

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



Διπλωματική Εργασία

**«Προσδιορισμός της ανθρώπινης έκθεσης και δόσης σε
αιωρούμενα σωματίδια σε χώρους του Πολυτεχνείου
Κρήτης»**

Κοτσίρα Ιωάννα

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Μιχάλης Λαζαρίδης (επιβλέπων)
Γλυτσός Θεόδωρος
Κολοκοτσά Διονυσία

Ευχαριστίες...

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Λαζαρίδη για ανάθεση αυτού του ενδιαφέροντος θέματος.

Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ θέλω να εκφράσω στον κύριο Γλυτσό ο οποίος στάθηκε δίπλα μου σε όλη την πορεία και με συνεχής καθοδήγηση κατάφερα να την φέρω εις πέρας την συγκεκριμένη εργασία.

Επιπλέον ευχαριστώ την κυρία Χαλβατζάκη την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε κατά την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας καθώς και τον κύριο Ξεκουκουλωτάκη και την κυρία Τυροβολά για την παραχώρηση του εργαστηρίου τους.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω την κα Κολοκοτσά που δέχτηκε να συμμετάσχει στην αξιολόγηση της εργασίας μου...

*Τέλος να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου με υπομονή μέχρι και το τέλος καθώς και τον εθελοντικό οργανισμό *BEST Chania* ο οποίος με δίδαξε πολλά πράγματα τα οποία με βοήθησαν να φέρω εις πέρας αυτό το έργο.*

Περίληψη

Τα αιωρούμενα σωματίδια (ΑΣ) είναι ένας σημαντικός ρύπος που συνδέεται με ποικίλες αρνητικές επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία, συμπεριλαμβανομένων αναπνευστικών προβλημάτων, καρδιαγγειακών επεισοδίων αλλά ακόμη και θνησιμότητας (Carugno et al., 2016; Minichilli et al., 2016; Phung et al., 2016; Shaughnessy et al., 2015; Vaduganathan et al., 2016). Η έκθεση του ανθρώπου σε ΑΣ εξαρτάται από πολλούς παράγοντες με έναν από τους πιο σημαντικούς να είναι το μέγεθος αυτών καθώς καθορίζει την συμπεριφορά και το σημείο εναπόθεσης τους στο αναπνευστικό σύστημα.

Τα τελευταία χρόνια πολλοί επιστήμονες εστίασαν το ενδιαφέρον τους σε εσωτερικούς εργασιακούς και εκπαιδευτικούς χώρους όπως τα γραφεία, τα σχολεία και τα πανεπιστήμια όπου εργαζόμενοι, μαθητές και φοιτητές περνούν ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα (Godoi et al., 2009; Lee and Chang, 2000; Blondeau et al., 2005). Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν τέτοιοι χώροι εντός του Πολυτεχνείου Κρήτης με σκοπό τον υπολογισμό της έκθεσης των φοιτητών και τον προσδιορισμό της αποτιθέμενης δόσης σε διάφορα σημεία της ανθρώπινης αναπνευστικής οδού. Επίσης, έγινε συσχέτιση μεταξύ των παρατηρούμενων συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων με τις πιθανές πηγές στα διάφορα μικροπεριβάλλοντα που μελετήθηκαν. Για να προσομοιωθούν όσο το δυνατόν καλύτερα οι πραγματικές συνθήκες έκθεσης ενός φοιτητή κατά την παραμονή του σε χώρους του Πολυτεχνείου Κρήτης, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις εντός μια αίθουσας, ενός εργαστηρίου, ενός γραφείου και του κυλικείου της Σχολής των Μηχανικών Περιβάλλοντος καθώς και στο εξωτερικό περιβάλλον κοντά στους χώρους αυτούς. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την χρήση πέντε οργάνων, τα δύο (Dust Trak) εξ αυτών για την μέτρηση αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2,5}$, ένα (P-Trak) εξ αυτών για την μέτρηση αιωρούμενων σωματιδίων PM_1 και τα άλλα δύο (OPS) για τον προσδιορισμό επιμέρους κλασμάτων σωματιδίων με μέγεθος μεταξύ 0,3 και 10 μm . Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το όργανο χωρίστηκαν σε υποκατηγορίες ώστε να μελετηθούν ξεχωριστά τα υπέρλεπτα, λεπτά και χονδρά σωματίδια. Στην συνέχεια με την χρήση του προγράμματος ExDoM2 υπολογίστηκε η δόση λεπτών και χονδρών σωματιδίων κατά την διάρκεια ενός υποθετικού σεναρίου δραστηριοτήτων ενός φοιτητή και μιας φοιτήτριας για 6 ώρες παραμονής σε χώρους του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε αιωρούμενα σωματίδια παρουσιάστηκαν στο χώρο του κυλικείου όπου η μέση ημερήσια τιμή των $PM_{2,5}$ (Dust Trak) ήταν από 50 έως $120 \frac{\mu g}{m^3}$ και των $PM_{2,5-10}$ (OPS) ήταν $16 \pm 7 \frac{\mu g}{m^3}$. Στον ίδιο χώρο παρουσιάστηκαν και οι υψηλότερες συγκεντρώσεις υπέρλεπτων σωματιδίων (PM_1) όπου η μέση τιμή αριθμού ήταν στα 2168 και $87038 \frac{\#}{cm^3}$ (P-Trak) και μάζας $10,6 \pm 8 \frac{\mu g}{m^3}$ (OPS). Στο χώρο της αίθουσας παρά τον μεγάλο αριθμό ατόμων που παρευρέθηκαν οι συγκεντρώσεις ήταν χαμηλότερες από αυτές του κυλικείου, αν και κατά την διάρκεια των διαλλειμάτων οι συγκεντρώσεις των μεγαλύτερων σωματιδίων αυξάνονταν λόγω της κίνησης των φοιτητών. Τα λεπτά και υπέρλεπτα σωματίδια στην αίθουσα προέρχονται κυρίως από το εξωτερικό περιβάλλον όπως και στους χώρους του γραφείου και του εργαστηρίου.

Ο χώρος του εργαστηρίου είναι σημαντικά μικρότερος από την αίθουσα παρόλα αυτά παρουσίασε μεγαλύτερες μέσες συγκεντρώσεις $PM_{2,5}$ για κάποιες ημέρες μετρήσεων. Έντονη διαφορά στις συγκεντρώσεις για τα λεπτά και χονδρά σωματίδια παρουσιάστηκαν κατά τις πρωινές ώρες που το εργαστήριο ήταν σε λειτουργία και τις βραδινές ώρες που το εργαστήριο ήταν κλειστό, ενώ στα υπέρλεπτα οι διαφορές ήταν πολύ μικρές. Στο χώρο του γραφείου παρότι δεν είχαμε εσωτερικές πηγές καθώς δεν υπήρχαν άτομα εντός και παρέμεινε κλειστό, δεν διαπιστώθηκε συσχέτιση των εσωτερικών συγκεντρώσεων με αυτές του

εξωτερικού περιβάλλοντος. Έντονη διαφορά παρουσιάστηκε στις συγκεντρώσεις μεταξύ των εργάσιμων ημερών και του Σαββατοκύριακου στα λεπτά και χονδρά σωματίδια.

Τέλος η εναποτιθέμενη δόση σε άντρα φοιτητή κυμάνθηκε μεταξύ 26 και 86 μg , ενώ σε γυναίκα φοιτήτρια κυμάνθηκε 18 έως και 62 μg . Και στους δύο φοιτητές η μεγαλύτερη εναπόθεση γίνεται στην εκτός θώρακα περιοχή ET_1 στην οποία εναποτίθενται τα μεγαλύτερης διαμέτρου σωματίδια. Υψηλή εναπόθεση χονδρών σωματιδίων και στους δύο φοιτητές είχαμε στην περιοχή των κυψελίδων εκτός από την περίπτωση του εξωτερικού περιβάλλοντος και του κυλικείου. Η μεγαλύτερη εναπόθεση σωματιδίων έγινε όταν οι φοιτητές βρισκόταν στην αίθουσα καθώς ήταν το περιβάλλον στο οποίο πέρασαν το μεγαλύτερο μέρος της μέρας του και λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων σε χονδρά σωματίδια στο πρώτο δίωρο μάθημα.

Abstract

Particulate matter (PM) is an important pollutant associated with a variety of adverse effects on human health including respiratory problems, cardiovascular events and even mortality (Carugno et al., 2016; Minichilli et al., 2016; Phung et al. 2016; Shaughnessy et al., 2015; Vaduganathan et al., 2016). Human exposure to PM depends on many factors. One of the most important is the size, which determines their behavior and their deposition in the respiratory system.

Many studies have focused on indoor air in places such as offices, schools and universities, where workers or students spend a long time (Godoi et al., 2009; Lee and Chang, 2000; Blondeau et al., 2005). This thesis is focused on such places within the Technical University of Crete in order to measure the exposure of students to PM and the determination of the deposited dose at various points of the human respiratory tract. Also, correlation was made between the observed concentrations of PM with the possible sources in the various microenvironments. In order to simulate the actual conditions of exposure of a student during his stay at the Technical University of Crete, experimental measurements were carried out within a classroom, a laboratory, an office and the canteen of the Department of Environmental Engineering and the outdoor environment. Measurements were made by using five instruments, the two (Dust Trak) of these for measuring $PM_{2.5}$, one (P-Trak) of these for measuring PM_1 and the other two (OPS) for determination individual particle fractions with a size between 0.3 and 10 μm . Then, using the ExDoM2 program, the dose for fine and coarse particles was calculated during a hypothetical scenario of activities of a male and a female student for 6 hours at the Technical University of Crete.

The highest concentrations of suspended particles were presented in the canteen where the average daily value of $PM_{2.5}$ (Dust Trak) was 50 to $120 \frac{\mu g}{m^3}$ and of $PM_{2.5-10}$ (OPS) was $16 \pm 7 \frac{\mu g}{m^3}$. In the classroom, despite the large number of people attending, daily concentrations were lower than those in the canteen. Although, during the breaks the concentrations of the larger particles were increased due to the movement of students. The fines and ultrafine particles sources in the classroom were mainly from outdoor as well as in the office and laboratory. The laboratory was significantly smaller than the classroom. However, daily average of $PM_{2.5}$ was higher some days. Big difference was occurred in concentrations of fine and coarse particles during the morning hours, when the laboratory was open and in the evening. At the same time the difference was very small in the ultrafine particles. In the office, although we did not have indoor sources as there were no people inside and most of the time the office was closed, there was no correlation of indoor and outdoor concentrations. Big difference was seen in the weekdays and the weekend concentrations of fine and coarse particles.

Finally the deposit dose at male student was between 26 to 86 μg , while at female student was 18 to 62 μg . In both students the largest deposition is in the non-chest area (ET1), in which the largest diameter particles are deposited. High deposition of coarse particles to both students was in the alveolar area except for case of the outdoor environment where the deposition of fine is greater. The largest amount of dose was found in the classroom, where the students spend most of the time and due to high concentrations of coarse particles.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	2
Ανασκόπηση εργασίας	2
Κεφάλαιο 1 : Αιωρούμενα Σωματίδια	
Εισαγωγή στα αιωρούμενα σωματίδια	4
1.1 Μέγεθος	4
1.2 Πηγές	7
1.3 Χημική Σύσταση	10
1.4 Επιπτώσεις στο περιβάλλον και την υγεία	12
Κεφάλαιο 2 : Αναπνευστικό σύστημα και η σχέση του με τα αιωρούμενα σωματίδια	
2.1 Αναπνευστικό σύστημα	14
2.2 Μηχανισμοί εναπόθεσης αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό	15
2.3 Μηχανισμοί απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων από το αναπνευστικό ...	15
Κεφάλαιο 3 : Πειραματική διαδικασία	
3.1 Υπό μελέτη κτήρια	17
3.2 Περιγραφή οργάνων μέτρησης	18
3.3 Περιγραφή υπολογιστικού Μοντέλου ExDoM2	25
Κεφάλαιο 4: Επεξεργασία και ανάλυση αποτελεσμάτων	
4.1 Εξωτερικό Περιβάλλον	29
4.2 Υπό μελέτη χώρος: Γραφείο	34
4.3 Υπό μελέτη χώρος: Εργαστήριο	42
4.4 Υπό μελέτη χώρος: Κυλικείο	52
4.5 Χώρος Μελέτης : Αίθουσα Διδασκαλίας K2.A1	63
Κεφάλαιο 5: Υπολογισμός δόσης (μοντέλο ExDoM2)	74
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις	82

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα1: Συγκριτική απεικόνιση του μεγέθους των PM με τη διάμετρο του κόκκου της άμμου και της τρίχας ανθρώπου (αναπροσαρμοσμένο από: http://www.epa.gov/airscience/air-particulate-matter-image.htm)	5
Εικόνα 2: Στατιστική κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων (Λαζαρίδης 2008)	6
Εικόνα 3: Αναπαράσταση των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την παραγωγή, ανάπτυξη και απομάκρυνση των σωματιδίων. (Introduction to Atmospheric Chemistry, by Daniel J. Jacob, Princeton University Press, 1999)	8
Εικόνα4: Διεργασίες που επηρεάζουν την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους. (Σπαής Γεώργιος, 2018)	9
Εικόνα 5: Σχηματική κατανομή μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων η οποία εμφανίζει ένα τυπικό καταμερισμός χημικών ειδών σε μικρά και μεγάλα σωματίδια.....	11
Εικόνα 6 : Ανατομία του αναπνευστικού συστήματος (ICRP, 1994)	15
Εικόνα7: Πρόσοψη του κτηρίου K2	17
Εικόνα 8: Κάτοψη ορόφου Γενικού Τμήματος (Σχέδιο Μηχανικού και επεξεργασμένο σχέδιο) (Νταουντάκη, 2010)	18
Εικόνα 9: Όργανα μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων που χρησιμοποιούν την μέθοδο της σκέδασης ακτινοβολίας	19
Εικόνα 10: Τα όργανα DustTrak II Handheld και DustTrak II που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.....	20
Εικόνα 11: Μορφολογία οργάνων Dust Trak	21
Εικόνα 12: Όργανο μέτρησης OPS 3330	22
Εικόνα 13: Όργανο P-Trak Ultrafine Particle Counter 8525 της TSI (διαστάσεις: 27 x 14 x 14cm)	23
Εικόνα 14: Αρχή λειτουργίας του P-Trak για τη μέτρηση του πλήθους των υπέρλεπτων σωματιδίων (αναπροσαρμοσμένο από TSI, 2004)	24
Εικόνα 15: Πλατφόρμα GUI(Παπαγιάννης 2015)	25
Εικόνα 16: Παρουσίαση αποτελεσμάτων του προγράμματος ExDoM2 (Παπαγιάννης, 2015)	28
Εικόνα 17: Σημείο μετρήσεων συγκέντρωση για το εξωτερικό περιβάλλον	30
Εικόνα 18: Σκαρίφημα του Γραφείου	34
Εικόνα 19: Κάτοψη του εργαστηριακού χώρου	44
Εικόνα 20: Κάτοψη Κυλικείου σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος	54
Εικόνα 21: Κυλικείο σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος	55
Εικόνα 22: Αίθουσα K2.A1	64
Εικόνα 23: Κάτοψη Αίθουσας K2.A1	65

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 1: Διάγραμμα Whisker για την συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ εντός του γραφείου	33
Σχήμα 2: Διάγραμμα μεταβολής της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ εντός του χώρου του γραφείου και του εξωτερικού περιβάλλοντος καθώς και ο λόγος (I/O)	33
Σχήμα 3: Διάγραμμα Whisker με την διακύμανση του αριθμού των σωματιδίων PM_1 εντός του γραφείου	38
Σχήμα 4: Διάγραμμα διακύμανσης αριθμού των σωματιδίων PM_1 εντός του γραφείου.....	39
Σχήμα 5: Διάγραμμα Whisker με την διακύμανση της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ για το χώρο του εργαστηρίου.	46
Σχήμα 6: Διάγραμμα Whisker με την διακύμανση του αριθμού των σωματιδίων PM_1 για το χώρο του εργαστηρίου	46
Σχήμα 7: Διάγραμμα μεταβολής της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ εντός του χώρου του εργαστηρίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος καθώς και ο λόγος (I/O).....	47
Σχήμα 8: Διάγραμμα μεταβολής της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ εντός του χώρου του εργαστηρίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος καθώς και ο λόγος (I/O) για το Σάββατο 4/11/2017.	48
Σχήμα 9: Διάγραμμα διακύμανσης αριθμού των σωματιδίων PM_1 εντός του εργαστηρίου	49
Σχήμα 10: Διάγραμμα συσχέτισης αριθμού ατόμων με την συγκέντρωση αριθμού των PM_1 σωματιδίων εντός του εργαστηρίου.....	50
Σχήμα 11: Διάγραμμα Whisker για την συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ εντός του κυλικείου.....	56
Σχήμα 12: Διάγραμμα Whisker με την διακύμανση του αριθμού των σωματιδίων PM_1 εντός του κυλικείου.....	56
Σχήμα 13: Διάγραμμα μεταβολής της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ εντός του χώρου του κυλικείου και του εξωτερικού περιβάλλοντος καθώς και ο λόγος (I/O).....	57
Σχήμα 14: Διάγραμμα διακύμανσης αριθμού των σωματιδίων PM_1 εντός του κυλικείου.....	58
Σχήμα 15: Διάγραμμα συσχέτισης καπνίσματος με τον αριθμό των μικρών σωματιδίων PM_1	60
Σχήμα 16: Διάγραμμα συσχέτισης καπνίσματος με την συγκέντρωση μάζας $PM_{2.5}$	60
Σχήμα 17: Διάγραμμα Whisker για την συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ εντός της αίθουσας (Όργανο μέτρησης Dustrak II)	66
Σχήμα 18: Συσχέτιση μεταξύ συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ κατά την διάρκεια των ακαδημαϊκών διαλειμμάτων και του αριθμού ατόμων εντός της αίθουσας	68
Σχήμα 19: Διάγραμμα μεταβολής της συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων $PM_{2.5}$ για το συνολικό διάστημα των μετρήσεων και του αριθμού των σωματιδίων PM_1 στο χώρο της αίθουσας	69

Σχήμα 20: Συγκέντρωση μάζας αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{0,3-1}$ κατά την διάρκεια του μαθήματος, όταν η αίθουσα είναι κενή και κατά την διάρκεια του διαλλείματος	71
Σχήμα 21: Συγκέντρωση μάζας αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{1-2,5}$ κατά την διάρκεια του μαθήματος ,όταν η αίθουσα είναι κενή και κατά την διάρκεια του διαλλείματος.....	72
Σχήμα 22: Συγκέντρωση μάζας αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2,5-10}$ κατά την διάρκεια του μαθήματος ,όταν η αίθουσα είναι κενή και κατά την διάρκεια του διαλλείματος.....	72
Σχήμα 23: Διάγραμμα συσχέτισης αριθμού ατόμων με την συγκέντρωση μάζας για τα υπέρλεπτα, λεπτά και χονδρά σωματίδια	73
Σχήμα 24:Διάγραμμα συσχέτισης αριθμού σωματιδίων PM_1 με τον αριθμό των ατόμων εντός της αίθουσας	73
Σχήμα 25: Αθροιστική δόση λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό για έναν ενήλικα άνδρα	75
Σχήμα 26: Αθροιστική δόση χονδρών αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό για έναν ενήλικα άνδρα.	75
Σχήμα 27: Αθροιστική δόση λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό για μια ενήλικη γυναίκα.....	77
Σχήμα 28: Αθροιστική δόση χονδρών αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό για μια ενήλικη γυναίκα	77
Σχήμα 29: Ρυθμός δόσης λεπτών και χονδρών σωματιδίων στην εκτός θώρακα περιοχή ET1 ενός ενήλικα άνδρα.....	78
Σχήμα 30: Ρυθμός δόσης λεπτών και χονδρών σωματιδίων στην εκτός θώρακα περιοχή ET1 μιας ενήλικης γυναίκας.....	78
Σχήμα 31: Ρυθμός δόσης λεπτών και χονδρών σωματιδίων στην κυψελιδική περιοχή AI ενός ενήλικα άνδρα.....	79
Σχήμα 32: Ρυθμός δόσης λεπτών και χονδρών σωματιδίων στην κυψελιδική περιοχή AI μιας ενήλικης γυναίκας.....	79
Σχήμα 33: Ποσοστιαία κατανομή της συμβολής των περιβαλλόντων στην αθροιστική δόσης για έναν ενήλικα άνδρα.....	80
Σχήμα 34: Ποσοστιαία κατανομή της συμβολής των περιβαλλόντων στην αθροιστική δόσης για μια ενήλικη γυναίκα.....	87
Σχήμα 35: Διάγραμμα συσχέτισης του ρυθμού δόσης με την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} για ένα ενήλικα άνδρα.....	87
Σχήμα 36: Διάγραμμα συσχέτισης του ρυθμού δόσης με την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} για μία ενήλικη γυναίκα.....	88

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Κατηγορίες των αιωρούμενων σωματιδίων ανάλογα με τη διάμετρο	5
Πίνακας 2: Στατιστικά στοιχεία για τα σωματίδια $PM_{2,5}$ του εξωτερικού χώρου τον μήνα Οκτώβρη.....	23
Πίνακας 3 : Στατιστικά στοιχεία για τα σωματίδια $PM_{2,5}$ του εξωτερικού χώρου τον μήνα Νοέμβρη.....	23
Πίνακας 4: Στατιστικά στοιχεία για τα σωματίδια $PM_{0,3-1}$ του εξωτερικού χώρου	24
Πίνακας 5: Στατιστικά στοιχεία για τα σωματίδια $PM_{1-2,5}$ του εξωτερικού χώρου	24
Πίνακας 6: Στατιστικά στοιχεία για τα σωματίδια $PM_{2,5-10}$ του εξωτερικού χώρου	25
Πίνακας 7: Μετεωρολογικά δεδομένα για τις 27 έως και 31 Οκτωβρίου	26
Πίνακας 8: Μετεωρολογικά δεδομένα για τις 1 έως και 8 Νοεμβρίου	26
Πίνακας 9: Στατιστικά στοιχεία της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων $PM_{0,3-1}$, $PM_{1-2,5}$ και $PM_{2,5-10}$ για πρωινές και βραδινές ώρες	26
Πίνακας 10: Στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκεντρώσεων μάζας (σωματίδια $PM_{2,5}$) και αριθμού (Σωματίδια PM_1) για το χώρο το γραφείου	28
Πίνακας 11: Στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων μάζας $PM_{0,3-1}$ και $PM_{1-2,5}$ για το χώρο το γραφείου	33
Πίνακας 12: Στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων μάζας $PM_{2,5-10}$ για το χώρο το γραφείου	33
Πίνακας 13: Στατιστικά στοιχεία σύγκρισης γραφείου και εξωτερικού περιβάλλοντος για τα σωματίδια $PM_{0,3-1}$, $PM_{1-2,5}$	34
Πίνακας 14: Στατιστικά στοιχεία σύγκρισης γραφείου και εξωτερικού περιβάλλοντος για τα σωματίδια $PM_{2,5-10}$	35
Πίνακας 15: Στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκεντρώσεων μάζας (σωματίδια $PM_{2,5}$) και αριθμού (Σωματίδια PM_1) για το χώρο το εργαστηρίου	38
Πίνακας 16 : Στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων μάζας για τα σωματίδια $PM_{0,1-1}$, $PM_{1-2,5}$, και $PM_{2,5-10}$ εντός του εργαστηρίου	44
Πίνακας 17: Μέση τιμή συγκέντρωσης μάζας για τα σωματίδια $PM_{0,1-1}$, $PM_{1-2,5}$, και $PM_{2,5-10}$ για πρωινές και βραδινές ώρες στο εργαστήριο	44
Πίνακας 18: Στατιστικά στοιχεία σύγκρισης εργαστηρίου και εξωτερικού περιβάλλοντος για τα σωματίδια $PM_{0,3-1}$, $PM_{1-2,5}$	48
Πίνακας 19: Στατιστικά στοιχεία σύγκρισης εργαστηρίου και εξωτερικού περιβάλλοντος για τα σωματίδια $PM_{2,5-10}$	48
Πίνακας 20: Στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκεντρώσεων μάζας (σωματίδια $PM_{2,5}$) και αριθμού (Σωματίδια PM_1) για το χώρο του κυλικείου	48
Πίνακας 21: Στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων μάζας $PM_{0,3-1}$, $PM_{1-2,5}$ και $PM_{2,5-10}$ για το χώρο το κυλικείου.....	54
Πίνακας 22: Στατιστικά στοιχεία για την συγκέντρωση μάζας την ώρα του διαλείμματος και λίγο πριν από αυτό στο χώρο του κυλικείου	55
Πίνακας 23: Στατιστικά στοιχεία συγκέντρωσης μάζας για την περίπτωση του καπνίσματος στο χώρο του κυλικείου	55
Πίνακας 24: Στατιστικά στοιχεία σύγκρισης κυλικείου και εξωτερικού περιβάλλοντος.....	56
Πίνακας 25: Στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκεντρώσεων μάζας (σωματίδια $PM_{2,5}$) και αριθμού (Σωματίδια PM_1) για το χώρο της αίθουσας	56
Πίνακας 26: Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκέντρωσης μάζας για αιωρούμενα σωματίδια $PM_{0,3-1}$, $PM_{1-2,5}$ και $PM_{2,5-10}$ για το χώρο της αίθουσας	63
Πίνακας 27: Σενάριο δραστηριοτήτων εκτιθέμενου ατόμου	75

Εισαγωγή

Μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον έχει αναπτυχθεί γύρω από την μελέτη της σωματιδιακής ρύπανσης στην ατμόσφαιρα και πιο συγκεκριμένα στην επίδραση που φαίνεται να έχει στον άνθρωπο (Pope και Dockery, 2006; Anderson κ.ά., 2012; Ruzer και Hurley, 2012). Η σωματιδιακή ύλη αποτελείται από αιωρούμενα στερεά ή υγρά σωματίδια που προέρχονται από ανθρώπινες ή φυσικές πηγές και στην συνέχεια αιωρούνται λόγω ανέμου ή δημιουργούνται στον αέρα μέσω φυσικών φαινομένων (συμπύκνωση, πυρηνοποίηση, χημική μετατροπή) (Λαζαρίδης 2008). Μελετώντας τα αιωρούμενα σωματίδια (ΑΣ) μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι πάνω τους απορροφώνται ή προσκολλώνται διάφορα χημικά στοιχεία, ενώσεις και βιολογικοί ρυπαντές τα οποία με αυτόν τον τρόπο μετακινούνται σε τοπική ή και παγκόσμια κλίμακα.

Η παρουσία του ανθρώπου σε περιβάλλοντα υψηλής συγκέντρωσης σωματιδίων για ορισμένο χρονικό διάστημα ονομάζεται έκθεση και συμβαίνει σε κλειστούς χώρους (όπως σπίτια, χώρους εργασίας, λεωφορεία, χώρους αναψυχής) ή στο εξωτερικό περιβάλλον. Η έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις είναι επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία διότι τα σωματίδια λόγω του μικρού τους μεγέθους κυρίως, διεισδύουν στο εσωτερικό του οργανισμού και εναποτίθενται σε διάφορες περιοχές του αναπνευστικού συστήματος προκαλώντας δυσλειτουργίες και πλήθος παθήσεων. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO 2002), το έτος 2002 οι θάνατοι που οφείλονται στην αέρια ρύπανση έφτασαν τις 800.000.

Μεγάλες συγκεντρώσεις ΑΣ παρατηρούνται σε αστικές κυρίως περιοχές εξαιτίας των πολλών ανθρωπογενών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα γεγονός που προκαλεί μεγάλο προβληματισμό για τις επιπτώσεις που μπορεί να έχουν στον άνθρωπο και γενικότερα στο περιβάλλον. Η καθημερινή χρήση αυτοκινήτων, η λειτουργία των εργοστασίων και οι κατασκευές κτηρίων και δρόμων συνεισφέρουν σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση της συγκεντρώσεις των ΑΣ στις πόλεις επιβαρύνοντας τον εξωτερικό αέρα και κατά συνέπεια την ανθρώπινη υγεία. Παρόλα αυτά τα τελευταία χρόνια οι επιστήμονες έχουν εστιάσει στην ρύπανση που υπάρχει και εντός των εσωτερικών χώρων και την επίδραση της στον άνθρωπο αλλά και στην εργασιακή και μαθησιακή απόδοση (Daisey et al. 2003, Androniki Maragkidoua, Omar Jaghbeirb, Kaarle Hämeria, Tareq Hussein et. Al. 2018). Σε χώρους όπως οι κατοικίες ή χώροι εργασίας έχουν παρατηρηθεί υψηλές συγκεντρώσεις λόγω κλιματιστικών, έλλειψης αερισμού ή καθημερινών ανθρώπινων δραστηριοτήτων όπως το κάπνισμα το μαγείρεμα και το σκούπισμα. Επίσης τα υλικά των κτηρίων τα έπιπλα και οι ηλεκτρικές συσκευές επηρεάζουν σημαντικά τον εσωτερικό αέρα (Kjeldsen, Birthe Uldahl; Toftum, Jørn; Wargocki, Pawel; Menå, Henriette R, Hansen, Eva M. N.; Clausen Geo, et. al 2018).

Οι αρνητικές επιπτώσεις των ΑΣ στον άνθρωπο δεν εξαρτώνται μόνο από την συγκέντρωση τους στο εκάστοτε περιβάλλον αλλά και από άλλους παράγοντες όπως η εφαρμοσμένη δόση και οι ιδιότητες των ΑΣ όπως το μέγεθος και η χημική τους σύσταση. Όταν ο άνθρωπος εκτίθεται σε ένα ρυπασμένο περιβάλλον, μια ποσότητα σωματιδίων (συνήθως εκφρασμένη σε συγκέντρωση μάζας ή αριθμού) εισέρχεται μέσω της μύτης ή του στόματος στον οργανισμό και κατευθύνεται στην αναπνευστική

οδό όπου και εναποτίθεται. Η κίνηση των σωματιδίων και η περιοχή που θα εναποτεθούν εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων, την ανατομία και τη φυσιολογία του ατόμου. Επίσης το μέγεθος των ΑΣ κατέχει σημαντικό ρόλο στο πόσο βαθιά θα φτάσουν τα σωματίδια εντός του ανθρώπινου οργανισμού με το βαθύτερο σημείο να βρίσκεται στην κυψελιδική περιοχή όπου συσσωρεύονται σωματίδια μικρότερα από 2,5 μm τα οποία απομακρύνονται δύσκολα και προκαλούν πνευμονοπάθειες και αναπνευστικά προβλήματα. Αν και ο ίδιος ο ανθρώπινος οργανισμός διαθέτει αυτόνομους μηχανισμούς καθαρισμού όπως είναι το φτέρνισμα και μπορεί και απομακρύνει ένα ποσοστό των σωματιδίων δεν καταφέρνει να καθαριστεί τελείως.

Ανασκόπηση Εργασίας:

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της ανθρώπινης έκθεσης και δόσης σε αιωρούμενα σωματίδια σε χώρους της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης (κυλικείο, αίθουσα, εργαστήριο και γραφείο) που απασχολούν φοιτητές συγκριτικά με τις συγκεντρώσεις ΑΣ που παρουσιάζονται στο εξωτερικό περιβάλλον. Στο Κεφάλαιο 1 αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο για τα αιωρούμενα σωματίδια εξετάζοντας τις πηγές, την χημική τους σύσταση καθώς και τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα και στους μηχανισμούς εναπόθεσης και απομάκρυνσης ΑΣ και στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι χώροι καθώς και τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας και το υπολογιστικό πρόγραμμα με το οποίο υπολογίστηκε η εφαρμοσμένη δόση ενός φοιτητή και μίας φοιτήτριας. Στο κεφάλαιο 4 γίνεται παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν για υπέρλεπτα, λεπτά και χονδρά σωματίδια και στην συνέχεια πραγματοποιείται υπολογισμός της δόσης και της απομάκρυνσης σωματιδίων με χρήση του μοντέλου ExDoM2 στο κεφάλαιο 5. Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και προτάσεις μελλοντικής έρευνας στο κεφάλαιο 6.

Κεφάλαιο 1^ο Αιωρούμενα σωματίδια

Εισαγωγή

Αρκετά σύνηθες είναι η ταύτιση του όρου των αιωρούμενων σωματιδίων με την έννοια του αεροζόλ όμως ο ορισμός του αεροζόλ αναφέρεται στο συνδυασμό όλων των συμπυκνωμένων συστατικών που είναι παρόντα στην ατμόσφαιρα, όπως επίσης και στον αέρα στον οποίο περιέχονται τα αιωρούμενα σωματίδια (Λαζαρίδης, 2008). Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι είτε στερεά είτε υγρά που βρίσκονται στον αέρα και έχουν διαμέτρους που κυμαίνονται από 2 nm μέχρι 200 μm (Λαζαρίδης, 2008). Οι πηγές τους ποικίλουν καθώς μπορεί να είναι φυσικές όπως η θάλασσα το έδαφος και η βλάστηση, ή μπορεί να προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες μέσα σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή λόγω καύσεων. Επίσης σχηματίζονται και στην ατμόσφαιρα μέσω μηχανισμών πυρηνοποίησης, συμπύκνωσης και εξάτμισης ή λόγω χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα.

Ο βασικός τρόπος έκφρασης που χρησιμοποιούν οι επιστήμονες είναι η συγκέντρωση μάζας με μονάδες μέτρησης $\frac{g}{m^3}$, $\frac{mg}{m^3}$, ή $\frac{\mu g}{m^3}$, αν και τα τελευταία χρόνια αυξάνεται η χρήση της συγκέντρωσης αριθμού σωματιδίων με μονάδες $\frac{\text{αριθμός}}{m^3}$ ή $\frac{\text{αριθμός}}{cm^3}$.

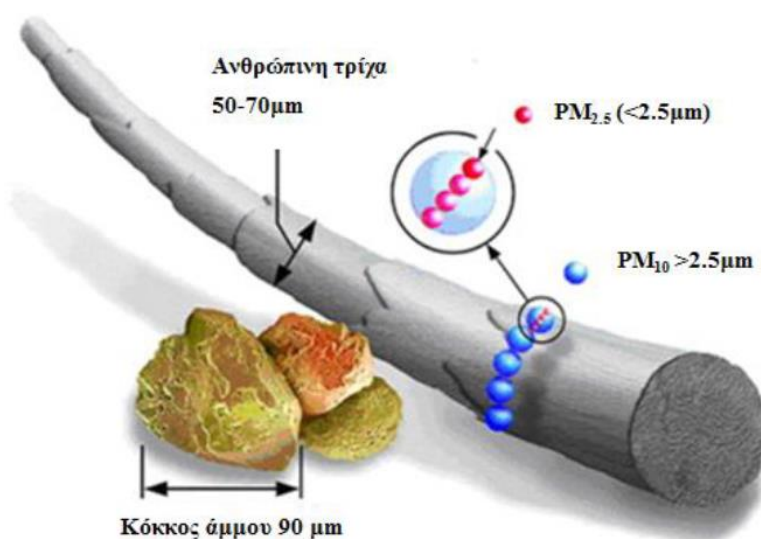
Τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων εμφανίζουν μεγάλη ποικιλομορφία και ως προς το μέγεθος και το σχήμα όσο και την χημική τους σύσταση και την πυκνότητα τους αφού περιέχουν οργανικό και στοιχειακό άνθρακα, ανόργανα ιόντα και ιχνοστοιχεία. Λόγω αυτής της διαφορετικότητας, ποικιλομορφία παρατηρείται και στην ίδια τους την συμπεριφορά στην ατμόσφαιρα και στην εναπόθεση τους στον ανθρώπινο οργανισμό.

1.1 Μέγεθος σωματιδίων

Οι επιστήμονες για την περιγραφή του μεγέθους και την εκτίμηση της συμπεριφοράς ως προς την κίνηση και την μεταφορά τους μέσα σε ένα αέριο μέσο, χρησιμοποιούν την έννοια της αεροδυναμικής διαμέτρου η οποία ορίζεται ως η ισοδύναμη διάμετρος ενός μη σφαιρικού σωματιδίου με πυκνότητα 1 g/cm³ που έχει την ίδια ταχύτητα καθίζησης με ένα σφαιρικό σωματίδιο. Βάση της αεροδυναμικής διαμέτρου τα σωματίδια χωρίζονται στις κατηγορίες που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Χαρακτηρισμός Σωματιδίων			Εύρος Αεροδυναμικής διαμέτρου (μm)
Χονδρόκοκα (Coarse)		PM ₁₀	2,5 ≤ & ≥ 10
Λεπτόκοκκα (Fine)	Συσσώρευσης (Accumulation)	PM _{2,5}	≤ 2.5
		PM ₁	≤ 1
	Πυρηνοποίησης (Nucleation)	Ultra Fine	≥ 0.001

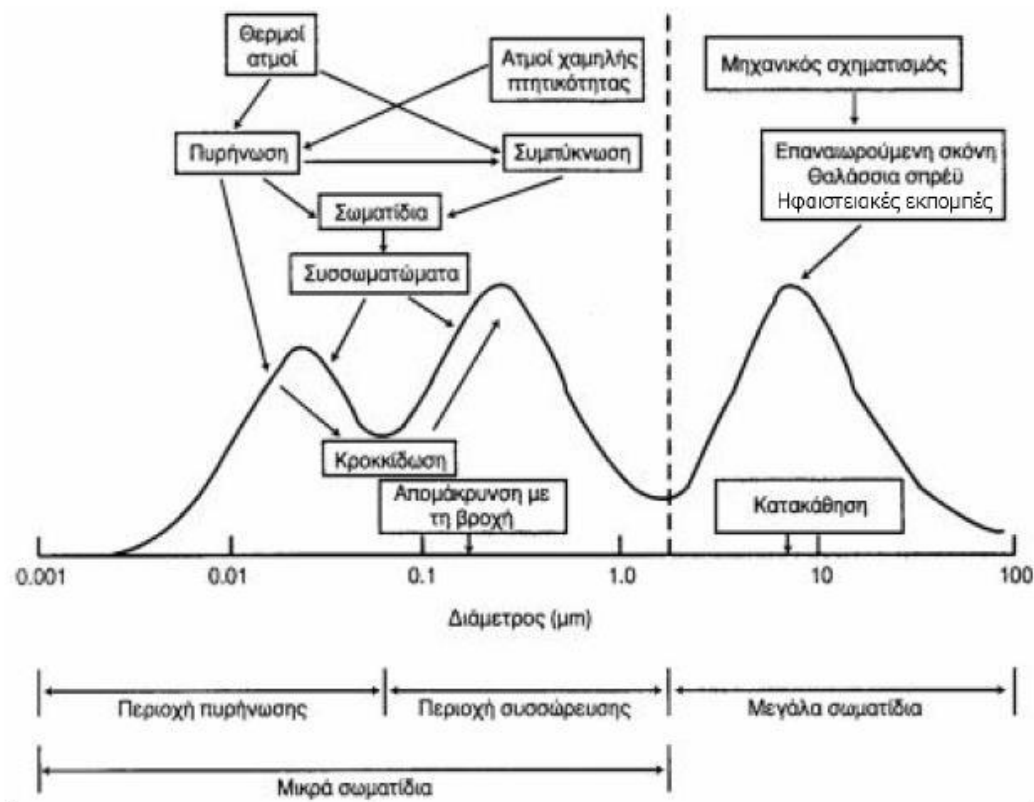
Οι δύο βασικές κατηγορίες που είναι ευρέως γνωστές είναι τα λεπτά σωματίδια (fine) με διαμέτρους κάτω από 2,5 μm και τα χονδρά (coarse) με διαμέτρους από 2,5 μm έως και 10 μm. Η συμπεριφορά αυτών των ειδών σωματιδίων εμφανίζει μεγάλες διαφορές καθώς προέρχονται από διαφορετικές πηγές και επηρεάζουν διαφορετικά το αναπνευστικό σύστημα. Παρατηρώντας την εικόνα 1 γίνεται αντιληπτή η διαφορά μεγέθους των αιρούμενων σωματιδίων σε σύγκριση με μια ανθρώπινη τρίχα και έναν κόκκο άμμου.



Εικόνα 1: Συγκριτική απεικόνιση του μεγέθους των PM με τη διάμετρο του κόκκου της άμμου και της τρίχας ανθρώπου (αναπροσαρμοσμένο από: <http://www.epa.gov/airscience/air-particulate-matter-image.htm>).

Τα χονδρά σωματίδια προέρχονται κυρίως από φυσικές πηγές έχουν υψηλές ταχύτητες καθίζησης και την δυνατότητα να ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις όταν οι ταχύτητες των ανέμων είναι υψηλές. (Sein-field & Pandis, 1998). Η προέλευση των λεπτών σωματιδίων σχετίζεται κυρίως με ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Alvarez κ.ά., 2004) και αποτελούν τον μεγαλύτερο κίνδυνο για την υγεία διότι έχουν τη δυνατότητα να εισβάλλουν στα βαθύτερα σημεία της αναπνευστικής οδού έως τις κυψελίδες και να προκαλέσουν βλάβες και δυσλειτουργίες στο αναπνευστικό σύστημα (Peters et al., 2011; Hoek et al., 2010; von Klot et al., 2005). Τα λεπτά

σωματίδια χωρίζονται και σε περαιτέρω κατηγορίες βάση της αεροδυναμικής διαμέτρου οι οποίες είναι τα υπέρλεπτα σωματίδια τα οποία είναι τα σωματίδια πυρήνα, τα Aitken και τα σωματίδια της ζώνης συσσώρευσης όπως παρουσιάζεται και στην παρακάτω εικόνα 2.



Εικόνα 2: Στατιστική κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων (Λαζαρίδης 2008)

Αρχικά τα σωματίδια με την μικρότερη διάμετρο είναι αυτά που παρουσιάζονται στην ζώνη Πυρηνοποίησης με διαμέτρους 1nm-10nm. Δημιουργούνται μέσω συμπύκνωσης ατμών κατά την διάρκεια καύσεων ή μέσω πυρηνοποίησης και απομακρύνονται με συσσωμάτωση τους σε μεγαλύτερα σωματίδια. Έχουν μικρή διάρκεια ζωής και ακολουθούν την κίνηση Brown κατά την οποία βρίσκονται σε διαρκή κίνηση λόγω συγκρούσεων με τα μόρια του αέρα ή διαχέονται στο χώρο. Τα σωματίδια Aitken έχουν διάμετρο 10nm -100nm και προέρχονται και αυτά από την πυρηνοποίηση αερίων ή από σωματίδια πυρήνων σαν αποτέλεσμα της αύξησης μεγέθους τους. Τέλος στην ζώνη συσσώρευσης είναι τα σωματίδια διαμέτρου μεταξύ 0.1 μm έως 1-3 μm. Δημιουργούνται κατά τη συσσωμάτωση μικρότερων σωματιδίων (υποκατηγορίας πυρήνα) ή τη συμπύκνωση αερίων συστατικών. Παρουσιάζουν χρόνο ζωής στην ατμόσφαιρα από 7 έως 30 ημέρες καθώς οι μηχανισμοί απομάκρυνσής τους είναι πολύ αργοί, και γίνεται είτε με ξηρή εναπόθεση σε φυτά και στο έδαφος λόγω βαρύτητας είτε με υγρή εναπόθεση μέσω βροχής. Τα σωματίδια συσσώρευσης ομαδοποιούνται περαιτέρω σε:

- Σταγονίδια (droplet mode), τα οποία δημιουργούνται από τη συσσωμάτωση σταγονιδίων μέσα σε νέφη ή ομίχλη και σε συνθήκες πολύ υψηλής υγρασίας.

- Συμπυκνώματα (condensation mode), τα οποία είναι μικρότερα σε μέγεθος από τα προηγούμενα και δημιουργούνται από τη συσσωμάτωση μη υγροσκοπικών σωματιδίων πυρήνα.

