



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

"ΡΥΠΑΝΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΑΠΟ ΥΠΟΜΕΤΡΙΚΑ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ"

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΟΡΙΖΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΒΙΒΙΑΝ

Φυσικός

ΑΘΗΝΑ
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015

Μέλη Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής:

Μαργαρίτα Ασημακοπούλου, Επίκουρη Καθηγήτρια, ΕΚΠΑ (Κύρια Επιβλέπουσα)

Κωνσταντίνος Χέλμης, Καθηγητής, ΕΚΠΑ

Κωνσταντίνος Ιακωβίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής, ΕΚΠΑ

Μέλη Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Μαργαρίτα Ασημακοπούλου, Επίκουρη Καθηγήτρια, ΕΚΠΑ

Κωνσταντίνος Χέλμης, Καθηγητής, ΕΚΠΑ

Κωνσταντίνος Ιακωβίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής, ΕΚΠΑ

Ματθαίος Σανταμούρης, Καθηγητής, ΕΚΠΑ

Δημοσθένης Ασημακόπουλος, Καθηγητής, ΕΚΠΑ

Έλενα Φλόκα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, ΕΚΠΑ

Αθανάσιος Αργυρίου, Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πατρών

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος ΙΙ . Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

*Στη μνήμη του αγαπημένου μου ξάδελφου Σπυράκου
που άφησε πίσω του ανεκτίμητο "κυματισμό"**

* Irvin D. Yalom. *Στον κήπο του επίκουρου. Αφήνοντας πίσω τον τρόμο του θανάτου*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματοποιήθηκε στον Τομέα Φυσικής Περιβάλλοντος και Μετεωρολογίας του Τμήματος Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και πραγματεύεται τη μελέτη της ρύπανσης του εσωτερικού περιβάλλοντος από υπομετρικά σωματίδια με ελεγχόμενες συνθήκες αερισμού σε κτίρια, ενώ παράλληλα υποστηρίχθηκε οικονομικά από την υποτροφία Ηράκλειτος II.

Η εκπόνηση της διδακτορικής μου διατριβής τα τελευταία τέσσερα χρόνια είναι αποτέλεσμα της συνεργασίας μου με ένα πλήθος ατόμων τους οποίους αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω. Θα ήθελα πρώτη από όλους να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της διδακτορικής μου διατριβής Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Φυσικής του ΕΚΠΑ κα Μαργαρίτα Ασημακοπούλου για την ευκαιρία που μου έδωσε, την καθοδήγηση, τις εύστοχες παρατηρήσεις αλλά και την εύρεση λύσεων σε πολλές κρίσιμες στιγμές κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής. Ακολούθως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής του ΕΚΠΑ κ. Ματθαίο Σανταμούρη που είχε την καλοσύνη να με προτείνει στην κα Ασημακοπούλου αλλά και στη συνέχεια ως μέλος της τριμελούς επιτροπής να με βοηθήσει με επιστημονικές ιδέες και πολύτιμες κατευθύνσεις. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμα τον Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής του ΕΚΠΑ κ. Κωνσταντίνο Χέλμη για τις πολύτιμες συμβουλές, την καθοδήγηση, τις κρίσιμες παρατηρήσεις και τη διαθεσιμότητά του αλλά και τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής του ΕΚΠΑ κ. Κωνσταντίνο Ιακωβίδη για την εμπύχωση και υποστήριξή του σε όλη τη διάρκεια των τεσσάρων αυτών ετών.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ερευνήτρια Β' του Ινστιτούτου Περιβαλλοντικής Βιώσιμης Ανάπτυξης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών κα Βασιλική Ασημακοπούλου για την καθοδήγηση αλλά και τις πολύτιμες συμβουλές της στο κομμάτι των θεωρητικών προσομοιώσεων, τον Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής του ΕΚΠΑ κ. Δημοσθένη Ασημακόπουλο για τις σημαντικές επιστημονικές του ιδέες περί φασματικής ανάλυσης χρονοσειρών, τον Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής του ΕΚΠΑ κ. Άγγελο Αγγελόπουλο για τη βοήθειά του στο προγραμματιστικό μέρος των θεωρητικών προσομοιώσεων και τον Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής του ΕΚΠΑ κ. Σαράντη Σοφιανό για τη διαθεσιμότητά του και τη βοήθειά του στην επεξήγηση των φασματικών αναλύσεων. Ευχαριστώ ακόμα την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Τμήματος Φυσικής του ΕΚΠΑ κα Φλόκα Έλενα και τον Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Αργυρίου Αθανάσιο, μέλη της επταμελούς εξεταστικής μου επιτροπής για τις εύστοχες παρατηρήσεις τους και τα χρήσιμα σχόλιά τους. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον

Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Του Πολυτεχνείου της Δανίας (DTU) Pawel Wargocki για τις επιστημονικές ιδέες στον τομέα της Παραγωγικότητας.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα επίσης να εκφράσω στην Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Βιολογίας του ΕΚΠΑ κα Ευαγγελία Γκότση-Καψανάκη για την άποψη συνεργασία, την ενθάρρυνση, τις παρατηρήσεις αλλά και την επιστημονική ιδέα της συσχέτισης των αιωρούμενων σωματιδίων με τους αερομεταφερόμενους μύκητες. Τις ευχαριστίες μου θέλω να δώσω στην Διδάκτορα Στέλλα Πατεράκη εξωτερικό συνεργάτη του εργαστηρίου Περιβαλλοντικών Ερευνών Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. του Δημοκρίτου για τη συνεργασία και τη διεξαγωγή των χημικών αναλύσεων των αιωρούμενων σωματιδίων καθώς επίσης στον απόφοιτο του Τμήματος Φυσικής του ΕΚΠΑ Ιωάννη Συφναίο και τη Φοιτήτρια του Τμήματος Φυσικής του ΕΚΠΑ Κατερίνα Στάθη για την πολύτιμη βοήθεια στη διενέργεια των πειραματικών μετρήσεων.

Ευχαριστώ ακόμα τους συναδέλφους μου Μαρία Αργυρίου και Αλέξανδρο Πανταζάρα για τις στιγμές που μοιραστήκαμε στο ίδιο γραφείο τα πρώτα δύομιση χρόνια της διατριβής μου, τις υποψήφιες διδάκτορες Γιάννα Κιτσαρά και Σάντυ Φαμέλη για τις συζητήσεις μας αλλά και τη Διδάκτορα Αφροδίτη Συννέφα για τις επιστημονικές της συμβουλές. Ευχαριστώ επίσης τη συνεργάτη και φίλη μου Διδάκτορα Νίκη Γαϊτάνη για την αφοσίωση, και τις εύστοχες επιστημονικές παρατηρήσεις της τον τελευταίο ενάμιση χρόνο της διατριβής μου που μοιραστήκαμε το ίδιο γραφείο.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην αδελφική μου φίλη Μαρίνα που είναι δίπλα μου, στους φίλους μου Κατερίνα, Βασίλη και Στέλλα για την ενθάρρυνσή τους αλλά και στον αδελφό μου Σπύρο, τη Σπυριδούλα, το Γιάννη, το Γεράσιμο, την Αγγελίνα και τη Μαριάννα για τη συμπαράστασή τους.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου Γιάννη και Μαριάνθη που είναι πάντα στο πλευρό μου στηρίζοντας τις επιλογές μου με πολλές οικονομικές θυσίες αλλά και στο σύντροφό μου Σωτήρη για την αγάπη, την ενθάρρυνση, τη βαθιά επιστημονική του ματιά αλλά και για την επιμονή του να με μάθει να προσπαθώ ακόμα περισσότερο. Η παρουσία του έπαιξε καθοριστικό παράγοντα στην ολοκλήρωση της διατριβής μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή διερευνώνται οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος σε κτίρια κατοικιών και σχολεία. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες πειραματικές μετρήσεις τόσο χρονικά όσο και ποιοτικά σε κτίρια που βρίσκονται σε περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά μικροκλίματος και επιμέρους ιδιαιτερότητες. Η διατριβή εστίασε στη μελέτη της ποιότητας του εσωτερικού αέρα ενώ διεξήχθησαν ταυτόχρονες μετρήσεις και στο εξωτερικό περιβάλλον. Εκτενέστερη ανάλυση πραγματοποιήθηκε στις συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων διάφορων αεροδυναμικών διαμέτρων αλλά και στα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα. Ένας από τους κυρίαρχους στόχους ήταν η διερεύνηση της έκθεσης του πληθυσμού στις εσωτερικές συγκεντρώσεις αέριων ρύπων αλλά και η κατανόηση των παραμέτρων που καθορίζουν τα επίπεδα των συγκεντρώσεων δίνοντας έμφαση στη μελέτη των επιπέδων αερισμού. Η προσωπική αποτίμηση των συνθηκών ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος από τους χρήστες των κτιρίων αποτέλεσε ακόμα μία σημαντική παράμετρο μελέτης. Διεξήχθησαν τρεις επιμέρους πειραματικές καμπάνιες σε κατοικίες και σχολεία, μικροπεριβάλλοντα κρίσιμα με την έννοια ότι ζουν σε αυτά άτομα ευπαθή στις επιπτώσεις της έκθεσης στους αέριους ρύπους όπως παιδιά και ηλικιωμένοι.

Η πρώτη πειραματική καμπάνια έλαβε χώρα σε δύο κατοικίες με διαφορετικό βαθμό αστικοποίησης στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής. Βασική επιδίωξη ήταν η ταυτόχρονη καταγραφή και σύγκριση των επιπέδων των αέριων ρύπων στις δύο κατοικίες και η διερεύνηση των παραμέτρων που επιδρούν στις συγκεντρώσεις τους. Η ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων προσεγγίστηκε και θεωρητικά με την εφαρμογή αριθμητικού μοντέλου. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντικά υψηλότερες τιμές των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων του διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα στην κατοικία στο αστικό σε σχέση με το ημιαστικό περιβάλλον. Οι δραστηριότητες που έλαβαν χώρα στα εσωτερικά των σπιτιών όπως το κάπνισμα ή μαγειρική αλλά και η ανθρώπινη παρουσία έδειξαν να έχουν σημαντική επίδραση στα επίπεδα των υπομετρικών σωματιδίων. Συνεπώς κατά την παρουσία έντονων εσωτερικών πηγών δημιουργίας αιωρούμενων σωματιδίων το εξωτερικό περιβάλλον δεν φάνηκε να επιδρά δραστικά στα επίπεδα των συγκεντρώσεων. Παρόλα αυτά οι τιμές υποβάθρου απουσία πηγών στην κατοικία στο αστικό περιβάλλον ήταν τριπλάσιες από τις αντίστοιχες τιμές στο ημιαστικό περιβάλλον. Τέλος, εκτιμήθηκαν θεωρητικά τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} απ' όπου διαπιστώθηκε ότι τόσο ο ρυθμός διεύθυνσης του αέρα όσο και η ταχύτητα εναπόθεσης των σωματιδίων παίζουν

καθοριστικό ρόλο στις ημερήσιες διακυμάνσεις τους και επιπλέον η θεωρητική πρόβλεψη των PM_{10} ήταν σε καλή συσχέτιση με τις αντίστοιχες μετρούμενες τιμές.

Οι μετρήσεις συνεχίστηκαν σε δύο σχολικά κτίρια της Ανατολική Αττικής για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με το διάστημα μετρήσεων στις κατοικίες και επιπλέον πέραν των φυσικοχημικών παραμέτρων καταγράφηκαν ταυτόχρονα η θερμοκρασία η σχετική υγρασία και οι αερομεταφερόμενοι μύκητες. Σε πρώτη φάση στόχος ήταν η καταγραφή των επιπέδων των αέριων ρύπων στα εσωτερικά και εξωτερικά περιβάλλοντα των τάξεων και ο χαρακτηρισμός της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος των σχολικών τάξεων με βάση τα ποσοστά υπέρβασης των προτεινόμενων οριακών τιμών. Ακολούθως, εξετάστηκαν οι συσχετίσεις μεταξύ του συνόλου των μετρούμενων παραμέτρων εστιάζοντας στις σχέσεις μεταξύ των αιωρούμενων σωματιδίων και των αερομεταφερόμενων μυκήτων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι σε πολλές από τις περιπτώσεις οι συγκεντρώσεις τόσο των αιωρούμενων σωματιδίων όσο και των αερομεταφερόμενων μυκήτων στα εσωτερικά περιβάλλοντα ήταν παρόμοιες με τις αντίστοιχες τιμές στο εξωτερικό περιβάλλον ενώ οι λόγοι εσωτερικών προς τις εξωτερικές συγκεντρώσεις βρέθηκαν μεγαλύτεροι της μονάδας υποδεικνύοντας την παρουσία εσωτερικών πηγών. Τέλος, βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ συγκεκριμένων τάξεων μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων και των αερομεταφερόμενων μυκήτων.

Οι μετρήσεις συνεχίστηκαν σε σχολικά κτίρια της Δυτικής Αττικής κατά την τρίτη πειραματική διαδικασία. Τόσο το πλήθος των υπό μελέτη σχολείων όσο και η διάρκεια δειγματοληψίας αυξήθηκαν σημαντικά από δύο σε εννιά σχολεία σε περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά μικροκλίματος. Πέραν της αύξησης του στατιστικού δείγματος στη συγκεκριμένη έρευνα καταγράφηκαν εκτενώς τα επίπεδα αερισμού, οι μετεωρολογικές παράμετροι και επιπλέον διερευνήθηκε η σχέση μεταξύ των μετρούμενων παραμέτρων και της υποκειμενικής αξιολόγησης της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος από τους μαθητές μέσω ερωτηματολογίων. Οι τιμές αερισμού κυμάνθηκαν σε ικανοποιητικά επίπεδα για την πλειοψηφία των ημερών δειγματοληψίας και το σύνολο των υπό μελέτη σχολείων. Τα αιωρούμενα σωματίδια και κυρίως τα PM_{10} ήταν σε ιδιαίτερα αυξημένα επίπεδα ξεπερνώντας τις προτεινόμενες οριακές τιμές κατά περισσότερες από 6 φορές στο σύνολο των σχολείων. Οι συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα φάνηκε να συσχετίζονται αρνητικά με το ρυθμό αερισμού και θετικά με την παρουσία μαθητών στις τάξεις. Μελετήθηκαν επιπλέον οι λόγοι των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό προς το εξωτερικό περιβάλλον και για το σύνολο των περιπτώσεων βρέθηκαν πολύ μεγαλύτεροι της μονάδας υποδηλώνοντας την έντονη παρουσία πηγών στα εσωτερικά περιβάλλοντα όπως του αυξημένου αριθμού μαθητών ανά διαθέσιμη επιφάνεια, της χρήσης πινάκων κιμωλίας και

των ανεπαρκών επιπέδων αερισμού για συγκεκριμένες περιπτώσεις. Συνοψίζοντας, τα μετρούμενα επίπεδα έκθεσης για την πλειοψηφία των περιπτώσεων ήταν μεγαλύτερα από τις προτεινόμενες τιμές εξαιτίας της έντονης παρουσίας εσωτερικών πηγών ρύπων παρότι τα επίπεδα αερισμού ήταν ικανοποιητικά. Πέραν αυτού, τα αυξημένα επίπεδα των αέριων ρύπων δεν έγιναν αντιληπτά από τους μαθητές καθώς στην πλειοψηφία τους έκριναν ικανοποιητική την ποιότητα του εσωτερικού αέρα, ενώ φάνηκε να συνδέουν τις υψηλές θερμοκρασίες με την υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα. Σε αντίθεση με την υποκειμενική αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα, η υποκειμενική θερμική αίσθηση των μαθητών προσέγγισε ικανοποιητικά τις αντίστοιχες μετρήσεις. Ακόμα διαπιστώθηκαν σημαντικές θετικές συσχετίσεις μεταξύ των συμπτωμάτων υγείας των μαθητών και των επιπέδων των αέριων ρύπων αλλά αρνητικές συσχετίσεις και μεταξύ της απόδοσης των μαθητών και των επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα. Τέλος εξετάστηκαν τα επίπεδα των ενεργειακών καταναλώσεων των σχολείων. Διαπιστώθηκε αφενός ότι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων τόσο οι καταναλώσεις ηλεκτρισμού όσο και οι καταναλώσεις πετρελαίου θέρμανσης ήταν σε χαμηλά επίπεδα αφετέρου βρέθηκαν σημαντικές θετικές συσχετίσεις μεταξύ των καταναλώσεων και των επιπέδων των αέριων ρύπων. Η θεωρητική εκτίμηση των συγκεντρώσεων των PM_{10} με τη βοήθεια του αριθμητικού μοντέλου MIAQ βρέθηκε ικανοποιητική σε σχέση αντίστοιχες με τις μετρούμενες τιμές ενώ εκτιμήθηκε ο ρυθμός εκπεμπόμενων σωματιδίων στις τάξεις εξ' αιτίας της παρουσίας των μαθητών.

ABSTRACT

The present thesis aims at investigating the factors affecting the indoor environmental quality (IEQ) in school buildings and residences. In this context, extended monitoring was performed in buildings located in areas of different microclimatic characteristics in the greater area of Attika, Greece. The research focused on the study of the indoor air quality (IAQ) while simultaneous measurements were also performed in the outdoor environment. Particulate matter (PM) of several aerodynamic diameters, carbon dioxide (CO₂) concentrations and ventilation rates were extensively investigated in naturally ventilated school buildings. In addition to the experimental measurements, the diurnal variation of PM was simulated using a numerical model. The perception of the indoor environmental conditions by the users of the buildings was further examined through questionnaires and students' productivity was also studied in relation to the levels of the indoor air pollutants, the ventilation rates and the perception of the IEQ. To this end, three experimental campaigns were performed in schools and residences.

The first experimental campaign was carried out in two residences in areas of different degree of urbanization. Main objective was to compare the levels of air pollutants in the two residences and also to study the parameters that affect their concentrations. The results showed significantly higher concentrations of PM, CO and CO₂ in the residence at the urban area in relation to the residence at the suburban area possibly associated to the vehicle emissions from adjoining streets which in many cases also exceeded the recommended limit values. The background levels of UFP in the residence of the urban area were by three times greater than the corresponding ones of the suburban area and were significantly affected by indoor activities such as smoking, cooking and the human presence. The diurnal fluctuation of PM was also simulated using the mathematical modeling tool, MIAQ. The sensitivity of the model in the changes of infiltration rates and deposition velocities of PM₁₀ in the absence of indoor sources was initially examined and PM₁₀ were then simulated with the presence of indoor sources and the estimated concentrations were in good agreement with the measurement findings.

In the second experimental campaign the measurements were performed in two schools of Eastern Attika where apart from the physicochemical parameters, airborne fungi, VOCs and meteorological parameters were also monitored. The measurement results showed that in many cases the concentrations of PM and airborne fungi in the classrooms were similar to the corresponding ones of the outdoor environment indicating that in the absence of intense indoor sources the outdoor environment can significantly affect the indoor one. Furthermore,

the correlations between all of the measured variables were examined and there were found statistically significant correlations between certain sizes of PM and airborne fungi a fact that could possibly indicate common sources between these pollutants.

The third experimental campaign was conducted in school buildings mainly located in Western Attika and apart from the increase of the statistical sample, this certain campaign also involved extended monitoring of the ventilation levels and the subjective perception of the IEQ (including the IAQ, thermal comfort, lighting and acoustics) of the classrooms by the students. It was found that the ventilation rates ranged in satisfactory levels for the majority of the schools while PM_{10} outreached the recommend limit values by more than 6 times for all schools. The ratios of indoor to outdoor PM for all the cases were much greater than unity indicating the intense presence of indoor sources such as overcrowded classrooms, the use of chalk boards and inadequate ventilation rates for certain cases. To summarize, the levels of exposure for the majority of the cases were greater than the recommended values even though the ventilation rates were satisfactory. Apart from this, the increased levels of air pollutants were not perceived by the students whose majority evaluated the indoor air quality as satisfactory and seemed to associate high temperatures to the degradation of the IAQ. However, the thermal perception of students approached the corresponding measurements of the thermal environment. Finally, students' productivity was examined as a function of the indoor air pollutant levels, the ventilation rates and students' perception of the IEQ. Negative correlations were found between students' productivity and CO_2 concentrations, and students' sick building syndrome (SBS) symptoms significantly correlated to the levels of air pollutants. Finally the energy consumption of the school buildings was examined and it was found that for the majority of the cases both the consumption for electricity and oil for heating remained in rather low levels and positively correlated to the levels of indoor air pollutants. The simulated PM_{10} concentrations approximated the measurements, while the emitted rate of PM_{10} due to the presence of students was further estimated.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	29
2.1	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	29
2.2	ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ	38
2.3	Ο ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΙΑQ (MULTI-CHAMBER INDOOR AIR QUALITY MODEL)	47
2.4	ΑΕΡΙΣΜΟΣ	49
2.5	ΈΡΕΥΝΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΩΝ	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	55
3.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	55
3.2	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΕ ΚΑΤΟΙΚΙΕΣ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ	69
3.2.1	Επιλογή θέσεων δειγματοληψίας	69
3.2.2	Στόχοι πειραματικών μετρήσεων	70
3.2.3	Μετρούμενες παράμετροι και πρωτόκολλο μετρήσεων	71
3.3	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΩΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΕ ΣΧΟΛΕΙΑ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ	73
3.3.1	Επιλογή θέσεων δειγματοληψίας	73
3.3.2	Στόχοι πειραματικών μετρήσεων	74
3.3.1	Μετρούμενες παράμετροι και πρωτόκολλο μετρήσεων	75
3.4	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΕ ΣΧΟΛΕΙΑ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ	77
3.4.1	Επιλογή θέσεων δειγματοληψίας	77
3.4.2	Στόχοι πειραματικών μετρήσεων	83
3.4.3	Μετρούμενες παράμετροι	83
3.4.4	Σχεδιασμός & πρωτόκολλο μετρήσεων	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΩΝ	89
4.1	ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΩΝ	89
4.2	ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	90
4.3	ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑΣ	92
4.4	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΙΣ	93
4.5	ΕΠΑΦΕΣ & ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΧΡΟΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ & ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	97
5.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΕ ΚΑΤΟΙΚΙΕΣ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ	97
5.1.1	Επεξεργασία και στατιστική ανάλυση των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων	97
5.1.1.1	Αιωρούμενα σωματίδια	97

5.1.1.2	Ανάλυση Φάσματος Ισχύος (Power Spectrum Analysis).....	102
5.1.1.3	Διοξείδιο και μονοξειδίου του άνθρακα.....	104
5.1.2	Εκτίμηση συγκεντρώσεων σωματιδίων PM ₁₀ με τη χρήση του αριθμητικού κώδικα ΜΙΑQ.....	105
5.1.3	Συμπεράσματα.....	110
5.2	ΠΡΩΤΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΕ ΣΧΟΛΕΙΑ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ.....	111
5.2.1	Επεξεργασία και στατιστική ανάλυση των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων .	111
5.2.1.1	Αιωρούμενα σωματίδια.....	111
5.2.1.2	Αερομεταφερόμενοι μύκητες.....	114
5.2.1.3	Διοξείδιο του άνθρακα.....	116
5.2.1.4	Σχέσεις εσωτερικών / εξωτερικών παραμέτρων.....	117
5.2.1	Περαιτέρω στατιστική ανάλυση.....	122
5.2.1.1	Ανάλυση κύριων συνιστωσών.....	124
5.2.1.2	Συσχετίσεις μεταξύ αέριων ρύπων στο εσωτερικό περιβάλλον.....	126
5.2.1.3	Γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης.....	129
5.2.1.4	Πολυπαραγοντικά μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης.....	129
5.2.2	Συμπεράσματα.....	131
5.3	ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΕ ΣΧΟΛΕΙΑ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ.....	133
5.3.1	Επεξεργασία & στατιστική ανάλυση των μετρούμενων παραμέτρων: Μέρος Α'	133
5.3.1.1	Αερισμός Σχολικών Τάξεων.....	133
5.3.1.2	Διοξείδιο του Άνθρακα, Μονοξείδιο του άνθρακα και Οργανικές Πτητικές Ενώσεις.....	140
5.3.1.3	Αιωρούμενα Σωματίδια.....	148
5.3.1.4	Αποτελέσματα βαρυμετρικής μεθόδου και χημική ανάλυση αιωρούμενων σωματιδίων.....	156
5.3.1.5	Επίδραση της χρήση πινάκων κιμωλίας και μαρκαδόρου στα επίπεδα αέριων ρύπων.....	163
5.3.1.6	Ποσοστά υπέρβασης των οριακών τιμών.....	163
5.3.2	Επεξεργασία έρευνας ερωτηματολογίων & διερεύνηση σχέσεων με τις μετρήσεις: Μέρος Β'.....	165
5.3.2.1	Ανάλυση σε συστάδες (Cluster Analysis).....	177
5.3.2.2	Παραγωγικότητα μαθητών.....	184
5.3.2.3	Ενεργειακές καταναλώσεις.....	188
5.3.3	Εκτίμηση συγκεντρώσεων σωματιδίων PM ₁₀ με τη χρήση του αριθμητικού κώδικα ΜΙΑQ: Μέρος Γ'.....	191
5.3.4	Συμπεράσματα.....	199
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		203
6.1	ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΈΡΕΥΝΑΣ.....	208
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		211
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ		225

7.1	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ	225
7.2	ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	230
7.3	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ ΜΑΘΗΤΩΝ.....	240
7.4	ΤΕΣΤ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑΣ	242
7.5	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	244
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ.....	247
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	249
	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	257

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη της βιομηχανίας τα τελευταία χρόνια συνοδευόμενη από την αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης και κατ' επέκταση την αύξηση των εκπομπών των αέριων ρύπων, συνετέλεσε σημαντικά στον υποβιβασμό της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος (Indoor Environmental Quality- IEQ). Η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος είναι μια ευρεία έννοια στην οποία εμπεριέχονται τέσσερις βασικές συνιστώσες: η ποιότητα του εσωτερικού αέρα (Indoor Air Quality-IAQ), το θερμικό περιβάλλον (Thermal Environment), ο φωτισμός (Lighting) και η ακουστική (Acoustics) (Standard EN 15251). Καθεμιά από τις επιμέρους υποκατηγορίες του εσωτερικού περιβάλλοντος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην υγεία και την άνεση των χρηστών ενός κτιρίου.

Τις τελευταίες δεκαετίες η μελέτη της ποιότητας του εσωτερικού αέρα έχει απασχολήσει σε μεγάλο βαθμό την επιστημονική κοινότητα καθώς έχει αποδειχθεί ότι η αύξηση των συγκεντρώσεων των αέριων ρύπων είναι δυνατόν να προκαλέσει δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων (Berglund et al., 1992) δεδομένου ότι οι άνθρωποι ξοδεύουν μεγάλο ποσοστό (65-90%) του χρόνου τους στα εσωτερικά περιβάλλοντα (Schweizer et al., 2007, Chang 2003, Wallace 1996, Silvers et al., 1994, Jenkins et al., 1992). Επιδημιολογικές μελέτες απέδειξαν ότι η ανθρώπινη έκθεση σε αέριους ρύπους όπως τα αιωρούμενα σωματίδια είναι άμεσα συνδεδεμένη με προβλήματα υγείας, συμπεριλαμβανομένων αλλεργιών και άσθματος, της επιβάρυνσης του αναπνευστικού συστήματος, εμφάνισης καρδιαγγειακών νοσημάτων και ασθενειών των πνευμόνων, αλλά και εμφραγμάτων του μυοκαρδίου (Pope III et al., 1995, Brunekreef and Holgate 2002, Dockery et al., 1993, Donaldson and Stone 2003, Annesi-Maesano et al., 2003, Kim et al., 2010, Bakke et al., 2012). Τα συμπτώματα αυτά έχουν συνδεθεί σε μεγάλο βαθμό και με το σύνδρομο του άρρωστου κτιρίου (Sick Building Syndrome, SBS) (Hedge et al. 1996, Knoppel 1992, EPA 1993, CEC 1989).

Κάθε χρόνο, η εσωτερική ατμοσφαιρική ρύπανση είναι υπεύθυνη για το θάνατο 1,6 εκατομμυρίων ανθρώπων, που σημαίνει ένας θάνατος ανά 20 δευτερόλεπτα (World Health Organization, WHO 2005). Μελέτες σε αναπτυσσόμενες χώρες έχουν καταλήξει στο ότι η χρήση ακατάλληλων καυσίμων για θέρμανση και παρασκευή φαγητού σε συνδυασμό με τον ανεπαρκή αερισμό έχει οδηγήσει στο θάνατο 4 εκατομμυρίων ατόμων ανά έτος (World Bank 2000, WRI 1996). Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) αξιολόγησε τη συνεισφορά από μια σειρά από επικίνδυνους παράγοντες στην επιβάρυνση διάφορων νοσημάτων και οδηγήθηκε στο συμπέρασμα ότι η εσωτερική ατμοσφαιρική ρύπανση, αποτελεί τον 8^ο σημαντικότερο παράγοντα κινδύνου για την υγεία, και είναι υπεύθυνη για το 2,7% της

παγκόσμιας επιβάρυνσης της ασθένειας, ενώ στις αναπτυσσόμενες χώρες με υψηλή θνησιμότητα, ο εσωτερικός καπνός ευθύνεται για την επιβάρυνση των ασθενειών κατά 3,7%. Η μαγειρική και η θέρμανση με καύσιμα όπως το κάρβουνο σε ανοιχτά τζάκια ή σόμπες χωρίς καμινάδες οδηγούν στην εσωτερική ατμοσφαιρική ρύπανση. Ο εσωτερικός αυτός καπνός περιέχει ένα μεγάλο τμήμα επιβλαβών για την υγεία ρύπων, συμπεριλαμβανομένων των μικρών σωματιδίων σκόνης τα οποία είναι δυνατόν να εισχωρήσουν βαθιά στους πνεύμονες και να προκαλέσουν ανυπέρβλητες δυσλειτουργίες στην ανθρώπινη υγεία. Σε κατοικίες με ανεπαρκή εξαερισμό, ο εσωτερικός καπνός μπορεί να υπερβεί τα αποδεκτά όρια για τα μικρά σωματίδια κατά 100 φορές. Η έκθεση γίνεται ιδιαίτερα υψηλή για τις γυναίκες, τα παιδιά και τους ηλικιωμένους που περνούν περισσότερο χρόνο στα εσωτερικά περιβάλλοντα. Οι πηγές δημιουργίας και μόλυνσης του κτιρίου είναι πολλές φορές δύσκολο να ανιχνευτούν (EPA 1993), ενώ όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, ο αερισμός παίζει καθοριστικό ρόλο στην αντιμετώπιση των προβλημάτων ποιότητας του εσωτερικού αέρα.

Μεγάλος αριθμός μελετών έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορους τύπους κτιρίων όπως κτίρια γραφείων (Matson 2005a), εργαστηριακούς χώρους (Buonanno et al., 2009, Glytsos et al., 2010), κέντρα διασκέδασης (Halios et al., 2009), εμπορικά κτίρια (Wang et al., 2010), υπόγειους συρμούς τρένων (Assimakopoulos et al., 2013), κλινικές οδοντιατρικής (Helmis et al., 2007) πύργους ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας (Helmis et al., 2009), κατοικίες (Chau et al., 2008) και σχολικά κτίρια (Dorizas et al., 2013). Συγκεκριμένα ο Matson (2005a) σε μελέτη που πραγματοποίησε σε κτίρια γραφείων και κατοικίες στη Σουηδία και τη Δανία βρήκε ότι οι συγκεντρώσεις υπομετρικών σωματιδίων στο εξωτερικό περιβάλλον επιδρούν σημαντικά στις εσωτερικές συγκεντρώσεις κατά την απουσία έντονων εσωτερικών πηγών. Οι υπολογιζόμενοι ρυθμοί αερισμού από τους Halios et al., (2009) στα κέντρα διασκέδασης ήταν σημαντικά χαμηλότεροι από τις ελάχιστες προτεινόμενες τιμές από διεθνή πρότυπα ενώ η πειραματική και θεωρητική διερεύνηση της ποιότητας του αέρα σε κλινική οδοντιατρικής της Αθήνας από τους Helmis et al., (2007) έδειξαν αυξημένα επίπεδα αέριων ρύπων συσχετιζόμενα με τον αριθμό των ατόμων, τις οδοντιατρικές κλινικές διαδικασίες, τα χρησιμοποιούμενα υλικά και το βαθμό αερισμού.

Σημαντικό πλήθος μελετών έχουν λάβει χώρα σε κατοικίες όπου με βάση τα αποτελέσματα φαίνεται ότι οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων επηρεάζονται σημαντικά από τις δραστηριότητες που λάμβαναν χώρα στο εσωτερικό των κτιρίων. Η μαγειρική και συγκεκριμένα το τηγάνισμα και το ψήσιμο στο φούρνο αλλά και η καύση των ξύλων, του κεριού και των αρωματικών στικς, αποτελούν βασική πηγή παραγωγής αιωρούμενων

σωματιδίων (Afshari et al., 2005; Glytsos et al., 2010; Ferro et al., 2004; He et al., 2004, Khillare et al., 2004, Morawska 2002, Morawska et al., 2003; Wallace et al. 2008, Mitsakou et al., 2007, Dasgupta et al., 2006, Tian et al., 2008, Wang et al., 2007; Willers et al., 2006, Matson 2005b, Zhu et al., 2005, Hussein et al., 2005, Santamouris et al., 2007b, Kalogerakis et al., 2005, Dermetzoglou et al., 2003, Götschi et al., 2002, Saraga et al., 2006, Wallace et al., 2008). Επιπλέον διαδικασίες καθαρίσματος όπως το σκούπισμα ή το σφουγγάρισμα προκαλούν την αναπήδηση αιωρούμενων σωματιδίων συμβάλλοντας δραματικά στην αύξησή τους (Monn et al., 1998, Corsi 2000, Byrne 1998, Tuckett et al., 1998, Long et al., 2000, Wallace 1996, McCormack et al., 2008). Μια από τις σπουδαιότερες πηγές αιωρούμενων σωματιδίων αποτελεί και ο καπνός του τσιγάρου (Reardon 2007, Moon et al., 1998, Slezakova et al., 2009, Gemenetzi et al., 2006, Wallace et al., 2003 cited in Paoletti et al., 2006, Morawska 2003). Επιπλέον η παρουσία ατόμων στο χώρο είναι δυνατόν να προκαλέσει την επαναίωρηση των αιωρούμενων σωματιδίων στο χώρο (Helmis et al., 2009, Fromme et al., 2008, Monn et al., 1998, Luoma 2001, Braniš et al., 2005). Οι εσωτερικές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων εξαρτώνται επίσης από κατασκευαστικούς παράγοντες όπως η θέση της κουζίνας μέσα στο σπίτι και η φύση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή της οροφής και των τοίχων της κουζίνας (Dasgupta et al., 2006, Hänninen et al., 2004, Sultan 2007). Οι επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες όπως η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία επηρεάζουν επίσης σε μεγάλο βαθμό την κατανομή των σωματιδίων (Hien et al., 2002, Manoli et al., 2002 cited in Ohura 2004, Gysels 2004, Khillare et al., 2004, Voutsas 2002). Τα νεογέννητα, τα μικρά παιδιά, οι ηλικιωμένοι αλλά και κληίηρεις ασθενείς ξοδεύουν ακόμα μεγαλύτερο ποσοστό της ημέρας τους στις κατοικίες, γεγονός που τους κάνει ακόμα πιο ευάλωτους στις αρνητικές επιπτώσεις της έκθεσης στους ρύπους του εσωτερικού αέρα.

Πέραν των δραστηριοτήτων του εσωτερικού περιβάλλοντος, ο αερισμός παίζει καθοριστικό ρόλο τόσο στην ποιότητα του εσωτερικού αέρα όσο και στη θερμική άνεση των χρηστών των κτιρίων. Συγκεκριμένα μελέτες έδειξαν ότι ο αερισμός μέσω του ανοίγματος των παραθύρων συνετέλεσε στη δραματική μείωση των ρύπων (McCormack et al., 2008, Fromme, et al. 2008, Diapouli et al., 2008, Rim and Persily 2010, Weisel 2005, Sultan et al., 2007, Wallace 2000 cited in Riley et al., 2002, Tuckett et al., 1998, Long et al., 2000, Wallace 1996, Cao et al., 2005, Matson 2005b) και κατά την απουσία εσωτερικών πηγών δημιουργίας ρύπων, ο λόγος συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό προς το εξωτερικό περιβάλλον καθορίστηκε σε μεγάλο βαθμό από τις επικρατούσες συνθήκες αερισμού είτε μέσω διείσδυσης από χαραμάδες είτε μέσω φυσικού ή και μηχανικού αερισμού (Zhu et al., 2005, Donghyun 2010, Mullen et al., 2010). Επιπλέον βρέθηκε ότι ο τύπος αερισμού

επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων. Συγκεκριμένα, ο μηχανικός αερισμός τηρώντας πάντα τις κατάλληλες μεθόδους σωστής συντήρησης, σε ορισμένες περιπτώσεις λειτουργεί αποτελεσματικότερα στην απομάκρυνση των ρυπαντών από το εσωτερικό περιβάλλον σε σχέση με τον φυσικό αερισμό. Στην περίπτωση που τα επίπεδα αερισμού είναι εξαιρετικά χαμηλά είναι δυνατόν οι δημιουργούμενοι ρύποι στο εσωτερικό περιβάλλον να μην επηρεάζονται από τον εξωτερικό αέρα και έτσι οι συγκεντρώσεις τους να συνεχίσουν να παραμένουν σε υψηλά επίπεδα. Ο παράγοντας διείσδυσης και τα κλάσματα των αιωρούμενων σωματιδίων από το εξωτερικό περιβάλλον που καταγράφονται στο εσωτερικό, εξαρτώνται από το ρυθμό ανταλλαγής αέρα, την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων, τις θερμοδυναμικές τους ιδιότητες, τα χαρακτηριστικά του κτιρίου και της τοποθεσίας στην οποία βρίσκεται αλλά και της εποχής στην οποία πραγματοποιείται η μελέτη (Weisel et al., 2005). Σε ανάλογα συμπεράσματα οδηγήθηκαν οι Sultan et al., 2007, επιβεβαιώνοντας ότι τα χαρακτηριστικά των κτιρίων, η στρατηγική αερισμού και διείσδυσης αέρα, παίζουν καθοριστικό ρόλο στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων και κατ' επέκταση στη υγεία των ατόμων που εκτίθενται σε αυτά. Τέλος, η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων, αυξάνεται σημαντικά από την ελλιπή συντήρηση των φίλτρων του μηχανικού συστήματος αερισμού (Tuckett et al., 1998, Long et al. 2000, Wallace 1996). Επίσης μελέτες που συσχέτισαν την ποιότητα του εσωτερικού αέρα με την αντίστοιχη του εξωτερικού αέρα, έδειξαν ότι το εξωτερικό περιβάλλον διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στα εσωτερικά επίπεδα ρύπων, γεγονός το οποίο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα επίπεδα αερισμού που αναπτύχθηκαν παραπάνω (Chaloulakou et al., 2003, Diapouli et al., 2007b, Goyal and Khare, 2009, Guo et al., 2010, Tiprayawong et al., 2009, Yoon et al., 2011, Jamriska et al., 1999, Jones et al., 2000 and Morawska et al., 2001).

Τα σχολικά κτίρια αποτελούν περιβάλλοντα μείζονος σημασίας για τη διασφάλιση της υγείας και της αποτελεσματικής μάθησης των μαθητών (Silvers et al., 1994) καθώς οι μαθητές ξοδεύουν σε αυτά σημαντικό ποσοστό της ημέρας τους. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, το εσωτερικό περιβάλλον των σχολικών αιθουσών είναι πολλές φορές επιβαρυνμένο (Dorizas et al. 2013a, Fromme et al., 2007, Froome et al., 2005, Goyal and Khare, 2009, Siskos et al., 2001, Synnefa et al., 2003, Tiprayawong et al., 2009) προκαλώντας εξαιρετικά δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία των παιδιών. Επιπλέον τα παιδιά αποτελούν ευπαθή ομάδα του ανθρώπινου πληθυσμού εξαιτίας του αναπτυσσόμενου ανοσοποιητικού συστήματός τους και των υψηλών επιπέδων βασικού ρυθμού μεταβολισμού τους σε αναλογία με το σωματικό τους βάρος (EPA 1995). Συγκεκριμένα η ποσότητα εισπνεόμενου αέρα ενός βρέφους είναι σχεδόν διπλάσια της αντίστοιχης ενός ενήλικα γεγονός το οποίο υποδηλώνει ότι τα παιδιά είναι σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό εκτεθειμένα στις τοξικές ουσίες του αέρα σε σύγκριση με τους

ενήλικες (WHO 2005, Annesi-Maesano et al., 2003). Συνεπώς η παρατεταμένη έκθεση των παιδιών σε αέριους ρύπους είναι δυνατόν να τους προκαλέσει σοβαρά προβλήματα υγείας (Schwartz 2004) και άρα τα σχολικά περιβάλλοντα αποτελούν κατηγορία κτιρίων ύψιστης σημασίας των οποίων η μελέτη κρίνεται αναγκαία και επιτακτική.

Πέραν των επιπτώσεων στην υγεία των ανθρώπων, πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι η επιβαρυσμένη ποιότητα του εσωτερικού αέρα είναι δυνατόν να φέρει αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοση και παραγωγικότητα των ατόμων που ζουν και εργάζονται στα περιβάλλοντα αυτά (Myhrvold et al., 1996, Lee et al., 2012, Wargocki et al., 2000, Wargocki et al., 2005, Mendell and Heath 2005) (Dorgan et al., 1998). Η κακή ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος στις σχολικές αίθουσες σε πολλές περιπτώσεις συνδέεται με ελλιπή επίπεδα αερισμού αλλά και με την έλλειψη των απαραίτητων πόρων για την επαρκή λειτουργία και συντήρηση των κατάλληλων υπηρεσιών για τη βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα (Haverinen-Shaughnessy et al., 2011, Shaughnessy et al., 2006, Bako-Biro et al., 2012, Shendell et al., 2004, Wargocki and Wyon 2007, Kameda et al., 2007). Συγκεκριμένα, οι Haverinen-Shaughnessy et al., 2011 σε μελέτη που πραγματοποίησαν σε σχολικές αίθουσες, βρήκαν γραμμική συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού αερισμού και των επιτευχθέντων βαθμολογιών από τους μαθητές. Επίσης, οι Wargocki et al., 1999 έδειξαν ότι μειώνοντας το φορτίο ρύπανσης του εσωτερικού αέρα, η άνεση αλλά και η παραγωγικότητα των μαθητών βελτιώθηκαν. Τέλος στη μελέτη των Kameda et al., 2007 η απόδοση των μαθητών συσχετίστηκε και με την αποδοχή του εσωτερικού περιβάλλοντος από τους μαθητές ωστόσο ο αερισμός και τα επίπεδα των αέριων ρύπων δεν καταγράφηκαν.

Παράλληλα σε πρόσφατες μελέτες έχει γίνει προσπάθεια να εξεταστεί η υποκειμενική αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος συμπεριλαμβανομένων και των τεσσάρων συνιστωσών που τη χαρακτηρίζουν. Η αποτίμηση των θερμικών συνθηκών των τάξεων από μαθητές έχει εξεταστεί σε αρκετές μελέτες μέσω της αξιολόγησης του θερμικού περιβάλλοντος, της θερμικής αποδοχής και της προτίμησης (Corgnatti et al., 2007, Corgnati et al., 2009, Tablada, A., 2005, Wong and Khoo 2003, Kwong and Adam 2011, Alfano et al., 2013, Teli et al., 2012, Teli et al., 2013, Azizpour et al. 2011). Μεγάλος αριθμός μελετών έχει πραγματοποιηθεί επίσης σε κτίρια γραφείων και σχολεία για την αξιολόγηση της θερμικής αντίληψης των χρηστών (de Dear and Brager 1998, Mumovic et al., 2009a, Wargocki and Wyon 2013, de Dear and Brager 2002, Ricciardi and Buratti et al., 2012, Tablada et al., 2005, Kwong and Adam 2011). Το γεγονός ότι υπάρχει μια διαφωνία σχετικά με την ικανότητα των παιδιών σε μικρές ηλικίες να αντιληφθούν και να εκφράσουν την θερμική τους αίσθηση με λογικό τρόπο (Walker, 2001), έχει ωθήσει τις μελέτες πεδίου θερμικής άνεσης που πραγματοποιούνται σε σχολικά κτίρια να εστιάζουν κυρίως σε ηλικίες μεταξύ 13 και 17 ετών

(Wong and Khoo, 2003). Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Humpreys (1977) είναι μια από τις λίγες που έγιναν σε παιδιά μικρότερης ηλικίας και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα παιδιά είναι τελικά σε θέση να αντιληφθούν το θερμικό περιβάλλον. Ωστόσο, ο αριθμός των μελετών αναφορικά με την αξιολόγηση του θερμικού περιβάλλοντος από τους μαθητές είναι περιορισμένος (Teli et al., 2013, Wong and Khoo 2003, Corgnati et al., 2007, Corgnati et al., 2009, Alfano et al., 2013, Teli et al., 2012).

Επιπλέον, μελέτες έδειξαν ότι τα αυξημένα επίπεδα εσωτερικών ρύπων οδήγησαν σε αυξημένα ποσοστά δυσαρεστημένων μαθητών σε σχέση με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα (Wargocki and Fanger 1997). Η αποτίμηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα, του φωτισμού, της ακουστικής και του θερμικού περιβάλλοντος έχει επίσης μελετηθεί σε σχολεία και κατοικίες (Wargocki et al., 1999, Frontczak et al., 2012, De Guili et al., 2012, Zalejska-Jonsoon and Wilhelmsson 2013, Frontczak and Wargocki 2011, Issa et al., 2011). Συγκεκριμένα στη μελέτη τους οι De Guili et al., 2011 βρήκαν ότι οι μαθητές παραπονέθηκαν κυρίως για την υποβιβασμένη ποιότητα του αέρα, το θόρυβο και το θερμικό περιβάλλον κατά τη διάρκεια των θερμών περιόδων. Σύμφωνα με έρευνα ερωτηματολογίου που πραγματοποιήθηκε σε κατοικίες στη Δανία από τους Frontczak et al., 2012, οι βασικότερες παράμετροι για τον καθορισμό της άνεσης στα εσωτερικά περιβάλλοντα των κατοικιών υπήρξαν η ποιότητα του εσωτερικού αέρα, ο φωτισμός, η ακουστική και το θερμικό περιβάλλον. Οι Sarantopoulos et al., 2013 αξιολόγησαν τα επίπεδα θορύβου σε σχολικά περιβάλλοντα και βρήκαν ότι ήταν υψηλότερα σε σχέση με τις προτεινόμενες οριακές τιμές. Σε μελέτη του θερμικού περιβάλλοντος σε σχολικές αίθουσες από τους Ricciardi and Buratti 2012 διαπιστώθηκαν σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ των δεικτών μέσης προβλεπόμενης ψήφου (Predicted Mean Vote-PMV) και του ποσοστού των δυσαρεστημένων ατόμων (Percentage of People Dissatisfied-PPD) από τα ερωτηματολόγια και τα πειραματικά δεδομένα.

Παρόλο που τόσο τα αιωρούμενα σωματίδια όσο και οι αερομεταφερόμενοι μύκητες αποτελούν βασικούς ρύπους του εσωτερικού περιβάλλοντος, είναι περιορισμένο το πλήθος των μελετών της διεθνούς βιβλιογραφίας που αναφέρονται σε ταυτόχρονες μετρήσεις, συσχετίσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δύο ρύπων (Adhikari et al, 2006, Degobbi et al, 2011, Grinn-Gofroñ et al, 2011, Hargreaves, 2003; Sousa et al, 2008). Σημειώνεται ότι στις μελέτες αυτές δεν έχουν εκτενώς αναλυθεί η συσχέτιση μεταξύ αιωρούμενων σωματιδίων και αερομεταφερόμενων σωματιδίων. Ειδικότερα στην Ελλάδα έχει πραγματοποιηθεί μόνο ποσοτική αξιολόγηση των βιοαεροσόλ σε σχέση με τα αιωρούμενα σωματίδια στο εξωτερικό περιβάλλον, σε κατοικίες και κτίρια γραφείων (Kalogerakis et al, 2005, Raisi et al, 2010).

Ένα μεγάλο πλήθος μελετών αναφέρεται στη χημική σύνθεση των αιωρούμενων σωματιδίων. Σύμφωνα με τους (Turnbull and Harrison 2000, Lin 2002) τα κύρια συστατικά των PM_{2.5} και PM₁₀ είναι το τα θειικά και νιτρικά ιόντα, ιόντα αμμωνίου, ο οργανικός άνθρακας (CO) και ο ανόργανος άνθρακας (EC). Τα μέταλλα που ανιχνεύθηκαν στα λεπτόκκοκα και χονδρόκκοκα σωματίδια του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος κατοικιών στο Δελχί, είναι τα ακολουθία: Ca, K, Pb, Cd, Ni, Zn, Fe και Mn. Σε ορισμένες από τις μετρήσεις τους οι Khillare et al. (2004) βρήκαν το ασβέστιο να βρίσκεται σε υψηλότερες συγκεντρώσεις στο εξωτερικό περιβάλλον συγκριτικά με το εσωτερικό, γεγονός το οποίο πιθανότατα να οφείλεται στα υψηλά επίπεδα κυκλοφορίας των οχημάτων τα οποία προκαλούν την επαναιώρηση του εδάφους και απελευθερώνουν υψηλά επίπεδα ασβεστίου στην ατμόσφαιρα (Fromme et al. 2008, Ji et al. 2010, Paoletti et al. 2006). Σε μελέτη της η Jeng (2010) ανέλυσε τη χημική σύνθεση και την οξειδοαναγωγική δραστηριότητα των αιωρούμενων σωματιδίων. Επίσης βρήκε ότι τα υπομετρικά σωματίδια έχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις οργανικού άνθρακα (organic carbon), στοιχειώδους άνθρακα (elemental carbon), πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAHs), και μετάλλων σε σχέση με τα PM_{2.5}. Η χημική ανάλυση των αιωρούμενων σωματιδίων αποτελεί παράγοντα κλειδί για τον προσδιορισμό των πηγών προέλευσης τους ωστόσο όμως ο αριθμός των μελετών που έχουν λάβει χώρα σε σχολικές αίθουσες είναι περιορισμένος (Fromme et al., 2008, Triantafyllou et al., 2008, Zwozdziak et al., 2013, Alves et al., 2013, Alves et al., 2014, John et al., 2007, Pegas et al., 2012, Raysoni et al., 2013).

Επιπλέον η μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων εξαιρετικά μικρής αεροδυναμικής διαμέτρου (<100 nm) γνωστά και ως υπομετρικά σωματίδια έχει ενταθεί τα τελευταία χρόνια λόγω του γεγονότος ότι εξ' αιτίας του μικρού μεγέθους τους εισχωρούν σε βαθύτερες περιοχές του αναπνευστικού μας συστήματος προκαλώντας δυσμενέστερες επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου. Οι συγκεντρώσεις αυτών έχουν καταγραφεί σε ένα πλήθος διαφορετικών εσωτερικών περιβαλλόντων όπως κτίρια κατοικιών (Bhangar et al. 2011, Arhami et al., 2010, Mullen et al., 2010, Matson 2005a), εστιατόρια (Wallace and Ott 2011) και σε κέντρα διασκέδασης (Halios et al., 2009). Ωστόσο στην Ελλάδα ο αριθμός των συγκεκριμένων μελετών στα υπομετρικά σωματίδια και κυρίως όσων αφορά σε κατοικίες και σχολικά κτίρια, παραμένει περιορισμένο (Diarouli et al. 2007a).

Πέραν της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος η ενεργειακή απόδοση των σχολικών κτιρίων αποτελεί επίσης σημαντική παράμετρο μελέτης. Στην Ελλάδα έχει μελετηθεί η ενεργειακή κατανάλωση σχολικών κτιρίων από ερευνητές οι οποίοι δημιούργησαν ένα εργαλείο ταξινόμησης των ενεργειακών καταναλώσεων μέσω τεχνικών ανάλυσης σε συστάδες (cluster analysis) (Gaitani et al., 2010, Santamouris et al., 2007a). Μια πιο

ολοκληρωμένη μελέτη πραγματοποιήθηκε από τους Dascalaki and Sermpetzoglou (2011) στην οποία εκτός από τις ενεργειακές καταναλώσεις μελετήθηκε επιπλέον και υποκειμενική αξιολόγηση του εσωτερικού περιβάλλοντος από τους μαθητές.

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί η πειραματική μελέτη της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος με την πλήρη καταγραφή των φυσικών, χημικών και βιολογικών παραμέτρων που τη χαρακτηρίζουν σε σχολικά κτίρια και κατοικίες στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής. Επιπλέον διερευνάται η σχέση μεταξύ των παραπάνω μετρήσεων με την υποκειμενική αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος από τους μαθητές. Συγκεκριμένα, οι βασικοί στόχοι της εργασίας συνοψίζονται παρακάτω:

1. Μελέτη των επιπέδων των συγκεντρώσεων των βασικότερων αέριων ρύπων του εσωτερικού αέρα δια μέσω πειραματικής διαδικασίας με την ταυτόχρονη διεξοδική καταγραφή και ανάλυση των επιπέδων διεύθυνσης του αέρα και του βαθμού αερισμού. Σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης με τα αποτελέσματα αντίστοιχων επιστημονικών ερευνών και χαρακτηρισμός των συγκεντρώσεων αυτών σε σχέση με το βαθμό υπέρβασης των οριακών τιμών όπως ορίζονται με βάση τα διεθνή πρότυπα. Μελέτη της ημερήσιας μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων και του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) με σκοπό τον προσδιορισμό των βασικότερων παραμέτρων επίδρασης των διακυμάνσεών τους και ταυτόχρονη καταγραφή φυσικοχημικών, βιολογικών και μετεωρολογικών παραμέτρων με σκοπό τη διερεύνηση ενδεχόμενων συσχετίσεων μεταξύ τους. Αποτύπωση του προφίλ των υπομετρικών σωματιδίων με σκοπό τη συνεισφορά στον καθορισμό κατευθυντήριων οδηγιών για τη μέθοδο μέτρησης και αλλά και τον καθορισμό των οριακών τιμών τους. Χημική ανάλυση των αιωρούμενων σωματιδίων με σκοπό την επιβεβαίωση των πηγών δημιουργίας τους με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία. Επιπλέον, πλήρης αποτύπωση των δραστηριοτήτων (μαγειρική, κάπνισμα, άνοιγμα παραθύρων, παρουσία ατόμων κτλ.) που λαμβάνουν χώρα σε κάθε εσωτερικό περιβάλλον στη διάρκεια των μετρήσεων και προσδιορισμός του κατά πόσο οι δραστηριότητες αυτές επιδρούν στις συγκεντρώσεις των μετρούμενων παραμέτρων.
2. Εφαρμογή μαθηματικού μοντέλου πρόβλεψης των αιωρούμενων σωματιδίων μετά από διαδοχικούς ελέγχους ευαισθησίας των διάφορων παραμέτρων, εκτίμηση ρυθμού εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων από συγκεκριμένες δραστηριότητες και σύγκριση μεταξύ πειραματικών και αναμενόμενων θεωρητικών αποτελεσμάτων.
3. Υποκειμενική αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος συμπεριλαμβανομένης της ποιότητας του εσωτερικού αέρα, της θερμικής άνεσης και του περιβάλλοντος φωτισμού και ακουστικής των τάξεων από μεγάλο πλήθος μαθητών με τη

βοήθεια ερωτηματολογίων και σύγκριση των απαντήσεων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των μετρήσεων με σκοπό τον προσδιορισμό των βασικότερων παραμέτρων που επιδρούν στις απαντήσεις των μαθητών. Προσδιορισμός των επικρατέστερων από τα συμπτώματα άρρωστου κτιρίου που ταλαιπωρούσαν τους μαθητές και επιπλέον μελέτη των συσχετίσεων μεταξύ των συμπτωμάτων αυτών σε αντιστοιχία με τα εσωτερικά επίπεδα αέριων ρύπων. Επιπλέον θα πραγματοποιηθεί διερεύνηση της παραγωγικότητας των μαθητών μέσω τυποποιημένων τεστ, σε σχέση με τα επίπεδα των αέριων ρύπων και του αερισμού. Τέλος, αξιολόγηση των ενεργειακών καταναλώσεων των σχολικών κτιρίων με βάση αντίστοιχες καταναλώσεις σε εθνικό επίπεδο αλλά και προσδιορισμός των ενδεχόμενων συσχετίσεων μεταξύ ενεργειακών καταναλώσεων και επιπέδων ρύπανσης του εσωτερικού αέρα.

Η δομή της διατριβής έχει ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 παρατίθενται οι βασικότερες συνιστώσες της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος, δίνοντας έμφαση στην ποιότητα του εσωτερικού αέρα. Με βάση τη βιβλιογραφική επισκόπηση αναλύεται η σύνθεση, οι πηγές προέλευσης και επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων ενώ αναπτύσσονται οι βασικές αρχές του αερισμού και παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο πρόβλεψης των αιωρούμενων σωματιδίων που βασίζεται στο ισοζύγιο μάζας. Τέλος αναπτύσσεται η αξία της χρήσης έρευνας ερωτηματολογίων και παρατίθενται οι βασικές αρχές στις οποίες βασίζεται.

Το Κεφάλαιο 3 αναφέρεται στην μεθοδολογία με την οποία πραγματοποιήθηκε όλη η ερευνητική προσπάθεια. Συγκεκριμένα παρατίθεται ο πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Στη συνέχεια για καθεμιά από τις πειραματικές καμπάνιες που διεξήχθησαν σε κατοικίες και σχολεία αναφέρονται οι στόχοι των πειραματικών μετρήσεων, οι μετρούμενες παράμετροι και τα πρωτόκολλα δειγματοληψίας αναλυτικά.

Στο Κεφάλαιο 4 αναπτύσσεται η μεθοδολογία στην οποία στηρίχτηκε η έρευνα ερωτηματολογίων. Αρχικά αναφέρονται οι στόχοι του συγκεκριμένου τμήματος της μελέτης. Παρατίθεται αναλυτικά η επιστημονική θεμελίωση και τα πρωτόκολλα εφαρμογής τόσο των ερωτηματολογίων όσο και των τεστ παραγωγικότητας των μαθητών αλλά και των ερωτηματολογίων σχετικά με την ενεργειακή αποτίμηση των σχολικών κτιρίων.

Το κεφάλαιο 5 αναφέρεται στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων των πειραματικών μετρήσεων και στην αξιολόγησή τους ανά πειραματική καμπάνια. Αρχικά αναφέρονται η

επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων της πρώτης πειραματικής καμπάνιας που έλαβε χώρα σε δύο κατοικίες της Αττικής ενώ τα αποτελέσματα και η επεξεργασία των δύο επόμενων πειραματικών μελετών που διεξήχθησαν στα σχολεία παρουσιάζονται στη συνέχεια. Τα αποτελέσματα της δεύτερης πειραματικής καμπάνιας που πραγματοποιήθηκε στα 9 σχολεία παρουσιάζονται σε τρία τμήματα: της ανάλυσης των πειραματικών μετρήσεων, της επεξεργασίας των ερωτηματολογίων και την θεωρητικής εκτίμησης των συγκεντρώσεων με τη βοήθεια αριθμητικού μοντέλου.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται οι γενικότερες διαπιστώσεις της διδακτορικής διατριβής ενώ προτείνονται αντικείμενα και προοπτικές για μελλοντική έρευνα.

Τέλος στα παραρτήματα δίδονται η αρχή λειτουργίας του πειραματικού εξοπλισμού, ορισμένα πρόσθετα γραφήματα τα οποία είναι συμπληρωματικά της διατριβής, αλλά και τα ερωτηματολόγια και τα τεστ παραγωγικότητας της δεύτερης πειραματικής μελέτης στα σχολεία της Αττικής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα παρατεθούν ορισμένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά καθεμιάς από τις επιμέρους συνιστώσες της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος (η θερμική άνεση, ο φωτισμός, η ακουστική και η ποιότητα του εσωτερικού αέρα (EN 15251)), οι οποίες έχουν άμεση σχέση με την άνεση, την υγεία και την παραγωγικότητα των ενοίκων ενός κτιρίου.

Θερμική άνεση

Σύμφωνα με τον ορισμό της Αμερικανικής Ένωσης Μηχανικών Θέρμανσης Ψύξης και Αερισμού (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning- ASHRAE 2004.55), "η θερμική άνεση αναφέρεται στην ικανοποίηση που εκφράζει ο χρήστης με το θερμικό περιβάλλον" η οποία επιτυγχάνεται όταν ικανοποιεί το 80% των χρηστών του κτιρίου. Οι βασικότερες παράμετροι που καθορίζουν τη θερμική άνεση είναι η θερμοκρασία του αέρα (Air Temperature, T), η σχετική υγρασία (Relative Humidity, RH), η ταχύτητα του εσωτερικού αέρα (Air Speed), η ακτινοβολούμενη θερμοκρασία (Radiant Temperature), η ποιότητα του αέρα (Indoor Air Quality, IAQ), ο βαθμός ρουχισμού ή επίπεδο ένδυσης (Clothing insulation), το είδος των δραστηριοτήτων των χρηστών του χώρου ή ρυθμός μεταβολισμού (Metabolic Rate), το φύλλο των χρηστών και η ηλικία τους.

Το ανθρώπινο σώμα παράγει ενέργεια με τη χρήση οξυγόνου για το μεταβολισμό του φαγητού και τη μετατροπή του σε χρήσιμες μορφές ενέργειας. Ο ρυθμός της παραγόμενης ενέργειας είναι γνωστός ως ρυθμός μεταβολής met (metabolic rate) ενώ το μεγαλύτερο μέρος της παραγόμενης ενέργειας είναι σε μορφή θερμότητας. Ως εκ τούτου, προκειμένου να επιτευχθεί η θερμική ισορροπία κρίνεται σκόπιμο, η εσωτερική παραγωγή θερμότητας του σώματος να είναι ίση με την απώλεια θερμότητας στο περιβάλλον (ISO 7730). Στην περίπτωση μη ισορροπίας των δύο, τότε είναι δυνατόν το ανθρώπινο σώμα να αισθανθεί άβολα. Η εξίσωση του θερμικού ισοζυγίου για το ανθρώπινο σώμα εκφράζεται ως εξής:

$$M - W = H + E + C_{res} + E_{res}$$

Όπου M: ο ρυθμός μεταβολισμού (Metabolic rate) όπου μετασχηματίζεται η χημική ενέργεια σε θερμότητα και μηχανικό έργο από τις αερόβιες και αναερόβιες δραστηριότητες μέσα στο ανθρώπινο σώμα (W/m^2), W: η ενέργεια που καταναλώνεται υπό μορφή μηχανικού έργου (W/m^2), H: η ξηρά απώλεια θερμότητας από την επιφάνεια του σώματος μέσω συναγωγής,

ακτινοβολίας και αγωγής (W/m^2), E : η ανταλλαγή θερμότητας στο δέρμα με εξάτμιση (W/m^2), C_{res} : η ανταλλαγή θερμότητας μέσω αναπνευστικής συναγωγής και E_{res} : η ανταλλαγή θερμότητας μέσω εξατμίσεων του αναπνευστικού (W/m^2). Το επίπεδο ένδυσης είναι ακόμα μία σημαντική παράμετρο που επηρεάζει τη θερμική άνεση και έχει να κάνει με την ιδιότητα του ανθρώπου να αποβάλλει θερμότητα προς το περιβάλλον. Η θερμική αντίσταση στην ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του δέρματος του ανθρώπου και της γύρω ατμόσφαιρας εξ' αιτίας του ρουχισμού μετρίεται σε μονάδες clo όπου $1 clo = 0.155 m^2K/Watt$ (CIBSE KS6, 2006).

Για τον προσδιορισμό της θερμικής άνεσης έχουν αναπτυχθεί μοντέλα τα οποία λαμβάνοντας υπόψη τις προαναφερθείσες παραμέτρους υπολογίζουν το ποσοστό των ικανοποιημένων και δυσαρεστημένων ατόμων με το θερμικό περιβάλλον. Το πρώτο μοντέλο θερμικής άνεσης αναπτύχθηκε από τον Fanger το 1967 (Fanger's Comfort Model) το οποίο βασιζόμενο στην εξίσωση του θερμικού ισοζυγίου υπολογίζει τους ακόλουθους δείκτες θερμικής άνεσης με τη χρήση μιας 7-βάθμιας κλίμακας θερμικής αίσθησης (Πίνακας 2-1) (ASHRAE 2004.55).

*Δείκτης PMV: Αφορά την Προβλεπόμενη Μέση Ψήφο (Predicted Mean Vote-PMV, αδιάστατο μέγεθος) που προβλέπει τη μέση τιμή των ψήφων θερμικής αίσθησης στην 7-βάθμια κλίμακα μιας μεγάλης ομάδας ατόμων εκτεθειμένης στο ίδιο περιβάλλον με βάση το ισοζύγιο θερμότητας του ανθρώπινου σώματος. Η εξίσωση υπολογισμού του δείκτη PMV προκύπτει με βάση τον ακόλουθο τύπο:

$$PMV = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.028] [(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}]$$

όπου E_c η ανταλλαγή θερμότητας στο δέρμα μέσω εξάτμισης όταν το άτομο αντιλαμβάνεται αίσθηση θερμικής ουδετερότητας (W/m^2).

*Δείκτης PPD: Αφορά το Προβλεπόμενο Ποσοστό Δυσφορούντων (Predicted percentage dissatisfied-PPD, %) που καθορίζει μια ποσοτική πρόβλεψη του ποσοστού των θερμικά δυσαρεστημένων ανθρώπων. Σύμφωνα με την προσέγγιση Fanger 1982 οι θερμικά δυσαρεστημένοι χρήστες είναι εκείνοι που ψηφίζουν τις ακραίες τιμές στην 7-βάθμια θερμική κλίμακα (δηλ. ζεστά, πολύ ζεστά, κρύα, πολύ κρύα). Συνήθως γίνεται υπερεκτίμηση των δυσφορούντων καθώς ο δείκτης υπολογίζει το ποσοστό ατόμων θεωρώντας ότι όλοι οι άνθρωποι στο χώρο είναι ντυμένοι με τον ίδιο βαθμό ρουχισμού. Το ποσοστό των δυσφορούντων με το θερμικό περιβάλλον υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)]$$

Πίνακας 2-1: 7-βάθμια κλίμακα θερμικής αίσθησης

+3	Πολύ ζεστά (Hot)
+2	Ζεστά (Warm)
+1	Ελαφρώς ζεστά (Slightly warm)
0	Φυσιολογικά (Neutral)
-1	Ελαφρώς κρύα (Cool)
-2	Κρύα (Cool)
-3	Πολύ κρύα (Cold)

Μελέτες πεδίου θερμικής άνεσης έδειξαν ότι η 'προσαρμοστική προσέγγιση' (adaptive approach) περιγράφει καλύτερα τις συνθήκες άνεσης σε μη κλιματιζόμενα ή φυσικώς αεριζόμενα κτίρια. Η θεμελιώδης παραδοχή της προσαρμοστικής προσέγγισης είναι: "Αν συμβεί κάποια αλλαγή τέτοια ώστε να προκαλέσει τη δυσφορία των ανθρώπων, οι άνθρωποι αντιδρούν με τρόπους που τείνουν να αποκαταστήσουν την άνεσή τους" (Humphreys and Nicol 1998). Συγκεκριμένα οι χρήστες του κτιρίου τείνουν να προσαρμοστούν στη βέλτιστη θερμοκρασία άνεσης κάνοντας αλλαγές στο επίπεδο ένδυσης και δραστηριότητάς τους. Επίσης η προσαρμογή στις εσωτερικές συνθήκες είναι δυνατόν να επιτευχθεί με τη λειτουργία των παραθύρων, των ανεμιστήρων αλλά και ορισμένων μηχανικών συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Επιπλέον, μελέτες (de Dear and Brager 2002) που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων της ASHRAE RP-884 έδειξαν ότι "οι ένοικοι των φυσικά αεριζόμενων κτιρίων προτιμούν ένα ευρύτερο φάσμα συνθηκών που αντανακλούν περισσότερο τις συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος" ενώ οι προβλέψεις του δείκτη PMV ταιριάζουν καλύτερα με τις προτιμήσεις των χρηστών κτιρίων με μηχανικό σύστημα θέρμανσης και ψύξης.

Φωτισμός

Κατάλληλα επίπεδα φωτισμού είναι απαραίτητα για την εκτέλεση εργασιών αποτελεσματικά και με ακρίβεια. Τα απαιτούμενα επίπεδα φωτισμού ορίζονται αναλυτικά στο πρότυπο: 12464-1. Ο φωτισμός σε ένα κτίριο παρέχεται για τρεις βασικούς λόγους: 1. να επιτρέπει στους χρήστες να εργαστούν και να κινηθούν στο χώρο με ασφάλεια, 2. να επιτρέπει τη σωστή επίτευξη εργασιών με τον κατάλληλο ρυθμό και 3. να δημιουργεί μια ευχάριστη εμφάνιση του χώρου. Συνεπώς θα πρέπει ο χώρος να είναι επαρκώς φωτισμένος χωρίς την παρουσία υπερβολικά λαμπρών πηγών καθώς υπάρχει πιθανότητα να δημιουργηθούν προβλήματα θάμβωσης στο χώρο γεγονός το οποίο είναι δυνατόν να προκαλέσει τη δυσαρέσκεια των χρηστών του κτιρίου. Διαφορετικού τύπου εργασίες απαιτούν και

διαφορετικές εντάσεις φωτισμού ανάλογα με το βαθμό δυσκολίας της εργασίας. Τα συνιστώμενα επίπεδα φωτισμού για σχολικές αίθουσες είναι: 300 lux (CIBSE KS6 2006).

Ακουστική

Η ακουστική άνεση προϋποθέτει ένα ιδανικά 'ήσυχο' περιβάλλον που να επιτρέπει την επίτευξη δραστηριοτήτων με άνεση χωρίς να αποσπάται η προσοχή των χρηστών από ενδεχόμενους θορύβους. Θόρυβος ορίζεται ως ο οποιασδήποτε μορφής ανεπιθύμητος ήχος που μπορεί να επηρεάσει τους ανθρώπους με διάφορους τρόπους ανάλογα με τα επίπεδα κύμανσής του προκαλώντας από απλή ενόχληση μέχρι πραγματική βλάβη στην ακοή. Υπάρχουν τρία δυνητικά προβλήματα: 1. ενόχληση: όπου ο θόρυβος γίνεται αντιληπτός και επιδρά στη συγκέντρωση, 2. συγκάλυψη: όπου ο θόρυβος καλύπτει αποτελεσματικά τον επιθυμητό ήχο όπως για παράδειγμα όταν μια ομιλία συγκαλύπτεται από την οδική κυκλοφορία ή ακόμα θόρυβος από μηχανήματα που προκαλούν παρεμβολές της ομιλίας. 3. Βλάβες της ακοής: στην περίπτωση αυτή ο θόρυβος είναι αρκετά δυνατός ώστε να προκαλέσει είτε την προσωρινή είτε ακόμα και τη μόνιμη βλάβη στην ακοή. Σημειώνεται ότι ένα υπερβολικά ήσυχο περιβάλλον είναι δυνατόν να προκαλέσει προβλήματα καθώς ορισμένο επίπεδο θορύβου υποβάθρου είναι χρήσιμο για την εξασφάλιση προστασίας του ιδιωτικού περιβάλλοντος (privacy). Για αίθουσες διδασκαλίας τα συνιστώμενα επίπεδα θορύβου κυμαίνονται μεταξύ 35-45dB (CIBSE comfort 2006).

Ποιότητα εσωτερικού αέρα

Σύμφωνα με την υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency-EPA), η Ποιότητα του Εσωτερικού Αέρα (Indoor Air Quality- IAQ) αφορά τα επίπεδα θερμοκρασίας, υγρασίας, τον αερισμό καθώς και τις συγκεντρώσεις των φυσικοχημικών και βιολογικών ρύπων στα εσωτερικά περιβάλλοντα των κτιρίων, παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την υγεία και την άνεση των ενοίκων ενός κτιρίου. Τα κατασκευαστικά υλικά, η λειτουργία των μηχανικών συστημάτων ψύξης και θέρμανσης, η παρουσία πηγών δημιουργίας ρύπων, η εισροή ρύπων από το εξωτερικό στο εσωτερικό περιβάλλον των κτιρίων, οι δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στα εσωτερικά περιβάλλοντα, αλλά και ο αερισμός αποτελούν παραμέτρους στις οποίες θα αναφερθούμε εκτενώς σε επόμενη παράγραφο, οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα (EPA 1993). Σύμφωνα με αναφορά της CISBE, αποδεκτή ποιότητα του αέρα στο εσωτερικό κτιριακό περιβάλλον είναι δυνατόν να επιτευχθεί με τον περιορισμό των ρύπων και με τον απαραίτητο αερισμό (CIBSETM21 1999). Κατά την ASHRAE, η εξασφάλιση της ποιότητας του αέρα στο εσωτερικό περιβάλλον σαν διαδικασία, αφορά το σχεδιασμό κτιρίου και συστήματος αερισμού, με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρηθούν οι συγκεντρώσεις συγκεκριμένων ρύπων κάτω από τα καθορισμένα επίπεδα που

τέθηκαν κατά το πρώιμο στάδιο του σχεδιασμού του κτιρίου. Τα επίπεδα αυτά έχουν οριστεί από αρμόδιες αρχές ώστε η ποιότητα του αέρα να είναι αποδεκτή από την πλειοψηφία των ατόμων (μεγαλύτερη ή ίση του 80%) που ζουν, εργάζονται και επισκέπτονται τους χώρους αυτούς ώστε να μην εκφράζουν σχετική δυσαρέσκεια (ASHRAE standard 62.1.2007).

Σύμφωνα με την οδηγία 2008/50/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου στις 21ης Μαΐου 2008 για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερου αέρα για την Ευρώπη, ρύπος έχει οριστεί ως «οποιαδήποτε ουσία που εμφανίζεται στον ατμοσφαιρικό αέρα και ενδέχεται να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου και/ή στο περιβάλλον στο σύνολό του». Η ρύπανση του αέρα έχει δύο βασικές μορφές, την αέρια και την σωματιδιακή ρύπανση και διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες: στους πρωτογενείς και τους δευτερογενείς ρύπους. Οι πρωτογενείς ρύποι εκπέμπονται κατ' ευθείαν από ρυπογόνες διαδικασίες, ενώ οι δευτερογενείς ρύποι προέρχονται από αντιδράσεις αποσύνθεσης των πρωτογενών ρύπων. Στη σωματιδιακή ρύπανση όπως και στην αέρια, τα σωματίδια είναι δευτερογενείς ρύποι που έχουν σχηματιστεί από αντιδράσεις που εμπλέκουν διοξείδιο του θείου ή του αζώτου (CIBSETM21 1999). Στη μελέτη αυτή θα εστιάσουμε στη σωματιδιακή ρύπανση.

Βασικότεροι ρύποι και πηγές του εσωτερικού αέρα

Στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται οι κυριότεροι ρύποι του εσωτερικού αέρα και οι αντίστοιχες πηγές τους.

Πίνακας 2-2: Ρύποι στο εσωτερικό περιβάλλον και πηγές αυτών (Spengler and Sexton 1983)

Ρύποι	Πηγές εκπομπής
Αλλεργιογόνα	Σκόνη σπιτιών, κατοικίδια ζώα, έντομα
Αμίαντος (Asbestos)	Μονωτικά υλικά
Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	Διεργασίες μεταβολισμού, καύση, αυτοκινούμενα οχήματα σε γκαράζ
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	Διεργασίες καύσης, λέβητες, εστίες θέρμανσης, σύστημα θέρμανσης με αέριο ή κηροζίνη, καπνός τσιγάρου
Φορμαλδεΐδη (HCHO)	Νοβοπάν, μονωτικά υλικά, έπιπλα
Διοξείδιο του αζώτου (NO ₂)	Αέρας του εξωτερικού περιβάλλοντος, καύση, αυτοκινούμενα οχήματα σε γκαράζ
Μικροοργανισμοί	Άνθρωποι, ζώα, φυτά, κλιματιστικά μηχανήματα
Οργανικές ουσίες	Συγκολλητικές ουσίες, διαλύτες, οικοδομικά υλικά, εξάτμιση, καύση, χρώματα, καπνός τσιγάρου
Όζον (O ₃)	Φωτοχημικές αντιδράσεις
Αιωρούμενα σωματίδια (PM)	Επαναίωση, καπνός τσιγάρου, προϊόντα καύσης, μαγειρική
Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs)	Καύση, καπνός τσιγάρου
Γύρη	Αέρας εξωτερικού περιβάλλοντος, δέντρα, γρασίδι, αγριόχορτα, φυτά
Ραδόνιο (Rn)	Έδαφος, υλικά κατασκευής οικοδομών (τσιμέντο, πέτρες)
Μύκητες	Έδαφος, φυτά, είδη διατροφής, εσωτερικές επιφάνειες
Διοξείδιο του θείου (SO ₂)	Αέρας εξωτερικού περιβάλλοντος, καύση
Μόλυβδος, Μαγγάνιο (Pb, Mn)	Καύσεις αυτοκινήτων

Σύμφωνα με διαχωρισμό του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας οι ρύποι χωρίζονται στις εξής κατηγορίες των: οργανικών, ανόργανων, κλασικών και εσωτερικών ρυπαντών. Ακολουθώς αναφέρονται οι ρύποι οι οποίοι μελετήθηκαν στη συγκεκριμένη διατριβή.

- **Αιωρούμενα σωματίδια**

Τα αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter, PM) είναι ένα σύνθετο μείγμα οργανικών και ανόργανων ουσιών από στερεά σωματίδια και υγρά σταγονίδια που βρίσκονται στον αέρα. Ορισμένα σωματίδια, όπως η σκόνη, και ο καπνός είναι αρκετά μεγάλα και σκουρόχρωμα ώστε να είναι ορατά με γυμνό μάτι. Άλλα σωματίδια πάλι είναι τόσο μικρά που μπορούν να ανιχνευθούν μόνο με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Ανάλογα με τα διάφορα χαρακτηριστικά τους όπως η μάζα, η σύνθεσή τους αλλά και το μέγεθός τους, κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες (WHO 2003). Ορισμένα σωματίδια, γνωστά ως πρωτογενή σωματίδια που εκπέμπονται απευθείας από κάποια πηγή, όπως από εργοτάξια, ασφαλτοστρωμένους

δρόμους, χωράφια, καπνοδόχους ή πυρκαγιές. Άλλα σωματίδια σχηματίζονται από πολύπλοκες αντιδράσεις χημικών ουσιών στην ατμόσφαιρα, όπως του διοξειδίου του θείου και οξειδίων του αζώτου που εκπέμπονται από τις μονάδες παραγωγής ενέργειας, βιομηχανίες και αυτοκίνητα. Τα σωματίδια αυτά, γνωστά ως «δευτερογενή σωματίδια» αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της σωματιδιακής ρύπανσης στη χώρα. Τα αιωρούμενα σωματίδια θα αναλυθούν εκτενώς στο κεφάλαιο 2.2 που ακολουθεί.

- **Πτητικές Οργανικές Ενώσεις**

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds, VOCs), είναι οργανικές ενώσεις ανθρωπογενούς προέλευσης που είναι ικανές να παράξουν φωτοχημικά οξειδωτικά μέσω αντιδράσεων με οξείδια του αζώτου, παρουσία ηλιακού φωτός. Είναι οργανικές χημικές ουσίες, (όπως το τριχλωροαιθυλένιο, το τριχλωροαιθάνιο, το τριχλωρομεθάνιο, το βενζόλιο, η ναφθαλίνη, η τολουόλη καθώς και άλλοι αλογονωμένοι διαλύτες) και σε συνήθεις θερμοκρασίες βρίσκονται σε αέρια κατάσταση. Ορισμένες από αυτές μπορεί να έχουν βραχυπρόθεσμες ή μακροπρόθεσμες δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου. Οι συγκεντρώσεις των πτητικών οργανικών ενώσεων είναι πολύ υψηλότερες σε εσωτερικούς χώρους (μέχρι και δέκα φορές υψηλότερες) σε σχέση με τους εξωτερικούς χώρους. Οι πτητικές οργανικές ενώσεις εκπέμπονται από ένα ευρύ φάσμα προϊόντων. Παραδείγματα των προϊόντων αυτών περιλαμβάνουν: χρώματα και βερνίκια, προϊόντα καθαρισμού, φυτοφάρμακα, οικοδομικά υλικά και έπιπλα, εξοπλισμό γραφείων, όπως φωτοτυπικά μηχανήματα και εκτυπωτές, υγρά διόρθωσης και αυτογραφικό χαρτί αντιγραφής, γραφική ύλη, συμπεριλαμβανομένων κόλλες αλλά και ανεξίτηλους μαρκαδόρους. Οι ενώσεις αυτές είναι δυνατόν να προκαλέσουν ερεθισμό στα μάτια, τη μύτη, το λαιμό, πονοκεφάλους, απώλεια προσανατολισμού, βλάβη στα νεφρά και στο ήπαρ, στο αναπνευστικό και νευρικό σύστημα, αλλά και χρόνιες παθήσεις όπως καρκίνο και αλλοιώσεις κυττάρων. Σύμφωνα με τον Molhave 1990 συγκεντρώσεις VOCs έως 0.2 mg/m^3 (0.05 ppm) ανήκουν στην κλίμακα άνεσης. Συγκεντρώσεις από 0.2 mg/m^3 έως 3 mg/m^3 (0.05-0.8 ppm) ανήκουν στην κλίμακα έκθεσης σε πολλούς παράγοντες, ενώ συγκεντρώσεις από 3 mg/m^3 έως 25 mg/m^3 (0.8-6.64 ppm) ανήκουν πλέον στην κλίμακα δυσφορίας. Στην κλίμακα τοξικής έκθεσης ανήκουν συγκεντρώσεις που υπερβαίνουν τα 25 mg/m^3 (>6.64ppm).

- **Μονοξείδιο του άνθρακα**

Το μονοξείδιο του άνθρακα (Carbon monoxide-CO) είναι ένα άχρωμο και άοσμο αέριο το οποίο εκλύεται από διεργασίες καύσης. Η πλειονότητα των εκπομπών CO στον ατμοσφαιρικό αέρα προέρχεται από κινητές πηγές και μπορεί να προκαλέσει επιβλαβείς επιπτώσεις στην υγεία μειώνοντας την παράδοση οξυγόνου στα όργανα του σώματος (όπως την καρδιά και τον εγκέφαλο) και τους ιστούς. Σε εξαιρετικά υψηλά επίπεδα, το CO μπορεί να προκαλέσει

ακόμα και το θάνατο. Σύμφωνα με την ASHRAE τα επιτρεπόμενα όρια συγκεντρώσεων CO για 8ωρη έκθεση είναι τα 10 mg/m³ (9 ppm).

- **Διοξείδιο του άνθρακα**

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) είναι ένα ατμοσφαιρικό αέριο που αποτελεί το βασικό συστατικό του κύκλου του άνθρακα. Παρόλο που παράγεται από φυσικές διεργασίες είναι δυνατό να εκλυθεί και από ανθρώπινες δραστηριότητες όπως την καύση ορυκτών καυσίμων (πχ άνθρακα, φυσικό αέριο και πετρέλαιο) για την ενέργεια και τις μεταφορές. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι το κυρίαρχο αέριο του φαινομένου του θερμοκηπίου και για το λόγο αυτό είναι γνωστό ότι συνεισφέρει στην κλιματική αλλαγή. Δεν θεωρείται ως τοξικό αέριο ωστόσο σε υψηλές συγκεντρώσεις είναι δυνατόν να προκαλέσει δυσφορία. Οι συγκεντρώσεις CO₂ στους εσωτερικούς χώρους συνδέονται με την πληρότητα ενός χώρου καθώς παράγεται μέσω του μεταβολισμού. Επίσης τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του CO₂ χρησιμοποιούνται πολλές φορές ως δείκτης επαρκούς αερισμού των κτιρίων. Στο εξωτερικό περιβάλλον το CO₂ είναι σχετικά σταθερό και κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα συνήθως μεταξύ 300 και 400 ppm. Σύμφωνα με την ASHRAE η οριακή τιμή των συγκεντρώσεων CO₂ για τα εσωτερικά περιβάλλοντα είναι στα 1,000 ppm για συνεχή 8ωρη έκθεση ενώ σύμφωνα με την οδηγία TOTEE 2425/86 η μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση είναι τα 9,000 mg/m³. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια συγκεντρώσεις μεγαλύτερες των 600 ppm θεωρούνται οριακά ανεκτές.

- **Βιολογικοί ρυπαντές**

Οι βιολογικές προσμείξεις περιλαμβάνουν βακτήρια, μύκητες, μούχλα, ιούς, τρίχωμα ζώων, σκόνη του σπιτιού, ακάρεα, κατσαρίδες, και γύρη. Υπάρχουν πολλές πηγές αυτών των ρύπων. Η γύρη προέρχεται από τα φυτά, οι ιοί μεταδίδονται από τους ανθρώπους και τα ζώα, ενώ βακτήρια μεταφέρονται από τους ανθρώπους, τα ζώα, το έδαφος και τα φυτικά υπολείμματα. Μολυσμένα κεντρικά συστήματα διαχείρισης αέρα μπορεί να γίνουν ένα γόνιμο έδαφος για την ανάπτυξη μούχλας, μυκήτων και άλλων πηγών βιολογικών ρυπαντών και είναι δυνατόν να διανέμουν στη συνέχεια αυτούς τους ρύπους σε όλο το σπίτι. Με τον έλεγχο των επιπέδων της σχετικής υγρασίας σε ένα σπίτι, η ανάπτυξη ορισμένων βιολογικών ρυπαντών είναι δυνατόν να ελαχιστοποιηθεί. Σχετική υγρασία της τάξης του 30-50 % συνιστάται γενικά για τα σπίτια. Στάσιμα νερά, υλικά κατεστραμμένα από την υγρασία και υγρές επιφάνειες αποτελούν επίσης ένα πρόσφορο έδαφος για μύκητες μούχλας, βακτηρίδια, και έντομα. Τέλος, τα ακάρεα σκόνης στις κατοικίες είναι η πηγή ενός από τα πιο ισχυρά βιολογικά αλλεργιογόνα, που αναπτύσσονται σε υγρό και ζεστό περιβάλλον (EPABIOLOGIC 2011).

Παράγοντες επιρροής της ποιότητας του αέρα

Η ποιότητα του εσωτερικού αέρα είναι μια διαρκώς μεταβαλλόμενη αλληλεπίδραση από ένα σύνθετο σύνολο παραγόντων. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που εμπλέκονται στην ανάπτυξη προβλημάτων στην ποιότητα του εσωτερικού αέρα είναι οι ακόλουθοι: (1) Εξακρίβωση της πηγής ρύπανσης, στους εσωτερικούς χώρους ή στο εσωτερικό των μηχανικών συστημάτων του κτιρίου, (2) το σύστημα ψύξης, θέρμανσης και αερισμού (HVAC) πολλές φορές δεν είναι σε θέση να εξασφαλίσει τόσο τη θερμική άνεση όσο και τον έλεγχο των υφιστάμενων ρύπων στο εσωτερικό των κτιρίων, (3) οι διαδρομές των ρυπαντών από την πηγή δημιουργίας τους προς τους ενοίκους του κτιρίου και (4) η παρουσία των ενοίκων. Είναι σημαντικό να κατανοηθεί ο ρόλος που παίζει καθένα από αυτά τα στοιχεία προκειμένου, να διερευνηθούν, να εμποδιστούν και να επιλυθούν προβλήματα ποιότητας εσωτερικού αέρα (EPA 1991). Επιπλέον, το κλίμα συμπεριλαμβανομένου των επιπέδων θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και βροχόπτωσης, τα κατασκευαστικά και δομικά υλικά του κτιρίου, το σύστημα θέρμανσης και αερισμού αλλά και ο γενικότερος τρόπος χρήσης του κτιρίου αποτελούν ορισμένους από τους παράγοντες οι οποίοι συντελούν δραματικά στη διαμόρφωση της ποιότητας του αέρα στο εσωτερικό κτιριακό περιβάλλον. Ακόμα, ο ρυθμός με τον οποίο ανανεώνεται ο αέρας στο εσωτερικό των κτιρίων και κυρίως οι εκπομπές από κάθε είδους καύσης για θέρμανση και μαγειρική επιδρούν στις συγκεντρώσεις των ρύπων που επιβαρύνουν την ποιότητα του αέρα. Τέλος, οι δραστηριότητες που λαμβάνουν μέρος στο εσωτερικό των κτιρίων όπως ο καθαρισμός, το κάπνισμα ή η χρήση αρωμάτων, οι διάφορες τεχνολογίες όπως τα φωτοτυπικά μηχανήματα και τα έπιπλα αποτελούν παράγοντες που επιδρούν στη γενικότερη ποιότητα του εσωτερικού αέρα.

Σύνδρομο Άρρωστου Κτιρίου

Ο όρος "Σύνδρομο Άρρωστου Κτιρίου" (Sick Building Syndrome, SBS) περιγράφει καταστάσεις στις οποίες οι χρήστες ενός κτιρίου παρουσιάζουν οξεία συμπτώματα υγείας και δυσαρέσκειας που συσχετίζονται με το χρόνο παραμονής τους στα κτίρια. Τα συμπτώματα αυτά δεν αποτελούν συμπτώματα συγκεκριμένης ασθένειας ενώ συνήθως σταματούν να εμφανίζονται όταν τα άτομα εγκαταλείπουν το κτίριο. Τα βασικότερα συμπτώματα είναι: ερεθισμός των ματιών, της μύτης και του λαιμού, βήχας, πονοκέφαλος, κόπωση, έκζεμα και υπνηλία. Άρρωστα θεωρούνται τα κτίρια των οποίων το 20% των ατόμων που ζουν σε αυτά εμφανίζουν ορισμένα από τα παραπάνω συμπτώματα ενώ αντίθετα σύμφωνα με την ASHRAE 62-1989 υγιή θεωρούνται τα κτίρια των οποίων λιγότερο από το 20% των ατόμων που βρίσκονται σε αυτά εκφράζουν δυσαρέσκεια με της συνθήκες ποιότητας αέρα.

2.2 Αιωρούμενα Σωματίδια

Τα αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter-PM) αποτελούν μίγμα από στερεά και υγρά σταγονίδια τα οποία βρίσκονται στον ατμοσφαιρικό αέρα, το μέγεθος των οποίων ποικίλει από περίπου τα 2×10^{-4} έως τα 500 μm (Fang et al., 2003). Τα αιωρούμενα σωματίδια προέρχονται από μία μεγάλη ποικιλία πηγών με διαφορετικά φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά τα οποία εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθός τους (Seinfeld and Pandis, 1998).

Το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους για τον καθορισμό των ιδιοτήτων, των χαρακτηριστικών, των επιπτώσεων στον αέρα, την κατάληξη των ατμοσφαιρικών σωματιδίων αλλά και τη δημιουργία προβλημάτων υγείας στους ανθρώπους. Επίσης οι ρυθμοί εναπόθεσης των αιωρούμενων στην ατμόσφαιρα και ως εκ τούτου ο ρυθμός παραμονής τους στην ατμόσφαιρα, είναι ισχυρή συνάρτηση του μεγέθους των σωματιδίων. Το μέγεθος ακόμα επηρεάζει τη μορφή της εναπόθεσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό του πνεύμονα, τη σκέδαση του φωτός, αλλά και την ατμοσφαιρική ορατότητα μέσω της επίδρασής της στην ισορροπία της ακτινοβολίας στο κλίμα (EPA 1996).

Το μέγεθος της "ισοδύναμης ή αεροδυναμικής διαμέτρου" αποτελεί το κριτήριο κατάταξης στις κατατομές μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων. Η διάμετρος των σωματιδίων μπορεί να προσδιοριστεί γεωμετρικά, με οπτικό ή ηλεκτρονικό μικροσκόπιο δια μέσω της σκέδασης του φωτός και της θεωρίας του Mie, αλλά και με την ταχύτητα καθίζησής τους, ή την αεροδυναμική συμπεριφορά τους. Οι δύο παράμετροι που χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι η διάμετρος Stokes και η αεροδυναμική διάμετρος. Η διάμετρος Stokes (D_p), περιγράφει το μέγεθος των σωματιδίων βασιζόμενη στην αεροδυναμική δύναμη αντίστασης που μεταδίδεται σε ένα σωματίδιο, όταν η ταχύτητα του διαφέρει από εκείνη του περιβάλλοντος ρευστού (αέρας). Για ένα λείο και σφαιρικό σε σχήμα σωματίδιο, η διάμετρος D_p ισούται ακριβώς με τη φυσική διάμετρο του σωματιδίου. Για σωματίδια ακανόνιστου σχήματος, η D_p είναι η διάμετρος της ισοδύναμης σφαίρας που θα είχε την ίδια αεροδυναμική αντίσταση. Η αεροδυναμική διάμετρος D_a , εξαρτάται από την πυκνότητα των σωματιδίων και ορίζεται ως η διάμετρος ενός σφαιρικού σωματιδίου με την ίδια ταχύτητα καθίζησης και με πυκνότητα υλικού ίση με 1 g/cm^3 . Σωματίδια με το ίδιο φυσικό μέγεθος και σχήμα, αλλά διαφορετικής πυκνότητας θα έχουν την ίδια διάμετρο Stokes, αλλά διαφορετική αεροδυναμική διάμετρο. Για σωματίδια μεγαλύτερα από περίπου 0,5 μm , η αεροδυναμική διάμετρος είναι πολύ σημαντική παράμετρος για τη μεταφορά και την εναπόθεση των σωματιδίων στην αναπνευστική οδό του ανθρώπου. Τα αναπνεύσιμα, τα θωρακικά και τα εισπνεόμενα

σωματίδια κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη σωματιδιακή αεροδυναμική διάμετρο (EPA 1996) p 125. Η αεροδυναμική διάμετρος και η διάμετρος Stokes συνδέονται με τον ακόλουθο τύπο:

$$D_a = \left(\frac{\rho C}{C_a}\right)^{1/2} D_p$$

Όπου ρ η πυκνότητα του σωματιδίου και C και C_a οι παράγοντες ολίσθησης του Cunningham που αξιολογήθηκαν για τα σωματίδια με διάμετρο D_p και D_a αντίστοιχα.

Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα μεγεθών των αιωρούμενων σωματιδίων ξεκινώντας από τα 0.01 μm και φτάνοντας ως τα 100 μm αεροδυναμικής διαμέτρου (CIBSETM21 1999). Στην ταξινόμηση αυτή, το σύνολο των αιωρούμενων σωματιδίων είναι γνωστά και ως Total Suspended Particulates (TSP). Τα ολικά αιωρούμενα σωματίδια διαχωρίζονται στα χονδρόκοκκα και τα λεπτόκοκκα σωματίδια όπου καθένας από τους δύο αυτούς τύπους σωματιδίων διακρίνεται σε επιμέρους κλάσματα.

1) Λεπτόκοκκα αιωρούμενα σωματίδια (Fine mode particles)

Στα λεπτόκοκκα σωματίδια ανήκουν σωματίδια αεροδυναμικής διαμέτρου μικρότερης των 2.5 μm τα οποία παράγονται κυρίως από δευτερογενείς αέριες ενώσεις και διαδικασίες καύσης. Σε μεγάλο βαθμό αποτελούνται από σωματίδια που εκλύονται από μηχανές εσωτερικής καύσης (Diesel Exhaust Particles, DEP), τον καπνό, αλλά και από προϊόντα δευτερογενών αντιδράσεων όπως οξείδιο του θείου και του αζώτου αλλά και υδρογονάνθρακες (Cheng 1998, Kleeman 1998). Ο χρόνος ημίσειας ζωής των σωματιδίων αυτών είναι από ορισμένες ημέρες έως εβδομάδες και εξ' αιτίας του μεγέθους τους μπορούν να εναποτεθούν βαθύτερα στους πνεύμονες και έτσι προκαλούν επιβλαβείς επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία συμπεριλαμβανομένης της προδιάθεσης σε αναπνευστικές ασθένειες (Pope and Dockery 2006). Τα λεπτόκοκκα σωματίδια διακρίνονται στις επιμέρους κατηγορίες:

1α) Κατηγορία πυρήνα (Nuclei mode)

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν λεπτόκοκκα σωματίδια με διάμετρο κάτω από περίπου 0.1 μm . Η δομή πυρήνων μπορεί να παρατηρηθεί ως ξεχωριστή κατηγορία μόνο σε μη ρυπασμένες περιοχές ή σε περιοχές με γειτνιαζουσες πηγές σχηματισμού νέων σωματιδίων πυρήνα. Τα σωματίδια που βρίσκονται στη δομή αυτή είναι δυνατόν να αναπτυχθούν ραγδαία οδεύοντας έτσι στη δομή συσσώρευσης (EPA 1996) Vol I p127. Τα περισσότερα από τα σωματίδια που ανήκουν στην κατηγορία αυτή αποτελούνται από θεικές, νιτρικές και οργανικές ενώσεις και κύρια αποτελούνται από πτητικές ενώσεις προερχόμενες από άκαυστα καύσιμα και λιπαντικά έλαια. Οι συγκρούσεις μεταξύ των σωματιδίων αυτών στη συγκεκριμένη δομή είναι αυτές

που θα καθορίσουν το χρόνο ζωής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Στη κατηγορία των πυρήνων, υπό συγκεκριμένες συνθήκες είναι δυνατόν να παρατηρηθούν ακόμα δύο δομές:

- Αυτή των πυρήνων Aitken (Aitken Nuclei) στην οποία ανήκει το τμήμα των πυρήνων που παρουσιάζει ένα τοπικό μέγιστο στην κατανομή αριθμού άνω των 15 nm και η δομή
- των υπομετρικών (Ultra-fine Nuclei) πυρήνων στους οποίους ανήκει το τμήμα των πυρήνων που παρουσιάζει ένα τοπικό μέγιστο στην κατανομή αριθμού κάτω των 15 nm (Wilson and Suh 1997).

1β) Κατηγορία συσσώρευσης (Accumulation mode)

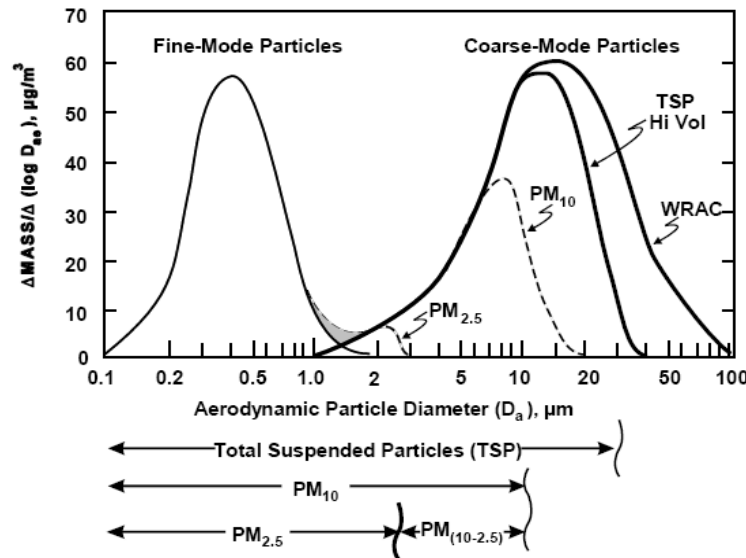
Πρόκειται για το τμήμα της δομής των λεπτόκοκκων σωματιδίων με διάμετρο πάνω από περίπου 0,1 μm έως 2 μm . Τα δευτερεύοντα σωματίδια, που σχηματίζονται από τις χημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα, συχνά συγκεντρώνονται σε αυτή την κατηγορία μεγέθους. Στη δομή συσσώρευσης τα σωματίδια συνήθως δεν αναπτύσσονται στην δομή των χονδρόκοκκων και ο χρόνος ζωής τους στην ατμόσφαιρα είναι από 7 έως 30 ημέρες. Τέλος τα σωματίδια που ανήκουν στη δομή συσσώρευσης διακρίνονται σε δύο δομές:

- Αυτή των σταγονιδίων (Droplet mode) στην οποία συμβαίνουν αντιδράσεις στην επιφάνεια των αιωρούμενων σωματιδίων με συνθήκες υψηλής σχετικής υγρασίας και η δομή
- του συμπυκνώματος (Condensation mode) στην οποία κατατάσσονται ακόμα μικρότερα σωματίδια που σχηματίζονται από συσσωμάτωση (συμπύκνωση) σωματιδίων πυρήνα.

2) Χονδρόκοκκα αιωρούμενα σωματίδια (Coarse mode particles)

Στην κατηγορία των χονδρόκοκκων σωματιδίων ανήκουν σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη των 2.5 μm . Είναι συνήθως πρωτογενή σωματίδια δηλαδή εκπέμπονται κατευθείαν από τις πηγές σαν σωματίδια. Η πλειοψηφία των χονδρόκοκκων σωματιδίων είναι αποτέλεσμα μηχανικών διασπάσεων μεγάλων σωματιδίων από σύνθλιψη ή εξάτμιση σπρέι ή ακόμα από επαναιώρηση της σκόνης. Επίσης στις πηγές περιλαμβάνονται βιομηχανικές εκπομπές, εκπομπές συσχετιζόμενες με την κυκλοφορία, γεωργικές δραστηριότητες και άλλες (Sioutas et al. 2005). Εξ' αιτίας του μεγέθους τους έχουν μεγαλύτερες ταχύτητες βαρυτικής καθίζησης και γι' αυτό απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα σε διάστημα ωρών. Ο χρόνος ημίσειας ζωής τους είναι ορισμένα λεπτά με ώρες (Wilson and Suh 1997).

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται οι κατανομές των λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων σωματιδίων (Εικόνα 2-1) (Wilson and Suh 1997) όπου είναι εμφανές ότι οι δύο κατανομές υπερκαλύπτουν η μια την άλλη μεταξύ αεροδυναμικών διαμέτρων 1 και 3 μm .



