



ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ
ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΟ ΕΤΟΣ 2015-2016

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Εκτίμηση των παραγόντων που επηρεάζουν το
εσωτερικό περιβάλλον με την βοήθεια
μαθηματικού μοντέλου»**

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ : Δρ. Ασημακοπούλου Μ.Ν

Επίκουρη Καθηγήτρια

Ρενδούμης Δημήτριος

Α.Μ : 201254

Αθήνα Ιούνιος 2016

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	7
2.1 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ	7
2.2 ΡΥΠΟΙ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ	8
2.3 ΡΥΠΟΙ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ ΣΕ ΣΧΟΛΙΚΑ ΚΤΙΡΙΑ	11
2.3.1 ΠΤΗΤΙΚΕΣ ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΕΝΩΣΕΙΣ.....	13
2.3.2 ΣΥΝΔΡΟΜΟ ΑΡΡΩΣΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ.....	15
2.4 ΑΕΡΟΖΟΛ	17
2.4.1 ΑΕΡΟΖΟΛ: ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	17
2.4.2 ΑΕΡΟΖΟΛ: ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ-ΕΠΙΤΠΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ.....	26
2.4.3 ΑΕΡΟΖΟΛ: ΕΠΙΤΡΕΠΤΑ ΟΡΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ.....	28
2.4.4 ΑΕΡΟΖΟΛ: ΚΙΝΗΤΗΡΙΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ.....	28
2.4.5 ΑΕΡΟΖΟΛ: ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	38
2.5 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	46
3.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	46
3.1.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ-ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ-ΣΤΟΧΟΙ	46
3.1.2 ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ-ΟΡΓΑΝΑ	49
3.1.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Μ.Ι.Α.Ω-ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	54
4.1 Μ.Ι.Α.Ω	54
4.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ.....	56
4.2.1 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	56
4.2.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ PM10 ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΙΑΩ	58
4.2.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕ ΓΥΨΟ 29/05/2013.....	88
4.2.4 ΓΕΝΙΚΟΣ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	95

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια εκτίμησης των παραγόντων που επηρεάζουν το εσωτερικό περιβάλλον. Η μελέτη εστιάζει στο εσωτερικό περιβάλλον των αιθουσών διδασκαλίας σε σχολικά κτίρια και ιδιαίτερος στην σωματιδιακή ρύπανση. Απώτερος στόχος μέσα από τις μετρήσεις και τις θεωρητικές προβλέψεις είναι η ανάδειξη και καλύτερη κατανόηση του προβλήματος της ρύπανσης του εσωτερικού αέρα και της έκθεσης των μαθητών στους διάφορους ρύπους και ιδιαίτερα στους σωματιδιακούς.

Η πειραματική μελέτη αφορά σε 9 σχολικά κτίρια στην περιοχή της Αττικής με συνολική διάρκεια 32 ημέρες. Τα κτίρια αυτά βρίσκονται εκτός του αστικού ιστού της πόλης και η επίδραση της εξωτερικής ρύπανσης στο εσωτερικό περιβάλλον αναμένεται μειωμένη. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα κατά τους μήνες Απρίλιο και Μάιο που τα συστήματα ψύξης/θέρμανσης ήταν απενεργοποιημένα λόγω εποχής. Οι μετρήσεις αυτές αφορούσαν μετεωρολογικές συνθήκες στο εσωτερικό περιβάλλον (θερμοκρασία, υγρασία), μετρήσεις αερισμού (έμμεσες με την χρήση μεθόδου απελευθέρωσης αερίου ιχνηθέτη), επίπεδα εσωτερικών και εξωτερικών συγκεντρώσεων χονδρόκοκκων σωματιδίων και καταγραφή αριθμού ατόμων ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Τα δεδομένα αυτά σε συνδυασμό με την καταγραφή οποιασδήποτε δραστηριότητας ή έκτακτου συμβάντος θα μπορούσε να επηρεάσει τις μετρήσεις καταχωρήθηκαν σε ημερολόγιο καταγραφών και αξιοποιήθηκαν μαζί με τα χαρακτηριστικά των κτιρίων (χρονολογία κατασκευής, ύψος και όγκος αιθουσών, χρήση ή όχι κλιματίας).

Στην συνέχεια υπολογίστηκαν τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά των μετρήσεων τα οποία συγκρινόμενα με ανάλογες μελέτες έδειξαν υψηλά επίπεδα εσωτερικής ρύπανσης σε σωματιδιακή ύλη παρότι τα επίπεδα αερισμού κρίθηκαν ικανοποιητικά για τα εν λόγω κτίρια με βάση προτεινόμενες τιμές.

Στο επόμενο κύριο στάδιο της παρούσας εργασίας έγιναν θεωρητικές προσομοιώσεις με το μοντέλο MIAQ προκειμένου να προβλεφθούν οι πειραματικές τιμές των εσωτερικών συγκεντρώσεων. Με την παραδοχή της καλής ανάμιξης και του ότι οι εσωτερικές πηγές ταυτίζονται με την παρουσία και την δραστηριότητα των μαθητών έγιναν θεωρητικές προσομοιώσεις με κριτήριο την καλύτερη συμφωνία πειραματικών και θεωρητικών τιμών. Με

αυτή την λογική διερευνήθηκε η ισχύς που πρέπει να αποδοθεί στους μαθητές προκειμένου να υπάρχει συμφωνία πειράματος και θεωρίας και συγκρίθηκε η τιμή αυτή με αντίστοιχες περιπτώσεις στην βιβλιογραφία.

Τέλος μελετήθηκε ο ρόλος των διαφόρων παραγόντων που επιδρούν στην μεταβολή των εσωτερικών συγκεντρώσεων των χονδρόκοκκων σωματιδίων όπως οι εξωτερικοί ρύποι, η μεταβολή των επιπέδων αερισμού αλλά και η παρουσία των μαθητών στην τάξη. Βρέθηκε ότι η μεταβολή των επιπέδων σωματιδιακής ρύπανσης μπορεί όντως να αποδοθεί στην κινητικότητα των μαθητών που έχει ως συνέπεια την επανεκπομπή σωματιδίων στον εσωτερικό αέρα ενώ επίσης σημαντική είναι η επίδραση του αερισμού που λειτούργησε ως μηχανισμός αραίωσης των συγκεντρώσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια η ρύπανση του εσωτερικού περιβάλλοντος έχει αναχθεί από την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (USEPA) ανάμεσα στους σημαντικότερους περιβαλλοντικούς κινδύνους. Ο λόγος είναι ότι παρατηρήθηκε ότι πολλές φορές ορισμένοι ρύποι στον εσωτερικό αέρα των κτιρίων υπερβαίνουν τα αντίστοιχα επίπεδα που παρατηρούνται στους εξωτερικούς χώρους. Αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι περισσότερες ώρες της ημέρας του σύγχρονου ανθρώπου αφορούν στο εσωτερικό ενός κτιρίου είτε λόγω διαβίωσης είτε λόγω εργασίας ή εκπαίδευσης ή ψυχαγωγίας καθιστούν την εσωτερική ατμοσφαιρική ρύπανση ως μεγαλύτερο κίνδυνο για την υγεία σε σχέση με την εξωτερική .

Η συχνότητα εμφάνισης άσθματος και αλλεργιών έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια τόσο στην Ελλάδα όσο και σε άλλες βιομηχανικές χώρες. Ενώ οι βασικοί λόγοι για αυτή την αύξηση δεν έχουν πλήρως διευκρινιστεί είναι σχεδόν βέβαιο ότι η κακή ποιότητα του εσωτερικού αέρα και τα διάφορα αλλεργιογόνα στους εσωτερικούς χώρους μπορούν να προκαλέσουν αντίστοιχα φαινόμενα σε ευαίσθητες κατηγορίες ατόμων. Καθίσταται επιτακτική η ανάγκη της εξεύρεσης των πιθανών αιτιών αλλά και της αποτελεσματικής αντιμετώπισης τους προκειμένου να ελαττωθεί η συχνότητα εμφάνισης αυτών των φαινομένων. Δεδομένου δε ότι τα παιδιά ανήκουν στις ευάλωτες κατηγορίες του πληθυσμού είναι ιδιαίτερα σημαντικό να προσδιοριστούν οι παράγοντες κινδύνου για αυτά.

Για τον λόγο αυτό οι χώροι που χρήζουν ιδιαίτερης μελέτης της ποιότητας του εσωτερικού αέρα είναι οι οικίες και τα σχολικά κτίρια που τα παιδιά περνούν τον περισσότερο χρόνο της ημέρας. Η ανησυχία για τα σχολικά κτίρια τα τελευταία χρόνια βαίνει αυξανόμενη γιατί παρατηρούνται ότι οι ρυθμοί αερισμού κρίνονται σε αρκετές περιπτώσεις χαμηλοί, τα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα υψηλά και τα πρότυπα εξαερισμού δεν πληρούνται πάντα. Ο περιορισμένος αριθμός μελετών σε σχέση με την ποιότητα αέρα στο εσωτερικό των σχολικών μονάδων αποτελεί ένα ακόμα λόγω ανησυχίας.

Στα πλαίσια αυτά η παρούσα εργασία αφορά στην μελέτη των επιπέδων αερισμού και των εσωτερικών συγκεντρώσεων χονδρόκοκκων σωματιδίων PM10 σε σχολικά κτίρια τα οποία ενέχουν αρκετούς κινδύνους για την υγεία των μαθητών.

Στο θεωρητικό κομμάτι αυτής της εργασίας (κεφάλαιο 2) γίνεται μια συνοπτική αναφορά στους ρύπους που συναντώνται στο εσωτερικό των κτιρίων και στους κινδύνους που ενέχουν για την υγεία των ενοίκων τους. Στην συνέχεια γίνεται ξεχωριστή αναφορά στα σχολικά κτίρια και στις πηγές αυτών των ρύπων για αυτά και παρουσιάζεται ο ρόλος των πτητικών οργανικών ενώσεων και το σύνδρομο του άρρωστου κτιρίου. Σε επόμενο στάδιο γίνεται λόγος για τους σωματιδιακούς ρύπους, που βρίσκονται στο επίκεντρο αυτής της εργασίας, όπως κύριες φυσικές και χημικές ιδιότητες, πηγές, διάκριση, επιπτώσεις στην υγεία και επιτρεπτές τιμές για τους εσωτερικούς χώρους. Ακόμα αναφέρονται οι κινητήριες δυνάμεις που επηρεάζουν την μεταβολή των συγκεντρώσεων των σωματιδιακών ρύπων στο εσωτερικό περιβάλλον και οι στρατηγικές ελέγχου τους. Τέλος παρουσιάζονται τα διάφορα μοντέλα που έχουν προταθεί για την καλύτερη μελέτη των παραγόντων που επηρεάζουν τα επίπεδα ρύπανσης στους εσωτερικούς χώρους με ξεχωριστή αναφορά στο μοντέλο M.I.A.Q που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη για την θεωρητική πρόβλεψη των εσωτερικών συγκεντρώσεων PM10.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρακτικό μέρος τη εργασίας, δηλαδή η μεθοδολογία των πειραματικών μετρήσεων, τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν, το πρωτόκολλο μετρήσεων, η παρουσίαση και ο σχολιασμός των διαγραμμάτων που προέκυψαν και αφορούν στην θεωρητική πρόβλεψη των πειραματικά μετρούμενων συγκεντρώσεων PM10 με την βοήθεια του μαθηματικού μοντέλου M.I.A.Q.

Τέλος , αναφέρονται τα αποτελέσματα και συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή την εργασία .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ

Ο όρος ποιότητα εσωτερικού αέρα (**Indoor Air Quality**) αναφέρεται στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του αέρα που απολαμβάνουν οι χρήστες κτιρίων ή κατοικιών και έχει άμεση ή έμμεση επίπτωση στην υγεία τους και στην άνετη διαμονή τους . Αυστηρότερα ο όρος (IAQ) μπορεί να εκληφθεί ως : οι «φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες που πρέπει να έχει ο εσωτερικός αέρας ώστε να μην προκαλεί ή να μην επιδεινώνει ασθένειες στους ενοίκους του κτιρίου και παράλληλα να εξασφαλίζει υψηλό επίπεδο άνεσης στην εκτέλεση των καθορισμένων δραστηριοτήτων για τις οποίες σχεδιάστηκε το κτίριο (Bronsema *et al.*, 2004). » Μελετώντας και ελέγχοντας τους ρυπαντές του αέρα στο εσωτερικό των κτιρίων μειώνονται οι κίνδυνοι για την υγεία των χρηστών τους (EPA United States Environmental Protection Agency).

Μελέτες από την EPA (United States Environmental Protection Agency) έχουν δείξει ότι οι αέριοι ρύποι στο εσωτερικό ενός κτιρίου πολλές φορές υπερβαίνουν τα επίπεδα των εξωτερικών ρύπων . Αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι πολλά άτομα και κυρίως παιδιά περνούν το 90% του χρόνου τους εντός ενός κτιρίου (Bronsema *et al.*, 2004) καθιστά πολύ σημαντικές τις μελέτες που αφορούν στον έλεγχο και την βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα.

Σύμφωνα με τον παγκόσμιο οργανισμό υγείας **WHO (World Health Organization)** υπάρχουν 2 είδη ρύπανσης του εσωτερικού αέρα : η αέρια και η σωματιδιακή. Μια διαφορετική διάκριση μπορεί να γίνει ανάλογα με το που παράγονται οι ρύποι. Έτσι έχουμε ρύπους που παράγονται κυρίως εντός του κτιρίου, ρύπους που παράγονται τόσο εντός όσο και εκτός του κτιρίου και ρύπους που παράγονται εκτός του κτιρίου (Spengler & Sexton, 1983) .

2.2 ΡΥΠΟΙ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ

Στα παρακάτω θα αναφερθούμε συνοπτικά στους ρυπαντές του εσωτερικού αέρα, τις διάφορες πηγές τους και τις συνέπειες τους στην ανθρώπινη υγεία. Παράλληλα θα ξεχωρίσουμε εκείνους που αφορούν στα σχολικά κτίρια ενώ θα αναφερθούμε ιδιαίτερα σε εκείνους που μελετώνται στην παρούσα εργασία.

Ρύποι που παράγονται (κυρίως) εκτός του κτιρίου :

Οξείδια του θείου : κύρια πηγή η καύση ορυκτών καυσίμων. Συνήθως βρίσκεται σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις εντός του κτιρίου σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον (Spengler & Sexton, 1983). Προκαλεί ερεθισμό στα μάτια , μύτη και στο λαιμό ενώ σε μακροχρόνια έκθεση προκαλεί αναπνευστικά προβλήματα (Spengler, Samet, & McCarthy, 2001).

Οζον: κύρια πηγή οι φωτοχημικές αντιδράσεις. Συνήθως βρίσκεται σε χαμηλές συγκεντρώσεις εντός του κτιρίου (Spengler & Sexton, 1983). Είναι ισχυρό οξειδωτικό που προκαλεί : ερεθισμό στα μάτια , στην μύτη και στο λαιμό, γενικότερα δυσφορία ενώ σε μεγαλύτερες εκθέσεις/συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει δυσκολία στην αναπνευστική λειτουργία, ασθματικές κρίσεις κ.α (Spengler *et al.*, 2001).

Γύρη: κύρια πηγή τα δέντρα και τα φυτά. Συνήθως βρίσκεται σε χαμηλές συγκεντρώσεις εντός του κτιρίου (Spengler & Sexton, 1983). Προκαλεί κυρίως έξαρση σε αλλεργίες στα μάτια , στη μύτη , στο δέρμα και επιβαρύνει όσους έχουν άσθμα (Spengler *et al.*, 2001) .

Μόλυβδος, μαγγάνιο : κύρια πηγή οι κινητήρες εσωτερικής καύσης αυτοκινήτων . Βρίσκεται σε χαμηλές συνήθως συγκεντρώσεις εντός ενός κτιρίου (Spengler & Sexton, 1983).

Ασβέστιο, γλώριο, πυρίτιο, κάδμιο : κύρια πηγή οι βιομηχανικές εκπομπές. Συναντώνται γενικά σε χαμηλές συγκεντρώσεις εντός ενός κτιρίου (Spengler & Sexton, 1983).

Οργανικές ουσίες : κύρια πηγή οι πετροχημικοί διαλύτες και η εξάτμιση άκαυστων καυσίμων. Συναντώνται συνήθως σε χαμηλές συγκεντρώσεις εντός ενός κτιρίου (Spengler & Sexton, 1983).

Ρύποι που παράγονται εντός/εκτός του κτιρίου :

Μονοξείδιο,διοξείδιο του αζώτου : παράγονται από την κατανάλωση καυσίμων αλλά και από κουζίνες αερίου και θερμάστρες. Συναντάται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εντός ενός κτιρίου παρά εκτός (Spengler & Sexton, 1983) αλλά συνήθως σε επίπεδα χαμηλότερα εκείνων που το καθιστούν τοξικό (Spengler *et al.*, 2001). Η παρατεταμένη έκθεση μπορεί να προκαλέσει ευαισθησία σε λοιμώξεις του αναπνευστικού και να επηρεάσει δυσμενώς άτομα με άσθμα. Ιδιαίτερα ευάλωτα αναμένεται να είναι βρέφη και μικρά παιδιά εξαιτίας των στενότερων αεραγωγών αυτών των πληθυσμιακών ομάδων (Spengler *et al.*, 2001).

Μονοξείδιο του άνθρακα : είναι από τους πιο συχνά εμφανιζόμενους ρύπους και παράγεται από μη αεριζόμενες εστίες καύσης και από καπνό τσιγάρου ως προϊόν ημιτελούς καύσης. Βρίσκεται σε συγκεντρώσεις τουλάχιστον ίσες με του εξωτερικού αέρα μέσα σε ένα κτίριο (Maroni, Seifert, & Lindvall, 1995). Είναι δηλητηριώδες και μπορεί να επιφέρει ακόμα και το θάνατο (Spengler *et al.*, 2001).

Διοξείδιο του άνθρακα : παράγεται από διεργασίες μεταβολισμού (π.χ ανθρώπινη αναπνοή) και διαδικασίες καύσης (Spengler & Sexton, 1983). Συναντάται σε υψηλότερες σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον συγκεντρώσεις ενώ φαίνεται να είναι σχετικά ακίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία

πλην από εξαιρετικές περιπτώσεις όπου σε υψηλές συγκεντρώσεις και με ταυτόχρονη ελλείψη οξυγόνου μπορεί να προκαλέσει ασφυξία (Spengler *et al.*, 2001).

Αιωρούμενα σωματίδια : Παράγονται ως προϊόν καύσης ή καπνού από τσιγάρο ενώ κύρια πηγή συνιστά και η επαναιώρηση (Spengler & Sexton, 1983). Τα σωματίδια αιθάλης που δημιουργούνται από καύση θεωρούνται καρκινογόνα (Maroni *et al.*, 1995) . Θα αναφερθούμε εκτενώς παρακάτω σε αυτά.

Μύκητες, μούχλα : διάφορες πηγές όπως έδαφος φυτά κ.α. Κυρίως προκαλούν αλλεργίες ,ρινίτιδα ,δερματίτιδες κ.α (Maroni *et al.*, 1995).

Ρύποι που παράγονται (κυρίως) εντός του κτιρίου :

Ραδόνιο : Έχει κύρια πηγή το έδαφος αλλά και τα υλικά κατασκευής του κτιρίου (Spengler & Sexton, 1983). Είναι ραδιενεργό με χρόνο ημιζωής 4 ημέρες και έτσι είναι καρκινογόνο (Maroni *et al.*, 1995).

Φορμαλδεΰδη : κύρια πηγή αποτελούν τα έπιπλα κατασκευασμένα από μοριοσανίδα καθώς επίσης διάφορα μονωτικά υλικά αλλά και καπνός από τσιγάρο (Spengler & Sexton, 1983). Συναντάται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εντός κτιρίου (Spengler & Sexton, 1983). Έχει ποικίλες επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό και είναι καρκινογόνος ουσία (Maroni *et al.*, 1995).

Αμίαντος : κύρια πηγή είναι τα μονωτικά υλικά και τα υλικά αντιπυρικής προστασίας (Spengler & Sexton, 1983). Ανήκει στα καρκινογόνα υλικά (Maroni *et al.*, 1995) .

Αμμωνία : κύρια πηγή είναι τα προϊόντα καθαρισμού αλλά παράγεται και ως προϊόν διεργασιών μεταβολισμού (Spengler & Sexton, 1983). Σε μεγάλες συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει από απλό ερεθισμό σε μάτια, μύτη και

λαιμό μέχρι πονοκεφάλους, ναυτία κ.α (Wisconsin Department of Health Services, 2000).

Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs) : κύρια πηγή τους είναι ο καπνός του τσιγάρου (Spengler & Sexton, 1983). Είναι υπεύθυνοι για καρκινογενέσεις (Maroni *et al.*, 1995) .

Μικροοργανισμοί : κύριες πηγές είναι οι άνθρωποι, τα ζώα και τα φυτά (Spengler & Sexton, 1983).

Αλλεργιογόνα : με κύρια πηγή την σκόνη τα έντομα και τα κατοικίδια ζώα (Spengler & Sexton, 1983).

2.3 ΡΥΠΟΙ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ ΣΕ ΣΧΟΛΙΚΑ ΚΤΙΡΙΑ

Όσον αφορά ειδικότερα στα σχολικά κτίρια σύμφωνα και με την έκθεση του ευρωπαϊκού προγράμματος SINFONIE (Schools Indoor Pollution and Health – Observatory Network in Europe) η ρύπανση του εσωτερικού αέρα εξαρτάται τόσο από το εξωτερικό περιβάλλον όσο και από τα υλικά κατασκευής του κτιρίου, τον εξαερισμό και τις συνήθειες των χρηστών του (Csobod *et al.*, 2014).

Ειδικότερα η περιοχή που βρίσκεται το σχολικό κτίριο (κοντά σε βιομηχανική περιοχή για πχ) έχει άμεση συνέπεια στην εξωτερική ατμοσφαιρική ρύπανση γύρω από το σχολικό κτίριο . Έτσι έμμεσα επηρεάζεται και η ποιότητα του εσωτερικού του αέρα δεδομένου ότι υπό προϋποθέσεις μέρος αυτής της ρύπανσης μέσω του συστήματος εξαερισμού ή του κελύφους του κτιρίου θα διεισδύσει και θα μολύνει και τον εσωτερικό αέρα.

Επίσης τα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή του κτιρίου, η παλαιότητα του (λόγω φθοράς των υλικών) μπορούν υπό προϋποθέσεις να αποτελέσουν πηγές εκπομπής ρύπων στο εσωτερικό του κτιρίου.

Τέλος οι δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα (πχ ανακαίνιση κτιρίου ή συστήματα θέρμανσης) αλλά και οι συνήθειες των χρηστών του κτιρίου (πχ κάπνισμα) αποτελούν επίσης πηγές εσωτερικής ρύπανσης.

ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΤΗΡΙΟΥ, ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΙΣ & ΕΠΙΠΛΑ	ΆΛΛΕΣ ΠΙΘΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ
Ρύπανση του εξωτερικού αέρα <ul style="list-style-type: none"> • Γύρη, σκόνη, σπόρια, μούχλας • Βιομηχανικές εκπομπές • Εκπομπές οχημάτων • Εξωτερικές εκπομπές μηχανημάτων 	HVAC εξοπλισμός <ul style="list-style-type: none"> • Ανάπτυξη μούχλας στα δοχεία συλλογής νερού, στους αγωγούς, στα πηνία και στους υγραντήρες • Ακατάλληλος εξαερισμός των προϊόντων καύσης • Σκόνη και θραύσματα στους αγωγούς Άλλος εξοπλισμός <ul style="list-style-type: none"> • Εκπομπές από τον εξοπλισμό των γραφείων (πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC), όζον) • Εκπομπές από εξοπλισμό καταστημάτων, εργαστηρίων και καθαρισμού Περιεχόμενα <ul style="list-style-type: none"> • Ανάπτυξη μούχλας πάνω σε ή μέσα σε λερωμένα ή κατεστραμμένα από το νερό υλικά • Σιφόνια που επιτρέπουν τη διέλευση αναθυμιάσεων από τους υπνόμους • Υλικά που περιέχουν VOCs (πτητικές οργανικές ενώσεις), ανόργανες ενώσεις ή κατεστραμμένο αμιάντο • Υλικά που παράγουν σωματίδια (σκόνη) 	<ul style="list-style-type: none"> • Προμήθειες επιστημονικών εργαστηρίων • Προμήθειες επαγγελματικής τέχνης • Χώροι προετοιμασίας φαγητού • Χώροι καπνίσματος • Προϊόντα καθαρισμού / αποσμητικά χώρου • Εκπομπές απορριμμάτων • Παρασιτοκτόνα • Οσμές, ΑΕ (αιωρούμενα σωματίδια) και από VOCs από μπουγιές, υλικά στεγανοποίησης, κόλλες, βερνίκια • Χρήστες του κτιρίου με μολυσματικές ασθένειες • Μαρκαστόφοι λευκού πίνακα και παρόμοια στυλό
Κοντινές πηγές <ul style="list-style-type: none"> • Αποβάθρες φόρτωσης • Οσμές από κάδους απορριμμάτων • Ανθυγιεινά μπάζα ή καυσαέρια κτιρίων που βρίσκονται κοντά σε εξωτερικά σημεία εισαγωγής αέρα 	Επίπλωση <ul style="list-style-type: none"> • Εκπομπές από καινούρια έπιπλα και δάπεδα • Ανάπτυξη μούχλας πάνω σε ή μέσα σε λερωμένα ή κατεστραμμένα από το νερό έπιπλα 	<ul style="list-style-type: none"> • Εντομα και άλλα παράσιτα • Προϊόντα προσωπικής υγιεινής • Αποθηκευμένη βενζίνη και εξοπλισμός για γρασίδι και κήπο
Υπόγειες πηγές <ul style="list-style-type: none"> • Ραδόνιο • Παρασιτοκτόνα • Διαρροές από υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης 		

Πίνακας 1 :Τυπικές πηγές αερίων ρύπων στο εσωτερικό των σχολικών κτιρίων

Note. Reprinted from "SINPHONIE: Schools Indoor Pollution & Health Observatory Network in Europe," by Csobod, E. and Annesi-Maesano, 2014,

Στον προηγούμενο πίνακα φαίνονται συνοπτικά οι τυπικές πηγές των αερίων ρύπων που συναντώνται στο εσωτερικό των σχολικών κτιρίων όπως αποτυπώνεται στην έκθεση του ευρωπαϊκού προγράμματος SINPHONIE .

Όπως προκύπτει και από τον παραπάνω πίνακα πολλές και διάφορες είναι οι πηγές που μπορούν να επηρεάσουν τον εσωτερικό αέρα στα σχολικά κτίρια. Οι (de Gennaro *et al.*, 2014) με βάση την επιστημονική βιβλιογραφία γύρω από την

ποιότητα αέρα στα σχολικά κτίρια αναφέρουν τελικά ότι πιο συχνά ο εσωτερικός αέρας των σχολικών κτιρίων μολύνεται από αιωρούμενα σωματίδια (**PM's**), πτητικές οργανικές ενώσεις (**VOC's**), φορμαλδεΐδη, καρβονυλικές ενώσεις και άλλα ανόργανα αέρια (**NO_x**, **CO**, **SO₂**, **CO₂** and **O₃**) .

2.3.1 ΠΤΗΤΙΚΕΣ ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΕΝΩΣΕΙΣ

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις (Wolkoff, 1995) είναι ένα πλήθος οργανικών ουσιών με σημεία βρασμού από περίπου 0°C έως περίπου 400°C . Με βάση το σημείο βρασμού κατατάσσονται σε 4 υποκατηγορίες :

- Very volatile organic compounds **VVOC's** με σημεία βρασμού από χαμηλότερες του 0°C έως και 50-100°C
- Volatile organic compounds **VOC's** με σημεία βρασμού από την περιοχή 240-260°C έως και 380-400°C
- Semi-volatile organic compounds **SVOC's** με σημεία βρασμού από την περιοχή 50-100°C έως και 240-260°C
- Organic compounds associated with particulate (organic) matter **POM's** με σημεία βρασμού μεγαλύτερα από 380°C

Όπως αναφέρουν (L Mølhave *et al.*, 1997) ένας όρος που έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται στην βιβλιογραφία για αυτές τις ουσίες είναι ο όρος **Total Volatile Organic Compounds (TVOC)** και αναφέρεται στην συνολική συγκέντρωση τους (ως μίγμα) των διαφόρων οργανικών ουσιών όλων των κατηγοριών . Αυτός ο όρος κατά ελάχιστον πρέπει να περιλαμβάνει αρωματικούς υδρογονάνθρακες (πχ βενζόλιο), αλειφατικούς υδρογονάνθρακες (πχ κανονικό εξάνιο), κυκλοαλκάνια (πχ κυκλοεξάνιο), τερπένια (πχ λιμονένιο), αλκοόλες (πχ προπανόλη-2), γλυκόλες (πχ 2-μεθοξυ-αιθανόλη), αλδεΐδες (πχ βουτανόλη), κετόνες (πχ μέθυλο-αίθυλο κετόνη), αλογονάνθρακες (πχ

τριχλωροαιθάνιο), οξέα (πχ εξανοϊκό οξύ), εστέρες (πχ οξικός αιθύλεστερας) με σημεία βρασμού στο εύρος που αναφέρθηκε παραπάνω.

Ιδιαίτερα σημαντικές πτητικές ουσίες με αξιόλογες επιπτώσεις στην υγεία των παιδιών (άρα βασικοί ρύποι για τα σχολικά κτίρια) αποτελούν οι παρακάτω (de Gennaro *et al.*, 2014) : βενζόλιο, ναφθαλίνη, φορμαλδεΐδη, τολουόλιο, ξυλόλιο, στυρόλιο, λιμονένιο, άλφα-πινένιο, και διχλωρομεθάνιο . Από αυτές το βενζόλιο, ξυλόλιο, τολουόλιο και στυρόλιο βρίσκονται σε διαλύτες και χρώματα που χρησιμοποιούνται για πχ ως υλικά ζωγραφικής και χειροτεχνίας. Σε κόλλες και σπρέι βαφής βρίσκεται συχνά διχλωρομεθάνιο ενώ σε προϊόντα καθαρισμού λιμονένιο και άλφα-πινένιο.

Ποικίλες είναι οι επιπτώσεις (Guo, Lee, Chan, & Li, 2004) στην υγεία που συνδέονται με την έκθεση σε VOC's. Αναπνευστικές δυσλειτουργίες βραχύβιες ή μακροπρόθεσμες, νευρολογική τοξικότητα, καρκίνος του πνεύμονα, αλλεργίες στα μάτια και το λαιμό αλλά και πιο κοινά συμπτώματα νευρολογικής φύσης όπως ζαλάδες, ναυτίες, έντονη κούραση ακόμα και κατάθλιψη έχουν καταγραφεί ως επιπτώσεις στην εισπνοή η επαφή με τις διάφορες πτητικές οργανικές ουσίες.

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι συγκεντρώσεις των VOC's εντός ενός κτιρίου τείνουν να είναι μεγαλύτερες από ότι στο εξωτερικό περιβάλλον. Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε κατοικίες στο Ηνωμένο Βασίλειο βρέθηκε ότι ο λόγος των εσωτερικών προς τις εξωτερικές συγκεντρώσεις μπορεί να είναι και πάνω από 10 (C. Yu & Crump, 1998). Ενδιαφέρον αποτελεί επίσης το στοιχείο ότι σε νεοεπιπλωμένα κτίρια, καινούργια, έτοιμα για χρήση η συγκέντρωση των VOC's βρέθηκε σε πολύ υψηλά επίπεδα για να υποχωρήσει κατά 10 τουλάχιστον φορές μέσα στους 6 πρώτους μήνες (C. Yu & Crump, 1998).

Ο (Lars Mølhave, 1991) αναφέρει εύρη συγκεντρώσεων των TVOC's που δείχνουν τα επίπεδα στα οποία οι ρύποι αυτοί έχουν σημαντικές συνέπειες στην υγεία. Έτσι συγκεντρώσεις πάνω από 25 mg/cm³ αντιστοιχούν σε τοξικά επίπεδα και αρκετές συνέπειες στην υγεία ενώ επίπεδα κάτω από 3 mg/cm³ ανήκουν στα επίπεδα άνεσης του ατμοσφαιρικού αέρα για τους χρήστες των κτιρίων.

Σε πολλές δημοσιεύσεις γίνεται συσχέτιση των VOC's με το «Σύνδρομο του άρρωστου κτιρίου» ως μια από τις κύριες αιτίες για την κατάσταση αυτή (Brinke *et al.*, 1998; C. W. F. Yu & Kim, 2010).

2.3.2 ΣΥΝΔΡΟΜΟ ΑΡΡΩΣΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Οι επιδράσεις του μολυσμένου εσωτερικού αέρα στους χρήστες των κτιρίων συνήθως οδηγούν σε εκδήλωση παραπόνων για αποπνικτική ατμόσφαιρα ή για δυσσομία. Σε άλλες περιπτώσεις έχουν ως αποτέλεσμα ορισμένες ασθένειες που σχετίζονται άμεσα με το εσωτερικό περιβάλλον του κτιρίου όπως η νόσος των λεγεωνάριων ή άσθμα οφειλόμενο στο κτίριο . Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις όπου αναφέρονται ιατρικά συμπτώματα που πιθανόν να έχουν σχέση με το κτίριο αλλά γενικά, τα αίτια τους παραμένουν ασαφή. Ακριβώς για αυτές τις τελευταίες περιπτώσεις έχει εισαχθεί ο όρος «Σύνδρομο άρρωστου κτιρίου» (SBS) (Norbäck, 2009).

Στα πιο συνηθισμένα συμπτώματα του άρρωστου κτιρίου αναφέρονται : (Redlich, Sparer, & Cullen, 1997) διάφοροι ερεθισμοί σε μάτια μύτη και λαιμό, βήχας, πονοκέφαλοι, δερματολογικά εξανθήματα ακόμα και διαταραχές στην οσμή την αντίληψη ή και την όραση. Παρότι δεν υπάρχει καθολικά αποδεκτός ορισμός ιατρικά για τον όρο «Σύνδρομο άρρωστου κτιρίου» τα χαρακτηριστικά του είναι μη συγκεκριμένα συμπτώματα που δεν οφείλονται σε κάποια ασθένεια

τα οποία μπορεί να εξασθενούν ή να εξαλείφονται τελείως (Abdul-Wahab, 2011) όταν ο χρήστης του κτιρίου απομακρύνεται από το κτίριο.

Παρά το πλήθος των ερευνών γύρω από το σύνδρομο του άρρωστου κτιρίου ελάχιστα έχουν θεωρηθεί ως κοινά αποδεκτά αίτια για αυτή την κατάσταση (Shah & Shah, 2015). Όπως αναφέρεται (Joshi, 2008) πιθανοί παράγοντες πρόκλησης του φαινομένου μπορούν να θεωρηθούν οι παρακάτω :

Χημικοί ρύποι : είτε από εξωτερικές πηγές (καυσαέρια) είτε από εσωτερικές πηγές (VOC's).

Βιολογικοί ρύποι: περιλαμβάνουν γύρη, μύκητες, αερομεταφερόμενες ασθένειες πχ νόσος των λεγεωνάριων.

Ανεπαρκής αερισμός : υπάρχουν πρότυπα που έχουν καθιερωθεί για τον ελάχιστο δυνατό εξαερισμό από την American Society of Heating, Refrigeration and AirConditioning Engineers (ASHRAE) πχ για χώρους γραφείων ρυθμός αερισμού 20 κυβικά εκατοστά ανά λεπτό και ανά άτομο. Κάτω από αυτά τα επίπεδα ο αερισμός θεωρείται ανεπαρκής και ευνοεί για την αυξημένη συγκέντρωση ρύπων όπως για πχ της σωματιδιακής ρύπανσης (σκόνη).

Άλλες αιτίες : όπως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ανεπαρκής φωτισμός και ψυχολογικοί παράγοντες.

Σε γενικές γραμμές η ταυτότητα ενός ύποπτου κτιρίου που μπορεί να πάσχει από το σύνδρομο του άρρωστου κτιρίου είναι ένα καινούργιο ή πρόσφατα ανακαινισμένο κτίριο (Redlich *et al.*, 1997) με εγκατεστημένο σύστημα θέρμανσης εξαερισμού και κλιματισμού. Τα φαινόμενα αφατούν, δλδ αρχιτεκτονικώς ελκυστικά και σύγχρονα κτίρια μπορεί να έχουν προσβληθεί από το σύνδρομο αυτό εξίσου πιθανά με παλαιά κτίρια που απλώς έχουν βρώμικα χαλιά. Επομένως ακόμα και τα σχολικά κτίρια παρότι θεωρούνται μη

βιομηχανικοί χώροι και μακριά από πηγές βιομηχανικής ρύπανσης είναι πιθανόν να πάσχουν από το σύνδρομο του άρρωστου κτιρίου.

