



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΣΤΟΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΧΩΡΟ
ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΗΤΡΟΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΕΥΠΑΘΕΙΣ
ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΕΣ ΟΜΑΔΕΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΜΠΑΡΜΠΑΡΕΣΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
Διπλωματούχος Χημικός Μηχανικός
MSc Φυσικής Περιβάλλοντος

ΑΘΗΝΑ

2019

Ημερομηνία ορισμού θέματος: 19/01/2015

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Επιβλέπουσα:

Μαργαρίτα - Νίκη Ασημακοπούλου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Φυσικής - ΕΚΠΑ

Μέλη:

Ευαγγελία Καψανάκη - Γκότση, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Βιολογίας - ΕΚΠΑ

Δρ. Βασιλική Ασημακοπούλου, Κύρια Ερευνήτρια Ινστιτούτου Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΙΕΠΒΑ) του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

1. Μαργαρίτα - Νίκη Ασημακοπούλου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Φυσικής - ΕΚΠΑ
2. Ευαγγελία Καψανάκη - Γκότση, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Βιολογίας – ΕΚΠΑ
3. Δρ. Βασιλική Ασημακοπούλου, Κύρια Ερευνήτρια Ινστιτούτου Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΙΕΠΒΑ) του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών
4. Κωνσταντίνος Βαρώτσος, Καθηγητής Τμήματος Φυσικής – ΕΚΠΑ
5. Έλενα Φλόκα, Καθηγήτρια Τμήματος Φυσικής – ΕΚΠΑ
6. Κωνσταντίνος Καρτάλης, Καθηγητής Τμήματος Φυσικής – ΕΚΠΑ
7. Δρ. Θωμάς Μάγγος, Κύριος Ερευνητής, Εργαστηρίου Περιβαλλοντικών Ερευνών – Ινστιτούτο ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ

Η διεξαγωγή του Πειραματικού μέρους στο 2ο Δημοτικό Σχολείο Νέας Σμύρνης έχει λάβει έγκριση από το Υπουργείο Παιδείας, Έρευνας και Θρησκευμάτων καθώς και από το Ινστιτούτο Εκπαιδευτικής Πολιτικής (ΙΕΠ) με την έκδοση σχετικής άδειας (158726/Δ1/27-9-2016).

*“Faith is the bird that feels the light and sings when the dawn is still dark.” —
Rabindranath Tagore*

Στην αγαπημένη μου Χριστίνα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στο Τμήμα Φυσικής, Τομέας Φυσικής Περιβάλλοντος και Μετεωρολογίας, στοχεύοντας στην εμβάθυνση του αντικειμένου της εσωτερικής αέριας ρύπανσης σε χώρους σχολικών συγκροτημάτων. Ευχαριστώ θερμά τους ανθρώπους που στήριξαν τη προσπάθεια σε όλη τη διάρκεια της διδακτορικής μου διατριβής. Συγκεκριμένα:

- Την υπεύθυνη καθηγήτριά μου, κυρία Μαργαρίτα-Νίκη Ασημακοπούλου, για την εμπιστοσύνη και τη καθοδήγηση.
- Την ερευνήτρια Δρ. Βασιλική Ασημακοπούλου για τη μεγάλη της βοήθεια στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων και τον έλεγχο του κειμένου.
- Την αναπληρώτρια καθηγήτρια κυρία Ευαγγελία Καψανάκη - Γκότση από το Τμήμα Βιολογίας ΕΚΠΑ, μέλος της συμβουλευτικής επιτροπής, για τη βοήθεια της κατά την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας αλλά και σε όλη τη διάρκεια της διατριβής, την εξέταση του κειμένου και τις εύστοχες παρατηρήσεις της.
- Τον ομότιμο καθηγητή ΕΚΠΑ κύριο Δημοσθένη Ασημακόπουλο για τις πολύτιμες συμβουλές του.
- Τους ερευνητές Δρ. Θωμά Μάγγο, Δρ. Στέλλα Πατεράκη και Δρ. Δικαία Σαραγά από το Ινστιτούτο Πυρηνικών και Ραδιολογικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ενέργειας και Ασφάλειας (Ι.Π.Ε.Τ.Ε.Α.) του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος για την παραχώρηση του εργαστηρίου και την εκπαίδευση που μου παρείχαν ώστε να πραγματοποιήσω τις απαιτούμενες χημικές αναλύσεις.
- Τον Δρ. Σωτήριο Καραβόλτσο και τους συνεργάτες του από τον τομέα Χημείας Περιβάλλοντος του τμήματος Χημείας ΕΚΠΑ για την πραγματοποίηση επιπρόσθετων χημικών αναλύσεων στα δείγματα.
- Τη Δρ. Ιωάννα Πυρρή, μέλος Ε.Δι.Π. του τμήματος Βιολογίας του ΕΚΠΑ, για την αμέριστη βοήθειά της στην επεξεργασία αποτελεσμάτων των αερομεταφερόμενων μυκήτων.
- Τους προπτυχιακούς φοιτητές Νικόλαο Λούμο, Μαρία-Αλίκη Σωτηρίου και Αθανάσιο Κουκουμτζή, για την σύμπραξή τους κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.
- Τη σύντροφό μου Χριστίνα, τους γονείς μου Γιάννη και Γιάννα και τους εκλεκτούς μου φίλους για την αγάπη τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής μελετήθηκαν πειραματικά οι περιβαλλοντικές συνθήκες εντός του 2^{ου} Δημοτικού σχολείου Νέας Σμύρνης κατά την περίοδο Οκτωβρίου 2016 - Ιουνίου 2017. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου κτιριακού συγκροτήματος είναι ότι ένα μέρος της οροφής του καλύπτεται από φυτά (πράσινη οροφή), ενώ το υπόλοιπο είναι συμβατικό και ακολουθεί τις βασικές προδιαγραφές που ακολουθούντο την εποχή της οικοδόμησής του.

Πραγματοποιήθηκαν εξειδικευμένες πειραματικές μετρήσεις καλύπτοντας όλο το κτιριακό συγκρότημα όπως και τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες. Ο πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στόχευε σε μετρήσεις σχετικές με τις θερμικές συνθήκες και την ποιότητα του αέρα στους εσωτερικούς και άμεσους εξωτερικούς χώρους του σχολείου, τόσο στο συμβατικό όσο και στο φυτοκαλυμμένο κομμάτι του συγκροτήματος. Επιπροσθέτως, μελετήθηκαν οι συνθήκες αερισμού των αιθουσών.

Συνοπτικά τα αποτελέσματα της πραγματοποιηθείσας εργασίας μπορούν να αποτυπωθούν ως εξής:

Πρώτον, τις θερμικές συνθήκες που διαμορφώνει η προσθήκη πράσινης οροφής σε ένα μέρος του σχολικού συγκροτήματος. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην αποτύπωση των διαφορών ως προς τα επίπεδα θερμοκρασίας (T) και σχετικής υγρασίας (RH) μεταξύ των αιθουσών που βρίσκονται υπό την επίδραση της φυτοκαλυμμένης ταράτσας και των αντίστοιχων κάτω από την συμβατική οροφή από τσιμέντο. Η διαφοροποίηση αυτή παρουσιάζει έντονες αυξομειώσεις κατά τη διάρκεια του έτους, με τις αλλαγές των εποχών.

Δεύτερον, τα επίπεδα της εσωτερικής αέριας ρύπανσης με την οποία έρχονται σε επαφή οι μαθητές και το εκπαιδευτικό προσωπικό κατά τη διάρκεια μίας σχολικής χρονιάς. Συγκεκριμένα, παρακολουθούνται συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOC) και αιωρούμενων σωματιδίων αεροδυναμικών διαμέτρων από 1 έως 10 μm (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀). Εξετάζεται η ενδεχόμενη υπέρβαση των ορίων έκθεσης για τους συγκεκριμένους ρυπαντές με βάση τα θεσμοθετημένα όρια που ισχύουν για το εξωτερικό περιβάλλον, οι ανθρωπογενείς ή φυσικοί παράγοντες επιρροής στις συγκεντρώσεις τους όπως επίσης και οι διαφορετικές επιπτώσεις του καθενός από αυτούς στον ανθρώπινο οργανισμό. Επιπλέον, διερευνάται ο επαρκής ή όχι αερισμός των αιθουσών. Το ποσοστό επάρκειας καθώς και ο τύπος αερισμού (φυσικός – μηχανικός) αποτελούν βασικές παραμέτρους επιρροής στην ποιότητα του αέρα οποιουδήποτε κλειστού χώρου.

Τρίτον, τη διερεύνηση των πιθανών συσχετίσεων μεταξύ των φυσικοχημικών παραμέτρων και της κατανομής των αερομεταφερόμενων μυκήτων.

Τέταρτον, τον προσδιορισμό του είδους των μετρούμενων χονδρόκοκκων αιωρούμενων σωματιδίων. Συγκεκριμένα, για τα αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀ διεξήχθησαν εκτεταμένες χημικές αναλύσεις, βάσει Ευρωπαϊκών προτύπων, ως προς οργανικό-στοιχειακό άνθρακα, ιόντα, μέταλλα και ιχνοστοιχεία, με στόχο την ταυτοποίηση της χημικής τους σύστασης και τον καθορισμό των κύριων πηγών εκπομπής τους.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε παραχωρήθηκε από το διαπιστευμένο Εργαστήριο Μέτρησης Ποιότητας Αέρα Εσωτερικού Περιβάλλοντος του Φυσικού τμήματος. Για τις χημικές αναλύσεις των φίλτρων αιωρούμενων σωματιδίων ως προς οργανικό – στοιχειακό άνθρακα, υδατοδιαλυτά ανιόντα και μέταλλα, χρησιμοποιήθηκαν οι εργαστηριακές εγκαταστάσεις του Ερευνητικού Ινστιτούτου “ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος” όπως και του τομέα Χημείας Περιβάλλοντος του ΕΚΠΑ. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε μελέτη σχετικά με την ποιοτική και ποσοτική κατανομή των αερομεταφερόμενων μυκήτων ύστερα από συνεργασία με την φοιτήτρια του Τμήματος Βιολογίας ΕΚΠΑ, κ. Άρτεμη Ζόμα, στα πλαίσια της διπλωματικής της εργασίας υπό την επίβλεψη της Αναπλ. Καθηγήτριας κ. Ευαγγελίας Καψανάκη-Γκότση. Τα αποτελέσματα έχουν συσχετισθεί με φυσικοχημικές παραμέτρους της παρούσας διατριβής.

Τα πειράματα στο σύνολο τους, παρουσιάζουν πρωτοτυπία καθώς συνδυάζουν για πρώτη φορά σε εσωτερικούς χώρους με πράσινη οροφή, μετρήσεις που περιλαμβάνουν τη φυσική του κτιρίου, την ποιότητα του αέρα στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον και την παρουσία αερομεταφερόμενων μυκήτων. Επίσης, επιχειρήθηκε ο προσδιορισμός της έκθεσης μιας ευπαθούς πληθυσμιακής ομάδας όπως είναι τα παιδιά αλλά και του προσωπικού που εργάζεται στο σχολικό συγκρότημα, σε εσωτερικές και άμεσες εξωτερικές συγκεντρώσεις αέριων ρύπων καθώς και η κατανόηση των παραμέτρων που καθορίζουν τα επίπεδα των συγκεντρώσεων αυτών (εποχικότητα, ανθρώπινη δραστηριότητα και μετεωρολογία). Επιπροσθέτως, από άποψη ενεργειακής αναβάθμισης του κτιρίου ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέταση της επιρροής της πράσινης οροφής στις εσωτερικές συνθήκες θερμικής άνεσης των αιθουσών διδασκαλίας του σχολικού συγκροτήματος.