Εικόνα 2-1: Εξιδανικευμένη κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων στη οποία φαίνονται τα λεπτόκκοκα και χονδρόκκοκα σωματίδια και τα κλάσματα αυτών, όπως συλλέγονται από επιλεκτικό συλλογέα δειγμάτων με βάση το μέγεθος τους (Wilson and Suh 1997)

Εκτός του διαχωρισμού των σωματιδίων αυτών με βάση το μέγεθός τους, διαχωρίζονται και ως προς την προέλευσή τους, τη σύνθεσή τους αλλά και ως προς το χρόνο ημίσειας ζωής τους (“Half Life”) (Kleeman 1998). Τα μεγαλύτερα σωματίδια (>10 μm) μπορούν να αιωρούνται σχεδόν ακίνητα στην ατμόσφαιρα για 10 έως 20 ώρες, σωματίδια με μικρότερη αεροδυναμική διάμετρο (< 1 μm) μπορούν να μεταφέρονται με τον άνεμο σε μεγάλες αποστάσεις ενώ ένα μικρότερο ποσοστό αιωρούμενων σωματιδίων είναι δυνατόν να αιωρείται για μεγάλο χρονικό διάστημα (έως και ένα έτος) φτάνοντας στο ανώτερο τμήμα της ατμόσφαιρας (EPA 1996).

Τα πιο γνωστά και ευρέως εξεταζόμενα μεγέθη αιωρούμενων σωματιδίων είναι τα PM₁₀, τα PM_{2.5} και τα PM₁. Στα αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀ (Coarse particles) ανήκουν σωματίδια με διάμετρο έως 10 μm , αντίστοιχα στα PM_{2.5} (Fine particles) ανήκουν σωματίδια με διάμετρο μικρότερης ή ίσης των 2.5 μm και στα PM₁ ανήκουν ακόμα μικρότερα σωματίδια που η διάμετρός τους είναι μικρότερη του 1 μm . Τα τελευταία χρόνια το επιστημονικό ενδιαφέρον έχει εστιάσει στη μελέτη των υπομετρικών σωματιδίων (Ultrafine particles-UFP) των οποίων η διάμετρος είναι μικρότερη των 0.1 μm .

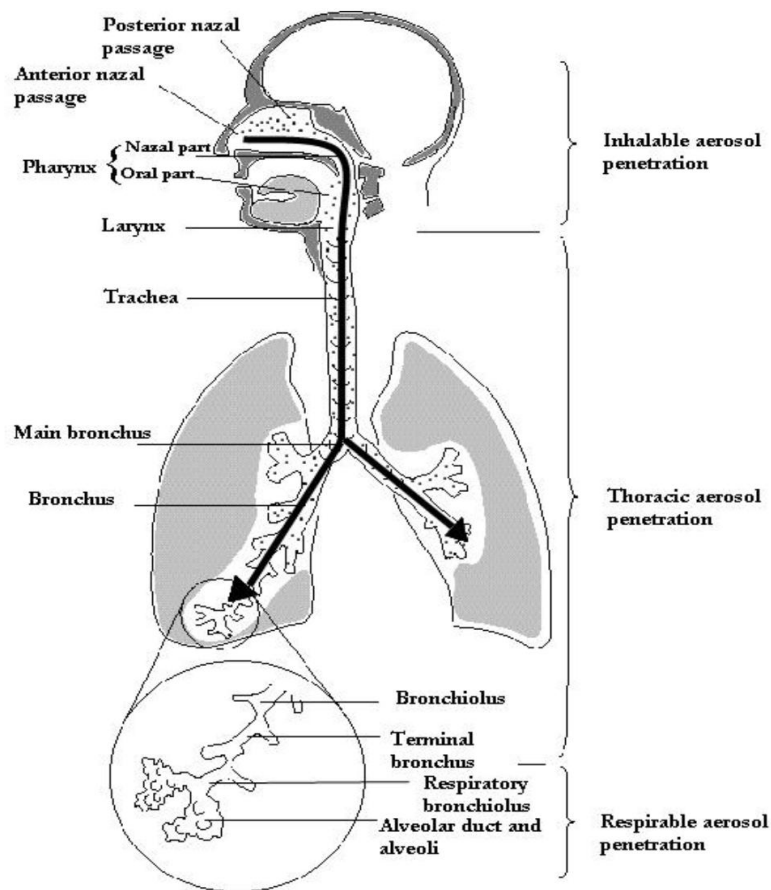
Διεισδυτικότητα στον ανθρώπινο οργανισμό

Τα αιωρούμενα σωματίδια ανάλογα με το μέγεθός τους διεισδύουν σε διαφορετικά τμήματα του αναπνευστικού συστήματος του ανθρώπινου οργανισμού. Σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο έως 11 μm , εισέρχονται και παραμένουν στο ανώτερο σύστημα της αναπνευστικής οδού (ρινική κοιλότητα), αυτά είναι γνωστά ως εσπνεύσιμα σωματίδια (inhalable particulate

matter, PM₁₀). Σωματίδια με διάμετρο μικρότερης των 7 μm διαπερνούν τη ρινική κοιλότητα και διεισδύουν στην τραχεία και τους πρωτογενείς βρόγχους. Αυτά είναι γνωστά και ως θωρακικά σωματίδια (thoracic particulate matter, PM_{2.5}). Σε δευτερογενείς βρόγχους διεισδύουν αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο 2.5 μm, γνωστά και ως αναπνεύσιμα σωματίδια (respirable particulate matter). Τέλος, υπάρχει η κατηγορία των υπομετρικών σωματιδίων (UFP, Ultrafine Particles) με έχουν διάμετρο μικρότερης του 0.1 μm, τα οποία εισέρχονται στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα, διαπερνούν και τα ακραία τμήματα των βρόγχων και φτάνουν ως τους θύλακες αέρα στα άκρα κάθε βρόγχου όπου εξ' αιτίας της τοξικής φύσης που αποκτούν κατά την εισχώρησή τους σε αυτό, προκαλούν εξαιρετικά δυσμενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία (Sioutas et al. 2005) (Εικόνα 2-2). Οι Sioutas et al. 2005 θεωρούν ότι η μελέτη των υπομετρικών σωματιδίων είναι ύψιστης σημασίας καθώς συγκρινόμενη με τα μεγαλύτερα σωματίδια, τα μικρότερα έχουν αναλογικά μεγαλύτερη επιφάνεια, ανά μάζα, έχουν ακόμα μεγαλύτερη ταχύτητα και μπορεί να διεισδύσουν βαθύτερα στους πνεύμονες και σε άλλους ιστούς συμπεριλαμβανομένων των τριχοειδών αγγείων και των ιστών του εγκεφάλου (Toxicology 2011). Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται ο βαθμός διείσδυσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα, σύμφωνα με το μέγεθός τους (Πίνακας 2-3).

Πίνακας 2-3:Βαθμός διείσδυσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα με βάση το μέγεθός τους

Μέγεθος (διάμετρος) των αιωρούμενων σωματιδίων (μm)	Βαθμός διείσδυσης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα
Μεγαλύτερα των 11	Δεν διεισδύουν
7-11	Διεισδύουν στις ρινικές διόδους
4.7-11	Διεισδύουν στο φάρυγγα
3.3-4.7	Διεισδύουν την τραχεία & τους πρωτογενείς βρόγχους
2.1-3.3	Διεισδύουν στους δευτερογενείς βρόγχους
1.1-2.1	Διεισδύουν στα ακραία τμήματα των βρόγχων
0.65-1.1	Διεισδύουν στους λεπτούς βρόγχους
0.45-0.65	Διεισδύουν στους μικροσκοπικούς θύλακες αέρα στο άκρο κάθε μικρού βρόγχου



Εικόνα 2-2: Βαθμός διείσδυσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (EPAPMsampling 2011)

Πηγές δημιουργίας

Τα αιωρούμενα σωματίδια ανάλογα με την κατηγορία μεγέθους τους διαφοροποιούνται ως προς τη χημική τους σύνθεση, το χρόνο ζωής και παραμονής τους στην ατμόσφαιρα αλλά κυρίως την προέλευση και πηγή δημιουργίας τους. Οι πηγές προέλευσης και οι μηχανισμοί δημιουργίας των αιωρούμενων σωματιδίων ποικίλουν ανάλογα με τις μορφολογικές, φυσικές και θερμοδυναμικές ιδιότητες των σωματιδίων. Η προέλευση των αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί να είναι τόσο φυσική όσο και ανθρωπογενής (EPA 1996, Kumar et al. 2010).

- **Φυσικές πηγές**

Οι βασικότερες φυσικές πηγές υπομετρικών σωματιδίων σύμφωνα με τους O'Dowd et al. (1997) είναι τα δάση, οι ωκεανοί και οι μετασχηματισμοί της ατμόσφαιρας. Άλλες φυσικές πηγές περιλαμβάνουν τις εκρήξεις ηφαιστειών από τις οποίες απελευθερώνονται φθορίδια, διοξείδιο του θείου, μεθάνιο και άλλα, τις φωτιές των δασών από τις οποίες παράγεται καπνός άκαυστοι υδρογονάνθρακες οξείδια του άνθρακα και οξείδια του αζώτου, και τους δυνατούς ανέμους που μεταφέρουν και διασκορπίζουν τη σκόνη από τις διάφορες πηγές.

Φυσικές πηγές αιωρούμενων σωματιδίων είναι ακόμα τα φυτά τα οποία απελευθερώνουν υδρογονάνθρακες, πτητικές οργανικές ενώσεις και γύρη (Gedekakis 2003).

- **Ανθρωπογενείς πηγές**

Οι ανθρωπογενείς πηγές διακρίνονται σε κινούμενες και σταθερές πηγές. Οι σταθερές πηγές περιλαμβάνουν την καύση ορυκτών καυσίμων για ηλεκτρικές και βιομηχανικές διεργασίες τις κατασκευές, τις κατεδαφίσεις, μέταλλα και ορυκτά πετροχημικών προϊόντων αλλά και προϊόντα επεξεργασίας ξύλου. Περεταίρω διεργασίες αποτελούν οι μύλοι που χρησιμοποιούνται στη γεωργία, η διάβρωση από εδάφη που έχουν οργωθεί, η διάθεση απορριμμάτων και η ανακύκλωση, η ιπτάμενη σκόνη αλλά και οι μη ασφαλοστρωμένοι δρόμοι. Στις κινούμενες πηγές συμπεριλαμβάνονται άμεσες εκπομπές πρωτογενών αιωρούμενων σωματιδίων και δευτερογενών πρόδρομων ουσιών από οχήματα κινούμενα σε αυτοκινητοδρόμους. Οι (Voutsas 2002) μελέτησαν τη στοιχειώδη σύνθεση των αιωρούμενων σωματιδίων στο εξωτερικό περιβάλλον και βρήκαν ότι οι κύριες πηγές ρύπων είναι οι εκπομπές των οχημάτων, οι βιομηχανικές διαδικασίες αλλά και η σκόνη από τους περιβάλλοντες δρόμους. Συνοπτικά οι κύριες πηγές των PM_{10} κατά τους (Wallace et al. 2008) είναι όλα τα μέσα κυκλοφορίας με καύσιμα, οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις και η θέρμανση κατά τη χειμερινή περίοδο. Όσο πιο λεπτά είναι τα σωματίδια, τόσο και αυξάνει η ευθύνη των μηχανών εσωτερικής καύσεως όσον αφορά την πηγή προέλευσής τους.

Χημική σύσταση

Η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων παίζει καθοριστικό ρόλο στην ανεύρεση των πηγών δημιουργίας τους και συνεπώς στον περιορισμό τους. Τα κυριότερα συστατικά των αιωρούμενων σωματιδίων αποτελούν τα θειικά, νιτρικά και αμμωνιακά ιόντα, το θαλασσίνο αλάτι ($NaCl$), τα οργανικά συστατικά (OC , EC , $PAHs$, $nPAHs$), τα βαρέα μέταλλα (Pb , Zn , Ni , Cu , V , Cr , Cd κ.α.), τα συστατικά του εδάφους (Al , Si , Ti , Ca , Fe) και το νερό (Hueglin et al., 2005, Tsai et al., 2006). Τα λεπτόκοκκα σωματίδια αποτελούνται από θειικά και νιτρικά άλατα και οξέα, στοιχειώδη και οργανικό άνθρακα, ιχνοστοιχεία, όπως τα μέταλλα και ποικίλες ποσότητες νερού (EPA 1996). Υλικά του φλοιού όπως το ασβέστιο, ο άργιλος, το πυρίτιο, το μαγνήσιο και ο σίδηρος ανιχνεύθηκαν στα χονδρόκοκκα σωματίδια. Μερικά συστατικά όπως το κάλιο και τα νιτρικά είναι δυνατόν να ανιχνευτούν τόσο στα λεπτόκοκκα όσο και στα χονδρόκοκκα σωματίδια. Το κάλιο στα χονδρόκοκκα σωματίδια προέρχεται από το έδαφος ενώ στα λεπτόκοκκα από την καύση ξύλου. Τα νιτρικά στα λεπτόκοκκα σωματίδια προέρχονται κυρίως από την αντίδραση της αέριας φάσης του νιτρικού οξέως με την αμμωνία στην αέρα φάση για το σχηματισμό του νιτρικού αμμωνίου. Τα νιτρικά στα χονδρόκοκκα σωματίδια προέρχονται κυρίως από την αντίδραση του νιτρικού οξέως της αέριας φάσης με τα προϋπάρχοντα χονδρόκοκκα σωματίδια.

Επιτρεπτά όρια συγκεντρώσεων

Ο οργανισμός παγκόσμιας υγείας (WHO) αναγνωρίζοντας την ανάγκη των ατόμων για καθαρό αέρα στο εσωτερικό περιβάλλον, το 1987 δημοσίευσε κατευθυντήριους οδηγούς (Air Quality Guidelines for Europe) για την ποιότητα του αέρα στην Ευρώπη (WHO 2000). Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι οριακές τιμές συγκεντρώσεων των ρύπων όπου με βάση τον ορισμό της οδηγίας 2008/50/EK οι τιμές αυτές εκφράζουν «τα επίπεδα των ρύπων βάση επιστημονικών γνώσεων με σκοπό να αποφεύγονται και να προλαμβάνονται επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία ή/και το σύνολο του περιβάλλοντος το οποίο πρέπει να επιτευχθεί εντός δεδομένης προθεσμίας χωρίς υπερβάσεις στη συνέχεια» (Πίνακας 2-4).

Πίνακας 2-4: Οριακές τιμές για τα PM₁₀ και PM_{2.5} (Ec-europa 2010), (Ess 2010)

Ρυπαντής	Συγκέντρωση	Περίοδος αναφοράς	Νομική φύση	Επιτρεπόμενες υπερβάσεις ανά έτος
PM ₁₀	50 µg/m ³	24 ώρες	Οριακές τιμές σε ισχύ από 1/05/2005	35
	40 µg/ m ³	1 έτος	Οριακές τιμές σε ισχύ από 1/05/2005	-
	50 µg/ m ³	24 ώρες	Οριακές τιμές σε ισχύ από 1/01/2010	7
	20 µg/ m ³	1 έτος	Οριακές τιμές σε ισχύ από 1/05/2010	-
PM _{2.5}	25 µg/ m ³	1 έτος	Τιμή στόχος τίθεται σε ισχύ 1.1.2010 Οριακές τιμές σε ισχύ από 1.1.2015	-

Για την Ευρώπη τα επίπεδα έκθεσης στα εισπνεόμενα σωματίδια είναι περιορισμένα. Τα δεδομένα ως επί το πλείστον προέρχονται από μελέτες που δεν έχουν ως άμεσο στόχο την παροχή μακροπρόθεσμων κατανομών στις έκθεσης για μεγάλα τμήματα του πληθυσμού. Εντούτοις στη Βόρεια Ευρώπη τα επίπεδα των PM₁₀ διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα με τις μέσες χειμερινές τιμές ακόμα και σε αστικά περιβάλλοντα να μην υπερβαίνουν τα 20-30 µg/m³. Στη Δυτική Ευρώπη τα επίπεδα φαίνεται να είναι σε υψηλότερες συγκεντρώσεις 40-50 µg/m³ με μικρές μόνο διαφορές μεταξύ αστικών και μη περιοχών. Από τα μέχρι στιγμής υπάρχοντα στοιχεία, τα επίπεδα των συγκεντρώσεων σε ορισμένες πόλεις της κεντρικής και Βόρειας Ευρώπης δείχνουν να είναι υψηλότερα. Αυτές οι πόλεις είναι το Βερολίνο και το Άμστερνταμ. Σαν αποτέλεσμα της ημερήσιας διακύμανσης στις συγκεντρώσεις των PM₁₀ οι 24ωροι μέσοι όροι των 100 µg/m³ συνήθως υπερβαίνονται σε πολλές περιοχές της Ευρώπης και κυρίως κατά τη διάρκεια των χειμερινών θερμοκρασιακών αναστροφών (WHO 2000).

Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων

Η ακατάλληλη ποιότητα του αέρα στο εσωτερικό περιβάλλον, εγκυμονεί πολλούς κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία. Όπως προαναφέρθηκε, το μέγεθος των σωματιδίων είναι αυτό που συνδέεται άμεσα με την πιθανότητα να προκληθούν προβλήματα στην υγεία των ανθρώπων. Σωματίδια μικρότερα των 10 μm σε διάμετρο είναι αυτά που έχουν τις δυσμενέστερες επιπτώσεις καθώς αυτά διεισδύουν βαθύτερα στους πνεύμονες και το αίμα των ανθρώπων αλλά είναι δυνατόν να βλάψουν και την καρδιά (EPA 1996). Οι σημαντικότερες επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία από την παρατεταμένη έκθεση των ατόμων σε αυξημένες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων είναι καρδιοαγγειακές ασθένειες, άσθμα και χρόνιες πνευμονικές παθήσεις, αναπνευστικά συμπτώματα, δυσκολία στην αναπνοή, βήχας, μειωμένη πνευμονική λειτουργία, χρόνια βρογχίτιδα, ακανόνιστοι καρδιακοί παλμοί και καρδιακές προσβολές (μη θανατηφόρες) ακόμα και ο πρόωρος θάνατος σε άτομα με χρόνια καρδιακά και πνευμονικά προβλήματα (EPA 1996).

Τα υπομετρικά σωματίδια της ατμόσφαιρας είναι δυνατόν να επιδράσουν στο κλίμα με άμεσο τρόπο δια μέσω της απορρόφησης της ακτινοβολίας και με έμμεσο τρόπο με τη μεταβολή των οπτικών ιδιοτήτων των νεφών (διατάραξη της ακτινοβολίας πεδίου). Η διαταραχή του πεδίου ακτινοβολίας γενικά είναι η μεταβολή της μέσης καθαρής ακτινοβολίας στην κορυφή της τροπόσφαιρας εξ' αιτίας της αλλαγής της ηλιακής (βραχέα) ή της επίγειας (μεγάλου μήκους κύματος) ακτινοβολίας (Houghton et al. 1990). Αυτή η επίπτωση στην κορυφή της τροπόσφαιρας (τροπόπαυση) είναι που παραβιάζει το κλίμα, και όχι η αλλαγή στην επιφάνεια, καθώς η επιφάνεια και η τροπόσφαιρα είναι άρρηκτα συνδεδεμένες μέσω των ατμοσφαιρικών διεργασιών ανταλλαγής ενέργειας, όπως η ξηρή και η υγρή συναγωγή (Ramanathan 1988).

Τα αιωρούμενα σωματίδια επιδρούν και στη βλάστηση καθώς εναποτίθενται στα φυτά και στα οικοσυστήματα δια μέσω της καθίζησής τους στο έδαφος. Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι μπορούν επίσης να αλλάξουν τον τρόπο που βλέπει ο άνθρωπος τον κόσμο καθώς έχουν την ικανότητα να σκεδάζουν το φως προκαλώντας επιπτώσεις και στην ορατότητα (Argiraki 2007). Η μείωση της ορατότητας είναι δυνατόν να προκληθεί εξαιτίας της επίδρασης των αιωρούμενων σωματιδίων στις οπτικές ιδιότητες της ατμόσφαιρας από τη σκέδαση και την απορρόφηση του φωτός που προκαλούν τα σωματίδια. Η σκέδαση του φωτός από σωματίδια, διαμέτρου μικρότερης των 0.05 μm , περιγράφεται από τη θεωρία του Rayleigh, ενώ η σκέδαση από σωματίδια μεγαλύτερα των 100 μm , περιγράφεται από τη θεωρία του Mie (Hinds 1999).

2.3 Ο αριθμητικός κώδικας MIAQ (Multi-Chamber Indoor Air Quality Model)

Στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ένα μεγάλο πλήθος μοντέλων για την προσομοίωση των αέριων ρύπων. Τα βασικότερα από αυτά είναι τα εξής: ντετερμινιστικά, γκαουσιανά, φυσικομαθηματικά, αριθμητικά, τα μοντέλα παλινδρόμησης, τα νευρωνικά και τα υβριδικά μοντέλα που αποτελούν συνδυασμό των ντετερμινιστικών και των στοχαστικών μοντέλων. Στην παρούσα εργασία θα γίνει αναφορά στα αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιούν την εξίσωση ισοζυγίου μάζας η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μάζας που εισέρχεται και εξέρχεται από ένα σύστημα (Dockery and Spengler, 1981, Nazaroff and Cass 1986, Switzer and Ott 1992). Η θεμελιώδης παραδοχή στην οποία στηρίζεται η εξίσωση ισοζυγίου μάζας είναι η αρχή διατήρησης μάζας όπου η γενική μορφή της εξίσωσής είναι η ακόλουθη:

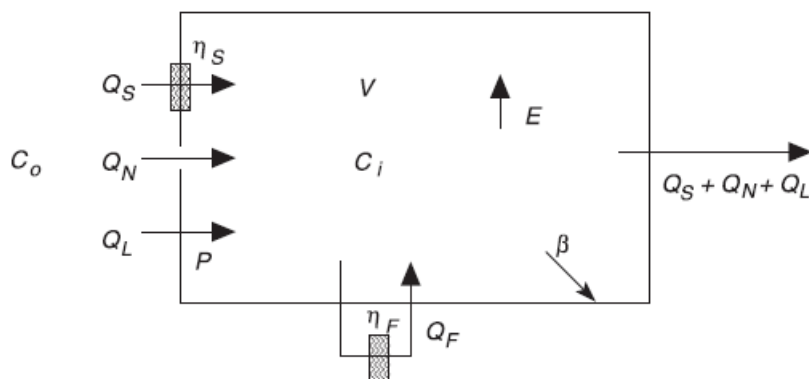
$$dC_i/dt = m\lambda C_o - a m \lambda C_o - m \lambda C_i - k_r C_i + S/V \quad (2-1)$$

όπου V είναι ο όγκος του τοπικού περιβάλλοντος, C_i η συγκέντρωση στον εσωτερικό χώρο ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), C_o η συγκέντρωση στο εξωτερικό περιβάλλον ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), a το κλάσμα του εναποτιθέμενου ρύπου κατά την είσοδό του από τον εξωτερικό χώρο στον εσωτερικό (αδιάστατο μέγεθος), m ο παράγοντας ανάμιξης (χωρίς μονάδες), λ ο ρυθμός αερισμού (h^{-1}), k_r ο ρυθμός εναπόθεσης (h^{-1}), και S είναι οι πηγές ή καταβόθρες ($\mu\text{g}/\text{h}$).

Το ακόλουθο σχήμα παρουσιάζει σχηματικά την προσέγγιση διατήρησης μάζας και απεικονίζει ορισμένες από τις διαδικασίες που είναι δυνατόν να επηρεάσουν τα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων στα εσωτερικά περιβάλλοντα (Nazaroff 2004) (Εικόνα 2-3). Συγκεκριμένα απεικονίστηκε η συγκέντρωση του εξωτερικού αέρα C_o ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) που εισέρχεται στο κτίριο δια μέσω τριών οδών ροής:

- της μηχανικής παροχής αέρα Q_s με ρυθμό ροής (m^3/h), όπου η ροή γίνεται μέσω ενός φίλτρου με απόδοση απομάκρυνσης η_s
- του φυσικού αερισμού, με ταχύτητα ροής Q_N (m^3/h),
- και της διήθησης, με ταχύτητα ροής Q_L (m^3/h)

Μια ακόμα οδός ροής εισόδου σωματιδίων είναι από φίλτρα ελέγχου των σωματιδίων με ρυθμό ροής Q_F (m^3/h), και με απόδοση απομάκρυνσης η_F .



Εικόνα 2-3: Σχηματική αναπαράσταση των δυναμικών διεργασιών των σωματιδίων στους εσωτερικούς χώρους

Ο αριθμητικός κώδικας MIAQ (Multi-Chamber Indoor Air Quality Model) χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό περιβάλλον και βασίζεται στην αρχή διατήρησης μάζας (Mass balance based). Το MIAQ είναι ένα πακέτο μοντελοποίησης του εσωτερικού αέρα πολλαπλών θαλάμων (multichamber modeling package) στο οποίο είναι δυνατόν να προσομοιωθούν ο αερισμός, οι συγκεντρώσεις, οι εκπομπές, η εναπόθεση και η χημική δραστηριότητα των σωματιδιακών ρύπων και αναπτύχθηκε το 1986 από τον William Nazaroff (Nazaroff and Cass, 1986)

Οι εσωτερικές συγκεντρώσεις σωματιδίων είναι συνάρτηση τόσο της διείσδυσης των σωματιδίων από το εξωτερικό περιβάλλον όσο και της παραγωγής των αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό περιβάλλον. Οι συγκεντρώσεις τροποποιούνται από τις εναλλαγές αέρα και τους ρυθμούς καθίζησης των σωματιδίων πάνω στις επιφάνειες. Τα μοντέλα ισοζυγίου μάζας αναφέρουν ότι η μεταβολή της μάζας μιας ουσίας σε ένα δεδομένο όγκο ισούται με το ποσό της μάζας που εισέρχεται στον όγκο μείον το ποσό που εξέρχεται από τον όγκο αυτό (χρησιμοποιείται σύστημα γραμμικών διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης). Για παράδειγμα, θεωρούμε έναν όγκο V γεμάτο με αέριο μάζας m . Η μεταβολή της μάζας Δm σε ένα μικρό χρονικό διάστημα Δt θα είναι η διαφορά της μεταξύ της εισερχόμενης (m_{in}) και της εξερχόμενης (m_{out}) στον όγκο μάζας:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{(m_{in} - m_{out})}{\Delta t} \quad (1)$$

Αν θεωρήσουμε ότι ο χρόνος Δt πλησιάζει το μηδέν προκύπτει η διαφορική εξίσωση του ρυθμού μεταβολής της μάζας:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(m_{in} - m_{out})}{dt} \quad (2)$$

Στην περίπτωση που απαιτείται η μάζα να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλο τον όγκο ανά πάσα στιγμή τότε προκύπτει μια κατάσταση αποκαλούμενη ως «καλώς αναμεμειγμένη» (well mixed). Η υπόθεση που γίνεται είναι ότι η μάζα που κερδίζεται η χάνεται στον όγκο ακαριαία κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο τον όγκο. Έτσι είναι δυνατόν να αντικαταστήσουμε τον όρο της μάζας (m) με τη συγκέντρωση $C=m/V$, έτσι ώστε:

$$dm/dt = VdC/dt \quad (3).$$

Οι παραπάνω εξισώσεις αποτελούν τη βάση για διάφορα μοντέλα διατήρησης μάζας. Η εξίσωση (2) λαμβάνει υπ' όψιν της πολλές μορφές ανάλογα με το είδος των διαδικασιών που συνεπάγεται η μεταφορά μάζας προς ή από τον όγκο που εξετάζεται. Μια μεγάλη κατηγορία μοντέλων υποθέτουν ότι ο όγκος V είναι ένας τέλεια αναμεμειγμένος θάλαμος. Τα πιο σύνθετα μοντέλα υποθέτουν πολλαπλούς θαλάμους με σκοπό να καταστεί δυνατή η πλήρης ανάμειξη του συνολικού όγκου V (Mage 1996). Το μοντέλο MIAQ των Nazaroff and Cass 1989 sited in (EPA 1996) Vol I p966 είναι ένα λεπτομερές μοντέλο ισοζυγίου μάζας, που περιλαμβάνει τις αλλαγές στο μέγεθος των σωματιδίων, τη χημική σύνθεση και τις αναταράξεις τους.

Ο αερισμός αποτελεί απαραίτητο στοιχείο εισόδου στο μοντέλο MIAQ. Επιπλέον οι χημικές αντιδράσεις των αέριων ρύπων και η δυναμική των αιωρούμενων σωματιδίων είναι δυνατόν να ενσωματωθούν στο μοντέλο. Συγκεκριμένα, τόσο η τάξη μεγέθους όσο και η χημική σύνθεση των αιωρούμενων σωματιδίων αλλά και οι διαδικασίες συσσωμάτωσης των σωματιδίων και ταχύτητες εναπόθεσής τους στις διάφορες επιφάνειες λαμβάνονται υπόψη. Τρεις μέθοδοι παρέχονται από το μοντέλο για τον υπολογισμό των ταχυτήτων εναπόθεσης: 1. μέσω της αγωγής εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας εναπόθεσης και του αέρα, 2. μέσω των σχέσεων τύρβης στον πυρήνα του δωματίου και 3. εξαναγκασμένη ροή παράλληλη προς τις επιφάνειες όπου οι εξισώσεις του οριακού στρώματος επιλύονται.

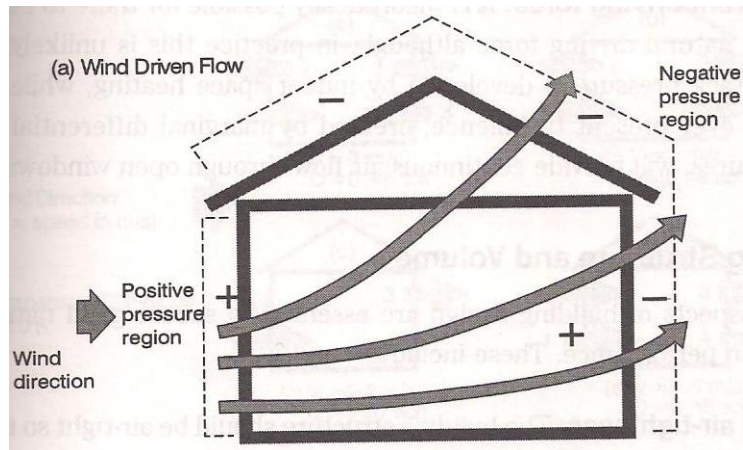
2.4 Αερισμός

Μία από τις βασικότερες παραμέτρους που καθορίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τα επίπεδα των αέριων ρύπων στο εσωτερικό περιβάλλον διαδραματίζοντας καθοριστικό ρόλο στην υγεία και τη θερμική άνεση των ατόμων στα κτίρια είναι ο βαθμός αερισμού. Ο σωστός αερισμός διασφαλίζει την παροχή οξυγόνου για μεταβολισμό καθώς και την απομάκρυνση συγκεντρώσεων ρύπων και ανεπιθύμητων οσμών από το εσωτερικό περιβάλλον. Σύμφωνα με

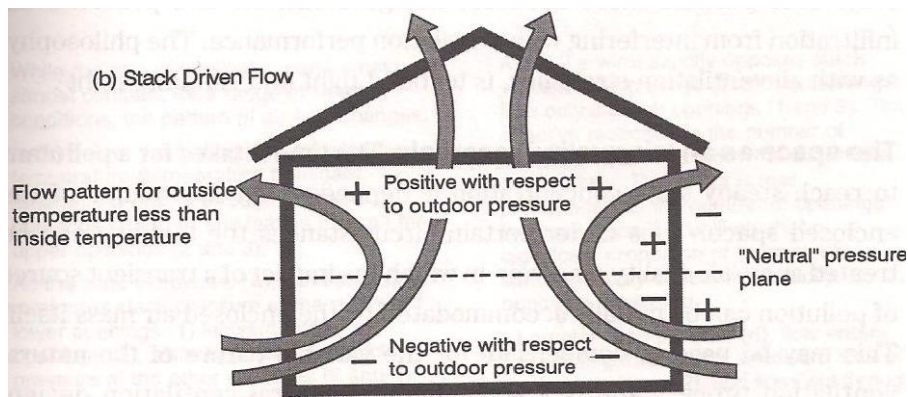
κείμενο του Ευρωπαϊκού Συμφώνου, αερισμός ορίζεται ως «η παροχή ή η απομάκρυνση αέρα προς και από ένα χώρο, με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού του αέρα» αλλά και σύμφωνα με το πρότυπο 62-1989 της ASHRAE ο αερισμός ορίζεται σαν «η διαδικασία παροχής και απομάκρυνσης κλιματιζόμενου αέρα με φυσικά ή μηχανικά μέσα προς και από ένα χώρο, με σκοπό τη διασφάλιση των επιθυμητών επιπέδων υγρασίας, θερμοκρασίας καθώς και των ρύπων στα εσωτερικά περιβάλλοντα» (CEC 1992), ASHRAE 2007). Με άλλα λόγια, βασική αρχή αερισμού είναι η παροχή της ποιότητας του εσωτερικού αέρα (IAQ) απομακρύνοντας τους αέριους ρύπους και τον παλαιότερο και ρυπασμένου αέρα από τα εσωτερικά περιβάλλοντα με την εισαγωγή «καθαρότερου» αέρα συνηθέστερα από το εξωτερικό περιβάλλον (Liddament 1996). Σύμφωνα με τους (Miller 1992) και τους (Sundell 1994), ο ελλιπής αερισμός οδηγεί σε μη υγιή περιβάλλοντα, σε αυξήσεις σε βακτηριολογικές συγκεντρώσεις και σε «άρρωστα κτίρια» ενώ η αύξηση του εξωτερικού αέρα που εισέρχεται στους εσωτερικούς χώρους ίσως αποτελεί τη σημαντικότερη προσέγγιση για τη μείωση των συγκεντρώσεων των ρύπων στα εσωτερικά περιβάλλοντα.

Το παραπάνω είναι δυνατόν να επιτευχθούν με τη βοήθεια τόσο φυσικών όσο και μηχανικών μέσων και έτσι καθορίζονται δύο είδη αερισμού, ο φυσικός και ο μηχανικός. Ο φυσικός αερισμός συμπεριλαμβάνει τόσο την προμελετημένη μετακίνηση αέριων μαζών από το εξωτερικό περιβάλλον προς το εσωτερικό δια μέσω ανοιγμάτων όπως πόρτες και παράθυρα (ventilation), όσο και την ακούσια εισροή αέρα μέσω χαραμιάδων και ρωγμών των κτιρίων (infiltration). Όπως είναι φανερό, ο θερμοκρασιακός έλεγχος σε χώρους στους οποίους λαμβάνει μέρος μόνο ο φυσικός αερισμός είναι εξαιρετικά δύσκολος. Ο αποτελεσματικός φυσικός αερισμός προϋποθέτει κατάλληλο σχεδιασμό ανοιγμάτων (CIBSEAM10 2005). Όσον αφορά τον μηχανικό ή εξαναγκασμένο αερισμό, η παροχή του επιτυγχάνεται με ηλεκτρικούς ανεμιστήρες οι οποίοι ως συνήθως αποτελούν τμήμα του συστήματος ψύξης, θέρμανσης και αερισμού του κτιρίου. Στην περίπτωση αυτή ο θερμοκρασιακός έλεγχος και άρα άνεση στο εσωτερικό των κτιρίων είναι εύκολο να επιτευχθεί (Alevantis 1995).

Κινητήριες δυνάμεις του φυσικού αερισμού αποτελούν ο άνεμος (wind effect) (Εικόνα 2-4) και οι πιέσεις δημιουργούμενες από θερμοκρασιακές διαφορές (stack effect) (Εικόνα 2-5) μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος ή από τις διαφορές στις θερμικές απολαβές μεταξύ των εσωτερικών χώρων (Liddament 1996).

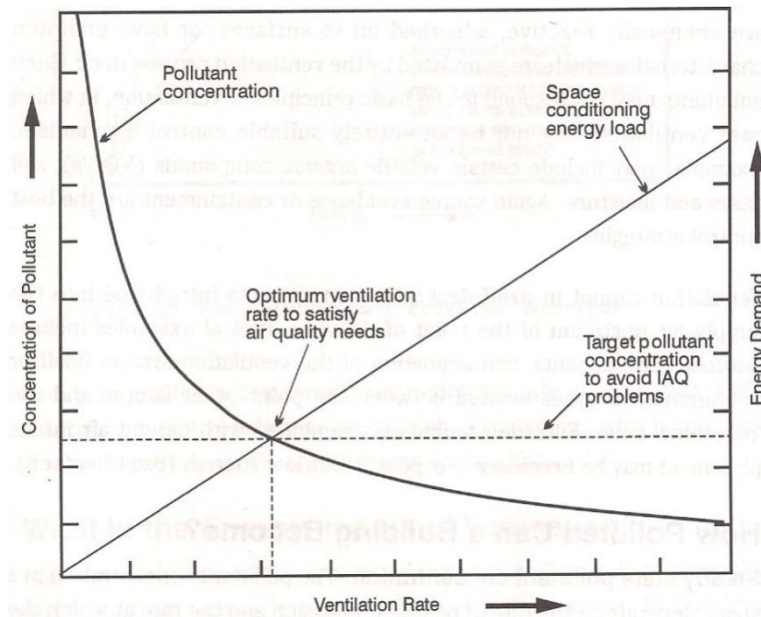


Εικόνα 2-4: Ροή καθοδηγούμενη από τον άνεμο (Wind driven flow) (Liddament 1996)



Εικόνα 2-5: Ροή καθοδηγούμενη από τη διαφορά πίεσης (Stack driven flow) (Liddament 1996)

Η απαραίτητη ποσότητα αερισμού εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις και τη φύση των ρύπων που υπάρχουν στο χώρο. Στην πράξη ένας κλειστός χώρος εμπεριέχει πολλούς και διαφορετικούς ρύπους. Στην περίπτωση που είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά εκπομπής του κάθε ρύπου τότε είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο απαραίτητος ρυθμός αερισμού για την αποφυγή των υπερβάσεων προκαθορισμένων οριακών τιμών (Εικόνα 2-6). Για τον καθορισμό του απαραίτητου ρυθμού αερισμού είναι χρήσιμο να καθορισθεί ο επικρατέστερος ρύπος. Ο ελάχιστος αποδεκτός ρυθμός αερισμού είναι αυτός που απαιτείται για την εξασθένιση του επικρατέστερου ρύπου σε αποδεκτά επίπεδα συγκεντρώσεων (Liddament 1996, pp5).



Εικόνα 2-6: Ελέγχοντας τον κυρίαρχο ρύπο (Liddament 1996)

Οι βασικότερες παράμετροι που επηρεάζουν το φυσικό αερισμό είναι η κατεύθυνση των επικρατούντων ανέμων, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος αλλά και η διαφορές θερμοκρασιών στο εσωτερικό περιβάλλον, και τέλος το μέγεθος και η θέση των ανοιγμάτων. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ή συνδυασμοί τύπων που χρησιμοποιούνται για την παροχή φυσικού αερισμού. Οι βασικοί τύποι φυσικού αερισμού είναι οι εξής: 1. Διαμπερή ή οριζόντιος αερισμός (Cross flow ventilation), 2. μονόπλευρος αερισμός (single sided ventilation) και 3. κατακόρυφος αερισμός (passive stack ventilation). Ο διαμπερή αερισμός αποτελεί την πιο συνηθισμένη και αποτελεσματική μέθοδο αερισμού, στην οποία η ροή εξαρτάται από τη θέση και το μέγεθος των ανοιγμάτων αλλά και από τη διεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου. Ο μονόπλευρος αερισμός έχει τη μικρότερη απόδοση με σχέση με τους άλλους τύπους αερισμού του οποίου κινητήρια δύναμη είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος. Τέλος ο κατακόρυφος αερισμός συμβαίνει κυρίως σε ψηλά κτίρια και προκύπτει ως αποτέλεσμα φυσικού ελκυσμού (φαινόμενο της καμινάδας). Η ροή εδώ και πάλι εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας αλλά και το μέγεθος και τη θέση των ανοιγμάτων στο χώρο.

2.5 Έρευνα ερωτηματολογίων

Οι χρήστες μη-βιομηχανικών χώρων εργασίας συμπεριλαμβανομένων των σχολικών κτιρίων και των βρεφονηπιακών σταθμών πολύ συχνά εκφράζουν παράπονα σχετικά με την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος. Όπως προαναφέρθηκε και στο εισαγωγικό μέρος, μεγάλο πλήθος επιστημονικών μελετών έχει αποδείξει ότι τα εσωτερικά περιβάλλοντα είναι πολλές φορές επιβαρυνμένα. Οι αιτίες για τα υποβαθμισμένα περιβάλλοντα ποικίλουν από τα ανεπαρκή επίπεδα αερισμού, την κακή συντήρηση των κτιρίων αλλά και των συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού κ.α. Τις περισσότερες φορές τα παράπονα των χρηστών συσχετίζονται με την άνεσή τους (πολύ ζέστη, πολύ κρύο, υγρός ή στεγνός αέρας, ανεπιθύμητες μυρωδιές κ.α.) ενώ πολλές φορές οι χρήστες εμφανίζουν και διάφορα συμπτώματα (νύστα, πονοκέφαλος, ερεθισμός του λαιμού της μύτης ή των ματιών κ.α.). Το γεγονός ότι σε ορισμένες από τις περιπτώσεις τα αποτελέσματα των μετρήσεων δεν συμπίπτουν με το βαθμό δυσαρέσκειας των χρηστών δύναται να αντιμετωπιστεί με την εφαρμογή ερωτηματολογίων για τη συστηματική μελέτη των συμπτωμάτων, της άνεσης και της γενικότερης αξιολόγησης της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος από τους μαθητές (Andersson 1993).

Η έρευνα ερωτηματολογίου είναι μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος καθώς αποτελεί μια σημαντική πηγή πληροφοριών από τους ανθρώπους για τη βελτίωση της απόδοσης των κτιρίων. Η έρευνα μέσω ερωτηματολογίων επιτρέπει την υποκειμενική αποτίμηση των λειτουργιών και σχεδιαστικών χαρακτηριστικών του κτιρίου θέτοντας σε προτεραιότητα τις απαραίτητες ενέργειες για τη βελτίωση της ικανοποίησης των χρηστών και της παραγωγικότητας στους χώρους εκπαίδευσης και εργασίας. Το γεγονός ότι τα ερωτηματολόγια βασίζονται στις υποκειμενικές απαντήσεις των ατόμων είναι δυνατόν αφενός να είναι ωφέλημα σε μεγάλο βαθμό, αφετέρου όμως να είναι και παραπλανητικά. Οι άνθρωποι έχοντας τη δυνατότητα να παρατηρούν, να επιλέγουν, να αξιολογούν, να ερμηνεύουν και να αναφέρουν, αποτελούν πολύτιμη πηγή πληροφοριών υπό τις σωστές προϋποθέσεις. Ωστόσο ο ανθρώπινος νους είναι αρκετά περίπλοκος και όργανο ευάλωτο στις παρατηρήσεις και στην περίπτωση που δεν ζητηθούν από τα κατάλληλα άτομα οι σωστές ερωτήσεις με το σωστό τρόπο δεν θα καταστεί δυνατή η συλλογή υψηλής ποιότητας απαντήσεων. Η δημιουργία των ερωτηματολογίων προϋποθέτει μια σειρά από ενέργειες για τη διασφάλιση ποιοτικών απαντήσεων. Συγκεκριμένα θα πρέπει οι ερωτήσεις να είναι ακριβείς, ξεκάθαρες, απλές και κατανοητές και προσαρμοσμένες στις ιδιαίτερες ανάγκες της ηλικιακής ομάδας στην οποία απευθύνονται. Επιπλέον τα ερωτηματολόγια θα πρέπει να είναι σύντομα αλλά και φιλικά προς τους χρήστες.

Με σκοπό τη διασφάλιση των απαντήσεων, θα πρέπει οι χρήστες να διαβεβαιώνονται σχετικά με την ανωνυμία των ερωτηματολογίων. Σύμφωνα με το βιβλίο "Αναπτύσσοντας και χρησιμοποιώντας ερωτηματολόγια" του Γενικού Λογιστηρίου του Κράτους των ΗΠΑ, θα πρέπει να πληρούνται οι εξής προϋποθέσεις (Gao 1993): Αρχικά θα πρέπει να εξηγηθεί στους χρήστες ο λόγος διεξαγωγής της έρευνας ερωτηματολογίου και η κρισιμότητα συμμετοχής στην έρευνα. Οι κατηγορίες των ερωτήσεων θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο γενικευμένες ενώ το λεξιλόγιο των ερωτήσεων καλό είναι να μην έχει επικριτικό ύφος αποφεύγοντας την εμφάνιση μομφής ή αν είναι δυνατόν η μορφή των ερωτήσεων να παρουσιάζεται ως κοινωνικά αποδεκτή. Επίσης θα πρέπει τα άτομα που συμμετέχουν στην έρευνα να διαβεβαιωθούν σχετικά με την ανωνυμία της συμμετοχής τους στην έρευνα αλλά και σχετικά με την εμπιστευτικότητα των δεδομένων. Οι συμμετέχοντες θα πρέπει επιπλέον να ενημερωθούν για το ότι οι απαντήσεις τους δεν θα χρησιμοποιηθούν με οποιονδήποτε απειλητικό τρόπο ενώ θα πρέπει να τους γίνει σαφής ο τρόπος με τον οποίο θα χρησιμοποιηθούν οι απαντήσεις τους. Τέλος οι συμμετέχοντες θα πρέπει να ενημερωθούν για το διαθέσιμο χρόνο συμπλήρωσης του ερωτηματολογίου αλλά και τη συνολική διάρκεια της έρευνας. Με σκοπό τη μεγιστοποίηση του ποσοστού συμμετοχής στην έρευνα, οι διοργανωτές θα πρέπει να ενθαρρύνουν την ευαισθητοποίηση της έρευνας και τη συμμετοχή. Επίσης θα πρέπει να τίθεται στόχος ποσοστού συμμετεχόντων στην έρευνα ίσος με το 50% του συνόλου για το υπό μελέτη κτίριο (CBE 2014).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

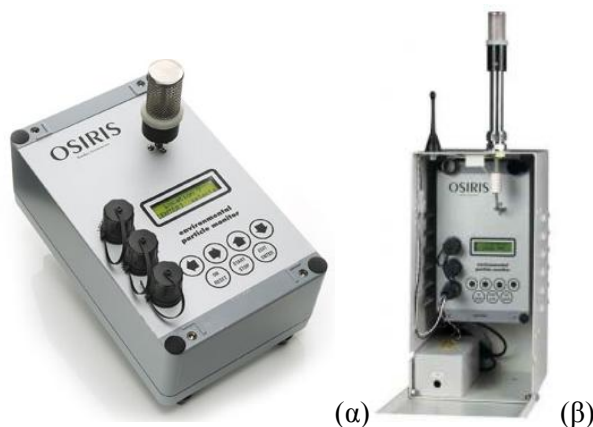
3.1 Πειραματικός Εξοπλισμός

Στο υποκεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο πειραματικός εξοπλισμός και οι διαδικασίες μέτρησης των παραμέτρων που καταγράφηκαν στα πλαίσια του πειραματικού μέρους της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Στο παράρτημα 7.1 αναφέρεται αναλυτικά η αρχή λειτουργίας του κάθε οργάνου.

Μετρητές αιωρούμενων σωματιδίων

OSIRIS

Ο καθορισμός των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων TSP, PM₁₀, PM_{2.5} και PM₁ μεγέθους από περίπου 0.4 μm (1 μm = 10⁻⁶ m) έως περίπου τα 20 μm σε διάμετρο, έγινε με τη βοήθεια του αυτόματου μετρητή Osiris σε μονάδες μάζας ανά όγκο, μg/m³ (Airborne Particle Monitor, Turnkey Instruments Ltd.) (Εικόνα 3-1). Η λειτουργία του OSIRIS βασίζεται σε μια τεχνική σκέδασης του φωτός όπου δείγμα αέρα εισέρχεται στο όργανο με τη βοήθεια μιας αντλίας αέρα με ρυθμό ροής τα 10 cc/sec. Ο εισερχόμενος αέρας περνάει από μια ακτίνα λέιζερ σε ένα φωτόμετρο και στη συνέχεια καταλήγει σε ένα φίλτρο όπου απομακρύνονται τα σωματίδια πριν φτάσουν στην αντλία. Ο μετρητής OSIRIS είναι δυνατόν να μετρήσει και στο εξωτερικό περιβάλλον με τη χρήση μετεωρολογικού κλωβού (Εικόνα 3-1, β). Ακολούθως συνοψίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου (Πίνακας 3-1).



Εικόνα 3-1: Φορητός μετρητής αιωρούμενων σωματιδίων OSIRIS (α) μετρήσεις σε εσωτερικό περιβάλλον, (β) μετρήσεις σε εξωτερικό περιβάλλον με τη χρήση κλωβού

Πίνακας 3-1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του OSIRIS

Μοντέλο	OSIRIS
Κατασκευαστής	Turnkey Instruments Ltd
Ανιχνεύσιμο εύρος μεγέθους σωματιδίων	0.4 μm – 20 μm
Εύρος συγκεντρώσεων	0-6000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Όριο ανίχνευσης	0.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Ρυθμός ροής:	600 cc/min
Ακρίβεια Οργάνου (Accuracy)	0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Λογισμικό επικοινωνίας με τον Η/Υ	AirQ

P-Trak

Για την καταγραφή υπομετρικών σωματιδίων (Ultrafine particles-UFP) χρησιμοποιήθηκε ο φορητός μετρητής P-Trak ο οποίος καταγράφει σωματίδια σε πραγματικό χρόνο σύμφωνα με την αρχή διάχυσης του φωτός (P-Trak, TSI Model 8525, St. Paul, MN) (Εικόνα 3-2). Το όργανο αυτό ανιχνεύει και καταγράφει σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερης του ενός μικρομέτρου, καθιστώντας το εξαιρετικά ευαίσθητο συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες και θεωρείται μικρής κλίμακας μετρητής σωματιδίων (Small scale Condensation Particle Counter) (TSI 2009. Οι μετρήσεις γίνονται σε μονάδες πλήθους (αριθμού) σωματιδίων ανά κυβικό εκατοστό (pt/cm^3). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 3-2).



Εικόνα 3-2: P-Trak

Πίνακας 3-2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του P-Trak

Μοντέλο	P-Trak Ultrafine Particle Counter Model 8525
Κατασκευαστής	TSI
Ανιχνεύσιμο εύρος μεγέθους σωματιδίων	0.02 μm- 1μm
Εύρος συγκεντρώσεων	0-5x10 ⁵ pt/cm ³
Ρυθμός ροής:	
Δείγματος	Περίπου 100 cm ³ /min
Συνολικός	Περίπου 700 cm ³ /min
Ακρίβεια Μέτρησης (Accuracy)	95% Richmond-Bryan
Επαναληψιμότητα (Precision)	± 3-12%
Λογισμικό επικοινωνίας με τον Η/Υ	TRAKPRO Data Analysis Software

Handheld 3016

Οι εσωτερικές συγκεντρώσεις των συγκεντρώσεων μάζας αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀, PM₅, PM_{2.5}, PM₁ και PM_{0.5} μετρήθηκαν με τη βοήθεια του φορητού μετρητή Handheld3016, IAQ (Lighthouse, worldwide solutions) σε μονάδες μg/m³ (Εικόνα 3-3). Το όργανο αυτό έχει βαθμονομηθεί σύμφωνα με το πρότυπο ISO 21501-4 με τη χρήση λάτεξ σφαιριδίων πολυστερίνης (Polysterene Latex Spheres). Τα σωματίδια αυτά είναι σφαιρικά και λευκά τα οποία αποτελούν ιδανικά χαρακτηριστικά για την εκτέλεση της βαθμονόμησης μεγέθους σε αισθητήρες σκέδασης φωτός που βασίζονται στην κοκκομετρική ανάλυση (sieve analysis). Τα βασικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου συνοψίζονται παρακάτω (Πίνακας 3-3).



Εικόνα 3-3: Μετρητής αιωρούμενων σωματιδίων Handheld 3016 IAQ (Lighthouse, worldwide solutions)

Πίνακας 3-3: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μετρητή Handheld 3016

Μοντέλο	Handheld 3016 IAQ
Κατασκευαστής	Lighthouse, worldwide solutions
Ανιχνεύσιμο εύρος μεγέθους σωματιδίων	0.3-25 μm
Εύρος συγκεντρώσεων	4.000.000 pt/ft^3
Ρυθμός ροής	0.1 CFM (2.83 LPM)
Ακρίβεια	100% για σωματίδια >0.45 μm
Λογισμικό επικοινωνίας με τον Η/Υ	LMS XChange 1.6

DustTrak

Για την καταγραφή συγκεντρώσεων PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ και PM_{10} σε ορισμένες από τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε και το DustTrak (TSI, model 8520) (Εικόνα 3-4) όπου τα σωματίδια μετρώνται σε μονάδες μάζας ανά όγκο, mg/m^3 . Το DustTrak είναι ένα φορητό όργανο καταγραφής ρύπων όπου με ένα laser φωτόμετρο του οποίου η λειτουργία βασίζεται στη σκέδαση του φωτός, μετρά και καταγράφει τις συγκεντρώσεις μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων σε πραγματικό χρόνο συλλέγοντας τα σωματίδια με ένα δειγματοληπτικό ακροφύσιο (Εικόνα 3-4). Στη συνέχεια συνοψίζονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά του DustTrak (Πίνακας 3-4).

**Εικόνα 3-4: DustTrak****Πίνακας 3-4: Τεχνικά χαρακτηριστικά μετρητή Dust Trak**

Μοντέλο	DustTrak Model 8520
Κατασκευαστής	TSI
Εύρος	0.001-100 mg/m^3 (Το όργανο είναι βαθμονομημένο σύμφωνα με το πρότυπο ISO 12103-1 να μετρά τα εισπνεόμενα τάξης μεγέθους σωματίδια (A1 test dust))
Ανιχνεύσιμο εύρος μεγέθους σωματιδίων	0.1-10 μm
Ανάλυση (Resolution)	$\pm 0.1\%$ ή $\pm 0.001 \text{ mg}/\text{m}^3$
Ρυθμός ροής	1.4-2.4 L/min
Λογισμικό επικοινωνίας με τον Η/Υ	TrakPro (Data Analysis Software)

Βαρομετρική μέθοδος μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων

Για συγκεκριμένες ημέρες δειγματοληψίας τα αιωρούμενα σωματίδια μετρήθηκαν με την πρότυπη βαρομετρική μέθοδο τόσο στο εσωτερικό όσο και το εξωτερικό περιβάλλον με τη βοήθεια δύο πανομοιότυπων δειγματοληπτών Derenda (Derenda Sequential (LVS3.1/PNS3.1-15)) χαμηλού όγκου με ελεγχόμενο ρυθμό ροής ($2.3 \text{ m}^3/\text{h}$) συλλέγοντας αιωρούμενα σωματίδια σε φίλτρα χαλαζία (Quartz filters) διαμέτρου 47 mm (Εικόνα 3-5). Τα φίλτρα αυτά προθερμαίνονταν πριν τη χρήση στους $550 \text{ }^\circ\text{C}$ με σκοπό να μειωθούν τα επίπεδα υπολειμματικού άνθρακα και στη συνέχεια τοποθετούνταν σε ένα δωμάτιο με ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας ($T=20\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ and $\text{RH}=50\pm 5 \%$). Ο προσδιορισμός συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων διεξήχθη βαρομετρικά με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροζυγού με ανάλυση $1 \mu\text{g}$ σύμφωνα με το πρότυπο EN 12341. Πριν τη χημική ανάλυση τα φίλτρα κόβονταν σε διάφορα τμήματα για διαφορετικού είδους αναλύσεων. Τα υδροδιαλυτά ιόντα (Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) ανιχνεύθηκαν με τη χρήση χρωματογράφου ιόντων (Ion chromatography-IC) ακολουθώντας τη μέθοδο που δίνεται από τους Bardouki et al., (2003). Τα στοιχεία του άνθρακα (οργανικού & στοιχειακού- Organic Carbon-OC & Elemental Carbon-EC) προσδιορίστηκαν με τη χρήση ενός αναλυτή άνθρακα (Sunset Lab, USA). Οι λεπτομέρειες της ανάλυσης δίνονται από τους Koulouri et al. (2008). Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο ο προσδιορισμός της μάζας με τη βαρομετρική μέθοδο όσο και οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε συνεργασία με το εργαστήριο Περιβαλλοντικών Ερευνών του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος".



Εικόνα 3-5: Δειγματολήπτης Derenda

Μετρητές VOCs, CO₂ & CO

ppb RAE

Οι συγκεντρώσεις των TVOCs σε ορισμένες από τις μετρήσεις καταγράφηκαν με το φορητό μετρητή ppbRAE (ppbRAE, PPB VOC Monitor, PGM-7240, RAE Sys. CA) (Εικόνα 3-6). Πρόκειται για έναν εξαιρετικά ευαίσθητο ανιχνευτή φωτο-ιονισμού (Photo-ionization Detector, PID) ο οποίος καταγράφει οργανικές πτητικές ενώσεις σε πραγματικό χρόνο σε μονάδες ppb. Εξ' αιτίας του σφάλματος του οργάνου, τιμές μικρότερες των 20 ppb θεωρούνται αναξιόπιστες. Τα βασικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του ppbRAE συγκεντρώνονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 3-5).



Εικόνα 3-6: ppbRAE, VOC Monitor

Πίνακας 3-5: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του PPB VOC Monitor

Μοντέλο	PPB VOC Monitor PGM-7240
Κατασκευαστής	RAE Systems
Ανιχνεύσιμο εύρος μεγέθους σωματιδίων	Όριο ανίχνευσης 1ppb
Εύρος συγκεντρώσεων	0-9999 ppb
	10.0-99.9 ppm
	100-199 ppm
Ακρίβεια Μέτρησης (Accuracy)	±20 ppb ή
	±10% της αναγραφόμενης τιμής
Χρόνος απόκρισης	Μικρότερος των 5 sec
Λογισμικό επικοινωνίας με τον H/Y	PRORAE Software

Multi-RAE-IR

Ο φορητός μετρητής MultiRAE-IR, Model PGM-54 (Multi-Gas Monitor, RAE Systems) χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή CO, CO₂ αλλά των VOCs σε μονάδες ppm (μέρη ανά εκατομμύριο) (Εικόνα 3-7). Πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος VOCs αναφέρεται στο σύνολο TVOCs των οργανικών πτητικών ενώσεων. Η αρχή λειτουργίας του MultiRAE-IR είναι παρόμοια με αυτή του ppbRAE που περιγράφηκε παραπάνω με τη μόνη διαφορά ότι ο

μετρητής MultiRAE διαθέτει 5 διαφορετικά αισθητήρια για να μετρά ποικιλία αερίων. Το αέριο που χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση του αισθητήριου των VOCs είναι το ισοβουτυλένιο (C₄H₈) σε αέρα των 100ppm, για το αισθητήριο CO χρησιμοποιήθηκε μίγμα CO/N₂ συγκέντρωσης 50 ppm και για το αισθητήριο CO₂, χρησιμοποιήθηκε φιάλη με μίγμα CO₂/N₂ συγκέντρωσης 5000 ppm. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του MultiRAE-IR συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3-6).



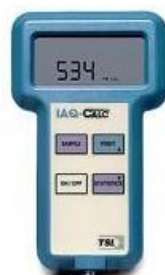
Εικόνα 3-7: MultiRAE-IR

Πίνακας 3-6: Τεχνικά χαρακτηριστικά MultiRAE-IR

Μοντέλο	MultiRAE Plus
Κατασκευαστής	RAE Systems
Ανιχνεύσιμο εύρος	0-2,000 ppm
Εύρος συγκεντρώσεων	CO ₂ : 0-20000 ppm, CO: 0-500 ppm, VOC: 0-200 ppm
Ρυθμός ροής:	150 cc/min
Λογισμικό επικοινωνίας με τον H/Y	proRAE Suite Software

IAQ-CALC, Model 8732,

Ο μετρητής χειρός διοξειδίου του άνθρακα IAQ-CALC καταγράφει στις συγκεντρώσεις CO₂ για το διάστημα της μέτρησης και στη συνέχεια υπολογίζει τη μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή της συγκέντρωσης στο χρονικό αυτό διάστημα της μέτρησης (Εικόνα 3-8). Καθώς το όργανο δεν είναι καταγραφικό, οι προαναφερόμενες τιμές αναγράφονται στην οθόνη του οργάνου. Στη συνέχεια συνοψίζονται τα βασικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου (Πίνακας 3-7).



Εικόνα 3-8: IAQ-CALC

Πίνακας 3-7 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά του IAQ-CALC CO₂ counter

	IAQ-CALC Model 8732
Μοντέλο	Dual wavelength detector with Non-dispersive infrared (NDIR)
Κατασκευαστής	TSI
Ανιχνεύσιμο εύρος μεγέθους	0-5000 ppm
Ακρίβεια Μέτρησης (Accuracy)	±3% ή ± 50 ppm
Ανάλυση (Resolution)	1 ppm
Χρόνος απόκρισης	<10 min σε ακίνητο αέρα

Μετρητές μετεωρολογικών παραμέτρων

Tinytag Plus 2, TGP-4500, T, RH%

Η καταγραφή της θερμοκρασίας και υγρασίας τόσο στο εσωτερικό όσο και το εξωτερικό περιβάλλον έγινε με τη χρήση αισθητήρων Tinytag (Εικόνα 3-9). Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του μετρητή (Πίνακας 3-8).



Εικόνα 3-9: Μετρητής θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, Tinytag TGP-4500

Πίνακας 3-8: Τεχνικά χαρακτηριστικά θερμουγραμέτρων Tinytag

Μοντέλο	Tinytag Plus 2 TGP-4500
Κατασκευαστής	Gemini Data loggers
Ανιχνεύσιμο εύρος μεγέθους	
T:	-25 °C έως +85 °C
RH:	0- 100%
Ακρίβεια Μέτρησης (Accuracy)	
T & RH:	± 3% στους 25 °C
Χρόνος απόκρισης	
RH:	40 sec
Λογισμικό επικοινωνίας με τον H/Y	Tinytag Explorer

INNOVA 1221-7301

Οι μετρήσεις των φυσικών παραμέτρων που επηρεάζουν το θερμικό περιβάλλον πραγματοποιήθηκαν με τον μετρητή θερμικής άνεσης INNOVA 1221 (LumaSense technologies) (Εικόνα 3-10) ο οποίος καταγράφει σε πραγματικό χρόνο όντας συνδεδεμένος σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με εγκατεστημένο το λογισμικό INNOVA 7701. Ο μετρητής INNOVA 1221 είναι σε συμφωνία με τα πρότυπα ISO 7730/ CEN 27730 και ASHRAE 55. Το όργανο αυτό χρησιμοποιεί αισθητήρες θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας αέρα, θερμοκρασίας θερμομέτρου μαύρης σφαίρας και ενεργούς θερμοκρασίας (Operative temperature). Στη συνέχεια το λογισμικό με τις κατάλληλες εξισώσεις και σύμφωνα με το πρότυπο ISO/Standard 7730-1995 υπολογίζει δείκτες θερμικής άνεσης όπως: τον δείκτη θερμικής καταπόνησης (Wet Bulb Globe Temperature-WBGT), το ποσοστό των δυσαρεστημένων χρηστών (Percentage of People Dissatisfied-PPD), και τη μέση προβλεπόμενη ψήφος (Predicted Mean Vote-PMV). Για τον υπολογισμό των δεικτών αυτών απαιτούνται ορισμένες παράμετροι όπως του ρυθμού μεταβολισμού (Metabolic rate-MET) και των επιπέδων ρουχισμού (Clothing value-CLO) όπου στη μελέτη αυτή οι παράμετροι τέθηκαν ίσοι με MET=1.2 (70W/m²) και CLO=0.8 που αντιστοιχούν σε καθιστική δραστηριότητα και σε ελαφριά καθημερινή ένδυση αντίστοιχα σύμφωνα με το πρότυπο ISO EN 7730 για σχολικές αίθουσες. Ορισμένα από τα βασικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου συνοψίζονται παρακάτω (Πίνακας 3-9).



Εικόνα 3-10 : Μετρητής θερμικής άνεσης INNOVA 1221

Πίνακας 3-9: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μετρητή INNOVA 1221

Μοντέλο	Thermal Comfort Data Logger- INNOVA 1221
Κατασκευαστής	INNOVA AirTech Instruments
Κλίμακα μέτρησης	-20 °C - 100 °C
Ανάλυση	0.1 °C
Λογισμικό επικοινωνίας με τον H/Y	INNOVA 7701

Μετρητής αερισμού

INNOVA 1312-1312

Ο ρυθμός αερισμού των τάξεων υπολογίστηκε με τη χρήση της μεθόδου εξασθένισης αέριου ιχνηθέτη (Tracer Gas Decay method) σύμφωνα με το πρότυπο ISO 12569:2012. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την έγχυση ενός αέριου ιχνηθέτη, την ανάμειξή του στο χώρο και στη συνέχεια τη μέτρηση του ρυθμού πτώσης της συγκέντρωσής του με τον κατάλληλο εξοπλισμό. Ο αέριος ιχνηθέτης που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις της παρούσας διατριβής ήταν το εξααθοριούχο θείο (SF₆) του οποίου ο ρυθμός πτώσης μετρήθηκε με τον μετρητή INNOVA 1312 (Photoacoustic Multi-Gas Monitor). Η αρχή λειτουργίας του οργάνου βασίζεται στη μέθοδο ανίχνευσης φωτοακουστικών υπερύθρων (photoacoustic infra-red detection method). Η μέθοδος Tracer gas έχει χρησιμοποιηθεί σε έναν μεγάλο αριθμό μελετών (Johnson et al., 2004). Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι το όργανο αυτό εκτός από το SF₆ μετρά επιπλέον CO, CO₂ αλλά και TOC ωστόσο στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε ως επί το πλείστο για μετρήσεις αερισμού. Στη διάρκεια των μετρήσεων ο μετρητής INNOVA 1312 είναι συνδεδεμένος με το δειγματολήπτη και δοσομετρητή INNOVA 1303 ο οποίος έχοντας 6 κανάλια (ακροφύσια) είναι δυνατόν να μετρήσει ταυτόχρονα σε 6 διαφορετικά σημεία (Multipoint Sampler Doser). Τα όργανα αυτά είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους και με έναν υπολογιστή στον οποίο είναι εγκατεστημένο το λογισμικό INNOVA 7620.

Σε κάθε μέτρηση πραγματοποιούνται οι ακόλουθες διαδικασίες: Το αέριο απελευθερώνεται σε διάφορα σημεία του χώρου και για την καλή ανάμειξη του στο χώρο χρησιμοποιείται ένας ανεμιστήρας ο οποίος λειτουργεί σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Με σκοπό την επιβεβαίωση της ομοιόμορφης κατανομής του αερίου στο χώρο, το αέριο καταγράφεται σε 5 διαφορετικά σημεία του χώρου και εν τέλη η μέση τιμή των 5 θέσεων λαμβάνεται υπόψη. Ο ρυθμός αερισμού υπολογίζεται σε εναλλαγές αέρα ανά ώρα (Air Changes per Hour-ACH) από την κλίση της καμπύλης του ρυθμού πτώσης του αερίου SF₆ σε καθορισμένο χρόνο, με βάση τον τύπο (1) (Nantka, 1990).

$$ACH = \frac{\ln C(t_1) - \ln C(t_2)}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

Όπου $C(t_1)$ και $C(t_2)$ είναι οι συγκεντρώσεις του SF_6 σε μονάδες ppm τις χρονικές στιγμές t_1 και t_2 αντίστοιχα και $t_2 - t_1$ είναι η συνολική περίοδος μέτρησης σε ώρες.



Εικόνα 3-11 : Μετρητές INNOVA 1312 και Multipoint Sampler Doser INNOVA 1303

Μοντέλο	INNOVA 1312 Photoacoustic multi-gas monitor
Κατασκευαστής	LumaSence Technologies
Ακρίβεια	± 1.5 ppm
Επαναληψιμότητα	1% της μετρούμενης τιμής
Λογισμικό επικοινωνίας με τον Η/Υ	INNOVA 7620

Μετρητής φωτισμού

TES-Lightmeter

Για τη μέτρηση των επιπέδων φωτισμού στις τάξεις χρησιμοποιήθηκε ο μετρητής TES 1335 Digital light meter (TES Electrical Electronic Corp.). Σε κάθε αίθουσα γίνονταν τρεις κύκλοι μετρήσεων ανά ημέρα μέτρησης. Κάθε κύκλος μέτρησης περιελάμβανε τη μέτρηση των επιπέδων φωτισμού σε 9 διαφορετικά σημεία στο χώρο με σκοπό να προκύψει μια αντιπροσωπευτική ένδειξη της κατανομής του φωτισμού σε όλη την τάξη. Τέλος, οι μέσες ημερήσιες τιμές των μετρήσεων αυτών λαμβάνονταν υπόψη για την περαιτέρω επεξεργασία. Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου (Πίνακας 3-10).



Εικόνα 3-12: Μετρητής επιπέδων φωτισμού TES 1335 Digital light meter

Πίνακας 3-10: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μετρητή φωτισμού TES 1335 Digital light meter

Μοντέλο	Digital Light Meter 1335
Κατασκευαστής	TES
Κλίμακα μέτρησης	0-400,000 Lux
Ακρίβεια	$\pm 3\%$ rdg ± 0.5 dgt
Ανάλυση	0.01 Lux

Μετρητής βιολογικών παραμέτρων

Burkard

Οι αερομεταφερόμενοι μύκητες συλλέχθηκαν σε πλάκες άγαρ με τη βοήθεια φορητής αντλίας Burkard (Burkard Manufacturing C. Ltd. Hertfordshire, UK) (Εικόνα 3-13). Η αντλία ρουφούσε αέρα με ρυθμό 10 ή 20 l/min και τον οδηγούσε σε τρυβλία διαμέτρου 90 mm πάνω στα οποία υπήρχε θρεπτικό υλικό το οποίο βοηθά στην ανάπτυξη των μυκήτων. Τρεις πλάκες με το άγαρ ήταν συνεχώς εκτεθειμένες σε κάθε τόπο δειγματοληψίας για 3 λεπτά ανά πλάκα και στη συνέχεια επωάζονταν για δύο εβδομάδες στους 28°C. Μετά από διάστημα δύο εβδομάδων και αφού διαπιστώθηκε η ανάπτυξη των μυκήτων, τα τρυβλία αυτά πήγαν στο εργαστήριο για ανάλυση και την καταμέτρηση των αποικιών μυκήτων οι οποίες αναπτύχθηκαν. Η καταμέτρηση των αποικιών διορθώθηκε και εκφράστηκε σε μονάδες σχηματισμού αποικιών ανά κυβικό (Colony Forming Units CFU/m³) ένα μέτρο καταμέτρησης βιώσιμων συγκεντρώσεων σπορίων. Οι αποικίες μυκήτων αναλύθηκαν περαιτέρω σε επίπεδο γένους. Τα επικρατέστερα γένη ήταν το Πενυσίλλιο (*Penicillium*), το Κλαντοσπόριο (*Cladosporium*) και ο Ασπέργιλλος (*Aspergillus*). Η συλλογή και καταγραφή των παραπάνω μυκήτων πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με τον Τομέα Οικολογίας και Ταξινομικής του τμήματος Βιολογίας του ΕΚΠΑ.



Εικόνα 3-13: Φορητή αντλία Burkard

Έλεγχος καλής λειτουργίας, βαθμονόμηση οργάνων και διασφάλιση ποιότητας των μετρήσεων

Η οργάνωση και διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων έγινε βάση αυστηρού πειραματικού πρωτοκόλλου στο οποίο αναφέρονται όλες οι πραγματοποιηθείσες ενέργειες για τη διασφάλιση της ποιότητας των μετρούμενων παραμέτρων. Πριν την έναρξη των μετρήσεων και για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα πραγματοποιούνταν έλεγχος καλής λειτουργίας και βαθμονόμηση των οργάνων με σκοπό τη διασφάλιση ακρίβειας και ορθότητας των μετρήσεων κάθε πειραματικής διαδικασίας. Επιπλέον γίνονταν αλληπάλληλες προκαταρκτικές μετρήσεις στο εργαστήριο υπό σταθερές συνθήκες για τον έλεγχο καλής λειτουργίας των οργάνων σύμφωνα με το πρότυπο ISO/IEC 17025:2005.

Όπως θα αναφερθεί σε επόμενο κεφάλαιο τα αιωρούμενα σωματίδια σε ορισμένες από τις πειραματικές μετρήσεις μετρήθηκαν τόσο στο εσωτερικό (Lighthouse) όσο και το εξωτερικό περιβάλλον (Osiris) αλλά με διαφορετικά όργανα δειγματοληψίας (Βλέπε κεφ. 3.2.3, 3.4.3). Για το λόγο αυτό και με σκοπό να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα από τους διαφορετικούς δειγματολήπτες πραγματοποιήθηκαν κατά την περίοδο των προκαταρκτικών μετρήσεων συγκριτικές μετρήσεις στο εργαστήριο υπό σταθερές συνθήκες χωρίς την παρουσία πηγών ρύπων, με σκοπό τον έλεγχο και την αξιολόγηση των μετρήσεων.

Πριν από κάθε πειραματική διαδικασία διερευνούνταν οι στόχοι, ο τόπος, ο τρόπος και η διάρκεια δειγματοληψίας σύμφωνα με τα ειδικά χαρακτηριστικά καθενός από τα εσωτερικά περιβάλλοντα στα οποία προγραμματίζονταν οι μετρήσεις. Οι συγκεκριμένες παράμετροι καθορίζονταν με βάση το πρότυπο ISO 16000-1:2004 το οποίο είναι εφαρμόσιμο σε διάφορα εσωτερικά περιβάλλοντα όπως κατοικίες και δημόσια κτίρια όπως σχολεία, νοσοκομεία κτλ. Αντίστοιχα μετά το τέλος της δειγματοληψίας προέκυπτε μια σημαντική σε έκταση βάση δεδομένων όπου για την αποφυγή συστηματικών σφαλμάτων πληροφόρησης, διεξάγονταν

επανελημμένοι έλεγχοι πληρότητας, ακρίβειας και ορθότητας των δεδομένων και των χρονοσειρών.

Θέσεις δειγματοληψίας

Οι θέσεις τοποθέτησης των οργάνων στα εσωτερικά περιβάλλοντα τόσο των κατοικιών όσο και των τάξεων ήταν σύμφωνα με το πρότυπο ISO 16000-1. Συγκεκριμένα:

* Το κέντρο του χώρου μέτρησης ήταν ιδανικά το καταλληλότερο σημείο για τη δειγματοληψία ωστόσο στις περιπτώσεις που αυτό δεν ήταν εφικτό λαμβάνονταν υπόψη τα ακόλουθα:

* Τα όργανα τοποθετούνταν σε απόσταση τουλάχιστον ενός μέτρου από τους τοίχους και σε ύψος 1.1 m από το δάπεδο

* Αποφεύχθηκαν σημεία που ήταν εκτεθειμένα στον ήλιο και που ήταν κοντά σε συστήματα θέρμανσης.

Επιπλέον αναφορικά με τις μετρήσεις στα σχολεία, τηρήθηκαν όλα τα μέτρα ασφάλειας για την επιλογή της θέσης τοποθέτησης των δειγματοληπτών και επίσης δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο να μη διαταραχθεί η φυσιολογική δραστηριότητα των μαθητών.

Οι αντίστοιχες μετρήσεις στο εξωτερικό περιβάλλον πραγματοποιούνταν ταυτόχρονα με τις εσωτερικές μετρήσεις. Οι θέσεις τοποθέτησης των οργάνων ήταν σε σημεία αντιπροσωπευτικά του εξωτερικού αέρα μακριά από τοπικές πηγές παραγωγής ρύπων (πχ. καπνοδόχους, κλιματιστικές μονάδες κτλ.) και σε σημεία μη προσιτά από τους χρήστες των κτιρίων. Δείγματα αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος πρέπει να λαμβάνονται από σημεία που βρίσκονται κοντά στο κτίριο αλλά όχι πλησιέστερα του 1m σύμφωνα με το πρότυπο ISO 16000-1. Επίσης οι δειγματολήπτες τοποθετούνταν σε κλωβούς με σκοπό την αποφυγή άμεσης έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία αλλά και τη βροχόπτωση.

3.2 Μεθοδολογία πειραματικής μελέτης σε κατοικίες της Αττικής

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεθοδολογία της πρώτης πειραματικής καμπάνιας που έλαβε χώρα σε δύο κατοικίες της Αττικής με διαφορετικό βαθμό αστικοποίησης. Αρχικά περιγράφονται οι τόποι δειγματοληψίας, ακολούθως παρατίθενται οι βασικοί στόχοι των πειραματικών μετρήσεων, στη συνέχεια αναφέρονται οι μετρούμενες παράμετροι αλλά και ο πειραματικός εξοπλισμός και τέλος περιγράφεται το πρωτόκολλο των μετρήσεων.

3.2.1 Επιλογή θέσεων δειγματοληψίας

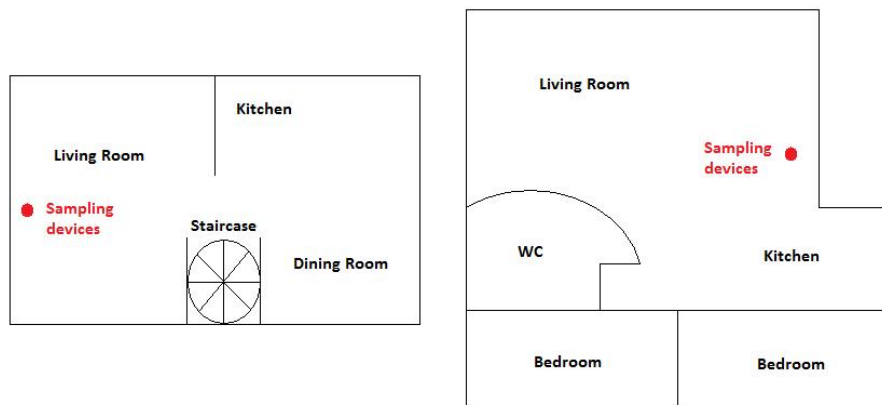
Η μελέτη της ποιότητας του αέρα σε κατοικίες είναι εξαιρετικής σημασίας καθώς οι άνθρωποι ξοδεύουν περίπου το 60% της ημέρας τους στις κατοικίες τους (Spengler and Sexton 1983). Για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν κατοικίες για τη διεξαγωγή των πρώτων πειραματικών μετρήσεων. Πλήθος μελετών έχουν διεξαχθεί σε Ελληνικές κατοικίες σε σχέση με την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος. Στην πλειοψηφία των μελετών αυτών έχουν μελετηθεί τα επίπεδα των συγκεντρώσεων ρύπων όπως τα PM₁₀, PM_{2.5}, VOCs και του CO₂. Παρά τις δυσμενείς επιπτώσεις που προκαλεί η έκθεση στα υπομετρικά σωματίδια UFP, εξ όσων γνωρίζουμε, υπάρχουν μόνο δύο καταγεγραμμένες μελέτες στις οποίες μετρώνται τα UFP στα εσωτερικά περιβάλλοντα κατοικιών στην Ελλάδα (Glytsos et al. 2010, Diarouli et al. 2007a). Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω έρευνα των επιπέδων των αέριων ρύπων και ειδικότερα των υπομετρικών σωματιδίων με σκοπό τη δημιουργία ολοκληρωμένου προφίλ των συγκεντρώσεών τους αλλά και την ανίχνευση των παραμέτρων που τα επηρεάζουν.

Περιγραφή των τόπων δειγματοληψίας

Όπως προαναφέρθηκε, οι μετρήσεις έλαβαν χώρα σε δύο κατοικίες με διαφορετικό βαθμό αστικοποίησης. Η πρώτη κατοικία είναι ένα τυπικό διαμέρισμα 75 m² στον 4^ο όροφο μιας εξαώροφης πολυκατοικίας στην περιοχή του Ζωγράφου πολύ κοντά στο κέντρο της Αθήνας (περίπου 4 km). Η δεύτερη κατοικία αφορά μία μεζονέτα που αποτελείται από 3 ορόφους και βρίσκεται στην περιοχή του Ντραφιού, προάστιο της Αθήνας (περίπου 20 km από το κέντρο της πόλης) μακριά από εκπομπές από οχήματα (Εικόνα 3-14). Οι δύο κατοικίες έχουν εγκατεστημένα κουφώματα με διπλά υαλοστάσια καθώς επίσης είναι και οι δύο φυσικά αεριζόμενες. Στην Εικόνα 3-15 παρουσιάζονται σε διαγράμματα χωρίς κλίματα οι κατόψεις των κατοικιών (κάτοψη ισογείου για την περίπτωση της μεζονέτας) στις οποίες απεικονίζονται οι θέσεις τοποθέτησης των δειγματοληπτών.



Εικόνα 3-14: Χάρτης Αττικής και αποτύπωση των δύο κατοικιών (Google Earth)



Εικόνα 3-15: Κατόψεις του ισόγειου της μεζονέτας (αριστερά) και του διαμερίσματος (δεξιά) (χωρίς κλίμακα)

3.2.2 Στόχοι πειραματικών μετρήσεων

Οι κυρίαρχοι στόχοι των μετρήσεων ήταν οι ακόλουθοι:

1. Η καταγραφή και η σύγκριση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων διαφόρων αεροδυναμικών διαμέτρων, του διοξειδίου αλλά και του μονοξειδίου του άνθρακα στις δύο κατοικίες και συνεπώς η κατανόηση του κατά πόσο ο διαφορετικός βαθμός αστικοποίησης διαφοροποιεί τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις ρύπων στο εσωτερικό περιβάλλον.
2. Η μελέτη των δραστηριοτήτων που λαμβάνουν χώρα στα εσωτερικά περιβάλλοντα όπου είναι δυνατόν να επηρεάσουν τις συγκεντρώσεις των ρύπων.
3. Η διερεύνηση περιοδικοτήτων και τάσεων των χρονοσειρών των αιωρούμενων σωματιδίων μέσω της μελέτης και σύγκρισης των φασματικών πυκνοτήτων ισχύος (Power Spectral Density) μεταξύ αιωρούμενων σωματιδίων διαφόρων τάξεων μεγέθους.
4. Η εκτίμηση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων με τη χρήση του αριθμητικού κώδικα MIAQ.

3.2.3 Μετρούμενες παράμετροι και πρωτόκολλο μετρήσεων

Οι παράμετροι που μετρήθηκαν στη συγκεκριμένη πειραματική καμπάνια ήταν τα εξής αιωρούμενα σωματίδια: TSP, PM₁₀, PM_{2.5} και PM₁ όπου καταγράφηκαν με τη βοήθεια του μετρητή Osiris στο εσωτερικό περιβάλλον. Τα PM₁₀ μετρήθηκαν και στο εξωτερικό περιβάλλον σε ορισμένες περιπτώσεις με τον μετρητή Dust Trak. Επίσης μετρήθηκαν τα υπομετρικά σωματίδια με το φορητό μετρητή P-Trak (TSI, Model 8525) αλλά και το διοξείδιο και το μονοξείδιο του άνθρακα με το μετρητή photo acoustic multi-gas INNOVA, type 1312 (AirTech Instruments).

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τον Ιούλιο και τον Αύγουστο του 2011 (24 ημέρες δειγματοληψίας) στη μεζονέτα στο προάστιο και από τον Οκτώβριο έως και το Δεκέμβριο (21 ημέρες δειγματοληψίας) του 2011 στο διαμέρισμα κοντά στο κέντρο της Αθήνας.

Ο πειραματικός εξοπλισμός και στις δύο κατοικίες ήταν τοποθετημένος σε ύψος 0.8 μ από το δάπεδο στο σαλόνι των κατοικιών όπου ήταν ο χώρος όπου οι ένοικοι περνούσαν ένα μεγάλο ποσοστό του χρόνου τους. Από τους ενοίκους ζητήθηκε η συμπλήρωση ημερολογίου συμπληρώνοντας την ακριβή ώρα έναρξης, τη διάρκεια και τη λήξη οποιασδήποτε δραστηριότητας που λάμβανε χώρα στο εσωτερικό των κατοικιών όπως πχ μαγείρεμα, κάπνισμα ή καθάρισμα που ενδεχομένως να επιδρούσε στις συγκεντρώσεις των ρύπων. Τα ημερολόγια θα συντελούσαν στον εντοπισμό των ενδεχόμενων πηγών παραγωγής αιωρούμενων σωματιδίων. Το βήμα δειγματοληψίας για τα αιωρούμενα σωματίδια ήταν τα 15 λεπτά ενώ για το διοξείδιο και το μονοξείδιο του άνθρακα ήταν τα 5 λεπτά. Για την πληρέστερη επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής (interpolation) σε όλες τις μετρούμενες παραμέτρους με σκοπό τη δημιουργία χρονοσειρών με το ίδιο μέγεθος.

Το στατιστικό πακέτο SPSS (SPSS Inc PASW Statistics 18) και το Microsoft Office Excel 2007 χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία και στατιστική ανάλυση των δεδομένων. Η σύγκριση των συγκεντρώσεων στις δύο κατοικίες παρουσιάστηκε με τη βοήθεια θηκογραμμάτων (box-plots). Η αντιστοίχιση των ημερήσιων δραστηριοτήτων με μέγιστες τιμές πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ημερήσιων διαγραμμάτων διακύμανσης των συγκεντρώσεων. Επίσης το MATLAB (MATLAB R2008a) χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό διαγραμμάτων φασματικής πυκνότητας ισχύος. Τέλος ο αριθμητικός κώδικας MIAQ χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων.

3.3 Μεθοδολογία πρώτης πειραματικής μελέτης σε σχολεία της Αθήνας

Πέραν των μετρήσεων σε κατοικίες κρίθηκε σκόπιμο οι πειραματικές μετρήσεις να συνεχιστούν σε σχολεία καθώς και τα σχολικά κτίρια αποτελούν εξίσου σημαντικό τύπο κτιρίων μόνο που στην προκειμένη περίπτωση οι μετρήσεις αναβαθμίστηκαν σε σχέση με τις μετρήσεις που προηγήθηκαν στις κατοικίες καθώς συμπεριέλαβαν την ταυτόχρονη καταγραφή τόσο φυσικοχημικών όσο και μετεωρολογικών αλλά και βιολογικών παραμέτρων. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία της 1^{ης} πειραματικής καμπάνιας που έλαβε χώρα σε δύο σχολεία της Ανατολικής Αττικής. Αρχικά αναφέρονται εκτενώς οι λόγοι που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη κατηγορία κτιρίων για την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Ακολούθως παρατίθενται οι βασικοί στόχοι των πειραματικών μετρήσεων και στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά ο σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας, το πρωτόκολλο των μετρήσεων, οι μετρούμενες παράμετροι αλλά και πειραματικός εξοπλισμός.

3.3.1 Επιλογή θέσεων δειγματοληψίας

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή της εργασίας, στις αναπτυσσόμενες χώρες τα παιδιά ξοδεύουν ένα σημαντικό ποσοστό της ημέρας τους σε εσωτερικά περιβάλλοντα και κυρίως σε σχολικές αίθουσες (Silvers et al., 1994, Bai et al., 2007). Η μελέτη του εσωτερικού περιβάλλοντος σχολικών αιθουσών χρήζει περαιτέρω ανάλυσης εξαιτίας τόσο του ότι αφορά σε μεγάλο βαθμό μία από τις ευπαθέστερες ομάδες του πληθυσμού μας όσο και του ότι συσχετίζεται με εξαιρετικά δυσμενείς επιπτώσεις της υγείας και της παραγωγικότητας των παιδιών. Για τους λόγους αυτούς και με σκοπό να αποτυπωθεί λεπτομερέστερα η υπάρχουσα κατάσταση αναφορικά με την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος της Αττικής, επιλέχθηκαν δύο σχολικά κτίρια για την διεξαγωγή των μετρήσεων.

Περιγραφή των τόπων δειγματοληψίας

Επιλέχθηκαν δύο επαγγελματικά λύκεια (ΕΠΑΛ) γειτονικών περιοχών, λίγο πιο έξω από το κέντρο της Αθήνας (Εικόνα 3-16). Το πρώτο βρίσκεται στην αστική περιοχή της Καισαριανής (Κ) δίπλα σε ένα πάρκο ενώ δεν συνορεύει με δρόμους αυξημένης κυκλοφορίας (Εικόνα 3-17). Το κτίριο κατασκευάστηκε το 2001 ενώ τα παράθυρα φέρουν διπλά υαλοστάσια. Το δεύτερο σχολείο βρίσκεται στην περιοχή του Υμηττού (Υ) σε σημείο όπου η κίνηση στους περιμετρικούς δρόμους είναι μέτρια (Εικόνα 3-18). Το σχολείο κατασκευάστηκε το 1930 ενώ έχει μονά υαλοστάσια εγκατεστημένα. Τα σχολεία είναι φυσικώς αεριζόμενα ενώ και τα δύο χρησιμοποιούν σύστημα κεντρικής θέρμανσης με καυστήρα πετρελαίου.



Εικόνα 3-16: Χάρτης Αττικής και αποτύπωση των δύο σχολείων (Google Earth)



Εικόνα 3-17: ΕΠΑΛ Καισαριανής



Εικόνα 3-18: ΕΠΑΛ Υμηττού

3.3.2 Στόχοι πειραματικών μετρήσεων

Οι βασικότεροι στόχοι της πρώτης πειραματικής καμπάνιας στα σχολεία ήταν οι ακόλουθοι:

1. Η ταυτόχρονη μέτρηση αιωρούμενων σωματιδίων, μετεωρολογικών παραμέτρων και διοξειδίου του άνθρακα μαζί με τους αερομεταφερόμενους μύκητες. Αξίζει να σημειωθεί ότι διεθνώς έχουν πραγματοποιηθεί ελάχιστες έρευνες ταυτόχρονων μετρήσεων φυσικοχημικών και βιολογικών αέριων ρύπων.

2. Η αναφορά των επιπέδων των βασικότερων ρύπων του αέρα στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον αλλά και ο χαρακτηρισμός του εσωτερικού περιβάλλοντος των τάξεων σε σχέση με τα ποσοστά υπέρβασης των θεσμοθετημένων από διεθνείς οργανισμούς οριακών τιμών.
3. Η αποτίμηση των συσχετίσεων μεταξύ των μετρούμενων παραμέτρων και εφαρμογή τεχνικών πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης εστιάζοντας στις σχέσεις μεταξύ αιωρούμενων σωματιδίων και αερομεταφερόμενων μυκήτων.

3.3.1 Μετρούμενες παράμετροι και πρωτόκολλο μετρήσεων

Τα αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀, PM_{2.5} και PM₁ μετρήθηκαν στο εσωτερικό περιβάλλον των τάξεων με τη βοήθεια του δειγματολήπτη αιωρούμενων σωματιδίων OSIRIS (Turnkey Instruments Ltd). Στο εξωτερικό περιβάλλον τα PM₁₀ μετρήθηκαν με το μετρητή Dust Trak. Τα υπομετρικά σωματίδια μετρήθηκαν με το φορητό μετρητή P-Trak (TSI, Model 8525). Οι συγκεντρώσεις CO₂ καταγράφηκαν με τη βοήθεια του IAQ-CALC (TSI, model 8732). Στην πειραματική αυτή καμπάνια μετρήθηκαν επιπλέον η θερμοκρασία και η υγρασία με αισθητήρες Tinytag (Gemini data loggers TGP-4500). Οι αερομεταφερόμενοι μύκητες ανακτήθηκαν με τη χρήση του φορητού δειγματολήπτη αέρα Burkard (Burkard Manufacturing Co, Ltd. Hertfordshire, UK) πάνω σε τρυβλία με άγαρ. Επιπλέον οι αποικίες μυκήτων αναλύθηκαν σε επίπεδο γένους σε Πενικίλια (*Penicillium*), Κλαδοσπόρια (*Cladosporium*) και Ασπέργιλλους (*Aspergillus*)

Η περίοδος δειγματοληψίας ήταν από τον Ιανουάριο έως και τον Μάιο του 2011 ενώ οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν μία φορά κάθε δεύτερη εβδομάδα ανά σχολείο. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 16 ημέρες δειγματοληψίας και στα δύο σχολεία. Τα δείγματα αέρα συλλέχθηκαν από 8 διαφορετικές θέσεις σε κάθε σχολείο. Οι θέσεις αυτές θα σημειώνονται στο εξής με K1 έως K8 και Y1 έως Y8 για τα σχολεία την Καισαριανής και του Υμηττού αντίστοιχα. Οι θέσεις K8 και Y8 αναφέρονται σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εξωτερικό περιβάλλον (ταράτσα) κάθε σχολείου. Οι υπόλοιπες 7 θέσεις ήταν σχολικές τάξεις και εργαστήρια υπολογιστών. Συγκεκριμένες τάξεις ήταν κατειλημμένες από μαθητές κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Ο αριθμός των μαθητών πριν και στη διάρκεια των μετρήσεων, οι επικρατούντες συνθήκες όπως το άνοιγμα των παραθύρων αλλά και οι ενδεχόμενες μυρωδιές στην εκάστοτε αίθουσα καταγράφονταν σε ημερήσια ημερολόγια. Τα παράθυρα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων διατηρήθηκαν κλειστά. Όλες οι προαναφερθείσες μεταβλητές μετρήθηκαν με βήμα δειγματοληψίας το 1 sec και η διάρκεια δειγματοληψίας ανά θέση ήταν τα 10 min. Τέλος, οι δειγματολήπτες ήταν όλοι συγχρονισμένοι μεταξύ τους και ήταν τοποθετημένοι σε τραπέζια στο κέντρο της εκάστοτε αίθουσας σε ύψος 0.8 m από το δάπεδο.

Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το στατιστικό πακέτο SPSS (SPSS Inc PASW Statistics 18) αλλά και με τη βοήθεια του Microsoft Excel 2007. Οι συγκεντρώσεις των ρύπων ανά θέση μέτρησης και ανά ημέρα μελετήθηκαν μέσω των διαγραμμάτων χρονικών διακυμάνσεων ενώ η κατανομή των ρύπων παρουσιάστηκε σε θηκογράμματα (Box plots). Επίσης πραγματοποιήθηκε ανάλυση κύριων συνιστωσών (PCA) με σκοπό την ομαδοποίηση μεταβλητών με κοινά χαρακτηριστικά. Επιπλέον υπολογίστηκαν συντελεστές συσχέτισης Spearman μεταξύ όλων των πιθανών ζευγών μεταβλητών, με σκοπό να εξεταστεί το κατά πόσο υφίστανται διμεταβλητές συσχετίσεις. Τέλος πραγματοποιήθηκε απλή και πολλαπλή βηματική γραμμική παλινδρόμηση (stepwise linear regression) με σκοπό να ανιχνευτεί η αλληλοεπίδραση μεταξύ των μετρούμενων παραμέτρων. Η γραμμική παρεμβολή και η ανάλυση των χρονοσειρών πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του MATLAB 2008 (MATLAB R2008a).

3.4 Μεθοδολογία δεύτερης πειραματικής μελέτης σε σχολεία της Αττικής

Η τρίτη πειραματική καμπάνια διεξήχθη σε 9 σχολεία καλύπτοντας κατά βάση την περιοχή της Δυτικής Αττικής υιοθετώντας μια πιο ολιστική μεθοδολογική προσέγγιση κατά την οποία πέραν των αναλυτικών μετρήσεων των παραμέτρων ποιότητας του εσωτερικού αέρα στη συγκεκριμένη μελέτη ζητήθηκε και η συμμετοχή των μαθητών τόσο για την προσωπική τους αποτίμηση σε σχέση με το εσωτερικό περιβάλλον των τάξεων, την παράθεση συμπτωμάτων υγείας όσο και για τον έλεγχο της απόδοσής τους αναφορικά με τα αντίστοιχα επίπεδα ρύπων. Τέλος, συλλέχθηκαν και επεξεργάστηκαν δεδομένα ενεργειακών καταναλώσεων των σχολικών μονάδων. Η μεθοδολογία του δεύτερου τμήματος της μελέτης που αφορά τη μεθοδολογία της έρευνας των ερωτηματολογίων αναπτύσσεται εκτενώς στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 που ακολουθεί.

3.4.1 Επιλογή θέσεων δειγματοληψίας

Σχολικά κτίρια επιλέχθηκαν για την επίτευξη των τελικών και ολοκληρωμένων πειραματικών μετρήσεων.

Περιγραφή των τόπων δειγματοληψίας

Τα 8 από τα 9 σχολεία ανήκουν στο δήμο Αχαρνών, που βρίσκεται στη βορειοδυτική πλευρά του λεκανοπεδίου της Αττικής (Εικόνα 3-19). Η βόρεια πλευρά του Δήμου βρίσκεται στους πρόποδες του όρους της Πάρνηθας ενώ η νότια πλευρά του δήμου συνορεύει με τον οικιστικό ιστό της πόλης. Ο Δήμος Αχαρνών απέχει περίπου 20 km από το κέντρο της Αθήνας. Το ένατο σχολείο ανήκει στο δήμο Παλλήνης όπου απέχει και πάλι περίπου 20 km από το κέντρο της Αθήνας ωστόσο βρίσκεται στη ανατολική Αττική (Εικόνα 3-19). Το σχολείο αυτό (Εκπαιδευτήρια Κωστέα-Γείτονα-3) απέχει κατά πολύ από τον αστικό ιστό ενώ βρίσκεται σε μία κατά βάση αγροτική περιοχή με ιδιαίτερα αραιή δόμηση.

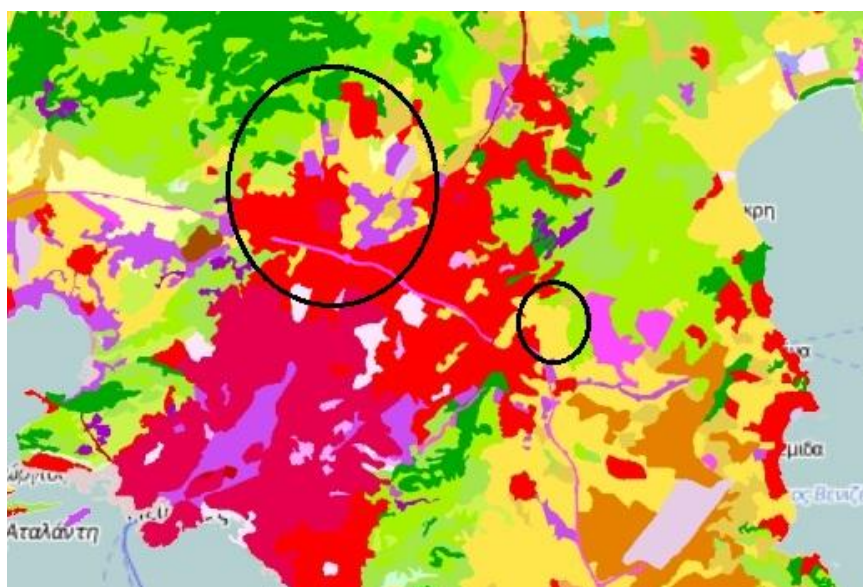


Εικόνα 3-19: Χάρτης Αττικής και αποτύπωση των σχολείων δειγματοληψίας

Στον ακόλουθο πίνακα αναφέρονται ορισμένα χαρακτηριστικά των σχολείων στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις όπως έτος κατασκευής, το συνολικό εμβαδό και το συνολικό πλήθος των μαθητών (Πίνακας 3-11). Επίσης στον πίνακα συνοψίζονται οι χαρακτηρισμοί της κάλυψης γης κατά CORINE 2000 για καθένα από τα σχολεία (Geodata 2010). Όπως φαίνεται τόσο από τον πίνακα όσο και από το διάγραμμα (Εικόνα 3-20), η πλειοψηφία των σχολείων (6 από τα 9) ανήκουν στην κατηγορία, με τεχνητές επιφάνειες, αστικές κατασκευές και ασυνεχή αστικό ιστό. Ένα από τα 9 σχολεία βρίσκεται σε συνεχή αστικές κατασκευές με συνεχή αστικό ιστό (12ο Δημοτικό σχολείο Αχαρνών-12), ενώ σε 2 από τα 9 σχολεία είναι σε αγροτικές περιοχές με ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις και σύμπλεγμα καλλιεργειών (Εκπαιδευτήριο Κωστέα Γείονα-3, 11ο Δημοτικό σχολείο Αχαρνών-11). Στους δύο μαύρους κύκλους σημειώνονται οι περιοχές που βρίσκονται τα 9 σχολεία. Στην Εικόνα 3-21 παρουσιάζεται το υπόμνημα κατανομών του χάρτη αυτού ενώ η μετάφραση του υπομνήματος παρατίθεται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 3-12).