2.4 ΑΕΡΟΖΟΛ

2.4.1 ΑΕΡΟΖΟΛ: ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Αεροζόλ, αερολύματα ή αλλιώς αιωρούμενα σωματίδια συνιστούν ένα σύμπλεγμα από υγρά ή στερεά σωματίδια που αιωρούνται σε ένα αέριο μέσο για χρονικό διάστημα τέτοιο, ώστε να είναι δυνατή η παρατήρηση και η καταγραφή τους. Το κάθε σωματίδιο είναι μικρό και διακριτό αντικείμενο. (Morawska & Salthammer, 2006). Στην παρούσα εργασία θα αναφερόμαστε σε αυτά ως αιωρούμενα σωματίδια ή PM (**P**articulate **M**atter).

Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν βασικό ρυπαντή του ατμοσφαιρικού αέρα τόσο του εσωτερικού όσο και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Προέρχονται από μια ποικιλία πηγών και διαθέτουν ένα πλήθος από μορφολογικές, χημικές, φυσικές και θερμοδυναμικές ιδιότητες. Παραδείγματα αποτελούν τα αιωρούμενα σωματίδια που περιλαμβάνουν προϊόντα καύσης όπως η αιθάλη, σωματίδια που παράγονται μέσω φωτοχημικών διεργασιών όπως αυτά που βρίσκονται στο φωτοχημικό νέφος στις μεγαλουπόλεις αλλά και σωματίδια τα οποία επανεκπέμπονται στον αέρα ενώ αρχικά είχαν επικαθήσει σε επιφάνειες όπως για πχ η σκόνη. Ορισμένα σωματίδια είναι υγρά, άλλα είναι στερεά άλλα μπορεί να περιέχουν στέρεο πυρήνα που περιβάλλεται από υγρό. Μπορεί να περιέχουν ανόργανα ιόντα, μεταλλικές ενώσεις, άτομα άνθρακα, οργανικές ενώσεις αλλά και κρυσταλλικές ενώσεις. Το πλήθος των οργανικών ενώσεων στα αιωρούμενα σωματίδια μπορεί να περιλαμβάνει εκατοντάδες διαφορετικές οργανικές ουσίες. Όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό λόγω της αιώρησης αυτών των σωματιδίων είναι δυνατή η αλληλεπίδραση και επομένως ο σχηματισμός νέων ενώσεων μέσω χημικών διεργασιών κάτι που αυξάνει την

πολυπλοκότητα της φύσης αυτών των σωματιδίων. Τα σωματίδια που προέρχονται απευθείας από κάποια πηγή αναφέρονται ως πρωτεύοντα ενώ αυτά που σχηματίζονται από συνδυασμό πρωτεύοντων ως δευτερεύοντα. Κάθε σωματίδιο μπορεί να αποτελεί μίγμα σωματιδίων από πολλές πηγές και υπό αυτή την έννοια τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να θεωρηθούν ως μίγμα από διάφορα μίγματα σωματιδίων.

Τα αιωρούμενα σωματίδια που συναντώνται στον εσωτερικό αέρα των κτιρίων μπορούν να προέρχονται τόσο από το εσωτερικό όσο και από το εξωτερικό του κτιρίου. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται οι πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων :

Φυσικές εξωτερικές πηγές :	Εσωτερικές πηγές :
<ul style="list-style-type: none"> • Συντρίμμια από χώμα και βράχια • Δασικές πυρκαγιές • Θαλασσινό άλας • Ηφαιστειακές εκρήξεις • Σωματίδια που σχηματίζονται από αέριες εκπομπές των H_2S, NH_3, NO_x και HC 	<ul style="list-style-type: none"> • Χρήστες κτιρίων • Φυτά, ζώα • Μαγείρεμα • Δομικά υλικά • Καπνός τσιγάρου • Συσκευές καύσης • Προϊόντα συντήρησης • Ανθρώπινες δραστηριότητες (πχ κατασκευές)
<p>Ανθρωπογενείς εξωτερικές πηγές :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Καύσεις και βιομηχανικές διεργασίες • Βιομηχανικές εκπομπές • Μη βιομηχανικές εκπομπές (πχ σκόνη από γεωργικές εργασίες) • Μεταφορές 	

Πίνακας 2 :Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων

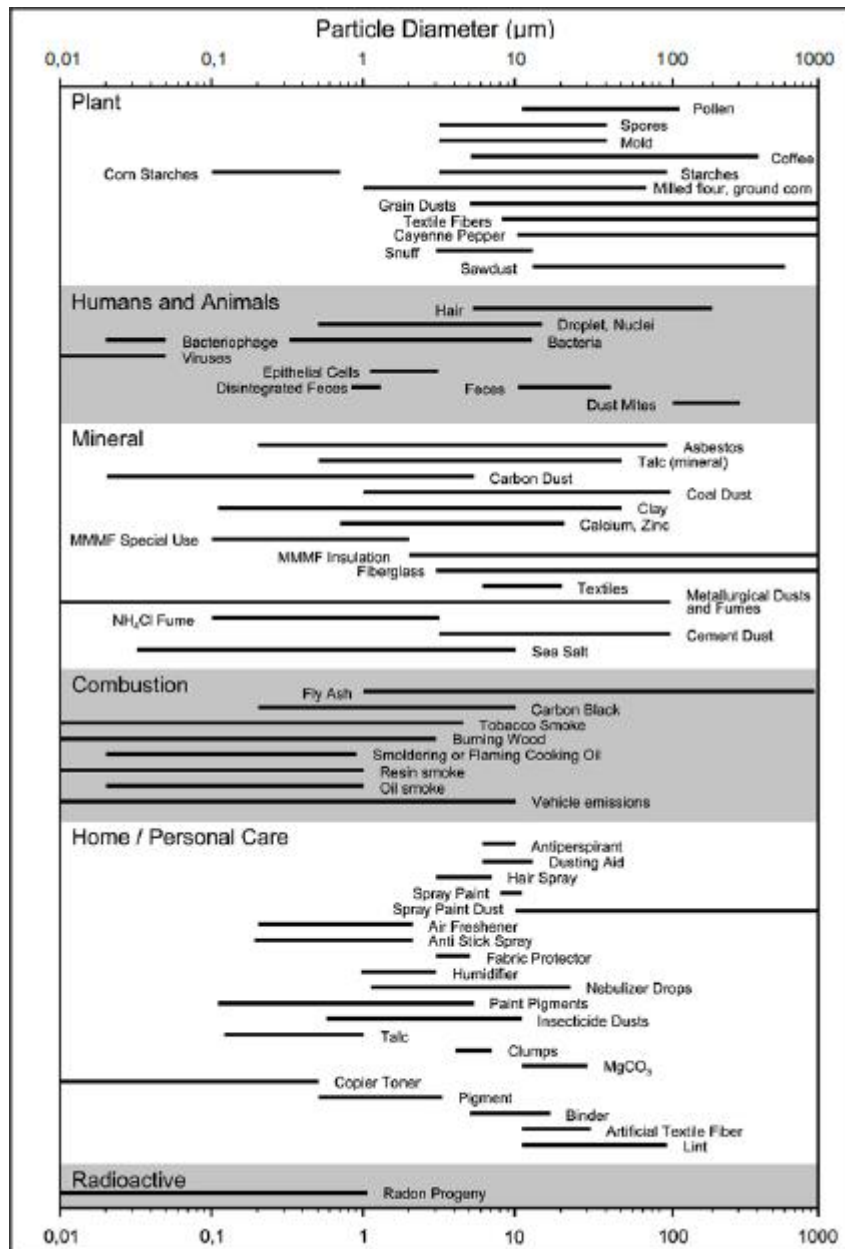
Note. Reprinted from "Indoor environment: airborne particles and settled dust" by Morawska, L., & Salthammer, T. (2006)

Η μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων εξυπηρετείται καλύτερα αν αυτά διακριθούν σε κατηγορίες ανάλογα με συγκεκριμένες ιδιότητες τους παρά με

την μελέτη καθενός από τα συστατικά τα οποία περιέχουν. Για τον λόγο αυτό θα αναφερθούμε παρακάτω στην ταξινόμηση των σωματιδίων.

Καταρχήν όμως πρέπει να ξεκαθαρίσουμε ότι η διάμετρος για ένα σφαιρικό σωματίδιο μπορεί να μετρηθεί με μεθόδους οπτικής μικροσκοπίας, μέσω της θεωρίας σκέδασης ή από την αεροδυναμική συμπεριφορά του σωματιδίου. Ωστόσο τα αιωρούμενα σωματίδια δεν είναι απαραίτητα σφαιρικά. Έτσι εισάγεται ένας όρος : η «ισοδύναμη» διάμετρος, η οποία αντιστοιχεί σε κάθε σωματίδιο ανεξαρτήτως σχήματος και ορίζεται ως η διάμετρος ενός φανταστικού σφαιρικού σωματιδίου με ίδιες φυσικές ιδιότητες με το πραγματικό σωματίδιο. Αυτή καθορίζεται από την ιδιότητα, του προς μελέτη σωματιδίου που κρίνεται ως σημαντικότερη πχ για τα «πολύ μικρά» σωματίδια, στα οποία η διάχυση υπερισχύει των άλλων ιδιοτήτων, η κατάλληλη ισοδύναμη διάμετρος είναι η διάμετρος Stokes. Η διάμετρος του Stokes (Stokes aerodynamic diameter), D_s είναι η διάμετρος μίας σφαίρας που έχει την ίδια πυκνότητα και ταχύτητα καθίζησης με το θεωρούμενο σωματίδιο. Επιτρέπει την τυποποίηση σωματιδίων διαφόρων σχημάτων μέσω σφαιρών που εμφανίζουν την ίδια αεροδυναμική ιδιότητα (ταχύτητα εναπόθεσης). Για μεγαλύτερα σωματίδια ($>0.5 \mu\text{m}$) η αεροδυναμική διάμετρος είναι η ιδανική για την περιγραφή αυτών των σωματιδίων. Ορίζεται αντίστοιχα αλλά εδώ παίζει ρόλο και η πυκνότητα των σωματιδίων αυτών. Συγκεκριμένα ορίζεται ως η διάμετρος σφαιρικού σωματιδίου που καθιζάνει με τον ίδιο ρυθμό με το υπό εξέταση σωματίδιο σε ακίνητο υγρό, αλλά με πυκνότητα 1 gr/cm^3 (U.S EPA, 2004).

Όσον αφορά την ταξινόμηση κρίνεται αναγκαίο να δούμε στο επόμενο διάγραμμα τις τάξεις μεγέθους των πιο κοινών αιωρούμενων σωματιδίων που συναντάμε στους εσωτερικούς αλλά και στους εξωτερικούς χώρους.



Εικόνα 1 : Διάγραμμα με είδη αιωρούμενων σωματιδίων και μέγεθος

Note. Reprinted from "Indoor environment: airborne particles and settled dust" by Morawska, L., & Salthammer, T. (2006)

Γενικά οι τάξεις μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων κυμαίνονται από 0.005 µm έως 100 µm (Holmes & Tuckett, 2000). Το πάνω όριο αντιστοιχεί στο μέγεθος λεπτού κόκκου άμμου ή υπέρλεπτης σταγόνας, τα οποία είναι αρκετά

μεγάλα σωματίδια για να μπορούν να παραμείνουν αιωρούμενα στον αέρα και έτσι σε σύντομο χρονικό διάστημα καταλήγουν στο έδαφος.

Έτσι διακρίνουμε (Whitby, 1978) τα :

-**Λεπτόκοκκα (fine particles)** αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο $< 2.0 \mu\text{m}$ τα οποία υποδιαιρούνται και σε περαιτέρω κατηγορίες.

«**Nucleation mode**» (Baron & Willeke, 2011) με διάμετρο μικρότερη από $0.10 \mu\text{m}$, με σωματίδια που εκπέμπονται άμεσα από πηγές καύσης ή από την συμπύκνωση των αερίων εκπομπών αφού ψυχθούν (Abubaker Sulyman, 2015). Έχουν μικρούς χρόνους ζωής, λιγότερο από μια ώρα, γιατί γρήγορα συνενώνονται με μεγαλύτερα σωματίδια ή λειτουργούν ως πυρήνες συμπύκνωσης σε νέφη . Για αυτό συναντώνται μόνο κοντά στις πηγές τους και θεωρούνται πρωτογενή σωματίδια. Χαρακτηρίζονται αλλιώς και ως **υπερλεπτόκοκκα** σωματίδια (**ultrafine particles**).

«**Accumulation mode**» με διάμετρο μεταξύ $0.10 \mu\text{m}$ και $2.0 \mu\text{m}$. Αυτά προέρχονται από την συνένωση μικρότερων σωματιδίων που έχουν προέλθει από εκπομπή αερίων καύσης ή από συμπύκνωση πτητικών ενώσεων (Abubaker Sulyman, 2015). Περιλαμβάνουν σχεδόν το σύνολο της μάζας των λεπτόκοκκων σωματιδίων (Baron & Willeke, 2011). Στην κατηγορία αυτή αναφέρονται τα λεγόμενα **PM_{2.5}** σωματίδια, δηλ σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από $2.5 \mu\text{m}$. Οι πηγές αυτών είναι κατά κύριο λόγο ανθρωπογενείς δραστηριότητες .

Γενικά τα σωματίδια αυτά περιέχουν θειικό αμμώνιο, νιτρικό αμμώνιο καθώς και οργανικό και στοιχειακό άνθρακα (Abubaker Sulyman, 2015).

-**Χονδρόκοκκα (coarse particles)** με διάμετρο $>2.0 \mu\text{m}$ τα οποία είναι συνήθως πρωτογενή σωματίδια δηλ εκπέμπονται απευθείας από τις πηγές. Δημιουργούνται επίσης και μέσω μηχανικών διεργασιών, διάσπαση

μεγαλύτερων σωματιδίων που παράγονται από εξάτμιση σπρέι ή επαναιώρηση σκόνης. Στις πηγές περιλαμβάνονται βιομηχανικές εκπομπές και γεωργικές δραστηριότητες. Στα σωματίδια αυτά κατατάσσονται ακόμα και σωματίδια γύρης, μούχλας, υπολείμματα φυτών και εντόμων (Chow & Watson, 1998; Wilson & Suh, 1997). Στα σωματίδια αυτά περιλαμβάνονται και τα λεγόμενα **PM10** δλδ σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 10 μm.

Η διάκριση των σωματιδίων σε λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα είναι ουσιώδης καθώς έχουν σημαντικές διαφορές τόσο στην πηγή προέλευσης όσο και στις ιδιότητες. Στον παρακάτω πίνακα μπορούμε συνοπτικά να διακρίνουμε τις βασικές διαφορές :

	Fine-Mode Particles	Coarse-Mode Particles
Formed from:	Gases.	Large solids/droplets.
Formed by:	Chemical reaction or vaporization. Nucleation, condensation on nuclei, and coagulation. Evaporation of fog and cloud droplets in which gases have dissolved and reacted.	Mechanical disruption (crushing, grinding, abrasion of surfaces, etc.). Evaporation of sprays. Suspension of dusts.
Composed of:	Sulfate, nitrate, ammonium, and hydrogen ions. Elemental carbon. Organic compounds (e.g., polyaromatic hydrocarbons). Metals (e.g., lead, cadmium, vanadium, nickel, copper, zinc, manganese, iron). Particle-bound water.	Resuspended dust (soil dust, street dust). Coal and oil fly ash. Oxides of crustal elements, (silicon, aluminum, titanium, and iron). CaCO ₃ , NaCl, sea salt. Pollen, mold, fungal spores. Plant/animal fragments. Tire wear debris.
Solubility:	Largely soluble, hygroscopic, and deliquescent.	Largely insoluble and nonhygroscopic.
Sources:	Combustion of coal, oil, gasoline, diesel fuel, and wood. Atmospheric transformation products of nitrogen oxides, SO ₂ , and organic compounds, including biogenic organic species (e.g., terpenes). High-temperature processes, smelters, steel mills, etc.	Resuspension of industrial dust and soil tracked onto roads and streets. Suspension from disturbed soil (e.g., farming, mining, unpaved roads). Biological sources. Construction and demolition. Coal and oil combustion. Ocean spray.
Atmospheric Half-Life:	Days to weeks.	Minutes to hours.
Travel distance:	100s to 1000s of km.	<1 to 10s of km

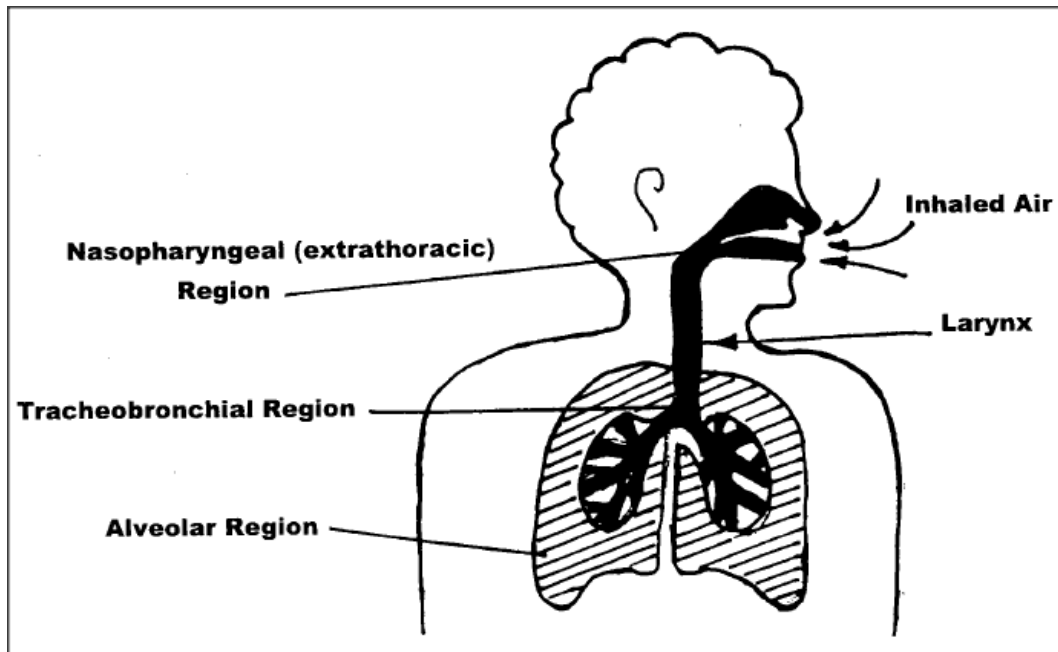
Πίνακας 3 : Σύγκριση λεπτόκοκκων-χονδρόκοκκων σωματιδίων

Note. Reprinted from "Fine particles and coarse particles: concentration relationships relevant to epidemiologic studies" by Wilson, W. E., & Suh, H. H. (1997)

Η ορολογία που χρησιμοποιείται συνήθως στην πράξη είναι για τα χονδρόκοκκα **PM10** ενώ για τα λεπτόκοκκα **PM2.5** και για τα υπερλεπτοκοκκα **PM1**. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε κυρίως με τα **PM10**.

Μια διαφορετική κατάταξη των σωματιδίων μπορεί να γίνει με βάση τον βαθμό διεισδυτικότητας τους στο αναπνευστικό σύστημα (Morawska & Salthammer, 2006).

Στο επόμενο σχήμα (World Health Organization, 1999) διακρίνεται η ανατομία του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος βάση του οποίου γίνεται η παρακάτω κατάταξη των σωματιδίων.



Εικόνα 2 : Ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα

Note. Reprinted from "Hazard prevention and control in the work environment:: airborne dust" by World Health Organization. (1999)

Γενικά τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να διεισδύσουν στο αναπνευστικό σύστημα δια μέσου της μύτης ή του στόματος. Η πιθανότητα να συμβεί κάτι τέτοιο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το μέγεθος των σωματιδίων, ο

ρυθμός εισπνοών κτλπ. Από εκεί και έπειτα τα σωματίδια αυτά μπορούν να επικαθήσουν σε διάφορα τμήματα ή να διαφύγουν και πάλι στην ατμόσφαιρα μέσω της εκπνοής, γεγονός που εξαρτάται από παράγοντες που αφορούν τόσο στο σωματίδιο όσο και στην ανατομία του αναπνευστικού συστήματος.

Τα μεγαλύτερα σωματίδια (>30 μm) αναμένεται να επικαθήσουν στα ρουθούνια, στην στοματική κοιλότητα ή τα χείλη δλδ θα παραμείνουν στο κεφάλι. Από αυτά που θα διεισδύσουν περισσότερο μόνο το 1% των PM10 θα φθάσουν ως το κατώτερο αναπνευστικό (alveolar region) όπου μπορούν να διεισδύσουν πλέον στην κυκλοφορία του αίματος. Κυρίως σε αυτό το βάθος, θα διεισδύσουν τα PM2.5, οπότε μεγαλύτερα σωματίδια από αυτά, θα επικαθήσουν στις υπόλοιπες περιοχές του αναπνευστικού (thoracic or extrathoracic region). Για σωματίδια ακόμα μικρότερα δλδ (<2.5 μm) και έως 0.5 μm το πιθανότερο είναι ότι κατά 80-85% θα διαφύγουν μέσω της εκπνοής διότι δεν είναι σημαντική η διαδικασία της επικάθησης. Για ακόμα μικρότερα σωματίδια (<0.5 μm) υπερισχύει η διαδικασία της διάχυσης και έτσι αυξάνεται και η πιθανότητα επικάθησης στο αναπνευστικό σύστημα. Για την κατάταξη λοιπών των σωματιδίων έχουν οριστεί κλάσματα των εισπνεόμενων σωματιδίων ανάλογα με τον βαθμό διείσδυσης σε σημεία του αναπνευστικού συστήματος.

Έτσι διακρίνουμε τα :

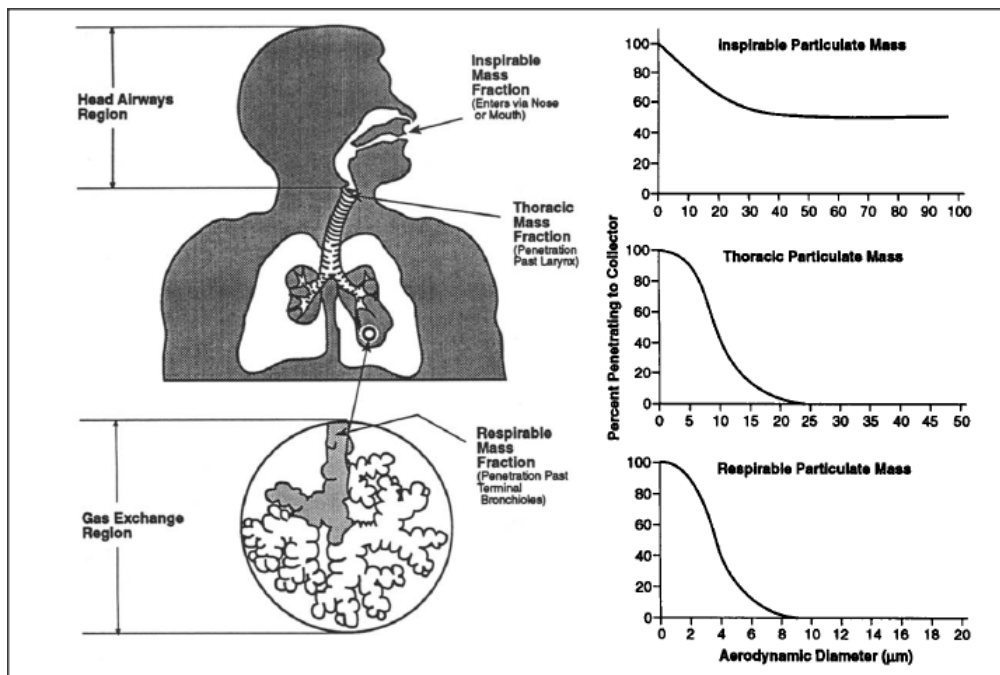
- Ολικά αιωρούμενα σωματίδια (TSP) που περιλαμβάνει το σύνολο των αιωρούμενων σωματιδίων.

- Εισπνεύσιμα σωματίδια (inhalable fraction) (Morawska & Salthammer, 2006) που αποτελούν τα σωματίδια που διεισδύουν στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα (ρινοφάρυγγας). Περιλαμβάνει σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 30 μm και κυρίως αυτά με διάμετρο 5-10 μm (Owen, Ensor, & Sparks, 1992).

-Θωρακικά σωματίδια (thoracic fraction) (Morawska & Salthammer, 2006) αποτελούν τα σωματίδια που διαπερνούν το ανώτερο τμήμα της αναπνευστικής οδού (ρινοφάρυγγας). Αποτελούνται από σωματίδια με διάμετρο κάτω από 10 μm και κυρίως αυτά με διάμετρο 1-5 μm (Owen *et al.*, 1992).

-Αναπνεύσιμα σωματίδια (respirable fraction) (Morawska & Salthammer, 2006) που είναι ουσιαστικά τα σωματίδια που φθάνουν ως το κατώτερο αναπνευστικό και μπορεί να περιέλθουν ακόμα και στην κυκλοφορία του αίματος. Αυτά έχουν διάμετρο κάτω από 2.5 μm και κυρίως κάτω από 1 μm (Owen *et al.*, 1992).

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζονται οι 3 παραπάνω κατηγορίες, ο βαθμός διείσδυσης και το κλάσμα ως ποσοστό των εισπνεύσιμων αιωρούμενων σωματιδίων συναρτήσει της διαμέτρου τους.



Εικόνα 3 : Τα 3 κλάσματα εισπνεύσιμων σωματιδίων και τα ποσοστά επί των εισπνεύσιμων σωματιδίων συναρτήσει της διαμέτρου

Note. Reprinted from "Airborne particle sizes and sources found in indoor air." by Owen, M., Ensor, D. S., & Sparks, L. (1992)

2.4.2 ΑΕΡΟΖΟΛΑ: ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ-ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ

Στα προηγούμενα αναφερθήκαμε στην προέλευση των αιωρούμενων σωματιδίων καθώς και στην ταξινόμηση τους βάση του μεγέθους τους και βάση της διεισδυτικότητας τους στο αναπνευστικό σύστημα. Η πιο καθοριστική φυσική τους ιδιότητα είναι το μέγεθος τους, καθώς από αυτό καθορίζεται και ο χρόνος αιώρησης τους στον αέρα, η διεισδυτικότητά τους στο αναπνευστικό σύστημα, η ταχύτητα καθίζησης, η ταχύτητα μεταφοράς τους κτλπ. Στο παρόν θα αναφερθούμε συνοπτικά στην χημική τους σύσταση και στις επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία .

Η χημική σύσταση των σωματιδίων είναι σημαντική γιατί έχει επιπτώσεις στο σχήμα, στην πυκνότητα, στην πτητικότητα, στην ενεργητικότητά τους, στις χημικές αντιδράσεις αλλά και στον βαθμό της τοξικότητάς τους. Επίσης παίζει καθοριστικό ρόλο στην εύρεση των πηγών εκπομπής τους και άρα στις στρατηγικές έλεγχου τους.

Ο ακριβής χημικός προσδιορισμός των αιωρούμενων σωματιδίων είναι μια εξαιρετικά αναλυτική και μεγάλη διαδικασία. Απλά δείγματα περιλαμβάνουν πλήθος κύριων συστατικών και εκατοντάδες δευτερευούσης σημασίας ιχνοστοιχεία (Pöschl, 2005). Επιπλέον η χημική σύσταση μπορεί να διαφέρει από περιοχή σε περιοχή αλλά ακόμα και από εποχή σε εποχή.

Σε γενικές γραμμές τα σημαντικότερα συστατικά των αιωρούμενων σωματιδίων αποτελούνται από (CCPA, 2001; Hueglin *et al.*, 2005; Pöschl, 2005; Tsai & Chen, 2006; Valavanidis, Fiotakis, & Vlachogianni, 2008) :

- 1) γεωλογικής φύσης υλικό (οξειδία του αλουμινίου, ασβέστιο, τιτάνιο, σίδηρο)
- 2) οργανικές ουσίες προσκολλημένες σε σωματίδια που μπορεί να είναι πτητικές ή ημιπτητικές (PAH's, nitro-PAH's)
- 3) στοιχειακό άνθρακα («black carbon»)
- 4) νιτρικά ιόντα
- 5) θειικά ιόντα
- 6) αμμωνιακά ιόντα καθώς επίσης

θαλασσινό αλάτι, νερό, βιολογικής φύσης υλικό αλλά και βαρέα μέταλλα και ιχνοστοιχεία.

Η χημική σύσταση των χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων σωματιδίων παρουσιάζει διαφορές και θεωρείται γενικά ότι αυτά τα είδη αιωρούμενων σωματιδίων συνυπάρχουν στην ατμόσφαιρα ως χημικώς ανεξάρτητα (Hinds, 2012). Έτσι τα λεπτόκοκκα ανήκουν στις όξινες ενώσεις και αποτελούνται κυρίως από τα θειικά, νιτρικά και αμμωνιακά ιόντα, νερό, τοξικά μέταλλα (κάδμιο κτλπ) και στοιχειακό άνθρακα ενώ από την άλλη τα χονδρόκοκκα ανήκουν στις βασικές ενώσεις και αποτελούνται από κρυσταλλικές ουσίες και τα οξείδια τους (σίδηρος, ασβέστιο κτλπ) καθώς επίσης από θαλασσινό αλάτι, φυτικά κατάλοιπα και σκόνη (Hinds, 2012; Valavanidis *et al.*, 2008; Wilson & Suh, 1997).

Από μελέτες που έχουν διεξαχθεί (Valavanidis *et al.*, 2008) προκύπτει ότι η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια έχει βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία. Έτσι από πολλές έρευνες προκύπτει ότι μια αύξηση συγκεντρώσεων των PM10 κατά 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ μπορεί να προκαλέσει σε νοσοκομειακές καταγραφές 0.5-0.6% αύξηση των ημερήσιων θανάτων, 1% αύξηση του άσθματος και των αποφρακτικών πνευμονοπαθειών (σε ηλικιωμένα άτομα) και 0.5-1.1% αύξηση των καρδιαγγειακών νοσημάτων. Επιδημιολογικές μελέτες από την άλλη δείχνουν ότι σε μακροπρόθεσμη βάση η έκθεση σε μικροσωματίδια συσχετίζεται με δυσλειτουργίες στο αναπνευστικό, χρόνιες βρογχίτιδες, αύξηση κινδύνου για καρκίνο του πνεύμονα αλλά και αύξηση καρδιαγγειακών νοσημάτων που μπορεί να αποβούν θανατηφόρα. Οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία είναι σημαντικότερες για την έκθεση σε λεπτόκοκκα σωματίδια εξαιτίας της μεγαλύτερης διεισδυτικότητας τους και του χρόνου παραμονής τους στο αναπνευστικό σύστημα σε σχέση με τα χονδρόκοκκα σωματίδια.

2.4.3 ΑΕΡΟΖΟΛΑ: ΕΠΙΤΡΕΠΤΑ ΟΡΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ

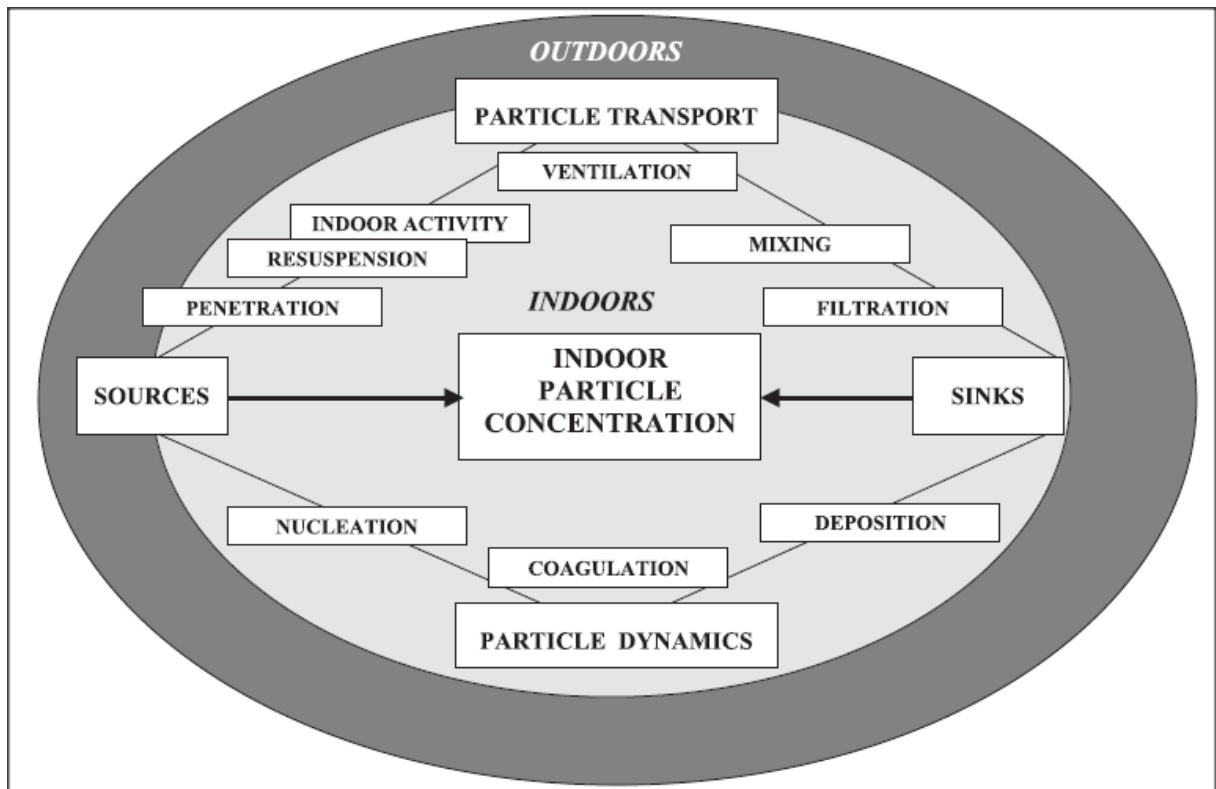
Με βάση τις κατευθυντήριες γραμμές του παγκόσμιου οργανισμού υγείας (World Health Organization, 2006) για την ποιότητα αέρα, οριακές τιμές για τα αιωρούμενα σωματίδια **PM10** είναι τα **20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** σε ετήσια βάση και τα **50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** σε ημερήσια βάση, ενώ για τα αιωρούμενα σωματίδια **PM2.5** είναι τα **10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** σε ετήσια βάση και **25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** σε ημερήσια βάση (οι οριακές αυτές τιμές είναι σε ισχύ για την Ελλάδα από το 2010 για τα PM10 και από το 2015 για τα PM2.5). Ως οριακή τιμή, βάση του ορισμού της οδηγίας 2008/50/ΔΚ, ορίζεται το «επίπεδο των ρύπων βάση επιστημονικών γνώσεων με σκοπό να αποφεύγονται, να προλαμβάνονται ή να μειώνονται οι επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και/ή στο σύνολο του περιβάλλοντος, το οποίο πρέπει να επιτευχθεί εντός δεδομένης προθεσμίας χωρίς εν συνεχεία υπερβάσεις. Αξίζει να επισημανθεί ότι δεν υπάρχουν ελάχιστα ασφαλή όρια για την ανθρώπινη υγεία και στην πράξη ως τέτοια θεωρούνται το υπόβαθρο των συγκεντρώσεων που συναντάται από φυσικές πηγές στο περιβάλλον.

2.4.4 ΑΕΡΟΖΟΛΑ: ΚΙΝΗΤΗΡΙΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ

Η εσωτερική συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων στα κτίρια διέπεται (Morawska & Salthammer, 2006; Thatcher & Layton, 1995) από τις χρονικές και χωρικές μεταβολές των εσωτερικών πηγών και καταβόθρων, φυσικοχημικούς μετασχηματισμούς των σωματιδίων, εσωτερική δραστηριότητα στο κτίριο αλλά και το υπόβαθρο των συγκεντρώσεων στο κτίριο που σχετίζεται άμεσα ή έμμεσα με τις εξωτερικές συγκεντρώσεις του περιβάλλοντος του κτιρίου. Τα χαρακτηριστικά του κτιρίου όπως το είδος και ο ρυθμός αερισμού, τυχόν ρωγμές στο κέλυφος του κτιρίου, ηλικία και υλικά κατασκευής παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο. Η σύνδεση αυτών των παραγόντων με την κατάλληλη μοντελοποίηση μπορεί να οδηγήσει στην πρόβλεψη των εσωτερικών

συγκεντρώσεων μέσω κατάλληλων μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί για τον σκοπό αυτό. Αυτό με την σειρά του θα βοηθήσει στην κατανόηση των μεθόδων και στρατηγικών που πρέπει να ακολουθηθούν κατά περίπτωση για τον έλεγχο στην έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια για τους ευνόητους λόγους που έχουν ήδη αναφερθεί στην παρούσα εργασία.

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζονται οι κινητήριες δυνάμεις που καθορίζουν τις εσωτερικές συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων (indoor particle concentration σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$).