1.2 Πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων

Βάση του τρόπου σχηματισμού τα ΑΣ χωρίζονται σε πρωτογενή και δευτερογενή σωματίδια. Τα πρωτογενή σωματίδια είναι αυτά που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα κατευθείαν από κάποια πηγή είτε αυτή είναι φυσική είτε λόγω ανθρωπογενούς δραστηριότητας. Τα δευτερογενή σωματίδια είναι τα σωματίδια εκείνα που παράγονται έμμεσα στην ατμόσφαιρα ανάλογα με τις φυσικοχημικές συνθήκες που επικρατούν, όπως η παρουσία υδρατμών και η ηλιακή ακτινοβολία. Τα δευτερογενή σωματίδια δημιουργούνται μέσω χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα. Στις χημικές αυτές αντιδράσεις παίρνουν μέρος αέρια (π.χ. ατμοσφαιρικό οξυγόνο, υδρατμοί), αντιδρώντα μόρια (π.χ. όζον, ελεύθερες ρίζες) και ρύποι (π.χ. SO₂, NO₂, οργανικά αέρια VOCs). Πιο αναλυτικά οι φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές των πρωτογενή και των δευτερογενή σωματιδίων συνοψίζονται παρακάτω :

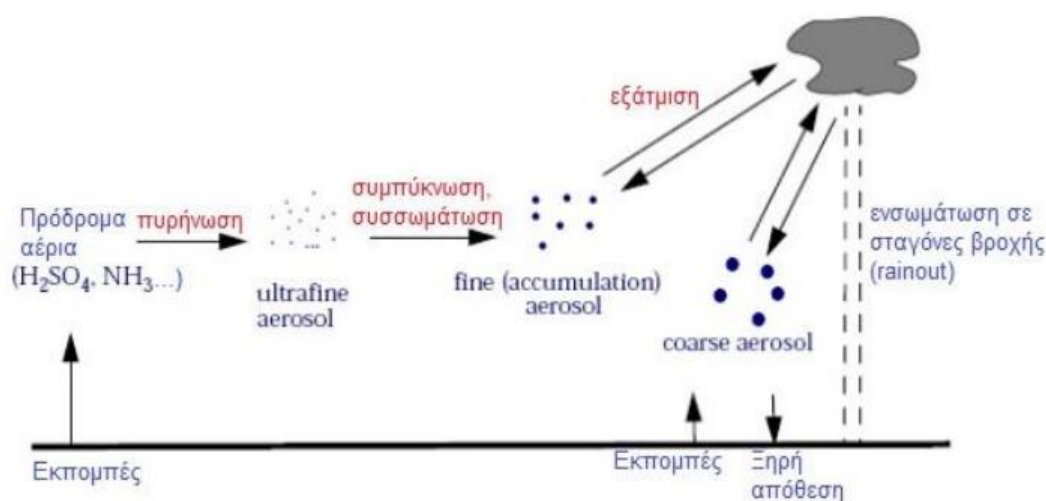
Οι φυσικές πηγές περιλαμβάνουν:

- Υλικά του φλοιού της Γης
- Του ωκεανούς όπου με την βοήθεια του ανέμου μεταφέρονται σταγονίδια νερού με άλατα.
- Τις ηφαιστειακές εκρήξεις, που εκλύουν σωματίδια. Οι εκλύσεις σωματιδίων μιας έκρηξης μπορούν να δημιουργήσουν διαταραχή στο περιβάλλον σε μεγάλη απόσταση από την ηφαιστειακή πηγή και η σωματιδιακή ύλη που σχηματίζεται παραμένει στην ατμόσφαιρα για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα.
- Την χλωρίδα όπου υπάρχει εκπομπή βιογενούς ύλης καθώς και εκπομπή σωματιδίων από την ατελή ή τέλεια καύση της.
- Τη σκόνη από τις ερήμους με εντονότερο παράδειγμα την έρημο Σαχάρα όπου μέσω του αέρα μεταφέρετε σκόνη σε πολύ μεγάλες αποστάσεις.
- Αιθάλη από φυσικές πυρκαγιές

Οι ανθρωπογενείς πηγές περιλαμβάνουν :

- Την βιομηχανική σκόνη η οποία προέρχεται από πολλές ανθρώπινες διεργασίες όπως η ατελή καύση ορυκτών καυσίμων και περιλαμβάνει σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη των 2,5 μm.
- Της εκπομπές από τα αυτοκίνητα .
- Την επαναιώρηση της σκόνης του εδάφους, που προκαλείται από τη κίνηση των οχημάτων, τις αγροτικές δραστηριότητες, τις κατασκευές κλπ.. Αυτή η κατηγορία εκπομπών περιλαμβάνει κυρίως σωματίδια μεγάλου μεγέθους, τα οποία καθιζάνουν σε μικρή απόσταση από την πηγή.
- Την κατασκευή κτηρίων, δρόμων ή άλλων ανθρωπογενών παροχών .
- Διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες όπως η καύση γαιάνθρακα και πετρελαίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Πέραν από τις πηγές που παράγουν πρωτογενή και δευτερογενή σωματίδια , πραγματοποιείται και σχηματισμός ή μετατροπή σωματιδίων στην ατμόσφαιρα μέσω φυσικών διεργασιών. Τα υπέρ-λεπτόκοκκα (ultrafine) σωματίδια, σχηματίζονται μέσω της πυρηνοποίησης (nucleation), που υφίστανται οι πρόδρομες ενώσεις τους. Η πυρηνοποίηση είναι αποτέλεσμα της συγκέντρωσης των ενώσεων αυτών στην ατμόσφαιρα προκειμένου να δημιουργηθεί ένας πυρήνας. Έπειτα ακολουθεί μια σειρά διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα προκειμένου να σχηματισθούν τα μεγαλύτερα σωματίδια. Οι διεργασίες είναι η συμπύκνωση (condensation) αερίων, η συσσωμάτωση (coagulation) λεπτόκοκκων σωματιδίων και η συσσώρευση (accumulation) πολλών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, είτε πρωτογενών είτε δευτερογενών όπως αναπαριστώνται σχηματικά στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Αναπαράσταση των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την παραγωγή, ανάπτυξη και απομάκρυνση των σωματιδίων. (Introduction to Atmospheric Chemistry, by Daniel J. Jacob, Princeton University Press, 1999).

Ως πυρηνοποίηση ορίζεται η μεταβολή φάσεως όπως για παράδειγμα η μεταβολή από την αέρα στην υγρή φάση η οποία γίνεται μέσω της δημιουργίας μικρών σωσσωματώσεων, μορίων σε μορφή πυρήνων όπως φαίνεται και στην εικόνα 3. Στην ατμόσφαιρα βέβαια υπάρχουν ήδη σωματίδια και συνήθως η πυρηνοποίηση λαμβάνει χώρα πάνω στις επιφάνειες αυτών των σωματιδίων. Η περίπτωση πυρηνοποίησης χωρίς προϋπάρχοντα σωματίδια ονομάζεται ομογενής πυρηνοποίηση (homogeneous nucleation) ενώ όταν υπάρχουν σωματίδια τότε ονομάζεται ετερογενής (heterogeneous nucleation). Όταν στην πυρηνοποίηση λαμβάνει μέρος μόνο μια χημική ένωση, η διεργασία ονομάζεται ομομοριακή (homomolecular), ενώ όταν συμμετέχουν περισσότερες της μίας ονομάζεται ετερομοριακή (heteromolecular). Στην συνέχεια η διαδικασία της συσσώρευσης συμβάλει στην αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων που προέρχονται κυρίως από την διαδικασία πυρηνοποίησης. Τα σωματίδια πυρηνοποίησης ή Aitken αφού περάσουν τα στάδια της συσσωμάτωσης ή συμπύκνωσης σχηματίζουν τα λεπτόκοκκα σωματίδια.

Κατά την συμπύκνωση οι ενώσεις μεταβάλλονται από την αέρια στην υγρή φάση όπως για παράδειγμα η μετατροπή υδρατμών σε νερό. Θεωρείται μία από τις σημαντικότερες διεργασίες στις οποίες βασίζεται ο μηχανισμός σχηματισμού των

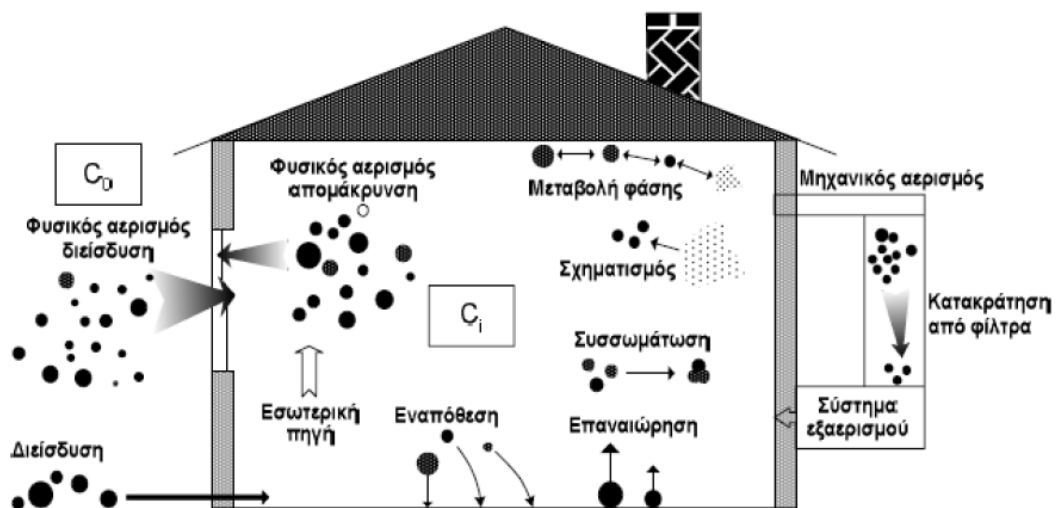
λεπτόκοκκων σωματιδίων. Βέβαια μπορεί να συμβαίνει και το αντίστροφο, η εξάτμιση όπου από την υγρή φάση μεταβάλλονται στην αέρια με αποτέλεσμα μόρια τα οποία βρίσκονται στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού να αποκολλώνται λόγω της υψηλής κινητικής τους ενέργειας. Στη περίπτωση της συμπύκνωσης έχουμε μείωση των ολικών σωματιδίων στον αέρα και αύξηση του όγκου και μάζας του σωματιδίου ενώ στην εξάτμιση έχουμε απώλεια μάζας και τα σωματίδια γίνονται μικρότερα λόγω μεταφοράς μορίων στην αέρια φάση.

Τέλος η συσσωμάτωση αφορά τον σχηματισμό μεγαλύτερων σωματιδίων μέσω της σύγκρουσης μικρότερων λόγω τις σχετικής κίνησης. Στην περίπτωση που η σχετική κίνηση προέρχεται από την κίνηση Brown κυρίως για τα πολύ μικρά σωματίδια τα οποία κινούνται άτακτα στο χώρο με επακόλουθο την σύγκρουσή τους, η διεργασία ονομάζεται θερμική συσσωμάτωση (thermal coagulation) ενώ όταν η σχετική κίνηση προέρχεται από εξωτερικής δυνάμεις όπως η βαρύτητα ονομάζεται κινηματική συσσωμάτωση.

Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους

Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων υπάρχουν και εντός των κατοικιών αλλά και των χώρων εργασίας όπως είναι τα γραφεία, οι αίθουσες συνεδριάσεων ,οι εργαστηριακοί χώροι πανεπιστημίων κλπ. Τα έπιπλα, τα χαλιά και οι μοκέτες, τα φωτοτυπικά μηχανήματα και τυχόν συστήματα καύσης που βρίσκονται στον χώρο όπως οι σόμπες, αποτελούν κάποιες από τις πηγές εκπομπής σωματιδίων. Επίσης ο ίδιος ο άνθρωπος συνεισφέρει στην παραγωγή και την μεταφορά σωματιδίων με τις δραστηριότητες του όπως είναι το κάπνισμα, το μαγείρεμα , το καθάρισμα, ακόμα και με το περπάτημα (Lai et al., 2004; Fromme et al.,2005; Santamouris et al., 2007; Saraga et al., 2010; Franck et al. 2011;Buonanno et al., 2009). Συγκεκριμένα για το περπάτημα έχει πραγματοποιηθεί μελέτη για την επίδραση που έχει στην συγκέντρωση μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων με διαμέτρους 0,1-10 μm κατά την οποία η μέση συγκέντρωση έφτασε τα $3320 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ κατά την διάρκεια του περπατήματος ενώ πριν ήταν στα $73 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ (Lazaridis et al.,2014). Μελέτες έχουν δείξει ότι το στρώσιμο του κρεβατιού ή το δίπλωμα των ρούχων έχουν επίδραση στις εσωτερικές συγκεντρώσεις (Ferro κ.ά. 2002). Επίσης τα ίδια τα κτήρια πολλές φορές είναι πηγές αιωρούμενων σωματιδίων λόγω κακού σχεδιασμού ή κακής χρήσης υλικών.

Επιπλέον εντός των εσωτερικών χώρων πέραν από τις παραπάνω πηγές λαμβάνουν χώρα και διεργασίες που επηρεάζουν την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων οι οποίες παρουσιάζονται στην εικόνα 4.



Εικόνα4: Διεργασίες που επηρεάζουν την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους. (Σπαής Γεώργιος, 2018)

Το εξωτερικό περιβάλλον συνεισφέρει σημαντικά στις συγκεντρώσεις εντός των εσωτερικών χώρων όπως φαίνεται και στην εικόνα** με τον φυσικό ή μηχανικό αερισμό αλλά και την διείσδυση των σωματιδίων μέσω του ανθρώπου, από τα ρούχα του και τα παπούτσια. Επιπλέον λαμβάνουν χώρα διεργασίες όπως η πυρηνοποίηση και μηχανισμοί όπως η συμπύκνωση, η εξάτμιση και η συσσωμάτωση οι οποίες όπως είδαμε παραπάνω οδηγούν στον σχηματισμό νέων σωματιδίων ή στην αύξηση του μεγέθους των υπαρχόντων.

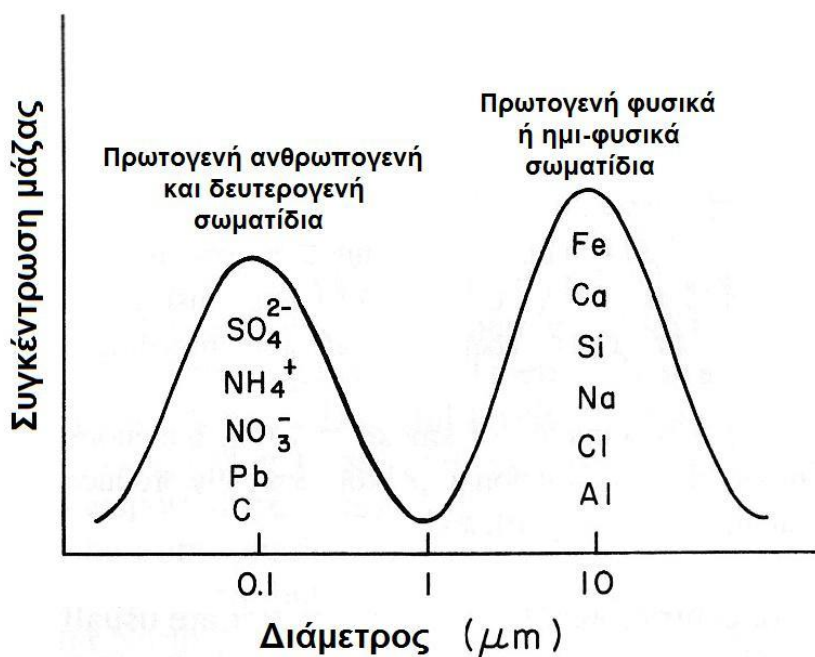
1.3 Χημική σύσταση αιωρούμενων σωματιδίων

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των ΑΣ αποτελεί και η χημική τους σύσταση η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πηγή προέλευσης τους αλλά και από χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα. Γενικά, τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούνται από μια ανόργανη φάση (στερεό ανόργανο υλικό, υδροδιαλυτά ανόργανα άλατα, στοιχειακός άνθρακας, κ.ά.) μία οργανική φάση (οργανικός άνθρακας, ετεροάτομα) και από νερό.

Τα λεπτά και υπέρλεπτα σωματίδια προέρχονται κυρίως από ανθρωπογενείς δραστηριότητες όπως τα συστήματα καύσεις και συμπυκνώματα προϊόντων καύσεις με αποτέλεσμα να περιέχουν μεγάλες ποσότητες αζώτου, οργανικού και στοιχειακού άνθρακα, ανόργανα ιόντα, μεγάλης πτητικότητας οργανικές ενώσεις, θείο και ιχνοστοιχεία.

Τα χονδρά σωματίδια προέρχονται κυρίως από μηχανικές και βιομηχανικές διεργασίες από την φθορά ελαστικών, των φρένων των αυτοκινήτων και του οδοστρώματος αλλά και από φυσικές πηγές όπως το θαλάσσιο αεροζόλ, την σκόνη και αεροζόλ βιολογικής προέλευσης κατά συνέπεια η χημική τους σύσταση περιλαμβάνει οργανικό άνθρακα υπό την μορφή ιών, γύρης, βακτηρίων και μυκήτων, οργανικό άνθρακα από την καύση, γεωλογικά συστατικά του στερεού φλοιού της γης από επαναιώρηση σκόνης και μέταλλα από θαλάσσια αερολύματα και σκόνη όπως

επίσης και φλοιώδη συστατικά όπως είναι το ασβέστιο, αλουμίνιο, μαγνήσιο και σίδηρος.



Εικόνα 5: Σχηματική κατανομή μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων η οποία εμφανίζει ένα τυπικό καταμερισμός χημικών ειδών σε μικρά και μεγάλα σωματίδια.

Βασικό ρόλο στην χημική σύσταση των σωματιδίων αποτελεί και η περιοχή από την οποία προέρχονται, καθώς συναντάμε διαφορετική σύσταση σε αστικές, υπαίθριες και θαλάσσιες περιοχές. Για παράδειγμα σε μια αστική περιοχή όπου έχουμε ανθρωπογενείς δραστηριότητες συναντάμε συνήθως μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αζώτου, θεικών, νιτρικών και άνθρακα, ενώ σε μια θαλάσσια παρατηρούνται μεγαλύτερες συγκεντρώσεις νατρίου και χλωρίου.

Όσον αφορά τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στον αέρα, το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) και διοξείδιο του θείου (SO₂) οξειδώνονται με ρίζες υδροξυλίου (OH[•]) και παράγουν νιτρικό (HNO[•]₃) και θειικό οξύ (H₂SO₄) αντίστοιχα, ενώ το HNO[•]₃ με τη σειρά του αντιδρά με την αμμωνία (NH₃) προς παραγωγή νιτρικού αμμωνίου (NH₄NO₃) (WHO 2005). Κατά την διάρκεια των αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα παρουσιάζονται υψηλές συγκεντρώσεις σε άζωτο και θείο με το φαινόμενο να παρατηρείται κυρίως στα λεπτά σωματίδια.

Η τοξικότητα

Η τοξικότητα των σωματιδίων εξαρτάται από την χημική τους σύσταση και από το μέγεθος τους. Μεγαλύτερο κίνδυνο για τον οργανισμό εμφανίζουν τα πιο μικρά σωματίδια, καθώς με την μείωση του μεγέθους αυξάνεται η τοξικότητα. Η πορώδης επιφάνεια των σωματιδίων προσελκύει βαρέα μέταλλα, θειικά και νιτρικά άλατα, πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (ΠΑΥ) και άλλες τοξικές και καρκινογόνες χημικές ουσίες που προκαλούν αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία (Chenand Lippmann, 2009; Schwarze et al., 2006).

Τα θειικά αποτελούν ένα από τα πιο επικίνδυνα συστατικά των αιωρούμενων σωματιδίων καθώς επιδρούν στην ικανότητα των πνευμόνων να αποβάλουν τα σωματίδια. Επίσης, η ύπαρξη μεταλλικών ιχνοστοιχείων δημιουργεί ελεύθερες ρίζες υδροξυλίου οι οποίες ερεθίζουν τους ιστούς. Τα σωματίδια PM_{10} έχουν έντονη δραστηριότητα μέσω των ελεύθερων ριζών, οι οποίες αποσυνθέτουν το DNA. Μέρος αυτής της δραστηριότητας οφείλεται στην ρίζα υδροξυλίου, μια ελεύθερη ρίζα ισχυρά δηλητηριώδη, η οποία εκλύεται από τα PM_{10} σε υδατικό μέσο. Επίσης, το ίδιο σωματιδιακό κλάσμα εκλύει σε σημαντικές ποσότητες Fe^{+3} σε pH ίσο με 7,2, το οποίο είναι το pH της επιφάνειας των πνευμόνων. Η έκλυση σιδήρου είναι ακόμη πιο επικίνδυνη, καθώς ευνοεί την διαδικασία σχηματισμού ριζών υδροξυλίου.

1.4 Επιπτώσεις αιωρούμενων σωματιδίων:

Πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια με επίκεντρο τις αρνητικές επιπτώσεις που έχουν τα αιωρούμενα σωματίδια τόσο στο περιβάλλον όσο και στην υγεία του ανθρώπου. Και για τους δύο τομείς αυτούς η επίδραση που έχουν τα σωματίδια δεν είναι εμφανής παρόλα αυτά είναι έντονη.

Στο περιβάλλον:

Η επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων αφορά κυρίως την ισορροπία του φυσικού περιβάλλοντος και την διατάραξη αυτής το οποίο επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα. Άμεση επίδραση αυτών υπάρχει στην ηλιακή ακτινοβολία όπου τα αιωρούμενα σωματίδια απορροφούν ένα μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μετατρέποντας στην σε θερμότητα και επίσης αλληλεπιδρούν με τα φωτόνια προκαλώντας σκέδαση του φωτός. Οι δύο αυτές αλληλεπιδράσεις της ακτινοβολίας με τα αιωρούμενα σωματίδια προκαλούν διατάραξη στο ισοζύγιο ενέργειας και κατ'επέκταση στην ισορροπία του περιβάλλοντος.

Έμμεση επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων παρατηρείται στα σύννεφα επηρεάζοντας τις ποσότητες και τις ιδιότητες αυτών και κατ'επέκταση τις βροχοπτώσεις και τον υδρολογικό κύκλο. Οι μηχανισμοί αυτοί αφορούν την μεταβολή του χρόνου ζωής των νεφών καθώς και την επίδραση των αεροζόλ στο Albedo των νεφών όπου σε συνδυασμό με την διάθλαση της ακτινοβολίας έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της διαθλαστικότητας και κατ' συνέπεια την μείωση της θερμοκρασίας.

Πέραν της αρνητικής επίδρασης στο κλίμα, επιπτώσεις παρουσιάζονται και στα οικοσυστήματα καθώς τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν την δυνατότητα να μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις με την βοήθεια του ανέμου και εναποτίθενται στο έδαφος και το νερό ρυπαίνοντας περιοχές αρκετά μακριά από την πηγή τους.

Έχουν παρατηρηθεί επιπτώσεις στην βλάστηση καθώς τα αιωρούμενα σωματίδια εισέρχονται κατά την αναπνοή και φράζουν τις οπές των φυτών με αποτέλεσμα την μείωση της φωτοσυνθετικής τους λειτουργίας. Μεγάλες ποσότητες αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί να προκαλέσουν μεταβολές στην χημική σύσταση του εδάφους και κατ'επέκταση στην δυνατότητα βλάστησης. Επιπρόσθετα η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων αν είναι τοξική, μπορεί να προκαλέσει αρνητικές επιδράσεις στα ίδια τα φυτά αλλά και στους οργανισμούς που τα καταναλώνουν και μέσω της τροφικής αλυσίδας να φτάνουν και στον άνθρωπο.

Η μείωση της ορατότητας είναι μια ακόμα επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων, η οποία είναι εμφανής και στο ανθρώπινο μάτι. Αν και η ορατότητα σχετίζεται άμεσα με τις καιρικές συνθήκες τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν σημαντικό ρόλο στην μείωση της. Σε συνδυασμό με την επίδραση τους στα δομικά υλικά και τα μνημεία, αφήνοντας λεκέδες και διαβρώνοντας πέτρες προκαλούν μεγάλες επιπτώσεις στην ανθρώπινη οικονομία και ψυχολογία.

Στην υγεία:

Λόγω της άρρηκτης σχέσης του ανθρώπου με το περιβάλλον, τα αιωρούμενα σωματίδια θα καταλήξουν στον ανθρώπινο οργανισμό, δημιουργώντας επιπλοκές στην υγεία του. Η είσοδος επιβλαβών σωματιδίων μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της τροφικής αλυσίδας, αλλά επικρατέστερα, μέσω της αναπνοής και της δερματικής επαφής. Φλεγμονές, βήχας, ζαλάδες και κρίσεις άσθματος είναι κάποια από τα πιο απλά συμπτώματα τις έκθεσης του ανθρώπου σε αιωρούμενα σωματίδια (Neuberger et al. 2004). Μια αύξηση της τάξεως των $10 \frac{\mu g}{m^3}$ στα PM10 οδηγεί σε αύξηση κατά 0.6% στα επείγοντα περιστατικά νοσοκομείων εξαιτίας μολύνσεων του ανώτερου αναπνευστικού (Shaughnessy, Venigalla, and Trump 2015). Πολλές έρευνες επίσης έχουν συνδέσει τα ΑΣ με προβλήματα στο αναπνευστικό σύστημα, βρογχίτιδα, άσθμα (Neuberger et al., 2004) καρκίνο των πνευμόνων και εμφύσημα αλλά και με καρδιαγγειακές νόσους όπως ισχαιμική καρδιοπάθεια και στεφανιαία νόσο (Morawska et al., 2006, AndersonHR. Et al., 2009, Teoldi et al. 2016).

Ο χρόνος έκθεσης του οργανισμού παίζει ρόλο στην εμφάνιση ασθενειών και επιπλοκών (Beelen et al., 2014; Zhang et al., 2014; Dockery et al. 1993; Hart et al. 2015; Hoek et al. 2013; Laden et al. 2006; Pope et al. 2002; Puett et al. 2008). Με την βραχυπρόθεσμη έκθεση, δηλαδή διάστημα λίγων ωρών ή ημερών, έχουν συνδεθεί καρδιακές προσβολές και αρρυθμίες σε άτομα με καρδιακά προβλήματα, όπως επίσης και κρίσεις άσθματος ή αναπνευστικές μολύνσεις σε άτομα με αναπνευστικά προβλήματα (Arbex et al. 2010; Auchincloss et al. 2008; Chen et al. 2012; Chuang et al. 2010; Dai et al. 2016). Στον αντίποδα, η μακροχρόνια έκθεση προκαλεί χρόνια βρογχίτιδα και μειωμένη λειτουργία του αναπνευστικού, παράγοντες που μπορεί να οδηγήσουν στον θάνατο καθώς και πίεση (Chan et al. 2015; Chuang et al. 2011; Foraster et al. 2014b; Liu et al. 2016; Schwartz et al. 2012). Σημαντικός παράγοντας και στις δύο περιπτώσεις είναι η συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων στην οποία εκτίθεται ο άνθρωπος και πλέον ένα φλέγον θέμα για την επιστημονική κοινότητα (Pope III CA et al., 2006).

Πέραν όμως από το χρονικό είδος της έκθεσης, η εμφάνιση και η σοβαρότητα των αρνητικών επιπτώσεων σχετίζεται με τον ίδιο τον άνθρωπο, καθώς οι επιδράσεις είναι διαφορετικές σε ομάδες υψηλού κινδύνου. Τα παιδιά και οι ηλικιωμένοι είναι πιο ευάλωτοι όσον αφορά το φυσιολογικό και ανοσοποιητικό τους σύστημα σε σχέση με έναν υγιή έφηβο ή ενήλικα (Farhat et al. 2005; Gauderman et al. 2000). Οι άνθρωποι που πάσχουν ήδη από καρδιακά ή του αναπνευστικού προβλήματα μπορεί και με την μικρότερη έκθεση να αντιμετωπίσουν επιδείνωση της κατάστασης τους.

Η χημική σύσταση των ΑΣ έχει καθοριστικό ρόλο στις επιπτώσεις στον άνθρωπο καθώς τα οργανικά κλάσματα, τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCB) και τα PAHs βλάπτουν το γενετικό υλικό των κυττάρων (Teoldi et al. 2016) αλλά και το συκώτι

(Yang et al. 2016). Επίσης τα βαρέα μέταλλα (κάδμιο, χρώμιο κλπ) μπορούν και εισχωρούν στο ενδοκρινικό νευρικό σύστημα λόγω της μεταφορά των λεπτών σωματιδίων που έχουν εισχωρήσει στο αίμα. Τέλος, ο σίδηρος και ο ψευδάργυρος από ορυκτά καύσιμα έχει βρεθεί πως σχετίζεται με ισχαιμική καρδιοπάθεια ενώ όσον αφορά τα βιοαεροζόλ, η αιωρούμενη γύρη δρα συνδυαστικά με άλλους αέριους ρύπους (O₃, NO₂) και δημιουργεί φλεγμονές ή επιδεινώνει προϋπάρχουσες αλλεργίες (Pöschl 2005).

Κεφάλαιο 2: Αναπνευστικό σύστημα

Όπως είδαμε στις επιδράσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην υγεία του ανθρώπου, το αναπνευστικό σύστημα κατέχει τον πιο βασικό ρόλο στην δίοδο και την παραμονή των σωματιδίων εντός του ανθρώπινου οργανισμού καθώς η μορφολογία του παίζει σημαντικό ρόλο στην ταχύτητα ροής, την κατεύθυνση, την πίεση και την υγρασία του αέρα που εισέρχεται.

Η φυσιολογία του αναπνευστικού εξαρτάται από το φύλο, την ηλικία, το βάρος και την κατάσταση υγείας του ατόμου τα οποία και καθορίζουν τον όγκο του αέρα στους πνεύμονες και τη διάρκεια ενός κύκλου αναπνοής. Επίσης σημαντική παράμετρος φυσιολογίας είναι ο τρόπος και ο ρυθμός των κύκλων αναπνοής του ατόμου καθώς παίζει σημαντικό ρόλο αν η αναπνοή πραγματοποιείται από το στόμα ή την μύτη για την εκτίμηση της δόσης.

Το αναπνευστικό σύστημα όπως φαίνεται και στην εικόνα 6 χωρίζεται σε δύο επιμέρους συστήματα, το ανώτερο και το κατώτερο. Το ανώτερο αναπνευστικό σύστημα περιλαμβάνει τα όργανα που βρίσκονται εκτός της περιοχής του θώρακα τα οποία είναι:

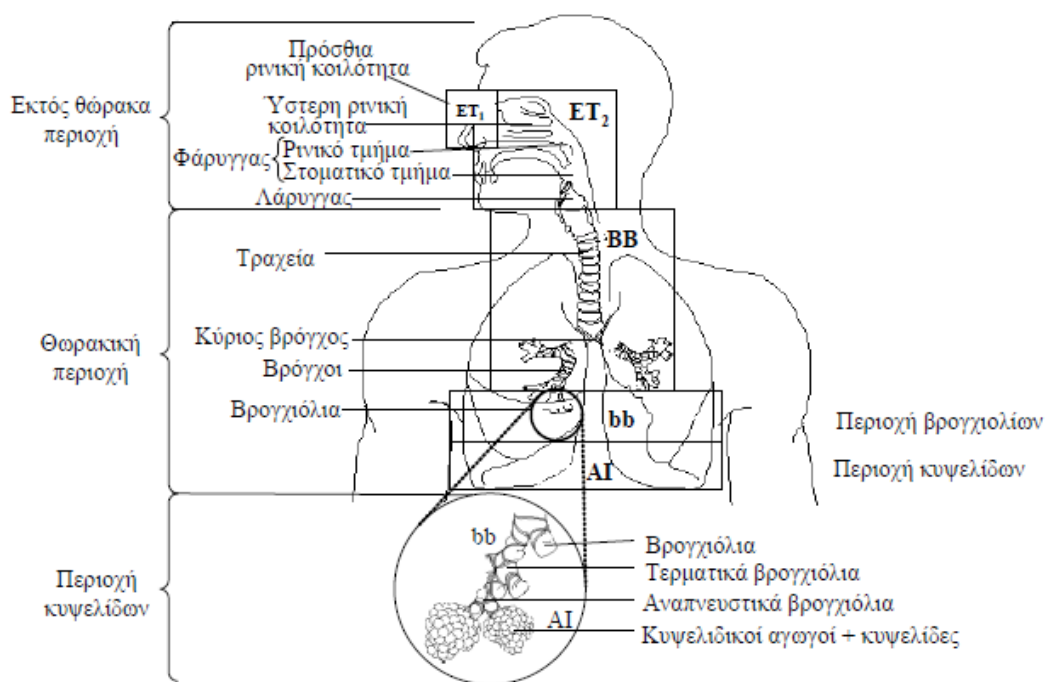
- **Ρινική κοιλότητα:** ρυθμίζει τη θερμοκρασία και την υγρασία του εισπνεόμενου αέρα και απομακρύνει τα μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια.
- **Φάρυγγας:** συνδέει την πρόσθια ρινική κοιλότητα με τον λάρυγγα και τη στοματική κοιλότητα με τον οισοφάγο.
- **Λάρυγγας:** χρησιμεύει ως αεραγωγός και ως φωνητικό όργανο. Η βλεννογόνος του λάρυγγα χρησιμεύει για να απομακρύνει τα ξένα σωματίδια και για να ρυθμίζει τη θερμοκρασία και την υγρασία του εισπνεόμενου αέρα (τα ίδια φυσιολογικά χαρακτηριστικά με τη ρινική κοιλότητα).

Αντίθετα το κατώτερο σύστημα περιλαμβάνει τα όργανα που βρίσκονται εντός της θωρακικής κοιλότητας τα οποία είναι :

- **Τραχεία:** Αποτελεί τη συνέχεια του λάρυγγα με μήκος 11-14 cm. Στο εσωτερικό της καλύπτεται από βλεννογόνο η οποία εμποδίζει την είσοδο σε ξένα σωματίδια. Τα ξένα σωματίδια αυτά απομακρύνονται από τις αναπνευστικές οδούς με το βήχα.
- **Βρόγχοι:** Η τραχεία διαιρείται σε 2 κύριους βρόγχους με τοιχώματα ίδιας κυτταρικής σύστασης με την τραχεία. Ο δεξιός βρόγχος εισέρχεται

στο δεξιό πνεύμονα ενώ ο αριστερός βρόγχος εισέρχεται στον αριστερό πνεύμονα .

- **Κυψελίδες:** Οι πνεύμονες ενός ενήλικα ανθρώπου περιλαμβάνουν περίπου 300 εκατομμύρια κυψελίδες με συνολική επιφάνεια 70-80 m² (για την ανταλλαγή αερίων). Τα σωματίδια που φθάνουν σε αυτή την περιοχή έχουν μικρό μέγεθος.



Εικόνα 6 : Ανατομία του αναπνευστικού συστήματος (ICRP, 1994)

Στην παρούσα εργασία θα υπολογίσουμε την δόση σε αιωρούμενα σωματίδια ενός φοιτητή και μιας φοιτήτριας στις 5 βασικές περιοχές του αναπνευστικού οι οποίες είναι η ρινική κοιλότητα (ET₁), η περιοχή του στόματος (ET₂) και η περιοχή των πρωτεύοντων βρόγχων (BB) και των τελικών βρόγχων (bb) καθώς και την κυψελιδική περιοχή (AI).

Μηχανισμοί εναπόθεσης αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα

Ως εναπόθεση χαρακτηρίζεται η μεταφορά των σωματιδίων από την αέρια μορφή στα τοιχώματα του αναπνευστικού και πραγματοποιείται με τους εξής βασικούς μηχανισμούς (Hussain, 2011):

- **Πρόσκρουση:** κατά την οποία τα σωματίδια αδυνατούν να ακολουθήσουν της γραμμής ροής του αναπνευστικού και πέφτουν πάνω στα τοιχώματα των αεραγωγών με αποτέλεσμα να εναποτίθενται σε αυτά
- **Καθίζηση:** λόγω της βαρύτητας τα σωματίδια καθιζάνουν και δεν ακολουθούν της γραμμής ροής.

- **Διάχυση:** κατά την κίνηση των σωματιδίων γίνεται σύγκρουση με μόρια αέρα με αποτέλεσμα τα σωματίδια να βγαίνουν εκτός ροής και να εναποτίθενται.

Κατά την κίνηση των σωματιδίων εντός του αναπνευστικού υπάρχουν και άλλοι μηχανισμοί εναπόθεσης όπως είναι η ηλεκτροστατική καθίζηση η οποία αφορά ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια μόνο και η αναχαίτιση-ενσφήνωση η οποία είναι η φυσική επαφή των σωματιδίων με τα τοιχώματα των αεραγωγών που όμως είναι μικρότερης σημασίας σε σχέση με τους προηγούμενους.

Μηχανισμοί απομάκρυνσης σωματιδίων από το αναπνευστικό

Μπορεί η εισχώρηση των αιωρούμενων σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό να είναι αναπόφευκτη παρόλα αυτά ο ανθρώπινος οργανισμός έχει δημιουργήσει μηχανισμούς άμυνας για την απομάκρυνση των σωματιδίων, οι οποίοι λειτουργούν και σε διαφορετικά μέρη του αναπνευστικού.

Οι σημαντικότεροι μηχανισμοί είναι οι ακόλουθοι (ICRP 1994):

- **Μηχανικός Καθαρισμός:** είναι καθημερινές ανθρώπινες συνήθειες όπως ο βήχας, το φτέρνισμα και το φύσημα της μύτης.
- **Καθαρισμός μέσω βλέννας:** στην τραχειοβρογχική περιοχή η βλέννα απομακρύνει τα αδιάλυτα σωματίδια και τα οδηγεί μέσω του λάρυγγα προς το γαστρεντερικό σύστημα όπου στην συνέχεια αφαιρούνται.
- **Καθαρισμός από τα μακροφάγα κύτταρα:** είναι μια αργή διαδικασία που πραγματοποιείται στην κυψελιδική περιοχή όπου τα μακροφάγα κύτταρα πραγματοποιούν φαγοκύτωση και στην συνέχεια τα σωματίδια απομακρύνονται προς τα βρογχιόλια μέσω της βλέννας η οποία δεν είναι πάντα δυνατή καθώς είναι ανοδική. Σε περίπτωση που δεν είναι δυνατή η μετακίνηση τους κατευθύνονται προς το κυκλοφορικό ή λεμφικό σύστημα.
- **Απορρόφηση από το αίμα:** όπου τα σωματίδια αρχικά διαλύονται και στη συνέχεια απορροφούνται τα συστατικά τους από το αίμα. Στην περίπτωση των υπέρλεπτων σωματιδίων η απορρόφηση μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς να προηγηθεί διάλυση.

Η αποτελεσματική διείσδυση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ανθρώπινη αναπνευστική οδό εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος τους, με τα μέγιστα στην κλίμακα μεγέθους από 100nm έως 1μm (Housiadas and Lazaridis 2010, Lazaridis et al., 2001, Hussein et al., 2015) το οποίο είναι επικίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία (Oberdörster, 2001; Francket al., 2011; Heinzerling et al., 2016). Παρά τις άμυνες του ανθρώπινου οργανισμού τα σωματίδια με διαμέτρους 0,4 έως 0,7 μm μπορούν να φτάσουν στην περιοχή των κυψελίδων ενώ τα λίγο μεγαλύτερα 0,7-1,1 μm μπορούν να εισχωρήσουν μέχρι και τα βρογχοκυψελίδια. Τα σωματίδια με διαμέτρους 1,1 έως 2,1μm φτάνουν στην περιοχή των βρογχολίων και τα χονδρά σωματίδια εναποτίθενται κατά κύριο λόγο στην περιοχή εκτός θώρακα και την τραχεία και είναι αυτά που ο οργανισμός μπορεί και απομακρύνει πιο εύκολα (Ny and Lee 2011).

Κεφάλαιο 3 : Πειραματική διαδικασία

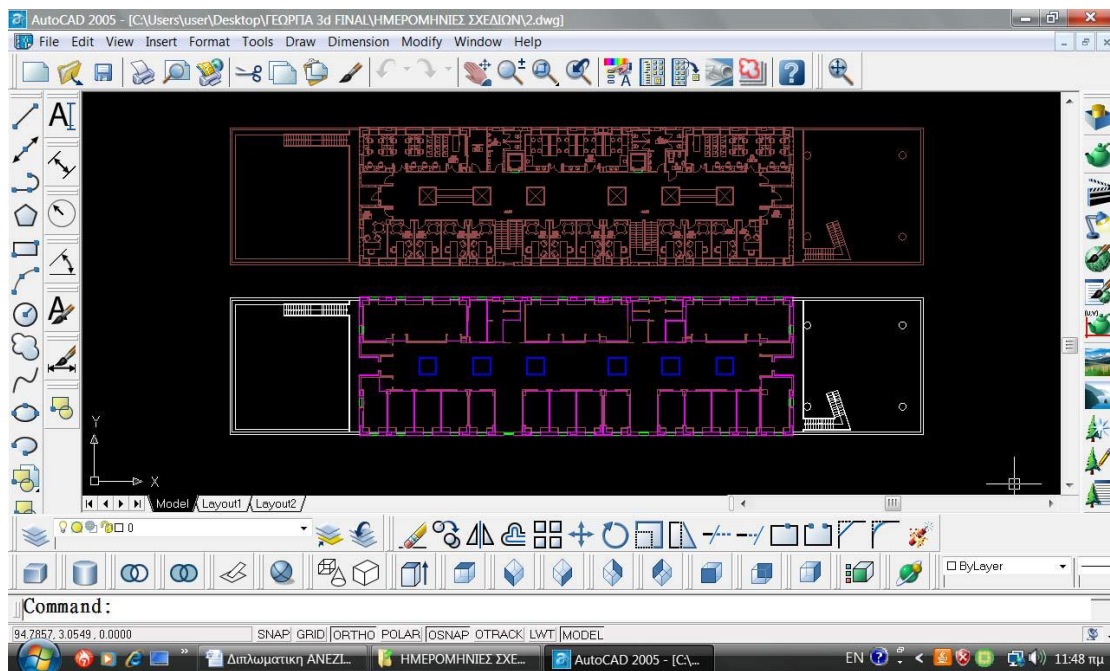
3.1 Υπό μελέτη Κτήρια

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα κτήρια K1 και K2 της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος η οποία βρίσκεται εντός της Πολυτεχνειούπολης και έχουν συνολική επιφάνεια περίπου 2.000m^2 . Τα κτίρια αυτά βρίσκεται στο βορειοανατολικό άκρο του πολυτεχνείου σε απόσταση περίπου 2km από τη θάλασσα και σε υψόμετρο 137 m. Τα δύο κτήρια αποτελούνται από 2 ορόφους και έχουν το καθένα συνολικό ύψος, μήκος και πλάτος 11m, 48m και 14.5m αντίστοιχα. Χωρίζονται σε δύο όμοια τμήματα τα οποία συνδέονται μεταξύ του με ένα κεντρικό χώρο ο οποίος διαφέρει. Στο κτήριο K1 ο χώρος αυτός είναι κλειστό με αλουμίνιο και τζάμι ενώ στο κτήριο K2 είναι ανοιχτός.



Εικόνα 7: Πρόσωση του κτηρίου K2

Στο ισόγειο του κτήριο K1 στεγάζονται τα εργαστήρια της σχολής ενώ στον πρώτο όροφο υπάρχουν γραφεία. Στο ισόγειο του κτηρίου K2 στεγάζεται το μηχανογραφικό κέντρο και το κυλικείο της σχολής καθώς και 2 αίθουσες διδασκαλίας ενώ στον πρώτο όροφο υπάρχουν 3 αίθουσες διδασκαλίας και γραφεία. Τα παράθυρα αποτελούν περίπου το 17% της εξωτερικής τοιχοποιίας του κτηρίου και το κάθε ένα έχει διαστάσεις $2\text{m} \times 1\text{m}$ (μήκος x πλάτος). Στο δεύτερο υπάρχουν 16 περσίδες με διαστάσεις $1,5\text{m} \times 1\text{m}$ (μήκος x πλάτος). Πέραν από τους χώρους εκπαίδευσης και τα γραφεία στα δύο κτήρια υπάρχουν χώροι υγιεινής, διάδρομοι και σκάλες.