Λέξεις-κλειδιά: Ποιότητα αέρα, Πράσινες στέγες, Ρυθμός αερισμού, Αερομεταφερόμενοι μύκητες, Εκτίμηση πηγών εκπομπής

ABSTRACT

In the context of this thesis, experimental results from a typical school building in Athens, equipped partly with a green roof system are investigated. Environmental monitoring took place in six classrooms located both under the concrete and the green roof sectors as well as in the immediate external environment during the warm and cold periods of a school year. Daily measurements of pollutants CO₂, TVOC (Total Volatile Organic Compound), PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ and airborne fungi were performed in selected classrooms. Moreover, levels of temperature (T), relative humidity (RH) and different ventilation rates were examined, in order to assess the indoor environmental conditions.

The results highlight that during summer, the green roof reduces temperature in a classroom on the top floor, in comparison with the respective classroom under the concrete roof and that relative humidity remained relatively stable for both classrooms. Amid winter, a reverse behavior occurs only for temperature. However, percentages of thermal discomfort remained relatively high for all classrooms during all experimental period. Moreover, air exchange rates (AER) were calculated by using the CO₂ as a tracer gas (decay method) within all classrooms. The results demonstrated insufficient ventilation for all experimental sights.

Concentrations of all investigated air pollutants found to be elevated during class hours and significantly affected by activities of pupils and seasonality. However, the different type of roof did not seem to affect significantly the results of indoor air quality regime. Indoor coarse particles (PM₁₀) tend to correlate with specific genera of airborne fungi. In addition, source apportionment of PM₁₀ demonstrated that vehicle exhausts (ambient environment) and resuspension (indoors) found to be the main sources of emission.

This thesis is innovative as it consists the first environmental experiment referring to different types of roof on the same educational building, which is accomplished in Greece.

Keywords: Air quality, Green roofs, Air exchange rate, Airborne fungi, Source apportionment

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	17
2.1 Βασικές παράμετροι ποιότητας αέρα εσωτερικού περιβάλλοντος.....	17
2.1.1 Γενικά	17
2.1.2 Διοξείδιο του άνθρακα	19
2.1.3 Πτητικές Οργανικές Ενώσεις.....	22
2.1.4 Αιωρούμενα Σωματίδια	27
2.1.5 Θεσμοθετημένα όρια έκθεσης	39
2.1.6 Θερμοκρασία-Σχετική Υγρασία.....	43
2.1.7 Βιοαερολύματα	45
2.1.8 Αερισμός.....	47
2.2 Πράσινες οροφές στα κτίρια	50
2.2.1 Ορισμός και βασικές έννοιες	50
2.2.2 Θερμική επίδραση φυτεμένων οροφών.....	55
2.3 Ποιότητα αέρα και πράσινες οροφές σε σχολεία.....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	61
3.1 Μεθοδολογία πειραματικής μελέτης	61
3.1.1 Τοποθεσία πειράματος – θέσεις πειραματικού εξοπλισμού.....	61
3.1.2 Πρωτόκολλο και περίοδοι μετρήσεων	69
3.2 Πειραματικός εξοπλισμός	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΑΣΙΝΗΣ ΣΤΕΓΗΣ ΚΑΙ ΑΕΡΙΣΜΟΣ	77
4.1 Γενικά.....	77
4.1.1 Αποτελέσματα για όλη την πειραματική περίοδο	77
4.1.2. Μηνιαίες μεταβολές.....	84
4.1.3. Ποσοστά εκτός ορίων και ημέρες ενδιαφέροντος.....	95
4.2 Επίπεδα αερισμού και συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα	99
4.2.1 Αποτελέσματα ολόκληρης της πειραματικής περιόδου	99
4.2.2 Αποτελέσματα ανά μήνα	103

4.2.3	Συσχετίσεις και κατανομές συχνοτήτων	105
4.2.4	Ρυθμός αερισμού (Air Exchange Rate)	111
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΕΡΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.....		115
5.1	Συνολικές Πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOC)	115
5.1.1	Αποτελέσματα ολόκληρης της πειραματικής περιόδου	115
5.1.2	Αποτελέσματα ανά μήνα	120
5.1.3	Αναλογία εσωτερικών-εξωτερικών συγκεντρώσεων (In/Out ratio).....	124
5.1.4	Συσχετίσεις μεταξύ των αιθουσών	126
5.2	Αερομεταφερόμενοι μύκητες (Airborne Fungi).....	128
5.2.1	Ανάπτυξη σπορίων υπό διαφορετικές εσωτερικές κλιματικές συνθήκες	128
5.2.2	Υπολογισμός δείκτη έκθεσης σε αερομεταφερόμενους μύκητες (Exposure Dose)	134
5.3	Αιωρούμενα σωματίδια (PM).....	137
5.3.1	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	137
5.3.2	Ημερήσια αποτελέσματα	145
5.3.3	Αποτελέσματα συσχετίσεων	152
5.3.4	Χημική ανάλυση αιωρούμενων σωματιδίων.....	154
5.4	Συσχετισμός και συνδυαστική ανάλυση των μετρούμενων παραμέτρων	173
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....		177
6.1	Ανακεφαλαίωση αποτελεσμάτων	178
6.2	Γενικά Συμπεράσματα	182
6.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	183
Βιβλιογραφία		184
Κατάλογος Συντομογραφιών.....		206
Συμβολισμοί.....		208
Ευρετήριο Εικόνων.....		212
Ευρετήριο Πινάκων		213
Ευρετήριο Σχημάτων		216
Παράρτημα Α: Τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε		220
Παράρτημα Β: Βάση δεδομένων υψηλής ποιότητας		231
Παράρτημα Γ: Μηνιαία αποτελέσματα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας ανά αίθουσα		232
Παράρτημα Δ: Αποτελέσματα διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂)		260
Παράρτημα Ε: Πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOC)		321
Παράρτημα ΣΤ: Αιωρούμενα Σωματίδια (PM)		359

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση των προηγούμενων δεκαετιών, μεγάλο μέρος αναφορικά με τις μετρήσεις αέριας ρύπανσης, κατείχαν έρευνες με προσανατολισμό το εξωτερικό περιβάλλον όπου ζει και δραστηριοποιείται ο άνθρωπος. Η ποιότητα του αέρα των εσωτερικών χώρων άρχισε να αναφέρεται ως ζήτημα στο τέλος της δεκαετίας του '60, αν και οι πρώτες μελέτες εμφανίστηκαν περίπου δέκα έτη αργότερα (Spengler, 1983). Η ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος (Indoor Environmental Quality - IEQ) έχει αναδειχθεί σε ένα σημαντικότατο ζήτημα δημόσιας υγείας, μια που έρευνες έχουν αποδείξει ότι τα επίπεδα μόλυνσης στο εσωτερικό είναι υψηλότερα από αυτά του εξωτερικού περιβάλλοντος (Montgomery και Kalman, 1989). Ανησυχία για τις αρνητικές επιπτώσεις κακής IEQ ξεκίνησαν τη δεκαετία του 1970, όταν αναφέρθηκαν τα πρώτα προβλήματα υγείας που σχετίζονταν με κτίρια (Kreiss, 1988). Έτσι, τα επόμενα χρόνια η επιστημονική κοινότητα έστρεψε μαζικά το ενδιαφέρον της και σε θέματα ποιότητας αέρα εσωτερικού περιβάλλοντος (Burge et al., 1987, Mendell, 1993, Skov et al., 1987, Sundell, 1994) καθώς οι άνθρωποι περνούν περισσότερο από το 90% του χρόνου τους εντός των κτιρίων (Hörpe, 2002). Στην έρευνά τους, που περιλάμβανε περισσότερους από 10.000 συμμετέχοντες από τις Η.Π.Α. και τον Καναδά, οι Leech et al., 2004 εντόπισαν ότι το καλοκαίρι μόλις το 10% μιας ημέρας ενός εργαζομένου αναφέρεται σε εξωτερικό περιβάλλον, ενώ κατά τη διάρκεια του χειμώνα το ποσοστό αυτό μειώνεται ακόμη περισσότερο φτάνοντας το 2% με 4%. Αυτή η συμπεριφορά είναι τυπική σε βιομηχανικές χώρες, ειδικά σε όσες παρουσιάζουν ακραία καιρικά φαινόμενα και θερμοκρασίες.

Από το 1984 ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (World Health Organization-WHO) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το 30% των νέων και ανακαινισμένων κτιρίων παγκοσμίως μπορούν να παρουσιάσουν πολύ υψηλές συγκεντρώσεις αέριων ρύπων. Άλλωστε, οι κάτοικοι των μεγάλων αστικών κέντρων δαπανούν το μεγαλύτερο μέρος της μέρας τους, έως και το 87%, στους χώρους αυτούς είτε λόγω εργασίας είτε λόγω μόνιμης κατοίκησης (Jenkins et al., 1992). Το γεγονός αυτό από μόνο του αναδεικνύει τη σημαντικότητα της ύπαρξης ενός εσωτερικού μικροπεριβάλλοντος όπου οι επικρατούσες συνθήκες δεν θα επηρεάζουν αρνητικά την υγεία του ανθρώπινου οργανισμού. Ως εκ τούτου, θέματα που σχετίζονται με τις ελλείψεις στον αέρα εσωτερικών χώρων θα αποτελέσουν ένα από τα πιο σημαντικά περιβαλλοντικά ζητήματα τα επόμενα χρόνια (Arun Srivastava και V.K.Jain, 2007). Όσον αφορά στα αίτια που ευθύνονται για την κακή ποιότητα του αέρα των εσωτερικών χώρων, αυτά περιλαμβάνουν:

1. Την υγρασία, η οποία σε αυξημένα επίπεδα εντός του κτιρίου έχει βρεθεί να συσχετίζεται με την εμφάνιση αλλεργιών - άσθματος (Sundell, 1993, Bornehag et al., 2001).
2. Τον εξαερισμό. Επιστημονικά στοιχεία υποδεικνύουν ότι οι ρυθμοί εξαερισμού εξωτερικού αέρα (Air Exchange Rate) κάτω από 25 s^{-1} ανά άτομο σε εμπορικά και δημόσια κτίρια είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με αυξημένα συμπτώματα αναπνευστικών ασθενειών (Sundell, 1994, Wargocki et al., 2002).