Εικόνα 4 :Σχηματικό διάγραμμα των κύριων παραγόντων που επηρεάζουν την εσωτερική συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων

Note. Reprinted from "Indoor environment: airborne particles and settled dust" by Morawska, L., & Salthammer, T. (2006)

Στα παρακάτω θα αναφερθούμε σε αυτές ξεχωρίζοντας εκείνες που παίζουν σημαντικό ρόλο για το εσωτερικό περιβάλλον ενός κτιρίου όπως του περιβάλλοντος των σχολικών κτιρίων που μελετώνται στην παρούσα εργασία.

Πηγές/καταβόθρες : τα σωματίδια στο εσωτερικό ενός κτιρίου όπως ήδη έχουμε αναφέρει προέρχονται είτε από το εξωτερικό περιβάλλον του κτιρίου όπου έχουν παραχθεί από εξωτερικές πηγές πχ καύσεις είτε παράγονται από εσωτερικές πηγές πχ ανθρώπινη δραστηριότητα ή μέσω άλλων διεργασιών πχ χημικών αντιδράσεων . Η πορεία τους εντός του κτιρίου καθορίζεται από τις διεργασίες που απεικονίζονται στο παραπάνω διάγραμμα κάποιες από τις οποίες λειτουργούν ως καταβόθρες.

Διεισδυτικότητα (Penetration) : αναφέρεται στην ικανότητα των σωματιδίων του εξωτερικού περιβάλλοντος του κτιρίου να διεισδύσουν διαμέσου του κελύφους του, στο εσωτερικό του, επηρεάζοντας τις εσωτερικές συγκεντρώσεις . Μέτρο αυτής της ικανότητας είναι ο παράγοντας διεισδυτικότητας (**penetration factor**) (Morawska & Salthammer, 2006; Pluschke, 2004) που ορίζεται ως το κλάσμα των σωματιδίων (εξωτερικού περιβάλλοντος) συγκριμένης διαμέτρου που διαπερνά το κέλυφος του κτιρίου και καταλήγει στο εσωτερικό του. Για πχ σε περίπτωση που τα παράθυρα του κτιρίου είναι ανοιχτά, τότε όλα σχεδόν τα σωματίδια διαπερνούν το κτίριο και έτσι ο παράγοντας αυτός θεωρείται σχεδόν μονάδα. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα σωματίδια με μεγάλη ευκολία καταλήγουν στο εσωτερικό του κτιρίου. Τώρα, στην περίπτωση που τα ανοίγματα του κτιρίου είναι «κλειστά» η τιμή αυτού του παράγοντα είναι γενικά χαμηλότερη από την μονάδα και η τιμή της εξαρτάται σημαντικά από την διάμετρο των σωματιδίων (Pluschke, 2004) . Όπως αναφέρεται (Nazaroff, 2004) παρότι αρκετές μελέτες έχουν διεξαχθεί δεν έχουν απαντήσει σε όλα τα ερωτήματα που αφορούν την τιμή του παράγοντα διεισδυτικότητας των σωματιδίων. Τα υπερλεπτόκοκκα (nucleation mode)

σωματίδια τείνουν να εγκαθίστανται στις ρωγμές του κελύφους λόγω της μεγάλης κινητικότητας (κίνηση Brown), τα χονδρόκοκκα από την άλλη έχουν περιορισμένη διεισδυτικότητα λόγω της τάσης να επικάθονται σε επιφάνειες κάθετες προς την κίνηση τους και μόνο τα λεπτόκοκκα (accumulation mode) αναμένεται να έχουν μεγάλη διεισδυτικότητα, άρα τιμή του παράγοντα διεισδυτικότητας κοντά στην μονάδα. Η τιμή του παράγοντα διεισδυτικότητας μπορεί να προσδιοριστεί με στατιστικές μεθόδους από μετρήσεις του λόγου των εσωτερικών προς των εξωτερικών συγκεντρώσεων των σωματιδίων, όταν όμως επικρατούν σταθερές συνθήκες (κατάσταση ισορροπίας) (Morawska & Salthammer, 2006).

Όσο μικρότερη η διεισδυτικότητα τόσο λιγότερο θα επηρεάζονται οι εσωτερικές συγκεντρώσεις από τις εξωτερικές κάτι το οποίο αναμένεται και στην παρούσα εργασία λόγω μελέτης των χονδρόκοκκων σωματιδίων.

Εναπόθεση (deposition) : Η εναπόθεση σωματιδίων σε επιφάνειες (τοίχους, έπιπλα κτλπ) αποτελεί έναν σημαντικό μηχανισμό που δρα ως καταβόθρα αλλά και ως συσσώρευση ύλης έτοιμης για επανεκπομπή στον εσωτερικό αέρα. Η διάμετρος των σωματιδίων έχει σημαντικότατο ρόλο στον μηχανισμό αυτό ο οποίος καθορίζεται από τις διαδικασίες που διέπουν την διάχυση των σωματιδίων στις διάφορες επιφάνειες για τα πολύ μικρά σωματίδια και την βαρυτική καθίζηση για τα μεγαλύτερα σωματίδια. Συγκεκριμένα τα υπερλεπτόκοκκα σωματίδια εναποτίθενται στις διάφορες επιφάνειες υπακούοντας στους νόμους της διάχυσης, ενώ τα χονδρόκοκκα (που αφορούν και την συγκεκριμένη μελέτη) ακολουθούν την βαρυτική καθίζηση (Hussein & Kulmala, 2008). Επομένως τα χονδρόκοκκα σωματίδια αναμένεται να επικάθονται κυρίως σε οριζόντιες επιφάνειες με πρόσωπο προς τα πάνω πχ πάτωμα του κτιρίου (Lai & Nazaroff, 2000).

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τον μηχανισμό της εναπόθεσης, είναι οι ροές αέρα, το είδος και το μέγεθος των επιφανειών καθώς και η τυχόν ύπαρξη ηλεκτρικού φορτίου σε αυτές, η τυχόν βαθμίδα θερμοκρασίας μεταξύ επιφανειών και του εσωτερικού αέρα, όπως επίσης και ο όγκος του δωματίου (Morawska & Salthammer, 2006) .

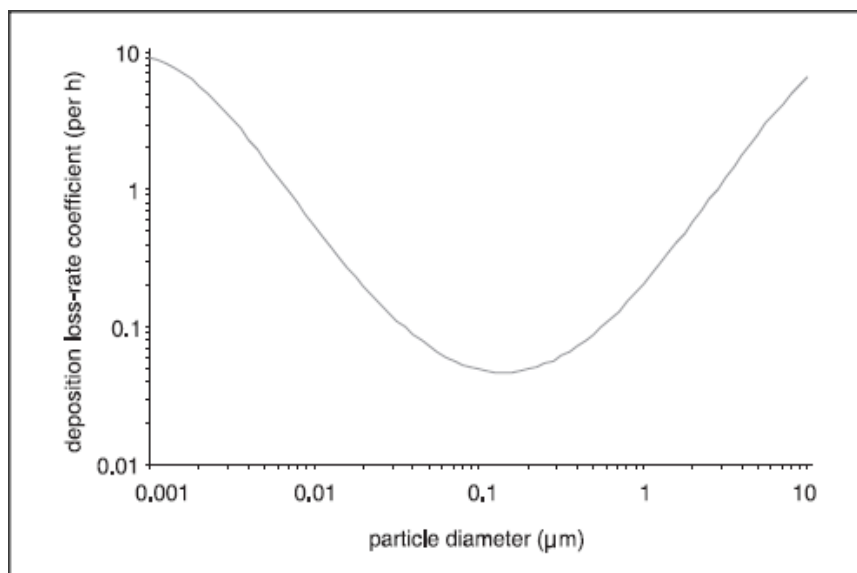
Έτσι με βάση και πειράματα που έχουν διεξαχθεί (Thatcher, Lai, Moreno-Jackson, Sextro, & Nazaroff, 2002; Thornburg *et al.*, 2001) η επίδραση των ροών αέρα είτε λόγω συστήματος εξαερισμού, είτε μέσω φυσικής ροής έχουν μεγάλη επίδραση στα μεγαλύτερα χονδρόκοκκα σωματίδια αυξάνοντας τον ρυθμό της εναπόθεσης στις επιφάνειες περίπου κατά 2 φορές, ενώ στα μικρότερα σωματίδια έχει μικρότερη επίδραση.

Το είδος, το μέγεθος και η ύπαρξη φορτίου στις επιφάνειες επιδρούν κατά τον ακόλουθο τρόπο στον μηχανισμό της εναπόθεσης. Όσο μεγαλύτερη η επιφάνεια τόσο πιθανότερη είναι η επικάθηση των σωματιδίων σε αυτές, άρα γρηγορότερος ο ρυθμός απομάκρυνσης των σωματιδίων λόγω εναπόθεσης στις επιφάνειες. Έτσι, τα επιπλωμένα κτίρια αναμένεται να έχουν αποδοτικότερο μηχανισμό εναπόθεσης, σε σχέση με τα άδεια κτίρια (Pluschke, 2004). Επίσης κολλώδεις και τραχείες επιφάνειες είναι ευνόητο ότι αυξάνουν τον ρυθμό εναπόθεσης, ενώ το ίδιο συμβαίνει και με φορτισμένες επιφάνειες (Morawska & Salthammer, 2006).

Όσον αφορά την βαθμίδα θερμοκρασίας, αναμένεται αύξηση του ρυθμού εναπόθεσης για μεγαλύτερες διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ επιφανειών και εσωτερικού αέρα, εξαιτίας του μηχανισμού της θερμικής εναπόθεσης (Pluschke, 2004). Φαινόμενο κατά το οποίο, τα σωματίδια τείνουν να μετατοπίζονται από τις θερμότερες ζώνες προς τις ψυχρότερες ζώνες (Romay, Takagaki, Pui, & Liu, 1998).

Για τον μηχανισμό της εναπόθεσης ως μέτρο, χρησιμοποιούνται βιβλιογραφικώς, ο ρυθμός εναπόθεσης και η ταχύτητα εναπόθεσης. Ο ρυθμός εναπόθεσης, μετριέται σε $\sim \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ και ορίζεται ως ο αριθμός των σωματιδίων που επικάθονται ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου. Η ταχύτητα εναπόθεσης, είναι ο ρυθμός εναπόθεσης ανά μονάδα αδιατάρακτης συγκέντρωσης άρα μετριέται σε μονάδες $\sim \text{m s}^{-1}$. Ένας άλλος όρος, είναι ο παράγοντας ή η σταθερά του ρυθμού εναπόθεσης που είναι ουσιαστικά ο αριθμός των σωματιδίων που επικάθονται ανά μονάδα χρόνου σε όλη την επιφάνεια οπότε έχει μονάδες $\sim \text{s}^{-1}$ (Morawska & Salthammer, 2006). Η ταχύτητα εναπόθεσης, μπορεί να προβλεφθεί θεωρητικά ή να μετρηθεί πειραματικά από τον παράγοντα του ρυθμού εναπόθεσης σε συνδυασμό με τον όγκο και την επιφάνεια του χώρου του πειράματος.

Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η τιμή του παράγοντα του ρυθμού εναπόθεσης ως συνάρτηση του μεγέθους των σωματιδίων.



Εικόνα 5: Σχηματικό διάγραμμα τιμών παράγοντα ρυθμού εναπόθεσης ως συνάρτηση της διαμέτρου των σωματιδίων

Note. Reprinted from "Indoor environment: airborne particles and settled dust" by Morawska, L., & Salthammer, T. (2006)

Σε γενικές γραμμές πάντως, το πλήθος των παραγόντων που επηρεάζουν την εναπόθεση, την καθιστούν ως μια παράμετρο εξαιρετικά μεταβλητή και ως έναν βαθμό «μοναδική» για κάθε πείραμα, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί και μοντελοποιηθεί μέσω πολλαπλών πειραμάτων, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την μέτρηση της σε κάθε πείραμα ξεχωριστά (Pluschke, 2004).

Επαναιώρηση (Resuspension) – Ανθρώπινη δραστηριότητα (indoor activity) : Η επαναιώρηση των σωματιδίων στον εσωτερικό αέρα είναι μια διαδικασία αντίστροφη της εναπόθεσης. Δηλαδή σωματίδια τα οποία έχουν εναποτεθεί σε επιφάνειες επανεκπέμπονται στον εσωτερικό αέρα ως αποτέλεσμα της εσωτερικής δραστηριότητας των ενοίκων στο κτίριο. Θεωρείται ως πηγή σωματιδίων στο χώρο, και εξαρτάται ισχυρά από την ανθρώπινη δραστηριότητα και το μέγεθος των σωματιδίων. Γενικά και με βάση την θεωρία που αφορά στις δυνάμεις που υπόκεινται τα αιωρούμενα σωματίδια (Baron & Willeke, 2011) οι δυνάμεις προσκόλλησης (σωματίδιο-σωματίδιο, σωματίδιο-επιφάνεια) είναι γραμμικά εξαρτώμενες από την διάμετρο των σωματιδίων ($\sim d$) ενώ οι δυνάμεις αποκόλλησης είναι γραμμικά εξαρτώμενες από την διάμετρο εις την τρίτη δύναμη ($\sim d^3$), συνεπώς τα μεγαλύτερα σωματίδια θα τείνουν να αποσπώνται ευκολότερα από τα μικρότερα.

Έτσι, ο ρυθμός επαναιώρησης αυξάνεται, όσο αυξάνεται η διάμετρος των σωματιδίων (Thatcher & Layton, 1995). Οποιαδήποτε μορφή δραστηριότητας ακόμα και απλό περπάτημα επιδρά στην αύξηση του αριθμού των αιωρούμενων σωματιδίων στο χώρο (Pluschke, 2004). Στην διεργασία αυτή προφανώς θα υπάρχει επηρεασμός από την ποσότητα των διαθέσιμων για επαναιώρηση σωματιδίων που έχουν εναποτεθεί προηγούμενα στις επιφάνειες, το είδος των επιφανειών (αφού τυχόν φθορά θα ευνοεί ακόμα και την εκπομπή καινούργιων σωματιδίων) (Hussein & Kulmala, 2008) και το μέγεθος αυτών, όπως επίσης το

είδος και ο χρόνος δραστηριότητας των ενοίκων στο χώρο. Στην ίδια μελέτη αναφέρονται ρυθμοί επαναιώρησης που φτάνουν ακόμα και $\sim 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ για συνήθη μετακίνηση ατόμων στο χώρο και την δραστηριότητα παιδιών. Πάντως, το καθάρισμα αποτελεί τη σημαντικότερη δραστηριότητα που αυξάνει σημαντικά τον αριθμό των αιωρούμενων σωματιδίων στους εσωτερικούς χώρους και αμέσως μετά, όπως προκύπτει από την ίδια μελέτη, για τα σωματίδια 5-10 μm , ακόμα και μια δραστηριότητα όπως συνεχές βάδισμα ατόμων που εισέρχονται στο δωμάτιο και κάθονται σε μια καρέκλα συνολικής διάρκειας 2 λεπτών μπορεί να διπλασιάσει τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων.

Αερισμός (Ventilation) – Φιλτράρισμα (Filtration) : Οι εσωτερικοί χώροι των κτιρίων ανταλλάσσουν αέρα με το περιβάλλον τους μέσω ενός συστήματος ανταλλαγής αέρα, που λειτουργεί είτε με φυσικό τρόπο (πχ απευθείας δια μέσου των παραθύρων) είτε με μηχανικό τρόπο με την χρήση ή όχι διαφόρων φίλτρων αέρα. Ο ρυθμός ανταλλαγής αέρα που εισέρχεται στο κτίριο αναφέρεται ως infiltration rate, ενώ ο ρυθμός ανταλλαγής αέρα που εξέρχεται από το κτίριο ως exfiltration rate και λόγω του ότι το κτίριο έχει ίδια πίεση αέρα σε σχέση με το περιβάλλον του, οι 2 αυτοί ρυθμοί είναι ίσοι και αναφέρονται από κοινού ως air-exchange rate σε h^{-1} . Ο ρυθμός αερισμού ή ventilation rate είναι ο λόγος του ρυθμού ανταλλαγής αέρα προς τον όγκο του θεωρούμενου δωματίου. Μονάδα μέτρησης του ρυθμού αερισμού είναι η ACH δλδ air changes per hour που δηλώνει τον αριθμό όγκων αέρα (ίσων με του δωματίου) που ανταλλάχθηκαν με το περιβάλλον σε χρονικό διάστημα μιας ώρας.

Γενικά ο αερισμός λειτουργεί ως διαδικασία αραίωσης/καθαρισμού του εσωτερικού αέρα, άρα ως μηχανισμός απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων και κατά συνέπεια ως διαδικασία μείωσης των εσωτερικών συγκεντρώσεων

(Pluschke, 2004), αν φυσικά, ο εξωτερικός αέρας θεωρείται λιγότερο ρυπαρός σε σχέση με τον εσωτερικό αέρα.

Οι τιμές του ρυθμού αερισμού, μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από κτίριο σε κτίριο ανάλογα με την χρήση του, το σχεδιασμό του και με τα συστήματα αερισμού που διαθέτει, από εποχή σε εποχή, από γεωγραφική θέση σε γεωγραφική θέση αλλά και με βάση τις συνήθειες των ενοίκων του (Morawska & Salthammer, 2006). Μελέτες υπολογισμού των ρυθμών ανταλλαγής αέρα σε κατοικίες στην Αυστραλία έδειξαν τιμές $\sim 26 \text{ h}^{-1}$ ενώ στην Αμερική παρόμοιες μελέτες έδειξαν τιμές $\sim 3-5 \text{ h}^{-1}$. Γενικά, κτίρια με φυσικό αερισμό αναμένεται να έχουν μεγαλύτερους ρυθμούς ανταλλαγής αέρα σε σχέση με κτίρια με συστήματα μηχανικού αερισμού (Morawska & Salthammer, 2006).

Σε κτίρια που διαθέτουν μηχανικό αερισμό και γενικότερα συστήματα θέρμανσης/ψύξης/φιλτραρίσματος αέρα είναι δυνατόν, αναλόγως της αποδοτικότητας των φίλτρων στον καθαρισμό του αέρα, να έχουμε μείωση των εσωτερικών συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων. Ο βαθμός απόδοσης αυτών των φίλτρων εξαρτάται από τον σχεδιασμό τους αλλά και από τις αεροδυναμικές ιδιότητες των ρυπαντών που αναμένεται να απομακρύνει (Pluschke, 2004). Έτσι για τα πολύ μικρά σωματίδια $0.1 - 0.5 \mu\text{m}$ η αποδοτικότητα είναι πολύ μικρή ως ασήμαντη εξαιτίας του ότι καμιά μηχανική διαδικασία παγίδευσης δεν είναι ικανή να συγκρατήσει αυτά τα σωματίδια (Morawska & Salthammer, 2006).

Σε κάθε περίπτωση ο αερισμός ενός κτιρίου αποτελεί ένα μηχανισμό που κατά περίπτωση μπορεί να είναι ελεγχόμενος ώστε να αποτελέσει ρυθμιστή των εσωτερικών συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων.

Ανάμιξη (Mixing) : Ένας παράγοντας που επηρεάζει την μέτρηση και πρόβλεψη των εσωτερικών συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων

μέσω κατάλληλης μοντελοποίησης είναι η καλή ανάμιξη. Με τον όρο αυτό, νοείται ότι οποιεσδήποτε μετρήσεις συγκεντρώσεων σε διαφορετικά σημεία ή σε διαφορετικές χρονικές στιγμές θα έχουν αμελητέα διαφορά μεταξύ τους. Γενικά, τα επεισόδια εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων είτε από κάποια εσωτερική πηγή πχ επαναιώρηση λόγω δραστηριότητας είτε λόγω αλλαγής στις συνθήκες αερισμού πχ άνοιγμα παραθύρου έχουν χρονικό και χωρικό εντοπισμό, ενώ τα αποτελέσματα τους θα είναι η διατάραξη της ισορροπίας των εσωτερικών συγκεντρώσεων σε μια νέα θέση κάτι που θα χρειαστεί χρόνο για να συμβεί (Nazaroff, 2004). Η διαδικασία της ανάμιξης επηρεάζεται από τις μηχανικές ροές αέρα αλλά και από τις διαφορές θερμοκρασίας στον χώρο (θερμικές ροές αέρα). Από πείραμα που διεξήχθη σε υπνοδωμάτιο με απελευθέρωση αέριου-ιχνηθέτη βρέθηκε ότι αναλόγως των συνθηκών αερισμού ο χρόνος αυτός μπορεί να υπολογιστεί στα 10 λεπτά, ενώ μπορεί γενικά να κυμαίνεται από 3 εως και 20 λεπτά (Nazaroff, 2004).

Σε κάθε περίπτωση, η υπόθεση ισορροπίας που προϋποθέτει η καλή ανάμιξη θεωρείται γενικά σωστή, σε πειράματα που η χρονική κλίμακα ενδιαφέροντος είναι αρκετά λεπτά ή και περισσότερο (Morawska & Salthammer, 2006).

Συσσωμάτωση (coagulation) : είναι η διαδικασία στην οποία τα σωματίδια συγκρούονται και με επικόλληση σχηματίζουν μεγαλύτερα σωματίδια. Λειτουργεί ως διαδικασία μείωσης σωματιδίων συγκεκριμένης διαμέτρου αλλά παράλληλα και ως μετατόπιση της κατανομής σε σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου (Grau-Boné & Strlic, 2013). Η διαδικασία αυτή εξαρτάται ισχυρά από την συγκέντρωση των σωματιδίων και θεωρείται ότι μπορεί να είναι αμελητέας σημασίας για συγκεντρώσεις σωματιδίων μικρότερες από 1×10^3 particles/cm³ δλδ για τις συνήθεις συνθήκες εντός ενός δωματίου (όπως επίσης και για τις συνθήκες της παρούσας εργασίας).

Άλλες διεργασίες (nucleation, chemistry reactions) : Χημικές αντιδράσεις μεταξύ διαφόρων ρυπαντών και κυρίως όζοντος και συγκεκριμένων τερπένιων μπορούν να προκαλέσουν σχηματισμό νέων σωματιδίων . Για πχ 20–40 ppb O₃ και εκατοντάδες ppb τερπένιων μπορούν να αυξήσουν κατά 5-40 μg m⁻³ την μάζα των λεπτόκοκκων σωματιδίων (Pluschke, 2004) . Ωστόσο, οι χρονικές κλίμακες που απαιτούνται για σχηματισμό μεγαλύτερων σωματιδίων από αυτά τα νεοσχηματισμένα σωματίδια είναι πολύ μεγάλες (Abubaker Sulyman, 2015) και έτσι αυτή η διεργασία θεωρείται στην παρούσα εργασία αμελητέας σημασίας.

Συμπερασματικά καταλήγουμε ότι οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την εσωτερική συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων είναι : ο αερισμός, η εναπόθεση/επαναιώρηση, η εσωτερική δραστηριότητα στο χώρο και σε μικρότερο βαθμό οι υπόλοιπες από τις παραπάνω διεργασίες που αναφέρθηκαν.

2.4.5 ΑΕΡΟΖΟΛ: ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

Η μελέτη των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων της σωματιδιακής ύλης καθώς και η ανάδειξη των κινητήριων δυνάμεων που καθορίζουν την εσωτερική συγκέντρωσή τους, είναι δυνατόν να επιτρέψουν τον έλεγχο αυτών, με απώτερο στόχο την βελτιστοποίηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα στα κτίρια. Σύμφωνα με τον WHO (World Health Organization, 2000), στις αναπτυγμένες χώρες ο εσωτερικός αέρας έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στην υγεία σε σχέση με τον εξωτερικό όχι μόνο λόγω μεγαλύτερου χρόνου έκθεσης σε αυτόν αλλά και λόγω του ότι οι περισσότεροι ρύποι έχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις εντός παρά εκτός ενός κτιρίου. Το ίδιο ισχύει και για την σωματιδιακή ρύπανση. Έτσι έχουν αναπτυχθεί τομείς, όπως η διαχείριση ποιότητας εσωτερικού αέρα που

έχουν ως σκοπό την βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης στους εσωτερικούς χώρους.

Σε γενικές γραμμές μπορούμε να κατατάξουμε τις διάφορες στρατηγικές ελέγχου (Lai, 2004) σε 3 κατηγορίες : ι) καταστολή ρυθμών εκπομπής/έλεγχος πηγών ιι) μείωση/αραίωση εσωτερικών συγκεντρώσεων ρύπων εξαιτίας ανταλλαγών αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον ιιι) καθαρισμό/αφαίρεση εσωτερικών ρύπων.

Τα όσα αναφέρονται παρακάτω αφορούν και στα σχολικά κτίρια (Csobod *et al.*, 2014)

Έλεγχος πηγών : η στρατηγική αυτή περιλαμβάνει:

απομάκρυνση πηγών είτε με εξάλειψη είτε με παρεμπόδιση εισόδου στο κτίριο. Παράδειγμα η αντικατάσταση φθαρμένων υλικών , η αποθάρρυνση κυκλοφορίας και στάθμευσης των αυτοκινήτων πολύ κοντά στο κτίριο.

αντικατάσταση πηγών για παράδειγμα η αντικατάσταση μηχανημάτων ή επίπλων με άλλα αντίστοιχα χαμηλότερης εκπομπής.

περιορισμός των πηγών για παράδειγμα η χρήση επικάλυψης στο εξωτερικό των ντουλαπιών που είναι κατασκευασμένα από συμπιεσμένη ξυλεία.

εξωτερικό έλεγχο για παράδειγμα περιορισμό κυκλοφορίας κοντά στο σχολικό κτίριο.

εσωτερικό έλεγχο για παράδειγμα αποφυγή προϊόντων καθαρισμού ή χρήσης αρωματικών με υψηλές εκπομπές και αντικατάσταση τους από άλλα χαμηλών εκπομπών.

περιορισμό έκθεσης για παράδειγμα κατάλληλο προγραμματισμό στις εργασίες συντήρησης-καθαρισμού σε περιόδους αργιών ή διακοπών θερινής

περιόδου. Διεξαγωγή σε κατάλληλους χώρους των διαφόρων δραστηριοτήτων πχ πειράματα χημείας στο εργαστήριο τις ώρες εργαστηρίου κτλπ. Κατάλληλο σχεδιασμό αιθουσών διδασκαλίας ώστε να περιορίζεται η έντονη κινητικότητα των μαθητών που προκαλεί επαναιώρηση των σωματιδιακών ρύπων.

Μείωση/αραίωση εσωτερικών συγκεντρώσεων λόγω ανταλλαγών αέρα : αναφέρεται ουσιαστικά στην χρήση συστήματος μηχανικού αερισμού. Η χρήση μηχανικού αερισμού είναι καθοριστικής σημασίας στην αραίωση των επιπέδων των εσωτερικών συγκεντρώσεων αφού εξωθεί τον μολυσμένο εσωτερικό αέρα και ταυτόχρονα εισάγει καθαρότερο αέρα, από το εξωτερικό περιβάλλον . Με βάση το πρότυπο 62.1-2013 (ASHRAE) ο ελάχιστος ρυθμός αερισμού με βάση και την πυκνότητα χρηστών του χώρου, είναι, για αίθουσα διδασκαλίας 7.4 λίτρα/δευτερόλεπτο*άτομο . Τα επίπεδα σωματιδιακής ύλης εξαρτώνται από την χρήση αερισμού, αλλά όχι ιδιαίτερα από το είδος αερισμού που χρησιμοποιείται (Tan & Zhang, 2004) . Περισσότερο επηρεάζονται από τα ρεύματα αέρα που προκαλούν επαναιώρηση και από τα επίπεδα υγρασίας. Για αυτό, το σύστημα αερισμού πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να ωθεί τον αέρα κάθετα προς τα κάτω (Leung & Chan, 2006) και να δημιουργεί τους λιγότερους δυνατούς στροβίλους ανάμιξης, γεγονός που επιτυγχάνεται όταν οι ρυθμοί αερισμού είναι σχετικά χαμηλοί (μικρές ταχύτητες ρευμάτων αέρα συνεπώς μικρότερες αναταράξεις).

Με την χρήση του μηχανικού αερισμού είναι δυνατόν να επιτευχθεί μια διαφορά πίεσης μεταξύ των περιοχών του κτιρίου που θέλουμε να παραμείνουν καθαρές και του περιβάλλοντος ή γειτονικών χώρων που μπορούν να λειτουργούν ως συλλέκτες ρύπανσης (Leung & Chan, 2006; Ryhl-Svendsen, 2006). Αυτό με την σειρά του λειτουργεί ως αυτόματη εξώθηση του μολυσμένου αέρα από τους χώρους ενδιαφέροντος σε άλλους χώρους.

Καθαρισμό/αφαίρεση εσωτερικών ρύπων : αναφέρεται ουσιαστικά στην χρήση φίλτρων στα συστήματα αερισμού, έτσι ώστε ο αέρας που εισέρχεται στον χώρο προερχόμενος, είτε από το εξωτερικό περιβάλλον είτε από ανακύκλωση του εσωτερικού αέρα, να είναι όσο το δυνατόν απαλλαγμένος από τους ρύπους (Ryhl-Svendensen, 2006). Υπάρχουν φίλτρα υψηλής απόδοσης ανάλογα με το μέγεθος των ρύπων που θέλουμε να απομακρύνουμε που απομακρύνουν για πχ κατά 99,97% σωματίδια διαμέτρου 0,3 μ m (HEPA) (Leung & Chan, 2006). Η χρήση μηχανικού αερισμού σε συνδυασμό με την χρήση κατάλληλων φίλτρων, είναι μια στρατηγική που συνίσταται (Jamriska, Morawska, & Ensor, 2003) προκειμένου να επιτευχθεί και να διατηρηθεί η ποιότητα του εσωτερικού αέρα στα κτίρια.

2.5 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ

Το εσωτερικό περιβάλλον ενός κτιρίου μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα πολύπλοκο δυναμικό σύστημα. Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα χαρακτηρίζονται ως φαινόμενα μεταφοράς και αφορούν στην μεταφορά θερμότητας, μάζας και ορμής ενώ παράλληλα υπάρχει μια διαρκής αλληλεπίδραση με το εξωτερικό περιβάλλον αλλά και με την τεχνολογία του εκάστοτε συστήματος κλιματισμού/θέρμανσης/αερισμού (HVAC) που αποτελεί ανθρώπινη παρέμβαση.

Η μαθηματική αναπαράσταση των παραπάνω φαινομένων προκύπτει από την εφαρμογή των βασικών αρχών διατήρησης ενέργειας, ορμής και μάζας αλλά και της εξίσωσης συνέχειας που οδηγεί σε ένα σύστημα μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους που η επίλυση τους οδηγεί στην χρονική και χωρική συγκέντρωση των σωματιδίων και άλλες παραμέτρους.

Τα μοντέλα εσωτερικής ποιότητας αέρα (IAQ Models) παρέχουν ένα τρόπο σύνδεσης ανάμεσα στις πηγές/καταβόθρες (συμπεριλαμβανόμενης και της

ανθρώπινης παρουσίας), στα χαρακτηριστικά του κτιρίου, στις ιδιότητες μεταφοράς και στην δυναμική των σωματιδίων που οδηγούν στην εκτίμηση της συγκέντρωσης των εσωτερικών ρυπαντών μέσω προσομοιώσεων.

Τα μοντέλα ποιότητας αέρα μπορούν να αξιοποιηθούν στην πρόβλεψη συγκεντρώσεων διαφόρων ρυπαντών και στα επίπεδα έκθεσης σε αυτά, στην μελέτη και τον χαρακτηρισμό των παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητα αέρα αλλά και στον σχεδιασμό κατάλληλων δράσεων για τον έλεγχο και περιορισμό της έκθεσης σε εσωτερικούς ρύπους (Morawska & Salthammer, 2006). Η ποιότητα αέρα στους εσωτερικούς χώρους μπορεί να εκτιμηθεί με απευθείας μετρήσεις, αλλά η συνεχής παρακολούθηση είναι δύσκολη ή δαπανηρή (πχ τοποθέτηση οργάνων που θα λαμβάνουν συνεχώς μετρήσεις και αξιοποίηση αυτών). Για αυτό, η χρήση μοντέλων καθίσταται αναγκαία ώστε σε συνδυασμό με πειραματικές μετρήσεις και τις κατάλληλες προσομοιώσεις να οδηγούν στην χάραξη κατάλληλων στρατηγικών ελέγχου της εσωτερικής ποιότητας αέρα, χωρίς να απαιτείται η συνεχής πειραματική μέτρηση.

Μια πρώτη κατηγοριοποίηση των μοντέλων (IAQ Models) τα διακρίνει σε **μικροσκοπικά** και **μακροσκοπικά μοντέλα** (Morawska & Salthammer, 2006; Spengler *et al.*, 2001).

Τα **μικροσκοπικά μοντέλα** στηρίζονται στην πλήρη μορφή των εξισώσεων NAVIER-STOKES (Morawska & Salthammer, 2006) περιλαμβάνοντας την χωρική και χρονική εξάρτηση όλων των μεταβλητών του εσωτερικού περιβάλλοντος πχ πεδία ταχυτήτων, θερμοκρασιών κτλπ. Μπορεί να είναι μονοδιάστατα, δισδιάστατα ή και τρισδιάστατα . Είναι πιο πολύπλοκα και απαιτούν ειδικές αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση των εξισώσεων, καθώς αυτές δεν έχουν αναλυτική λύση και βασίζονται στην διακριτοποίηση του χώρου και του χρόνου, στα χρονικά βήματα και στην μέθοδο πεπερασμένων

διαφορών. Έτσι οι εξισώσεις καταλήγουν σε συνήθεις διαφορικές με μερικές παραγώγους, οι οποίες επιλύονται με την χρήση αριθμητικών μεθόδων (Axley, 1987). Ωστόσο οι δυνατότητες τους είναι αυξημένες και τα αποτελέσματα τους μπορούν να δώσουν για παράδειγμα χρονική πρόβλεψη της κατανομής της συγκέντρωσης των ρυπαντών στο χώρο.

Τα **μακροσκοπικά μοντέλα** από την άλλη βασίζονται στην εξίσωση διατήρησης της μάζας και στην υπόθεση καλής ανάμιξης, κάτι που οδηγεί στην επίλυση συνήθων διαφορικών εξισώσεων (Spengler *et al.*, 2001). Αυτά τα μοντέλα δεν περιλαμβάνουν χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων από περιοχή σε περιοχή στο ίδιο δωμάτιο, ούτε μπορούν να προβλέψουν φαινόμενα όπως εναπόθεση στις διάφορες επιφάνειες. Στα μοντέλα αυτά ο χώρος υποδιαιρείται σε ένα ή περισσότερα διαμερίσματα μέσα στα οποία η συγκέντρωση θεωρείται σταθερή (από σημείο σε σημείο). Μπορούν να προβλέψουν μόνο την χρονική διακύμανση των συγκεντρώσεων των ρυπαντών στον υπό εξέταση χώρο.

Μια διαφορετική κατηγοριοποίηση διακρίνει τα μοντέλα σε στατιστικά, σε μοντέλα διατήρησης μάζας και σε μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής CFD (computational fluid dynamics) (Spengler *et al.*, 2001).

Στα **στατιστικά μοντέλα** χρησιμοποιούνται η ανάλυση παλινδρόμησης (σχέση μεταξύ 2 ή περισσότερων μεταβλητών με σκοπό την πρόβλεψη των τιμών της μιας μέσω των τιμών της άλλης/άλλων) και η πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (κατασκευή μοντέλου που να περιγράφει την σχέση μιας εξαρτημένης μεταβλητής και μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών) (Maroni *et al.*, 1995) . Παραδείγματα τέτοιας προσέγγισης αποτελούν οι ακόλουθες μελέτες (M. Kim, SankaraRao, Kang, Kim, & Yoo, 2012; Shrestha, 2009; Wong, Mui, & Hui, 2006). Πιο σύγχρονες τεχνικές στα ίδια πλαίσια συναντώνται στις ακόλουθες μελέτες που περιλαμβάνουν την χρήση

νευρωνικών δικτύων και υβριδικών μοντέλων (Elbayoumi, Ramli, & Yusof, 2015; Kadiyala, Kaur, & Kumar, 2013; M. H. Kim *et al.*, 2010). Ο γενικότερος σκοπός των στατιστικών μοντέλων είναι η εκτίμηση της έκθεσης του πληθυσμού στους διάφορους ρύπους (Spengler *et al.*, 2001). Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το μοντέλο “SHAPE” (Ott, 1983). Χρησιμοποιεί τεχνικές δειγματοληψίας Monte-Carlo για την κατασκευή κατανομών συχνότητας της έκθεσης, συνδυάζοντας για αυτό δεδομένα δραστηριότητας του πληθυσμού και κατανομή συγκεντρώσεων για διάφορα μικροπεριβάλλοντα (υποδιαιρέσεις του υπό εξέταση χώρου πχ κουζίνα, υπνοδωμάτιο κτλπ).