Εικόνα 8: Κάτοψη ορόφου Γενικού Τμήματος (Σχέδιο Μηχανικού και επεξεργασμένο σχέδιο) (Νταουντάκη, 2010)

Από τα δύο κτήρια αυτά επιλέχθηκαν για τις μετρήσεις αιωρούμενων σωματιδίων ένα γραφείο (13 m^2) το οποίο βρίσκεται στον 1^ο όροφο του κτηρίου K1, ένα εργαστήριο (54 m^2) που στεγάζεται στο ισόγειο του ίδιου κτηρίου καθώς και μια αίθουσα διδασκαλίας (100 m^2) και ο χώρος του κυλικείου (100 m^2) που βρίσκονται στο κτήριο K2. Οι χώροι αυτοί επιλέχθηκαν λόγω των διαφορετικών δραστηριοτήτων που λαμβάνουν χώρα από τους χρήστες με σκοπό την έρευνα της επιρροής του στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων. Επίσης οι χώροι απασχολούνται και από διαφορετικό αριθμό ατόμων καθώς στο γραφείο υπήρχε ένας κύριος χρήστης, στο εργαστήριο περίπου 3 ενώ στην αίθουσα και το κυλικείο ο αριθμός των χρηστών ξεπερνούσε τους 10.

Οι μετρήσεις στους παραπάνω χώρους πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια 3 οργάνων τα οποία αναλύονται στην συνέχεια. Ήταν τοποθετημένα εντός των χώρων κατά τις ώρες λειτουργίας τους εκτός από το γραφείο και το εργαστήριο όπου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και τις βραδινές ώρες.

3.2 Περιγραφή οργάνων μέτρησης

Εισαγωγή

Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων χρησιμοποιούνται μέθοδοι δειγματοληψίας οι οποίες κυρίως στηρίζονται στο σταθμικό προσδιορισμό δηλαδή στην ζύγιση ενός φίλτρου ή δοχείου πριν και μετά την δειγματοληψία. Παρ' όλα αυτά τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται και χρήση αυτόματων μεθόδων προσδιορισμού καθώς δίνει συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων συνάρτηση του χρόνου το οποίο έχει ως αποτέλεσμα άμεσα δεδομένα για την κατάσταση που επικρατεί.

Τέτοιες μέθοδοι είναι :

- Η μέθοδος απορρόφησης β-ακτινοβολίας, η οποία βασίζεται στη μεταβολή της β-ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από μία ραδιενεργό πηγή, κατά τη διέλευση της μέσα από τη σωματιδιακή ύλη που εναποτίθεται στο φίλτρο.
- Η μέθοδος ταλάντωσης χορδής, η οποία βασίζεται στη μεταβολή της συχνότητας ταλάντωσης του συστήματος οπότε καθορίζεται η μεταβολή της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων που έχουν συλλεχθεί.
- Η μέθοδος πιεζοηλεκτρικής ταλάντωσης κατά την οποία τα αιωρούμενα σωματίδια αποτίθενται σε πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους είτε λόγω πρόσκρουσης είτε λόγω ηλεκτροστατικών δυνάμεων.
- Η μέθοδος μεταβολής πίεσης φίλτρου (Pressure Drop Tape Sampler, CAMMS), η οποία στηρίζεται στη μέτρηση της πτώσης της πίεσης στην επιφάνεια ενός φίλτρου Fluoropore. Η πίεση μειώνεται γραμμικά σε συνάρτηση με τη μάζα που αποτίθεται στην επιφάνεια του φίλτρου.
- Η μέθοδος σκεδασμού φωτός η οποία στηρίζεται στην ιδιότητα των αιωρούμενων σωματιδίων να προκαλούν σκεδασμό. Η σχέση που συνδέει τον σκεδασμό με το σωματιδιακό φορτίο εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων.

Για την διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε όργανα μέτρησης χρησιμοποιούν την τελευταία κατά σειρά μέθοδο, τα οποία αναλύονται στην συνέχεια.



Εικόνα 9: Όργανα μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων που χρησιμοποιούν την μέθοδο της σκέδασης ακτινοβολίας.

Dust Trak

Αρχικά για την παρακολούθηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων $PM_{2.5}$ στους εσωτερικούς χώρους χρησιμοποιήθηκε το όργανο DustTrak II Handheld

(Μοντέλο 8532) ενώ για το εξωτερικό περιβάλλον χρησιμοποιήθηκε DustTrak II (Μοντέλο 8530) το οποίο βρισκόταν εντός ενός εργαστηρίου και συνδεόταν με το εξωτερικό περιβάλλον με ένα σωληνάκι. Τα όργανα παρουσιάζονται στην εικόνα 10.

Τα παραπάνω όργανα μετρούν αιωρούμενα σωματίδια χρησιμοποιώντας ειδικές κεφαλές για PM_{10} , $PM_{2,5}$ και PM_1 και είναι σχεδιασμένα να μετρούν σε πραγματικό χρόνο, σε εσωτερικούς χώρους όπως γραφεία, βιομηχανίες κλπ καθώς και σε εξωτερικό περιβάλλον.

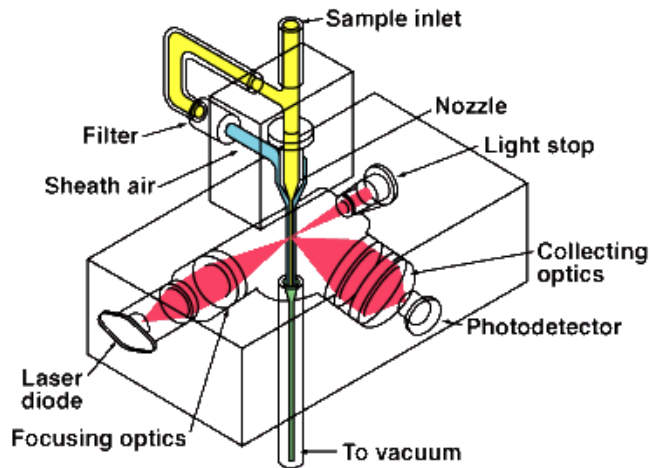


Εικόνα 10: Τα όργανα DustTrak II Handheld και DustTrak II που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία

Είναι μικρά και φορητά και λειτουργούν είτε με σύνδεση σε ηλεκτρικό ρεύμα, είτε με μπαταρία, διευκολύνοντας έτσι τον χρήστη να μετρήσει σε χώρους που επιλέγει. Είναι εύχρηστα καθώς ο χρήστης μπορεί να προγραμματίσει το χρόνο έναρξης και λήξης και τα διαστήματα εγγραφής και να εξάγει τα δεδομένα μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή χωρίς να είναι απαραίτητη η παρουσία του κατά την δειγματοληψία.

Το ρεύμα αέρα εισέρχεται στο όργανο με παροχή 1,7 L/min μέσω της κεφαλής λόγω της εσωτερικής αντλίας όπου διασταυρώνεται με μια ακτίνα λέιζερ 780 νανομέτρων (nm) η οποία εκπέμπεται με σκοπό να διασκορπιστεί/σκεδαστεί από τα σωματίδια προς όλες τις κατευθύνσεις. Στην συνέχεια ο φακός (90°) συλλέγει το διασκορπισμένο φως και το εστιάζει σε έναν φωτοανιχνευτή που υπάρχει και μετατρέπει το φως σε τάση. Η τάση αυτή είναι ανάλογη του διασκορπισμένου φωτός το οποίο είναι ανάλογο της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων που εισέρχονται στο όργανο με τελικό αποτέλεσμα τον υπολογισμό της συγκέντρωσης μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων.

Αναλυτικότερα ένα σωματίδιο διασκορπίζει x ποσότητα φωτός, 2 σωματίδια διασκορπίζουν διπλάσια και 10 σωματίδια την δεκαπλάσια. Η ποσότητα x που διασκορπίζεται εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων. Για τα σωματίδια με διάμετρο ενός έκτου του μήκους κύματος του λέιζερ η εξάρτηση είναι η πιο έντονη, καθώς για τα μικρά σωματίδια το διασκορπισμένο φως μειώνεται ως συνάρτηση της έκτης δύναμης της διαμέτρου.



Εικόνα 11: Μορφολογία οργάνων Dust Trak

Optical Particle Sizer (OPS)



Εικόνα 12: Όργανο μέτρησης OPS 3330

Το TSI Optical Particle Sizer (OPS) Model 3330 είναι ένα ελαφρύ φορητό όργανο, το οποίο παρέχει γρήγορη και ακριβή μέτρηση της συγκέντρωσης σωματιδίων και κατανομή μεγέθους σωματιδίων χρησιμοποιώντας την τεχνολογία μέτρησης μεμονωμένων σωματιδίων. Χρησιμοποιεί οπτικά συστήματα τελευταίας τεχνολογίας με συλλογή φωτισμού από γωνίες 120 ° με αποτέλεσμα ακριβή, υψηλής ποιότητας δεδομένα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο του ή μαζί με το περιβαλλοντικό περίβλημα για καιρικές συνθήκες.

Αναλυτικότερα η λειτουργία του ξεκινά με το αερόλυμα του δείγματος εισχωρεί κατευθείαν στη περιοχή μετρήσεων του οργάνου για τη μείωση των απωλειών που οφείλονται στην μεταφορά. Η ανατροφοδότηση γίνεται σε πραγματικό χρόνο σε συνδυασμό με την μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας του δείγματος. Στον οπτικό θάλαμο, το αεροζόλ σκεδάζει μια ακτίνα λέιζερ, η οποία χρησιμοποιείται για την καταμέτρηση του αριθμού των σωματιδίων. Το σχήμα της δέσμης λέιζερ, το μέγεθος

του όγκου προβολής, ο τύπος του ανιχνευτή και οι αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος στο μοντέλο 3330 έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν βέλτιστη ανάλυση σε κλίμακα μεγέθους 0,3 έως 10 μm .

Το κομμάτι του προγραμματισμού του οργάνου είναι πολύ εύχρηστο καθώς έχει οθόνη αφής και ο χρήστης μπορεί να βάλει τις δικές του επιλογές. Η οθόνη παρέχει πληροφορίες κατάστασης σχετικά με την αντλία, το λέιζερ, ρυθμό ροής και πολλά άλλα. Οι χρήστες μπορούν να προγραμματίσουν τις ώρες έναρξης και λήξης, σημείο ρύθμισης συναγερμού και πολλές άλλες παραμέτρους. Η εσωτερική μνήμη μπορεί να αποθηκεύσει εγγραφές δειγμάτων που μπορεί να προβληθεί εύκολα στην οθόνη ή να τις αντιγράψει ο χρήστης σε κάποια άλλη μονάδα (flash). Δεδομένα μπορεί επίσης να αποθηκευτεί απευθείας σε έναν υπολογιστή μέσω ένα καλώδιο USB ή σύνδεση Ethernet.

Τα δεδομένα που παρέχονται από το όργανο παρουσιάζονται με μορφή excel στην οποία υπάρχει ο χρόνος δειγματοληψίας, η θερμοκρασία, η υγρασία καθώς και η συνολική συγκέντρωση αριθμού όλων των σωματιδίων (διαμέτρων 0,3 έως και 10 μm). Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα δεδομένα αυτά μετατράπηκαν σε συγκέντρωση μάζας με την βοήθεια του προγράμματος Aerosol manager της εταιρίας TSI.

Επίσης το σύνολο των μετρούμενων σωματιδίων χωρίστηκε σε τρεις υποκατηγορίες για να μελετηθούν ξεχωριστά τα υπέρλεπτα, λεπτά και χονδρά σωματίδια και να προσδιοριστούν πιθανές πηγές σωματιδίων στον υπό μελέτη εσωτερικό/εξωτερικό χώρο ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη ομάδα είναι τα σωματίδια με διάμετρο 0,3-1 μm ($\text{PM}_{0,3-1}$), στη δεύτερη τα σωματίδια με διαμέτρους από 1-2,5 μm ($\text{PM}_{1-2,5}$) και τέλος τα σωματίδια με διαμέτρους 2,5-10 μm (σωματίδια $\text{PM}_{2,5-10}$). Τα σωματίδια της κάθε κατηγορίας παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά σε εσωτερικά/εξωτερικά περιβάλλοντα και με αυτόν τον τρόπο μελετήθηκε ξεχωριστά η διακύμανση των σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθος τους μέσα σε διαφορετικούς χώρους.

P-Trak Ultrafine Particle Counter 8525 (TSI)



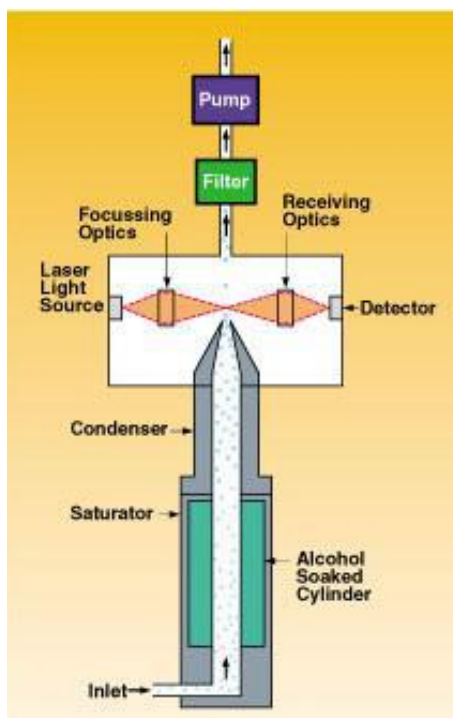
Εικόνα 13: Όργανο P-Trak Ultrafine Particle Counter 8525 της TSI (διαστάσεις: 27 x 14 x 14cm).

Το P-Trak Ultrafine Particle Counter (UPC) 8525 είναι ένα εργαλείο για την μέτρηση λεπτών σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους. Είναι μικρό, φορητό όργανο το οποίο λειτουργεί και με μπαταρία και με ηλεκτρικό ρεύμα διευκολύνοντας το

χρήστη. Το όργανο αυτό ανιχνεύει και μετράει πολύ λεπτά σωματίδια ($<1\mu\text{m}$). Παρέχει άμεση μέτρηση σε πραγματικό χρόνο και εντοπίζει επίσης προφανείς πηγές ρύπων όπως λέβητες, φούρνους και οχήματα και ανιχνεύει επίσης τις μη προφανείς πηγές όπως φωτοτυπικά μηχανήματα και εκτυπωτές.

Αναλυτικότερα οι μετρήσεις γίνονται σε μονάδες σωματιδίων ανά κυβικό εκατοστό (pt/cm^3) έναντι των παραδοσιακών μετρήσεων αερολυμάτων σε χιλιοστόγραμμα ανά κυβικό μέτρο ($\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$). Το P-TRAKTM UPC μπορεί να δει πολύ λεπτά σωματίδια, καθιστώντας το πολύ πιο ευαίσθητο απ' ό,τι άλλες τεχνολογίες. Τα σωματίδια έλκονται μέσω του P-TRAKTM UPC χρησιμοποιώντας μια ενσωματωμένη αντλία. Κατά την είσοδο στο όργανο, τα σωματίδια περνούν μέσα από ένα κορεσμένο σωλήνα όπου αυτά αναμιγνύονται με ατμό αλκοόλης.

Πιο συγκεκριμένα γίνεται χρήση ισοπροπυλικής αλκοόλης ($\text{CH}_3\text{CHOHCH}_3$) η οποία είναι υψηλής καθαρότητας (99,5%) ώστε να περιέχει μικρό ποσοστό υγρασίας ή άλλων ακαθαρσιών. Η αλκοόλη χρησιμοποιείται ώστε τα αιωρούμενα μικρο-σωματίδια της ατμόσφαιρας να μετατραπούν σε μεγαλύτερου μεγέθους σταγονίδια και έτσι να είναι ευκολότερη η ανίχνευση και η μέτρηση τους. Η αλκοόλη στην συνέχεια εξατμίζεται σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία σε ειδικό κελί όπου εισέρχονται τα σωματίδια. Εκεί ενώνονται με τους υπέρ κορεσμένους ατμούς και αυξάνουν το μέγεθος τους, οπότε με μία «οπτική τεχνική» καθίσταται εφικτή η μέτρηση του πλήθους των πολύ μικρών σωματιδίων (Λαζαρίδης, 2008).



Εικόνα 14: Αρχή λειτουργίας του P-Trak για τη μέτρηση του πλήθους των υπόμικρων σωματιδίων (αναπροσαρμοσμένο από TSI, 2004).

Το όργανο συνοδεύεται από μικρό ειδικό κυλινδρικό δοχείο εντός του οποίου γίνεται η πλήρωση του φυσιγγίου λειτουργίας με αλκοόλη. Το δοχείο αυτό πρέπει να γεμίζεται κάθε 8 ώρες περίπου, γεγονός που καθιστά αδύνατη τη συνεχή δειγματοληψία για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 8 ωρών και γι αυτόν τον λόγο δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στο εξωτερικό περιβάλλον παρά μόνο στο

εσωτερικό όπου ο χρήστης βρίσκεται κοντά στα όργανα. Το όργανο κατά τη μέτρηση θα πρέπει να παραμένει στην οριζόντια θέση ώστε οι φακοί εντός αυτού να μην υπερχειλίσουν με αλκοόλη (TSI, 2004)

Η αρχή λειτουργίας του οργάνου παρουσιάζεται στο σχήμα*** και είναι ίδια με αυτή που χρησιμοποιεί το όργανο DustTrak κατά την οποία η δέσμη φωτός προσπίπτει στα σωματίδια και σκεδάζεται με αποτέλεσμα να εξασθενεί. Η εξασθένιση αυτή είναι ανάλογη του αριθμού των

3.3 Περιγραφή μοντέλου ExDoM2

Εισαγωγή

Όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια τα αιωρούμενα σωματίδια εισχωρούν στον ανθρώπινο οργανισμό σε μεγάλες ποσότητες και ένα ποσοστό αυτών παραμένει εντός του οργανισμού. Πέραν δηλαδή της έκθεσης του ανθρώπου σε αυτά, σημαντικό είναι να υπολογίσουμε την δόση που λαμβάνει ο οργανισμός. Με τον όρο δόση ορίζουμε την ποσότητα των αιωρούμενων σωματιδίων που εναποτίθεται στο αναπνευστικό σύστημα ή και σε άλλες περιοχές του σώματος σε ορισμένη χρονική περίοδο.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα (ICRP, 1994; RIVM, 2002; Salma κ.ά., 2002; Mitsakou κ.ά., 2005; Αλεξανδροπούλου, 2010) με σκοπό τον υπολογισμό της εναποτιθέμενης δόσης στον άνθρωπο τα οποία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα στατιστικά/ημιεμπειρικά και στα μηχανιστικά μοντέλα λόγω της διαφοράς στον υπολογισμό του ποσοστού εναπόθεσης σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος. Τα ημιεμπειρικά μοντέλα θεωρούν ότι το αναπνευστικό σύστημα αποτελείται από διακριτές περιοχές οι οποίες δρουν σαν φίλτρα. Με την βοήθεια μαθηματικών εξισώσεων που προέρχονται από καμπύλες προσέγγισης πειραματικών δεδομένων υπολογίζουν την απόδοση κάθε φίλτρου, αντιμετωπίζοντας στατιστικά την διαδικασία εναπόθεσης. Εφαρμόζονται μόνο για τις συνθήκες κάτω από τις οποίες πρόέκυψαν τα πειραματικά δεδομένα και θεωρούνται αρκετά αξιόπιστα

Τα μηχανιστικά μοντέλα από την άλλη προσομοιώνουν κάθε μηχανισμό εναπόθεσης σωματιδίων ξεχωριστά χρησιμοποιώντας εξισώσεις μεταφορά σωματιδίων για τον προσδιορισμό της δόσης, χωρίς όμως να λαμβάνουν υπόψη σημαντικούς μηχανισμούς όπως είναι η βαρύτιμη ή η ηλεκτροστατική καθίζηση, ή η εναπόθεση λόγω διάχυσης. Σημαντικότερη ίσως αδυναμία για την πρακτική εφαρμογή τους είναι πως δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες μεταβαλλόμενης συγκέντρωσης έκθεσης ή παραμέτρων φυσιολογίας (Aleksandropoulou και Lazaridis, 2010).

Στη παρούσα διπλωματική εργασία η δόση υπολογίζεται με το μοντέλο ExDoM2 (Χαλβατζάκη και Λαζαρίδης, 2015) το οποίο έχει βασιστεί στο μοντέλο ExDoM (Exposure-Dose Model -Αλεξανδροπούλου 2010) ενσωματώνοντας νέους μηχανισμούς καθαρισμού από το αναπνευστικό σύστημα με βάση την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από την International Commission on Radiological Protection 2015 (ICRP) και σε ένα φαρμακοκινητικό (PBPK : Physiologically based pharmacokinetic modeling) μοντέλο για τη μεταφορά των βαρέων μετάλλων, που περιέχουν τα

αιωρούμενα σωματίδια, από το αίμα στο ανθρώπινο σώμα (π.χ. συκώτι, καρδιά, νεφροί, εγκέφαλος, γαστρεντερικό σύστημα, οστά) (Chalvatzaki και Lazaridis, 2015).

Μοντέλο ExDoM2

Το μοντέλο ExDoM2 βασίστηκε στο αναθεωρημένο μοντέλο του ανθρώπινου αναπνευστικού (HRTM) της Διεθνούς Υπηρεσίας Ακτινοπροστασίας (ICRP, 2015) και στο μοντέλο ExDoM το οποίο είναι η μοντελοποίηση του HRTM (αρχική έκδοση) της ICRP (1994) σε προγραμματιστικό περιβάλλον Fortran.

Το ExDoM2 είναι ένα μοντέλο που υπολογίζει τη δόση και τη συγκράτηση της μάζας των σωματιδίων στην αναπνευστική οδό του ανθρώπου καθώς και τη μάζα που μεταφέρεται στον οισοφάγο και την απορρόφηση στο αίμα. Η δόση υπολογίζεται στην παρούσα εργασία στην εκτός θώρακα και στην θωρακική. Η εκτός θώρακα περιοχή περιλαμβάνει την πρόσθια ρινική κοιλότητα (ET1) και την ύστερη ρινική κοιλότητα, τον λάρυγγα και τον φάρυγγα (ET2), ενώ η περιοχή των πνευμόνων περιλαμβάνει τις παρακάτω περιοχές: τραχεία και βρόγχοι (BB), βρογχιόλια (bb) και κυψελίδες (AI).

Από μαθηματικής άποψης το μοντέλο χρησιμοποιεί την παρακάτω εξίσωση για τον υπολογισμό της δόσης σωματιδίων ανά ώρα .

$$H = \sum B C_i D E_{i,j}$$

Όπου H είναι ο ρυθμός δόσης των σωματιδίων σε $\frac{\mu g}{h}$

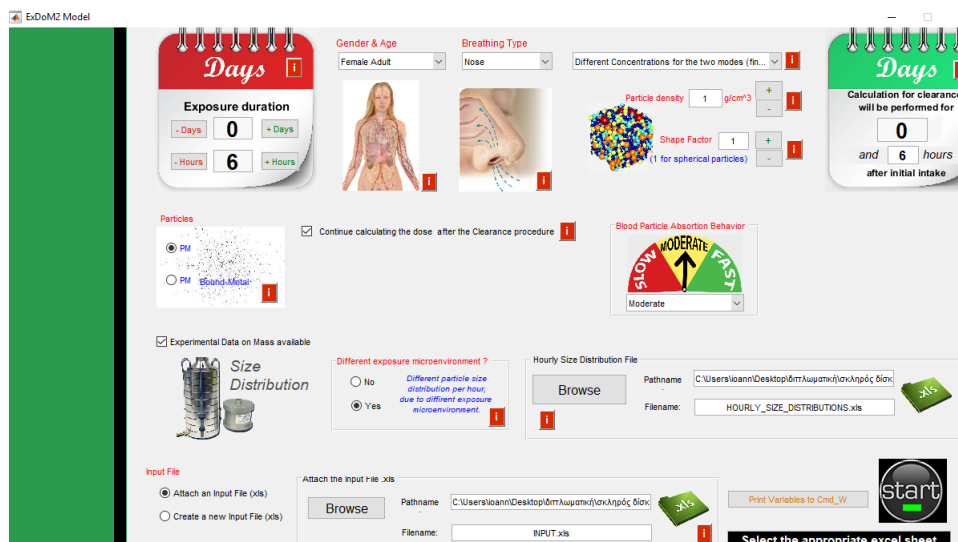
B είναι ο ρυθμός εισπνοής σε $\frac{m^3}{h}$

C_i είναι η συγκέντρωση σωματιδίων μεγέθους i σε $\frac{\mu g}{m^3}$ και

$D E_{i,j}$ είναι το κλάσμα εναπόθεσης σωματιδίων μεγέθους i στην περιοχή.

Λειτουργία του Μοντέλου ExDoM2 και της πλατφόρμας GUI.

Η χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου πραγματοποιείται μέσω μιας πλατφόρμας λογισμικού. Το γραφικό περιβάλλον διεπαφής (GUI) δημιουργήθηκε από τον Παπαγιάννη (2015) και επιτρέπει στον χρήστη την εισαγωγή των παραμέτρων αλλά και των δεδομένων τα οποία θα χρησιμοποιήσει το μοντέλο για την εφαρμογή του. Όλα τα προσφερόμενα αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσα από ένα απλό και διαδραστικό περιβάλλον, σε μια σελίδα web (Παπαγιάννης 2015). Εντός της πλατφόρμας αυτής δίνονται στο χρήστη επιλογές που αφορούν τόσο τα σωματίδια όσο και τον ίδιο τον άνθρωπο με σκοπό να δημιουργηθούν οι αντίστοιχες συνθήκες που πραγματοποιήθηκε το εκάστοτε πείραμα.



Εικόνα 15: Πλατφόρμα GUI(Παπαγιάννης 2015)

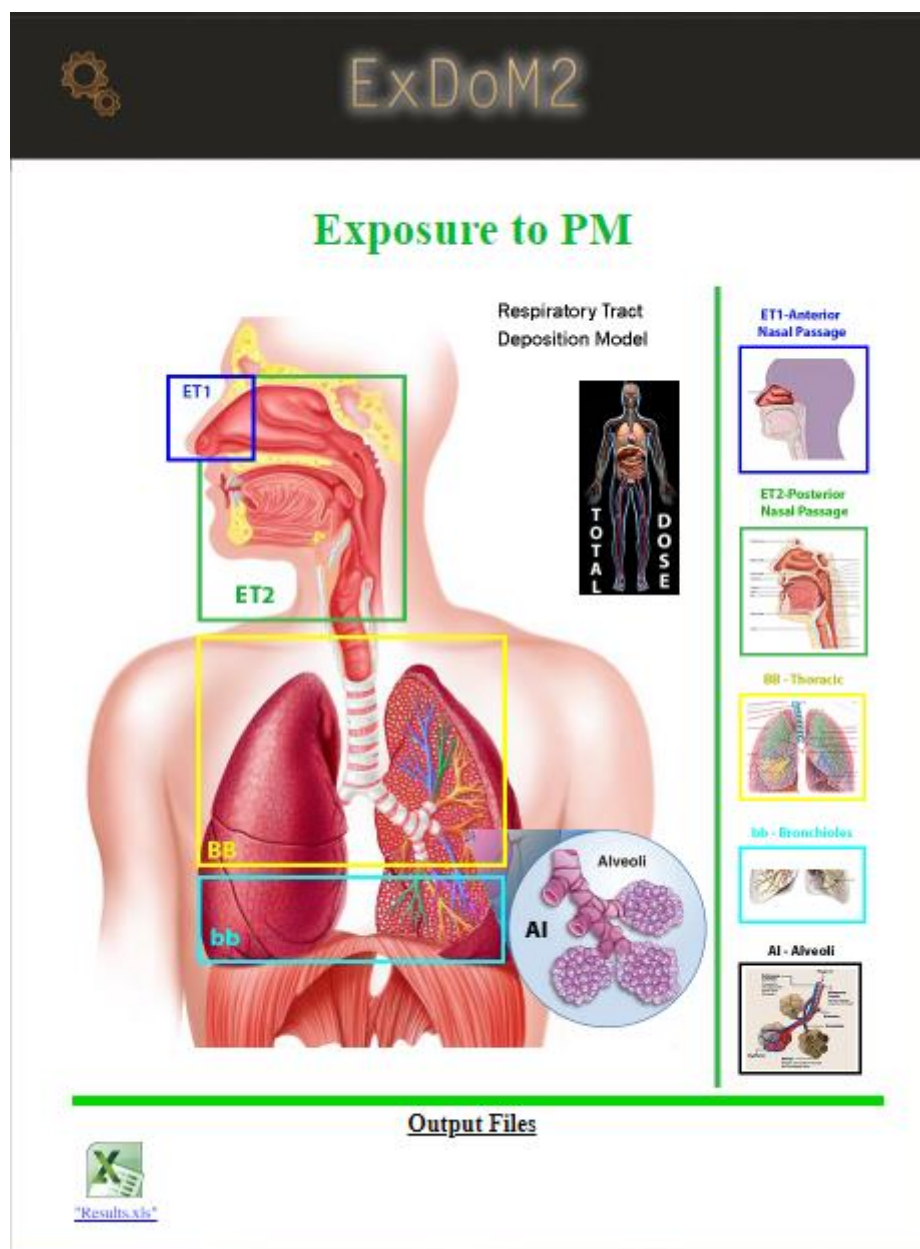
Αρχικά δίνεται η επιλογή στο χρήστη να επιλέξει τον τύπο συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων είτε αριθμού $[\frac{\#}{cm^3}]$ είτε μάζας $[\frac{\mu g}{m^3}]$. Για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε η συγκέντρωση μάζας και στην συνέχεια ο χρήστης μπορεί να κάνει επιλογή :

- του χρόνου έκθεσης με ακρίβεια ωρών
- του φύλου και της ηλικίας του εκτιθέμενου ατόμου
- το είδος δραστηριότητας (ύπνος, ανάπαυση , ελαφριά εργασία, βαριά εργασία)
- του τρόπου εισπνοής είτε από την μύτη είτε από το στόμα
- του τύπου δεδομένων συγκέντρωσης σωματιδίων είτε ξεχωριστές συγκεντρώσεις για λεπτά και χονδρά σωματίδια είτε μια συνολική συγκέντρωση για όλα τα σωματίδια
- την πυκνότητα $[\frac{g}{m^3}]$ των αιωρούμενων σωματιδίων
- των συντελεστή σχήματος. Συγκεκριμένα για τα σφαιρικά σωματίδια ο συντελεστής ισούται με ένα.
- το είδος στο οποίο μπορεί να επιλέξει PM σωματίδια ή PM-Bound-Metal όπου ο χρήστης θα επιλέξει κάποιο από τα διαθέσιμα μέταλλα.
- διαδικασία καθαρισμού.

Η συγκεκριμένη πλατφόρμα επιτρέπει την εισαγωγή δεδομένων με την μορφή αρχείων excel (input file) τα οποία περιέχουν τα εξής δεδομένα :

- τη συγκέντρωση των σωματιδίων
- την ταχύτητα του αέρα
- το επίπεδο σωματικής άσκησης του εκτιθέμενου
 - 1= ύπνος
 - 2=καθιστός, ανάπαυση
 - 3=ελαφριά εργασία
 - 4=βαριά εργασία
- κατανομή μεγέθους των σωματιδίων.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου παρουσιάζονται σε περιβάλλον δυναμικής ιστοσελίδας όπως φαίνεται στην εικόνα 16, πατώντας πάνω στις περιοχές του αναπνευστικού παρουσιάζεται η δόση που έχει λάβει. Επίσης ο χρήστης μπορεί να τα λάβει σε αρχείο με μορφή Excel το οποίο περιέχει όλες τις πληροφορίες συγκεντρωμένες για τις περιοχές εκτός θώρακος οι οποίες είναι η ET1 περιοχή (πρόσθια ρινική κοιλότητα) και η ET2 περιοχή (ύστερη ρινική κοιλότητα, λάρυγγα και φάρυγγα) καθώς και θώρακος (πνεύμονες) η οποία διαιρείται σε BB (τραχεία και βρόγχοι), bb (βρογχιόλια) και AI (κυψελιδική περιοχή), το οποίο το κατεβάζει πατώντας το αντίστοιχο κουμπί με το λογό του Excel.



Εικόνα 16: Παρουσίαση αποτελεσμάτων του προγράμματος ExDoM2 (Παπαγιάννης, 2015)

Κεφάλαιο 4^ο: Πειραματική διαδικασία

4.1 Εξωτερικό περιβάλλον

Με τον όρο εξωτερικό περιβάλλον αναφερόμαστε σε χώρους που έρχονται σε απευθείας επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα όπως είναι οι προαύλιοι χώροι του Πολυτεχνείου. Ο αέρας στην περιοχή του Πολυτεχνείου επηρεάζεται και από φυσικές και από ανθρωπογενείς πηγές. Στις φυσικές πηγές συγκαταλέγονται η θάλασσα η οποία απέχει 2km επιβαρύνοντας τον αέρα με σταγονίδια. Επιπλέον ο χώρος του πολυτεχνείου περιτριγυρίζεται από υπαίθριες εκτάσεις από τις οποίες γίνεται μεταφορά σκόνης. Σημαντική επιρροή στον ατμοσφαιρικό αέρα έχουν και τα μικρής διάρκειας φαινόμενα σκόνης από την γειτονική έρημο Σαχάρα από την οποία μεταφέρεται σκόνη λόγω των νότιων ανέμων αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις σε μεγάλο βαθμό και ξεπερνώντας τα όρια της Ευρωπαϊκής ένωσης. Για παράδειγμα στις 10 και 11 Ιανουαρίου του 2010 οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ ξεπερνούσαν τα $600 \frac{\mu g}{m^3}$ ενώ η μέγιστη ωριαία συγκέντρωση καταγράφηκε στις 19:00 και ήταν $1039,5 \frac{\mu g}{m^3}$ στο σταθμό του Ακρωτηρίου (Μαμμή-Γαλάνη Ελένη, 2010). Το φαινόμενο αυτό ήταν το εντονότερο που πραγματοποιήθηκε το 2010, παρόλα αυτά οι τιμές της συγκέντρωσης σε άλλα επεισόδια σκόνης είναι εξίσου μεγάλες όπως στις 18 Ιανουαρίου η μέγιστη συγκέντρωση ήταν $338,25 \frac{\mu g}{m^3}$ και μέση ημερήσια συγκέντρωση στα $162,51 \frac{\mu g}{m^3}$ (Μαμμή-Γαλάνη Ελένη, 2010).

Πέραν από τις φυσικές πηγές υπάρχουν και ανθρωπογενείς όπως τα συστήματα θέρμανσης εντός και εκτός του χώρου του Πολυτεχνείου καθώς και τα καυσαέρια από τα μέσα μεταφοράς, οι ανθρώπινες εργασίες όπως κηπουρική στους χώρους πράσινου, η κίνηση των ανθρώπων ειδικότερα στις ώρες αιχμής τα. Πάρα αυτά οι συγκεντρώσεις δεν είναι ιδιαίτερα υψηλές καθώς δεν υπάρχουν μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις στην περιοχή πέραν από το εργοστάσιο της ΔΕΗ το οποίο δεν επιβαρύνει την ατμόσφαιρα.

Στην συγκεκριμένη μελέτη θα εξετάσουμε τον χώρο γύρω από τα υπό μελέτη κτήρια και τις συγκεντρώσεις PM_{0,3-1}, PM_{1-2,5}, PM_{2,5-10}, PM_{2,5} και PM₁ που παρουσιάστηκαν με την βοήθεια των οργάνων OPS 3330 και Dust Trak II 8530. Λόγω αδυναμίας τοποθέτησης των οργάνων έξω ακριβώς από τους εσωτερικούς χώρους που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις θεωρήσαμε ότι η βέλτιστη τοποθεσία είναι το εργαστήριο Ατμοσφαιρικών Αιωρούμενων Σωματιδίων το οποίο βρίσκεται αρκετά κοντά και ταυτόχρονα δεν επηρεάζεται από εσωτερικές πηγές. Στην εικόνα 17 παρουσιάζεται η τοποθεσία των οργάνων, η οποία βρισκόταν σε χώρο που δεν υπήρχε κίνηση από φοιτητές και αυτοκίνητα.



Εικόνα 17: Σημείο μετρήσεων συγκέντρωση για το εξωτερικό περιβάλλον.

Με το όργανο Dust Trak 8530 πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις συγκέντρωσης μάζας των $PM_{2.5}$ για κάποιες ημέρες του Οκτώβρη και του Νοέμβρη και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 2: Στατιστικά στοιχεία για τα σωματίδια $PM_{2.5}$ του εξωτερικού χώρου τον μήνα Οκτώβρη

Ημερομηνία	Συγκέντρωση μάζας σωματιδίων $PM_{2.5}$ [$\frac{\mu g}{m^3}$]		
	27-Οκτ	30-Οκτ	31-Οκτ
Ελάχιστο	13	21	17
Μέγιστο	37	40	69
Μέση τιμή	20	25	30
Διάμεσο	20	25	28
Εκατοστημοριακή κατάταξη 95%	28	30	51
Εκατοστημοριακή κατάταξη 5%	21	22	19
Τυπική απόκλιση	4	3	10

Πίνακας 3 : Στατιστικά στοιχεία για τα σωματίδια $PM_{2.5}$ του εξωτερικού χώρου τον μήνα Νοέμβρη

Ημερομηνία	Συγκέντρωση μάζας σωματιδίων $PM_{2.5}$ [$\frac{\mu g}{m^3}$]							
	1-Νοε	2-Νοε	3-Νοε	4-Νοε	6-Νοε	7-Νοε	8-Νοε	27-Νοε
Ελάχιστο	17	22	22	17	26	19	17	18
Μέγιστο	107	121	115	42	78	95	104	31
Μέση τιμή	50	65	77	29	36	34	35	24
Διάμεσο	55	71	92	29	35	33	35	24
Εκατοστημοριακή κατάταξη 95%	84	107	106	39	48	51	56	29
Εκατοστημοριακή κατάταξη 5%	18	23	23	18	28	23	35	19

Τυπική απόκλιση	21	31	30	7	7	11	13	3
-----------------	----	----	----	---	---	----	----	---

Από του Πίνακες 2 και 3 μπορούμε να δούμε την διακύμανση της συγκέντρωσης μάζας των $PM_{2.5}$ για του μήνες Οκτώβριο και Νοέμβριο. Τις τελευταίες μέρες του Οκτωβρίου παρατηρήθηκε μέση τιμή $25 \pm 5,6 \frac{\mu g}{m^3}$ η οποία δεν διαφέρει καθόλου από την διάμεσο δείχνοντας μια σταθερή διακύμανση της συγκέντρωσης μάζας. Τις τρεις πρώτες μέρες του Νοεμβρίου παρατηρείται μια αύξηση της συγκέντρωσης με την μέση τιμή να φτάνει στα $64 \frac{\mu g}{m^3}$ και διαφορά μεταξύ μέσης τιμής και διαμέσου που οφείλεται σε λίγες αυξημένες τιμές. Η συγκέντρωση τις υπόλοιπες μέρες των μετρήσεων μειώνεται ξανά με την μέση τιμή να βρίσκεται κοντά στα $30 \frac{\mu g}{m^3}$. Επίσης παρατηρούμε και αύξηση στην τυπική απόκλιση μεταξύ των δύο μηνών η οποία υποδεικνύει το μεγάλο φάσμα τιμών που παίρνει η συγκέντρωση το μήνα Νοέμβριο.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία που προέκυψαν από τις μετρήσεις με το όργανο OPS μετά την μετατροπή τους σε συγκέντρωση μάζας και τον διαχωρισμό βάση διαμέτρου σε σωματίδια $PM_{0,3-1}$, $PM_{1-2,5}$ και $PM_{2,5-10}$.

Πίνακας 4: Στατιστικά στοιχεία για τα σωματίδια $PM_{0,3-1}$ του εξωτερικού χώρου.

$\left(\frac{\mu g}{m^3}\right)$	Συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων 0.3-1 μm											
	27-Οκτ	28-Οκτ	29-Οκτ	30-Οκτ	31-Οκτ	1-Νοε	2-Νοε	3-Νοε	4-Νοε	6-Νοε	7-Νοε	8-Νοε
Ελάχιστο	0,59	0,48	0,24	0,35	0,34	0,44	0,6	0,34	0,44	1	0,89	0,69
Μέγιστο	1,88	2,02	1,6	2,24	3,53	5	3,28	2,32	1,63	2,3	3,77	6,51
Μέση τιμή	0,9	1,01	0,55	0,89	0,69	0,69	1,1	0,89	0,81	1,46	1,41	1,89
Διάμεσος	0,89	0,95	0,46	0,9	0,7	0,65	0,94	0,85	0,73	1,46	1,29	1,71
Εκατοστημοριακή κατάταξη 95%	1,36	1,66	1,39	1,37	1,01	1,02	2,07	1,63	1,37	1,98	2,5	3,52
Εκατοστημοριακή κατάταξη 5%	0,65	0,52	0,3	0,39	0,39	0,48	0,66	0,42	0,53	1,07	0,96	0,78
Τυπική απόκλιση	0,21	0,37	0,3	0,29	0,28	0,3	0,46	0,38	0,26	0,28	0,48	0,96

Πίνακας 5: Στατιστικά στοιχεία για τα σωματίδια $PM_{1-2,5}$ του εξωτερικού χώρου

$\left(\frac{\mu g}{m^3}\right)$	Συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων 1-2.5 μm											
	27-Οκτ	28-Οκτ	29-Οκτ	30-Οκτ	31-Οκτ	1-Νοε	2-Νοε	3-Νοε	4-Νοε	6-Νοε	7-Νοε	8-Νοε
Ελάχιστο	1,52	0,39	1,07	2,67	1,54	1,36	1,24	0,42	0,55	0,76	0,61	1,29
Μέγιστο	13,1	10,35	11,91	9,03	5,17	3,41	2,57	2,71	7,93	2,66	2,95	5,6
Μέση τιμή	2,04	2,6	3,37	5,17	3,11	1,82	1,77	1,27	2,13	1,22	1,14	2,22
Διάμεσος	1,97	2,31	3,12	5,02	2,92	1,76	1,74	1,24	2,05	1,23	1,07	1,9
Εκατοστημοριακή κατάταξη 95%	2,58	4,56	6,69	8,13	4,28	2,34	2,17	1,96	4	1,49	1,71	3,68
Εκατοστημοριακή κατάταξη 5%	1,68	0,61	1,39	3,14	1,94	1,54	1,45	0,62	0,83	0,89	0,77	1,44
Τυπική απόκλιση	0,47	1,34	1,74	1,52	0,81	0,24	0,22	0,4	1,05	0,18	0,3	0,83

Πίνακας 6: Στατιστικά στοιχεία για τα σωματίδια PM_{2,5-10} του εξωτερικού χώρου

$\left(\frac{\mu g}{m^3}\right)$	Συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων 2,5-10 μm											
	27- Οκτ	28- Οκτ	29- Οκτ	30- Οκτ	31- Οκτ	1-Νοε	2-Νοε	3-Νοε	4-Νοε	6-Νοε	7-Νοε	8-Νοε
Ελάχιστο	3,86	1,78	2,15	5,11	2,86	3,44	1,84	0,17	0,18	1,69	1,14	2,66
Μέγιστο	23,5	21,07	20,62	28,25	16,72	16,77	16,41	10,63	24	18,16	80,57	48,34
Μέση τιμή	8,42	7,4	9,69	13,32	9,48	7,81	6,96	3,86	5,97	4,35	3,87	9,56
Διάμεσος	7,52	7,17	10,32	12,9	10,07	7,15	6,83	3,64	4,62	4,21	3,5	8,49
Εκατοστημοριακή κατάταξη 95%	12,86	11,99	15,1	19,54	13,45	13,02	9,72	7,56	12,43	6,76	6,57	17,37
Εκατοστημοριακή κατάταξη 5%	5,26	3,2	3,49	7,99	4,74	5,34	4,56	0,85	1,21	2,49	1,95	4,33
Τυπική απόκλιση	2,6	2,7	3,76	3,5	2,69	2,31	1,61	1,97	3,97	1,53	2,63	4,59

Τον μήνα Οκτώβρη η ημερήσια μέση για τα υπέρλεπτα σωματίδια κυμάνθηκε μεταξύ 0,2 έως και 3,5 $\frac{\mu g}{m^3}$ με την μέση τιμή να είναι $0,8 \pm 0,3 \frac{\mu g}{m^3}$ ενώ τον μήνα Νοέμβρη παρατηρείται μια αύξηση με την ημερήσια μέση συγκέντρωση να λαμβάνει τιμές από 0,4 έως 6,5 $\frac{\mu g}{m^3}$ και την μέση τιμή να είναι στα $1,2 \pm 0,5 \frac{\mu g}{m^3}$. Έντονη διαφορά παρουσιάζεται στις 8 Νοεμβρίου όπου η τυπική απόκλιση είναι διπλάσια και τριπλάσια από των άλλων ημερών το οποίο μπορεί να οφείλεται στην αλλαγή της κατεύθυνσης του ανέμου το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση αιωρούμενων σωματιδίων από διαφορετικές πηγές, καθώς και στις 29 Οκτώβρη όπου παρατηρείται πολύ χαμηλή μέση τιμή της συγκέντρωσης.