3. Τις εκπομπές των υλικών κατασκευής του κτιρίου κυρίως όσον αφορά σε οργανικές πτητικές ενώσεις (VOC) και φορμαλδεΐδη (CH₂O).
4. Τη χημική σύσταση των ρυπαντών του εσωτερικού αέρα καθώς ενδέχεται να έχουν διαφορετική επίδραση (αναλόγως του είδους τους) στον ανθρώπινο οργανισμό.
5. Τα υλικά καθαρισμού και συντήρησης του κτιρίου.
6. Την ανθρώπινη δραστηριότητα (κυρίως το κάπνισμα).

Κατά γενική ομολογία τα αποτελέσματα των ερευνητών καταλήγουν στο συμπέρασμα, ότι στους εσωτερικούς χώρους είναι πιθανό οι άνθρωποι να εκτίθενται σε υψηλότερες συγκεντρώσεις ρύπων σε πολύ μεγαλύτερο ποσοστό σε σύγκριση με το εξωτερικό περιβάλλον, λόγω του ότι αθροίζεται η εσωτερική ρύπανση με την εξωτερική (Klepeis et al., 2001). Η κύρια αιτία του γεγονότος αυτού είναι η ύπαρξη εσωτερικών πηγών αέριας ρύπανσης με τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι εξωτερικές πηγές ρύπανσης όπως τα οχήματα, οι βιομηχανικές μονάδες, οι καμινάδες των σπιτιών είναι σαφώς πιο ρυπογόνες από τις εσωτερικές, έχουν όμως τη δυνατότητα να διαχυθούν στην ατμόσφαιρα και να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις ώστε να μην δημιουργούν υψηλές συγκεντρώσεις, όπως ακριβώς συμβαίνει στην περίπτωση των εσωτερικών πηγών. Εκεί υπάρχει μεν ο μικρότερος βαθμός ρύπανσης αλλά στο μικρό χώρο όπου πραγματοποιείται, προκαλεί υψηλές συγκεντρώσεις επειδή παγιδεύεται λόγω του κακού ή ανεπαρκούς αερισμού και καθιστά το περιβάλλον αφόρητο για τον ανθρώπινο οργανισμό. Πρέπει βέβαια να τονιστεί ότι το άμεσο εξωτερικό περιβάλλον επηρεάζει και αυτό με τη σειρά του την ποιότητα του αέρα ενός κλειστού χώρου, ειδικά εάν αυτός έρχεται σε άμεση επαφή μαζί του (π.χ. από παράθυρα, μπαλκονόπορτες). Τα συμπτώματα που δημιουργούνται κατά την παραμονή των ανθρώπων σε τέτοιους χώρους σχετίζονται άμεσα με το κτίριο, όπως προαναφέρθηκε, και ονομάζονται Building Related Symptoms (BRS). Εμφανίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία και ως Sick Building Syndrome (SBS) (Erdmann και Arpe, 2004).

Παρ' ότι υπάρχουν αρκετές έρευνες που μελετούν την ποιότητα αέρα εντός γραφείων ή κατοικιών, δεν έχει δοθεί η ίδια προσοχή σε σχολικά κτίρια (Lee & Guerin, 2009). Αυτό έχει συμβεί πάρα τη μεγάλη σημασία που έχει η αέρια ρύπανση στα αναπτυσσόμενα σώματα των παιδιών, στην υγεία τους και στη σχολική τους επίδοση και παρά την έντονη δημόσια απαίτηση για καλύτερη IEQ στα σχολεία. Στις περισσότερες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι μαθητές περνούν έως και το 80% της ημέρας τους εντός εσωτερικών χώρων και μάλιστα τον περισσότερο χρόνο στις τάξεις των Δημοτικών σχολείων, σε σύγκριση με άλλους χώρους, εξαιρώντας τις κατοικίες τους (Annesi-Maesano et al., 2012). Συνεπώς η IEQ στις σχολικές αίθουσες, είναι ένα θέμα ύψιστης σημασίας. Όπως και άλλα κτίρια, έτσι και τα σχολικά είναι πιθανό να εμφανίσουν προβλήματα ποιότητας αέρα, που οφείλονται στην λάθος χρήση και συντήρησή τους. Ο λόγος επιλογής των παιδιών και όχι οποιασδήποτε άλλης πληθυσμιακής ομάδας αν και φαντάζει προφανής οφείλεται στο ότι τα παιδιά, ιδιαίτερα αυτά των τόσων μικρών ηλικιών, είναι περισσότερο από κάθε άλλη πληθυσμιακή κατηγορία ευάλωτα λόγω του γεγονότος ότι βρίσκονται στην ανάπτυξη. Οι οργανισμοί τους, όπως και το αναπνευστικό τους σύστημα, είναι κατά πολύ πιο επιρρεπή στα διάφορα ερεθίσματα που δέχονται καθώς εισπνέουν μεγαλύτερο όγκο αέρα σε σύγκριση με τους ενήλικες λόγω του χαμηλού τους βάρους και της περιορισμένης ανάπτυξης του

ανοσοποιητικού τους συστήματος (Faustman et al., 2000, Godoi et al., 2009, Madureira et al., 2012, Roveli et al., 2014). Αυτός είναι και ο λόγος που κατά τη τελευταία δεκαετία λαμβάνεται ιδιαίτερη μνεία στις μετρήσεις ποιότητας αέρα σε σχολεία. Δεν είναι λίγοι άλλωστε οι ερευνητές που έχουν κάνει προσπάθεια άμεσης σύνδεσης των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν μέσα στις αίθουσες με τα διάφορα αναπνευστικά προβλήματα που παρουσιάζουν κατά καιρούς οι μαθητές (Peters et al., 2000, Samet et al., 2000, Le Tertre et al., 2002).

Δεν είναι όμως μόνο τα βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα συμπτώματα στην υγεία που μπορεί να προκληθούν από ένα επιβαρυσμένο εσωτερικό περιβάλλον. Υπάρχει επιπροσθέτως μια πληθώρα άλλων προβλημάτων, όπως για παράδειγμα η δυσφορία που μπορεί να αισθανθούν οι μαθητές κατά τη διάρκεια του μαθήματος ή η μείωση της παραγωγικότητά τους. Τα συμπτώματα αυτά δεν είναι καθόλου ασήμαντα καθότι κρίνονται ικανά να επηρεάσουν ακόμα και τους ενήλικες που βρίσκονται εντός των αιθουσών (διδακτικό προσωπικό) (S.C. Lee και M. Chang, 2000). Σε ακραίες περιπτώσεις, όπως σε σχολικά συγκροτήματα των Η.Π.Α., παρατηρήθηκε ότι η κακή ποιότητα αέρα και ο ανεπαρκής αερισμός ήταν η βασική αιτία για την επιλεκτική απουσία των παιδιών από το μάθημα (Shendell et al., 2004).

Κάνοντας μια σύντομη αναφορά στους τρόπους αντιμετώπισης των παραπάνω προβλημάτων, οι περισσότερες έρευνες καταλήγουν στο ότι πρέπει να υπάρχει συχνός και επαρκής εξαερισμός, είτε αυτός είναι φυσικός με τη χρήση παραθύρων ή μπαλκονόπορτας, είτε μηχανικός, ο οποίος απαιτεί τη λειτουργία ανεμιστήρων που εισάγουν τον φρέσκο αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον στο εσωτερικό, αποβάλλοντας έτσι τον «πολυδιατηρημένο» αέρα από το κτίριο (Hummelgaard et al., 2007). Τα πρότυπα της ASHRAE (1999) (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) συνιστούν ελάχιστο βαθμό εξαερισμού της τάξης 8 l/s ανά άτομο για τις σχολικές αίθουσες (J. M. Daisey et al., 2003). Για να περιορίσει κανείς τους εκάστοτε αέριους ρύπους θα πρέπει να γίνει πρώτα ανίχνευση των αντίστοιχων πηγών εκπομπής. Αυτό είναι το πιο σύνθετο κομμάτι. Πρέπει να γίνει κατανοητό ωστόσο, πως κάθε εσωτερικό μικροκλίμα χαρακτηρίζεται μοναδικά με βάση τον τοπικό εξωτερικό αέρα (πολύ σημαντική η ανάδειξη συσχέτισης εσωτερικού/εξωτερικού - indoor/outdoor περιβάλλοντος), τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του κτιρίου και τις δραστηριότητες των ατόμων εντός του χώρου (Stranger et al., 2007). Επομένως, είναι ένα συνονθύλευμα παραμέτρων που προκαλούν τη ρύπανση σε έναν εσωτερικό χώρο, κάτι που δεν θα πρέπει να παραβλέπεται και να προσπερνάται αβίαστα, ώστε να βρεθεί μια ή παραπάνω αποτελεσματικές λύσεις.

Στην Ελλάδα, σύμφωνα με πρόσφατα στοιχεία της Ελληνικής Στατιστικής Υπηρεσίας (ΕΛΣΤΑΤ-<http://www.statistics.gr/>) υπάρχουν περίπου 16.700 σχολικά κτίρια. Το μεγαλύτερο ποσοστό εξ αυτών κατασκευάστηκε κατά τη περίοδο 1946-1960, χρονολογούνται δηλαδή κοντά στα 70 έτη. Το 58,8% από τα σχολεία αυτά είναι κατασκευασμένα από πέτρα ενώ τα υπόλοιπα κυρίως από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ένα εξίσου ενδιαφέρον στοιχείο είναι το είδος της οροφής. Το 61,6% των σχολικών κτιρίων στην Ελλάδα έχει οροφή με κεραμίδια ενώ το υπόλοιπο συμβατικές ταράτσες σκυροδέματος. Η έρευνα των Dascalaki και Sermpetzoglou, 2011 αναφέρει ότι αναλόγως των πέντε διαφορετικών βαθμών εκπαίδευσης, η χρήση των Ελληνικών σχολείων χωρίζεται σε: νηπιαγωγεία (38%), δημοτικά σχολεία (37%), γυμνάσια (13%), λύκεια (9%) και τεχνικά λύκεια (3%). Η συνολική έκταση που καταλαμβάνουν όλα τα σχολικά συγκροτήματα είναι 10.772.913 m², το 34% των οποίων ανήκει αποκλειστικά στις

αίθουσες διδασκαλίας. Ο συνολικός αριθμός των εγγεγραμμένων μαθητών είναι 1.357.480. Ως εκ τούτου, συμπεραίνεται ότι σε κάθε μαθητή αντιστοιχεί μια μέση επιφάνεια 7.9 m² του σχολικού κτιρίου και 2,7 m² της εκάστοτε τάξης. Σε ότι αφορά τις ενεργειακές καταναλώσεις, η ίδια έρευνα αναφέρει ότι αναλόγως της κλιματικής ζώνης (εντός Ελλάδος), κάθε σχολείο καταναλώνει κατά μέσο όρο από 49,5 kWh/m² έως και 90,8 kWh/m². Σε μια προσπάθεια μείωσης των καταναλώσεων αυτών αλλά και γενικότερης στροφής στο βιοκλιματικό σχεδιασμό και την αναβάθμιση των σχολικών κτιρίων, ο Ελληνικός Οργανισμός Σχολικών Κτιρίων σε συνεργασία με το Υπουργείο Παιδείας και Θρησκευμάτων, έχουν ξεκινήσει από το 2008, μια σειρά από βιοκλιματικές επεμβάσεις (αντικατάσταση κουφωμάτων, πράσινες στέγες, χρήση φωτοβολταϊκών, αυτόματο σύστημα ελέγχου ηλεκτρικών εγκαταστάσεων κ. ά.) σε συνολικά 193 σχολεία όλη της χώρας (Κοκμοτού, 2013). Ειδικότερα οι φυτεμένες οροφές, έχουν στόχο να βελτιώσουν τη θερμοκρασία στους εσωτερικούς χώρους και να εξοικονομούν ενέργεια ανακυκλώνοντας το νερό που χρησιμοποιείται για το πότισμα των φυτών μέσω δεξαμενών ομβρικών. Φαίνεται λοιπόν πως το αντικείμενο με το οποίο ασχολείται η παρούσα διατριβή, είναι αφενός σημαντικό καθώς εξετάζει ένα κτίριο που φιλοξενεί μια ευπαθή πληθυσμιακή ομάδα όπως οι μαθητές και αφετέρου σύγχρονο και πρωτοποριακό, καθότι ασχολείται με τα αποτελέσματα των νέων κατασκευαστικών τεχνικών που εφαρμόζονται τα τελευταία χρόνια στα σχολικά κτίρια της χώρας μας.