Πίνακας 3-11: Χαρακτηριστικά των σχολείων στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις

Σχολείο	Κωδική ονομασία	Χαρακτηρισμός κάλυψης της γης κατά CORINE 2000	Έτος κατασκευής	Συνολικό Εμβαδόν Σχολείου (m ²)	Συνολικός Αριθμός Μαθητών
14ο Δημοτικό σχολείο Αχαρνών	14	Τεχνητές επιφάνειες/ Αστικές κατασκευές/ Ασυνεχής αστικός ιστός	2001	2266	254
1ο Δημοτικό σχολείο Θρακομακεδόνων	1	Τεχνητές επιφάνειες/ Αστικές κατασκευές/ Ασυνεχής αστικός ιστός	1978	1400	291
4ο Δημοτικό σχολείο Αχαρνών	4	Τεχνητές επιφάνειες/ Αστικές κατασκευές/ Ασυνεχής αστικός ιστός	1986	1763	292
Εκπαιδευτήρια Κωστέα-Γείτονα	3	1.Αγροτικές περιοχές/ Ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις Συμπλέγματα καλλιεργειών 2.Δάση και φυσικές περιοχές/ Θάμνοι και χορτολίβαδα/ Ζώνες αναγέννησης/υποβάθμισης δασικής βλάστησης	-	-	-
18ο Δημοτικό σχολείο Αχαρνών	18	Τεχνητές επιφάνειες/ Αστικές κατασκευές/ Ασυνεχής αστικός ιστός	1991	530	240
12ο Δημοτικό σχολείο Αχαρνών	12	Τεχνητές επιφάνειες/ Αστικές κατασκευές/ Συνεχής αστικός ιστός	1980	1500	371
2ο Δημοτικό σχολείο Θρακομακεδόνων	2	Τεχνητές επιφάνειες/ Αστικές κατασκευές/ Ασυνεχής αστικός ιστός	2003	2294	214
8ο Δημοτικό σχολείο Αχαρνών	8	Τεχνητές επιφάνειες/ Αστικές κατασκευές/ Ασυνεχής αστικός ιστός	1999	1820	278
11ο Δημοτικό σχολείο Αχαρνών	11	Αγροτικές περιοχές/ Ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις/ Συμπλέγματα καλλιεργειών	1994	1644	194



Εικόνα 3-20: Κατανομή κάλυψης γης κατά CORINE 2000 για την περιοχή της Αττικής



Εικόνα 3-21: Υπόμνημα κατανομών κάλυψης γης κατά CORINE 2000

Πίνακας 3-12: Μετάφραση υπομνήματος κάλυψης γης στα τρία επίπεδα

Επίπεδο 1	Επίπεδο 2	Επίπεδο 3
1. Τεχνητές επιφάνειες	1.1 Αστική οικοδόμηση	1.1.1 Συνεχής αστική οικοδόμηση 1.1.2 Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση
	1.2 Βιομηχανικές, εμπορικές ζώνες και δίκτυα επικοινωνίας	1.2.1 Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες 1.2.2 Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη 1.2.3 Ζώνες λιμένων
	1.3 Ορυχεία, χώροι απορρίψεως απορριμμάτων και χώροι οικοδόμησης	1.3.1 Χώροι εξόρυξης ορυκτών 1.3.2 Χώροι απόρριψης απορριμμάτων 1.3.3 Χώροι οικοδόμησης
	1.4 Τεχνητές, μη γεωργικές ζώνες πρασίνου	1.4.1 Περιοχές αστικού πρασίνου 1.4.2 Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής
2. Γεωργικές περιοχές	2.1 Αρόσιμη γη	2.1.1 Μη αρδεύσιμη-αρόσιμη γη 2.1.2 Μόνιμα αρδευόμενη γη 2.1.3 Ορυζώνες
	2.2 Μόνιμες καλλιέργειες	2.2.1 Αμπελώνες 2.2.2 Οπωροφόρα δέντρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς 2.2.3 Ελαιώνες
	2.3 Λιβάδια	2.3.1 Λιβάδια
	2.4 Ετερογενείς γεωργικές περιοχές	2.4.1 Ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες 2.4.2 Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας 2.4.3 Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης 2.4.4 Γεωργο-δασικές περιοχές
3. Δάση και ημι-φυσικές περιοχές	3.1 Δάση	3.1.1 Δάσος πλατύφυλλων 3.1.2 Δάσος κωνοφόρων 3.1.3 Μικτό δάσος
	3.2 Συνδυασμοί θαμνώδους και/ή ποώδους βλάστησης	3.2.1 Φυσικοί βοσκότοποι 3.2.2 Θάμνοι και χερσότοποι 3.2.3 Σκληροφυλλική βλάστηση 3.2.4 Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις
	3.3 Ανοιχτοί χώροι με λίγη ή καθόλου βλάστηση	3.3.1 Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές 3.3.2 Απογυμνωμένοι βράχοι 3.3.3 Εκτάσεις με αραιή βλάστηση

		3.3.4 Αποτεφρωμένες εκτάσεις
		3.3.5 Παγετώνες και αιώνιο χιόνι
4. Υγρές ζώνες	4.1 Εσωτερικές υγρές ζώνες	4.1.1 Βάλτοι στην ενδοχώρα 4.1.2 Τυφώνες
	4.2 Παραθαλάσσιες υγρές ζώνες	4.2.1 Παραθαλάσσιοι βάλτοι 4.2.2 Αλυκές 4.2.3 Παλιρροιακά επίπεδα
5. Υδάτινες επιφάνειες	5.1 Χερσαία ύδατα	5.1.1 Ροές υδάτων 5.1.2 Συλλογές υδάτων
		5.2.1 Παράκτιες λιμνοθάλασσες 5.2.2 Εκβολές ποταμών 5.2.3 Θάλασσα και ωκεανός
	5.2 Θαλάσσια ύδατα	

Στη συνέχεια παρατίθενται τα επιμέρους χαρακτηριστικά των αιθουσών όπως διαστάσεις, αριθμός μαθητών, είδος πίνακα και προσανατολισμός των τάξεων όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις σε καθένα από τα σχολεία (Πίνακας 3-13).

Πίνακας 3-13: Χαρακτηριστικά σχολικών αιθουσών

Κωδική ονομασία σχολείου	Εμβαδόν επιφάνειας τάξης (m ²)	Όγκος της τάξης (m ³)	Αριθμός μαθητών τάξης	Πίνακας	Προσανατολισμός τάξης
14	53	165	17	Κιμωλίας	Βόρειος
1	64	198	25	Κιμωλίας	Βορειοδυτικός
4	50	155	24	Κιμωλίας	Νοτιοδυτικός
3	46	137	25	Κιμωλίας	Δυτικός
18	47	138	18	Κιμωλίας	Νότιος
12	49	157	25	Μαρκαδόρου	Νότιος
2	50	162	25	Μαρκαδόρου	Ανατολικός
8	52	159	19	Μαρκαδόρου	Δυτικός
11	55	172	15	Κιμωλίας	Νότιος

Στις παρακάτω φωτογραφίες παρουσιάζονται οι τάξεις στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις όπου φαίνεται η δομή των θρανίων αλλά και η θέση τοποθέτησης των οργάνων (Εικόνα 3-22, έως Εικόνα 3-26).



Εικόνα 3-22: 1^ο (αριστερά) & 2^ο (δεξιά) Δημοτικό σχολείο Θρακομακεδόνων



Εικόνα 3-23: 4^ο (αριστερά) & 11^ο (δεξιά) Δημοτικό σχολείο Αχαρνών



Εικόνα 3-24: 11^ο (αριστερά) και 12^ο (δεξιά) Δημοτικό σχολείο Αχαρνών



Εικόνα 3-25: 14^ο & 18^ο Δημοτικό σχολείο Αχαρνών



Εικόνα 3-26: Εκπαιδευτήρια Κωστέα Γείτονα

3.4.2 Στόχοι πειραματικών μετρήσεων

Οι κυρίαρχοι στόχοι της παρούσας πειραματικής διαδικασίας είναι οι ακόλουθοι:

1. Καταγραφή και ανάλυση των επιπέδων αερισμού και ορισμένων από τους βασικότερους αέριους ρύπους όπως των CO, CO₂, VOCs αλλά και των αιωρούμενων σωματιδίων σε σχολικές αίθουσες με φυσικό αερισμό κατά τη διάρκεια της ανοιξιάτικης περιόδου, σε σχολεία της Αττικής με σκοπό τη δημιουργία βάσης δεδομένων αλλά και ολοκληρωμένου προφίλ των συγκεντρώσεων για την περίοδο μέτρησης. Επίσης, αξιολόγηση των επιπέδων των συγκεντρώσεων των ρύπων με βάση τα ποσοστά υπέρβασης των μέγιστων επιτρεπόμενων οριακών τιμών,
2. Μελέτη του κατά πόσο το εξωτερικό περιβάλλον επηρεάζει τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των ρύπων στο εσωτερικό περιβάλλον δια μέσω της μελέτης των λόγων των συγκεντρώσεων ρύπων στο εσωτερικό προς το εξωτερικό περιβάλλον (Indoor to Outdoor ratio-I/O),
3. Προσδιορισμός του βαθμού όπου η παρουσία των ατόμων, ο βαθμός αερισμού και η χρήση πινάκων κλωθιάς ή μαρκαδόρου είναι δυνατόν να επηρεάσουν τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των ρύπων στο εσωτερικό περιβάλλον,
4. Μελέτη τόσο της προσωπικής αποτίμησης της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος, και των συμπτωμάτων υγείας όσο και της παραγωγικότητας των μαθητών σε σχέση με τα αντίστοιχα επίπεδα ρύπων,
5. Θεωρητική εκτίμηση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ με τη χρήση αριθμητικού μοντέλου.

3.4.3 Μετρούμενες παράμετροι

Σημαντικός αριθμός ρύπων μετρήθηκαν τόσο στο εσωτερικό όσο και το εξωτερικό περιβάλλον των σχολικών αιθουσών. Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη πειραματική καμπάνια ήταν τα εξής: Για την καταγραφή των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀, PM₅, PM_{2.5}, PM₁, PM_{0.5} στα εσωτερικά περιβάλλοντα των τάξεων χρησιμοποιήθηκε το Lighthouse. Αντίστοιχα για την καταγραφή των TSP, PM₁₀, PM_{2.5} και

PM₁ στο εξωτερικό περιβάλλον χρησιμοποιήθηκε ο μετρητής OSIRIS τοποθετημένος σε κλωβό. Τα υπομετρικά σωματίδια στις τάξεις μετρήθηκαν με το φορητό μετρητή P-Trak. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι σε ορισμένες από τις ημέρες δειγματοληψίας σύμφωνα με τη διαθεσιμότητα των οργάνων τα αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀, PM_{2.5} και PM₁ μετρήθηκαν τόσο στο εσωτερικό όσο και το εξωτερικό περιβάλλον με τη βαρυμετρική μέθοδο δειγματοληψίας στην οποία χρησιμοποιήθηκαν οι αντλίες Derenda για τη συλλογή δείγματος αέρα σε ειδικά φίλτρα τα οποία στη συνέχεια υποβάλλονταν σε χημική ανάλυση. Για την αποτύπωση των επιπέδων CO, CO₂ και VOCs στις τάξεις χρησιμοποιήθηκε το MultiRAE. Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία τόσο στα εσωτερικά περιβάλλοντα των τάξεων όσο και στο εξωτερικό περιβάλλον καταγράφονταν με τη βοήθεια των θερμουγραμέτρων TinyTag. Οι δείκτες θερμικής άνεσης υπολογίζονταν με τη βοήθεια του οργάνου INNOVA 1221 και τα επίπεδα φωτισμού καταγράφονταν με το μετρητή TES 1335.

Μετρήσεις αερισμού

Ο ρυθμός πτώσης του αέριου ιχνηθέτη για τον υπολογισμό του ρυθμού αερισμού των σχολικών αιθουσών πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του οργάνου INNOVA 1312. Στην πλειοψηφία των μετρήσεων αερισμού με τη χρήση της μεθόδου του ρυθμού πτώσης του αέριου ιχνηθέτη (Tracer gas decay method) γίνονται ορισμένες παραδοχές σε σχέση με το χώρο (ζώνη) που πραγματοποιούνται οι μετρήσεις αλλά και σε σχέση με τις ροές του αέρα. Η βασική παραδοχή είναι ότι ο υπό μελέτη χώρος μπορεί να θεωρηθεί ως καλά αναμεμιγμένος χώρος (well mixed) ως προς τον αέριο ιχνηθέτη (Sherman and Dickerhoff 1989). Στην πράξη, η ιδανική συνθήκη της 'τέλεια' αναμεμιγμένης ζώνης είναι σπάνιο να ισχύει, ωστόσο έχει παρατηρηθεί ότι μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά με τη χρήση ανεμιστήρων. Στη συγκεκριμένη πειραματική καμπάνια χρησιμοποιήθηκε ένας ανεμιστήρας για την εξασφάλιση της ανάμειξης του αέριου ιχνηθέτη σε όλα τα σημεία του χώρου, ο οποίος ήταν τοποθετημένος μακριά από σημεία που θα μπορούσαν να αλλάξουν τις ροές μεταξύ των ζωνών (πχ κοντά σε κάποιο παράθυρο ή σε κάποιο σημείο με έντονη διαρροή αέρα) (Sherman and Dickerhoff 1989).

Στη διάρκεια κάθε ημέρας δειγματοληψίας διάφορα ανοίγματα παραθύρων έλαβαν χώρα σε καθένα από τα σχολεία τα οποία κυμάνθηκαν από πλήρως κλειστά (Διείσδυση- infiltration rates), λίγο ανοιχτά, μισάνοιχτα και εντελώς ανοιχτά. Για τον υπολογισμό του ρυθμού αερισμού για καθένα από τα ανοίγματα, στο τέλος κάθε ημέρας μέτρησης τα συγκεκριμένα ανοίγματα των παραθύρων επαναλαμβάνονταν και οι μετρήσεις αερισμού λάμβαναν χώρα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ρυθμού πτώσης του αέριου ιχνηθέτη που προαναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1 της μεθοδολογίας. Η διαδικασία της μέτρησης του αερισμού ήταν η ίδια για όλα τα σενάρια ανοιγμάτων των παραθύρων. Ο αέριος ιχνηθέτης απελευθερωνόταν σε

διάφορα σημεία στην τάξη και για την καλή ανάμειξη του αέρα λειτουργούσε ένας ανεμιστήρας καθ' όλη τη διάρκεια της μέτρησης υποθέτοντας σταθερό ρυθμό ροής από το εξωτερικό περιβάλλον. Με σκοπό να επαληθευτεί ότι έχει επιτευχθεί καλή διανομή του αερίου, ο ρυθμός πτώσης του μετρήθηκε σε 5 διαφορετικά σημεία στο εσωτερικό των τάξεων και στο τέλος η μέση τιμή των τιμών από τις θέσεις αυτές λαμβάνονταν υπ' όψη στους υπολογισμούς. Ο λόγος που οι μετρήσεις αυτές δεν διενεργούνταν στη διάρκεια της ημέρας ήταν επειδή η μέθοδος αερίου ιχνηθέτη προϋποθέτει την έγχυση του αερίου SF₆, αέριο το οποίο παρόλο που δεν είναι τοξικό, η έγχυσή του θα μπορούσε να προκαλέσει την αρνητική αντίδραση των μαθητών. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η παρουσία των μαθητών θα μπορούσε να επιδράσει την εσωτερική ανάμειξη του αέρα είτε προκαλώντας επιπλέον ανάμειξη εξ' αιτίας των ροών μεταφοράς είτε μπλοκάροντας την ανάμειξη καθώς ο αέρας είναι δυνατόν να συσσωρεύεται στο ταβάνι των τάξεων. Το γεγονός αυτό αποτελεί περιορισμό της συγκεκριμένης μεθοδολογίας ωστόσο έγινε η παραδοχή ότι το συγκεκριμένο σφάλμα είναι της τάξης των 5-10% και δεν λήφθηκε υπόψη. Επίσης οι διαφορές στα ύψη των τάξεων θα μπορούσαν να έχουν επίδραση στα αποτελέσματα, ωστόσο όλες οι τάξεις είχαν παρόμοια ύψη που κυμάνθηκαν από 3 έως και 3.2 m. Ακόμα, το γεγονός ότι οι μετρήσεις αερισμού υπολογίστηκαν σε διαφορετική ώρα μέσα στη μέρα από τις πραγματικές μετρήσεις θα μπορούσε να οδηγήσει σε ανακριβή υπολογισμό των πραγματικών τιμών αερισμού. Βρέθηκε ότι η θερμοκρασία συνήθως αυξανόταν κατά 2 °C από την έναρξη μέχρι τη λήξη των μετρήσεων ενώ η σχετική υγρασία σημείωνε μείωση κατά περίπου 10 %. Η ταχύτητα του αέρα άλλαζε καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Το εισερχόμενο σφάλμα εξ' αιτίας των παραπάνω παραμέτρων υπολογίστηκε να βρίσκεται μεταξύ 5 και 8%. Στα σχολεία όπου οι μετρήσεις διήρκεσαν περισσότερο από μία ημέρα, οι μετρήσεις αερισμού επαναλαμβάνονταν 3 φορές σε 3 διαφορετικές ημέρες. Η μέση τιμή αερισμού των τριών μετρήσεων ανά διαφορετικό σενάριο ανοίγματος λαμβάνονταν υπόψη τελικά ως μία ενδεικτική τιμή για κάθε σχολείο. Επιπλέον σε όλες τις τάξεις μονόπλευρος αερισμός (Single-sided) έλαβε χώρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι με εξαίρεση τα σχολεία 12 και 18 όπου η πόρτα των τάξεων συνέδεε την τάξη κατευθείαν με το εξωτερικό περιβάλλον, για τα υπόλοιπα σχολεία μεσολαβούσε ένας εσωτερικός διάδρομος. Επιπρόσθετα, οι πόρτες και τα παράθυρα του διαδρόμου έζω από τις τάξεις στη διάρκεια των μετρήσεων αερισμού διατηρήθηκαν στο ίδιο άνοιγμα όπως και στη διάρκεια της ημέρας με σκοπό την πραγματοποίηση των μετρήσεων υπό τις ίδιες συνθήκες κατά το μέγιστο δυνατό με σκοπό τον περιορισμό του σφάλματος. Τέλος, πέραν των ανοιγμάτων των παραθύρων και της πόρτας, δεν υπήρξαν άλλα διαθέσιμα ανοίγματα (πχ μικρά ανοίγματα εξαερισμού-vents).

Στον πίνακα που ακολουθεί, συνοψίζονται (Πίνακας 3-14) οι ανοιγόμενες επιφάνειες για το σενάριο των 'πλήρως ανοιχτών' παραθύρων αλλά και τα εμβαδά των δαπέδων κάθε τάξης.

Σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα, τα σχολεία 14, 1, 4 και 12 είχαν τη μεγαλύτερη επιφάνεια ανοίγματος που κυμάνθηκε από 3.5 έως 4 m². Στα σχολεία 3, 18, 2 και 8 οι ανοιγόμενες επιφάνειες κυμάνθηκαν από 1.2 έως 2.9 m² ενώ στο σχολείο 11 η ανοιγόμενη επιφάνεια ήταν μόνο 0.45 m².

Πίνακας 3-14: Ανοιγόμενη επιφάνεια στο σενάριο αερισμού "πλήρως ανοιχτά" παράθυρα & εμβαδό της επιφάνειας κάθε τάξης ανά σχολείο

Σχολεία	Ανοιγόμενη επιφάνεια παραθύρου στο σενάριο "πλήρως ανοιχτά παράθυρα" (m ²)	Εμβαδόν της τάξης (m ²)
14	3.50	53
1	3.90	64
4	4.60	50
3	2.40	46
18	1.70	47
12	4.30	49
2	2.90	50
8	1.20	52
11	0.45	55

Συνοψίζοντας, οι ιδιότητες που θα πρέπει να πληρούνται σε καθεμιά από τις τάξεις που πραγματοποιούνται οι μετρήσεις αερισμού με τη χρήση της μεθόδου του αερίου ιχνηθέτη είναι οι εξής: 1. Από άποψη ομοιογένειας, οι ιδιότητες του αερίου SF₆ θα πρέπει να είναι οι ίδιες σε κάθε σημείο της ζώνης. 2. Η ζώνη θα πρέπει να είναι απομονωμένη χωρίς περεταίρω εισροές αερίων ιχνηθετών, 3. Τέλος, η ζώνη θα πρέπει να είναι καλώς αναμειγμένη κάτι το οποίο σημαίνει ότι το εκλυόμενο αέριο θα πρέπει να είναι ακαριαία διασκορπιζόμενο στη ζώνη. Παρόλα αυτά, στην πραγματικότητα ο αέρας απαιτεί πεπερασμένο χρόνο ώστε να αναμειχθεί καλά (Sherman 1990). Αν δεν πληρούνται οι προαναφερόμενες προϋποθέσεις, υπάρχει πιθανότητα εισαγωγής σφάλματος και ανακρίβειών στις μετρήσεις. Οι Santamouris et al., 2008 υπολόγισαν ότι το σφάλμα που οφείλεται στην ανομοιογένεια του αέρα είναι μεταξύ 4-7%. Για να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα ακρίβειας των μετρήσεων δόθηκε έμφαση ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτούμενες προδιαγραφές. στην παρούσα μελέτη δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή Στη συγκεκριμένη μελέτη έγινε ιδιαίτερη προσπάθεια ώστε να πληρούνται οι απαιτούμενες ιδιότητες της ζώνης και να μειωθούν οι ανακρίβειες.

3.4.4 Σχεδιασμός & πρωτόκολλο μετρήσεων

Στην έρευνα συνολικά συμμετείχαν 9 δημοτικά σχολεία όπου ανά σχολείο διενεργούνταν ταυτόχρονες μετρήσεις σε μία τάξη της ΣΤ' Δημοτικού και στο εξωτερικό περιβάλλον. Η διάρκεια δειγματοληψίας ανά σχολείο ήταν από μία έως πέντε μέρες ανάλογα με τη διαθεσιμότητα του κάθε σχολείου. Για την ομαλή διεξαγωγή των μετρήσεων διενεργήθηκαν αλληπάλληλες προκαταρκτικές ενέργειες που αφορούσαν από τη δημιουργία επαφών με τις αρμόδιες αρχές μέχρι τον έλεγχο σωστής λειτουργίας των οργάνων μέτρησης. Οι ενέργειες

αυτές πραγματοποιήθηκαν για διάστημα περίπου τριών μηνών (Ιανουάριο με Μάρτιο 2013), ακριβώς πριν την έναρξη της περιόδου δειγματοληψίας.

Περίοδος δειγματοληψίας

Καθότι η διαθέσιμη περίοδος δειγματοληψίας ήταν μόνο 6 εβδομάδες η επιλογή του πλήθους των σχολείων αλλά και του αριθμού ημερών δειγματοληψίας ανά σχολείο έπρεπε να γίνει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Ένα μεγάλο δείγμα σχολείων με αυξημένο αριθμό ημερών δειγματοληψίας ανά σχολείο θα αποτελούσαν το ιδανικότερο σενάριο για τη δημιουργία μιας ικανοποιητικής βάσης δεδομένων. Ωστόσο καθότι το πρόγραμμα των μετρήσεων έπρεπε να προκύψει σε συνεργασία με όλα τα σχολεία των οποίων η διαθεσιμότητα ήταν περιορισμένη, πραγματοποιήθηκε η καλύτερη δυνατή προσαρμογή με το μέγιστο δυνατό αριθμό σχολείων αλλά και αριθμό ημερών δειγματοληψίας ανά σχολείο.

Οι πειραματικές μετρήσεις διήρκησαν δύο ανοιξιάτικους μήνες, από την 1^η Απριλίου έως και την 31^η Μαΐου του 2013. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 32 ημέρες δειγματοληψίας στα 9 φυσικώς αεριζόμενα Δημοτικά σχολεία και οι ημέρες δειγματοληψίας κυμαίνονταν από μία έως πέντε ημέρες ανά σχολείο, ανάλογα με τη διαθεσιμότητά τους. Την περίοδο των μετρήσεων (Mid-season) δεν λειτούργησε ούτε θέρμανση αλλά ούτε και ψύξη (free-running mode) στις σχολικές αίθουσες και για μεγάλο ποσοστό των ημερών μέτρησης και κυρίως στο δεύτερο μισό της πειραματικής περιόδου, τα παράθυρα ήταν ανοιχτά. Στον πίνακα που ακολουθεί παραθέτονται αναλυτικά τα σχολεία στα οποία έγιναν οι μετρήσεις και οι αντίστοιχες ημέρες δειγματοληψίας αυτών (Πίνακας 3-15).

Πίνακας 3-15: Σχολεία και ημέρες δειγματοληψίας

Κωδική ονομασία σχολείου	Ημερομηνίες μέτρησης	Πλήθος ημερών μέτρησης ανά σχολείο
14	1-5/4/13	5
1	8-12/4/13	5
4	14-18&24/4/13	5
3	19&22/4/13	2
18	23/4/13	1
12	13-17/5/13	5
2	20-24/5/13	5
8	27-29/5/13	3
11	31/5/13	1

Πρωτόκολλο μετρήσεων

Οι μετρήσεις σε κάθε σχολείο ξεκινούσαν 40 λεπτά πριν την άφιξη των μαθητών στις τάξεις (περίπου στις 7:30 π.μ.) και ολοκληρώνονταν περίπου στις 14:40 μ.μ, 40 λεπτά μετά την αναχώρηση των μαθητών ώστε να εξεταστεί το κατά πόσο η παρουσία και η δραστηριότητά τους στις αίθουσες επιδρούν στις συγκεντρώσεις των ρύπων. Η συνολική διάρκεια δειγματοληψίας ανά ημέρα μέτρησης ήταν περίπου 7 ώρες και στο σύνολό τους οι ώρες δειγματοληψίας ξεπέρασαν τις 200. Το βήμα μέτρησης για καθένα από τους αυτόματους δειγματολήπτες ήταν τα 5 min. Όπως προαναφέρθηκε οι μετρήσεις έλαβαν χώρα σε μία σχολική τάξη ανά σχολείο και τα όργανα ήταν τοποθετημένα στο 1.1 m από το δάπεδο σύμφωνα με το πρότυπο ISO 7726:1998 για καθημερινούς χρήστες. Επίσης τα όργανα ήταν τοποθετημένα όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο κέντρο της τάξης. Τέλος, οι δραστηριότητες που ενδεχομένως να επιδρούσαν στις συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων όπως η παρουσία και το πλήθος των μαθητών, το άνοιγμα των παραθύρων κτλ. σημειώνονταν σε ημερήσια ημερολόγια σημειώνοντας της ακριβή ώρα έναρξης, διάρκεια και ώρα λήξης της δραστηριότητας.

Για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων της δεύτερης πειραματικής καμπάνιας σε σχολεία χρησιμοποιήθηκαν το στατιστικό πακέτο SPSS (SPSS Inc PASW Statistics 19), το Microsoft Office Excel 2007 και το MATLAB 2008 (MATLAB R2008a). Συγκεκριμένα, τα επίπεδα διείσδυσης του αέρα και αερισμού ανά σχολείο μελετήθηκαν με τη βοήθεια ραβδογραμμάτων και θηκογραμμάτων αντίστοιχα. Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των εσωτερικών αέριων ρύπων ανά σχολείο αναπαραστάθηκαν γραφικά με τη βοήθεια θηκογραμμάτων ενώ υπολογίστηκαν οι περιγραφικές στατιστικές παράμετροι όλων των μετρούμενων μεταβλητών. Με σκοπό την ανίχνευση περιοδικοτήτων των χρονοσειρών διενεργήθηκε φασματική ανάλυση για ορισμένες από τις παραμέτρους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΩΝ

Το κεφάλαιο που ακολουθεί αναφέρεται στην δεύτερη πειραματική καμπάνια που έλαβε χώρα σε 9 σχολεία της Αττικής. Πέραν των πειραματικών μετρήσεων η μεθοδολογία των οποίων αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 0 που προηγήθηκε, η συγκεκριμένη μελέτη συμπεριέλαβε και ένα δεύτερο μέρος Β' στο οποίο απαιτήθηκε η συμμετοχή των μαθητών στην έρευνα. Συγκεκριμένα, σε πρώτη φάση ζητήθηκε από τους μαθητές η συμπλήρωση ενός ερωτηματολογίου αναφορικά με την αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος αλλά και την αναφορά συγκεκριμένων συμπτωμάτων υγείας. Σε δεύτερη φάση οι μαθητές κλήθηκαν να συμπληρώσουν συγκεκριμένα τεστ απόδοσης-παραγωγικότητας. Η συμπλήρωση τόσο των ερωτηματολογίων όσο και των τεστ παραγωγικότητας διενεργήθηκαν ταυτόχρονα με τις πειραματικές μετρήσεις. Τέλος, με σκοπό τη δημιουργία βάσης των ενεργειακών καταναλώσεων των σχολείων συλλέχθηκαν λογαριασμοί της ΔΕΗ και του πετρελαίου θέρμανσης από τους υπεύθυνους διεξαγωγής της έρευνας και σε συνεργασία με τους διευθυντές των σχολείων.

4.1 Στόχοι της έρευνας ερωτηματολογίων

Συμπληρωματικά των στόχων που τέθηκαν στην παράγραφο 3.4.2 για τη δεύτερη πειραματική διαδικασία στα σχολικά κτίρια, λαμβάνοντας υπόψη το δεύτερο τμήμα της έρευνας στο οποίο ενσωματώθηκε η έρευνα ερωτηματολογίων, ο έλεγχος παραγωγικότητας και η αποτίμηση των ενεργειακών καταναλώσεων, περαιτέρω στόχοι της έρευνας ήταν οι ακόλουθοι:

1. Η μελέτη της προσωπικής αντίληψης της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος από τους μαθητές και ο καθορισμός των βασικότερων παραμέτρων που καθορίζουν την προσωπική αποτίμηση των συνθηκών με τη βοήθεια ανάλυσης συστάδων (cluster analysis),
2. Ο προσδιορισμός των ενδεχόμενων συσχετίσεων μεταξύ των απαντήσεων των μαθητών σχετικά με την υποκειμενική αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος και των αντίστοιχων μετρήσεων αλλά και μεταξύ των συμπτωμάτων υγείας και των επιπέδων των αντίστοιχων μετρούμενων αέριων ρύπων,
3. Η διερεύνηση ενδεχόμενων συσχετίσεων μεταξύ της απόδοσης των μαθητών με τα επίπεδα αερισμού και διοξειδίου του άνθρακα και
4. Η αξιολόγηση των επιπέδων των ενεργειακών καταναλώσεων σε σχέση με ευρισκόμενα αντίστοιχων ερευνών και επιπλέον η διερεύνηση πιθανών συσχετίσεων μεταξύ των ενεργειακών καταναλώσεων με τους αέριους ρύπους.

4.2 Υποκειμενική αξιολόγηση της ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος

Η αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος από τους μαθητές της τάξης έγινε με τη βοήθεια ερωτηματολογίων που δημιουργήθηκαν με βάση οδηγούς της ASHRAE και του κέντρου για το κτιριακό περιβάλλον CBE (2008) (CBE's Occupant Indoor Environmental Quality Survey). Το ερωτηματολόγιο της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος ήταν ανώνυμο και αποτελείτο από 4 μέρη: την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης, της ποιότητας αέρα, του φωτισμού και της ακουστικής (Παράρτημα 7.3). Όλες οι ερωτήσεις αναφέρονταν στην αξιολόγηση των συνθηκών εκείνη τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή ('right-now survey') της μελέτης με σκοπό τη σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρούμενες παραμέτρους. Συνολικά συγκεντρώθηκαν 665 ερωτηματολόγια όπου το συνολικό ποσοστό ανταπόκρισης των μαθητών ήταν 99%. Στην αρχή κάθε ερωτηματολογίου οι μαθητές κλήθηκαν να απαντήσουν σε δύο προσωπικές ερωτήσεις για την ηλικία και το φύλλο τους. Η μορφή της πλειοψηφίας των απαντήσεων στις ερωτήσεις αξιολόγησης ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος ήταν σύμφωνα με την 7-βάθμια κλίματα όπως αναφέρεται στο παράρτημα Ε του οδηγού CBE Occupant survey της ASHRAE 2010 όπου η απάντηση 0 αντιστοιχούσε σε θετική αξιολόγηση ενώ η απάντηση 6 σε αρνητική. Με σκοπό την ενθάρρυνση των μαθητών για τη συμμετοχή στην έρευνα δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη μορφή παρουσίασης του ερωτηματολογίου ώστε να είναι πιο φιλικό προς αυτούς. Συγκεκριμένα η θετική αξιολόγηση ήταν σημειωμένη με πράσινο χρώμα και με ένα χαμογελαστό σκίτσο ενώ η αρνητική απάντηση ήταν σημειωμένη με κόκκινο χρώμα και με ένα λυπημένο αντίστοιχα σκίτσο (Παράρτημα 7.3). Κάθε κατηγορία ερωτήσεων διαχωριζόταν από τις υπόλοιπες με χρωματικό πλαίσιο και είχε συγκεκριμένο τίτλο.

Αναλυτικότερα, το πρώτο μέρος της θερμικής άνεσης περιελάμβανε τρεις ερωτήσεις. Στην πρώτη ερώτηση οι μαθητές κλήθηκαν να αξιολογήσουν τη θερμική τους αίσθηση (Thermal Sensation). Υπάρχουν διάφορες κλίμακες θερμικής άνεσης. Για παράδειγμα υπάρχει η 7-βάθμια κλίμακα Bedford (much too cool, too cool, comfortably cool, comfortable, comfortably warm, too warm, much warm) που χρησιμοποιείται κυρίως στη Βρετανία, όπου συνδυάζοντας τις αρχές της θερμικής αίσθησης και άνεσης είναι δυνατόν να φανεί χρήσιμη σε μελέτες που επιθυμείται η παρουσίαση μόνο μίας ερώτησης στους χρήστες του κτιρίου. Στη συγκεκριμένη έρευνα προτιμήθηκε η 7-βάθμια κλίμακα ASHRAE (cold, cool, slightly cool, neutral, slightly warm, warm, hot) έναντι της Bedford καθώς θεωρήθηκε ότι θα είναι πιο κατανοητή από τους μαθητές (Teli et al. 2013, ASHRAE 55, 2005). Το γεγονός ότι η θερμική αίσθηση δεν δίνει πληροφορίες σχετικές με τη θερμοκρασία προτίμησης των χρηστών του κτιρίου, συνήθως οι μελέτες πεδίου της ASHRAE συνοδεύουν την ερώτηση της θερμικής αίσθησης με ακόμα μία ερώτηση σχετικά με τη θερμική προτίμηση (Thermal Preference) των

ατόμων που συμμετέχουν στην έρευνα για την άντληση μεγαλύτερου όγκου πληροφοριών (Humphreys 1977). Όσον αφορά τις θερμικές προτιμήσεις, δόθηκε στους μαθητές τριτοβάθμια κλίμακα θερμικών προτιμήσεων του McIntyre (warmer, no change, cooler). Επιπλέον η ερώτηση σχετικά με τη θερμική αίσθηση δεν συνδέεται άμεσα με την άνεση, την ικανοποίηση και την αποδοχή και για το λόγο αυτό ερωτήσεις για τις συγκεκριμένες κατηγορίες ρωτώνται ξεχωριστά. Η θερμική αποδοχή μελετάται σπανιότερα από τη θερμική αίσθηση και άνεση παρόλο που θεωρείται απαραίτητη και καίρια ερώτηση. Συνήθως δύναται με μορφή δυαδικής απάντησης (acceptable, unacceptable thermal environment) αλλά πολλές φορές συναντάται και η συνεχόμενη κλίμακα που επιτρέπει πιο ισχυρή στατιστική ανάλυση (clearly acceptable, just acceptable, just unacceptable, clearly unacceptable) (de Dear and Brager 1998). Στην παρούσα μελέτη προτιμήθηκε η δυαδική μορφή απάντησης της θερμικής αποδοχής καθώς κρίθηκε και πάλι απλούστερη για τους μαθητές.

Το δεύτερο μέρος του ερωτηματολογίου αφορούσε την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα. Στο μέρος αυτό υπήρχαν τέσσερις ερωτήσεις. Η πρώτη ερώτηση συσχετιζόταν με το βαθμό ικανοποίησης των μαθητών με την ποιότητα του αέρα των τάξεων και η δεύτερη ερώτηση είχε να κάνει με το αν οι μαθητές πιστεύουν ότι η ποιότητα του αέρα βοηθά ή εμποδίζει την απόδοσή τους. Επίσης υπήρχε ακόμα μία ερώτηση σχετικά με το χαρακτηρισμό του ρεύματος του αέρα των τάξεων της οποίας η κλίμακα ήταν από το -3 έως το +3, όπου το -3 αντιστοιχούσε σε στάσιμο αέρα ενώ το +3 σε ανεπιθύμητο ρεύμα. Η απάντηση 0 αντιστοιχούσε στις ιδανικές συνθήκες. Οι τελευταίες δύο ερωτήσεις του δεύτερου μέρους είχαν να κάνουν με το χαρακτηρισμό του αέρα ως προς τη φρεσκάδα του και τις μυρωδιές. Οι απαντήσεις των δύο αυτών ερωτήσεων δίνονταν και πάλι σε 7-βάθμια κλίμακα. Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονιστεί ότι η προσωπική αποτίμηση της ποιότητας του αέρα είναι δυνατόν να συμβάλει στον εντοπισμό προβλημάτων στα κτίρια. Επίσης τέτοιου είδους έρευνες ερωτηματολογίων είναι δυνατόν να προσδιορίσουν συνθήκες στις οποίες η ποιότητα του αέρα είναι αποδεκτή όπου τα δεδομένα αυτών των συνθηκών μπορούν να συσχετιστούν με τις περιβαλλοντικές μετρήσεις. Ωστόσο όμως πρέπει να σημειωθεί ότι ικανοποιημένοι χρήστες ενός κτιρίου δεν διασφαλίζουν αποδεκτή ποιότητα του εσωτερικού αέρα καθώς υπάρχουν προσμείξεις του αέρα οι οποίες δεν γίνονται αντιληπτές οι οποίες είναι δυνατόν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα υγείας.

Το τρίτο μέρος του ερωτηματολογίου συσχετιζόταν με τη οπτική άνεση των τάξεων και περιελάμβανε δύο ερωτήσεις. Η πρώτη αφορούσε το χαρακτηρισμό του φωτισμού της τάξης τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή και η δεύτερη είχε να κάνει με το αν κατά τους μαθητές ο φωτισμός βοηθά ή εμποδίζει την απόδοσή τους.

Στο τέταρτο μέρος του ερωτηματολογίου οι μαθητές κλήθηκαν να απαντήσουν το βαθμό ικανοποίησής τους από την ακουστική της τάξης τους αλλά και το αν πιστεύουν ότι η ακουστική βοηθά ή εμποδίζει την απόδοσή τους. Όπως προαναφέρθηκε, η πλειοψηφία των απαντήσεων δίνονταν σε 7-βάθμια κλίμακα από το 0 έως το 6 όπου το 0 αντιστοιχούσε σε θετική αξιολόγηση ενώ το 6 σε αρνητική αξιολόγηση της εκάστοτε ερώτησης.

Στο επόμενο τμήμα του ερωτηματολογίου δόθηκαν δέκα συγκεκριμένα συμπτώματα υγείας (συνδρόμου άρρωστου κτιρίου, SBS) στα οποία οι μαθητές κλήθηκαν να απαντήσουν θετικά ή αρνητικά ανάλογα με το αν εμφάνιζαν κάποιο από αυτά. Τα συγκεκριμένα συμπτώματα αντλήθηκαν από το ερωτηματολόγιο MM Questionnaire (Andersson 1993) αλλά και από το Εθνικό Ινστιτούτο Επαγγελματικής Ασφάλειας και Υγείας (NIOSH 1997). Στην τελευταία ερώτηση οι μαθητές έκριναν το αν οι συνθήκες της τάξης ενθάρρυναν ή όχι την απόδοσή τους. Και πάλι οι απαντήσεις δίνονταν στη μορφή της 7-βάθμιας κλίμακας.

Τα ερωτηματολόγια μοιράζονταν στους μαθητές μία φορά την ημέρα περίπου την ίδια ώρα (10:15), 15 min μετά την είσοδο των μαθητών στις τάξεις μετά από το πρώτο διάλειμμα της ημέρας διάρκειας 20 min ενώ συνολικά δίνονταν στους μαθητές 10 min για τη συμπλήρωσή του. Μετά τη συλλογή των ερωτηματολογίων πραγματοποιήθηκε ποιοτικός έλεγχος των απαντήσεων και επιπλέον υπολογίστηκε και το ποσοστό συμμετοχής των μαθητών στην έρευνα. Στην περίπτωση κενών απαντήσεων όλη η αντίστοιχη σειρά των απαντήσεων από το συγκεκριμένο μαθητή διαγράφονταν. Μετά την απομάκρυνση των κενών απαντήσεων το ποσοστό των πλήρως συμπληρωμένων ερωτηματολογίων ήταν το 98% του συνόλου.

4.3 Έλεγχος παραγωγικότητας

Για την αξιολόγηση της απόδοσης των μαθητών κάθε ημέρα δειγματοληψίας πέραν του ερωτηματολογίου υποκειμενικής αξιολόγησης της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος, δίνονταν στους μαθητές να συμπληρώσουν συγκεκριμένα τεστ απόδοσης-παραγωγικότητας καθώς σε πρόσφατες επιστημονικές μελέτες υπάρχουν ενδείξεις ότι η μειωμένη απόδοση των μαθητών ενδεχομένως να οφείλεται και στα αυξημένα επίπεδα ρύπων στον εσωτερικό αέρα των τάξεων (Wargocki et al., 2007). Τα τεστ αυτά και το πρωτόκολλο χρήσης τους αντλήθηκαν από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα SINPHONIE (Schools Indoor Pollution and Health: Observation Network in Europe) που έχει ως σκοπό να βελτιώσει την ποιότητα αέρα στα σχολικά κτίρια. Από το σύνολο των 9 σχολείων και 193 μαθητών συλλέχθηκαν συνολικά 1,310 τεστ.

Κάθε τεστ περιελάμβανε ένα τμήμα από 36 αριθμητικές πράξεις συμπεριλαμβανομένου πρόσθεσης, αφαίρεσης και πολλαπλασιασμού. Τις πράξεις αυτές οι μαθητές κλίνονταν να τις απαντήσουν μέσα σε 10 min. Το δεύτερο τμήμα περιελάμβανε ένα τεστ κρυπτογράφησης στο οποίο δινόταν μια σειρά αριθμών στην οποία αντιστοιχούσε ένα σύμβολο. Στη συνέχεια οι μαθητές κλείνονταν να αντιστοιχίσουν το σωστό σύμβολο σε μια σειρά από 119 δοθέντες αριθμούς μέσα σε δύο μόνο min. Το τεστ αυτό συμπληρώνονταν από τους ίδιους μαθητές δύο φορές την ημέρα, μία πριν την έναρξη και μία μετά τη λήξη των μαθημάτων της ημέρας (Παράρτημα 7.4).

Το τεστ αποτελούμενο από τα δύο τμήματα συμπληρωνόταν δύο φορές την ημέρα από τους ίδιους μαθητές. Συγκεκριμένα μοιράζονταν στους μαθητές κατά την πρώτη και την τελευταία διδακτική ώρα σύμφωνα με τις υποδείξεις του πρωτοκόλλου διεξαγωγής σκοπός του οποίου ήταν η διερεύνηση των επιπτώσεων της επιβάρυνσης της ποιότητας του αέρα στην απόδοση των μαθητών. Το αριθμητικό τμήμα ήταν ελαφρώς τροποποιημένο από την πρώτη στην τελευταία ώρα ενώ το τεστ κωδικών ήταν κοινό. Κάθε ερωτηματολόγιο και τεστ είχαν έναν συγκεκριμένο αριθμό που αντιστοιχούσε σε κάθε μαθητή για λόγους συγκρισιμότητας και αρχειοθέτησης.

4.4 Ενεργειακές καταναλώσεις

Πέραν των πειραματικών μετρήσεων και της έρευνας ερωτηματολογίων καταγράφηκαν επιπλέον και οι ενεργειακές καταναλώσεις. Σε ειδικά διαμορφωμένα ερωτηματολόγια ενεργειακής απόδοσης οι διευθυντές των σχολείων σε συνεργασία με τους μελετητές συμπλήρωναν τις ενεργειακές καταναλώσεις των σχολικών μονάδων θα θέρμανση και ηλεκτρισμό για την τριετία 2010-2012. Στο ίδιο ερωτηματολόγιο περιλαμβάνονταν ερωτήσεις σχετικά με το έτος κατασκευής του σχολικού κτιρίου, το εμβαδόν και τη μόνωση του κτιρίου, τον αριθμό των ορόφων, το συνολικό αριθμό των μαθητών αλλά και το ωράριο λειτουργίας του σχολείου. Επιπλέον ζητήθηκε και μια σύντομη περιγραφή του περιβάλλοντα χώρου του σχολικού κτιρίου. Τέλος υπήρχαν ερωτήσεις σχετικά με το σύστημα της θέρμανσης, τη χρονολογία κατασκευής του συστήματος θέρμανσης, τη μόνωση των σωληνώσεων, το εμβαδόν της θερμαινόμενης επιφάνειας αλλά και το ωράριο λειτουργίας της καθώς και την εγκατεστημένη ισχύ του λέβητα. Μετά τη συλλογή των δεδομένων διενεργήθηκε έλεγχος ορθότητας, πληρότητας και ακρίβειας των δεδομένων.

Οι καταναλώσεις ηλεκτρικού ρεύματος αντλήθηκαν από διμηνιαίους λογαριασμούς της ΔΕΗ ενώ πληροφορίες σχετικά με τη θέρμανση των κτιρίων δίνονταν σε ετήσια βάση κατανάλωσης λίτρων πετρελαίου. Για την επεξεργασία του συνόλου των ενεργειακών

καταναλώσεων τα λίτρα πετρελαίου μετατράπηκαν σε kWh με βάση την ενεργειακή πυκνότητα πετρελαίου, 11.3 kWh/L.

Μετά τη συλλογή των καταναλώσεων, στη συνέχεια κανονικοποιήθηκαν διαιρώντας προς τη συνολική θερμαινόμενη επιφάνεια ανά σχολείο ώστε να καταστεί δυνατή η σύγκριση των ενεργειακών καταναλώσεων των σχολικών κτιρίων με διαφορετικές διαστάσεις, μέσω της ομογενοποίησης των δεδομένων. Επιπλέον η επίδραση των διαφορετικών κλιματικών συνθηκών από χρόνο σε χρόνο κανονικοποιήθηκε με τη χρήση της μεθόδου των ετήσιων βαθμομερών μεθοδολογία που περιγράφεται από τους Gaitani et al., 2010. Η θεωρία των βαθμομερών θέρμανσης βασίζεται στην εξωτερική θερμοκρασία "βάσης" ενός κτιρίου, πάνω από την οποία το κτίριο δεν απαιτεί τη λειτουργία θέρμανσης. Για τη συγκεκριμένη μελέτη και σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η θερμοκρασία αυτή ήταν ίση με 18 °C. Το πλήθος των βαθμομερών (Heating Degree Days -HDD) υπολογίστηκε με βάση τον τύπο:

$$HDD = \sum_{t_{start}}^{t_{end}} (T_{HDD_base} - T_{out}) \quad (1)$$

Όπου T_{HDD_base} είναι η θερμοκρασία 'βάσης' και T_{out} είναι η μέση ημερήσια εξωτερική θερμοκρασία. Οι βαθμομέρες που υπολογίστηκαν με βάση στον τύπο (1) για τα έτη 2010, 2011 και 2012 βρέθηκαν ίσες με 774, 1218 και 1094 αντίστοιχα με βάση δεδομένα θερμοκρασιών που αντλήθηκαν από το Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Οι κανονικοποιημένες ενεργειακές καταναλώσεις υπολογίστηκαν με βάση τον τύπο:

$$Q^N = Q * \left(\frac{HDD^N}{HDD}\right) \quad (2)$$

Όπου Q^N είναι οι κανονικοποιημένες ενεργειακές καταναλώσεις (kWh/m²/year), Q είναι η αρχική δοθείσα ενεργειακή κατανάλωση, HDD^N είναι οι μέσες υπολογιζόμενες βαθμομέρες για τα 3 χρόνια και HDD είναι η βαθμομέρες για καθένα από τα έτη.

4.5 Επαφές & δημιουργία χρονοδιαγράμματος

Δεδομένου ότι η υποκειμενική αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος απαιτεί και τη συμμετοχή των μαθητών στην έρευνα επιλέχθηκε η συγκεκριμένη ηλικιακή ομάδα των 11 ετών καθώς σύμφωνα με ευρήματα ερευνών τα παιδιά σε αυτή την ηλικία είναι σε θέση να έχουν πλήρη αντίληψη των επικρατούντων συνθηκών και έχουν τη δυνατότητα να τις αξιολογήσουν επαρκώς.

Για την εκτέλεση των μετρήσεων σε σχολικές αίθουσες Δημοτικών σχολείων απαιτήθηκε ειδική άδεια εγκεκριμένη από τη Διεύθυνση σπουδών Πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης του Υπουργείου Παιδείας και Θρησκευμάτων Πολιτισμού και Αθλητισμού (ΥΠΕΠΘ). Στη συνέχεια, και κατόπιν έγκρισης της προτεινόμενης έρευνας και από τον διευθυντή του εκάστοτε σχολείου αλλά και από τους εκπαιδευτικούς των τάξεων όπου θα διεξάγονταν οι μετρήσεις, ενημερώθηκαν και οι γονείς σχετικά με την πειραματική διαδικασία αλλά και σχετικά με τη συμμετοχή των παιδιών τους στην έρευνα δια μέσω ερωτηματολογίων και τεστ παραγωγικότητας. Επισημάνθηκε η ανωνυμία συμμετοχής και η εμπιστευτικότητα των δεδομένων και τέλος ζητήθηκε η ενυπόγραφη υπεύθυνη δήλωση και συγκατάθεση των γονέων για στη συμμετοχή των παιδιών τους στην έρευνα. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε το χρονοδιάγραμμα των μετρήσεων κατόπιν συνεννόησης με τους διευθυντές και τους εκπαιδευτικούς των τάξεων με τις ακριβείς ημέρες δειγματοληψίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι για τη δημιουργία χρονοδιαγράμματος των μετρήσεων απαιτήθηκαν πολλαπλά τηλεφωνήματα στους διευθυντές των σχολείων καθώς κυρίως το μήνα Μάιο πολλά από τα σχολεία διοργάνωναν εκδηλώσεις για το κλείσιμο της σχολικής χρονιάς με αποτέλεσμα να προκαλούνταν αναστάτωση στις εκπαιδευτικές ώρες, γεγονός το οποίο έγινε σημαντική προσπάθεια στο να αποφευχθεί. Καθότι ο διαθέσιμος χρόνος για τη διεξαγωγή των μετρήσεων ήταν πολύ περιορισμένος, χρειάστηκε να γίνει ένας πολύ καλός προγραμματισμός των ημερών δειγματοληψίας ώστε οι διαθέσιμες ημέρες μέτρησης να εκμεταλλεύονταν κατά το μέγιστο δυνατό και να μην προέκυπταν κενά στη δειγματοληψία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ & ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

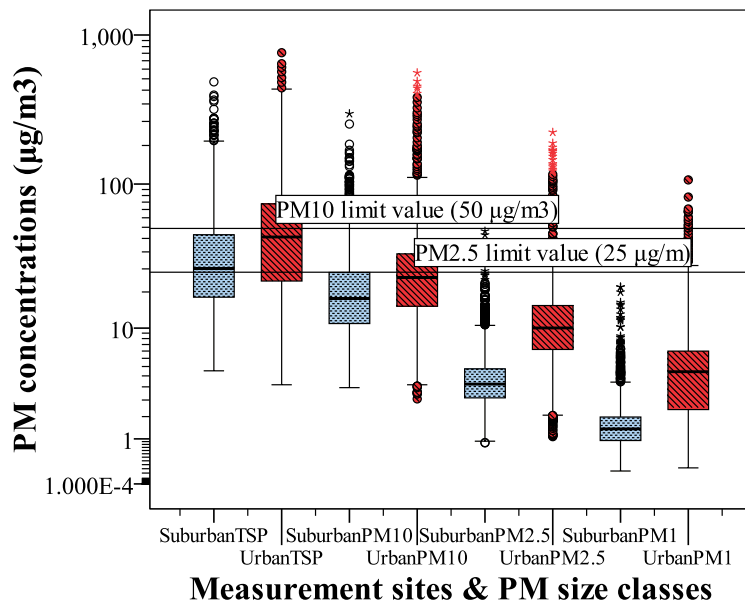
5.1 Πειραματική μελέτη σε κατοικίες της Αττικής

Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων και η στατιστική ανάλυση αυτών που έλαβαν χώρα σε δύο κατοικίες της Αττικής παρουσιάζονται στο κεφάλαιο που ακολουθεί. Αρχικά παραθέτονται τα ευρισκόμενα των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων από τις δύο κατοικίες όπου και συγκρίνονται και στη συνέχεια αναλύεται το φάσμα των χρονοσειρών των σωματιδίων. Ακολούθως παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις CO₂ και CO στα δύο σπίτια και τέλος εκτιμώνται τα επίπεδα PM₁₀ με τη βοήθεια του αριθμητικού κώδικα ΜΙΑQ.

5.1.1 Επεξεργασία και στατιστική ανάλυση των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων

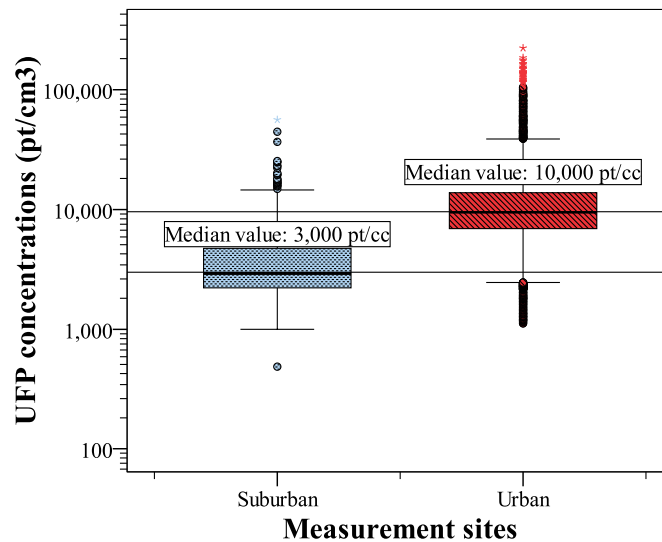
5.1.1.1 Αιωρούμενα σωματίδια

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η διασπορά των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων (TSP, PM₁₀, PM_{2.5} και PM₁) σε θηκογράμματα (box plots) για τις κατοικίες στο ημιαστικό περιβάλλον (Suburban-μπλε με τελείες) και για το αστικό περιβάλλον (Urban-κόκκινο, ριγέ) για το σύνολο της περιόδου δειγματοληψίας (Εικόνα 5-1). Το άνω τεταρτημόριο (75^ο τεταρτημόριο) των PM₁₀ και των PM_{2.5} και για τις δύο κατοικίες είναι κάτω από την αντίστοιχη προτεινόμενη οριακή τιμή από τον παγκόσμιο οργανισμό υγείας (WHO, 50 μg/m³ και 25 μg/m³ για τα PM₁₀ και τα PM_{2.5} αντίστοιχα). Οι συγκεντρώσεις για όλες τις τάξεις μεγέθους των σωματιδίων για το διαμέρισμα στο αστικό περιβάλλον είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές της κατοικίας στο ημιαστικό περιβάλλον και επίσης παρουσιάζουν μεγαλύτερη διασπορά γύρω από τη μέση τιμή (Dorizas et al., 2013).



Εικόνα 5-1: Θηκογράμματα των κατανομών των συγκεντρώσεων των σωματιδίων TSP, PM₁₀, PM_{2.5} και PM₁ στις κατοικίες στην ημιαστική (Suburban-μπλε) και την αστική περιοχή (Urban-κόκκινο)

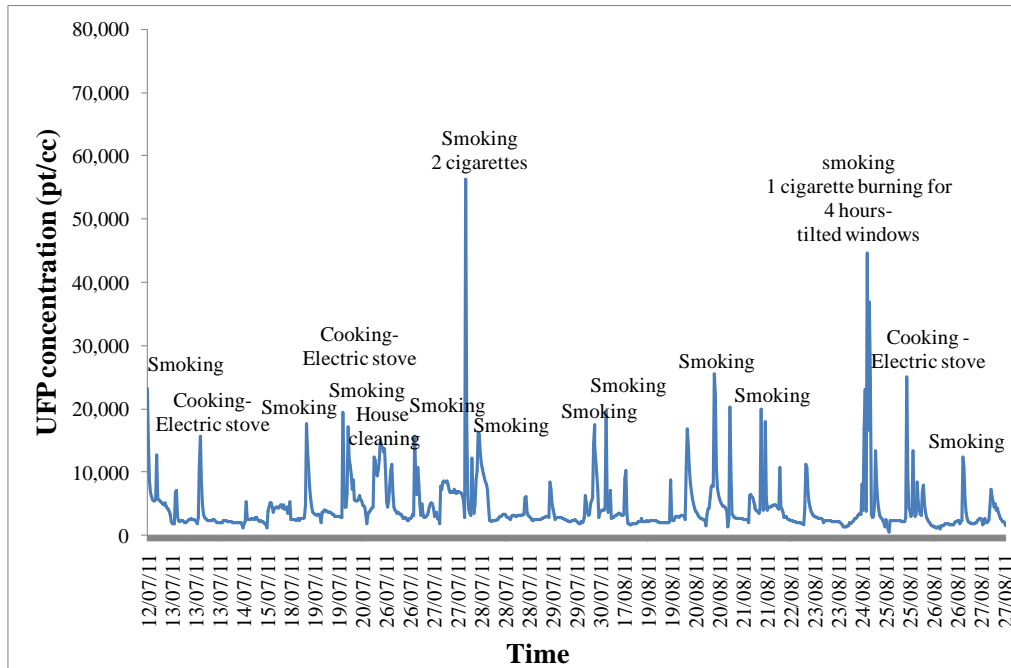
Οι αντίστοιχες κατανομές των υπομετρικών σωματιδίων παρουσιάζονται σε θηκογράμματα σε λογαριθμική κλίμακα για το σύνολο της περιόδου δειγματοληψίας (Εικόνα 5-2). Οι συγκεντρώσεις της κατοικίας στο αστικό περιβάλλον είναι κατά πολύ υψηλότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες του ημιαστικού περιβάλλοντος. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις του διαμερίσματος ενδεχομένως να επηρεάζονται από τις αυξημένες δραστηριότητες που λάμβαναν χώρα στο εσωτερικό του διαμερίσματος. Επίσης γνωρίζοντας από τη βιβλιογραφία ότι πηγές των υπομετρικών σωματιδίων είναι κυρίως προϊόντα καύσης, μπορούμε να καταλήξουμε στο ότι οι αυξημένες συγκεντρώσεις υπομετρικών σωματιδίων στην κατοικία στο αστικό περιβάλλον πέραν των δραστηριοτήτων του εσωτερικού περιβάλλοντος, είναι δυνατόν να επηρεάστηκαν και από τις εκπομπές των οχημάτων από γειτονικούς δρόμους.



Εικόνα 5-2: Θηκογράμματα των κατανομών των συγκεντρώσεων των υπομετρικών σωματιδίων στο ημιαστικό (Suburban-Μπλε) και το αστικό (Urban-κόκκινο) περιβάλλον

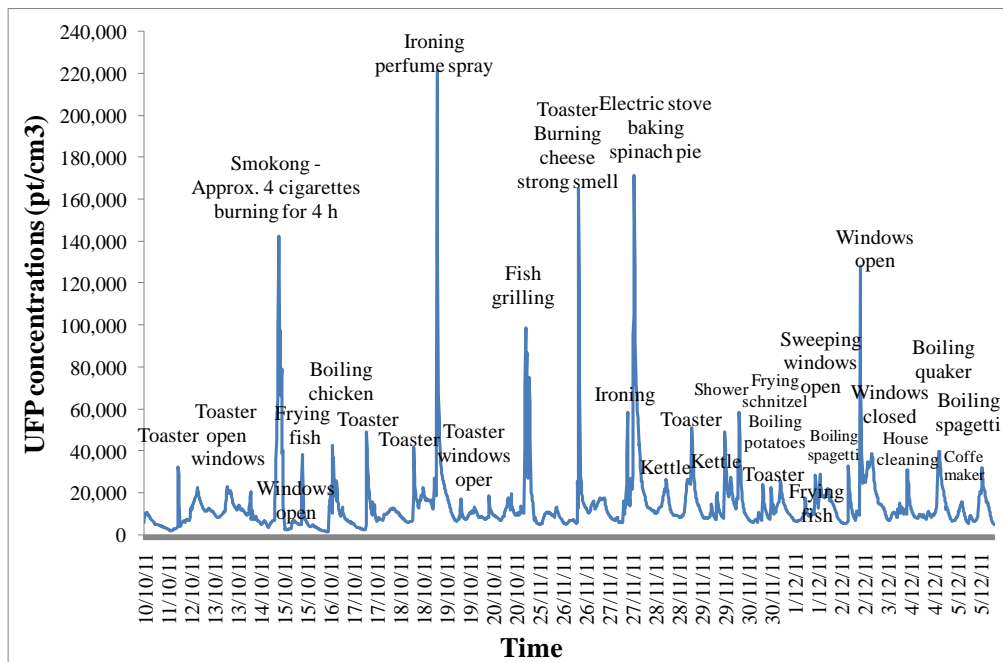
Στα ακόλουθα δύο διαγράμματα παρουσιάζονται οι ημερήσιες διακυμάνσεις των υπομετρικών σωματιδίων στις δύο κατοικίες (Εικόνα 5-3 και Εικόνα 5-4 για το ημιαστικό και αστικό περιβάλλον αντίστοιχα). Οι δραστηριότητες που λάμβαναν χώρα στις κατοικίες σημειώνονταν στα διαγράμματα διακύμανσης σύμφωνα με τις πληροφορίες που λαμβάνονταν από τα ημερήσια ημερολόγια δραστηριοτήτων. Στις περισσότερες από τις περιπτώσεις οι μέγιστες τιμές των συγκεντρώσεων αποδόθηκαν σε συγκεκριμένες δραστηριότητες που έλαβαν χώρα στις κατοικίες τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Οι συγκεντρώσεις σημείωναν πτώση λίγο μετά την παύση των συγκεκριμένων δραστηριοτήτων.

Τα επίπεδα υποβάθρου των υπομετρικών συγκεντρώσεων στην κατοικία στο ημιαστικό περιβάλλον ήταν περίπου $3,000 \text{ pt/cm}^3$ (Εικόνα 5-3). Το κάπνισμα ήταν η κύρια πηγή υπομετρικών σωματιδίων στη συγκεκριμένη κατοικία. Στη διάρκεια καπνίσματος ενός τσιγάρου οι συγκεντρώσεις αυξάνονταν περίπου 6 φορές σε σχέση με τα επίπεδα υποβάθρου φτάνοντας στα $20,000 \text{ pt/cm}^3$. Επίσης το μαγείρεμα οδήγησε σε αύξηση των υπομετρικών, ωστόσο δεν λάμβανε χώρα συχνά στη συγκεκριμένη κατοικία.



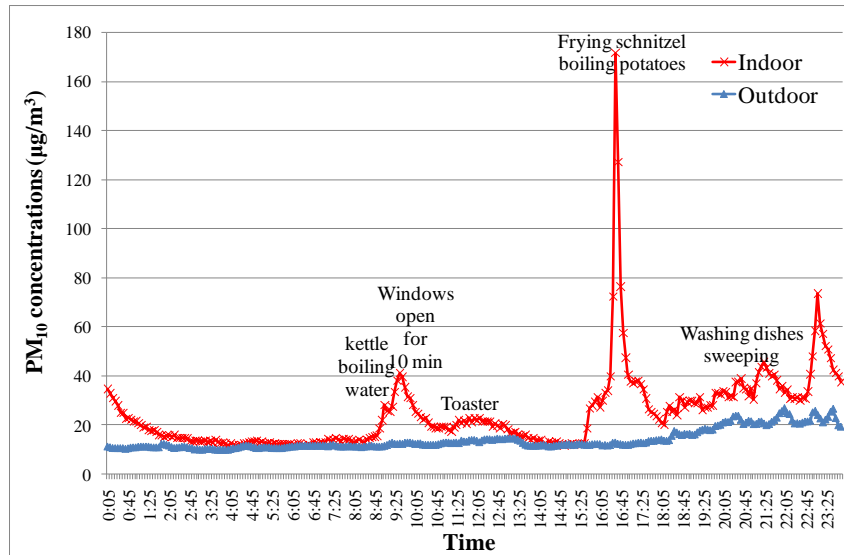
Εικόνα 5-3 : Διακύμανση των υπομετρικών σωματιδίων στην κατοικία στο ημιαστικό περιβάλλον για όλη την περίοδο δειγματοληψίας

Σε αντίθεση με την κατοικία στο Ντράφι, στην κατοικία του Ζωγράφου οι συγκεντρώσεις υπομετρικών παρουσίασαν σημαντικές διακυμάνσεις με έντονες κορυφές (Εικόνα 5-4). Οι έντονες αυτές διακυμάνσεις θα μπορούσαν να αποδοθούν στην παρατεταμένη παρουσία των ατόμων στην κατοικία, καθώς και τις αυξημένες δραστηριότητες που έλαβαν χώρα στο διαμέρισμα στο αστικό σε σχέση με τη μεζονέτα στο ημιαστικό περιβάλλον. Τα επίπεδα υποβάθρου στην κατοικία του Ζωγράφου ήταν περίπου $10,000 \text{ pt/cm}^3$. Η κύρια πηγή της παραγωγής υπομετρικών εκεί ήταν η μαγειρική. Συγκεκριμένα η χρήση της τοστιέρας οδήγησε σε αύξηση των επιπέδων υποβάθρου κατά 4 με 5 φορές. Το βράσιμο νερού σε βραστήρα οδήγησε σε αύξηση των συγκεντρώσεων σε επίπεδα μεταξύ 25,000 και 60,000 pt/cc . Το ψήσιμο στην ηλεκτρική κουζίνα οδήγησε σε πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις μεταξύ 105,000 και 182,000 pt/cc . Η ακραία τιμή των 223,000 pt/cc συνέβη στη διάρκεια σιδερώματος με σίδερο ατμού όταν ψεκάστηκε άρωμα στα ρούχα.



Εικόνα 5-4: Διακύμανση των υπομετρικών σωματιδίων στην κατοικία στο αστικό περιβάλλον για όλη την περίοδο δειγματοληψίας

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} στο εσωτερικό και το εξωτερικό περιβάλλον μιας τυπικής ημέρας στην περίοδο της μέτρησης στην κατοικία στο αστικό περιβάλλον (Εικόνα 5-5). Οι συγκεντρώσεις στο εσωτερικό περιβάλλον της κατοικίας είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τις εξωτερικές καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Συγκεκριμένα, οι εσωτερικές συγκεντρώσεις από σταθερά χαμηλά επίπεδα που κυμάνθηκαν στη διάρκεια της νύχτας, σταδιακά αυξάνονται από τις 8.00 π.μ. έως τις 9.00 π.μ. ώρα στην οποία οι ένοικοι προετοιμάζουν το πρωινό τους (καφετιέρα και τοστιέρα σε λειτουργία). Από τις 16.00 μ.μ. έως τις 16.30 μ.μ. πραγματοποιήθηκε μαγείρεμα (τηγάνισμα και βράσιμο) στο εσωτερικό της κατοικίας. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί την έντονη αύξηση των συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM_{10} στις 16.35 π.μ. Κατά τη διάρκεια της νύχτας οι εσωτερικές συγκεντρώσεις σημείωσαν σημαντική πτώση προσεγγίζοντας σε μεγάλο βαθμό τις εξωτερικές συγκεντρώσεις περίπου στις 4.00 π.μ. Οι εξωτερικές συγκεντρώσεις παραμένουν σχετικά σταθερές κατά τη διάρκεια τόσο της ημέρας όσο και της νύχτας ωστόσο φαίνεται να αυξάνονται ελάχιστα τις απογευματινές ώρες από τις 18.00 μ.μ. έως τα μεσάνυχτα.



Εικόνα 5-5: Διακύμανση των εσωτερικών προς τις εξωτερικές συγκεντρώσεις σωματιδίων PM₁₀ στην κατοικία στο αστικό περιβάλλον μιας τυχαίας ημέρας (30 Οκτώβρη 2011)

5.1.1.2 Ανάλυση Φάσματος Ισχύος (Power Spectrum Analysis)

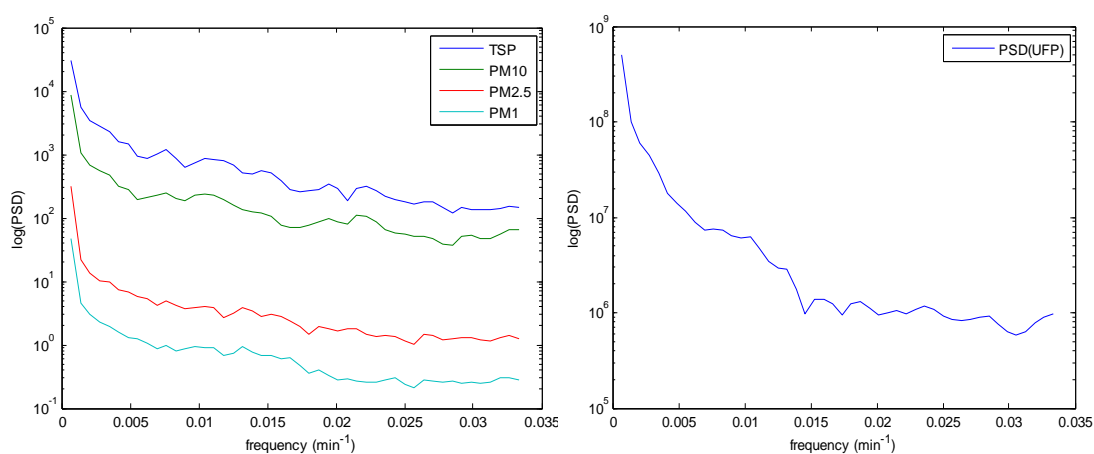
Η ανάλυση FFT χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή φασματικής πυκνότητας ισχύος με σκοπό τη διερεύνηση περιοδικών ταλαντώσεων και τάσεων των χρονοσειρών των μετρούμενων παραμέτρων. Το περιοδόγραμμα παρέχει ένα μέτρο σημαντικότητας των πιθανών συχνοτήτων που θα μπορούσαν να ερμηνεύσουν το μοτίβο των μεταβολών των μετρούμενων δεδομένων. Με άλλα λόγια περιγράφει τον τρόπο όπου η μέση ισχύς ενός σήματος κατανέμεται στις διάφορες συχνότητες. Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier X της χρονοσειράς των αιωρούμενων σωματιδίων υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Fast Fourier Transform (FFT). Το περιοδόγραμμα μιας πεπερασμένης χρονοσειράς καθορίζεται ως το τετράγωνο του μεγέθους X :

$$I(n_k) = \frac{1}{N} |X(k)|^2 = \frac{1}{N} \left| \sum_{t=0}^{N-1} x_t e^{-2\pi i n_k t} \right|^2$$

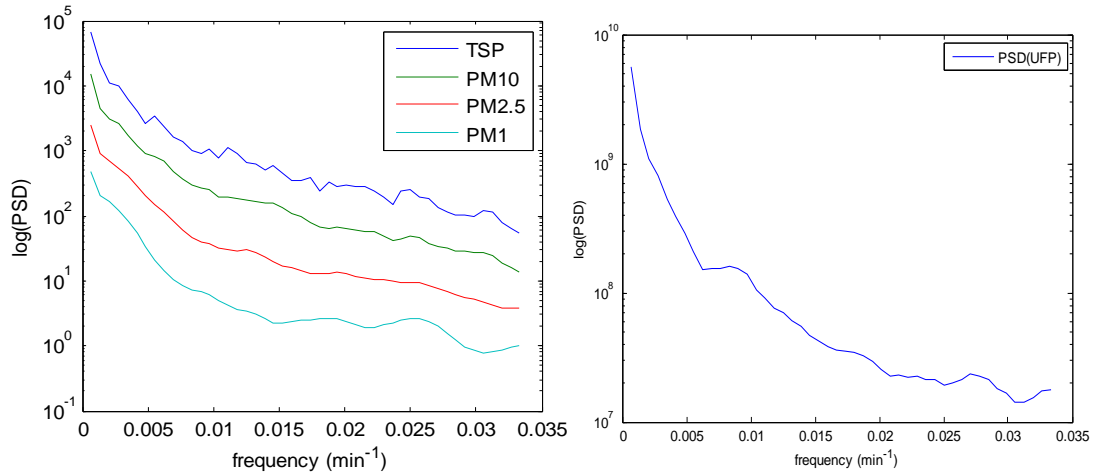
Όπου N είναι ο αριθμός των διαδοχικών παρατηρήσεων, $k = 0, 1, \dots, N-1$, x_t είναι η χρονοσειρά και $n_k = k / N$.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος των χρονοσειρών των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων όλων των μετρούμενων αεροδυναμικών διαμέτρων στις δύο κατοικίες. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα η φασματική πυκνότητα ισχύος (Power Spectral Density -PSD) ενώ στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζονται οι συχνότητες εκφρασμένες σε μονάδες μέτρησης ανά λεπτό (min^{-1}). Οι χρονοσειρές των αιωρούμενων σωματιδίων και στις δύο κατοικίες έχουν

την τάση να έχουν μικρότερη φασματική ενέργεια σε υψηλότερες συχνότητες. Οι καμπύλες PSD των TSP, PM₁₀, PM_{2.5} και PM₁ και για τις δύο κατοικίες είναι παρόμοιες και οι τάσεις των καμπύλων τους είναι σχεδόν παράλληλες (Εικόνα 5-6, Εικόνα 5-7). Ωστόσο όσο μεγαλύτερα είναι τα σωματίδια τόσο μεγαλύτερες είναι και οι τιμές της φασματικής πυκνότητας ισχύος. Από τα διαγράμματα φαίνεται επίσης ότι ο ρυθμός πτώσης του φάσματος μειώνεται για μεγαλύτερες συχνότητες δηλαδή υπάρχει μία περιοχή κυρίως στις μικρότερες συχνότητες που παρατηρείται ταχεία μείωση ενώ μια άλλη περιοχή όπου η μείωση αυτή αμβλύνεται στις υψηλότερες συχνότητες. Το φάσμα ισχύος για συχνότητες μεγαλύτερες των 0.02 min⁻¹ γίνεται σχετικά σταθερό πράγμα το οποίο σημαίνει ότι για μεγαλύτερες συχνότητες ή για βήμα δειγματοληψίας μικρότερο των 50 min δεν παρατηρήθηκαν έντονες μεταβολές των συγκεντρώσεων. Συνεπώς η βασικότερη πληροφορία που αντλείται από τα συγκεκριμένα διαγράμματα αφορά την ευαισθησία του συστήματος στις έντονες μεταβολές και άρα το πόσο συχνά πρέπει να γίνεται η δειγματοληψία. Τα συγκεκριμένα ευρισκόμενα επαληθεύονται και από την Εικόνα 5-5 στην οποία παρατηρούνται εντονότερες μεταβολές για βήμα δειγματοληψίας μεγαλύτερο ή ίσο των 40 min. Οι καμπύλες PSD των χρονοσειρών των υπομετρικών είναι πιο απότομες σε σχέση με τα μεγαλύτερα σωματίδια (Εικόνα 5-6, Εικόνα 5-7, δεξιά για την ημιαστική και την αστική περιοχή αντίστοιχα).



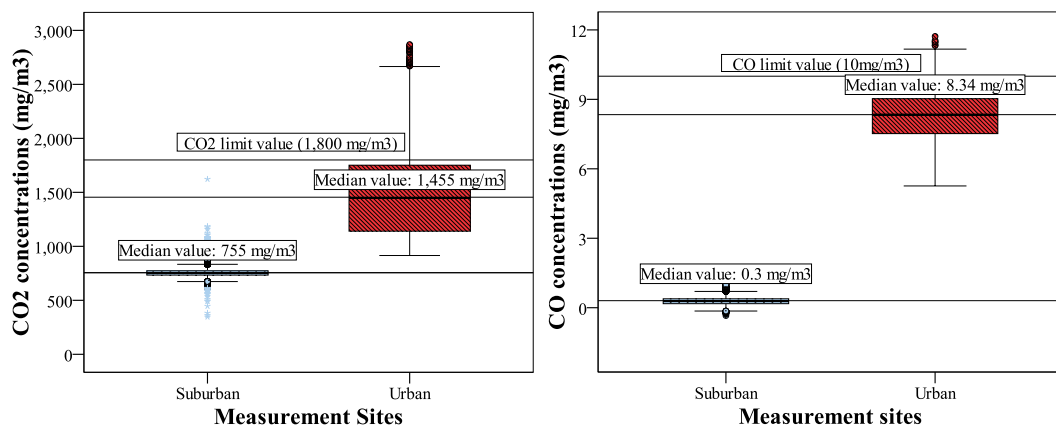
Εικόνα 5-6: Καμπύλες PSD των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ (αριστερά) και των υπομετρικών σωματιδίων (δεξιά) στην κατοικία στην ημιαστική περιοχή



Εικόνα 5-7: Καμπύλες PSD των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ (αριστερά) και των υπομετρικών σωματιδίων (δεξιά) στην κατοικία στην αστική περιοχή

5.1.1.3 Διοξείδιο και μονοξειδίου του άνθρακα

Η διασπορά των συγκεντρώσεων CO₂ (Εικόνα 5-8, αριστερά) και CO (Εικόνα 5-8, δεξιά) παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα για τις δύο κατοικίες (Εικόνα 5-8). Όπως και στην περίπτωση των σωματιδίων, έτσι και για το CO₂ αλλά και για το CO οι συγκεντρώσεις στην κατοικία στο αστικό περιβάλλον (Urban) είναι κατά πολύ υψηλότερες σε σχέση με το ημιαστικό περιβάλλον (Suburban). Σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα οι συγκεντρώσεις τόσο των CO όσο και των CO₂ ξεπέρασαν και τις οριακές τιμές (των 10 mg/m³ και 1,800 mg/m³ για το CO και CO₂ αντίστοιχα). Οι αυξημένες συγκεντρώσεις CO₂ της κατοικίας στο αστικό περιβάλλον ενδεχομένως να οφείλονται στην παρατεταμένη παρουσία των ανθρώπων στο διαμέρισμα.



Εικόνα 5-8: Θηκογράμματα των CO₂ (αριστερά) και των CO (δεξιά) στις κατοικίες στο αστικό (κόκκινο ριγέ) και ημιαστικό (μπλε με τελείες) περιβάλλον

5.1.2 Εκτίμηση συγκεντρώσεων σωματιδίων PM₁₀ με τη χρήση του αριθμητικού κώδικα ΜΙΑQ

Ο αριθμητικός κώδικας ΜΙΑQ η αρχή λειτουργίας του οποίου περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2.3 που προηγήθηκε χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων στα εσωτερικά περιβάλλοντα. Αρχικά εξετάστηκε η ευαισθησία του μοντέλου στις μεταβολές βασικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τα αιωρούμενα σωματίδια με σκοπό την πρόβλεψη των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ στο εσωτερικό περιβάλλον της κατοικίας στην αστική περιοχή με βάση δοθείσες πειραματικές τιμές.

Παραδοχές και περιορισμοί (Assumptions and limitations)

Οι βασικότερες παραδοχές που γίνονται για την εφαρμογή του κώδικα είναι σε πρώτη φάση ότι οι ζώνες του κτιρίου αλληλοσυνδέονται και ότι ο αέρας στην κάθε ζώνη είναι καλά αναμεμιγμένος. Το ποσοστό μεταβολής των συγκεντρώσεων στη ζώνη αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$dC/dt=S-LC \quad (5-1)$$

όπου S: Είναι οι πηγές και L: οι καταβόθρες και οι δυο χρονικά εξαρτώμενες παράμετροι.

Ο κώδικας επίσης ενσωματώνει χημικούς μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται στα επίπεδα φωτοχημικής ρύπανσης.

Σημειώνεται ότι κάθε προσομοίωση αφορά μόνο ένα εικοσιτετράωρο, ενώ το γεγονός ότι ο ρυθμός διεύθυνσης κατά τη διάρκεια της ημέρας ορίζεται σε ωριαία βάση είναι δυνατόν να οδηγήσει στην απώλεια σημαντικής πληροφορίας στη διάρκεια της ώρας αυτής. Επίσης ένα από τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου είναι ο ρυθμός εκπομπής των σωματιδίων από τις διάφορες πηγές σε μονάδες μάζας /min.

Δεδομένα εισόδου

Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα δεδομένα εισόδου στο μοντέλο για την προσομοίωση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ μιας ενδεικτικής ημέρας στη κατοικία στο κέντρο της Αθήνας (Πίνακας 5-1).

Πίνακας 5-1: Δεδομένα εισόδου τον αριθμητικό κώδικα ΜΙΑQ

Όγκος δωματίου	108 m ³
Ύψος δωματίου	2.7 m
Εμβαδά παράπλευρων επιφανειών	15.39, 15.39, 18.9 και 18.9 m ²
Θερμοκρασία τοίχων	Παραδοχή τιμής, 24 °C
Εσωτερική θερμοκρασία	Μέση ωριαία μετρούμενη τιμή. 24-26.6 °C
Μέγεθος σωματιδίου	PM ₁₀ : 2.5-10 μm
Πυκνότητα σωματιδίου	2,200 kg/m ³
Ρυθμός διείσδυσης αέρα (infiltration)	0.55 ACH= 1m ³ /min (διαδοχικές δοκιμές)
Αρχική συγκέντρωση σωματιδίων	Η μετρούμενη τιμή (42.28 μg/m ³)
Εξωτερική συγκέντρωση σωματιδίων	Μέση ωριαία μετρούμενη τιμή (7.73-15.79 μg/m ³)
Ένταση της τύρβης	Turbulence intensity =1/s, T=298.15 K= 25 °C
Ταχύτητα καθίζησης (deposition velocity)	(0.015 cm/s, assumed. 0.16 cm/s calculated including all surfaces (Εύρη ταχυτήτων καθίζησης βιβλιογραφίας: 0.039-0.1 cm/s)
Πηγές παραγωγής σωματιδίων	1000, 300, 200, 150, 80, 50 μg/min (λειτουργία ανάλογα με την κατάσταση) τιμές βασισμένες στη βιβλιογραφία

Εφαρμογή μοντέλου απουσία πηγών

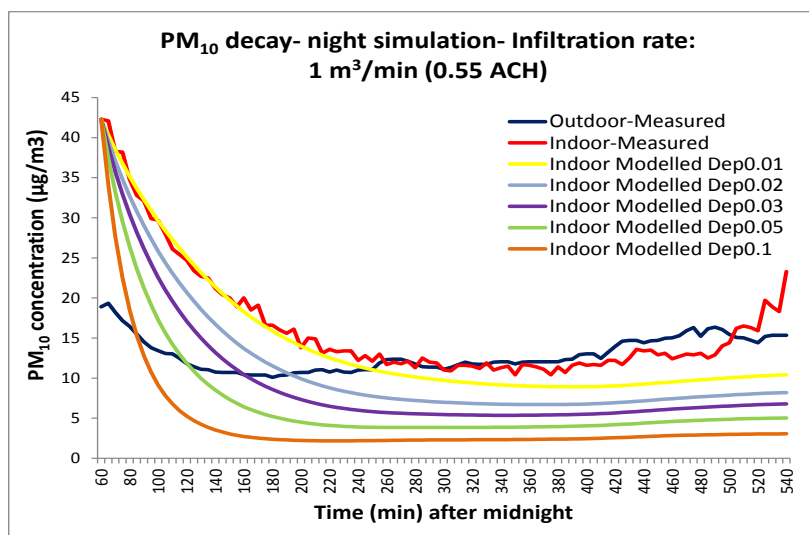
Πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές προσομοιώσεις εξετάζοντας κάθε φορά την ευαισθησία και άλλης παραμέτρου. Σε πρώτη φάση προσομοιώθηκε ο χώρος για 8 ώρες στη διάρκεια της νύχτας με τα παράθυρα κλειστά χωρίς την παρουσία πηγών εξετάζοντας διάφορες τιμές ρυθμού διείσδυσης και ταχύτητας καθίζησης των σωματιδίων.

Για την περίπτωση σταθερών συνθηκών χωρίς πηγές παραγωγής αιωρούμενων σωματιδίων η εξίσωση αρχής διατήρησης μάζας ($dC/dt=S-LC$) σε κάθε ζώνη γίνεται: $dC/dt=0$, και με σταθερό ρυθμό αερισμού προκύπτει: $C_i=aC_o$ όπου C_i : Συγκεντρώσεις στο εσωτερικό περιβάλλον ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ενώ C_o :συγκεντρώσεις στο εξωτερικό περιβάλλον ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), $a=\frac{\lambda}{\lambda+\kappa\tau}$ με λ :

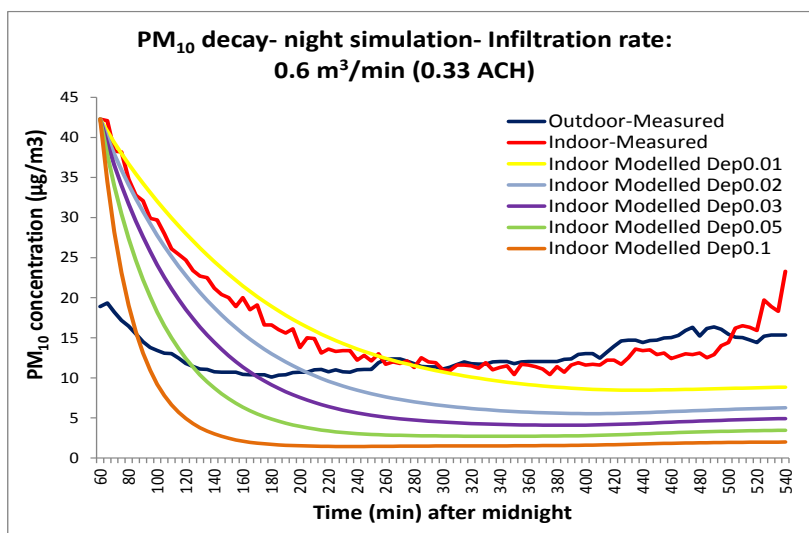
το ρυθμό αερισμού (h^{-1}), $\kappa\tau$: το ρυθμό εναπόθεσης (h^{-1}). $Ud=\frac{\kappa dV}{A_d}$, κ_d : ρυθμός εναπόθεσης απώλειας (h^{-1}), V : Όγκος, A_d : εμβαδό επιφάνειας.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παραθέτονται τα αποτελέσματα από τις πολλαπλές προσομοιώσεις δοκιμάζοντας διάφορες τιμές ταχυτήτων εναπόθεσης των αιωρούμενων σωματιδίων σύμφωνα με τιμές τη διεθνούς βιβλιογραφίας (0.039-0.1 cm/s) για τις 8 ώρες στη διάρκεια της νύχτας χωρίς την παρουσία πηγών για διαφορετικούς ρυθμούς διείσδυσης

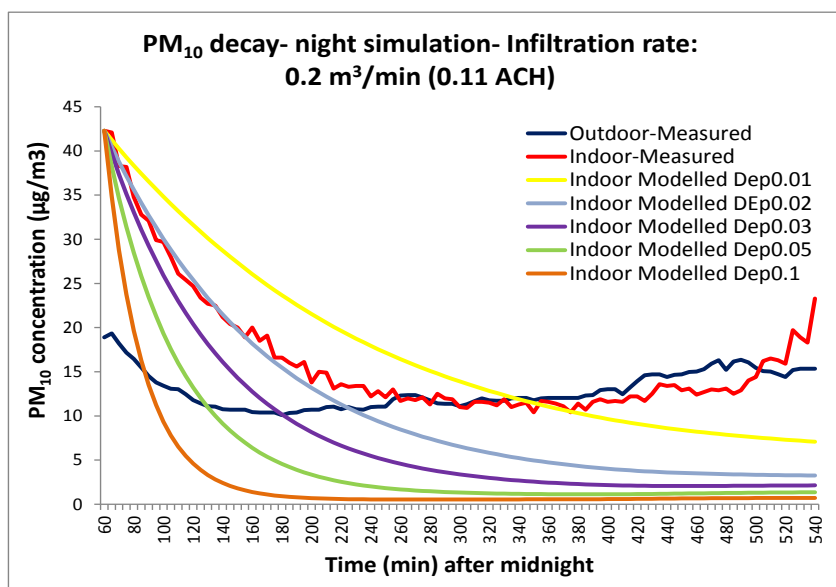
(Εικόνα 5-9 έως Εικόνα 5-11). Από τα αποτελέσματα απουσία πηγών, βρέθηκε ότι οι συγκεντρώσεις των PM_{10} σωματιδίων επηρεάζονταν σημαντικά τόσο από τις αλλαγές στο ρυθμό διείσδυσης όσο και την ταχύτητα εναπόθεσης. Συγκεκριμένα, για ταχύτητα καθίζησης ίση με 0.01 cm/s οι υπολογιζόμενες τιμές προσεγγίζουν κατά πολύ τις μετρούμενες συγκεντρώσεις των PM_{10} στο εσωτερικό περιβάλλον για την πρώτη περίπτωση με ρυθμό διείσδυσης 0.55 ACH . Για τη δεύτερη περίπτωση, και πάλι ταχύτητα καθίζησης ίση με 0.01 cm/s προσεγγίζει καλύτερα τις μετρούμενες τιμές ωστόσο ο μικρότερος ρυθμός διείσδυσης (0.33 ACH) στην Εικόνα 5-9 προσεγγίζει καλύτερα τις μετρούμενες τιμές. Τέλος εξετάστηκε και μικρότερος βαθμός διείσδυσης (0.11 ACH) όπου στην περίπτωση αυτή μόνο η ταχύτητα εναπόθεσης ίση με 0.02 cm/s προσέγγισε τις πειραματικές τιμές ωστόσο μόνο τις πρώτες τρεις ώρες.



Εικόνα 5-9: Έλεγχος ευαισθησίας των ταχυτήτων εναπόθεσης στο ρυθμό πτώσης των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} για ρυθμό διείσδυσης 0.55 ACH



Εικόνα 5-10: Έλεγχος ευαισθησίας των ταχυτήτων εναπόθεσης στο ρυθμό πτώσης των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ για ρυθμό διείσδυσης 0.33 ACH

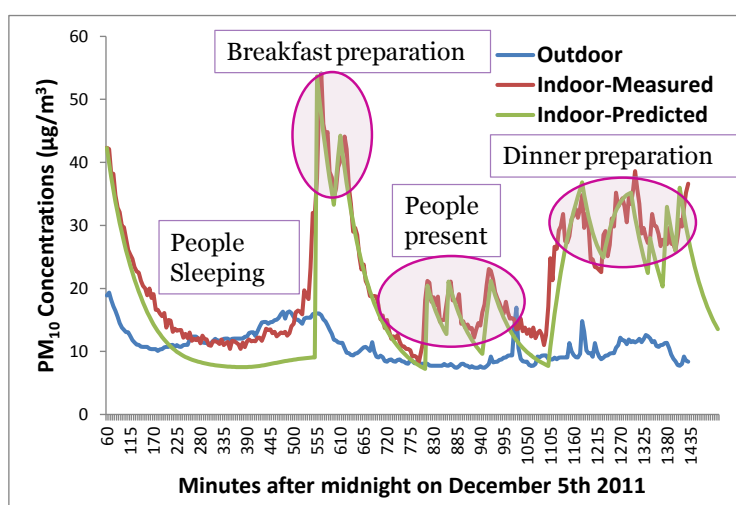


Εικόνα 5-11: Έλεγχος ευαισθησίας των ταχυτήτων εναπόθεσης στο ρυθμό πτώσης των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ για ρυθμό διείσδυσης 0.11 ACH

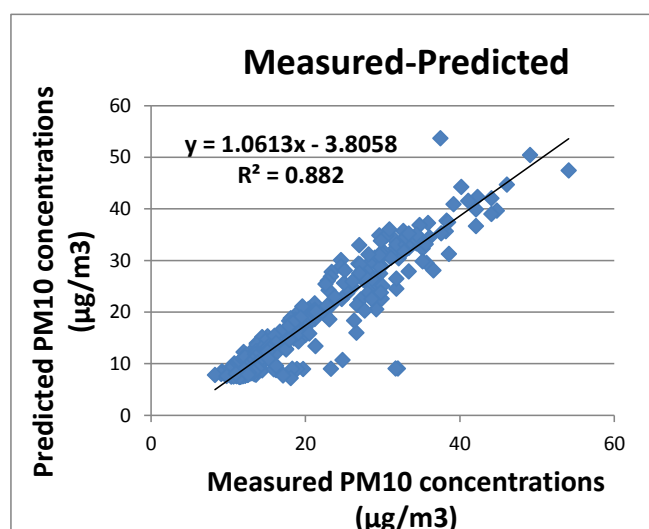
Εφαρμογή μοντέλου παρουσία πηγών

Ακολούθως προσομοιώθηκε για ένα ολόκληρο εικοσιτετράωρο η διακύμανση των PM₁₀ παρουσία πηγών στη διάρκεια της ημέρας (Εικόνα 5-12). Σύμφωνα με το ημερήσιο ημερολόγιο δραστηριοτήτων εισάγονταν στο μοντέλο οι ρυθμοί εκπομπών των αιωρούμενων σωματιδίων, ανάλογα με τη δραστηριότητα και σύμφωνα πάντα με τιμές της βιβλιογραφίας. Στο διάγραμμα ξεχωρίζουν 3 περιπτώσεις πηγών δημιουργίας σωματιδίων στις οποίες τα PM₁₀ αυξάνονται σημαντικά από τα επίπεδα υποβάθρου και σημειώνουν έντονες διακυμάνσεις στη διάρκεια της ημέρας. Αυτές είναι κατά την προετοιμασία του πρωινού στη

διάρκεια του οποίου τoστιάρα, βραστήρας και καφετιέρα είναι σε λειτουργία. Στη συνέχεια η παρουσία των ατόμων κατά τις απογευματινές ώρες προκαλεί αύξηση στις συγκεντρώσεις και τέλος κατά τις βραδινές ώρες με την προετοιμασία του δείπνου τα PM₁₀ και πάλι αυξάνονται. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι οι ρυθμοί εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων κυμάνθηκαν από 30- 12,000 μg/min ανάλογα με την εκάστοτε πηγή, τιμές οι οποίες αντλήθηκαν από τη διεθνή βιβλιογραφία. Από την Εικόνα 5-12 είναι επίσης φανερό ότι η τάση των συγκεντρώσεων που προέκυψαν έπειτα από την προσομοίωση προσεγγίζει με μεγάλο βαθμό τις μετρούμενες τιμές. Κάτι το οποίο φαίνεται και από το διάγραμμα διασποράς στην Εικόνα 5-13 όπου ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των μετρούμενων και προβλεπόμενων τιμών είναι σημαντικός και ίσος με R²=0.882.



Εικόνα 5-12: Ημερήσια διακύμανση των μετρούμενων και υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων PM₁₀ με τη βοήθεια του κώδικα MIAQ



Εικόνα 5-13: Διάγραμμα διασποράς μεταξύ των μετρούμενων και προβλεπόμενων τιμών PM₁₀

5.1.3 Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη πειραματική καμπάνια μελετήθηκαν οι συγκεντρώσεις ρύπων σε δύο κατοικίες με διαφορετικό βαθμό αστικοποίησης. Συγκεκριμένα μετρήθηκαν οι εξής ρύποι: TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, UFP, CO₂ και CO σε ένα τυπικό διαμέρισμα κοντά στο κέντρο της Αθήνας και σε μία μονοκατοικία σε προάστιο της Αττικής. Από τα αποτελέσματα βρέθηκε ότι οι συγκεντρώσεις ρύπων στην κατοικία κοντά στο κέντρο της πόλης ξεπέρασαν κατά πολύ τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στην κατοικία στο προάστιο και σε πολλές από τις περιπτώσεις ξεπέρασαν μάλιστα και τις προτεινόμενες οριακές τιμές. Οι εσωτερικές πηγές καθώς και οι δραστηριότητες των ενοίκων στα εσωτερικά περιβάλλοντα φάνηκε να επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις εσωτερικές συγκεντρώσεις και στις δύο κατοικίες αλλά κυρίως στο διαμέρισμα στο αστικό περιβάλλον όπου οι πηγές ήταν εντονότερες. Μελετώντας τις ημερήσιες διακυμάνσεις των αιωρούμενων σωματιδίων βρέθηκε ότι σημείωναν σημαντική πτώση στη διάρκεια της νύχτας μετά την παύση της λειτουργίας εσωτερικών πηγών όπως μαγειρικής. Παρόλα αυτά με την απουσία των εσωτερικών πηγών οι συγκεντρώσεις δεν έπεσαν σε επίπεδα χαμηλότερα των 3,000 pt/cc και των 9,000 pt/cc για την κατοικία στο ημιαστικό και αστικό περιβάλλον αντίστοιχα. Οι καμπύλες PSD των αιωρούμενων σωματιδίων TSP, PM₁₀, PM_{2.5} και PM₁ και για τις δύο κατοικίες ήταν παρόμοιες. Οι χρονοσειρές είχαν μεγαλύτερη φασματική ισχύ για μικρότερες τιμές συχνοτήτων για όλες τις τάξεις μεγέθους σωματιδίων ενώ ο ρυθμός πτώσης της φασματικής ισχύος μειώθηκε στις μεγαλύτερες συχνότητες. Επίσης παρατηρήθηκε ότι μεγαλύτερα σωματίδια περιέχουν μεγαλύτερη φασματική ισχύ. Η κλήση των καμπύλων φάσματος ισχύος των υπομετρικών σωματιδίων και για τις δύο κατοικίες ήταν μεγαλύτερη σε σχέση με τα μεγαλύτερα σωματίδια φανερώνοντας ότι η φασματική ισχύς των υπομετρικών σωματιδίων μειώνεται σημαντικά για μεγαλύτερες τιμές συχνοτήτων. Τέλος, με τη χρήση του αριθμητικού κώδικα MIAQ εκτιμήθηκε η ευαισθησία του μοντέλου στις μεταβολές του ρυθμού διείσδυσης του αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον αλλά και στις μεταβολές των ταχυτήτων εναπόθεσης των PM₁₀ σωματιδίων απουσία πηγών. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν μεταβάλλοντας μία μόνο παράμετρο κάθε φορά ενώ όλες οι υπόλοιπες διατηρούνταν σταθερές. Από τους ελέγχους ευαισθησίας υπολογίστηκαν οι τιμές ρυθμού διείσδυσης και ταχύτητας εναπόθεσης οι οποίες ήταν στα πλαίσια βιβλιογραφικών τιμών. Τέλος οι συγκεντρώσεις PM₁₀ προσομοιώθηκαν για ένα ολόκληρο εικοσιτετράωρο παρουσία πηγών απ' όπου προέκυψε ότι οι προβλεπόμενες τιμές ήταν σε συμφωνία με τις πραγματικές τιμές των αιωρούμενων σωματιδίων.

5.2 Πρώτη πειραματική μελέτη σε σχολεία της Αθήνας

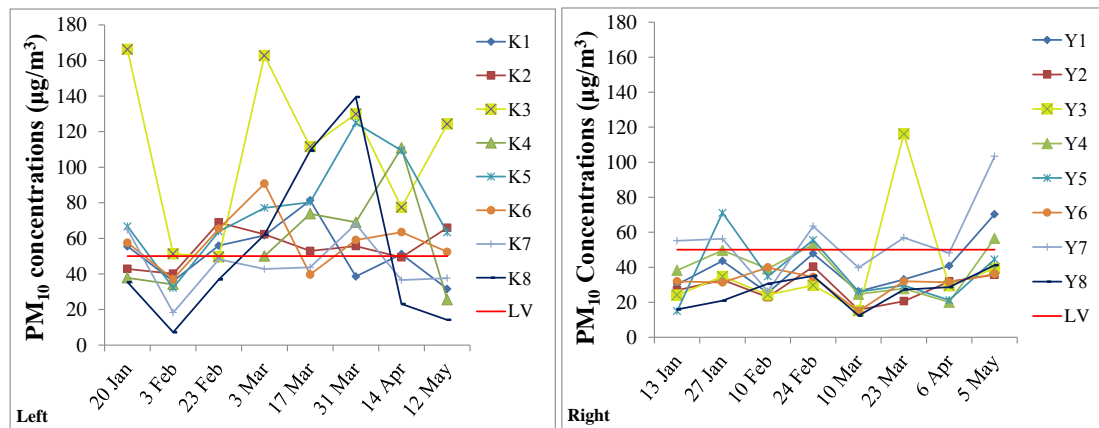
Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παραθέτονται τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των μετρήσεων που έλαβαν χώρα στην πρώτη πειραματική καμπάνια που πραγματοποιήθηκε σε δύο σχολεία της Αττικής, η σύγκριση των τιμών των ρύπων σε σχέση με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις τους στο εξωτερικό περιβάλλον καθώς και περαιτέρω στατιστική ανάλυση.