Τα λεπτά σωματίδια παρουσιάζουν μεγαλύτερη ημερήσια μέση συγκέντρωση μάζας από τα υπέρλεπτα με την μέση συγκέντρωση για τον μήνα Οκτώβρη να είναι στα $3,3 \pm 1,2 \frac{\mu g}{m^3}$ ενώ τον μήνα Νοέμβρη πέφτει στα $1,7 \pm 0,5 \frac{\mu g}{m^3}$. Η διαφορά της μέσης τιμής από την διάμεσο είναι σχεδόν μηδαμινή υποδεικνύοντας μια σταθερή διακύμανση της συγκέντρωσης των λεπτών σωματιδίων. Αντίθετα η τυπική απόκλιση παρουσιάζει διακυμάνσεις ειδικά για τις μέρες 28, 29, και 30 του Οκτωβρίου και 4 Νοεμβρίου όπου οι τιμές ξεπερνούν αρκετά τις υπόλοιπες.

Όσον αφορά τα χονδρά σωματίδια τις τελευταίες μέρες του Οκτώβρη (1,8 έως 28 $\frac{\mu g}{m^3}$) παρουσιάζεται μεγαλύτερη ημερήσια μέση συγκέντρωση από ότι τον μήνα Νοέμβρη (0,17 έως 80,6 $\frac{\mu g}{m^3}$), η οποία ξεκινά από τα $9,7 \pm 4,6 \frac{\mu g}{m^3}$ και στην συνέχεια πέφτει στα $6 \pm 2,7 \frac{\mu g}{m^3}$, αν και στις 7 και στις 8 Νοεμβρίου παρουσιάζονται δύο μέγιστες τιμές πολύ μεγαλύτερες από τις τιμές του Οκτωβρίου.

Σημαντικό ρόλο στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα παίζουν τα καιρικά φαινόμενα που επικρατούν στην περιοχή. Ο άνεμος επαναιωρεί και μεταφέρει αιωρούμενα σωματίδια σε μεγάλες αποστάσεις και η βροχή τα οδηγεί σε καθίζηση. Επίσης τα καιρικά φαινόμενα επηρεάζουν και την ανθρώπινη δραστηριότητα η οποία κατέχει σημαντικό ρόλο στις συγκεντρώσεις των σωματιδίων. Για παράδειγμα όταν επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες η κίνηση των φοιτητών στο πολυτεχνείο μειώνεται. Κατά την περίοδο των δειγματοληψιών τα μετεωρολογικά δεδομένα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 7: Μετεωρολογικά δεδομένα για τις 27 έως και 31 Οκτωβρίου

	Θερμοκρασία	Υγρασία	Ταχύτητα ανέμου
Ελάχιστο	13,6	56,0	0,0
Μέγιστο	24,5	93,0	27,4
Μέση τιμή	17,6	78,1	8,9
Τυπική απόκλιση	2,4	9,4	4,8

Πίνακας 8: Μετεωρολογικά δεδομένα για τις 1 έως και 8 Νοεμβρίου

	Θερμοκρασία	Υγρασία	Ταχύτητα ανέμου
Ελάχιστο	11,6	48,0	0,0
Μέγιστο	24,1	93,0	20,9
Μέση τιμή	16,1	74,6	7,2
Τυπική απόκλιση	2,3	8,0	4,4

Η διαφορά στις συγκεντρώσεις των υπέρλεπτων σωματιδίων μεταξύ των δύο μηνών μπορεί να οφείλεται στην διαφορά της ταχύτητας του ανέμου καθώς τον μήνα Οκτώβρη η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου φτάνει τα $27 \pm 4,8 \frac{km}{h}$ ενώ τον Νοέμβρη μειώνεται στα $20 \pm 4,4 \frac{km}{h}$. Επίσης σημαντικό καιρικό φαινόμενο είναι η βροχή καθώς εξαναγκάζει τα μεγαλύτερα σωματίδια σε καθίζηση λόγω βαρύτητας. Στις 31/10 έβρεξε για περίπου 2 ώρες μεταξύ 12:00 και 14:00 όπου τις συγκεκριμένες ώρες η συγκέντρωση των $PM_{2,5-10}$ μειώθηκε στα $5 \frac{\mu g}{m^3}$ ενώ η συγκέντρωση των $PM_{1-2,5}$ δεν παρουσίασε καμία αλλαγή. Σε αντίστοιχο φαινόμενο βροχής στις 4 Νοεμβρίου η συγκέντρωση των $PM_{2,5-10}$ δεν φαίνεται να επηρεάζεται καθόλου.

Κατά την διάρκεια μια ημέρας οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων αλλάζουν, είτε λόγω των καιρικών φαινομένων είτε λόγω της κίνησης που υπάρχει στο χώρο. Βασική διαφορά στην κίνηση εντός του χώρου του Πολυτεχνείου αποτελούν οι πρωινές ώρες/εργασίμες ώρες (07:00 έως 18:00) σε σχέση με τις υπόλοιπες ώρες τις ημέρας.

Πίνακας 9: Στατιστικά στοιχεία της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων $PM_{0,3-1}$, $PM_{1-2,5}$ και $PM_{2,5-10}$ για πρωινές και βραδινές ώρες.

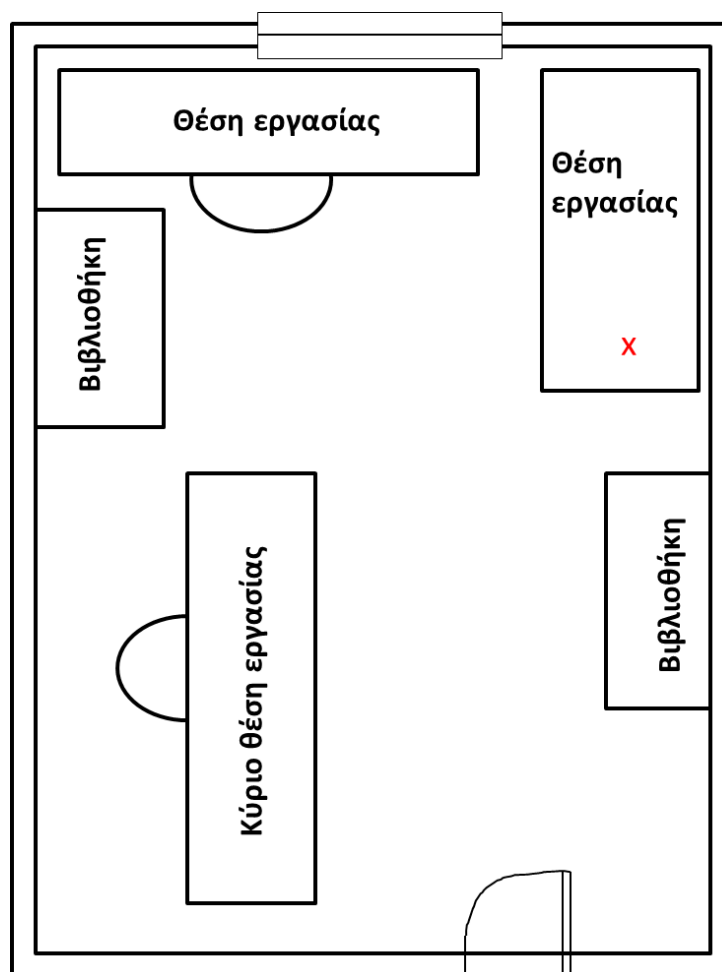
		0.3-1 μm	1-2.5 μm	2,5-10 μm
Πρωινές ώρες	Ελάχιστο	0,2	0,3	2,1
	Μέγιστο	2,2	9,0	28,0
	Μέση τιμή	0,8	2,8	9,2
Βραδινές ώρες	Ελάχιστο	0,3	0,3	1,8
	Μέγιστο	2,0	11,9	23,4
	Μέση τιμή	0,9	3,1	10,3

Από τον Πίνακα 9 παρατηρούμε ότι δεν εμφανίζεται μεγάλη αλλαγή μεταξύ των πρωινών και των βραδινών ωρών συμπεραίνοντας ότι η κίνηση εντός του

Πολυτεχνείου από φοιτητές και αυτοκίνητα δεν επηρεάζει σημαντικά τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων.

4.2 Χώρος Μελέτης : Γραφείο K1.114

Ο εξεταζόμενος γραφειακός χώρος βρίσκεται στον 1^ο όροφο του υπό μελέτη κτηρίου K1. Περιλαμβάνει ένα παράθυρο, που συνδέεται με έναν ακάλυπτο χώρο, ο οποίος περιλαμβάνει δρόμο για αυτοκίνητα και πεζοδρόμια με φυτοκάλυψη, και μία πόρτα που το γραφείο με τον διάδρομο και με τα υπόλοιπα γραφεία που υπάρχουν στον όροφο.



Εικόνα 18:Σκαρίφημα του Γραφείου

Κύρια χρήση του χώρου γινόταν από ένα άτομο, με εξαίρεση ελάχιστες περιπτώσεις που υπήρχαν επισκέπτες στο χώρο για πολύ μικρό χρονικό διάστημα, με τον αριθμό των ατόμων να κυμαίνεται από 2 έως και 5 άτομα. Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για 3 εργάσιμες μέρες στα τέλη Οκτώβρη κατά τις οποίες το γραφείο ήταν ανοιχτό για 5 ώρες συνολικά. Σε αυτό το χρονικό διάστημα η παρουσία ατόμων στο χώρο κυμάνθηκε από 1 έως 5 άτομα. Κατά την διάρκεια που ο χρήστης βρισκόταν μέσα στο γραφείο η πόρτα και το παράθυρο δεν ήταν πάντα ανοιχτά. Η πόρτα παρέμεινε ανοιχτή για μία ώρα από τις 5 ώρες που χρησιμοποιήθηκε ο

χώρος, ενώ το παράθυρο 4 ώρες (ανάκληση). Επιπλέον έγιναν μετρήσεις και το Σαββατοκύριακο 28 και 29 Οκτωβρίου όπου ο χώρος παρέμεινε κλειστός καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας.

Οι δραστηριότητες μέσα στο γραφείο ήταν ελάχιστες και περιλάμβαναν κυρίως τη χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή και την μετακίνηση εγγράφων ή το περπάτημα του χρήστη το οποίο ήταν ελάχιστο.

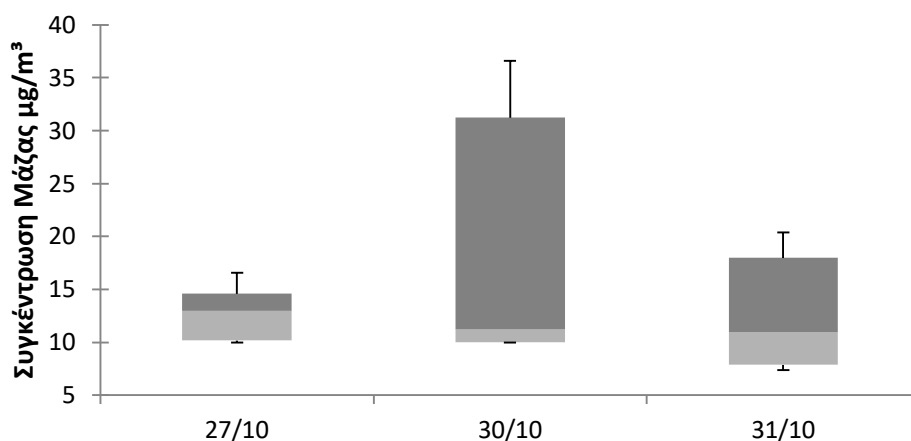
Όσον αφορά τον εξοπλισμό του γραφείου, υπήρχαν 3 θέσεις εργασίας (τραπέζια υπολογιστών) εκ των οποίων το ένα χρησιμοποιούσε συχνότερα ο χρήστης και τα άλλα δύο χρησιμοποιούνταν κυρίως για τοποθέτηση εγγράφων, βιβλίων κλπ. Επιπλέον υπήρχαν δύο βιβλιοθήκες με τζάμι, οι οποίες περιείχαν βιβλία. Στη θέση εργασίας που χρησιμοποιούσε ο χρήστης υπήρχε ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής ο οποίος ήταν σε λειτουργία συγκεκριμένες ώρες και ένα εκτυπωτής ο οποίος λειτούργησε μόνο μία φορά για 10 λεπτά. Η θέση εργασίας που χρησιμοποιούσε ο χρήστης βρισκόταν δίπλα στην πόρτα και περίπου ένα μέτρο από το παράθυρο όπως φαίνεται και στην εικόνα 10.

Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από τις 27 Οκτωβρίου (Παρασκευή) έως και τις 31 Οκτωβρίου (Τρίτη) εκτός του Σαββατοκύριακου, με σκοπό την έρευνα της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ και αριθμού των $PM_{1.}$. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τα όργανα Dustrak II (μοντέλο 8532), P-trak (μοντέλο 8525) και OPS (μοντέλο 3330) τα οποία ήταν τοποθετημένα στο σημείο χ όπως φαίνεται στο παραπάνω σκαρίφημα (εικόνα18), αρκετά κοντά στο παράθυρο και σε απόσταση ενός μέτρου από την πόρτα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 10.

Πίνακας 10: Στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων μάζας σωματιδίων $PM_{2.5}$ και αριθμού για το χώρο το γραφείου

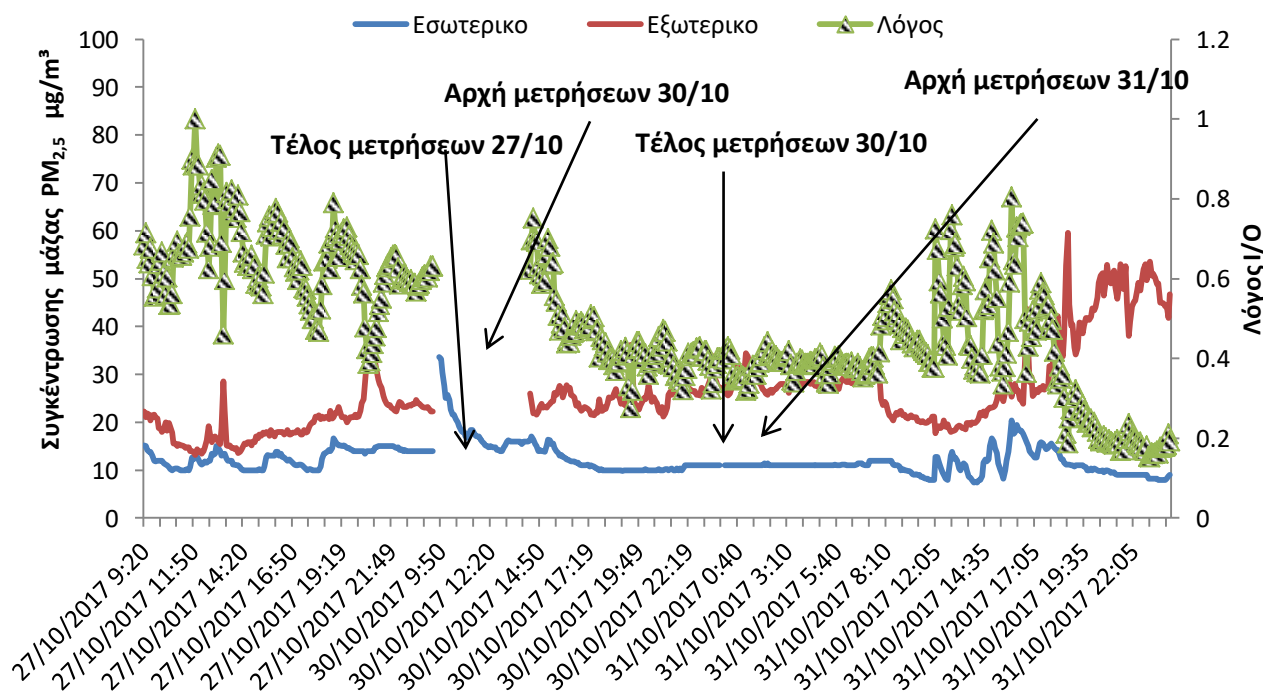
	Συγκέντρωση μάζας σωματιδίων $PM_{2.5}$ [$\mu g/m^3$]			Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων PM_1 [#/ cm^3]		
	27/10	30/10	31/10	27/10	30/10	31/10
Ελάχιστο	10	10	7	1114	2038	2781
Μέγιστο	17	34	20	8113	11188	7521
Μέση τιμή	13	14	11	1654	4779	4786
Διάμεσος	13	11	11	1519	3906	4824
Εκατοστημοριακή κατάταξη 95%	15	22	16	2614	9312	7202
Εκατοστημοριακή κατάταξη 5%	10	10	8	1173	2393	3124
Τυπική απόκλιση	2	4	2	552	1950	1253

Με το όργανο Dust Trak II μετρήθηκε η συγκέντρωση μάζας των $PM_{2.5}$ για τρεις εργάσιμες μέρες, η οποία κυμάνθηκε από 7 έως 34 $\frac{\mu g}{m^3}$, με την ημερήσια μέση τιμή και τη σχετική απόκλιση να είναι ίσες με $12,7 \pm 2,7 \frac{\mu g}{m^3}$. Τα αποτελέσματα του πίνακα παρουσιάζονται και με τη μορφή διαγραμμάτων Whisker στο σχήμα 1.



Σχήμα 1: Διάγραμμα Whisker για την συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων $\text{PM}_{2.5}$ εντός του γραφείου.

Από τον πίνακα 10 και το σχήμα 1 παρατηρούμε ότι η διάμεσος και η μέση τιμή δεν έχουν καμία διαφορά για το σύνολο των ημερών κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα μη ύπαρξης έντονων αυξομειώσεων της συγκέντρωσης. Η μεταβολή της συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων $\text{PM}_{2.5}$ για το συνολικό διάστημα των μετρήσεων παρουσιάζεται στο σχήμα 2 σε συνδυασμό με τις συγκεντρώσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος για τις αντίστοιχες μέρες και τον λόγο εσωτερικού με εξωτερικό περιβάλλον ο οποίος βοηθά στην κατανόηση της διαφοράς των συγκεντρώσεων στα δύο αυτά περιβάλλοντα.



Σχήμα 2: Διάγραμμα μεταβολής της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων $\text{PM}_{2.5}$ εντός του χώρου του γραφείου και του εξωτερικού περιβάλλοντος καθώς και ο λόγος (I/O)

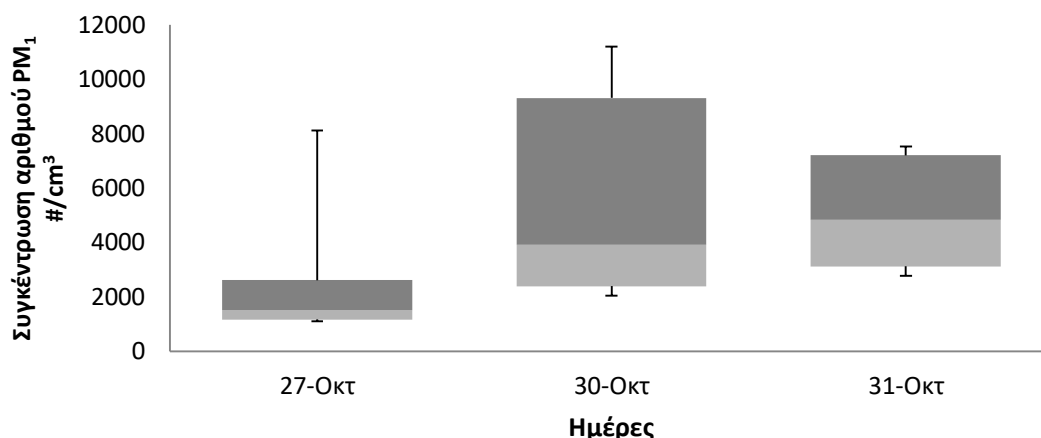
Από το σχήμα 2 παρατηρούμε ότι η συγκέντρωση έχει σταθερή διακύμανση για όλες τις ημέρες με εξαίρεση στις 30/10 όπου η συγκέντρωση ξεκινά πάνω από τα $30 \frac{\mu g}{m^3}$ και στην συνέχεια επανέρχεται σε συγκεντρώσεις κοντά στα $10 \frac{\mu g}{m^3}$ όπως τις υπόλοιπες ημέρες.

Πραγματοποιήθηκε και σύγκριση μεταξύ της χρονικής περιόδου χρήσης του χώρου και 10 λεπτά πριν όπως και 10 λεπτά μετά από αυτήν με σκοπό να ερευνηθεί η πιθανή επίδραση που υπάρχει από τις δραστηριότητες του χρήστη. Παρόλα αυτά δεν εμφανίστηκε καμία αύξηση στις τιμές της συγκέντρωσης των σωματιδίων $PM_{2.5}$. Αναλυτικότερα στην περίπτωση χρήσης του χώρου η μέση συγκέντρωση για τις 27/10 είναι στα $14 \pm 1,4 \frac{\mu g}{m^3}$ και για τις 30/10 στα $17 \pm 0,3 \frac{\mu g}{m^3}$ ενώ πριν και μετά την χρήση του χώρου είναι στα $16,6 \pm 1,8$ και $16 \pm 0,4 \frac{\mu g}{m^3}$ για τις δύο μέρες αντίστοιχα.

Σε αντίστοιχη μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε άλλα 2 γραφεία το Κτηρίου K1 το 2013 από την Νικολέτα Γρυδάκη στα πλαίσια της Μεταπτυχιακής της διατριβής οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων $PM_{2.5}$ κυμάνθηκαν από 13 έως $88 \frac{\mu g}{m^3}$ (μέση τιμή: $18 \frac{\mu g}{m^3}$) τον μήνα Νοέμβριο και σε ένα διπλανό γραφείο 4 και $124 \frac{\mu g}{m^3}$ (μέση τιμή: $19 \frac{\mu g}{m^3}$). Τα δύο αυτά γραφεία είχαν χρησιμοποιηθεί από περισσότερα από του ενός άτομα κατά την διάρκεια των δειγματοληψιών, με την πόρτα των γραφείων για αρκετές ώρες ανοιχτή και με εντονότερη χρήση των υπολογιστών. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στις προηγούμενες μετρήσεις ότι βρίσκονταν σε εξέλιξη εργασίες κατασκευής του διπλανού κτηρίου με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος κυμάνθηκαν σε εύρος από 14 έως $50 \frac{\mu g}{m^3}$ και κατά συνέπεια και του εσωτερικού.

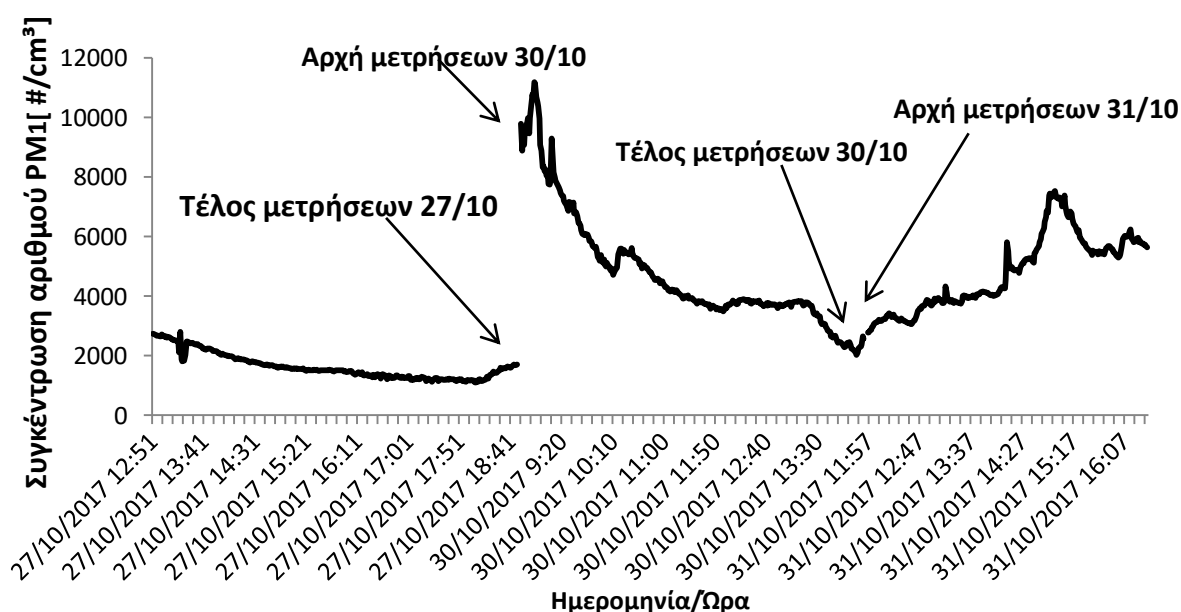
Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται και η διακύμανση της συγκέντρωσης του εξωτερικού περιβάλλοντος η οποία είναι σχεδόν διπλάσια από του εσωτερικού με την μέση συγκέντρωση να είναι στα $25 \pm 5,7 \frac{\mu g}{m^3}$ και $12,7 \pm 2,7 \frac{\mu g}{m^3}$ αντίστοιχα και κατ επέκταση ο λόγος να βρίσκεται κάτω από την μονάδα (μεταξύ 0,3 έως 0,6). Οι διακυμάνσεις των δύο περιβαλλόντων δεν φαίνεται να συσχετίζονται στο σχήμα 2 το οποίο αποδεικνύει και ο δείκτης συσχέτισης R^2 ο οποίος κυμάνθηκε μεταξύ 0,02 και 0,05.

Την ίδια χρονική περίοδο μετρήθηκε και ο αριθμός των σωματιδίων PM_{10} και τα αποτελέσματα των μετρήσεων εμφανίζονται στον πίνακα 10 καθώς και με μορφή whisker στο σχήμα 3.



Σχήμα 3: Διάγραμμα Whisker με την διακύμανση του αριθμού των σωματιδίων PM₁ εντός του γραφείου

Ο αριθμός των σωματιδίων PM₁ κυμάνθηκε μεταξύ 1114 και 11188 $\frac{\#}{\text{cm}^3}$ με την μέση τιμή στα $3739,7 \pm 1251,7 \frac{\#}{\text{cm}^3}$. Η διάμεσος διαφέρει ελάχιστα (8%) από την μέση τιμή για όλες τις ημέρες μετρήσεων το οποίο επισημαίνει ότι δεν υπήρχαν έντονες αυξομειώσεις στην συγκέντρωση αριθμού. Η μεταβολή του αριθμού των σωματιδίων PM₁ παρουσιάζεται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4: Διάγραμμα διακύμανσης αριθμού των σωματιδίων PM₁ εντός του γραφείου

Η διακύμανση της συγκέντρωσης αριθμού παρουσιάζει εντονότερη διακύμανση σε σχέση με αυτήν της συγκέντρωσης μάζας των PM_{2.5}. Τις δύο πρώτες μέρες μετρήσεων η συγκέντρωση αριθμού μειώνεται με το πέρασμα της ημέρας ενώ την τρίτη μέρα μετρήσεων συμβαίνει το αντίθετο το οποίο μπορεί να οφείλεται στην αύξηση των συγκεντρώσεων στο εξωτερικό περιβάλλον όπως είδαμε στο σχήμα 3. Οι υψηλότερες τιμές εμφανίστηκαν τις πρωινές ώρες στις 30/11 όπως συνέβη και με

τις συγκέντρωση μάζας των PM_{2,5} το οποίο δεν γνωρίζουμε που οφείλεται καθώς δεν υπάρχει δυνατότητα σύγκρισης με τις εξωτερικές συγκεντρώσεις λόγω σφάλματος του οργάνου και κατ επέκταση απουσία μετρήσεων.

Γενικότερα η χρήση του γραφείου ήταν ελάχιστη για τις μέρες που πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις με τον χρήστη να βρίσκεται στο χώρο για περίπου μια με δύο ώρες την μέρα σε σύντομα χρονικά διαστήματα. Κατά κύριο λόγο ο χώρος του γραφείου παρέμενε κλειστός αλλά ακόμα και όταν γινόταν χρήση αυτού οι συγκεντρώσεις μάζας και ο αριθμού των σωματιδίων δεν παρουσίασαν κάποια διαφορά. Για παράδειγμα στις 27/10 ο χρήστης βρέθηκε στο γραφείο για 2,5 ώρες συνολικά με την μέση συγκέντρωση αριθμού $1656,1 \frac{\#}{\text{cm}^3}$ ενώ τις υπόλοιπες ώρες που ο χρήστης δεν βρισκόταν στο γραφείο ήταν $1632,2 \frac{\#}{\text{cm}^3}$.

Πιθανές πηγές στον εσωτερικό χώρο μπορεί να η χρήση του εκτυπωτή (Scungio et al.,2017) αν και στην παρούσα μελέτη η δεκάλεπτη χρήση του δεν επηρέασε τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM_{2,5} και PM₁.Επίσης η μετακίνηση εγγράφων και βιβλίο προκαλεί επαναιώρηση σκόνη αν και δεν καταγράφηκε κάποια αντίστοιχο περιστατικό.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις του οργάνου OPS 3330 για τα σωματίδια με διάμετρο 0,3 έως 10 μm στους παρακάτω πίνακες 11 και 12. Με το συγκεκριμένο όργανο μετρήθηκε και το Σαββατοκύριακο 28 και 29 Νοεμβρίου με σκοπό να την έρευνα της συμπεριφορά των σωματιδίων σε ένα κλειστό χώρο για όλο το 24ώρο χώρο.

Πίνακας 11: Στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων μάζας PM_{0,3-1} και PM_{1-2,5} για το χώρο το γραφείου

$\left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}\right)$	0,3-1 μm					1-2,5 μm				
	27/10	28/10	29/10	30/10	31/10	27/10	28/10	29/10	30/10	31/10
Ελάχιστο	0,72	0,61	0,27	0,36	0,41	0,53	0,26	0,21	1,26	0,75
Μέγιστο	1,09	1,74	1,24	2,44	1,95	3,32	2,70	3,17	6,16	3,51
Μέση τιμή	0,89	1,04	0,56	0,84	0,79	1,35	1,11	1,43	2,58	1,61
Διάμεσος	0,88	0,93	0,45	0,74	0,68	1,24	0,91	1,49	2,39	1,45
Εκατοστημοριακή κατάταξη 95%	1,03	1,68	1,16	1,35	1,34	2,22	2,27	2,73	4,08	2,64
Εκατοστημοριακή κατάταξη 5%	0,74	0,65	0,29	0,38	0,53	0,76	0,39	0,33	1,49	0,92
Τυπική απόκλιση	0,10	0,33	0,28	0,33	0,28	0,44	0,58	0,78	0,86	0,57

Πίνακας 12: Στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων μάζας PM_{2,5-10} για το χώρο το γραφείου

$\left(\frac{\mu g}{m^3}\right)$	2,5-10 μm				
	27/10	28/10	29/10	30/10	31/10
Ελάχιστο	0,24	0,01	0,00	0,16	0,13
Μέγιστο	27,56	2,67	3,64	23,22	75,94
Μέση τιμή	3,45	0,65	0,78	2,16	2,50
Διάμεσος	1,86	0,59	0,45	1,37	1,10
Εκατοστημοριακή κατάταξη 95%	11,28	1,38	2,34	8,34	9,86
Εκατοστημοριακή κατάταξη 5%	0,57	0,18	0,03	0,44	0,38
Τυπική απόκλιση	3,81	0,37	0,77	2,67	3,76

Οι συγκεντρώσεις των υπέρλεπτων σωματιδίων κυμαίνονται μεταξύ 0,36 έως και $2,44 \frac{\mu g}{m^3}$ (μέση τιμή: $0,84 \pm 0,2 \frac{\mu g}{m^3}$) για τις ημέρες που λειτουργούσε το Πολυτεχνείο ενώ το Σαββατοκύριακο οι τιμές της συγκέντρωσης κυμάνθηκαν μεταξύ 0,27 έως και $1,74 \frac{\mu g}{m^3}$ (μέση τιμή: $0,8 \pm 0,3 \frac{\mu g}{m^3}$). Παρατηρούμε ότι η συγκέντρωση των PM_{0,3-1} δεν παρουσιάζει αλλαγή κατά την περίοδο που το γραφείο δεν χρησιμοποιείται, υποδεικνύοντας την προέλευση των υπέρλεπτων σωματιδίων να είναι από το εξωτερικό περιβάλλον λόγω αερισμού. Όσο για τα λεπτά σωματίδια οι συγκεντρώσεις κατά τις εργάσιμες ημέρες κυμάνθηκαν μεταξύ 0,53 μέχρι $6,16 \frac{\mu g}{m^3}$ (μέση τιμή : $1,8 \pm 0,6 \frac{\mu g}{m^3}$) ενώ τις άλλες δύο ημέρες από 0,21 έως $3,17 \frac{\mu g}{m^3}$ (μέση τιμή: $1,2 \pm 0,6 \frac{\mu g}{m^3}$), παρουσιάζοντας μια μικρή ελάττωση τις ημέρες που δεν υπάρχουν δραστηριότητες εντός του γραφείου. Στα σωματίδια PM_{2,5-10} παρουσιάζεται πολύ μεγάλη διαφορά μεταξύ των εργάσιμων και μη ημερών καθώς τις εργάσιμες ημέρες η μέση τιμή της συγκέντρωσης είναι $2,7 \pm 3,4 \frac{\mu g}{m^3}$ ενώ το Σαββατοκύριακο είναι $0,7 \pm 0,6 \frac{\mu g}{m^3}$. Αυτή η διαφορά οδηγεί στο συμπέρασμα της ύπαρξης εσωτερικών πηγών εντός του γραφείου κατά την διάρκεια των εργάσιμων ημερών και την μη συσχέτιση με το εξωτερικό περιβάλλον. Αντίστοιχο φαινόμενο παρουσιάστηκε και στην μεταπτυχιακή διατριβή της Γρυδάκη Νικολέτας σε αντίστοιχο γραφείο του κτηρίου K1, όπου η συγκέντρωση των PM₁₀ μειώθηκε λίγο το Σάββατο και υποδιπλασιάστηκε την Κυριακή, ενώ τις εργάσιμες ημέρες κατά την χρήση του γραφείου οι τιμές διπλασιάστηκαν σχεδόν. Επίσης για τα χονδρά σωματίδια παρατηρείται διαφορά μεταξύ της διαμέσου και της μέσης τιμής της συγκέντρωσης καθώς υψηλές τιμές στην τυπική απόκλιση, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει για τα λεπτά και υπέρλεπτα σωματίδια, δείχνοντας την ύπαρξη αυξημένων τιμών κατά την διάρκεια των μετρήσεων πιθανόν από στιγμιαίες πηγές.

Ίδιος διαχωρισμός διαμέτρων πραγματοποιήθηκε και για το εξωτερικό περιβάλλον με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στους πίνακες 4, 5 και 6. Η σύγκριση του εσωτερικού με το εξωτερικό περιβάλλον πραγματοποιείται με την χρήση του λόγου I/O, ο οποίος ουσιαστικά είναι ο λόγος της συγκέντρωσης μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος και έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη σύγκριση τιμών ως προ το ποια τιμή είναι υψηλότερη. Τα στατιστικά

αποτελέσματα του λόγου παρουσιάζονται στους πίνακες 13 και 14. Επίσης στους πίνακες αυτούς παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα για τον δείκτη συσχέτισης R^2 του οποίου οι τιμές δείχνουν την επιρροή του εξωτερικού περιβάλλοντος στον αντίστοιχο εσωτερικό χώρο.

Πίνακας 13: Στατιστικά στοιχεία σύγκρισης γραφείου και εξωτερικού περιβάλλοντος για τα σωματίδια $PM_{0,3-1}$, $PM_{1-2,5}$.

		0.3-1 μm					1-2.5 μm				
		27-Οκτ	28-Οκτ	29-Οκτ	30-Οκτ	31-Οκτ	27-Οκτ	28-Οκτ	29-Οκτ	30-Οκτ	31-Οκτ
Λόγος	Συσχέτιση	0,37	0,47	0,82	0,25	0,06	0,00	0,70	0,63	0,25	0,11
	Ελάχιστο	0,46	0,53	0,58	0,39	0,22	0,26	0,19	0,13	0,48	0,27
	Μέγιστο	1,40	1,73	1,74	2,44	5,75	1,96	1,24	0,74	0,56	1,28
	Μέση τιμή	1,02	1,09	1,04	0,97	1,36	0,69	0,47	0,41	0,51	0,52
	Τυπική απόκλιση	0,16	0,30	0,21	0,29	0,91	0,26	0,18	0,13	0,03	0,18

Πίνακας 14: Στατιστικά στοιχεία σύγκρισης γραφείου και εξωτερικού περιβάλλοντος για τα σωματίδια $PM_{2,5-10}$.

		2,5-10 μm				
		27-Οκτ	28-Οκτ	29-Οκτ	30-Οκτ	31-Οκτ
Λόγος	Συσχέτιση	0,03	0,08	0,19	0,12	0,06
	Ελάχιστο	0,03	0,00	0,00	0,01	0,01
	Μέγιστο	6,03	0,44	0,35	1,58	21,70
	Μέση τιμή	0,49	0,10	0,07	0,16	0,34
	Τυπική απόκλιση	0,63	0,06	0,07	0,17	0,73

Όσον αφορά την συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων $PM_{0,3-1}$ στο εσωτερικό περιβάλλον παρατηρείται ότι ακολουθεί την ίδια διακύμανση με αυτή του εξωτερικού με σχεδόν ίδιες τιμές (μέση τιμή εξωτερικού: $0,81 \pm 0,29 \frac{\mu g}{m^3}$), από τις οποίες μάλιστα προκύπτει και ο λόγος να ισούται με την μονάδα για το μεγαλύτερο μέρος των μετρήσεων, με εξαίρεση την τελευταία ημέρα μετρήσεων 31/10 όπου έχουμε πτώση στην συγκέντρωση του εξωτερικού περιβάλλοντος και ταυτόχρονα αύξηση στο εσωτερικό, κάνοντας τον λόγο να αυξηθεί τιμές φτάνοντας μέχρι και την τιμή 6. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η Κυριακή όπου οι συγκεντρώσεις των δυο περιβαλλόντων είναι ίδιες και δείχνοντας την επιρροή του εξωτερικού περιβάλλοντος στο εσωτερικό, κάτι που αποδεικνύεται και από τον δείκτη συσχέτισης ο οποίος έχει τιμή 0,8, την υψηλότερη τιμή για εκείνες τις μέρες.

Για τα σωματίδια $PM_{1-2,5}$ ο λόγος I/O λαμβάνει πολύ χαμηλές τιμές επισημαίνοντας την διαφορά στις συγκεντρώσεις μεταξύ των δύο περιβαλλόντων με τις συγκεντρώσεις του εξωτερικού να είναι σχεδόν διπλάσιες από αυτές του εσωτερικού (μέση τιμή: $3,26 \pm 1,18 \frac{\mu g}{m^3}$). Σε ελάχιστες περιπτώσεις ο λόγος φτάνει και ξεπερνά την μονάδα κατά τις οποίες οι τιμές του εσωτερικού περιβάλλοντος

αυξάνονταν λόγω παρουσίας του χρήστη στο χώρο. Το μέγιστο του λόγου που παρουσιάζεται στις 27/10 είναι την στιγμή που στο γραφείο βρίσκονται 2 άτομα και μόλις φύγουν η συγκέντρωση μειώνεται. Η επιρροή του εξωτερικού περιβάλλοντος φαίνεται κατά την διάρκεια του Σαββατοκύριακου όπου οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων παρουσιάζουν μια ομοιότητα και ο δείκτης συσχέτισης λαμβάνει σχετικά μεγάλες τιμές (0,6-0,7), ενώ τις υπόλοιπες μέρες οι τιμές είναι κοντά στο μηδέν.

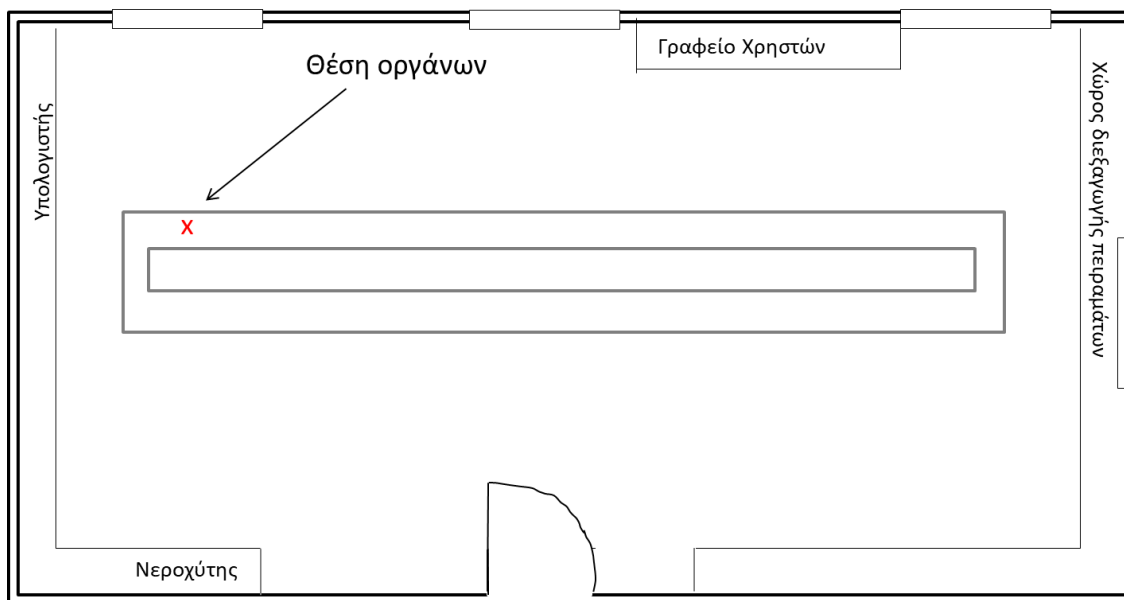
Στα χονδρά σωματίδια παρατηρούμε ότι ο λόγος παίρνει πολύ μεγάλες τιμές σε κάποιες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα η μέγιστη τιμή του λόγου στις 27/10 είναι 6 και στις 31/10 είναι 20 οι οποίες προέκυψαν όταν στο γραφείο βρισκόταν από 2 και 5 άτομα αντίστοιχα. Η συγκέντρωση των $PM_{2,5-10}$ εντός του γραφείου είναι πολύ χαμηλή κατά την διάρκεια που το γραφείο είναι κλειστό ενώ διπλασιάζεται όταν το γραφείο έχει κόσμο, το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αυτά τα σωματίδια επηρεάζονται πολύ από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και καθόλου από το εξωτερικό περιβάλλον κάτι που αποδεικνύεται και από το δείκτη συσχέτισης, οποίος κυμάνθηκε μεταξύ 0,03 έως και 0,19 .

Σε ένα περιβάλλον όπως είναι το γραφείο, οι πηγές που συναντώνται κυρίως είναι ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός, η κίνηση του χρήστη εντός του χώρου, ο καθαρισμός του γραφείου και το κάπνισμα (Mowaraska et al.,2011 S.A. Baterman et al.,2001). Επίσης ο αερισμός του χώρου είναι ένας βασικός παράγοντας που επηρεάζει τις συγκεντρώσεις εντός του γραφείου (C.Chen et al., 2011). Στην περίπτωση του γραφείου που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική το εξωτερικό περιβάλλον φάνηκε να έχει την μεγαλύτερη επιρροή καθώς ο χρήστης ήταν ένας και βρισκόταν στο γραφείο για πολύ μικρό χρονικό διάστημα και τις ώρες που βρισκόταν εντός του χώρου άνοιγε το παράθυρο με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη εισχώρηση αέρα. Το σαββατοκύριακο συγκεκριμένα τα λεπτά και υπέρλεπτα σωματίδια εμφάνισαν πολύ ισχυρή συσχέτιση με το εξωτερικό περιβάλλον ενώ οι συγκεντρώσεις των χονδρών σωματιδίων επηρεάστηκαν κυρίως από τις δραστηριότητες του χρήστη.