Το θέμα της ποιότητας αέρα εντός σχολικών κτιρίων έχει απασχολήσει αρκετές Ελληνικές ερευνητικές ομάδες, οι οποίες μετά από πειράματα σε διάφορα σχολεία έχουν καταλήξει σε σημαντικά συμπεράσματα. Η δημοσίευση των Diarouli et al., 2007a εξετάζει τις συγκεντρώσεις πολύ μικρών αιωρούμενων σωματιδίων (<1μm) σε επτά Δημοτικά σχολεία, τα οποία βρίσκονται σε περιοχές της Αθήνας με διαφορετικά χαρακτηριστικά δόμησης και ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η μελέτη επισημαίνει ότι οι εσωτερικές συγκεντρώσεις των ρύπων σε όλα τα υπό εξέταση σχολεία εμφάνισαν μεταβλητότητα κυρίως λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας στις αίθουσες (επαναιώρηση σωματιδίων) ενώ σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα είχαν και τα επίπεδα ρύπανσης του άμεσου εξωτερικού περιβάλλοντος από τα διερχόμενα οχήματα. Η έρευνα αυτή, όπως και οι αντίστοιχες των Chaloulakou και Manroidis, 2001, Siskos et al., 2001 και Synnefa et al., 2003, αποτελούν τις πρώτες ερευνητικές προσπάθειες στην Ελλάδα για την αποτύπωση της εσωτερικής αέριας ρύπανσης σε σχολικές αίθουσες. Όλες καταλήγουν στο ότι αυτού του είδους οι έρευνες μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στο σχεδιασμό αποτελεσματικών πολιτικών και λήψη μέτρων για την προστασία της δημόσιας υγείας. Μεταγενέστερες εργασίες στο αντικείμενο κατέληξαν σε εξίσου σημαντικά συμπεράσματα. Οι Dorizas et al., 2013 πραγματοποίησαν μετρήσεις ποιότητας αέρα σε 9 σχολεία (φυσικού αερισμού) σε διάφορες περιοχές της Αττικής. Συνοπτικά αναφέρουν ότι τα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων και κυρίως τα PM₁₀ κυμάνθηκαν σε εξαιρετικά υψηλά επίπεδα έως έξι φορές πάνω από τις προτεινόμενες οριακές τιμές και ότι οι εσωτερικές συγκεντρώσεις ήταν πολύ πιο αυξημένες από τις αντίστοιχες εξωτερικές, καταδεικνύοντας την ύπαρξη εσωτερικών πηγών εκπομπής. Στο ίδιο πείραμα μετρήθηκαν υψηλές τιμές συνολικών πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOC) και επιρροή του εξωτερικού αέρα στα εσωτερικά επίπεδα αερισμού. Τέλος με τη χρήση ειδικών ερωτηματολογίων, κατέστη σαφές ότι οι μαθητές συνέδεσαν την υποβάθμιση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα με τις υψηλές τιμές θερμοκρασίας, καταδεικνύοντας τη σημαντικότητα αυτής της παραμέτρου στη διαμόρφωση του μικροκλίματος μιας τάξης. Άλλες σχετικά πιο πρόσφατες έρευνες σε Ελληνικά σχολεία (Dimouidi και

Kostarela 2009, Dascalaki και Sermpetzoglou 2011, Kalimeri et al., 2016) αναφέρονται σε παρόμοια συμπεράσματα για τη ποιότητα του αέρα όπως και για την εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια αυτά.

Ένας από τους προτεινόμενους τρόπους βελτίωσης της IEQ αλλά και της εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια είναι η κατασκευή πράσινων (φυτοκαλυμμένων) οροφών, κυρίως ως προς την κατεύθυνση της βελτιστοποίησης των συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας, αναλόγως της εποχής. Μια τέτοια λύση όπως και τα πλεονεκτήματά της εξετάζονται στην έρευνα των Spala et al., 2008 η οποία αναφέρεται σε κτίρια γραφείων στην Αθήνα. Προς το παρόν, παρόμοια έρευνα για τέτοιου είδους σχολικό κτίριο στον Ελλαδικό χώρο δεν υφίσταται. Αυτό είναι και ένα από τα κίνητρα της παρούσας διατριβής, επιλέγοντας το 2^ο Δημοτικό σχολείο Νέας Σμύρνης, μέρος του οποίου καλύπτεται από πράσινη οροφή. Επομένως, οι στόχοι της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι:

- Η εξέταση των θερμικών συνθηκών που διαμορφώνονται στις αίθουσες, ύστερα από την προσθήκη πράσινης οροφής σε ένα μέρος του κτιριακού συγκροτήματος. Συγκεκριμένα, εξετάζεται ποια είναι η επίδραση μιας τέτοιου είδους επέμβασης στο κτίριο σε ότι αφορά τα επίπεδα θερμοκρασίας (T) και σχετικής υγρασίας (RH) στις αίθουσες που βρίσκονται κάτω από την πράσινη οροφή και στις αντίστοιχες κάτω από την συμβατική οροφή σκυροδέματος. Οι όποιες διαφορές επηρεάζονται σαφέστατα και από τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες κατά τη διάρκεια του έτους με τις αλλαγές των εποχών.
- Η μελέτη της φυσικής του κτιρίου και κυρίως του επαρκούς ή μη, αερισμού των σημείων ενδιαφέροντος (αίθουσες). Η έρευνα αυτή έχει τη σημασία της καθώς ο αερισμός (εν προκειμένω φυσικός) αποτελεί δομικό στοιχείο για τον χαρακτηρισμό τόσο των συνθηκών θερμικής άνεσης όσο κυρίως της ποιότητας του αέρα ενός κλειστού χώρου. Η γνώση των επιπέδων αερισμού των αιθουσών, εξηγεί σε μεγάλο βαθμό τα μετέπειτα αποτελέσματα εσωτερικής αέριας ρύπανσης.
- Η καταγραφή των επιπέδων εσωτερικής αέριας ρύπανσης με την οποία έρχονται σε επαφή οι μαθητές και το εκπαιδευτικό προσωπικό. Ειδικότερα, οι μετρήσεις αφορούν συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), συνολικών πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOC) και αιωρούμενων σωματιδίων με ισοδύναμες αεροδυναμικές διαμέτρους από 1 έως 10 μm (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀). Οι μετρήσεις αυτές στοχεύουν στις επιπτώσεις των αέριων ρύπων, στον οργανισμό μιας ευπαθούς ομάδας όπως είναι τα παιδιά ηλικίας 6-12 ετών. Για το λόγο αυτό, ελέγχεται η ενδεχόμενη υπέρβαση των θεσμοθετημένων ορίων έκθεσης για τους συγκεκριμένους ρυπαντές, οι ανθρωπογενείς ή φυσικοί παράγοντες που επηρεάζουν συγκεντρώσεις τους και τέλος τι είδους επίπτωση μπορεί να φέρει ο καθένας τους στην ανθρώπινη υγεία.
- Η ταυτοποίηση των πηγών εκπομπής των μετρούμενων αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀. Εκτός της γνώσης των επιπέδων συγκέντρωσης, ιδιαίτερης σημασίας κρίνεται και η εξακρίβωση των πηγών εκπομπής των αιωρούμενων σωματιδίων. Γνωρίζοντας την ακριβή προέλευση των ρυπαντών αυτών, προτείνονται τα κατάλληλα μέτρα αντιμετώπισης σε περιπτώσεις

υπερβολικών συγκεντρώσεων. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται μέσα από την πραγματοποίηση εξειδικευμένων χημικών αναλύσεων, βάσει Ευρωπαϊκών προτύπων, με κύριες εξεταζόμενες παραμέτρους τον οργανικό και στοιχειακό άνθρακα, τα ιόντα, τα μέταλλα και διάφορα ιχνοστοιχεία που εμπεριέχονται στα χονδρόκοκκα αιωρούμενα σωματίδια.

- Η διερεύνηση της επιρροής των βιολογικών παραμέτρων στην ποιότητα του αέρα εντός των αιθουσών. Οι αερομεταφερόμενοι μύκητες αποτελούν σημαντική παράμετρο στη διαμόρφωση της ποιότητας αέρα ενός μικροκλίματος. Τα επίπεδα μόλυνσης ενός χώρου από μούχλα είναι ένα αρκετά συνηθισμένο πρόβλημα, ιδιαίτερης σημασίας. Εξίσου σημαντικός και πιθανός είναι κάποιος ενδεχόμενος συσχετισμός ή η επιρροή των μυκήτων στις υπόλοιπες ομάδες αέριων ρύπων που συνολικά διαμορφώνουν το προφίλ της ποιότητας του αέρα των σημείων ενδιαφέροντος.
- Η συσχέτιση όλων των μετρούμενων παραμέτρων. Στόχος η ταυτοποίηση των κυριότερων παραγόντων που επηρεάζουν την εσωτερική ποιότητα του αέρα στις αίθουσες διδασκαλίας όπως και με ποιο τρόπο αυτοί συνδέονται μεταξύ τους.

Με τον τρόπο αυτό εμπλουτίζεται η ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία που αφορά αντίστοιχες έρευνες σε σχολεία, με το ιδιαίτερο όμως χαρακτηριστικό ότι μέρος του συγκεκριμένου σχολικού συγκροτήματος διαθέτει πράσινη οροφή.

Βάσει όλων των προαναφερθέντων η διατριβή ακολουθεί την παρακάτω δομή:

Στο **Κεφάλαιο 2** παρατίθεται η βιβλιογραφική έρευνα που περιλαμβάνει τις βασικότερες συνιστώσες της θερμικής συμπεριφοράς ενός κτιρίου καθώς και της ποιότητας εσωτερικού αέρα. Αναλύεται η δομή και η επιρροή των πράσινων οροφών στα κτίρια. Επιπλέον, περιγράφεται η χημική σύσταση, οι πηγές προέλευσης και οι επιπτώσεις όλων των εξεταζόμενων αέριων ρύπων ενώ αναπτύσσονται και οι βασικές αρχές του αερισμού.