Στα **μοντέλα διατήρησης μάζας** η βασική αρχή είναι ότι η μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων που εισέρχεται στο κτίριο ή εκπέμπεται μέσα σε αυτό από εσωτερικές πηγές πρέπει να παραμένει σταθερή, δηλαδή, είτε να παραμένει στον αέρα, είτε να εναποτίθεται στις διάφορες επιφάνειες, είτε να μεταφέρεται σε άλλα δωμάτια ή στο εξωτερικό περιβάλλον. Μια βασική παραδοχή στην χρήση αυτών των μοντέλων είναι ότι υπάρχει καλή ανάμιξη του αέρα λόγω τύρβης στο εσωτερικό και έτσι η συγκέντρωση είναι σταθερή σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου μια δεδομένη χρονική στιγμή. Με αυτή την παραδοχή προκύπτει ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την συμπεριφορά των σωματιδίων στο χώρο (Nazaroff, 2004). Υπό προϋποθέσεις, ο εσωτερικός αέρας μπορεί να θεωρηθεί καλά αναμεμειγμένος όπως προκύπτει από μελέτες (Miller & Nazaroff, 2001; Ott, Klepeis, & Switzer, 2003). Ο (Spengler *et al.*, 2001) αναφέρει ότι η υπόθεση της καλής ανάμιξης είναι σωστή όταν οι χρονικές κλίμακες είναι μεγαλύτερες από μερικά λεπτά της ώρας, όταν οι συγκεντρώσεις κοντά στις πηγές δεν ενδιαφέρουν και όταν δεν υπάρχουν τοπικές μεταβολές ροών αέρα στην περιοχή ενδιαφέροντος. Σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να ο χώρος να διαμερισματοποιείται σε μικρότερους που

επικοινωνούν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας αέρα σε κάθε έναν από τους οποίους να ισχύει η υπόθεση της καλής ανάμιξης.

Παραδείγματα τέτοιων μοντέλων είναι το MIAQ (Nazaroff & Cass, 1989), το INDAIR (Dimitroulopoulou, Ashmore, Hill, Byrne, & Kinnersley, 2006), το CONTAM (Axley, 1987), το RISK (Sparks, 2000).

Τα **μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής CFD** βασίζονται στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων NAVIER-STOKES (Spengler *et al.*, 2001). Στα μοντέλα αυτού του τύπου έχουμε διακριτοποίηση του χώρου σε πολύ μικρούς όγκους (πεπερασμένους όγκους ελέγχου). Σε κάθε κελί ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων προκύπτει από την ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων πάνω σε αυτό τον όγκο. Από το σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων με χρήση επαναληπτικών μεθόδων προκύπτει μια τιμή για κάθε μεταβλητή σε κάθε τέτοιο πεπερασμένο όγκο. Τα δεδομένα που προκύπτουν από μια τέτοια αντιμετώπιση περιλαμβάνουν ταχύτητες αέρα κατανομή θερμοκρασίας, πίεσης, συγκεντρώσεων κτλπ (Spengler *et al.*, 2001). Τα μοντέλα αυτά είναι απαραίτητα αν χρειάζεται να μελετήσουμε για πχ την κατανομή των συγκεντρώσεων στο χώρο. Τέτοια μοντέλα μπορούν να αξιοποιηθούν ώστε να εκτιμήσουν την έκθεση σε ρύπους σε ατομικό επίπεδο ή για την μελέτη ροών αέρα στα κτίρια. Σε κάθε περίπτωση αυτά τα μοντέλα απαιτούν πολλά δεδομένα από τον χρήστη όπως βαθμίδες θερμοκρασίας, ταχύτητες αέρα, αρχικές συγκεντρώσεις στον χώρο που με την σειρά τους οδηγούν σε χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού και αύξηση του κόστους ενώ παράλληλα η προσομοίωση τους απαιτεί υπολογιστικά συστήματα μεγάλης ισχύος. Παραδείγματα τέτοιων μοντέλων συναντώνται στις παρακάτω μελέτες (F. Chen, Simon, & Lai, 2006; Lai & Chen, 2007; Zhao, Chen, & Tan, 2009).

Αν θελήσουμε να συγκρίνουμε τα CFD μοντέλα με τα μοντέλα διατήρησης μάζας θα λέγαμε ότι τα μοντέλα διατήρησης μάζας υπερέχουν στην απλότητα, στην ευκολία χρήσης, στα λιγότερα δεδομένα εισόδου και στην μικρότερη υπολογιστική δύναμη αλλά μειονεκτούν στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων (για πχ ομοιογενή συγκέντρωση ρύπων στον χώρο). Έτσι χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές που αφορούν στην μεταβολή των συγκεντρώσεων ρύπων σε εσωτερικούς χώρους.

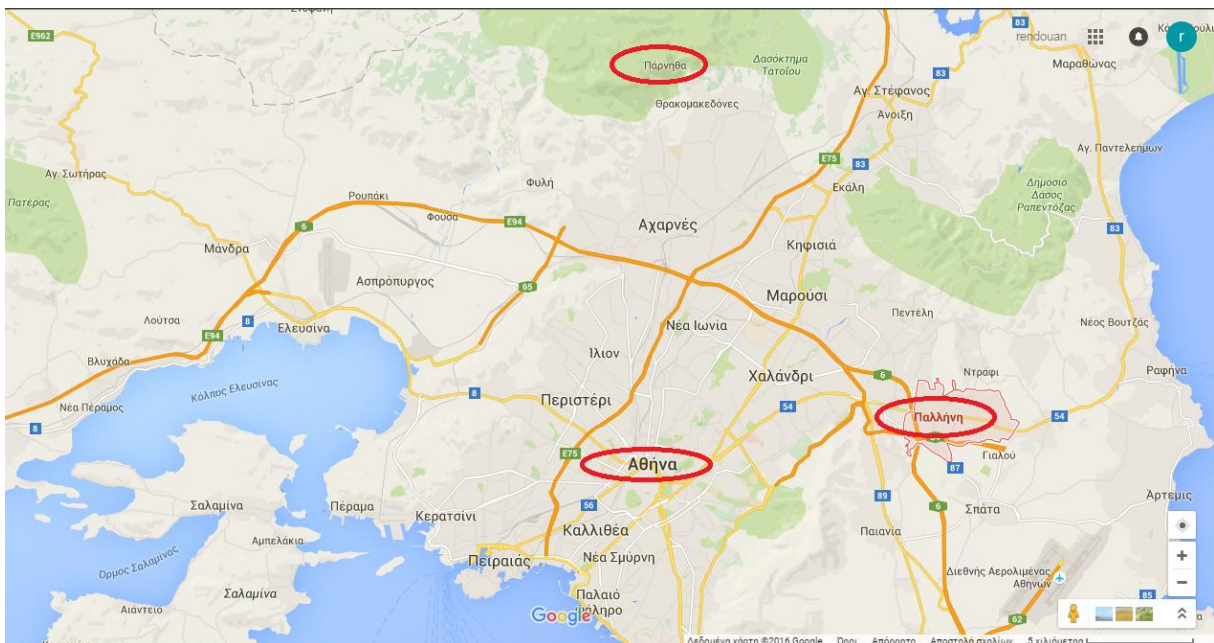
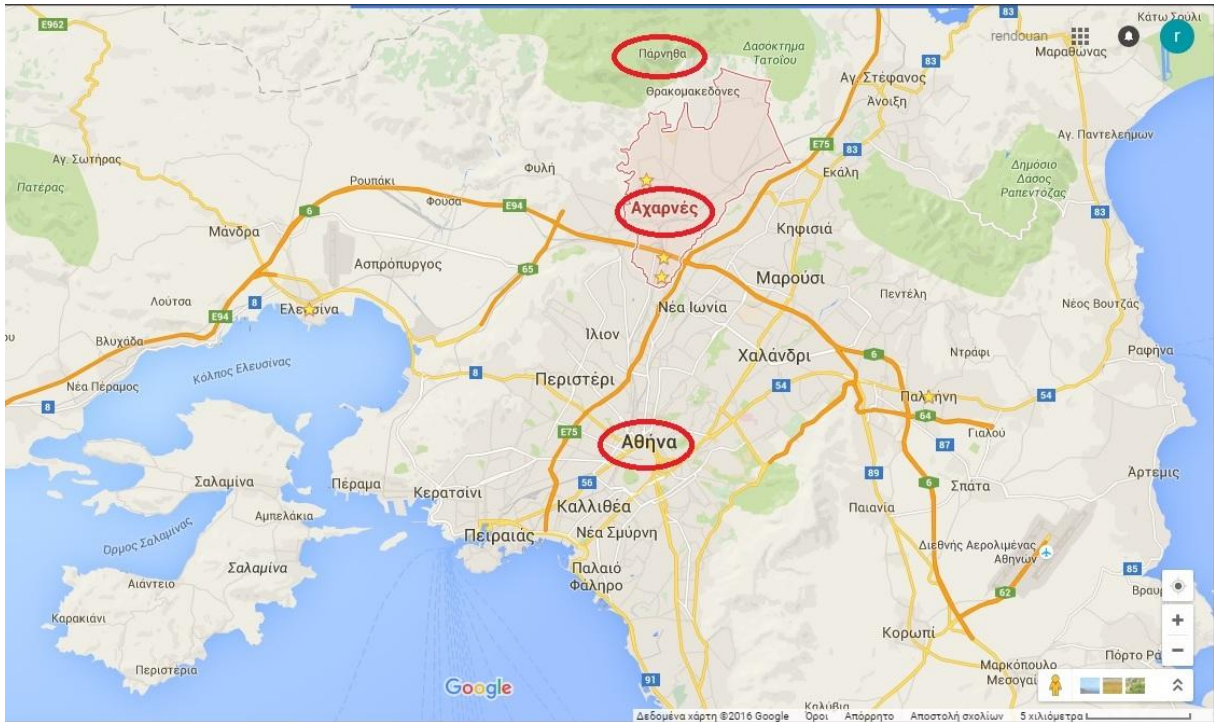
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ-ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ-ΣΤΟΧΟΙ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν 9 σχολικές αίθουσες σε ισάριθμα σχολικά συγκροτήματα της Αττικής. Τα 8 από αυτά βρίσκονται στην περιοχή των Αχαρνών. Η περιοχή αυτή στα βόρεια της φθάνει έως τις παρυφές του όρους Πάρνηθα ενώ στα νότια της βρίσκεται ο αστικός ιστός της πόλης των Αθηνών. Η μέση απόσταση από το κέντρο των Αθηνών είναι 20 km. Το άλλο σχολικό κτίριο βρίσκεται στην περιοχή της Παλλήνης στην ανατολική Αττική περίπου

στα 20 km από την πόλη της Αθήνας. Οι περιοχές των δήμων Αχαρνών και Παλλήνης στους οποίους βρίσκονται οι σχολικές μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την πειραματική μελέτη φαίνονται στην εικόνα 6.



Εικόνα 6 : Οι περιοχές Αχαρνών και Παλλήνης στον χάρτη και η θέση τους σε σχέση με την Αθήνα και την Πάρνηθα.

Τα χαρακτηριστικά των σχολικών κτιρίων και αιθουσών συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα στον οποίο φαίνεται και η κωδικοποίηση των σχολείων που ακολουθήθηκε στην παρούσα μελέτη για πρακτικούς λόγους. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα στο διάστημα από 01/04/2013 έως 31/05/2013 ενώ δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στις διακοπές του Πάσχα και τα σαββατοκύριακα.

ΔΗΜΟΤΙΚΟ ΣΧΟΛΕΙΟ	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ (ΗΜΕΡΕΣ)	ΕΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	ΕΜΒΑΔΟ ΠΑΤΩΜΑΤΟΣ ΤΑΞΗΣ (m ²)	ΟΓΚΟΣ ΤΑΞΗΣ (m ³)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΑΘΗΤΩΝ ΤΑΞΗΣ	ΤΥΠΟΣ ΠΙΝΑΚΑ	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΑΞΗΣ
14° ΑΧΑΡΝΩΝ	14	1-5/4/2013 (5 ημ)	2001	53	165	17	κιμωλία	BOP
1° ΘΡΑΚ/ΔΩΝ	1	8-12/4/2013 (5 ημ)	1978	64	198	25	κιμωλία	ΒΔ
4° ΑΧΑΡΝΩΝ	4	15-18/4/2013 & 24/4/2013 (5 ημ)	1986	50	155	24	κιμωλία	ΝΔ
3° ΠΑΛΛΗΝΗΣ	3	19&22/4/2013 (2 ημ)	-	46	137	25	κιμωλία	ΔΥΤ
18° ΑΧΑΡΝΩΝ	18	23/4/2013 (1 ημ)	1991	47	138	18	κιμωλία	NOT
12° ΑΧΑΡΝΩΝ	12	13-17/5/2013 (5 ημ)	1980	49	157	25	μαρκαδ	NOT
2° ΘΡΑΚ/ΔΩΝ	2	20-24/5/2013 (5 ημ)	2003	50	162	25	μαρκαδ	ΑΝ
8° ΑΧΑΡΝΩΝ	8	27-29/5/2013 (3 ημ)	1999	52	159	19	μαρκαδ	ΔΥΤ
11° ΑΧΑΡΝΩΝ	11	31/5/13 (1ημ)	1994	55	172	15	κιμωλία	NOT

Πίνακας 4 : Χαρακτηριστικά σχολικών μονάδων και αιθουσών διδασκαλίας στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις

Στόχοι των μετρήσεων είναι:


- Η καταγραφή και ανάλυση των επιπέδων αερισμού αλλά και των αιωρούμενων σωματιδίων σε σχολικές αίθουσες με φυσικό αερισμό κατά την περίοδο που δεν λειτουργούν τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης δλδ κατά την περίοδο της Άνοιξης.
- Η μελέτη της επίδρασης των εξωτερικών συγκεντρώσεων ρύπων στις αντίστοιχες εσωτερικές

- Η μελέτη του βαθμού επίδρασης της παρουσίας των μαθητών, του βαθμού αερισμού και της χρήσης μαρκαδόρου ή κιμωλίας στα επίπεδα των εσωτερικών συγκεντρώσεων
- Θεωρητική εκτίμηση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων με την χρήση του αριθμητικού μοντέλου ΜΙΑQ.

3.1.2 ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ-ΟΡΓΑΝΑ

Οι παράμετροι που καταγράφηκαν είναι ο αριθμός των αιωρούμενων σωματιδίων εντός και εκτός κτιρίου, η θερμοκρασία και υγρασία εντός κτιρίου και ο ρυθμός αερισμού με χρήση κατάλληλης μεθόδου που θα περιγραφεί παρακάτω.

Στο εσωτερικό των κτιρίων τα αιωρούμενα σωματίδια μετρήθηκαν με την χρήση του φορητού μετρητή Handheld 3016 IAQ (Lighthouse, worldwide solutions) σε μονάδες $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Το όργανο αυτό φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, έχει βαθμονομηθεί με το πρότυπο ISO 21501-4 με χρήση σφαιριδίων λάτεξ πολυστερίνης όπως προκύπτει από τον κατασκευαστή. Βασικά χαρακτηριστικά του οργάνου φαίνονται στην παρακάτω εικόνα (από την σελίδα του κατασκευαστή).

	ΜΟΝΤΕΛΟ	Handheld 3016
	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ	LIGHTHOUSE WORLDWIDE SOLUTIONS
	ΕΥΡΟΣ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	0.3-10 μm
	ΑΚΡΙΒΕΙΑ	100% για σωματίδια $>0.45 \mu\text{m}$
	ΟΡΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ	4.000.000 pt/ft^3
	ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ	H/Y - ΕΚΤΥΠΩΤΗ
	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	LMS XChange 1.6

Εικόνα 7 : Handheld 3016 και βασικά χαρακτηριστικά

Στο εξωτερικό των κτιρίων για τις μετρήσεις των αιωρούμενων σωματιδίων σε μονάδες $\mu\text{g}/\text{m}^3$ χρησιμοποιήθηκε ο μετρητής OSIRIS (Airborne Particulate Monitor, Turnkey Instruments Ltd.) τοποθετημένος σε κλωβό . Το όργανο αυτό και ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά του φαίνονται στην παρακάτω εικόνα

	ΜΟΝΤΕΛΟ	OSIRIS Airborne Particulate Monitor
	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ	Turnkey Instruments Ltd
	ΕΥΡΟΣ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	0.5 μm – 20 μm
	ΑΚΡΙΒΕΙΑ	0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	ΟΡΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ	6000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	ΟΡΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ	0.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	<u>AirQ</u>

Εικόνα 8 : OSIRIS και βασικά χαρακτηριστικά

Για την μέτρηση των μετεωρολογικών παραμέτρων (θερμοκρασία, υγρασία) χρησιμοποιήθηκαν θερμουγρόμετρα TinyTag . Φωτογραφία του οργάνου και κύρια χαρακτηριστικά του φαίνονται στην επόμενη εικόνα.

	ΜΟΝΤΕΛΟ	Tinytag Plus 2 TGP-4500
	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ	<u>Gemini Data loggers</u>
	ΕΥΡΟΣ T	-25 °C ΕΩΣ +85 °C
	ΕΥΡΟΣ RH	0- 100%
	ΑΚΡΙΒΕΙΑ	± 3% ΣΤΟΥΣ 25 °C
	ΑΠΟΚΡΙΣΗ	40 <u>sec</u>
	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	Tinytag Explorer

Εικόνα 9: TinyTag Plus 2 και βασικά χαρακτηριστικά

Όσον αφορά την μέτρηση του αερισμού χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος εξασθένισης αερίου ιχνηθέτη (tracer gas decay method) και συγκεκριμένα η χρήση SF₆ (εξαφθοριούχο θείο). Η μέθοδος εξασθένισης με αέριο ιχνηθέτη χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε ανάλογες μελέτες για την εύρεση του ρυθμού αερισμού. Η μέθοδος περιγράφεται από τους (Etheridge & Sandberg, 1996) ενώ παραδείγματα μπορούν να βρεθούν στις ακόλουθές μελέτες (Grot & Persily, 1986; Nazaroff, Salmon, & Cass, 1990).

Για την χρήση της μεθόδου αυτής απαιτείται η παραδοχή της καλής ανάμιξης του αέρα στον χώρο ενδιαφέροντος ενώ απαιτείται η γνώση του όγκου του δωματίου (Etheridge & Sandberg, 1996). Για την εξασφάλιση της καλής ανάμιξης του αέρα χρησιμοποιήθηκε ανεμιστήρας που τοποθετήθηκε όμως μακριά από οποιοδήποτε άνοιγμα (παράθυρο κτλπ) για να μην μεταβάλλει τις ροές αέρα μεταξύ των ζωνών της αίθουσας. Πρακτικά αέριο SF₆ απελευθερώνεται στην αίθουσα ενώ λειτουργεί ανεμιστήρας και στην συνέχεια μετράται ο ρυθμός πτώσης της συγκέντρωσης του.

Στην διάρκεια κάθε ημέρας δειγματοληψίας διάφορα σενάρια ανοίγματος παραθύρων (ανοιχτά, μισάνοιχτα, λίγο ανοιχτά) που παρατηρούνταν δοκιμάστηκαν με την μέθοδο αυτή τόσο στην αρχή (πριν την έναρξη των μαθημάτων) όσο και στο τέλος (μετά την λήξη των μαθημάτων) κάθε ημέρας. Έτσι το αέριο ιχνηθέτης απελευθερώνεται σε διαφορετικά σημεία και ένας ανεμιστήρας τίθεται σε λειτουργία ως το τέλος των μετρήσεων. Έπειτα το αέριο καταγράφεται σε 5 διαφορετικές θέσεις και η μέση τιμή λαμβάνεται υπόψιν. Αυτό επαναλαμβάνεται για κάθε σενάριο. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε είναι το INNOVA 1312 σε σύνδεση με τον INNOVA 1303 που είναι δειγματολήπτης και δοσομετρητής με 6 ακροφύσια και δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης σε 6 διαφορετικά σημεία. Φωτογραφία του οργάνου και βασικά χαρακτηριστικά φαίνονται στην επόμενη εικόνα.

	ΜΟΝΤΕΛΟ	INNOVA 1312 Photoacoustic multi-gas monitor
	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ	LumaSense Technologies
	ΑΚΡΙΒΕΙΑ	±1.5 ppm
	ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ	1% της μετρούμενης τιμής
	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΓΙΑ Η/Υ	INNOVA 7620

Εικόνα 10 : INNOVA 1312 και βασικά χαρακτηριστικά

Ο ρυθμός αερισμού σε μονάδες ACH (Air Changes per Hour) υπολογίζεται στην συνέχεια, από την ακόλουθη σχέση όπως προκύπτει από (He, Morawska, Hitchins, & Gilbert, 2004) :

$$\lambda(ACH) = \frac{\ln C(t_1) - \ln C(t_2)}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

Όπου λ : ο ρυθμός αερισμού σε ACH , $C(t_1), C(t_2)$: οι συγκεντρώσεις του ιχνηθέτη σε ppm τις χρονικές στιγμές t_1, t_2 αντίστοιχα.

Ο λόγος που το αέριο απελευθερωνόταν σε στιγμές που οι μαθητές απουσίαζαν είναι για να μην εκτίθενται στην έκλυση του αερίου SF₆ που παρότι δεν είναι τοξικό θα προκαλούσε ενδεχόμενη αναστάτωση τους.

Στην συγκεκριμένη μέθοδο κάποιο σφάλμα υπεισέρχεται λόγω του ότι ο αερισμός δεν μετρείται την ώρα που είναι παρόντες οι μαθητές και λόγω του ότι οι μετεωρολογικές παράμετροι δεν είναι ίδιες την ώρα της μέτρησης του αερισμού και στην διάρκεια της ημέρας κατά την μέτρηση των αιωρούμενων σωματιδίων. Τα σφάλματα αυτά δεν λήφθηκαν υπόψιν ωστόσο εκτιμήθηκαν στο 5-8% λόγω μετεωρολογικών παραμέτρων και 5-10% λόγω μη παρουσίας των μαθητών και είναι στα ανεκτά πλαίσια ενός τέτοιου πειράματος. Άλλο σφάλμα είναι πιθανό να προέρχεται από την υπόθεση καλής ανάμιξης που δεν είναι απόλυτα σωστή υπόθεση στην πράξη όπως έχει ήδη αναφερθεί στα προηγούμενα.

Στον επόμενο πίνακα καταγράφονται ανά σχολείο οι τιμές σε (m²) των ανοιγμάτων (παραθύρων κτλπ) όταν είναι πλήρως ανοιχτά.

ΣΧΟΛΕΙΟ	ΠΛΗΡΩΣ ΑΝΟΙΧΤΑ ΠΑΡΑΘΥΡΑ (m ²)
14	3.50
1	3.90
4	4.60
3	2.40
18	1.70
12	4.30
2	2.90
8	1.20
11	0.45

Πίνακας 5 : τιμές εμβαδού ανοιγμάτων (πλήρως ανοιχτά) ανά σχολείο

3.1.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Όπως ήδη αναφέρθηκε οι μετρήσεις στα 9 σχολεία έλαβαν χώρα κατά την περίοδο της άνοιξης όταν τα συστήματα ψύξης-θέρμανσης ήταν εκτός λειτουργίας με σκοπό ο αερισμός των αιθουσών να γίνεται με φυσικό τρόπο. Οι συνολικές ημέρες δειγματοληψίας ήταν 32 από 1/04/2013 έως 31/05/2013 με εξαίρεση τις αργίες Πάσχα και τα σαββατοκύριακα. Ανάλογα την διαθεσιμότητα των σχολείων σε κάθε σχολική μονάδα οι μετρήσεις διήρκησαν από μια έως πέντε ημέρες όπως φαίνεται στον πίνακα 6 .

Σε κάθε ημέρα διεξαγωγής των μετρήσεων οι μετρήσεις ξεκίναγαν 40 λεπτά πριν την άφιξη των μαθητών (07:30 περίπου) και ολοκληρώνονταν 40 λεπτά μετά την αποχώρηση των μαθητών δλδ περίπου στις 14:40. Άρα κάθε ημέρα δειγματοληψίας περιελάμβανε τουλάχιστον 7 ώρες μετρήσεων. Ως βήμα μέτρησης τέθηκαν τα 5' λεπτά της ώρας. Τα όργανα βρίσκονταν σε ύψος 1,1 m από το δάπεδο σύμφωνα με το πρότυπο ISO 7726:1998 για καθημένους χρήστες και όσο πιο κοντά στο κέντρο της τάξης. Η παρουσία των μαθητών, οι διάφορες δραστηριότητες, οι αλλαγές στα ανοίγματα κτλπ σημειώνονταν σχολαστικά σε ημερολόγιο μετρήσεων σημειώνοντας την ακριβή ώρα έναρξης, λήξης και την

διάρκεια του κάθε συμβάντος. Η επεξεργασία και η ανάλυση των δεδομένων έγιναν με χρήση του προγράμματος MATLAB και του EXCEL ενώ η προσομοίωση των πειραματικά μετρούμενων τιμών αιωρούμενων σωματιδίων με το αριθμητικό μοντέλο MIAQ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Μ.Ι.Α.Ο-ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

4.1 Μ.Ι.Α.Ο

Στην παρούσα εργασία για την μελέτη της σωματιδιακής ρύπανσης σε 8 σχολικές μονάδες γίνεται χρήση του αριθμητικού μοντέλου MIAQ (Multi-chamber Indoor Air Quality model), το οποίο κατατάσσεται στα μοντέλα διατήρησης μάζας.

Η παραγωγή και η απομάκρυνση των αέριων και σωματιδιακών ρυπαντών στους εσωτερικούς χώρους μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά (Maroni *et al.*, 1995) με την χρήση της αρχής διατήρησης της μάζας :

$$\text{Ρυθμός συσσώρευσης μάζας} = \text{ρυθμός[εισόδου} + \text{παραγωγής} - \text{εξόδου} - \text{κατανάλωσης από καταβόθρες}] \quad (1)$$

ή

$$\frac{VdC_{IN}}{dt} = \text{ρυθμός μεταβολής μάζας λόγω} :$$

$$\begin{aligned} & [\text{εισροή εξωτερικού αέρα (infiltration)}] + [\text{παραγωγή λόγω πηγών εσωτερικά}] - \\ & - [\text{εκροή εσωτερικού αέρα (exfiltration)}] - [\text{εσωτερική απομάκρυνση ρύπων}] \quad (2) \end{aligned}$$

όπου V : ο όγκος του δωματίου και C_{IN} : η εσωτερική συγκέντρωση του εκάστοτε ρύπου.

Στο μοντέλο που παρουσιάστηκε από τους (Nazaroff & Cass, 1989) το κτίριο αναπαρίσταται ως ένα σύνολο συνδεδεμένων θαλάμων ο κάθε ένας από τους οποίους έχει καλή ανάμιξη. Κάθε θάλαμος θεωρείται ότι αναπαριστά ένα δωμάτιο ή ένα σύνολο δωματίων και μπορεί να ανταλλάσσει αέρα με τους υπόλοιπους θαλάμους. Σε κάθε θάλαμο εκτός από την υπόθεση καλής ανάμιξης ισχύει η ακόλουθη εξίσωση που περιγράφει τον ρυθμό μεταβολής της συγκέντρωσης για κάθε ρύπο σε κάθε τμήμα του θαλάμου :

$$\frac{dC_{ik}}{dt} = S_{ik} - L_{ik} C_{ik} \quad (3)$$

Όπου C_{ik} : συγκέντρωση μάζας του ρύπου k στο θάλαμο i , S_{ik} : το σύνολο όλων των πηγών του k στον θάλαμο i (εκπομπή, μεταφορά από άλλο θάλαμο ή από τον εξωτερικό χώρο και συσσωμάτωση από μικρότερα σωματίδια στον ίδιο θάλαμο), L_{ik} : το άθροισμα όλων των καταβόθρων του k στον θάλαμο i (εναπόθεση σε επιφάνειες, απομάκρυνση λόγω αερισμού ή φιλτραρίσματος, και απώλειες λόγω συσσωμάτωσης σε μεγαλύτερα σωματίδια) . Οι όροι πηγών και καταβόθρων δύναται να έχουν χρονική μεταβολή.

Όπως είναι φανερό από τα παραπάνω το μοντέλο αναπαριστά τις επιπτώσεις του αερισμού, της εναπόθεσης, της απευθείας εκπομπής από εσωτερικές πηγές και της συσσωμάτωσης. Προκειμένου για σωματιδιακή ύλη που αιωρείται, αυτή κατηγοριοποιείται σε συνεχή τμήματα μέσα στα οποία τα αεροζόλ μπορεί να αποτελούνται από διάφορα χημικά συστατικά αλλά αντιμετωπίζονται ομοιογενώς από το μοντέλο. Τα αεροζόλ θεωρούνται ομοιογενή, σφαιρικά και ίδιας πυκνότητας και η μάζα τους κατανέμεται με τον λογάριθμό της διαμέτρου των σωματιδίων ούτως ώστε η μάζα των σωματιδίων να σχετίζεται με μοναδικό τρόπο με την διάμετρο των σωματιδίων. Για λόγους οικονομίας υπολογιστικών πόρων το μεγαλύτερο σωματίδιο μέσα σε κάθε τμήμα έχει τουλάχιστον

διπλάσια μάζα σε σχέση με το μικρότερο. Τα όρια κάθε τμήματος καθορίζονται από τον χρήστη.

Τα δεδομένα εισόδου περιλαμβάνουν, χαρακτηριστικά του κτιρίου : όγκο, ύψος, επιφάνειες, μετεωρολογικά δεδομένα : θερμοκρασία, υγρασία, χαρακτηριστικά ρύπου : είδος, πυκνότητα, τμήματα, αρχικές συγκεντρώσεις και επίσης δεδομένα αερισμού, πηγές και ταχύτητες εναπόθεσης.

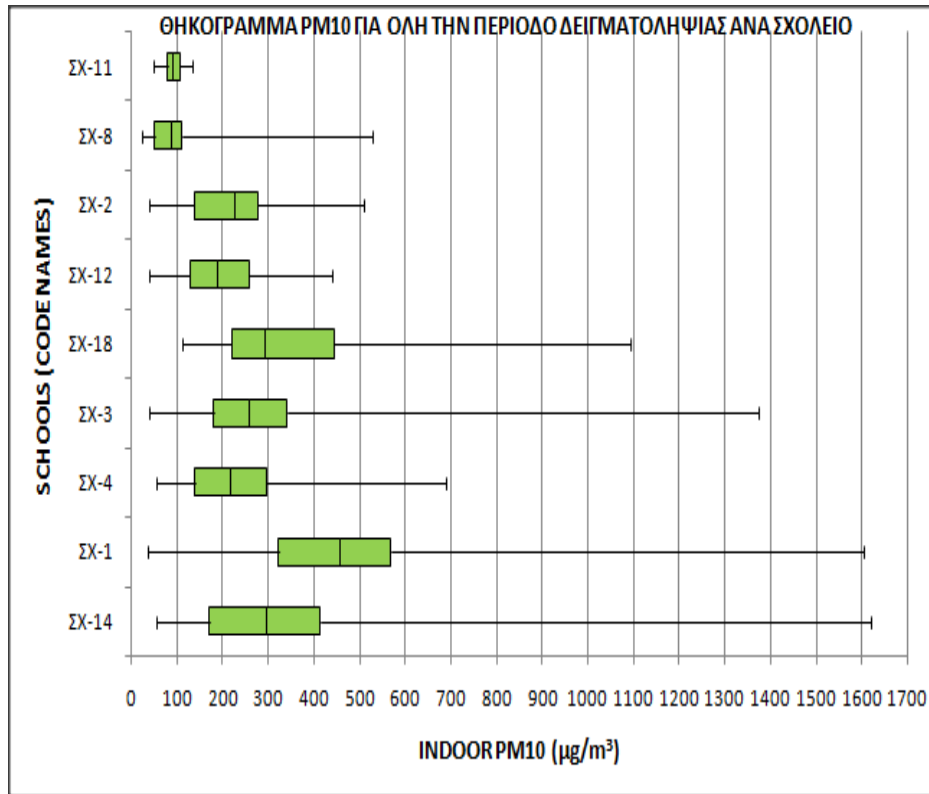
4.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ

4.2.1 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Σε κάθε ημέρα δειγματοληψίας σε ημερολόγιο μετρήσεων καταγράφονται με συχνότητα 5' λεπτών της ώρας η συγκέντρωση των PM10 εντός και εκτός του κτιρίου, η θερμοκρασία, η υγρασία, ο αερισμός, ο αριθμός των μαθητών και τα διάφορα συμβάντα (πχ κατασκευές κτλπ). Στατιστικά στοιχεία των μετρήσεων ανά σχολείο για το σύνολο των ημερών δειγματοληψίας παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα και το θηκόγραμμα για τις εσωτερικές συγκεντρώσεις ανά σχολείο για το σύνολο των ημερών δειγματοληψίας.

ΠΑΡΑΜ	ΜΕΤΕΘΟΔ	ΣΧΟΛ 14	ΣΧΟΛ 1	ΣΧΟΛ 4	ΣΧΟΛ 3	ΣΧΟΛ 18	ΣΧΟΛ 12	ΣΧΟΛ 2	ΣΧΟΛ 8	ΣΧΟΛ 11
PM ₁₀	MIN	55,35	34,64	54,46	37,72	112,47	38,68	39,33	21,91	48,48
	MAX	1618,53	1603,72	687,23	1371,89	1093,13	439,25	509,33	526,40	133,23
	MEAN	326,41	447,78	226,12	287,65	361,23	198,94	212,49	92,45	91,68
	SD	213,89	207,75	107,85	176,21	215,52	84,41	89,36	64,06	21,37
PM ₁₀ EXT	MIN	5,40	0,77	2,05	6,88	16	3,93	8,59	6,61	16,68
	MAX	250,12	51,84	87,47	37,95	35,46	77,87	547,69	361,18	31,64
	MEAN	28,18	20,66	28,40	15,79	21,30	24,45	135,18	36,55	21,55
	SD	22,89	10,21	23,81	4,19	3,09	13,08	89,24	47,14	3,21
T (°C)	MIN	18	16,65	17,47	19,40	17,70	20,78	24,04	24,12	25,84
	MAX	22,05	20,54	25,50	22,24	22,95	26,54	28,21	28,94	27,61
	MEAN	20,82	18,76	22,55	20,68	21,10	23,35	26,61	27,62	27,07
	SD	0,68	0,81	1,32	0,84	1,33	1,23	1,32	0,77	0,47
RH (%)	MIN	31,56	51,61	22,44	37,52	40,39	42,78	32,78	21,10	34,41
	MAX	67,63	75,73	58,32	54,34	55,58	73,59	57,08	44,93	45,65
	MEAN	48,45	64,57	38,97	46,61	48,44	59,44	44,26	35,02	38,01
	SD	9,32	5,27	8,79	4,22	3,88	6,61	5,63	5,84	2,78
VENT (ACH)	MIN	0,70	0,44	0,33	0,11	0,52	0,79	0,65	0,42	0,82
	MAX	16,98	9,38	21,97	9,54	9,02	6,40	4,34	5,04	5,00
	MEAN	6,45	1,67	8,41	6,03	5,11	3,56	3,61	3,88	2,34
	SD	5,69	2,91	8,66	4,18	3,69	2,75	1,47	2,01	1,02
ΜΑΘΗΤΕΣ		24	29	27	28	21	31	33	22	20

Πίνακας 6 : Διάφορα στατιστικά μεγέθη των μετρήσεων ανά σχολείο για όλη την διάρκεια δειγματοληψίας



Διάγραμμα 4.1 : Θηκόγραμμα εσωτερικών συγκεντρώσεων PM10 ανά σχολείο για το σύνολο των ημερών δειγματοληψίας. Στα σχολεία : ΣΧ-8, ΣΧ-2, ΣΧ-12 χρησιμοποιείται μαρκαδόρος αντί κιμωλίας στο μάθημα.

Από τον παραπάνω πίνακα και το αντίστοιχο θηκόγραμμα προκύπτει καταρχήν ότι τα επίπεδα των εσωτερικών συγκεντρώσεων υπερβαίνουν κατά πολύ τα επίπεδα των εξωτερικών συγκεντρώσεων PM10 κατά τουλάχιστον 10 φορές. Επίσης τα επίπεδα αυτά είναι κατά πολύ υψηλότερα των ορίων των επιτρεπτών συγκεντρώσεων που τίθενται από τον WHO δλδ $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ σε ημερήσια βάση. Αυτό οπωσδήποτε οφείλεται και στην μεγάλη παρουσία ατόμων και μάλιστα παιδιών με αρκετή δραστηριότητα στην αίθουσα. Βέβαια οι μετρήσεις περιέχουν αρκετές ακραίες τιμές που ανεβάζουν τον μέσον όρο και μπορεί να οφείλονται σε μεμονωμένα τυχαία συμβάντα ή και σε σφάλματα των οργάνων που σχετίζονται με την παρουσία-παρέμβαση των μαθητών.