5.2.1 Επεξεργασία και στατιστική ανάλυση των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων

5.2.1.1 Αιωρούμενα σωματίδια

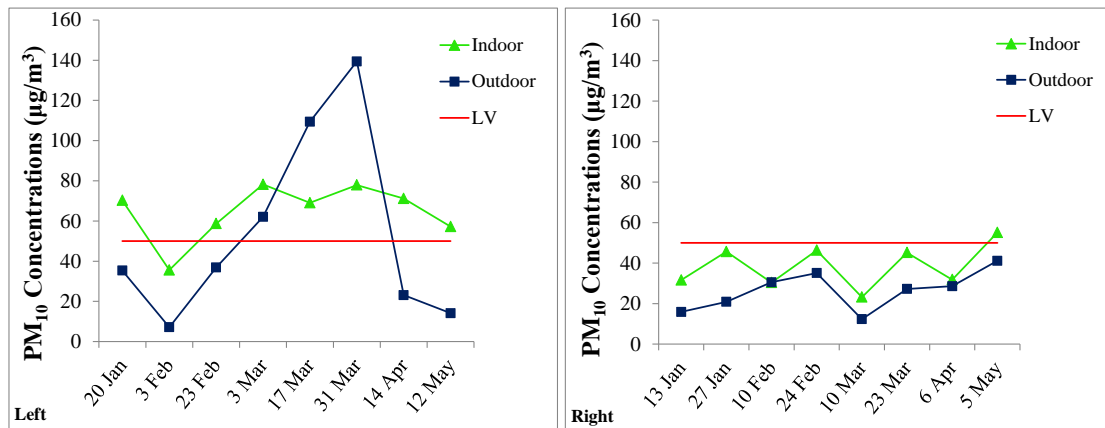
Η διακύμανση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} σε μονάδες $\mu\text{g}/\text{m}^3$ παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-14 (Εικόνα 5-14, αριστερό διάγραμμα για το σχολείο Κ και διάγραμμα στα δεξιά για το σχολείο Υ). Κάθε διάγραμμα περιλαμβάνει 8 γραμμές (μία για κάθε θέση μέτρησης). Οι θέσεις Κ8 και Υ8 όπως αναφέρθηκε και στην μεθοδολογία του πειράματος αναφέρονται στις μετρήσεις στο εξωτερικό περιβάλλον ενώ οι υπόλοιπες 7 θέσεις ήταν σχολικές τάξεις και εργαστήρια υπολογιστών. Η οριζόντια κόκκινη γραμμή (σημειώνεται με LV) αντιστοιχεί στην 24ωρη οριακή τιμή των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) όπως προτείνεται από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO, 2005). Οι εσωτερικές συγκεντρώσεις των PM_{10} και για τα δύο σχολεία κυμάνθηκαν από 14.92 έως και $166.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Συγκεκριμένα, η μέση συγκέντρωση των PM_{10} στο εσωτερικό περιβάλλον ήταν $63.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και κυμάνθηκε μεταξύ 18.27 - $166.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ στο σχολείο Κ (Εικόνα 5-14, αριστερό διάγραμμα) και αντίστοιχα $38.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και 14.92 - $116.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για το σχολείο Υ (Εικόνα 5-14, διάγραμμα στα δεξιά). Οι συγκεντρώσεις στο σχολείο Κ ήταν υψηλότερες ξεπερνώντας τις οριακές τιμές σε πολλές περιπτώσεις (Εικόνα 5-14, αριστερά π.χ. Κ3, st.dev. 46) ενώ στο σχολείο Υ οι συγκεντρώσεις ήταν σημαντικά χαμηλότερες σε όλες σχεδόν τις θέσεις μέτρησης με ορισμένες εξαιρέσεις (Εικόνα 5-14, δεξιά π.χ. Υ3, st.dev. 32). Τα έντονα εσωτερικά μέγιστα σε συγκεκριμένες ημερομηνίες αποδίδονται στους εξής λόγους:

- 1) Την έντονη παρουσία μαθητών στην τάξη πριν και κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, καθώς η παρουσία των μαθητών και η κίνησή τους στο χώρο, είναι δυνατόν να προκαλέσει την επαναιώρηση των μεγάλων σωματιδίων επιδρώντας στις συγκεντρώσεις τους (Guo et al., 2010),
- 2) Τα ελλειπή επίπεδα αερισμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις περισσότερες περιπτώσεις ο αερισμός δεν επαρκούσε για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων οσμών αλλά και συγκεντρώσεων ρύπων.
- 3) Τη διεύδυση σωματιδίων από κατασκευαστικές εργασίες που έλαβαν χώρα στο εξωτερικό περιβάλλον του σχολείου Κ σε συγκεκριμένες ημέρες δειγματοληψίας.



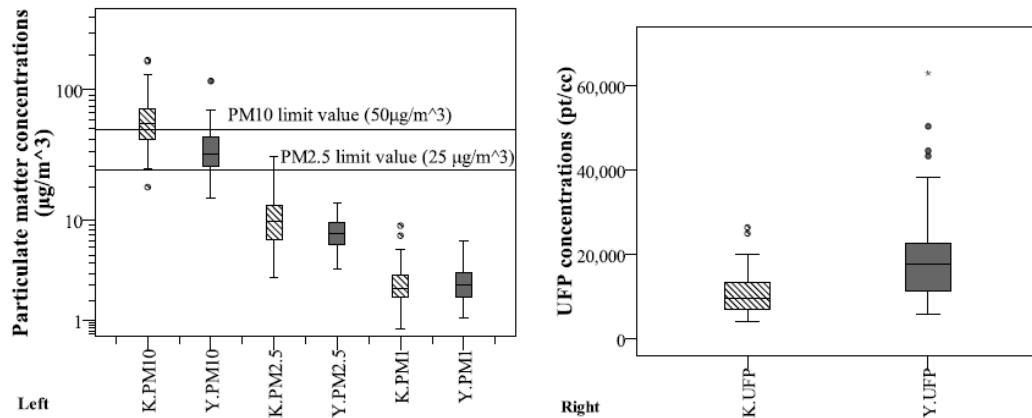
Εικόνα 5-14: Χρονική διακύμανση των συγκεντρώσεων PM₁₀ σε όλες τις θέσεις μέτρησης για τα σχολεία Κ (αριστερά) και Υ (δεξιά)

Οι μέσες συγκεντρώσεις των PM₁₀ σωματιδίων για τις 7 θέσεις δειγματοληψίας στο εσωτερικό περιβάλλον (K1 με K7 και Y1 με Y7) παρουσιάζονται ως προς τις αντίστοιχες εξωτερικές συγκεντρώσεις στην Εικόνα 5-15 (Εικόνα 5-15, αριστερά για το σχολείο Κ και δεξιά για το σχολείο Υ). Οι εξωτερικές συγκεντρώσεις κυμάνθηκαν από 7 έως 139 µg/m³ στο σχολείο Κ και από 12 έως 41 µg/m³ για το σχολείο Υ. Οι περισσότερες μετρήσεις στο εσωτερικό περιβάλλον ήταν μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στο εξωτερικό περιβάλλον και για τα δύο σχολεία και επίσης φάνηκε να ακολουθούν την ίδια τάση κυρίως στο σχολείο Υ. Η πλειοψηφία των μετρήσεων στο εσωτερικό περιβάλλον για το σχολείο Κ ξεπέρασε τις οριακές τιμές. Οι ακραίες εξωτερικές συγκεντρώσεις των PM₁₀ τη 17^η και την 31^η Μαρτίου στο σχολείο Κ ενδεχομένως να οφείλονται στα αυξημένα επίπεδα σχετικής υγρασίας που παρατηρήθηκαν καθώς και στις δύο αυτές ημερομηνίες ψιχάλιζε στη διάρκεια των μετρήσεων. Επιπλέον, τις ημέρες αυτές παρατηρήθηκε έντονη μυρωδιά καπνού από τσιγάρο στο εξωτερικό περιβάλλον του σχολείου Κ, γεγονός που θα μπορούσε να έχει επίδραση στις συγκεντρώσεις. Οι μέσες εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις των PM₁₀ σωματιδίων στο σχολείο Υ ήταν χαμηλότερες από τις οριακές τιμές με εξαίρεση τις μετρήσεις στις 5 Μαΐου όπου οι εσωτερικές συγκεντρώσεις ξεπέρασαν κατά πολύ λίγο την οριακή τιμή των 50 µg/m³.



Εικόνα 5-15: Διακύμανσης των μέσων τιμών των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό περιβάλλον προς τις αντίστοιχες εξωτερικές συγκεντρώσεις στα σχολεία Κ (αριστερά) και Υ (δεξιά)

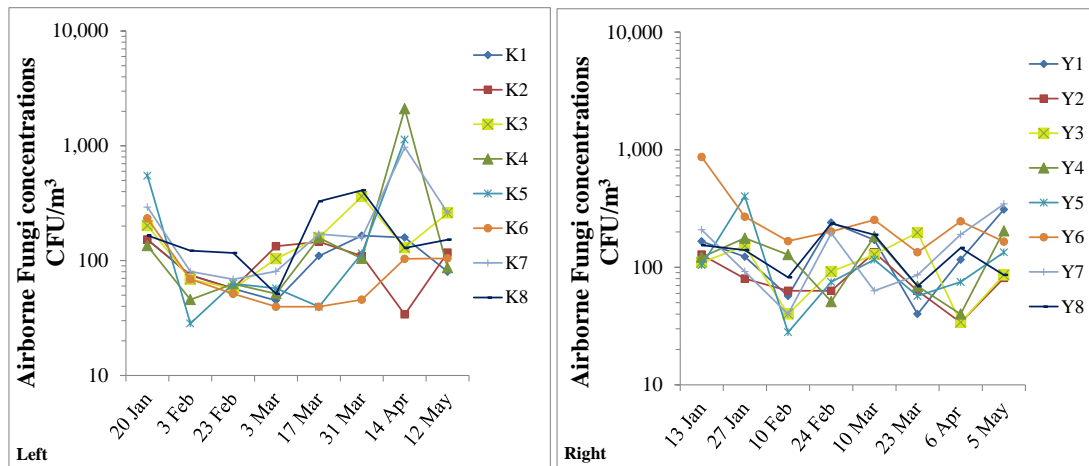
Η κατανομή των συγκεντρώσεων των PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ (Εικόνα 5-16, αριστερά) αλλά και των υπομετρικών σωματιδίων (Εικόνα 5-16, δεξιά) και για τα δύο σχολεία παρουσιάζονται ακολούθως σε θηκογράμματα. Οι συγκεντρώσεις των υπομετρικών σωματιδίων εκφράζονται σε μονάδες πλήθους ανά όγκο (pt/cc). Το 60% του συνόλου των PM₁₀ σωματιδίων στο σχολείο Κ και το 17% στο σχολείο Υ, υπερέβησαν την οριακή τιμή των 50 µg/m³. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις PM₁₀ στο εσωτερικό περιβάλλον του σχολείου Κ θα μπορούσαν να οφείλονται στις αντίστοιχα αυξημένες συγκεντρώσεις στο εξωτερικό περιβάλλον (Εικόνα 5-16, αριστερά) λόγω χωματουργικών εργασιών σε συγκεκριμένες ημέρες γειτονικά του σχολείου Κ, όπου σύννεφα σκόνης γίνονταν συχνά αντιληπτά. Επιπλέον, σε συγκεκριμένες περιπτώσεις η συνολικά διαθέσιμη επιφάνεια ανά μαθητή στο σχολείο Κ ήταν μικρότερη σε σχέση με το σχολείο Υ αλλά και η έντονη δραστηριότητα από την παρουσία των μαθητών είναι δυνατόν να προκαλέσουν επαναιώρηση των αιωρούμενων σωματιδίων μεγαλύτερου μεγέθους αυξάνοντας έτσι τις συγκεντρώσεις τους. Οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2.5} κυμάνθηκαν από 3.16 έως 31.27 µg/m³ στο σχολείο Κ και από 3.75 έως 18.05 µg/m³ στο σχολείο Υ. Η οριακή τιμή των 25µg/m³ για τα PM_{2.5} ξεπεράστηκε κατά 5% μόνο για στο σχολείο Κ. (Εικόνα 5-16, αριστερά). Οι συγκεντρώσεις των υπομετρικών σωματιδίων κυμάνθηκαν από 4,188 έως 26,518 pt/cm³ στο σχολείο Κ και από 5,789 έως 63,093 pt/cm³ στο σχολείο Υ (Εικόνα 5-16, δεξιά). Τα υπομετρικά στο σχολείο Υ ήταν περισσότερο από τα αντίστοιχα στο σχολείο Κ και επίσης παρουσίασαν εντονότερη διασπορά γύρω από τη μέση τιμή. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις υπομετρικών σωματιδίων στο σχολείο Υ ενδεχομένως να οφείλονταν στις εκπομπές των οχημάτων στους γειτονικούς δρόμους. Επίσης εξ' αιτίας των μονών υαλοστασίων και των κουφωμάτων χωρίς μόνωση, στην κατασκευή του σχολείου Υ, οι εξωτερικοί αέριοι ρύποι ενδεχομένως να διείσδυσαν ευκολότερα στα εσωτερικά περιβάλλοντα.



Εικόνα 5-16: Κατανομή των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_1 (δεξιά) σε μορφή θηκογράμματος στα σχολεία K (ργε) και Y (γκρι)

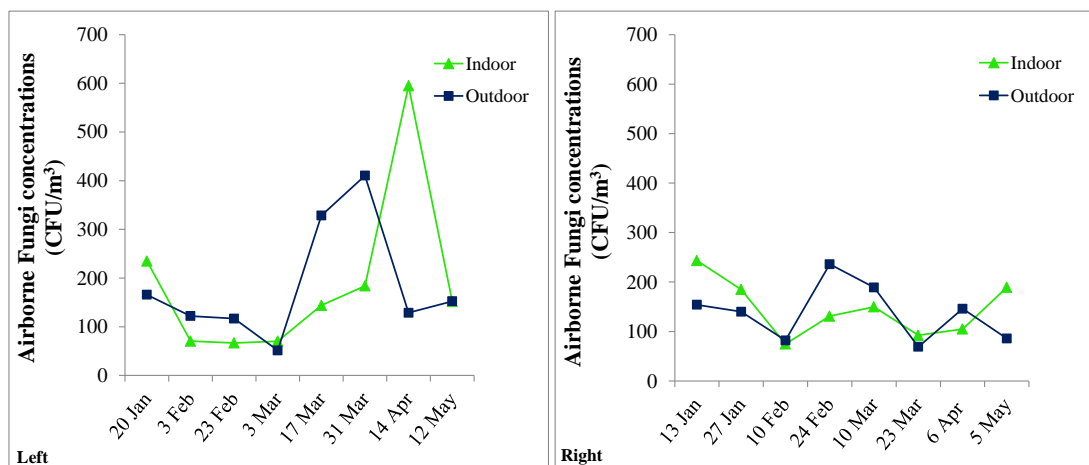
5.2.1.2 Αερομεταφερόμενοι μύκητες

Η χρονική μεταβολή των συνολικών συγκεντρώσεων αερομεταφερόμενων μυκήτων για τα δύο σχολεία παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα στην Εικόνα 5-17, εκφρασμένη σε μονάδες σχηματιζόμενων αποικιών ανά κυβικό μέτρο CFU/m^3 (Colony Forming Units, CFU) και. Κάθε διάγραμμα περιέχει 8 γραμμές (μία από κάθε θέση δειγματοληψίας) ενώ οι γραμμές K8 και Y8 αφορούν τις εξωτερικές μετρήσεις. Οι συνολικές εσωτερικές συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μυκήτων για τα δύο σχολεία κυμαίνονταν μεταξύ 28 και 2,098 CFU/m^3 . Ειδικότερα, η μέση τιμή της συνολικής συγκέντρωσης των αερομεταφερόμενων μυκήτων στα εσωτερικά περιβάλλοντα ήταν 191 CFU/m^3 και κυμάνθηκε μεταξύ 28 - 2,098 CFU/m^3 εκτός από μία ακραία τιμή (5,685 CFU/m^3) στο σχολείο K (Εικόνα 5-17, αριστερά). Αντίστοιχα η μέση τιμή για το σχολείο Y ήταν 146 CFU/m^3 ενώ οι τιμές κυμάνθηκαν από 28 έως 866 CFU/m^3 (Εικόνα 5-17, δεξιά). Σημειώνεται ότι δεν υφίσταται ένα καθολικά αποδεκτό κατώτατο όριο τιμής των συγκεντρώσεων των αερομεταφερόμενων μυκήτων.



Εικόνα 5-17: Χρονική διακύμανση των συγκεντρώσεων των αερομεταφερόμενων μυκήτων σε όλες τις θέσεις μέτρησης για τα σχολεία K (αριστερά) και Y (δεξιά)

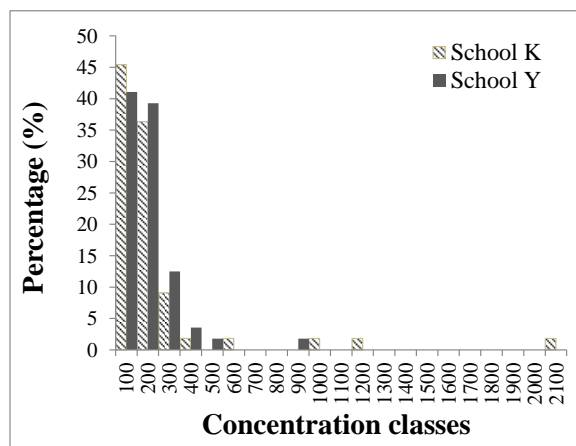
Οι μέσες συγκεντρώσεις των συνολικά αερομεταφερόμενων μυκήτων στους 7 εσωτερικούς χώρους ανά σχολείο (K1 έως K7 και Y1 Y7) παρουσιάζονται σε σχέση με τις εξωτερικές συγκεντρώσεις στην Εικόνα 5-18. Οι εξωτερικές συγκεντρώσεις των αερομεταφερόμενων μυκήτων κυμαίνονταν από 51 έως 410 CFU/m³ στο σχολείο K και από 69 έως 236 CFU/m³ στο σχολείο Y. Στις περισσότερες από τις μετρήσεις, οι εσωτερικές συγκεντρώσεις ακολουθούν την τάση των εξωτερικών συγκεντρώσεων. Στην περίπτωση του σχολείου Y (Εικόνα 5-18, δεξιά), τα επίπεδα εσωτερικών συγκεντρώσεων φάνηκαν να επηρεάζονται κυρίως από τις εξωτερικές συγκεντρώσεις, το οποίο πιθανότατα υποδηλώνει την απουσία σημαντικών εσωτερικών πηγών.



Εικόνα 5-18: Διακύμανσης των μέσων τιμών των συγκεντρώσεων των αερομεταφερόμενων μυκήτων στο εσωτερικό περιβάλλον προς τις αντίστοιχες εξωτερικές συγκεντρώσεις στα σχολεία K (αριστερά) και Y (δεξιά)

Η συχνότητα κατανομής των συγκεντρώσεων του συνόλου των αερομεταφερόμενων μυκήτων στα δύο σχολεία παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-19 σε 21 τάξεις των 100 CFU/m³

που κυμαίνονταν από 100 έως το 2,100. Περισσότερο από το 90% των συνολικών συγκεντρώσεων των αερομεταφερόμενων μυκήτων βρίσκονται μεταξύ 100 και 300 CFU/m³ για τα δύο σχολεία. Ωστόσο, υπήρχε ένα μικρό ποσοστό, ιδίως στο σχολείο K, όπου οι συγκεντρώσεις μεταβάλλονται από 400 έως και 2,098 CFU/m³.



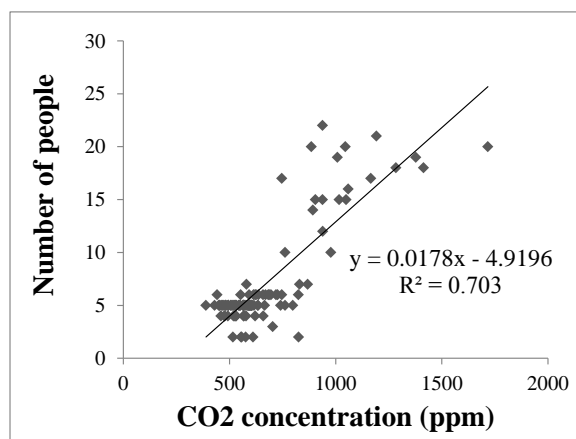
Εικόνα 5-19: Κατανομή συχνοτήτων του συνόλου των αερομεταφερόμενων μυκήτων σε τάξεις των 100 CFU/m³ στα σχολεία K (ριγέ) και Y(γκρι)

Τα επικρατέστερα γένη μυκήτων που ανιχνεύθηκαν στις τάξεις ήταν το *Penicillium*, το *Cladosporium* και ο *Aspergillus*. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι πηγές των συγκεκριμένων μυκήτων βρίσκονται κυρίως στο εξωτερικό περιβάλλον και εξαρτώνται από την εποχικότητα. Από τις βασικότερες πηγές του *Cladosporium* είναι η βλάστηση και τα φύλλα των δέντρων, του *Aspergillus* είναι διαδικασίες σήψης και η παρουσία σκουπιδιών ενώ το *Penicillium* εξαρτάται εμφανίζει έντονη εποχικότητα και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία. Στο εσωτερικό περιβάλλον, τα αυξημένα επίπεδα υγρασίας, η σκόνη και η παρουσία ατόμων αποτελούν ενδεχόμενες πηγές αερομεταφερόμενων μυκήτων. Σπόρια μυκήτων είναι επίσης δυνατόν να ανιχνευτούν πάνω στα ρούχα αλλά και στον εσωτερικό αέρα. Τα σπόρια αυτά είναι δυνατόν να αναπτυχθούν σε αποικίες στην περίπτωση που επικρατήσουν οι ιδανικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Οι συγκεντρώσεις *Penicillium* κυμάνθηκαν από 0 έως 872 CFU/m³ στο σχολείο K και από 6 έως 476 CFU/m³ στο σχολείο Y. Οι συγκεντρώσεις των *Cladosporium* κυμάνθηκαν από 0 έως 585 CFU/m³ στο σχολείο K και από 0 έως 134 CFU/m³ στο σχολείο Y ενώ ο *Aspergillus* ήταν από 0 έως 17 και από 0 έως 176 CFU/m³ στα σχολεία K και Y αντίστοιχα.

5.2.1.3 Διοξείδιο του άνθρακα

Οι συγκεντρώσεις CO₂ συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται ως δείκτης επαρκούς αερισμού, δείκτης αξιολόγησης της ποιότητας του εσωτερικού αέρα αλλά και χαρακτηρισμού της

πληρότητας ενός χώρου (Mumovic et al., 2009b, Santamouris, et al., 2008). Για την περίπτωση των υπό μελέτη σχολείων οι συγκεντρώσεις CO₂ κυμάνθηκαν από 389 έως 1,717 ppm στο σχολείο Κ και από 460 έως 1,377 ppm στο σχολείο Υ. Στην Εικόνα 5-20 παρουσιάζεται σε διάγραμμα διασποράς η γραμμική συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων CO₂ και του αριθμού των μαθητών στις τάξεις και για τα δύο σχολεία. Όπως ήταν αναμενόμενο φαίνεται σημαντική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών ($r^2=0.702$, N=112). Πρέπει να σημειωθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις οι συγκεντρώσεις διοξειδίου υπερέβησαν την προτεινόμενη οριακή τιμή των 1,000 ppm από του πρότυπου της ASHRAE (62-2001 και 62-2004) υποδηλώνοντας ανεπαρκή επίπεδα αερισμού τα οποία συμβάλλουν στον περιορισμό της απομάκρυνσης των μεγαλύτερων σωματιδίων από το εσωτερικό στο εξωτερικό περιβάλλον (Almeida et al., 2011).



Εικόνα 5-20: Διάγραμμα διασπορά των συγκεντρώσεων CO₂ σε σχέση με το πλήθος των ατόμων

5.2.1.4 Σχέσεις εσωτερικών / εξωτερικών παραμέτρων

Πλήθος μελετών έχει δείξει ότι η ρύπανση του εξωτερικού περιβάλλοντος επιδρά στην ποιότητα του εσωτερικού αέρα (Yocom 1982). Συγκεκριμένα, για τα αιωρούμενα σωματίδια έχει αποδειχθεί ότι συγκεκριμένες τάξεις μεγέθους εισχωρούν σε μεγάλο βαθμό στα εσωτερικά περιβάλλοντα (Koutrakis et al., 1992, Özkayanak et al., 1996) ενώ μελετάται και ο λόγος των εσωτερικών προς τις εξωτερικές συγκεντρώσεις (Cao et al., 2005).

Συντελεστές συσχέτισης

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα μελετηθούν οι συσχετίσεις μεταξύ των ρύπων στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον σε κάθε σχολείο. Οι εσωτερικές συγκεντρώσεις για καθεμιά από τις ακόλουθες περιπτώσεις προέκυψε από τη μέση τιμή του συνόλου των μετρήσεων για όλες τις ημέρες δειγματοληψίας. Οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών συγκεντρώσεων των ρύπων συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5-2).

Είναι φανερό ότι για την πλειοψηφία των περιπτώσεων οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό προς το εξωτερικό περιβάλλον ήταν υψηλοί ωστόσο οι συσχετίσεις δεν ήταν σημαντικές, λαμβάνοντας υπ' όψη το επίπεδο σημαντικότητας. Οι συντελεστές συσχέτισης των PM_{2.5} και PM₁ στο εσωτερικό προς το εξωτερικό περιβάλλον ήταν σημαντικοί στο επίπεδο σημαντικότητας 0.01 μόνο για το σχολείο Υ. Επίσης βρέθηκαν σημαντικές συσχετίσεις των UFP στο εσωτερικό προς το εξωτερικό περιβάλλον για το σχολείο της Καισαριανής. Οι συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μυκήτων αλλά και τα επικρατέστερα γένη τους στο εσωτερικό περιβάλλον δεν φάνηκε να συσχετίζονται με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος.

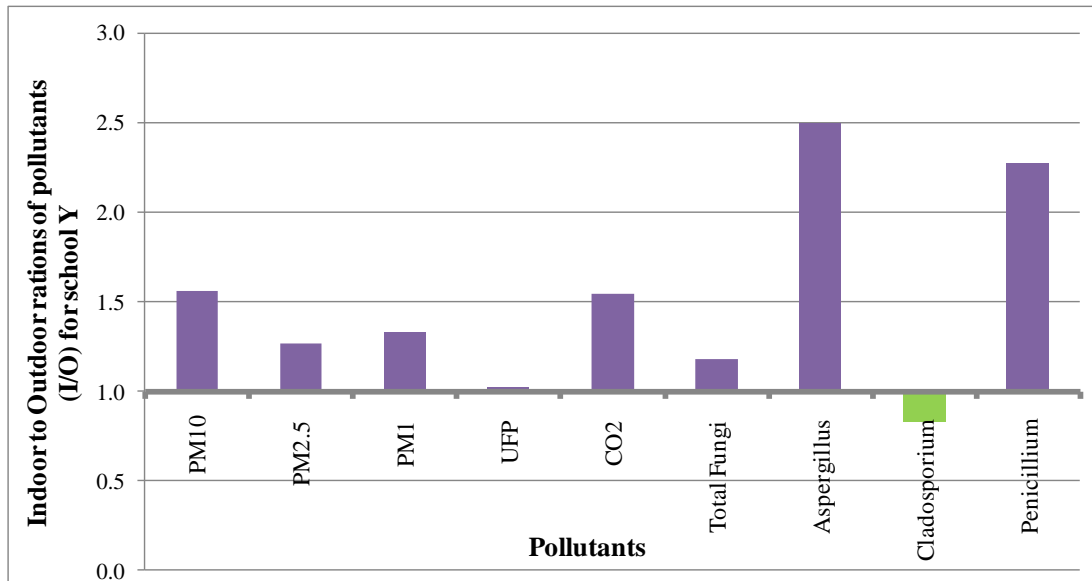
Πίνακας 5-2: Συντελεστές συσχέτισης Pearson και Spearman των ρύπων του εσωτερικού προς το εξωτερικό περιβάλλον

Παράμετρος	Υμηττός		Καισαριανή	
	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman
PM ₁₀	0.705	0.667	0.628	0.595
PM _{2.5}	0.887**	0.857**	0.606	0.690
PM ₁	0.909**	0.850**	0.451	0.571
UFP	0.425	0.595	0.866**	0.833*
CO ₂	0.565	0.714*	0.337	0.383
Total fungi	0.240	0.405	-0.137	0.5
<i>Aspergillus</i>	-0.118	-0.117	-0.199	-0.067
<i>Cladosporium</i>	-0.114	0.06	0.263	0.396
<i>Penicillium</i>	0.157	0.406	-0.034	0.446

**Σημαντική συσχέτιση στο επίπεδο 0.01, * Σημαντική συσχέτιση στο επίπεδο 0.05

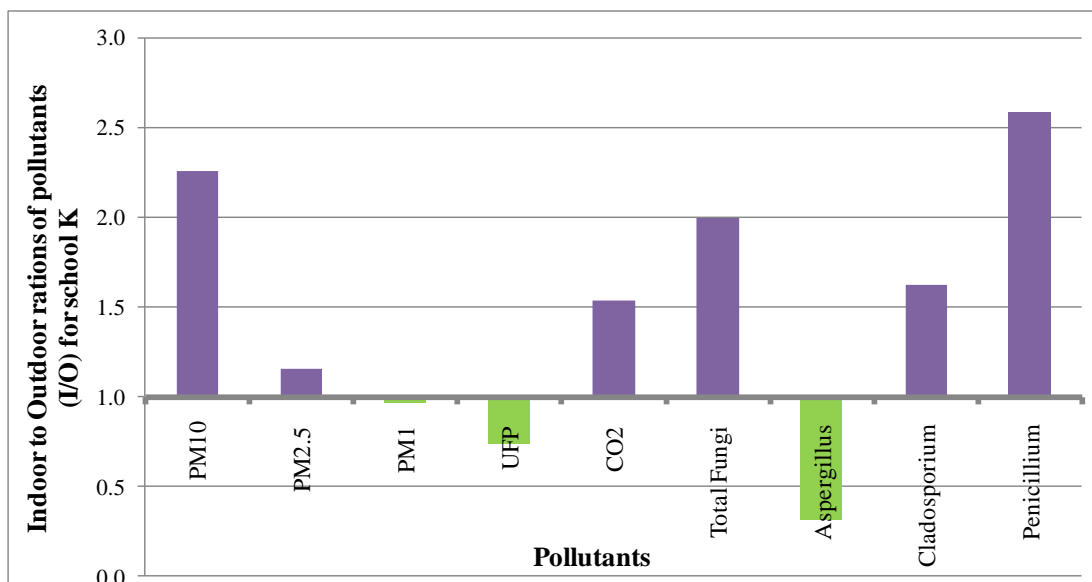
Λόγοι των εσωτερικών / εξωτερικών παραμέτρων

Στο διάγραμμα που ακολουθεί αποτυπώνονται οι λόγοι των εσωτερικών προς τις εξωτερικές συγκεντρώσεις όλων των μετρούμενων ρύπων στο σχολείο Υ (Εικόνα 5-21). Είναι φανερό ότι για την πλειοψηφία των ρύπων οι εσωτερικές συγκεντρώσεις είναι υψηλότερες των εξωτερικών και οι αντίστοιχοι λόγοι είναι περίπου ίσοι με 1.5, ενώ οι εσωτερικές συγκεντρώσεις των UFP είναι περίπου ίσες με τις εξωτερικές. Το *Cladosporium* ήταν ο μόνος ρύπος του οποίου οι συγκεντρώσεις ήταν μεγαλύτερες στο εξωτερικό περιβάλλον. Οι εσωτερικές συγκεντρώσεις των *Aspergillus* και *Penicillium* ήταν κατά περισσότερες από δύο φορές μεγαλύτερες του εξωτερικού περιβάλλοντος.



Εικόνα 5-21: Λόγοι των συγκεντρώσεων στο εσωτερικό προς το εξωτερικό περιβάλλον για το σχολείο Y

Στην Εικόνα 5-22 παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι λόγοι (I/O) των μετρούμενων μεταβλητών για το σχολείο K. όπου για συγκεκριμένες περιπτώσεις παρουσιάζουν ορισμένες διαφορές σε σύγκριση με το σχολείο Y. Στο σχολείο K οι συγκεντρώσεις PM₁ στο εσωτερικό περιβάλλον είναι περίπου οι ίδιες με το εξωτερικό περιβάλλον, ενώ οι εξωτερικές συγκεντρώσεις UFP για το σχολείο K ξεπέρασαν τις εσωτερικές. Επίσης και το *Cladosporium* ήταν μεγαλύτερο στο εσωτερικό περιβάλλον σε αντίθεση με τα ευρισκόμενα για το σχολείο Y.

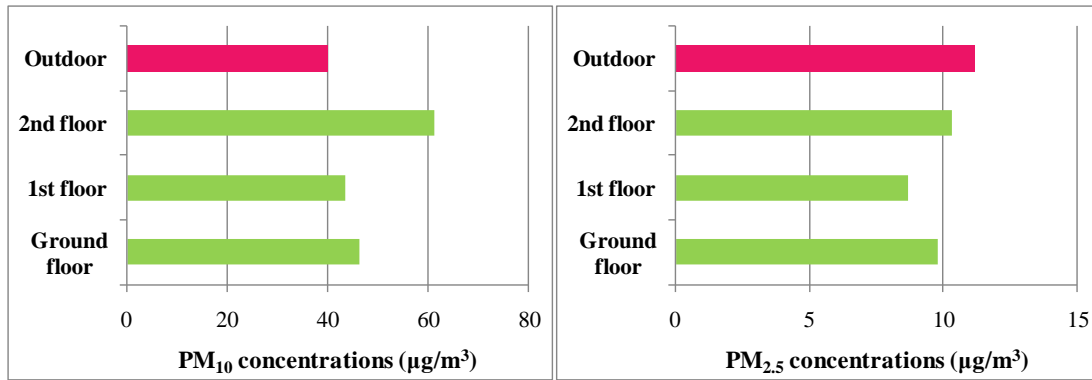


Εικόνα 5-22: Λόγοι των συγκεντρώσεων στο εσωτερικό προς το εξωτερικό περιβάλλον για το σχολείο K

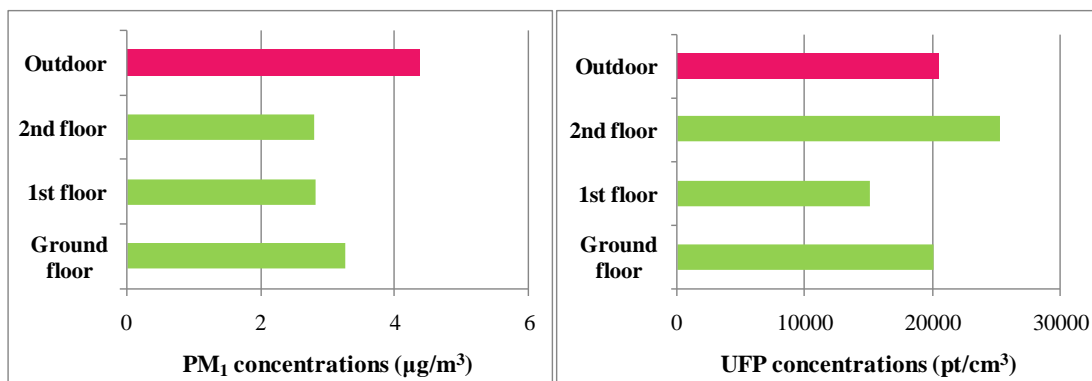
Συγκεντρώσεις ρύπων ανά επίπεδο ορόφου και για τα δύο σχολεία

Στην παράγραφο αυτή μελετάται η κατακόρυφη κατανομή των συγκεντρώσεων των μετρούμενων ρύπων ανά όροφο και για τα δύο σχολεία. Σημειώνεται ότι είναι λίγες οι μελέτες που έχουν ασχοληθεί με την κατακόρυφη κατανομή αιωρούμενων σωματιδίων και αερομεταφερόμενων μυκήτων στους διάφορους ορόφους για φυσικά αεριζόμενα κτίρια. Συγκεκριμένα σε μελέτη των Quang et al., 2012 που εστίασε στα αιωρούμενα σωματίδια, σχολιάζουν ότι ο ρυθμός μεταβολής των σωματιδίων με το ύψος είναι σύνθετος εξ' αιτίας των πολύπλοκων ροών γύρω από τα κτίρια και των εκπομπών των οχημάτων από τις παρακείμενες οδούς.

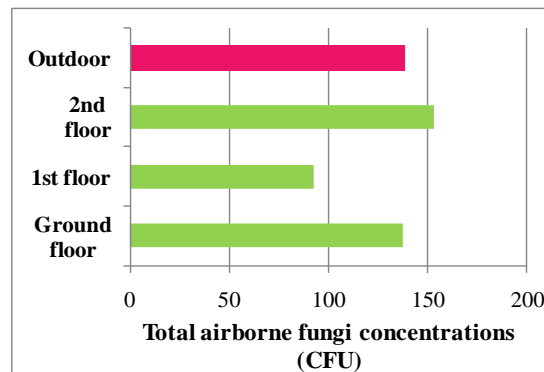
Οι μέσες συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων και των αερομεταφερόμενων μυκήτων στα δύο σχολεία ανά όροφο για το σύνολο των ημερών δειγματοληψίας παρουσιάζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν (Εικόνα 5-23, Εικόνα 5-24, Εικόνα 5-25). Για τους περισσότερους από τους μετρούμενους ρύπους, η κατακόρυφη κατανομή είναι παρόμοια. Οι συγκεντρώσεις του ισογείου (ground floor) προσεγγίζουν τις εξωτερικές συγκεντρώσεις ενώ είναι μεγαλύτερες από αυτές του πρώτου ορόφου κάτι το οποίο φανερώνει ότι στο ισόγειο οι συγκεντρώσεις επηρεάζονται από τις εκπομπές των οχημάτων στους γειτονικούς δρόμους (Kalaiarasan et al., 2009, Quang et al., 2012). Οι συγκεντρώσεις του δεύτερου ορόφου είναι μεγαλύτερες από αυτές του πρώτου. Παρόλο που ο πρώτος όροφος είναι πλησιέστερα στις εκπομπές των οχημάτων σε σχέση με τον δεύτερο όροφο, οι συγκεντρώσεις τόσο των αιωρούμενων σωματιδίων όσο και των αερομεταφερόμενων μυκήτων στον όροφο αυτό είναι χαμηλότερες. Η μείωση των σωματιδίων στον πρώτο όροφο θα μπορούσε να αποδοθεί στην εκτροπή του ρυπασμένου αέρα λόγο κυκλοφορίας των οχημάτων εξ' αιτίας των περιβαλλόντων δέντρων που είναι δυνατόν να παγιδεύουν τα σωματίδια (Cheong et al., 2007). Επίσης οι αυξημένες συγκεντρώσεις στο δεύτερο όροφο σε σχέση με τον πρώτο θα μπορούσαν να αποδοθούν σε επίδραση τοπικών πηγών όπως η παρουσία των ατόμων, ο ανεπαρκής αερισμός κ.α. (Jung et al., 2011). Οι εσωτερικές συγκεντρώσεις των $PM_{2.5}$ (Εικόνα 5-23, δεξιά) και των PM_1 (Εικόνα 5-24, αριστερά) δεν φάνηκε αν επηρεάζονται σημαντικά από το επίπεδο του ορόφου (Jung et al., 2011, Montoya and Hildemann 2005). Όπως και για την περίπτωση των αιωρούμενων σωματιδίων έτσι και οι αερομεταφερόμενοι μύκητες του ισογείου ήταν υψηλότεροι σε σχέση με τον πρώτο όροφο (Εικόνα 5-25) (Khattab and Levetin 2008).



Εικόνα 5-23: Μέσες συγκεντρώσεις σωματιδίων PM₁₀ (αριστερά) και PM_{2.5} (δεξιά) ανά όροφο για τα δύο σχολεία



Εικόνα 5-24: Μέσες συγκεντρώσεις σωματιδίων PM₁ (αριστερά) και UFP (δεξιά) ανά όροφο για τα δύο σχολεία

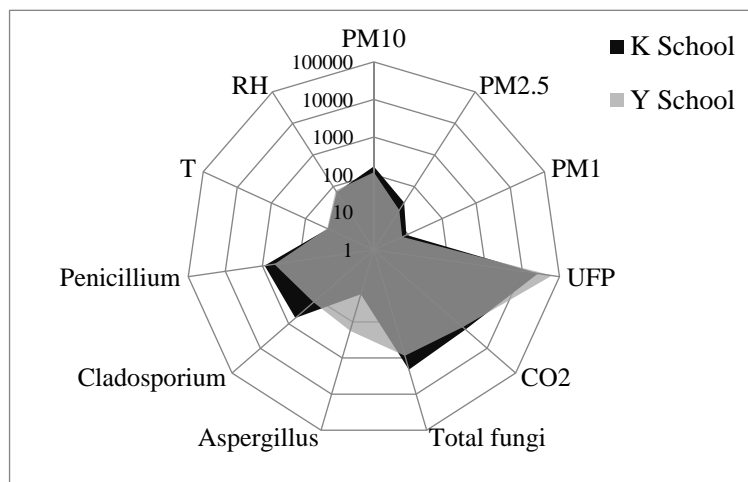


Εικόνα 5-25: Μέσες συγκεντρώσεις του συνόλου των αερομεταφερόμενων μυκήτων ανά όροφο για τα δύο σχολεία.

5.2.1 Περαιτέρω στατιστική ανάλυση

Κοινή περιοχή δεδομένων των μετρήσεων από τα δύο σχολεία

Οι περιοχές τιμών που εκτείνεται το σύνολο των δεδομένων των μετρούμενων παραμέτρων στα δύο σχολεία παρουσιάζονται σε ροδόγραμμα στην Εικόνα 5-26. Οι μέγιστες τιμές κάθε μεταβλητής έχουν χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό του διαγράμματος. Οι μεταβλητές που μετρήθηκαν στο σχολείο Κ παρουσιάζονται με μαύρο ενώ για το σχολείο Υ φαίνονται με ανοιχτό γκρι. Με σκοπό την ομογενοποίηση του δείγματος από τα δύο σχολεία έγινε η παραδοχή ότι παρόμοιες τιμές παράγονται από παρόμοιες συνθήκες και έτσι η περαιτέρω επεξεργασία αφορά την κοινή περιοχή δεδομένων από τα δύο σχολεία που είναι η περιοχή δεδομένων που υπερκαλύπτονται η μία από την άλλη και φαίνεται με σκούρο γκρι στην Εικόνα 5-26 από την οποία έχουν απομακρυνθεί οι ακραίες τιμές οι οποίες ενδεχομένως να οφείλονται σε ιδιαίτερα χαρακτηριστικά σε καθένα από τα σχολεία. Η κοινή αυτή περιοχή αναπαριστά ποσοστό περίπου 66% του συνόλου των μετρήσεων και για τα δύο σχολεία. Τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία όλων των εσωτερικά μετρούμενων παραμέτρων για τα σχολεία Κ (N=55), Υ(N=56) και την κοινής περιοχής δεδομένων (θα συμβολίζεται με C, N=73) συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5-3). Οι μέσες τιμές τόσο για τα PM₁₀ όσο και για τα PM_{2.5} της κοινής περιοχής ήταν χαμηλότερες από τις προτεινόμενες τιμές του παγκόσμιου οργανισμού υγείας. Οι ακραίες τιμές εκτός της κοινής περιοχής που φαίνονται στην Εικόνα 5-26 φιλτράρονταν και στο εξής η στατιστική ανάλυση αναφέρεται στην κοινή περιοχή δεδομένων μεγέθους N=73.



Εικόνα 5-26: Ροδόγραμμα που προέκυψε από τις μέγιστες τιμές κάθε παραμέτρου σε κάθε σχολείο

Πίνακας 5-3: Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα των παραμέτρων εσωτερικού περιβάλλοντος των σχολείων Κ, Υ και της κοινής περιοχής δεδομένων-С

Μεταβλητές	Σχολείο	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέση τιμή	Διάμεσος	Τυπική απόκλιση
PM ₁₀ (μg/m ³)	K (N=55)	18.27	166.18	64.53	55.94	32.07
	Y (N=56)	14.92	116.14	38.65	33.74	19.35
	C (N=73)	14.92	116.14	47.83	43.69	20.66
PM _{2,5} (μg/m ³)	K (N=55)	3.16	31.27	10.90	9.76	5.52
	Y (N=56)	3.75	18.05	8.19	7.81	2.78
	C (N=73)	3.16	17.58	8.71	7.99	2.97
PM ₁ (μg/m ³)	K (N=55)	.72	9.01	2.83	2.42	1.58
	Y (N=56)	1.09	6.81	2.94	2.75	1.29
	C (N=73)	0.72	6.81	2.59	2.39	1.08
UFP (pt/cm ³)	K (N=55)	4188	26518	10853	9774	4895
	Y (N=56)	5789	63093	19333	17530	11392
	C (N=73)	4188	26518	12365	10059	5865
CO ₂ (ppm)	K (N=55)	389	1717	666	588	265
	Y (N=56)	460	1377	674	601	187
	C (N=73)	389	1377	613	570	166
Total Fungi (CFU/m ³)	K (N=55)	28	2098	191	104	329
	Y (N=56)	28	866	146	123	128
	C (N=73)	28	310	102	80	67
<i>Aspergillus</i> (CFU/m ³)	K (N=55)	0	17	3	0	4
	Y (N=56)	0	176	15	6	34
	C (N=73)	0	17	3	0	4
<i>Cladosporium</i> (CFU/m ³)	K (N=55)	0	585	43	23	85
	Y (N=56)	0	134	22	17	24
	C (N=73)	0	116	22	17	21
<i>Penicillium</i> (CFU/m ³)	K (N=55)	0	872	99	40	177
	Y (N=56)	6	476	76	66	75
	C (N=73)	0	227	51	34	45
T(°C)	K (N=55)	15.83	22.19	19.67	20.18	1.51
	Y (N=56)	11.95	23.23	18.84	18.68	2.21
	C (N=73)	14.63	22.19	19.37	19.82	1.8
RH (%)	K (N=55)	47.14	66.90	53.88	53.20	4.67
	Y (N=56)	26.31	75.48	50.87	52.17	12.65
	C (N=73)	26.31	65.14	51.44	52.42	7.53

Σε πρώτη φάση στη μελέτη αυτή εξετάστηκαν συσχετίσεις μεταξύ των αιωρούμενων σωματιδίων και των αερομεταφερόμενων σωματιδίων και επιπλέον εξετάστηκαν συσχετίσεις μεταξύ PM_{10} και θερμοκρασίας. Για το σκοπό αυτό η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε 4 βήματα:

Βήμα 1^ο: Πραγματοποιήθηκε ανάλυση κύριων συνιστωσών στο σύνολο των δεδομένων της κοινής περιοχής με σκοπό να εντοπιστούν κρυμμένα μοτίβα συσχετίσεων των δεδομένων. Οι κύριες συνιστώσες κατηγοριοποιήθηκαν σύμφωνα με το σύνολο της πληροφορίας που εμπεριέχεται στο σύνολο των δεδομένων που εκπροσωπεί.

Βήμα 2^ο: Υπολογίστηκαν οι συντελεστές συσχέτισης Spearman για κάθε πιθανό συνδυασμό παραμέτρων

Βήμα 3^ο: Αναπτύχθηκαν γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης για όλα τα στατιστικά σημαντικά ζεύγη παραμέτρων.

Βήμα 4^ο: Τέλος, εφαρμόστηκαν τεχνικές πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης με σκοπό να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη συγκεκριμένων κάθε φορά μεταβλητών. Σύμφωνα με τα ευρισκόμενα της ανάλυσης κύριων συνιστωσών συγκεκριμένες μεταβλητές αποκλείστηκαν από τα μοντέλα παλινδρόμησης σε κάθε περίπτωση.

5.2.1.1 Ανάλυση κύριων συνιστωσών

Η ανάλυση κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis- PCA) είναι μια μέθοδος μείωσης των διαστάσεων του συνόλου των δεδομένων με την ταυτόχρονη διατήρηση των πληροφοριών και τη μεταβλητότητα των δεδομένων. Είναι μια μαθηματική διαδικασία η οποία μετασχηματίζει ένα σύνολο μεταβλητών που ενδεχομένως συνδέονται μεταξύ τους με ένα σύνολο ασυσχέτιστων μεταβλητών. Οι νέες μεταβλητές ονομάζονται κύριες συνιστώσες και είναι γραμμικές συσχετίσεις του αρχικού συνόλου των μεταβλητών. Η πρώτη συνιστώσα έχει τη μεγαλύτερη δυνατή μεταβλητότητα και κάθε επόμενη συνιστώσα έχει το μεγαλύτερο ποσοστό μεταβλητότητας που δεν έχει εξηγηθεί από την πρώτη συνιστώσα (Gaitani et al., 2010, Jolliffe 2002). Η PCA επίσης δίνει μια ιδέα σχετικά με τις συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων.

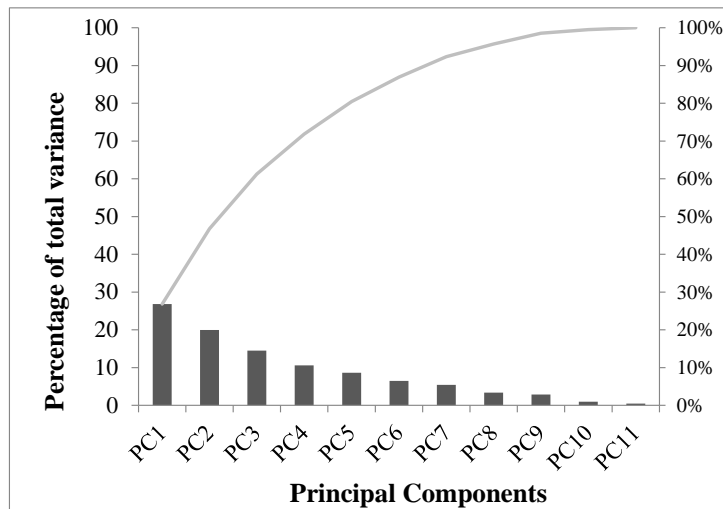
Η PCA εφαρμόστηκε στις 11 παραμέτρους του συνόλου των δεδομένων της κοινής περιοχής (N=73). Αυτές οι παράμετροι ήταν οι εξής: PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 , UFP, CO_2 , Total Fungi, *Penicillium*, *Cladosporium*, *Aspergillus*, θερμοκρασία και σχετική υγρασία. Με σκοπό να βρεθεί το πλήθος των σημαντικότερων κύριων συνιστωσών εφαρμόστηκε η μέθοδος περιστροφής Varimax. Στη συνέχεια εξετάστηκαν οι 4 συνιστώσες που είχαν ιδιοτιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Η λύση των τεσσάρων συνιστωσών συγκεντρώνει το 71.848% της συνολικής διακύμανσης (Πίνακας 5-4).

Πίνακας 5-4: Πίνακας περιστροφής συνιστωσών (Rotated component matrix)

	Συνιστώσες (Components)			
	1	2	3	4
PM ₁₀	.162	.755	.169	.138
PM _{2.5}	.066	.586	.086	.737
PM ₁	-.041	-.082	.059	.952
UFP	.276	-.104	.848	.100
CO ₂	-.124	.194	.793	.018
Total fungi	.960	.139	.094	-.043
<i>Aspergillus</i>	.098	.493	.202	-.066
<i>Cladosporium</i>	.828	.183	-.183	.000
<i>Penicillium</i>	.876	-.044	.238	.026
T	.025	.808	-.151	-.022
RH	-.041	.506	-.302	.302
Ιδιοτιμή	2.950	2.195	1.595	1.164
% Μεταβλητότητας	26.816	19.952	14.500	10.581
Αθροιστικό %	26.816	46.768	61.268	71.848

Η πρώτη συνιστώσα συγκεντρώνει το 26.816% της συνολικής διακύμανσης και παρουσιάζει σημαντική θετική συνεισφορά από το σύνολο των αερομεταφερόμενων μυκήτων, τα *Penicillium* και τα *Cladosporium*. Η συνιστώσα αυτή αντιπροσωπεύει τον βιολογικό παράγοντα. Η δεύτερη συνιστώσα συσχετίζεται με τα χονδρόκοκκα σωματίδια (PM₁₀ και PM_{2.5}) καθώς και τις περιβαλλοντικές παραμέτρους (θερμοκρασία και σχετική υγρασία) και συγκεντρώνει το 19.952% της συνολικής διακύμανσης. Η τρίτη συνιστώσα αντιπροσωπεύει το 14.5% του συνόλου της διακύμανσης και συσχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τα υπομετρικά σωματίδια και το CO₂. Τέλος, η τέταρτη συνιστώσα που εξηγεί το 10.581% του συνόλου της διακύμανσης συσχετίζεται με υψηλές τιμές λεπτόκοκκων σωματιδίων (PM_{2.5} και PM₁).

Το ποσοστό της συνολικής διακύμανσης των κύριων συνιστωσών (11 PCs) παρουσιάζεται στο ακόλουθο γράφημα (Εικόνα 5-27). Η καμπύλη αναπαριστά την αθροιστική αναλογία του συνόλου της διακύμανσης κατά την επιλογή συγκεκριμένου αριθμού συνιστωσών. Οι πρώτες τρεις συνιστώσες συγκεντρώνουν σημαντικό ποσοστό πληροφορίας που ανέρχεται στο 65% του συνόλου της διακύμανσης.



Εικόνα 5-27: Ποσοστό του συνόλου της διακύμανσης που αντιστοιχεί σε καθεμιά από τις κύριες συνιστώσες

5.2.1.2 Συσχετίσεις μεταξύ αέριων ρύπων στο εσωτερικό περιβάλλον

Στο ακόλουθο κεφάλαιο υπολογίστηκαν διμεταβλητές συσχετίσεις μεταξύ όλων των μετρούμενων παραμέτρων και τα αποτελέσματα αυτών συγκρίθηκαν με αυτά της διεθνούς βιβλιογραφίας. Στον ακόλουθο πίνακα (συσχετίσεων) συνοψίζονται οι συντελεστές συσχέτισης Spearman rank (Πίνακας 5-5) όπου βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις στο επίπεδο σημαντικότητας 0.01 για τις ακόλουθες περιπτώσεις:

1. PM_{10} προς τα $PM_{2.5}$, τον *Aspergillus*, τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία.

Βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ τόσο των $PM_{2.5}$ όσο και των PM_{10} με τη θερμοκρασία και τον *Aspergillus* στο επίπεδο σημαντικότητας 0.01, γεγονός το οποίο είναι σε συμφωνία με ευρισκόμενα της μελέτης των Adhikari et al., (2006). Επιπλέον οι Srimuruganandam and Nagendra (2011) και Raisi et al (2010) βρήκαν συσχετίσεις μεταξύ των PM_{10} με τα $PM_{2.5}$ ($R_{\text{Pearson}}^2=0.54-0.76$ and $R^2=0.77$ αντίστοιχα) τιμές παρόμοιες με τα ευρισκόμενα της παρούσας μελέτης. Τα σωματίδια PM_{10} και $PM_{2.5}$ συσχετίστηκαν επιπλέον με τη σχετική υγρασία γεγονός το οποίο επαληθεύει το ότι τις ημερομηνίες 17^η και 31^η του Μάρτη στο σχολείο K (Εικόνα 5-18, αριστερά) είχε παρατηρηθεί βροχόπτωση.

2. Συσχετίσεις των $PM_{2.5}$ με τα PM_1 , τον *Aspergillus* τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία.

Οι Deggobi et al (2011) αναφέρουν σημαντικές θετικές συσχετίσεις μεταξύ των $PM_{2.5}$ και του *Aspergillus* ($R^2=0.186$, $p<0.05$) ενώ οι Srimuruganandam and Nagendra (2011) βρήκαν ισχυρότερες συσχετίσεις μεταξύ των $PM_{2.5}$ και PM_1 ($R_{\text{Pearson}}^2=0.92-0.98$) σε σχέση με τα ευρισκόμενα της παρούσης μελέτης.

3. Συσχετίσεις μεταξύ των UFP προς το CO_2 και το *Penicillium*.

Τα UFP συσχετίστηκαν θετικά με το *Penicillium* στο επίπεδο σημαντικότητας 0.01. Σύμφωνα με τους Hargreaves et al, (2003) οι ομοιότητες μεταξύ των αερομεταφερόμενων μυκήτων και των υπομετρικών σωματιδίων οφείλονται στο γεγονός ότι και τα δύο μεγέθη μετρώνται σε μονάδες πλήθους. Τα UFP συσχετίστηκαν επίσης με το CO₂. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός εξετάστηκε και από τους Weichenthal (2008) ωστόσο οι συσχετίσεις που βρήκαν δεν ήταν σημαντικές ($R^2=0.04$).

4. Το σύνολο των αερομεταφερόμενων μυκήτων προς το *Cladosporium* και το *Penicillium* αλλά και του *Cladosporium* προς το *Penicillium*.

5. Συσχέτιση του *Aspergillus* προς τη θερμοκρασία.

Τόσο οι Adhikari et al, (2006) όσο και οι Hammed et al, (2012) αναφέρουν σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ των *Aspergillus* και της θερμοκρασίας.

Αντίστοιχα, σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 5-5) βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις και στο επίπεδο σημαντικότητας 0.05 για τις ακόλουθες περιπτώσεις:

1. Μεταξύ των PM₁₀ και των Total Fungi

Σε αντίθεση με τα ευρισκόμενα των Lin and Li (2000) όπου τα PM₁₀ συσχετίστηκαν με το *Penicillium*, στην παρούσα μελέτη τα PM₁₀ συσχετίστηκαν σημαντικά με τους αερομεταφερόμενους μύκητες στο επίπεδο σημαντικότητας 0.05.

2. Μεταξύ UFP προς τα Total Fungi.

Η σχετική υγρασία για την περίοδο δειγματοληψίας δεν συσχετίστηκε ούτε με το σύνολο των αερομεταφερόμενων μυκήτων ούτε με κανένα από τα επικρατέστερα γένη, γεγονός το οποίο είναι σε συμφωνία με τα ευρισκόμενα των Sousa et al., (2008).

Το μεγαλύτερο πλήθος των προαναφερόμενων συσχετίσεων επαληθεύονται και με τα ευρισκόμενα της ανάλυσης κύριων συνιστωσών (PCA).

Πίνακας 5-5: Πίνακας συσχετίσεων συντελεστών Spearman Rank μεταξύ των μετρούμενων μεταβλητών (N=73)

Μεταβλητές	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁	UFP	CO ₂	Total fungi	<i>Aspergillus</i>	<i>Cladosporium</i>	<i>Penicillium</i>	T	RH
PM ₁₀	1	0.584**	0.012	-0.006	0.157	0.240*	0.301**	0.210	0.120	0.423**	0.354**
PM _{2,5}		1	0.636**	0.098	0.199	0.038	0.318**	0.149	-0.008	0.408**	0.434**
PM ₁			1	0.097	0.156	-0.110	0.104	0.047	0.010	-0.047	0.182
UFP				1	0.558**	0.261*	0.068	0.061	0.364**	-0.116	-0.075
CO ₂					1	0.076	-0.038	-0.151	0.190	-0.107	0.085
Total fungi						1	0.194	0.782**	0.832**	0.116	0.086
<i>Aspergillus</i>							1	0.162	0.136	0.309**	0.157
<i>Cladosporium</i>								1	0.547**	0.216	0.015
<i>Penicillium</i>									1	-0.075	0.002
T										1	0.389**
RH											1

**Σημαντική συσχέτιση στο επίπεδο σημαντικότητας 0.01, * Σημαντική συσχέτιση στο επίπεδο σημαντικότητας 0.05

5.2.1.3 Γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης

Από τα στατιστικά σημαντικά ζευγάρια των μεταβλητών του πίνακα που προηγήθηκε (Πίνακας 5-5) αναπτύχθηκαν γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης για το επίπεδο σημαντικότητας 0.01 τα οποία παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 5-6). Οι εξαρτημένες και ανεξάρτητες μεταβλητές, οι τιμές β και α της εξίσωσης γραμμικής παλινδρόμησης: $y = \beta x + \alpha$, οι συντελεστές r^2 και r_{adj}^2 (adjusted) καθώς και οι τιμές F των γραμμικών μοντέλων παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 5-6). Οι συντελεστές συσχέτισης r^2 κυμάνθηκαν από 0.044 έως 0.748 για τιμές επιπέδων σημαντικότητας (p-values) μικρότερες των 0.05 απορρίπτοντας έτσι τη μηδενική υπόθεση που υποστηρίζει τη μη συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών.

Πίνακας 5-6: Γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης για τα στατιστικά σημαντικά ζεύγη των μετρούμενων παραμέτρων στο επίπεδο σημαντικότητας 0.01 (N=73)

Εξαρτημένη μεταβλητή	Ανεξάρτητη μεταβλητή	β	α	N	r^2	r_{adj}^2	F	p
PM ₁₀	PM _{2.5}	4.311	10.30	73	0.385	0.376	44.398	0.000
PM ₁₀	<i>Aspergillus</i>	1.261	44.62	73	0.057	0.044	4.303	0.042
PM ₁₀	T	4.783	-44.81	73	0.174	0.162	14.941	0.000
PM ₁₀	RH	0.669	13.42	73	0.059	0.046	4.488	0.038
PM _{2.5}	PM ₁	1.669	4.38	73	0.371	0.362	41.829	0.000
PM _{2.5}	<i>Aspergillus</i>	0.190	8.22	73	0.062	0.049	4.725	0.033
PM _{2.5}	T	0.694	-4.74	73	0.177	0.165	15.245	0.000
PM _{2.5}	RH	0.143	1.33	73	0.132	0.120	10.798	0.002
UFP	CO ₂	16.748	2095.99	73	0.225	0.214	20.612	0.000
UFP	<i>Penicillium</i>	50.917	9761.54	73	0.151	0.139	12.647	0.001
Total Fungi	<i>Cladosporium</i>	2.371	50.57	73	0.581	0.575	98.467	0.000
Total Fungi	<i>Penicillium</i>	1.289	35.89	73	0.751	0.748	214.545	0.000
<i>Aspergillus</i>	T	0.560	-8.29	73	0.066	0.053	5.041	0.028
<i>Cladosporium</i>	<i>Penicillium</i>	0.240	9.33	73	0.252	0.242	23.967	0.000

5.2.1.4 Πολυπαραγοντικά μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης

Πολυπαραγοντικά μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης αναπτύχθηκαν στη συνέχεια εξετάζοντας διάφορες περιπτώσεις εξαρτημένων μεταβλητών. Η προς τα πίσω σταδιακή πολυπαραγοντική ανάλυση (Backward Stepwise Multiple Regression Analysis) χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να εξεταστεί το πόσο ισχυρή είναι η πρόβλεψη κάθε παραμέτρου (Πίνακας 5-7).

Σύμφωνα με τα ευρισκόμενα της PCA συγκεκριμένες ανεξάρτητες παράμετροι αποκλείστηκαν από συγκεκριμένα μοντέλα με τα οποία συσχετιζόνταν άμεσα προς τις εξαρτημένες μεταβλητές (Πίνακας 5-4). Για παράδειγμα, τα σωματίδια PM_{2.5} και PM₁ δεν συμπεριλήφθηκαν στο 2^ο μοντέλο παλινδρόμησης στο οποίο τα PM₁₀ ήταν η εξαρτημένη μεταβλητή και τα *Penicillium*, *Cladosporium* και *Aspergillus* αποκλείστηκαν από το 4ο μοντέλο που είχε τους αερομεταφερόμενους μύκητες ως εξαρτημένη μεταβλητή (Πίνακας 5-7). Η παρουσία των μεταβλητών αυτών στα συγκεκριμένα μοντέλα θα αντιπροσώπευε το μεγαλύτερο μέρος της διακύμανσης του μοντέλου περιορίζοντας κατά πολύ την μεταβλητότητα των άλλων παραμέτρων.

Η στάθμη σημαντικότητας για καθένα από τα μοντέλα ήταν μικρότερη των 0.05 υποδεικνύοντας ότι η μεταβλητότητα των μοντέλων δεν είναι τυχαία και τα μοντέλα είναι δυνατόν να φανούν χρήσιμα. Οι συντελεστές προσδιορισμού (coefficient of determination) r² κυμάνθηκαν από 0.121 έως και 0.476 (Πίνακας 5-7). Η θερμοκρασία είναι παρούσα στα περισσότερα γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης και επίσης είναι φανερό ότι σε πολλά από αυτά προβλέπονται είτε τα αιωρούμενα σωματίδια είτε οι αερομεταφερόμενοι μύκητες δοθέντων ως ανεξάρτητες μεταβλητές τους αερομεταφερόμενους μύκητες και τα αιωρούμενα σωματίδια αντίστοιχα σε συνδυασμό με μετεωρολογικές παραμέτρους (Πίνακας 5-7).

Πίνακας 5-7: Πολυπαραγοντικά μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης διάφορων συνδυασμών των μετρούμενων μεταβλητών

Πολυπαραγοντικά μοντέλα παλινδρόμησης	N	r ²	r _{adj} ²	F	p
1. UFP = 22840.979 +360.269 x PM _{2.5} +16.584 x CO ₂ -821.626xT -217.655 x RH +25.644 x Total fungi +282.739 x <i>Aspergillus</i>	73	0.476	0.429	10.009	0.000
2. PM ₁₀ = -51.87 +4.895 x T +0.095 x <i>Penicillium</i>	73	0.216	0.194	9.669	0.000
3. PM _{2.5} = -10.516 +0.00012 x UFP +0.592 x T +0.121 x RH	73	0.289	0.259	9.37	0.000
4. Total fungi = 57.9 +0.868 x PM ₁₀ +0.004 x UFP	73	0.181	0.146	5.089	0.003
5. <i>Aspergillus</i> = -11.784 +0.00016 x UFP +0.639 x T	73	0.121	0.095	4.8	0.011

5.2.2 Συμπεράσματα

Τα βασικότερα συμπεράσματα της συγκεκριμένης πειραματικής καμπάνιας συνοψίζονται στη συνέχεια. Οι εσωτερικές συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων και των αερομεταφερόμενων μυκήτων ήταν σε πολλές περιπτώσεις παρόμοιες με τις αντίστοιχες εξωτερικές υποδεικνύοντας ότι στην απουσία σημαντικών εσωτερικών πηγών οι εσωτερικές συγκεντρώσεις επηρεάζονται σημαντικά από τις αντίστοιχες εξωτερικές. Ωστόσο, για συγκεκριμένες περιπτώσεις οι εσωτερικές ξεπέρασαν τις εξωτερικές πιθανόν εξ' αιτίας των ανεπαρκών επιπέδων αερισμού αλλά και του υπερβολικά μεγάλου αριθμού ατόμων στις αίθουσες. Το συνολικό εύρος των συγκεντρώσεων των ρύπων υποδηλώνει σχετικά καλή ποιότητα του εσωτερικού αέρα, με ορισμένες μόνο εξαιρέσεις. Τα αυξημένα επίπεδα υπομετρικών σωματιδίων θα μπορούσαν να αποδοθούν σε εκπομπές οχημάτων από γειτονικούς δρόμους. Η κατακόρυφη κατανομή των ρύπων έδειξε ότι οι συγκεντρώσεις του ισογείου προσέγγιζαν τις εξωτερικές συγκεντρώσεις ενώ οι συγκεντρώσεις του πρώτου ορόφου ήταν χαμηλότερες σε σχέση με αυτές του ισογείου και του 2ου ορόφου. Τοπικές πηγές όπως εκπομπές οχημάτων αλλά και καταβόθρες όπως η παρουσία των δέντρων σε συνδυασμό με δραστηριότητες στα εσωτερικά περιβάλλοντα των τάξεων είναι δυνατόν να επηρέασαν τις μετρήσεις.

Με σκοπό να αναλυθούν περαιτέρω τα δεδομένα, το σύνολο των μετρούμενων παραμέτρων παρουσιάστηκε σε ροδόγραμμα όπου η κοινή περιοχή των δεδομένων αντιπροσώπευσε περίπου το 66% του συνόλου των μετρήσεων. Οι στατιστικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στην κοινή περιοχή των δεδομένων από την οποία είχαν φιλτραριστεί οι ακραίες τιμές. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση κύριων συνιστωσών με σκοπό να ομαδοποιηθούν οι μεταβλητές με κοινά χαρακτηριστικά. Βρέθηκε ότι το 71.848% της συνολικής διακύμανσης εξηγήθηκε από 4 κύριες συνιστώσες. Τα ευρισκόμενα της ανάλυσης κύριων συνιστωσών χρησιμοποιήθηκαν περαιτέρω για την απομάκρυνση συγκεκριμένων μεταβλητών από ορισμένα πολυπαραγοντικά μοντέλα παλινδρόμησης. Επίσης βρέθηκαν συντελεστές συσχέτισης Spearman για το σύνολο των ζευγαριών των μετρούμενων παραμέτρων. Σημαντικές θετικές συσχετίσεις βρέθηκαν μεταξύ των PM_{10} και του συνόλου των αερομεταφερόμενων μυκήτων καθώς επίσης μεταξύ των PM_{10} και $PM_{2.5}$ με τον *Aspergillus*. Τα υπομετρικά σωματίδια συσχετίστηκαν θετικά με το σύνολο των αερομεταφερόμενων μυκήτων και το *Penicillium*. Από τη στατιστική ανάλυση δύο μεταβλητών δημιουργήθηκαν γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης σε επίπεδα σημαντικότητας μικρότερα των 0.05 για όλες τις περιπτώσεις. Αφενός εφαρμόστηκαν πολυπαραγοντικά μοντέλα παλινδρόμησης εξετάζοντας διάφορες περιπτώσεις εξαρτημένων μεταβλητών στα οποία δοθέντων των αιωρούμενων σωματιδίων και μετεωρολογικών παραμέτρων προβλέπονταν

αερομεταφερόμενοι μύκητες και αντίστοιχα δοθέντων των αερομεταφερόμενων μυκήτων και μετεωρολογικών παραμέτρων προβλέπονταν τα αιωρούμενα σωματίδια. Περαιτέρω μετρήσεις κρίνονται αναγκαίες και επιπλέον επικύρωση των αναπτυχθέντων μοντέλων με σκοπό να ενισχυθεί η αποτύπωση της αλληλεξάρτησης και των συνεργηστικών επιπτώσεων στην υγεία από την αλληλεπίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων και των αερομεταφερόμενων μυκήτων με απώτερο σκοπό την πλήρη κατανόηση των εσωτερικών συνθηκών στα εσωτερικά περιβάλλοντα.

5.3 Δεύτερη πειραματική μελέτη σε σχολεία της Αττικής

Στο ακόλουθο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δεύτερης πειραματικής καμπάνιας που έλαβε χώρα σε 9 σχολεία της Αττικής χωρισμένα σε δύο μέρη. Στο μέρος Α' παρουσιάζεται η επεξεργασία και στατιστική ανάλυση όλων των μετρούμενων παραμέτρων. Συγκεκριμένα, παραθέτονται τα επίπεδα αερισμού ανά σχολείο όπου και συγκρίνονται μεταξύ τους. Ακολούθως αναλύονται τα επίπεδα των μετρούμενων αέριων ρύπων ανά σχολείο ενώ η περίοδος δειγματοληψίας διαχωρίζεται και μελετάται στις επιμέρους περιόδους διδασκαλίας και μη. Επιπλέον μελετάται η επίδραση των πινάκων κιμωλίας και μαρκαδόρου στα επίπεδα ρύπων και καταγράφονται τα ποσοστά υπέρβασης των οριακών τιμών ανά ρύπο. Στο μέρος Β', πραγματοποιείται ανάλυση της έρευνας ερωτηματολογίων συμπεριλαμβανομένων της υποκειμενικής αξιολόγησης της ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος, της μελέτης της παραγωγικότητας των μαθητών αλλά και των ενεργειακών καταναλώσεων και στη συνέχεια καθεμιά από αυτές τις παραμέτρους συγκρίνονται με τις αντίστοιχες μετρήσεις του μέρους Α'. Αναλυτικότερα, δοθέντων των υποκειμενικών απαντήσεων των μαθητών αναφορικά με την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα πραγματοποιείται ανάλυση σε συστάδες με σκοπό την ανεύρεση των επιπέδων των μεταβλητών του εσωτερικού περιβάλλοντος που επιδρούν στις απαντήσεις των μαθητών. Κατόπιν οι απαντήσεις των μαθητών συγκρίνονται με τις αντίστοιχες μετρούμενες τιμές. Σε επόμενο στάδιο ελέγχεται η παραγωγικότητα των μαθητών και συγκρίνεται με τα εσωτερικά επίπεδα ρύπων αλλά και με τις απαντήσεις τους σχετικά με την αξιολόγηση του εσωτερικού περιβάλλοντος. Τέλος, εξετάζονται οι ενεργειακές καταναλώσεις των σχολικών μονάδων τα δεδομένα των οποίων συγκρίνονται με βιβλιογραφικά δεδομένα και επίσης εξετάζονται συσχετίσεις μεταξύ των ενεργειακών καταναλώσεων με τα επίπεδα των εσωτερικών ρύπων. Στο μέρος Γ' παραθέτονται τα αποτελέσματα από τις εκτιμήσεις των σωματιδίων PM_{10} με τη χρήση του αριθμητικού κώδικα MIAQ.

5.3.1 Επεξεργασία & στατιστική ανάλυση των μετρούμενων παραμέτρων: Μέρος Α'

5.3.1.1 Αερισμός Σχολικών Τάξεων

Η διείσδυση του αέρα (Infiltration rates) και ο βαθμός αερισμού (Ventilation rates) σε καθεμιά από τις σχολικές αίθουσες αποτελούν το αντικείμενο μελέτης του συγκεκριμένου υποκεφαλαίου. Τα αποτελέσματα του αερισμού ανά σχολική αίθουσα συγκρίνονται μεταξύ τους και στη συνέχεια παρουσιάζονται ξεχωριστά για τις συνολικές περιόδους των μετρήσεων αλλά και τις περιόδους διδασκαλίας.

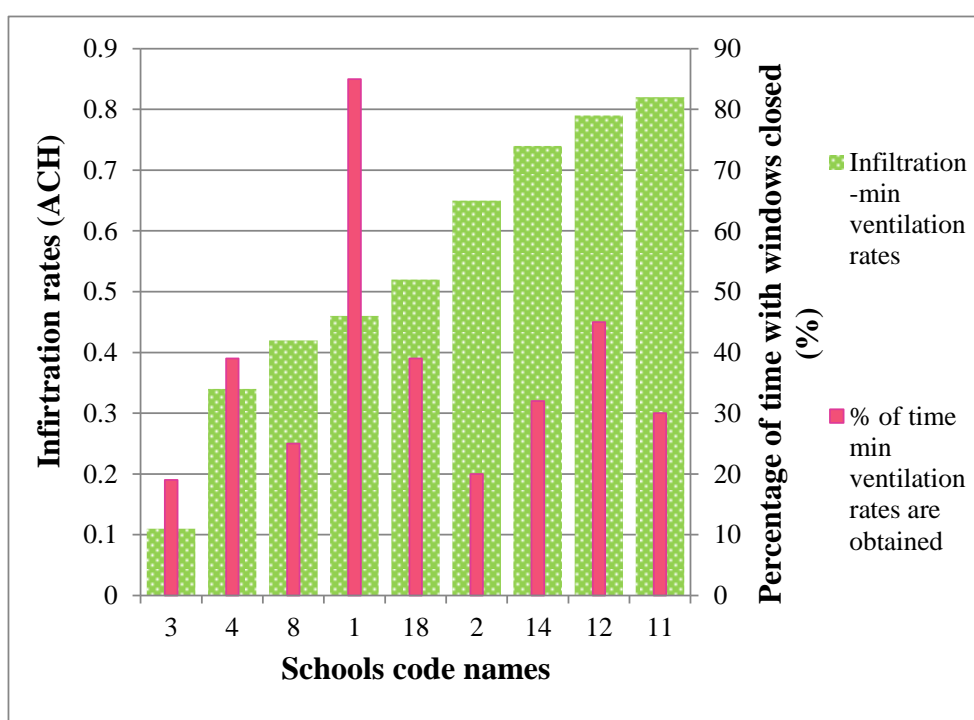
Ρυθμός διείσδυσης του αέρα (Infiltration rates)

Ο ρυθμός διείσδυσης του αέρα αφορά τη ροή του αέρα σε ένα χώρο μέσω των χαραμάδων του κτιριακού κελύφους με κλειστά παράθυρα και πόρτες και αποτελεί ένδειξη του πόσο αεροστεγής είναι μία κατασκευή. Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται ο ρυθμός διείσδυσης του αέρα σε καθένα από τα 9 σχολεία (πράσινες ράβδοι) και στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται επίσης το ποσοστό του χρόνου για τη διάρκεια του συνόλου των μετρήσεων όπου τα παράθυρα παρέμειναν κλειστά σε καθένα από τα σχολεία (ροζ λεπτές ράβδοι) (Εικόνα 5-28). Οι τιμές είναι διατεταγμένες σε αυξανόμενα ποσοστά διείσδυσης του αέρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ποσοστό του χρόνου όπου τα παράθυρα παρέμειναν κλειστά λάμβανε χώρα η διείσδυση του αέρα δια μέσω των χαραμάδων του κτιρίου. Το διάγραμμα αυτό δεν είναι διάγραμμα συσχέτισης. Παρουσιάζει το ρυθμό διείσδυσης του αέρα σε καθένα από τα 9 σχολεία δοθέντων της λειτουργίας των ανοιγμάτων των παραθύρων στις τάξεις, πληροφορία η οποία αντλήθηκε από τα ημερήσια ημερολόγια δραστηριοτήτων σε καθεμιά από τις τάξεις.

Ο ρυθμός διείσδυσης του αέρα κυμάνθηκε από 0.11 (Σχολείο 3) έως 0.82 ACH (Σχολείο 11). Τα σχολεία 3, 4 και 8 ήταν τα πιο αεροστεγή ενώ τα σχολεία 14, 12 και 11 παρουσίασαν τιμές διείσδυσης μεγαλύτερες των 0.7 ACH. Οι αυξημένες τιμές διείσδυσης αέρα στα σχολεία 11 και 14 θα μπορούσαν να αποδοθούν στο γεγονός ότι τις ημέρες που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις του αερισμού επικρατούσαν ισχυρότεροι άνεμοι σε σχέση με τα υπόλοιπα σχολεία γεγονός το οποίο είναι δυνατόν να επηρεάσει κατά πολύ τις μετρήσεις διείσδυσης αέρα. Οι επικρατούντες άνεμοι στη διάρκεια των μετρήσεων του σχολείου 12 δεν ήταν τόσο ισχυροί ωστόσο η κατασκευή του κτιρίου ήταν σχετικά παλιότερη (Πίνακας 3-11) σε σχέση με τα υπόλοιπα σχολεία (με εξαίρεση το σχολείο 1) και για το λόγο αυτό οι αυξημένες τιμές διείσδυσης θα μπορούσαν να οφείλονται σε κατασκευαστικές απώλειες όπως από χαραμάδες του κτιρίου και τα μη στεγανωμένα κουφώματα. Στο σχολείο 1 τα παράθυρα ήταν κλειστά για περισσότερο από το 80% της περιόδου μέτρησης ενώ στα σχολεία 3 και 2 τα παράθυρα ήταν κλειστά μόνο για το 20% της συνολικής περιόδου των μετρήσεων. Κλειστά παράθυρα για μεγάλο χρονικό διάστημα (μεγαλύτερο του 50%) στη διάρκεια της ημέρας είναι δυνατόν να οδηγήσουν στη συσσώρευση των αέριων ρύπων στο εσωτερικό περιβάλλον. Παρόλα αυτά το παρατεταμένο άνοιγμα των παραθύρων είναι δυνατόν να αυξήσει τα εσωτερικά επίπεδα ρύπων στην περίπτωση που το εξωτερικό περιβάλλον είναι πιο επιβαρυνμένο σε σχέση με το εσωτερικό. Οι υπολογιζόμενοι ρυθμοί διείσδυσης της συγκεκριμένης πειραματικής καμπάνιας ήταν σχετικά χαμηλότεροι σε σχέση με τα ευρισκόμενα άλλων μελετών όπως των Part et al., 2008 στην οποία βρέθηκε οι ρυθμοί

διείσδυσης κυμάνθηκαν από 0.5 έως 1.5 ACH, ενώ ήταν παρόμοιες με τα ευρήματα των Bartlett et al., 2004 (0.0148-0.738 ACH).

Το γεγονός ότι οι μετρήσεις ρυθμού διείσδυσης πραγματοποιήθηκαν στο τέλος των ημερήσιων μετρήσεων, είναι δυνατόν να εισάγει σφάλμα καθώς υπήρχαν περιπτώσεις όπου οι καιρικές συνθήκες άλλαζαν στη διάρκεια της ημέρας. Αυτό αποτελεί περιορισμό της συγκεκριμένης έρευνας ωστόσο δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ούτως ώστε να ληφθούν υπόψη μετρήσεις με παρόμοιες καιρικές συνθήκες αυτών που επικρατούσαν στη διάρκεια της ημέρας σε σχέση με αυτές που επικρατούσαν στη διάρκεια που πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις αερισμού στο τέλος της ημέρας.



Εικόνα 5-28: Ρυθμός διείσδυσης του αέρα στα σχολεία και ποσοστό του χρόνου όπου τα παράθυρα παρέμειναν εντελώς κλειστά ανά σχολείο

Ρυθμός αερισμού (Ventilation rates)

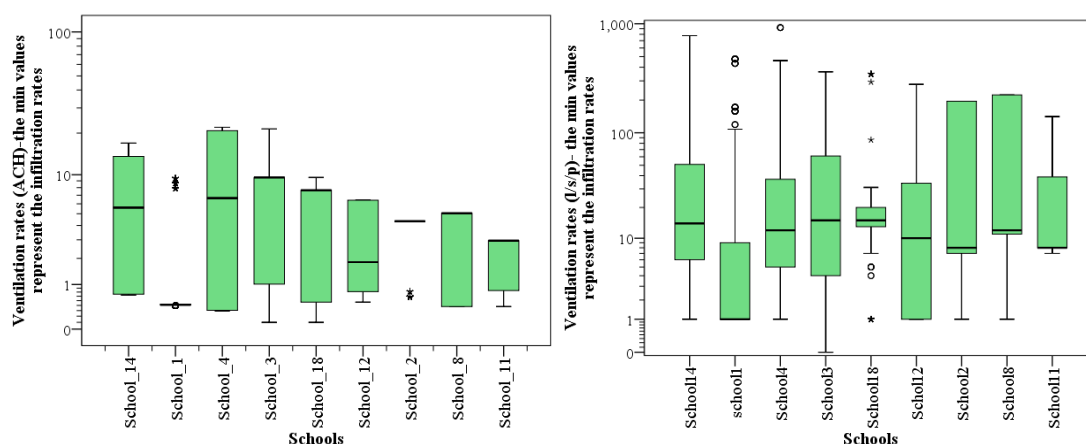
Όπως προαναφέρθηκε, οι πληροφορίες σχετικά με τα ανοίγματα των παραθύρων που λάμβαναν χώρα στις τάξεις στη διάρκεια της ημέρας αντλούνταν από τα ημερολόγια στα οποία πέραν της ακριβής ώρας και διάρκειας των ανοιγμάτων των παραθύρων σημειωνόταν επίσης η συμπεριφορά των μαθητών σε σχέση με το άνοιγμά τους. Για περισσότερες από τις περιπτώσεις οι μαθητές συνήθιζαν να ανοίγουν τα παράθυρα στην αρχή κάθε διαλείμματος με σκοπό τον αερισμό των αιθουσών. Σε ημέρες με χαμηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες, (συνήθως χαμηλότερες των 19 °C) και σε περιπτώσεις όπου άλλες τάξεις είχαν γυμναστική

στον προαύλιο χώρο ακριβώς έξω από την αίθουσα κάνοντας φασαρία, οι δάσκαλοι συνήθιζαν να κλείνουν τα παράθυρα κατά την είσοδό τους στην τάξη για το επόμενο μάθημα.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται σε θηκογράμματα οι κατανομές του ρυθμού αερισμού σε ACH (αριστερό διάγραμμα) και σε μονάδες l/s/p (δεξί διάγραμμα) για το σύνολο της περιόδου μέτρησης σε καθένα από τα 9 σχολεία (Εικόνα 5-29). Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι οι ελάχιστες τιμές αερισμού αντιστοιχούν στο ρυθμό διείσδυσης (infiltration rate). Για τον υπολογισμό της κατανομής του ρυθμού αερισμού δημιουργήθηκε χρονοσειρά με τις διάφορες τιμές αερισμού στις αντίστοιχες ώρες που έλαβαν χώρα στις τάξεις στη διάρκεια της ημέρας, πληροφορία που αντλήθηκε από τα ημερολόγια ανοιγμάτων των παραθύρων. Συγκεκριμένα, κάθε ημέρα δειγματοληψίας τα άτομα που πραγματοποιούσαν τις μετρήσεις με τη βοήθεια των δασκάλων συμπλήρωναν το ημερολόγιο στο οποίο σημείωναν την ακριβή ώρα, διάρκεια και εμβαδό ανοίγματος των παραθύρων. Από τα ημερολόγια αυτά και από τις μετρήσεις αερισμού τόσο για τις μετρήσεις μίας ημέρας όσο και για τις μετρήσεις που διήρκεσαν 5 ημέρες ανά σχολείο, δημιουργήθηκαν χρονοσειρές του ρυθμού αερισμού ανά σχολείο, και στη συνέχεια υπολογίστηκε η κατανομή τους.

Ο ρυθμός αερισμού για την πλειοψηφία των σχολείων παρουσιάζει μεγάλη διασπορά γύρω από τη μέση τιμή υποδηλώνοντας ότι διάφορα σενάρια ανοιγμάτων των παραθύρων έλαβαν χώρα στη διάρκεια της ημέρας και για το λόγο αυτό παρουσιάστηκαν και διάφορες τιμές αερισμού για συγκεκριμένα σχολεία (Εικόνα 5-29). Τα σχολεία 1 και 2 αποτελούν εξαιρέσεις σε αυτό στα οποία μόνο δύο σενάρια ανοιγμάτων πλήρως ανοιχτά και πλήρως κλειστά παράθυρα έλαβαν χώρα (Εικόνα 5-29, αριστερό διάγραμμα, μόνο δύο ακραίες τιμές). Οι τιμές αερισμού κυμάνθηκαν από περίπου 1 έως 22 ACH για το σύνολο των σχολείων. Πράγματι, ο αερισμός έφτασε σε ακραίες των 22 ACH σε ορισμένες από τις περιπτώσεις όπως αυτές των σχολείων 3 και 4, ωστόσο όμως οι μέσες τιμές του αερισμού για το σύνολο των σχολείων κυμάνθηκαν από 0.7 έως 8 ACH. Οι αυξημένες τιμές αερισμού των δύο σχολείων θα μπορούσαν να αποδοθούν στην κατεύθυνση του αέρα όπου για πολλές από τις περιπτώσεις ήταν προς τα παράθυρα των τάξεων. Επιπλέον στο σενάριο με τα πλήρως ανοιχτά παράθυρα, η ανοιγόμενη επιφάνεια (Πίνακας 3-14) για το σχολείο 4 ήταν η μεγαλύτερη συγκριτικά με τα υπόλοιπα σχολεία και γι' αυτό ο ρυθμός αερισμού ήταν μεγαλύτερος. Στο διάγραμμα στα δεξιά (Εικόνα 5-29) ο ρυθμός αερισμού είναι εκφρασμένος σε μονάδες l/s/p. Για τη μετατροπή των ACH σε μονάδες l/s/p ο ρυθμός αερισμού διαιρέθηκε προς τον όγκο των τάξεων και το πλήθος των μαθητών που ήταν παρόντες τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Στις περιπτώσεις όπου οι αίθουσες ήταν άδειες γινόταν η παραδοχή ότι η τάξη ήταν κατειλημμένη από ένα άτομο ούτως ώστε να έχει νόημα η διαίρεση και για το λόγο αυτό σε πολλές περιπτώσεις οι τιμές εκτείνονται σε ακραίες τιμές λόγω της διαίρεσης με ένα

πολύ μικρό νούμερο. Οι μέσες τιμές αερισμού ανά σχολείο κυμάνθηκαν από 1.03 έως 15.411 l/s/p με μέση τιμή ίση με 11.71 l/s/p, τιμή υψηλότερη σε σχέση με την ελάχιστη προτεινόμενη για σχολικές αίθουσες τιμή ίση με 8 l/s/p στο πρότυπο ASHRAE Standard 62. Οι ευρισκόμενοι ρυθμοί αερισμού στην παρούσα εργασία είναι υψηλότεροι σε σχέση με τους αντίστοιχους των Shaughnessy et al., 2006 οι οποίοι βρήκαν μέση τιμή αερισμού ίση με 3.88 l/s/p, η οποία προέκυψε από εύρος τιμών που κυμάνθηκε από 0.9-11.74 l/s/p. Αντίστοιχα, μέσες τιμές αερισμού σε σχολικές τάξεις της Πορτογαλλίας ήταν ίσες με 2.4 l/s/p τιμές πολύ χαμηλότερες σε σχέση με αυτές που μετρήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Επίσης σε Φινλανδικές τάξεις ο ρυθμός αερισμού ήταν ίσος με 7.2 l/s/p (Canha 2013).



Εικόνα 5-29: Κατανομή ρυθμού αερισμού σε μονάδες ACH (αριστερό διάγραμμα) και l/s/p (δεξιό διάγραμμα) σε κάθε σχολείο για όλη την περίοδο των μετρήσεων

Προκειμένου να διερευνηθεί αθροιστικά η δυναμική του αερισμού σε κάθε σχολείο σε σχέση με τα υπόλοιπα σχολεία με σκοπό να κατηγοριοποιηθούν τα σχολεία σε καλύτερα και χειρότερα αεριζόμενα, υπολογίστηκαν οι ακόλουθοι λόγοι για το σύνολο της περιόδου μέτρησης (Εξίσωση 4-1) (Εικόνα 5-30).

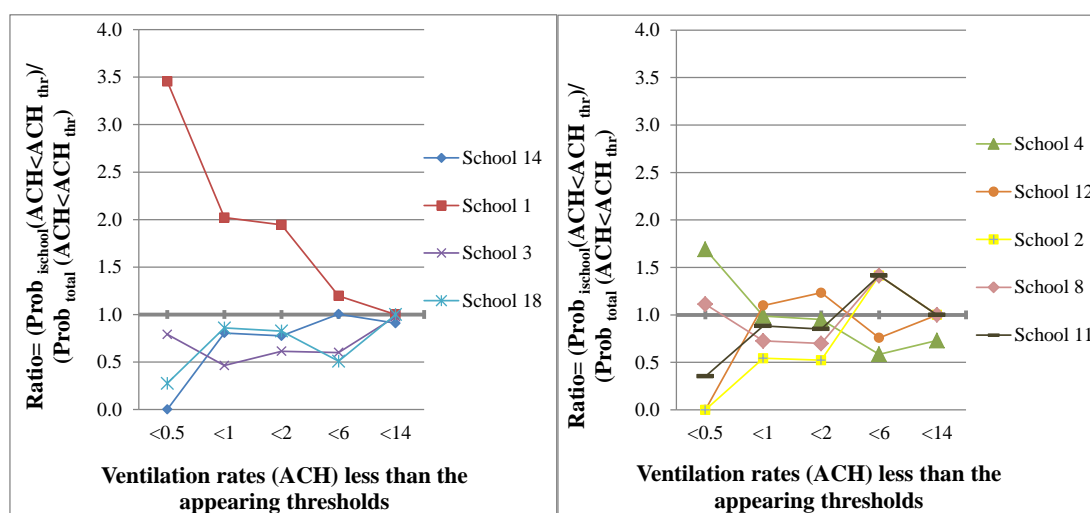
$$\text{Ratio} = \frac{\text{Prob}_{\text{school}}(\text{ACH} < \text{ACH}_{\text{thr}})}{\text{Prob}_{\text{total}}(\text{ACH} < \text{ACH}_{\text{thr}})} \quad (5-2)$$

Όπου $\text{Prob}_{\text{school}}(\text{ACH} < \text{ACH}_{\text{thr}})$: Η πιθανότητα ο αερισμός σε κάθε σχολείο i να είναι μικρότερος από συγκεκριμένες οριακές τιμές (ACH_{thr}) και $\text{Prob}_{\text{total}}(\text{ACH} < \text{ACH}_{\text{thr}})$: Η συνολική πιθανότητα του αερισμού για το σύνολο των σχολείων να είναι μικρότερος από τις ίδιες οριακές τιμές (ACH_{thr}).

Αν ο υπολογιζόμενος λόγος ήταν μικρότερος της μονάδας τότε τα ποσοστά αερισμού του υπό μελέτη σχολείου ήταν σε καλύτερα επίπεδα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σχολεία. Εάν όμως

ο λόγος ήταν μεγαλύτερος της μονάδας σήμαινε ότι η πιθανότητα του αερισμού να είναι μικρότερη από μια ορισμένη τιμή θα ήταν μεγαλύτερη για το εν λόγω σχολείο σε σύγκριση με τα άλλα σχολεία, που σημαίνει ότι οι ρυθμοί αερισμού για το συγκεκριμένο σχολείο θα είναι χαμηλότεροι σε σχέση με τα υπόλοιπα σχολεία και ως εκ τούτου, η τάξη θα είναι χειρότερα αεριζόμενη. Αυτές οι συγκεκριμένες οριακές τιμές αερισμού (0.5, 1, 2, 6 & 14 ACH) επιλέχθηκαν κατόπιν μελέτης της κατανομής συχνοτήτων του αερισμού σε όλα τα σχολεία, έτσι ώστε να έχουν ισότιμη κατανομή των συχνοτήτων μεταξύ των τιμών αυτών.

Τα σχολεία με τις καλύτερες και χειρότερες επιδόσεις αερισμού (Ακραίες τιμές λόγων) σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σχολεία παρουσιάζονται στην Εικόνα 5-30, αριστερό διάγραμμα ενώ στα δεξιά αποτυπώνονται τα σχολεία με μέτριο αερισμό (Λόγοι κοντά στη μονάδα). Ειδικότερα το σχολείο 1 φάνηκε να είναι το χειρότερα αεριζόμενο σε σύγκριση με τα άλλα σχολεία, καθώς οι περισσότεροι από τους λόγους είναι πολύ μεγαλύτεροι της μονάδας (Εικόνα 5-30, αριστερά). Το συμπέρασμα αυτό είναι σε συμφωνία με τα ευρήματα του διαγράμματος που προηγήθηκε (Εικόνα 5-28, ροζ ράβδοι) στον οποίο έγινε φανερό ότι το ποσοστό του χρόνου όπου τα παράθυρα ήταν κλειστά στο συγκεκριμένο σχολείο ήταν μεγαλύτερο από το 80%. Οι λόγοι των πιθανοτήτων στα σχολεία 18, 3 και 14 είναι μικρότεροι ή ίσοι με τη μονάδα για όλες τις περιπτώσεις φανερώνοντας καλύτερα επίπεδα αερισμού σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σχολεία (Εικόνα 5-30, αριστερά). Τα σχολεία 4, 12, 8, 2 και 11 για ορισμένες μόνο περιπτώσεις είχαν λόγους πιθανοτήτων μεγαλύτερους της μονάδας υποδεικνύοντας μέτρια αεριζόμενα σχολεία σε σχέση με τα υπόλοιπα (Εικόνα 5-30, δεξιά).



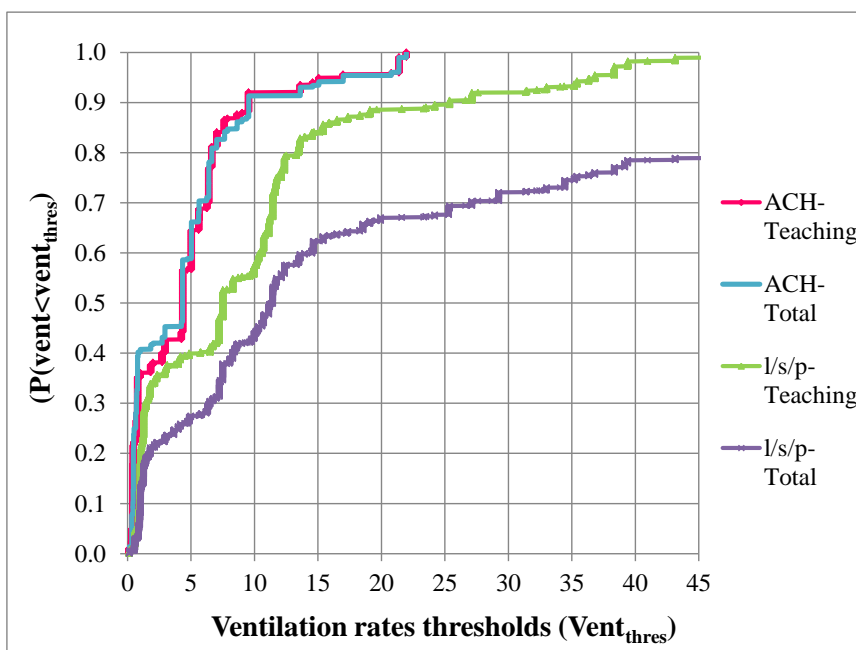
Εικόνα 5-30: Λόγοι των πιθανοτήτων του αερισμού σε κάθε σχολείο προς την πιθανότητα του συνόλου των σχολείων να είναι μικρότερος από ορισμένες τιμές κατωφλίου (αριστερά: το χειρότερο και καλύτερα αεριζόμενα σχολεία, δεξιά: σχολεία με μέτριο αερισμό σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σχολεία)

Σε επόμενο στάδιο η περίοδος των μετρήσεων διαχωρίστηκε και μελετήθηκε σε δύο υποπεριόδους. Την περίοδο διδασκαλίας και την περίοδο μη-διδασκαλίας όπου η αίθουσα ήταν κατειλημμένη με λιγότερους από 10 μαθητές. Η περίοδος αυτή αφορούσε μεταβατικές περιόδους όπου οι μαθητές εισέρχονταν ή εξέρχονταν από τις τάξεις. Το γεγονός ότι η περίοδος μη-διδασκαλίας για ορισμένες από τις περιπτώσεις ήταν μεταβατική περίοδος, θα μπορούσε κανείς εύκολα να συμπεράνει ότι είναι περίοδος με έντονη δυναμική. Η περίοδος διδασκαλίας αντιπροσωπεύει το 60% του συνολικού χρόνου των μετρήσεων ενώ η περίοδος μη-διδασκαλίας αντιπροσωπεύει αντίστοιχα το υπολειπόμενο 40%. Ο διαχωρισμός σε περιόδους διδασκαλίας και μη, είναι απαραίτητος καθώς οι ώρες μη διδασκαλίας αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής περιόδου μέτρησης και δίνουν επίσης ένα πιο ξεκάθαρο προφίλ της ημερήσιας δυναμικής συμπεριφοράς των ρύπων. Επιπλέον οι περίοδοι μη διδασκαλίας προηγούνται των περιόδων διδασκαλίας γεγονός το οποίο είναι εξαιρετικά σημαντικό καθώς είναι δυνατόν να έχουν σημαντική επίδραση σε αυτή. Ο διαχωρισμός επίσης είναι χρήσιμος για λόγους συγκρισιμότητας με άλλες μελέτες.

Ακολούθως παρουσιάζονται σε διάγραμμα αθροιστικής συχνότητας οι ρυθμοί αερισμού όλων των σχολείων για την περίοδο διδασκαλίας αλλά και για τη συνολική περίοδο των μετρήσεων σε μονάδες ACH και l/s/p (Εικόνα 5-31). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι δύο περίοδοι, διδασκαλίας και συνολική, αναφέρονται σε διαφορετική πληρότητα. Η περίοδος διδασκαλίας αναφέρεται σε πλήρως κατειλημμένη αίθουσα ενώ η συνολική περίοδος περιλαμβάνει επιπλέον περιόδους όπου η τάξη ήταν άδεια. Όπως προαναφέρθηκε, για τη μετατροπή από μονάδες ACH σε μονάδες l/s/p ο ρυθμός αερισμού διαιρέθηκε με το πλήθος των ατόμων στις τάξεις. Λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορετική πληρότητα, και το γεγονός ότι το μέγεθος εκφρασμένο σε l/s/p εμπεριέχει και την πληρότητα των αιθουσών, είναι αναμενόμενο να υπάρχουν διαφορές μεταξύ του ρυθμού αερισμού στις δύο περιόδους. Όσον αφορά την περίπτωση μονάδων ACH για τις δύο περιόδους φαίνεται ότι οι δύο καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στο ότι για πολλές από τις περιπτώσεις τα παράθυρα διατηρούνταν ανοιχτά στη διάρκεια της διδασκαλίας και των διαλειμμάτων και συνεπώς επικρατούσαν παρόμοιες συνθήκες αερισμού στις δύο περιπτώσεις.

Η διάμεση τιμή του ρυθμού αερισμού για το σύνολο των σχολείων για τη συγκεκριμένη μελέτη βρέθηκε ίση με 4.16 ACH και 11 l/s/p. Όσον αφορά την περίοδο διδασκαλίας, η διάμεση τιμή βρέθηκε ίση με 4.34 ACH και 7.51 l/s/p. Σε μία παρόμοια μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε σχολικά κτίρια από τους Santamouris et al., 2008 βρήκαν διάμεση τιμή περίπου 4.5 l/s/p και για την περίπτωση των φυσικά αεριζόμενων σχολείων η τιμή ήταν

περίπου ίση με 3 l/s/p. Σύμφωνα με τους Santamouris et al., 2008 η διαφορά αυτή σε σχέση με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να αποδοθεί στο γεγονός ότι στη μελέτη τους για τα φυσικά αεριζόμενα κτίρια, τα παράθυρα ήταν κλειστά για την πλειοψηφία των περιπτώσεων. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν ήταν ότι η μελέτη τους ήταν αντιπροσωπευτική για σχολεία που βρίσκονται σε θερμά κλίματα. Επιπλέον το 77% των περιπτώσεων της παρούσας μελέτης, είχαν ρυθμό αερισμού μικρότερο των 11 l/s/p κατά τη διάρκεια της διδακτικής περιόδου. Σε αντίστοιχες περιπτώσεις στη μελέτη των Santamouris et al., 2008, βρήκαν τιμές μικρότερες των 8 l/s/p ενώ για τα φυσικά αεριζόμενα σχολεία ο ρυθμός αερισμού 8 l/s/p αφορούσε περίπου το 95 % των περιπτώσεων. Οι τάξεις της παρούσας μελέτης φαίνεται να είναι καλύτερα αεριζόμενες σε σχέση με άλλες μελέτες. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε σε ένα βαθμό να αποδοθεί στο ότι οι μετρήσεις έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της Άνοιξης (Απρίλη και Μάη, Πίνακας 3-15), όπου για ένα πολύ μεγάλο ποσοστό της περιόδου μέτρησης τα παράθυρα ήταν ανοιχτά (Εικόνα 5-28, ροζ ράβδοι) εξ' αιτίας των αυξημένων θερμοκρασιών της εποχής. Τα ευρισκόμενα της μελέτης αυτής όπως και της μελέτης των Santamouris et al., 2008, θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικά για σχολεία που βρίσκονται σε θερμά μεσογειακά κλίματα.