4.3 Χώρος Μελέτης : Εργαστήριο

Ο υπό μελέτη εργαστηριακός χώρος βρίσκεται στο ισόγειο του κτηρίου K1 δίπλα ακριβώς από την κεντρική ζώνη που συνδέεται με το εξωτερικό περιβάλλον. Έχει εμβαδό 54 m² (8,7 m x 6,2 m x 3 m) και ο όγκος υπολογίζεται στα 162 m³. Ο χώρος διαθέτει 4 παράθυρα, τα τρία από τα οποία έχουν βορειοδυτικό προσανατολισμό (κύρια πρόσοψη), ενώ το τέταρτο επικοινωνεί με το χώρο της εισόδου του κτηρίου, που βρίσκεται στην κεντρική ζώνη. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων τα 2 παράθυρα ήταν συνεχώς κλειστά, το τρίτο με βορειοδυτικό προσανατολισμό μετά από παρέμβαση των ατόμων στην αίθουσα άνοιγε σε ανάκληση για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα που υπήρχαν άτομα στο εργαστήριο. Το 4^ο παράθυρο ήταν ανοιχτό σε ανάκληση καθ όλη την διάρκεια του 24ωρου και για όλες τις μέρες που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις. Στην κάτοψη του εργαστηρίου (εικόνα 19) παρουσιάζεται και πάγκος περιμετρικά του χώρου στον οποίο ήταν τοποθετημένα διάφορα μηχανήματα καθώς και η πόρτα του εργαστηρίου

ήταν ανοιχτή κατά το μεγαλύτερο μέρος της λειτουργίας του εργαστηρίου. Στο κέντρο του χώρου εκτείνεται ένας ακόμα πάγκος εργασίας, στο οποίο είναι τοποθετημένα όργανα που χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο όπως ογκομετρικοί σωλήνες, φιάλες κλπ. Το ύψος του πάγκου ξεπερνά το 1 m, και στην μέση του υπάρχει ράφι σε ύψος 1,5 m στο οποίο είναι τοποθετημένα αρκετά χημικά αντιδραστήρια τα οποία όμως είναι σφραγισμένα σε ειδικά δοχεία αποθήκευσης.



Εικόνα 19: Κάτοψη του εργαστηριακού χώρου

Στο χώρο υπάρχει νεροχύτης, για τον καθαρισμό των οργάνων ο οποίος χρησιμοποιούσαν αρκετά συχνά μέσα στην μέρα. Επιπλέον το εργαστήριο διαθέτει κλιματισμό ο οποίος ήταν ενεργός καθ όλη την διάρκεια των μετρήσεων διατηρώντας την θερμοκρασία στους 25 °C.

Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας εργάζονταν 1 έως 6 άτομα για τη διεκπεραίωση πειραματικών εργασιών στη δεξιά πλευρά του χώρου όπως φαίνεται και στην κάτοψη (εικόνα 19) αλλά το ωράριο των χρηστών δεν ήταν σταθερό και οι ώρες λειτουργίας του εργαστηρίου κυμαίνονταν από τις 09:00 το πρωί έως και τις 17:00 το απόγευμα. Ο χρόνος παραμονής των χρηστών κυμαινόταν από 1 έως 5 ώρες ανάλογα με τις ανάγκες των πειραματικών εργασιών. Το βασικό πείραμα που διεξαγόταν κατά την συγκεκριμένη περίοδο ήταν για φωτοχημική διάσπαση φαρμακευτικών ουσιών από υδατικές μήτρες με UV ακτινοβολία. Για τη διεκπεραίωση του συγκεκριμένου πειράματος χρησιμοποιούσαν φασματογράφος μάζας με αντλία. Επίσης για τις ανάγκες άλλων πειραμάτων χρησιμοποιούσαν αναλυτής TOC με τον οποίο γινόταν προσδιορισμός του ολικού οργανικού άνθρακα σε υδάτινα διαλύματα.

Το εργαστήριο περιλαμβάνει και δύο ηλεκτρονικούς υπολογιστές εκ των οποίων ο ένας ήταν δίπλα στα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την συγκεκριμένη μελέτη και ο άλλος ήταν τοποθετημένος σε ένα γραφείο όπως φαίνεται στην κάτοψη (εικόνα 19) ο οποίος ήταν σχεδόν πάντα σε λειτουργία και γινόταν καθημερινή και πολύωρη χρήση του. Οι χρήστες αρκετά συχνά καθόντουσαν κοντά στον υπολογιστή

είτε για την διεκπεραίωση των πειραμάτων τους αλλά και αρκετά συχνά για να πραγματοποιήσουν το διάλειμμα τους.

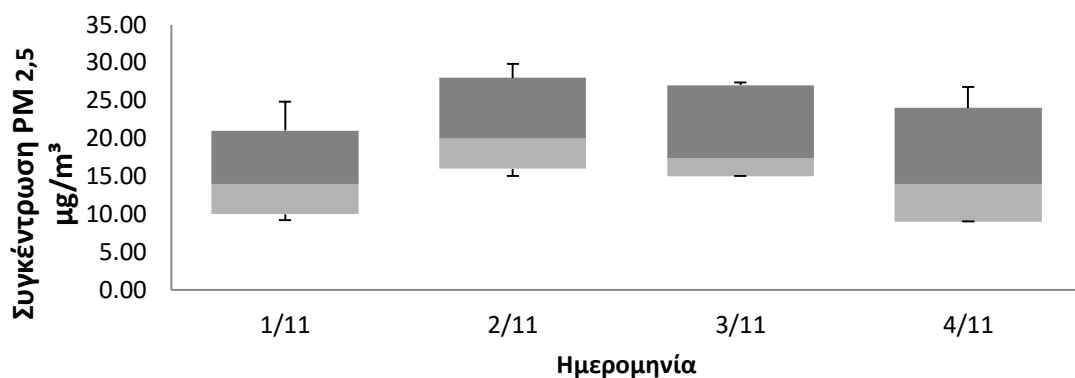
Τα όργανα Dustrak II (μοντέλο 8532) και P-trak (μοντέλο 8525) τοποθετήθηκαν πάνω στον πάγκο εργασίας που βρίσκεται στην μέση της αίθουσας όπως φαίνεται στην κάτοψη (σχήμα 19) με το κόκκινο χ. Απέναντι και σε απόσταση ενός μέτρου βρισκόταν ένα παράθυρο το οποίο ήταν μόνιμα κλειστό και συνδέεται με το εξωτερικό περιβάλλον. Τα υπόλοιπα παράθυρα και η πόρτα βρίσκονταν σε απόσταση μεγαλύτερη των τριών μέτρων.

Οι πειραματικές μετρήσεις στον εργαστηριακό χώρο πραγματοποιήθηκαν την πρώτη βδομάδα του Νοεμβρίου για τέσσερις συνεχόμενες ημέρες (1/11 έως 4/11) και τα αποτελέσματα αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 15. Επιλέχθηκαν χρονικές περίοδοι που γινόταν χρήση του εργαστηριακού χώρου αλλά έγιναν μετρήσεις και το Σάββατο 4/11 για 10 ώρες όπου ο εργαστηριακός χώρος παρέμεινε τελείως κλειστός καθ όλη την διάρκεια της μέρας. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για 82 ώρες εκ' των οποίων 18 ώρες γινόταν χρήση του χώρου και 64 ώρες ο χώρος παρέμενε κλειστός. Τις ώρες που δεν υπήρχαν άτομα η αίθουσα παρέμενε κλειδωμένη και τα όργανα κατέγραφαν κανονικά συγκέντρωση μάζας.

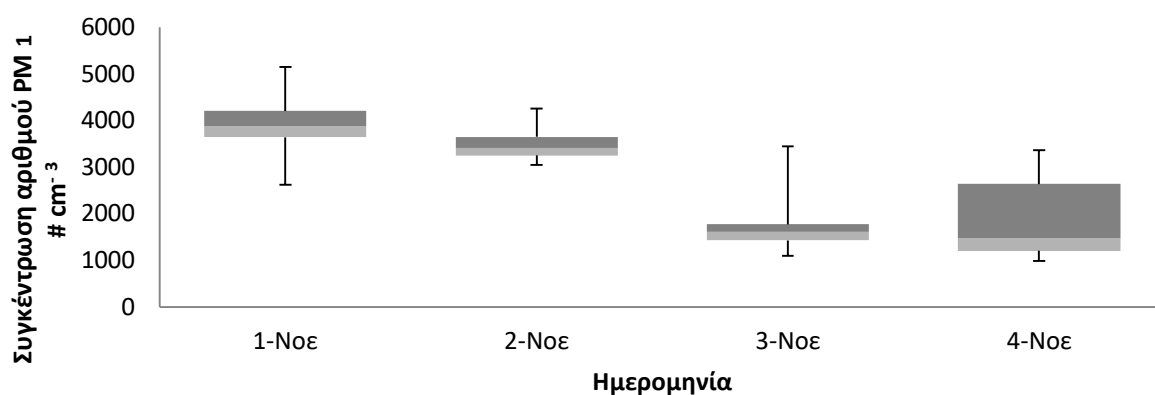
Πίνακας 15: Στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκεντρώσεων μάζας (σωματίδια $PM_{2.5}$) και αριθμού (Σωματίδια PM_{10}) για το χώρο το εργαστηρίου τις ώρες λειτουργίας.

	Συγκέντρωση σωματιδίων $PM_{2.5}$ [$\mu g/m^3$]				Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων PM_{10} [#/ cm^3]			
	1/11	2/11	3/11	4/11	1/11	2/11	3/11	4/11
Ελάχιστο	9	15	15	9	2613	3048	1087	990
Μέγιστο	25	30	27	27	5150	4250	3441	3360
Μέση τιμή	15	21	19	15	3942	3468	1702	1823
Διάμεσος	14	20	19	14	3876	3401	1605	1467
Εκατοστημοριακή κατάταξη 95%	21	28	27	24	4893	3975	2799	2688
Εκατοστημοριακή κατάταξη 5%	10	16	15	9	3396	3101	1187	1125
Τυπική απόκλιση	3	3	3	4	446	280	467	676

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ για τις εργάσιμες μέρες (1 έως 3 Νοεμβρίου) εντός του εργαστηρίου κυμάνθηκε από 9 έως 30 $\frac{\mu g}{m^3}$ (μέση τιμή: $18 \pm 3 \frac{\mu g}{m^3}$) και το Σάββατο (4/11), η συγκέντρωση κυμάνθηκε επίσης από 9 έως 27 $\frac{\mu g}{m^3}$ (μέση τιμή: $15 \pm 4 \frac{\mu g}{m^3}$). Τα αποτελέσματα του πίνακα παρουσιάζονται με μορφή Whisker στο σχήμα 5.

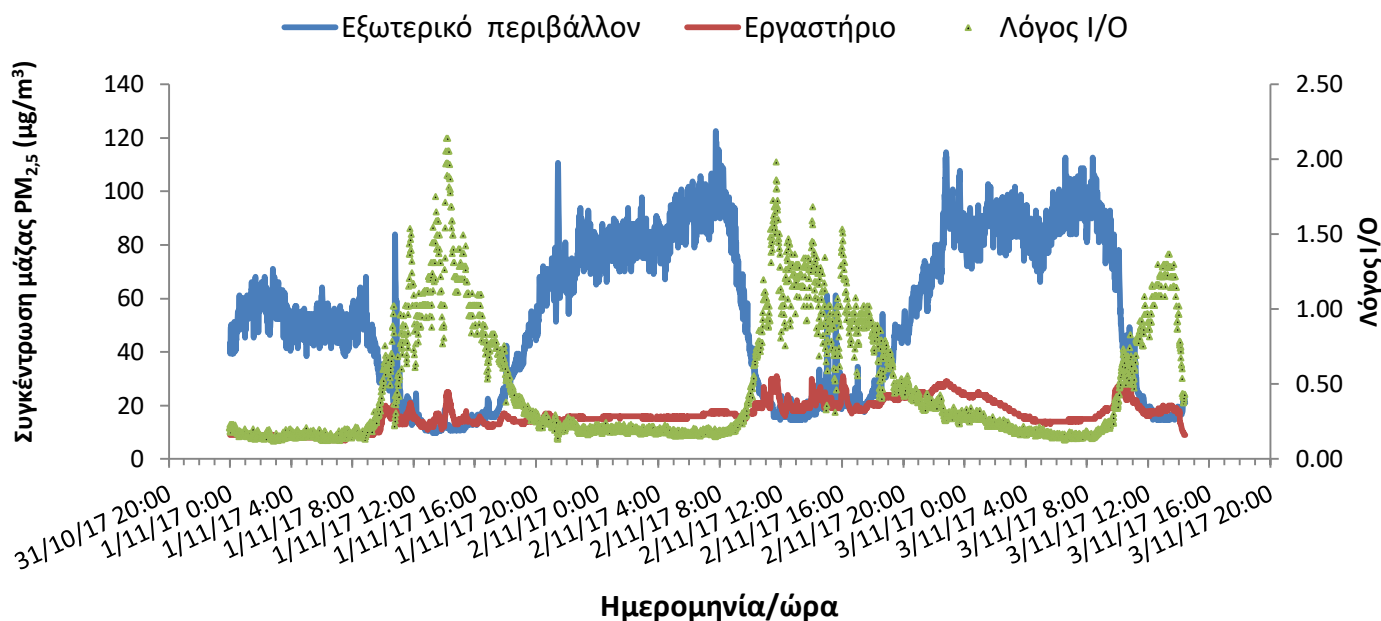


Σχήμα 5: Διάγραμμα Whisker με την διακύμανση της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων $PM_{2,5}$ για το χώρο του εργαστηρίου.



Σχήμα 6: Διάγραμμα Whisker με την διακύμανση του αριθμού των σωματιδίων PM_1 για το χώρο του εργαστηρίου.

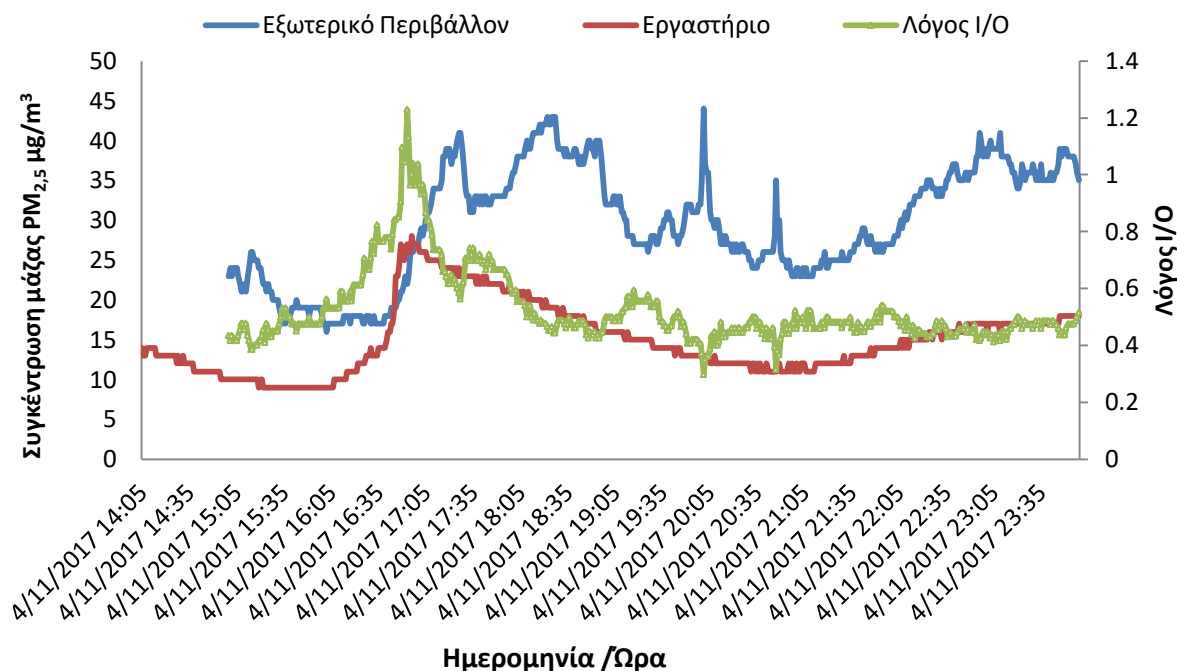
Από τον πίνακα και τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η διάμεσος και η μέση τιμή διαφέρουν ελάχιστα για το σύνολο των ημερών καθώς δεν υπάρχουν έντονες αυξομειώσεις στην συγκέντρωση. Η μεταβολή της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων $PM_{2,5}$ παρουσιάζεται και στο σχήμα 7.



Σχήμα 7: Διάγραμμα μεταβολής της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ εντός του χώρου του εργαστηρίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος καθώς και ο λόγος (I/O)

Από το διάγραμμα του σχήματος 7, παρατηρείται ότι η συγκέντρωση μάζας εντός του εργαστηρίου είναι σταθερή για το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας και δεν ξεπερνά τα $20 \frac{\mu g}{m^3}$, εκτός από τις 08:00 έως και τις 16:00 όπου βλέπουμε στο διάγραμμα τη συγκέντρωση να αυξομειώνεται. Κατά την διάρκεια αυτών των ωρών το εργαστήριο είναι σε λειτουργία με τους χρήστες να περιφέρονται στο χώρο και να εκτελούν πειραματικές εργασίες.

Επιπλέον στο σχήμα 7 παρουσιάζεται και η διακύμανση της συγκέντρωσης μάζας των $PM_{2.5}$ για το εξωτερικό περιβάλλον η οποία κυμάνθηκε από 17 έως και $120 \frac{\mu g}{m^3}$ με τις χαμηλότερες τιμές να παρατηρούνται την τελευταία μέρα μετρήσεων, Σάββατο 4/11 (σχήμα 7). Οι πρώτες τρεις μέρες μετρήσεων ήταν εργάσιμες μέρες όπου πραγματοποιούνταν μάθημα στο Πολυτεχνείο με αποτέλεσμα να έχουμε συνεχείς προέλευση φοιτητών, μεγαλύτερη κίνηση από αυτοκίνητα, και μεγαλύτερη χρήση των χώρων του πολυτεχνείου, ενώ το Σάββατο ο χώρος χρησιμοποιείται από ελάχιστα άτομα, καθώς είναι κλειστό και το κυλικείο της σχολής και όλες οι υπηρεσίες. Επίσης η βροχή είναι ένα βασικός λόγος για τις μειωμένες συγκεντρώσεις. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διακύμανση της συγκέντρωσης για το Σάββατο όπου παρατηρείται ότι η διακύμανση εντός του εργαστηρίου ακολουθεί την διακύμανση της εξωτερική συγκέντρωσης.



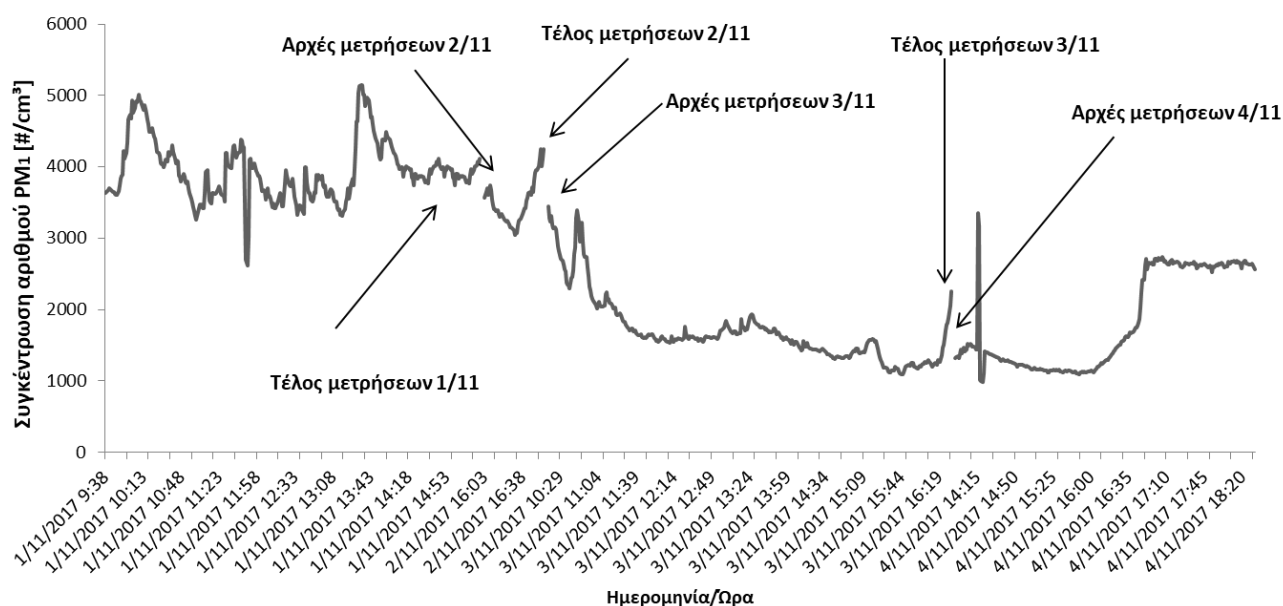
Σχήμα 8: Διάγραμμα μεταβολής της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ εντός του χώρου του εργαστηρίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος καθώς και ο λόγος (Ι/Ο) για το Σάββατο 4/11/2017

Στα σχήματα 7 και 8 παρουσιάζεται επίσης ο λόγος Ι/Ο. Τις πρώτες πρωινές ώρες και τις βραδινές οι συγκεντρώσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι διπλάσιες από αυτές που υπάρχουν στο εργαστήριο με αποτέλεσμα ο λόγος Ι/Ο να κυμαίνεται μεταξύ 0,1 έως 0,3. Για τις ώρες 08:00 και 16:00 παρατηρούμε ότι η συγκέντρωση του εξωτερικού περιβάλλοντος μειώνεται αισθητά πέφτοντας σε τιμές κάτω από $20 \frac{\mu g}{m^3}$ και σε συνάρτηση με την αύξηση της συγκέντρωσης εντός του εργαστηρίου παρατηρούμε ότι ο λόγος Ι/Ο έχει εύρος τιμών 0,8 έως και 1,2, δηλαδή σε αρκετές περιπτώσεις η συγκέντρωση μάζας των $PM_{2.5}$ εντός του εργαστηρίου είναι μεγαλύτερη από το εξωτερικό περιβάλλον. Το Σάββατο 4/11 οι συγκεντρώσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος παρόλο που ήταν πιο χαμηλές από τις υπόλοιπες μέρες παρέμειναν υψηλότερες από αυτές του κλειστού εργαστηρίου με τον λόγο Ι/Ο να είναι μόνιμα μικρότερος από της μονάδα με τιμές από 0,4 έως και 0,7 με εξαίρεση μία μικρή αύξηση του λόγου στις 17:00 όπου οφείλεται σε αύξηση των εσωτερικών συγκεντρώσεων χωρίς όμως να μπορούμε να διακρίνουμε την πηγή.

Όσον αφορά την επιρροή του εξωτερικού περιβάλλοντος στις συγκεντρώσεις εντός του χώρου του εργαστηρίου τις πρώτες μέρες ο δείκτης συσχέτισης R^2 παίρνει τιμές κοντά στο 0,5 παρουσιάζονται μια μικρή συσχέτιση. Αντίθετα το Σάββατο ο δείκτης μειώνεται αρκετά παρά την παρόμοια διακύμανση των συγκεντρώσεων, το οποίο οφείλεται ίσως στην μικρή σύνδεση με το εξωτερικό περιβάλλον δηλαδή τον φυσικός αερισμός, ενώ τις άλλες μέρες οι χρήστες άνοιγαν και παράθυρο.

Η συγκέντρωση αριθμού των σωματιδίων PM_1 κυμάνθηκε μεταξύ 1087 έως και $5150 \frac{\#}{cm^3}$ (μέση τιμή: $3037 \pm 1193 \frac{\#}{cm^3}$) για τις τρεις πρώτες μέρες ενώ το Σάββατο από 990 έως $3360 \frac{\#}{cm^3}$ (μέση τιμή: $1823 \pm 676 \frac{\#}{cm^3}$). Τα αποτελέσματα για την

συγκέντρωση αριθμού παρουσιάζονται στον πίνακα 15 και η μεταβολή της συγκέντρωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 9. Στις 2/11 παρουσίασε σφάλμα το όργανο κατά την διάρκεια των μετρήσεων και μετρήθηκε μόνο μία ώρα.



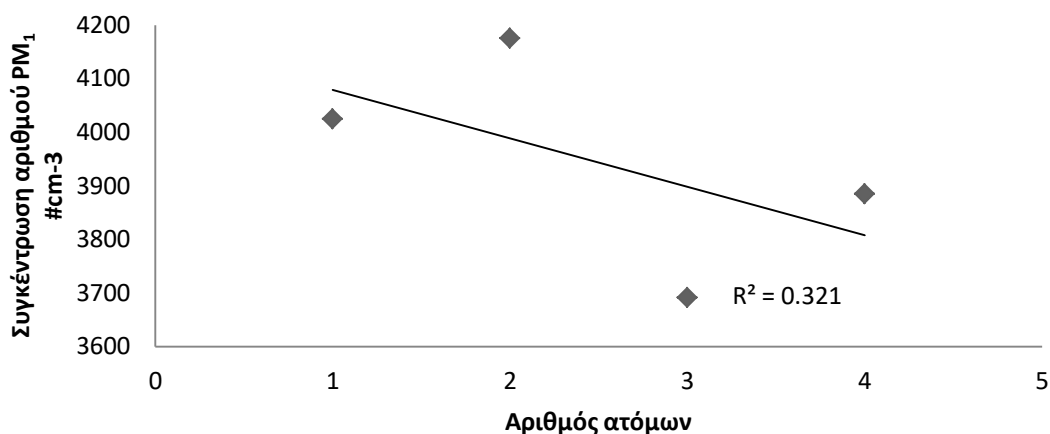
Σχήμα 9: Διάγραμμα διακύμανσης αριθμού των σωματιδίων PM_1 εντός του εργαστηρίου

Από τα σχήματα 7 και 9 βλέπουμε ότι ο αριθμός των σωματιδίων PM_1 παρουσιάζει σχετικά παρόμοια διακύμανση με τη συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ εκτός από την τελευταία μέρα μετρήσεων το Σάββατο όπου παρουσιάστηκε μια ξαφνική αύξηση στον αριθμό των σωματιδίων ενώ η μάζα παραμένει σχεδόν σταθερή. Το Σάββατο στο εργαστήριο δεν είχε καθόλου κίνηση από κόσμο καθώς ο χώρος ήταν κλειστός, και τα περισσότερα όργανα εκτός λειτουργίας. Η μεγαλύτερη επίδραση σε αυτήν την περίπτωση έρχεται από το εξωτερικό περιβάλλον και την διείσδυση των σωματιδίων εντός του χώρου του εργαστηρίου.

Στις 1/11 παρατηρούμε από το διάγραμμα (σχήμα 9) ότι ο αριθμός των σωματιδίων είναι μεγαλύτερος καθ όλη την διάρκεια της μέρας σε σχέση με τις άλλες τρεις ημέρες χωρίς όμως να υπάρχει κάποια διαφορά στις δραστηριότητες των χρηστών παρά μόνο μια ελάχιστη μεγαλύτερη κίνηση κοντά στην τοποθεσία των οργάνων.

Σε παρόμοια μελέτη (μεταπτυχιακή διατριβή) που πραγματοποιήθηκε το καλοκαίρι του 2013 από την Γρυδάκη Νικολέτα, μετρήθηκαν τα αιωρούμενα σωματίδια εντός του ίδιου εργαστηρίου με το όργανο DustTrak DRX 8534 για το χρονικό διάστημα από 24 Ιουνίου έως 8 Ιουλίου και βρέθηκε ότι η συγκέντρωση των σωματιδίων $PM_{2.5}$ κυμάνθηκε από 13 έως 83 $\frac{\mu g}{m^3}$ (μέση τιμή: 17 $\frac{\mu g}{m^3}$). Εκείνη την περίοδο στο εργαστήριο εργάζονταν 8 άτομα και 2 παράθυρα ήταν μόνιμα ανοιχτά σε ανάκληση ακόμα και την διάρκεια της νύχτας. Επίσης με την χρήση του P-Trak (TSI, μοντέλο 8525) μετρήθηκε η συγκέντρωση αριθμού των σωματιδίων PM_1 η οποία κυμάνθηκε μεταξύ 329 έως και 2205 $\frac{\#}{cm^3}$. Η δειγματοληψία για την

συγκέντρωση αριθμού των σωματιδίων πραγματοποιήθηκε την χειμερινή περίοδο (Δεκέμβριο) και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο αριθμός των ατόμων στο χώρο δεν επηρεάζει τα σωματίδια PM_{10} , το οποίο συμφωνεί και με τα αποτελέσματα τις παρούσας εργασίας καθώς στις περιπτώσεις που ο αριθμός των ατόμων εντός του εργαστηρίου αυξανόταν ο αριθμός των PM_{10} δεν παρουσίαζε αντίστοιχη αύξηση. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η συσχέτιση του αριθμού των ατόμων με το αριθμό των υπέρλεπτων σωματιδίων ενδεικτικά για μία μέρα (1/11/2017) με τον δείκτη συσχέτισης να είναι πολύ χαμηλός ($R^2=0,3$).



Σχήμα 10: Διάγραμμα συσχέτισης αριθμού ατόμων με την συγκέντρωση αριθμού των PM_{10} σωματιδίων εντός του εργαστηρίου.

Όταν ο αριθμός των ατόμων εντός του εργαστηρίου αυξάνεται σημαίνει ότι υπάρχει μεγαλύτερη και πιο συχνή κίνηση εντός του εργαστηρίου, με την βασική δραστηριότητα να είναι το περπάτημα. Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Lazaidis et al (2014) μέσα σε ένα εργαστήριο αναλύθηκε η επιρροή που έχει το περπάτημα στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων και βρέθηκε ότι δεν επηρεάζει τον αριθμό των PM_{10} σχεδόν καθόλου, αντίθετα επηρεάζει σημαντικά τα σωματίδια PM_{10} . Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε και στην παρούσα εργασία και σε άλλες μελέτες καθώς τα μεγαλύτερα σωματίδια είναι πιο εύκολο να ξεκολλήσουν από τις επιφάνειες που έχουν κατακαθίσει (Boor BE et al.,2013)

Με την βοήθεια του οργάνου OPS 3330 μετρήθηκαν και τα σωματίδια με διάμετρο 0,3 έως 10 μm και τα αποτελέσματα για τις εργάσιμες ώρες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 16 .

Πίνακας 16 : Στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων μάζας για τα σωματίδια PM_{0,1-1}, PM_{1-2,5}, και PM_{2,5-10} εντός του εργαστηρίου τις εργάσιμες ώρες (09:00-17:00)

$\left(\frac{\mu g}{m^3}\right)$	0.3-1 μm				1-2.5 μm				2,5-10 μm			
	1- Noε	2- Noε	3- Noε	4- Noε	1- Noε	2- Noε	3- Noε	4- Noε	1- Noε	2- Noε	3- Noε	4- Noε
Ελάχιστο	0,58	0,82	0,35	0,52	1,12	0,79	0,51	0,38	1,97	0,39	0,18	0,00
Μέγιστο	1,95	2,76	2,10	2,55	3,59	2,80	1,70	3,22	34,24	24,23	10,00	5,58
Μέση τιμή	1,02	1,14	1,01	0,85	1,83	1,75	1,29	1,12	8,79	6,43	3,83	0,76
Εκατοστημοριακή κατάταξη 95%	1,65	2,05	1,48	1,61	2,66	2,18	1,56	2,00	19,80	12,66	2,05	1,95
Εκατοστημοριακή κατάταξη 5%	0,60	0,84	0,42	0,55	1,35	0,90	0,63	0,53	3,11	0,74	0,53	0,16
Τυπική απόκλιση	0,32	0,37	0,32	0,35	0,40	0,38	0,26	0,47	5,40	3,66	1,85	0,70

Τα σωματίδια PM_{0,3-1} και PM_{1-2,5}, παρουσίασαν παρόμοιες συγκεντρώσεις για όλες τις μέρες με την μέση τιμή να ήταν $1,0 \pm 0,3 \frac{\mu g}{m^3}$, και $1,4 \pm 0,4 \frac{\mu g}{m^3}$ αντίστοιχα. Διαφορά παρουσιάστηκε στα χονδρά σωματίδια το Σάββατο όπου οι τιμές της συγκέντρωσης μειώθηκαν αισθητά με την μέση τιμή να είναι στα $0,76 \frac{\mu g}{m^3}$ ενώ τις προηγούμενες ημέρες βρισκόταν στα $6,4 \frac{\mu g}{m^3}$.

Βασική διαφορά στις συγκεντρώσεις μάζας και για τις τρεις κατηγορίες παρατηρούμε τις πρωινές ώρες που το εργαστήριο ήταν ανοιχτό σε σχέση με τις βραδινές ώρες. Μεγαλύτερη διαφορά παρατηρείται στις μεγαλύτερες διαμέτρους, στα σωματίδια PM_{2,5-10} με την μέση συγκέντρωση για όλες τις μέρες να είναι $4,9 \frac{\mu g}{m^3}$ ενώ τις βράδυνες ώρες πέφτει στα $0,15 \frac{\mu g}{m^3}$. Μικρότερη διαφορά παρατηρείτε στα PM_{1-2,5} με την διαφορά να είναι της τάξης του $0,1 \frac{\mu g}{m^3}$ ενώ στα PM_{0,3-1} η διαφορά είναι σχεδόν μηδενική, όπως μπορούμε να δούμε και στον πίνακα 17.

Πίνακας 17: Μέση τιμή συγκέντρωσης μάζας για τα σωματίδια PM_{0,1-1}, PM_{1-2,5}, και PM_{2,5-10} για πρωινές και βραδινές ώρες στο εργαστήριο.

		0.3-1 μm	1-2.5 μm	3-10 μm
1-Noε	Ανοιχτό/πρωινές ώρες	1.02	1.83	8.79
	Κλειστό/Βραδινές ώρες	0.90	1.19	1.76
2-Noε	Ανοιχτό/πρωινές ώρες	1.14	1.75	6.43
	Κλειστό/Βράδυνες ώρες	0.06	0.31	0.15
3-Noε	Ανοιχτό/πρωινές ώρες	1.01	1.29	3.83
	Κλειστό/Βράδυνες ώρες	0.05	0.21	0.10

Τις πρωινές ώρες υπάρχει κίνηση στο εργαστήριο από του χρήστες, κάτι το οποίο φαίνεται να επηρεάζει όλες τις κατηγορίες σωματιδίων με την πιο έντονη επιρροή στα σωματίδια με $PM_{2,5-10}$. Επίσης είναι βασικό να αναφερθεί ότι οι χρήστες το πρωί ανοίγουν και ένα επιπλέον παράθυρο σε σχέση με τις βραδινές ώρες που παραμένει κλειστό, το οποίο επηρεάζει τις συγκεντρώσεις κυρίως των λεπτών και υπέρλεπτων σωματιδίων επιτρέποντας πιο έντονη εισχώρηση σωματιδίων από το εξωτερικό περιβάλλον.

Όσον αφορά την σύγκριση της συγκέντρωσης του εξωτερικού περιβάλλοντος με το χώρο του εργαστηρίου για τις ώρες λειτουργίας, οι τιμές του λόγου I/O καθώς και ο δείκτης συσχέτισης R^2 παρουσιάζονται στους πίνακες 18 και 19. Οι μέσες συγκεντρώσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος τις αντίστοιχες ώρες με τις ώρες λειτουργίας του εργαστηρίου ήταν $0,8 \frac{\mu g}{m^3}$, $1,8 \frac{\mu g}{m^3}$ και $5,7 \frac{\mu g}{m^3}$ για τα $PM_{0,3-1}$, $PM_{1-2,5}$ και $PM_{2,5-10}$ αντίστοιχα. Για τα υπέρλεπτα σωματίδια παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις εντός του εργαστηρίου είναι λίγο υψηλότερες από αυτές του εξωτερικού καθώς η μέση τιμή του λόγου I/O ξεπερνά την μονάδα όλες τις μέρες με την μικρότερη μέση τιμή να είναι το Σάββατο. Ο λόγος I/O για τα σωματίδια $PM_{1-2,5}$ βρίσκεται κοντά στην μονάδα με τις συγκεντρώσεις στο εξωτερικό περιβάλλον να είναι λίγο υψηλότερες ιδιαίτερα το Σάββατο. Έντονη διαφορά στις συγκεντρώσεις παρουσιάζεται στα χονδρά σωματίδια με τον λόγο να έχει μέγιστες τιμές 16 και 24 για τις 2 και 3 Νοεμβρίου ενώ το Σάββατο οι τιμές μειώνονται πολύ.

Από τον δείκτη συσχέτισης βλέπουμε ότι για καμία ημέρα και σε κανένα είδος σωματιδίων δεν υπάρχει ισχυρή συσχέτιση των συγκεντρώσεων του εξωτερικού με τις συγκεντρώσεις του εσωτερικού περιβάλλοντος καθώς ο δείκτης παίρνει πολύ χαμηλές τιμές. Η επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος περιορίζεται στην διείσδυση σωματιδίων στο χώρο του εργαστηρίου, χωρίς όμως η συγκέντρωση του εργαστηρίου να ακολουθεί τις μεταβολές του εξωτερικού περιβάλλοντος.

Πίνακας 18: Στατιστικά στοιχεία σύγκρισης εργαστηρίου και εξωτερικού περιβάλλοντος για τα σωματίδια $PM_{0,3-1}$, $PM_{1-2,5}$

		0,3-1 μm				1-2,5 μm			
		1/11	2/11	3/11	4/11	1/11	2/11	3/11	4/11
Συσχέτιση		0,03	0,03	0,38	0,29	0,16	0,01	0,02	0,09
Λόγος	ελάχιστο	0,40	0,34	0,54	0,51	0,42	1,24	0,79	0,16
(I/O)	μέγιστο	3,71	4,24	4,57	4,50	2,38	2,30	2,80	4,56
	μέση τιμή	1,58	1,51	1,17	1,08	0,98	1,00	0,78	0,63
	Τυπική απόκλιση	0,62	0,59	0,37	0,42	0,29	0,16	0,39	0,45

Πίνακας 19: Στατιστικά στοιχεία σύγκρισης εργαστηρίου και εξωτερικού περιβάλλοντος για τα σωματίδια $PM_{2,5-10}$.

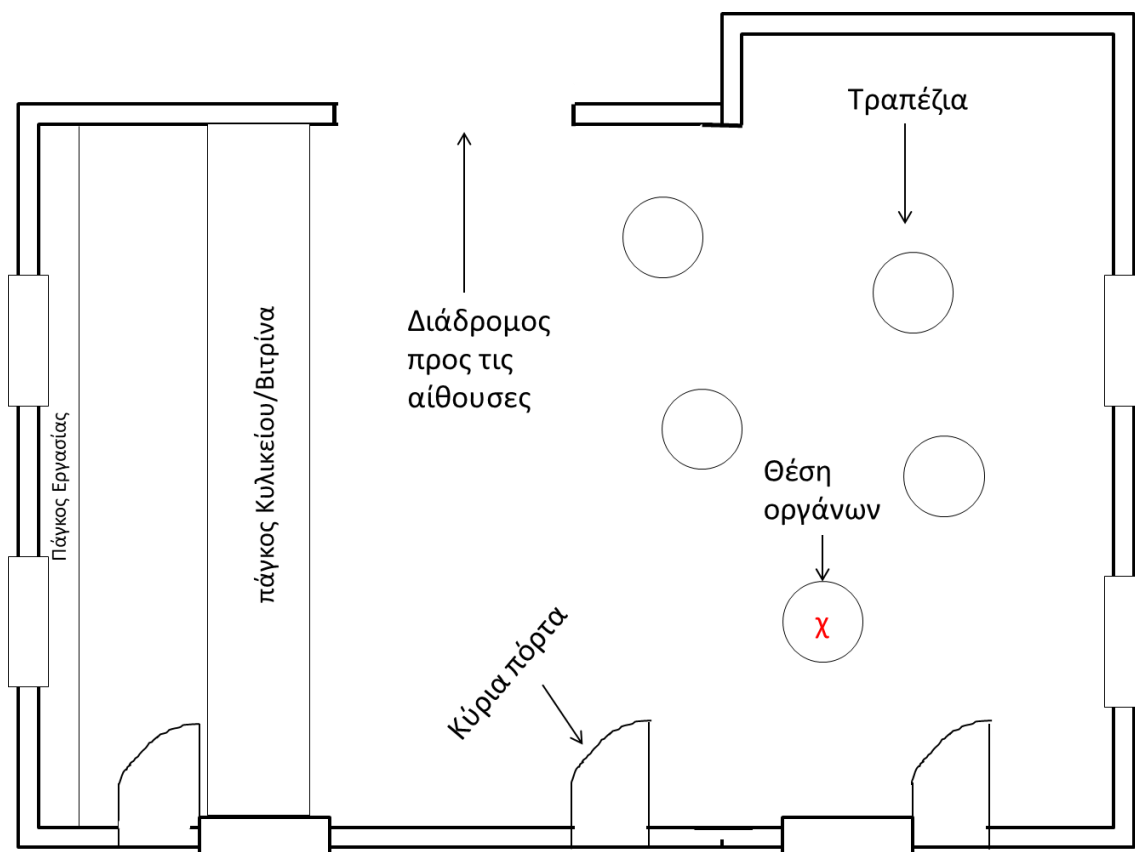
		2,5-10 μm			
		1-Νοε	2-Νοε	3-Νοε	4-Νοε
Λόγος (I/O)	Συσχέτιση	0,01	0,02	0,01	0,05
	ελάχιστο	0,10	1,84	0,39	0,01
	μέγιστο	4,73	16,41	24,23	6,85
	μέση τιμή	1,09	0,96	1,45	0,22
	Τυπική απόκλιση	0,82	1,75	3,84	0,44

Οι εργαστηριακοί χώροι είναι ειδικά μικρό-περιβάλλοντα καθώς μπορεί να περιέχουν μεγάλο εύρος ρυπογόνων ουσιών και οι συγκεντρώσεις αυτών να είναι υψηλές, ανάλογα με την φύση των πειραμάτων που διεξάγονται (Park,2000). Στα εργαστήρια εντός του πολυτεχνείου πέραν από το επιστημονικό προσωπικό του εργαστηρίου απασχολούνται και φοιτητές οι οποίοι είναι πιθανό να έρθουν σε επαφή με αυτές τις συγκεντρώσεις. Πιο συγκεκριμένα για τον συγκεκριμένο εργαστηριακό χώρο παρατηρήθηκε ότι υπάρχουν εσωτερικές πηγές καθώς οι τιμές κατά τις ώρες λειτουργίας του ξεπερνούν αυτές του εξωτερικού περιβάλλοντος και μάλιστα το Σάββατο όπου το εργαστήριο είναι εκτός λειτουργίας παρουσιάζονται πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις εντός του εργαστηρίου. Οι τιμές της συγκέντρωσης των $PM_{2,5}$ και PM_{10} είναι παρόμοιες και με άλλες μελέτες όπως με την μελέτη στο Πανεπιστήμιο της Σμύρνης όπου πραγματοποιήθηκαν τριήμερες μετρήσεις PM_{10} και $PM_{2,5}$ εντός 6 εργαστηρίων , 3 στην σχολή των Χημικών και 3 στην σχολή των Χημικών μηχανικών (Sait C.Sofuoflu et al.,2015). Στα εργαστήρια των Χημικών οι μέσες τιμές της συγκέντρωσης των $PM_{2,5}$ κυμάνθηκαν από 5 έως και 38 $\frac{\mu g}{m^3}$ με τις μεγαλύτερες τιμές να παρουσιάζονται στο εργαστήριο με τις περισσότερες πειραματικές δραστηριότητες και οι χαμηλότερες σε εκείνο με τις λιγότερες. Όσον αφορά τα PM_{10} η συγκέντρωση κυμάνθηκε μεταξύ 0 και 79 $\frac{\mu g}{m^3}$ με τις υψηλότερες και χαμηλότερες τιμές να εμφανίζονται στα εργαστήρια με τις περισσότερες και τις λιγότερες πειραματικές δραστηριότητες αντίστοιχα. Στο εργαστήριο των Χημικών μηχανικών η μέση συγκέντρωση των $PM_{2,5}$ κυμάνθηκε από 1,04 έως 25 $\frac{\mu g}{m^3}$ και των PM_{10} από 1,35 έως 206 $\frac{\mu g}{m^3}$ (Sait C.Sofuoflu et al.,2015).