Επίσης είναι εμφανές και από το θηκόγραμμα ότι στα σχολεία που χρησιμοποιείται κιμωλία οι εσωτερικές συγκεντρώσεις PM10 τείνουν να είναι

μεγαλύτερες κατά μέσον όρο από ότι στα σχολεία που χρησιμοποιείται μαρκαδόρος.

Στην μελέτη (Chatzidiakou, Mumovic, & Summerfield, 2012) συνοψίζονται ανάλογες μετρήσεις από άλλες μελέτες σε 96 σχολεία και 159 αίθουσες και οι οποίες δείχνουν εξίσου σημαντική υπέρβαση των ορίων επιτρεπτών συγκεντρώσεων των PM10 και παρότι τα επίπεδα είναι κατά τι χαμηλότερα από τις παρούσες μετρήσεις ωστόσο κρίνονται ότι βρίσκονται στα ανάλογα επίπεδα.

Όσον αφορά τις μετρήσεις θερμοκρασίας παρατηρούμε ότι σε όλη την διάρκεια των μετρήσεων η θερμοκρασία ανά σχολείο μεταβαλλόταν κατά περίπου 4 °C, άρα σχετικά μικρή μεταβολή, ενώ τα επίπεδα υγρασίας κατά 25%.

Ο ρυθμός διείσδυσης στα κτίρια (ίσως με ελάχιστο αερισμό στον πίνακα 6) κυμαίνεται ανάλογα με το σχολείο από 0,11 έως και 0.82 ACH ενώ τα μέγιστα επίπεδα αερισμού από 4,34 έως και 21,97 ACH δλδ πάνω από 20 φορές μεγαλύτερα από τον βαθμό διείσδυσης.

4.2.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ PM10 ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΙΑQ

Στο παρών εδάφιο γίνεται προσπάθεια εκτίμησης των πειραματικά μετρούμενων τιμών των εσωτερικών συγκεντρώσεων PM10 με την βοήθεια του αριθμητικού μοντέλου ΜΙΑQ.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το μοντέλο αυτό ανήκει στην κατηγορία των μοντέλων ισοζυγίου μάζας. Πρόκειται για έναν μαθηματικό αλγόριθμο ο οποίος λαμβάνει υπόψιν βασικές διεργασίες που καθορίζουν τα επίπεδα εσωτερικών

συγκεντρώσεων και δέχεται ως είσοδο δεδομένα που αφορούν γεωμετρικά στοιχεία του χώρου (όγκος, ύψος, επιφάνειες), μετεωρολογικές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία), επίπεδα αερισμού, αρχικές συγκεντρώσεις, εξωτερικές συγκεντρώσεις και πηγές.

Το μοντέλο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές μελέτες (Halios & Helmis, 2007; Halios *et al.*, 2009; Halios & Helmis, 2007; Halios & Helmis, 2010; Halios *et al.*, 2014; Nazaroff *et al.*, 1990) με ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Βασική παραδοχή στην χρήση αυτού του μοντέλου είναι ότι σε κάθε ζώνη ο αέρας θεωρείται καλά αναμεμειγμένος.

Ένα από τα μειονεκτήματα αυτού του μοντέλου είναι ότι δέχεται μέσες ωριαίες τιμές ως δεδομένα . Δηλαδή δέχεται μέση ωριαία θερμοκρασία, μέση ωριαία υγρασία, μέσω ωριαίο αερισμό και μέσες ωριαίες εξωτερικές συγκεντρώσεις. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα για την θερμοκρασία και την υγρασία αφού δεν παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές σε διάστημα μιας ώρας ωστόσο δημιουργεί πρόβλημα στις εξωτερικές συγκεντρώσεις και σε μεγαλύτερο βαθμό στον αερισμό αφού αυτές οι παράμετροι και ειδικά ο αερισμός παρατηρήθηκε ότι πολλές φορές μεταβάλλονται σημαντικά μέσα στο χρονικό διάστημα της μιας ώρας. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με τις πολλαπλές προσομοιώσεις ανά ημέρα δειγματοληψίας . Δηλαδή για κάθε διαφορετική τιμή αερισμού γινόταν και μια νέα προσομοίωση με τα αντίστοιχα δεδομένα εισόδου που αφορούσαν το συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο των τιμών αερισμού. Στην συνέχεια γινόταν συγκερασμός των αποτελεσμάτων.

Έτσι κάθε ημέρα αποτελούνταν από τόσες προσομοιώσεις όσες και οι μεταβολές των τιμών αερισμού. Στην αρχική προσέγγιση ως αρχικές συγκεντρώσεις λαμβάνονταν οι πραγματικές πειραματικές τιμές PM10 και στις υπόλοιπες προσομοιώσεις της ημέρας ως αρχικές τιμές PM10 λαμβάνονταν οι

θεωρητικές τιμές του μοντέλου των προηγούμενων προσομοιώσεων. Σε επόμενη φάση μεταβλήθηκε η ταχύτητα εναπόθεσης δοκιμάζοντας 3 διαφορετικά σενάρια 0.005-0.010-0.015 cm/sec. Σε μια προσπάθεια βελτιστοποίησης της πρόγνωσης με το μοντέλο οι προσομοιώσεις επαναλήφθηκαν αλλά αυτή την φορά σε κάθε προσομοίωση λαμβάνονταν ως αρχική τιμή PM10 οι πραγματικές πειραματικές τιμές με ταχύτητα εναπόθεσης αυτή του καλύτερου σεναρίου. Μια τέτοια ενέργεια διαπιστώθηκε ότι βελτιώνει σημαντικά τα ποσοστά ακριβούς πρόγνωσης ενώ ταυτόχρονα κρίθηκε αναγκαία η επιλογή της δεδομένου ότι στα σημεία που αλλάζει ο αερισμός υπάρχουν ασυνέχειες. Ακριβώς στα σημεία αυτά δεδομένου ότι μεταβολή στον αερισμό συνεπάγεται μετατόπιση της ισορροπίας στον χώρο και κατά συνέπεια παραβίαση της υπόθεσης της καλής ανάμιξης που αποτελεί βασική υπόθεση στο μοντέλο MIAQ πρέπει το μοντέλο να τροφοδοτείται από νέες πειραματικές τιμές PM10₀.

Όσον αφορά τις πηγές θεωρήθηκε ότι κατά κύριο λόγο πηγή αποτελεί η παρουσία των μαθητών λόγω των οποίων προκαλείται επαναιώρηση σωματιδίων στον χώρο και η χρήση κιμωλίας (βέβαια υπήρξε περίπτωση που κάτι τέτοιο δεν ήταν επαρκές όπως η περίπτωση της ημέρας 29/05/2013 που υπήρχε γυψοκατασκευή στην αίθουσα). Πολλαπλές δοκιμές με εσωτερικές πηγές διαφορετικής ισχύος πραγματοποιήθηκαν ακολουθώντας την λογική της μελέτης (Helmis *et al.*, 2007). Βρέθηκε ότι για τις συνθήκες του συγκεκριμένου πειράματος μια ισχύς ανά μαθητή 80 μg/min αναπαριστά καλύτερα τα δεδομένα.

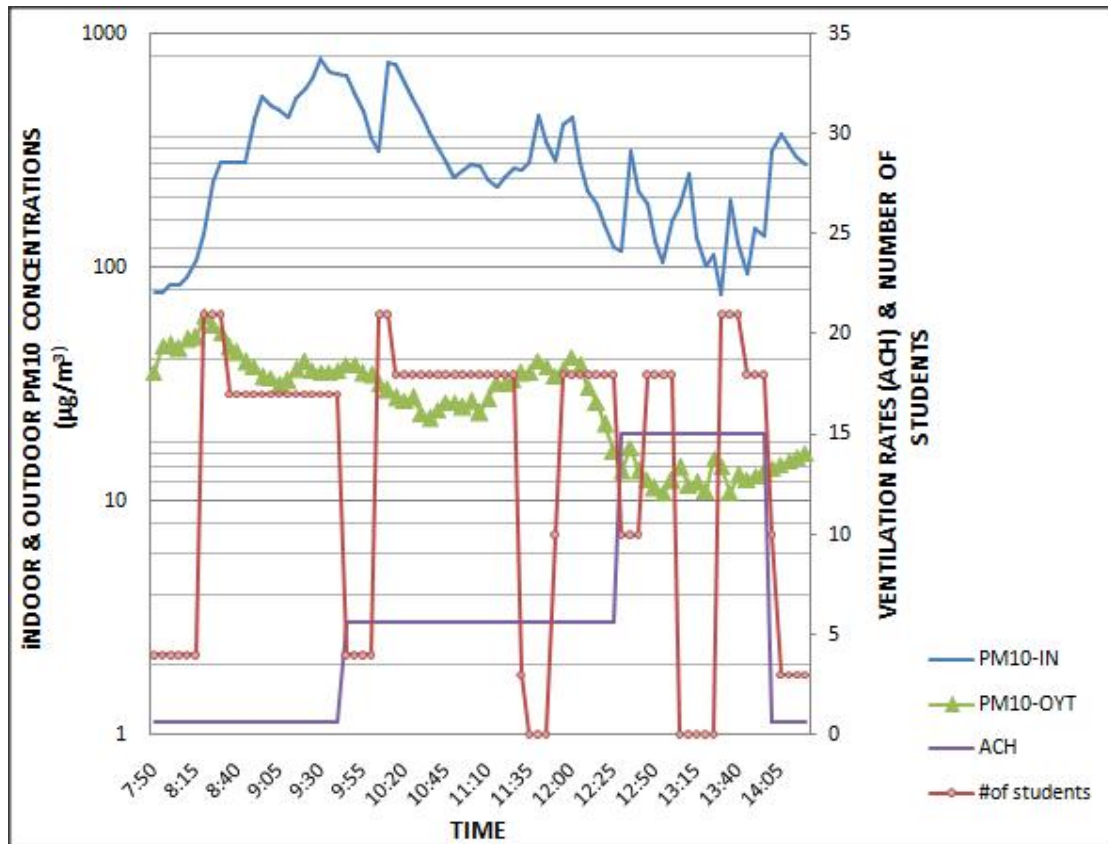
Στις αμέσως επόμενες σελίδες παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου των προσομοιώσεων ανά ημέρα, διάγραμμα με τη μεταβολή των επιπέδων αερισμού, εσωτερικών/εξωτερικών συγκεντρώσεων και αριθμού των μαθητών στην διάρκεια κάθε ημέρας καθώς και συγκριτικό διάγραμμα διασποράς των 3

σεναρίων ταχύτητας εναπόθεσης αλλά και συγκριτικό διάγραμμα διασποράς αρχικής – βελτιστοποιημένης προσέγγισης, και τα τελικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε διαγράμματα συγκεντρώσεων και διασποράς για ορισμένες ημέρες ενδεικτικά . Στο τέλος σχολιάζονται τα τελικά αποτελέσματα των θεωρητικών αποτελεσμάτων του μοντέλου σε σχέση με τις πειραματικές τιμές και τα δεδομένα.

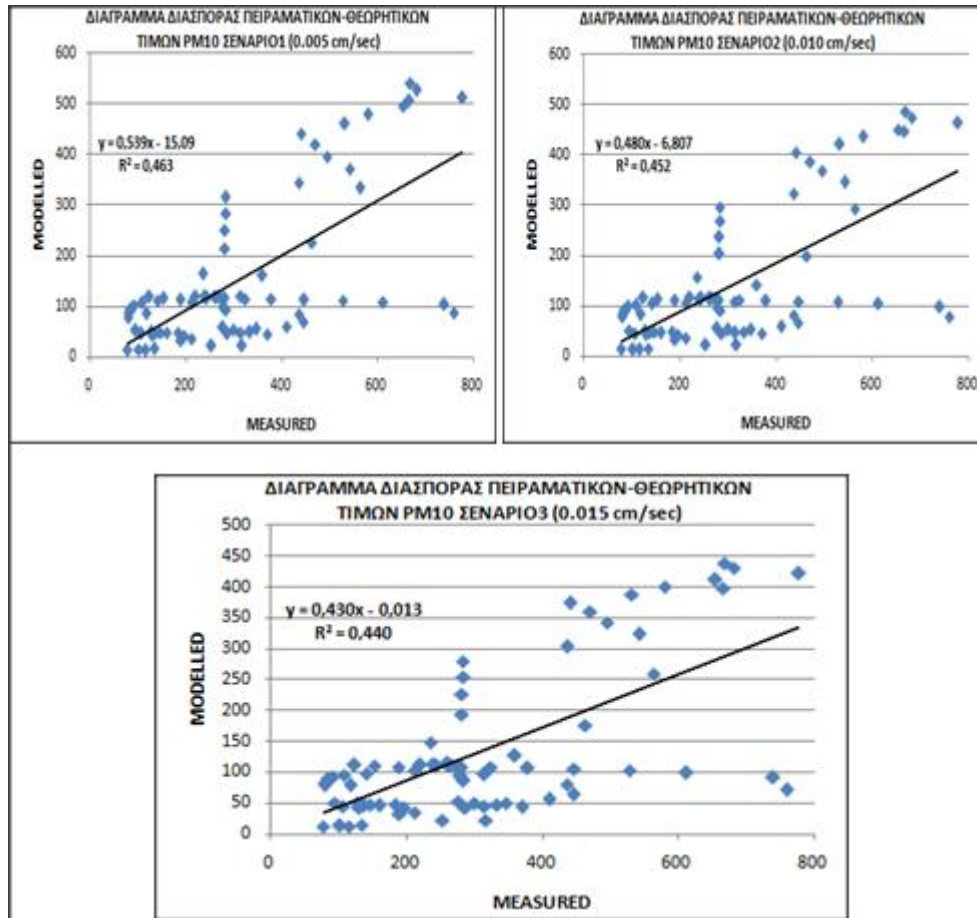
ΣΧΟΛΕΙΟ 14 : 5/4/2013

ΟΓΚΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ	165 m ³
ΥΨΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ	3,1 m
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ (μέση ωριαία)	20,1-21,9°C
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΙΧΩΝ (μέση ωριαία)	ΠΑΡΑΔΟΧΗ ΤΙΜΗΣ 2°C ΜΙΚΡΟΤΕΡΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ
ΕΠΙΠΕΔΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (μέση ωριαία τιμή)	36-57%
ΜΕΓΕΘΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	2,5-10 μm
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	2.200 kg/m ³
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ (σενάρια)	0.005-0.015 cm/sec
ΑΕΡΙΣΜΟΣ (μέσες ωριαίες τιμές)	1,92-41,42 m ³ /min
ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ	78.75 μg/m ³
ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ	12,5-47,1 μg/m ³
ΠΗΓΕΣ (ΛΟΓΩ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΜΑΘΗΤΩΝ)	0-1680 μg /min

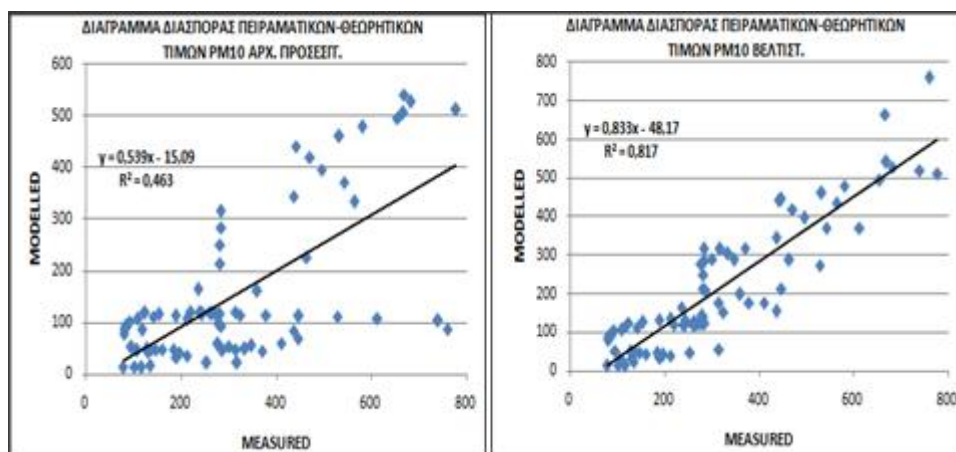
Πίνακας 1.1 : Δεδομένα εισόδου στο ΜΙΑQ για τις 5/4/2013 .



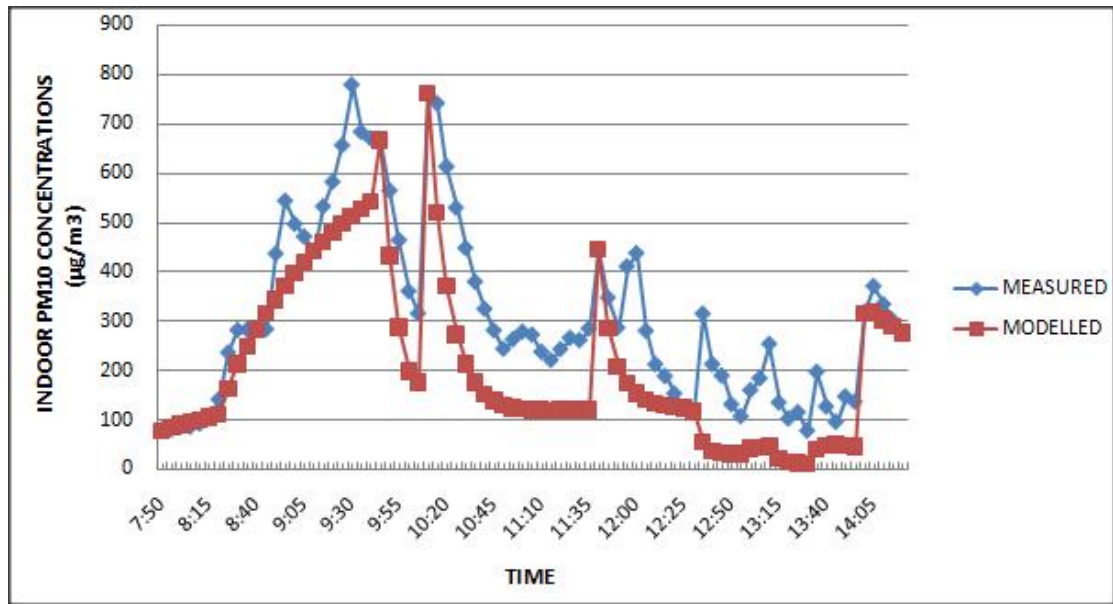
Διάγραμμα 1.1 : Διάγραμμα που απεικονίζει την διακύμανση των εσωτερικών PM10 , των εξωτερικών PM10, του ρυθμού αερισμού και του αριθμού των μαθητών κατά την διάρκεια της ημέρας 5/4/2013 συναρτήσει του χρόνου .



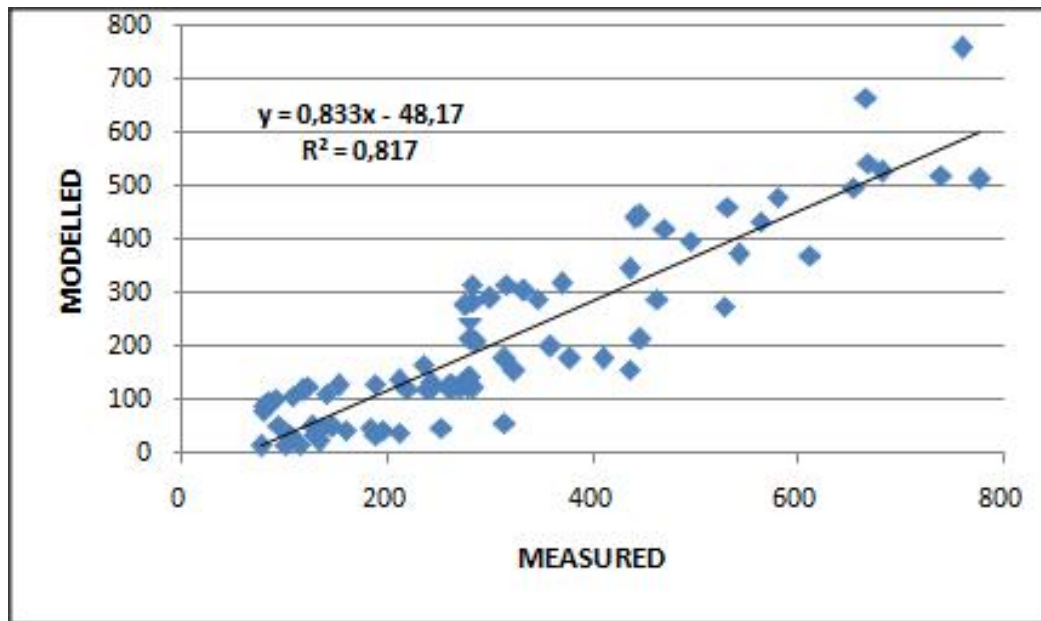
Διάγραμμα 1.2 : Συγκριτικό διάγραμμα με καμπύλες ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστή συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών PM10 για τις 5/4/2013 με βάση τα σενάρια με τις διαφορετικές ταχύτητες εναπόθεσης σενάριο1,2,3 με 0,005-0,010-0,015 cm/sec αντίστοιχα.



Διάγραμμα 1.3 : Συγκριτικό διάγραμμα με καμπύλες ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστή συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών PM10 για τις 5/4/2013 με βάση την αρχική (αριστερά) και με βάση την βελτιστοποιημένη προσέγγιση (δεξιά).



Διάγραμμα 1.4 : Συγκριτικό διάγραμμα που απεικονίζει τις εσωτερικές συγκεντρώσεις PM10 όπως μετρήθηκαν πειραματικά και όπως προβλέφθηκαν θεωρητικά με την χρήση του μοντέλου MIAQ για τις 5/4/2013 (βέλτιστη προσέγγιση) .



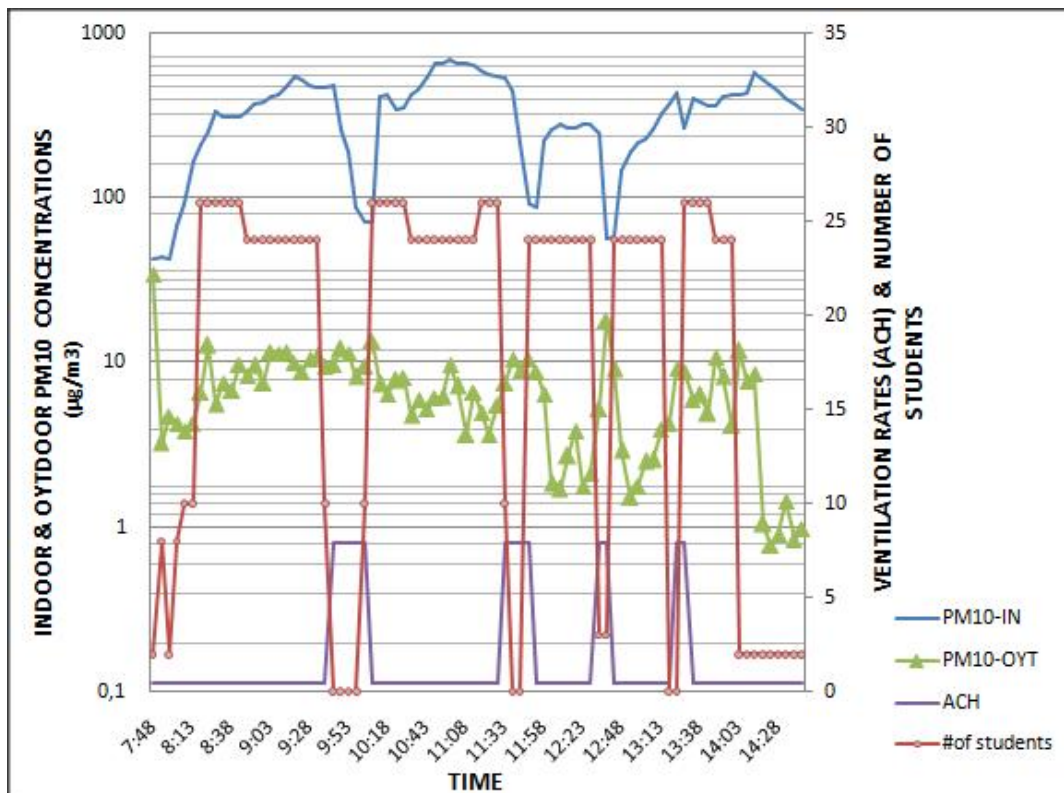
Διάγραμμα 1.5 : Καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστής συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών PM10 για τις 5/4/2013 .

Στο διάγραμμα 1.4 παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση θεωρητικών και πειραματικών συγκεντρώσεων PM10 για τις 5/4/2013 στο σχολείο 14. Οι αρχικές συγκεντρώσεις στις 07:50 όπου δεν έχουν προσέλθει οι μαθητές είναι $78,75 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Κατόπιν παρατηρούμε μια αύξηση των τιμών PM10 τα επόμενα λεπτά λόγω συγκέντρωσης των μαθητών και έναρξη πρώτου διδακτικού δώρου ως το πρώτο διάλλειμα στις 09:40 που οι μαθητές αποχωρούν και ο αερισμός αυξάνεται λόγω του ότι ανοίγουν τα παράθυρα. Στην συνέχεια και για τα επόμενα 20-25 λεπτά του διαλλείματος παρατηρούμε σημαντική πτώση των τιμών PM10 λόγω απουσίας πηγών και λόγω αύξησης του αερισμού. Ακολουθεί η τρίτη διδακτική ώρα με εκ νέου αύξηση των PM10 από τις 10:05 . Στην διάρκεια αυτής της διδακτικής ώρας ο αερισμός είναι αυξημένος σε σχέση με την προηγούμενη ώρα λόγω του ότι δεν κλείνουν τα παράθυρα. Έτσι παρά την ραγδαία αρχικά αύξηση ακολουθεί μια βαθμιαία πτώση των τιμών. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο ότι κατά την είσοδο των μαθητών υπάρχει έντονη κινητικότητα άρα και μεγάλη επαναιώρηση σωματιδίων ενώ στην συνέχεια κατά την διάρκεια της ώρας μειώνεται η κινητικότητα και έτσι επικρατεί η αραίωση των συγκεντρώσεων εξαιτίας του αερισμού. Ακολουθεί το δεύτερο διάλλειμα στις 11:30 και η επόμενη διδακτική ώρα κατά τις 11:45 όπου οι τιμές αυξάνονται εκ νέου μέχρι τις 12:30 όπου μειώνονται στο νέο διάλλειμα. Από εκεί και πέρα υπάρχουν αποκλίσεις όπου πιθανόν οφείλονται σε δραστηριότητα που δεν καταγράφηκε. Από το διάγραμμα διασποράς προκύπτει αξιοσημείωτη προσέγγιση θεωρητικών και πειραματικών τιμών $R^2=0.817$.

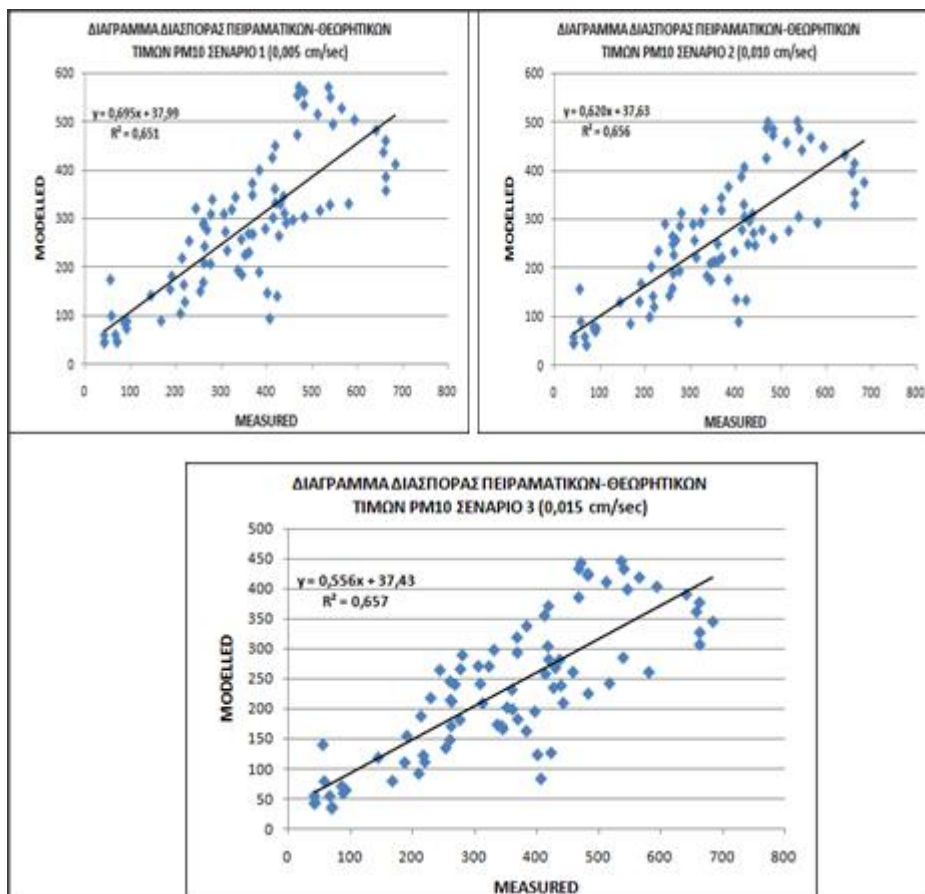
ΣΧΟΛΕΙΟ 1: 8/4/2013

ΟΓΚΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ	198 m ³
ΥΨΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ	3,1 m
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ (μέση ωριαία)	18,1-19,8°C
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΙΧΩΝ (μέση ωριαία)	ΠΑΡΑΔΟΧΗ ΤΙΜΗΣ 2°C ΜΙΚΡΟΤΕΡΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ
ΕΠΙΠΕΔΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (μέση ωριαία τιμή)	60-70%
ΜΕΓΕΘΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	2,5-10 μm
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	2.200 kg/m ³
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ (σενάρια)	0.005-0.015 cm/sec
ΑΕΡΙΣΜΟΣ (μέσες ωριαίες τιμές)	1,55-26,00 m ³ /min
ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ	42.52 μg/m ³
ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ	0,9-11,6 μg/m ³
ΠΗΓΕΣ (ΛΟΓΩ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΜΑΘΗΤΩΝ)	0-2080 μg /min

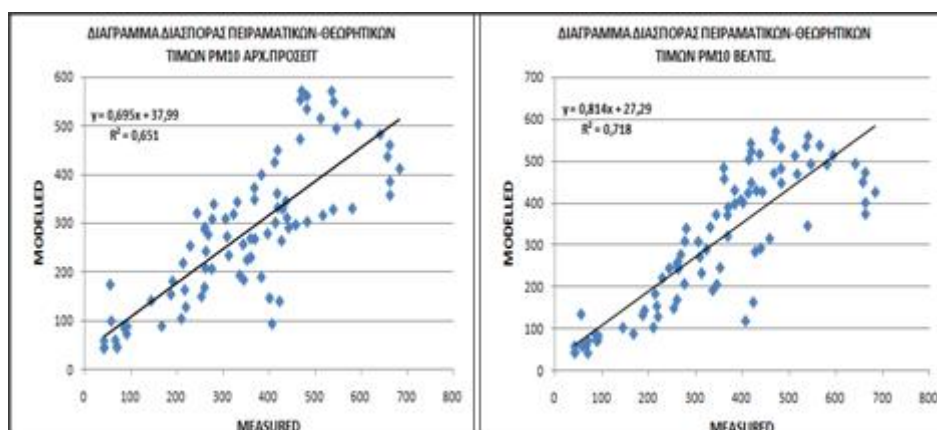
Πίνακας 2.1 : Δεδομένα εισόδου στο ΜΙΑQ για τις 8/4/2013 .



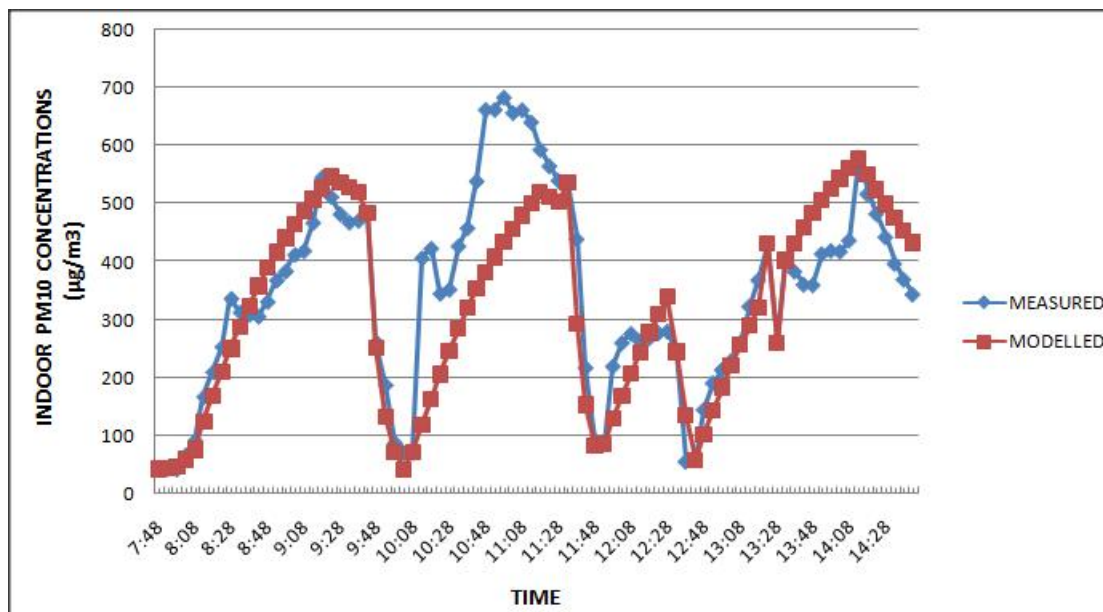
Διάγραμμα 2.1 : Διάγραμμα που απεικονίζει την διακύμανση των εσωτερικών PM10 , των εξωτερικών PM10, του ρυθμού αερισμού και του αριθμού των μαθητών κατά την διάρκεια της ημέρας 8/4/2013 συναρτήσει του χρόνου .



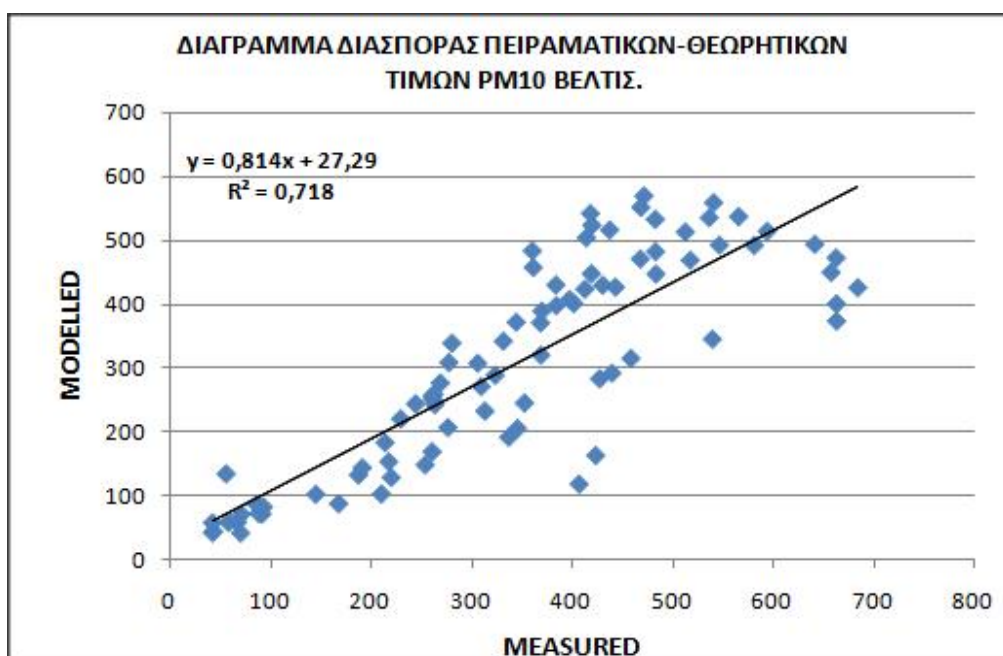
Διάγραμμα 2.2 : Συγκριτικό διάγραμμα με καμπύλες ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστή συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών PM10 για τις 8/4/2013 με βάση τα σενάρια με τις διαφορετικές ταχύτητες εναπόθεσης σενάρια 1,2,3 με 0,005-0,010-0,015 cm/sec αντίστοιχα.



Διάγραμμα 2.3 : Συγκριτικό διάγραμμα με καμπύλες ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστή συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών PM10 για τις 8/4/2013 με βάση την αρχική (αριστερά) και με βάση την βελτιστοποιημένη προσέγγιση (δεξιά).