Εικόνα 5-31: Αθροιστικές κατανομές συχνοτήτων του ρυθμού αερισμού σε μονάδες ACH και l/s/p για την περίοδο διδασκαλίας και τη συνολική περίοδο των μετρήσεων για κάθε σχολείο

5.3.1.2 Διοξείδιο του Άνθρακα, Μονοξείδιο του άνθρακα και Οργανικές Πτητικές Ενώσεις

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία ορισμένες από τις βασικότερες εσωτερικές πηγές του CO είναι: θερμαντικές συσκευές όπως ξυλόσομπες αλλά και σόμπες γκαζιού, εκπομπές

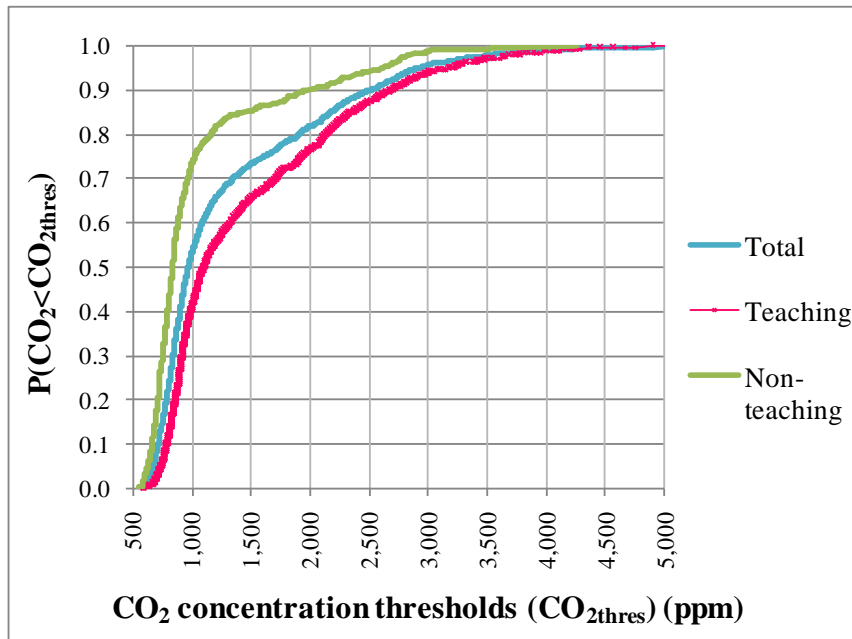
οχημάτων από γειτονικούς δρόμους αλλά και ο καπνός του τσιγάρου. Οι άνθρωποι αποτελούν μία από τις βασικότερες πηγές παραγωγής CO₂ μέσω της διαπνοής. Το CO₂ επίσης προκαλείται από ανθρώπινες δραστηριότητες όπως από την καύση ξύλου, λαδιού και κάρβουνου. Προϊόντα καθαριότητας όπως σπρέι και μπογιές αποτελούν από τις βασικότερες πηγές VOCs στα εσωτερικά περιβάλλοντα (EPA 2014). Οι ελάχιστες, μέγιστες, μέσες τιμές και τυπική απόκλιση των συγκεντρώσεων των CO, CO₂, και VOCs υπολογίστηκαν για καθένα από τα 9 σχολεία που έγιναν μετρήσεις (Πίνακας 5-8). Οι συγκεντρώσεις του CO για τα πρώτα 5 σχολεία που παρουσιάζονται στον πίνακα (Σχολεία: 14, 1, 4,3 και 18) όπου και κατά σειρά ήταν τα 5 πρώτα σχολεία που έλαβαν χώρα οι μετρήσεις, διατηρήθηκαν σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Το προφίλ αυτό αλλάζει στα 4 τελευταία σχολεία (12, 2, 8 και 11) όπου εκεί οι συγκεντρώσεις αυξάνονται σημαντικά πιθανόν εξ' αιτίας των εκπομπών των οχημάτων από τους γειτονικούς δρόμους. Σε σχέση με το CO₂ λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η οριακή τιμή είναι 1,000 ppm, είναι φανερό ότι η μέση τιμή των συγκεντρώσεων για την πλειοψηφία των σχολείων είναι λίγο μεγαλύτερη της οριακής με εξαίρεση το σχολείο 1 όπου εκεί οι συγκεντρώσεις ήταν διπλάσιες των οριακών. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις CO₂ στο σχολείο 1 θα μπορούσαν να αποδοθούν στο παρατεταμένο διάστημα όπου τα παράθυρα διατηρήθηκαν κλειστά στη διάρκεια των μετρήσεων (Εικόνα 5-28). Στα σχολεία 2 και 11 οι συγκεντρώσεις ήταν χαμηλότερες του ορίου. Τα ευρισκόμενα της παρούσας μελέτης είναι παρόμοια με αυτά των Madeco et al., 2013 (999 ppm) και των Mumovic et al., 2009a (Μέση τιμή: 1,154 ppm) και είναι λίγο χαμηλότερα σε σχέση με τις μέσες συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν από τους Haverinen-Shaughnessy et al., 2011 σε 100 τάξεις. Επίσης είναι παρόμοια με τα ευρισκόμενα των Santamouris et al., 2008 όπου η μέση συγκέντρωση για το CO₂ ήταν περίπου 1,070 ppm ενώ οι αντίστοιχη συγκέντρωση που βρήκαν ήταν 1,410 και 910 για τα φυσικά και τα μηχανικά αεριζόμενα σχολεία αντίστοιχα. Οι αυξημένες εσωτερικές συγκεντρώσεις CO₂ θα μπορούσαν να αποδοθούν στις υπερπληθείς τάξεις αλλά και στον ανεπαρκή αερισμό σε ορισμένες περιπτώσεις. Το προφίλ των συγκεντρώσεων για τα VOCs είναι παρόμοιο με τις συγκεντρώσεις CO. Οι συγκεντρώσεις είναι σχετικά χαμηλές στα σχολεία 14, 1, 4, 3 και 18 ενώ αυξάνονται δραματικά στα σχολεία 12, 2, 8 και 11. Οι υψηλότερες τιμές VOCs στα σχολεία 12, 2 και 8 είναι πιθανόν να οφείλονται στη χρήση πινάκων μαρκαδόρου (Πίνακας 3-13). Ωστόσο, παρόλο που στο σχολείο 11 χρησιμοποιούσαν πίνακα κιμωλίας τα επίπεδα των VOCs ήταν εξίσου υψηλά. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν παρατηρήθηκε κάποια ιδιαίτερη μυρωδιά στη συγκεκριμένη αίθουσα, ωστόσο χημικά καθαρισμού και απολύμανσης που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθαρισμό των τάξεων πριν την έναρξη των μετρήσεων είναι δυνατόν να οδήγησαν στην αύξηση των συγκεκριμένων συγκεντρώσεων των οποίων όμως η χρήση δεν έγινε αντιληπτή τουλάχιστον μέσω της όσφρησης. Το γεγονός ότι στα σχολεία 8 και 11 οι συγκεντρώσεις CO και VOCs είναι υψηλότερες από όλες τις περιπτώσεις ενώ αντίστοιχα τα επίπεδα CO₂ είναι τα

χαμηλότερα συγκριτικά με τα υπόλοιπα σχολεία είναι παράδοξο και θα πρέπει να διερευνηθεί η πηγή των ρύπων.

Πίνακας 5-8: Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα για τα μεγέθη: CO, CO₂ και VOCs για καθένα από τα 9 σχολεία

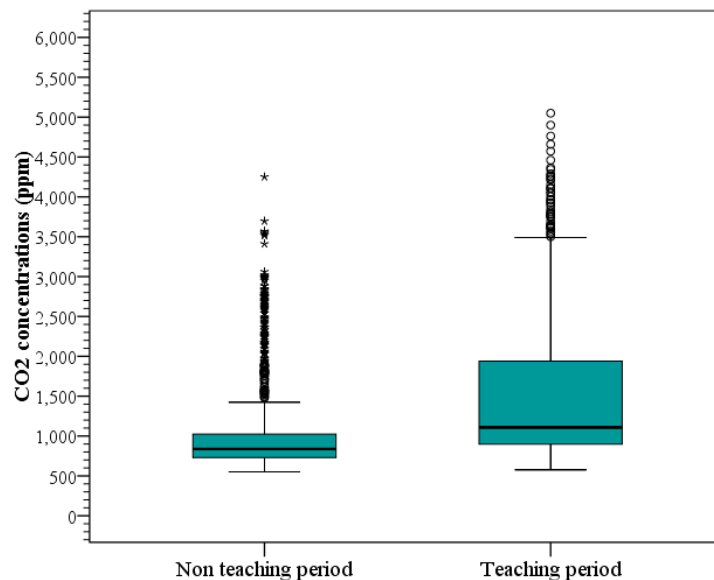
Σχολείο	N	CO (ppm)				CO ₂ (ppm)				VOC (ppm)			
		Min.	Max.	Aver.	Std. Dev.	Min.	Max.	Aver.	Std. Dev.	Min.	Max.	Aver.	Std. Dev.
14	399	0,0	0.8	0.1	0.1	556	2910	1219	604	0.0	9.4	1.0	1.1
1	428	0,0	0.9	0.1	0.2	538	5049	2082	933	0.0	5.9	1.1	1.0
4	429	0,0	1.4	0.2	0.4	546	3547	1105	601	0.0	5.7	1.1	1.0
3	191	0,0	1.1	0.2	0.3	577	2364	1209	461	0.0	5.0	1.5	1.1
18	89	0,0	0.0	0.0	0.0	566	2385	1118	536	0.0	0.8	0.2	0.2
12	406	0,2	4.0	1.3	0.8	558	4365	1437	942	0.0	51.9	6.4	9.0
2	424	0,2	8.3	2.9	2.2	587	1729	893	205	0.0	27.2	6.6	6.8
8	268	1,3	11.1	7.2	2.0	573	2207	1018	301	0.3	39.9	7.8	6.4
11	81	4,2	13.9	12.1	2.3	689	1172	971	135	3.0	39.7	15.5	8.7

Στις παραγράφους που ακολουθούν η μελέτη θα εστιάσει στο CO₂ καθώς εκτός από δείκτης αερισμού αποτελεί και μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους του εσωτερικού περιβάλλοντος. Στο ακόλουθο γράφημα (Εικόνα 5-32) παρουσιάζεται η αθροιστική κατανομή συχνοτήτων των συγκεντρώσεων CO₂ για το σύνολο των σχολείων, την συνολική περίοδο των μετρήσεων (μπλε γραμμή), για την περίοδο διδασκαλίας (ροζ γραμμή με χι) και την περίοδο μη-διδασκαλίας (πράσινη γραμμή). Είναι φανερό ότι οι συγκεντρώσεις της περιόδου μη-διδασκαλίας είναι χαμηλότερες σε σχέση με αυτές της περιόδου διδασκαλίας εξ' αιτίας των χαμηλότερων επιπέδων CO₂ κατά τις πρωινές ώρες αλλά και λόγω της χαμηλής πληρότητας των τάξεων. Για το 50% των περιπτώσεων της συνολικής περιόδου οι συγκεντρώσεις ήταν κοντά στην οριακή τιμή ενώ ήταν μεγαλύτερες των 1,150 ppm για την περίοδο διδασκαλίας. Το 28% των περιπτώσεων της συνολικής περιόδου μέτρησης οι συγκεντρώσεις ήταν μεγαλύτερες των 1,500 ppm και μεγαλύτερες από 1,750 ppm για την περίοδο διδασκαλίας. Και για τις δύο αυτές περιπτώσεις τα ευρισκόμενα της παρούσας έρευνας είναι σε συμφωνία με τα αντίστοιχα ευρισκόμενα των Santamouris et al., 2008. Τέλος βρέθηκε ότι η μέση τιμή των συγκεντρώσεων των CO₂ ήταν ίση με 1,055 ppm για την περίοδο μη-διδασκαλίας και ίση με 1,482 ppm για την περίοδο διδασκαλίας.



Εικόνα 5-32: Αθροιστική κατανομή συχνοτήτων των συγκεντρώσεων CO₂ (ppm) στα 9 σχολεία

Οι κατανομές των συγκεντρώσεων CO₂ παρουσιάζονται επίσης σε θηκογράμματα για τη διάρκεια των περιόδων διδασκαλίας και μη διδασκαλίας (Εικόνα 5-33). Παρατηρείται σημαντική αύξηση στις συγκεντρώσεις κατά τη διάρκεια των περιόδων διδασκαλίας σε σχέση με τις περιόδους μη διδασκαλίας. Η μέση τιμή των συγκεντρώσεων του CO₂ για τη μη διδακτική περίοδο είναι 1,055 ppm, ενώ για την περίοδο διδασκαλίας είναι 1,482 ppm.

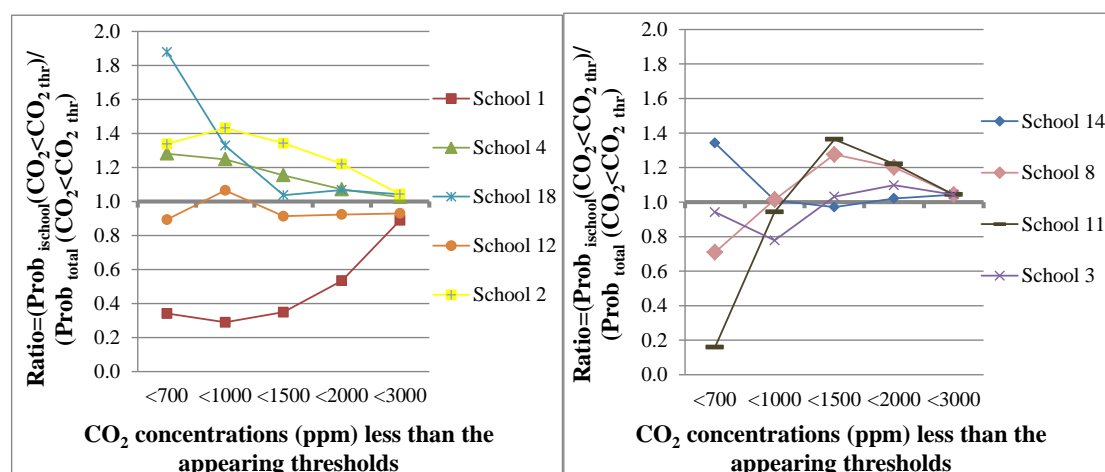


Εικόνα 5-33: Κατανομή των συγκεντρώσεων CO₂ για το σύνολο των σχολείων κατά τις περιόδους διδασκαλίας και μη διδασκαλίας

Η δυναμική των συγκεντρώσεων του CO₂ αναλύεται σε αυτή την ενότητα (σε αντιστοιχία με τη δυναμική του αερισμού, Εικόνα 5-30). Με σκοπό να συγκριθούν οι συγκεντρώσεις CO₂ σε κάθε σχολείο σε σχέση με το σύνολο των σχολείων, οι λόγοι των πιθανοτήτων του CO₂ να είναι μικρότερο από συγκεκριμένες τιμές ($P_{\text{robischool}}(\text{CO}_2 < \text{CO}_{2\text{thr}})$) προς τη συνολική πιθανότητα όλων των σχολείων ($P_{\text{robttotal}}(\text{CO}_2 < \text{CO}_{2\text{thr}})$) παρουσιάζονται στην Εικόνα 5-34 (διάγραμμα αντίστοιχο με την Εικόνα 5-30 για τον αερισμό) (Εξίσωση 4-2).

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Prob}_{\text{school}}(\text{CO}_2 < \text{CO}_{2\text{thr}})}{\text{Prob}_{\text{total}}(\text{CO}_2 < \text{CO}_{2\text{thr}})} \quad (5-3)$$

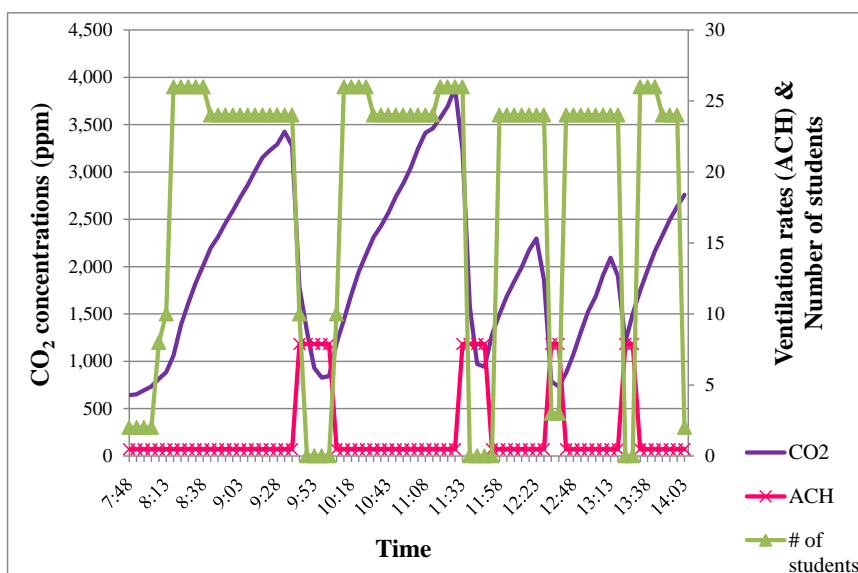
Τα σχολεία με τις χαμηλότερες τιμές CO₂ σε σχέση με τα υπόλοιπα, είναι τα σχολεία 18, 2 και 4. Συγκεκριμένα οι λόγοι για τα σχολεία αυτά είναι μεγαλύτεροι της μονάδας κάτι το οποίο σημαίνει ότι για το σύνολο των οριακών τιμών που εξετάστηκαν (CO_{2thr}) η πιθανότητα του CO₂ να είναι μικρότερη από τα κατώτατα αυτά όρια ήταν πάντα χαμηλότερη από την αντίστοιχη πιθανότητα του συνόλου των σχολείων (Εικόνα 5-34, αριστερά). Τα σχολεία 1 και 12 φαίνεται να έχουν το χειρότερο προφίλ συγκεντρώσεων CO₂ σε σχέση με τα άλλα σχολεία (Εικόνα 5-34, αριστερά). Η Εικόνα 5-34 στα δεξιά παρουσιάζει τα σχολεία με μέτριες συγκεντρώσεις CO₂ σε σχέση με τα υπόλοιπα σχολεία όπου για ορισμένες περιπτώσεις ήταν μεγαλύτερες και για κάποιες άλλες μικρότερες της μονάδας.



Εικόνα 5-34: Λόγοι των πιθανοτήτων των συγκεντρώσεων CO₂ σε κάθε σχολείο προς την πιθανότητα του συνόλου των σχολείων να είναι μικρότερος από ορισμένες τιμές κατωφλίου (αριστερά: σχολεία με τα χαμηλότερα και τα υψηλότερα επίπεδα CO₂, και δεξιά: σχολεία με μέτρια επίπεδα CO₂ σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σχολεία)

Με σκοπό τη γραφική απεικόνιση των βασικών παραμέτρων από τις οποίες εξαρτάται το CO₂ στα εσωτερικά περιβάλλοντα, δημιουργήθηκε ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων CO₂ σαν συνάρτηση του αριθμού των ατόμων και του ρυθμού αερισμού για μία

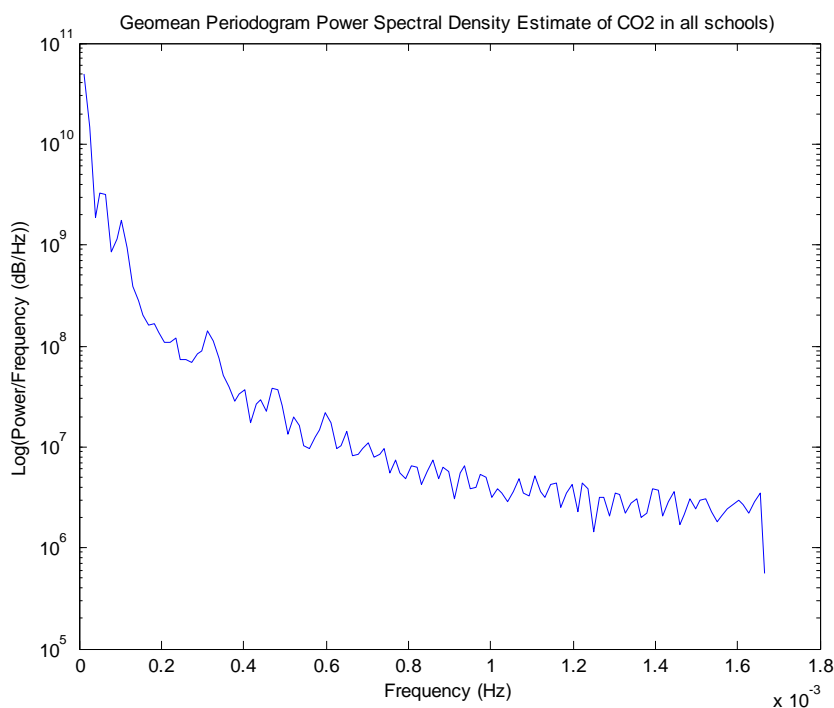
αντιπροσωπευτική ημέρα στο σχολείο 1 (Εικόνα 5-35). Από τις 8.10 πμ που οι μαθητές μπήκαν στην αίθουσα και τα παράθυρα ήταν κλειστά, οι συγκεντρώσεις CO₂ σταδιακά αυξήθηκαν φτάνοντας σε πολύ υψηλά επίπεδα υπερβαίνοντας ακόμα και τα 3,000 ppm. Στη συνέχεια οι συγκεντρώσεις άρχισαν να μειώνονται από τις 9.40 πμ ώρα έναρξης του πρώτου διαλείμματος όπου άνοιξαν τα παράθυρα και οι μαθητές εκκένωσαν την αίθουσα. Δέκα λεπτά μετά το άνοιγμα των παραθύρων (περίπου στις 9.50 πμ) και αφού ο αερισμός από 0.47 ACH έφτασε στις 7.88 ACH προκλήθηκε μείωση στις μέγιστες συγκεντρώσεις CO₂ όπου από 3,426 ppm υποτετραπλασιάστηκαν φτάνοντας στα 843 ppm. Περίπου στις 10.00 πμ οι μαθητές μπήκαν και πάλι στις τάξεις μετά από 20λεπτο διάλειμμα, έκλεισαν τα παράθυρα και οι συγκεντρώσεις αυξήθηκαν σημαντικά. Το ίδιο μοτίβο επαναλήφθηκε μέχρι το τέλος των ημερήσιων μετρήσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι γύρω στις 12.30 πμ, περίπου 10 λεπτά μετά το άνοιγμα των παραθύρων για το τρίτο διάλειμμα της ημέρας, οι συγκεντρώσεις μειώθηκαν από τα 2,300 ppm στα 785 ppm. Η μείωση αυτή δεν είναι ανάλογη της αρχικής μείωσης όπου εκεί οι συγκεντρώσεις υποτετραπλασιάστηκαν, ωστόσο ήταν επαρκής ώστε οι συγκεντρώσεις CO₂ να πέσουν κάτω από τις οριακές τιμές. Όσον αφορά το εξωτερικό περιβάλλον, βρέθηκε ότι τα επίπεδα ήταν σταθερά περίπου στα 400 ppm. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η ημερήσια διακύμανση του αερισμού αποτυπώθηκε με τη βοήθεια των ημερολογίων στα οποία όπως προαναφέρθηκε σημειώνονταν οι ακριβείς ώρες και διάρκεια των ανοιγμάτων των παραθύρων.



Εικόνα 5-35: Ημερήσια διακύμανση συγκεντρώσεων CO₂ σαν συνάρτηση του αριθμού των ατόμων και του αερισμού

Στη συνέχεια με σκοπό να εξεταστεί η περιοδική συμπεριφορά και οι κυρίαρχες συχνότητες της χρονοσειράς CO₂ χρησιμοποιήθηκε το περιοδόγραμμα της φασματικής πυκνότητας

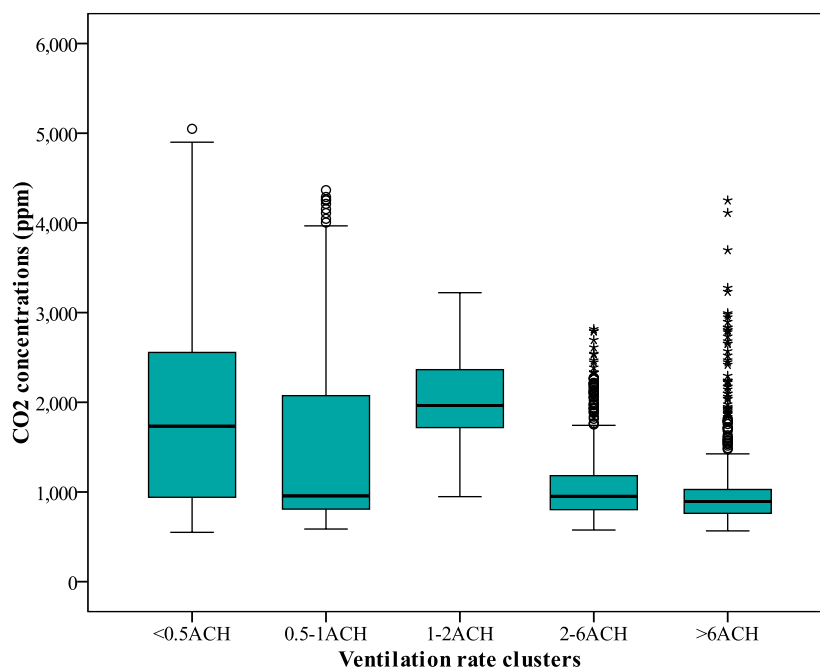
ισχύος του CO₂ το οποίο προκύπτει από τον γεωμετρικό μέσο για τις ίδιες συχνότητες των περιοδογραμμάτων για καθένα από τα 9 σχολεία. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται η φασματική πυκνότητα εκφρασμένη σε λογαριθμική κλίμακα (dB / Hz) ενώ ο οριζόντιος άξονας δείχνει τις συχνότητες εκφρασμένες σε μονάδες Hz. Οι χρονοσειρές των συγκεντρώσεων CO₂ φαίνεται να έχουν μικρότερη φασματική ισχύ για υψηλότερες συχνότητες. Παρατηρείται μία περιοχή στις χαμηλές συχνότητες όπου σημειώνεται ταχεία μείωση του φάσματος ενώ στις υψηλότερες συχνότητες ο ρυθμός της μείωσης αμβλύνεται σημαντικά. Το σημείο συνάντησης των δύο περιοχών παρατηρείται στα 0.8×10^{-3} Hz συχνότητα η οποία αντιστοιχεί στα 20 min γεγονός το οποίο φανερώνει ότι για βήμα δειγματοληψίας τα 20 min παρατηρούνται έντονες μεταβολές στις συγκεντρώσεις. Επίσης παρατηρείται μία μικρή αιχμή στη συχνότητα των 0.3×10^{-3} Hz που αντιστοιχεί στα 55 min και μπορεί να θεωρηθεί ως η περιοδικότητα μεταξύ των διαλειμμάτων όπου οι τάξεις αερίζονταν.



Εικόνα 5-36: Περιοδόγραμμα του γεωμετρικού μέσου της φασματικής πυκνότητας ισχύος του CO₂ για τα 9 σχολεία

Στη συνέχεια παρουσιάζεται κατανομή των συγκεντρώσεων CO₂ σε διάφορες συστάδες (cluster) τιμών αερισμού για τη συνολική περίοδο μέτρησης (Εικόνα 5-37). Οι συστάδες τιμών είναι: 1. Αερισμός μικρότερος από 0.5 ACH, 2. Αερισμός μεταξύ 0.5 και 1 ACH, 3. Τιμές μεταξύ 1 και 2 ACH, 4. Αερισμός μεταξύ 2 και 6 ACH και τέλος 5. Ρυθμός αερισμού μεγαλύτερος των 6 ACH. Οι κατανομές των συγκεντρώσεων CO₂ υπολογίστηκαν για καθεμιά από τις συστάδες αυτές και παρουσιάζονται σε θηκογράμματα στην Εικόνα 5-37.

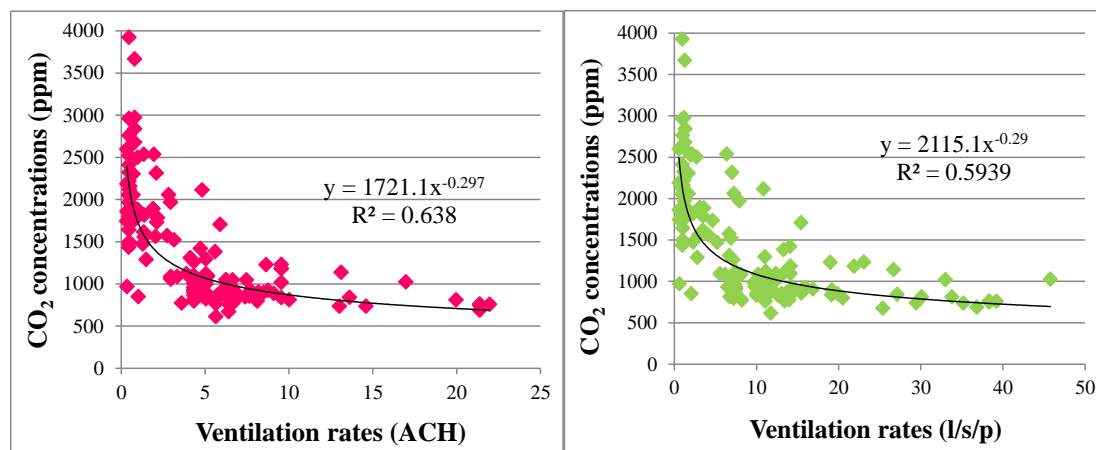
Παρατηρείται μείωση στις συγκεντρώσεις CO₂ κινούμενοι προς μεγαλύτερες τιμές αερισμού. Επίσης για τιμές αερισμού μεγαλύτερες των 2ACH παρουσιάζεται ένα μεγάλο πλήθος ακραίων τιμών. Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στο γεγονός ότι δεν επέρχεται τέλεια ανάμειξη του εσωτερικού αέρα ακαριαία, καθώς υψηλότερες τιμές αερισμού εισέρχονται συνεχώς στην τάξη. Έτσι παρά τις υψηλές τιμές αερισμού, οι συγκεντρώσεις CO₂ για ορισμένες περιπτώσεις είναι υψηλές λόγω της ετερογένειας και της αστάθειας του αέρα στους εσωτερικούς χώρους.



Εικόνα 5-37: Κατανομή των συγκεντρώσεων CO₂ στις διάφορες συστάδες αερισμού

Η συμπεριφορά των συγκεντρώσεων CO₂ σε σχέση με τον αερισμό μελετάται περαιτέρω σε διάγραμμα διασποράς. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται η μέση ωραία τιμή των συγκεντρώσεων CO₂ και των αντίστοιχων ρυθμών αερισμού για τις ώρες διδασκαλίας (Εικόνα 5-36) (αριστερά: σε μονάδες ACH, και δεξιά: σε μονάδες l/s/p) σε όλα τα σχολεία. Οι συγκεντρώσεις CO₂ φαίνεται να μειώνονται εκθετικά για μεγαλύτερες τιμές αερισμού. Συγκεκριμένα, για αερισμό μεγαλύτερο των 5 ACH και αντίστοιχα 10 l/s/p, η πλειοψηφία των συγκεντρώσεων CO₂ ήταν χαμηλότερες των 1,000 ppm. Μέτρια συσχέτιση παρουσιάζεται μεταξύ του CO₂ και του ρυθμού αερισμού για τις ώρες διδασκαλίας ($R^2=0.638$ και 0.5939 σε μονάδες αερισμού ACH και l/s/p αντίστοιχα). Το συμπέρασμα που θα μπορούσε να εξαχθεί από τα διαγράμματα αυτά είναι ότι επαρκής αερισμός θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντική μείωση CO₂ στο εσωτερικό περιβάλλον. Το ίδιο ζήτημα εξετάστηκε για το σύνολο της περιόδου μέτρησης λαμβάνοντας δεδομένα ανά 5λεπτο μέτρησης, ωστόσο οι συσχετίσεις δεν βρέθηκαν να είναι σημαντικές. Η αιτία για την ενδυνάμωση των

συσχετίσεων κατά την εύρεση της μέσης ωριαίας τιμής για τις ώρες διδασκαλίας θα μπορούσε να αποτελεί το γεγονός ότι η εύρεση του μέσου 'φιλτράρει' τις τυχαίες και γρήγορες μεταβολές που δεν επηρεάζονται από την αλλαγή στον αερισμό αλλά είναι τυχαίες. Κατά τη διάρκεια των ωρών διδασκαλίας τα ανοίγματα των παραθύρων και ο αριθμός των ατόμων ήταν συνήθως σταθερός και έτσι ο ρυθμός αερισμού δεν άλλαζε απότομα όπως στη διάρκεια των ωρών μη-διδασκαλίας όπου οι γρήγορες αλλαγές στον αερισμό προκαλούν δυναμικά φαινόμενα που υπερβαίνουν μια απλή γραμμική συσχέτιση.

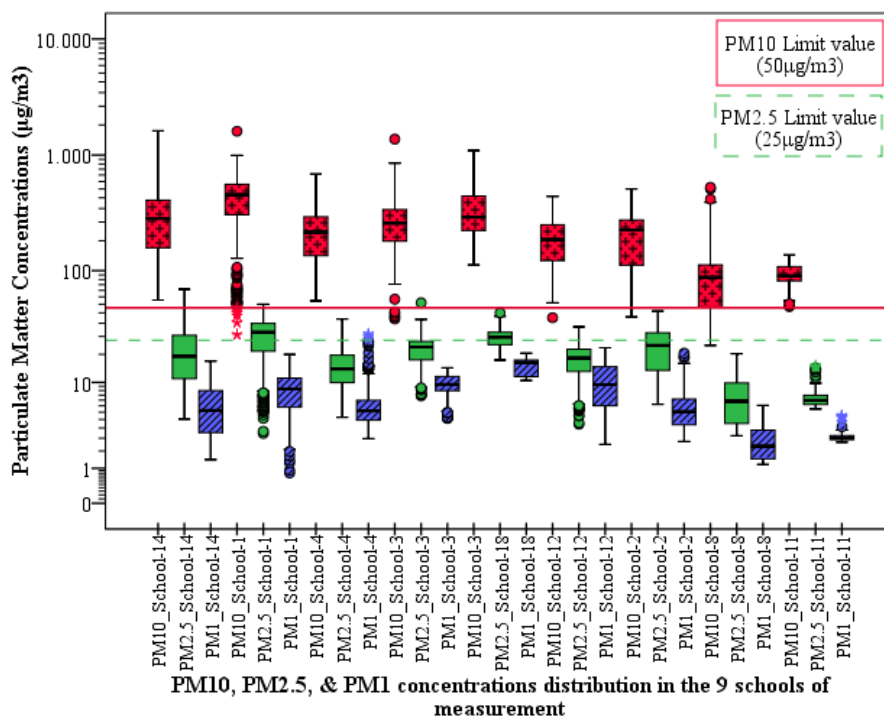


Εικόνα 5-38: Διαγράμματα διασποράς της μέσης ωριαίας τιμής των συγκεντρώσεων CO₂ και των αντίστοιχων τιμών ρυθμού αερισμού σε μονάδες ACH (αριστερά) και l/s/p (δεξιά) για τις ώρες διδασκαλίας

5.3.1.3 Αιωρούμενα Σωματίδια

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί η μελέτη εστιάζει στην επεξεργασία των μετρήσεων που αφορούν στα αιωρούμενα σωματίδια. Οι κατανομές των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀, PM_{2.5} και PM₁ για τη συνολική περίοδο της μέτρησης σε καθεμιά από τις 9 τάξεις παρουσιάζεται σε θηκογράμματα στο ακόλουθο διάγραμμα (Εικόνα 5-39, Παράρτημα Εικόνα 0-14 για τα υπομετρικά). Οι δύο οριζόντιες γραμμές αντιστοιχούν στις οριακές τιμές των 50 μg/m³ και 25 μg/m³ για τα PM₁₀ (κόκκινη) και για τα PM_{2.5} (πράσινη διακεκομμένη) αντίστοιχα (WHO 2005a). Οι συγκεντρώσεις σωματιδίων PM₁₀ για το σύνολο των σχολείων είχαν παρόμοιο προφίλ σε ιδιαίτερα αυξημένα επίπεδα. Η μέση τιμή των PM₁₀ για το σύνολο των σχολείων ήταν 244.5 μg/m³ ενώ σε αντίστοιχη μελέτη οι Habil et al., 2011 βρήκαν 524.76 και 153.37 μg/m³ μέσες τιμές για το χειμώνα και το καλοκαίρι αντίστοιχα. Οι κατανομές των συγκεντρώσεων PM_{2.5} και PM₁ παρουσίασαν διαφορές από σχολείο σε σχολείο και υπήρχαν και περιπτώσεις όπου τα PM_{2.5} ξεπέρασαν την οριακή τιμή τους. Τα περιγραφικά στατιστικά δεδομένα για όλα τα μετρούμενα μεγέθη σωματιδίων στο εσωτερικό περιβάλλον για καθένα από τα 9 σχολεία συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 5-9).

Συγκεκριμένα, οι ελάχιστες, μέγιστες, μέσες τιμές, διάμεσοι αλλά και οι τυπικές αποκλίσεις υπολογίστηκαν για τα: $PM_{0.5}$, PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_5 , PM_{10} , TPM αλλά και για τα UFP. Είναι φανερό ότι τα εύρη των συγκεντρώσεων για τα περισσότερα από τα μεγέθη σωματιδίων ποικίλλουν σημαντικά από σχολείο σε σχολείο. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις των σωματιδίων μεγαλύτερου μεγέθους θα μπορούσαν να συνδεθούν με τα αυξημένα επίπεδα σκόνης και την παρουσία των ατόμων των οποίων η κίνηση προκαλεί την αιώρηση της σκόνης. Επίσης τα ανεπαρκή επίπεδα αερισμού σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατόν να προκαλέσουν την αύξηση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων. Επιπλέον, οι εκπομπές των οχημάτων από γειτονικούς δρόμους είναι δυνατόν να επηρεάσουν τις συγκεντρώσεις σωματιδίων μικρότερου μεγέθους.



Εικόνα 5-39: Εσωτερικές κατανομές συγκεντρώσεων αιωρούμενων στις 9 τάξεις

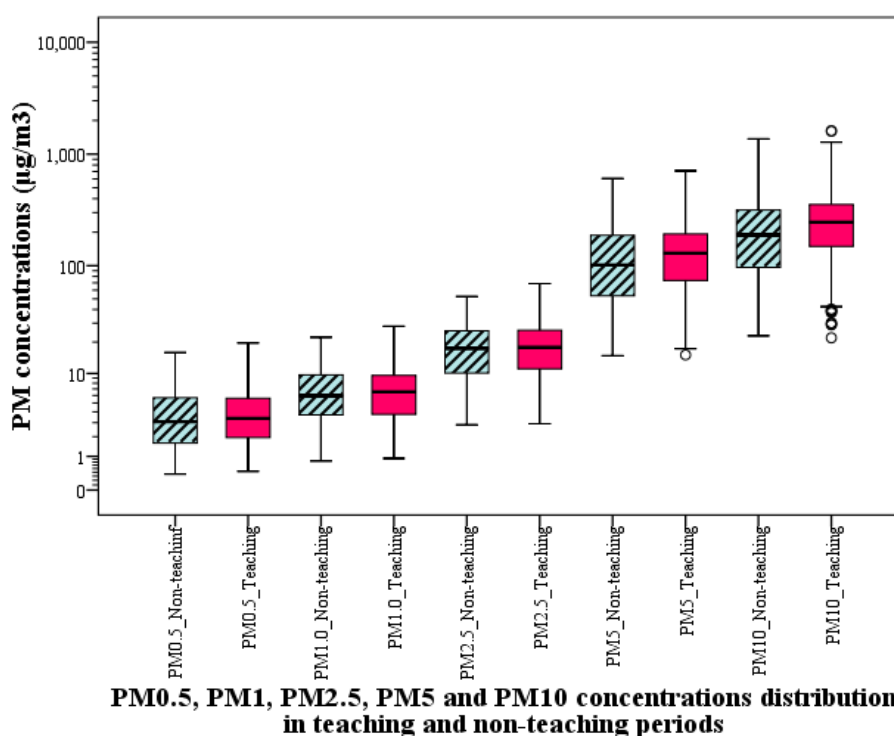
Πίνακας 5-9: Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα για τα αιωρούμενα σωματίδια σε καθένα από τα 9 σχολεία για το σύνολο της περιόδου δειγματοληψίας

	Σχολείο	Min	Max	Average	Median	St.dev
PM _{0.5}	14	0.66	7.60	2.77	2.55	1.58
	1	0.39	11.53	4.39	4.22	2.22
	4	1.73	19.57	4.26	3.17	3.27
	3	3.04	9.23	6.33	6.28	1.57
	18	6.65	13.70	9.76	10.00	2.25
	12	1.57	13.71	6.93	6.66	3.37
	2	0.53	6.87	2.09	2.02	0.90
	8	0.62	3.88	1.36	1.07	0.83
	11	1.44	2.23	1.69	1.62	0.21
PM ₁	14	1.38	15.78	5.80	5.31	3.01
	1	0.82	18.13	8.35	8.66	3.50
	4	2.60	28.05	6.53	5.25	4.43
	3	4.38	13.71	9.61	9.56	2.31
	18	10.44	18.61	14.21	15.31	2.71
	12	2.21	20.85	9.98	9.53	4.75
	2	2.41	18.66	5.52	5.15	2.25
	8	1.16	5.98	2.57	2.10	1.31
	11	2.35	4.73	2.91	2.63	0.69
PM _{2.5}	14	4.31	68.78	20.25	17.46	11.43
	1	3.00	50.87	26.88	28.80	11.06
	4	4.51	37.64	14.32	13.38	6.09
	3	7.41	52.47	20.43	21.18	6.52
	18	16.11	42.72	26.42	25.90	5.40
	12	3.80	32.15	16.73	16.86	5.84
	2	6.13	44.19	21.60	21.92	8.97
	8	2.82	18.41	7.17	6.56	3.68
	11	5.48	14.50	7.61	6.72	2.47
PM ₅	14	30.07	709.97	163.92	147.19	106.12
	1	11.61	594.73	225.43	239.12	114.87
	4	20.51	338.88	109.63	105.34	54.94
	3	21.54	605.23	145.07	132.03	80.10
	18	60.90	445.41	174.88	140.93	93.42
	12	19.68	220.60	95.34	89.48	41.10
	2	20.62	287.21	143.91	155.92	67.47
	8	13.27	202.83	49.92	48.72	30.32
	11	30.46	71.66	49.52	48.28	10.93

	14	55.35	1618.53	316.23	282.71	212.06
	1	27.06	1603.72	430.56	454.07	219.44
	4	54.46	687.23	223.21	215.54	108.25
	3	37.72	1371.89	286.09	257.83	175.27
PM ₁₀	18	112.47	1093.13	360.05	290.85	214.59
	12	38.68	439.25	192.87	186.24	84.69
	2	39.33	509.33	206.85	225.33	91.15
	8	21.91	526.40	91.78	87.47	63.30
	11	48.48	136.87	92.87	90.17	21.97
	14	57.52	1867.23	349.96	316.73	234.05
	1	38.61	1827.36	479.48	496.07	240.81
	4	60.56	765.53	250.09	242.69	119.81
	3	41.42	1602.65	335.13	303.89	205.71
TPM	18	120.60	1294.58	402.38	320.15	246.99
	12	42.56	503.14	220.88	213.56	97.82
	2	42.41	661.60	226.20	240.87	97.20
	8	23.20	695.87	110.85	106.49	78.36
	11	52.27	169.29	112.12	111.13	29.03
	14	3062	24292	9494	9025	3871
	1	751	47060	5820	3506	5410
	4	1493	12818	3502	3290	1627
	3	1357	36641	8961	6117	7430
UFP	18	1792	3985	2445	2327	518
	12	1018	15693	4112	3551	2486
	2	790	70718	6496	4830	5569
	8	883	18937	5572	4330	4368
	11	769	8729	3851	3745	2695

Ακολούθως οι συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων μελετώνται για τις επιμέρους περιόδους διδασκαλίας και μη. Η κατανομή των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό περιβάλλον για τις περιόδους διδασκαλίας (ροζ) και μη-διδασκαλίας (γαλάζιο ριγέ) για το σύνολο της περιόδου δειματοληψίας παρουσιάζονται σε θηκογράμματα στο ακόλουθο γράφημα (Εικόνα 5-40). Κατά τη διάρκεια περιόδων διδασκαλίας οι συγκεντρώσεις είναι λίγο υψηλότερες συγκριτικά με τις περιόδους μη διδασκαλίας. Αυτή η διαφορά μεγαλώνει για σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στο ότι σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους επηρεάζονται σημαντικά από την παρουσία των μαθητών στην τάξη στη διάρκεια των ωρών διδασκαλίας αλλά και από το ρυθμό αερισμού στις ώρες μη-διδασκαλίας. Σε αντίθεση με τα σωματίδια μικρότερου μεγέθους όπου επηρεάζονται μεν από την παρουσία των ατόμων και τον αερισμό

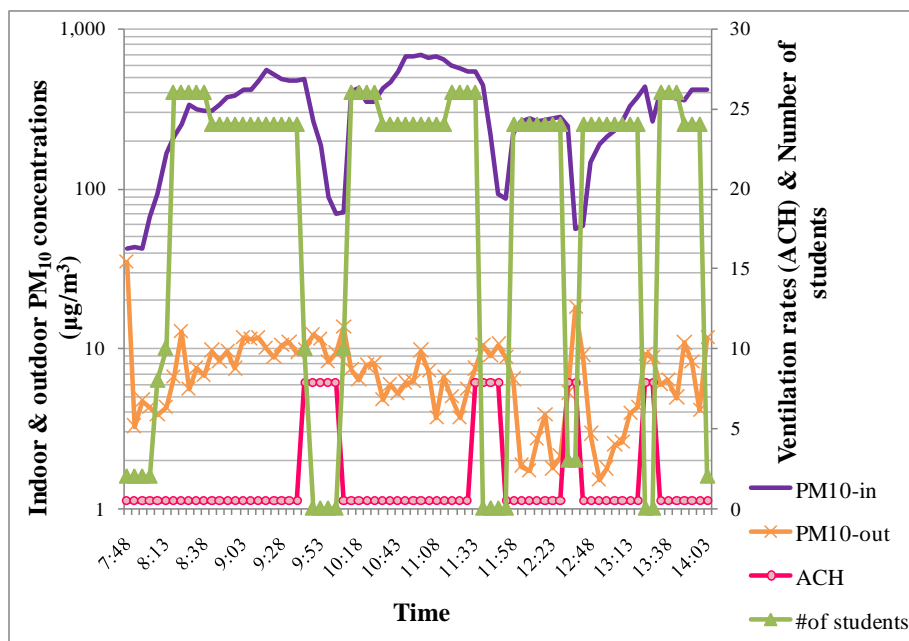
ωστόσο οι πηγές τους είναι κυρίως διαδικασίες καύσης και εκπομπές οχημάτων όπου ενδεχομένως η παρουσία τους να μην ήταν τόσο έντονη στα σχολεία που έγιναν οι μετρήσεις.



Εικόνα 5-40: Κατανομή συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων για τις περιόδους διδασκαλίας και μη διδασκαλίας

Η ημερήσια διακύμανση των εσωτερικών (µωβ) και εξωτερικών (πορτοκαλί με σταυρό) συγκεντρώσεων PM_{10} μιας τυπικής ημέρας στο σχολείο 1 (πανομοιότυπο διάγραμμα με την Εικόνα 5-35 για το CO_2) παρουσιάζεται σε σχέση με το πλήθος των μαθητών στην τάξη αλλά και σε σχέση με το ρυθμό αερισμού σε μονάδες ACH στο ακόλουθο διάγραμμα (Εικόνα 5-41, Παράρτημα Εικόνα 0-17, Εικόνα 0-18). Είναι φανερό ότι η ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων PM_{10} και του πλήθους των μαθητών μέσα στις τάξεις είναι θετικά συσχετιζόμενα μεγέθη ενώ οι συγκεντρώσεις είναι αρνητικά συσχετιζόμενες με το ρυθμό αερισμού. Επιπλέον ο αερισμός αυξάνεται στη διάρκεια των διαλειμμάτων όπου τα παράθυρα ήταν ανοιχτά και την ίδια ώρα οι μαθητές έβγαιναν από την αίθουσα. Αναλυτικότερα, ξεκινώντας από τις 8.10 πμ ώρα στην οποία οι μαθητές εισέρχονται στην τάξη, τα παράθυρα είναι κλειστά και από τη στιγμή αυτή και έπειτα οι συγκεντρώσεις σταδιακά αυξάνονταν. Περίπου στις 9.40 πμ, ώρα έναρξης του πρώτου διαλείμματος της ημέρας, η αύξηση του αερισμού από 0.47 ACH (διείσδυση με κλειστά παράθυρα) στις 7.88 ACH (πλήρως ανοιχτά παράθυρα) προκαλεί σημαντική μείωση στα PM_{10} από $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ σε τιμές μικρότερες των $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Το ίδιο μοτίβο επαναλαμβάνεται για την επόμενη ώρα διδασκαλίας όπου ξεκινάει γύρω στις 10.00 πμ και τελειώνει γύρω στις 11.30 πμ. Οι συγκεντρώσεις τη δεύτερη

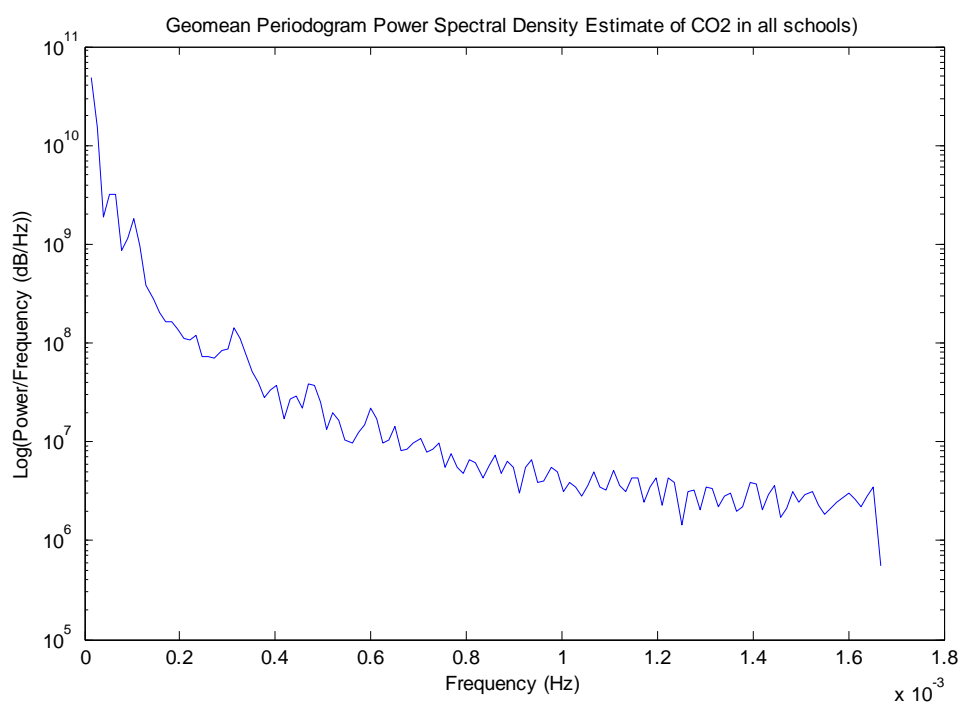
διδασκτική ώρα υπερβαίνουν ακόμα και τα $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Η τρίτη, τέταρτη και πέμπτη διδασκτική ώρα της ημέρας διαρκούν λιγότερο σε σχέση με τις δύο πρώτες διδασκτικές ώρες, με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις PM_{10} δεν οδηγούνται σε τόσο υψηλές τιμές όπως αυτές της πρώτης και δεύτερης ώρας διδασκαλίας. Όσον αφορά τις εξωτερικές συγκεντρώσεις, παραμένουν σε σχετικά χαμηλά και σταθερά επίπεδα στη διάρκεια της ημέρας.



Εικόνα 5-41: Ημερήσια διακύμανση εσωτερικών και εξωτερικών συγκεντρώσεων PM_{10} σε σχέση με το πλήθος των μαθητών και το ρυθμό αερισμού (8/4/13, Σχολείο 1)

Οι συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων εξετάζονται εκτενέστερα μελετώντας το περιοδογράμμα της χρονοσειράς των PM_{10} για τα 9 σχολεία. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε ο γεωμετρικός μέσος της φασματικής πυκνότητας ισχύος σε καθένα από τα 9 σχολεία καθώς το υπό μελέτη μέγεθος είναι εκφρασμένο λογαριθμική κλίμακα (Εικόνα 5-42). Η χρονοσειρά των αιωρούμενων σωματιδίων φαίνεται να έχει χαμηλότερη φασματική ισχύ σε μεγαλύτερες συχνότητες. Για συχνότητες μεγαλύτερες του $1 \times 10^{-3} \text{ Hz}$ που αντιστοιχούν σε χρόνο περίπου 17 min, το φάσμα ισχύος γίνεται σχετικά σταθερό γεγονός το οποίο φανερώνει για βήμα μέτρησης πολύ μικρότερο των 17 min δεν παρατηρούνται έντονες μεταβολές. Επίσης παρουσιάζεται μια αιχμή στα $0.3 \times 10^{-3} \text{ Hz}$ που αντιστοιχεί στα 55 min που περίπου ίσο με το διάστημα μεταξύ των δύο μαθημάτων όπου οι τάξεις αερίζονταν με το άνοιγμα των παραθύρων ενώ ταυτόχρονα οι μαθητές εκκένωναν την αίθουσα και αντίστοιχα οι συγκεντρώσεις σημείωναν πτώση (Εικόνα 5-42). Σε αντιστοιχία με την περίπτωση του CO_2 , (Εικόνα 5-36) τα περιοδογράμματα από τους δύο ρύπους εμφανίζουν ορισμένες ομοιότητες. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να μας οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι τα σωματίδια PM_{10} και

το CO₂ επηρεάζονται από παρόμοιους παράγοντες όπως το άνοιγμα των παραθύρων και άρα τον αερισμό των αιθουσών αλλά και την παρουσία των μαθητών.



Εικόνα 5-42: Περιοδόγραμμα του γεωμετρικού μέσου της φασματικής πυκνότητας ισχύος του PM₁₀ στις 9 σχολεία

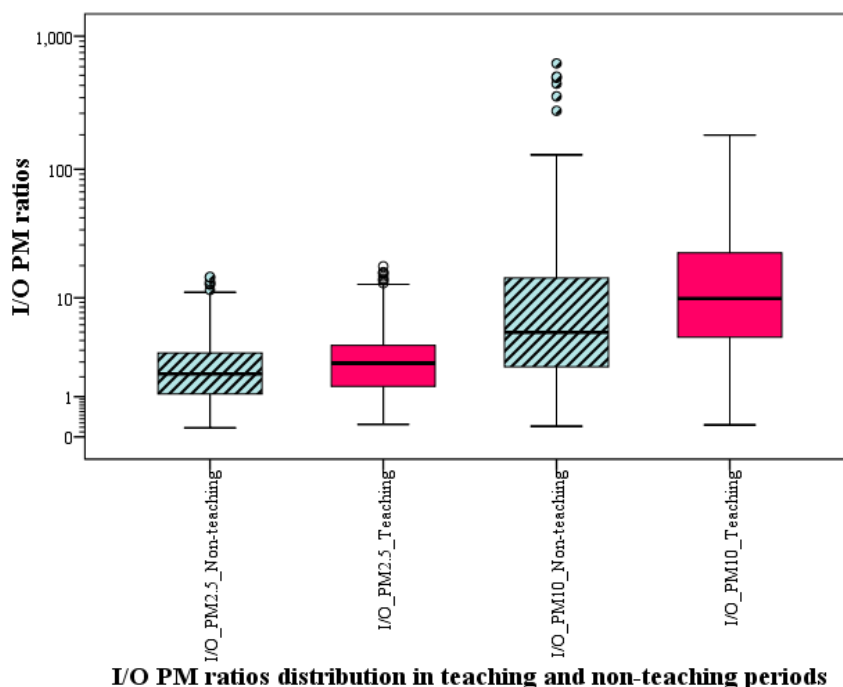
Λόγοι των εσωτερικών προς τις εξωτερικές συγκεντρώσεις σωματιδίων

Με σκοπό να εξεταστεί η συνεισφορά του εξωτερικού περιβάλλοντος στα εσωτερικά επίπεδα σωματιδίων, μελετήθηκαν οι λόγοι των εσωτερικών προς τα εξωτερικά σωματίδια (Indoor to Outdoor-I/O) PM₁₀ και PM_{2.5} για το σύνολο της περιόδου δειγματοληψίας για καθένα από τα 9 σχολεία (Πίνακας 5-10, παράρτημα Εικόνα 0-16). Τόσο για τα PM₁₀ όσο και για τα PM_{2.5} σε όλα σχεδόν τα σχολεία οι λόγοι είναι πολύ μεγαλύτεροι της μονάδας κάτι το οποίο φανερώνει ότι η παρουσία των εσωτερικών πηγών είναι ιδιαίτερα έντονη. Συγκεκριμένα, για την πλειοψηφία των περιπτώσεων οι συγκεντρώσεις των PM₁₀ στο εσωτερικό περιβάλλον ξεπέρασαν κατά περισσότερες από 10 φορές τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος υποδηλώνοντας την έντονη παρουσία εσωτερικών πηγών (π.χ. παρουσία και κίνηση ατόμων, χρήση κιμωλίας). Οι λόγοι εσωτερικών προς τις εξωτερικές συγκεντρώσεις I/O, της συγκεκριμένης μελέτης ήταν κατά πολύ μεγαλύτεροι από αντίστοιχες μελέτες που διεξήχθησαν σε δημοτικά σχολεία όπως των Madeco et al., 2013 οι οποίοι βρήκαν τους λόγους να κυμαίνονται από 0.9-28 και από 0.9-2.5 για την περίοδο θέρμανσης και ψύξης αντίστοιχα.

Πίνακας 5-10: Μέσες τιμές των εσωτερικών προς τις εξωτερικές συγκεντρώσεις (Indoor to outdoor -I/O ratio) σε καθένα από τα σχολεία

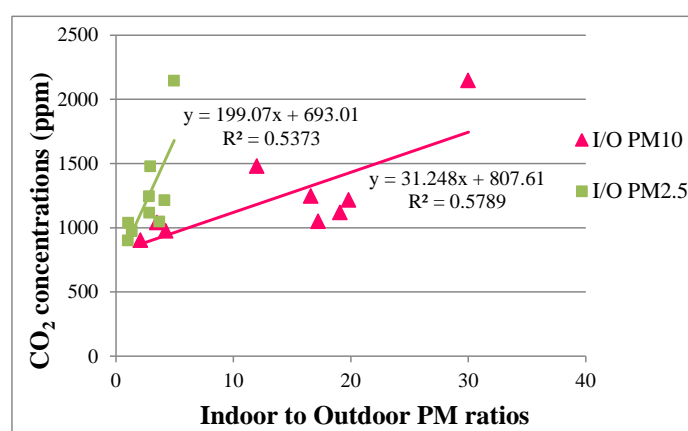
Σχολεία	I/O-PM ₁₀	I/O-PM _{2,5}
14	16,41	2,78
1	36,42	4,97
4	19,11	2,83
3	20,00	4,14
18	17,18	3,80
12	12,16	2,92
2	2,09	1,02
8	3,41	1,02
11	4,25	1,36

Ακολούθως, οι λόγοι I/O των PM₁₀ και των PM_{2,5} παρουσιάζονται σε θηκογράμματα για τις περιόδους διδασκαλίας (ροζ) και μη-διδασκαλίας (γαλάζιο ριγέ) στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 5-43). Είναι φανερό ότι οι τιμές των λόγων για την περίοδο διδασκαλίας είναι μεγαλύτεροι των αντίστοιχων μη διδασκαλίας, γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με τα ευρισκόμενα των Alshitawi et al., 2009. Οι διαφορές στους λόγους για τις δύο περιόδους είναι μεγαλύτερες για τα μεγαλύτερα σωματίδια PM₁₀.



Εικόνα 5-43: Κατανομές των λόγων I/O των αιωρούμενων σωματιδίων κατά τη διάρκεια των περιόδων διδασκαλίας και μη για το σύνολο των σχολείων και όλη την περίοδο μέτρησης

Οι λόγοι I/O των αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό προς το εξωτερικό περιβάλλον μελετήθηκαν επιπλέον σαν συνάρτηση των συγκεντρώσεων CO₂. Στο ακόλουθο διάγραμμα διασποράς παρουσιάζονται οι λόγοι I/O των PM₁₀ και PM_{2.5} σε σχέση με τις εσωτερικές συγκεντρώσεις CO₂. Μέντριες θετικές συσχετίσεις ξεχωρίζουν μεταξύ των λόγων των PM₁₀ αλλά και των PM_{2.5} με το CO₂. Συγκεκριμένα όσο οι λόγοι I/O αυξάνονται οι συγκεντρώσεις CO₂ αυξάνονται και το αντίστροφο. Θα μπορούσε εύκολα κανείς να συμπεράνει ότι οι εσωτερικές συγκεντρώσεις CO₂ έχουν παρόμοια συμπεριφορά με τα σωματίδια PM₁₀ και PM_{2.5}. Αυτή η κοινή συμπεριφορά θα μπορούσε να έχει ως κινητήρια δύναμη ορισμένες κοινές πηγές δημιουργίας των δύο ρύπων που προαναφέρθηκαν, όπως αυτή του ανεπαρκούς αερισμού αλλά και του αυξημένου συνωστισμού τις τάξεις.



Εικόνα 5-44: Διάγραμμα διασποράς μεταξύ των λόγων I/O των αιωρούμενων και των συγκεντρώσεων CO₂

5.3.1.4 Αποτελέσματα βαρυμετρικής μεθόδου και χημική ανάλυση αιωρούμενων σωματιδίων

Στην παράγραφο που ακολουθεί θα παρατεθούν τα ευρισκόμενα των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον των σχολικών τάξεων όπως καταγράφηκαν ακολουθώντας τη βαρυμετρική μέθοδο δειγματοληψίας. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί το ότι οι δειγματολήπτες δεν ήταν διαθέσιμοι για το σύνολο της περιόδου δειγματοληψίας παρά μόνο για 10 από τις 32 ημέρες δειγματοληψίας. Οι ημερήσιες εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 5-11). Επιβεβαιώνοντας τα αυξημένα επίπεδα έκθεσης στα αιωρούμενα σωματίδια στα σχολικά περιβάλλοντα και σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία (Alves et al., 2013, Diarouli et al., 2008, Hassanvand et al., 2014, Lin and Peng, 2010), τα αποτελέσματα ενισχύουν την κρισιμότητα για την καλύτερη κατανόηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα. Χωρίς καμία εξάρτηση του τύπου δειγματοληψίας, των επιμέρους χαρακτηριστικών των σχολείων αλλά και των διάφορων τάξεων μεγέθους αιωρούμενων

σωματιδίων, οι μεγαλύτερες τιμές αιωρούμενων σωματιδίων εντοπίστηκαν στα εσωτερικά περιβάλλοντα. Στις περισσότερες των περιπτώσεων οι καταγεγραμμένες συγκεντρώσεις τόσο των PM₁₀ όσο και των PM_{2.5} ξεπέρασαν τις αντίστοιχες οριακές τιμές τους. Οι μέγιστες τιμές PM₁₀ και PM_{2.5} στα εσωτερικά περιβάλλοντα παρατηρήθηκαν στα σχολεία 12 και 8 αντίστοιχα ενώ στο εξωτερικό περιβάλλον και για τις δύο κατηγορίες μεγεθών οι μέγιστες τιμές παρατηρήθηκαν στο σχολείο 2. Λαμβάνοντας υπόψη τη διαφοροποίηση των εξωτερικών επιπέδων ρύπανσης των σχολείων 2 και 12 (61.7 και 40.8 μg/m³ αντίστοιχα), πρέπει να δοθεί έμφαση στο ότι οι εσωτερικές συγκεντρώσεις των σχολείων αυτών ήταν σχεδόν ίσες (84.6 και 87.7 μg/m³ αντίστοιχα).

Τα υψηλότερα επίπεδα συγκεντρώσεων στο εσωτερικό σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον, είναι πολύ πιθανό να συσχετίζονται είτε με φυσικές δραστηριότητες των μαθητών είτε με την επαναιώρηση την εισαγωγή/παραγωγή αιωρούμενων σωματιδίων (σκόνη κιμωλίας, σκόνη που έχει μεταφερθεί με τα παπούτσια, θραύσματα από ύφασμα ή από έπιπλα) σε συνδυασμό με τα ακατάλληλα επίπεδα αερισμού αλλά και ενδεχόμενες πηγές του εξωτερικού περιβάλλοντος (Alves et al., 2013, 2014, Pegas et al., 2012, Raysoni et al., 2013, Hassanvand et al., 2014). Επιπλέον τα σχολεία 2 και 8 ήταν πιο πρόσφατα χτισμένα σε σχέση με τα σχολεία 11 και 12 και ως εκ τούτου έχουν χρησιμοποιηθεί λιγότερο από τους μαθητές σύμφωνα με συμπέρασμα των Raysoni et al., 2012. Αυτή θα μπορούσε να είναι η εξήγηση για τις χαμηλότερες τιμές των λόγων I/O PM₁₀ στα σχολεία 2 και 8. Η ίδια θεώρηση μπορεί να γίνει και για τα PM_{2.5} επίσης.

Πίνακας 5-11: Μέσες συγκεντρώσεις μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον με τη βαρομετρική μέθοδο μέτρησης

Σχολείο	Σωματίδια	Ημ/νία μέτρησης	Εσωτερική συγκέντρωση (μg/m ³)	Εξωτερικές συγκεντρώσεις (μg/m ³)	Λόγοι εσωτερικών/Εξωτερικές Συγκεντρώσεις (I/O)
12	PM ₁₀	15/5/2013	80.09	-	
12	PM ₁₀	17/5/2013	95.35	40.79	2.34
2	PM ₁₀	21/5/2013	103.35	86.83	1.19
2	PM _{2.5}	22/5/2013	50.03	51.12	0.98
2	PM ₁	23/5/2013	19.11	18.51	1.03
2	PM ₁₀	24/5/2013	65.79	36.65	1.80
8	PM ₁₀	27/5/2013	46.11	30.15	1.53
8	PM _{2.5}	28/5/2013	67.49	27.85	2.42
8	PM ₁₀	29/5/2013	80.91	57.70	1.40
11	PM ₁₀	31/5/2013	69.96	41.52	1.68

Χημική σύνθεση των αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό και το εξωτερικό περιβάλλον

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα παρατεθούν τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον για τις ημέρες που έλαβε χώρα η βαρυμετρική μέθοδος δειγματοληψίας (Πίνακας 5-11). Στα δύο διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζεται η μέση κατανομή (%) των χημικών συστατικών των PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_1 στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον αντίστοιχα ανά σχολείο (Εικόνα 5-45, Εικόνα 5-46).

Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.1, τα ανιχνευόμενα υδατοδιαλυτά ιόντα ήταν τα εξής: Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} ενώ τα ανιχνευόμενα στοιχεία του άνθρακα ήταν ο οργανικός (OC) και ο στοιχειακός άνθρακας (EC). Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, υψηλές ποσότητες ασβεστίου συσχετίζονται με υλικά του φλοιού της γης και οικοδομικά υλικά από τη φθορά των υλικών της κατασκευής των κτιρίων. Ειδικότερα σε σχολικά περιβάλλοντα συσχετίζονται επίσης με τη σκόνη της κιμωλίας (Fromme et al., 2008). Το μαγνήσιο συνήθως συνδέεται με επαναιωρούμενη σκόνη από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Triantafyllou et al., 2008) ενώ τα SO_4^{2-} και NO_3^- αποτελούν ένδειξη επιβαρυσμένης ατμόσφαιρας και οφείλονται στις εκπομπές των οχημάτων. Ο οργανικός άνθρακας (OC) σε σχολικές τάξεις συνήθως συσχετίζεται με την παρουσία των μαθητών και τις δραστηριότητές τους όπως σωματίδια από χαρτί, από τμήματα αποσυντιθέμενου δέρματος και ίνες υφασμάτων από τα ρούχα των μαθητών (Pegas et al., 2012).

Στη συγκεκριμένη μελέτη, σε γενικές γραμμές, μεγαλύτερο ποσοστό συνεισφοράς των ανιχνευόμενων στοιχείων καταγράφηκε στο εξωτερικό περιβάλλον κυμαινόμενο από 44% έως 54%. Στο σχολείο 8 τα PM_{10} και στο σχολείο 2 τα $PM_{2.5}$ ήταν οι εξαιρέσεις στο παραπάνω συμπέρασμα (48% και 45% και 52% και 48% στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον αντίστοιχα). Από το σύνολο των ανιχνευόμενων στοιχείων, η ποσοστιαία συμμετοχή των ιόντων ήταν μεγαλύτερη από αυτήν του συνολικού άνθρακα (20.3-56.9% και 43.1-79.7% για τον άνθρακα και τα ιόντα αντίστοιχα).

Ανεξάρτητα από τον τόπο δειγματοληψίας, τα δευτερογενή ανόργανα αερολύματα (άθροισμα θεικών, νιτρικών και αμμωνίου) ήταν τα κύρια υδατοδιαλυτά ιόντα υποδεικνύοντας υψηλό βαθμό ανθρωπογενούς ρύπανσης στην περιοχή (Hassanvand et al., 2014). Στα εσωτερικά περιβάλλοντα αντιπροσώπευαν περίπου το 34-70% της συνολικής μάζας των υδροδιαλυτών ιόντων των PM_{10} , το 71% στα $PM_{2.5}$ και 65% στα PM_1 αντίστοιχα. Στο εξωτερικό περιβάλλον, η συμμετοχή τους ήταν 40-67%, 77-80% και 53% για τα PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_1

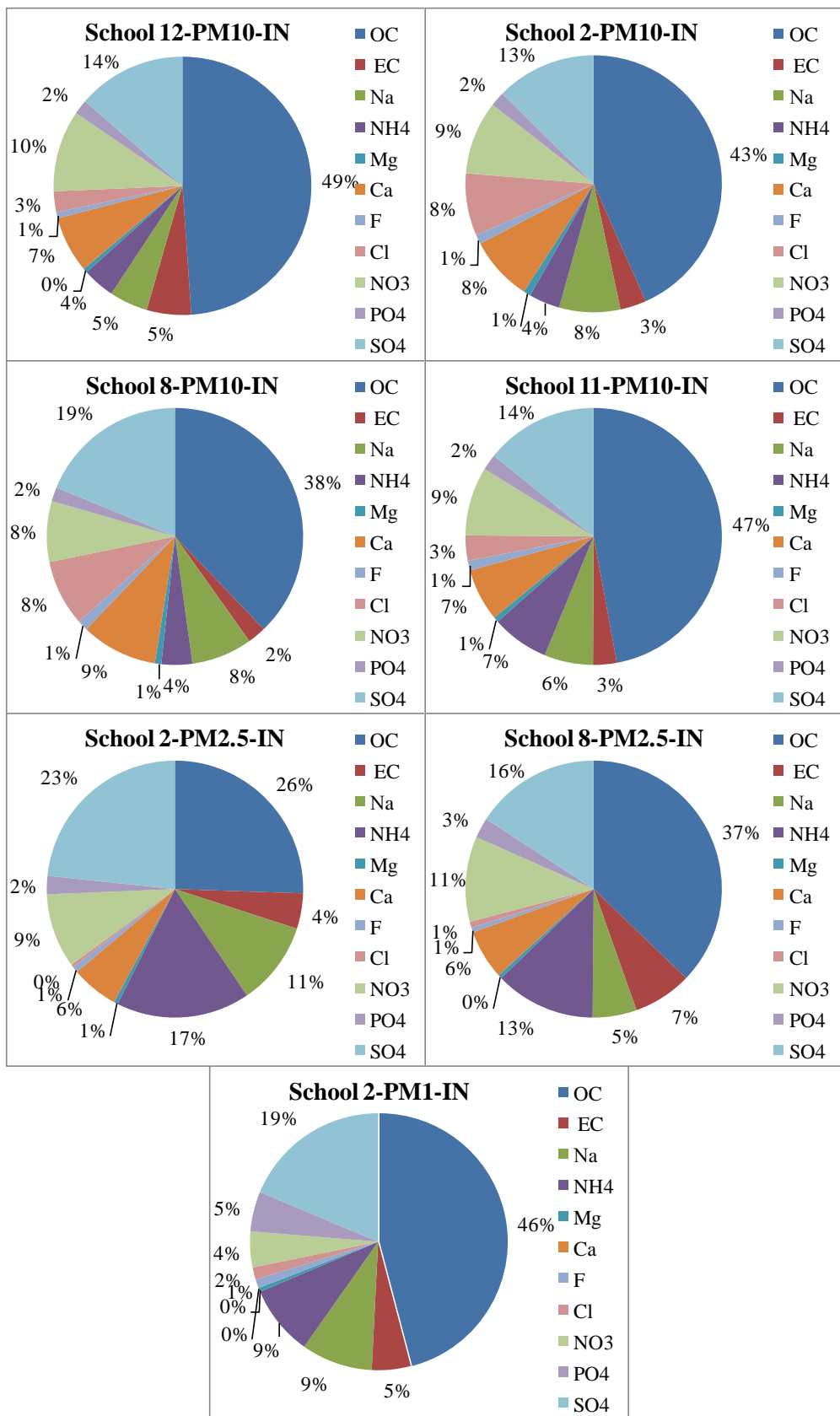
αντίστοιχα. Αξίζει να σχολιαστούν τα αυξημένα ποσοστά των δευτερογενών ανόργανων αερολυμάτων στα $PM_{2.5}$ σε σύγκριση με τα αντίστοιχα στα PM_{10} τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό περιβάλλον.

Σε συμφωνία με τα ευρισκόμενα των Pegas et al., 2012 στην Πορτογαλία, τα ανθρακούχα στοιχεία στο εσωτερικό των τάξεων επικράτησαν των ιόντων. Πιο συγκεκριμένα, η χημική ανάλυση των καταγεγραμμένων αιωρούμενων σωματιδίων έδειξε ότι τα σωματίδια στο εσωτερικό περιβάλλον είχαν δημιουργηθεί κυρίως από οργανικό άνθρακα με την παρουσία του να κυμαίνεται από 38% έως 47% και από 26% έως 37% στα PM_{10} και $PM_{2.5}$ αντίστοιχα. Οι πηγές του οργανικού άνθρακα στο εσωτερικό περιβάλλον κυρίως συσχετίζονται με την πληρότητα της τάξης από τους μαθητές και τη δραστηριότητά τους. Συγκεκριμένα θα μπορούσαν να είναι να είναι σωματίδια από μικρά κομμάτια χαρτιού, νιφάδες δέρματος ακόμη και ίνες από ρούχα (Pegas et al., 2012). Για την περίπτωση των PM_{10} , η συνεισφορά έφτασε το 46%. Μεταξύ των ανιχνευόμενων ιοντικών συστατικών, τα θειικά παρουσίασαν την υψηλότερη συγκέντρωση και έτσι τα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με τα αντίστοιχα των John et al., 2007 από μια άλλη καμπάνια που έλαβε χώρα στο Οχάιο. Το κάλιο ήταν χαμηλότερο από το όριο ανίχνευσης ενώ οι ελάχιστες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν για το μαγνήσιο και το φθόριο. Για όλες τις περιπτώσεις, ο οργανικός άνθρακας ήταν μεγαλύτερος από τα θειικά.

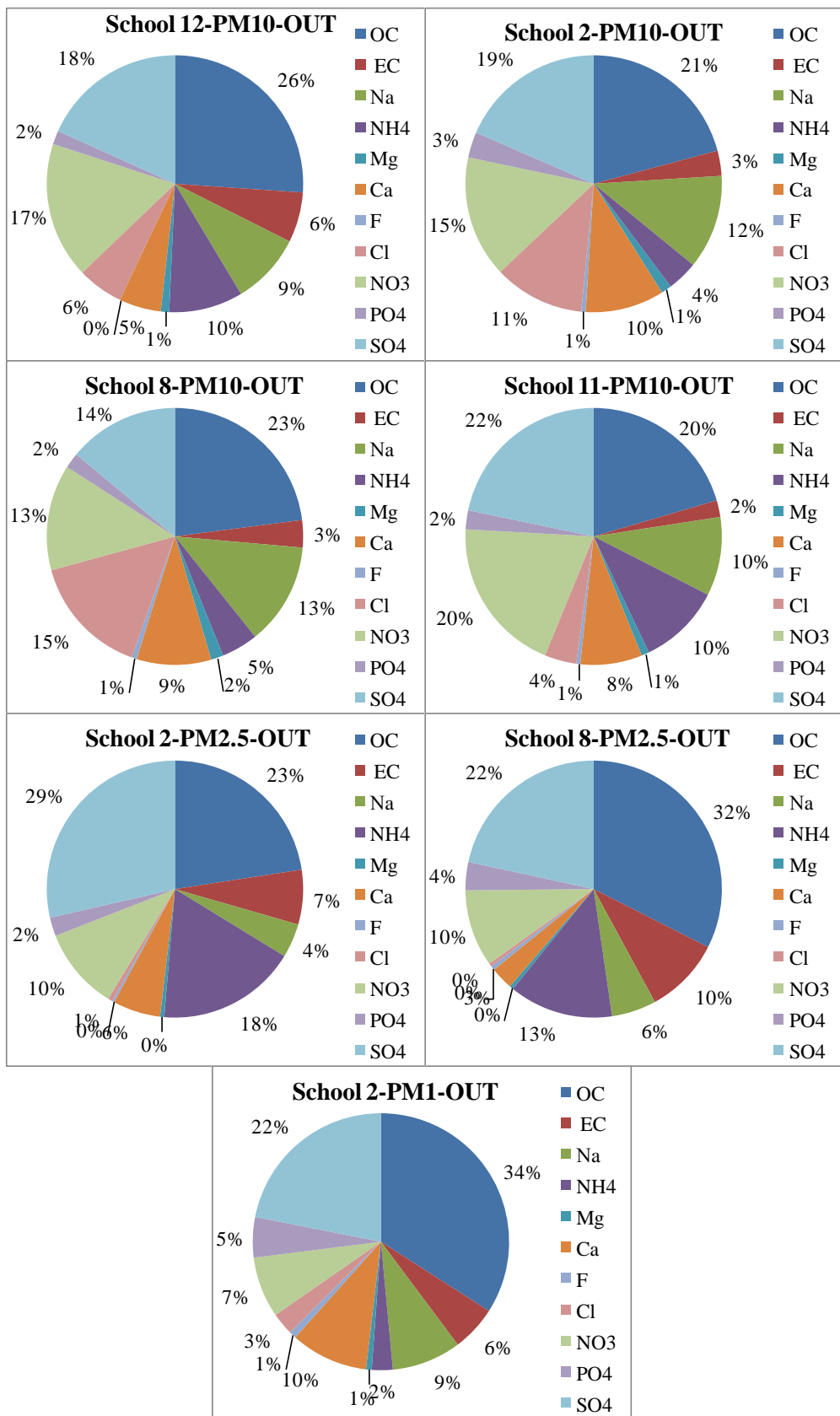
Όσον αφορά τον εξωτερικό αέρα, η κατανομή των συγκεντρώσεων των χημικών συστατικών δεν ήταν η ίδια για όλα τα σχολεία και τα κλάσματα μεγέθους. Η διαφοροποίηση της χημικής σύστασης των σωματιδίων αντανάκλα διαφορετικές εκπομπές ειδικά για την περίπτωση του εξωτερικού αέρα που φανερώνει διαφορετικές περιοχές πηγών αλλά και διαφορετικές διαδρομές αέριων μαζών αλλά και καιρικές συνθήκες (Gomisek et al., 2004). Ο οργανικός άνθρακας κυριάρχησε στο εξωτερικό περιβάλλον των σχολείων 12, 2 και 8 (21-26% και 23-32% για τα PM_{10} και τα $PM_{2.5}$ αντίστοιχα). Τον ακολουθούν τα θειικά και τα χλωριούχα αντίστοιχα. Στην περίπτωση του σχολείου 11, τα σωματίδια απαρτίζονταν κυρίως από θειικά τα οποία ακολουθούνταν από τον οργανικό άνθρακα (22% και 20% αντίστοιχα). Ωστόσο, όπως στην περίπτωση του εσωτερικού περιβάλλοντος το κάλιο ήταν κάτω από το όριο ανίχνευσης ενώ το μαγνήσιο και το φθοριούχο έδειξαν τις ελάχιστες μέσες τιμές.

Αναλύοντας τον λόγο OC/EC τόσο για το εσωτερικό όσο και για το εξωτερικό περιβάλλον, έγινε φανερό ότι χωρίς καμία εξάρτηση με τα χαρακτηριστικά της περιοχής δειγματοληψίας, οι μέγιστες τιμές καταγράφηκαν στο εσωτερικό περιβάλλον γεγονός το οποίο σε μεγάλο ποσοστό οφείλεται στην ανθρώπινη παρουσία και δραστηριότητα. Οι μικρότεροι λόγοι παρουσιάστηκαν στο εξωτερικό περιβάλλον του σχολείου 12 υποδηλώνοντας έντονη

επίδραση από εκπομπές της κυκλοφορίας σε σχέση με τα υπόλοιπα σχολεία (Alves et al., 2013). Ο λόγος I/O για τα συστατικά των αιωρούμενων σωματιδίων παρουσίασε τιμές μεγαλύτερες της μονάδας για τον οργανικό άνθρακα, το φθόριο και το ασβέστιο (I/O: 1.06-3.86). Οι υψηλότερες τιμές του ασβεστίου στο εσωτερικό περιβάλλον φανερώνουν ότι σε μεγάλο βαθμό τα αιωρούμενα σωματίδια των τάξεων αποτελούνται από φθαρμένα κτιριακά υλικά όπως το τσιμέντο και ο γύψος, υλικά του φλοιού της γης που μεταφέρονται στις τάξεις μέσω του αερισμού και εγκλωβίζονται σε αυτές αλλά και η σκόνη από τη χρήση της κιμωλίας. Επιδημιολογικές μελέτες υποστηρίζουν ότι σωματίδια που προέρχονται από υλικά του φλοιού της γης που ανιχνεύονται με τις υψηλές συγκεντρώσεις ασβεστίου, καλίου και μαγνησίου προκαλούν λιγότερες βλαβερές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία σε σχέση με σωματίδια που προέρχονται από διαδικασίες καύσης (Fromme et al., 2008). Στις περισσότερες των περιπτώσεων οι εσωτερικές συγκεντρώσεις του στοιχειακού άνθρακα, του νατρίου του αμμωνίου και του μαγνησίου ήταν σχεδόν ίσες ή υψηλότερες από τις αντίστοιχες εξωτερικές τιμές (I/O: 0.5-3.31). Αντίθετα, τα χλωριούχα, τα νιτρικά τα φωσφορικά και τα θειικά ανιχνεύθηκαν κυρίως μέσα στις τάξεις (I/O: 0.54-2.36). Σωματίδια με υψηλές περιεκτικότητες σε αλάτι στο εσωτερικό περιβάλλον είναι δυνατόν να σχηματιστούν από την απορρόφηση προϊόντων καθαρισμού (Fromme et al., 2008). Η παρουσία θεικών αποτελεί ένδειξη διεργασιών καύσης όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι δυνατόν να συμβαίνουν στο εξωτερικό περιβάλλον και μέσω του αερισμού μεταφέρονται στο εσωτερικό περιβάλλον των τάξεων.



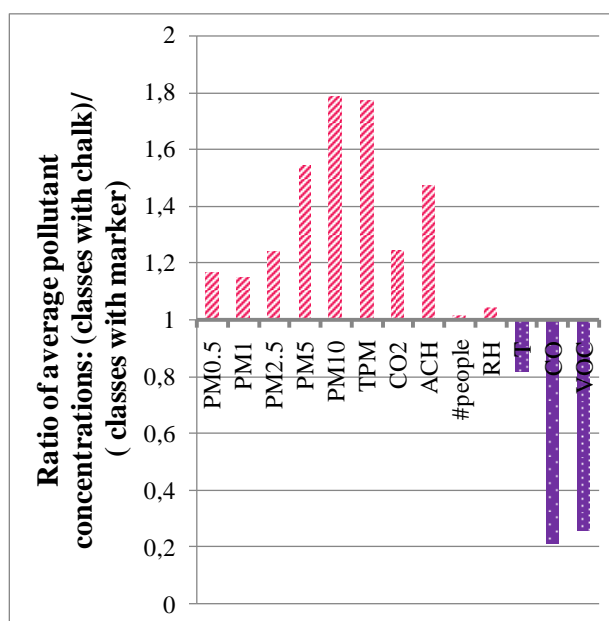
Εικόνα 5-45: Κατανομή των χημικών στοιχείων των αιωρούμενων σωματιδίων στα εσωτερικά περιβάλλοντα κάθε σχολείου



Εικόνα 5-46: Κατανομή των χημικών στοιχείων των αιωρούμενων σωματιδίων στα εξωτερικά περιβάλλοντα κάθε σχολείου

5.3.1.5 Επίδραση της χρήση πινάκων κιμωλίας και μαρκαδόρου στα επίπεδα αέριων ρύπων

Στο κεφάλαιο αυτό τα σχολεία διαχωρίστηκαν σε αυτά που χρησιμοποιούσαν πίνακες κιμωλίας (σχολεία: 14, 1, 4, 3, 18 και 11, Πίνακας 3-13 , στήλες 1 & 5) και σε αυτά που χρησιμοποιούσαν πίνακες μαρκαδόρου (σχολεία: 12, 2 και 8, Πίνακας 3-13). Οι λόγοι των μέσων τιμών των ρύπων για τη συνολική περίοδο μέτρησης στα σχολεία με πίνακες κιμωλίας προς τα σχολεία με πίνακες μαρκαδόρου, παρουσιάζονται στο γράφημα που ακολουθεί (Εικόνα 5-47). Οι λόγοι είναι μεγαλύτεροι της μονάδας για τα αιωρούμενα σωματίδια, το CO₂ και τον αερισμό ενώ είναι μικρότεροι της μονάδας για τη θερμοκρασία, το CO και τα VOCs. Ο αριθμός των ατόμων ήταν σχεδόν ο ίδιος για τις δύο περιπτώσεις ενώ τα επίπεδα σχετικής υγρασίας (RH) ήταν ελαφρώς αυξημένα στα σχολεία με πίνακα κιμωλίας. Η θερμοκρασία (T) ήταν μεγαλύτερη σε σχολεία με πίνακα μαρκαδόρου. Συγκεκριμένα οι μαυροπίνακες κιμωλίας οδήγησαν σε αύξηση των επιπέδων σωματιδίων παρόλο που ο αερισμός ήταν μεγαλύτερος εγώ οι πίνακες μαρκαδόρου οδήγησαν σε αυξημένα επίπεδα συγκεντρώσεων VOCs και CO. Θα μπορούσε κανείς να συμπεράνει πως το κέρδος από τη μείωση των VOCs χάνεται με την αύξηση των PM στην περίπτωση των μαυροπινάκων κιμωλίας.



Εικόνα 5-47: Λόγοι των μέσων συγκεντρώσεων των παραμέτρων στις τάξεις με πίνακες κιμωλίας προς τις τάξεις με πίνακες μαρκαδόρου

5.3.1.6 Ποσοστά υπέρβασης των οριακών τιμών

Ο ακόλουθος πίνακας συνοψίζει τα ποσοστά υπέρβασης των προτεινόμενων διαθέσιμων οριακών τιμών για συγκεκριμένους ρύπους για το σύνολο της περιόδου δειγματοληψίας σε χρωματική κλίμακα. Ποσοστά μεγαλύτερα του 80% σημειώνονται με κόκκινο, αυτά που

βρίσκονται μεταξύ 60 και 80% σημειώνονται με πορτοκαλί, τα ποσοστά μεταξύ 40 και 60% είναι με κίτρινο, αυτά μεταξύ των 20 και 40% παρουσιάζονται με πράσινο και τα ποσοστά που είναι μικρότερα των 20% παρουσιάζονται με μπλε. Οι συγκεντρώσεις CO ξεπέρασαν το όριο στα σχολεία 8 και 11. Στο σχολείο 8 η υπέρβαση ήταν σχετικά χαμηλή (12%) ενώ στο σχολείο 11 το ποσοστό πλησίασε το 90% του συνόλου της περιόδου δειγματοληψίας. Οι εκπομπές των οχημάτων από γειτονικούς δρόμους θα μπορούσαν να συσχετίζονται με τα αυξημένα επίπεδα CO στις περιπτώσεις αυτές. Σύμφωνα με τους Molhave et al., 1990 η κλίμακα δυσφορίας με την πιθανή εμφάνιση πονοκεφάλων ξεκινά όταν οι συγκεντρώσεις VOCs είναι από 0.8 ppm και μεγαλύτερες. Οι VOCs ξεπέρασαν τις οριακές τιμές των 0.8 ppm σε όλα τα σχολεία εκτός του σχολείου 18. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις VOCs στα σχολεία 12, 2 και 8 θα μπορούσαν να οφείλονται στη χρήση μαρκαδόρου. Σύμφωνα με τους Molhave et al., 1990 όταν οι συγκεντρώσεις VOCs βρίσκονται μεταξύ 0.8 και 6.64 ppm είναι δυνατόν να προκαλέσουν πονοκεφάλους ενώ όταν οι συγκεντρώσεις είναι μεγαλύτερες των 6.64 ppm είναι δυνατόν να προκαλέσουν σοβαρότερες επιπτώσεις στην υγεία όπως νευρολογικά προβλήματα. Οι συγκεντρώσεις CO₂ ξεπέρασαν το όριο των 1,000 ppm σε όλα τα σχολεία και τα ποσοστά υπέρβασης κυμάνθηκαν από 23 έως 60% με εξαίρεση το σχολείο 1 στο οποίο το ποσοστό υπέρβασης ξεπέρασε το 80%. Όπως προαναφέρθηκε στην Εικόνα 5-28, το σχολείο 1 είχε τα παράθυρα κλειστά για περισσότερο από το 80% του χρόνου των μετρήσεων, τα επίπεδα του αερισμού ήταν πολύ χαμηλά και έτσι το CO₂ εγκλωβίζονταν στο εσωτερικό περιβάλλον των τάξεων. Οι Seppanen et al., 1999 κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι συγκεντρώσεις του CO₂ ακόμα και αν είναι χαμηλότερες του ορίου των 1,000 ppm δεν επαρκούν πάντα για την απομάκρυνση των αέριων ρύπων από τα εσωτερικά περιβάλλοντα. Τα ποσοστά υπέρβασης των οριακών τιμών των PM_{2.5} ήταν σχετικά χαμηλά για την πλειοψηφία των περιπτώσεων. Το υψηλότερο ποσοστό ήταν στο σχολείο 1 (66%) το οποίο θα μπορούσε να αποδοθεί στον ανεπαρκή αερισμό για την απομάκρυνση των PM_{2.5}. Στα σχολεία 8 και 11 οι συγκεντρώσεις PM_{2.5} ήταν χαμηλότερες της οριακής τιμής των 25 μg/m³ για όλη την περίοδο των μετρήσεων. Οι συγκεντρώσεις PM₁₀ για το σύνολο των σχολείων και για σχεδόν όλη την περίοδο των μετρήσεων ήταν μεγαλύτερες των οριακών τιμών. Μόνο στο σχολείο 8 το ποσοστό ήταν λίγο λιγότερο (74%) σε σχέση με τα άλλα σχολεία πιθανόν εξ' αιτίας του ότι στο συγκεκριμένο σχολείο υπήρχαν λιγότεροι μαθητές ανά τετραγωνικό στην αίθουσα συγκριτικά με άλλα σχολεία καθώς επίσης στο συγκεκριμένο σχολείο χρησιμοποιούσαν πίνακα μαρκαδόρου (Παράρτημα, Εικόνα 0-15).

Πίνακας 5-12 : Ποσοστά υπέρβασης των οριακών τιμών για το σύνολο της μετρούμενης περιόδου

	CO	VOC	CO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀
Σχολείο	>10 ppm	> 0,8 ppm	> 1000 ppm	> 25μg/m ³	>50μg/m ³
14	0	43	44	31	100
1	0	49	81	66	96
4	0	52	33	4	100
3	0	69	57	21	97
18	0	0	29	57	100
12	0	71	42	11	100
2	0	80	23	35	98
8	12	93	43	0	74
11	89	100	49	0	98

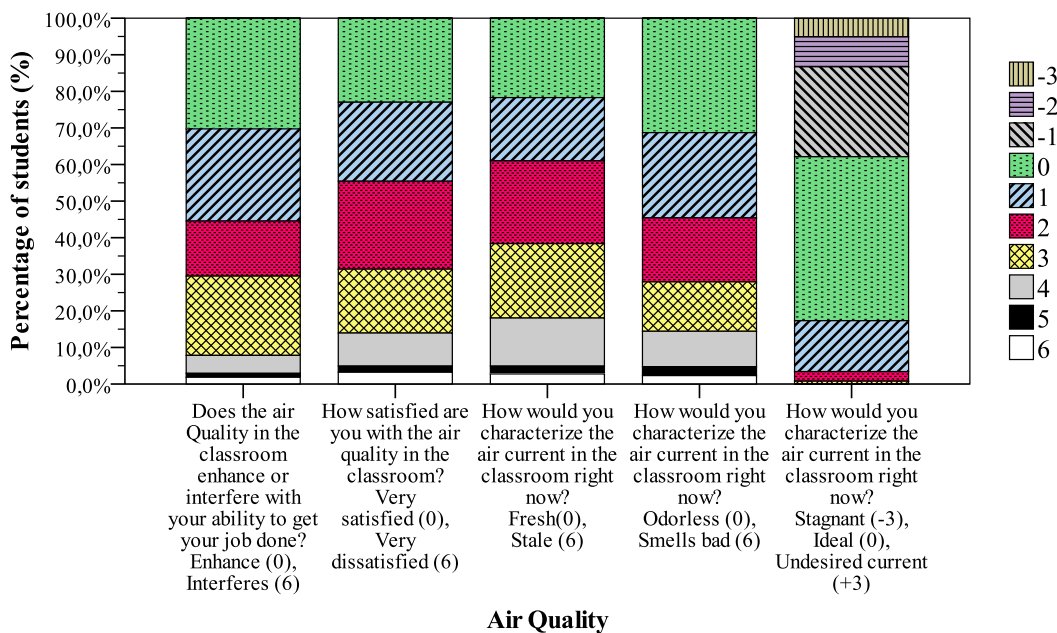
5.3.2 Επεξεργασία έρευνας ερωτηματολογίων & διερεύνηση σχέσεων με τις μετρήσεις: Μέρος Β'

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα από την έρευνα ερωτηματολογίου που πραγματοποιήθηκε στους μαθητές σχετικά με την αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος των τάξεών τους χωρισμένες στις εξής κατηγορίες: ποιότητας εσωτερικού αέρα, θερμικού περιβάλλοντος, φωτισμού και ακουστικής. Επιπλέον παρουσιάζονται τα ευρισκόμενα από την επεξεργασία των μετρήσεων που αφορούν στις συγκεκριμένες επιμέρους κατηγορίες όπου και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες απαντήσεις των μαθητών. Τέλος γίνεται προσπάθεια εντοπισμού των βασικότερων παραμέτρων που επιδρούν στην θετική αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα από τους μαθητές.

Απαντήσεις ερωτηματολογίων αναφορικά με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα

Η κατανομή των ψήφων του συνόλου των μαθητών σε όλα τα σχολεία για την αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα των τάξεων παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα σε μορφή ραβδογράμματος (Εικόνα 5-48). Κάθε ράβδος αντιστοιχεί σε μία ερώτηση και προκύπτει από το σύνολο των κατανομών των ψήφων των μαθητών από τα 9 σχολεία για το σύνολο της περιόδου δειγματοληψίας. Η κατανομή των ψήφων αναλυτικά ανά σχολείο παρουσιάζεται στο παράρτημα, Εικόνα 0-20. Οι 4 πρώτες ράβδοι του διαγράμματος αναφέρονται σε ερωτήσεις των οποίων οι απαντήσεις δίνονταν σε 7-βάθμια κλίμακα από το 0 έως το 6 όπου η απάντηση 0 αντιστοιχεί σε θετική αξιολόγηση του εσωτερικού αέρα, ενώ η απάντηση 6 αντιστοιχεί σε αρνητική αξιολόγηση. Η κλίμακα των απαντήσεων της πέμπτης ράβδου ήταν από το -3 έως το +3. Περίπου 30%, 25% και 15% των μαθητών απάντησαν 0, 1 και 2 αντίστοιχα στην κλίμακα των απαντήσεων από 0 έως 6 στην πρώτη ερώτηση. Λιγότερο

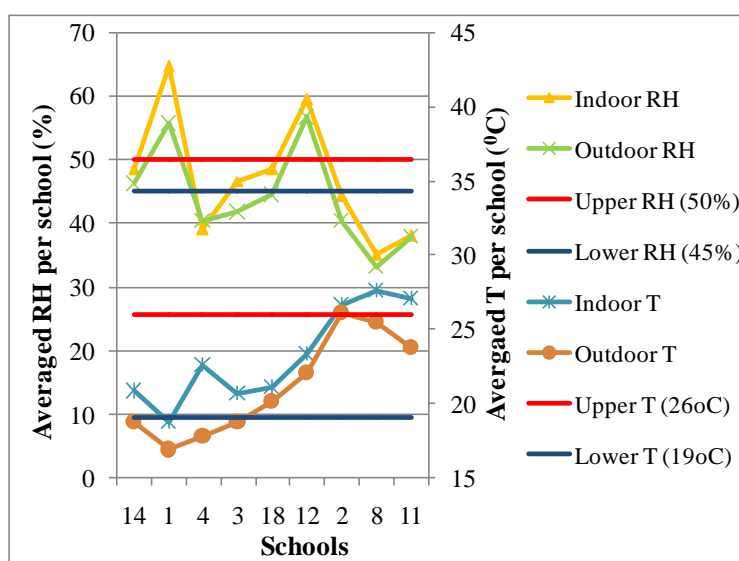
από το 10% των μαθητών σε όλα τα σχολεία έδωσαν απαντήσεις που κυμαίνονταν από 4 έως το 6 κάτι το οποίο φανερώνει ότι πολύ μικρό ποσοστό των μαθητών πίστευαν ότι η εσωτερική ποιότητα του αέρα εμποδίζει την απόδοσή τους. Περίπου η ίδια κατανομή των ψήφων παρουσιάζεται και για τις ερωτήσεις της δεύτερης, τρίτης και τέταρτης ράβδου που απαντούν στο επίπεδο ικανοποίησης, τη φρεσκάδα και τις μυρωδιές του εσωτερικού αέρα αντίστοιχα. Για τις ερωτήσεις αυτές οι αρνητικές ψήφοι μεταξύ 4 και 6 έφτασαν περίπου το 10-15% στο σύνολό τους ενώ οι θετικές απαντήσεις με ψήφους μεταξύ 0 και 2 αντιστοίχησαν περίπου στο 70% των μαθητών. Λαμβάνοντας υπόψη τις αυξημένες εσωτερικές συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων (Εικόνα 5-39) και ταυτόχρονα το αυξημένο ποσοστό ικανοποιημένων μαθητών με την ποιότητα του αέρα των τάξεών τους θα μπορούσε κανείς να συμπεράνει ότι η επιβαρυσμένη ποιότητα του εσωτερικού αέρα δεν γίνεται αντιληπτή από τους μαθητές. Είναι επίσης γεγονός ότι οι αυξημένες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων δεν συνδέονται πάντα με κάποια αντιληπτή και χειροπιαστή παράμετρο όπως για παράδειγμα η μυρωδιά του αέρα. Επιπλέον συνδυασμός διάφορων παραμέτρων όπως της θερμικής άνεσης, των επιπέδων φωτισμού κτλ. θα μπορούσαν να επιδράσουν την αντίληψη των μαθητών, παράμετροι οι οποίες δεν συνυπολογίζονται σε αυτή τη μονοπαραγοντική συσχέτιση. Όσον αφορά την πέμπτη ερώτηση (και ράβδο) που χαρακτηρίζει το ρεύμα του αέρα της τάξης, περίπου το 45% των μαθητών χαρακτήρισαν το ρεύμα του αέρα ως ιδανικό ενώ περίπου 35% των μαθητών ένιωσαν το ρεύμα στάσιμο. Τέλος, περίπου το 20% του συνόλου των μαθητών ένιωθαν ένα ανεπιθύμητο ρεύμα αέρα.



Εικόνα 5-48: Κατανομή του συνόλου των ψήφων των μαθητών των 9 σχολείων για την αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα για το σύνολο της περιόδου της ανασκόπησης

Μετρήσεις θερμικού περιβάλλοντος

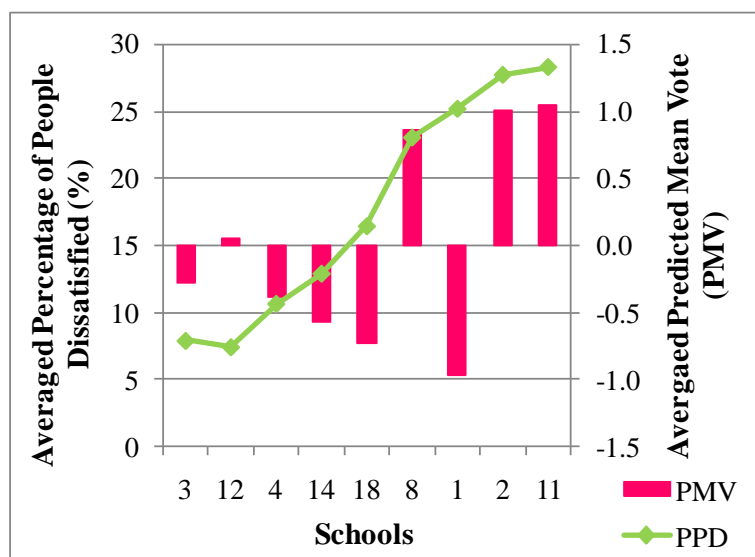
Το θερμικό περιβάλλον εξετάζεται στις παραγράφους που ακολουθούν. Η διασπορά της μέσης εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας ανά σχολείο για το σύνολο της περιόδου μέτρησης παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα 5-49). Σύμφωνα με τον οδηγό του Τεχνικού Επιμελητηρίου της Ελλάδας (ΤΕΕ) οι προτεινόμενες τιμές θερμοκρασίας για σχολικά κτίρια είναι μεταξύ 19 και 26 °C και το αντίστοιχο εύρος για τη σχετική υγρασία είναι μεταξύ (45-50%) (Santamouris et al., 2007c). Τόσο η θερμοκρασία όσο και η σχετική υγρασία στο εσωτερικό περιβάλλον είναι υψηλότερες σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον. Επιπλέον η τάση στις εσωτερικές τιμές ακολουθεί την εξωτερική τάση. Η εσωτερική θερμοκρασία για την πλειοψηφία των περιπτώσεων ήταν μεταξύ των προτεινόμενων ορίων. Μόνο για ένα ποσοστό της τάξης του 10% της συνολικής περιόδου των μετρήσεων οι θερμοκρασίες ήταν χαμηλότερες των 19°C και το 17% των θερμοκρασιών ήταν μεγαλύτερες των 27 °C. Επιπλέον παρουσιάστηκε αυξητική τάση των θερμοκρασιών από την έναρξη (Σχολείο 14) έως τη λήξη των μετρήσεων (Σχολείο 11). Όσο για τη σχετική υγρασία, σε 6 από τα 9 σχολεία ήταν εκτός των προτεινόμενων ορίων. Συγκεκριμένα το ανώτερο όριο των 50% ξεπεράστηκε κατά περίπου 10% στα σχολεία 1 και 12. Στα σχολεία 4, 8 και 11 η σχετική υγρασία ήταν χαμηλότερη των προτεινόμενων οριακών τιμών.