4.3 Χώρος Μελέτης: Κυλικείο

Ο χώρος του κυλικείου βρίσκεται στο ισόγειο του κτηρίου Κ2 και αποτελείται από το κυλικείο της σχολής και καθιστικό χώρο για του φοιτητές. Περιλαμβάνει 3 πόρτες εκ των οποίων η μία βρίσκεται στο χώρο στέγασης του κυλικείου, η δεύτερη πόρτα βρίσκεται στο μέσο περίπου του χώρου από την οποία γίνεται και η είσοδος των φοιτητών και τέλος η τρίτη πόρτα βρίσκεται στο πίσω δεξιά μέρος του χώρου η οποία χρησιμοποιείται σπάνια έως καθόλου όπως φαίνεται και στην κάτοψη στην εικόνα 20. Οι τρεις πόρτες συνδέουν τον χώρο του κυλικείου με ένα ημι στεγασμένο

χώρο ο οποίος χρησιμοποιείται από τους φοιτητές ως καθιστικός, και περιλαμβάνει τραπέζια και καρέκλες. Ο χώρος αυτός είναι ουσιαστικά το κεντρικό ισόγειο τμήμα του κτηρίου K2 αλλά δεν είναι κλειστό με τζάμι όπως του κτηρίου K1 και περιτριγυρίζεται από τοίχους με μεγάλα κενά. Επίσης ο χώρος περιλαμβάνει δύο παράθυρα (με βορειοανατολικό προσανατολισμό) τα οποία βρίσκονταν σε ανάκληση κατά το μεγαλύτερο μέρος των πειρατικών μετρήσεων και συνδέονται με το εξωτερικό περιβάλλον, απέναντι από το εργαστήριο Ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων που ήταν τοποθετημένα τα όργανα που μετρούσαν τις συγκεντρώσεις μάζας του εξωτερικού περιβάλλοντος.



Εικόνα 20: Κάτοψη Κυλικείου σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος

Στο χώρο μελέτης στεγάζεται το κυλικείο της Σχολής στο οποίο εργάζονταν ένα με δύο άτομα κατά την διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων. Οι εργασίες περιλαμβάνουν την ετοιμασία ροφημάτων, την πώληση φαγητού το οποίο δεν παρασκευάζεται εκεί και την πώληση αναψυκτικών. Στο κομμάτι αυτό υπάρχουν ηλεκτρικές συσκευές για την προετοιμασία καφέ, δυο ψυγεία και ένα έπιπλο-βιτρίνα για τα φαγητά που πωλούνται στο κυλικείο. Ο χώρος απέιχε 3 μέτρα από τη θέση των οργάνων, η οποία στην κάτοψη σηματοδοτείται με το κόκκινο χ (εικόνα 20).



Εικόνα 21: Κυλικείο σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος

Εκτός των δραστηριοτήτων στο κυλικείο, στο χώρο υπήρχαν 4 με 5 τραπέζια (ανάλογα με την μέρα των μετρήσεων) και καρέκλες τα οποία χρησιμοποιούνταν από φοιτητές για διάβασμα, φαγητό, καφέ και κάπνισμα. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων μας η παρουσία ατόμων σε αυτή την θέση ήταν αρκετά συχνή καθώς οι καιρικές συνθήκες δεν επέτρεπαν πάντα στους φοιτητές να κάθονται στον εξωτερικό χώρο.

Ο χώρος αυτός είναι ένας από του βασικότερους χώρους, με πολύ μεγάλη κίνηση μέσα στο πολυτεχνείο πέραν από την επίσκεψη φοιτητών στο κυλικείο, ο χώρος είναι και είσοδος και έξοδος για το κτήριο K2 και για τις αίθουσες που υπάρχουν εντός αυτού. Ο αριθμός των ατόμων αυξομειώνονταν πολύ συχνά ιδιαίτερα κατά την διάρκεια του διαλείμματος από τα μαθήματα και για περίπου 15 λεπτά ο χώρος γέμιζε από φοιτητές οι οποίοι επισκέπτονταν το κυλικείο ή εισέρχονταν ή εξέρχονταν από το κτήριο. Στην πρώτη φάση μετρήσεων από τις 6/11 έως και τις 8/11 ο αριθμός των ατόμων κυμάνθηκε από 2 έως 20 άτομα με το μεγαλύτερο μέρος των μετρήσεων (90%) ο αριθμός των ατόμων να ξεπερνά τα 10. Στην δεύτερη φάση μετρήσεων για τις ημέρες 27 και 28 Νοεμβρίου ο μέσος αριθμός των ατόμων αυξήθηκε και στο χώρο βρισκόντουσαν από 2 έως και 26 άτομα με το 90% των τιμών να ξεπερνάει τα 16 άτομα.

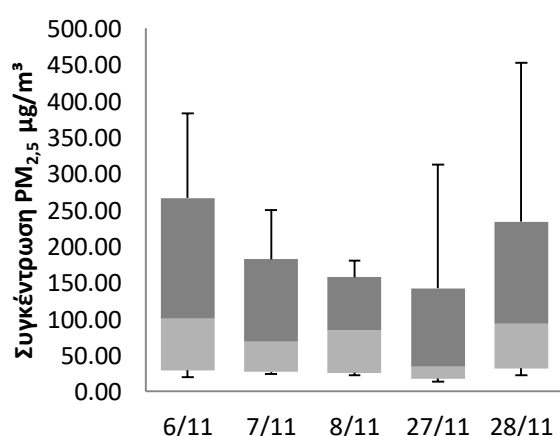
Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο κυλικείο από τις 6 Νοεμβρίου έως και τις 8 Νοεμβρίου και από τις 27 έως και τις 29 Νοεμβρίου. Τα όργανα Dust trak II (μοντέλο 8532), P-trak (μοντέλο 8525) και OPS (μοντέλο 3330) ήταν τοποθετημένα πάνω σε τραπέζι το οποίο βρισκόταν σε απόσταση μικρότερη από ένα μέτρο από τα παράθυρα του χώρου και την τρίτη πόρτα όπως φαίνεται και στην εικόνα 20 (κόκκινο χ). Επίσης τα όργανα ήταν κοντά και στα άλλα τραπέζια που βρισκόντουσαν στο χώρο (απόσταση μικρότερη από ένα μέτρο) με αποτέλεσμα πολλές φορές άτομα να κάθονται πολύ κοντά στα όργανα.

Οι μετρήσεις εντός του χώρου μελέτης πραγματοποιήθηκαν για 6 ώρες κάθε μέρα και οι ώρες που επιλέχθηκαν είχαν σκοπό να συμπεριλάβουν και την πρωινή κίνηση, καθώς και την απογευματινή η οποία είναι σημαντικά μικρότερη.

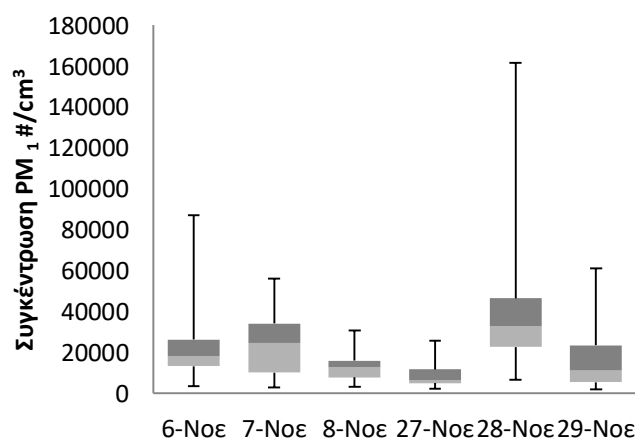
Πίνακας 20: Στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκεντρώσεων μάζας (σωματίδια $PM_{2.5}$) και αριθμού (Σωματίδια PM_1) για το χώρο του κυλικείου.

	Συγκέντρωση μάζας σωματιδίων $PM_{2.5}$ [$\mu g/m^3$]					Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων PM_1 [#/ cm^3]					
	6/11	7/11	8/11	27/11	28/11	6/11	7/11	8/11	27/11	28/11	29/11
Ελάχιστη τιμή	20	24	23	14	22	3567	2922	3417	2237	6775	2168
Μέγιστη τιμή	383	250	180	312	453	87038	55986	30803	25800	161533	61171
Μέση τιμή	120	90	84	50	110	22561	23651	12494	8853	37173	17239
Διάμεσος	101	69	84	34	93	18255	24696	12758	6687	32925	11179
Εκατοστημοριακή κατάταξη 95%	266	183	158	142	234	58414	45796	21596	19328	71190	50543
Εκατοστημοριακή κατάταξη 5%	29	27	26	18	32	6856	5135	4441	3215	10524	2988
Τυπική απόκλιση	79	54	41	48	74	15473	13387	5648	5187	23332	15463

Την πρώτη εβδομάδα μετρήσεων η συγκέντρωση κυμάνθηκε από 20 έως και $380 \frac{\mu g}{m^3}$, με την μέση συγκέντρωση να είναι $291 \pm 58 \frac{\mu g}{m^3}$, ενώ την δεύτερη εβδομάδα μετρήσεων η συγκέντρωση κυμάνθηκε από 14 έως και $453 \frac{\mu g}{m^3}$ με την μέση συγκέντρωση να είναι $80 \pm 61 \frac{\mu g}{m^3}$. Τα αποτελέσματα του πίνακα παρουσιάζονται και με τη μορφή διαγραμμάτων Whisker στο σχήμα 11.

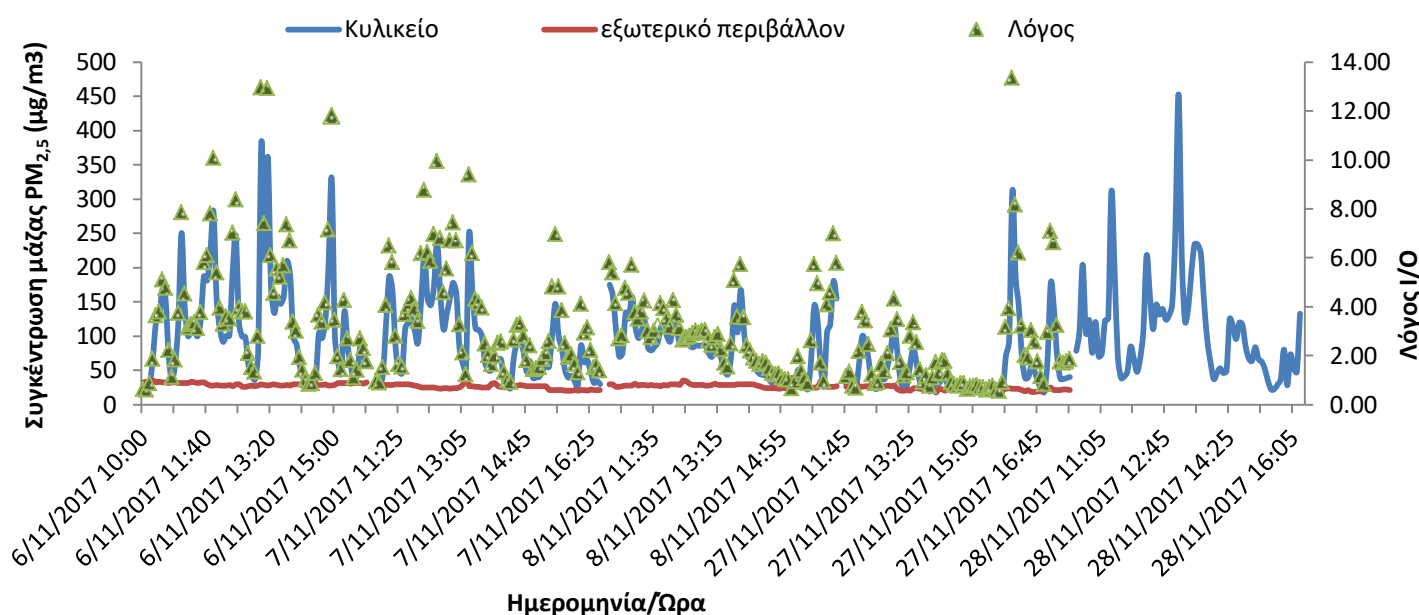


Σχήμα 11: Διάγραμμα Whisker για την συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ εντός του κυλικείου.



Σχήμα 12: Διάγραμμα Whisker με την διακύμανση του αριθμού των σωματιδίων PM_1 εντός του κυλικείου.

Από τον πίνακα 20 και το σχήμα 11 μπορούμε να δούμε ότι υπάρχει διαφορά μεταξύ διάμεσης και μέσης τιμής μεγαλύτερη από 15% το οποίο υποδηλώνει την έντονη αυξομείωση της συγκέντρωσης των σωματιδίων ειδικά για τις ημερομηνίες 6/11, 7/11 και 28/11 υποδεικνύοντας έντονες, μικρής διάρκειας αυξομειώσεις στις συγκεντρώσεις των σωματιδίων $PM_{2.5}$. Μεγάλη τιμές παρατηρούνται επίσης και στην τυπική απόκλιση παρουσιάζοντας το ευρύ φάσμα τιμών που λαμβάνει η συγκέντρωση. Η χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης μάζας παρουσιάζεται και στο σχήμα 7.



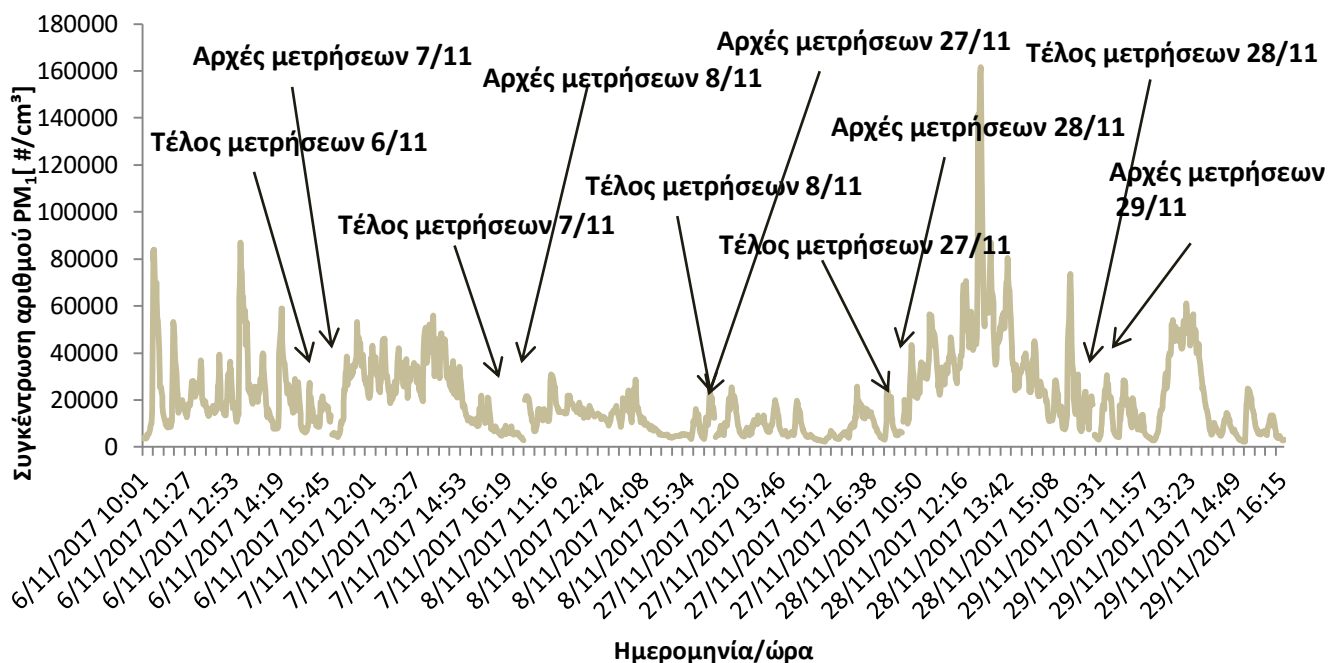
Σχήμα 13: Διάγραμμα μεταβολής της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ εντός του χώρου του κυλικείου και του εξωτερικού περιβάλλοντος καθώς και ο λόγος I/O

Από το σχήμα 13 παρατηρείται ότι η συγκέντρωση μάζας των $PM_{2.5}$ εντός του χώρου του κυλικείου δεν παρουσιάζει καθόλου σταθερή διακύμανση αλλά συνεχείς αυξομειώσεις καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων. Οι τιμές της συγκέντρωσης είναι πολύ μεγαλύτερες από τους άλλους χώρους αλλά και από το εξωτερικό περιβάλλον όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 7. Για όλες τις μέρες στο κυλικείο η συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ φτάνει τις υψηλότερες τιμές τις μεσημεριανές ώρες από τις 12:00 έως και 14:00 όπου στο χώρο βρίσκονται και περισσότεροι φοιτητές βάση του ημερολογίου δραστηριοτήτων, με τον αριθμό τους να κυμαίνεται μεταξύ 10 και 20 ατόμων. Από το σχήμα 13 μπορούμε να δούμε ότι οι κορυφές που εμφανίζονται αντιστοιχούν στο ακαδημαϊκό τέταρτο, την ώρα του διαλείματος δηλαδή όπου στο χώρο αυτό έρχονται πολλά άτομα τα οποία βρισκότουσαν στις αίθουσες για μάθημα. Χαμηλότερες συγκεντρώσεις παρουσιάζονται στις 8 Νοεμβρίου (Τετάρτη) και στις 27 Νοεμβρίου (Δευτέρα) σε σχέση με τις υπόλοιπες ημέρες. Η Τετάρτη είναι μία μέρα που στο Πολυτεχνείο τα μαθήματα τελειώνουν 14:00 με αποτέλεσμα εκείνη την μέρα η κίνηση του κόσμου στο κυλικείο ήταν πολύ μικρότερη τις απογευματινές ώρες, όπως φαίνεται και στο σχήμα με την συγκέντρωση να μειώνεται, με τον αριθμό των ατόμων να βρίσκεται κάτω από τα 10 για το μεγαλύτερο μέρος των μετρήσεων. Όσον αφορά την Δευτέρα 27/11, ο αριθμός των ατόμων κυμάνθηκε μεταξύ 2 και 26 αλλά παρόλα αυτά οι τιμές της

συγκέντρωσης είναι μικρότερες και αυτό μπορεί να οφείλεται στις εξωτερικές καιρικές συνθήκες, καθώς έβρεχε με αποτέλεσμα την υγρή εναπόθεση των σωματιδίων στο έδαφος και την ελάχιστη δυνατή εισχώρηση τους στο εσωτερικό περιβάλλον. Οι μεγαλύτερες τιμές της συγκέντρωσης μάζας παρατηρούνται στις 28/11 με την μέγιστη τιμή να εμφανίζεται στις 13:05 ($453 \frac{\mu g}{m^3}$). Εκείνη την χρονική στιγμή βάση του ημερολογίου δραστηριοτήτων υπήρχε κίνηση στο χώρο και 3 τσιγάρα αναμμένα..

Στο σχήμα 13 παρουσιάζεται και η συγκέντρωση του εξωτερικού περιβάλλοντος για τις αντίστοιχες ημέρες με σταθερή διακύμανση καθ όλη την διάρκεια των μετρήσεων. Δεν εμφανίζονται οι τιμές του εξωτερικού περιβάλλοντος και του λόγου για την 28/11 για μεγαλύτερη ευκρίνεια, καθώς η συγκέντρωση του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι πάρα πολύ μεγάλη. Οι μέσες συγκεντρώσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι $35 \pm 29 \frac{\mu g}{m^3}$ (17 έως και $104 \frac{\mu g}{m^3}$) σε σχέση με το κυλικείο η οποία ήταν $291 \pm 58 \frac{\mu g}{m^3}$ για την πρώτη περίοδο μετρήσεων ενώ την δεύτερη υπάρχουν μετρήσεις μόνο για τις 27/11 όπου η μέση τιμή της συγκέντρωσης ήταν $24 \pm 19 \frac{\mu g}{m^3}$ σε σχέση με την συγκέντρωση εντός του κυλικείου η οποία ήταν $50 \pm 48 \frac{\mu g}{m^3}$. Η τιμές της συγκέντρωσης στο χώρο του κυλικείο είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που παρουσιάστηκαν στο εξωτερικό περιβάλλον κάτι που φαίνεται και από τον λόγο I/O ο οποίος κυμάνθηκε μεταξύ 0,6 έως και 13,3. Οι τιμές του λόγου είναι πολύ μεγάλες και μόνο το 14% βρίσκεται κάτω από την μονάδα το οποίο μας οδηγεί στο συμπέρασμα της ύπαρξης εσωτερικών πηγών εντός του χώρου καθώς και ο δείκτης συσχέτισης μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος ήταν πάρα πολύ μικρός ($R^2=0.0015$). Σε παρόμοια μελέτη στη Σρι Λάνκα έγιναν μετρήσεις σε μπαρ και καφετέριες όπου επιτρεπόταν το κάπνισμα και οι τιμές της συγκέντρωσης εντός των χώρων για τα σωματίδια $PM_{2.5}$ ήταν 33 έως $299 \frac{\mu g}{m^3}$ ενώ στο εξωτερικό περιβάλλον 18 έως $83 \frac{\mu g}{m^3}$ (Sumal Nandasena et al., 2012). Σε όλους τους εσωτερικούς χώρους, τα επίπεδα των $PM_{2.5}$ βρέθηκαν υψηλότερα από τα πρότυπα όρια. Όλοι οι εσωτερικοί χώροι εμφάνισαν υψηλότερα επίπεδα $PM_{2.5}$ ως προς το εξωτερικό περιβάλλον τους.

Την ίδια χρονική περίοδο μετρήθηκε και η συγκέντρωση αριθμού των σωματιδίων PM_{10} , με την βοήθεια τους οργάνου P-Trak 8525 Η μέση τιμή της συγκέντρωσης μάζας για την πρώτη φάση μετρήσεων ήταν $19568 \pm 34508 \frac{\#}{cm^3}$ και στην δεύτερη φάση μετρήσεων $21088 \pm 14660 \frac{\#}{cm^3}$. Τα αποτελέσματα του πίνακα για τον αριθμό παρουσιάζονται και σε μορφή whisker στο σχήμα 12 και η μεταβολή της συγκέντρωσης του αριθμού σωματιδίων παρουσιάζεται στο σχήμα 14.



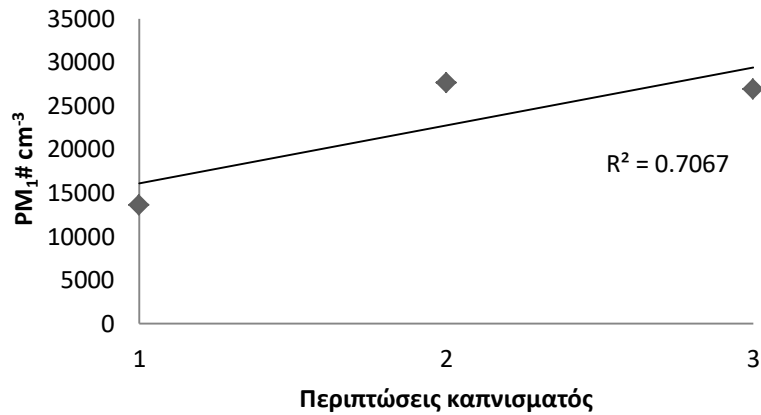
Σχήμα 14: Διάγραμμα διακύμανσης αριθμού των σωματιδίων PM_1 εντός του κυλικείου.

Από τα σχήματα 13 και 14 παρατηρούμε ότι η διακύμανση του αριθμού σωματιδίων PM_1 ακολουθεί παρόμοια διακύμανση με την συγκέντρωση μάζας των $PM_{2.5}$, με τις χαμηλότερες τιμές και σε αυτήν την περίπτωση να εμφανίζονται τις ημέρες 8/11 και 27/11. Υψηλότερες τιμές εμφανίζονται τις μέρες 6/11 και 28/11. Από το σχήμα μπορούμε να δούμε ότι οι κορυφές που εμφανίζονται αντιστοιχούν στο ακαδημαϊκό τέταρτο, την ώρα του διαλλείματος δηλαδή όπου στο χώρο αυτό έρχονται πολλά άτομα τα οποία βρισκόντουσαν στις αίθουσες για μάθημα. Η υψηλότερη τιμή παρατηρείται στις 28/11 στις 12:50 όπου στο χώρο του κυλικείου υπάρχει κίνηση καθώς και ανάμενα τσιγάρα.

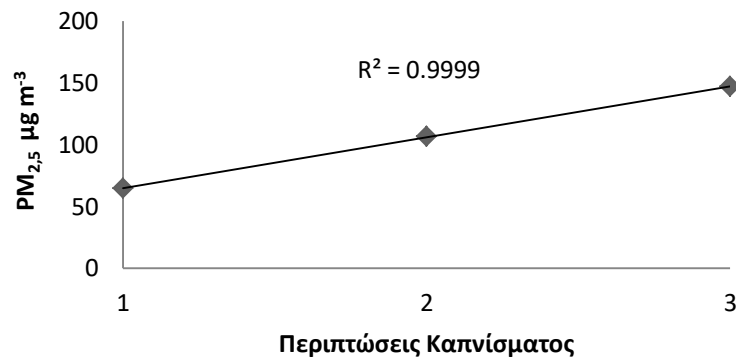
Οι περιπτώσεις των μέγιστων τιμών συγκέντρωσης μάζας και αριθμού για τα σωματίδια $PM_{2.5}$ και PM_1 αντίστοιχα πραγματοποιήθηκαν σε χρονικές περιόδους που υπήρχε κίνηση ατόμων αλλά και κάπνισμα. Οι δύο αυτές δραστηριότητες αποτελούν βασικές εσωτερικές πηγές αιωρούμενων σωματιδίων για το χώρο μελέτης. Έντονη κίνηση των ατόμων στο χώρο παρατηρείται κατά την διάρκεια των διαλλειμάτων από τα μαθήματα και μπορούμε να δούμε από τα σχήματα 13 και 14 ότι υπάρχει αύξηση κατά κύριο λόγο της συγκέντρωσης μάζας και αριθμού κατά την διάρκεια αυτών.

Από τα παρακάτω διαγράμματα στα οποία παρουσιάζεται η συσχέτιση του καπνίσματος με την αύξηση της συγκέντρωσης αριθμού και μάζας για τα σωματίδια $PM_{2.5}$ και PM_1 μπορούμε να επιβεβαιώσουμε τη σημαντική επίδραση του καπνίσματος στην συγκέντρωση μάζας και αριθμού των αιωρούμενων σωματιδίων.

Στα σχήματα 15 και 16 παρουσιάζονται οι 3 περιπτώσεις στις οποίες χωρίστηκαν οι πειραματικές τιμές, οι οποίες είναι Περίπτωση 1: 10 λεπτά πριν την ύπαρξη τσιγάρου, Περίπτωση 2: Ύπαρξη ενός αναμένου τσιγάρου στο χώρο και τέλος οι Περίπτωση 3: ύπαρξη 2 ή περισσότερων αναμένων τσιγάρων στο χώρο.



Σχήμα 15: Διάγραμμα συσχέτισης καπνίσματος με τον αριθμό των μικρών σωματιδίων PM₁



Σχήμα 16: Διάγραμμα συσχέτισης καπνίσματος με την συγκέντρωση μάζας PM_{2,5}

Για τις τρεις περιπτώσεις αυτές υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές και τοποθετήθηκαν σε διάγραμμα ώστε να υπολογιστεί η συσχέτιση, με την βοήθεια του δείκτη R^2 . Όσον αφορά τον αριθμό των σωματιδίων PM₁ ο δείκτης είναι 0,7 και δείχνει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ του καπνίσματος και του αριθμού των σωματιδίων αυτών. Ακόμα μεγαλύτερο δείκτη με το R^2 να φτάνει την μονάδα (σχήμα 16) έχουμε στην περίπτωση της συγκέντρωσης μάζας των PM_{2,5} δείχνοντας την απόλυτη συσχέτιση. Σε μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε ένα εργαστήριο με σκοπό την έρευνα επιρροής συγκεκριμένων πηγών υπό εργαστηριακές συνθήκες βρέθηκε ότι το κάπνισμα προκάλεσε από τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αριθμού και μάζας σε σχέση με άλλες πηγές με το μέσο μέγιστο αριθμό για δύο πειράματα με τσιγάρο ήταν $1,8 \cdot 10^5 \pm 0,24 \cdot 10^5 \frac{\#}{\text{cm}^3}$ ενώ η μέση μέγιστη τιμή της μάζας για τα σωματίδια PM_{2,5} $1200 \pm 200 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ (Glytsos et al. 2010). Επίσης στην ίδια μελέτη κατέληξαν στο ότι τα σωματίδια αυτά παραμένουν για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα στον αέρα σε σύγκριση με άλλα από άλλες πηγές και ότι υπάρχει κάποιος μηχανισμός ανάπτυξης καθώς μεγαλώνουν οι διάμετροι τους. Επίσης σε ένα εστιατόριο στο Μπέρμινγχαμ η συγκέντρωση των PM_{2,5} έφτασε τα $287 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ σε τμήμα καπνιστών ενώ στο τμήμα καπνιστών κυμαίνονταν στα $34 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ (Gurung et al., 2016).

Επίσης πραγματοποιήθηκε μέτρηση συγκέντρωσης μάζας με το Optical Particle Sizer (μοντέλο 3330) για σωματίδια 0,3-10 μm , τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 16 καθώς χωρίστηκαν σε 3 κατηγορίες για να γίνει παρατήρηση της συμπεριφοράς τους. Παρατηρείται διαφορά στον αριθμό ημερών που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις καθώς παρουσιάστηκε σφάλμα στο όργανο Optical Particle Sizer και δεν μετρήθηκαν οι ημέρες 27,28 και 29 Νοεμβρίου όπως στα άλλα δύο όργανα.

Πίνακας 21: Στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων μάζας $\text{PM}_{0,3-1}$, $\text{PM}_{1-2,5}$ και $\text{PM}_{2,5-10}$ για το χώρο το κυλικείου

$\left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}\right)$	0.3-1 μm			1-2.5 μm			2,5-10 μm		
	6-Νοε	7-Νοε	8-Νοε	6-Νοε	7-Νοε	8-Νοε	6-Νοε	7-Νοε	8-Νοε
Ελάχιστο	1,44	1,65	1,32	0,91	0,86	2,04	1,87	2,70	5,72
Μέγιστο	137,16	63,17	29,22	14,69	15,30	10,77	83,25	155,72	518,83
Μέση τιμή	12,58	9,95	9,38	1,96	1,84	2,73	12,92	13,31	20,55
Διάμεσος	10,30	7,57	9,11	1,80	1,61	2,60	11,27	11,34	13,41
Percentile 95%	32,85	24,34	19,93	2,96	3,13	3,54	25,32	23,68	33,02
Percentile 5%	2,12	2,08	2,02	1,16	1,08	2,16	4,11	4,81	8,17
Τυπική απόκλιση	11,64	7,89	5,69	0,89	1,16	0,74	8,58	11,79	37,88

Οι μέσες συγκεντρώσεις των $\text{PM}_{0,3-1}$, $\text{PM}_{1-2,5}$ και $\text{PM}_{2,5-10}$ ήταν $10,6 \pm 8 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$, $2,2 \pm 0,93 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ και $16 \pm 7 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ αντίστοιχα. Από τον πίνακα 16 μπορούμε να δούμε ότι υπάρχει διαφορά μεταξύ της μέσης τιμής και της διαμέσου για την συγκέντρωση και των 3 κατηγοριών σωματιδίων η οποία κυμαίνεται μεταξύ 8% και 20% με μεγαλύτερη διαφορά στα σωματίδια $\text{PM}_{2,5-10}$ υποδεικνύοντας την ύπαρξη έντονων αυξομειώσεων για πολύ μικρό χρονικό διάστημα σε ώρα που υπήρχε μεγάλη κίνηση στο κυλικείο από φοιτητές. Μεγάλες τιμές παρουσιάζει και η τυπική απόκλιση στα σωματίδια $\text{PM}_{0,3-1}$ και $\text{PM}_{2,5-10}$ σε συνδυασμό και με πάρα πολύ υψηλές μέγιστες τιμές το οποίο ενδέχεται να οφείλεται σε μεγάλα ρεύματα αέρα που εισχώρησαν εντός του χώρου σε συνδυασμό με την κίνηση των φοιτητών.

Με την βοήθεια του ημερολογίου δραστηριοτήτων χωρίστηκαν τα δεδομένα με σκοπό να εξετάσουμε την επιρροή της κίνησης των ατόμων για κάθε μία από τις κατηγορίες σωματιδίων και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 22: Στατιστικά στοιχεία για την συγκέντρωση μάζας την ώρα του διαλείμματος και λίγο πριν από αυτό στο χώρο του κυλικείου.

$\left(\frac{\mu g}{m^3}\right)$	0,3-1 μm			1-2,5 μm			2,5-10 μm		
	6- Νοε	7- Νοε	8- Νοε	6- Νοε	7- Νοε	8- Νοε	6- Νοε	7- Νοε	8- Νοε
10 λεπτά πριν το διάλειμμα	14,37	6,50	10,13	1,92	1,55	2,58	10,25	11,49	13,39
διάλλειμμα	12,23	11,18	9,24	2,21	2,19	2,80	16,31	14,61	21,39

Από τον Πίνακα 22 μπορούμε να δούμε ότι η κίνηση του κόσμου επηρεάζει κυρίως τα σωματίδια $PM_{2,5-10}$ καθώς με το περπάτημα επαν-αιωρούνται σωματίδια που έχουν καθίζηση στο έδαφος λόγω της βαρύτητας. Επίσης την ώρα του διαλείμματος οι φοιτητές ανοίγουν την μεσαία πόρτα για να εξέλθουν από τον χώρο δίνοντας την δυνατότητα στα αιωρούμενα σωματίδια από το εξωτερικό περιβάλλον να εισέλθουν ευκολότερα.

Επιπλέον με την βοήθεια του ημερολογίου δραστηριοτήτων εξετάσαμε και την περίπτωση του καπνίσματος και την επιρροή του στην συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων $PM_{0,3-1}$, $PM_{1-2,5}$ και $PM_{2,5-10}$ και τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 23: Στατιστικά στοιχεία συγκέντρωσης μάζας για την περίπτωση του καπνίσματος στο χώρο του κυλικείου.

$\left(\frac{\mu g}{m^3}\right)$	0,3-1 μm			1-2,5 μm			2,5-10 μm		
	6-Νοε	7-Νοε	8-Νοε	6-Νοε	7-Νοε	8-Νοε	6-Νοε	7-Νοε	8-Νοε
10 λεπτά πριν	8,41	9,29	6,09	1,96	1,83	2,72	15,63	16,74	26,55
1 τσιγάρο	17,10	13,00	13,95	2,57	2,22	2,63	13,34	13,31	15,39
2 + τσιγάρα	25,27	13,78	-	2,61	1,61	-	15,18	8,26	-

Σε αυτήν την περίπτωση εξετάστηκε η χρονική περίοδος των 10 λεπτών πριν την έναρξη του καπνίσματος και η ύπαρξη ενός και δύο τσιγάρων αναμμένων. Από τον πίνακα βλέπουμε ότι το κάπνισμα επηρεάζει κυρίως τα σωματίδια $PM_{0,3-1}$ και φαίνεται να μην έχει καμία επιρροή στα μεγαλύτερα σωματίδια $PM_{2,5-10}$.

Για τις ίδιες ημερομηνίες πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις στο εξωτερικό περιβάλλον ώστε να εξεταστεί η εισχώρηση των σωματιδίων από το εξωτερικό στο εσωτερικό περιβάλλον. Οι μέσες συγκεντρώσεις των $PM_{0,3-1}$, $PM_{1-2,5}$ και $PM_{2,5-10}$ ήταν $1,5 \pm 0,6 \frac{\mu g}{m^3}$, $1,5 \pm 0,5 \frac{\mu g}{m^3}$ και $6 \pm 3 \frac{\mu g}{m^3}$ αντίστοιχα, οι οποίες είναι πολύ μικρότερες από αυτές που παρουσιάστηκαν εντός του κυλικείου. Η μεγάλη διαφορά στις συγκεντρώσεις φαίνεται και αν εξετάσουμε τον λόγο I/O όπου οι τιμές του παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Μεγάλο ενδιαφέρον έχουν τα σωματίδια

PM_{0,3-1} για τα οποία η τιμή του λόγου δεν πέφτει κάτω από την μονάδα παρ'όλου που συνήθως τα υπέρλεπτα σωματίδια εισέρχονται από το εξωτερικό περιβάλλον. Επίσης και εδώ εμφανίζεται η διαφορά για την ημέρα Τετάρτη 8/11 όπου οι τιμές του λόγου είναι μικρότερες από τις 7/11. Βέβαια μικρότερη επίδραση της συγκεκριμένης κατάστασης φαίνεται να έχει στα σωματίδια PM_{0,3-1} όπου ακόμα και η ελάχιστη τιμή του λόγου είναι μεγαλύτερη της.

Πίνακας 24: Στατιστικά στοιχεία σύγκρισης κυλικείου και εξωτερικού περιβάλλοντος

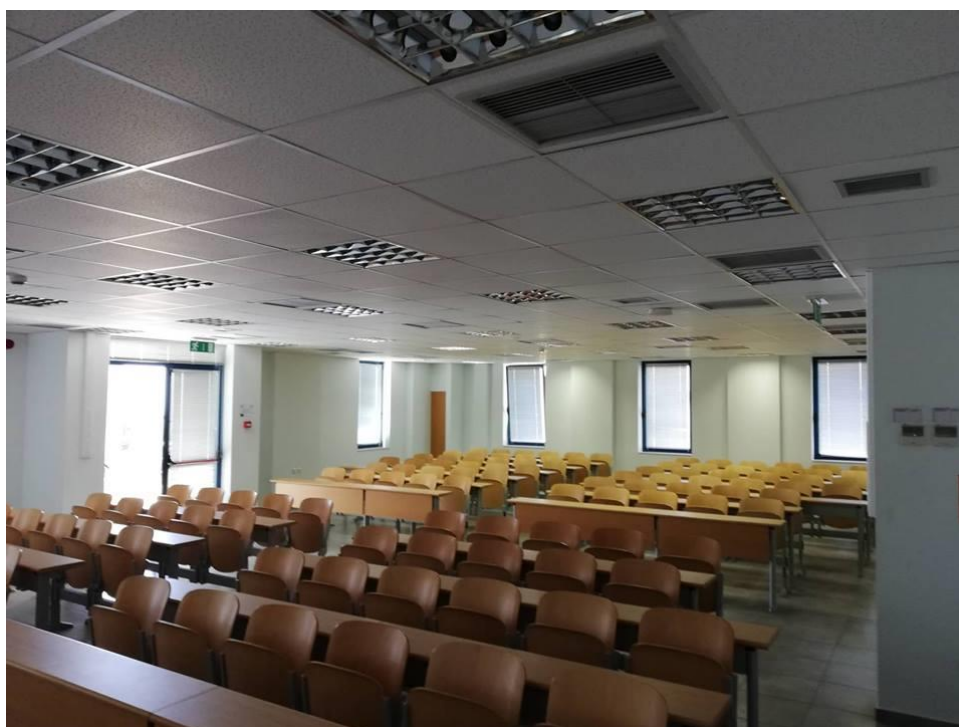
		0,3-1 μm		1-2,5 μm		2,5-10 μm	
		7-Νοε	8-Νοε	7-Νοε	8-Νοε	7-Νοε	8-Νοε
Συσχέτιση		0,033	0,076	0,0012	0,045	0,0003	0,051
Λόγος (Ι/Ο)	Ελάχιστο	1,58	1,26	0,55	0,81	0,13	0,52
	Μέγιστο	56,01	39,02	13,57	4,66	62,98	32,65
	Μέση τιμή	9,83	8,64	1,76	1,41	5,28	2,06

Επίσης έγινε έρευνα και όσον αφορά την επίδραση των εξωτερικών συγκεντρώσεων στο χώρο του κυλικείου με την βοήθεια του δείκτη συσχέτισης (R^2). Οι τιμές του R^2 είναι πολύ μικρές για όλες τις διαμέτρους το οποίο σημαίνει ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος παρόλο που υπάρχουν δύο παράθυρα ανοιχτά σε ανάκληση για το μεγαλύτερο μέρος των πειραματικών μετρήσεων, τα οποία μάλιστα είναι σε απόσταση ενός μέτρου από τα όργανα. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί η αύξηση του δείκτη R^2 στις 8/11 ακόμα και αν είναι πολύ μικρός καθώς όπως έχει ειπωθεί και προηγουμένως, την ημέρα αυτή η κίνηση των φοιτητών στο χώρο μελέτης είναι μικρότερη σε διάρκεια με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη επίδραση από το εξωτερικό περιβάλλον ειδικότερα για τα σωματίδια PM_{2,5-10}.

Σε χώρους όπως είναι οι καφετέριες, τα εστιατόρια και τα κυλικεία υπάρχουν πάρα πολλές εσωτερικές πηγές όπως είναι η κίνηση των ανθρώπων, το σερβίρισμα, το κάπνισμα, τα κεριά, το μαγείρεμα και πολλές άλλες με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις να είναι αρκετά υψηλότερες στο εσωτερικό από ότι στο εξωτερικό περιβάλλον όπως συμβαίνει και στην περίπτωση του κυλικείου της σχολής Μηχανικών περιβάλλοντος. Σημαντική πηγή κυρίως για τα λεπτά και υπέρλεπτα σωματίδια είναι το κάπνισμα που αυξάνει σημαντικά τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων το οποίο συμφωνεί και με άλλες μελέτες (Sumal Nandasena et al., 2012, Gurung et al., 2016). Για τα χονδρά σημαντική πηγή είναι η συχνή κίνηση των φοιτητών κυρίως την ώρα του διαλλείματος. Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε εστιατόριο στην Ατλάντα κατά την διάρκεια εκδηλώσεων συγκεντρώσεις κατά μάζα των PM_{2,5} βρέθηκαν μεγαλύτερες των $100 \frac{\mu g}{m^3}$ και η αριθμητική συγκέντρωση των υπέρλεπτων σωματιδίων ίση με $4105 \frac{\#}{cm^3}$ (Brown et al., 2011).