Διάγραμμα 2.4 : Συγκριτικό διάγραμμα που απεικονίζει τις εσωτερικές συγκεντρώσεις PM10 όπως μετρήθηκαν πειραματικά και όπως προβλέφθηκαν θεωρητικά με την χρήση του μοντέλου ΜΙΑQ για τις 8/4/2013 (βέλτιστη προσέγγιση) .



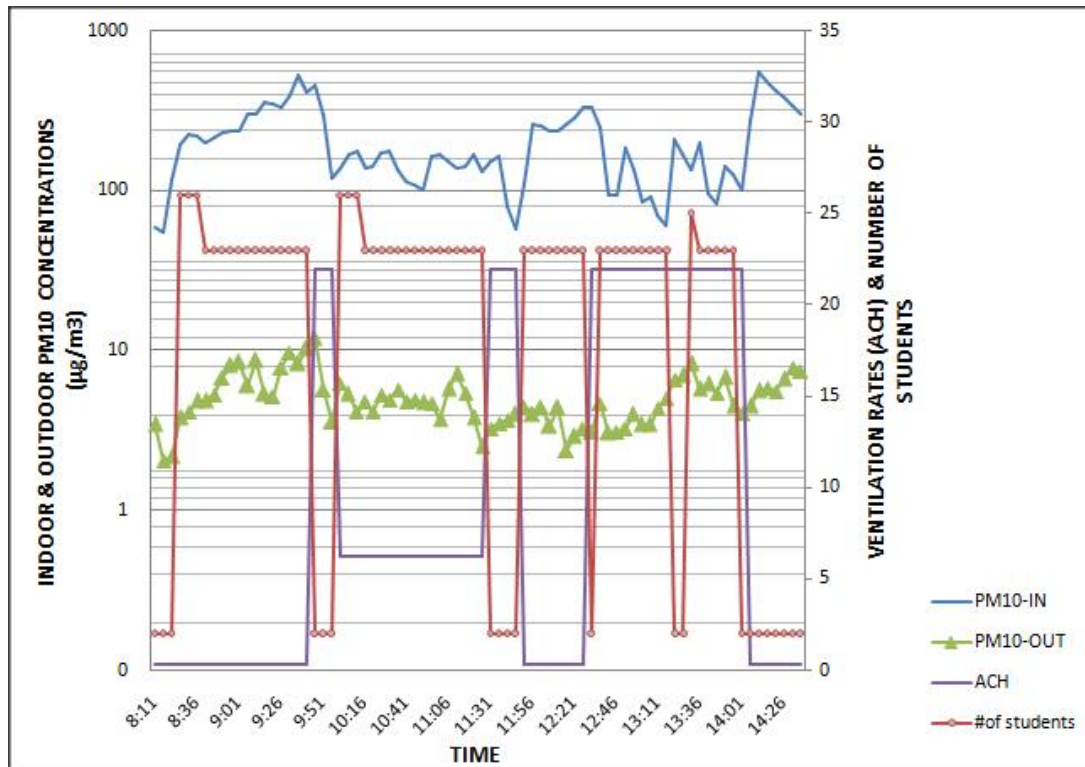
Διάγραμμα 2.5 : Καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστής συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών PM10 για τις 8/4/2013 .

Στο διάγραμμα 2.4 παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση θεωρητικών και πειραματικών συγκεντρώσεων PM10 για τις 8/4/2013 στο σχολείο 1. Οι αρχικές συγκεντρώσεις στις 07:48 όπου δεν έχουν προσέλθει οι μαθητές είναι 42,52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Κατόπιν παρατηρούμε μια αύξηση των τιμών PM10 τα επόμενα λεπτά λόγω συγκέντρωσης των μαθητών και έναρξη πρώτου διδακτικού δώρου έως το πρώτο διάλλειμα στις 09:40 που οι μαθητές αποχωρούν και ο αερισμός αυξάνεται λόγω του ότι ανοίγουν τα παράθυρα. Στην συνέχεια και για τα επόμενα 20-25 λεπτά του διαλλείματος παρατηρούμε σημαντική πτώση των τιμών PM10 λόγω απουσίας πηγών και λόγω αύξησης του αερισμού. Ακολουθεί η τρίτη διδακτική ώρα με εκ νέου αύξηση των PM10 από τις 10:05 με εκ νέου κλείσιμο των παραθύρων. Ακολουθεί το δεύτερο διάλλειμα στις 11:30 και η επόμενη διδακτική ώρα κατά τις 11:50 όπου οι τιμές αυξάνονται εκ νέου μέχρι τις 12:30 όπου μειώνονται στο νέο διάλλειμα και αυξάνονται στην επόμενη διδακτική ώρα. Ακολουθεί νέα διδακτική ώρα και νέο διάλλειμα με αναμενόμενα αποτελέσματα. Από το διάγραμμα διασποράς προκύπτει μέτρια προσέγγιση θεωρητικών και πειραματικών τιμών $R^2=0.718$.

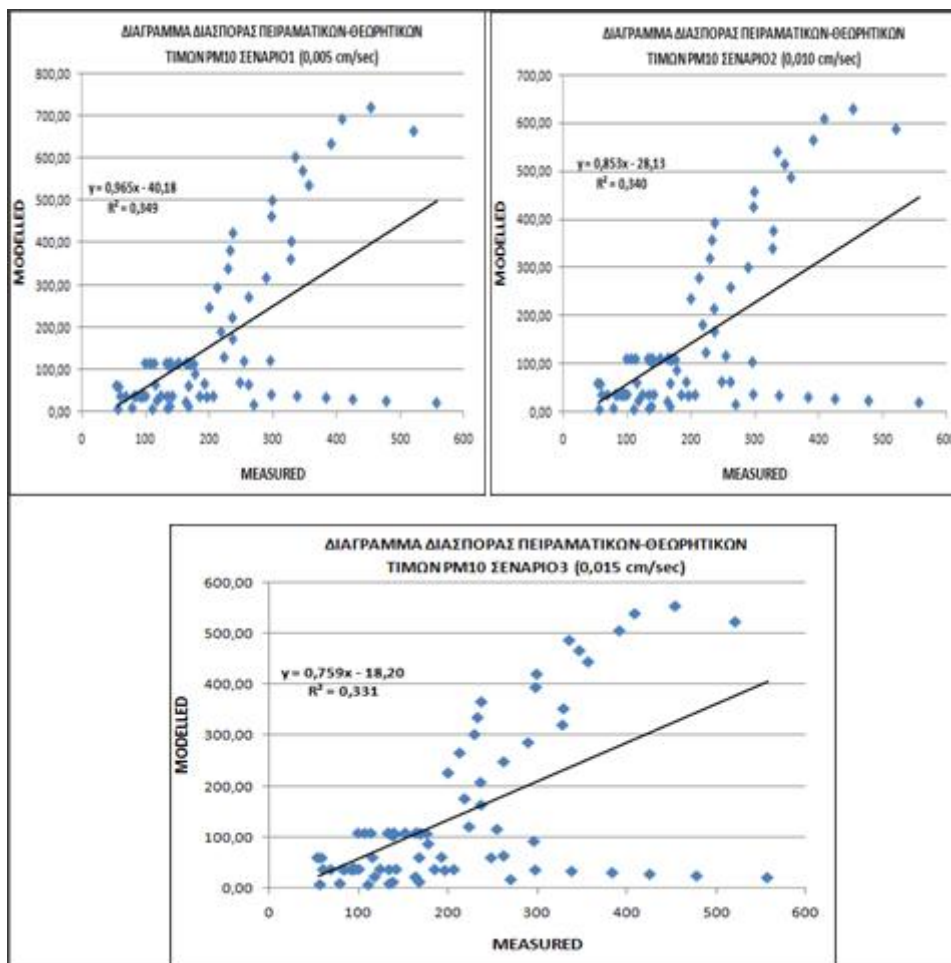
ΣΧΟΛΕΙΟ 4: 15/4/2013

ΟΓΚΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ	155 m ³
ΥΨΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ	3,1 m
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ (μέση ωριαία)	22,8-24,3°C
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΙΧΩΝ (μέση ωριαία)	ΠΑΡΑΔΟΧΗ ΤΙΜΗΣ 2°C ΜΙΚΡΟΤΕΡΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ
ΕΠΙΠΕΔΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (μέση ωριαία τιμή)	36-54%
ΜΕΓΕΘΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	2,5-10 μm
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	2.200 kg/m ³
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ (σενάρια)	0.005-0.015 cm/sec
ΑΕΡΙΣΜΟΣ (μέσες ωριαίες τιμές)	0,85-56,75 m ³ /min
ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ	58.89 μg/m ³
ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ	3,6-7,8 μg/m ³
ΠΗΓΕΣ (ΛΟΓΩ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΜΑΘΗΤΩΝ)	0-2080 μg /min

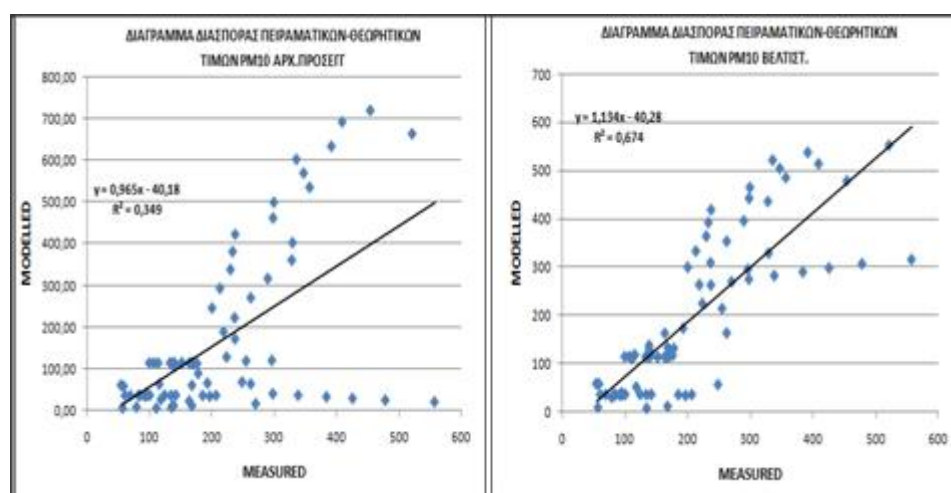
Πίνακας 3.1 : Δεδομένα εισόδου στο ΜΙΑQ για τις 15/4/2013 .



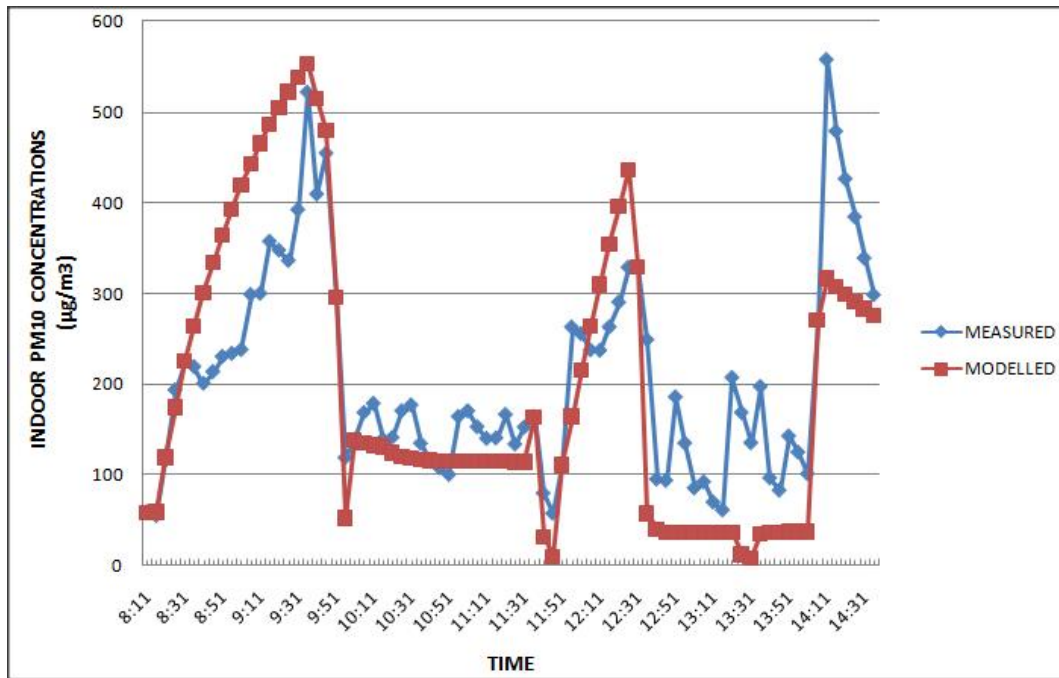
Διάγραμμα 3.1 : Διάγραμμα που απεικονίζει την διακύμανση των εσωτερικών PM10 , των εξωτερικών PM10, του ρυθμού αερισμού και του αριθμού των μαθητών κατά την διάρκεια της ημέρας 15/4/2013 συναρτήσει του χρόνου .



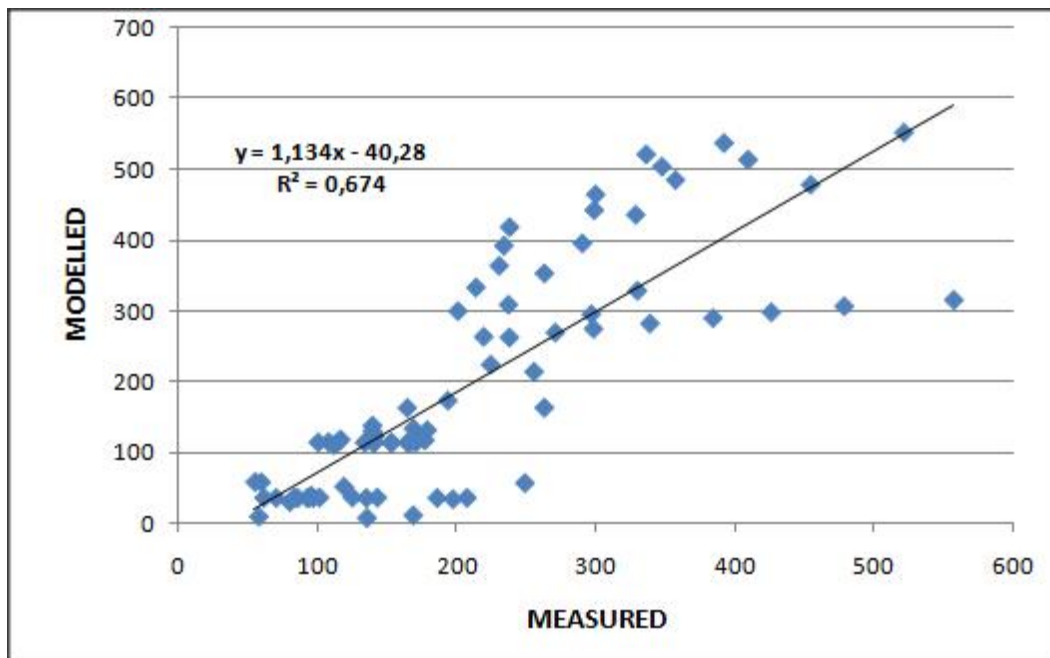
Διάγραμμα 3.2 : Συγκριτικό διάγραμμα με καμπύλες ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστή συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών PM10 για τις 15/4/2013 με βάση τα σενάρια με τις διαφορετικές ταχύτητες εναπόθεσης σενάρια 1,2,3 με 0,005-0,010-0,015 cm/sec αντίστοιχα.



Διάγραμμα 3.3 : Συγκριτικό διάγραμμα με καμπύλες ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστή συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών PM10 για τις 15/4/2013 με βάση την αρχική (αριστερά) και με βάση την βελτιστοποιημένη προσέγγιση (δεξιά).



Διάγραμμα 3.4 : Συγκριτικό διάγραμμα που απεικονίζει τις εσωτερικές συγκεντρώσεις PM10 όπως μετρήθηκαν πειραματικά και όπως προβλέφθηκαν θεωρητικά με την χρήση του μοντέλου MIAQ για τις 15/4/2013 (βέλτιστη προσέγγιση) .



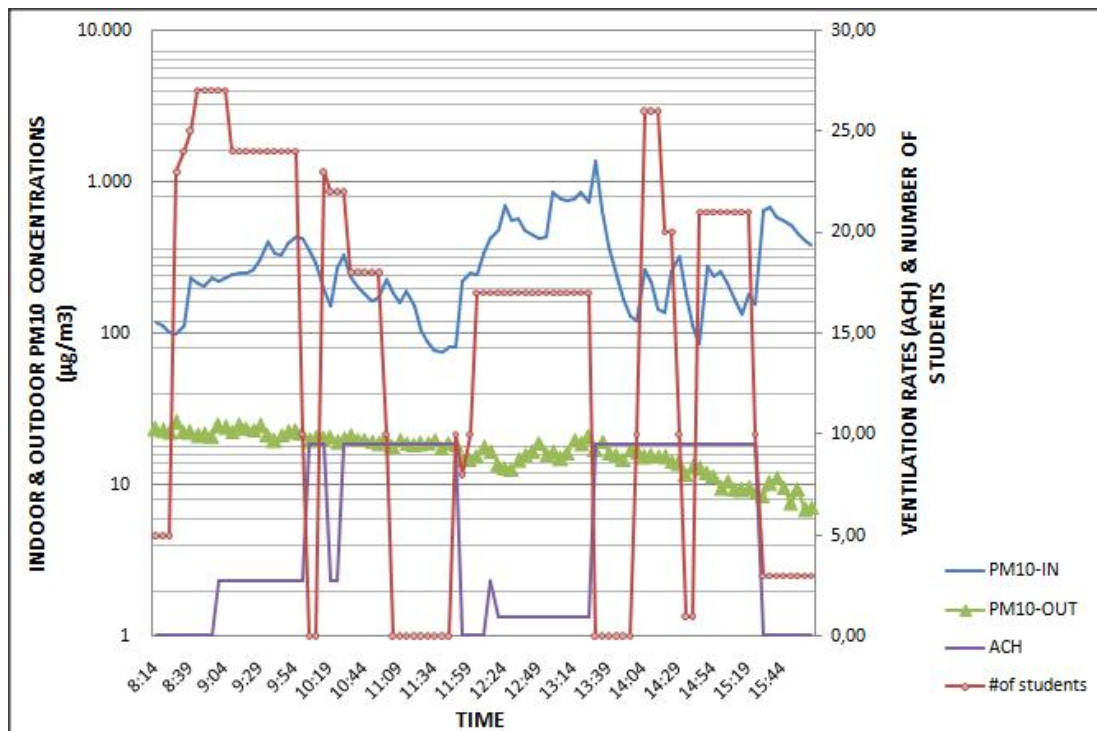
Διάγραμμα 3.5 : Καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστής συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών PM10 για τις 15/4/2013 .

Στο διάγραμμα 3.4 παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση θεωρητικών και πειραματικών συγκεντρώσεων PM10 για τις 15/4/2013 στο σχολείο 4. Οι αρχικές συγκεντρώσεις στις 08:10 όπου δεν έχουν προσέλθει ακόμα οι μαθητές στην αίθουσα είναι 58,89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Κατόπιν παρατηρούμε μια αξιοσημείωτη αύξηση των τιμών PM10 τα επόμενα λεπτά λόγω συγκέντρωσης των μαθητών και έναρξη πρώτου διδακτικού δίωρου έως το πρώτο διάλλειμα στις 09:40 που οι μαθητές αποχωρούν και ο αερισμός αυξάνεται σημαντικά λόγω του ότι ανοίγουν τα παράθυρα. Στην συνέχεια και για τα επόμενα 20-25 λεπτά του διαλλείματος παρατηρούμε σημαντική πτώση των τιμών PM10 λόγω απουσίας πηγών και λόγω αύξησης του αερισμού. Ακολουθεί η τρίτη διδακτική ώρα με μικροδιακυμάνσεις στις τιμές των PM10 ίσως γιατί μερικά παράθυρα παραμένουν ανοιχτά ή και λόγω δραστηριότητας που δεν έγινε αντιληπτή ώστε να καταγραφεί στο ημερολόγιο. Ακολουθεί το δεύτερο διάλλειμα στις 11:30 με πτώση των τιμών και η επόμενη διδακτική ώρα κατά τις 11:45 όπου οι τιμές αυξάνονται εκ νέου μέχρι τις 12:30 όπου μειώνονται στο νέο διάλλειμα. Σε αυτή την διδακτική ώρα τα παράθυρα είναι πλήρως κλειστά και έτσι ο αερισμός ισούται με τον ρυθμό διείσδυσης. Από εκεί και πέρα υπάρχουν αποκλίσεις όπου πιθανόν οφείλονται σε δραστηριότητα που δεν καταγράφηκε. Από το διάγραμμα διασποράς προκύπτει μέτρια προσέγγιση θεωρητικών και πειραματικών τιμών $R^2=0.674$.

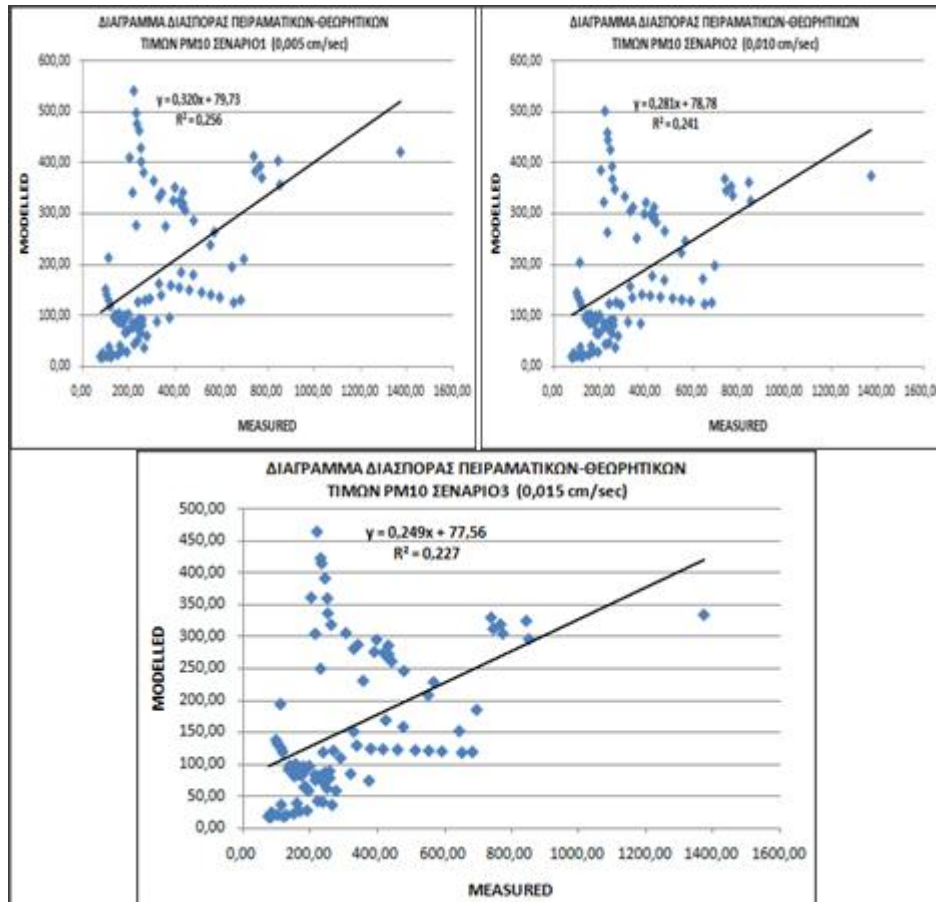
ΣΧΟΛΕΙΟ 3: 19/4/2013

ΟΓΚΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ	137 m ³
ΥΨΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ	3,0 m
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ (μέση ωριαία)	20,4-22,2°C
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΙΧΩΝ (μέση ωριαία)	ΠΑΡΑΔΟΧΗ ΤΙΜΗΣ 2°C ΜΙΚΡΟΤΕΡΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ
ΕΠΙΠΕΔΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (μέση ωριαία τιμή)	38-51%
ΜΕΓΕΘΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	2,5-10 μm
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	2.200 kg/m ³
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ (σενάρια)	0.005-0.015 cm/sec
ΑΕΡΙΣΜΟΣ (μέσες ωριαίες τιμές)	0,25-21,78 m ³ /min
ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ	118.15 μg/m ³
ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ	8,8-22,8 μg/m ³
ΠΗΓΕΣ (ΛΟΓΩ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΜΑΘΗΤΩΝ)	0-2160 μg /min

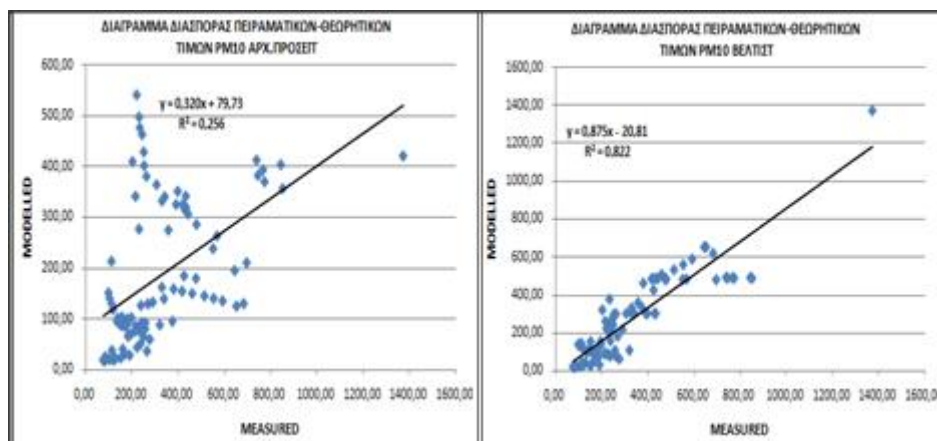
Πίνακας 4.1 : Δεδομένα εισόδου στο ΜΙΑQ για τις 19/4/2013 .



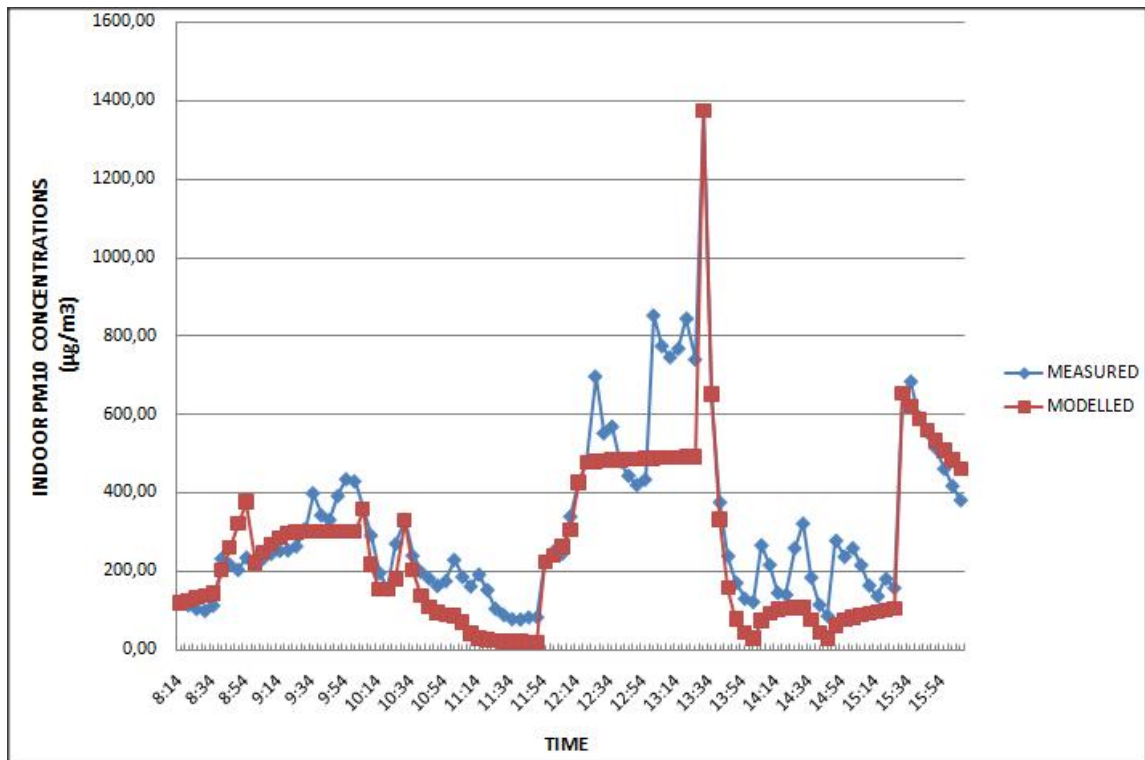
Διάγραμμα 4.1 : Διάγραμμα που απεικονίζει την διακύμανση των εσωτερικών PM10 , των εξωτερικών PM10, του ρυθμού αερισμού και του αριθμού των μαθητών κατά την διάρκεια της ημέρας 19/4/2013 συναρτήσει του χρόνου .



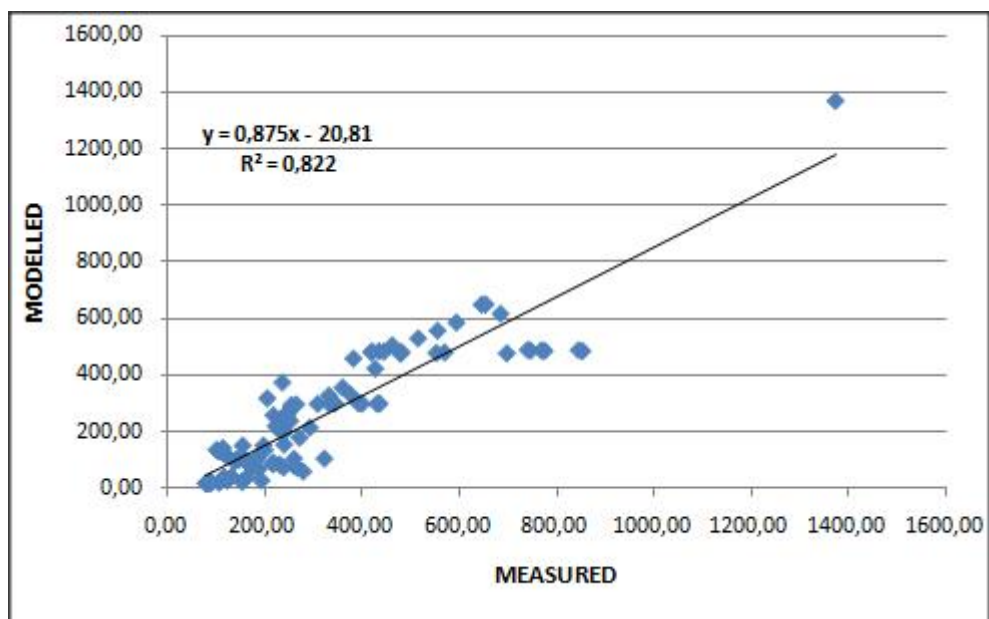
Διάγραμμα 4.2 : Συγκριτικό διάγραμμα με καμπύλες ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστή συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών PM10 για τις 19/4/2013 με βάση τα σενάρια με τις διαφορετικές ταχύτητες εναπόθεσης σενάρια 1,2,3 με 0,005-0,010-0,015 cm/sec αντίστοιχα



Διάγραμμα 4.3 : Συγκριτικό διάγραμμα με καμπύλες ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστή συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών PM10 για τις 19/4/2013 με βάση την αρχική (αριστερά) και με βάση την βελτιστοποιημένη προσέγγιση (δεξιά).



Διάγραμμα 4.4 : Συγκριτικό διάγραμμα που απεικονίζει τις εσωτερικές συγκεντρώσεις PM10 όπως μετρήθηκαν πειραματικά και όπως προβλέφθηκαν θεωρητικά με την χρήση του μοντέλου MIAQ για τις 19/4/2013 (βέλτιστη προσέγγιση) .



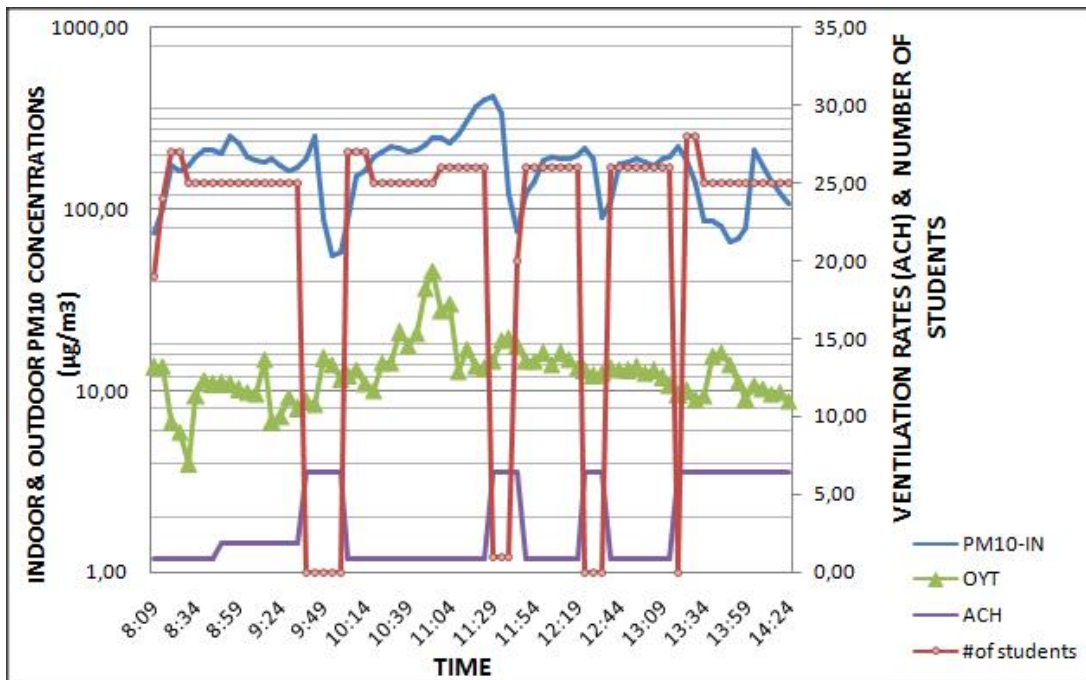
Διάγραμμα 4.5 : Καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστής συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών PM10 για τις 19/4/2013 .

Στο διάγραμμα 4.4 παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση θεωρητικών και πειραματικών συγκεντρώσεων PM10 για τις 19/4/2013 στο σχολείο 3. Οι αρχικές συγκεντρώσεις στις 08:20 όπου δεν έχουν προσέλθει οι μαθητές είναι 118,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Κατόπιν παρατηρούμε μια αύξηση των τιμών PM10 τα επόμενα λεπτά λόγω συγκέντρωσης των μαθητών και έναρξη πρώτου διδακτικού δώρου έως το πρώτο διάλλειμα στις 10:00 που οι μαθητές αποχωρούν και ο αερισμός αυξάνεται λόγω του ότι ανοίγουν τα παράθυρα. Κατά την διάρκεια του πρώτου δώρου τα παράθυρα είχαν ήδη μισανοίξει γεγονός που μάλλον δεν επέτρεψε την ραγδαία αύξηση των τιμών PM10. Στην συνέχεια και για τα επόμενα 10-15 λεπτά του διαλλείματος παρατηρούμε σημαντική πτώση των τιμών PM10 περίπου στο ήμισυ των τιμών λόγω απουσίας πηγών και λόγω περαιτέρω αύξησης του αερισμού. Ακολουθεί η τρίτη διδακτική ώρα με εκ νέου αύξηση των PM10 από τις 10:15. Στην διάρκεια αυτής της διδακτικής ώρας ο αερισμός αυξομειώνεται υπάρχει κινητικότητα και παρατηρούνται αποκλίσεις θεωρητικών και πειραματικών τιμών. Ακολουθεί το δεύτερο διάλλειμα στις 11:05 που διαρκεί μέχρι και τις 11:45 όπου παρατηρείται πτώση των τιμών PM10 και η επόμενη διδακτική ώρα κατά τις 11:45 όπου οι τιμές αυξάνονται εκ νέου και μάλιστα σημαντικά. Να σημειωθεί ότι οι μαθητές δεν ξαναβγαίνουν ως τις 13:30 και στην διάρκεια αυτής της διδακτικής ώρας υπάρχει κινητικότητα έντονη αλλά και μεταβολή αερισμού αφού ξέσπασε βροχή και οι μαθητές διαμαρτυρήθηκαν ότι κρύνουν και έτσι έκλεισαν τα παράθυρα. Παρατηρείται ότι σε γενικές γραμμές το μοντέλο κατέγραψε την τάση χάνοντας τις μικρομεταβολές. Στις 13:30 το διάλλειμα διαρκεί παραπάνω και οι τιμές πέφτουν σημαντικά. Από το διάγραμμα διασποράς παρατηρούμε σχετικά καλή συμφωνία θεωρητικών πειραματικών τιμών $R^2=0.822$.