Το **Κεφάλαιο 3** αναφέρεται στη μεθοδολογία και την περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων όπως και η τοποθεσία και τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του κτιρίου. Στη συνέχεια, για κάθε πειραματική καμπάνια, παρατίθεται λεπτομερής ανάλυση του χρονοδιαγράμματος των μετρήσεων, των εξεταζόμενων παραμέτρων, των πρωτοκόλλων που ακολουθήθηκαν και των θέσεων δειγματοληψίας.

Τα **Κεφάλαια 4 και 5** παραθέτουν τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, διαχωρισμένα σε δύο βασικούς άξονες. Πρώτον, εξετάζεται η επίδραση της πράσινης οροφής στη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου, παρουσιάζονται οι τιμές, το είδος και η επάρκεια του αερισμού των αιθουσών. Δεύτερον, παρατίθενται τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων από το εσωτερικό και άμεσο εξωτερικό περιβάλλον του σχολείου. Στο πλαίσιο αυτό, παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων αερομεταφερόμενων μυκήτων εντός του σχολείου που πραγματοποιήθηκαν παράλληλα με τις μετρήσεις της ποιότητας αέρα, πραγματοποιείται χημική ανάλυση των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ με σκοπό τον καθορισμό των πηγών εκπομπής και τέλος

συσχετίζονται όλες οι βασικές παράμετροι με σκοπό την ομαδοποίηση των αέριων ρύπων και την εύρεση σχέσεων μεταξύ τους.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα και οι διαπιστώσεις της διδακτορικής διατριβής ενώ προτείνονται αντικείμενα και ιδέες για μελλοντική έρευνα πάνω στο θέμα.

Τέλος, στα Παραρτήματα περιλαμβάνονται ορισμένα γραφήματα τα οποία είναι συμπληρωματικά της διατριβής, όπως και τεχνικές λεπτομέρειες για την αρχή λειτουργίας του πειραματικού εξοπλισμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Βασικές παράμετροι ποιότητας αέρα εσωτερικού περιβάλλοντος

2.1.1 Γενικά

Αέριος ρύπος ορίζεται κάθε είδος ουσίας, χημικής ένωσης ή ακτινοβολίας σε ποσότητα, συγκέντρωση ή διάρκεια τέτοια ώστε να είναι δυνατόν να προκληθούν άμεσες ή έμμεσες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, στους ζωντανούς οργανισμούς και στα οικοσυστήματα. Πρωταρχική κατηγοριοποίηση των ρύπων είναι η προέλευσή τους. Διακρίνονται σε πρωτογενείς ρύπους οι οποίοι εκπέμπονται απευθείας από την πηγή προέλευσης και δευτερογενείς, οι οποίοι δημιουργούνται από τους πρωτογενείς στην ατμόσφαιρα κατόπιν χημικών αντιδράσεων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα πρωτογενών αέριων ρυπαντών είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το μονοξείδιο του αζώτου (NO), το διοξείδιο του θείου (SO₂) ενώ δευτερογενών, το όζον (O₃) και το διοξείδιο του αζώτου (NO₂). Ο σχηματισμός των δευτερογενών ρύπων μπορεί να λάβει χώρα σε διαφορετικό χρόνο και τόπο από τους αντίστοιχους των πρόδρομων ουσιών, από τις οποίες προέρχονται. Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα οι δευτερογενείς ρύποι μπορεί να είναι πολύ πιο επικίνδυνοι από τους πρωτογενείς (Lahey et al., 2016).

Δεύτερη κατηγορία διαχωρισμού των ρύπων αποτελεί η κατάσταση στην οποία βρίσκονται στο περιβάλλον (Brunekreef et al., 2002). Τρεις είναι οι πιθανές καταστάσεις στις οποίες απαντώνται: στερεοί, υγροί και αέριοι ρύποι (με τη μορφή αερίων ή ατμών). Οι υγροί και οι στερεοί μπορούν να βρεθούν εναποτιθέμενοι στα διάφορα αντικείμενα ενός χώρου ενώ οι αέριοι, είτε στον αέρα εξωτερικού περιβάλλοντος είτε εσωτερικών χώρων.

Τρίτη κατηγορία αποτελεί η χημική τους σύσταση. Με βάση αυτή, χωρίζονται σε:

- Μη οργανικές ενώσεις οι οποίες περιέχουν άνθρακα.
- Οργανικές ενώσεις όπως για παράδειγμα οι πτητικές οργανικές ενώσεις ή αλλιώς VOC (volatile organic compounds).
- Ενώσεις που περιέχουν θείο και άζωτο.
- Σωματίδια της ύλης.

Η τέταρτη κατηγορία αφορά τις πηγές εκπομπής τους, οι οποίες διαχωρίζονται σε ανθρωπογενείς και φυσικές. Οι πρώτες μπορεί να είναι είτε αστικές (οχήματα, τζάκια) και βιομηχανικές πηγές, είτε αγροτικές και γεωργικές. Συνεισφέρουν λιγότερο στις εκπομπές αερίων ρύπων και οδηγούν σε υψηλές συγκεντρώσεις (ατμοσφαιρικά επεισόδια). Οι κυριότερες φυσικές πηγές είναι οι πυρκαγιές, οι ηφαιστειακές εκρήξεις, η αποσάθρωση από ανέμους, η αποσύνθεση οργανικής ύλης κ.α. Η ατμόσφαιρα έχει τους κατάλληλους μηχανισμούς ούτως ώστε να αντιμετωπίζει επαρκώς τους φυσικώς παραγόμενους ρύπους. Αντίθετα, οι ανθρωπογενείς ρύποι έχουν ιδιότητες όπως δυνατότητα μεταφοράς με αέριες μάζες, μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα και κατά συνέπεια τη

δυνατότητα να προκαλούν χημικές αντιδράσεις με οποιαδήποτε νεοεισελθούσα ουσία στην ατμόσφαιρα.

Η συγκέντρωση των ρύπων αναγράφεται με 2 τρόπους:

- Κατά βάρος: Μάζα ρύπου ανά μονάδα όγκου αέρα ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- Κατά όγκο: Όγκος ρύπου ανά όγκο αέρα. Μετράται σε ppm: σωματίδια ανά εκατομμύριο - Όγκος ρύπου/ 10^6 όγκου αέρα είτε σε ppb: σωματίδια ανά δισεκατομμύριο - Όγκος ρύπου/ 10^9 όγκου αέρα.

Οι κύριες πηγές αέριων ρύπων στους εσωτερικούς χώρους των σχολείων είναι οι δραστηριότητες των μαθητών και των εκπαιδευτικών που βρίσκονται στις αίθουσες, τα υλικά από τα οποία είναι χτισμένα τα σχολεία, τα διάφορα έπιπλα που βρίσκονται μέσα στις τάξεις (θρανία, καρέκλες, ντουλάπες κ.α.), προϊόντα καθαρισμού που χρησιμοποιούνται καθώς και ο αέρας που εισέρχεται από τον εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο (Xu et al., 2018). Η συγκέντρωση των ρύπων μέσα σε κλειστούς χώρους εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

1. Τον όγκο του αέρα που εσωκλείεται στον χώρο.
2. Τον ρυθμό παραγωγής και απελευθέρωσης του ρύπου στον χώρο.
3. Τον ρυθμό εξάλειψης του ρύπου μέσω αντιδράσεων, φιλτραρίσματος ή καθίζησης.
4. Τον ρυθμό εξαερισμού με φυσικό ή μηχανικό τρόπο και εισόδου κατά συνέπεια του εξωτερικού αέρα.
5. Τη συγκέντρωση του ρύπου στον εξωτερικό χώρο.
6. Τις τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας.

Ο πίνακας 2.1 συνοψίζει κάποια από τα παραπάνω στοιχεία και προσθέτει κάποια επιπλέον.

Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση των παραγόντων που επηρεάζουν την εσωτερική ατμοσφαιρική ποιότητα (Νικολάου, 2007)

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ	
ΦΥΣΙΚΟΙ	Θερμοκρασία (20-26° C)
	Σχετική υγρασία (20-70%)
	Αερισμός (περίπου 8l/s κατά άτομο, απουσία καπνιστών)
	Φωτισμός
	Θόρυβος (<70-80 dB) και δονήσεις
	Σκόνη
ΧΗΜΙΚΟΙ	Αιωρούμενα σωματίδια (προϊόντα καύσης, ίνες αμιάντου, υαλονήματα)
	Βαρέα μέταλλα, τοξικά στοιχεία (Pb, Cd, As, Hg, κ.α.)
	Ιόντα
	Πτητικές οργανικές ενώσεις
ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΙ	Ανόργανες αέριες ενώσεις (SO ₂ , NO _x , O ₃ , Rn, κ.α.)
	Μικροοργανισμοί (ισί, βακτήρια, μύκητες, κ.α)
	Αλλεργιογόνα (γύρη, έντομα, ζώα, κ.α)

Παρατίθενται επιπροσθέτως παρακάτω μερικοί τρόποι αντιμετώπισης των παραπάνω προβλημάτων (Das et al., 2018):

- ❖ "Διαχείριση Πηγών". Περιλαμβάνει αναγνώριση της πηγής και κατάλληλης διαμόρφωσης της. Φαίνεται να είναι ο πιο αποτελεσματικός και δραστικός τρόπος επίλυσης του προβλήματος, όχι όμως και ο μοναδικός. Το αρνητικό με την επιλογή αυτή, στη σημερινή εποχή είναι πως κάθε αντικείμενο σε ένα χώρο αποτελεί και μια μικρή πηγή, οπότε η επόμενη λύση είναι η αλλαγή και χρήση σωστά και προσεκτικά διαλεγμένων υλικών.
- ❖ Μικρότερης έντασης δραστηριότητες αποφέρουν λιγότερους ρύπους. Στην παρούσα φάση, στις αίθουσες δεν πραγματοποιούνται δραστηριότητες που θεωρούνται ακραίες για τα δεδομένα των κτηρίων. Άρα, ίσως η πιο σωστή διατύπωση στην προκειμένη κατάσταση ως τρόπος αντιμετώπισης θα ήταν να μην υπάρχουν τάξεις με παραπάνω παιδιά από το προβλεπόμενο. Η μέγιστη χωρητικότητα μίας τάξης με φυσικό αερισμό σύμφωνα με το πρότυπο ASHRAE Standard 62-1989 είναι 50 άτομα/100 m².
- ❖ Σχεδιαστική παρέμβαση στο χώρο, με τη χρήση μηχανικών συστημάτων εξαερισμού ή τοποθέτηση υλικών με απαλές επιφάνειες ώστε να καθαρίζονται εύκολα και να αποφεύγεται η επαναιώρηση των ρύπων.
- ❖ Αραίωση των ρύπων με μεταγωγή, διασπορά ή διάχυση, σε περίπτωση μεγάλης συγκέντρωσης σε ένα χώρο, ούτως ώστε να μην δημιουργούν ασφυκτικές καταστάσεις.