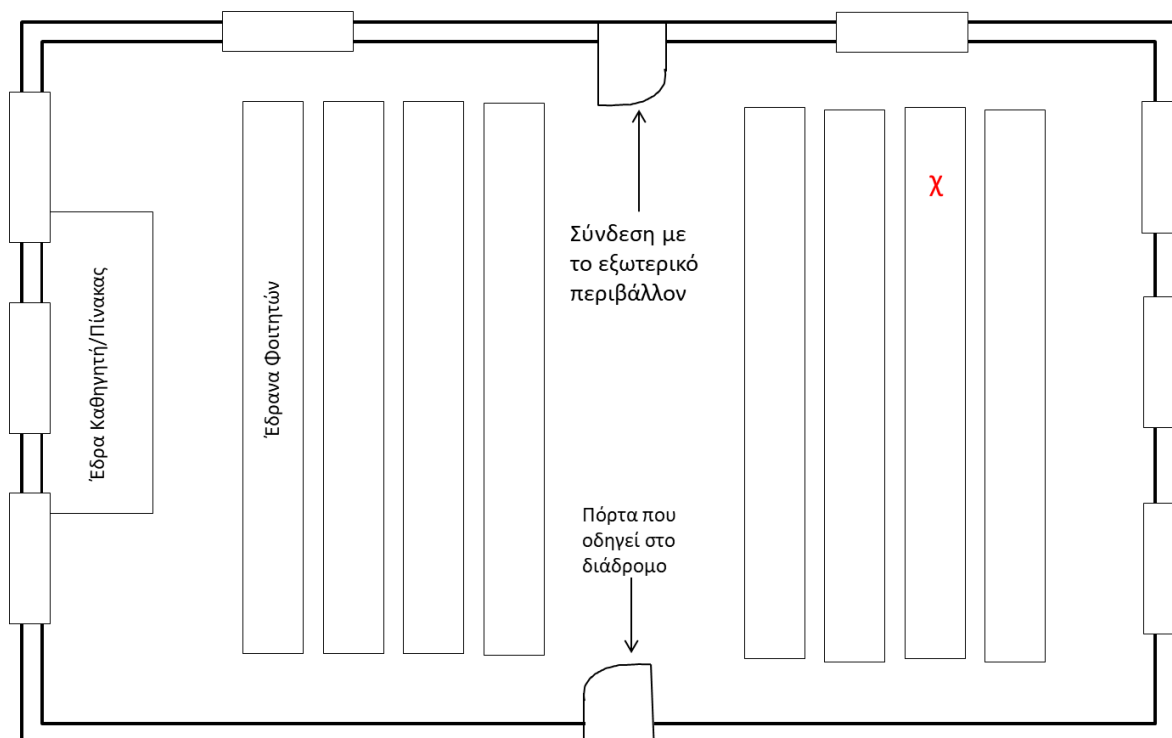
4.5 Χώρος Μελέτης : Αίθουσα Διδασκαλίας K2.A1

Ο χώρος της αίθουσας K2.A1 βρίσκεται στον πρώτο αριστερά όροφο του κτηρίου K2. Η αίθουσα περιέχει θρανία και ένα πλαστικό πίνακα στον οποίο χρησιμοποιούνται μαρκαδόροι όπως φαίνεται. Επιπλέον έχει 8 μεγάλα παράθυρα τα οποία επικοινωνούν είτε απευθείας με μεγάλο μπαλκόνι (1) είτε βρίσκονται υψηλότερα από την επιφάνεια του εδάφους και επικοινωνούν με ακάλυπτο χώρο (κυρίως έδαφος με χώμα). Κατά την διάρκεια των μετρήσεων έγινε χρήση των παραθύρων που βρίσκονταν στο πίσω μέρος της αίθουσας όπως φαίνονται στην εικόνα 22, τα οποία επιλεκτικά άνοιγαν σε ανάκληση για κάποιες ώρες κατά την διάρκεια της μέρας. Οι δύο πόρτες της αίθουσας τη συνδέουν με το παραπάνω μπαλκόνι και με το εσωτερικό του κτηρίου K2 αντίστοιχα. Πρέπει να αναφερθεί ότι η παρουσία ατόμων στο μπαλκόνι είναι περιορισμένη και λαμβάνει χώρα κυρίως τις ώρες διδασκαλίας στη αίθουσα, ενώ το εξωτερικό περιβάλλον γύρω από την αίθουσα δέχεται μικρή επίδραση από τη κίνηση των αυτοκινήτων στους χώρους του Πολυτεχνείου.



Εικόνα 22: Αίθουσα K2.A1

Η αίθουσα μπορεί να φιλοξενήσει περίπου 150 άτομα, αλλά κατά την διάρκεια των μετρήσεων αριθμός ατόμων κυμάνθηκε από 0 έως 50 άτομα. Διαθέτει σύστημα κλιματισμού το οποίο λειτουργούσε επιλεκτικά κατά τη διάρκεια των δειγματοληψιών. Συγκεκριμένα το σύστημα κλιματισμού ενεργοποιήθηκε, μετά από παρέμβαση των ατόμων που βρίσκονται στην αίθουσα, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων μόνο μία φορά για να θερμάνει το χώρο για μικρό χρονικό διάστημα .



Εικόνα 23: Κάτοψη Αίθουσας K2.A1

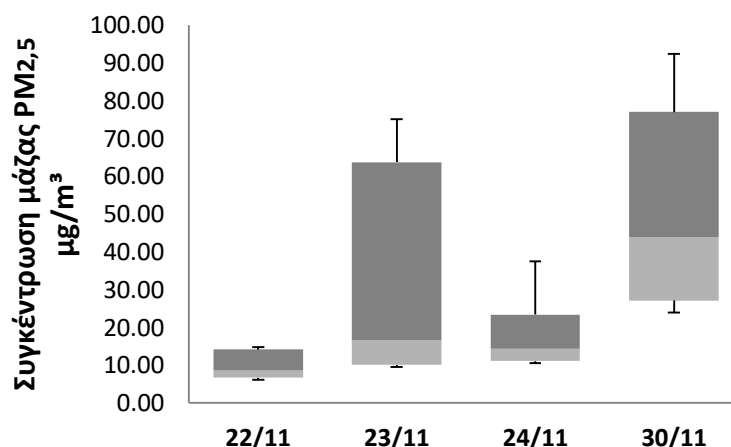
Τα όργανα Dustrak II (μοντέλο 8532) και P-trak (μοντέλο 8525) τοποθετήθηκαν στο πίσω αριστερό μέρος της αίθουσας όπως φαίνεται στην εικόνα 23 (σημείο χ), κοντά σε 2 από τα παράθυρα και σχετικά μακριά από τις 2 πόρτες, σε απόσταση μεγαλύτερη των 3 μέτρων. Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από τις 22/11 έως, 24/11 και 30/11 για 6 συνεχόμενες ώρες κάθε ημέρα. Επιλέχθηκαν χρονικές περίοδοι που στην αίθουσα γινόταν διδασκαλία και χρονικές περίοδοι που η αίθουσα ήταν τελείως κενή από άτομα. Οι χρονικές περίοδοι δεν είναι ακριβώς ίδιες για κάθε ημέρα μετρήσεων, αλλά αρκετά κοντινές (μεταξύ 09:00-17:00) καθώς είναι συγκεκριμένες οι ώρες που υπάρχουν εκπαιδευτικές δραστηριότητες στο Πολυτεχνείο. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για 24 ώρες, εκ' των οποίων 13 αντιστοιχούν σε διδασκαλία και 3 ώρες σε κενή αίθουσα και 8 ώρες με πολύ λίγα άτομα (1 με 2 άτομα). Τις ώρες που δεν υπήρχαν άτομα η αίθουσα παρέμενε κλειδωμένη και τα όργανα κατέγραφαν κανονικά συγκέντρωση μάζας ή αριθμού. Κατά τη διάρκεια των ωρών διδασκαλίας στην αίθουσα βρισκόταν κατά μέσο όρο 36 άτομα. Η παρουσία ατόμων κυμάνθηκε από 10 (ελάχιστη τιμή) σε 50. (μέγιστη τιμή). Οι ώρες διδασκαλίας κάθε μαθήματος ήταν συνήθως 2 με την έναρξη να τοποθετείται χρονικά 15 λεπτά μετά το ακέραιο μέρος της ώρας (π.χ. 12:15), ενώ μετά από 45 λεπτά υπήρχε διάλειμμα 15 λεπτών. Κατά τη διάρκεια του διαλείμματος μεγάλο μέρος των φοιτητών παρέμενε στην αίθουσα ή βρισκόταν στο εξωτερικό μπαλκόνι.

Στον πίνακα 25 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία που προέκυψαν από τις μετρήσεις στην αίθουσα για τις 4 ημέρες και για τα 2 όργανα.

Πίνακας 25: Στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκεντρώσεων μάζας (σωματίδια $PM_{2.5}$) και αριθμού (Σωματίδια PM_1) για το χώρο της αίθουσας.

	Συγκέντρωση μάζας σωματιδίων $PM_{2.5}$ [$\mu g/m^3$]				Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων PM_1 [#/ cm^3]			
	22/11	23/11	24/11	30/11	22/11	23/11	24/11	30/11
Ελάχιστο	6	9	10	24	1106	1424	2151	4048
Μέγιστο	15	75	37	92	2156	17151	6639	22031
Μέση τιμή	9	25	16	46	1523	5985	3479	11506
Διάμεσος	8	16	14	44	1413	4401	3062	10542
Εκατοστημοριακή κατάταξη 95%	14	64	23	77	2029	14988	5323	19695
Εκατοστημοριακή κατάταξη 5%	7	10	11	27	1115	1916	2276	4783
Τυπική απόκλιση	2	17	6	16	304	3962	1065	4301

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στον χώρο της αίθουσας χωρίστηκαν σε 3 μέρες την ίδια βδομάδα (22,23,24) και 1 μέρα την αμέσως επόμενη βδομάδα (30/11). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων η συγκέντρωση μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2.5}$ για τις 3 μέρες κυμάνθηκε στα $16 \pm 8,3 \frac{\mu g}{m^3}$, ενώ την τελευταία μέρα (30/11) μετρήσεων, βλέπουμε ότι η μέση συγκέντρωση έφτασε τα $46 \frac{\mu g}{m^3}$. Τα αποτελέσματα του πίνακα παρουσιάζονται και με τη μορφή διαγραμμάτων Whisker στο σχήμα 17.



Σχήμα 17: Διάγραμμα Whisker για την συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$ εντός της αίθουσας (Όργανο μέτρησης Dustrak II)

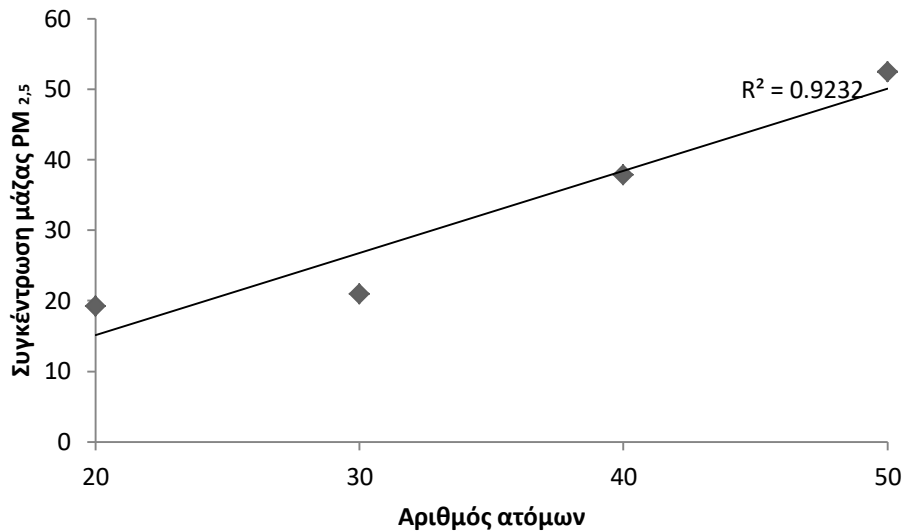
Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι η διάμεσος και η μέση τιμή διαφέρουν ελάχιστα για τις 22, 24 και 30 Νοεμβρίου, το οποίο υποδεικνύει μια σταθερότητα στις τιμές της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$, με εξαίρεση τις 23/11 όπου υπάρχει διαφορά περίπου 35% το οποίο οφείλεται στις αυξημένες τιμές της συγκέντρωσης τις πρώτες ώρες μετρήσεων μεταξύ 09:00 και 11:00 κατά τις οποίες πραγματοποιείται μάθημα εντός της αίθουσας με περίπου 40 άτομα και την εσωτερική πόρτα ανοιχτή. Στο ίδιο χρονικό διάστημα παρατηρήθηκε και η μέγιστη τιμή για εκείνη την μέρα η οποία βρέθηκε κατά την διάρκεια του μαθήματος (09:35) χωρίς να υπάρχει κίνηση στο χώρο. Το ίδιο αποτέλεσμα φανερώνει και η τυπική απόκλιση στις 23/11 καθώς είναι αρκετά μεγαλύτερη, υποδεικνύοντας μεγαλύτερη διακύμανση των τιμών σε σχέση με τις ημέρες 22 και 24 Νοεμβρίου.

Στις 30/11 παρατηρείται το ίδιο αυξημένη τυπική απόκλιση παρά την μικρή διαφορά που παρατηρείται μεταξύ διαμέσου και μέση τιμής. Βέβαια εκείνη την μέρα οι τιμές της συγκέντρωσης είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις υπόλοιπες ημέρες με το 95% των τιμών να βρίσκεται κάτω από $77 \frac{\mu g}{m^3}$ και μόνο το 5% κάτω από $27 \frac{\mu g}{m^3}$. Οι αυξημένες τιμές συγκέντρωσης παρατηρήθηκαν μεταξύ 11:00 με 13:00 όπου στην αίθουσα πραγματοποιούνταν μάθημα με σχεδόν 50 άτομα και με τις δύο πόρτες ανοιχτές.

Μετά την επεξεργασία του ημερολογίου δραστηριοτήτων παρατηρήσαμε ότι στις 23/11 η αίθουσα δεν παρέμεινε καθόλου κενή παρά μόνο για 1 περίπου ώρα (13:00-14:00) όπου ο αριθμός των ατόμων ήταν πολύ μικρός της τάξης 1 με 2 άτομα και όλες τις υπόλοιπες ώρες των μετρήσεων στην αίθουσα βρίσκονταν μεγάλος αριθμός ατόμων (20 έως 50 άτομα) καθώς πραγματοποιούνταν μάθημα. Αντίστοιχο φαινόμενο παρουσιάζεται και στις 30/11 με την διαφορά ότι τα άτομα εντός της αίθουσας κυμάνθηκαν από 30 έως 50 . Παρόλα αυτά δεν παρατηρείται κάποια διαφοροποίηση στις δραστηριότητες που να εξηγεί την σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης στις 30/11, οπότε πιθανόν αυτή να οφείλεται στην επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος καθώς στο ημερολόγιο δραστηριοτήτων αναγράφεται ότι η πόρτα που συνδέεται με το εξωτερικό περιβάλλον παρέμεινε ανοιχτή για περίπου 2 ώρες ενώ τις υπόλοιπες μέρες των μετρήσεων έμενε ανοιχτή για περίπου 10 λεπτά.

Διαφορά παρατηρείται και στον αριθμό των ατόμων κατά τις ημέρες μετρήσεων όπως προαναφέρθηκε, παρόλα αυτά κατά την διάρκεια του μαθήματος ο αριθμός δεν φαίνεται να επηρεάζει την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων καθώς δεν υπάρχει κίνηση στο χώρο παρά μόνο από τον καθηγητή. Ως παράδειγμα αναφέρεται η 23/11 οπότε πραγματοποιήθηκε μάθημα με 40 άτομα και η μέση συγκέντρωση βρέθηκε περίπου στα $39 \frac{\mu g}{m^3}$ ενώ δυο ώρες αργότερα πραγματοποιήθηκε μάθημα με 48 άτομα και η μέση συγκέντρωση βρέθηκε $21 \frac{\mu g}{m^3}$.

Σημαντική διαφορά παρατηρείται κατά την διάρκεια των διαλειμμάτων σε σχέση με τον αριθμό των ατόμων καθώς η επαναιώρηση σωματιδίων που πραγματοποιείται από 20 άτομα είναι διαφορετική από αυτή που προκαλείται από 50. Το αποτέλεσμα αυτό παρουσιάζεται και στο παρακάτω σχήμα 18 όπου αναγράφεται η συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων $PM_{2.5}$, η οποία χωρίστηκε βάση του ημερολογίου δραστηριοτήτων και ο αριθμός των ατόμων ο οποίος χωρίστηκε σε 4 κατηγορίες : Έως 20, μεταξύ 20 και 30, μεταξύ 30 και 40 και μεταξύ 40 και 50 .



Σχήμα 18: Συσχέτιση μεταξύ συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων PM_{2.5} κατά την διάρκεια των ακαδημαϊκών διαλειμμάτων και του αριθμού ατόμων εντός της αίθουσας.

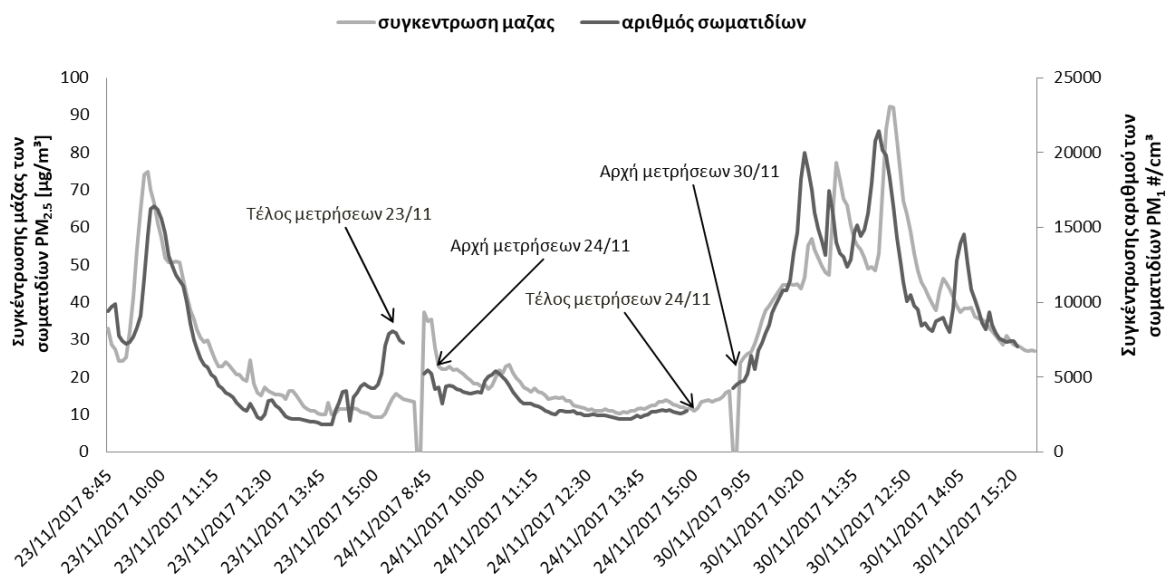
Για την κατανόηση της συσχέτισης μεταξύ της συγκέντρωσης μάζας κατά την διάρκεια του διαλείμματος και του αριθμού των ατόμων χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης συσχέτισης R^2 ο οποίο ισούται με 0,9 δείχνοντας έντονη σύνδεση μεταξύ των δύο αυτών παραγόντων. Βέβαια κατά την διάρκεια των διαλειμμάτων οι φοιτητές κάνουν μεγαλύτερη χρήση της εξωτερικής πόρτας και των παραθύρων το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την εντονότερη εισχώρηση των αέριων μαζών από το εξωτερικό περιβάλλον το οποίο συνεισφέρει και στην αύξηση της συγκέντρωσης των PM_{2.5} εντός της αίθουσας.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στην αίθουσα δεν υπήρχε η δυνατότητα μέτρησης της συγκέντρωσης και του αριθμού των σωματιδίων του εξωτερικού περιβάλλοντος γιατί τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στις υπόλοιπες περιόδους για το σκοπό αυτό δεν ήταν διαθέσιμα (κάλυπταν άλλες ανάγκες του εργαστηρίου). Όποτε δεν μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση παρόλα αυτά υπάρχουν δεδομένα από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τις δύο πρώτες βδομάδες του Νοεμβρίου (1/11 έως και 9/11) και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέση συγκέντρωση μάζας των PM_{2.5} ήταν $42,4 \pm 15,6 \frac{\mu g}{m^3}$. Ανατρέχοντας στα μετεωρολογικά δεδομένα για τον μήνα Νοέμβριο παρατηρούμε ότι το δεύτερο μισό του μήνα, όπου και έγιναν οι μετρήσεις στο χώρο της αίθουσας, έχουμε πτώση της μέσης θερμοκρασίας 2 μονάδες και αύξηση της μέσης ταχύτητας του ανέμου από 6 σε $8 \frac{km}{h}$.

Εντός του χώρου του Πολυτεχνείου οι επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών αποτελεί τον βασικότερο λόγο αύξησης ή ελάττωσης την εξωτερικής συγκέντρωσης καθώς κατά την διάρκεια των μετρήσεων δεν υπήρχαν κατασκευαστικές εργασίες στο χώρο, αλλά μεγάλος μέρος του πολυτεχνείου αποτελείται από εκτάσεις με χόμα. Ένα αρκετά σημαντικό ρόλο στην συγκέντρωση και τον αριθμό των σωματιδίων έχει η παρουσία αυτοκινήτων και του λεωφορείου που μεταφέρει του φοιτητές τα οποία όμως δεν βρίσκονταν κοντά στην τοποθεσία των οργάνων ώστε να τα επηρεάσουν σημαντικά.

Ανατρέχοντας στην βιβλιογραφία μπορούμε να δούμε ότι σε παρόμοιες μελέτες η εσωτερική συγκέντρωση εντός αιθουσών είναι ίση ή λίγο μεγαλύτερη σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον όπως στην περίπτωση των Lee και Chang, (Lee and Chang, 2000) που σε μετρήσεις σε αίθουσες στο Hong Kong οι συγκέντρωση των PM_{10} κυμάνθηκε μεταξύ 80 και $230 \frac{\mu g}{m^3}$ ενώ για το εξωτερικό περιβάλλον βρέθηκε μεταξύ 80 και $200 \frac{\mu g}{m^3}$. . Ακόμα και στην περίπτωση του Janssen et al. 1997 ο οποίος ερεύνησε την έκθεση μαθητών σε $PM_{2,5}$ σε ένα σχολείο δίπλα σε αυτοκινητόδρομο, η μέση συγκέντρωση για το εσωτερικό περιβάλλον κυμάνθηκε μεταξύ 7,7 και $52,8 \frac{\mu g}{m^3}$ ενώ η εξωτερική μεταξύ 5,2 έως και $60,8 \frac{\mu g}{m^3}$. Επίσης σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε σχολεία στην Αθήνα (Diarouli et al. 2006) για σωματίδια PM_{10} και $PM_{2,5}$ οι μέσες συγκεντρώσεις για τον εσωτερικό χώρο να είναι $263,13 \frac{\mu g}{m^3}$ και $82,65 \frac{\mu g}{m^3}$ αντίστοιχα και για τον εξωτερικό $162,89 \frac{\mu g}{m^3}$ και $56,25 \frac{\mu g}{m^3}$ αντίστοιχα. Και στις 3 περιπτώσεις που αναφέρθηκαν οι συγκεντρώσεις είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία, το οποίο μπορεί να δικαιολογηθεί στην διαφορά διδασκαλίας που γινόταν καθώς σε σχολεία με μικρότερους μαθητές οι δραστηριότητες διαφέρουν σε σχέση με μαθήματα σε πολυτεχνείο όπου βασική δραστηριότητα είναι η διάλεξη και η παρουσιάσεις όπου οι φοιτητές παραμένουν στάσιμοι για το μεγαλύτερο μέρος της ώρας.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα μεταβολής της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων $PM_{2,5}$ συγκριτικά με την μεταβολή αριθμού των σωματιδίων PM_1 .



Σχήμα 19: Διάγραμμα μεταβολής της συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων $PM_{2,5}$ για το συνολικό διάστημα των μετρήσεων και του αριθμού των σωματιδίων PM_1 στο χώρο της αίθουσας

Αναφορικά με τη συγκέντρωση αριθμού των σωματιδίων η μέση τιμή για τις 3 πρώτες ημέρες ήταν στα $3662 \pm 1777 \frac{\#}{cm^3}$ ενώ την τελευταία μέρα μετρήσεων η μέση

τιμή υπολογίστηκε στα $11506 \frac{\#}{cm^3}$. Η μεταβολή της συγκέντρωσης του αριθμού σωματιδίων σε συνάρτηση με την μεταβολή της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων PM_{2,5} παρουσιάζεται στο σχήμα 19.

Από το διάγραμμα των συγκεντρώσεων (σχήμα 19) παρατηρούμε ότι η συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων (που πρακτικά αντιστοιχεί σε σωματίδια PM₁) παρουσιάζει ίδια διακύμανση με τη συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων PM_{2,5}. Επομένως σχεδόν όλα τα σωματίδια που είναι μικρότερα από 2,5 μm είναι σχεδόν στο σύνολο τους μικρότερα και από 1 μm, και πιθανότατα προέρχονται από το εξωτερικό περιβάλλον. Το ίδιο φαινόμενο υψηλής συγκέντρωσης παρουσιάζεται και στην συγκέντρωση αριθμού την τελευταία μέρα μετρήσεων (30/11) παρόλο που δεν υπήρχε καμία διαφορά στην χρήση του χώρου και στις δραστηριότητες κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Αυτή η διαφορά οφείλεται στο εξωτερικό περιβάλλον καθώς την συγκεκριμένη μέρα η πόρτα που συνδέει την αίθουσα με το εξωτερικό περιβάλλον παρέμεινε ανοιχτή για αρκετή ώρα σε σχέση με τις άλλες μέρες που άνοιγε στιγμιαία ή για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Παρόμοιες τιμές της συγκέντρωσης αριθμού παρουσιάστηκαν και σε μία μελέτη σε ένα σχολείο της Αυστραλίας με τον μέσο αριθμό σωματιδίων (0.015 - 0.790 μm) να είναι $3190 \frac{\#}{cm^3}$ (Guo, Hai et al. 2010)

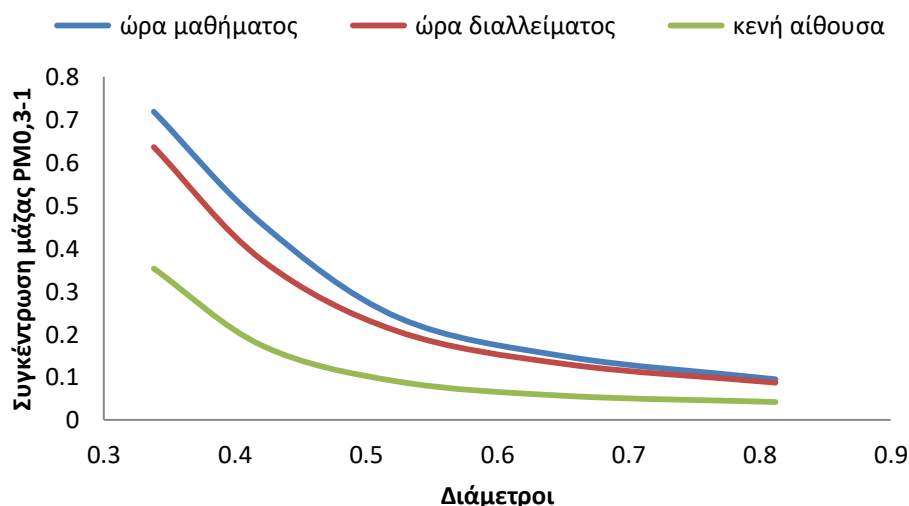
Με την βοήθεια του οργάνου OPS 3330 μετρήθηκαν και τα σωματίδια με διάμετρο 0,3 έως 10 μm και τα αποτελέσματα αυτών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Το όργανο τοποθετήθηκε στην ίδια θέση με τα υπόλοιπα όργανα.

Πίνακας 26: Στατιστικά χαρακτηριστικά συγκέντρωσης μάζας για αιωρούμενα σωματίδια PM_{0,3-1}, PM_{1-2,5} και PM_{2,5-10} για το χώρο της αίθουσας.

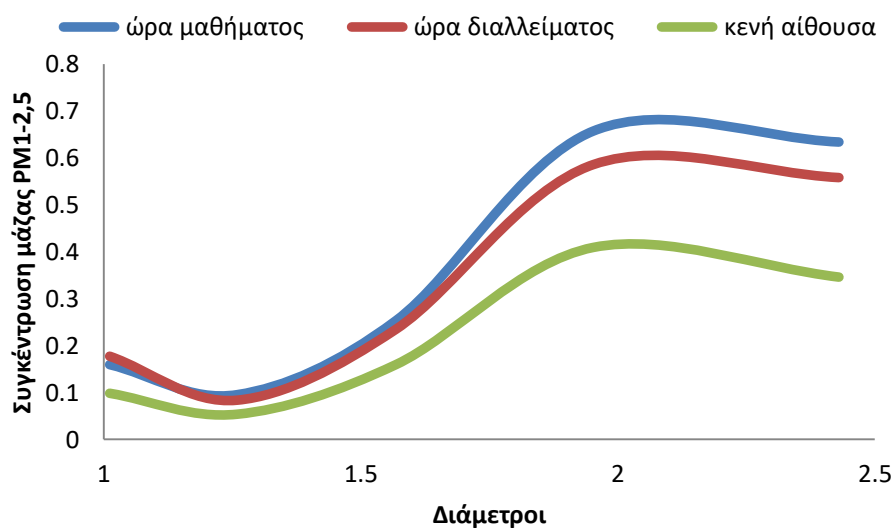
$\left(\frac{\mu g}{m^3}\right)$	0.3-1 μm			1-2.5 μm			2,5-10 μm		
	22- Noε	23- Noε	24- Noε	22- Noε	23- Noε	24- Noε	22-Noε	23-Noε	24-Noε
ελάχιστο	0,3251	0,5106	0,6602	0,5424	1,4569	0,8385	1,1686	2,3784	0,7177
Μέγιστο	1,4656	8,1920	4,1309	1,3053	9,7072	2,3331	31,2773	44,7781	23,5591
μέση τιμή	0,6567	1,9507	1,2326	0,8953	2,9072	1,4144	6,7250	15,1734	5,9144
διάμεσος	0,5654	1,1213	0,9680	0,9039	2,5582	1,3195	4,8019	13,6231	5,7173
Εκατοστημοριακή κατάταξη 95%	1,3108	6,7780	2,1773	1,1383	4,6945	2,0155	18,3096	29,3118	11,2577
Εκατοστημοριακή κατάταξη 5%	0,3387	0,5676	0,6884	0,6586	1,5774	1,0085	1,7723	4,5878	1,3646
Τυπική απόκλιση	0,2870	1,8817	0,6737	0,1426	1,3658	0,3303	5,0569	7,7639	3,3204

Με την βοήθεια του σχήματος 20 και του ημερολογίου δραστηριοτήτων παρατηρήσαμε ότι τα σωματίδια PM_{0,3-1} παρουσιάζουν μεγαλύτερη μάζα κατά την διάρκεια μαθήματος όπου οι φοιτητές είναι καθιστοί και η μοναδική κίνηση στο χώρο

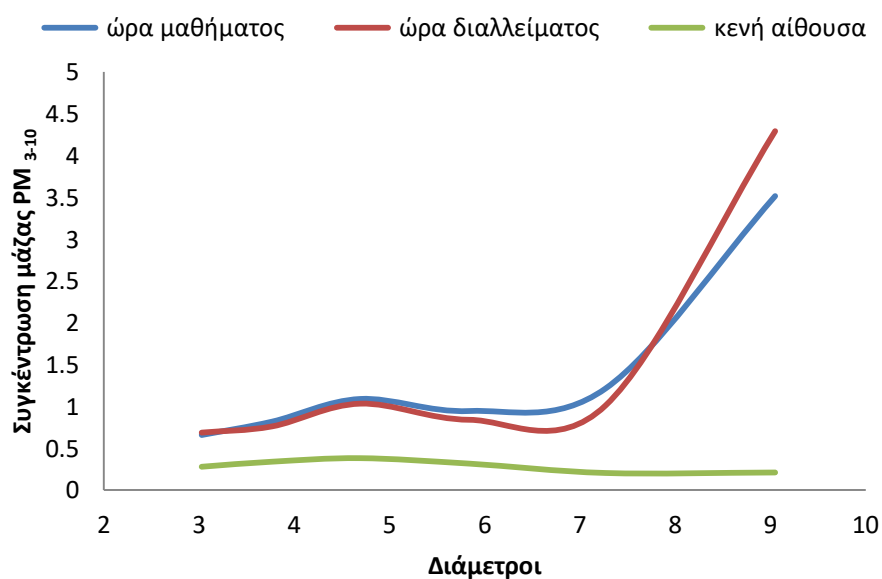
είναι από το καθηγητή ο οποίος είναι πολύ μακριά από τα όργανα , χωρίς όμως η κίνηση να είναι μεγάλη, μόνο περπάτημα ή γράψιμο στον πίνακα. Βάση των δραστηριοτήτων εντός της αίθουσας δεν φαίνεται να υπάρχουν πηγές υπέρλεπτων σωματιδίων το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οφείλονται σε σωματίδια από το εξωτερικό περιβάλλον τα οποία παραμένουν στον αέρα για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Όσον αφορά τα σωματίδια $PM_{1-2,5}$ παρατηρούμε το ίδιο φαινόμενο με τα σωματίδια $PM_{0,3-1}$, όπως φαίνεται στο σχήμα 21 με την διαφορά ότι οι τιμές της συγκέντρωσης στην περίπτωση του μαθήματος και του διαλλείματος είναι αρκετά κοντινές. Τα σωματίδια $PM_{2,5-10}$ παρατηρούμε ότι παρουσιάζουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις την ώρα του διαλλείματος (σχήμα22) όπου υπάρχει κίνηση στο χώρο από τους φοιτητές με βασική δραστηριότητα το περπάτημα μέσα στο χώρο της αίθουσας. Για την συγκεκριμένη δραστηριότητα έχουν γίνει πολλές μελέτες, οι οποίες αναφέρουν ότι το περπάτημα οδηγεί σε επαναιώρηση και αυξάνει τις συγκεντρώσεις των PM_{10} (Qian et al , 2008, Ferro et al. 2004). Στην περίπτωση της άδεια αίθουσας, τα σωματίδια PM_{3-10} παρουσιάζουν τις πιο χαμηλές συγκεντρώσεις καθώς λόγω βαρύτητας τα σωματίδια έχουν εναποτεθεί στο έδαφος.



Σχήμα 20: Συγκέντρωση μάζας αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{0,3-1}$ κατά την διάρκεια του μαθήματος, όταν η αίθουσα είναι κενή και κατά την διάρκεια του διαλλείματος.

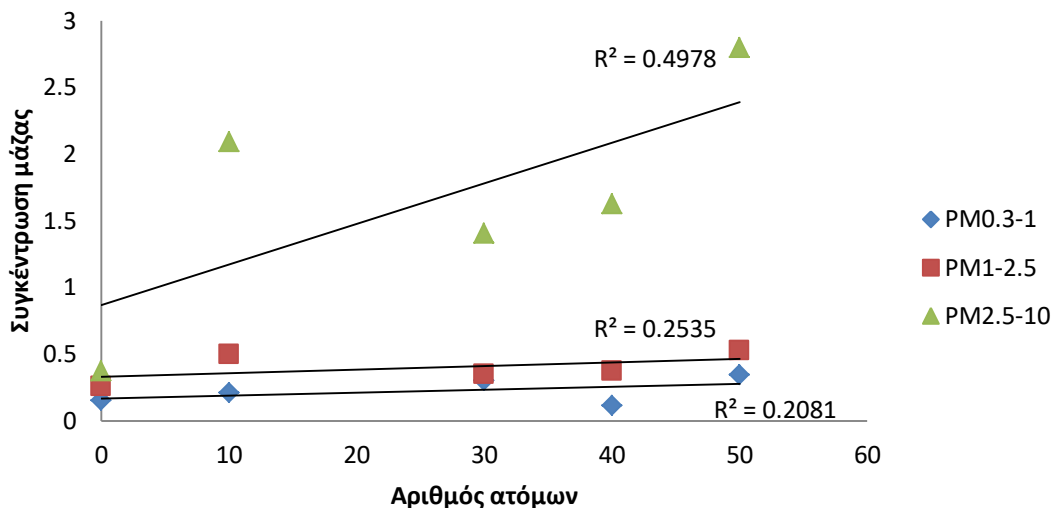


Σχήμα 21: Συγκέντρωση μάζας αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{1-2,5}$ κατά την διάρκεια του μαθήματος, όταν η αίθουσα είναι κενή και κατά την διάρκεια του διαλλείματος.



Σχήμα 22: Συγκέντρωση μάζας αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2,5-10}$ κατά την διάρκεια του μαθήματος, όταν η αίθουσα είναι κενή και κατά την διάρκεια του διαλλείματος.

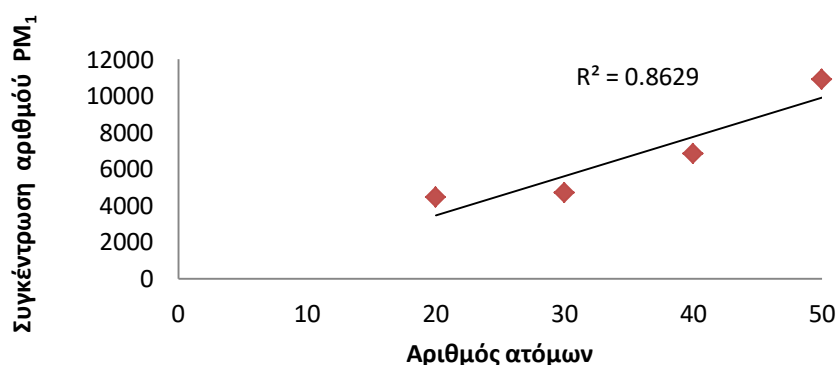
Στο παρακάτω σχήμα 23 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ του αριθμού των ατόμων εντός της αίθουσας κατά την διάρκεια διδασκαλίας ή κλειστής αίθουσας με την συγκέντρωση των σωματιδίων για τις τρεις κατηγορίες που προαναφέρθηκαν. Το διάγραμμα αυτό κατασκευάστηκε μόνο για τις ώρες διδασκαλίας εντός της αίθουσας (όχι την ώρα του διαλλείματος) και χρησιμοποιήθηκαν και οι συγκεντρώσεις όταν οι αίθουσα ήταν τελείως κενή από άτομα.



Σχήμα 23: Διάγραμμα συσχέτισης αριθμού ατόμων με την συγκέντρωση μάζας για τα υπέρλεπτα, λεπτά και χονδρά σωματίδια.

Παρατηρώντας το διάγραμμα βλέπουμε ότι η συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων δεν παρουσιάζει συσχέτιση με τον αριθμό των ατόμων κατά την διάρκεια του μαθήματος ειδικά για τα υπέρλεπτα και λεπτά σωματίδια για τα οποία ο δείκτης συσχέτισης είναι πολύ μικρός ($R^2=0.2$). Μεγαλύτερη συσχέτιση παρουσιάζουν τα χονδρά σωματίδια ($PM_{2.5-10}$), για τα οποία ο δείκτης φτάνει το 0,5. Ουσιαστικά παρατηρούμε ότι η παρουσία ατόμων, τα οποία βρίσκονται στάσιμα εντός της αίθουσας, δεν επηρεάζει τα μικρά σωματίδια, το οποίο φαίνεται και από την συσχέτιση της συγκέντρωσης μάζας των $PM_{2.5}$, που μετρήθηκε από το όργανο Dust Trak II, η οποία είχε ως αποτέλεσμα τον δείκτη συσχέτισης (R^2) ίσο με 0,3.

Αντιθέτως από το σχήμα 24 παρατηρούμε ότι η συσχέτιση μεταξύ αριθμού ατόμων και αριθμού σωματιδίων PM_1 είναι αρκετά μεγάλη με τον δείκτη να ισούται με 0,8. Η ύπαρξη περισσότερων ατόμων στο χώρο, δηλώνει πιο έντονες δραστηριότητες σε σχέση με τα λιγότερα άτομα όπως μεγαλύτερη μετακίνηση, ανταλλαγή σημειώσεων, μεγαλύτερη κίνηση του καθηγητή εντός του χώρου.



Σχήμα 24: Διάγραμμα συσχέτισης αριθμού σωματιδίων PM_1 με τον αριθμό των ατόμων εντός της αίθουσας.

Αντίθετο φαινόμενο έχει εμφανιστεί σε άλλες μελέτες όπως στην μελέτη των Guo, et al. 2010 σε σχολεία στην Γαλλία, στην οποία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι για τα πολύ μικρά σωματίδια σημαντικότερο ρόλο έχει το εξωτερικό περιβάλλον από ότι έχουν οι δραστηριότητες εντός του χώρου. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγει ακόμα μία μελέτη (Morawska et al. 2017) για τον αριθμό των υπέρλεπτων σωματιδίων στην οποία έχει γίνει βιβλιογραφική έρευνα χρησιμοποιώντας τιμές από πολλές διαφορετικές μελέτες. Λογικά και στην συγκεκριμένη περίπτωση οι τιμές της συγκέντρωσης αριθμού των υπέρλεπτων σωματιδίων οφείλονται στην εισχώρηση από το εξωτερικό περιβάλλον καθώς η ύπαρξη περισσότερων φοιτητών εντός της αίθουσας υποδεικνύει και μεγαλύτερη χρήση της εξωτερικής πόρτας καθώς και των παραθύρων.

Η συγκέντρωση μάζας και αριθμού των λεπτών και υπέρλεπτων αιωρούμενων σωματιδίων σε χώρους όπως η αίθουσες και χώρους συνεδριάσεων εξαρτάται κυρίως από τον εξωτερικό αέρα, τον αερισμό του χώρου και την δυνατότητα διείσδυσης στο χώρο στο οποίο καταλήγουμε και στην συγκεκριμένη εργασία. Οι εσωτερικές πηγές μπορεί να είναι η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, προτζέκτορα ή κλιματισμού οι οποίες μπορεί να θεωρηθεί ότι έχουν μηδενική επίδραση στην συγκέντρωση και των αριθμό των αιωρούμενων σωματιδίων ειδικά σε σχέση με την επίδραση που έχει το εξωτερικό περιβάλλον μέσα σε αυτόν, που ακόμα και στην περίπτωση της τελείως κλειστής αίθουσας η εισχώρηση αιρούμενων σωματιδίων είναι αναπόφευκτη. Την μεγαλύτερη επίδραση στο χώρο της αίθουσας όσον αφορά τα λεπτά και τα χονδρά σωματίδια την προκαλεί η παρουσία ατόμων και οι δραστηριότητες τους που στην προκειμένη περίπτωση είναι το περπάτημα εντός του χώρου το οποίο προκαλεί επαναιώρηση. Σε όλες τις κατηγορίες των σωματιδίων ο αριθμός των ατόμων κατά την διάρκεια του μαθήματος δεν φάνηκε να επηρεάζει τις συγκεντρώσεις παρόλα αυτά τα λεπτά και υπέρλεπτα σωματίδια παρουσίασαν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις μάζας κατά την διάρκεια του μαθήματος και όχι του διαλλείματος όπως τα χονδρά σωματίδια.

Κεφάλαιο 5: Υπολογισμός δόσης (μοντέλο ExDoM2)

Υπολογισμός δόσης Φοιτητή/Φοιτήτριας

Για τον υπολογισμό της δόσης χρησιμοποιήθηκε ένα υποθετικό σενάριο το οποίο περιλαμβάνει τις διαφορετικές δραστηριότητες ενός φοιτητή/τριας εντός των χώρων του Πολυτεχνείου για έξι ώρες. Οι χρόνοι και η σειρά των δραστηριοτήτων επιλέχτηκε ώστε το σενάριο να βρίσκεται αρκετά κοντά στην καθημερινότητα ενός φοιτητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο προσδιορισμός της δόσης έγινε με τη χρήση των τιμών της συγκέντρωσης των λεπτών ($PM_{2.5}$) και χονδρών ($PM_{2.5-10}$) σωματιδίων όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν εντός του εκάστοτε χώρου με την χρήση του οργάνου OPS τον μήνα Νοέμβριο, οι οποίες παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Σκοπός της εργασίας είναι ο υπολογισμός του εύρους της δόσης που μπορεί να δεχτεί ο φοιτητής/τρια στο υποθετικό σενάριο και γι αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι μέγιστες, ελάχιστες και μέσες ωριαίες τιμές της συγκέντρωσης ώστε να υπολογιστεί η μέγιστη, ελάχιστη και η μέση τιμή της δόσης. Θεωρήθηκε ότι shape factor είναι ίσο με 1, τιμή που αντιστοιχεί σε σφαιρικά σωματίδια και επίσης επιλέχτηκε πυκνότητα σωματιδίων ίση με $1 \frac{g}{cm^3}$.