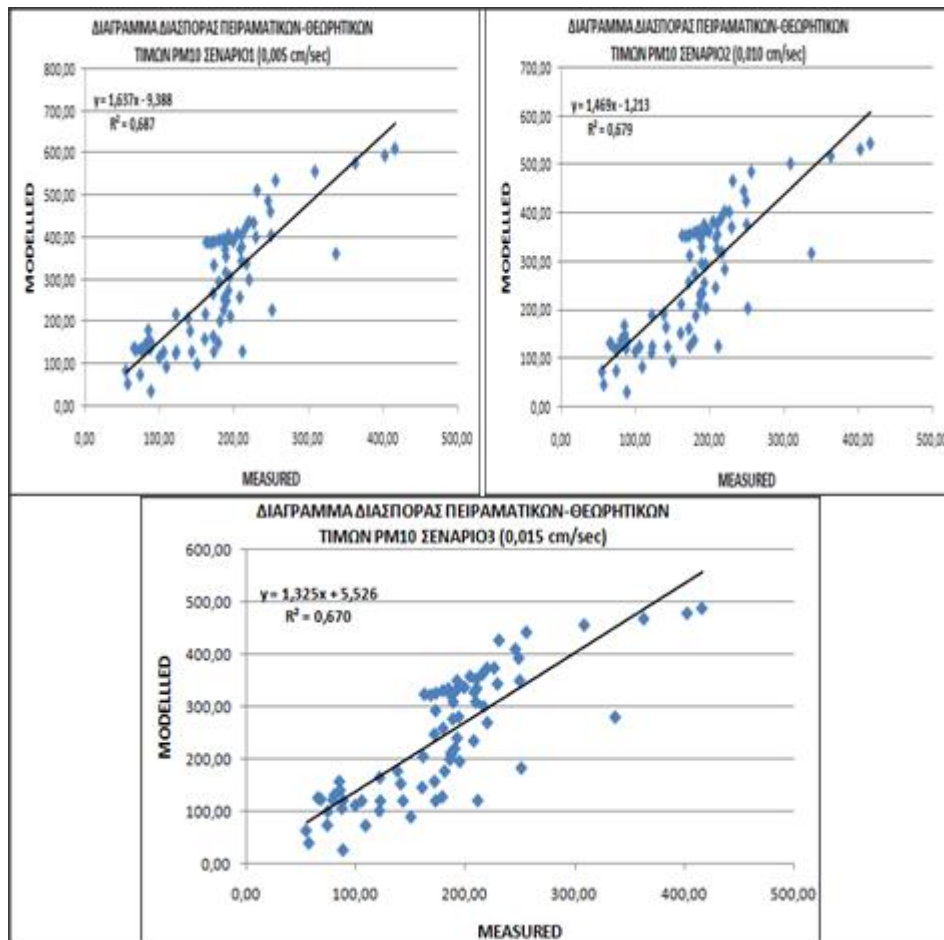
ΣΧΟΛΕΙΟ 12: 14/5/2013

ΟΓΚΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ	157 m ³
ΥΨΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ	3,2 m
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ (μέση ωριαία)	22,2-23,0°C
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΙΧΩΝ (μέση ωριαία)	ΠΑΡΑΔΟΧΗ ΤΙΜΗΣ 2°C ΜΙΚΡΟΤΕΡΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ
ΕΠΙΠΕΔΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (μέση ωριαία τιμή)	59-71%
ΜΕΓΕΘΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	2,5-10 μm
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	2.200 kg/m ³
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ (σενάρια)	0.005-0.015 cm/sec
ΑΕΡΙΣΜΟΣ (μέσες ωριαίες τιμές)	2,06-16,74 m ³ /min
ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ	74.35 μg/m ³
ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ	8,7-21,0 μg/m ³
ΠΗΓΕΣ (ΛΟΓΩ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΜΑΘΗΤΩΝ)	0-2160 μg /min

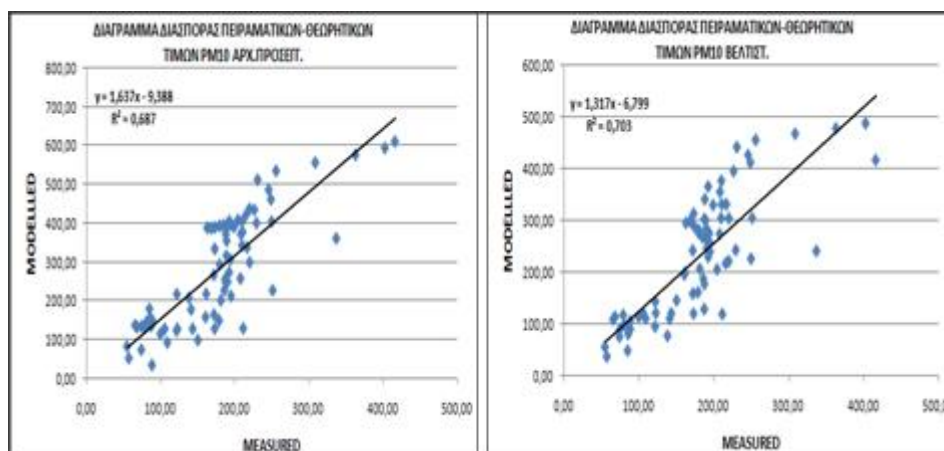
Πίνακας 5.1 : Δεδομένα εισόδου στο ΜΙΑQ για τις 14/5/2013 .



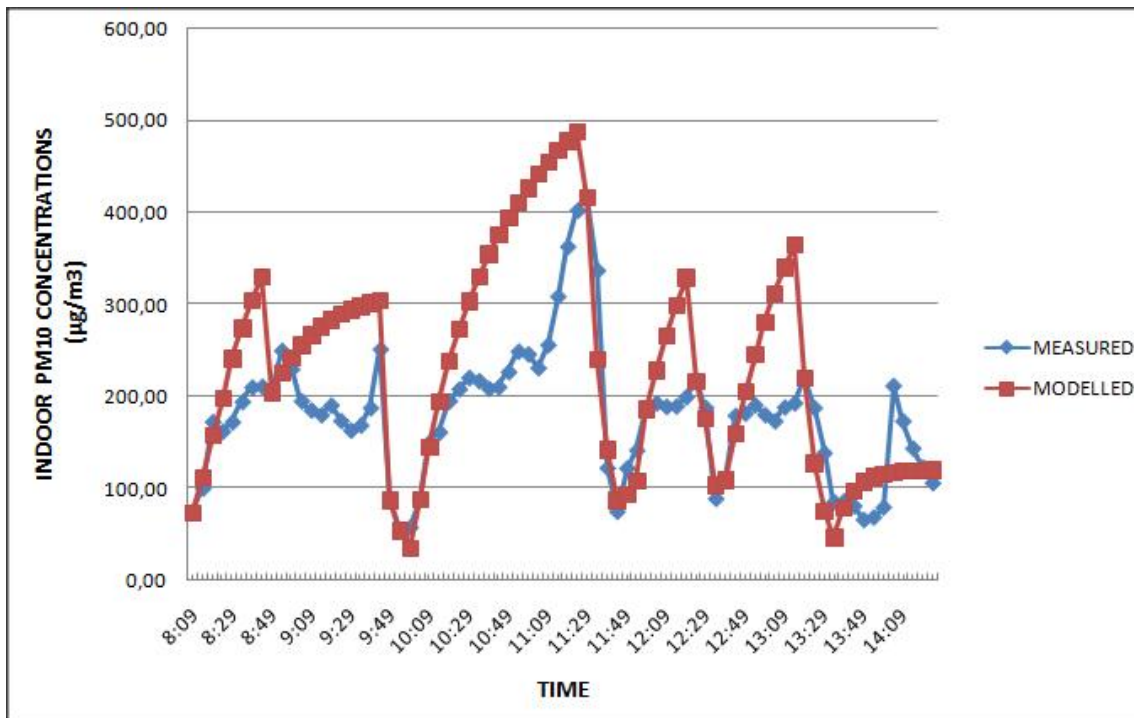
Διάγραμμα 5.1 : Διάγραμμα που απεικονίζει την διακύμανση των εσωτερικών PM10 , των εξωτερικών PM10 , του ρυθμού αερισμού και του αριθμού των μαθητών κατά την διάρκεια της ημέρας 14/5/2013 συναρτήσει του χρόνου .



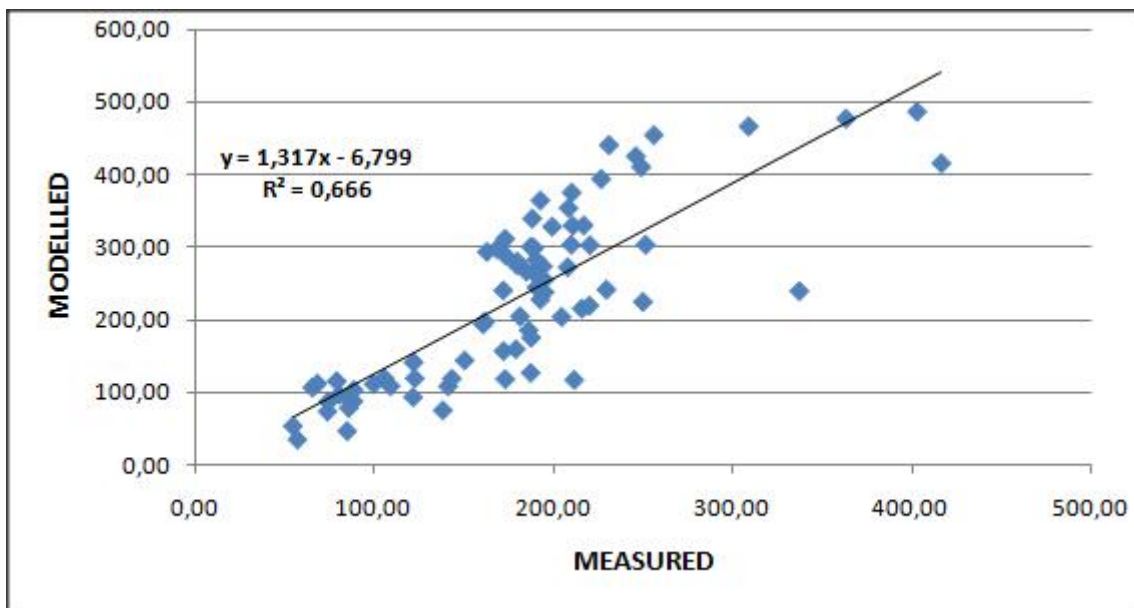
Διάγραμμα 5.2 : Συγκριτικό διάγραμμα με καμπύλες ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστή συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών PM10 για τις 14/5/2013 με βάση τα σενάρια με τις διαφορετικές ταχύτητες εναπόθεσης σενάρια 1,2,3 με 0,005-0,010-0,015 cm/sec αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.3 : Συγκριτικό διάγραμμα με καμπύλες ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστή συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών PM10 για τις 19/4/2013 με βάση την αρχική (αριστερά) και με βάση την βελτιστοποιημένη προσέγγιση (δεξιά).



Διάγραμμα 5.4 : Συγκριτικό διάγραμμα που απεικονίζει τις εσωτερικές συγκεντρώσεις PM10 όπως μετρήθηκαν πειραματικά και όπως προβλέφθηκαν θεωρητικά με την χρήση του μοντέλου MIAQ για τις 14/5/2013 (βέλτιστη προσέγγιση) .



Διάγραμμα 5.5 : Καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστής συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών PM10 για τις 14/5/2013 .

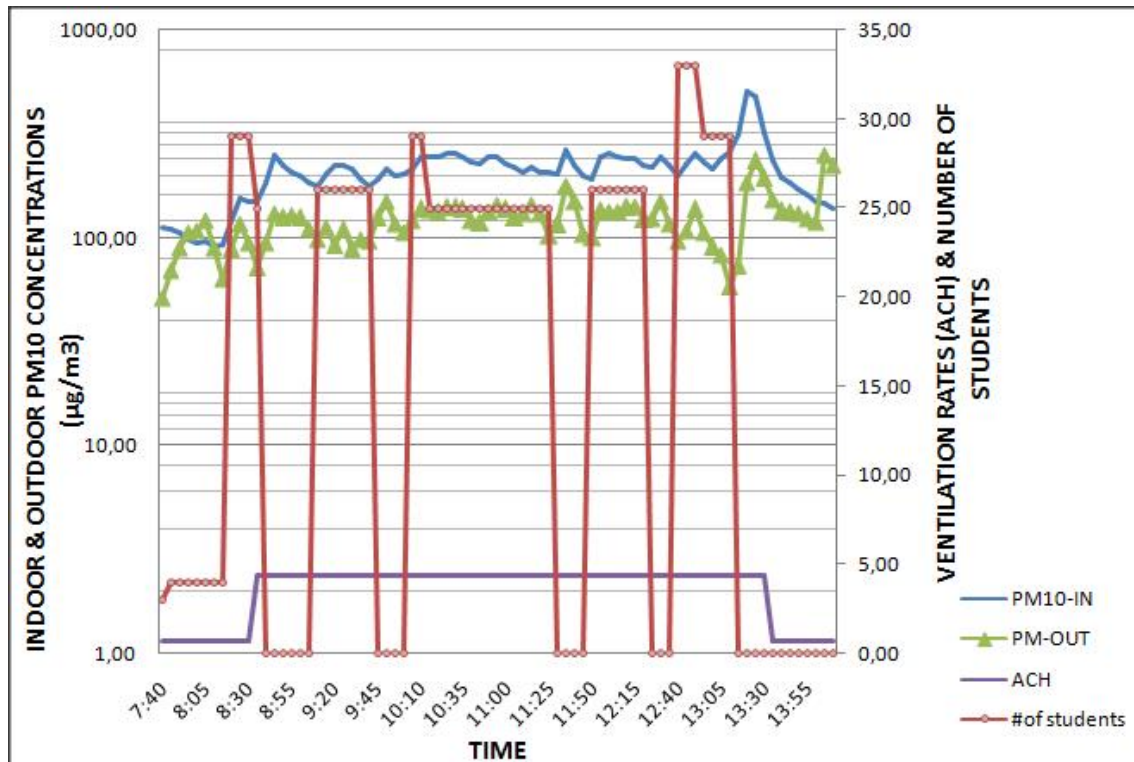
Στο διάγραμμα 5.4 παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση θεωρητικών και πειραματικών συγκεντρώσεων PM10 για τις 14/5/2013 στο σχολείο 12. Οι αρχικές συγκεντρώσεις στις 08:05 όπου δεν έχουν προσέλθει ακόμα οι μαθητές είναι $74,35 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Κατόπιν παρατηρούμε μια αύξηση των τιμών PM10 τα επόμενα λεπτά λόγω συγκέντρωσης των μαθητών και έναρξη πρώτου διδακτικού δίωρου εως το πρώτο διάλλειμα στις 09:35 που οι μαθητές αποχωρούν και ο αερισμός αυξάνεται λόγω του ότι ανοίγουν τα παράθυρα. Στην συνέχεια και για τα επόμενα 20-25 λεπτά του διαλλείματος παρατηρούμε σημαντική πτώση των τιμών PM10 λόγω απουσίας πηγών και λόγω αύξησης του αερισμού. Ακολουθεί η τρίτη διδακτική ώρα με εκ νέου αύξηση των PM10 από τις 10:05. Ακολουθεί το δεύτερο διάλλειμα στις 11:30 και η επόμενη διδακτική ώρα κατά τις 11:40 όπου οι τιμές αυξάνονται εκ νέου μέχρι τις 12:20 όπου μειώνονται στο νέο διάλλειμα. Παρατηρούνται κάποιες υπερεκτιμήσεις των τιμών του μοντέλου σε σχέση με τις πειραματικές τιμές. Από το διάγραμμα διασποράς προκύπτει μέτρια προσέγγιση θεωρητικών και πειραματικών τιμών $R^2=0.666$.

Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται ο πίνακας εισόδου, το διάγραμμα με την μεταβολή εσωτερικών/εξωτερικών συγκεντρώσεων αερισμού και αριθμό μαθητών και τα τελικά αποτελέσματα (βέλτιστη προσέγγιση και αντίστοιχο διάγραμμα διασποράς).

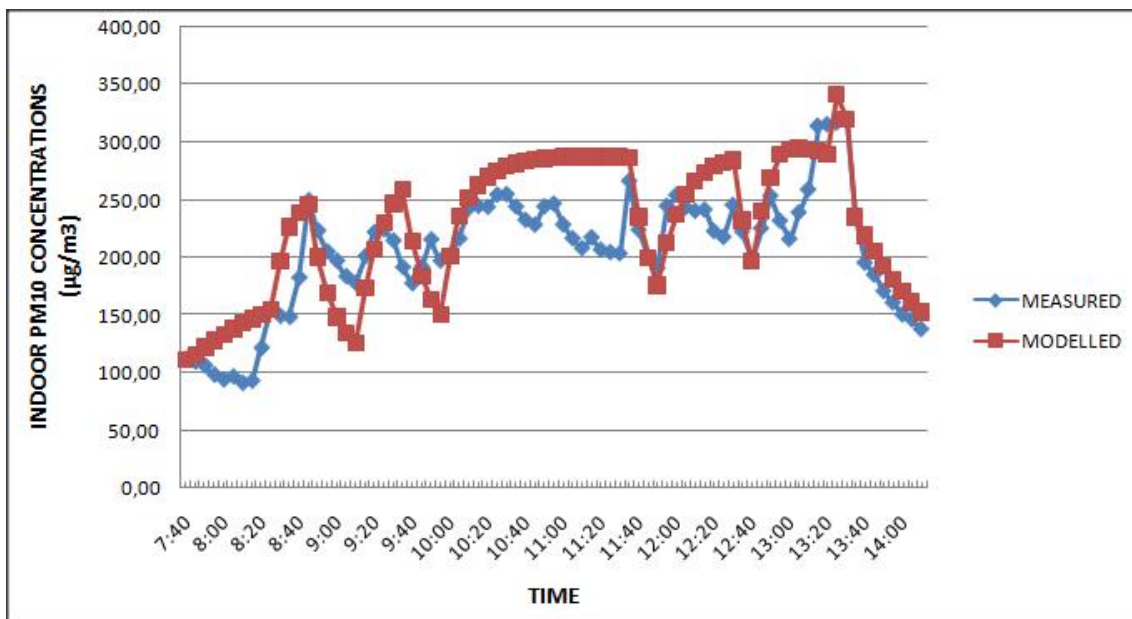
ΣΧΟΛΕΙΟ 2: 21/5/2013

ΟΓΚΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ	162 m ³
ΥΨΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ	3,2 m
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ (μέση ωριαία)	25,9-28,0°C
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΙΧΩΝ (μέση ωριαία)	ΠΑΡΑΔΟΧΗ ΤΙΜΗΣ 2°C ΜΙΚΡΟΤΕΡΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ
ΕΠΙΠΕΔΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (μέση ωριαία τιμή)	38-50%
ΜΕΓΕΘΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	2,5-10 μm
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	2.200 kg/m ³
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ (σενάρια)	0.005-0.015 cm/sec
ΑΕΡΙΣΜΟΣ (μέσες ωριαίες τιμές)	1,75-11,71 m ³ /min
ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ	112.03 μg/m ³
ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ	90,8-158,3 μg/m ³
ΠΗΓΕΣ (ΛΟΓΩ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΜΑΘΗΤΩΝ)	0-2640 μg /min

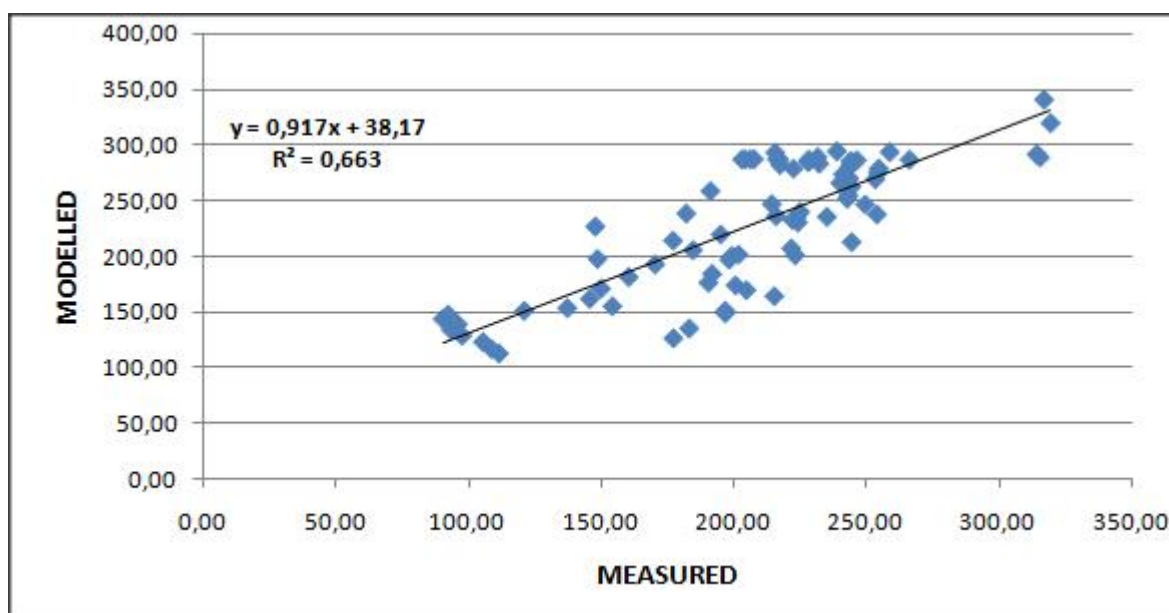
Πίνακας 6.1 : Δεδομένα εισόδου στο ΜΙΑQ για τις 21/5/2013 .



Διάγραμμα 6.1 : Διάγραμμα που απεικονίζει την διακύμανση των εσωτερικών PM10 , των εξωτερικών PM10, του ρυθμού αερισμού και του αριθμού των μαθητών κατά την διάρκεια της ημέρας 21/5/2013 συναρτήσεως του χρόνου .



Διάγραμμα 6.2 : Συγκριτικό διάγραμμα που απεικονίζει τις εσωτερικές συγκεντρώσεις PM10 όπως μετρήθηκαν πειραματικά και όπως προβλέφθηκαν θεωρητικά με την χρήση του μοντέλου MIAQ για τις 21/5/2013 (βέλτιστη προσέγγιση) .



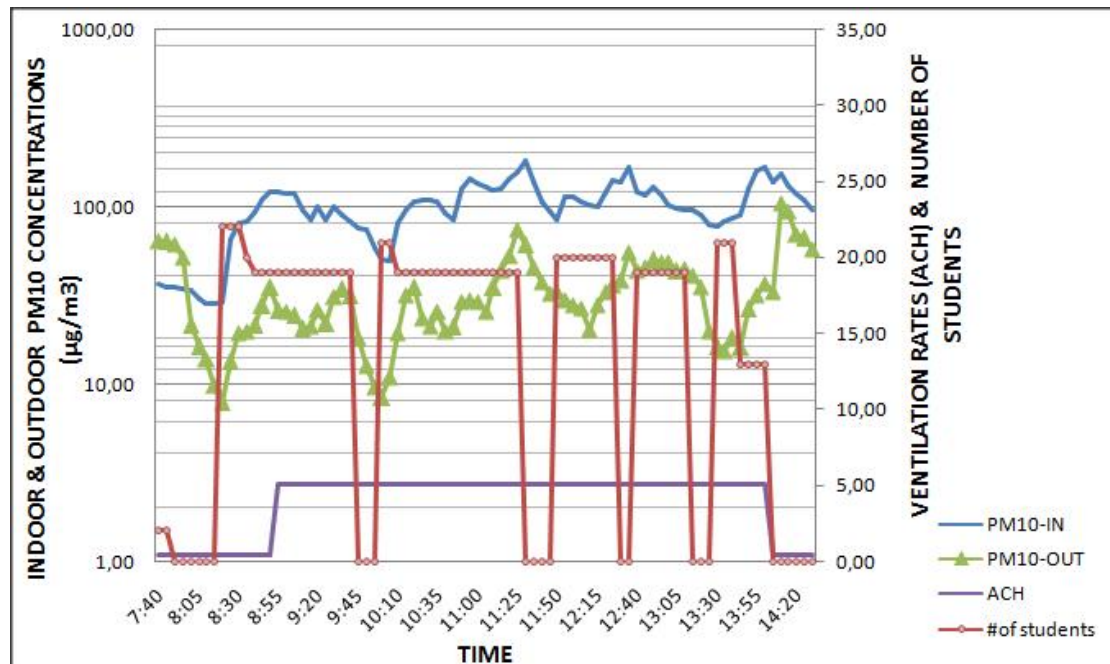
Διάγραμμα 6.3 : Καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστής συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών PM10 για τις 21/5/2013 .

Στο διάγραμμα 6.2 παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση θεωρητικών και πειραματικών συγκεντρώσεων PM10 για τις 21/5/2013 στο σχολείο 2. Οι αρχικές συγκεντρώσεις στις 07:40 όπου δεν έχουν προσέλθει οι μαθητές είναι 112,03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Κατόπιν παρατηρούμε μια αύξηση των τιμών PM10 από τις 08:20 λόγω συγκέντρωσης των μαθητών και έναρξη της πρώτης διδακτικής ώρας έως το πρώτο διάλλειμα στις 08:40 που οι μαθητές αποχωρούν και ο αερισμός αυξάνεται λόγω του ότι ανοίγουν τα παράθυρα τα οποία παραμένουν ανοιχτά έως το πέρας της ημέρας αυτής. Στην συνέχεια και για τα επόμενα 20-25 λεπτά του διαλλείματος παρατηρούμε σημαντική πτώση των τιμών PM10 λόγω απουσίας πηγών και λόγω αύξησης του αερισμού. Ακολουθεί η τρίτη διδακτική ώρα με εκ νέου αύξηση των PM10 από τις 09:10 και μέχρι τις 09:45 που ακολουθεί νέο διάλλειμα και πτώση των τιμών PM10. Ακολουθεί νέα διδακτική ώρα και νέο διάλλειμα με τις αναμενόμενες αυξήσεις και πτώσεις των τιμών PM10. Από εκεί και πέρα υπάρχουν μικρές αποκλίσεις όπου πιθανόν οφείλονται σε δραστηριότητα που δεν καταγράφηκε. Από το διάγραμμα διασποράς προκύπτει μέτρια προσέγγιση θεωρητικών και πειραματικών τιμών $R^2=0.663$.

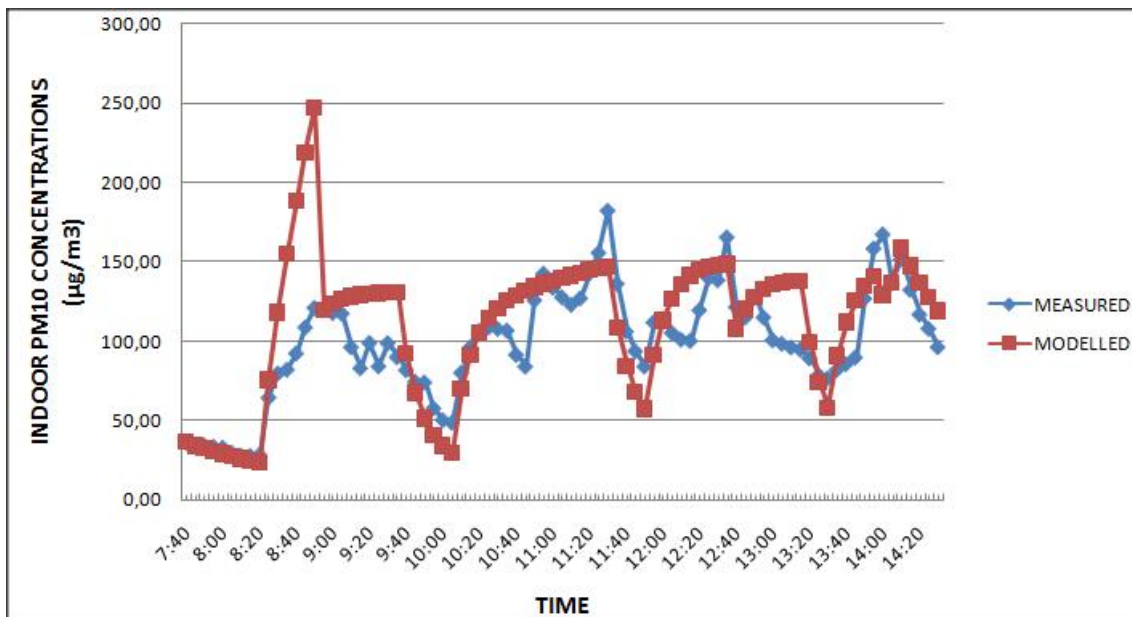
ΣΧΟΛΕΙΟ 8: 28/5/2013

ΟΓΚΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ	159 m ³
ΥΨΟΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ	3,0 m
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ (μέση ωριαία)	26,9-28,9°C
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΙΧΩΝ (μέση ωριαία)	ΠΑΡΑΔΟΧΗ ΤΙΜΗΣ 2°C ΜΙΚΡΟΤΕΡΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ
ΕΠΙΠΕΔΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (μέση ωριαία τιμή)	34-43%
ΜΕΓΕΘΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	2,5-10 μm
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	2.200 kg/m ³
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ (σενάρια)	0.005-0.015 cm/sec
ΑΕΡΙΣΜΟΣ (μέσες ωριαίες τιμές)	1,11-13,35 m ³ /min
ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ	36.57 μg/m ³
ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ	22,9-71,1 μg/m ³
ΠΗΓΕΣ (ΛΟΓΩ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΜΑΘΗΤΩΝ)	0-1760 μg /min

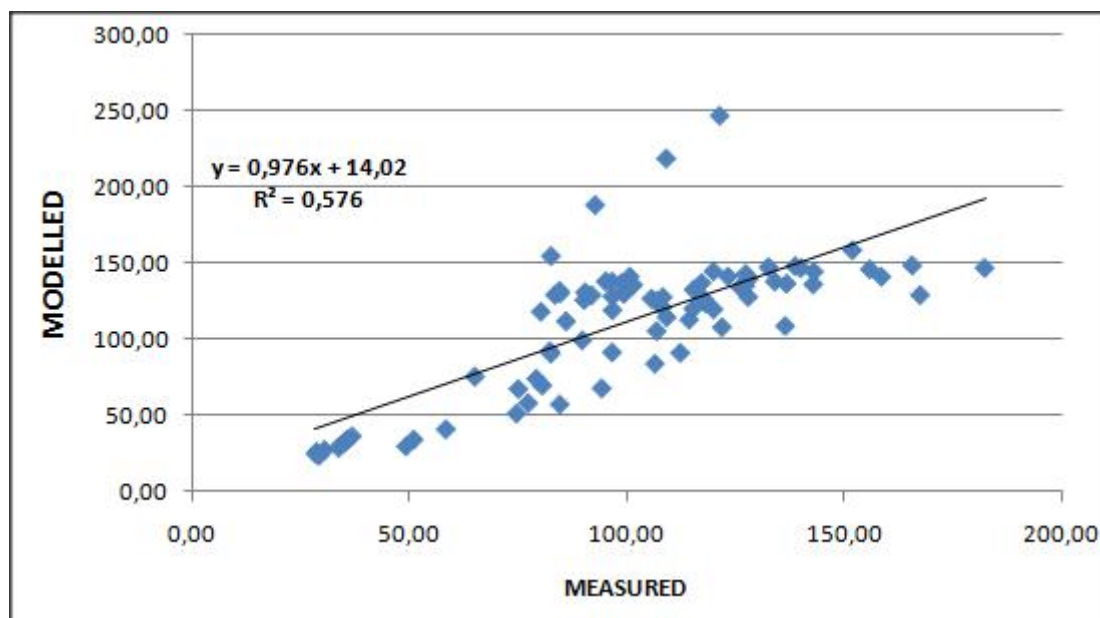
Πίνακας 7.1 : Δεδομένα εισόδου στο ΜΙΑQ για τις 28/5/2013 .



Διάγραμμα 7.1 : Διάγραμμα που απεικονίζει την διακύμανση των εσωτερικών PM10 , των εξωτερικών PM10, του ρυθμού αερισμού και του αριθμού των μαθητών κατά την διάρκεια της ημέρας 28/5/2013 συναρτήσει του χρόνου .



Διάγραμμα 7.2 : Συγκριτικό διάγραμμα που απεικονίζει τις εσωτερικές συγκεντρώσεις PM10 όπως μετρήθηκαν πειραματικά και όπως προβλέφθηκαν θεωρητικά με την χρήση του μοντέλου MIAQ για τις 28/5/2013 (βέλτιστη προσέγγιση) .

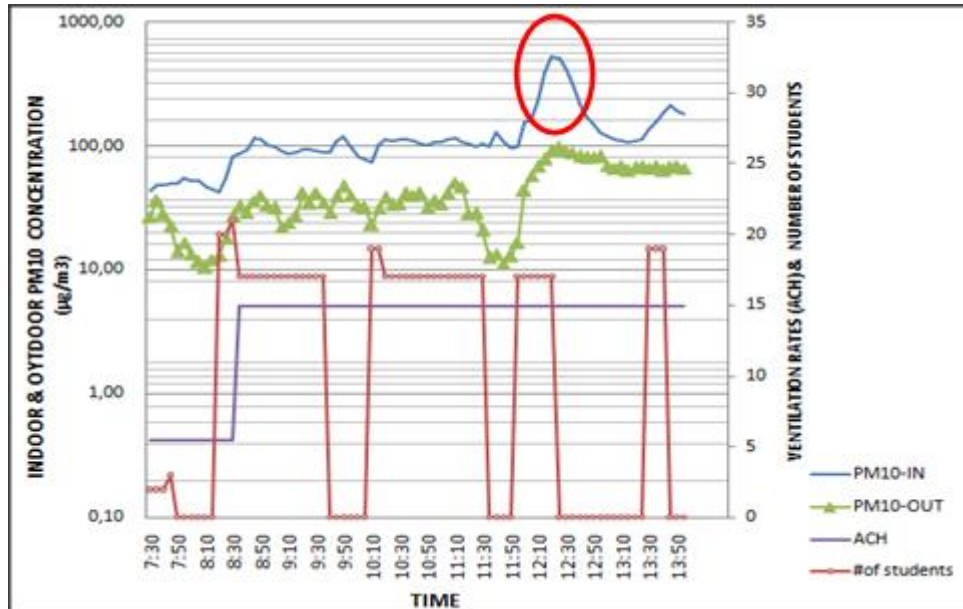


Διάγραμμα 7.3 : Καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστής συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών PM10 για τις 28/5/2013 .

Στο διάγραμμα 7.2 παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση θεωρητικών και πειραματικών συγκεντρώσεων PM10 για τις 28/5/2013 στο σχολείο 8. Οι αρχικές συγκεντρώσεις στις 07:40 όπου δεν έχουν προσέλθει οι μαθητές είναι 36,57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Κατόπιν παρατηρούμε μια αύξηση των τιμών PM10 από τις 08:20 λόγω συγκέντρωσης των μαθητών και έναρξη πρώτου διδακτικού δώρου έως το πρώτο διάλλειμα στις 09:40 που οι μαθητές αποχωρούν. Μετά το πρώτο μισάωρο ο αερισμός αυξάνεται λόγω του ότι ανοίγουν τα παράθυρα τα οποία παραμένουν ανοιχτά έως το τέλος της ημέρας αυτής. Στην συνέχεια και για τα επόμενα 20-25 λεπτά του διαλλείματος παρατηρούμε σημαντική πτώση των τιμών PM10 λόγω απουσίας πηγών. Ακολουθεί η τρίτη διδακτική ώρα με εκ νέου αύξηση των PM10 από τις 10:05. Ακολουθεί το δεύτερο διάλλειμα στις 11:30 και η επόμενη διδακτική ώρα κατά τις 11:45 όπου οι τιμές αυξάνονται εκ νέου μέχρι τις 12:30 όπου μειώνονται στο νέο διάλλειμα. Από το διάγραμμα διασποράς προκύπτει μικρή προσέγγιση θεωρητικών και πειραματικών τιμών $R^2=0.576$ διότι ενώ το μοντέλο έπιανε την τάση έχανε επιμέρους μεταβολές μικρής διάρκειας ενώ στο πρώτο δώρο υπάρχει μια σημαντική υπερεκτίμηση που πιθανόν οφείλεται ακόμα και σε σφάλμα.

4.2.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕ ΓΥΨΟ 29/05/2013

Στην ημέρα αυτή παρατηρήθηκε απότομη και μικρής διάρκειας αύξηση των επιπέδων PM10. Αυτό φαίνεται με κόκκινο κύκλο στο επόμενο διάγραμμα .



Διάγραμμα 8.1 : Διάγραμμα που απεικονίζει την διακύμανση των εσωτερικών PM10 , των εξωτερικών PM10, του ρυθμού αερισμού και του αριθμού των μαθητών κατά την διάρκεια της ημέρας 29/5/2013 συναρτήσει του χρόνου . Με κόκκινο κύκλο υποδηλώνεται η απότομη και σημαντική αλλά μικρής διάρκειας αύξηση στα επίπεδα PM10.