2.1.2 Διοξείδιο του άνθρακα

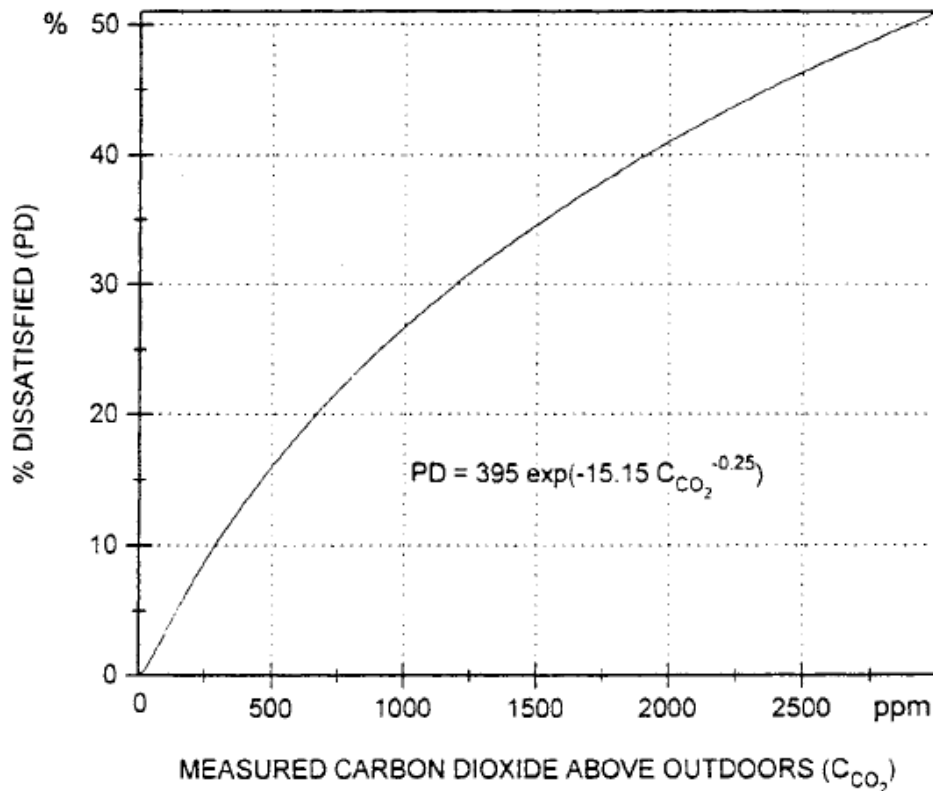
2.1.2.1 Χαρακτηριστικά

Ανόργανη χημική ένωση που αποτελείται από δύο άτομα οξυγόνου ενωμένα με ομοιοπολικό δεσμό με ένα άτομο άνθρακα, με χημικό τύπο CO₂. Είναι αέριο συστατικό της γήινης ατμόσφαιρας, άχρωμο, άοσμο και άγευστο σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας και ανήκει στα αέρια του θερμοκηπίου. Η σημασία του ως το βασικό προϊόν της ανθρώπινης εκπνοής είχε ήδη αναγνωριστεί από τον Pettenkofer, ο οποίος, λαμβάνοντας υπόψη την υγιεινή του ανθρώπινου οργανισμού, πρότεινε το 0.1% του CO₂ σαν οριακή τιμή για ένα επαρκώς αεριζόμενο δωμάτιο (700 ppm σε υπνοδωμάτια) (Pettenkofer, 1858). Είχε γίνει, λοιπόν, αντικείμενο μελέτης ήδη από τον 19^ο αιώνα, αναδεικνύοντας έτσι τη σπουδαιότητά του και τη σημαντικότητά του προς περαιτέρω μελέτη.

Το μόριο του διοξειδίου του άνθρακα (O=C=O) περιέχει δύο διπλούς δεσμούς και έχει γραμμική μορφή. Αποτελεί σταθερή ένωση και σε κατάλληλες συνθήκες ανάγεται προς άνθρακα (C) ή προς μονοξείδιο του άνθρακα (CO), συμπεριφέρεται δηλαδή σαν οξειδωτικό (Βασιλικιώτης, 1986). Λόγω των ιδιοτήτων του χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία τροφίμων, πετρελαίου όπως και στη χημική βιομηχανία. Βρίσκει εφαρμογές σε πολλά καταναλωτικά προϊόντα που απαιτούν πεπιεσμένο αέριο γιατί είναι φθινό, άφλεκτο και μεταβαίνει από την αέρια φάση στην υγρή, σε θερμοκρασία δωματίου και σε χαμηλή σχετικά πίεση. Επιπλέον αποτελεί ένα από τα βασικά προϊόντα καύσης όταν

πρόκειται για θέματα χρήσης οικιακής ενέργειας (μαγειρική ή θέρμανση). Συσκευές που έχουν ως βασικό καύσιμο αέριο, κηροζίνη, ξυλεία, θεωρούνται γενικά ως βασικές πηγές διοξειδίου του άνθρακα, εξαρτώμενες όμως από τον τρόπο που η εξάτμιση της συσκευής συνδέεται με το εσωτερικό περιβάλλον.

Το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί έναν από τους βασικούς ρύπους του αέρα εσωτερικού περιβάλλοντος. Εκπέμπεται κυρίως ως προϊόν ανθρώπινης μεταβολικής δραστηριότητας (εκπνοή). Φθάνοντας σε ασυνήθιστα υψηλά επίπεδα μπορεί να προκαλέσει διαταραχές στον ανθρώπινο οργανισμό (Wolkoff, 2018). Στη διεθνή βιβλιογραφία, τα πειράματα μέτρησης των επιπέδων συγκέντρωσης του CO₂ αποτελούν δείκτη της επάρκειας αερισμού του εκάστοτε χώρου, για κάθε άνθρωπο μέσα σε αυτόν (Santamouris et al., 2008 , Fromme et al., 2008, Hanninen et al., 2013, Emmertich et al., 2017). Επίσης χρησιμοποιείται και ως μέτρο ένδειξης της πληρότητας μιας τάξης, αναφορικά με τα σχολεία, αν δηλαδή υπάρχουν παραπάνω παιδιά από το επιτρεπτό ή όχι (Blondeau et al., 2005). Τέλος χρησιμοποιείται για πάνω από ένα αιώνα και σαν δείκτης των βιολογικών αποβολών του ανθρώπου με πολύ καλά αποτελέσματα (Huber και Wanner, 1983). Στο σχήμα 2.1 φαίνεται το ποσοστό δυσφορίας που νιώθουν οι άνθρωποι, όταν υπάρχουν υψηλές συγκεντρώσεις CO₂ σε κλειστό χώρο και μοναδική πηγή εκπομπής είναι η εκπνοή τους.

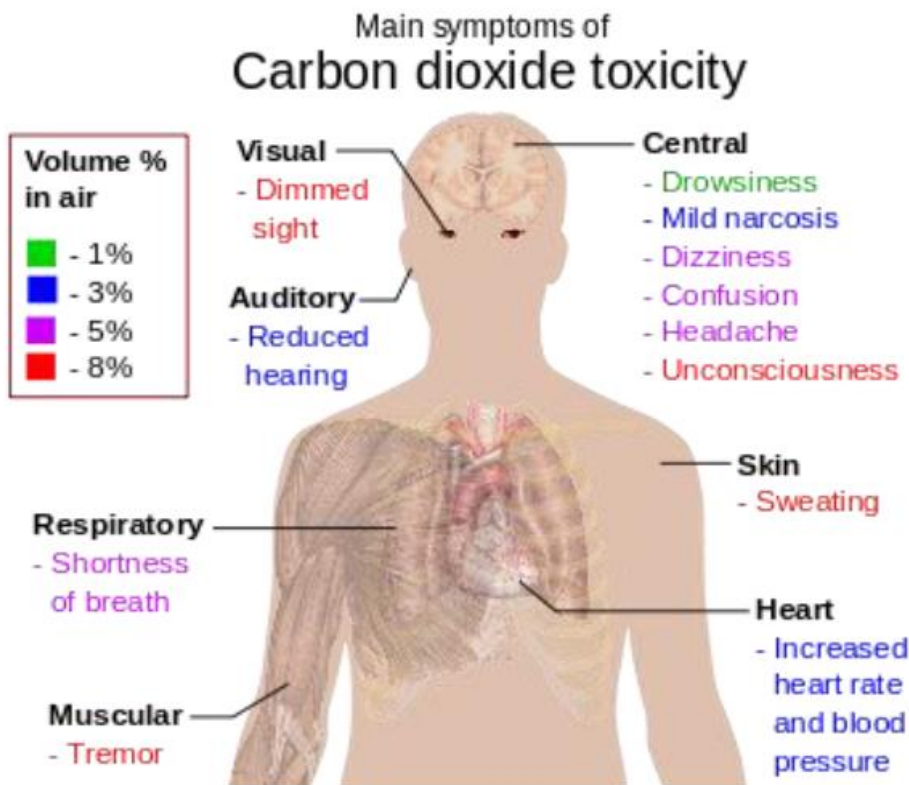


Σχήμα 2.1: Το διοξείδιο του άνθρακα ως δείκτης των βιολογικών αποβολών. Η καμπύλη δείχνει την ποιότητα αέρα όπως γίνεται αντιληπτή (% δυσαρέσκεια – Percentage of Dissatisfaction) συναρτήσει της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα (Maroni et al.,1995)

2.1.2.2 Επίδραση στον άνθρωπο

Η πολύωρη έκθεση του ανθρώπου σε μέτριες συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες για τον μεταβολισμό του ασβεστίου και του φωσφόρου ενώ ταυτοχρόνως το διοξείδιο του άνθρακα είναι τοξικό για την καρδιά και προκαλεί αρρυθμίες. Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.1, η τοξικότητα και οι επιπτώσεις της αυξάνονται με την αύξηση της περιεκτικότητας του CO₂ στον αέρα κατά (Meislich et al., 1983):

- Περιεκτικότητα 1%. Σε παρατεταμένη έκθεση ενδέχεται να προκαλέσει υπνηλία.
- Περιεκτικότητα 3%. Συμπεριφέρεται ως ήπιο ναρκωτικό προκαλώντας αυξημένη αρτηριακή πίεση και καρδιακό παλμό. Παράλληλα μειώνει την ακοή.
- Περιεκτικότητα 5%. Προκαλεί διέγερση του αναπνευστικού συστήματος, ζάλη, σύγχυση και δυσκολία στην αναπνοή συνοδευόμενη από κεφαλαλγία και δύσπνοια.
- Περιεκτικότητα 8%. Προκαλεί εφίδρωση, παραισθήσεις και απώλεια συνείδησης ύστερα από έκθεση πέντε έως δέκα λεπτών.



Εικόνα 2.1: Οι επιπτώσεις του διοξειδίου του άνθρακα στον ανθρώπινο οργανισμό, ανάλογα με την περιεκτικότητά του στον αέρα (Häggström, 2014).

Επιπλέον παρενέργειες στον ανθρώπινο οργανισμό έχουν καταγραφεί η αλλαγή του pH του αίματος, όπως και η μειωμένη ικανότητα για έντονη και επίπονη φυσική άσκηση. Στον πίνακα 2.2 υποδεικνύονται τόσο το μεταβολικό ποσοστό, όσο και το ποσοστό παραγωγής του διοξειδίου του άνθρακα για διαφορετικές δραστηριότητες.