Εικόνα 5-49: Διακύμανση μέσων θερμοκρασιών και σχετικής υγρασίας ανά σχολείο

Στη συνέχεια μελετώνται οι υπολογιζόμενοι δείκτες θερμικής άνεσης. Συγκεκριμένα στην Εικόνα 5-50 παρουσιάζεται η κατανομή των μέσων τιμών των δεικτών του ποσοστού των δυσαρεστημένων ατόμων με το θερμικό περιβάλλον- PPD (πράσινη γραμμή) και της μέσης προβλεπόμενης ψήφου- PMV (ροζ ράβδοι) για το σύνολο της περιόδου δειγματοληψίας σε καθένα από τα σχολεία, τιμές που υπολογίστηκαν με βάση τις μετρήσεις. Οι δείκτες PPD

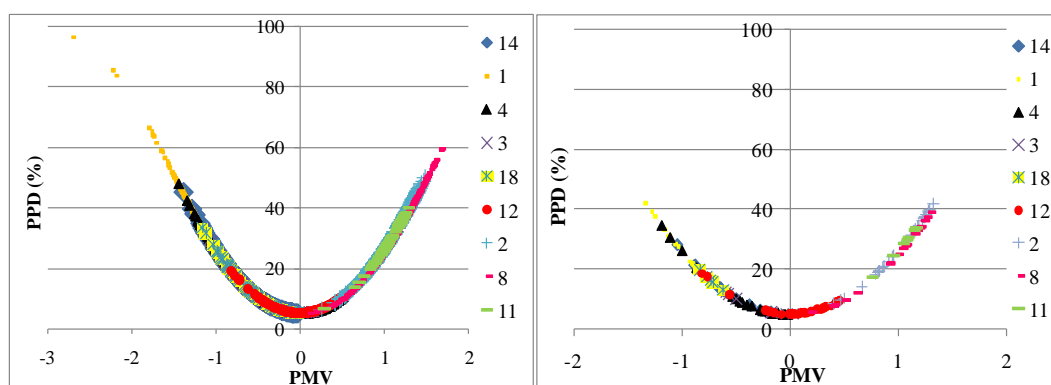
είναι τοποθετημένοι σε αυξανόμενα ποσοστά. Τα μεγαλύτερα ποσοστά των προβλεπόμενων δυσαρεστημένων μαθητών με το θερμικό περιβάλλον εμφανίζονται στα σχολεία 8, 1, 2 και 11 (>20%). Όσον αφορά το δείκτη PMV, στα σχολεία 3, 12 και 4 κυμάνθηκε μεταξύ -0.5 και +0.5 όπου σύμφωνα με την προσέγγιση του Fanger (1970) φανερώνουν ένα θερμικά ουδέτερο περιβάλλον. Στα σχολεία 8, 2 και 11 ο δείκτης PMV ήταν μεταξύ +0.5 και 1 υποδηλώνοντας σχετικά θερμό περιβάλλον σε αντίθεση με τα σχολεία 18 και 1 όπου ο δείκτης ήταν μεταξύ -0.5 και -1 φανερώνοντας ένα πιο δροσερό περιβάλλον.



Εικόνα 5-50: Μέσες τιμές των δεικτών PMV και PPD για το σύνολο της περιόδου δειγματοληψίας ανά σχολείο

Οι υπολογιζόμενοι δείκτες PMV και PPD από τις μετρήσεις για το σύνολο της περιόδου των μετρήσεων ανά σχολείο παρουσιάζονται επίσης σε διάγραμμα διασποράς στην Εικόνα 5-51, αριστερά. Τα σχολεία στην κατακόρυφη λίστα είναι τοποθετημένα σε σειρά όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις σε καθένα από αυτά. Επεξηγηματικά, οι μετρήσεις ξεκίνησαν στο σχολείο 14 (1η Απρίλη, 1η ημέρα δειγματοληψίας) και τελείωσαν στο σχολείο 11 (31 Μαΐου). Είναι εμφανές ότι μετακινούμενοι από την αρχή προς το τέλος των μετρήσεων οι δείκτες PMV μετακινούνται από τις αρνητικές προς τις θετικές τιμές του οριζόντιου άξονα. Επίσης, η μεγάλη πλειοψηφία των μετρήσεων βρίσκεται έξω από τις προτεινόμενες ουδέτερες τιμές άνεσης των $-0.5 < PMV < 0.5$. Το διάγραμμα στα δεξιά (Εικόνα 5-51) παρουσιάζει τις υπολογιζόμενες αντίστοιχες κατανομές των δεικτών PMV και PPD για τα 15 λεπτά της περιόδου όπου συμπληρώνονταν τα ερωτηματολόγια. Στην περίπτωση αυτή οι υπολογιζόμενοι ψήφοι ήταν λιγότερο διασκορπισμένες σε ακραίες τιμές στην κλίμακα της θερμικής αίσθησης και ήταν περισσότερο συγκεντρωμένες γύρω από το μηδέν για τα περισσότερα σχολεία. Επίσης, οι δείκτες PPD είναι μικρότεροι σε σχέση με τους

αντίστοιχους για το σύνολο της περιόδου των μετρήσεων σε κάθε σχολείο. Ωστόσο υπήρχαν περιπτώσεις στις οποίες οι δείκτες PMV ήταν εκτός των προτεινόμενων ορίων.

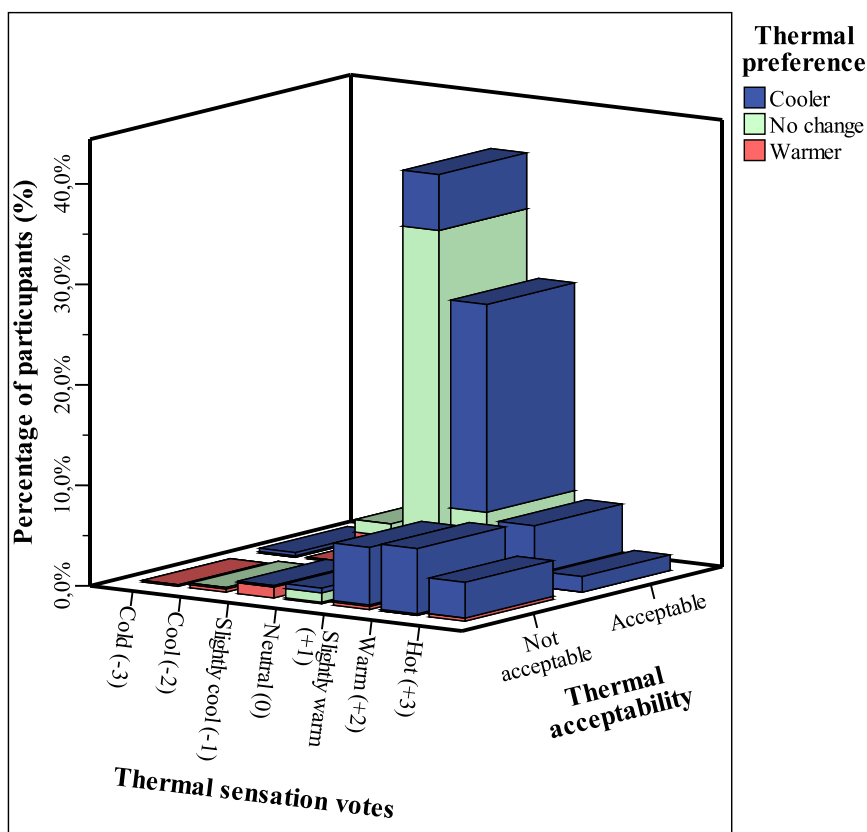


Εικόνα 5-51: Κατανομή των δεικτών PMV και PPD για το σύνολο της περιόδου δειγματοληψίας (αριστερά) και για τη διάρκεια στην οποία συμπληρώνονταν τα ερωτηματολόγια (δεξιά) σε καθένα από τα σχολεία

Απαντήσεις μαθητών για την αξιολόγηση του θερμικού περιβάλλοντος

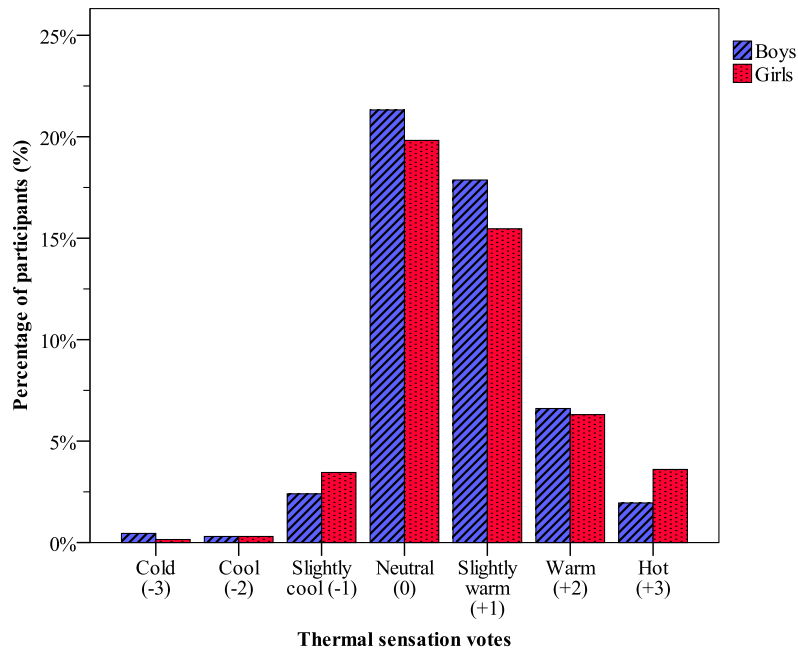
Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζονται οι απαντήσεις που συσχετίζονται με το χαρακτηρισμό της θερμικής άνεσης των μαθητών. Στην Εικόνα 5-52 παρουσιάζεται η κατανομή των ψήφων θερμικής άνεσης (TSV) στην 7-βάθμια κλίμακα θερμικής αίσθησης της ASHRAE σαν συνάρτηση των θερμικών προτιμήσεων και της θερμικής αποδοχής για το σύνολο των σχολείων και το σύνολο της περιόδου δειγματοληψίας. Περισσότερο από το 90% των ψήφων TSV βρίσκονται μεταξύ του θερμικά ουδέτερου και θερμού άξονα (δεξιά) της κλίμακας θερμικής αίσθησης από τους οποίους περίπου το 40% αισθάνονται θερμικά ουδέτεροι. Επίσης, περίπου το 80% του συνόλου των μαθητών αντιλήφθηκαν το θερμικό περιβάλλον ως αποδεκτό. Από τους μαθητές που αξιολόγησαν ως 'ουδέτερο' (neutral) το θερμικό περιβάλλον περίπου το 25% προτίμησαν πιο δροσερό περιβάλλον, 70% από αυτούς δεν προτίμησαν καμία αλλαγή στις συνθήκες και περίπου το 5% προτίμησαν πιο θερμό περιβάλλον. Από τους μαθητές που ένιωθαν ζέστη και οι ψήφοι ήταν στα δεξιά του άξονα (ψήφοι : +1, +2 και +3), η πλειοψηφία προτιμούσε πιο δροσερό περιβάλλον. Επίσης, η πλειοψηφία των μαθητών χαρακτήρισαν το θερμικό περιβάλλον ως αποδεκτό. Στο 35% των μαθητών που ψήφισαν "ελαφρά ζεστά" (slightly warm) μόνο το 5% αξιολόγησαν ως μη αποδεκτό το θερμικό περιβάλλον και προτίμησαν πιο δροσερές συνθήκες. Οι μαθητές που ψήφισαν "ζεστά" ήταν περίπου το 10% του συνόλου από τους οποίους οι μισοί πίστευαν ότι το θερμικό περιβάλλον ήταν αποδεκτό και οι άλλοι μισοί ότι είναι μη αποδεκτό. Παραδόξως, ποσοστό μικρότερο του 5% που αξιολόγησε το θερμικό περιβάλλον ως "πολύ ζεστό" (hot) θεώρησαν ότι είναι αποδεκτό ενώ 5% το βρήκαν μη αποδεκτό. Περαιτέρω επεξηγηματικά διαγράμματα της

αποτίμησης των θερμικών συνθηκών αλλά και τη συνολική αποτίμηση του εσωτερικού περιβάλλοντος ανά σχολείο από τους μαθητές παρουσιάζονται στο παράρτημα 7.2 (Εικόνα 0-8-Εικόνα 0-12, Εικόνα 0-19 και Εικόνα 0-23).



Εικόνα 5-52: Κατανομή των ψήφων θερμικής αίσθησης στην 7-βάθμια κλίμακα της ASHRAE σε σχέση με τις θερμικές προτιμήσεις και τη θερμική αποδοχή

Η θερμική αποδοχή και προτίμηση των αγοριών και κοριτσιών μελετήθηκε επίσης (Εικόνα 5-53). Οι ψήφοι των αγοριών που αξιολόγησαν το θερμικό περιβάλλον ως αποδεκτό ήταν κατά 10% μεγαλύτεροι από τις αντίστοιχες ψήφους των κοριτσιών, ωστόσο οι ψήφοι μη αποδοχής των θερμικών συνθηκών των κοριτσιών ήταν περισσότερες από τις αντίστοιχες των αγοριών. Το γεγονός αυτό φανερώνει ότι τα αγόρια επιδεικνύουν υψηλότερα ποσοστά αποδοχής του θερμικού περιβάλλοντος σε σχέση με τα κορίτσια. Επίσης, το ποσοστό των αγοριών που προτιμούν πιο δροσερό περιβάλλον ήταν περίπου κατά 5% μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των κοριτσιών.

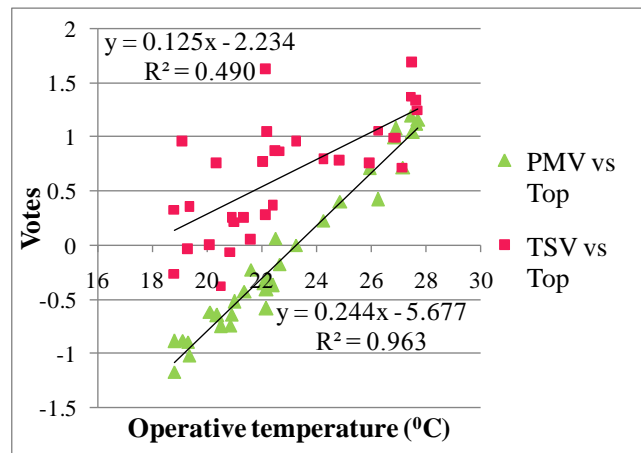


Εικόνα 5-53: Ψήφοι θερμικής αίσθησης ανά φύλλο για το σύνολο των σχολείων

Σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων και των απαντήσεων για την αξιολόγηση του θερμικού περιβάλλοντος

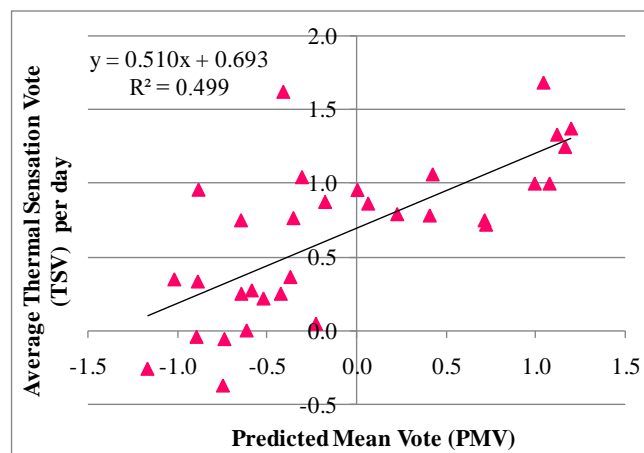
Στο κεφάλαιο αυτό συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των απαντήσεων των ερωτηματολογίων αναφορικά με τις συνθήκες θερμικού περιβάλλοντος των τάξεων. Στην Εικόνα 5-54 οι μέσες ημερήσιες τιμές των δεικτών TSV από τα ερωτηματολόγια και PMV από τις μετρήσεις παρουσιάζονται σε διάγραμμα διασποράς σε σχέση με τη λειτουργική θερμοκρασία (Operative temperature). Αξίζει να σημειωθεί ότι η λειτουργική θερμοκρασία αφορά τη μέση εικοσάλεπτη τιμή θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια όπου συμπληρώνονταν τα ερωτηματολόγια. Βρέθηκε μέτρια συσχέτιση μεταξύ των δεικτών TSV και της λειτουργικής θερμοκρασίας ($r^2=0.49$) ενώ αντίστοιχα ο δείκτης PMV συσχετίστηκε σημαντικά με τη θερμοκρασία ($r^2=0.963$). Τα ευρισκόμενα αυτά είναι σε συμφωνία με τα αντίστοιχα ευρισκόμενα των Wong and Khoo 2003, Ricciardi and Buratti 2012 και Teli et al., 2013. Η 'ουδέτερη' θερμοκρασία με βάση την παλινδρόμηση του δείκτη TSV είναι περίπου $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ενώ η αντίστοιχη θερμοκρασία με βάση τον δείκτη PMV είναι περίπου $23.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Αυτές οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες σε σχέση με τα ευρισκόμενα των Wong and Khoo 2003 and de Dear et al., 1991 καθώς οι μελέτες αυτές πραγματοποιήθηκαν σε υγρά τροπικά κλίματα. Η χαμηλότερη ουδέτερη θερμοκρασία της παρούσας μελέτης θα μπορούσε να οφείλεται στο γεγονός ότι το κλίμα της Αθήνας δεν είναι τόσο θερμό και υγρό κατά τη διάρκεια των εαρινών μηνών όσο στη Σιγκαπούρη που πραγματοποιήθηκαν οι συγκεκριμένες μελέτες. Σημειώνεται ότι, άνθρωποι που μένουν σε θερμότερα κλίματα τείνουν να προσαρμόζονται σε

υψηλότερες θερμοκρασίες και για το λόγο αυτό η ουδέτερη θερμοκρασία είναι υψηλότερη (Wong and Khoo 2003).



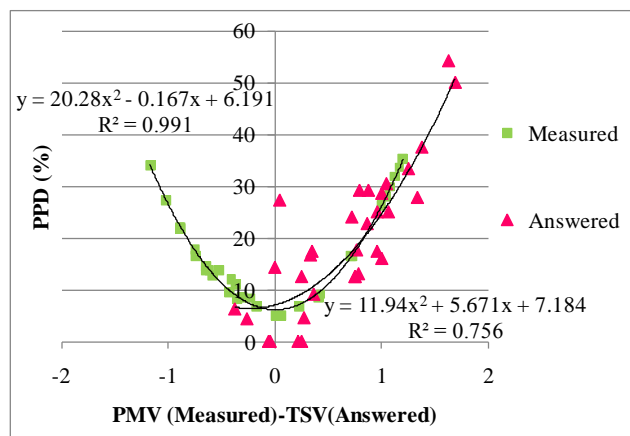
Εικόνα 5-54: Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των δεικτών PMV και TSV με τη λειτουργική θερμοκρασία

Στην Εικόνα 5-55 παρουσιάζεται σε διάγραμμα διασποράς η σχέση μεταξύ του υπολογιζόμενου δείκτη PMV από τις μετρήσεις και του δείκτη TSV που προέκυψε από τα ερωτηματολόγια. Πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε σημείο αφορά τη μέση ημερήσια τιμή των αντίστοιχων δεικτών. Μέτρια συσχέτιση παρουσιάζεται μεταξύ των δύο δεικτών κάτι το οποίο φανερώνει ότι οι μετρήσεις προσεγγίζουν κατά πολύ την πραγματική υποκειμενική αντίληψη της θερμικής άνεσης των μαθητών. Περαιτέρω συσχετίσεις μεταξύ των μετρούμενων θερμικών δεικτών και των αντίστοιχων υποκειμενικών από τις απαντήσεις των μαθητών παρουσιάζονται στον Πίνακα 0-1 του παραρτήματος.



Εικόνα 5-55: Συσχέτιση μεταξύ των δεικτών PMV (από μετρήσεις) και TSV (από απαντήσεις)

Στην Εικόνα 5-56 παρουσιάζεται η κατανομή των ημερήσιων μέσων τιμών των δεικτών PMV και TSV από τις μετρήσεις και τα ερωτηματολόγια ως προς τις αντίστοιχες τιμές PPD που υπολογίστηκαν με βάση την προσέγγιση Fanger κατά την οποία οι ψήφοι +2, +3, -2, -3 θεωρούνται ως μη αποδεκτές. Είναι φανερό ότι οι μαθητές αντιλαμβάνονται θερμότερο θερμικό περιβάλλον σε σχέση με τις προβλεπόμενες ψήφους των μετρήσεων.



Εικόνα 5-56: Κατανομή των μέσων ημερήσιων μετρούμενων τιμών του δείκτη PMV και των απαντήσεων TSV ως προς τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη PPD

Σε επόμενο στάδιο εξετάστηκε η συσχέτιση μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών θερμοκρασιών και της αντίληψης της ποιότητας του εσωτερικού αέρα από τους μαθητές. Βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ των ψήφων των μαθητών και των θερμοκρασιών για τους συντελεστές συσχέτισης Pearson και Spearman στο επίπεδο σημαντικότητας 0.05 (Πίνακας 5-13). Το γεγονός αυτό φανερώνει το ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον, τόσο οι ψήφοι εκτείνονται σε απαντήσεις αρνητικής αξιολόγησης της ποιότητας αέρα. Για το λόγο αυτό χαμηλότερες θερμοκρασίες φάνηκε να συσχετίζονται με θετική αξιολόγηση της ποιότητας αέρα από τους μαθητές.

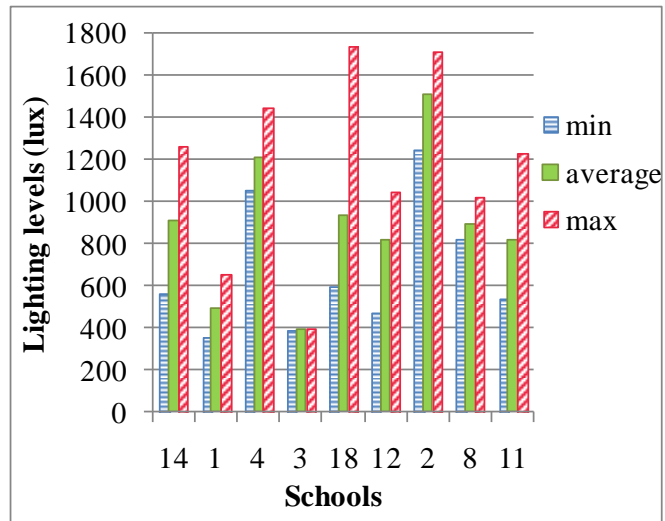
Πίνακας 5-13: Συσχετίσεις μεταξύ της αντίληψης της ποιότητας του εσωτερικού αέρα από τους μαθητές, των εσωτερικών και εξωτερικών θερμοκρασιών

	Θερμοκρασία (°C)	Ικανοποίηση με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα	Ποιότητα εσωτερικού αέρα: Ενθαρρύνει την ικανότητα των μαθητών να μελετήσουν	Αέρας: Φρέσκος-Απολυκτι-κός	Αέρας: Μυρωδιές-άοσμος
Συντελεστής συσχέτισης Pearson	Εσωτερική	0.594**	0.461**	0.512**	0.428*
	Εξωτερική	0.422*	0.334	0.409*	0.459**
Συντελεστής συσχέτισης Spearman's rho	Εσωτερική	0.542*	0.422*	0.436*	0.393*
	Εξωτερική	0.311	0.259	0.304	0.418

*. Σημαντική συσχέτιση στο επίπεδο: 0.05, **.Σημαντική συσχέτιση στο επίπεδο: 0.01

Μετρήσεις φωτισμού

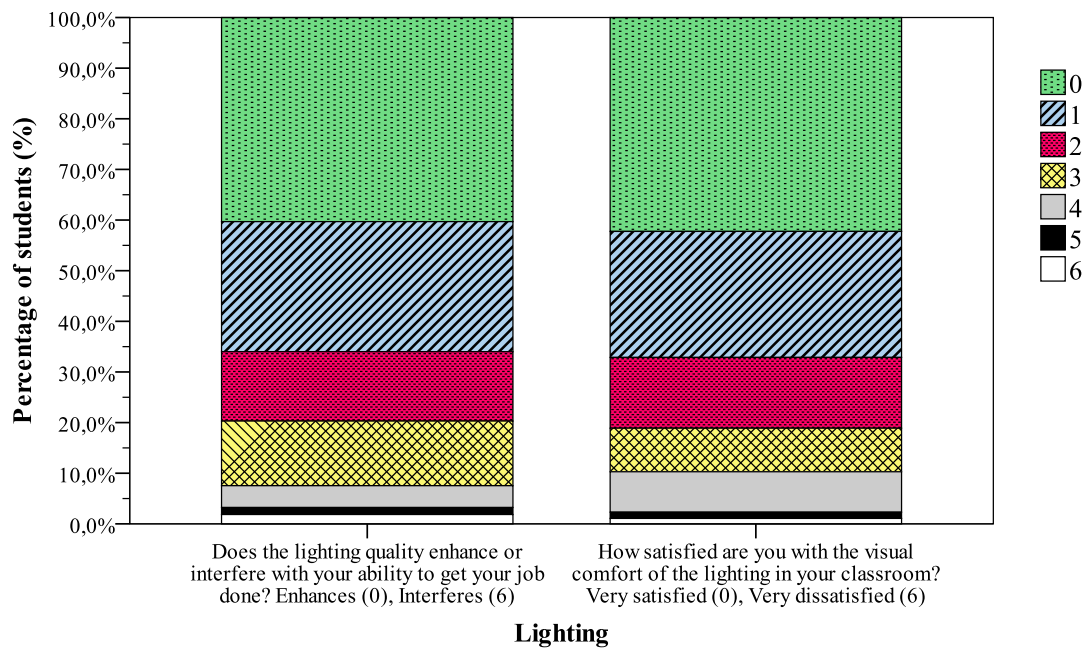
Στην Εικόνα 5-57 συνοψίζονται οι ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές των επιπέδων φωτισμού για το σύνολο της περιόδου μέτρησης ανά σχολείο. Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε μια από τις τιμές έχει προκύψει παίρνοντας τη μέση τιμή από τις μετρήσεις που έλαβαν χώρα τρεις φορές την ημέρα σε 9 διαφορετικά σημεία της τάξης (περιγράφεται αναλυτικά στη μεθοδολογία, παράγραφος 3.1, μετρητής φωτισμού). Τα σχολεία 3 και 1 (Μέσες τιμές: 398 & 493 lux αντίστοιχα) είχαν τα χαμηλότερα επίπεδα φωτισμού σε σχέση με τα υπόλοιπα σχολεία στα οποία τα επίπεδα φωτισμού επεκτάθηκαν έως τα 1400 lux. Τα σχολεία 4 και 2 φάνηκε να έχουν μεγαλύτερες μέσες τιμές φωτισμού φτάνοντας έως τα 1,214 και 1,509 lux αντίστοιχα. Οι μέσες τιμές των επιπέδων φωτισμού για τα υπόλοιπα σχολεία ήταν περίπου 800 lux. Λαμβάνοντας υπόψη το πρότυπο φωτισμού Building Bulletin 90 όπου για χώρους διδασκαλίας ο φωτισμός θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 300 και 500 lux, είναι φανερό ότι σε πολλές από τις περιπτώσεις οι τάξεις φωτίζονταν υπερβολικά. Τα αυξημένα επίπεδα φωτισμού θα μπορούσαν να αποδοθούν στο γεγονός ότι σε πολλές από τις περιπτώσεις παρόλο που τα επίπεδα φυσικού φωτισμού ήταν ικανοποιητικά, τα φώτα ήταν επίσης σε λειτουργία.



Εικόνα 5-57: Επίπεδα φωτισμού στα 9 σχολεία

Απαντήσεις μαθητών για την αξιολόγηση του φωτισμού των τάξεων

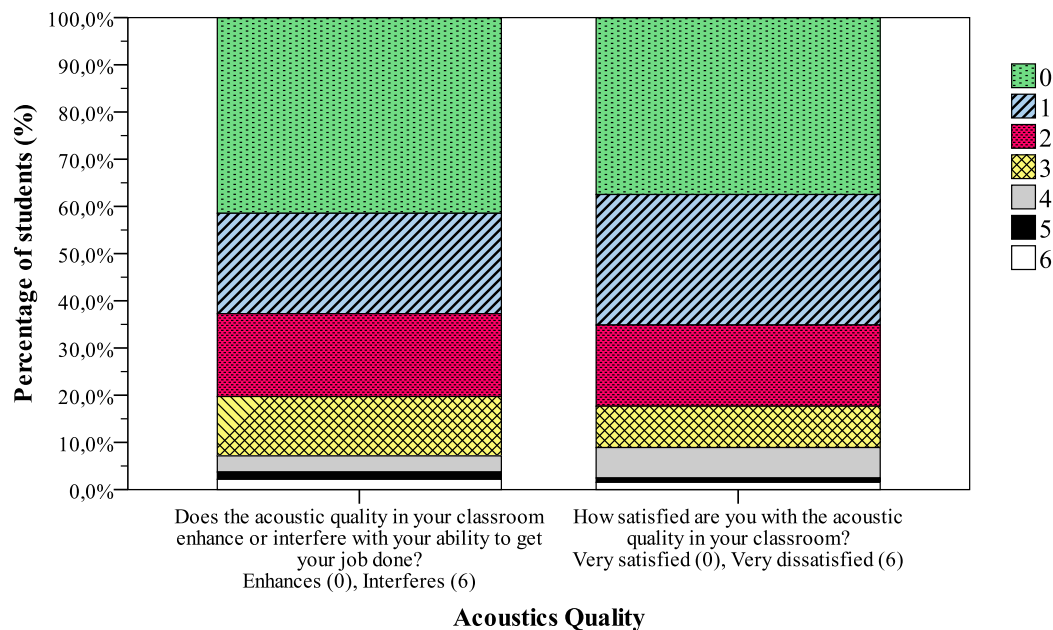
Όπως προαναφέρθηκε στη μεθοδολογία (παράγραφος 4.2), δύο από τις ερωτήσεις του ερωτηματολογίου αξιολόγησης, αναφέρονταν στο φωτισμό. Η κατανομή των ψήφων των απαντήσεων για το σύνολο των σχολείων και το σύνολο της περιόδου των μετρήσεων και για τις δύο ερωτήσεις είναι παρόμοια (Εικόνα 5-58, αναλυτικά οι ψήφοι ανά σχολείο παρουσιάζονται στην Εικόνα 0-21 του παραρτήματος). Περίπου το 40% των απαντήσεων του συνόλου των μαθητών πίστευαν ότι ο φωτισμός τους βοηθά να μελετήσουν και επίσης το 40% των μαθητών ήταν πλήρως ικανοποιημένοι με την οπτική άνεση των τάξεών τους (ψηφίζοντας 0). Επίσης περίπου 40% των απαντήσεων και για τα δύο ερωτήματα βρισκόταν μεταξύ 1 και 2. Ποσοστό μικρότερο του 10% των μαθητών ψήφισαν 4, 5 και 6. Συνοψίζοντας, το σύνολο των μαθητών αξιολόγησαν θετικά το φωτισμό των τάξεών τους καθώς το 80% των ψήφων ήταν μεταξύ 0 και 2 φανερόνοντας ικανοποίηση με το περιβάλλον φωτισμού και επίσης το ότι πίστευαν ότι η ποιότητα φωτισμού ενθαρρύνει την ικανότητά τους να συγκεντρωθούν.



Εικόνα 5-58: Κατανομή των ψήφων για την αξιολόγηση του φωτισμού των τάξεων

Απαντήσεις μαθητών για την αξιολόγηση της ακουστικής των τάξεων

Στην Εικόνα 5-59 συνοψίζονται οι κατανομές των απαντήσεων του συνόλου των μαθητών σε όλα τα σχολεία αναφορικά με την αξιολόγηση της ακουστικής των τάξεων (στην Εικόνα 0-22 του παραρτήματος φαίνονται οι ψήφοι ανά σχολείο). Περίπου το 40% των μαθητών πίστευαν ότι η ακουστική των τάξεών τους ενθάρρυνε την ικανότητά τους να μελετήσουν ψηφίζοντας 1 στην 7-βάθμια κλίμακα ενώ ποσοστό 40% ψήφισε 2 και 3. Στο σύνολό τους οι ψήφοι των 4, 5 και 6 συγκέντρωσαν περίπου το 5% των ψήφων κάτι το οποίο σημαίνει ότι η πλειοψηφία των μαθητών πιστεύει ότι η ακουστική των τάξεών τους βοηθά την απόδοσή τους. Η κατανομή των ψήφων που απαντούν στην ερώτηση σε σχέση με την ικανοποίηση των μαθητών με την ακουστική είναι πανομοιότυπη με τις απαντήσεις της ερώτησης για το φωτισμό που περιγράφηκαν παραπάνω. Περίπου το 80% των μαθητών ψήφισαν από 0 έως 2 υποδηλώνοντας ικανοποίηση με την ακουστική της τάξης τους.

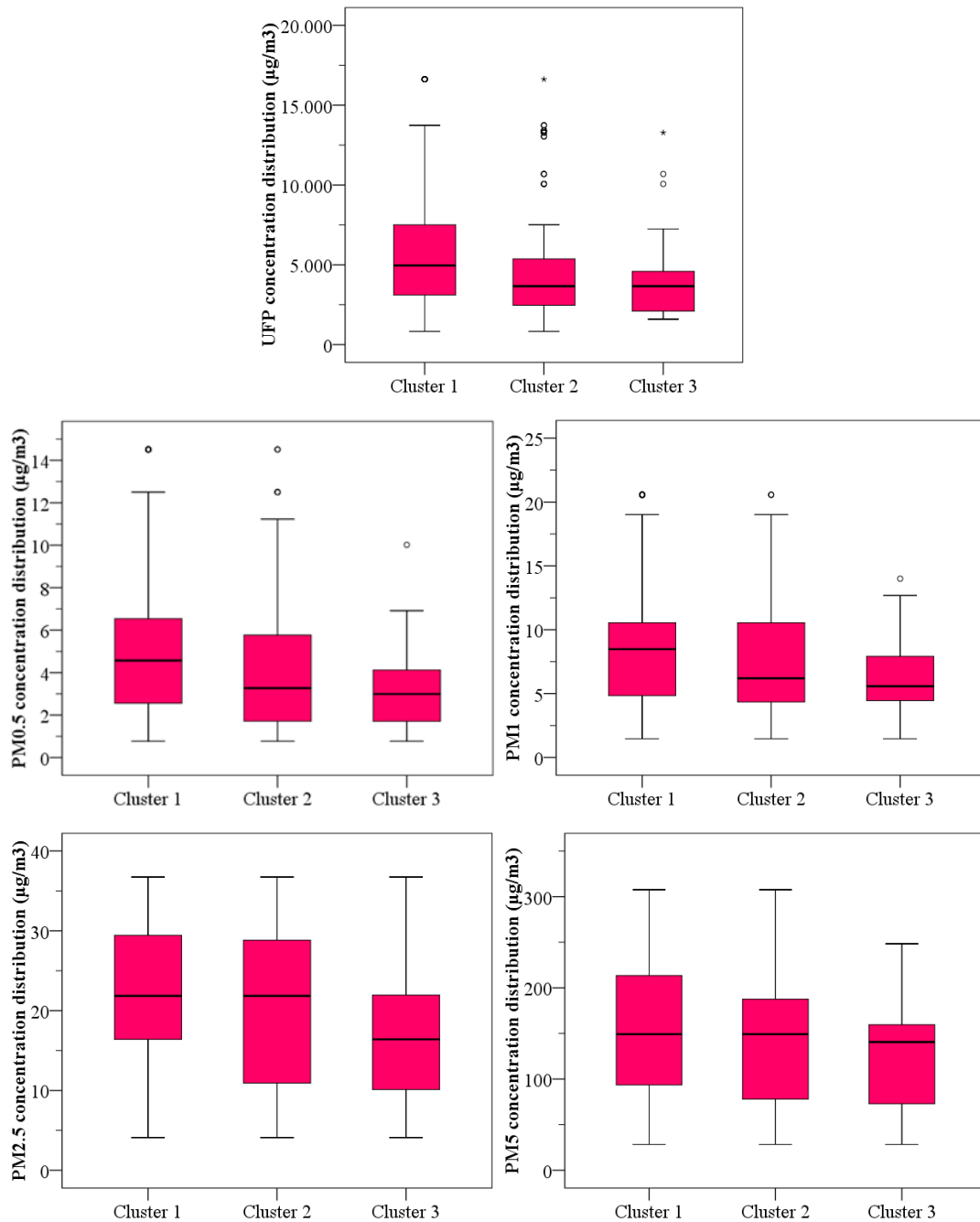


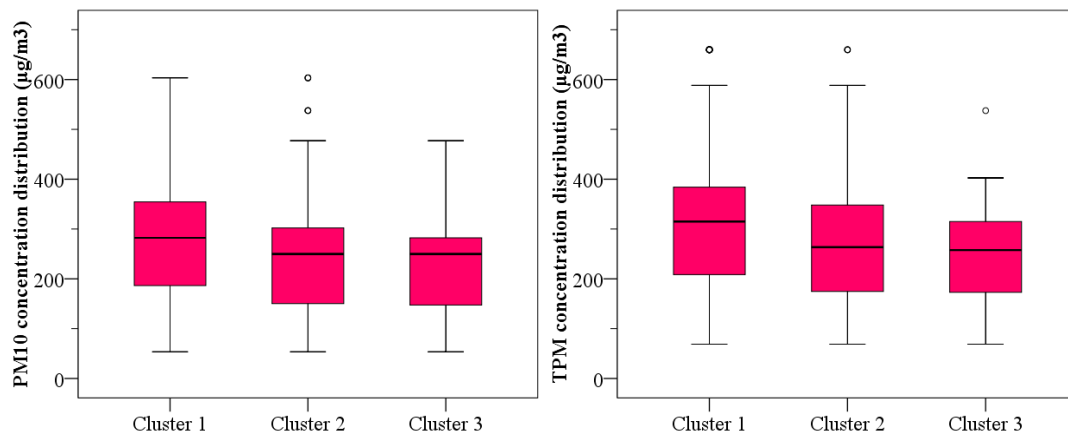
Εικόνα 5-59 : Κατανομή των ψήφων για την αξιολόγηση της ακουστικής των τάξεων

5.3.2.1 Ανάλυση σε συστάδες (Cluster Analysis)

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιήθηκε ανάλυση σε συστάδες (cluster analysis) μεταξύ των εσωτερικών επιπέδων διάφορων περιβαλλοντικών παραμέτρων και των απαντήσεων των μαθητών. Τα ευρισκόμενα αφορούν το σύνολο των μαθητών όλων των σχολείων, αλλά και οι κατανομές των συγκεντρώσεων των αέριων ρύπων, της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και του αερισμού αφορούν το σύνολο των δεδομένων της πειραματικής διαδικασίας σε όλα τα σχολεία. Σε πρώτη φάση μελετήθηκαν οι απαντήσεις στην ερώτηση "Είσαι ικανοποιημένος με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα της τάξης σου αυτή τη στιγμή;" όπου και ομαδοποιήθηκαν. Όπως προαναφέρθηκε, η παρεχόμενη κλίμακα απαντήσεων ήταν από το 0 έως το 6, όπου το 0 αντιστοιχούσε σε πλήρως ικανοποιημένους ενώ το 6 σε πλήρως δυσαρεστημένους με την ποιότητα του αέρα των τάξεών τους. Τρεις συστάδες-ομάδες επιλέχθηκαν με αρχικά κέντρα βάρη των ομάδων τα εξής: 1, 3 και 5 που αντιστοιχούσαν στις ομάδες 1, 2 και 3 αντίστοιχα. Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζονται σε θηκογράμματα η κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων διάφορων μεγεθών (από τα υπομετρικά, UFP, PM_{0.5}, PM₁, PM_{2.5}, PM₅, PM₁₀ έως τα TPM) στις τρεις συστάδες (Εικόνα 5-60). Είναι φανερό ότι για όλες τις τάξεις μεγέθους σωματιδίων η διάμεση τιμή φαίνεται να μειώνεται από την πρώτη στην τρίτη συστάδα. Όπως προαναφέρθηκε, η πρώτη συστάδα αντιστοιχεί σε θετική αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα ενώ η τρίτη συστάδα αντιστοιχεί σε αρνητική αξιολόγηση. Για την περίπτωση των αιωρούμενων σωματιδίων κάποιος θα περίμενε αυξητική τάση στη διάμεση τιμή των κατανομών από την πρώτη στην τρίτη συστάδα γεγονός το οποίο σημαίνει ότι για υψηλότερες τιμές αιωρούμενων σωματιδίων θα ήταν αναμενόμενο οι

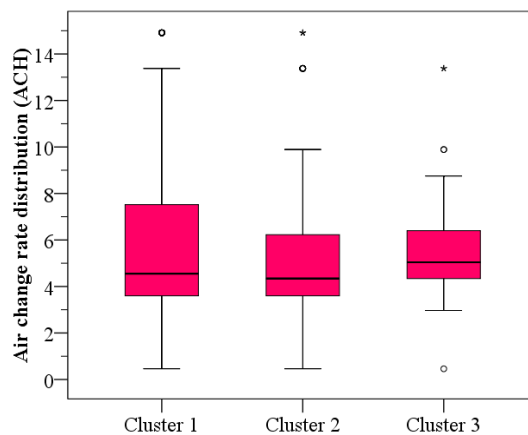
μαθητές να ήταν λιγότερο ικανοποιημένοι με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα. Ωστόσο φαίνεται να συμβαίνει το αντίθετο κάτι το οποίο φανερώνει ότι οι μαθητές δεν αντιλαμβάνονται την αύξηση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων και επίσης ότι η αύξηση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων δεν επιδρά αρνητικά στις απαντήσεις των μαθητών σχετικά με την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα.





Εικόνα 5-60: Κατανομή των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στις τρεις συστάδες

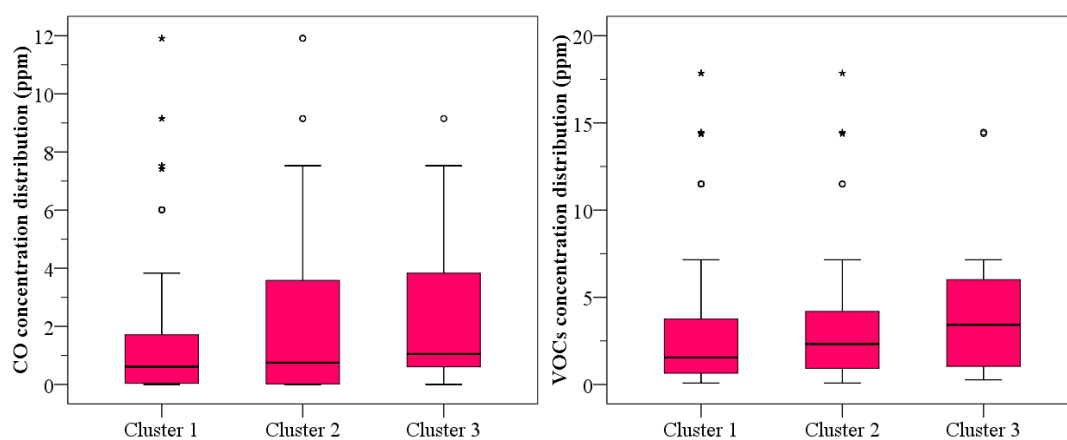
Η έκταση των τιμών του αερισμού φαίνεται να μειώνεται από την πρώτη στην τρίτη συστάδα ωστόσο η διάμεση τιμή είναι σχεδόν σταθερή για τις τρεις συστάδες (Εικόνα 5-61).



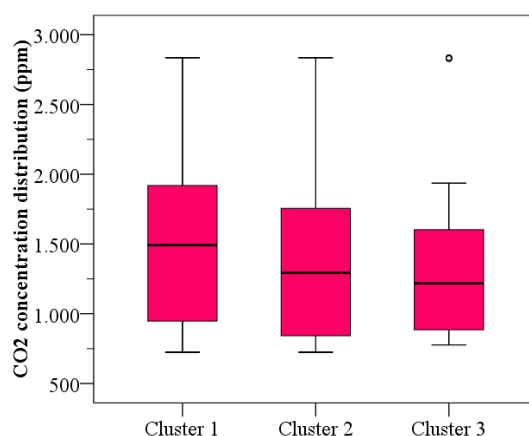
Εικόνα 5-61: Κατανομή των συγκεντρώσεων του αερισμού στις τρεις συστάδες

Οι διάμεσοι των συγκεντρώσεων των CO και VOCs σημειώνουν ελαφρά αύξηση από την πρώτη στην τρίτη συστάδα φανερώνοντας ότι η ενδεχόμενη αύξηση των δύο αυτών ρύπων θα μπορούσε να οδηγήσει σε αυξημένο ποσοστό δυσαρεστημένων μαθητών με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα παρότι το CO είναι άχρωμο, άοσμο και άγευστο (Εικόνα 5-62). Συγκεκριμένα, τα 25^ο και 75^ο εκατοστημόρια κυμάνθηκαν από 0.04 έως 1.71, από 0.02 έως 3.58 και από 0.56 έως 4.92 στις συστάδες 1, 2 και 3 αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες διάμεσες τιμές των συστάδων 1, 2 και 3 ήταν ίσες με 0.61, 0.75 και 1.05 ppm αντίστοιχα. Όσο για τις συγκεντρώσεις VOCs τα 25^ο και 75^ο εκατοστημόρια κυμάνθηκαν από 0.65 έως 3.75 στην πρώτη συστάδα, από 0.93 έως 4.19 στη δεύτερη συστάδα και από 1.01 έως 6.01 στην τρίτη συστάδα. Οι διάμεσες τιμές ήταν 1.55, 2.32 και 4.42 στις συστάδες 1, 2 και 3 αντίστοιχα.

Τέλος σημειώνεται ότι οι διάμεσες τιμές CO₂ μειώνονταν από την πρώτη στην τρίτη συστάδα (Εικόνα 5-63).

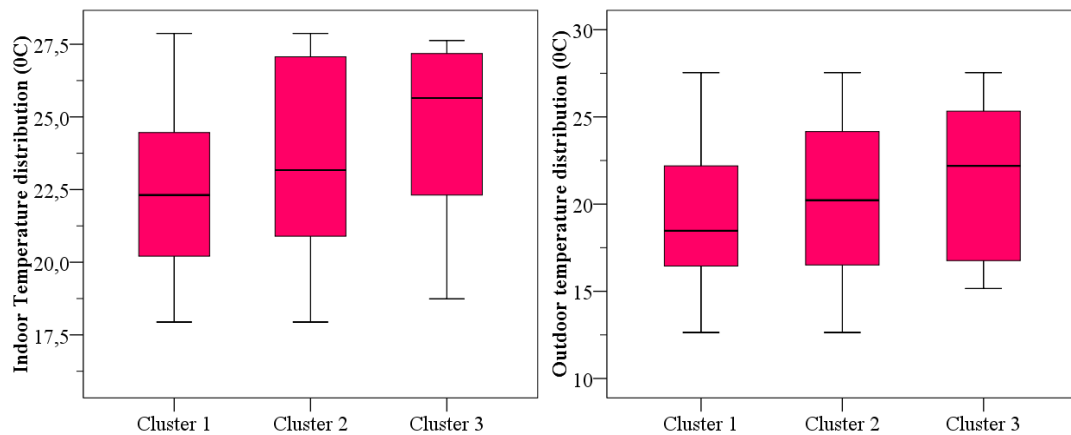


Εικόνα 5-62: Κατανομή των συγκεντρώσεων CO και VOCs στις τρεις συστάδες



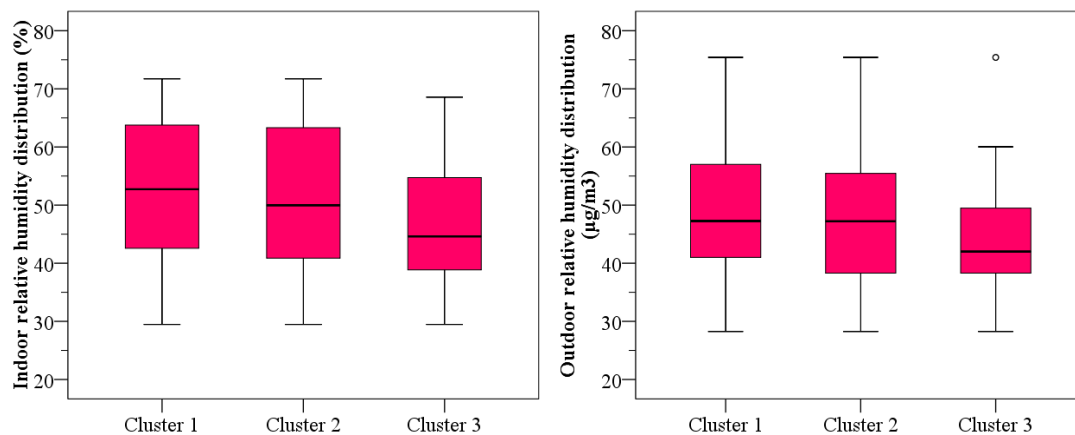
Εικόνα 5-63: Κατανομή των συγκεντρώσεων του CO₂ στις τρεις συστάδες

Τόσο η εσωτερική όσο και η εξωτερική θερμοκρασία έδειξε να επηρεάζουν σημαντικά τις απαντήσεις των μαθητών (Εικόνα 5-64). Τα 25^ο και 75^ο εκατοστημόρια των εσωτερικών θερμοκρασιών κυμάνθηκαν από 20.21 έως 24.46 °C στην πρώτη συστάδα, από 20.85 έως 27.07 °C στη δεύτερη και από 22.18 έως 27.18 °C στην τρίτη. Η διάμεσες τιμές των εσωτερικών θερμοκρασιών στις τρεις συστάδες ήταν ίσες με 22.31, 23.55 και 25.65 °C αντίστοιχα. Όσο για τις εξωτερικές θερμοκρασίες οι διάμεσοι για τις συστάδες 1, 2 και 3 ήταν 19.21, 20.21 και 22.19 °C αντίστοιχα. Με άλλα λόγια προκύπτει ότι για μεγαλύτερες θερμοκρασίες οι μαθητές είναι περισσότερο δυσαρεστημένοι με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα.



Εικόνα 5-64: Κατανομή των εσωτερικών (αριστερά) και εξωτερικών (δεξιά) θερμοκρασιών στις τρεις συστάδες

Σε αντίθεση με τα ευρισκόμενα για τις εσωτερικές και εξωτερικές θερμοκρασίες, η εσωτερική και εξωτερική σχετική υγρασία φάνηκε να μειώνεται από την πρώτη στην τρίτη συστάδα όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-65. Συγκεκριμένα η διάμεση τιμή της σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό περιβάλλον ήταν 52.73, 49.96 και 44.6% στις συστάδες 1, 2 και 3 αντίστοιχα ενώ στο εξωτερικό ήταν 47.26, 49.96 και 44.6%.

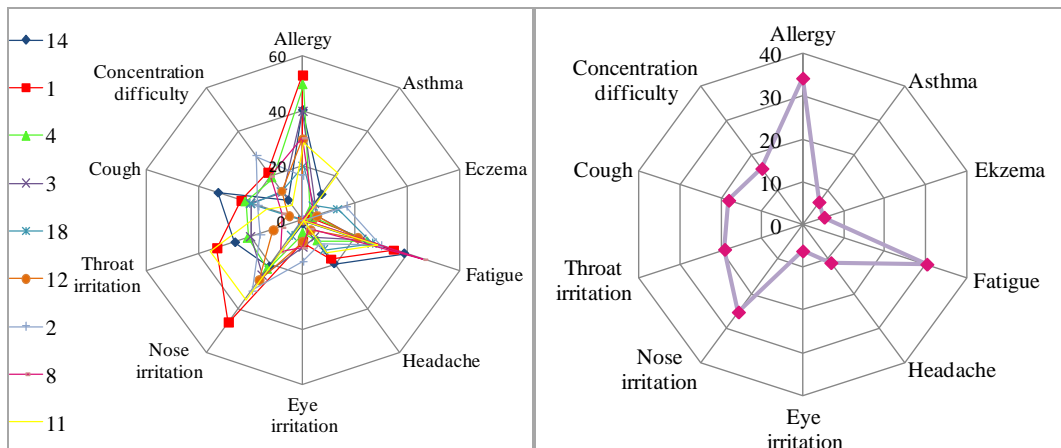


Εικόνα 5-65: Κατανομή των εσωτερικών (αριστερά) και εξωτερικών (δεξιά) τιμών σχετική υγρασίας στις τρεις συστάδες

Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τις απαντήσεις στην ερώτηση : "Πιστεύεις ότι η συνολική ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος ενθαρρύνει η όχι την ικανότητά σου να μελετήσεις στην τάξη;". Ωστόσο δεν παρατηρήθηκε ιδιαίτερη μεταβλητότητα από συστάδα σε συστάδα.

Συμπτώματα άρρωστου κτιρίου (SBS symptoms)

Στην ακόλουθη παράγραφο μελετώνται τα συμπτώματα άρρωστου κτιρίου των μαθητών. Τα συμπτώματα αυτά ήταν τα εξής: Αλλεργία, Άσθμα, Έκζεμα, Υπνηλία/κούραση, Πονοκέφαλος, Ερεθισμός/ξηρασία/καταρροή στα μάτια, Ερεθισμός/μπούκωμα/καταρροή στη μύτη, Ερεθισμός/ξηρασία/βραχνάδα στο λαιμό, Βήχας και Δυσκολία συγκέντρωσης. Στην Εικόνα 5-66 (αριστερά) παρουσιάζονται οι κατανομές των συμπτωμάτων άρρωστου κτιρίου (SBS) ανά σχολείο σε ροδόγραμμα (στην Εικόνα 0-24 του παραρτήματος παρουσιάζονται και σε ραβδόγραμμα τα συμπτώματα ανά σχολείο ενώ στην Εικόνα 0-25 και Εικόνα 0-26 διαχωρίζονται τα συμπτώματα ανάλογα με το ποσοστό εμφάνισής τους ανά σχολείο). Τα περισσότερα συμπτώματα εμφανίζονται στο σχολείο 1. Συγκεκριμένα στο σχολείο 1 εμφανίστηκαν τα υψηλότερα ποσοστά αλλεργιών (53.03%), ερεθισμοί της μύτης και του λαιμού (46.09 και 33.04 αντίστοιχα). Τα υψηλότερα ποσοστά άσθματος εμφανίστηκαν στο σχολείο 11 ενώ για το έκζεμα ήταν στα σχολεία 2 και 18 (16.53 και 13.33%). Αυξημένα ποσοστά κόπωσης (fatigue) και πονοκεφάλων παρουσιάστηκαν στα σχολεία 14 και 1 (38.96 & 34.78% και 19.48 & 17.39% αντίστοιχα). Τα υψηλότερα ποσοστά ερεθισμού των ματιών παρουσιάστηκαν στο σχολείο 2 (14.88%) ενώ εντονότερος ήταν ο ερεθισμός στη μύτη και το λαιμό για το σχολείο 11 (35.71 και 35.71%). Οι μαθητές των σχολείων 13 και 1 παρουσίασαν υψηλότερα ποσοστά βήχα συγκριτικά με τα υπόλοιπα σχολεία (32.47 & 23.48%), ενώ τα υψηλότερα ποσοστά δυσκολίας συγκέντρωσης εμφανίστηκαν στους μαθητές των σχολείων 1 και 3 (21.74 & 28.93%). Με σκοπό να δημιουργηθεί μια πιο ξεκάθαρη αναπαράσταση των επικρατέστερων συμπτωμάτων του συνόλου των σχολείων υπολογίστηκε το μέσο ποσοστό ανά σύμπτωμα και παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-66 (δεξιά). Είναι φανερό ότι τα επικρατέστερα συμπτώματα που εμφανίζονται στα περισσότερα σχολεία επιδρώντας σε περισσότερους από το 20% του συνόλου των μαθητών, είναι αλλεργίες, κόπωση και ερεθισμός της μύτης.



Εικόνα 5-66: Συμπτώματα άρρωστου κτιρίου ανά σχολείο (αριστερά) και μέση τιμή του συνόλου των σχολείων ανά σύμπτωμα (δεξιά)

Σε επόμενο έλεγχο, εξετάστηκαν τα συμπτώματα σαν συνάρτηση του φύλλου των μαθητών. Βρέθηκε ότι για το σύνολο των συμπτωμάτων τα ποσοστά των κοριτσιών που επηρεάστηκαν από τα συμπτώματα ήταν υψηλότερο από το αντίστοιχο των αγοριών.

Συμπτώματα σε σχέση με τα επίπεδα των αέριων ρύπων

Τα συμπτώματα άρρωστου κτιρίου μελετήθηκαν σε σχέση με τα επίπεδα των ρύπων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων αναφέρονται στα αποτελέσματα από τους αυτόματους μετρητές και όχι από τις βαρυμετρικές μετρήσεις. Οι Συντελεστές συσχέτισης Spearman's μεταξύ των συμπτωμάτων SBS και των αέριων ρύπων συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 5-14). Όπως είναι φανερό σημαντικές θετικές συσχετίσεις βρέθηκαν μεταξύ των αιωρούμενων σωματιδίων διαφόρων μεγεθών και των λόγων εσωτερικού προς το εξωτερικό περιβάλλον σε σχέση με συμπτώματα όπως αλλεργίες, πονοκεφάλους, ερεθισμό του λαιμού αλλά και βήχας. Επίσης οι συγκεντρώσεις CO₂ συσχετίστηκαν σημαντικά με τις αλλεργίες. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι εξετάστηκαν και οι συσχετίσεις μεταξύ των συμπτωμάτων και των CO και VOCs ωστόσο οι συντελεστές συσχέτισης που προέκυψαν δεν ήταν σημαντικές και για το λόγο αυτό δεν συμπεριλήφθησαν στον πίνακα.

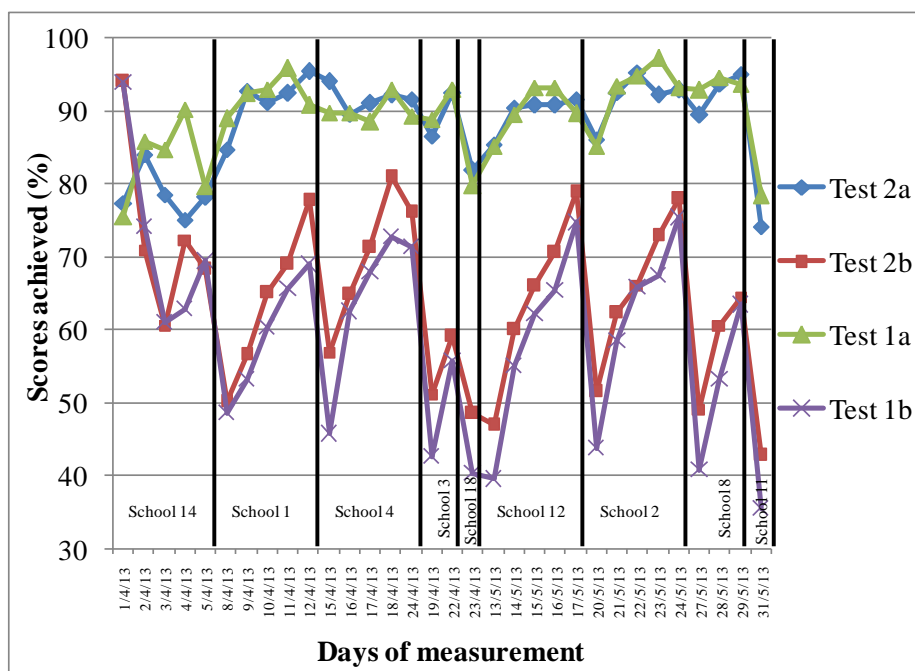
Πίνακας 5-14: Συντελεστές συσχέτισης Spearman's μεταξύ των συμπτωμάτων SBS και των αέριων ρύπων

	Συμπτώματα SBS	PM _{2.5}	PM ₅	PM ₁₀	TPM	I/O PM _{2.5}	I/O PM ₁₀	CO ₂
Συντελεστές συσχέτισης Spearman's rho	Αλλεργίες	0.144	0.354*	0.498**	0.518**	0.616**	0.660**	0.587**
	Πονοκέφαλος	0.475**	0.622**	0.624**	0.607**	0.180	0.168	0.169
	Ερεθισμός λαιμού	0.255	0.398*	0.445*	0.446*	0.355*	0.457**	0.313
	Βήχας	0.236	0.539**	0.625**	0.632**	0.368*	0.556**	0.335
Συντελεστές συσχέτισης Pearson's correlation coefficients	Αλλεργίες	0.171	0.391*	0.553**	0.568**	0.618**	0.519**	0.603**
	Πονοκέφαλος	0.396*	0.501**	0.477**	0.469**	0.362*	0.469**	0.219
	Ερεθισμός λαιμού	0.292	0.467**	0.499**	0.502**	0.354*	0.368*	0.417*
	Βήχας	0.215	0.484**	0.522**	0.520**	0.362*	0.435*	0.177

*. Σημαντική συσχέτιση στο επίπεδο: 0.05, **. Σημαντική συσχέτιση στο επίπεδο: 0.01

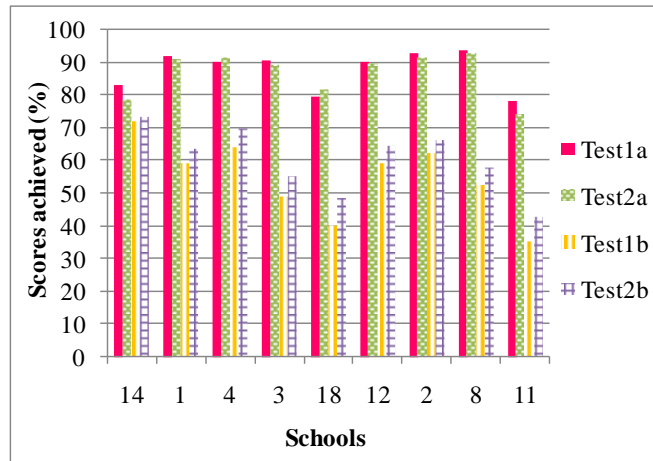
5.3.2.2 Παραγωγικότητα μαθητών

Η παραγωγικότητα των μαθητών αποτελεί αντικείμενο μελέτης της παραγράφου που ακολουθεί. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις των μέσων επιτευχθέντων βαθμολογιών των μαθητών σε όλα τα σχολεία (Εικόνα 5-67) (Dorizas et al., 2015a). Οι μαύρες κάθετες γραμμές διαχωρίζουν τις διακυμάνσεις σε καθένα από τα σχολεία. Τα τεστ 1a και 1b αναφέρονται στο τεστ μαθηματικών ενώ τα τεστ 2a και 2b αναφέρονται στο τεστ κωδικού. Όπου τα a και b αναφέρονται στα τεστ που διανεμήθηκαν την πρώτη και την τελευταία ώρα των μαθημάτων αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι οι διακυμάνσεις των τεστ μαθηματικών 1a και 2a είναι σχετικά σταθερές από μέρα σε μέρα και από σχολείο σε σχολείο. Ωστόσο, στο τεστ κωδικού 1b και 2b σε καθένα από τα σχολεία, οι βαθμολογίες που επιτεύχθηκαν σημείωσαν αύξηση από ημέρα σε ημέρα, πιθανών εξ' αιτίας της επαναληψιμότητας του ίδιου τεστ και άρα της εκμάθησής του (learning effect) (πχ στο σχολείο 1: 8/4/13 έως 12/4/13). Το προφίλ των βαθμολογιών είναι λίγο διαφορετικό για την πρώτη μέρα μετρήσεων (1/4/13) στο σχολείο 14 σε σχέση με τα υπόλοιπα σχολεία όπου οι βαθμολογίες της πρώτης ημέρας ήταν μεγαλύτερες σε σχέση με τις υπόλοιπες μέρες στο σχολείο αυτό, κάτι το οποίο θα μπορούσε να αποδοθεί στο γεγονός ότι εξ' αιτίας του ότι ήταν η πρώτη ημέρα δειγματοληψίας, δόθηκε λίγο περισσότερος χρόνος στους μαθητές για τη συμπλήρωση του τεστ. Σε όλες τις ημέρες οι βαθμολογίες στο τεστ 2b ήταν υψηλότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες του τεστ 1b (Sifnaios et al., 2014).



Εικόνα 5-67: Κατανομή των επιτευχθέντων βαθμολογιών ανά ημέρα

Οι μέσες τιμές των βαθμολογιών ανά σχολείο για καθένα από τα τεστ παρουσιάζονται στην Εικόνα 5-68. Είναι φανερό ότι οι μαθητές κατόρθωσαν υψηλότερες βαθμολογίες στα τεστ μαθηματικών σε σχέση με τα τεστ κωδικών. Επιπλέον, δεν σημειώθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των τεστ μαθηματικών της πρώτης και της τελευταίας ώρας (1a και 2a) κάτι το οποίο φαίνεται και από την Εικόνα 5-67. Ωστόσο για την περίπτωση των τεστ κωδικού (2a & 2b) για όλα τα σχολεία, οι βαθμοί στο τεστ της τελευταίας ώρας ήταν σχετικά υψηλότεροι σε σχέση με τους αντίστοιχους της πρώτης ώρας. Για την πλειοψηφία των σχολείων οι μαθητές συγκέντρωσαν στο τεστ μαθηματικών βαθμολογίες μεγαλύτερες ή ίσες του 90%. Εξαιρέση σε αυτό αποτελούν τα σχολεία 14, 18 και 11 όπου οι βαθμολογίες στο αντίστοιχο τεστ ήταν περίπου στο 80%. Όσον αφορά τα τεστ κωδικού, στα σχολεία 3, 18 και 11 οι μαθητές είχαν βαθμούς μικρότερους των 50% ενώ τα υπόλοιπα σχολεία κατόρθωσαν βαθμολογίες μεγαλύτερες των 60%.

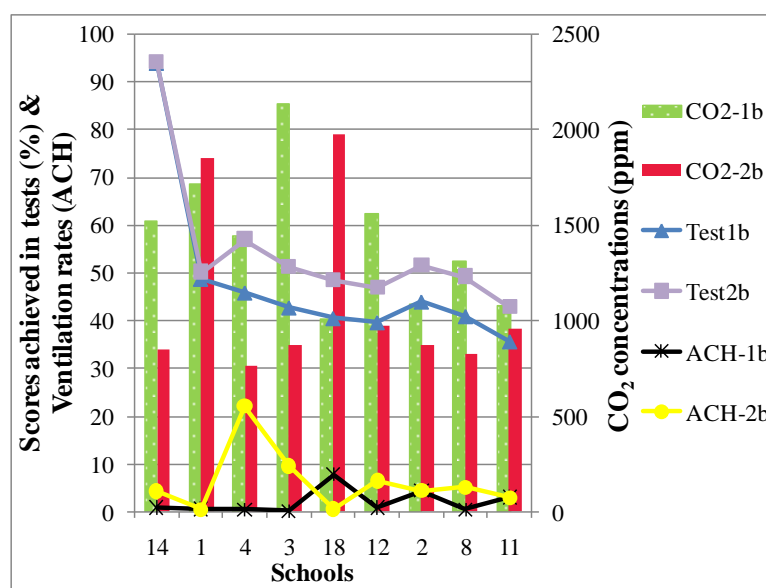


Εικόνα 5-68: Κατανομή των βαθμολογιών ανά σχολείο

Παραγωγικότητα σε σχέση με τα επίπεδα ρύπων και του βαθμού αερισμού

Η παραγωγικότητα μέσω των επιτευχθέντων βαθμολογιών στα τεστ εξετάστηκε περαιτέρω σε σχέση με τα επίπεδα των εσωτερικών αέριων ρύπων αλλά και με τα επίπεδα του αερισμού. Κατόπιν μελέτης του διαγράμματος 4-68, κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθούν μόνο οι βαθμολογίες της πρώτης ημέρας σε κάθε σχολείο ώστε να αποφευχθούν οι ενδεχόμενες υψηλότερες βαθμολογίες των υπόλοιπων ημερών εξ' αιτίας της εκμάθησης του τεστ λόγω επαναληψιμότητας. Στην Εικόνα 5-69 παρουσιάζονται οι βαθμοί των επιδόσεων των μαθητών στα τεστ κωδικού της πρώτης και της τελευταίας ώρας (τεστ 1b-μπλε και τεστ 2b-μοβ) για την πρώτη ημέρας μέτρησης σε κάθε σχολείο. Οι ράβδοι αντιστοιχούν στις μέσες συγκεντρώσεις CO₂ (CO₂-πράσινη: αντιστοιχεί στο τεστ 1b & ροζ: αντιστοιχεί στο τεστ 2b) για την περίοδο που συμπληρώθηκαν τα τεστ παραγωγικότητας. Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζονται επίσης ο ρυθμός αερισμού σε μονάδες ACH σε γραμμές (ACH-1b: Μαύρη γραμμή, για τη διάρκεια του τεστ 1b, ACH-2b: Κίτρινη γραμμή, για τη διάρκεια του τεστ 2b). Είναι φανερό ότι στη διάρκεια του τεστ 1b οι συγκεντρώσεις CO₂ είναι αρκετά υψηλότερες για την πλειοψηφία των σχολείων. Οι αντίστοιχες βαθμολογίες είναι χαμηλότερες αλλά και ο αερισμός είναι χαμηλότερος. Συνολικά βρέθηκε ότι μείωση στις εσωτερικές συγκεντρώσεις CO₂ κατά 17.01% είναι δυνατόν να οδηγήσει σε αύξηση της παραγωγικότητας κατά 16.13%. Συνοψίζοντας, υπάρχει μια ξεκάθαρη αρνητική τάση συσχέτισης μεταξύ των επιτευχθέντων βαθμολογιών και των συγκεντρώσεων CO₂ και θετική συσχέτιση μεταξύ των βαθμολογιών και του ρυθμού αερισμού (Dorizas et al., 2013d). Συγκεκριμένα ο συντελεστής συσχέτισης Spearman μεταξύ CO₂ και της παραγωγικότητας βρέθηκε ίσος με -0.305. Στην περίπτωση δε που ληφθούν υπόψη τα δεδομένα της πρώτης ημέρας δειγματοληψίας στο σχολείο 14 (Εικόνα 5-67) τα οποία πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της πρώτης ημέρας πιλοτικής

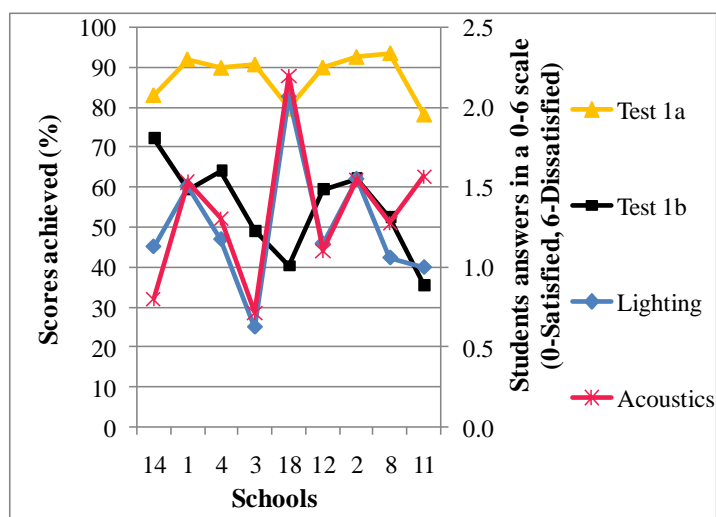
δειγματοληψίας, ο προκύπτων συντελεστής συσχέτισης Spearman είναι ίσος με -0.5 ο οποίος είναι στατιστικά σημαντικός στο επίπεδο σημαντικότητας 0.05 (Dorizas et al., 2015b).



Εικόνα 5-69: Συσχετίσεις μεταξύ των τάσεων των επιδόσεων των μαθητών στα τεστ και των συγκεντρώσεων CO₂ αλλά και του ρυθμού αερισμού σε κάθε σχολείο

Παραγωγικότητα σε σχέση με την αποδοχή της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος

Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο (4.2) της περιγραφής της έρευνας ερωτηματολογίου, όσο πλησιέστερα στο μηδέν είναι οι απαντήσεις των μαθητών της υποκειμενικής αξιολόγησης της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος, τόσο θετικότερη είναι η αξιολόγησή τους. Στην Εικόνα 5-70 παρουσιάζονται οι βαθμολογίες των μαθητών στο τεστ μαθηματικών και το τεστ κωδικού της πρώτης ώρας και οι αντίστοιχες μέσες τιμές των απαντήσεων που συσχετίζονται με την αξιολόγηση των επιπέδων φωτισμού και ακουστικής. Ο λόγος που επιλέχθηκε για να μελετηθεί το τεστ της πρώτης ώρας ήταν καθώς το αντίστοιχο ερωτηματολόγιο αξιολόγησης της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος διανεμήθηκε στους μαθητές σε ώρα πλησιέστερη με αυτή του πρώτου τεστ σε σχέση με το δεύτερο τεστ. Στην Εικόνα 5-70 φαίνεται ότι για χαμηλότερες βαθμολογίες στα τεστ οι αντίστοιχες ψήφοι αξιολόγησης του φωτισμού και της ακουστικής ήταν σχετικά μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές των υψηλότερων βαθμολογιών. Όπως προαναφέρθηκε, όσο μεγαλύτερες ήταν οι τιμές των ψήφων τόσο μεγαλύτερη και η δυσαρέσκεια των μαθητών με το εσωτερικό περιβάλλον. Από την αρνητική αυτή συσχέτιση των τάσεων θα μπορούσε κάποιος να συμπεράνει ότι όσο πιο ικανοποιημένοι είναι οι μαθητές με το εσωτερικό περιβάλλον φωτισμού και ακουστικής, τόσο υψηλότερες βαθμολογίες επιτυγχάνουν.

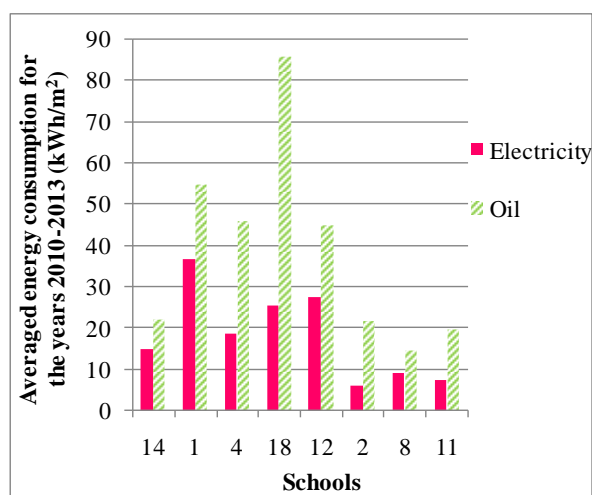


Εικόνα 5-70: Σχέση μεταξύ των τάσεων των επιδόσεων των μαθητών στα τεστ παραγωγικότητας και της υποκειμενικής αξιολόγησης της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος

5.3.2.3 Ενεργειακές καταναλώσεις

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η ενεργειακή κατανάλωση για ηλεκτρισμό και πετρέλαιο θέρμανσης σε καθένα από τα σχολεία. Στην Εικόνα 5-71 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές καταναλώσεων ηλεκτρισμού και πετρελαίου ανά σχολείο για τα έτη 2010-2013. Η ενεργειακή κατανάλωση του σχολείου 3 δεν ήταν διαθέσιμη και για αυτό τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μόνο για 8 από τα 9 σχολεία. Η κατανάλωση πετρελαίου θέρμανσης δίνονταν σε λίτρα και στη συνέχεια μετατράπηκε από λίτρα σε kWh πολλαπλασιάζοντας με το συντελεστή 11.2 της ενεργειακής πυκνότητας του πετρελαίου (11.2 kWh/l). Τα σχολεία 2, 8 και 11 φάνηκε να έχουν χαμηλότερες ενεργειακές καταναλώσεις τόσο για ηλεκτρισμό όσο και για πετρέλαιο. Συγκεκριμένα, η μέση ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος στα σχολεία αυτά ήταν περίπου 8 kWh/m² και η κατανάλωση πετρελαίου ήταν περίπου 18 kWh/m²/yr. Οι υψηλότερες καταναλώσεις ηλεκτρικού ρεύματος παρατηρήθηκαν στα σχολεία 1, 18 και 12 ίσες με 36.79, 25.38 και 27.35 kWh/m²/yr αντίστοιχα. Στο σχολείο 18 η κατανάλωση πετρελαίου ήταν ίση με 85.68 kWh/m²/yr ενώ τα σχολεία 1, 4 και 12 είχαν καταναλώσεις ίσες με περίπου 45 kWh/m². Η αιτία για τις αυξημένες συγκεντρώσεις στα σχολεία αυτά θα μπορούσε να αποδοθεί στο γεγονός ότι σύμφωνα με τον Πίνακα 3-11 τα σχολεία αυτά ήταν παλαιότερες κατασκευές συγκριτικά με τα υπόλοιπα σχολεία. Για το λόγο αυτό παλαιότερες κτιριακές κατασκευές θα μπορούσαν να είναι λιγότερο αεροστεγείς και έτσι να έχουν μεγαλύτερες διαφυγές αέρα σε σχέση με τα υπόλοιπα σχολεία, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι για να θερμανθούν οι συγκεκριμένες κατασκευές απαιτείται η λειτουργία του συστήματος θέρμανσης για περισσότερες ώρες συγκριτικά με νεότερες κατασκευές. Σύμφωνα με τους Santamouris et al., 2007a ένα τυπικό σχολικό κτίριο καταναλώνει για

θέρμανση 57 kWh/m²/year και για ηλεκτρισμό 20 kWh/m²/year ενώ ένα κτίριο βέλτιστων ενεργειακών καταναλώσεων καταναλώνει 32 και 10kWh/m²/year αντίστοιχα. Οι μέσες καταναλώσεις για το σύνολο των σχολείων της μελέτης αυτής ήταν 18.23 και 38.51 kWh/m²/year για ηλεκτρισμό και θέρμανση αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι κοντά στο τυπικό και βέλτιστο κτίριο σύμφωνα με τον ενεργειακή ταξινόμηση των Santamouris et al., 2007a.



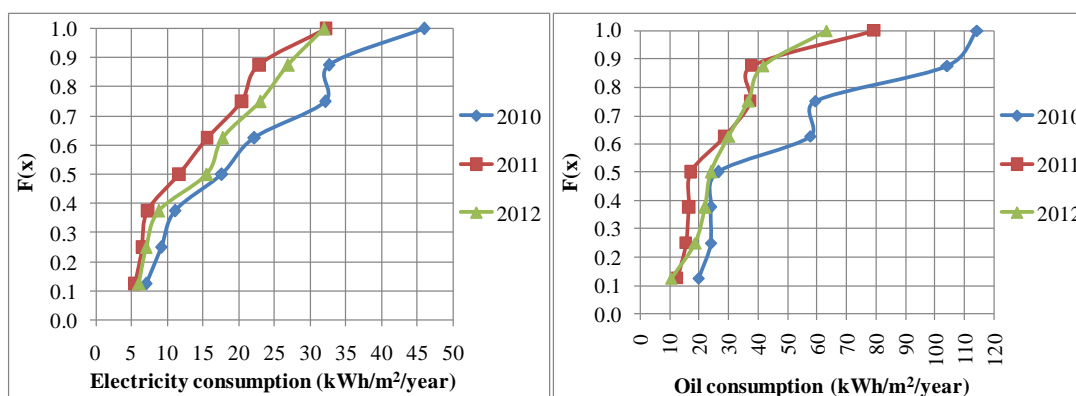
Εικόνα 5-71: Μέσες καταναλώσεις ηλεκτρικού ρεύματος και πετρελαίου για τα έτη 2010-2013 ανά σχολείο

Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται η εγκατεστημένη ισχύς των λεβήτων σε καθένα από τα σχολεία αλλά και οι καταναλώσεις ηλεκτρισμού και πετρελαίου θέρμανσης σε μονάδες kWh/m² των σχολείων για τα έτη 2010-2012. Η εγκατεστημένη ισχύς μετατράπηκε από kcal/h σε μονάδες kW με βάση τον τύπο: 1kWh=860 kcal.

Πίνακας 5-15: Καταναλώσεις ηλεκτρισμού και πετρελαίου θέρμανσης για τα έτη 201-2012 σε καθένα από τα σχολεία

Σχολείο	Θερμαινόμενη επιφάνεια (m ²)	Εγκατεστημένη ισχύς λέβητα (kW)	Ηλεκτρισμός (kWh/m ²)			Πετρέλαιο θέρμανσης (kWh/m ²)		
			2010	2011	2012	2010	2011	2012
14	1900	255.86	17.67	11.71	15.57	26.65	17.43	22.18
1	700	-	46.04	32.34	32.00	104.37	28.94	30.10
4	754	162.82	22.22	15.60	17.72	57.86	37.65	41.64
18	500	139.56	32.71	20.46	22.97	114.35	79.48	63.21
12	1000	261.68	32.12	22.95	26.99	59.56	37.85	36.87
2	1975	186.1	7.02	5.48	6.07	24.13	16.70	24.00
8	1500	151.2	11.08	7.27	8.83	19.85	12.62	10.53
11	1400	174.5	9.12	6.45	7.01	23.93	15.54	18.81

Η κατανομή συχνοτήτων των καταναλώσεων ηλεκτρισμού και πετρελαίου θέρμανσης για καθένα από τα τρία έτη 2010-2013 για το σύνολο των σχολείων παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα (Εικόνα 5-72,αριστερά και δεξιά αντίστοιχα). Όπως είναι φανερό και από τα δύο διαγράμματα οι ενεργειακές καταναλώσεις του 2010 είναι υψηλότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες των επόμενων ετών του 2011 και 2012 κάτι το οποίο θα μπορούσε να αποδοθεί στο γεγονός ότι από το 2011 ξεκίνησε η οικονομική κρίση στην Ελλάδα όπου οι καταναλώσεις ενέργειας μειώθηκαν σημαντικά. Συγκεκριμένα, τόσο οι καθηγητές όσο και οι μαθητές παραπονέθηκαν για το ότι κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών αισθάνονταν κρύο στις τάξεις τους στη διάρκεια των μαθημάτων εξ' αιτίας της περιορισμένης θέρμανσης. Στην Εικόνα 5-72 αριστερά φαίνεται ότι για το 50% των περιπτώσεων οι καταναλώσεις ηλεκτρισμού ήταν μεγαλύτερες των 17.67, 11.71 και 15.57 kWh/m² για τα έτη 2010, 2011 και 2012 αντίστοιχα. Όσον αφορά την κατανάλωση πετρελαίου θέρμανσης σε λίτρα, για το 50% των περιπτώσεων η κατανάλωση ήταν μεγαλύτερη των 2.38, 1.56 και 2.14 lt/m² για τα έτη 2010, 2011 και 2012 αντίστοιχα. Αντίστοιχα η κατανάλωση πετρελαίου θέρμανσης σε μονάδες kWh/m² για τα έτη 2010, 2011 και 2012 ήταν 26.65, 17.43 και 24 kWh/m² (Εικόνα 5-72, δεξιά).



Εικόνα 5-72: Αθροιστική κατανομή συχνοτήτων των καταναλώσεων ηλεκτρισμού (αριστερά) και καταναλώσεων πετρελαίου (δεξιά) για τα έτη 2010-2012

Η ετήσια κατανομή των καταναλώσεων ηλεκτρισμού εξετάστηκε και σε μηνιαία βάση από την οποία προέκυψε ότι οι καταναλώσεις από τον Ιανουάριο έως τον Ιούνιο και από το Σεπτέμβριο έως το Δεκέμβριο ήταν περίπου οι ίδιες σε καθένα από τα σχολεία ενώ κατά τον Ιούλιο και τον Αύγουστο οι καταναλώσεις σχεδόν μηδενίζονταν εξ' αιτίας των θερινών διακοπών.

Τέλος, οι μέσες συγκεντρώσεις ρύπων ανά σχολείο συγκρίθηκαν με τη μέση τιμή ενεργειακών καταναλώσεων της τριετίας ανά σχολείο και βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές θετικές συσχετίσεις μεταξύ των αιωρούμενων σωματιδίων και του CO₂ σε σχέση με τις

καταναλώσεις ηλεκτρικού ρεύματος και πετρελαίου θέρμανσης (Πίνακας 5-16). Στον πίνακα που ακολουθεί συγκεντρώνονται οι συντελεστές συσχέτισης Spearman και Pearson όπου γίνεται φανερό ότι για πολλές από τις περιπτώσεις οι συσχετίσεις είναι σημαντικές και για τα δύο επίπεδα σημαντικότητας 0.05 και 0.01 (Πίνακας 5-16). Οι θετικές συσχετίσεις φανερώνουν ότι σε σχολεία με μεγαλύτερες ενεργειακές καταναλώσεις τόσο για την κατανάλωση ηλεκτρισμού όσο και για την κατανάλωση πετρελαίου, οι αντίστοιχες εσωτερικές συγκεντρώσεις ήταν υψηλότερες.

Πίνακας 5-16: Συντελεστές συσχέτισης Spearman και Pearson μεταξύ των ενεργειακών καταναλώσεων και των αέριων ρύπων

Συντελεστές συσχέτισης	Ενέργεια	PM _{0.5}	PM ₁	PM _{2.5}	PM ₅	PM ₁₀	TPM	CO ₂
Spearman's rho	Electricity	0.680	0.717*	0.639	0.653	0.758*	0.771*	0.880**
	Oil	0.933**	0.937**	0.673	0.569	0.680	0.690	0.382
Pearson	Electricity	0.810*	0.810*	0.476	0.524	0.595	0.595	0.929**
	Oil	0.929**	0.929**	0.738*	0.762*	0.857**	0.857**	0.643

*. Σημαντική συσχέτιση στο επίπεδο: 0.05, **.Σημαντική συσχέτιση στο επίπεδο: 0.01

5.3.3 Εκτίμηση συγκεντρώσεων σωματιδίων PM₁₀ με τη χρήση του αριθμητικού κώδικα MIAQ: Μέρος Γ'

Στο επόμενο στάδιο προσομοιώθηκαν οι ημερήσιες διακυμάνσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ στις σχολικές αίθουσες με τη βοήθεια του αριθμητικού κώδικα MIAQ. Σε αντίθεση με την αντίστοιχη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στις κατοικίες (Κεφάλαιο 5.1.2) όπου ο ρυθμός διεύθυνσης θεωρήθηκε σταθερός καθώς τα παράθυρα παρέμειναν κλειστά καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, στην περίπτωση των σχολείων ο αερισμός άλλαζε αρκετές φορές στη διάρκεια της ημέρας ανάλογα με το άνοιγμα των παραθύρων. Το σενάριο που επικράτησε στην πλειοψηφία των περιπτώσεων ήταν ότι τα παράθυρα ήταν κλειστά στη διάρκεια των μαθημάτων ενώ άνοιγαν κατά τη διάρκεια των διαλειμμάτων. Ωστόσο, πλησιάζοντας προς τους θερινούς μήνες εξ' αιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας, τα παράθυρα πολλές φορές παρέμεναν ανοιχτά και στη διάρκεια των μαθημάτων.

Ένας από τους περιορισμούς του αριθμητικού κώδικα που αναφέρθηκαν σε κεφάλαιο που προηγήθηκε κατά την περιγραφή του, είναι ότι σαν δεδομένο εισόδου δέχεται τη μέση ωριαία τιμή αερισμού και ρυθμού διεύθυνσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο ρυθμός αερισμού άλλαζε στη διάρκεια της ώρας. Με σκοπό να αποτυπωθεί η συγκεκριμένη συνθήκη έγινε η ακόλουθη παραδοχή. Η ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM₁₀ προσομοιώθηκε πολλαπλώς για τα διάφορα σενάρια αερισμού. Με άλλα λόγια η ημερήσια

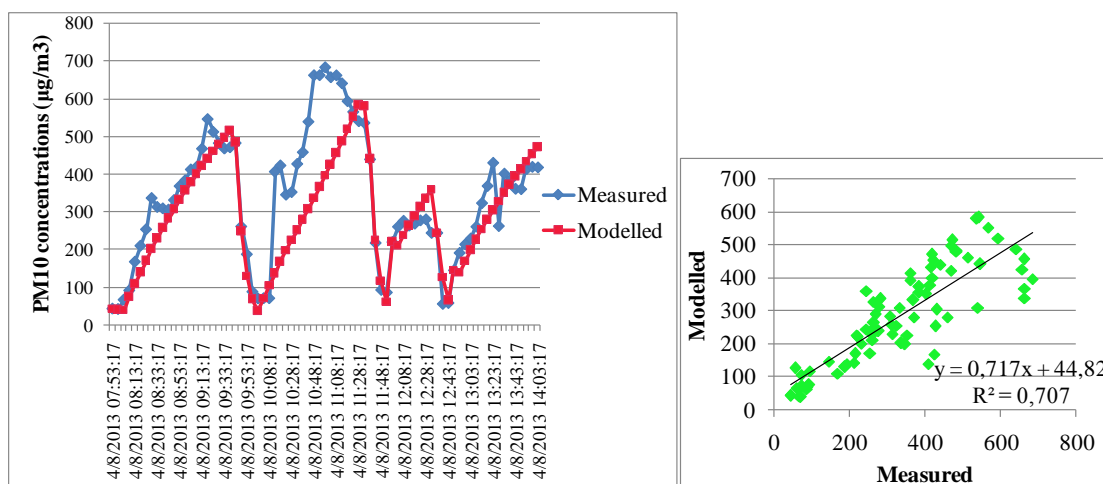
διακύμανση διαχωρίστηκε και μελετήθηκε σε επιμέρους διαστήματα με κοινό ρυθμό αερισμό και στη συνέχεια έγιναν διαδοχικές προσομοιώσεις για καθένα από αυτά τα διαστήματα εισάγοντας και τα αντίστοιχα δεδομένα εισόδου όπως εξωτερικές συγκεντρώσεις, εσωτερική θερμοκρασία αέρα, πηγές στο εσωτερικό περιβάλλον, αρχική συγκέντρωση κτλ. Συνολικά προσομοιώθηκαν 4 ενδεικτικές ημέρες σε 3 διαφορετικά σχολεία τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα (Εικόνα 5-73 - Εικόνα 5-76). Τα δεδομένα εισόδου για καθεμιά από τις προσομοιώσεις παραθέτονται αναλυτικά στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 5-17-Πίνακας 5-20). Είναι φανερό πως μέτρια συσχέτιση εμφανίζεται μεταξύ των μετρούμενων και υπολογιζόμενων τιμών με τους συντελεστές συσχέτισης να κυμαίνονται από 0.610 έως 0.707. Από τα διαγράμματα γίνεται φανερό ότι οι υπολογιζόμενες τιμές αποκλίνουν σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές κυρίως στις περιπτώσεις που παρατηρούνται μικρές διακυμάνσεις των μετρούμενων συγκεντρώσεων των οποίων οι πηγές δεν έγιναν αντιληπτές στη διάρκεια των μετρήσεων οι οποίες όμως ενδεχομένως να οφείλονται και σε τυχαίους παράγοντες. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν οι αιχμές των περίπου 8:20, 10:15 και 13:30 στην Εικόνα 5-73, στις 9:50 και 13:50 στην Εικόνα 5-74 καθώς και των 10:10, 10:30, 12:31 και 13:51 στην Εικόνα 5-75.

Όπως προαναφέρθηκε, από τις βασικότερες πηγές εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ στα εσωτερικά περιβάλλοντα των τάξεων ήταν η παρουσία των μαθητών και η χρήση πινάκων κιμωλίας. Ακολουθώντας την μεθοδολογία των Helmis et al., (2007) στη συγκεκριμένη περίπτωση για την παρουσία των μαθητών, οι εσωτερικές πηγές προσομοιώθηκαν με μεταβαλλόμενες εντάσεις μέχρις ότου οι υπολογιζόμενες τιμές προσέγγιζαν ικανοποιητικά τις μετρούμενες τιμές. Κατόπιν πολλαπλών δοκιμών βρέθηκε ότι για διαθέσιμη επιφάνεια ανά μαθητή που κυμαίνεται από 1.8 έως 3.7 m², οι ρυθμοί εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων κυμάνθηκαν από 1,000- 1,500 µg/min.

Πίνακας 5-17: Δεδομένα εισόδου για την προσομοίωση της 8/4/13 του σχολείου 1

Όγκος δωματίου	198 m ³
Ύψος δωματίου	3.1 m
Θερμοκρασία τοίχων	Παραδοχή τιμής, 16 °C στη
Εσωτερική θερμοκρασία	Μέση ωριαία μετρούμενη τιμή. 18.1-19.9 °C
Μέγεθος σωματιδίου	PM ₁₀ : 2.5-10 µm
Πυκνότητα σωματιδίου	2,200 kg/m ³
Ρυθμός διείσδυσης αέρα (infiltration)	Κυμάνθηκε από 1-26 m ³ /min
Αρχική συγκέντρωση σωματιδίων	Μετρούμενη τιμή (482.65 µg/m ³)
Εξωτερική συγκέντρωση σωματιδίων	Ωριαία μετρούμενη τιμή (6.71-15.45 µg/m ³)
Πηγές παραγωγής σωματιδίων (Παρουσία μαθητών)	1,000-1,500 µg/min

Αναλυτικότερα, την Εικόνα 5-73, αριστερά παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση μετρούμενων και προβλεπόμενων PM_{10} σωματιδίων για τις 8/4/13 στο σχολείο 1. Οι εσωτερικές μετρούμενες συγκεντρώσεις ξεκινούν από τα $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ στις 7:53 όπου η αίθουσα είναι άδεια και τα παράθυρα κλειστά. Δέκα λεπτά αργότερα αρχίζουν να εισέρχονται οι μαθητές στην τάξη εισάγοντας στο μοντέλο πηγή εκπεμπόμενων αιωρούμενων σωματιδίων όπου και προκαλείται σταδιακή αύξηση των συγκεντρώσεων όπου οι θεωρητικές τιμές προσεγγίζουν σημαντικά τις μετρούμενες τιμές. Στις 9:30 είναι το πρώτο διάλειμμα στη διάρκεια του οποίου οι μαθητές εξέρχονται από την τάξη ενώ ταυτόχρονα ανοίγουν τα παράθυρα και συνεπώς αυξάνεται ο ρυθμός αερισμού. Κατά το εικοσάλεπτο διάλειμμα παρατείνεται έντονη μείωση των συγκεντρώσεων κατά περισσότερες από 5 φορές τόσο στις μετρούμενες όσο και στις υπολογιζόμενες τιμές οι συγκεντρώσεις των οποίων ταυτίζονται στο διάστημα αυτό. Στις 9:55 οι μαθητές εισέρχονται και πάλι στην τάξη ενώ ταυτόχρονα κλείνουν τα παράθυρα μειώνοντας σημαντικά το ρυθμό αερισμού από τις 7.88 ACH (του διαλείμματος) στις 0.47 ACH (ρυθμός διείσδυσης- infiltration). Στη διάρκεια της δεύτερης διδακτικής ώρας (9:55-11:30) οι μετρούμενες συγκεντρώσεις των PM_{10} αυξάνονται κατά περισσότερες από 7 φορές σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στη διάρκεια του διαλείμματος που προηγήθηκε. Στο συγκεκριμένο διάστημα οι υπολογιζόμενες τιμές με τη βοήθεια του MIAQ έχουν ορισμένη απόκλιση από τις μετρούμενες τιμές γεγονός το οποίο ενδεχομένως να οφείλεται σε ορισμένη δραστηριότητα των μαθητών που έλαβε χώρα στη διάρκεια του μαθήματος και η οποία δεν καταγράφηκε και συνεπώς δεν προσομοιώθηκε. Ακολούθως οι υπολογιζόμενες τιμές ακολουθούν ικανοποιητικά τις μετρούμενες τιμές τόσο στη διάρκεια των μαθημάτων όσο και κατά τα διαλείμματα. Από το διάγραμμα διασποράς παρατηρείται ικανοποιητική προσέγγιση ($R^2=0.707$) των μετρούμενων τιμών με τη βοήθεια του αριθμητικού κώδικα MIAQ.



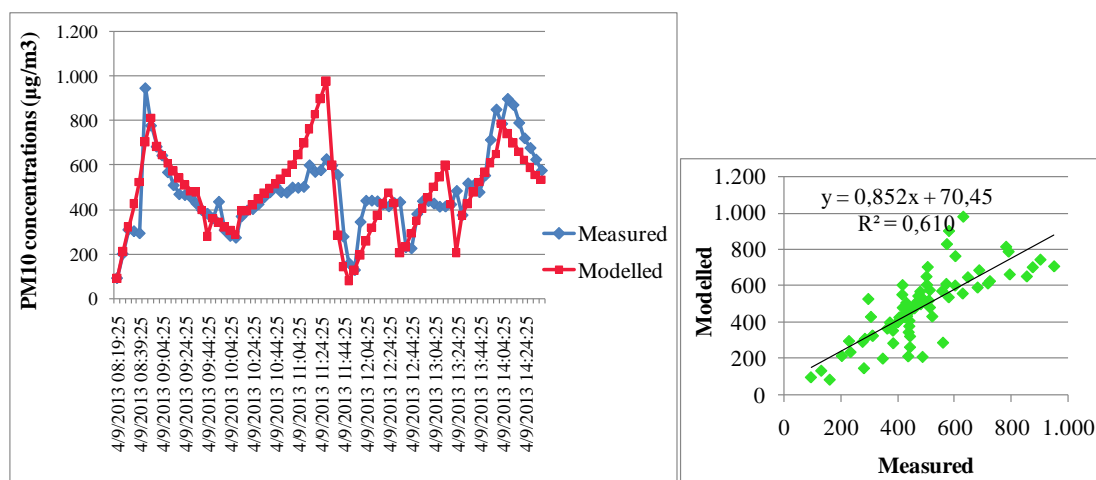
Εικόνα 5-73: Ημερήσια διακύμανση (αριστερά) και διάγραμμα διασποράς (δεξιά) μεταξύ των μετρούμενων και προβλεπόμενων συγκεντρώσεων PM₁₀ με τη βοήθεια του αριθμητικού κώδικα MIAQ για τις 8/4/13

Πίνακας 5-18: Δεδομένα εισόδου για την προσομοίωση της 9/4/13 του σχολείου 1

Όγκος δωματίου	198 m ³
Ύψος δωματίου	3.1 m
Θερμοκρασία τοίχων	Παραδοχή τιμής, 16 °C
Εσωτερική θερμοκρασία	Μέση ωριαία μετρούμενη τιμή. 17.4-19.9 °C
Μέγεθος σωματιδίου	PM ₁₀ : 2.5-10 µm
Πυκνότητα σωματιδίου	2,200 kg/m ³
Ρυθμός διείσδυσης αέρα (infiltration)	Κυμάνθηκε από 1.5-15.1 m ³ /min
Αρχική συγκέντρωση σωματιδίων	Η μετρούμενη τιμή (93.57 µg/m ³)
Εξωτερική συγκέντρωση σωματιδίων	Ωριαία μετρούμενη τιμή (17.78-30.33 µg/m ³)
Πηγές παραγωγής σωματιδίων (Παρουσία μαθητών)	1,000-1,500 µg/min

Στην Εικόνα 5-74 παρουσιάζεται η διακύμανση (αριστερά) και η διασπορά (δεξιά) των μετρούμενων και υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων PM₁₀ για τις 9/4/13 στο σχολείο 1. Με εξαίρεση τη διδακτική ώρα μεταξύ 10:30 και 11:24 οι προβλεπόμενες τιμές προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό τις μετρούμενες ($R^2=0.610$). Η απόκλιση μεταξύ μετρούμενων και προβλεπόμενων τιμών στο συγκεκριμένο διάστημα ενδεχομένως να οφείλεται σε άνοιγμα των παραθύρων όπου πιθανότατα οδήγησε στον περιορισμό της έκτασης των συγκεντρώσεων σε πολύ υψηλές τιμές κάτι το οποίο παρατηρήθηκε στις προβλεπόμενες τιμές. Ωστόσο όμως η ενδεχόμενη αυτή δραστηριότητα δεν καταγράφηκε στο ημερολόγιο δραστηριοτήτων και συνεπώς δεν θεωρήθηκε ως δεδομένο εισόδου στο μοντέλο και έτσι η διαρκής αύξηση των προβλεπόμενων συγκεντρώσεων υπολογίστηκε με την προϋπόθεση ότι τα παράθυρα ήταν συνεχώς κλειστά. Σύμφωνα με το ημερολόγιο δραστηριοτήτων όταν τα παράθυρα ήταν

κλειστά ο ρυθμός διείσδυσης υπολογίστηκε ίσος με 0.44 ACH ενώ στη διάρκεια των διαλειμμάτων τα παράθυρα άνοιγαν και ο αερισμός ήταν περίπου ίσος με 9 ACH.