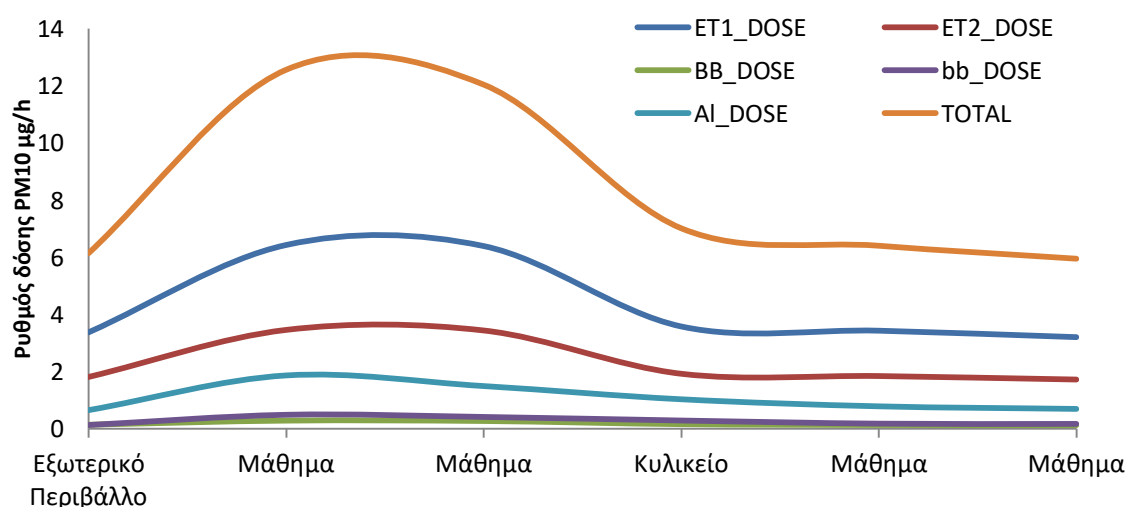
Ανάλυση Σεναρίου υπολογισμού Δόσης :

Ένα φοιτητής/τριας καταφθάνει στο Πολυτεχνείο Κρήτης στις 8:00 το πρωί και τα μαθήματα ξεκινούν στις 9:00 (3 :ελαφριά κίνηση) . Στην συνέχεια παρακολουθεί ένα δίωρο μάθημα (9:00-11:00) εντός της αίθουσας K2.A1 (2: καθιστός). Στις 11:00 πραγματοποιεί το διάλλειμα του στο κυλικείο της Σχολής για περίπου μία ώρα και στην συνέχεια παρακολουθεί ένα ακόμα δίωρο μάθημα έως και τις 14:00 στην ίδια αίθουσα. Οι ενέργειες του φοιτητή παρουσιάζονται και στον παρακάτω πίνακα.

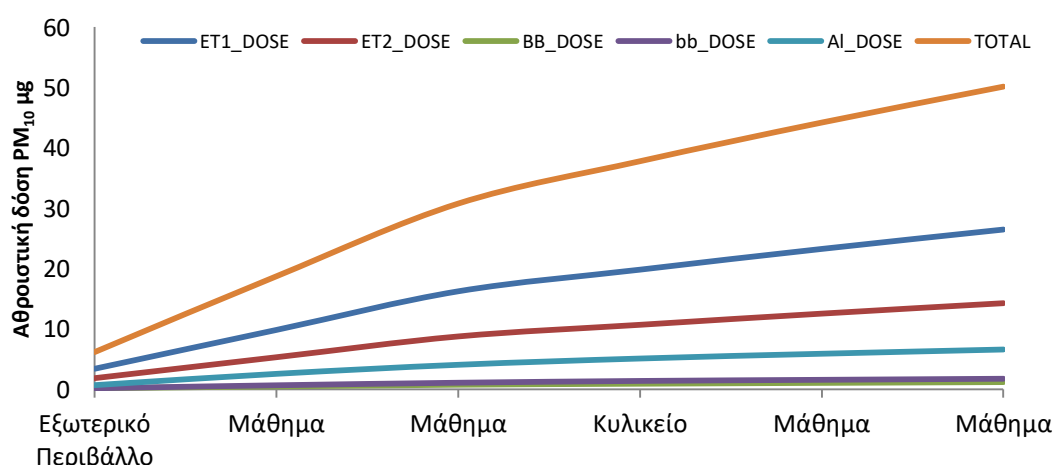
Πίνακας 27: Σενάριο δραστηριοτήτων εκτιθέμενου ατόμου.

Ωρα	Δραστηριότητα	Χώρος
08:00-09:00	Περπάτημα (3)	Εξωτερικό Περιβάλλον
09:00-10:00	Παρακολούθηση Μαθήματος(2)	Αίθουσα
10:00-11:00	Παρακολούθηση Μαθήματος(2)	Αίθουσα
11:00-12:00	Ξεκούραση/Διάλλειμα (2)	Κυλικείο
12:00-13:00	Παρακολούθηση Μαθήματος(2)	Αίθουσα
13:00-14:00	Παρακολούθηση Μαθήματος(2)	Αίθουσα

Για έναν ενήλικα άνδρα η αθροιστική δόση σωματιδίων PM₁₀ μπορεί να κυμανθεί μεταξύ 26 και 86 μg (μέση τιμή 50 μg) για τις 6 ώρες. Ο ρυθμός δόσης και η αθροιστική δόση παρουσιάζεται στα σχήματα 25 και 26 .



Σχήμα 25: Διάγραμμα ρυθμού δόσης στις πέντε περιοχές του αναπνευστικού ενός ενήλικα άνδρα.

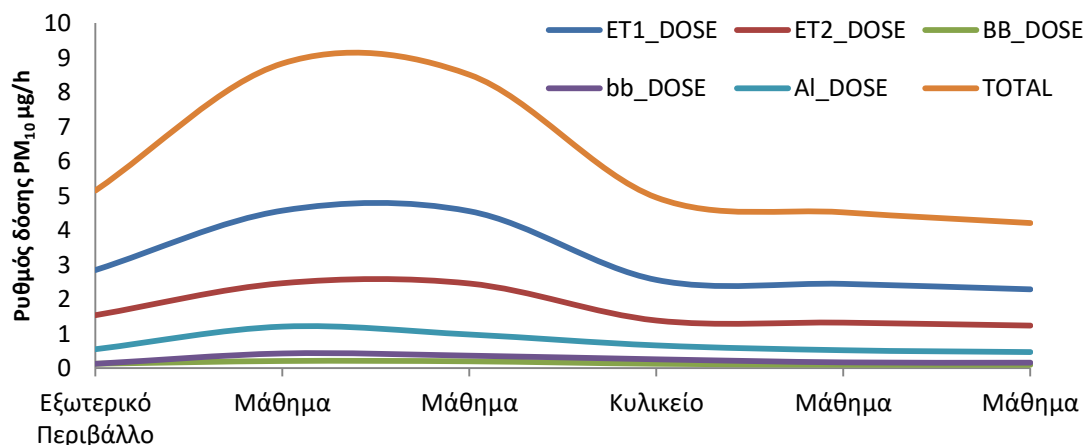


Σχήμα 26: Διάγραμμα Αθροιστικής εναποτιθέμενης δόσης στις πέντε περιοχές του αναπνευστικού συστήματος ενός ενήλικα άνδρα.

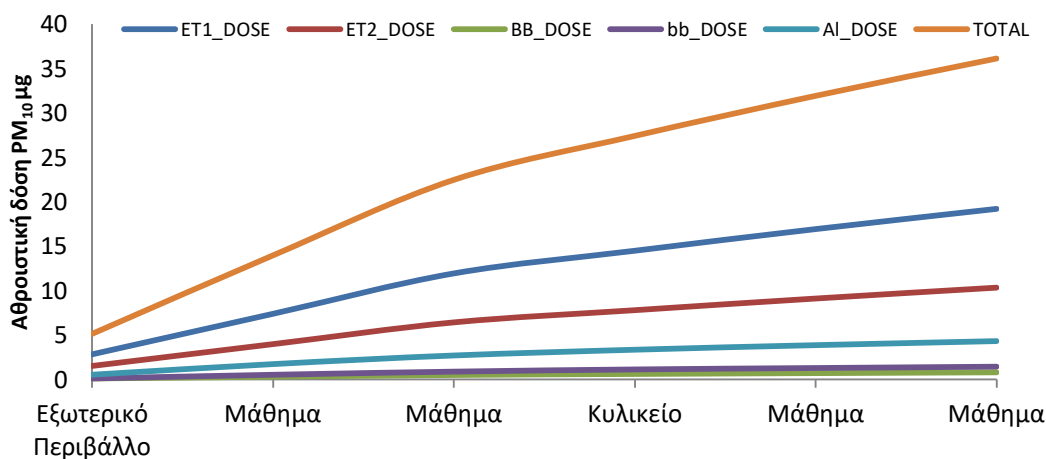
Ο φοιτητής ξεκινά με ελαφριά κίνηση (περπάτημα) στο εξωτερικό περιβάλλον πηγαίνοντας στο Πολυτεχνείο και για την περίοδο αυτή ο μέσος ρυθμός δόσης είναι $6,2 \frac{\mu g}{h}$ και η συγκέντρωση του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι $5,8 \frac{\mu g}{m^3}$. Στην συνέχεια ο φοιτητής βρίσκεται στην αίθουσα για ένα δίωρο μάθημα κατά το οποίο είναι καθιστός, παρόλα αυτά βλέπουμε ότι ο ρυθμός δόσης διπλασιάζεται και παραμένει σταθερός για το δίωρο αυτό στα $12,5 \frac{\mu g}{h}$ και $12,0 \frac{\mu g}{h}$ την πρώτη και δεύτερη ώρα αντίστοιχα. Το δίωρο αυτό που ο φοιτητής βρίσκεται στην αίθουσα οι συγκεντρώσεις των PM₁₀ είναι αρκετά υψηλές, την πρώτη ώρα $30,9 \frac{\mu g}{m^3}$ και την δεύτερη ώρα μειώνεται στα $28,1 \frac{\mu g}{m^3}$. Η έντονη αύξηση του ρυθμού δόσης οφείλεται στην έντονη διαφορά των

συγκεντρώσεων. Την επόμενη ώρα ο φοιτητής κάνει το διάλειμμα του στο χώρο του κυλικείου όπου η μέση συγκέντρωση των PM_{10} ήταν $24,7 \frac{\mu g}{m^3}$ και βλέπουμε ότι ο μέσος ρυθμός δόσης υποδιπλασιάζεται ($7,1 \frac{\mu g}{h}$) όπου και παραμένει και για το επόμενο δώρο που ο φοιτητής παρακολούθησε μάθημα.

Για τις ίδιες συγκεντρώσεις σωματιδίων υπολογίστηκε και η αθροιστική δόση σε μία ενήλικη γυναίκα (φοιτήτρια) για το παραπάνω σενάριο η οποία κυμάνθηκε από 18 έως και 62 μg (μέση τιμή 36 μg). Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο ρυθμός δόσης και η αθροιστική δόση για τις 6 ώρες.



Σχήμα 27: Διάγραμμα ρυθμού δόσης στις πέντε περιοχές του αναπνευστικού μιας ενήλικης γυναίκας.

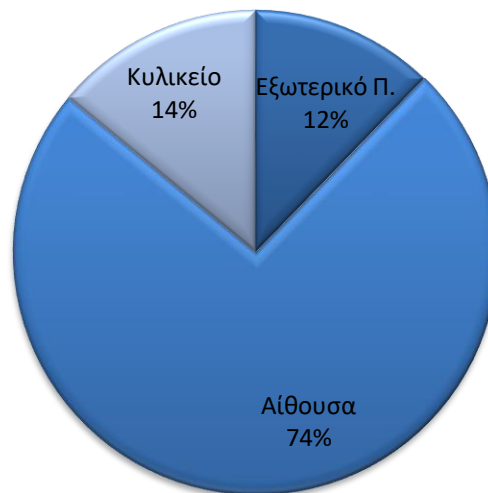


Σχήμα 28: Διάγραμμα Αθροιστικής εναποτιθέμενης δόσης στις πέντε περιοχές του αναπνευστικού συστήματος μιας ενήλικης γυναίκας.

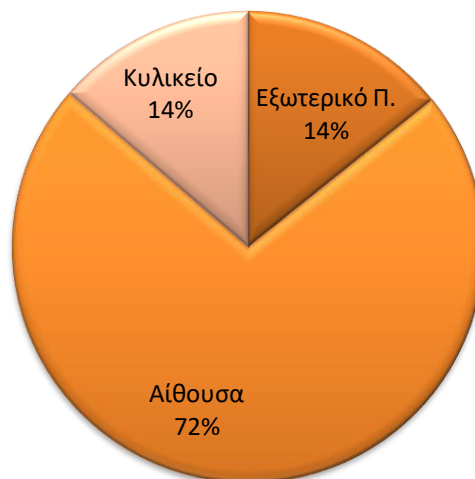
Στην περίπτωση της φοιτήτριας ο μέσος ρυθμός δόσης σε όλες τις περιοχές του αναπνευστικού ακολουθεί την παρόμοια διακύμανση όπως και στον ενήλικα άνδρα με τις τιμές να είναι λίγο πιο χαμηλές κατά $2 \frac{\mu g}{h}$ με εξαίρεση το πρώτο δώρο στην αίθουσα, όπου παρουσιάστηκαν και οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, οπότε οι τιμές του ρυθμού για τον άνδρα ξεπερνούν τα $12 \frac{\mu g}{h}$ ενώ στην περίπτωση της

γυναίκας είναι κοντά στα $8,5 \frac{\mu g}{h}$. Ενδιαφέρον και στις δύο περιπτώσεις αποτελεί ο χώρος του κυλικείου ο οποίο είναι επιβαρυμένος από λεπτά και υπέρλεπτα σωματίδια, τα οποία παρουσίασαν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε σχέση με όλους του άλλους χώρους. Παρ' όλα αυτά η δόση που λαμβάνουν οι φοιτητές είναι μικρότερη. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην διαφορά του ποσοστού εναπόθεσης που έχουν τα σωματίδια ανάλογα με την διάμετρό τους. Ο Brown (2015) υποστήριξε ότι η μικρότερη εναπόθεση στην αναπνευστική οδό παρατηρήθηκε για σωματίδια με διαμέτρους 0,1 έως και 1 μm .

Όπως είδαμε παραπάνω κάθε περιβάλλον παρουσίασε διαφορετικές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων και κατ επέκταση διαφορετική εναποτιθέμενη δόση στους δύο φοιτητές. Η ποσοστιαία αθροιστική δόση των διαφορετικών περιβαλλόντων παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα.



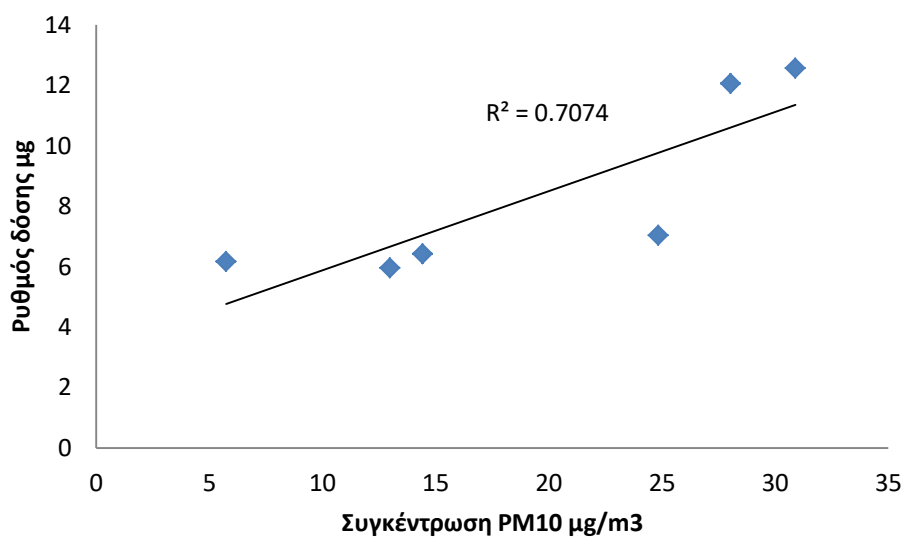
Σχήμα 33: Ποσοστιαία κατανομή της συμβολής των περιβαλλόντων στην αθροιστική δόσης για έναν ενήλικα άνδρα.



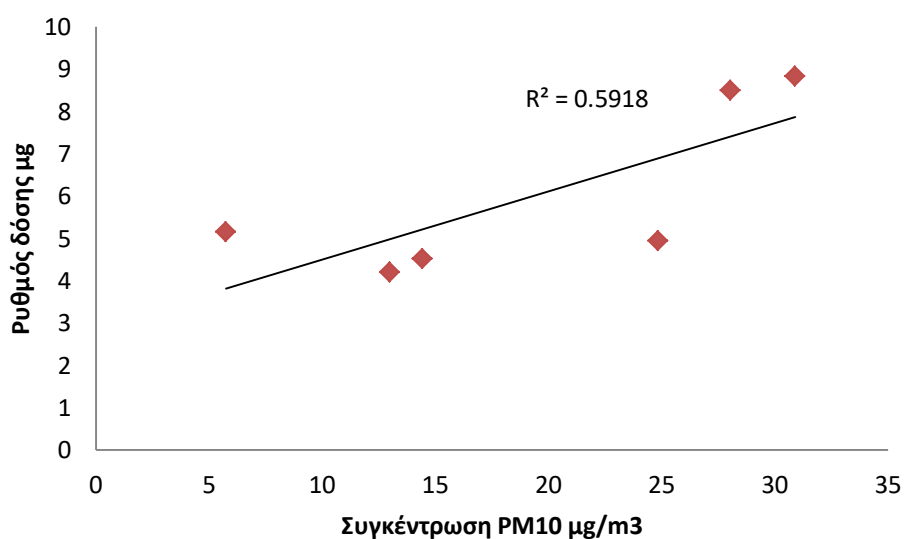
Σχήμα 34: Ποσοστιαία κατανομή της συμβολής των περιβαλλόντων στην αθροιστική δόση για μια ενήλικη γυναίκα

Δεν παρατηρείται μεγάλη διαφορά μεταξύ άντρα και γυναίκας στα ποσοστά που εναποτέθηκαν με εξαίρεση το εξωτερικό περιβάλλον όπου οι δύο φοιτητές βρίσκονταν σε ελαφριά κίνηση. Στην περίπτωση της γυναίκας φοιτήτρια έχουμε μια ελάχιστη αυξημένη εναπόθεση η οποία οφείλεται στην κίνηση και στο ρυθμό αναπνοής της γυναίκας καθώς και οι δύο εκτέθηκαν στην ίδια συγκέντρωση σωματιδίων. Από τα δύο ποσοστιαία διαγράμματα βλέπουμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό δόσης είναι αυτό στην αίθουσα καθώς ο φοιτητής περνά το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου παρακολουθώντας μαθήματα (4 ώρες). Επίσης στην αίθουσα παρουσιάστηκαν και οι υψηλότερες συγκεντρώσεις σωματιδίων PM_{10} το οποίο επηρεάζει την δόση που δέχονται οι φοιτητές.

Σημαντικός παράγοντας για την δόση που δέχεται το ΑΑΣ είναι οι συγκεντρώσεις σε σωματίδια στις οποίες εκτίθεται όπως είδαμε προηγούμενος παρόλα αυτά η σχέση δεν είναι γραμμική όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα συσχέτισης μεταξύ του ρυθμού δόσης και της έκθεσης για τον άντρα και την γυναίκα στα οποία παρουσιάζεται και ο δείκτης συσχέτισης R^2 ο οποίο δεν είναι αρκετά ισχυρός, ιδιαίτερα στην φοιτήτρια.



Σχήμα 35: Διάγραμμα συσχέτισης του ρυθμού δόσης με την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀ για ένα ενήλικα άνδρα.



Σχήμα 36: Διάγραμμα συσχέτισης του ρυθμού δόσης με την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀ για μία ενήλικη γυναίκα.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να διερευνηθούν και να συγκριθούν αρχικά οι συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_{10}) εντός μιας αίθουσας, ενός εργαστήριου, ενός γραφείου και του κυλικείου της σχολής των Μηχανικών Περιβάλλοντος ώστε να εντοπιστούν οι πιθανές εσωτερικές πηγές και η επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος. Για την μέτρηση των συγκεντρώσεων χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικά όργανα μέτρησης, τρία εκ' των οποίων χρησιμοποιήθηκαν στους εσωτερικούς χώρους και δύο για τις μετρήσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος. Στην συνέχεια με τα δεδομένα μετρήσεων από τους παραπάνω χώρους υπολογίστηκε η ανθρώπινη δόση σε αιωρούμενα σωματίδια που θα δεχτεί ένα φοιτητής και μια φοιτήτρια υποθέτοντας ένα ρεαλιστικό σενάριο το οποίο αντιπροσωπεύει όσο το δυνατόν καλύτερα την καθημερινότητα ενός μέσου φοιτητή στους χώρους της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ (Dust Trak), με την πιο έντονη διακύμανση παρουσιάστηκαν στο χώρο του κυλικείου όπου οι φοιτητές πραγματοποιούν το διάλλειμα τους. Οι μέσες τιμές κυμάνθηκαν από 50 έως $120 \frac{\mu g}{m^3}$ και ξεπέρασαν κατά πολύ τις τιμές της συγκέντρωσης του εξωτερικού περιβάλλοντος με τον λόγο I/O να βρίσκεται συνεχώς πάνω από την μονάδα και φτάνοντας ακόμη και σε υψηλές τιμές (14) υποδεικνύοντας την ύπαρξη εσωτερικών πηγών όπως είναι η κίνηση των ατόμων η οποία ήταν πιο έντονη κατά την ώρα του διαλείμματος (ακαδημαϊκό τέταρτο) καθώς και το κάπνισμα το οποίο παρουσίασε δείκτη συσχέτισης με την αύξηση της συγκέντρωσης (R^2) 0.99. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας για τις υψηλές συγκεντρώσεις συμφωνούν και με άλλες επιστημονικές μελέτες (Sumal Nandasena et al., 2012, Gurung et al., 2016).

Ο χώρος της αίθουσας διδασκαλίας παρά τον μεγάλο αριθμό ατόμων που παρευρέθηκαν παρουσίασε πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις με την μέση τιμή της συγκέντρωσης να κυμαίνεται από 9 έως $16 \frac{\mu g}{m^3}$ για τις 3 πρώτες ημέρες μετρήσεων ενώ μια εβδομάδα αργότερα η μέση τιμή του ήταν στα $46 \frac{\mu g}{m^3}$. Σε παρόμοια μελέτη στο Πανεπιστήμιο Θράκης οι τιμές της συγκέντρωσης των $PM_{2.5}$ ήταν μεγαλύτερες από ότι στην παρούσα εργασία και κυμάνθηκαν μεταξύ 32 και $188 \frac{\mu g}{m^3}$ (Gaidajis and Angelakoglou, 2009). Ο αριθμός των ατόμων εντός της αίθουσας κατά την διάρκεια του μαθήματος δεν φάνηκε να επηρεάζει τις συγκεντρώσεις, αντίθετα την ώρα του διαλείμματος όπου η κίνηση των φοιτητών είναι εντονότερη υπάρχει μεγάλη συσχέτιση με τον δείκτη R^2 να είναι 0,92. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι κατά την διάρκεια του διαλλείματος γίνεται και χρήση της εξωτερικής πόρτας επιτρέποντας μεγαλύτερες μάζες αέρα να εισέλθουν στο χώρο ο οποίος επομένως επηρεάζει τις εσωτερικές συγκεντρώσεις.

Επίσης ο χώρος του εργαστηρίου που είναι σημαντικά μικρότερος από την αίθουσα παρουσίασε μεγαλύτερες τιμές για τη μέση συγκέντρωση οι οποίες κυμάνθηκαν από 15 έως $20 \frac{\mu g}{m^3}$ με τις μέγιστες τιμές να παρουσιάζονται όταν το εργαστήριο βρίσκεται σε λειτουργία. Οι τιμές της εσωτερικής συγκέντρωσης των $PM_{2.5}$ κατά την ώρα λειτουργίας του εργαστηρίου (08:00-16:00) ήταν μεγαλύτερες και

από τις εξωτερικές συγκεντρώσεις ενώ τις βραδινές ώρες που το εργαστήριο παρέμενε κλειστό οι τιμές του εξωτερικού περιβάλλοντος ήταν διπλάσιες και τριπλάσιες. Βέβαια τον κύριο ρόλο σε αυτό τον έχει η έντονη μείωση των εξωτερικών συγκεντρώσεων κατά τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες το οποίο πιθανόν να οφείλεται στις καιρικές συνθήκες που επικρατούν.

Στο χώρο του γραφείου παρουσιάστηκαν εξίσου χαμηλές συγκεντρώσεις $PM_{2,5}$ με τις μέσες τιμές να κυμαίνονται από 11 έως 13 $\frac{\mu g}{m^3}$. Αντίθετα οι τιμές του εξωτερικού περιβάλλοντος ήταν διπλάσιες κατά το μεγαλύτερο μέρος των μετρήσεων. Αν και δεν υπήρχαν εμφανείς πηγές εντός του χώρου καθώς και ο χρήστης βρισκόταν στο γραφείο για πολύ μικρό χρονικό διάστημα δεν φαίνεται να υπάρχει επιρροή του εξωτερικού περιβάλλοντος καθώς ο δείκτης συσχέτισης (R^2) πήρε τιμές μεταξύ 0,02 και 0,05.

Ο αριθμός των υπέρλεπτων σωματιδίων (PM_1) μετρήθηκε με το όργανο P-Trak 8525 μόνο στους εσωτερικούς χώρους με τον μεγαλύτερες τιμές να παρουσιάζονται στο χώρο του κυλικείου όπως είναι αναμενόμενο και κυμάνθηκαν μεταξύ 2168 και 87038 $\frac{\#}{cm^3}$. Ως σημαντική εσωτερική πηγή αποδέχτηκε το κάπνισμα όπου παρουσίασε ισχυρό δείκτη συσχέτισης ($R^2=0,7$) με τις εσωτερικές συγκεντρώσεις μάζας. Στο χώρο τις αίθουσας ο αριθμός των PM_1 κυμάνθηκε μεταξύ 1106 και 22031 $\frac{\#}{cm^3}$ τα οποία προέρχονται κατά κύριο λόγο από το εξωτερικό περιβάλλον καθώς δεν υπήρχαν πηγές εντός της αίθουσας. Παρόμοιες τιμές της συγκέντρωσης αριθμού παρουσιάστηκαν και σε μία μελέτη σε ένα σχολείο της Αυστραλίας με τον μέσο αριθμό σωματιδίων (0.015 - 0.790 μm) να είναι 3190 $\frac{\#}{cm^3}$ (Guo, Hai et al. 2010). Η συγκέντρωση αριθμού των PM_1 φαίνεται να επηρεάζεται από τον αριθμό των ατόμων εντός της αίθουσας καθώς παρουσίασε ισχυρό δείκτη συσχέτισης ($R^2=0,8$), το οποίο όμως πρέπει να αντιμετωπιστεί με προσοχή καθώς ο μεγάλος αριθμός ατόμων σημαίνει και μεγαλύτερη χρήση της εξωτερικής πόρτας ή πιο συχνό άνοιγμα των παραθύρων. Σύμφωνα και με άλλες μελέτες, τα υπέρλεπτα σωματίδια οφείλονται κατά κύριο λόγο στο εξωτερικό περιβάλλον (Guo, et al. 2010, Morawska et al. 2017). Στο εργαστήριο η συγκέντρωση αριθμού των υπέρλεπτων σωματιδίων κυμάνθηκε από 1087 έως 5150 $\frac{\#}{cm^3}$ και δεν επηρεάζεται από τον αριθμό των ατόμων στο χώρο με τον δείκτη συσχέτισης να είναι (R^2) 0,3. Το οποίο συμφωνεί και με άλλες μελέτες (Γρυδάκη, 2013). Τέλος ο χώρος του γραφείου παρουσίασε μεγαλύτερη συγκέντρωση αριθμού σε σωματίδια PM_1 από ότι το εργαστήριο (1114 και 11188 $\frac{\#}{cm^3}$).

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της κατανομής σωματιδίων σε κλάσματα (μετρήσεις με το όργανο OPS) έδειξε ότι όπως και στην περίπτωση του αριθμού των υπέρλεπτων σωματιδίων έτσι και στην συγκέντρωση μάζας ($PM_{0,3-1}$) οι μεγαλύτερες τιμές παρουσιάστηκαν στο κυλικείο με την μέση τιμή να είναι $10,6 \pm 8 \frac{\mu g}{m^3}$. Επίδραση στα υπέρ λεπτά σωματίδια δεν είχε η κίνηση των ατόμων εντός του κυλικείου, ούτε την ώρα του διαλλείματος όπου η κίνηση είναι μεγάλη. Αντίθετα μεγάλη επιρροή είχε το κάπνισμα εντός του χώρου με τις τιμές να διπλασιάζονται όταν υπήρχαν φοιτητές που κάπνιζαν. Επιπλέον στην περίπτωση του κυλικείου εμφανίστηκαν οι πιο μικροί δείκτες συσχέτισης του εσωτερικού με το εξωτερικό περιβάλλον σε σχέση με του

άλλους χώρους καθώς και οι τιμές ήταν πολύ μεγαλύτερες εντός του κυλικείου ($I/O > 1$). Στους άλλους τρεις χώρους, στο γραφείο, στο εργαστήριο και στην αίθουσα η μέση τιμή της συγκέντρωσης ήταν $0,84 \pm 0,25 \frac{\mu g}{m^3}$, $0,96 \pm 0,3 \frac{\mu g}{m^3}$, $1,3 \pm 1,9 \frac{\mu g}{m^3}$ αντίστοιχα. Και στους τρεις χώρους δεν υπήρχαν εσωτερικές πηγές όπως το κάπνισμα που να επηρεάζαν τις συγκεντρώσεις, με αποτέλεσμα η συγκέντρωση των σωματιδίων να θεωρούμε ότι οφείλεται κατά κύριο λόγο στο εξωτερικό περιβάλλον παρά τους μικρούς δείκτες συσχέτισης που παρουσιάστηκαν.

Τα σωματίδια $PM_{1-2,5}$ παρουσίασαν παρόμοιες μέσες τιμές συγκέντρωσης και στους τέσσερις χώρους με την μεγαλύτερη να είναι στο κυλικείο ($2,2 \pm 0,93 \frac{\mu g}{m^3}$). Το εξωτερικό περιβάλλον δεν φάνηκε να επηρεάζει κανέναν από τους χώρους με του δείκτες συσχέτισης να είναι πολύ κοντά στο μηδέν και η μέση τιμή του λόγου I/O να βρίσκεται κάτω από την μονάδα εκτός του κυλικείου όπου ο λόγος ήταν συνεχώς πάνω από την μονάδα. Μικρή επιρροή φάνηκε να έχει η κίνηση των ατόμων και στους τέσσερις χώρους για αυτά τα σωματίδια.

Τέλος τα χονδρά σωματίδια ($PM_{2,5-10}$) παρατηρήθηκε ότι επηρεάζονται κατά κύριο λόγο από την κίνηση των ατόμων και στους τέσσερις χώρους με τις τιμές να διπλασιάζονται στο γραφείο όταν ο χρήστης ήταν εκεί. Επίσης στο εργαστήριο υπήρχε μεγάλη διαφορά στις τιμές της συγκέντρωσης τις πρωινές και τις βραδινές ώρες. Οι μεγαλύτερες τιμές εμφανίστηκαν στο χώρο του κυλικείου (μέση τιμή: $16 \pm 7 \frac{\mu g}{m^3}$) και στην αίθουσα (μέση τιμή: $9,3 \pm 5,4$) με τις μέγιστες να εμφανίζονται κατά την ώρα του διαλλείματος. Το εξωτερικό περιβάλλον φαίνεται να μην επηρεάζει τις τιμές στους εσωτερικούς χώρους με τους δείκτες συσχέτισης να είναι πολύ μικροί παρότι σε όλους τους χώρους εκτός του κυλικείου οι τιμές τους εξωτερικού περιβάλλοντος ήταν μεγαλύτερες.

Όσον αφορά την δόση που δέχεται το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα παρατηρήθηκε ότι είναι υψηλότερη σε έναν ενήλικα άνδρα από ότι σε μια ενήλικη γυναίκα σε όλες τις περιοχές του αναπνευστικού. Πιο επιβαρυνμένη περιοχή και στους δύο είναι η περιοχή εκτός θώρακα (ET_1). Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας συμφωνούν και με άλλες παρόμοιες μελέτες (Παντελάκη, κ.α., 2018). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα χονδρά σωματίδια έχουν μεγαλύτερη εναπόθεση και στην κυψελιδική περιοχή εκτός από την περίπτωση που ο φοιτητής/φοιτήτρια βρισκόταν σε ελαφριά κίνηση στο εξωτερικό περιβάλλον όπου η εναπόθεση των χονδρών σωματιδίων στην κυψελιδική περιοχή ήταν μικρότερη από αυτή των λεπτών, το οποίο σημαίνει ότι και τα χονδρά σωματίδια έχουν την δυνατότητα να εισχωρήσουν βαθύτερα στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα. Επίσης στο κυλικείο όπου οι συγκεντρώσεις των λεπτών και των υπέρλεπτων σωματιδίων είναι υψηλότερες λόγω καπνίσματος τα λεπτά σωματίδια έχουν μεγαλύτερη εναπόθεση στην περιοχή AI .

Την μεγαλύτερη επίδραση στη δόση που δέχτηκαν οι φοιτητές είχε το περιβάλλον της αίθουσας λόγω του μεγάλου χρονικού διαστήματος που περνούν εκεί καθώς και λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων που παρουσιάστηκαν σε χονδρά σωματίδια. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η σχέση της έκθεσης και δόσης δεν είναι γραμμική με τον δείκτη συσχέτισης να ισούται με 0,6 για έναν ενήλικα άνδρα και 0,5 για μία ενήλικη γυναίκα, το οποίο συμφωνεί και με άλλες μελέτες (Αλεξανδροπούλου κ.α., 2008).

Προτάσεις μελλοντικής έρευνας

Δύο βασικά μειονεκτήματα που παρουσίασε η συγκεκριμένη μελέτη ήταν το μικρό χρονικό διάστημα μετρήσεων καθώς και η απουσία μελέτης σταθερών μεταβλητών. Με βάση αυτά προτείνεται η περαιτέρω έρευνα μεγαλύτερων χρονικών διαστημάτων καθώς και άλλων εποχών με μετρήσεις ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Επιπλέον συνιστάται διερεύνηση της χημικής σύστασης των σωματιδίων και μέτρα για την μείωση των συγκεντρώσεων στο χώρο του κυλικείου ο οποίος παρουσίασε τις υψηλότερες συγκεντρώσεις.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μελλοντική έρευνα έχουν και άλλοι χώροι που παρουσιάζουν σημαντικές εσωτερικές πηγές όπως είναι το μηχανογραφικό κέντρο του Πολυτεχνείου Κρήτης το οποίο έχει 4 διαφορετικές αίθουσες με μεγάλο αριθμό υπολογιστών καθώς και ένα χώρο ο οποίος περιλαμβάνει 4 μεγάλους εκτυπωτές οι οποίοι είναι σε συνεχή λειτουργία. Επιπλέον ο ημί στεγασμένος χώρος που συνδέει το μηχανογραφικό κέντρο με το κυλικείο, ο οποίος χρησιμοποιείται ως εξωτερικό χώρο για το κυλικείο αλλά γίνεται και διέλευση αυτοκινήτων για την ανατροφοδότηση του κυλικείου.

Βιβλιογραφία

Ann Wong, C., & Idayu Ahmad, M. (2017). Indoor Air Quality Investigation of Offices in the Food Industry. *Iranica Journal of Energy and Environment*, 8(4).

Assimakopoulos, V. D., Bekiari, T., Pateraki, S., Maggos, T., Stamatis, P., Nicolopoulou, P., & Assimakopoulos, M. N. (2018). Assessing personal exposure to PM using data from an integrated indoor-outdoor experiment in Athens-Greece. *Science of the Total Environment*, 636, 1303-1320.

Assimakopoulos, V. D., Saraga, D., Helmis, C. G., Stathopoulou, O. I., & Halios, C. H. (2008). An experimental study of the indoor air quality in areas of different use. *Global NEST J*, 10, 192-200.

Bo, M., Salizzoni, P., Clerico, M., & Buccolieri, R. (2017). Assessment of indoor-outdoor particulate matter air pollution: A review. *Atmosphere*, 8(8), 136. Braniš, M., Řezáčová, P., & Domasová, M. (2005). The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ in a classroom. *Environmental research*, 99(2), 143-149.

Chalvatzaki, E., Chatoutsidou, S., Mammi-Galani, E., Almeida, S., Gini, M., Eleftheriadis, K., ... & Lazaridis, M. (2018). Estimation of the Personal Deposited Dose of Particulate Matter and Particle-Bound Metals Using Data from Selected European Cities. *Atmosphere*, 9(7), 248.

Daniels, M. J., Dominici, F., Samet, J. M., & Zeger, S. L. (2000). Estimating particulate matter-mortality dose-response curves and threshold levels: an analysis of daily time-series for the 20 largest US cities. *American journal of epidemiology*, 152(5), 397-406.

de Gennaro, G., Farella, G., Marzocca, A., Mazzone, A., & Tutino, M. (2013). Indoor and outdoor monitoring of volatile organic compounds in school buildings: Indicators based on health risk assessment to single out critical issues. *International journal of environmental research and public health*, 10(12), 6273-6291.

de Kluizenaar, Y., Kuijpers, E., Eekhout, I., Voogt, M., Vermeulen, R. C. H., Hoek, G., ... & Pronk, A. (2017). Personal exposure to UFP in different micro-environments and time of day. *Building and Environment*, 122, 237-246.

Diapouli, E., Chaloulakou, A., & Spyrellis, N. (2007). Indoor and outdoor particulate matter concentrations at schools in the Athens area. *Indoor and Built Environment*, 16(1), 55-61.

Diapouli, E., Chaloulakou, A., & Spyrellis, N. (2008). Indoor and outdoor PM concentrations at a residential environment, in the Athens area. *Global NEST Journal*, 10(2), 201-208.

Filonchik, M., Yan, H., Yang, S., & Hurynovich, V. (2016). A study of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in the atmosphere of large cities in Gansu Province, China, in summer period. *Journal of Earth System Science*, 125(6), 1175-1187.

Gemenetzi, P., Moussas, P., Arditoglou, A., & Samara, C. (2006). Mass concentration and elemental composition of indoor PM_{2.5} and PM₁₀ in University rooms in Thessaloniki, northern Greece. *Atmospheric Environment*, 40(17), 3195-3206.

Gerasopoulos, E., Kouvarakis, G., Babasakalis, P., Vrekoussis, M., Putaud, J. P., & Mihalopoulos, N. (2006). Origin and variability of particulate matter (PM₁₀) mass

concentrations over the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment*, 40(25), 4679-4690.

Glytsos, T., Ondráček, J., Džumbová, L., Kopanakis, I., & Lazaridis, M. (2010). Characterization of particulate matter concentrations during controlled indoor activities. *Atmospheric Environment*, 44(12), 1539-1549.

Guo, H., Morawska, L., He, C., Zhang, Y. L., Ayoko, G., & Cao, M. (2010). Characterization of particle number concentrations and PM 2.5 in a school: Influence of outdoor air pollution on indoor air. *Environmental Science and Pollution Research*, 17(6), 1268-1278.

Hwang, Y., & Lee, K. (2018). Contribution of microenvironments to personal exposures to PM10 and PM2. 5 in summer and winter. *Atmospheric Environment*, 175, 192-198.

Johnson, D. L., Lynch, R. A., Floyd, E. L., Wang, J., & Bartels, J. N. (2018). Indoor air quality in classrooms: Environmental measures and effective ventilation rate modeling in urban elementary schools. *Building and Environment*, 136, 185-197.

Karanasiou, A., Viana, M., Querol, X., Moreno, T., & de Leeuw, F. (2014). Assessment of personal exposure to particulate air pollution during commuting in European cities—Recommendations and policy implications. *Science of the Total Environment*, 490, 785-797.

Kaunelienė, V., Meišutovič-Akhtarjeva, M., & Martuzevičius, D. (2018). A review of the impacts of tobacco heating system on indoor air quality versus conventional pollution sources. *Chemosphere*, 206, 568-578.

Kopanakis, I., Chatoutsidou, S. E., Torseth, K., Glytsos, T., & Lazaridis, M. (2013). Particle number size distribution in the eastern Mediterranean: Formation and growth rates of ultrafine airborne atmospheric particles. *Atmospheric environment*, 77, 790-802.

Li, Z., Wen, Q., & Zhang, R. (2017). Sources, health effects and control strategies of indoor fine particulate matter (PM2. 5): A review. *Science of the Total Environment*, 586, 610-622.

Mammi-Galani, E., Chalvatzaki, E., & Lazaridis, M. (2016). Personal Exposure and dose of inhaled ambient particulate matter bound metals in five European Cities. *Aerosol and Air Quality Research*, 16(6), 1452-1463.

Maragkidou, A., Jaghbeir, O., Hämeri, K., & Hussein, T. (2018). Aerosol particles (0.3–10 µm) inside an educational workshop– Emission rate and inhaled deposited dose. *Building and Environment*, 140, 80-89.

Marcazzan, G. M., Vaccaro, S., Valli, G., & Vecchi, R. (2001). Characterisation of PM10 and PM2. 5 particulate matter in the ambient air of Milan (Italy). *Atmospheric Environment*, 35(27), 4639-4650.

Ruprecht, A. A., De Marco, C., Saffari, A., Pozzi, P., Mazza, R., Veronese, C., & Hasheminassab, S. (2017). Environmental pollution and emission factors of electronic cigarettes, heat-not-burn tobacco products, and conventional cigarettes. *Aerosol science and technology*, 51(6), 674-684.

Serfozo, N., Chatoutsidou, S. E., & Lazaridis, M. (2014). The effect of particle resuspension during walking activity to PM10 mass and number concentrations in an indoor microenvironment. *Building and Environment*, 82, 180-189.

Stafoggia, M., Zauli-Sajani, S., Pey, J., Samoli, E., Alessandrini, E., Basagaña, X., & Faustini, A. (2015). Desert dust outbreaks in Southern Europe: contribution to daily PM₁₀ concentrations and short-term associations with mortality and hospital admissions. *Environmental health perspectives*, 124(4), 413-419.

Suryawanshi, S., Chauhan, A. S., Verma, R., & Gupta, T. (2016). Identification and quantification of indoor air pollutant sources within a residential academic campus. *Science of the Total Environment*, 569, 46-52.

Trianti, S. M., Samoli, E., Rodopoulou, S., Katsouyanni, K., Papiris, S. A., & Karakatsani, A. (2017). Desert dust outbreaks and respiratory morbidity in Athens, Greece. *Environmental Health*, 16(1), 72.

Ugranli, T., Toprak, M., Gursoy, G., Cimrin, A. H., & Sofuoglu, S. C. (2015). Indoor environmental quality in chemistry and chemical engineering laboratories at Izmir Institute of Technology. *Atmospheric Pollution Research*, 6(1), 147-153.

Αλεξανδροπούλου, Β. (2013) Ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος υποστήριξης αποφάσεων για την εκτίμηση της έκθεσης του ανθρώπου σε ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια και των επιπτώσεων τους στην ανθρώπινη υγεία. Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πολυτεχνείου Κρήτης.

Γρυδάκη Ν. (2013). Μελέτη ποιότητας του αέρα στο κτήριο των Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πολυτεχνείου Κρήτης.

Λιάπας, Θ. (2017). Επιμερισμός της συνεισφοράς πηγών σωματιδιακής ρύπανσης στην Κύπρο. Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκη.

Νταουντάκη Γ. (2010). Περιβαλλοντική ανάλυση και αξιολόγηση των κτηρίων του τμήματος ΜΗΠΕΡ στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πολυτεχνείου Κρήτης.

Παπαγεωργίου, Σ. (2018). Ποσοτικοποίηση της ανθρώπινης έκθεσης και δόσης σε αιωρούμενα σωματίδια στο αστικό περιβάλλον. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πολυτεχνείου Κρήτης.

Παπαγιάννης, Ε. (2015). Δημιουργία μία φιλικής προς τον χρήστη γραφικής πλατφόρμας για το μοντέλο ExDoM2 (Exposure Dose Model2) και η εφαρμογή του στο μετρό της Αθήνας. Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πολυτεχνείου Κρήτης.

Σπαής, Γ. (2018). Μελέτη της προσωπικής έκθεσης και δόσης από αιωρούμενα σωματίδια και των πηγών τους στο αστικό περιβάλλον. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πολυτεχνείου Κρήτης.

Χαλβατζάκη, Ε. (2009). Εκτίμηση εκπομπών και συγκεντρώσεων αέριων ρύπων από το χώρο διάθεσης απορριμμάτων (ΧΔΑ) στο ακρωτήριο. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πολυτεχνείου Κρήτης.