Πίνακας 2.2: Ποσοστό παραγωγής του διοξειδίου του άνθρακα για διάφορες δραστηριότητες (Νικολάου, 2007)

Δραστηριότητα	Μεταβολικό ποσοστό [W]	Ποσοστό παραγωγής του CO ₂ [l/s]
Στατική εργασία	100	0.004
Ελαφριά εργασία	150-300	0.006-0.012
Μέτρια εργασία	300-500	0.012-0.020
Βαριά εργασία	500-650	0.020-0.026
Πολύ βαριά εργασία	650-800	0.026-0.032

2.1.3 Πτητικές Οργανικές Ενώσεις

2.1.3.1 Ορισμός και χαρακτηριστικά

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις αποτελούν μία σημαντική κατηγορία ατμοσφαιρικών ρύπων, που εντοπίζονται κυρίως σε αστικά κέντρα και βιομηχανικές περιοχές. Ο όρος οργανικές πτητικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds ή VOC) χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια πολύ ευρεία τάξη οργανικών ενώσεων (Lubes και Goodarzi, 2018). Θέτοντας έναν αυστηρό όρο/περιορισμό: στην κατηγορία αυτή θα έπρεπε να συμπεριλαμβάνονται οργανικές ενώσεις, οι οποίες είναι παρούσες στην ατμόσφαιρα σε αέρια κατάσταση, αλλά οι οποίες, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, θα ήταν υγρά ή στερεά. Δηλαδή στους 20 °C θα είχαν τάση ατμών μικρότερη από 760 torr (101,3 kPa) και μεγαλύτερη από 1 torr (0,133 kPa). Όμως, επειδή με βάση τον ορισμό αυτό δεν θα συμπεριλαμβάνονταν στη λίστα των VOC πολλές οργανικές ενώσεις, υιοθετήθηκε και ένας λιγότερο αυστηρός ορισμός: να περιλαμβάνονται στη λίστα των ενώσεων αυτών όλες οι ουσίες περιέχουν άνθρακα, με εξαίρεση τον στοιχειώδη άνθρακα, το μονοξείδιο (CO) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), οι οποίες ευρίσκονται στην ατμόσφαιρα. Ο ορισμός αυτός περιλαμβάνει και οξυγονούχες, αλογονούχες και θειούχες οργανικές ενώσεις.

Οι οργανικές ενώσεις, κατά γενική έννοια, είναι πολύ περισσότερες σε αριθμό συγκριτικά με τις ανόργανες, αναφορικά με τη ρύπανση σε εσωτερικούς χώρους και πολλές φορές δεν είναι δυνατόν να μετρηθούν και να αναγνωρισθούν όλες. Το γεγονός ότι τα VOC μπορούν και εξατμίζονται σε συνθήκες δωματίου οφείλεται στις ασθενείς ενδομοριακές (εσωτερικές) δυνάμεις μεταξύ των μη πολικών μορίων τους. Τα VOC εκπέμπονται ως αέρια από διάφορες ουσίες που βρίσκονται σε στερεή ή υγρή κατάσταση και οι συγκεντρώσεις τους εμφανίζονται υψηλότερες σε εσωτερικούς χώρους από ότι στο περιβάλλον (Goodman et al., 2017).

Τα VOC περιλαμβάνουν ουσίες με ευρέως διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες (Krol et al., 2010). Μεταξύ αυτών, ειδικότερα δύο είναι πρακτικής σημασίας:

1. Ο λιποφιλικός ή υδροφιλικός χαρακτήρας των ενώσεων, που συνήθως περιγράφονται από τον συντελεστή κατανομής οκτανόλης / νερού και την υδατοδιαλυτότητα.
2. Ο ουδέτερος, βασικός ή όξινος χαρακτήρας. Η τελευταία ιδιότητα πρέπει να ληφθεί υπόψη για τον χρωματογραφικό διαχωρισμό των μειγμάτων VOC και καθορίζει την επιλογή κατάλληλων χρωματογραφικών στηλών. (Χρωματογραφία είναι η διαδικασία με την οποία γίνεται ο διαχωρισμός των πτητικών ενώσεων που μετρούνται, καθώς σε πολλά πειράματα, όπως και σε αυτό που θα παρουσιαστεί παρακάτω, γίνεται καταμέτρηση των Total VOC, δηλαδή γίνεται γενική καταμέτρηση πτητικών οργανικών ενώσεων.)

Αναλόγως την μοριακή τους δομή ταξινομούνται σε υδρογονάνθρακες (αλκάνια, αλκένια, αρωματικές ενώσεις), οξειδωμένους υδρογονάνθρακες και αλογονομένους υδρογονάνθρακες. Απαντώνται στην ατμόσφαιρα σε μεγάλο εύρος συγκεντρώσεων, από ppb έως μερικά ppt. Στο εσωτερικό περιβάλλον οι κυριότεροι από αυτούς είναι (WHO, 2010):

- ✚ Οι χλωροφθοράνθρακες και χλωράνθρακες, από προϊόντα καθαρισμού και ψυκτικών.
- ✚ Το βενζόλιο, από τον καπνό του τσιγάρου και εμμέσως από τα καυσαέρια των αυτοκινήτων.
- ✚ Το μεθυλενοχλωρίδιο, από βαφές ψεκασμού.
- ✚ Το τετραχλωροαιθυλένιο, από το στεγνό καθάρισμα.
- ✚ Η φορμαλδεΐδη, από έπιπλα και δομικά υλικά, όπως χρώματα, κόλλες, ξύλο και κεραμίδια.

2.1.3.2 Πηγές Εκπομπής

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις είναι πανταχού παρούσες στο εσωτερικό περιβάλλον. Ο ανιχνεύσιμη συγκέντρωσή τους στον αέρα εσωτερικών χώρων έχει αποδειχθεί από παλαιότερες αλλά και πιο πρόσφατες μελέτες πως είναι υψηλότερος συγκριτικά με τον εξωτερικό αέρα (Johansson, 1978, Seifert και Abraham, 1982, Raysoni et al., 2017). Ήδη από το 1981 είχαν ταυτοποιηθεί πάνω από 250 διαφορετικές πτητικές οργανικές ενώσεις σε εσωτερικούς χώρους (Jarke et al., 1981). Το 1986 ο αριθμός των αναγνωρισμένων VOCs έφτανε παραπάνω από 300 (Berglund et al., 1986) και μέχρι το 1989 πάνω από 900 (U.S. EPA, 1989).

Οι πηγές δημιουργίας των VOCs στην ατμόσφαιρα είναι φυσικές αλλά και ανθρωπογενείς. Η κύρια φυσική πηγή των πτητικών οργανικών ενώσεων είναι η χλωρίδα και κυρίως τα δέντρα, ενώ μόνο το 15% των εκπομπών προέρχονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες (Παπαγιαννακόπουλος, 1996).

Οι κύριες πηγές εκπομπών από ανθρώπινες δραστηριότητες κατά Guo et al.,2004 είναι:

- Κινητές πηγές (κυρίως τα μεταφορικά μέσα).
- Διάφορες βιομηχανικές διεργασίες, ειδικά αυτές που περιλαμβάνουν διαλύματα όπως βαφές, εκτυπώσεις και πετροχημικές διεργασίες.
- Καύση ορυκτών καυσίμων.
- Υλικά κατασκευής κτιρίων, επίπλων και εξοπλισμού γραφείου.

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις οι οποίες περιέχονται ως επί το πλείστον στα αέρια απόβλητα βιομηχανικών μονάδων, σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις αποτελούν σημαντική πηγή ρύπανσης, άμεσα λόγω τοξικότητας και έμμεσα λόγω δημιουργίας όζοντος (O_3) στο χαμηλό στρώμα της ατμόσφαιρας (τροπόσφαιρα). Η κύρια διεργασία φυσικής απομάκρυνσης των VOCs στην ατμόσφαιρα είναι η φωτοχημική οξείδωση και ακολουθεί η εναπόθεση. Τα προϊόντα των VOCs στη συνέχεια υποβάλλονται σε περαιτέρω αλυσιδωτή οξείδωση ή εναποτίθενται σε επιφάνειες από αερολύματα, σε σταγόνες νερού (όξινη βροχή) ή στην επιφάνεια της γης. Ένα σημαντικό μέρος τους οξειδώνεται πλήρως σε CO_2 (Sakamoto et al.,2017).

Τα VOCs απασχολούν τη διεθνή βιβλιογραφία πρωτίστως λόγω της ατμοσφαιρικής επιβάρυνσης που επιφέρουν σε εσωτερικούς κλειστούς χώρους αλλά κυρίως στα κτίρια (Campagnolo et al., 2017). Για το λόγο αυτό χρήζουν εξέτασης οι πηγές δημιουργίας τους στους χώρους αυτούς. Η συγκέντρωση των VOCs στο εσωτερικό των κτιρίων προέρχεται από δύο ειδών πηγές (Wiglusz et al.,2002):

1) Τις εκπομπές υποβάθρου. Χημικές ενώσεις που προέρχονται κυρίως από τα δομικά υλικά και τον εξοπλισμό του κτιρίου. Η εκπομπή υποβάθρου είναι συνεχής και σε σχεδόν σταθερό ρυθμό εκπομπής. Στο παρελθόν, έχει δοθεί μεγάλη προσοχή στη φορμαλδεΐδη που μπορεί να εκπέμπεται από υλικά όπως προϊόντα ξύλου, χαλιά, υφάσματα, αλλά και από κόλλες και βερνίκια.

2) Περιοδικές εκπομπές. Προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες όπως το κάπνισμα, το μαγείρεμα, η χρήση συσκευών καύσης αερίου για θέρμανση για παράδειγμα, το καθάρισμα και δεν έχουν μόνιμο χαρακτήρα. Αλλά και από τον ίδιο τον άνθρωπο, ο οποίος εκτός από διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμούς, αναδύει μεγάλο αριθμό οργανικών ενώσεων, πολλές εκ των οποίων συμβάλλουν στην σωματική οσμή. Μεταξύ των σημαντικότερων πτητικών ενώσεων είναι εκείνες που ανήκουν στις κατηγορίες αλειφατικών, αρωματικούς και αλογονομένους υδρογονάνθρακες (διαλύτες), αλδεΐδες και εστέρες.