Με την βοήθεια του ημερολογίου μετρήσεων και καταγραφών διαπιστώθηκε ότι εκείνη την ώρα και συγκριμένα από 11:50 έως και 12:15 έχει γίνει κατασκευή με γύψο και εκεί πιθανόν οφείλεται και αυτή η απότομη αύξηση των συγκεντρώσεων.

Επιχειρήθηκε λοιπόν να διαπιστωθεί η αξιοπιστία του μοντέλου στο αν μπορεί να προβλέψει αυτή την απότομη αύξηση στις συγκεντρώσεις τροφοδοτούμενη με κατάλληλης ισχύος πηγή. Συγκεκριμένα έλαβαν χώρα τα ακόλουθα σενάρια:

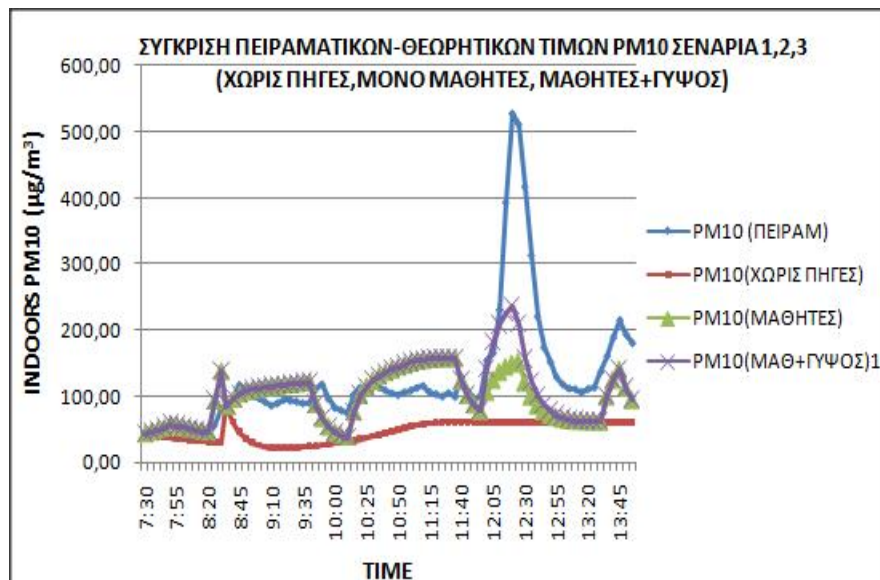
Σενάριο1: στο σενάριο αυτό το μοντέλο έτρεξε χωρίς πηγές

Σενάριο2: στο σενάριο αυτό το μοντέλο έτρεξε με πηγή μόνο τους μαθητές (όπως και στις υπόλοιπες ημέρες)

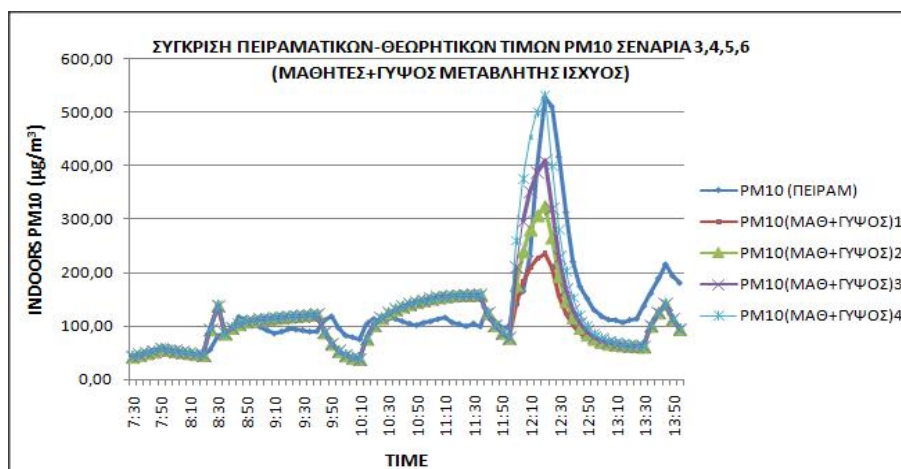
Σενάριο3: στο σενάριο αυτό αυξήθηκε η ισχύς των πηγών για να ληφθεί υπόψη και ο γύψος. Συγκεκριμένα διπλασιάσαμε την ισχύ των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν στο σενάριο 2.

Σενάρια4,5,6 : στα σενάρια αυτά μεταβάλλαμε την ισχύ των πηγών (αύξηση) (τριπλασιάσαμε, τετραπλασιάσαμε την ισχύ των πηγών του σεναρίου 2) μέχρι που είδαμε σύμπτωση πειραματικών και θεωρητικών τιμών (σενάριο 6). Αυτό συνέβη όταν χρησιμοποιήσαμε πηγή ισχύος 4.5 περίπου φορές την ισχύ της πηγής που χρησιμοποιήσαμε στο σενάριο 2.

Τα αποτελέσματα των διαφόρων σεναρίων φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 8.2 : Σενάρια 1,2,3 (χωρίς πηγές, μόνο μαθητές, μαθητές + γύψος)



Διάγραμμα 8.3 : Σενάρια 3,4,5,6 με πηγή μεταβλητής ισχύος (αυξανόμενης)

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα το μοντέλο είναι σε θέση να προβλέψει την απότομη αύξηση των συγκεντρώσεων PM10 όταν ληφθεί υπόψη ότι υπάρχει στο χώρο και άλλη εσωτερική πηγή.

Συμπεραίνουμε ότι το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πειραματική διερεύνηση πηγών στο χώρο και εύρεσης της ισχύος τους με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστές όλες οι πηγές στο χώρο.

4.2.4 ΓΕΝΙΚΟΣ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ

Όπως παρατηρούμε από τα δεδομένα εισόδου των ημερών που παρουσιάζονται παραπάνω αλλά και από τον πίνακα χαρακτηριστικών των σχολικών κτιρίων οι αίθουσες είναι πανομοιότυπες με μικρές διαφορές στον όγκο 137-198 m³ και στο ύψος, ακόμα μικρότερες, από 3,0-3,2 m . Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι μεταβολές θερμοκρασίας σε κάθε ημέρα τρεξιμάτων είναι ελάχιστες και συγκεκριμένα από 0,8°C έως 2,1°C ενώ και τα επίπεδα υγρασίας μεταβάλλονται από 9% μέχρι και 22%. Μάλιστα σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις οι θερμοκρασίες ήταν περίπου στους 21°C και τα επίπεδα υγρασίας κοντά στα 50%. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι παράγοντες αυτοί θα έχουν μικρή επίδραση στα αποτελέσματα των εσωτερικών συγκεντρώσεων.

Τα επίπεδα εξωτερικών συγκεντρώσεων ποικίλλουν αν και στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπερβαίνουν τα 20 μg/m³. Σε μια δυο περιπτώσεις υπερβαίνουν τα 70 μg/m³ που δηλώνει αρκετή επιβάρυνση σωματιδιακής ρύπανσης στο περιβάλλον των σχολικών μονάδων τις συγκεκριμένες ημέρες. Μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι οι αρχικές εσωτερικές συγκεντρώσεις στις σχολικές αίθουσες στις ημέρες που παρουσιάζονται παραπάνω υπερβαίνουν κατά κανόνα τις εξωτερικές. Δηλαδή πριν καν εμφανιστούν οι μαθητές τα επίπεδα συγκεντρώσεων της σωματιδιακής ρύπανσης διαφέρουν από τα εξωτερικά

επίπεδα. Αυτό μας οδηγεί εκ πρώτης όψεως στο συμπέρασμα ότι οι εξωτερικές συγκεντρώσεις δεν αναμένεται να έχουν σημαντική επίδραση στην αύξηση των εσωτερικών συγκεντρώσεων κάτι που επιβεβαιώθηκε και στην πράξη.

Όσον αφορά τα επίπεδα αερισμού αυτά ποικίλλουν ανά ημέρα αλλά και κατά την διάρκεια της ημέρας και κυμάνθηκαν από $\sim 1 \text{ m}^3/\text{min}$ έως και $\sim 56 \text{ m}^3/\text{min}$ και γενικά από μια έως και 20-50 φορές το κατώφλι των επιπέδων αερισμού που είναι ουσιαστικά ο βαθμός διείσδυσης στο κτίριο και μαζί με την παρουσία των μαθητών αποτέλεσαν τους κύριους ρυθμιστές των επιπέδων των PM₀ στις αίθουσες του πειράματος.

Ως πηγές εσωτερικής ρύπανσης θεωρήθηκαν οι μαθητές. Η ισχύς των πηγών θεωρήθηκε ανάλογη του αριθμού των μαθητών. Μετά από πολλαπλές δοκιμές με πηγές διαφορετικής ισχύος κρίθηκε ότι ένας μαθητής αντιστοιχούσε σε πηγή ισχύος $80 \text{ }\mu\text{g}/\text{min}$. Αυτή η τιμή έδινε ως αποτέλεσμα συνολική ισχύ $\sim 2000 \text{ }\mu\text{g}/\text{min}$ και είναι σε συμφωνία με αντίστοιχες μελέτες (Buonanno *et al.*, 2012; Halios & Helmis 2007). Βέβαια μια τέτοιου είδους παραδοχή δεν λαμβάνει υπόψη το επίπεδο δραστηριότητας των μαθητών παρά μόνο κατά μέσον όρο. Δηλαδή διαφορετική ισχύς αναμένεται όταν οι μαθητές παρακολουθούν το μάθημα χωρίς να μετακινούνται και διαφορετική ισχύς όταν μετακινούνται για παράδειγμα κατά την λήξη ή την έναρξη της κάθε διδακτικής ώρας. Ένας τέτοιος διαχωρισμός ίσως απαιτεί αναλυτική καταγραφή της δραστηριότητας των μαθητών με χρήση κατάλληλων κλάσεων όπως για πχ μικρή κινητικότητα, μέτρια κινητικότητα, έντονη κινητικότητα κλπ με κάποια όρια ποσοτικού προσδιορισμού όπως για πχ 10% κινείται να συνεπάγεται μικρή κινητικότητα κλπ.

Το μέγεθος των σωματιδιακών ρύπων που μελετήθηκε είναι 2.5 έως 10 μm . Τα σωματίδια αυτά θεωρήθηκαν σφαιρικά με βάση όσα έχουμε ήδη αναφέρει

στις προηγούμενες ενότητες με διάμετρο 2.5 έως 10 μm και πυκνότητα 2200 kg/m^3 (C.-L. Chen *et al.*, 2002).

Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αέρα και επιφανειών (τοιχοί) θεωρήθηκε σταθερή και ίση με -2K. Οι (Nazaroff & Cass, 1989) χρησιμοποιούν τιμές -1K έως -5K οπότε η τιμή που επιλέχθηκε ήταν εντός του μέσου όρου προτεινόμενων τιμών.

Πραγματοποιήθηκαν πολλαπλά τρεξίματα με διαφορετική ταχύτητα εναπόθεσης και συγκεκριμένα με ταχύτητες που κυμάνθηκαν από 0,005 έως 0,015 cm/sec (C. H. Haliotis & C. G. Helmis, 2007). Η ταχύτητα εναπόθεσης είναι καθοριστικός παράγοντας και ενδέχεται να διαφέρει από χώρο σε χώρο και από μέρα σε μέρα διεξαγωγής των πειραμάτων. Έτσι και στα πειράματα μας υπήρξε μεταβλητή η τιμή της σε κάθε προσομοίωση με κριτήριο την καλύτερη συμφωνία θεωρητικών και πειραματικών τιμών αλλά εντός βιβλιογραφικών τιμών. Όσο πιο αργή η ταχύτητα εναπόθεσης τόσο πιο μεγάλο χρονικό διάστημα απαιτείται για την αραίωση των συγκεντρώσεων των PM10.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ

Στα διαγράμματα αυτά απεικονίζονται από κοινού η μεταβολή κατά την διάρκεια της ημέρας των επιπέδων εσωτερικών και εξωτερικών συγκεντρώσεων των PM10, του αριθμού των μαθητών και των επιπέδων αερισμού.

Στα διαγράμματα αυτά γίνεται εύκολα αντιληπτή η σχέση μεταξύ του αριθμού των μαθητών και της μεταβολής των επιπέδων των εσωτερικών συγκεντρώσεων των PM10. Αν θεωρήσουμε για παράδειγμα το διάγραμμα 2.1 που αντιστοιχεί στην 8/4/2013 παρατηρούμε ότι με την άφιξη των μαθητών παρουσιάζεται μια σημαντική αύξηση των εσωτερικών συγκεντρώσεων PM10 που διατηρείται μέχρι την λήξη της πρώτης διδακτικής περιόδου οπότε

παρατηρείται μια σημαντική πτώση η οποία ακολουθείται από νέα αύξηση την επόμενη διδακτική ώρα και ούτω καθεξής.

Λιγότερο εμφανής είναι ο ρόλος των επιπέδων αερισμού ενώ τα επίπεδα των εξωτερικών ρύπων δεν φαίνεται να επιδρούν τόσο στα επίπεδα των εσωτερικών συγκεντρώσεων μιας που στις εμφανιζόμενες ημέρες υπήρξαν πολύ μικρότερες συγκεντρώσεις εξωτερικών ρύπων σε σχέση με τους εσωτερικούς.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ/ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ PM10

Στα διαγράμματα αυτά έχουν σχεδιαστεί οι θεωρητικά προβλεπόμενες τιμές που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις με το μοντέλο MIAQ όταν τροφοδοτήθηκε από τα αντίστοιχα δεδομένα εισόδου.

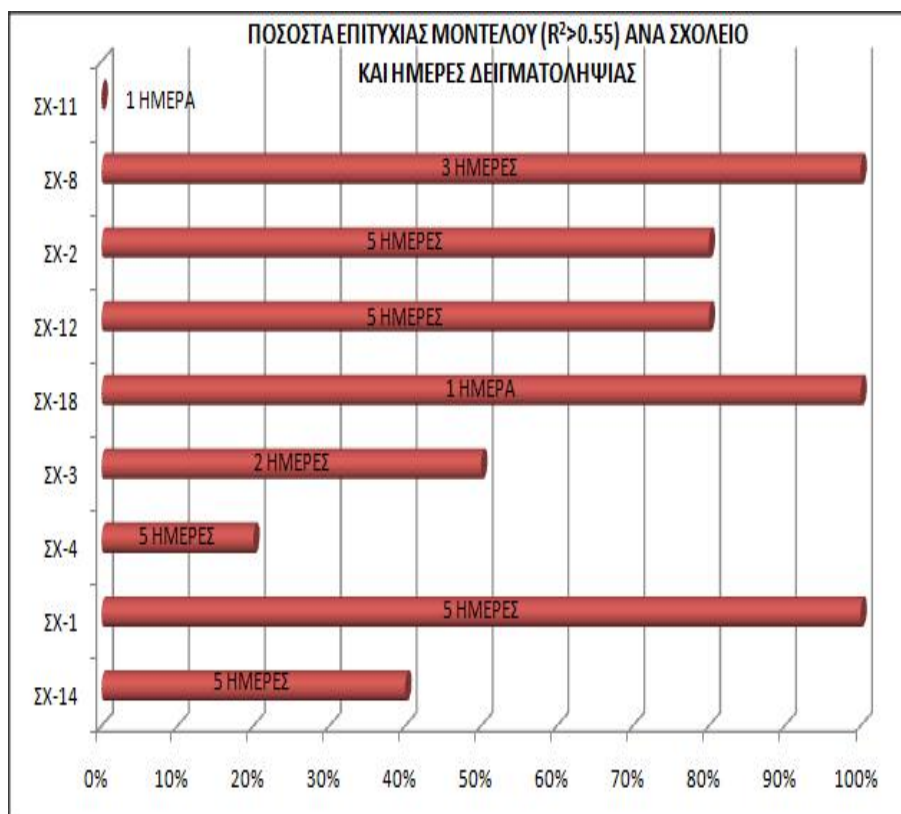
Παρατηρούμε ότι σε γενικές γραμμές το μοντέλο καταφέρνει να ακολουθεί τις μεταβολές αύξηση/μείωση των επιπέδων των εσωτερικών συγκεντρώσεων. Ιδίως στις ημέρες που υπάρχει σαφής σχέση των μεταβολών με τις διδακτικές ώρες δηλαδή αύξηση στην έναρξη κάθε διδακτικής ώρας και μείωση στην λήξη της μέχρι την επόμενη διδακτική ώρα, παρατηρούμε ότι θεωρητικές και πειραματικές τιμές συμβαδίζουν καλύτερα. Παράδειγμα η 8/4/2013 δηλαδή το διάγραμμα 2.2. Αυτό αναδεικνύει την ισχύ της βασικής υπόθεσης ότι οι μαθητές αποτελούν πηγή εκπομπής σωματιδίων στο χώρο.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ

Στα διαγράμματα αυτά παρουσιάζεται η καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών εσωτερικών συγκεντρώσεων PM10.

Παρατηρούμε μέτριους κυρίως συντελεστές συσχέτισης που κυμαίνονται από 0,57 έως και 0,82. Αυτό υποδεικνύει ότι πιθανόν υπάρχουν και άλλοι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η μεταβολή των εσωτερικών συγκεντρώσεων PM10.

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζονται τα τελικά αποτελέσματα επιτυχίας του μοντέλου στην συγκεκριμένη πειραματική και θεωρητική εργασία. Επιτυχία πρόβλεψης θεωρήθηκε όταν ο συντελεστής συσχέτισης θεωρητικών τιμών (μοντέλου) και πειραματικών τιμών ήταν μεγαλύτερος από 0.55.



Διάγραμμα 9.1: Διάγραμμα των ποσοστών επιτυχούς πρόβλεψης του μοντέλου ΜΙΑQ ανά σχολείο. Με μαύρο το σύνολο των ημερών δειγματοληψίας στο συγκεκριμένο σχολείο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν τα επίπεδα εσωτερικών συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων σε 9 αίθουσες ισάριθμων σχολικών κτιρίων σε περιοχές της Αττικής. Καταγράφηκαν με κατάλληλα όργανα και μεθοδολογία τα επίπεδα υγρασίας και θερμοκρασίας στους εσωτερικούς χώρους , έμμεσα τα επίπεδα αερισμού (με την μέθοδο αερίου ιχνηθέτη), τα επίπεδα εσωτερικών συγκεντρώσεων PM10 και τα επίπεδα των εξωτερικών συγκεντρώσεων PM10. Στα δεδομένα επίσης καταγράφηκαν γεωμετρικά στοιχεία των αιθουσών και των κτιρίων (ύψος, όγκος, ηλικία) και χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την χρήση αυτών των χώρων (αριθμός μαθητών, χρήση πίνακα κιμωλίας ή μαρκαδόρου) . Με τα δεδομένα αυτά και βάση ορισμένων περιορισμών και παραδοχών επιχειρήθηκε η θεωρητική πρόβλεψη των εσωτερικών συγκεντρώσεων των PM10 και η συσχέτιση τους με τα πειραματικά δεδομένα.

Τα σχολικά κτίρια μελετήθηκαν σκόπιμα σε περίοδο που δεν λειτουργούν τα συστήματα θέρμανσης/ψύξης και έτσι βρίσκονταν σε συνθήκες φυσικού αερισμού.

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν ότι :

- Τα επίπεδα εσωτερικών συγκεντρώσεων PM10 υπερβαίνουν κατά πολύ τα επιτρεπτά όρια συγκεντρώσεων που έχουν τεθεί από τον παγκόσμιο οργανισμό υγείας στα συγκεκριμένα σχολεία.
- Τα επίπεδα εσωτερικών συγκεντρώσεων υπερβαίνουν στις περισσότερες περιπτώσεις τα επίπεδα των εξωτερικών συγκεντρώσεων στο εξωτερικό περιβάλλον. Αυτό πιθανόν οφείλεται στην ύπαρξη ισχυρών πηγών στο εσωτερικό των κτιρίων που προφανώς σχετίζεται με την παρουσία και δραστηριότητα των μαθητών.

- Τα επίπεδα διείδυσης (ελάχιστος αερισμός στον πίνακα 6) κρίνονται ιδιαίτερα υψηλά γεγονός που σχετίζεται με την παλαιότητα των κτιρίων αυτών ή και με μετεωρολογικούς παράγοντες για πχ επικράτηση ισχυρών ανέμων.
- Τα μέγιστα επίπεδα αερισμού υπερβαίνουν σε πολλές περιπτώσεις τις αντίστοιχες τιμές σε άλλα σχολικά κτίρια αλλά και τις προτεινόμενες τιμές .
- Η χρήση κιμωλίας είχε ως αποτέλεσμα αυξημένα επίπεδα PM10 όπως προκύπτει από τον πίνακα 6 και το διάγραμμα (θηκόγραμμα) 4.1 αφού τόσο οι μέγιστες όσο και οι μέσες τιμές των PM10 ήταν αυξημένες σε σχέση με τα σχολεία που χρησιμοποιούσαν μαρκαδόρο.
- Οι τιμές που πρόβλεπε το μοντέλο MIAQ ήταν σε καλή συμφωνία σε σχέση με τις πειραματικές τιμές. Με την βοήθεια του μοντέλου εκτιμήθηκαν οι ρυθμοί εκπομπής PM10 εξαιτίας της παρουσίας των μαθητών.
- Με γνωστές τις συνθήκες αερισμού και το πλήθος των μαθητών ήταν δυνατή σε ικανοποιητικό βαθμό η πρόβλεψη της κατανομής των εσωτερικών συγκεντρώσεων PM10 με την βοήθεια του μοντέλου MIAQ.
- Διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει περιπτώσεις στις οποίες εκτός από τους μαθητές , την χρήση κιμωλίας υπάρχουν και άλλες γνωστές πηγές εκπομπής αρκεί να υπάρχει αναλυτική καταγραφή σε ημερολόγιο μετρήσεων (παράδειγμα ημέρας 29/05/2013 με γυψοκατασκευή).
- Κρίνεται σκόπιμη στα πλαίσια αντίστοιχων μελετών η πλήρης καταγραφή όλων των συμβάντων που ενδέχεται να επηρεάζουν τις εσωτερικές συγκεντρώσεις σωματιδιακής ρύπανσης .

- Επίσης κρίνεται σκόπιμο η επέκταση του αριθμού των ημερών δειγματοληψίας, του αριθμού αιθουσών ανά σχολικό κτίριο, και της μελέτης περισσότερων σχολικών μονάδων για την καλύτερη εκτίμηση των εσωτερικών επιπέδων σωματιδιακής ρύπανσης και την ασφαλέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abdul-Wahab, S. A. (2011). *Sick Building Syndrome*: Springer.
- Abubaker Sulyman, I. (2015). *Elemental Profiles and Characterization of Air Particulate Matter across the Central Belt of Sudan*. UOFK.
- ASHRAE. Standard 62.1-2013. 2013. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta, GA. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*
- Axley, J. (1987). *Indoor air quality modeling: phase II report*: US Department of Commerce, National Bureau of Standards, Building Environment Division.
- Baron, P. A., & Willeke, K. (2011). *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications* (THIRD ed.): John Wiley & Sons.
- Brinke, J. T., Selvin, S., Hodgson, A., Fisk, W., Mendell, M., Koshland, C., & Daisey, J. (1998). Development of new volatile organic compound (VOC) exposure metrics and their relationship to “sick building syndrome” symptoms. *Indoor Air*, 8(3), 140-152.
- Bronsema, B., Bjorck, M., Carrer, P., Clausen, G., Fitzner, K., Flatheim, G., . . . Kurnitski, J. (2004). Performance criteria of buildings for health and comfort. *Report of ISIAQ-CIB, Task Group TG42*.
- Buonanno, G., Fuoco, F., Marini, S., & Stabile, L. (2012). Particle resuspension in school gyms during physical activities. *Aerosol Air Qual. Res*, 12(5), 803-813.
- CCPA. (2001). Ambient Particulate Matter Characterization Guidelines.
- Chatzidiakou, L., Mumovic, D., & Summerfield, A. J. (2012). What do we know about indoor air quality in school classrooms? A critical review of the literature. *Intelligent Buildings International*, 4(4), 228-259.
- Chen, C.-L., Tsuang, B.-J., Pan, R.-C., Tu, C.-Y., Liu, J.-H., Huang, P.-L., . . . Cheng, M.-T. (2002). Quantification on source/receptor relationship of primary pollutants and secondary aerosols from ground sources—Part II. Model description and case study. *Atmospheric environment*, 36(3), 421-434.
- Chen, F., Simon, C., & Lai, A. C. (2006). Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model. *Atmospheric Environment*, 40(2), 357-367.
- Chow, J. C., & Watson, J. G. (1998). Guideline on speciated particulate monitoring.
- Csobod, E., Annesi-Maesano, I., Carrer, P., Kephelopoulos, S., Madureira, J., Rudnai, P., . . . Hyvärinen, A. (2014). SINFONIE: Schools Indoor Pollution & Health Observatory Network in Europe. *Final Report. Luxembourg: Publications Office of the European Union* (<http://www.sinphonie.eu/sites/default/files/ExecutiveSummary/lbna26738enn.pdf>, accessed 23 March 2015).
- de Gennaro, G., Dambruoso, P. R., Loiotile, A. D., Di Gilio, A., Giungato, P., Tutino, M., . . . Porcelli, F. (2014). Indoor air quality in schools. *Environmental chemistry letters*, 12(4), 467-482. doi: 10.1007/s10311-014-0470-6
- Dimitroulopoulou, C., Ashmore, M., Hill, M., Byrne, M., & Kinnersley, R. (2006). INDAIR: A probabilistic model of indoor air pollution in UK homes. *Atmospheric Environment*, 40(33), 6362-6379.
- Elbayoumi, M., Ramli, N. A., & Yusof, N. F. F. M. (2015). Development and comparison of regression models and feedforward backpropagation neural network models to predict seasonal indoor PM 2.5–10 and PM 2.5 concentrations in naturally ventilated schools. *Atmospheric Pollution Research*, 6(6), 1013-1023.

- EPA United States Environmental Protection Agency. An Introduction to Indoor Air Quality Retrieved 19 March, 2016, from <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality>
- Etheridge, D. W., & Sandberg, M. (1996). *Building ventilation: theory and measurement* (Vol. 50): John Wiley & Sons Chichester, UK.
- Grau-Bové, J., & Strlic, M. (2013). Fine particulate matter in indoor cultural heritage: a literature review. *Herit Sci*, 1(8), 1-17.
- Grot, R. A., & Persily, A. K. (1986). Measured air infiltration and ventilation rates in eight large office buildings *Measured air leakage of buildings*: ASTM International.
- Guo, H., Lee, S., Chan, L., & Li, W. (2004). Risk assessment of exposure to volatile organic compounds in different indoor environments. *Environmental Research*, 94(1), 57-66.
- Halios, C., & Helmis, C. (2007). *Experimental and theoretical study of the main mechanisms that control Indoor Air Quality in an office microenvironment*. Paper presented at the 10th International Conference on Environmental Science and Technology Kos island, Greece, 5 – 7 September 2007.
- Halios, C. H., Helmis, C. G., Eleftheriadis, K., Flocas, H. A., & Assimakopoulos, V. D. (2009). A comparative study of the main mechanisms controlling indoor air pollution in residential flats. *Water, air, and soil pollution*, 204(1-4), 333-350.
- Halios, C. H., & Helmis, C. G. (2007). Combining experimental and theoretical methods to quantify indoor particulate emissions: application in an office microenvironment. *Methods*, 505, 3.
- Halios, C. H., & Helmis, C. G. (2007). On the estimation of characteristic indoor air quality parameters using analytical and numerical methods. *Science of the Total Environment*, 381(1), 222-232.
- Halios, C. H., & Helmis, C. G. (2010). Temporal evolution of the main processes that control indoor pollution in an office microenvironment: a case study. *Environmental monitoring and assessment*, 167(1-4), 199-217.
- Halios, C. H., Helmis, C. G., Deligianni, K., Vratolis, S., & Eleftheriadis, K. (2014). Determining the ventilation and aerosol deposition rates from routine indoor-air measurements. *Environmental monitoring and assessment*, 186(1), 151-163.
- He, C., Morawska, L., Hitchins, J., & Gilbert, D. (2004). Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. *Atmospheric environment*, 38(21), 3405-3415.
- Helmis, C., Tzoutzas, J., Flocas, H., Halios, C., Stathopoulou, O., Assimakopoulos, V., . . . Adam, E. (2007). Indoor air quality in a dentistry clinic. *Science of the Total Environment*, 377(2), 349-365.
- Hinds, W. C. (2012). *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*: John Wiley & Sons.
- Holmes, P., & Tuckett, C. (2000). Airborne particles: exposure in the home and health effects. *Leicester: MRC Institute for Environment and Health*.
- Hueglin, C., Gehrig, R., Baltensperger, U., Gysel, M., Monn, C., & Vonmont, H. (2005). Chemical characterisation of PM_{2.5}, PM₁₀ and coarse particles at urban, near-city and rural sites in Switzerland. *Atmospheric Environment*, 39(4), 637-651.
- Hussein, T., & Kulmala, M. (2008). Indoor aerosol modeling: Basic principles and practical applications. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 8(1), 23-34.
- Jamriska, M., Morawska, L., & Ensor, D. S. (2003). Control strategies for sub-micrometer particles indoors: model study of air filtration and ventilation. *Indoor Air*, 13(2), 96-105.

- Joshi, S. M. (2008). The sick building syndrome. *Indian journal of occupational and environmental medicine*, 12(2), 61-64. doi: 10.4103/0019-5278.43262
- Kadiyala, A., Kaur, D., & Kumar, A. (2013). Development of hybrid genetic-algorithm-based neural networks using regression trees for modeling air quality inside a public transportation bus. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63(2), 205-218.
- Kim, M., SankaraRao, B., Kang, O., Kim, J., & Yoo, C. (2012). Monitoring and prediction of indoor air quality (IAQ) in subway or metro systems using season dependent models. *Energy and Buildings*, 46, 48-55.
- Kim, M. H., Kim, Y. S., Lim, J., Kim, J. T., Sung, S. W., & Yoo, C. (2010). Data-driven prediction model of indoor air quality in an underground space. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 27(6), 1675-1680.
- Lai, A. C. (2004). Modeling of airborne particle exposure and effectiveness of engineering control strategies. *Building and Environment*, 39(6), 599-610.
- Lai, A. C., & Chen, F. (2007). Modeling of cooking-emitted particle dispersion and deposition in a residential flat: a real room application. *Building and Environment*, 42(9), 3253-3260.
- Lai, A. C., & Nazaroff, W. W. (2000). Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces. *Journal of aerosol science*, 31(4), 463-476.
- Leung, M., & Chan, A. H. (2006). Control and management of hospital indoor air quality. *Medical science monitor*, 12(3), SR17-SR23.
- Maroni, M., Seifert, B., & Lindvall, T. (1995). *Indoor air quality: a comprehensive reference book*: Elsevier.
- Miller, S., & Nazaroff, W. (2001). Environmental tobacco smoke particles in multizone indoor environments. *Atmospheric Environment*, 35(12), 2053-2067.
- Mølhave, L. (1991). Volatile organic compounds, indoor air quality and health. *Indoor Air*, 1(4), 357-376.
- Mølhave, L., Clausen, G., Berglund, B., Ceaurriz, J. D., Kettrup, A., Lindvall, T., . . . Rothweiler, H. (1997). Total volatile organic compounds (TVOC) in indoor air quality investigations. *Indoor Air*, 7(4), 225-240.
- Morawska, L., & Salthammer, T. (2006). *Indoor environment: airborne particles and settled dust*. John Wiley & Sons.
- Nazaroff, W. W. (2004). Indoor particle dynamics. *Indoor Air*, 14(s7), 175-183.
- Nazaroff, W. W., & Cass, G. R. (1989). Mathematical modeling of indoor aerosol dynamics. *Environmental Science & Technology*, 23(2), 157-166.
- Nazaroff, W. W., Salmon, L. G., & Cass, G. R. (1990). Concentration and fate of airborne particles in museums. *Environmental science & technology*, 24(1), 66-77.
- Norbäck, D. (2009). An update on sick building syndrome. *Current opinion in allergy and clinical immunology*, 9(1), 55-59.
- Ott, W. R. (1983). Exposure estimates based on computer generated activity patterns. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, 21(1-2), 97-128.
- Ott, W. R., Klepeis, N. E., & Switzer, P. (2003). Analytical solutions to compartmental indoor air quality models with application to environmental tobacco smoke concentrations measured in a house. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53(8), 918-936.
- Owen, M., Ensor, D. S., & Sparks, L. (1992). Airborne particle sizes and sources found in indoor air. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 26(12), 2149-2162.
- Pluschke, P. (2004). *Indoor Air Pollution: Part F*: Springer Science & Business Media.

- Pöschl, U. (2005). Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(46), 7520-7540.
- Redlich, C. A., Sparer, J., & Cullen, M. R. (1997). Sick-building syndrome. *The Lancet*, 349(9057), 1013-1016.
- Romay, F. J., Takagaki, S. S., Pui, D. Y., & Liu, B. Y. (1998). Thermophoretic deposition of aerosol particles in turbulent pipe flow. *Journal of aerosol science*, 29(8), 943-959.
- Ryhl-Svendsen, M. (2006). Indoor air pollution in museums: prediction models and control strategies. *Studies in Conservation*, 51(sup1), 27-41.
- Shah, K. K., & Shah, R. A. (2015). SICK BUILDING SYNDROME. *International Journal of Advanced Research in Engineering, Science & Management*, VOLUME 2(ISSUE 4).
- Shrestha, S. L. (2009). Categorical regression models with optimal scaling for predicting indoor air pollution concentrations inside kitchens in Nepalese Households. *Nepal Journal of Science and Technology*, 10, 205-211.
- Sparks, L. (2000). An Indoor Air Quality Model for Particulate Matter. *AIR AND WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION-PUBLICATIONS-VIP*, 98, 76-91.
- Spengler, J. D., Samet, J. M., & McCarthy, J. F. (2001). *Indoor air quality handbook*.
- Spengler, J. D., & Sexton, K. (1983). Indoor air pollution: a public health perspective. *Science*, 221(4605), 9-17.
- Tan, Z., & Zhang, Y. (2004). A review of effects and control methods of particulate matter in animal indoor environments. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(7), 845-854.
- Thatcher, T. L., Lai, A. C., Moreno-Jackson, R., Sextro, R. G., & Nazaroff, W. W. (2002). Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors. *Atmospheric Environment*, 36(11), 1811-1819.
- Thatcher, T. L., & Layton, D. W. (1995). Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence. *Atmospheric Environment*, 29(13), 1487-1497.
- Thornburg, J., Ensor, D. S., Rodes, C. E., Lawless, P., Sparks, L., & Mosley, R. (2001). Penetration of particles into buildings and associated physical factors. Part I: model development and computer simulations. *Aerosol Science & Technology*, 34(3), 284-296.
- Tsai, Y. I., & Chen, C.-L. (2006). Atmospheric aerosol composition and source apportionments to aerosol in southern Taiwan. *Atmospheric Environment*, 40(25), 4751-4763.
- U.S EPA. (2004). Air Quality Criteria for Particulate Matter (Vol. I). Washington, DC.
- Valavanidis, A., Fiotakis, K., & Vlachogianni, T. (2008). Airborne particulate matter and human health: toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 26(4), 339-362.
- Whitby, K. T. (1978). The physical characteristics of sulfur aerosols. *Atmospheric Environment (1967)*, 12(1), 135-159.
- Wilson, W. E., & Suh, H. H. (1997). Fine particles and coarse particles: concentration relationships relevant to epidemiologic studies. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 47(12), 1238-1249.
- Wisconsin Department of Health Services. (2000). Indoor Air Issues: Ammonia Retrieved 19 March, 2016, from https://www.dhs.wisconsin.gov/library/P-00810.htm?order=title_field&sort=desc
- Wolkoff, P. (1995). Volatile organic compounds sources, measurements, emissions, and the impact on indoor air quality. *Indoor Air*, 5(S3), 5-73.

- Wong, L., Mui, K., & Hui, P. (2006). A statistical model for characterizing common air pollutants in air-conditioned offices. *Atmospheric Environment*, 40(23), 4246-4257.
- World Health Organization. (1999). Hazard prevention and control in the work environment:: airborne dust.
- World Health Organization. (2000). The right to healthy indoor air: report on a WHO meeting, Bilthoven, The Netherlands 15-17 May 2000.
- World Health Organization. (2006). *Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide*: World Health Organization.
- Yu, C., & Crump, D. (1998). A review of the emission of VOCs from polymeric materials used in buildings. *Building and Environment*, 33(6), 357-374.
- Yu, C. W. F., & Kim, J. T. (2010). Building pathology, investigation of sick buildings—VOC emissions. *Indoor and Built Environment*, 19(1), 30-39.
- Zhao, B., Chen, C., & Tan, Z. (2009). Modeling of ultrafine particle dispersion in indoor environments with an improved drift flux model. *Journal of aerosol science*, 40(1), 29-43.