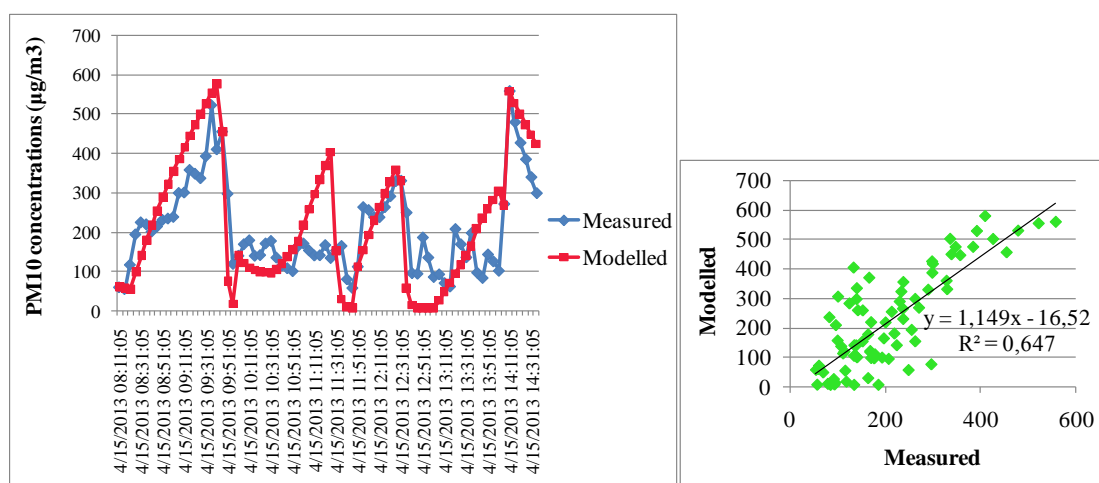
Εικόνα 5-74: Ημερήσια διακύμανση (αριστερά) και διάγραμμα διασποράς (δεξιά) μεταξύ των μετρούμενων και προβλεπόμενων συγκεντρώσεων PM₁₀ με τη βοήθεια του αριθμητικού κώδικα MIAQ για τις 9/4/13

Πίνακας 5-19: Δεδομένα εισόδου για την προσομοίωση της 15/4/13 του σχολείου 4

Όγκος δωματίου	155 m ³
Ύψος δωματίου	3.1 m
Θερμοκρασία τοίχων	Παραδοχή τιμής, 21 °C
Εσωτερική θερμοκρασία	Μέση ωριαία μετρούμενη τιμή. 22.8-24.0 °C
Μέγεθος σωματιδίου	PM ₁₀ : 2.5-10 µm
Πυκνότητα σωματιδίου	2,200 kg/m ³
Ρυθμός διείσδυσης αέρα (infiltration)	Κυμάνθηκε από 0.85-6.0 m ³ /min
Αρχική συγκέντρωση σωματιδίων	Η μετρούμενη τιμή (58.89 µg/m ³)
Εξωτερική συγκέντρωση σωματιδίων	Ωριαία μετρούμενη τιμή (5.28-6.8 µg/m ³)
Πηγές παραγωγής σωματιδίων (Παρουσία μαθητών)	1,000-1,500 µg/min

Στην Εικόνα 5-75 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα με τα παραπάνω για τις 15/4/13 στο σχολείο 4. Εδώ παρατηρούνται συχνές και μικρές αιχμές στις μετρούμενες συγκεντρώσεις οι οποίες δεν προσεγγίστηκαν ικανοποιητικά στις προβλεπόμενες τιμές και οι οποίες ενδεχομένως να οφείλονται είτε στην έντονη κινητικότητα των μαθητών στις τάξεις είτε σε τυχαίους παράγοντες όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Υπάρχει μια έντονη απόκλιση μεταξύ των μετρούμενων και υπολογιζόμενων τιμών στο διάστημα 10:51 έως 11:30 με τις προβλεπόμενες τιμές να ξεπερνούν κατά πολύ τις μετρούμενες, γεγονός το οποίο όπως και για την περίπτωση της διδακτικής ώρας μεταξύ 10:30 και 11:24 στην Εικόνα 5-74 ενδεχομένως να οφείλεται σε άνοιγμα των παραθύρων και άρα την αύξηση του ρυθμού

αερισμού, γεγονός το οποίο όμως δεν προσομοιώθηκε προκαλώντας τη συνεχή αύξηση των υπολογιζόμενων τιμών. Οι τιμές αερισμού που εισήχθησαν στο μοντέλο ήταν: 0.33, 6.24 και 21.97 ACH για την περίπτωση της διείσδυσης, του ανοίγματος ορισμένων και όλων των παραθύρων αντίστοιχα. Στο σύνολο της ημερήσιας διακύμανσης, ικανοποιητική είναι η συσχέτιση μεταξύ μετρούμενων και προβλεπόμενων τιμών των PM_{10} (Εικόνα 5-75, δεξιά, $R^2=0.647$).



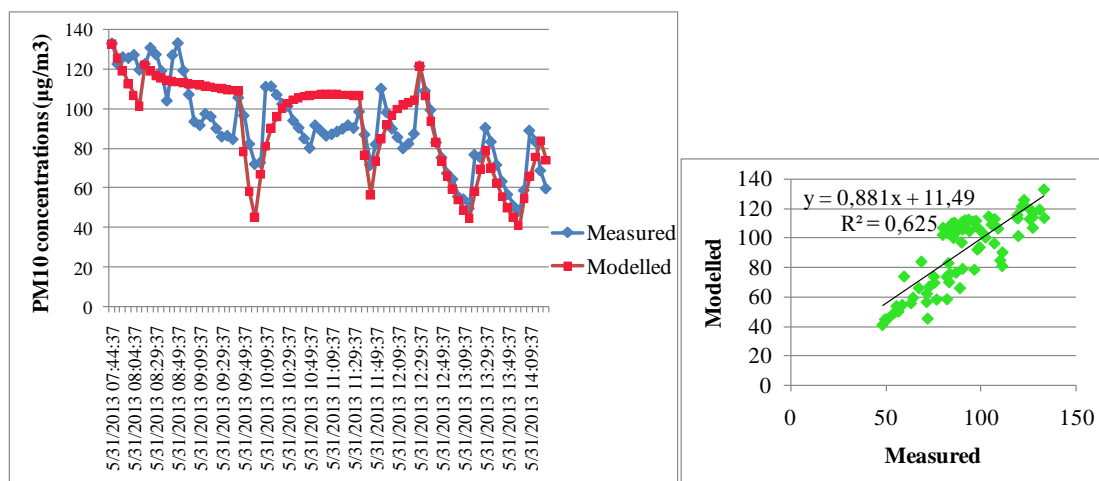
Εικόνα 5-75: Ημερήσια διακύμανση (αριστερά) και διάγραμμα διασποράς (δεξιά) μεταξύ των μετρούμενων και προβλεπόμενων συγκεντρώσεων PM_{10} με τη βοήθεια του αριθμητικού κώδικα ΜΙΑQ για τις 15/4/13

Πίνακας 5-20: Δεδομένα εισόδου για την προσομοίωση της 31/5/13 του σχολείου 11

Όγκος δωματίου	172 m ³
Ύψος δωματίου	3.1 m
Θερμοκρασία τοίχων	Παραδοχή τιμής, 23 °C
Εσωτερική θερμοκρασία	Μέση ωριαία μετρούμενη τιμή. 26.3-27.6 °C
Μέγεθος σωματιδίου	PM_{10} : 2.5-10 µm
Πυκνότητα σωματιδίου	2,200 kg/m ³
Ρυθμός διείσδυσης αέρα (infiltration)	Κυμάνθηκε από 0.85-6.0 m ³ /min
Αρχική συγκέντρωση σωματιδίων	Η μετρούμενη τιμή (133.07 µg/m ³)
Εξωτερική συγκέντρωση σωματιδίων	Ωριαία μετρούμενη τιμή (2.35-8.46 µg/m ³)
Πηγές παραγωγής σωματιδίων (Παρουσία μαθητών)	1,000-1,500 µg/min

Τέλος, στην Εικόνα 5-76 παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση (αριστερά) και το διάγραμμα διασποράς (δεξιά) για τις 31/5/13 στο σχολείο 11 απ' όπου φαίνεται ικανοποιητική προσέγγιση των μετρούμενων τιμών από τις προβλεπόμενες τιμές με τη βοήθεια του μοντέλου ΜΙΑQ ($R^2=0.594$). Συγκριτικά με τα παραπάνω διαγράμματα διακύμανσης στο συγκεκριμένο φαίνεται να υπάρχει μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ μετρούμενων και

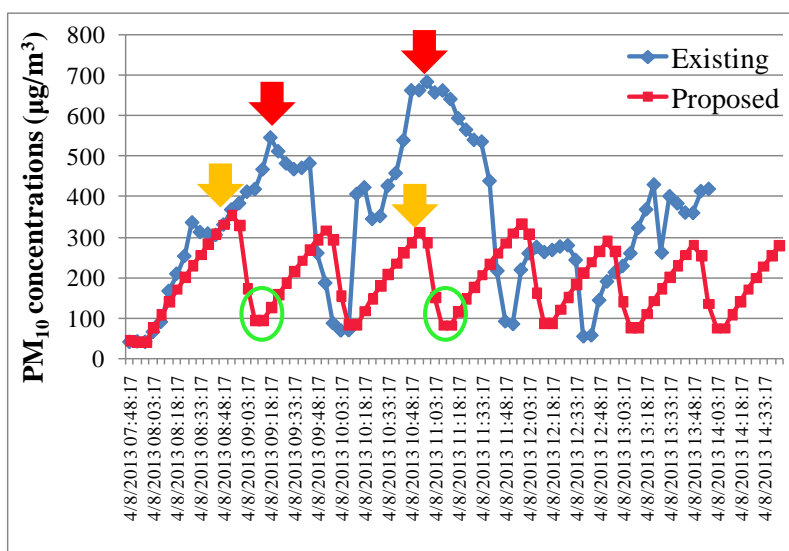
υπολογιζόμενων τιμών εξ' αιτίας της διαφορετικής κλίμακας των συγκεντρώσεων PM₁₀. Για τα εξής διαστήματα: 7:44-8:09 και 12:29-13:54 τα παράθυρα ήταν κλειστά και ο αερισμός ήταν μόνο μέσω διείσδυσης (0.82 ACH) ενώ για όλο το υπόλοιπο διάστημα τα παράθυρα ήταν ανοιχτά ενώ επικράτησε αερισμός της τάξης των 3 ACH.



Εικόνα 5-76: Ημερήσια διακύμανση (αριστερά) και διάγραμμα διασποράς (δεξιά) μεταξύ των μετρούμενων και προβλεπόμενων συγκεντρώσεων PM₁₀ με τη βοήθεια του αριθμητικού κώδικα MIAQ για τις 31/5/13

Στις παραπάνω προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκε η θεωρητική πρόβλεψη των μετρούμενων τιμών των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ έχοντας ως δεδομένα εισόδου την παρουσία και το πλήθος των μαθητών, το ρυθμό αερισμού, τη θερμοκρασία, τις εξωτερικές συγκεντρώσεις αλλά και την αρχική συγκέντρωση στο εσωτερικό περιβάλλον. Βρέθηκε ότι οι υπολογιζόμενες θεωρητικές τιμές προσέγγισαν σε μεγάλο βαθμό τις πειραματικές μετρήσεις. Επιπλέον έχοντας επιβεβαιώσει την αξιοπιστία του μοντέλου με τις διαδοχικές προσομοιώσεις για διαφορετικές ημέρες σε διαφορετικά σχολεία, είναι δυνατόν το μοντέλο αυτό να αναπαραχθεί για οποιαδήποτε περίπτωση εργασίας με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως αυτή των φυσικά αεριζόμενων σχολικών κτιρίων κατά τους εαρινούς μήνες σε μεσογειακά κλίματα. Ακόμα, η θεωρητική προσομοίωση δίνει τη δυνατότητα να εξετάσει κανείς την ευαισθησία του μοντέλου στη μεταβολή των παραμέτρων εισόδου όπως π.χ. του ρυθμού εκπομπής των πηγών, του ρυθμού αερισμού κ.α. κάτι το οποίο δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με το πείραμα. Στην προκειμένη περίπτωση βρέθηκε ότι οι εξωτερικές συγκεντρώσεις ήταν σε τόσο χαμηλά επίπεδα ώστε δεν είχαν καμία επίδραση στις συγκεντρώσεις του εσωτερικού περιβάλλοντος, αντίθετα τόσο ο αερισμός όσο και η παρουσία των ατόμων έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στα επίπεδα και τις διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων PM₁₀.

Πέραν αυτών, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων διδακτικών περιόδων διάρκειας 90 λεπτών η καθεμιά, οι συγκεντρώσεις των PM_{10} στο σύνολο των σχολείων επεκτάθηκαν σε πολύ υψηλές τιμές (Εικόνα 5-41), προτάθηκε η διάσπαση των διδακτικών αυτών περιόδων σε επιμέρους διδακτικές ώρες μικρότερης διάρκειας (45 λεπτών) με την εισαγωγή δεκάλεπτων διαλειμμάτων. Στην Εικόνα 5-77 παρουσιάζεται με μπλε γραμμή η μετρούμενη ημερήσια διακύμανση των αιωρούμενων PM_{10} για μία τυπική ημέρα μέτρησης στο σχολείο 1. Παρατηρείται ότι στη διάρκεια των δύο πρώτων 90λεπτων διδακτικών περιόδων οι συγκεντρώσεις ξεπερνούν τα $550 \mu g/m^3$. Η διάσπαση καθεμιάς από τις δύο αυτές διδακτικές περιόδους σε αντίστοιχα δύο επιμέρους 45λεπτες, οδήγησαν σε περιορισμό της έκτασης των συγκεντρώσεων σε χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τις υπάρχουσες, των οποίων οι μέγιστες τιμές μόλις άγγιξαν τα $300 \mu g/m^3$. Το ποσοστό μείωσης της μέσης ημερήσιας τιμής των συγκεντρώσεων άγγιξε το 56% με την εισαγωγή των δύο αυτών διαλειμμάτων.



Εικόνα 5-77: Ημερήσια διακύμανση αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} στην υπάρχουσα και την προτεινόμενη κατάσταση

5.3.4 Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιήθηκε μια ολιστική προσέγγιση της αξιολόγησης του εσωτερικού περιβάλλοντος τόσο μέσω των πειραματικών μετρήσεων όσο και μέσω της υποκειμενικής αξιολόγησης των μαθητών, του ελέγχου της παραγωγικότητας, της μελέτης των συμπτωμάτων άρρωστου κτιρίου αλλά και των ενεργειακών καταναλώσεων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία στο εσωτερικό περιβάλλον ακολουθούν την τάση των αντίστοιχων τιμών του εξωτερικού περιβάλλοντος με τις εσωτερικές να είναι υψηλότερες από τις εξωτερικές τιμές και για τις δύο περιπτώσεις. Για την πλειοψηφία των περιπτώσεων η εσωτερική θερμοκρασία ήταν εντός των οριακών τιμών ενώ η σχετική υγρασία στο εσωτερικό περιβάλλον για μόνο 3 από τα 9 σχολεία ήταν μεταξύ των προτεινόμενων ορίων.

Ο μέσος ρυθμός διείσδυσης ανά σχολείο κυμάνθηκε από 0.1 έως περίπου 0.8 ACH. Οι αυξημένες τιμές για ορισμένες από τις περιπτώσεις ενδεχομένως να οφείλονται στις υψηλότερες τιμές του επικρατούντος ανέμου καθώς επίσης και στην εισροή του αέρα μέσω διείσδυσης από χαραμάδες λόγω παλαιότητας των κτιρίων. Οι μέσοι ρυθμοί αερισμού για το σύνολο των σχολείων ήταν περίπου 11.71 l/s/p, τιμή μεγαλύτερης της ελάχιστης προτεινόμενης από της ASHRAE των 8 l/s/p, υποδηλώνοντας ότι οι τάξεις ήταν επαρκώς αεριζόμενες για συγκεκριμένες περιπτώσεις. Οι μέσες συγκεντρώσεις CO₂ ανά σχολείο ήταν κοντά στο όριο των 1,000 ppm με ορισμένες εξαιρέσεις που οφείλονταν στα ανεπαρκή επίπεδα αερισμού. Επιπλέον οι συγκεντρώσεις CO₂ συσχετίστηκαν θετικά με τον αριθμό των ατόμων. Οι συγκεντρώσεις CO για τα περισσότερα από τα σχολεία ήταν πολύ μικρότερες (<1.5 ppm) των προτεινόμενων οριακών τιμών των 10 ppm, ωστόσο οι συγκεντρώσεις αυξάνονταν κατά πολύ στα σχολεία 12, 2, 8 και 11. Παρόμοια συμπεριφορά με το CO σημειώθηκε για την περίπτωση των VOCs των οποίων τα επίπεδα των συγκεντρώσεων ήταν χαμηλότερα στα σχολεία 14, 1, 4, 3 και 18 (<1.6 ppm) ενώ αυξάνονταν δραματικά στα σχολεία 12, 2, 8 και 11 (>6 ppm). Η μέση συγκέντρωση των PM₁₀ στο εσωτερικό περιβάλλον ξεπέρασε σε πολλές περιπτώσεις την προτεινόμενη οριακή τιμή των 50 μg/m³ κατά περισσότερες από 10 φορές για την πλειοψηφία των σχολείων. Επίσης, οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων κατά τη διάρκεια των περιόδων διδασκαλίας ήταν λίγο μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες των περιόδων μη-διδασκαλίας πιθανόν εξ' αιτίας της παρουσίας των μαθητών αλλά και του μειωμένου ρυθμού αερισμού σε ορισμένες περιπτώσεις. Η μελέτη της ημερήσιας διακύμανσης των αιωρούμενων σωματιδίων στις τάξεις έδειξε ότι τόσο ο βαθμός αερισμού όσο και η παρουσία των ατόμων στις τάξεις έχουν σημαντική επίδραση στις συγκεντρώσεις τους.

Οι λόγοι I/O των εσωτερικών προς τις εξωτερικές συγκεντρώσεις σωματιδίων ήταν μεγαλύτεροι της μονάδας για όλες τις περιπτώσεις υποδηλώνοντας ότι το εξωτερικό περιβάλλον δεν επιδρά σημαντικά το εσωτερικό πιθανόν εξ' αιτίας των έντονων πηγών στο εσωτερικό των τάξεων. Επιπλέον μέτρια θετική συσχέτιση βρέθηκε μεταξύ των λόγων I/O των PM₁₀ και των PM_{2.5} με το CO₂. Οι τάξεις που χρησιμοποιούσαν πίνακα μαρκαδόρου είχαν υψηλότερες τιμές VOCs ενώ οι τάξεις που χρησιμοποιούσαν πίνακα κιμωλίας παρουσίασαν αυξημένα επίπεδα των μεγαλύτερων αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀. Η χημική ανάλυση των αιωρούμενων σωματιδίων επιβεβαίωσε ορισμένες πηγές δημιουργίας τους στα εσωτερικά περιβάλλοντα. Συγκεκριμένα η έντονη παρουσία οργανικού άνθρακα συσχετίστηκε με την παρουσία και τις δραστηριότητες των μαθητών στις τάξεις ενώ τα αυξημένα ποσοστά θεικών αποτελούν ένδειξη διαδικασιών καύσης στο εξωτερικό περιβάλλον. Επίσης υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο είναι ένδειξη παρουσίας γύψου, φθοράς των υλικών κατασκευής της τάξης, σοβά, υλικών του φλοιού της γης ή και σκόνη κιμωλίας.

Όσον αφορά την αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα από τους μαθητές, βρέθηκε ότι περίπου το 70% των ψήφων των μαθητών βρισκόταν μεταξύ των ψήφων 0 και 2 υποδηλώνοντας ικανοποίηση με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα και επίσης ότι οι μαθητές πίστευαν ότι η ποιότητα του εσωτερικού αέρα ενθαρρύνει την απόδοσή τους στα μαθήματά τους. Επίσης πίστευαν ότι ο αέρας των τάξεών τους ήταν φρέσκος και άοσμος ενώ το 50% των μαθητών πίστευαν ότι το ρεύμα του αέρα ήταν ιδανικό. Η ανάλυση συστάδων (Cluster Analysis) έδειξε ότι για υψηλότερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, και CO₂ παραδόξως οι μαθητές ήταν περισσότερο ικανοποιημένοι με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα των τάξεών τους. Ο ρυθμός αερισμού δεν φάνηκε να επιδρά στις απαντήσεις των μαθητών. Οι εσωτερικές και εξωτερικές θερμοκρασίες είχαν μεγάλη επιρροή στην κριτική των μαθητών. Συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι για μέση εσωτερική θερμοκρασία ίση με 22.31 °C οι μαθητές ήταν πλήρως ικανοποιημένοι με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα ενώ για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 25 °C ήταν πλήρως δυσαρεστημένοι. Συνεπώς η αύξηση της θερμοκρασίας οδήγησε και σε αύξηση των δυσαρεστημένων μαθητών με τον εσωτερικό αέρα. Οι απαντήσεις από τα ερωτηματολόγια που συσχετίζονταν με το θερμικό περιβάλλον έδειξαν ότι οι μαθητές το έκριναν σχετικά ζεστό και προτίμησαν πιο δροσερό περιβάλλον ενώ η πλειοψηφία τους το θεώρησε ως αποδεκτό. Επιπλέον τα αγόρια έδειξαν να αποδέχονται το θερμικό περιβάλλον σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με τα κορίτσια. Όσον αφορά τις συσχετίσεις μεταξύ των μετρήσεων και των ερωτηματολογίων, βρέθηκε ότι τόσο οι δείκτες PMV από τις μετρήσεις όσο και οι δείκτες TSV από τα ερωτηματολόγια συσχετίζονταν με την λειτουργική θερμοκρασία. Επιπλέον βρέθηκε σημαντική θετική συσχέτιση μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας με την

αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα από τους μαθητές. Ακόμα, βρέθηκαν μέτριες συσχετίσεις μεταξύ των δεικτών PMV των μετρήσεων και TSV από τις ψήφους των μαθητών. Σε σχέση με τις μετρήσεις οι μαθητές αντιλαμβάνονταν το εσωτερικό περιβάλλον πιο ζεστό. Τα επίπεδα φωτισμού ήταν υψηλά σχεδόν σε όλες τις τάξεις ενώ η πλειοψηφία των μαθητών ήταν ικανοποιημένοι με το περιβάλλον φωτισμού και επίσης ότι πίστευαν ότι ο φωτισμός ενθαρρύνει την ικανότητά τους να διαβάσουν. Η πλειοψηφία των μαθητών (80%) όπως και για την περίπτωση του φωτισμού δήλωσαν ικανοποιημένοι και με το περιβάλλον ακουστικής και επιπλέον πίστευαν ότι η ακουστική ενθαρρύνει την ικανότητά τους να διαβάσουν.

Επιπλέον βρέθηκε ότι αλλεργίες, ερεθισμός της μύτης και κόπωση ήταν τα επικρατέστερα συμπτώματα άρρωστου κτιρίου για το σύνολο των σχολείων ενώ τα κορίτσια ήταν πιο ευαίσθητα στα συμπτώματα σε σχέση με τα αγόρια. Ακόμα ένα σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι τα συμπτώματα άρρωστου κτιρίου συσχετιζόνταν θετικά με τα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων και του CO₂. Οι βαθμοί που επιτεύχθηκαν από τους μαθητές στα τεστ ελέγχου της παραγωγικότητας συσχετίστηκαν αρνητικά με τις συγκεντρώσεις CO₂ ενώ συσχετίστηκαν θετικά με το ρυθμό αερισμού. Επίσης, βρέθηκε ότι οι θετικές αξιολογήσεις του περιβάλλοντος φωτισμού και ακουστικής συνέπεσαν με υψηλότερες επιτευχθείσες βαθμολογίες από τους μαθητές. Τέλος, βρέθηκαν σχετικά χαμηλές ενεργειακές καταναλώσεις για θέρμανση σε σχέση με ευρισκόμενα άλλων μελετών γεγονός το οποίο θα μπορούσε να αποδοθεί σε περιορισμένη ενεργειακή κατανάλωση λόγω οικονομικής κρίσης των τελευταίων ετών. Οι ετήσιες κατανομές έδειξαν χαμηλότερες καταναλώσεις στη διάρκεια των θερινών μηνών εξ' αιτίας των θερινών διακοπών, ενώ βρέθηκαν σχετικά σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ των αέριων ρύπων του εσωτερικού περιβάλλοντος και των ενεργειακών καταναλώσεων τόσο για τον ηλεκτρισμό, όσο και για το πετρέλαιο.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ με τη βοήθεια του αριθμητικού κώδικα MIAQ προσέγγισαν ικανοποιητικά τις μετρούμενες τιμές και επίσης υπολογίστηκαν ρυθμοί εκπομπής των αιωρούμενων σωματιδίων από την παρουσία των μαθητών στις τάξεις οι οποίοι κυμάνθηκαν από 1,000 έως 1,500 μg/min ανάλογα με το πλήθος των μαθητών ανά τετραγωνικό. Επίσης προτάθηκε η εισαγωγή διαλειμμάτων με σκοπό τη διάσπαση της διάρκειας των διδακτικών περιόδων σε μικρότερες περιόδους, πρόταση η οποία οδήγησε σε μείωση των συγκεντρώσεων των PM₁₀ της τάξης του 50% σε σχέση με τις υπάρχουσες τιμές.

Συνοψίζοντας, η ποιότητα του εσωτερικού αέρα των τάξεων έδειξε να είναι υποβαθμισμένη σε σχέση με τα αυξημένα επίπεδα των εσωτερικών αέριων ρύπων, γεγονός το οποίο δεν έγινε

ιδιαίτερα αντιληπτό από τους μαθητές καθώς σε γενικές γραμμές έκριναν την ποιότητα του εσωτερικού αέρα ως ικανοποιητική. Οι μαθητές έδειξαν να συσχετίζουν την υποβάθμιση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα με υψηλότερες θερμοκρασίες κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι η θερμοκρασία είναι για αυτούς ένας κρίσιμος δείκτης ικανοποίησης με το εσωτερικό περιβάλλον. Τέλος, η επίδοση-παραγωγικότητα των μαθητών και τα συμπτώματα άρρωστου κτιρίου των μαθητών επηρεάστηκαν από τις αυξημένες συγκεντρώσεις αέριων ρύπων και τις χαμηλές τιμές αερισμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετάται η ρύπανση του εσωτερικού περιβάλλοντος από αιωρούμενα σωματίδια υπό ελεγχόμενες συνθήκες αερισμού σε κτίρια. Συγκεκριμένα, διερευνώνται οι παράμετροι και οι φυσικές διεργασίες που χαρακτηρίζουν την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος εστιάζοντας στην πειραματική μελέτη της αέριας ρύπανσης. Στο πλαίσιο αυτό διεξήχθησαν τρεις εκτενείς πειραματικές καμπάνιες σε φυσικά αεριζόμενες κατοικίες και σχολικά κτίρια της Αττικής. Τα περιβάλλοντα αυτά παρουσιάζουν ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον καθώς άνθρωποι ευάλωτοι στις αρνητικές συνέπειες της έκθεσης στους ρύπους του εσωτερικού αέρα όπως ηλικιωμένοι και παιδιά, δαπανούν σημαντικό μέρος της ημέρας τους σε αυτά.

Η πρώτη πειραματική καμπάνια έλαβε χώρα σε δύο κατοικίες της Αττικής με διαφορετικά χαρακτηριστικά αστικοποίησης. Στόχος ήταν η μελέτη και σύγκριση των επιπέδων των αέριων ρύπων στις δύο κατοικίες αλλά και η διερεύνηση της επίδρασης των δραστηριοτήτων που λαμβάνουν χώρα στα εσωτερικά περιβάλλοντα στις συγκεντρώσεις ρύπων. Τα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} επιπλέον προσεγγίστηκαν θεωρητικά με τη χρήση του αριθμητικού κώδικα ΜΙΑQ. Τα κυριότερα συμπεράσματα της μελέτης συνοψίζονται ως εξής:

- Όλες οι μετρούμενες τάξεις μεγέθους των μετρούμενων αιωρούμενων σωματιδίων (TSP, PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 και UFP), το διοξείδιο (CO_2) αλλά και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) ήταν υψηλότερα στην κατοικία στο αστικό περιβάλλον σε σχέση με την κατοικία στο ημιαστικό περιβάλλον ενώ για πολλές από τις περιπτώσεις οι συγκεντρώσεις των PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO, και CO_2 ξεπέρασαν και τις προτεινόμενες οριακές τιμές.
- Οι τιμές υποβάθρου χωρίς την παρουσία πηγών στην κατοικία στο αστικό περιβάλλον ήταν σχεδόν τριπλάσιες από τις αντίστοιχες στην κατοικία στο ημιαστικό περιβάλλον.
- Οι εσωτερικές δραστηριότητες που έλαβαν χώρα και στις δύο κατοικίες είχαν σημαντική επίδραση στα επίπεδα υπομετρικών σωματιδίων. Συγκεκριμένα, η μαγειρική αύξησε τα επίπεδα υποβάθρου από 4 έως και 18 φορές ανάλογα με τον τύπο μαγειρέματος στην κατοικία στο αστικό περιβάλλον ενώ το κάπνισμα που ήταν και η βασικότερη αιτία αύξησης υπομετρικών σωματιδίων στην κατοικία στο ημιαστικό περιβάλλον αύξησε τις τιμές υποβάθρου κατά 6 περίπου φορές.
- Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων PM_{10} στο εξωτερικό περιβάλλον διατηρήθηκαν σε χαμηλά επίπεδα και δεν φάνηκε να επιδρούν σημαντικά στις εσωτερικές

συγκεντρώσεις οι οποίες επηρεάζονταν σε μεγάλο βαθμό από τις εσωτερικές δραστηριότητες.

- Τα φάσματα των χρονοσειρών των αιωρούμενων σωματιδίων και στις δύο κατοικίες είχαν κοινή συμπεριφορά. Για σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους το φάσμα ισχύος ήταν μεγαλύτερο ενώ η καμπύλη PSD των υπομετρικών σωματιδίων ήταν πιο απότομη σε σχέση με τα μεγαλύτερα σωματίδια και για τα δύο σπίτια. Επίσης, από τη μελέτη των φασμάτων προέκυψε ο ιδανικός ρυθμός δειγματοληψίας για τον οποίο συνέβησαν έντονες μεταβολές.
- Τέλος, με τη βοήθεια του αριθμητικού κώδικα MIAQ, εκτιμήθηκε η ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{10} μετά από διαδοχικούς ελέγχους ευαισθησίας στη μία από τις κατοικίες απ' όπου προέκυψε μια καλή συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών τιμών.

Η δεύτερη πειραματική καμπάνια διενεργήθηκε σε δύο σχολεία της Ανατολικής Αττικής σε περιοχές με διαφορές στην αστική μορφολογία. Οι μετρήσεις περιελάμβαναν πέραν των μετρήσεων των φυσικοχημικών αέριων ρύπων, επιπλέον μετρήσεις για αερομεταφερόμενους μύκητες καθώς και μετεωρολογικές παράμετροι.. Τα κύρια συμπεράσματα της δεύτερης πειραματικής καμπάνιας είναι τα ακόλουθα:

- Οι μέσες συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} στα εσωτερικά περιβάλλοντα προσέγγισαν σε μεγάλο βαθμό τις αντίστοιχες εξωτερικές συγκεντρώσεις για την πλειοψηφία των μετρήσεων. Σε ορισμένες από τις περιπτώσεις οι συγκεντρώσεις αυτές ξεπέρασαν και τις προτεινόμενες οριακές τιμές.
- Οι συγκεντρώσεις των μεγαλύτερων αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_1 ήταν υψηλότερες στο σχολείο της Καισαριανής σε σχέση με το σχολείο του Υμηττού ενώ τα υπομετρικά σωματίδια παρουσίασαν αντίστροφη εικόνα στα δύο σχολεία. Στην επαναίωση των σωματιδίων εξ' αιτίας της έντονης δραστηριότητας των μαθητών αλλά και στα ελλιπή επίπεδα αερισμού ενδεχομένως να οφείλονται αυξημένες συγκεντρώσεις των μεγαλύτερων σωματιδίων ενώ οι εκπομπές των οχημάτων από τους γειτονικούς δρόμους θα μπορούσαν να είναι υπαίτιες για την αύξηση των μικρότερων σωματιδίων.
- Οι τάσεις των συγκεντρώσεων των αερομεταφερόμενων μυκήτων στα εσωτερικά περιβάλλοντα των τάξεων ακολούθησαν τις αντίστοιχες τάσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος ενώ βρέθηκαν σημαντικές θετικές συσχετίσεις μεταξύ των συγκεντρώσεων $PM_{2.5}$, PM_1 και UFP στο εσωτερικό και το εξωτερικό περιβάλλον. Επιπλέον οι λόγοι των εσωτερικών προς τις εξωτερικές συγκεντρώσεις του συνόλου των μετρούμενων παραμέτρων ήταν μεγαλύτεροι της μονάδας τόσο για τα

αιωρούμενα σωματίδια όσο και για τα επικρατέστερα γένη των αερομεταφερόμενων μυκήτων υποδηλώνοντας την παρουσία πηγών στις τάξεις. Εξαιρέση σε αυτό ήταν τα υπομετρικά σωματίδια των οποίων οι λόγοι ήταν μόλις μικρότεροι της μονάδας.

- Η κατακόρυφη κατανομή τόσο των αιωρούμενων σωματιδίων όσο και του συνόλου των αερομεταφερόμενων μυκήτων παρουσίασε πανομοιότυπο προφίλ. Συγκεκριμένα οι συγκεντρώσεις στον δεύτερο όροφο ήταν χαμηλότερες συγκριτικά με αυτές του ισόγειου και δεύτερου ορόφου. Οι εκπομπές των οχημάτων στους γειτονικούς δρόμους ενδεχομένως να οδήγησαν στην αύξηση των συγκεντρώσεων στο ισόγειο ενώ η πτώση των τιμών στον πρώτο όροφο θα μπορούσε να αποδοθεί σε τοπικές καταβόθρες όπως τα δέντρα περιμετρικά των σχολείων. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις στον δεύτερο όροφο ενδεχομένως να είναι αποτέλεσμα τοπικών πηγών.
- Κατόπιν μελέτης των διμεταβλητών συσχετίσεων μεταξύ του συνόλου των μετρούμενων παραμέτρων εντοπίστηκαν σημαντικές θετικές συσχετίσεις μεταξύ των αιωρούμενων σωματιδίων και των αερομεταφερόμενων σωματιδίων που ενδεχομένως να υποδηλώνουν κοινές πηγές δημιουργίας των ρύπων αυτών.

Η τρίτη πειραματική καμπάνια έλαβε χώρα σε 9 φυσικώς αεριζόμενα σχολεία της Δυτικής Αττικής με διαφορετικά χαρακτηριστικά μικροκλίματος και επιμέρους χαρακτηριστικά. Στη μελέτη αυτή πέραν των εκτεταμένων τόσο χρονικά όσο και ποιοτικά πειραματικών μετρήσεων πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονα και έρευνα ερωτηματολογίων στην οποία έγινε αποτίμηση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος από τους μαθητές. Επίσης μελετήθηκε η απόδοση και παραγωγικότητα των μαθητών μέσω ειδικών τεστ αξιολόγησης και επιπλέον καταγράφηκαν τα συμπτώματα άρρωστου κτιρίων των μαθητών αλλά και τα επίπεδα ενεργειακών καταναλώσεων ανά σχολείο. Από το σύνολο των συλλεγόμενων πληροφοριών πέραν της αξιολόγησης των επιπέδων των αέριων ρύπων σε σχέση με τα αντίστοιχα επίπεδα αερισμού, την παρουσία των ατόμων και τη χρήση πινάκων κιμωλίας και μαρκαδόρου, επιπλέον διερευνήθηκαν και τα επίπεδα συσχετίσεων μεταξύ των μετρούμενων επιπέδων αέριων ρύπων και της προσωπικής εκτίμησης της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος από τους μαθητές. Οι βασικότερες διαπιστώσεις της τρίτης πειραματικής καμπάνιας συνοψίζονται ακολούθως:

- Τα επίπεδα διείσδυσης αέρα για την πλειοψηφία των σχολείων ήταν αυξημένα γεγονός το οποίο αποδόθηκε στα υψηλά επίπεδα των επικρατούντων ανέμων αλλά και την παλαιότητα των κτιρίων σε ορισμένες από τις περιπτώσεις. Σε γενικές γραμμές οι μέσες τιμές αερισμού ανά σχολείο ήταν υψηλότερες από τις προτεινόμενες τιμές από διεθνείς οργανισμούς για σχολικά κτίρια γεγονός το οποίο

υποδεικνύει επαρκώς αεριζόμενες τάξεις για την πλειοψηφία των υπό μελέτη περιπτώσεων.

- Οι συγκεντρώσεις διοξειδίου συσχετίστηκαν αρνητικά με το βαθμό αερισμού και θετικά με τον αριθμό των μαθητών. Επίσης η χρονοσειρά του διοξειδίου του άνθρακα εμφάνισε συγκεκριμένη περιοδικότητα που αντιστοιχούσε στο χρόνο μεταξύ των διαλειμμάτων όπου οι τάξεις αερίζονταν και οι μαθητές ήταν έξω από την αίθουσα.
- Παρότι τα επίπεδα αερισμού ήταν επαρκή για την πλειοψηφία των περιπτώσεων, οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων και κυρίως των PM_{10} κυμάνθηκαν σε πολύ υψηλά επίπεδα ξεπερνώντας σε μεγάλο βαθμό τις προτεινόμενες οριακές τιμές. Δεδομένων των σημαντικών θετικών συσχετίσεων μεταξύ των αιωρούμενων σωματιδίων και του πλήθους των μαθητών στις τάξεις, ο περιορισμός του μέγιστου αριθμού μαθητών ανά διαθέσιμο εμβαδό σύμφωνα με διεθνείς προδιαγραφές θα συντελούσε στην αποφυγή ακραίων εσωτερικών συγκεντρώσεων. Επίσης, τα PM_{10} συσχετίστηκαν αρνητικά με τον βαθμό αερισμού ενώ η φασματική ανάλυση των χρονοσειρών τους παρουσίασε κοινές περιοδικότητες με το διοξείδιο του άνθρακα μαρτυρώντας κοινές πηγές μεταξύ των δύο παραμέτρων όπως η παρουσία των μαθητών και τα επίπεδα του αερισμού. Επιπλέον τα αιωρούμενα σωματίδια του εσωτερικού περιβάλλοντος ήταν πολλαπλάσια σε σχέση με τα αντίστοιχα επίπεδα στο εξωτερικό περιβάλλον υποδεικνύοντας σημαντικές πηγές εσωτερικά των τάξεων. Συνεπώς κατά την παρουσία έντονων πηγών στο εσωτερικό περιβάλλον, οι ρύποι του εξωτερικού αέρα δεν έχουν σχεδόν καμία επίπτωση στις εσωτερικές συγκεντρώσεις και άρα οι διαφορές του μικροκλίματος των συγκεκριμένων σχολείων σε ένα βαθμό εξομοιώθηκαν.
- Η χημική ανάλυση των αιωρούμενων σωματιδίων επιβεβαίωσε ορισμένες πηγές δημιουργίας τους. Συγκεκριμένα διαπιστώθηκαν ιδιαίτερα αυξημένες συγκεντρώσεις οργανικού άνθρακα (OC) στις τάξεις ο οποίος συσχετίστηκε με την παρουσία και τις δραστηριότητες των μαθητών αλλά και την επαναιωρούμενη σκόνη. Οι ποσότητες ασβεστίου συνδέθηκαν με τη σκόνη κιμωλίας αλλά και τη σκόνη εξ' αιτίας της φθοράς των κατασκευαστικών υλικών της τάξης. Επιπλέον, η παρουσία θεικών και νιτρικών ιόντων αποδόθηκε στις εκπομπές των οχημάτων από τους γειτονικούς δρόμους όπου μέσω του αερισμού εισέρχονταν στις τάξεις.
- Η χρήση πινάκων κιμωλίας οδήγησε σε αύξηση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων ενώ η χρήση πινάκων μαρκαδόρου αύξησε τα επίπεδα των οργανικών πτητικών ενώσεων στις τάξεις. Συνεπώς το κέρδος από τη μείωση των οργανικών πτητικών ενώσεων με τη χρήση πινάκων κιμωλίας χάθηκε με την σημαντική αύξηση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων.

- Η πλειοψηφία των μαθητών για το σύνολο των σχολείων έδειξε ικανοποιημένη με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα των τάξεων γεγονός το οποίο ήρθε σε αντίθεση με τις αντίστοιχες μετρούμενες υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων. Συνεπώς οι μαθητές δεν αντιλαμβάνονταν την αύξηση των συγκεντρώσεων των αέριων ρύπων. Οι απαντήσεις θερμικής αίσθησης των μαθητών συσχετίστηκαν θετικά με τις αντίστοιχες προβλεπόμενες τιμές των μετρήσεων ωστόσο οι μαθητές αντιλαμβάνονταν το θερμικό περιβάλλον θερμότερο σε σχέση με τις προβλεπόμενες ψήφους. Σημαντικές θετικές συσχετίσεις ανιχνεύτηκαν μεταξύ της αντίληψης της ποιότητας του αέρα από τους μαθητές και τα επίπεδα των θερμοκρασιών υποδεικνύοντας ότι οι μαθητές αντιλαμβάνονταν τη θερμοκρασία ως δείκτη της ποιότητας του εσωτερικού αέρα. Ο φωτισμός κυμάνθηκε σε υψηλά σχετικά επίπεδα ενώ αντίστοιχα οι μαθητές έδειξαν ικανοποιημένοι τόσο από το περιβάλλον φωτισμού όσο και από το περιβάλλον ακουστικής των τάξεών τους. Οι μαθητές φάνηκε να συνδέουν την υποβάθμιση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα με υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας υποδηλώνοντας ότι η θερμοκρασία είναι για τους μαθητές καθοριστικός παράγοντας για την ικανοποίησή τους με το εσωτερικό περιβάλλον.
- Αλλεργίες, νύστα και ερεθισμός της μύτης ήταν τα συμπτώματα άρρωστου κτιρίου που εμφανίστηκαν συχνότερα στο σύνολο των μαθητών, ενώ πολλά από τα συμπτώματα συσχετίστηκαν θετικά με τα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων και το διοξείδιο του άνθρακα. Επιπλέον διαπιστώθηκε η αρνητική επίδραση των αυξημένων συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα στην παραγωγικότητα των μαθητών. Επίσης, οι ενεργειακές καταναλώσεις του συνόλου των σχολείων κυμάνθηκαν σε σχετικά χαμηλά επίπεδα συγκριτικά με τη βιβλιογραφία ενώ συσχετίστηκαν θετικά με τα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων.
- Τέλος, οι μετρούμενες συγκεντρώσεις PM_{10} προσεγγίστηκαν ικανοποιητικά με τη βοήθεια του αριθμητικού κώδικα MIAQ στις σχολικές αίθουσες ενώ εκτιμήθηκαν οι ρυθμοί εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων από την παρουσία των ατόμων στις τάξεις. Συνεπώς γνωρίζοντας τις επικρατούσες συνθήκες, το βαθμό αερισμού και το πλήθος των μαθητών ανά επιφάνεια είναι δυνατόν να προβλεφθούν σε ικανοποιητικό βαθμό τα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων σε φυσικά αεριζόμενες σχολικές αίθουσες κατά την εαρινή περίοδο σε αντίστοιχα θερμά μεσογειακά κλίματα. Επιπλέον, έγινε πρόταση για την καταλληλότερη διαχείριση των διδακτικών περιόδων. Συγκεκριμένα, η εισαγωγή διαλειμμάτων με σκοπό τη διάσπαση των δύο πρώτων διδακτικών περιόδων παρατεταμένης διάρκειας σε επιμέρους περιόδους μικρότερης διάρκειας οδήγησε σε σημαντική μείωση των συνολικών συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} .

6.1 Προοπτικές Μελλοντικής Έρευνας

Στη διάρκεια των μετρήσεων της συγκεκριμένης έρευνας ενσωματώθηκαν ορισμένοι περιορισμοί (limitations). Το γεγονός ότι οι μετρήσεις αερισμού της τρίτης πειραματικής καμπάνιας διεξάγονταν στο τέλος της ημέρας απουσία μαθητών, θα μπορούσε να αποτελέσει πηγής εισαγωγής σφάλματος. Αφενός γιατί η παρουσία των μαθητών στη διάρκεια της ημέρας είναι δυνατόν να επηρεάσει την ανάμειξη του αέρα γεγονός το οποίο δεν συνυπολογίζεται στη διάρκεια των μετρήσεων απουσία μαθητών. Αφετέρου, δεδομένου ότι ο ρυθμός διεύθυνσης του αέρα εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες η ενδεχόμενη αλλαγή τους στη διάρκεια των μετρήσεων θα αλλοίωνε τις πραγματικές τιμές. Επιπλέον περιορισμό αποτελεί το γεγονός ότι δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις διαφυγής αερίων με τη μέθοδο 'blower door' με σκοπό να εξεταστεί περαιτέρω η αεροστεγανότητα των τάξεων. Επίσης, κατά τον έλεγχο παραγωγικότητας το τεστ κωδικού που μοιράζονταν στους μαθητές κατά την πρώτη και την τελευταία διδακτική ώρα ήταν το ίδιο. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει περιορισμό της πειραματικής διαδικασίας καθώς η βελτίωση της απόδοσης θα μπορούσε να αποδοθεί στην επίδραση της διαδικασίας εκμάθησης (learning effect) λόγω της επανάληψης του ίδιου τεστ.

Βασιζόμενοι στα παραπάνω η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να συμπεριλάβει τις εξής προτάσεις:

- Τη διεξαγωγή μετρήσεων σε μεγαλύτερο πλήθος σχολείων και σε σχολεία που βρίσκονται σε περιοχές με εντονότερες διαφορές μικροκλίματος με σκοπό τόσο την ενίσχυση του στατιστικού δείγματος όσο και την εκτενέστερη διερεύνηση της επίδρασης του εξωτερικού περιβάλλοντος στα επίπεδα των εσωτερικών ρύπων αλλά και τη διενέργεια πειραματικών μετρήσεων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους με στόχο την περαιτέρω αξιολόγηση της απόδοσης του φυσικού αερισμού κατά τους χειμερινούς μήνες σε θερμά Μεσογειακά κλίματα.
- Επιπλέον η μεθοδολογία θα μπορούσε να συμπληρωθεί με τη συνεχή καταγραφή μετεωρολογικών παραμέτρων στη διάρκεια των πειραμάτων συμπεριλαμβανομένων μετρήσεων της ταχύτητας και διεύθυνσης του αέρα, την εκτίμηση της αεροστεγανότητας με τη μέθοδο 'blower door', την περαιτέρω δυναμική θεωρητική εκτίμηση των συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων. Συγκεκριμένα μελλοντική θεωρητική προσέγγιση θα μπορούσε να συμπεριλάβει τη χωροχρονική μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων στα εσωτερικά περιβάλλοντα με σκοπό την κατανόηση του διαδρομών που ακολουθούν τα σωματίδια σκοπεύοντας στην ανεύρεση περαιτέρω μηχανισμών απομάκρυνσης τους. Επίσης θα μπορούσαν να επικυρωθούν (validation) τα υπολογιζόμενα στατιστικά μοντέλα πρόβλεψης υπομετρικών

σωματιδίων με την εισαγωγή νέων πειραματικών δεδομένων. Ακόμα η συλλογή εκτενέστερου δείγματος χημικών αναλύσεων των αιωρούμενων σωματιδίων θα μπορούσε να οδηγήσει στην περαιτέρω αποτίμηση των πηγών δημιουργίας τους.

- Την περαιτέρω διερεύνηση των σχέσεων μεταξύ της απόδοσης των μαθητών με τα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα με τη διεξαγωγή των τεστ παραγωγικότητας της παρούσας διατριβής με τροποποιημένο το τεστ της τελευταίας ώρας με σκοπό την αποφυγή της βελτίωσης της απόδοσης εξαιτίας της εκμάθησης του τεστ. Επίσης, η πραγματοποίηση του ελέγχου παραγωγικότητας θα μπορούσε να διεξαχθεί και κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου σε φυσικώς αεριζόμενα σχολεία με σκοπό τη διερεύνηση της απόδοσης των μαθητών με μειωμένα επίπεδα αερισμού εξ' αιτίας των χαμηλότερων θερμοκρασιών. Τέλος η εκ νέου διοργάνωση αντίστοιχης δειγματοληψίας θα μπορούσε να συμπεριλάβει και την ιατρική συμμετοχή για την ταυτόχρονη διεξαγωγή συγκεκριμένων ιατρικών εξετάσεων για τη διάγνωση συμπτωμάτων άρρωστου κτιρίου των μαθητών και στη συνέχεια τόσο τη σύγκριση και ανάλυση των τιμών αυτών σε σχέση με τα αντίστοιχα επίπεδα ρύπων στις τάξεις όσο και τη διερεύνηση συνεργιστικών επιπτώσεων στην υγεία από τους αερομεταφερόμενους μύκητες και τα αιωρούμενα σωματίδια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adhikari, A., Reponen, T., Grinshpun, S.A., Martuzevicius, D. and LeMasters, G. (2006) Correlation of ambient inhalable bioaerosols with particulate matter and ozone: A two-year study. *Environmental Pollution*, 140, (1), pp16-28.
- Afshari, A. Matson, U. et al. (2005) Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: A study conducted in a full-scale chamber. *Indoor Air*, 15(2), pp 141-150.
- Alevantis, P. (1995) Indoor air Quality in Practice. Energy conservation in buildings. European Commission Directorate General XVII for Energy, CIENE.
- Alfano, F.R., Ianniello, E., Palella, B.I. (2013). PMV-PPD and acceptability in naturally ventilated schools. *Building and Environment*, 67, pp 129-137. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.05.013>.
- Almeida, S.M., Canha, N., Silva, A., Freitas, M.dC., Pegas, P., Alves, C., Evtugina, M. and Pio, C.A. (2001) Children exposure to atmospheric particles in indoor of Lisbon primary schools. *Atmospheric Environment*, 45, (40), pp7594-7599.
- Alshitawi, M., Awbi. H., Mahyuddin, N. (2009) Particulate Matter Mass Concentration (PM10) under Different Ventilation Methods in Classrooms. *International Journal of Ventilation*, 8 (2), pp 93-108.
- Alves, C., Nunes, T., Silva, J., Duarte, M. (2013) Comfort Parameters and Particulate Matter (PM10 and PM2.5) in School Classrooms and Outdoor Air. *Aerosol and Air Quality Research*, 13, pp 1521–1535.
- Alves, C., Urban, R.C., Pegas, P.N., Nunes, T. (2014) Indoor/Outdoor relationships between PM10 and Associated Organic Compounds in a primary School. *Aerosol and Air Quality*, 14, pp 86-89. DOI: 10.4209/aaqr.2013.04.0114.
- Andersson, K., Stridh, G., Fagerlund, I., Larsson, B. (1993) The MM-questionnaires- A tool when solving indoor climate problems. Department of Occupational and Environmental Medicine, Örebro, Sweden.
- Annesi-Maesano, I., Agabiti, N., Pistelli, R. et al. (2003) Subpopulations at increased risk of adverse health outcomes from air pollution. *European Respiratory Journal Supplement*, 40, pp 57-63. DOI: 10.1183/09031936.03.00402103.
- Argiraki (2007) ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ: Εξάμηνο Ε', Σημειώσεις Μαθήματος –ΕΚΠΑ 2007., http://users.uoa.gr/~argyiraki/simeioseis_an_geoch.pdf.
- Arhami, M., Minguillon, M. C. et al. (2010) Organic compound characterization and source apportionment of indoor and outdoor quasi-ultrafine particulate matter in retirement homes of the Los Angeles Basin. *Indoor air*, 20(1), pp 17-30.
- ASHRAE RP-884, Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. 1997, de Dear R. Final report. Available online at: http://sydney.edu.au/architecture/documents/staff/richard_de_dear/RP884_Final_Report.pdf.
- ASHRAE (2005) *ASHRAE Handbook: Fundamentals*. Atlanta, GA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- ASHRAE, 62.1.2007 (2007) Ventilation for Acceptable indoor air quality, Atlanta, GA, American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE Standard 62-2007).
- ASHRAE (2010) American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Performance Measurement Protocols for Commercial Buildings, Atlanta, pp 236-257.
- ASHRAE 55 (2010) Thermal environmental conditions for human occupancy. ANSI/ASRAE Standard 55. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE Transactions 104 (1) pp991-1004.

- Assimakopoulos, M.N., Dounis, A., Spanou, A., Santamours, M. (2013) Indoor air quality in a metropolitan area metro using fuzzy logic assessment. *Science of the Total Environment*, 449, pp 461-469, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.043>.
- Azizpour, F., Moghimi, S., Mat, S., Lim, C.H., Sopian, K. (2011) Objective and subjective assessments of the thermal comfort in hot-humid region. *Recent Researches in chemistry, Biology, Environment and Culture*, ISBN: 978-1-61804—060-2.
- Bai, Z., You, Y., Gao, X., Yu, H., Yan, L., Zhu, T. (2007) Comparison of time-activity patterns in different patterns in different periods in Tianjin, China. *Epidemiology*, 17(6), S454. DOI:10.1097/00001648-200611001-01218.
- Bakke, J., Wieslander G., Norback, D. and Moen B. (2012) Eczema Increases Susceptibility to PM10 in Office Indoor Environments. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 67 (1), pp 15-21. DOI: 10.1080/19338244.2011.564236.
- Bako-Biro, Z.S., Clements-Croome, D.J., Kochhar, N., Awbi, H.B., Williams, M.J. (2012) Ventilation rates in schools and pupils' performance. *Building and Environment*, 48, pp 215-223. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.08.018.
- Bardouki H, Liakakou H, Economou C, Sciare J, Smolík J, Zdímal V, et al. (2003) Chemical composition of size-resolved atmospheric aerosols in the eastern Mediterranean during summer and winter. *Atmospheric Environment*, 37, pp 195–208.
- Bartlett, K., Martinez, M., Bert, J. (2004) Modeling of occupant-generated CO₂ dynamics in naturally ventilated classrooms. *Journal of occupational and Environmental Hygiene*, 1:3, pp 139-148. DOI: 10.1080/15459620490424393.
- Berglund B, B. B., Knoppel H, Lindvall T., Maroni M., Molhave L., Skov P. (1992) Effects of indoor air pollution on human health. *Indoor Air*, pp 2-25.
- Bhangar, S., N. A. Mullen, et al. (2011) Ultrafine particle concentrations and exposures in seven residences in northern California. *Indoor Air*, 21(2), pp 132-144.
- Braniš, M., P. Řezáčová, et al. (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), pp 143-149.
- Brunekreef B, and Holgate, ST. (2002) Air pollution and health. *The Lancet*, 360, (9341), pp 1233-1242.
- Building Bulletin 90 (1999) Lighting Design for Schools. Architects & Building Branch, Department for Education and Employment, ISBN 0 11 271041 7.
- Buonanno, G., L. Morawska, et al. (2009) Particle emission factors during cooking activities. *Atmospheric Environment*, 43(20), pp 3235-3242.
- Byrne, M. A. (1998) Aerosol exposed. Chemistry in Britain (Royal Society of Chemistry).
- Cao, J.J., Lee, S.C., Chow, J.C., Cheng, Y., Ho, K.F., Fung, K., Liu, S.X., Watson, J.G. (2005) Indoor/outdoor relationships for PM_{2.5} and associated carbonaceous pollutants at residential homes in Hong Kong-case study. *Indoor Air*, 15, pp 197-204.
- Canha, N., Almeida, M., Freitas, M., Taubel, M., Hanninen, O. (2013) Winter ventilation rates at primary schools: comparison between Portugal and Finland. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 76, pp 400-408. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/15287394.2013.765372>.
- CBE (2008) Occupant Indoor Environmental Quality (IEQ) Survey TM <http://www.cbe.berkeley.edu/research/survey.htm>, Berkeley, CA: Center for the Built Environment.
- CBE (2014) Center for the Built Environment. Indoor Environmental Quality Survey Information Packet, Berkeley.
- CEC (1989) Sick Building Syndrome- A Practical Guide. Report No 4. European Concerned Action: Indoor Air Quality and Its Impacts on Man. Cost Project 613. EUR 12294 EN. Commission of the European Communities. Luxembourg: Office for Publications of the European Communities.
- CEC (1992) Guidelines for ventilation requirements in buildings. Commission of the European Communities. Luxembourg: Office for publications of the European Communities Report No 11. (European Concerned Action: Indoor Air Quality and its Impact on Man. EUR 14449 EN).

- Chaloulakou, A., Mavroidis, I., Duci, A. (2003) Indoor and outdoor carbon monoxide concentration relationships at different microenvironments in the Athens area. *Chemosphere*, 52, pp 1007-1019. DOI:10.1016/S0045-6535(03)00263-7
- Chang, T. (2003) Assessing the Importance of Different Exposure Metrics and Time-Activity Data to Predict 24-H Personal PM_{2.5} Exposures. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 66, pp 1825-1846.
- Chau, C.K., Hui, W.K., Tse, M.S. (2008) Valuing the health benefits of improving indoor air quality in residences. *Science of the Total Environment*, 394, pp 25-38. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.01.033
- Cheng, L., Sandhu, H.S. Angle, R.P., Myrick, R.H. (1998) Characteristics of inhalable particulate matter in Alberta cities - Result for 1988 to 1989 summers. *Atmospheric Environment*, 32, pp 3835-3844.
- Cheong, K.W.D., Balasubramanian, R. and Kalaiarasan, M. (2007) Field-based investigation on vertical distribution of airborne particulate matter in multi-storey buildings. Available at: http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive/IAQVEC2007/Cheong.pdf, Assessed on August 8th 2013.
- CIBSEAM10 (2005) The Chartered Institution of Building Services Engineers. Natural ventilation in non-domestic buildings. Applications Manual. London.
- CIBSETM21 (1999) The Chartered Institution of Building Services Engineers. Minimising pollution at air intakes. Technical Memoranda. London.
- CIBSE comfort (2005) The Chartered Institution of Building Services Engineers London, CIBSE Knowledge series: KS6. Race, G.L. Latimer Trend & Co. Ltd., Plymouth PL6 7PY, ISBN-13: 978-1-903287-67-5.
- CIBSE KS6 (2006) Comfort CIBSE Knowledge Series: KS6. Lawrence R.G. CIBSE, ISBN: 978-1-903287-67-5.
- Corgnati, S.P., Filipi, M., Viazzo, S. (2007) Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: Subjective preferences and thermal comfort. *Building and Environment*, 42, pp 951-959. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.10.027.
- Corgnati, S.P., Ansaldi, R., Filipi, M. (2009) Thermal comfort in Italian classrooms under free running conditions during mid seasons: Assessment through objective and subjective approaches. *Building and Environment*, 44, pp 785-792. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.05.023.
- Corsi, R. L., Chiang, C.Y. (2000) The effect of vacuuming on indoor air particulate matter. Proceeding of A&WMA's 93rd Annual Conference and Exhibition on Indoor Air Quality Issues in Educational/Public/Federal Facilities. *Air and Waste Management Association*, Salt Lake City, UT, USA. AB-7a.
- Dascalaki, E.G., Sermpetzoglou, V.G. (2011) Energy performance and indoor environmental quality in Hellenic schools. *Energy and Buildings*, 43, pp 718-727. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.11.017.
- Dasgupta, S., M. Huq, et al. (2006) Indoor air quality for poor families: new evidence from Bangladesh. *Indoor air*, 16(6), pp 426-444.
- de Dear, R. J. and Brager, G. S. (1998) Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. San Francisco, CA, USA, ASHRAE.
- de Dear, R.J., Leow, K.G., Ameen, A. (1991) Thermal comfort in the humid tropics. Part I. Climate chapter experiments on temperature preferences in Singapore, *ASHRAE Transactions* 97 (1), pp 874-879.
- de Dear, R.J. and Brager, G.S. (2002) Thermal comfort in naturally ventilated buildings. Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 34, pp 549-561.
- Degobbi C, Lopes FDTQS, Carvalho-Oliveira R, Muñoz JE and Saldiva PHN: (2011) Correlation of fungi and endotoxin with PM_{2.5} and meteorological parameters in atmosphere of Sao Paulo, Brazil. *Atmospheric Environment*, 45, (13), pp 2277-2283.
- De Guili, V., Da Pos, O., De Carli, M. (2012) Indoor environmental quality and pupil perception in Italian primary schools. *Building Environment*, 56, pp 335-345, DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.03.024

- Dermentzoglou M., Manoli, E., Voutsas D., Samara, C. (2003) Sources and patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in fine indoor particulate matter of Greek houses. *Fresenius Environmental Bulletin*, 12(12), pp 1511-1519.
- Diapouli, E., A. Chaloulakou, et al. (2007a) Levels of ultrafine particles in different microenvironments--implications to children exposure. *The Science of the total environment*, 388 (1-3), pp 128-136.
- Diapouli, E., G. Grivas, et al. (2007b) PM10 and Ultrafine Particles Counts In-Vehicle and On-Road in the Athens Area. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 8(1), pp 89-97.
- Diapouli, E., A. Chaloulakou, et al. (2008) Indoor and outdoor PM mass and number concentrations at schools in the Athens area. *Environmental monitoring and assessment*, 136(1-3), pp 13-20.
- Dockery, D.W. and Spengler, J.D. (1981) Personal exposure to respirable particulates and sulfates. *Journal of Air Pollution Control Association*, 32 (2), pp 153-159.
- Dockery, D.W., Pope, Iii C.A., Xu, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Fay, M.E., Ferris, B.G. and Speizer, F.E. (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *New England Journal of Medicine*, 329, (24), pp1753-1759.
- Donaldson, K., and Stone, V. (2003) Current hypotheses on the mechanisms of toxicity of ultrafine particles. *Annali dell'Istituto Superiore di Sanita*, 39, (3), pp 405-410.
- Donghyun, R., Persily Andrew W. L. (2010) Infiltration of Outdoor Ultrafine Particles into a Test House. *Environmental Science & Technology*, 44(15).
- Dorgan, C. B., Dorgan, C. E., Kanarek, M.S., Willman, A. J. (1998) Health and productivity benefits of improved indoor air quality, ASHRAE Transactions. Vol. 104(1A), pp 658-666.
- Dorizas, P.V., Kapsanaki-Gotsi, E., Assimakopoulos, M.N. and Santamouris, M. (2012) Particulate matter and airborne fungi concentrations in schools in Athens. *Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics* (Helmis CG and Nastos PT eds.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Springer Atmospheric Sciences, 2, pp 931-937. DOI: 10.1007/978-3-642-29172-2_130.
- Dorizas, P.V., Assimakopoulos, M.N., Santamouris, M. (2013) On the study of the indoor environment in private residences. 11th REHVA World Congress & 8th International Conference on IAQVEC, CLIMA 2013, Prague, 16-19 June 2013.
- Dorizas, P.V., Kapsanaki-Gotsi E., Assimakopoulos, M.N., Santamouris, M. (2013a) Correlation of Particulate Matter with Airborne Fungi in Schools in Greece. *International Journal of Ventilation*, 12(1), pp 1-16. DOI: <http://www.ijvent.org/doi/abs/10.5555/2044-4044-12.1.1>.
- Dorizas, P.V., Assimakopoulos, M.N., Helmis, C., Santamouris, M. (2013b) Analysis of the indoor air quality in Greek primary schools. *Proceedings of the 34th AIVC-3rd TightVent-2nd Cool Roofs'-1st venticool Conference*, 25-26 September, Athens 2013, pp 110-113.
- Dorizas, P.V., Assimakopoulos, M.N., Helmis, C., Santamouris, M. (2013c). A study on the thermal environment in Greek primary schools based on questionnaires and concurrent measurements. *Proceedings of the 34th AIVC-3rd TightVent-2nd Cool Roofs'-1st Venticool Conference*, 25-26 September, Athens 2013, pp 13-15.
- Dorizas, P.V., Assimakopoulos, M.N., Helmis, C., Santamouris, M. Signaios, J., Stathi, K. (2013d) Does indoor environmental quality affect students performance? *Proceedings of the 34th AIVC-3rd TightVent-2nd Cool Roofs'-1st Venticool Conference*, 25-26 September, Athens 2013, pp 113-115.
- Dorizas, P.V., Kapsanaki-Gotsi, E., Assimakopoulos, M.N., Helmis, C., Santamouris, M. (2013e) Indoor and outdoor distribution of airborne pollutants in naturally ventilated classrooms. *Proceedings of the 34th AIVC-3rd TightVent-2nd Cool Roofs'-1st Venticool Conference*, 25-26 September, Athens 2013, pp 115-117.
- Dorizas, P.V., Assimakopoulos, M.N., Helmis, C., Santamouris, M. (2015a) An integrated evaluation study of the ventilation rate, the exposure and the air quality in naturally ventilated classrooms in the Mediterranean region during spring. *Science of the Total Environment*, pp 557-570. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.060>.

- Dorizas, P.V., Assimakopoulos, M.N., Santamouris, M. (2015b) A Holistic Approach for the Assessment of the Indoor Environmental Quality, Students Productivity and Energy Consumption in Primary Schools. *Environmental Monitoring and Assessment*, (Under review).
- Ec-europa (2010) European Commission Environment, Air Quality Standards. EN 12464-1. The Lighting of Workplaces.
- EPA (1991) U.S. Environmental Protection Agency, Building Air Quality. A guide for building owners and facility managers.
- EPA (1993) US Environmental Protection Agency PA. The inside story a guide to Indoor Air Quality. EPA/402-F-94-005, Washington DC <http://www.epa.gov/iaq/pubs/insidest.html>
- EPA (1995) United States Environmental Protection Agency, Indoor Air Quality tools for schools. Indoor Air, <http://www.epa.gov/iaq/schools/actionkit.html>. Accessed 13 March 2012.
- EPA (1996) Air Quality Criteria for Particulate Matter. United States Environmental Protection Agency, Volume I of III (Office of Research and Environmental Protection Washington DC 20460). <http://www.epa.gov/iaq/pubs/insidestory.html>. Accessed 13 March 2012.
- EPA (2014) United States Environmental Protection Agency. An Introduction to Indoor Air Quality (IAQ). Available online at: <http://www.epa.gov/iaq/voc.html>. Accessed on January 30th 2014.
- EPABIOLOGIC (2011) Environmental Protection Agency, Biology. <http://www.epa.gov/iaq/biologic.html>.
- EPAPMsampling (2011) Environmental Protection Agency, Sampling. http://www.epa.gov/apti/Materials/APTI%20435%20student/Student%20Manual/Chapter_4_noTOC-cover_MRpf.pdf
- Ess (2010) Commission proposes new air quality limit values. Environmental Software and Services.
- Fang, G.C., Chang, C.N., Chu, C.C., Wu, Y.S., Fu, P. P.C., Yang, I.L., Chen, M.H. (2003) Characterization of particulate, metallic elements of TSP, PM_{2.5} and PM_{2.5-10} aerosols at a farm sampling site in Taiwan, Taichung. *The Science of The Total Environment*, 308, pp 157-166.
- Ferro, A. R., R. J. Kopperud, et al. (2004) Source Strengths for Indoor Human Activities that Resuspend Particulate Matter. *Environmental Science and Technology*, 38(6), pp 1759-1764.
- Fromme, J., Twardella, D., Dietrich, S., Heitmann, D., Schierl, R., Liebl, B., Ruden, H. (2007) Particulate matter in the indoor air of classrooms-exploratory results from Munich and surrounding area. *Atmospheric Environment*, 41, pp 854-866. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.08.053
- Fromme, H., Diemer, J., Dietrich, S., Cyrus, S., Heinrich, J., Lang, W., Kiranoglu, M. and Twardella, D. (2008) Chemical and morphological properties of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}) in school classrooms and outdoor air. *Atmospheric Environment*, 42, (27), pp 6597-6605.
- Frontczak, M., Wargocki, P. (2011) Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and Environment*, 46, pp 922-937. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.021>
- Frontczak, M., Andersen, R.V., Wargocki, P. (2012). Questionnaire survey on factors influencing comfort with indoor environmental quality in Danish housing. *Building and Environment*, 50, pp 56-64.
- Gaitani, N., Lehmann, C., Santamouris, M., Mihalakakou, G. and Patargias, P. (2010) Using principal component and cluster analysis in the heating evaluation of the school building sector. *Applied Energy*, 87, (6), pp 2079-2086.
- Gao (1993) United States General Accounting Office. Program Evaluation and Methodology Division. Developing and Using Questionnaires.
- Gedekakis, I. (2003) Ατμοσφαιρική ρύπανση: Επιπτώσεις, Έλεγχος και Εναλλακτικές τεχνολογίες. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.

- Gemenetzi, P., Moussas, P. et al. (2006) Mass concentration and elemental composition of indoor PM_{2.5} and PM₁₀ in University rooms in Thessaloniki, northern Greece. *Atmospheric Environment*, 40(17), pp 3195-3206.
- Geodata, (2010) Available at: <http://www.geodata.gov.gr/maps/>, Accessed on July 10th, 2013
- Glytsos, T., Ondráček, J. et al. (2010) Characterization of particulate matter concentrations during controlled indoor activities. *Atmospheric Environment*, 44(12), pp 1539-1549.
- Gomiscek, B., Stopper, S., Preining, O., Hauck, H., 2004. Spatial and temporal variations of PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ and particle number concentration during the AUPHEP project. *Atmospheric Environment*, 38, this issue, doi:10.1016/j.atmosenv.2004.03.056.
- Götschi, T., Oglesby, L. et al. (2002) Comparison of Black Smoke and PM_{2.5} Levels in Indoor and Outdoor Environments of Four European Cities. *Environmental Science & Technology*, 36(6), pp 1191-1197.
- Goyal, R. and Khare M. (2011) Indoor air quality modeling for PM₁₀, PM_{2.5}, and PM_{1.0} in naturally ventilated classrooms of an urban Indian school building. *Environmental Monitoring and Assessment*, 176(1-4), pp 501-516.
- Guo, H., Morawska, L., He, C., Zhang, Y.L., Ayoko, G. and 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 International*, 17 (6), pp 1268-1278. DOI:10.1007/s11356-010-0306-2
- Gysels, K. (2004) Indoor environment and conservation in the Royal Museum of Fine Arts, Antwerp, Belgium. *Journal of Cultural Heritage*, 5(2), pp 221-230.
- Grinn-Gofroń, A., Strzelczak, A. and Wolski, T. (2011) The relationships between air pollutants, meteorological parameters and concentration of airborne fungal spores. *Environmental Pollution*, 159, (2), pp 602-608.
- Habil, M., Taneja, A. (2011) Children's Exposure to Indoor Particulate Matter in Naturally Ventilated Schools in India. *Indoor and Built Environment*, 20(4), pp 430-448. DOI:10.1177/1420326X11409455
- Halios, C., Santamouris, M. et al. (2009) Exposure to fine particulate matter in ten night clubs in Athens Greece: studying the effect of ventilation, cigarette smoking and resuspension. *Science of the Total Environment*, 407(17), pp 4894-4901.
- Hammed, Abdel A.A., Khoder, M.I., Ibrahim, Y.H., Saeed, Y., Osman, M.E. and Ghanem, S. (2012) Study on some factors affecting survivability of airborne fungi. *Science of the Total Environment*, 414, pp 696-700.
- Hänninen, O. O., Lebre, E. et al. (2004) Infiltration of ambient PM_{2.5} and levels of indoor generated non-ETS PM_{2.5} in residences of four European cities. *Atmospheric Environment*, 38(37), pp 6411-6423.
- Hargreaves, M., Parappukkaran, S., Morawska, L., Hitchins, J., He, C. and Gilbert, D. (2003) A pilot investigation into associations between indoor airborne fungal and non-biological particle concentrations in residential houses in Brisbane, Australia. *Science of the Total Environment*, 312, (1-3), pp 89-101.
- Hassanvand, M.S., Naddafi, K., Faridi S., Arhami, M., Nabizadeh, R., HosseinSowlat M., Pourpak, Z., Rastkari, N., Momeniha, F., Kashani, H., Gholampour, A., Nazmara, S., Alimohammadi, M., Goudarzi, G., Yunesian, M. (2014) Indoor/outdoor relationships of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ mass concentrations and their water-soluble ions in a retirement home and a school dormitory. *Atmospheric Environment*, 82, pp 375-382. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.10.048
- Haverineen-Shaughnessy, U., Moschandreas, D.J., Shaughnessy, R.J. (2011) Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement. *Indoor Air*, 21, 121-131. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2010.00686.x.
- He, C., Morawska, L. et al. (2004) Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. *Atmospheric Environment*, 38(21), pp 3405-3415.
- Hedge, A., Erickson, W. A. et al. (1996) Predicting sick building syndrome at the individual and aggregate levels. *Environment International*, 22(1), pp 3-19.

- Helmis, C.G., Tzoutzas, J., Flocas, H.A., Halios, C.H., Stathopoulou, O.I., Assimakopoulos, V.D., Panis, V., Apostolatu, M., Sgouros, G. (2007) Indoor air quality in a dentistry clinic. *Science of the Total Environment*, 377, pp 349-365, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.01.100
- Helmis, C.G., Assimakopoulos, V.D., Flocas, H.A., Stathopoulou, O.I., Sgouros, G. and Hatzaki, M., (2009) Indoor air quality assessment in the Air Traffic Control Tower of the Athens Airport, Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*, 148, pp 47-60.
- Hien, P. D., Bac, V. T. et al. (2002) Influence of meteorological conditions on PM_{2.5} and PM_{2.5-10} concentrations during the monsoon season in Hanoi, Vietnam. *Atmospheric Environment*, 36(21), pp 3473-3484.
- Hinds, W. C. (1999) Properties, behavior, and measurement of airborne particles. *Aerosol Technology*, Second edition. John Wiley & Sons, inc., pp 206-213.
- Houghton, J. T., G. J. Jenkins, et al. (1990) Climate change: the IPCC scientific assessment. *Climate change: the IPCC scientific assessment*.
- Hueglin, C., Gehrig, R., Baltensperger, U., Gysel, M., Monn, C., Vonmont, H. (2005) Chemical characterization of PM_{2.5}, PM₁₀ and coarse particles at urban, near-city and rural sites in Switzerland. *Atmospheric Environment*, 39, pp 637-651.
- Humphreys, M.A. (1977) A study of the thermal comfort of primary schools children in summer. *Building and Environment*, 12, pp 231-239.
- Humphreys, M.A. and Nicol, J.F., (1998) Understanding the Adaptive Approach to Thermal Comfort.
- Hussein, T., K. Hameri, et al. (2005). Indoor and outdoor particle size characterization at a family house in Espoo–Finland. *Atmospheric Environment*, 39(20), pp 3697-3709.
- ISO 7730 (2005) Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Brussels: International Organization of Standardization.
- ISO 7726 (1998) Ergonomics of the thermal environment-instruments for measuring physical quantities. Geneva: International Organization of Standardization.
- ISO/IEC 17025:2005. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories: International Organization of Standardization.
- ISO 16000-1:2004 Indoor Air: Part 1: General aspects of sampling strategy: International Organization of Standardization: International Organization of Standardization.
- ISO 12569:2012 Thermal performance of buildings and material-Determination of specific airflow rate in buildings-Tracer gas dilution method.
- ISO 21501-4:2007. Determination of particle size distribution- Single particle light interaction methods-Part 4: Light scattering airborne particulate counter for clean spaces.
- Issa, M.H., Rankin, J.H., Attalla, M., Christian, A.J. (2011) Absenteeism, Performance and occupant satisfaction with the indoor environment of green Toronto schools. *Indoor Built and Environment*, 20(5), pp 511-523. DOI: 10.1177/1420326X11409114
- Jamriska, M., Thomas, S., Morawska, L., Clark, B.A. (1999) Relation between indoor and outdoor exposure to fine particles near a busy arterial road. *Indoor Air*, 11, pp 35-48. DOI: 10.1111/j.1600-0668.1999.t01-2-00002.x
- Jeng, H. A. (2010) Chemical composition of ambient particulate matter and redox activity. *Environmental monitoring and assessment*, 169(1-4), pp 597-606.
- Jenkins, P.L., Phillips, T.J., Mulberg, E.J. and Hui, S.P. (1992) Activity patterns of Californians: Use of and proximity to indoor pollutant sources. *Atmospheric Environment - Part A General Topics*, 26 A, (12), pp 2141-2148.
- Ji, X., O. Le Bihan, et al. (2010) Characterization of particles emitted by incense burning in an experimental house. *Indoor air*, 20(2), pp 147-158.
- Jolliffe, I.T. (2002) Principal Component Analysis- Second Edition, Springer Series in Statistics, Springer-Verlag New York Berlin Heidelberg.
- John, K., Karnae, S., Crist, K., Kim, M., Kulkarni, A. (2007) Analysis of trace elements and ions in ambient fine particulate matter at three elementary schools in Ohio. *J. Air Waste Management Association*, 57, pp 394–406.

- Johnson, T., Myers, J., Kelly, T., Wisbith, A., Ollisonc, W. (2004) A pilot study using scripted ventilation conditions to identify key factors affecting indoor pollutant concentration and air exchange rate in a residence. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 14(1), pp 1-22
- Jones, N.C., Thornton, C.A., Mark, D., Harrison, R.M. (2000) Indoor/Outdoor relationships of particulate matter in domestic homes with roadside, urban and rural locations. *Atmospheric Environment*, 34, pp 4375-4383. DOI:10.1016/S1352-2310(99)00489-6
- Jung, K.H., Bernabe, K., Moors, K., Yan, B., Chillrud, Whyatt, R., Camann, D., Kinney, P.L., Perera, F.P. and Miller, R.L. (2011) Effects of floor level and building type on residential levels of outdoor and indoor polycyclic aromatic hydrocarbons, black carbon, and particulate matter in New York city. *Atmosphere*, 2, pp 96-109.
- Kalaiarasan, M., Balasubramanian, R., Cheong, K.W.D., Tham, K.W. (2009) Traffic-generated airborne particles in naturally ventilated multi-storey residential buildings of Singapore: Vertical distribution and potential health risks. *Building and Environment*, 44, pp 1493-1500.
- Kalogerakis, N., Paschali, D., Lekaditis, V., Pantidou, A., Eleftheriadis, K. and Lazaridis, M. (2005) Indoor air quality—bioaerosol measurements in domestic and office premises. *Journal of Aerosol Science*, 36, (5-6), pp 751-761.
- Kameda, K., Murakami, S., Ito, K., Kaneko, T. (2007) Study on productivity in the classroom (Part 3) Nationwide questionnaire survey on the effects of IEQ on learning performance. Proceedings of Clima 2007. Well Being Indoors.
- Khattab, A. and Levetin, E. (2008) Effect of sampling height on the concentration of airborne fungi spores. *Annals Allergy Asthma and Immunology*. 101, pp 529-534.
- Khillare, P.S., Pandey, R., Balachandran, S. (2004) Characterization of indoor PM10 in residential areas of Delhi. *Indoor and Built Environment*, 13, pp 139-147.
- Kim, H.H., Kim, C.S., Lim, Y.W., Suh, M.A., Shin, D.C. (2010) Indoor and Outdoor Air Quality and its Relation to Allergic Diseases among Children: A case Study at a primary School in Korea. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 4-3, pp 157-165. DOI: 10.5572/ajae.2010.4.3.157.
- Kleeman, M. (1998) Source contributions to the size and composition distribution of urban particulate air pollution - model performance using a lumped chemical mechanism. *Atmospheric Environment*, 32, pp 2803-2816.
- Knoppel H., W. P. (1992) Chemical, Microbiological, Health and Comfort Aspects of Indoor Air Quality- State of the Art in SBS. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1992.
- Koulouri, E., Saarikoski, S., Theodosi, C., Markaki, Z., Gerasopoulos, E., Kouvarakis, G., et al. (2008) Chemical composition and sources of fine and coarse aerosol particles in the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment*, 42, pp 6542-50. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.04.010.
- Koutrakis, P., Briggs, SLK., Leaderer B.P. (1992) Source apportionment of indoor aerosols in Suffolk and Onondaga countries, New York. *Environmental Science & Technology*. 26, pp 521-527.
- Kumar, P., A. Robins, et al. (2010) A review of the characteristics of nanoparticles in the urban atmosphere and the prospects for developing regulatory controls. *Atmospheric Environment*, 44(39), pp 5035-5052.
- Kwong, Q.J. and Adam, N.M. (2011) Perception of thermal comfort in the enclosed transitional space of tropical buildings. *Indoor and built environment*, 20(5), pp 524-533. DOI: 10.1177/1420326X11411136.
- Liddament, M. (1996). A guide to energy efficient ventilation. AIVC guide to ventilation, Great Britain.
- Lin, W.H. and Li, C.S. (2000) Associations of fungal aerosols, air pollutants, and meteorological factors. *Aerosol Science and technology*, 32, (4), pp 359-368.
- Liu, B. Y. H. and Pui D. Y. H. (1974) Electrical neutralization of aerosols. *Journal of Aerosol Science*, 5(5), pp 465-472.
- Lin, J.J. (2002) Characterization of the major chemical species in PM2.5 in the Kaohsiung City, Taiwan. *Atmospheric Environment*, 36(12), pp 1911-1920.

- Long, C. M., Suh, H.H. et al. (2000) Characterization of indoor particle sources using continuous mass and size monitors. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 50(7), pp 1236-1250.
- Luoma, M. and Batterman S.A. (2001) Characterization of particulate emissions from occupant activities in offices. *Indoor air*, 11(1), pp 35-48.
- Madeco, A., Magalhaes, O., Brito, A., Mayan, O. (2013) Characterization of indoor Environmental Quality in primary Schools in Maia: A Portuguese Case Study, *Human and Ecological Risk Assessment*, 19, pp 126-136. DOI: 10.1080/10807039.2012.683751.
- Mage, D. T., Ott, W. R. (1996) Accounting for nonuniform mixing and human exposure in indoor environments. In: Tichenor, B. A., ed. *Characterizing sources of indoor air pollution and related sink effects*. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials. pp 263-278.
- Manoli, E., Voutsas, D. et al. (2002) Chemical characterization and source identification/apportionment of fine and coarse air particles in Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Environment*, 36(6), pp 949-961.
- Matson, U. (2005a) Indoor and outdoor concentrations of ultrafine particles in some Scandinavian rural and urban areas. *The Science of the total environment*, 343(1-3), pp 169-176.
- Matson, U. (2005b) Comparison of the modelling and the experimental results on concentrations of ultra-fine particles indoors. *Building and Environment*, 40(7), pp 996-1002.
- McCormack, M. C., P. N. Breyse, et al. (2008) Common household activities are associated with elevated particulate matter concentrations in bedrooms of inner-city Baltimore pre-school children. *Environmental research*, 106(2), pp 148-155.
- Mendell M.J. and Heath G.A. (2005) Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air*, 15, 27-52. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2004.00320.x
- Miller J D (1992) Microbial contamination of indoor air, Proc Indoor air quality, ventilation and energy conservation. 5th International Jacques Cartier Conference, Montreal, Canada, 1992.
- Mitsakou, C., Housiadas, C. et al. (2007) Lung deposition of fine and ultrafine particles outdoors and indoors during a cooking event and a no activity period. *Indoor Air*, 17(2), pp 143-152.
- Molhave L. (1990) Volatile organic Compounds, Indoor Air Quality and Health. *Indoor Air*, 4, 357-376. DOI: 10.1111/j.1600-0668.1991.00001.x
- Monn, C., O. Brändli, et al. (1998) Personal exposure to nitrogen dioxide in Switzerland. *Science of the Total Environment*, 215(3), pp 243-251.
- Montoya, L.D. and Hildemann L.M. (2005) Size distributions and height variations of airborne particulate matter and cat allergen indoors immediately following dust-disturbing activities. *Aerosol Science*, 36, pp 735-749.
- Morawska, L., He, C., Hitchins, J., Gilbert, D., Parappukkaran, S. (2001) The relationship between indoor and outdoor airborne particles in the residential environment, *Atmospheric Environment*, 35, pp 3463-3473. DOI: 10.1016/S1352-2310(01)00097-8.
- Morawska, L. Zhang J.J. (2002) Combustion sources of particles. 1. Health relevance and source signatures. *Chemosphere*, 49, pp 1045-1058.
- Morawska, L., He, C. et al. (2003) Characteristics of particle number and mass concentrations in residential houses in Brisbane, Australia. *Atmospheric Environment*, 37(30), pp 4195-4203.
- Mullen, N. A., Liu, C. et al. (2010) Ultrafine particle concentrations and exposures in four high-rise Beijing apartments. *Atmospheric Environment*, 45 (40), pp 7574-7582.
- Mumovic, D., Palmer, J., Davies, M., Orme, M., Ridley, I., Oreszczy, T., Judd, C., Critchlow, R., Medina, H.A., Pilmoor, G., Pearson, C. and Way, P. (2009a) Winter indoor air quality, thermal comfort and acoustic performance of newly built secondary schools in England. *Building and Environment*, 44, (7), pp 1466-1477.

- Mumovic, D., Davies, M., Ridley, I., Altamirano-Medina, H., Oreszczyn, T. (2009b) A methodology for post-occupancy evaluation of ventilation rates in schools. *Building Services Engineering Research and Technology*, 30(2), pp 143-152. DOI: 10.1177/0143624408099175.
- Myhrvold, A.N., Olsen, E., Lauridsen, O. (1996) Indoor environment in schools pupils health and performance in regard to CO₂ concentrations. In: Proceedings of seventh international conference on indoor air quality and climate. 4, pp 369-374.
- Nantka, M. (1990) Comparison of different methods for airtightness and air change rate determination. In: Sherman, M.H., Air change Rate and Airtightness in Buildings, ASTM STP 1067. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, pp 267-282.
- National Research Council. (1993) Protecting visibility in national parks and wilderness areas. National Academy Press. 3v. Washington, DC.
- Nazaroff W.W. and Cass G.R., (1986) Mathematical modeling of chemically reacting pollutants in indoor air. *Environmental Science Technology*, 20(9), pp 924-934
- Nazaroff W.W. and Cass G.R. (1989) Mathematical modeling of indoor aerosol dynamics. *Environmental Science Technology*, 24, pp 66-67.
- Nazaroff, W. W. (2004) Indoor particle dynamics. *Indoor Air*, Supplement 14(SUPPL. 7), pp 175-183.
- NIOSH (1997) National Institute for Occupational Safety and Health. HETA 97-0031. Indoor Air Quality and Work Environment Symptoms Survey. Blue Cross and Blue Shield of Michigan. May 1997.
- O'Dowd, C. D., Smith, M. H. et al. (1997) Marine aerosol, sea-salt, and the marine sulphur cycle: a short review. *Atmospheric Environment*, 31(1), pp 73-80.
- Özkayanak, H., Xue, J., Spengler, J.D. Wallace, L.A., Pellizzari, L.D., Jenkins, P. (1996) Personal exposure to airborne particles and metals: results from particles TEAM study in Riverside, C.A. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 6, pp 57-78.
- Paoletti, L., B. DeBerardis, et. al. (2006) Influence of tobacco smoke on indoor PM₁₀ particulate matter characteristics. *Atmospheric Environment*, 40(18), pp 3269-3280.
- Pegas, P.N., Nunes, T., Alves, C.A., Silva, J.R., Vieira, S.L.A., Caseiro, A., Pio, C.A.. (2012) Indoor and outdoor characterization of organic and inorganic compounds in city centre and suburban elementary schools of Aveiro, Portugal. *Atmospheric Environment*, 55, pp 80-89.
- Pope, Iii C.A., Bates, D.V. and Raizenne, M.E. (1995) Health effects of particulate air pollution: Time for reassessment? *Environmental Health Perspectives*, 103, (5), pp 472-480.
- Pope, Iii C.A., Dockery, D.W. (2006) Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *JAMA*, 56, 709-742. DOI: 10.1080/10473289.2006.10464485.
- Quang, T.N., He, C., Morawska, L., Knibbs, L.D. and Falk M. (2012) Vertical particle concentration profiles around urban office buildings. *Chemistry and Physics*, 12, pp 5017-5030.
- Raisi, L., Lazaridis, M. and Katsivela, E. (2010) Relationship between airborne microbial and particulate matter concentrations in the ambient air at a Mediterranean site. *Global Nest Journal*, 12, (1), pp 84-91.
- Ramanathan, V. et al., (1987) Climate-chemical interactions and effects of changing atmospheric trace gases. Deep Sea Research Part B. *Oceanographic Literature Review*, 35(6), pp 529-529.
- Raysoni, A. U., Stock, T.H., Sarnat, J.A., Sosa, T.M., Sarnat, S.E, Holguin, F., Greenwald, R., Johnson, B., Li, W-W (2013) Characterization of traffic-related air pollutant metrics at four schools in El Paso, Texas, USA: Implications for exposure assessment and sitting schools in urban areas. *Atmospheric Environment*, 80, pp 140-151.
- Reardon, J. Z. (2007) Environmental Tobacco Smoke: Respiratory and Other Health Effects. *Clinics in chest medicine*, 28(3), pp 559-573.
- Ricciardi, P., Buratti, C. (2012) Thermal comfort in open plan offices in northern Italy: An adaptive approach. *Building and Environment*, 56, pp 314-320. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.03.019.

- Riley, W. J., McKone, T. E. et al. (2002) Indoor Particulate Matter of Outdoor Origin: Importance of Size-Dependent Removal Mechanisms. *Environmental Science & Technology* 36(2), pp 200-207.
- Rim D., Wallace, L., Persily A. (2010) Infiltration of Outdoor Ultrafine Particles into a Test House. *Environmental Science & Technology*, 44(15).
- Santamouris, M., Mihalakakou, G., Patarias, P., Gaitani, N., Sfakianaki, K., Papagralstra, M., Pavlou, C., Doukas, P., Primikiri, E., Geros, V., Assimakopoulos, M.N., Mitoula, R., Zerefos, S. (2007a) Using intelligent clustering techniques to classify the energy performance of school buildings. *Energy and Buildings*, 39, pp 45-51. DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.04.018.
- Santamouris, M., Georgiou, M.A.K., Livada, I., Doukas, P., Assimakopoulos, M.N., Sfakianaki, A., Pavlou, K., Geros, V., Papagrastra, M. (2007b) Indoor Air Quality in Fifty Residences in Athens. *International Journal of Ventilation*, 5(4), pp 367-380.
- Santamouris M. and Papaglastra M., Ed. (2007c). Pollution and Indoor Air Quality in Buildings. Athens,, ΤεΚΔΟΤΙΚΗ.
- Santamouris, M., Synnefa, A., Assimakopoulos, M., Livada, I., Pavlou, K., Papaglastra, M. Gaitani, N., Kolokotsa, D., Assimakopoulos, V. (2008) Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation. *Energy and Buildings*, 40, pp 1833-1843. DOI:10.1016/j.enbuild.2008.04.002.
- Saraga, D., Maggos, T., Vassilakos, C., Michopoulos, J., Helmis, C.G., Bartzis, J.G., (2006) Contribution from smoking to PM_{2,5}, PM₁ particles and VOC's concentrations in residential houses in Athens, Greece. Air Pollution. 14th International conference. The New Forest, UK, May 2006, pp 22-24.
- Sarantopoulos, G., Lykoudis, S., Kassomenos, P. (2013) Noise levels in primary schools of medium sized city in Greece. *Science of the Total Environment*, 482-483, 493-500, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.010>.
- Schwartz, J. (2004) Air Pollution and Children's Health. *Pediatrics* 113 (4 II), pp 1037-1043.
- Schweizer, C., Edwards, R.D., Bayer-Oglesby, L., Gauderman, W.J., Ilacqua, V., Jantunen, M.J., Lai, H.K., Nieuwenhuijsen, M., Kunzli, N., (2007) Indoor time-microenvironment-activity patterns in seven regions of Europe. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 17, pp 170-181.
- Seinfeld, J.H., Pandis S.N. (2006) Atmospheric Chemistry and Physics – From Air Pollution to Climate Change, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- Seppanen, O.A., Fisk, W.J. Mendel, M.J. (1999) Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. *Indoor Air*, 9, pp 333-341.
- Shaughnessy, R.J., Haverinen-Shaughnessy, U., Nevalainen, A., Moschandreas, D. (2006) A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance. *Indoor Air*, 16, pp 465-468. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2006.00440.x.
- Shendell, D.G., Prill, R., Fish, W.J., Apte, M.G., Blake, D., Faulker, D. (2004) Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*, 14, pp 333-341. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x.
- Sherman, M. (1990) Tracer-Gas Techniques for measuring ventilation in a single zone, *Building and Environment*, 25 (4), pp 365-374. DOI:10.1016/0360-1323(90)90010-O.
- Sherman, M., Dickerhoff, D. (1989). A multigas tracer system for multizone air flow measurements. Proceedings ASHRAE/DOE/BTECC conference, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings Conference IV. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, pp 417-432.
- Sifnaios, J., Dorizas, P.V., Assimakopoulos, M.N. (2014) A Study of Carbon Dioxide Concentrations in Elementary Schools. 35th AIVC-4rd TightVent -2nd venticool Conference. Poznan, Poland, 24-25 September 2014.
- Silvers, A., Florence, B.T., Rourke, D.L., Lorimor, R.J. (1994) How children spend their time-a sample survey for use in exposure and risk assessment. *Risk Analysis*, 14(6), pp 931-944. DOI: 10.1111/j.1539-6924.1994.tb00062.x.

- SINPHONIE, project. Schools Indoor Pollution and Health: Observatory Network in Europe Available at: <http://www.sinphonie.eu/about>, accessed on July 24th, 2013.
- Sioutas, C., Delfino, R. J. et al. (2005) Exposure Assessment for Atmospheric Ultrafine Particles (UFPs) and Implications in Epidemiologic Research. *Environmental Health Perspectives*, 113(8), pp 947-955.
- Siskos, P.A., Bouba, K.E., Stroubou, A.A. (2001) Determination of selected pollutants and measurement of physical parameters for the evaluation of indoor air quality in school buildings in Athens, Greece. *Indoor and Built Environment*, 10(3-4), pp 185-192. DOI:10.1159/000049235.
- Slezakova, K., Pereira, M. et al. (2009) Influence of tobacco smoke on the elemental composition of indoor particles of different sizes. *Atmospheric Environment*, 43(3), pp 486-493.
- Sousa, S.I.V., Martins, F.G., Pereira, M.C., Alvim-Ferraz, M.C.M., Ribeiro, H., Oliveira, M. and Abreu, I. (2008) Influence of atmospheric ozone, PM10 and meteorological factors on the concentration of airborne pollen and fungal spores. *Atmospheric Environment*, 42, (32), pp 7452-7464.
- Spengler, J.D., Sexton, K. (1983) Indoor air pollution: a public health perspective. *Science* 221 (4605), pp 9-17.
- Srimuruganandam, B. and Shiva, Nagendra, S.M. (2011) Characteristics of particulate matter and heterogeneous traffic in the urban area of India. *Atmospheric Environment*, 45, (18), pp 3091-3102.
- Sultan, Z. M. (2007) Estimates of associated outdoor particulate matter health risk and costs reductions from alternative building, ventilation and filtration scenarios. *Science of the Total Environment*, 377(1), pp 1-11.
- Sundell, J. (1994) On the association between building ventilation characteristics, some indoor environmental exposures, some allergic manifestations and subjective symptom reports, Indoor Air Supplement No2/94.
- Switzer, P., and Ott, W. (1992) Derivation of an indoor air averaging time model from the mass balance equation for the case of independent source inputs and fixed air exchange rates. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 2(S2), pp 113-135.
- Synnefa, A., Polichronaki, E., Papagiannopoulou, E., Santamouris, M., Mihalakakou, G., Doukas, P., Siskos, P.A., Bakeas, E., Dremetsika, A., Geranios, A. and Delakou, A. (2003) "An Experimental Investigation of the Indoor Air Quality in Fifteen School Buildings in Athens, Greece, *International Journal of Ventilation*, 2(3), pp 185-201. DOI: <http://www.ijvent.org/doi/abs/10.5555/ijov.2003.2.3.185?journalCode=ijov>.
- Tablada, A., De la Pena, A.M., De Troyer, F. (2005) Thermal comfort of naturally ventilated buildings in warm-humid climates: field study. PLEA2005, The 22nd Conference on Passive and low energy architecture. Beirut, Lebanon, 13-16, November 2005.
- Teli, D., Jentsch, M.F. James, P.A.B. (2012) Naturally ventilated classrooms: An assessment of existing comfort models for predicting the thermal sensation and preference of primary school children. *Energy and Buildings*, 53, pp 166-182. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.06.022.
- Teli, D., Patrick, A., James, B., Jentsch, M.F. (2013) Thermal comfort in naturally ventilated primary school classrooms. *Building Research & Information*, 41(3), pp 301-316. DOI: 10.1080/09613218.2013.773493.
- Tian, L., Guoqiang, Z. et al. (2008) The Impact of Kitchen Activities on Indoor Pollutant Concentrations. *Indoor and Built Environment*, 17(4), pp 377-383.
- Tippayawong, N., Khuntong, P., Nitatwicht, C., Khunatorn, Y., Tantakitti, C. (2009) Indoor/outdoor relationships of size-resolved particle concentrations in naturally ventilated school environments. *Building and Environment*, 44, pp 188-197. DOI:10.1016/j.buildenv.2008.02.007.
- Toxicology (2011) Fine and ultrafine Particulate matter. <http://www.toxicologysource.com/medicine/fineandultrafine.html>.

- Triantafyllou, A.G., Zoras, S., Evagelopoulos, V. and Garas, S. (2008) PM10, O3, CO concentrations and elemental analysis of airborne particles in a school building. *Water, Air, and Soil Pollution, Focus*, 8, (1), pp 77-87.
- Tsai, Y.I., Chen, C.L. (2006) Atmospheric aerosol composition and source apportionments to aerosol in southern Taiwan. *Atmospheric Environment*, 40, pp 4751-4763.
- TSI, Trust Science Innovation files (Available at: http://test.tsi.com/uploadedFiles/Product_Information/Literature/Application_Notes/ITI-071.pdf, Accessed on 20 June 2009).
- Tuckett, C. J., Holmes, P. et al. (1998) Airborne particles in the home. *Journal of Aerosol Science*, 29(Supplement 1): S293-S294.
- Turnbull, A. B. and Harrison, R. M. (2000) Major component contributions to PM10 composition in the UK atmosphere. *Atmospheric Environment*, 34(19), pp 3129-3137.
- Voutsas, D. (2002) Elemental composition of airborne particulate matter in the multi-impacted urban area of Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Environment*, 36(28), pp 4453-4462.
- Wall, S. M., John, W., Ondo, J. L. (1988) Measurement of aerosol size distributions for nitrate and major ionic species. *Atmospheric Environment*, 22, pp 1649-1656.
- Wallace, L. (1996) Indoor particles: A review. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 46(2), pp 98-126.
- Wallace, L. (2000) Correlation of Personal Exposure to Particles with Outdoor Air Measurements: A Review of Recent Studies. *Aerosol Science and Technology*, 32(1), pp 15-25.
- Wallace, L. A., Mitchell, H. et al. (2003) Particle concentrations in inner-city homes of children with asthma: The effect of smoking, cooking, and outdoor pollution. *Environmental Health Perspectives*, 111(9), pp 1265-1272.
- Wallace, L., Wang, F. et al. (2008) Contribution of Gas and Electric Stoves to Residential Ultrafine Particle Concentrations between 2 and 64 nm: Size Distributions and Emission and Coagulation Rates. *Environmental Science & Technology*, 42(23), pp 8641-8647.
- Wallace, L. and Ott W. (2011) Personal exposure to ultrafine particles. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 21(1), pp 20-30.
- Wang, B. Lee, S. C. et al. (2007) Characteristics of emissions of air pollutants from burning of incense in temples, Hong Kong. *Science of the Total Environment*, 377(1), pp 52-60.
- Wang, Y., Hopke, P. K. et al. (2010a) Long-term characterization of indoor and outdoor ultrafine particles at a commercial building. *Environmental Science and Technology*, 44(15), pp 5775-5780.
- Wargocki, P., Wyon, D.P., Baik, Y.K., Clausen, G., Fanger, P.O. (1999) Perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity in an office with two different pollution loads. *Indoor Air*, 9, pp 165-179.
- Wargocki, P., Wyon, D.P., Fanger, P.O. (2000) Productivity is affected by the air quality in offices. Proceedings of Healthy Buildings, Vol. 1, Espoo, Finland, April 2000.
- Wargocki, P., Wyon, D.P., Matysiak, B. Irgens, S. (2005) The effects of classroom air temperature and outdoor air supply rate on the performance of school work by children. In: Proceedings of Indoor Air 2005. Beijing, the 10th international conference on indoor air quality and climate. 1, pp 368-372.
- Wargocki, P. Wyon, D.P. (2007) The effects of outdoor air supply rate and supply air filter condition in classrooms on the performance of schoolwork by children, *HVAC&R Research*, 13(2), pp 165-191. DOI: 10.1080/10789669.2007.10390950.
- Wargocki, P. and Wyon, D.P. (2013) Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment*, 59, pp 581-589.
- Weichenthal, S., Dufresne, A., Infante-Rivard, C. and Joseph, L. (2008) Characterizing and predicting ultrafine particle counts in Canadian classrooms during the winter months: Model development and evaluation. *Environmental Research*, 106, (3), pp 349-360.
- Weisel, C., Junfeng, Z., Turpin, B., Morandi, M., Colome, S., Stock, T., Spektor, D., Korn, L., Winer, A. Aloimokhtari, S. et al. (2005) Relationships of Indoor, Outdoor, and Personal Air (RIOPA): study: Study design, methods and quality assurance/ control

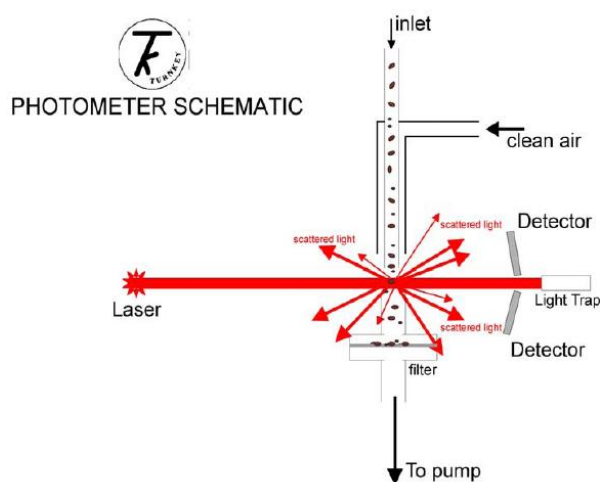
- results. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 15(2005), pp 123-137.
- Whitby, K. T. and Cantrell, B.K. (1975) Atmospheric Aerosols: Characteristics and Measurements. Presented at the Int. Conf Environmental Sensing and Assessment. Las Vegas, N.V.
- WHO (2000) Air Quality Guidelines. World Health Organization Regional Office for Europe Copenhagen.
- WHO (2003) Indoor air pollution and health <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/en/index.html>, World Health Organization.
- WHO (2005) World Health Organization. Air Quality Guidelines- Global update, Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, World Health Organization Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark 2005. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf. Accessed 13 March 2012.
- WHO, World Health Organization(2005a) Children's Health and the Environment- A global perspective. A resource guide for the health sector.
- Willers, S. M., Brunekreef, B. et al. (2006) Gas cooking, kitchen ventilation, and asthma, allergic symptoms and sensitization in young children--the PIAMA study. *Allergy*, 61(5), pp 563-568.
- Wilson, W. E. and Suh, H. H. (1997) Fine particles and coarse particles: Concentration relationships relevant to epidemiologic studies. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 47(12), pp 1238-1249.
- Wong, N.H., Khoo, S.S. (2003) Thermal comfort in classrooms in the tropics. *Energy and Buildings*, 35, pp 337-351. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00109-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00109-3).
- World Bank (2000) Indoor Air Pollution Newsletter Energy and Health for the Poor. (2).
- WRI (1996) The Urban Environment. World Resource Institute 1996, World Resources, 1996-1997. Oxford University Press.
- Yocom, J.E. (1982) Indoor-Outdoor quality relationship. A critical review. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 26, pp 521-527.
- Yoon, C., Lee, K., Park, D. (2011) Indoor air quality differences between urban and rural preschools in Korea. *Environmental Science and Pollution Research*, 18, pp 333-345. DOI: 10.10.
- Zalejska-Jonsoon, A., Wilhelmsson, M. (2013) Impact of perceived indoor environmental quality on overall satisfaction in Swedish dwellings. *Building and Environment*, 63, pp 134-144. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.02.005>.
- Zhu, Y., Hinds, W. et al. (2005) Penetration of freeway ultrafine particles into indoor environments. *Journal of Aerosol Science*, 36(3), pp 303-322.
- Zwoździak, A., Sówka, I., Krupińska, B., Zwoździak, J., Nych, A. (2013) Infiltration of indoor sources as determinants of the elemental composition of particulate matter inside a school in Wrocław, Poland? *Building and Environment*, 66, pp 173-180. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.023>.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

7.1 Αρχή λειτουργίας πειραματικών οργάνων

OSIRIS

Το όργανο διαχωρίζει τα σωματίδια ανάλογα με το μέγεθός τους καθώς αυτά περνούν από την ακτίνα λέιζερ (Εικόνα 0-1). Η σκεδαζόμενη ακτίνα φωτός από τα επιμέρους σωματίδια σκόνης μετατρέπεται σε ηλεκτρικό παλμό του οποίου η ένταση είναι ανάλογη του μεγέθους του σωματιδίου. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του φωτόμετρου είναι η μέτρηση ακτινών φωτός οι οποίες σκεδάζονται υπό μικρές γωνίες. Η γωνία σκέδασης είναι εικονικά η ίδια για τα άσπρα και μαύρα σωματίδια του ίδιου μεγέθους, κάτι το οποίο σημαίνει ότι δεν εξαρτάται από το υλικό και τη σύνθεση του σωματιδίου. Η ένταση της ακτίνας φωτός είναι ένδειξη του μεγέθους των σωματιδίων και έτσι είναι δυνατόν να υπολογιστεί η αναμενόμενη μάζα του. Η παραδοχή που γίνεται συνήθως είναι ότι η πυκνότητα του σωματιδίου είναι 1.5 grams/cc. Αφού υπολογιστεί η μάζα του σωματιδίου είναι δυνατόν να υπολογιστεί και η πιθανότητα καθίζησης του σωματιδίου σύμφωνα με την παραδοχή της δειγματοληψίας.

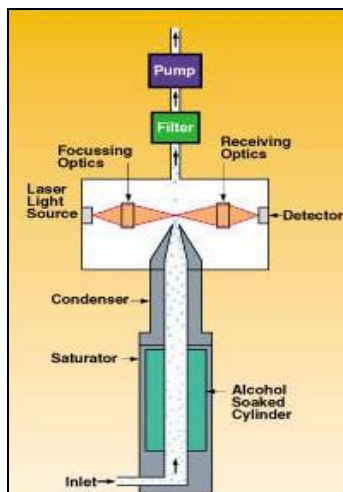


Εικόνα 0-1: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας του Osiris

PTRAK

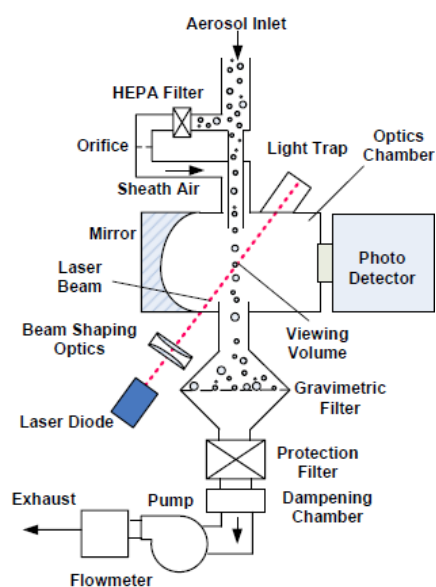
Τα σωματίδια εισέρχονται στο μετρητή δια μέσου μιας ενσωματωμένης αντλίας και στη συνέχεια περνούν μέσα από έναν αγωγό όπου και αναμειγνύονται με διάλυμα αλκοόλης (Εικόνα 0-2). Το μείγμα σωματιδίων-αλκοόλης περνά μέσα από έναν αγωγό-συμπυκνωτή όπου η αλκοόλη συμπυκνώνεται μέσα στα σωματίδια προκαλώντας τα να αναπτυχθούν σε μεγαλύτερες σταγόνες (droplets). Οι σταγόνες αυτές ακολούθως περνούν μέσα από μια εστιασμένη δέσμη φωτός laser παράγοντας ακαριαίες λάμπσεις φωτός οι οποίες ανιχνεύονται

από ένα φωτο-ανιχνευτή-detector (Εικόνα 0-2). Η συγκέντρωση σωματιδίων καθορίζεται από την απαρίθμηση των φωτεινών εκλάμψεων που παρήχθησαν. Στην περίπτωση που τα σωματίδια δεν αναπτύχθηκαν με το διάλυμα αλκοόλης, δεν θα παρήγαγαν τις απαιτούμενες λάμπεις φωτός και συνεπώς δεν θα γίνονταν αντιληπτά από τον ανιχνευτή (TSI files 2009).



Εικόνα 0-2: Διατομή του μετρητή P-Trak (www.tsi.com)

DustTrak

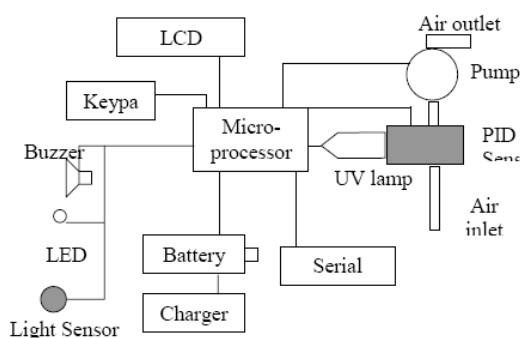


Εικόνα 0-3: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του DustTrak

ppbRAE

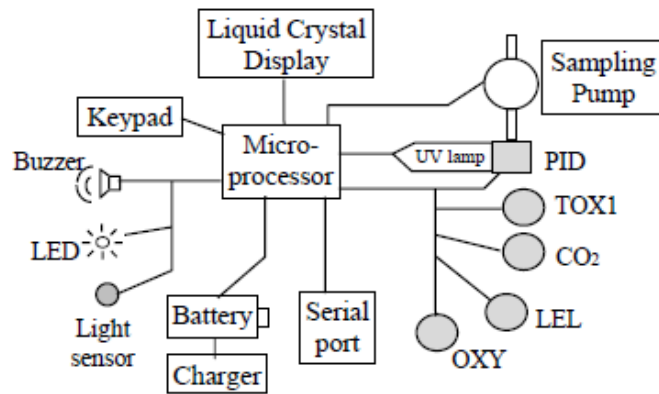
Το ppbRAE αποτελείται από έναν ανιχνευτή δύο καναλιών φωτο-ιονισμού (photo-ionization detector-PID) και από μία λάμπα υπεριώδους ακτινοβολίας ως πηγή φωτονίων υψηλής ενέργειας. Και τα δύο κανάλια του ανιχνευτή βρίσκονται στο θάλαμο ιονισμού. Καθώς οι οργανικοί ατμοί διέρχονται από τη λάμπα, φωτο-ιονίζονται και τα εκβαλλόμενα ηλεκτρόνια ανιχνεύονται ως ηλεκτρικό ρεύμα. Το πρώτο κανάλι ρεύματος απορρέει από τα ιονισμένα

αέρια. Το δεύτερο κανάλι ρεύματος μετρά τα ιονισμένα αέρια και τις φωτοηλεκτρικές εκπομπές των ηλεκτρονίων από τη μεταλλική επιφάνεια, κάτι το οποίο είναι συνάρτηση της έντασης του υπεριώδους φωτός. Το διπλό κανάλι ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση της διακύμανσης της έντασης του φωτός που οφείλεται στην αλλοίωση της λάμπας. Η διπλή δομή καναλιών επιτρέπει στο όργανο, τον καθορισμό των ιονιζόμενων αέριων συγκεντρώσεων με ακρίβεια σε ppb (μέρη ανά δισεκατομμύριο) χωρίς να είναι απαραίτητες οι συχνές βαθμονομήσεις. Ο αισθητήρας PID ανιχνεύει ένα ευρύ φάσμα οργανικών ατμών και επιπλέον έχει κατασκευαστεί σαν μια μικρή κοιλότητα μπροστά από την υπεριώδη λάμπα. Ένα διάφραγμα αντλίας στο εσωτερικό του οργάνου αντλεί συνεχώς αέρα μέσω του αισθητήρα και στη συνέχεια το εκκενώνει μέσω θύρας εξόδου του αερίου από την πλαϊνή πλευρά του οργάνου. Ένα τσιπ μικροϋπολογιστή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της λειτουργίας του βομβητή συναγερμού, του LED, της αντλίας και του αισθητήρα φωτός. Το τσιπ αυτό μέτρα, τις ενδείξεις μετρήσεις του αισθητήρα και υπολογίζει τις συγκεντρώσεις αερίου με βάση τη βαθμονόμηση σε γνωστά πρότυπα αέρια (Εικόνα 0-4).



Εικόνα 0-4: Σχηματικό διάγραμμα της αρχής λειτουργίας του οργάνου PPb RAE

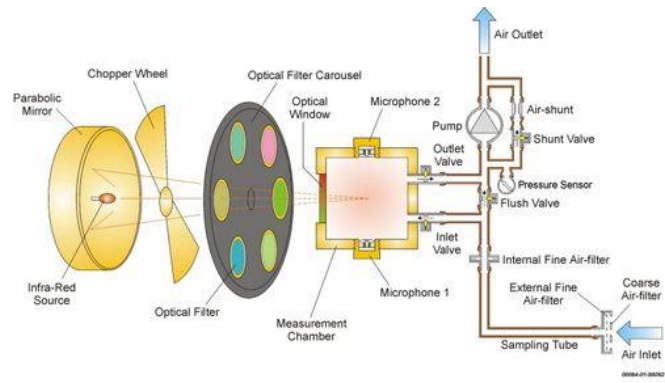
Όπως και το ppbRAE έτσι και το MultiRAE διαθέτει έναν ανιχνευτή ιονισμού (Photo-ionization Detector) και μία αντλία δειγματοληψίας. Το CO₂ μετράται με έναν αισθητήρα υπερύθρου χωρίς διάχυση (Non-dispersive infrared-NDIR). Η ποσότητα υπερύθρου που ακτινοβολεί μέσα από το δείγμα του αερίου και απορροφάται από το CO₂ και είναι ανάλογη της συγκέντρωσής του. Ο αισθητήρας PID που προαναφέρθηκε χρησιμοποιεί μια απαλλαγμένη από ηλεκτρόδια λάμπα UV ως πηγή υψηλής ενέργειας φωτονίων με σκοπό τον ιονισμό ενός ευρέως φάσματος οργανικών αερίων (VOCs). Το προκύπτον ηλεκτρικό ρεύμα είναι ανάλογο προς τη συγκέντρωση των VOCs. Η ακρίβεια του οργάνου εξετάστηκε με την έκθεση των αισθητηρίων του οργάνου σε γνωστές συγκεντρώσεις αερίων βαθμονόμησης πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας και έπρεπε να είναι μεταξύ 0-20% των πραγματικών συγκεντρώσεων.



Εικόνα 0-5: Σχηματικό διάγραμμα αρχής λειτουργίας του MultiRAE-IR

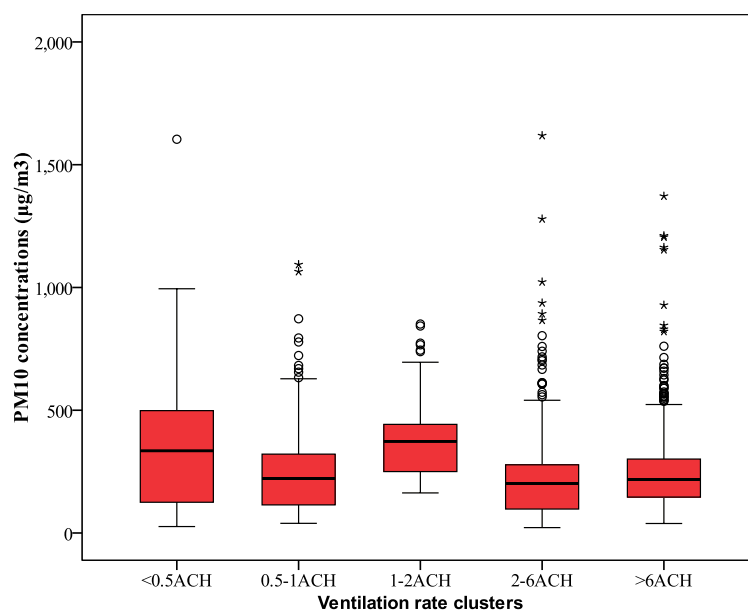
INNOVA 1312

Στην ακόλουθη παράγραφο θα περιγραφεί η εν συντομία αρχή λειτουργίας του οργάνου. Χρησιμοποιείται η φωτο-ακουστική φασματοσκοπία (Photoacoustic Spectroscopy-PAS) κατά την οποία το προς μέτρηση αέριο ακτινοβολείται με φως προεπιλεγμένου μήκους κύματος. Τα μόρια του αερίου απορροφούν ορισμένη από την ενέργεια του φωτός και τη μετατρέπουν σε ηχητικό σήμα το οποίο ανιχνεύεται από ένα μικρόφωνο. Η πηγή IR είναι ένα σφαιρικό θερμαινόμενο μαύρο σώμα. Ένας καθρέπτης εστιάζει το φως πάνω στο παράθυρο του φωτοακουστικού κελιού αφού περάσει την έλικα φωτός (light chopper) και το οπτικό φίλτρο. Η έλικα είναι ένας διάτρητος δίσκος όπου με την περιστροφή της ανάβει και σβήνει το φως. Αφού το φως περάσει το παράθυρο, η ακτίνα φωτός εισέρχεται στο κελί PAS. Εάν η συχνότητα του φωτός συμπίπτει με τη ζώνη απορρόφησης του αερίου στο κελί, το μόριο του φυσικού αερίου θα απορροφήσει μέρος του φωτός. Όσο ψηλότερη είναι η συγκέντρωση του αερίου στο κελί τόσο περισσότερο φως θα απορροφηθεί. Καθώς το αέριο απορροφά ενέργεια θερμαίνεται και ως εκ τούτου επεκτείνεται και προκαλεί και αύξηση της πίεσης. Καθώς το φως τεμαχίζεται, η πίεση αυξομειώνεται και έτσι παράγεται ένα ηχητικό σήμα. Το ακουστικό σήμα ανιχνεύεται με δύο μικρόφωνα. Τα ηλεκτρικά σήματα εξόδου από τα δύο σήματα μικροφώνου προστίθεται σε έναν επεξεργαστή πριν από την επεξεργασία (Lumasence technologies, 2011) (Εικόνα 0-6).

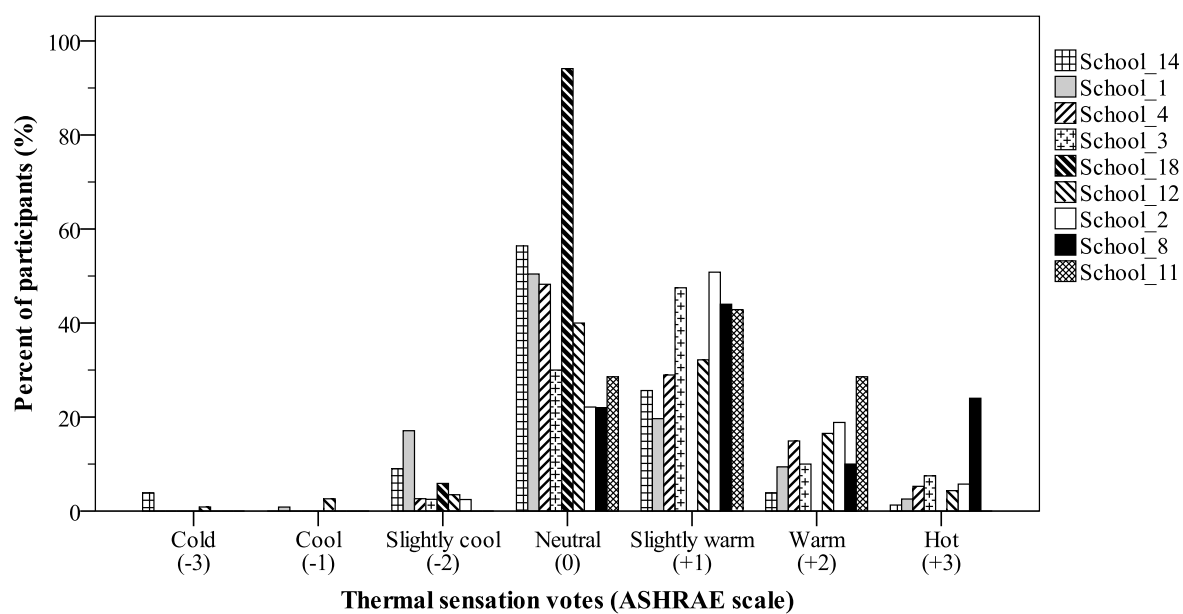


Εικόνα 0-6: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας του INNOVA 1312

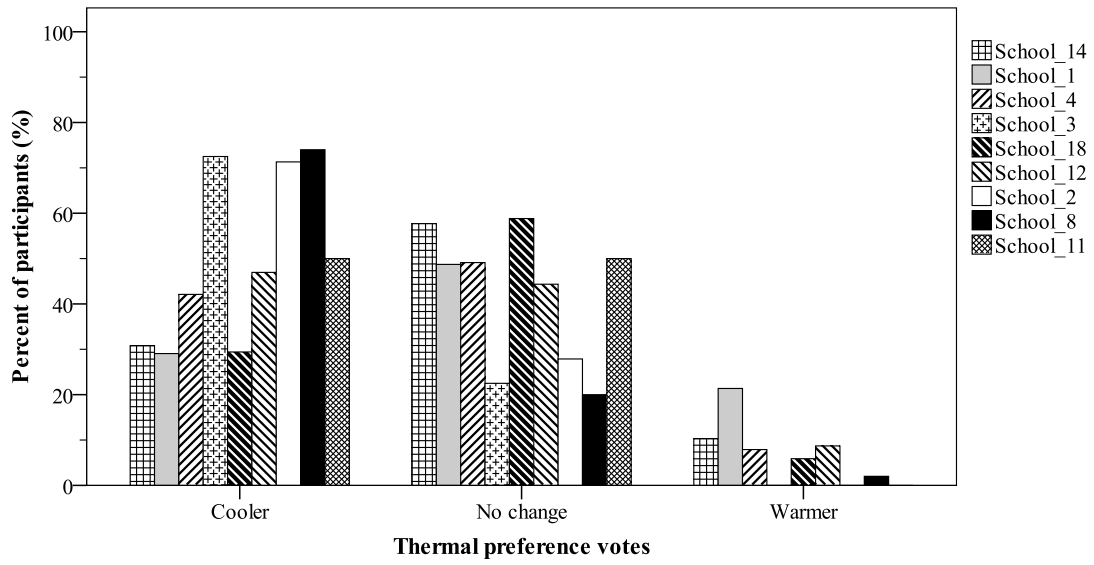
7.2 Πρόσθετα διαγράμματα



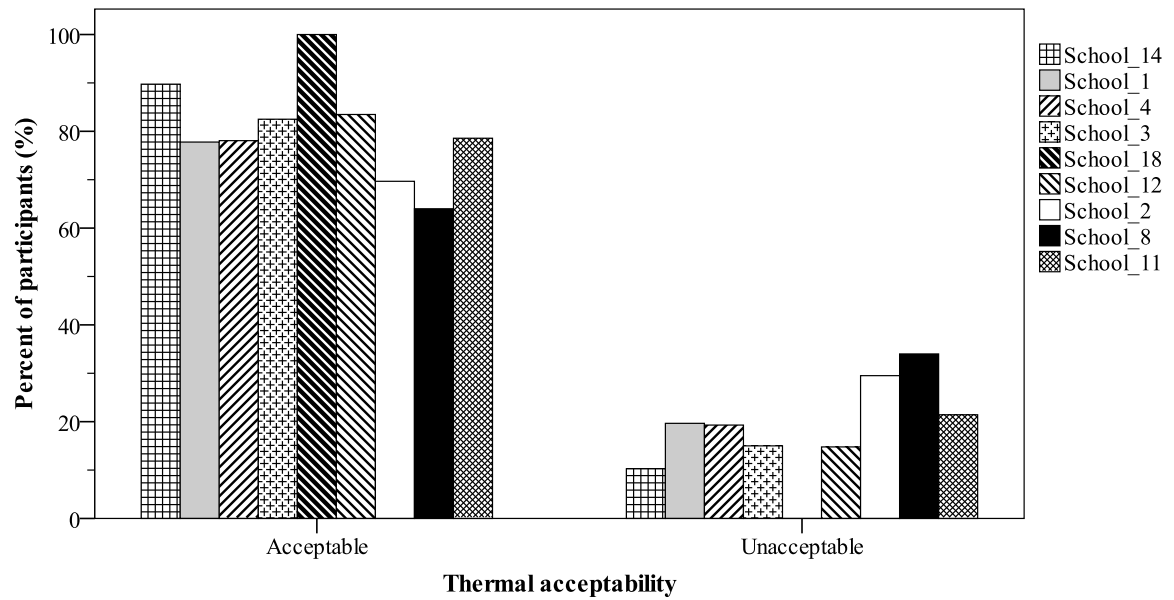
Εικόνα 0-7: Κατανομή των συγκεντρώσεων PM₁₀ στις διάφορες ομάδες τιμών αερισμού



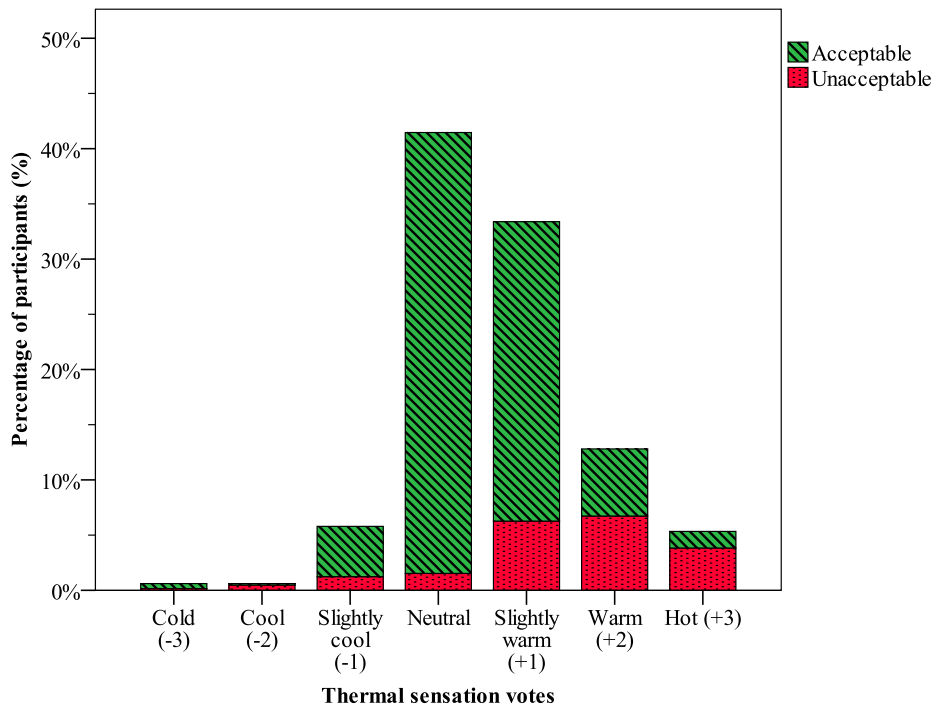
Εικόνα 0-8: Κατανομή των ψήφων θερμικής αίσθησης των μαθητών σε κάθε σχολείο



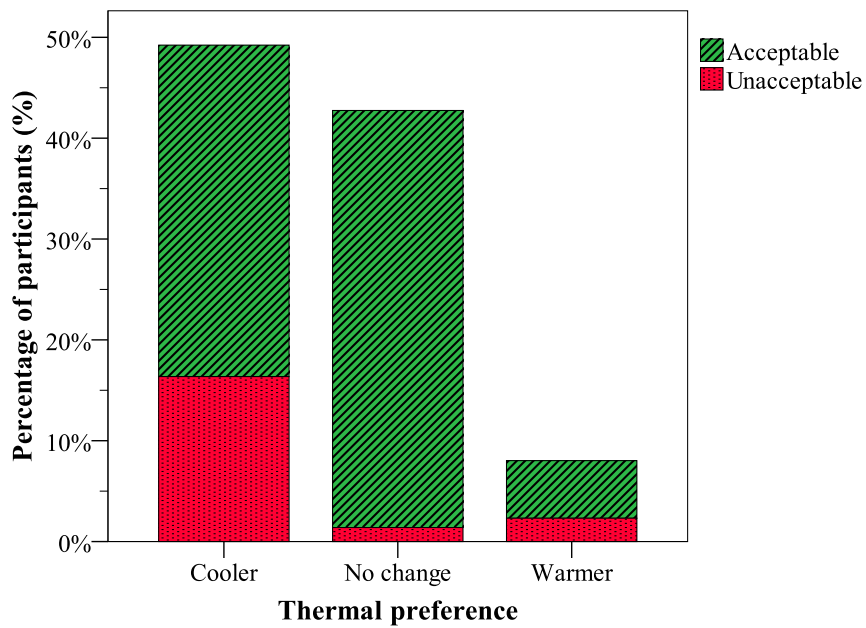
Εικόνα 0-9: Κατανομή των ψήφων θερμικής προτίμησης των μαθητών σε κάθε σχολείο



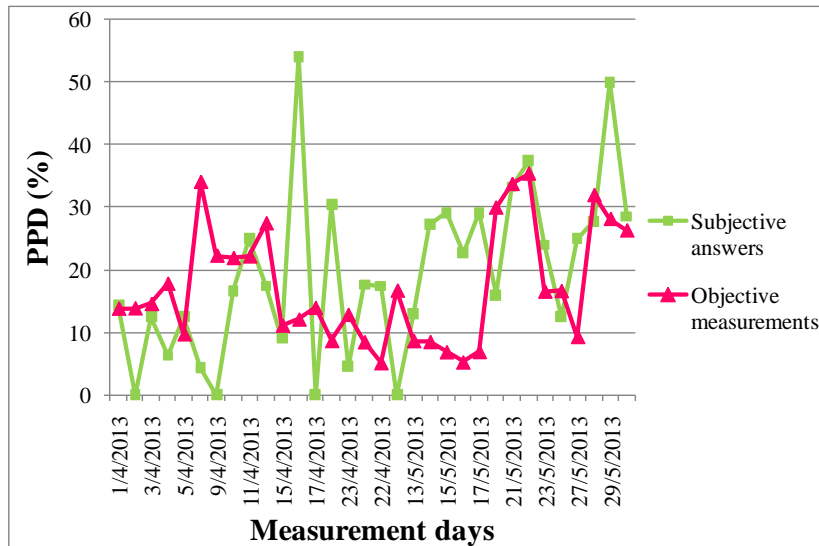
Εικόνα 0-10: Κατανομή των ψήφων θερμικής αποδοχής των μαθητών σε κάθε σχολείο



Εικόνα 0-11: Ψήφοι θερμικής αίσθησης σε σχέση με τη θερμική αποδοχή των μαθητών για το σύνολο των σχολείων



Εικόνα 0-12: Ψήφοι θερμικών προτιμήσεων σε σχέση με τη θερμική αποδοχή για το σύνολο των σχολείων

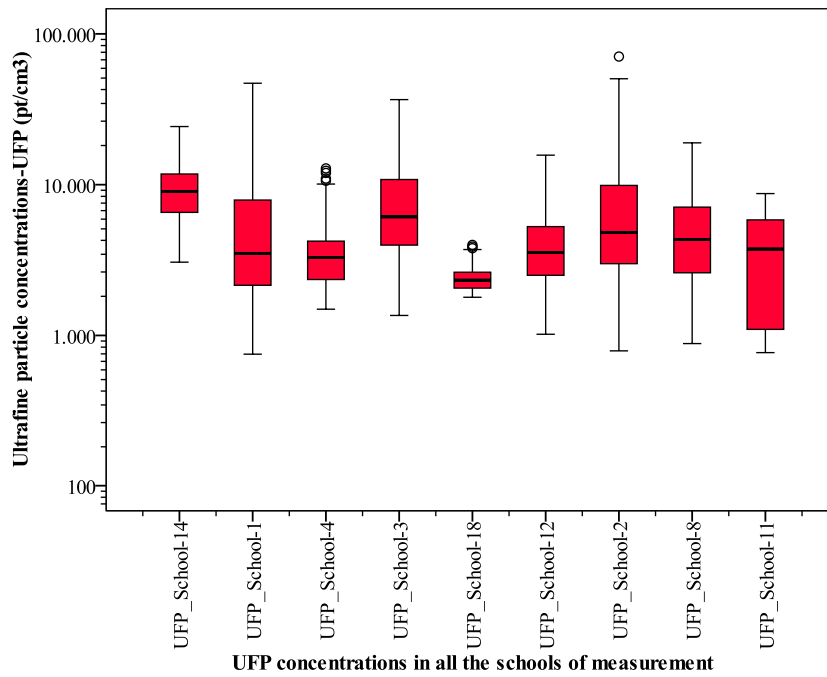


Εικόνα 0-13: Διακύμανση των δεικτών PPD από τις μετρήσεις (ροζ) και των αντίστοιχων δεικτών από τα ερωτηματολόγια (πράσινη)

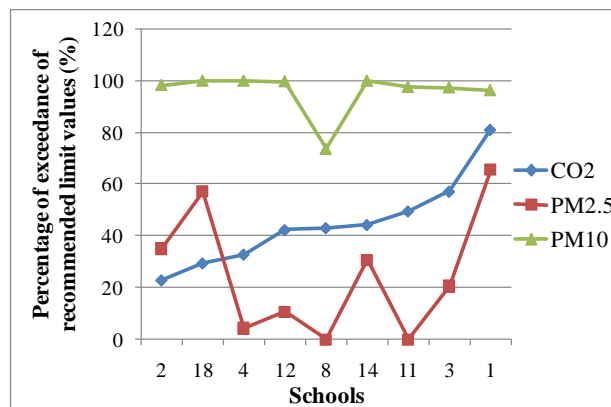
Πίνακας 0-1: Πίνακας συντελεστών συσχέτισης μεταξύ των δεικτών των μετρήσεων και απαντήσεων (N=32, όσο και το σύνολο των ημερών δειγματοληψίας)

	Pearson correlation coefficient				Spearman's rho correlation coefficient			
	Subjective TSV	Objective PMV	Subjective PPD	Objective PPD	Subjective TSV	Objective PMV	Subjective PPD	Objective PPD
Subjective TSV	1	0.707**	0.826**	0.146	1	0.726**	0.822**	0.055
Objective PMV		1	0.539**	0.302		1	0.611**	0.015
Subjective PPD			1	0.130			1	-0.025
Objective PPD				1				1

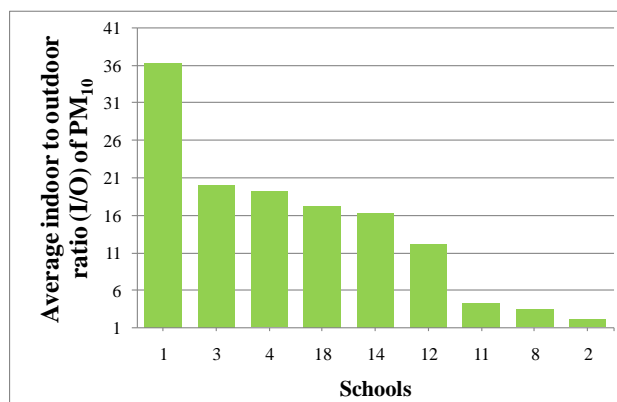
**Correlation is significant at the level of significance: 0.01



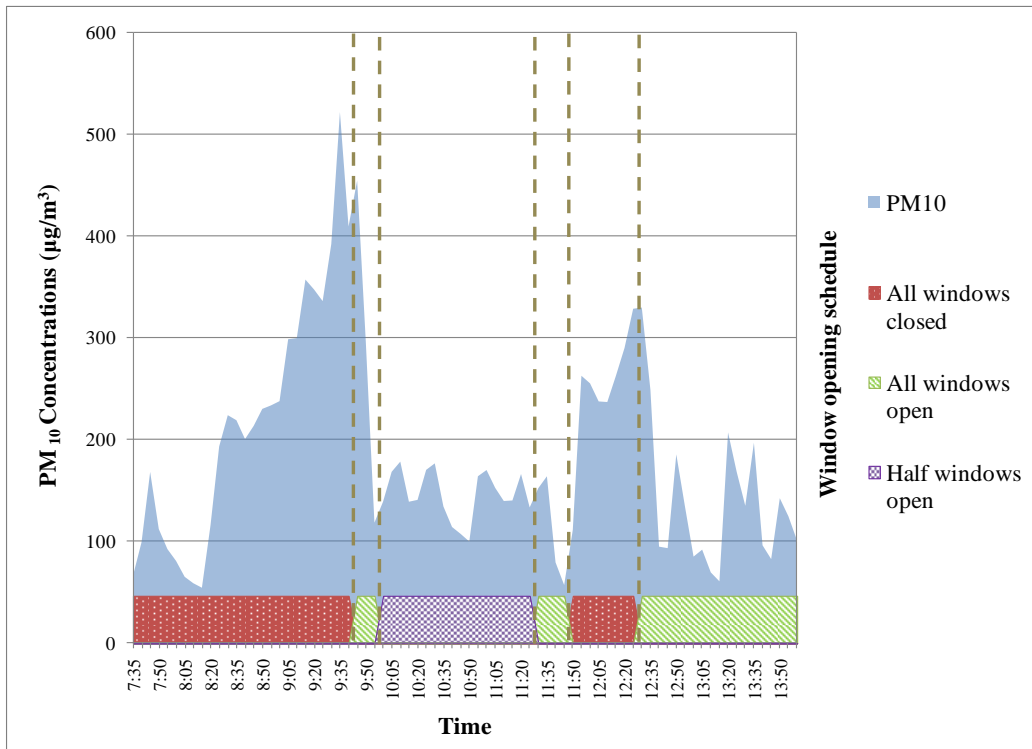
Εικόνα 0-14: Κατανομή των συγκεντρώσεων των υπομετρικών σωματιδίων ανά σχολείο



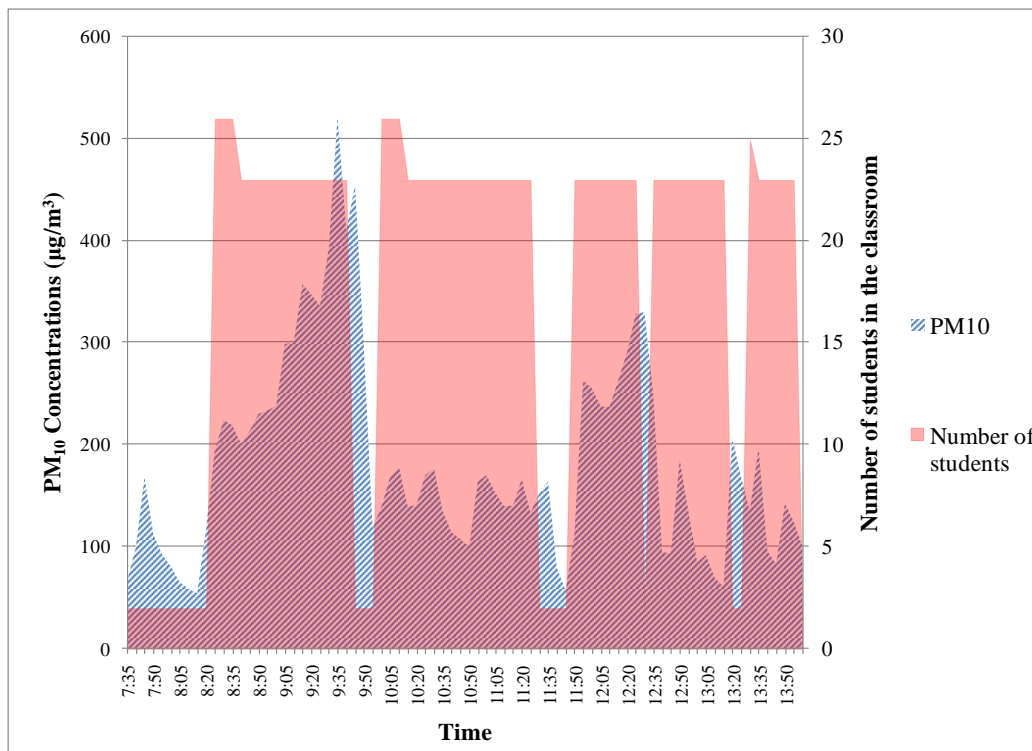
Εικόνα 0-15: Ποσοστά υπέρβασης των οριακών τιμών ανά ρύπο



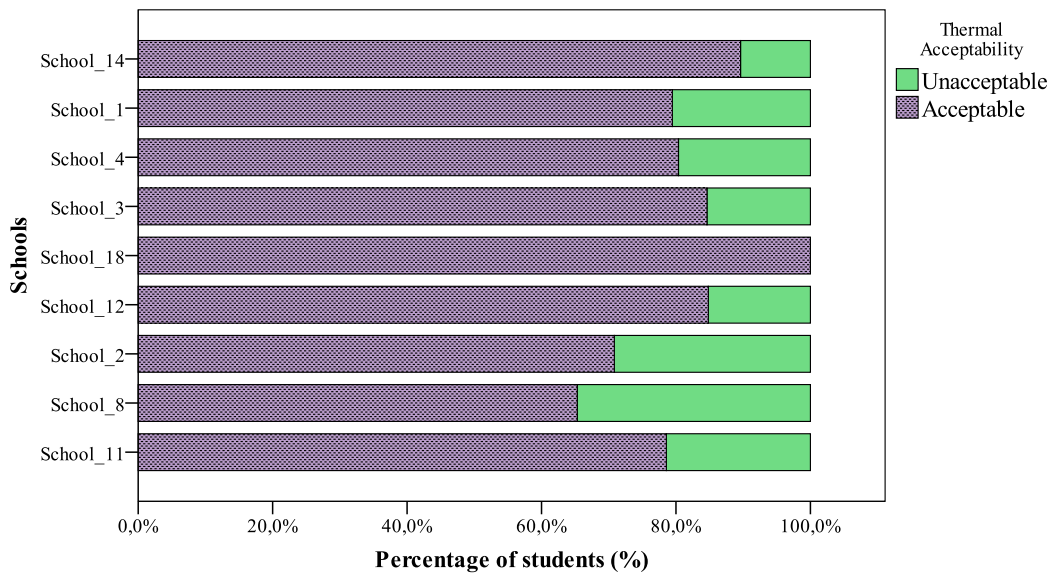
Εικόνα 0-16: Μέσοι λόγοι των εσωτερικών προς τις εξωτερικές συγκεντρώσεις PM_{10} για το σύνολο της περιόδου δειγματοληψίας ανά σχολείο



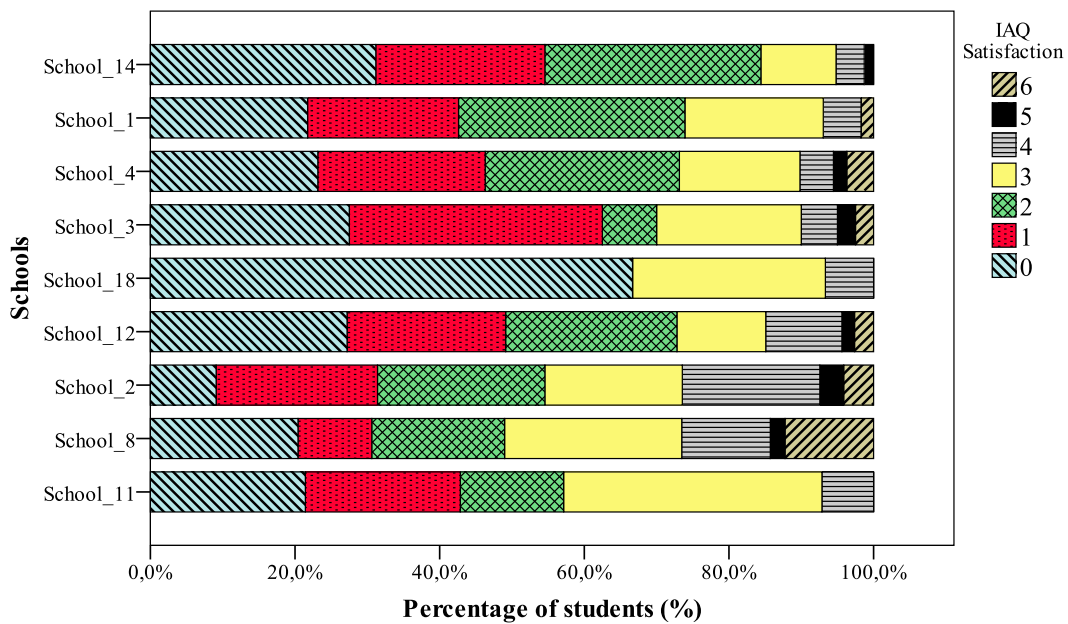
Εικόνα 0-17: Ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{10} σε σχέση με το άνοιγμα των παραθύρων στο σχολείο 4 στις 15 Απρίλη



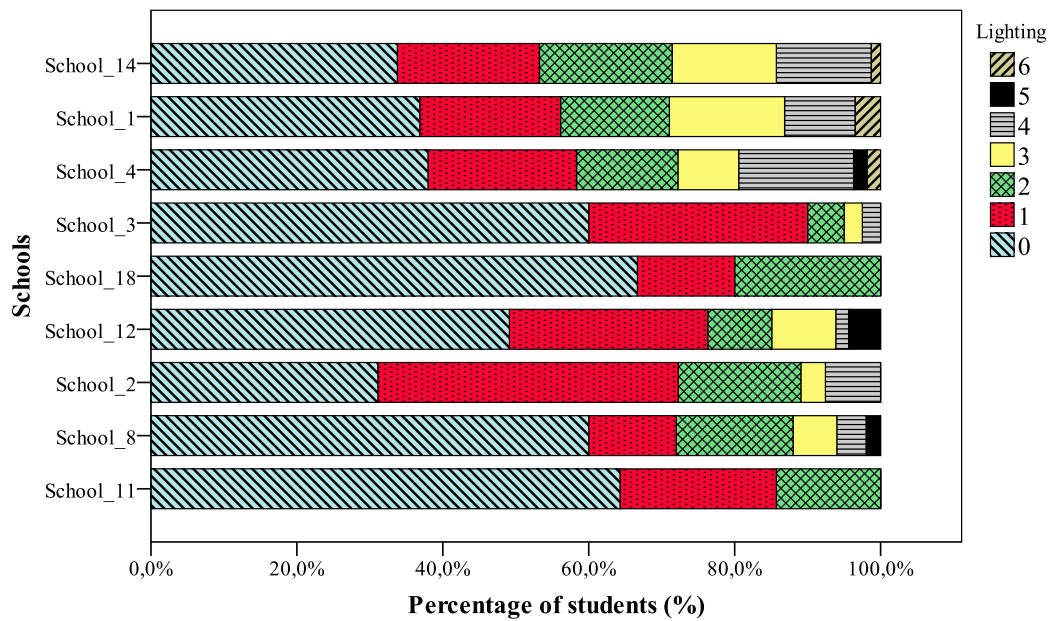
Εικόνα 0-18: Ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{10} σε σχέση με το πλήθος των μαθητών στο σχολείο 4 στις 15 Απρίλη



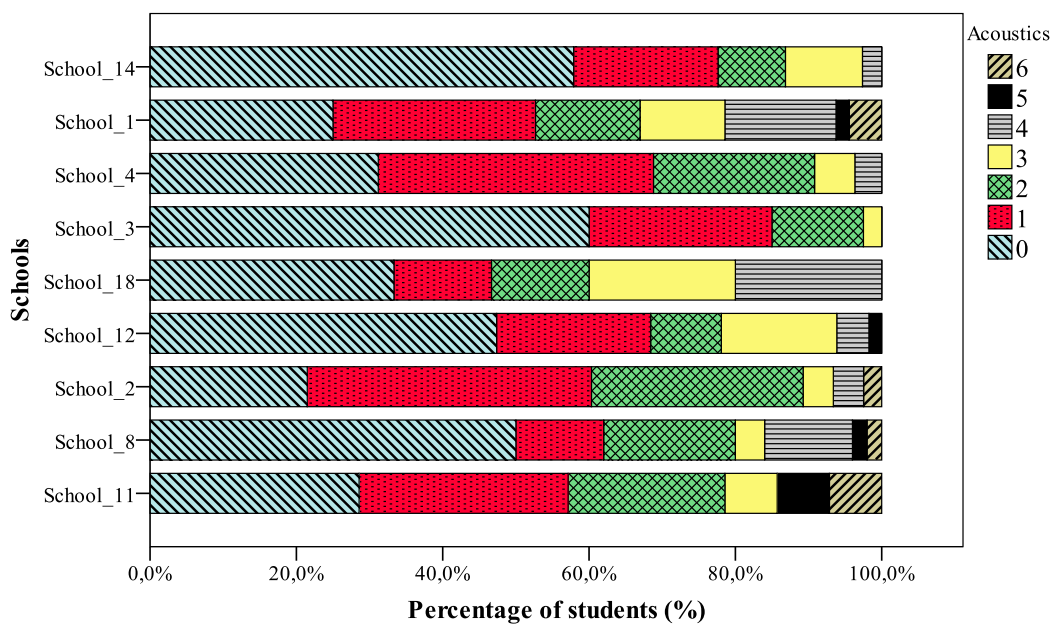
Εικόνα 0-19: Κατανομή των ψήφων θερμικής αποδοχής ανά σχολείο



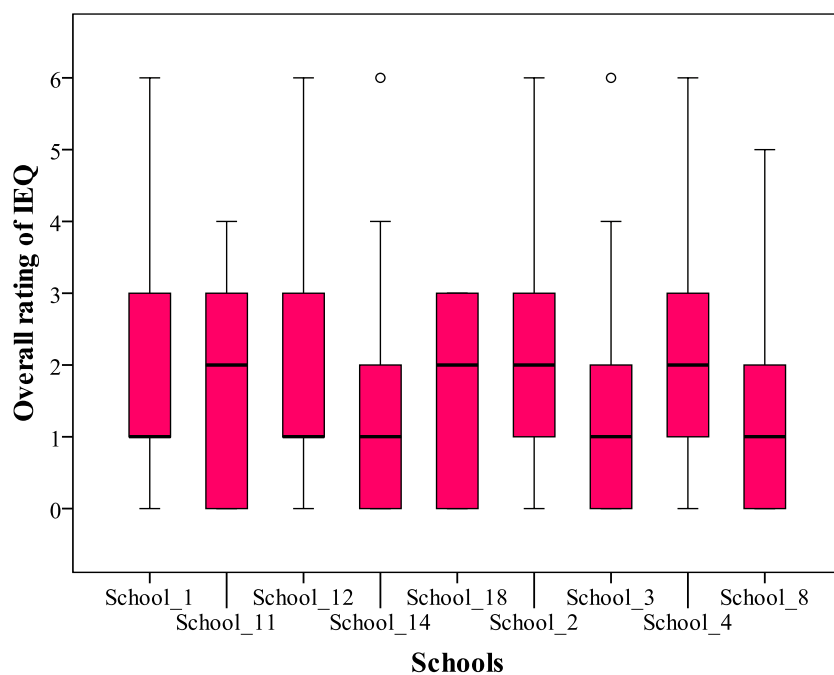
Εικόνα 0-20: Κατανομή των ψήφων ικανοποίησης με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα ανά σχολείο (0: πλήρως ικανοποιημένοι, 6: πλήρως δυσαρεστημένοι)



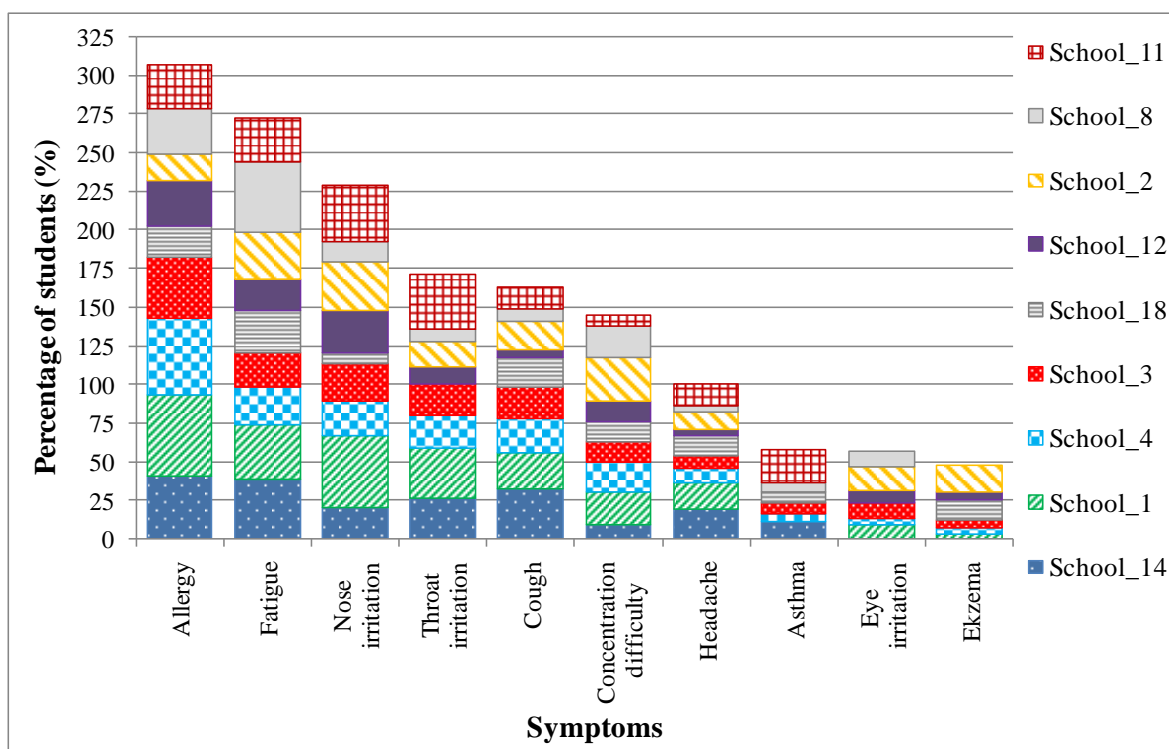
Εικόνα 0-21: Κατανομή των ψήφων ικανοποίησης με τα επίπεδα φωτισμού ανά σχολείο (0: πλήρως ικανοποιημένοι, 6: πλήρως δυσαρεστημένοι)



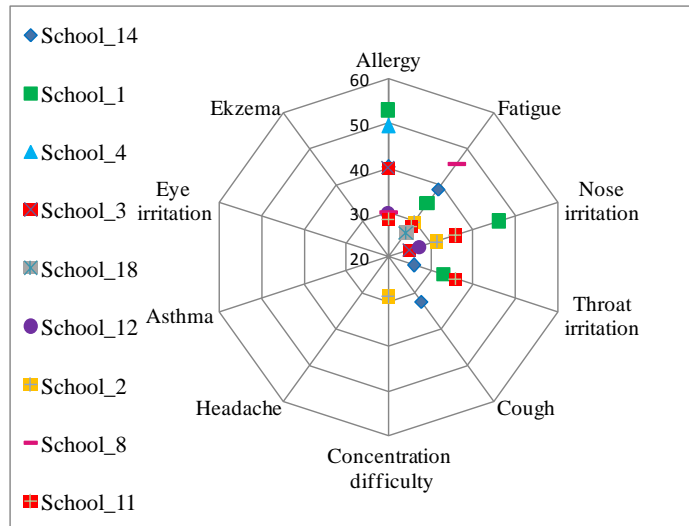
Εικόνα 0-22: Κατανομή των ψήφων ικανοποίησης με τα επίπεδα ακουστικής ανά σχολείο (0: πλήρως ικανοποιημένοι, 6: πλήρως δυσαρεστημένοι)



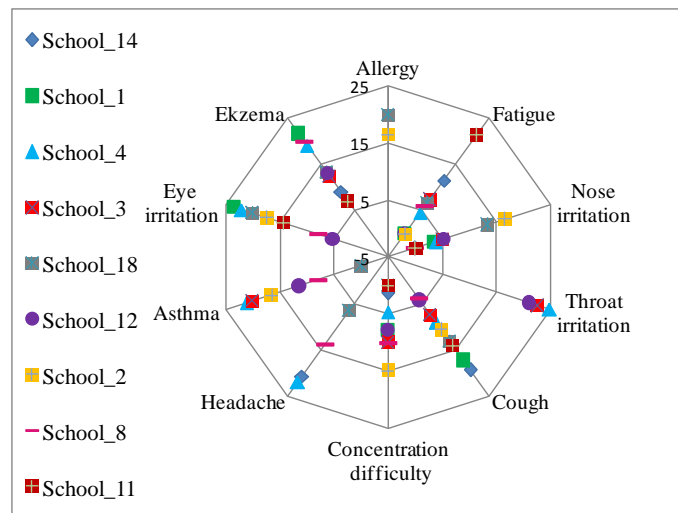
Εικόνα 0-23: Κατανομή των ψήφων που αναφέρονται στο αν οι μαθητές πιστεύουν ότι συνολικές συνθήκες ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος ενθαρρύνουν την απόδοσή τους



Εικόνα 0-24: κατανομή των συμπτωμάτων άρρωστου κτιρίου των μαθητών ανά σχολείο



Εικόνα 0-25: Κατανομή των συμπτωμάτων άρρωστου κτιρίου ανά σχολείο για περιπτώσεις μεγαλύτερες ή ίσες του 25% του συνόλου των μαθητών ανά σχολείο



Εικόνα 0-26 Κατανομή των συμπτωμάτων άρρωστου κτιρίου ανά σχολείο για περιπτώσεις μικρότερες του 25% του συνόλου των μαθητών ανά σχολείο

7.3 Ερωτηματολόγιο μαθητών

Ημερήσιο Ερωτηματολόγιο μαθητών

Ημερομηνία: _____ ΚΑΜ: _____

Ημέρα μέτρησης: _____ Σχολείο: _____ Τάξη/Τμήμα: __ Όροφος: __

Ηλικία: _____ Φύλλο:

Αγόρι	Κορίτσι
-------	---------



A. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΕΣΗ

1. Παρακαλώ σημείωσε πόσο κρύο ή ζέστη αισθάνεσαι στην τάξη σου αυτή τη στιγμή ;

Πολύ κρύο ☹☹☹	Κρύο ☹☹	Σχετικά κρύο ☹	Άνετα! 😊😊😊	Σχετικά ζεστά ☹	Ζεστά ☹☹	Πολύ ζεστά ☹☹☹
------------------	------------	-------------------	---------------	--------------------	-------------	-------------------

2. Πώς θα προτιμούσες να αισθανόσουν αυτή τη στιγμή;

Πιο δροσερός ☹	Χωρίς καμία αλλαγή! 😊😊😊	Πιο ζεστός ☹
-------------------	----------------------------	-----------------

3. Πώς κρίνεις τις συνθήκες κρύου ζέστης στην τάξη σου αυτή τη στιγμή;

Αποδεκτές! 😊😊😊	ΜΗ αποδεκτές ☹☹☹
-------------------	---------------------

B. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΕΡΑ



4. Είσαι ικανοποιημένος από την ποιότητα του αέρα στην τάξη σου αυτή τη στιγμή;

0	1	2	3	4	5	6
Απόλυτα ικανοποιημένος! 😊😊						☹☹ Πλήρως δυσαρεστημένος

5. Πιστεύεις ότι η ποιότητα του αέρα βοηθά ή εμποδίζει την απόδοσή σου;

0	1	2	3	4	5	6
Βοηθά πολύ! 😊😊						☹☹ Δεν βοηθά καθόλου

6. Πώς θα χαρακτήριζες το ρεύμα του αέρα στην τάξη σου αυτή τη στιγμή;

-3	-2	-1	0	1	2	3
Στάσιμο ☹☹			Ιδανικό 😊😊	☹☹ Ανεπιθύμητο ρεύμα		

7. Πώς θα χαρακτήριζες τον αέρα της τάξης σου αυτή τη στιγμή;

0	1	2	3	4	5	6
Φρέσκος 😊😊						☹☹ Αποπνικτικός

0	1	2	3	4	5	6
Άοσμος 😊😊						☹☹ Μυρίζει άσχημα

Γ. ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΕΣΗ



8. Πώς θα χαρακτήριζες το φωτισμό στην τάξη σου αυτή τη στιγμή; Βλέπεις με άνεση στον πίνακα & το θρανίο σου;

0	1	2	3	4	5	6
Εξαιρετικός! 😊😊						☹☹ Πολύ ελλιπής

9. Πιστεύεις ότι ο φωτισμός της τάξης βοηθάει ή εμποδίζει την απόδοσή σου ;

0	1	2	3	4	5	6
Βοηθά πολύ! 😊😊						☹☹ Δεν βοηθά καθόλου

Δ. ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΑΝΕΣΗ



10. Πόσο ικανοποιημένος είσαι από την ακουστική της τάξης σου αυτή τη στιγμή; Ακούς με άνεση τη δασκάλα & τους συμμαθητές σου;

0	1	2	3	4	5	6
---	---	---	---	---	---	---

Απόλυτα Ικανοποιημένος! 😊😊

😡😡 Πλήρως δυσαρεστημένος

11. Πιστεύεις ότι η ακουστική της τάξης βοηθάει ή εμποδίζει την απόδοσή σου στα μαθήματα ;

0	1	2	3	4	5	6
---	---	---	---	---	---	---

Βοηθά πολύ! 😊😊

😡😡 Δεν βοηθά καθόλου

Ε. ΥΓΕΙΑ-Συμπτώματα



12. Μήπως έχεις κάποια αλλεργία; Ναι Όχι

13. Μήπως έχεις ασθματικά προβλήματα; Ναι Όχι

14. Είχες ποτέ έκζεμα; Ναι Όχι

15. Μήπως αισθάνεσαι κούραση ή υπνηλία; Ναι Όχι

16. Μήπως έχεις πονοκέφαλο; Ναι Όχι

17. Μήπως έχεις ερεθισμό ή ξηρασία ή καταρροή στα μάτια; Ναι Όχι

18. Μήπως έχεις ερεθισμένη ή βουλωμένη ή καταρροή στη μύτη; Ναι Όχι

19. Μήπως έχεις ερεθισμό ή ξηρότητα ή βραχνάδα στο λαιμό; Ναι Όχι

20. Μήπως έχεις βήχα; Ναι Όχι

21. Μήπως έχεις δυσκολία συγκέντρωσης; Ναι Όχι

ΣΤ. Συνοψίζοντας....



22. Με βάση τα παραπάνω οι γενικότερες συνθήκες της τάξης σου πιστεύεις ότι ενθαρρύνουν ή όχι την απόδοσή σου στα μαθήματά σου;

0	1	2	3	4	5	6
---	---	---	---	---	---	---

Βοηθούν πολύ 😊😊

😡😡 Δεν βοηθούν καθόλου

Ευχαριστούμε πολύ για τη συνεργασία!!! 😊

Η παραπάνω ερωτήσεως έχουν μεταφραστεί από τυποποιημένα ερωτηματολόγια που έχουν συνταχθεί από διεθνείς οργανισμούς όπως η ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) και η EPA (Environmental Protection Agency) αλλά και το ΕΛΚΕΠΑ (Ελληνικό Κέντρο Παραγωγικότητας, Διεύθυνση Κατάρτισης).

7.4 Τεστ παραγωγικότητας

ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑΣ

Σχολείο: _____

Ημερομηνία: _____ ΚΑΜ: _____

Ημέρα μέτρησης: _____

1^ο Μέρος

1α) Οι ακόλουθες **μαθηματικές πράξεις** θα πρέπει να επιλυθούν από τους μαθητές κατά την πρώτη ώρα του μαθήματος της ημέρας.

Μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος: 10 λεπτά

$\begin{array}{r} 12 \\ + 4 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 43 \\ + 26 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 19 \\ + 71 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 37 \\ + 34 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 81 \\ + 29 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 54 \\ + 63 \\ \hline \end{array}$
--	---	---	---	---	---

$\begin{array}{r} 79 \\ - 8 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 57 \\ - 16 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 36 \\ - 18 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 82 \\ - 27 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 35 \\ - 19 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 66 \\ - 55 \\ \hline \end{array}$
--	---	---	---	---	---

$\begin{array}{r} 8 \\ \times 4 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 7 \\ \times 8 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 8 \\ \times 9 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 12 \\ \times 3 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 53 \\ \times 7 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 71 \\ \times 7 \\ \hline \end{array}$
--	--	--	---	---	---

$\begin{array}{r} 13 \\ + 8 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 17 \\ + 5 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 26 \\ + 26 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 78 \\ + 13 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 63 \\ + 78 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 15 \\ + 36 \\ \hline \end{array}$
--	--	---	---	---	---

$\begin{array}{r} 12 \\ - 11 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 75 \\ - 36 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 82 \\ - 18 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 44 \\ - 27 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 43 \\ - 35 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 55 \\ - 26 \\ \hline \end{array}$
---	---	---	---	---	---

$\begin{array}{r} 3 \\ \times 8 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 21 \\ \times 6 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 47 \\ \times 6 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 39 \\ \times 8 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 56 \\ \times 7 \\ \hline \end{array}$	$\begin{array}{r} 67 \\ \times 8 \\ \hline \end{array}$
--	---	---	---	---	---

Αποτέλεσμα_1α: _____

(Πλήθος πράξεων που επιλύθηκαν σωστά στα 10 λεπτά)

1β) Κρυπτογράφιση

Σε κάθε αριθμό αντιστοιχεί το σύμβολο που βρίσκεται στο κουτάκι κάτω από αυτόν.

Κώδικας	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	÷)	+	⊢	⌈	∨	⊂	÷	⊢

- Γράψτε το αντίστοιχο σύμβολο κάτω από τους αριθμούς που ακολουθούν
- Ξεκινήστε με τα 7 ψηφία του «Παραδείγματος» με τη βοήθεια του δασκάλου σας
- Συνεχίστε μόνοι σας μέχρι ο δάσκαλός σας να σας πει 'ΤΕΛΟΣ ΧΡΟΝΟΥ'!

Έχετε 120 δευτερόλεπτα στη διάθεσή σας ξεκινώντας αφού συμπληρώσετε το «παραδείγμα» μέχρι να ακούσετε ΤΕΛΟΣ ΧΡΟΝΟΥ.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ																					
2	1	4	6	3	5	2	1	3	4	2	1	3	1	2	3	1	4	2	6	3	

1	2	5	1	3	1	5	4	2	7	4	6	9	2	5	8	4	7	6	1	8	

7	5	4	8	6	9	4	3	1	8	2	9	7	6	2	5	8	7	3	6	4	

5	9	4	1	6	8	9	3	7	5	1	4	9	1	5	8	7	6	9	7	8	

2	4	8	3	5	6	7	1	9	4	3	6	2	7	9	3	5	6	7	4	5	

2	7	8	1	3	9	2	6	8	4	1	3	2	6	4	9	3	8	5	1	8	

Αποτελέσματα_1β: _____
 (Άθροισμα των σωστών αντιστοιχίσεων σε 120 δευτερόλεπτα. Να μην συμπεριληφθούν τα 7 του παραδείγματος)

7.5 Ερωτηματολόγιο Ενέργειας

Ερωτηματολόγιο Ενέργειας

Ημ/νία: _____

A. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Όνομασία σχολείου	
Υπεύθυνος ερωτηματολογίου	
Τηλ. / e-mail	

B. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΤΙΡΙΟΥ

Αριθμός ορόφων (το ισόγειο θεωρείται όροφος)	
Συνολικό εμβαδό (Υπόγειο-Ισόγειο-όροφος)	
Χρονολογία κατασκευής κτιρίου	
Αριθμός αιθουσών (να συμπεριληφθούν αίθουσες φυσικής, μουσικής καλλιτεχνικών, Η/Υ, κτλ)	
Αριθμός μαθητών (σύνολο)	
Αριθμός διδακτικού προσωπικού	
Ωράριο λειτουργίας σχολείου	
Σύντομη περιγραφή περιβάλλοντα χώρου (με τι γειτονεύει το σχολείο πχ με πολυκατοικίες, δρόμο μέτριας ή ταχείας κυκλοφορίας, πλατείες, αλσύλλιο, βουνό κτλ.)	

Γ. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (Σύστημα θέρμανσης)

Είδος θέρμανσης	
Χρονολογία κατασκευής θέρμανσης	
Χρησιμοποιούμενο καύσιμο (πετρέλαιο, ηλεκτρική ενέργεια, υγραέριο, ξύλα κλπ)	
Ωράριο λειτουργίας συστήματος θέρμανσης	
Θερμοκρασία λειτουργίας της θέρμανσης (°C) (που είναι ο αισθητήρας θερμοκρασίας;)	
Μόνωση σωληνώσεων υπάρχει;	
Εμβαδόν θερμαινόμενη επιφάνειας (m ²)	
Εγκατεστημένη ισχύς του λέβητα (σημαντική ερώτηση, αναγράφεται σε πινακίδα επάνω στον λέβητα, σε kcal/hr ή KW)	

Γ1. Ετήσια κατανάλωση ενέργειας (ΑΝ υπάρχει και μηνιαία, τη θέλουμε)

	2010		2011		2012	
	Κατανάλωση	Κόστος (€)	Κατανάλωση	Κόστος (€)	Κατανάλωση	Κόστος (€)
Ηλεκτρική ενέργεια (kWh)						
Πετρέλαιο (lt, λίτρα)						
Υγραέριο (m ³)						
Άλλο						

Μηνιαίες Καταναλώσεις Πετρελαίου Θέρμανσης

Μήνες	2010		2011		2012	
	Κατανάλωση (Λίτρα)	Ποσό Πληρωμής (€)	Κατανάλωση (Λίτρα)	Ποσό Πληρωμής (€)	Κατανάλωση (Λίτρα)	Ποσό Πληρωμής (€)
Ιανουάριος						
Φεβρουάριος						
Μάρτιος						
Απρίλιος						
Μάιος						
Ιούνιος						
Ιούλιος						
Αύγουστος						
Σεπτέμβριος						
Οκτώβριος						
Νοέμβριος						
Δεκέμβριος						
Συνολικό Ετήσιο (Λίτρα)						
Συνολικό Ετήσιο ανά τετραγωνικό (lt/m²)						

Φωτογραφία χαρακτηριστικά λέβητα και καυστήρα.****

Μηνιαίες Καταναλώσεις Ηλεκτρικού ρεύματος

Μήνες	2010		2011		2012	
	Κατανάλωση (kWh)	Ποσό Πληρωμής (€)	Κατανάλωση (kWh)	Ποσό Πληρωμής (€)	Κατανάλωση (kWh)	Ποσό Πληρωμής (€)
Ιανουάριος						
Φεβρουάριος						
Μάρτιος						
Απρίλιος						
Μάιος						
Ιούνιος						
Ιούλιος						
Αύγουστος						
Σεπτέμβριος						
Οκτώβριος						
Νοέμβριος						
Δεκέμβριος						
Συνολικό Ετήσιο (kWh)						
Συνολικό Ετήσιο ανά τετραγωνικό (kWh/m²)						

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

ASHRAE American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers
USEPA United States Environmental Protection Agency
WHO World Health Organization
CIBSE Chartered Institution of Building Services Engineers
Ε.Κ.Π.Α Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
ΕΚΤ Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο
ΥΠΕΠΘ Υπουργείο Παιδείας και Θρησκευμάτων
ΕΣΠΑ Εθνικό Στρατηγικό Πλαίσιο Αναφοράς
Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Εθνικό Κέντρο Φυσικών Επιστημών
Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. Τεχνικές Οδηγίες του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας
SINPHONIE Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα σχετικό με τη ρύπανση του εσωτερικού αέρα στα σχολεία (Schools Indoor Pollution and Health Observatory Network in Europe)
MIAQ Μοντέλο Πολλαπλών Θαλάμων της Ποιότητας του Εσωτερικού Αέρα (Multi-Chamber Indoor Air Quality Model)
ISO International Organization for Standardization
CIBSE The chartered Institution of Building Services Engineers

IEQ Indoor Environmental Quality
IAQ Indoor Air Quality
PM Particulate Matter
TSP Total Suspended Particles
UFP Υπομετρικά σωματίδια (Ultrafine Particulate Matter, UFP)
CO₂ Διοξείδιο του Άνθρακα (Carbon Dioxide)
CO Μονοξείδιο του Άνθρακα (Carbon Monoxide)
VOCs Οργανικές Πτητικές Ενώσεις (Volatile Organic Compounds)
ACH Εναλλαγές αέρα την ώρα (Air Changes per Hour)
PCA Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis)
FFT Γρήγορος Μετασχηματισμός Φουριέ (Fast Fourier Transform)
PMV Μέση Προβλεπόμενη Ψήφος (Predicted Mean Vote) (αδιάστατο)
PPD Προβλεπόμενο Ποσοστό Δυσφορούντων (Predicted Percentage of Dissatisfied (%))
TSV Αντίληψη Θερμικής Αίσθησης (Thermal Sensation Vote)
SBS Σύνδρομο Άρρωστου Κτιρίου (Sick Building Syndrome)
RH Σχετική υγρασία (%)
T Θερμοκρασία (°C)
T_{OP} Λειτουργική Θερμοκρασία (°C)

WBGT Θερμοκρασία Υγραινόμενης Σφαίρας (Web Bulb Globe Temperature) ($^{\circ}\text{C}$)
Met Ρυθμός μεταβολής (Metabolic Rate)
Clo Βαθμός ρουχισμού (Clothing Insulation)
HCHO Φορμαλδεΐδη
PAHs Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)
OC οργανικός άνθρακας (Organic Carbon)
EC Στοιχειακός άνθρακας (Elemental Carbon)
PID Ανιχνευτής Φωτο-ιονισμού (Photo-ionic Detector)
PSD Φασματική Πυκνότητα Ισχύος (Power Spectral Density)
I/O Εσωτερικός/Εξωτερικός (Indoor / Outdoor)
SF₆ Εξαφθοριούχο Θείο (Sulfur Hexafluoride)
CFU Αριθμός σχηματιζόμενων αποικιών μυκήτων (Colony Forming Units)

Συμβολισμοί

Ca²⁺ Ιόντα ασβεστίου
Cl⁻ Ιόντα Χλωρίου
Hg Υδράργυρος
CO Μονοξείδιο του Άνθρακα
K⁺ Ιόντα Καλίου
Mg²⁺ Ιόντα Μαγνησίου
Na⁺ Ιόντα Νατρίου
NaCl Χλωριούχο Νάτριο (θαλασσινό Αλάτι)
NH₄⁺ Ιόντα Αμμωνίου
NO_x Οξείδια του Αζώτου
NO₃⁻ Νιτρικά Ιόντα
O₃ Όζον
Pb Μόλυβδος
SO₄²⁻ Ιόντα θείου
SO₂ Διοξείδιο του θείου
Rn Ραδόνιο
Pb Μόλυβδος
Mn Μαγγάνιο

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1: Εξιδανικευμένη κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων στη οποία φαίνονται τα λεπτόκκοκα και χονδρόκκοκα σωματίδια και τα κλάσματα αυτών, όπως συλλέγονται από επιλεκτικό συλλογέα δειγμάτων με βάση το μέγεθος τους (Wilson and Suh 1997)	41
Εικόνα 2-2: Βαθμός διείσδυσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (EPAPMsampling 2011)	43
Εικόνα 2-3: Σχηματική αναπαράσταση των δυναμικών διεργασιών των σωματιδίων στους εσωτερικούς χώρους.....	48
Εικόνα 2-4: Ροή καθοδηγούμενη από τον άνεμο (Wind driven flow) (Liddament 1996)	51
Εικόνα 2-5: Ροή καθοδηγούμενη από τη διαφορά πίεσης (Stack driven flow) (Liddament 1996).....	51
Εικόνα 2-6: Ελέγχοντας τον κυρίαρχο ρύπο (Liddament 1996)	52
Εικόνα 3-1: Φορητός μετρητής αιωρούμενων σωματιδίων OSIRIS (α) μετρήσεις σε εσωτερικό περιβάλλον, (β) μετρήσεις σε εξωτερικό περιβάλλον με τη χρήση κλωβού.....	55
Εικόνα 3-2: P-Trak	56
Εικόνα 3-3: Μετρητής αιωρούμενων σωματιδίων Handheld 3016 IAQ (Lighthouse, worldwide solutions)	57
Εικόνα 3-4: DustTrak	58
Εικόνα 3-5: Δειγματολήπτης Derenda	59
Εικόνα 3-6: ppbRAE, VOC Monitor.....	60
Εικόνα 3-7: MultiRAE-IR	61
Εικόνα 3-8: IAQ-CALC	61
Εικόνα 3-9: Μετρητής θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, Tinytag TGP-4500	62
Εικόνα 3-10 : Μετρητής θερμικής άνεσης INNOVA 1221	63
Εικόνα 3-11 : Μετρητές INNOVA 1312 και Multipoint Sampler Doser INNOVA 1303	65
Εικόνα 3-12: Μετρητής επιπέδων φωτισμού TES 1335 Digital light meter	66
Εικόνα 3-13: Φορητή αντλία Burkard.....	67
Εικόνα 3-14: Χάρτης Αττικής και αποτύπωση των δύο κατοικιών (Google Earth)	70
Εικόνα 3-15: Κατόψεις του ισογείου της μεζονέτας (αριστερά) και του διαμερίσματος (δεξιά) (χωρίς κλίμακα)	70
Εικόνα 3-16: Χάρτης Αττικής και αποτύπωση των δύο σχολείων (Google Earth).....	74
Εικόνα 3-17: ΕΠΑΛ Καισαριανής	74
Εικόνα 3-18: ΕΠΑΛ Υμηττού.....	74
Εικόνα 3-19: Χάρτης Αττικής και αποτύπωση των σχολείων δειγματοληψίας.....	78
Εικόνα 3-20: Κατανομή κάλυψης γης κατά CORINE 2000 για την περιοχή της Αττικής	79
Εικόνα 3-21: Υπόμνημα κατανομών κάλυψης γης κατά CORINE 2000.....	80

Εικόνα 3-22: 1° (αριστερά) & 2° (δεξιά) Δημοτικό σχολείο Θρακομακεδόνων	82
Εικόνα 3-23: 4° (αριστερά) & 11° (δεξιά) Δημοτικό σχολείο Αχαρνών	82
Εικόνα 3-24: 11° (αριστερά) και 12° (δεξιά) Δημοτικό σχολείο Αχαρνών	82
Εικόνα 3-25: 14° & 18° Δημοτικό σχολείο Αχαρνών.....	82
Εικόνα 3-26: Εκπαιδευτήρια Κωστέα Γείτονα.....	83
Εικόνα 5-1: Θηκογράμματα των κατανομών των συγκεντρώσεων των σωματιδίων TSP, PM ₁₀ , PM _{2.5} και PM ₁ στις κατοικίες στην ημιαστική (Suburban-μπλε) και την αστική περιοχή (Urban-κόκκινο)	98
Εικόνα 5-2: Θηκογράμματα των κατανομών των συγκεντρώσεων των υπομετρικών σωματιδίων στο ημιαστικό (Suburban-Μπλε) και το αστικό (Urban-κόκκινο) περιβάλλον...	99
Εικόνα 5-3 : Διακύμανση των υπομετρικών σωματιδίων στην κατοικία στο ημιαστικό περιβάλλον για όλη την περίοδο δειγματοληψίας.....	100
Εικόνα 5-4: Διακύμανση των υπομετρικών σωματιδίων στην κατοικία στο αστικό περιβάλλον για όλη την περίοδο δειγματοληψίας.....	101
Εικόνα 5-5: Διακύμανση των εσωτερικών προς τις εξωτερικές συγκεντρώσεις σωματιδίων PM ₁₀ στην κατοικία στο αστικό περιβάλλον μιας τυχαίας ημέρας (30 Οκτώβρη 2011).....	102
Εικόνα 5-6: Καμπύλες PSD των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁ (αριστερά) και των υπομετρικών σωματιδίων (δεξιά) στην κατοικία στην ημιαστική περιοχή	103
Εικόνα 5-7: Καμπύλες PSD των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁ (αριστερά) και των υπομετρικών σωματιδίων (δεξιά) στην κατοικία στην αστική περιοχή	104
Εικόνα 5-8: Θηκογράμματα των CO ₂ (αριστερά) και των CO (δεξιά) στις κατοικίες στο αστικό (κόκκινο ριγέ) και ημιαστικό (μπλε με τελείες) περιβάλλον.....	104
Εικόνα 5-9: Έλεγχος ευαισθησίας των ταχυτήτων εναπόθεσης στο ρυθμό πτώσης των αιωρούμενων σωματιδίων PM ₁₀ για ρυθμό διείσδυσης 0.55 ACH.....	107
Εικόνα 5-10: Έλεγχος ευαισθησίας των ταχυτήτων εναπόθεσης στο ρυθμό πτώσης των αιωρούμενων σωματιδίων PM ₁₀ για ρυθμό διείσδυσης 0.33 ACH.....	108
Εικόνα 5-11: Έλεγχος ευαισθησίας των ταχυτήτων εναπόθεσης στο ρυθμό πτώσης των αιωρούμενων σωματιδίων PM ₁₀ για ρυθμό διείσδυσης 0.11 ACH.....	108
Εικόνα 5-12: Ημερήσια διακύμανση των μετρούμενων και υπολογιζόμενων συγκεντρώσεων PM ₁₀ με τη βοήθεια του κώδικα MIAQ	109
Εικόνα 5-13: Διάγραμμα διασποράς μεταξύ των μετρούμενων και προβλεπόμενων τιμών PM ₁₀	109
Εικόνα 5-14: Χρονική διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁₀ σε όλες τις θέσεις μέτρησης για τα σχολεία Κ (αριστερά) και Υ (δεξιά)	112

Εικόνα 5-15: Διακύμανσης των μέσων τιμών των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό περιβάλλον προς τις αντίστοιχες εξωτερικές συγκεντρώσεις στα σχολεία Κ (αριστερά) και Υ (δεξιά).....	113
Εικόνα 5-16: Κατανομή των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_1 (δεξιά) σε μορφή θηκογράμματος στα σχολεία Κ (ριγέ) και Υ (γκρι).....	114
Εικόνα 5-17: Χρονική διακύμανση των συγκεντρώσεων των αερομεταφερόμενων μυκήτων σε όλες τις θέσεις μέτρησης για τα σχολεία Κ (αριστερά) και Υ (δεξιά).....	115
Εικόνα 5-18: Διακύμανσης των μέσων τιμών των συγκεντρώσεων των αερομεταφερόμενων μυκήτων στο εσωτερικό περιβάλλον προς τις αντίστοιχες εξωτερικές συγκεντρώσεις στα σχολεία Κ (αριστερά) και Υ (δεξιά).....	115
Εικόνα 5-19: Κατανομή συχνοτήτων του συνόλου των αερομεταφερόμενων μυκήτων σε τάξεις των 100 CFU/m ³ στα σχολεία Κ (ριγέ) και Υ(γκρι).....	116
Εικόνα 5-20: Διάγραμμα διασπορά των συγκεντρώσεων CO ₂ σε σχέση με το πλήθος των ατόμων.....	117
Εικόνα 5-21: Λόγοι των συγκεντρώσεων στο εσωτερικό προς το εξωτερικό περιβάλλον για το σχολείο Υ.....	119
Εικόνα 5-22: Λόγοι των συγκεντρώσεων στο εσωτερικό προς το εξωτερικό περιβάλλον για το σχολείο Κ.....	119
Εικόνα 5-23: Μέσες συγκεντρώσεις σωματιδίων PM_{10} (αριστερά) και $PM_{2.5}$ (δεξιά) ανά όροφο για τα δύο σχολεία.....	121
Εικόνα 5-24: Μέσες συγκεντρώσεις σωματιδίων PM_1 (αριστερά) και UFP (δεξιά) ανά όροφο για τα δύο σχολεία.....	121
Εικόνα 5-25: Μέσες συγκεντρώσεις του συνόλου των αερομεταφερόμενων μυκήτων ανά όροφο για τα δύο σχολεία.....	121
Εικόνα 5-26: Ροδόγραμμα που προέκυψε από τις μέγιστες τιμές κάθε παραμέτρου σε κάθε σχολείο.....	122
Εικόνα 5-27: Ποσοστό του συνόλου της διακύμανσης που αντιστοιχεί σε καθεμιά από τις κύριες συνιστώσες.....	126
Εικόνα 5-28: Ρυθμός διείσδυσης του αέρα στα σχολεία και ποσοστό του χρόνου όπου τα παράθυρα παρέμειναν εντελώς κλειστά ανά σχολείο.....	135
Εικόνα 5-29: Κατανομή ρυθμού αερισμού σε μονάδες ACH (αριστερό διάγραμμα) και 1/s/p (δεξιά διάγραμμα) σε κάθε σχολείο για όλη την περίοδο των μετρήσεων.....	137
Εικόνα 5-30: Λόγοι των πιθανοτήτων του αερισμού σε κάθε σχολείο προς την πιθανότητα του συνόλου των σχολείων να είναι μικρότερος από ορισμένες τιμές κατωφλίου (αριστερά: το χειρότερο και καλύτερα αεριζόμενα σχολεία, δεξιά: σχολεία με μέτριο αερισμό σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σχολεία).....	138

Εικόνα 5-31: Αθροιστικές κατανομές συχνοτήτων του ρυθμού αερισμού σε μονάδες ACH και l/s/p για την περίοδο διδασκαλίας και τη συνολική περίοδο των μετρήσεων για κάθε σχολείο	140
Εικόνα 5-32: Αθροιστική κατανομή συχνοτήτων των συγκεντρώσεων CO ₂ (ppm) στα 9 σχολεία	143
Εικόνα 5-33: Κατανομή των συγκεντρώσεων CO ₂ για το σύνολο των σχολείων κατά τις περιόδους διδασκαλίας και μη διδασκαλίας.....	143
Εικόνα 5-34: Λόγοι των πιθανοτήτων των συγκεντρώσεων CO ₂ σε κάθε σχολείο προς την πιθανότητα του συνόλου των σχολείων να είναι μικρότερος από ορισμένες τιμές κατωφλίου (αριστερά: σχολεία με τα χαμηλότερα και τα υψηλότερα επίπεδα CO ₂ , και δεξιά: σχολεία με μέτρια επίπεδα CO ₂ σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σχολεία).....	144
Εικόνα 5-35: Ημερήσια διακύμανση συγκεντρώσεων CO ₂ σαν συνάρτηση του αριθμού των ατόμων και του αερισμού	145
Εικόνα 5-36: Περιοδόγραμμα του γεωμετρικού μέσου της φασματικής πυκνότητας ισχύος του CO ₂ για τα 9 σχολεία	146
Εικόνα 5-37: Κατανομή των συγκεντρώσεων CO ₂ στις διάφορες συστάδες αερισμού.....	147
Εικόνα 5-38: Διαγράμματα διασποράς της μέσης ωριαίας τιμής των συγκεντρώσεων CO ₂ και των αντίστοιχων τιμών ρυθμού αερισμού σε μονάδες ACH (αριστερά) και l/s/p (δεξιά) για τις ώρες διδασκαλίας	148
Εικόνα 5-39: Εσωτερικές κατανομές συγκεντρώσεων αιωρούμενων στις 9 τάξεις.....	149
Εικόνα 5-40: Κατανομή συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων για τις περιόδους διδασκαλίας και μη διδασκαλίας.....	152
Εικόνα 5-41: Ημερήσια διακύμανση εσωτερικών και εξωτερικών συγκεντρώσεων PM ₁₀ σε σχέση με το πλήθος των μαθητών και το ρυθμό αερισμού (8/4/13, Σχολείο 1).....	153
Εικόνα 5-42: Περιοδόγραμμα του γεωμετρικού μέσου της φασματικής πυκνότητας ισχύος του PM ₁₀ στις 9 σχολεία	154
Εικόνα 5-43: Κατανομές των λόγων I/O των αιωρούμενων σωματιδίων κατά τη διάρκεια των περιόδων διδασκαλίας και μη για το σύνολο των σχολείων και όλη την περίοδο μέτρησης	155
Εικόνα 5-44: Διάγραμμα διασποράς μεταξύ των λόγων I/O των αιωρούμενων και των συγκεντρώσεων CO ₂	156
Εικόνα 5-45: Κατανομή των χημικών στοιχείων των αιωρούμενων σωματιδίων στα εσωτερικά περιβάλλοντα κάθε σχολείου.....	161
Εικόνα 5-46: Κατανομή των χημικών στοιχείων των αιωρούμενων σωματιδίων στα εξωτερικά περιβάλλοντα κάθε σχολείου	162
Εικόνα 5-47: Λόγοι των μέσων συγκεντρώσεων των παραμέτρων στις τάξεις με πίνακες κλωσίας προς τις τάξεις με πίνακες μαρκαδόρου.....	163

Εικόνα 5-48: Κατανομή του συνόλου των ψήφων των μαθητών των 9 σχολείων για την αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα για το σύνολο της περιόδου της ανασκόπησης.....	166
Εικόνα 5-49: Διακύμανση μέσων θερμοκρασιών και σχετικής υγρασίας ανά σχολείο	167
Εικόνα 5-50: Μέσες τιμές των δεικτών PMV και PPD για το σύνολο της περιόδου δειγματοληψίας ανά σχολείο	168
Εικόνα 5-51: Κατανομή των δεικτών PMV και PPD για το σύνολο της περιόδου δειγματοληψίας (αριστερά) και για τη διάρκεια στην οποία συμπληρώνονταν τα ερωτηματολόγια (δεξιά) σε καθένα από τα σχολεία	169
Εικόνα 5-52: Κατανομή των ψήφων θερμικής αίσθησης στην 7-βάθμια κλίμακα της ASHRAE σε σχέση με τις θερμικές προτιμήσεις και τη θερμική αποδοχή	170
Εικόνα 5-53: Ψήφοι θερμικής αίσθησης ανά φύλλο για το σύνολο των σχολείων.....	171
Εικόνα 5-54: Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των δεικτών PMV και TSV με τη λειτουργική θερμοκρασία.....	172
Εικόνα 5-55: Συσχέτιση μεταξύ των δεικτών PMV (από μετρήσεις) και TSV (από απαντήσεις)	172
Εικόνα 5-56: Κατανομή των μέσων ημερήσιων μετρούμενων τιμών του δείκτη PMV και των απαντήσεων TSV ως προς τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη PPD.....	173
Εικόνα 5-57: Επίπεδα φωτισμού στα 9 σχολεία.....	175
Εικόνα 5-58: Κατανομή των ψήφων για την αξιολόγηση του φωτισμού των τάξεων.....	176
Εικόνα 5-59 : Κατανομή των ψήφων για την αξιολόγηση της ακουστικής των τάξεων	177
Εικόνα 5-60: Κατανομή των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στις τρεις συστάδες.....	179
Εικόνα 5-61: Κατανομή των συγκεντρώσεων του αερισμού στις τρεις συστάδες.....	179
Εικόνα 5-62: Κατανομή των συγκεντρώσεων CO και VOCs στις τρεις συστάδες.....	180
Εικόνα 5-63: Κατανομή των συγκεντρώσεων του CO ₂ στις τρεις συστάδες.....	180
Εικόνα 5-64: Κατανομή των εσωτερικών (αριστερά) και εξωτερικών (δεξιά) θερμοκρασιών στις τρεις συστάδες.....	181
Εικόνα 5-65: Κατανομή των εσωτερικών (αριστερά) και εξωτερικών (δεξιά) τιμών σχετική υγρασίας στις τρεις συστάδες.....	181
Εικόνα 5-66: Συμπτώματα άρρωστου κτιρίου ανά σχολείο (αριστερά) και μέση τιμή του συνόλου των σχολείων ανά σύμπτωμα (δεξιά)	183
Εικόνα 5-67: Κατανομή των επιτευχθέντων βαθμολογιών ανά ημέρα.....	185
Εικόνα 5-68: Κατανομή των βαθμολογιών ανά σχολείο.....	186
Εικόνα 5-69:Συσχετίσεις μεταξύ των τάσεων των επιδόσεων των μαθητών στα τεστ και των συγκεντρώσεων CO ₂ αλλά και του ρυθμού αερισμού σε κάθε σχολείο	187

Εικόνα 5-70: Σχέση μεταξύ των τάσεων των επιδόσεων των μαθητών στα τεστ παραγωγικότητας και της υποκειμενικής αξιολόγησης της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος	188
Εικόνα 5-71: Μέσες καταναλώσεις ηλεκτρικού ρεύματος και πετρελαίου για τα έτη 2010-2013 ανά σχολείο	189
Εικόνα 5-72: Αθροιστική κατανομή συχνοτήτων των καταναλώσεων ηλεκτρισμού (αριστερά) και καταναλώσεων πετρελαίου (δεξιά) για τα έτη 2010-2012	190
Εικόνα 5-73: Ημερήσια διακύμανση (αριστερά) και διάγραμμα διασποράς (δεξιά) μεταξύ των μετρούμενων και προβλεπόμενων συγκεντρώσεων PM_{10} με τη βοήθεια του αριθμητικού κώδικα MIAQ για τις 8/4/13	194
Εικόνα 5-74: Ημερήσια διακύμανση (αριστερά) και διάγραμμα διασποράς (δεξιά) μεταξύ των μετρούμενων και προβλεπόμενων συγκεντρώσεων PM_{10} με τη βοήθεια του αριθμητικού κώδικα MIAQ για τις 9/4/13	195
Εικόνα 5-75: Ημερήσια διακύμανση (αριστερά) και διάγραμμα διασποράς (δεξιά) μεταξύ των μετρούμενων και προβλεπόμενων συγκεντρώσεων PM_{10} με τη βοήθεια του αριθμητικού κώδικα MIAQ για τις 15/4/13	196
Εικόνα 5-76: Ημερήσια διακύμανση (αριστερά) και διάγραμμα διασποράς (δεξιά) μεταξύ των μετρούμενων και προβλεπόμενων συγκεντρώσεων PM_{10} με τη βοήθεια του αριθμητικού κώδικα MIAQ για τις 31/5/13	197
Εικόνα 5-77: Ημερήσια διακύμανση αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} στην υπάρχουσα και την προτεινόμενη κατάσταση	198
Εικόνα 0-1: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας του Osiris	225
Εικόνα 0-2: Διατομή του μετρητή P-Trak (www.tsi.com)	226
Εικόνα 0-3: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του DustTrak	226
Εικόνα 0-4: Σχηματικό διάγραμμα της αρχής λειτουργίας του οργάνου PPb RAE.....	227
Εικόνα 0-5: Σχηματικό διάγραμμα αρχής λειτουργίας του MultiRAE-IR	228
Εικόνα 0-6: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας του INNOVA 1312.....	229
Εικόνα 0-7: Κατανομή των συγκεντρώσεων PM_{10} στις διάφορες ομάδες τιμών αερισμού..	230
Εικόνα 0-8: Κατανομή των ψήφων θερμικής αίσθησης των μαθητών σε κάθε σχολείο	230
Εικόνα 0-9: Κατανομή των ψήφων θερμικής προτίμησης των μαθητών σε κάθε σχολείο...	231
Εικόνα 0-10: Κατανομή των ψήφων θερμικής αποδοχής των μαθητών σε κάθε σχολείο	231
Εικόνα 0-11: Ψήφοι θερμικής αίσθησης σε σχέση με τη θερμική αποδοχή των μαθητών για το σύνολο των σχολείων	232
Εικόνα 0-12: Ψήφοι θερμικών προτιμήσεων σε σχέση με τη θερμική αποδοχή για το σύνολο των σχολείων.....	232
Εικόνα 0-13: Διακύμανση των δεικτών PPD από τις μετρήσεις (ροζ) και των αντίστοιχων δεικτών από τα ερωτηματολόγια (πράσινη)	233

Εικόνα 0-14: Κατανομή των συγκεντρώσεων των υπομετρικών σωματιδίων ανά σχολείο .	234
Εικόνα 0-15: Ποσοστά υπέρβασης των οριακών τιμών ανά ρύπο	234
Εικόνα 0-16: Μέσοι λόγοι των εσωτερικών προς τις εξωτερικές συγκεντρώσεις PM ₁₀ για το σύνολο της περιόδου δειγματοληψίας ανά σχολείο	234
Εικόνα 0-17: Ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ σε σχέση με το άνοιγμα των παραθύρων στο σχολείο 4 στις 15 Απρίλη.....	235
Εικόνα 0-18: Ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ σε σχέση με το πλήθος των μαθητών στο σχολείο 4 στις 15 Απρίλη	235
Εικόνα 0-19: Κατανομή των ψήφων θερμικής αποδοχής ανά σχολείο.....	236
Εικόνα 0-20: Κατανομή των ψήφων ικανοποίησης με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα ανά σχολείο (0: πλήρως ικανοποιημένοι, 6: πλήρως δυσαρεστημένοι)	236
Εικόνα 0-21: Κατανομή των ψήφων ικανοποίησης με τα επίπεδα φωτισμού ανά σχολείο (0: πλήρως ικανοποιημένοι, 6: πλήρως δυσαρεστημένοι)	237
Εικόνα 0-22: Κατανομή των ψήφων ικανοποίησης με τα επίπεδα ακουστικής ανά σχολείο (0: πλήρως ικανοποιημένοι, 6: πλήρως δυσαρεστημένοι)	237
Εικόνα 0-23: Κατανομή των ψήφων που αναφέρονται στο αν οι μαθητές πιστεύουν ότι συνολικές συνθήκες ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος ενθαρρύνουν την απόδοσή τους	238
Εικόνα 0-24: κατανομή των συμπτωμάτων άρρωστου κτιρίου των μαθητών ανά σχολείο..	238
Εικόνα 0-25: Κατανομή των συμπτωμάτων άρρωστου κτιρίου ανά σχολείο για περιπτώσεις μεγαλύτερες ή ίσες του 25% του συνόλου των μαθητών ανά σχολείο	239
Εικόνα 0-26 Κατανομή των συμπτωμάτων άρρωστου κτιρίου ανά σχολείο για περιπτώσεις μικρότερες του 25% του συνόλου των μαθητών ανά σχολείο	239

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1: 7-βάθμια κλίμακα θερμικής αίσθησης.....	31
Πίνακας 2-2: Ρύποι στο εσωτερικό περιβάλλον και πηγές αυτών (Spengler and Sexton 1983)	34
Πίνακας 2-3:Βαθμός διείσδυσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα με βάση το μέγεθός τους	42
Πίνακας 2-4: Οριακές τιμές για τα PM ₁₀ και PM _{2.5} (Ec-europa 2010), (Ess 2010).....	45
Πίνακας 3-1:Τεχνικά Χαρακτηριστικά του OSIRIS	56
Πίνακας 3-2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του P-Trak.....	57
Πίνακας 3-3: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μετρητή Handheld 3016	58
Πίνακας 3-4: Τεχνικά χαρακτηριστικά μετρητή Dust Trak	58
Πίνακας 3-5: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του PPB VOC Monitor	60
Πίνακας 3-6: Τεχνικά χαρακτηριστικά MultiRAE-IR	61
Πίνακας 3-7 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά του IAQ-CALC CO ₂ counter	62
Πίνακας 3-8: Τεχνικά χαρακτηριστικά θερμοουρομέτρων Tinytag.....	62
Πίνακας 3-9: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μετρητή INNOVA 1221	64
Πίνακας 3-10: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μετρητή φωτισμού TES 1335 Digital light meter	66
Πίνακας 3-11: Χαρακτηριστικά των σχολείων στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις	79
Πίνακας 3-12: Μετάφραση υπομνήματος κάλυψης γης στα τρία επίπεδα.....	80
Πίνακας 3-13: Χαρακτηριστικά σχολικών αιθουσών	81
Πίνακας 3-14: Ανοιγόμενη επιφάνεια στο σενάριο αερισμού "πλήρως ανοιχτά" παράθυρα & εμβαδό της επιφάνειας κάθε τάξης ανά σχολείο	86
Πίνακας 3-15: Σχολεία και ημέρες δειγματοληψίας	87
Πίνακας 5-1: Δεδομένα εισόδου τον αριθμητικό κώδικα MIAQ.....	106
Πίνακας 5-2: Συντελεστές συσχέτισης Pearson και Spearman των ρύπων του εσωτερικού προς το εξωτερικό περιβάλλον.....	118
Πίνακας 5-3: Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα των παραμέτρων εσωτερικού περιβάλλοντος των σχολείων K, Y και της κοινής περιοχής δεδομένων-C.....	123
Πίνακας 5-4: Πίνακας περιστροφής συνιστωσών (Rotated component matrix).....	125
Πίνακας 5-5: Πίνακας συσχετίσεων συντελεστών Spearman Rank μεταξύ των μετρούμενων μεταβλητών (N=73).....	128
Πίνακας 5-6: Γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης για τα στατιστικά σημαντικά ζεύγη των μετρούμενων παραμέτρων στο επίπεδο σημαντικότητας 0.01 (N=73).....	129
Πίνακας 5-7: Πολυπαραγοντικά μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης διάφορων συνδυασμών των μετρούμενων μεταβλητών.....	130

Πίνακας 5-8: Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα για τα μεγέθη: CO, CO ₂ και VOCs για καθένα από τα 9 σχολεία.....	142
Πίνακας 5-9: Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα για τα αιωρούμενα σωματίδια σε καθένα από τα 9 σχολεία για το σύνολο της περιόδου δειγματοληψίας.....	150
Πίνακας 5-10: Μέσες τιμές των εσωτερικών προς τις εξωτερικές συγκεντρώσεις (Indoor to outdoor -I/O ratio) σε καθένα από τα σχολεία	155
Πίνακας 5-11: Μέσες συγκεντρώσεις μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον με τη βαρυμετρική μέθοδο μέτρησης.....	157
Πίνακας 5-12 : Ποσοστά υπέρβασης των οριακών τιμών για το σύνολο της μετρούμενης περιόδου	165
Πίνακας 5-13: Συσχετίσεις μεταξύ της αντίληψης της ποιότητας του εσωτερικού αέρα από τους μαθητές, των εσωτερικών και εξωτερικών θερμοκρασιών	174
Πίνακας 5-14: Συντελεστές συσχέτισης Spearman's μεταξύ των συμπτωμάτων SBS και των αέριων ρύπων	184
Πίνακας 5-15: Καταναλώσεις ηλεκτρισμού και πετρελαίου θέρμανσης για τα έτη 201-2012 σε καθένα από τα σχολεία	189
Πίνακας 5-16: Συντελεστές συσχέτισης Spearman και Pearson μεταξύ των ενεργειακών καταναλώσεων και των αέριων ρύπων.....	191
Πίνακας 5-17: Δεδομένα εισόδου για την προσομοίωση της 8/4/13 του σχολείου 1	192
Πίνακας 5-18: Δεδομένα εισόδου για την προσομοίωση της 9/4/13 του σχολείου 1	194
Πίνακας 5-19: Δεδομένα εισόδου για την προσομοίωση της 15/4/13 του σχολείου 4	195
Πίνακας 5-20: Δεδομένα εισόδου για την προσομοίωση της 31/5/13 του σχολείου 11	196
Πίνακας 0-1: Πίνακας συντελεστών συσχέτισης μεταξύ των δεικτών των μετρήσεων και απαντήσεων (N=32, όσο και το σύνολο των ημερών δειγματοληψίας).....	233