3) Μια τρίτη πηγή αποτελεί το άμεσο εξωτερικό περιβάλλον ενός κτηρίου. Έχει αναφερθεί και παραπάνω πως δεν πρέπει να περνά αβίαστα η τοποθεσία όπου είναι κτισμένο ένα κτήριο και στο πώς

αυτή συνεισφέρει σε εσωτερική αέρια μόλυνση. Όλα τα κτήρια έχουν διαθέτουν φυσικό (πόρτες, παράθυρα) ή μηχανικό εξαερισμό ενώ πολλές είναι οι περιπτώσεις όπου οι δύο τύποι συνδυάζονται. Με τον τρόπο αυτό ο επιβαρυμένος αέρας της έξωθεν ατμόσφαιρας εισβάλλει στον εσωτερικό χώρο και δημιουργεί αρκετά δυσμενείς καταστάσεις, αν σκεφτεί κανείς πως μια ποσότητα ρύπου εισέρχεται σε έναν χώρο κατά πολύ μικρότερο εν συγκρίσει με το εξωτερικό περιβάλλον. Τότε ο μη επαρκής εξαερισμός οδηγεί σε ακόμα πιο επιβαρυμένο εσωτερικό περιβάλλον εντός του κτηρίου (Lerner et al., 2012). Ακόμα να αναφερθεί, ότι μια ειδική περίπτωση εσωτερικής μόλυνσης που προέρχεται από εξωτερικούς χώρους είναι η "μετανάστευση" αέριων ουσιών στο κτίριο από το περιβάλλον έδαφος. Αν και το ραδόνιο (Rn), είναι ο κυρίαρχος ρύπος σε αυτού του είδους τη "μετανάστευση", υπάρχουν και άλλες πτητικές οργανικές ενώσεις εξίσου σημαντικές αναλόγως με το είδος του εδάφους γύρω από το κτίσμα. Για παράδειγμα αν υπάρχει έντονο το στοιχείο των σκουπιδιών στη γύρω περιοχή, θα συμβάλει στις αυξημένες τιμές των αντιστοιχών ρύπων (Correa et al., 2010). Τέλος, το υπαίθριο εξωτερικό περιβάλλον μπορεί να συμβάλει έμμεσα στη ρύπανση εσωτερικού αέρα μέσω οργανικών ουσιών που προέρχονται από πόσιμο νερό. Στην πραγματικότητα, χλωροφόρμιο και άλλοι πτητικοί αλογονωμένοι υδρογονάνθρακες έχουν βρεθεί να φθάνουν σε αισθητά υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης κατά τη διάρκεια του ντους.

2.1.3.3 Επιπτώσεις στην Υγεία

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις σχετίζονται με το σύνδρομο των «άρρωστων» κτιρίων (Sick Building Syndrome ή SBS). Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για να περιγράψει το σύνολο των συμπτωμάτων που εμφανίζονται σε άτομα που περνούν πολύ χρόνο μέσα σε κτίρια και εξαφανίζονται όταν τα άτομα βρίσκονται εκτός του κτιρίου (Cui et al., 2014). Παρόλο που τα αίτια του SBS δεν έχουν διερευνηθεί πλήρως, θεωρείται ότι ο κακός αερισμός του κτιρίου, η χρήση συγκεκριμένων υλικών στην κατασκευή και οι πηγές ρύπανσης εντός και εκτός του κτηρίου συντελούν στην δημιουργία του φαινομένου (Norbäck et al., 2017).

Η ικανότητα των VOC να επιδρούν στην υγεία του ανθρώπινου οργανισμού ποικίλλει. Ορισμένες από τις ενώσεις αυτές είναι υψηλής τοξικότητας ενώ άλλες δεν έχουν καμιά επίδραση. Η έκταση και η φύση της επίδρασης των VOC στον άνθρωπο εξαρτάται από τη συγκέντρωση τους, τον χρόνο έκθεσης και την κατάσταση της υγείας του ατόμου. Τα συμπτώματα που έχουν αναφερθεί αμέσως μετά από έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις VOC κατά Jones, 1999 είναι :

- Ερεθισμός στα μάτια, τη μύτη, το λαιμό και το δέρμα
- Πονοκέφαλος, ζαλάδα, ναυτία, δύσπνοια
- Αίσθημα κόπωσης, αδυναμία συγκέντρωσης, εξασθένηση της μνήμης

Μια ομάδα των VOC δρουν ως ναρκωτικά και οδηγούν σε εξασθένηση του κεντρικού νευρικού συστήματος. Η μακροχρόνια έκθεση σε αυτές τις ενώσεις είναι δυνατόν να προκαλέσει βλάβες στο συκώτι και τα νεφρά, διαταραχές στο νευρικό σύστημα, δερματικές παθήσεις και καρκίνο (Minnesota Department of Health, 2006).

Αναλύοντας λίγο παραπάνω τον όρο "Sick Building Syndrome" που αναφέρθηκε και παραπάνω, αναφέρεται ότι ανά τις δεκαετίες οι ερευνητές σχολιάζουν τα συμπτώματα που εμφανίζουν οι άνθρωποι όταν περνούν τον χρόνο σε εσωτερικούς χώρους και πώς αυτά μετέπειτα μειώνονται όταν βρίσκονται εκτός κτηρίου (Levin, 1989, Zhang, 2017). Η κατανόηση της αιτιολογίας του SBS αποτελεί μείζονα πρόκληση. Στοιχεία που υποστηρίζουν την υπόθεση ότι τα χαρακτηριστικά ενός κτηρίου και η σχετική εσωτερική ποιότητα περιβάλλοντος επηρεάζουν την εμφάνιση συμπτωμάτων στους κατοίκους του κτηρίου συνεχίζουν να συσσωρεύονται (Mendell, 1993, Chao et al., 2003). Η ποιότητα του εσωτερικού αέρα φαίνεται επίσης να επηρεάζει την απουσία των ανθρώπων από τα κτήρια (με την έννοια ότι τους ωθεί στο να μην έρχονται στη δουλειά για παράδειγμα), την απόδοση της εργασίας και την υγεία (Fisk, 2000).

Μία ερευνητική ομάδα από τη Δανία (Wargocki et al., 1999) κατέληξε, κατόπιν μαρτυριών από εργαζόμενους που περνούσαν αρκετές ώρες σε γραφεία, τα εξής συμπτώματα που παρουσίαζε η πλειοψηφία εξ αυτών:

- i. Ενόχληση σε μάτια, μύτη και λαιμό
- ii. Αίσθηση ξηρών βλεννογόνων και ξηρού δέρματος
- iii. Ερύθημα
- iv. Ψυχική κόπωση
- v. Πονοκεφάλους, αρκετά συχνές μολύνσεις του αναπνευστικού και βήχας
- vi. Βραχνάδα, φτέρνισμα, φαγούρα
- vii. Ναυτία, ζάλη

Φαίνεται ξεκάθαρα πως υπάρχει άμεση συσχέτιση με τα συμπτώματα που περιγράφηκαν για τα VOC και επιπλέον να τονισθεί πως, τα όποια παράπονα οδηγούν ερευνητές στο να ψάξουν για αυτά τα συμπτώματα και να κάνουν συσχετίσεις με το τι είδους ποιότητα περιβάλλοντος επικρατεί σε κάθε χώρο και εάν έχουν άμεση σχέση με το φύλο, ηλικία, ιατρικό ιστορικό, τις συνήθειες κάθε ανθρώπου και πολλά ακόμα στοιχεία. Για παράδειγμα, κάποιος που έχει συνηθίσει να ζει σε σπίτι όπου επικρατεί καπνός τσιγάρου σε όλο τον χώρο, τότε είναι λογικό να μην παραπονεθεί έντονα ή και καθόλου για αντίστοιχες συνθήκες που ίσως επικρατούν στο περιβάλλον εργασίας του.

Τέλος αξίζει να προστεθεί ότι έχει το "άρρωστο" κτήριο πάρει αυτό το όνομα διότι τα συμπτώματα περιορίζονται στους εσωτερικούς κλειστούς χώρους του. Συνήθως όταν οι άνθρωποι που πέρασαν κάποιο χρονικό διάστημα εντός αυτού, βγουν στο εξωτερικό περιβάλλον, δηλώνουν πως τα συμπτώματα εξαλείφονται (Serpanen et al., 2002). Υπάρχουν όμως και αλλού είδους συμπτώματα, π.χ. δερματικά που χρειάζονται κάποια ώρα να αναπτυχθούν, οπότε μπορεί ο ασθενής να έχει ήδη εξέλθει του κτηρίου άλλα παρόλα αυτά να τα εμφανίσει ετεροχρονισμένα.

2.1.4 Αιωρούμενα Σωματίδια

2.1.4.1 Ορισμός και βασικές έννοιες

Ως αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη (Particulate Matter) ή αερολύματα (aerosols), καλούμε το σύνολο των διεσπαρμένων υγρών ή στερεών μικροσωματιδίων που αιωρούνται εντός αερίου μέσου, συνήθως του αέρα. Το μέγεθος τους κυμαίνεται από 10^{-3} έως 500 μm , μεγαλύτερο από αυτό των απλών μορίων της ατμόσφαιρας (Seinfeld & Pandis, 2006). Διαχωρίζονται στα πρωτογενή, αυτά δηλαδή που εισάγονται στο αέριο μέσο σε υγρή ή στερεά μορφή και στα δευτερογενή, τα οποία σχηματίζονται με μετατροπή ατμώδους φάσης σε σωματιδιακή (Χουσιάδας, 2005).

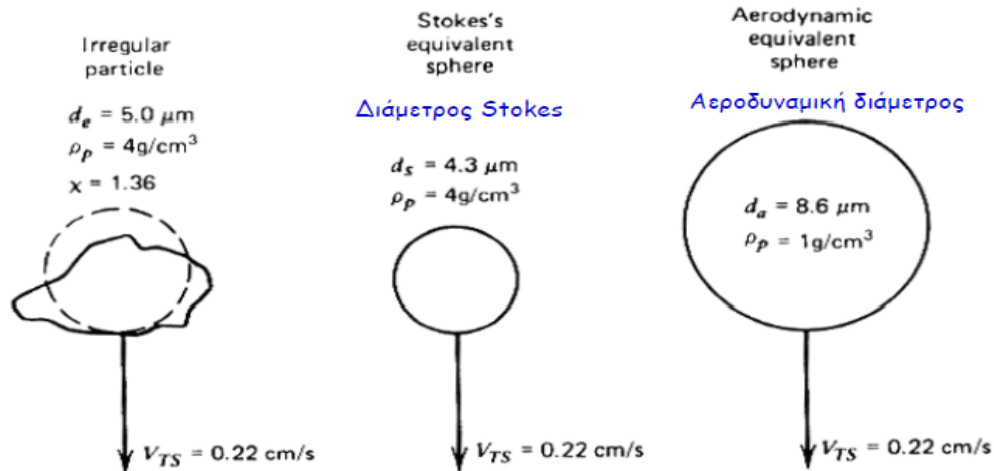
Τα αιωρούμενα σωματίδια προέρχονται από φυσικές αλλά και ανθρωπογενείς διεργασίες ενώ παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία σε μέγεθος, φυσικοχημικά και θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά. Οι συγκεντρώσεις τους στην ατμόσφαιρα, ως προς τη μάζα, είναι της τάξης κάποιων δεκάδων $\mu\text{g}/\text{m}^3$, με εξαίρεση τις ατμοσφαιρικά επιβαρυμένες περιοχές όπου ο αριθμός αυτός πολλαπλασιάζεται. Συγκεκριμένα σε μεγάλες πόλεις, σε ένα κυβικό εκατοστό αέρα, υπάρχουν περίπου 20.000 αιωρούμενα σωματίδια. Αν αναλογιστεί κανείς, ότι ο άνθρωπος αναπνέει περίπου 6 λίτρα αέρα κάθε λεπτό, δηλαδή αναπνέει 500 cm^3 σε κάθε αναπνοή, καταλήγει να αναπνέει 10^6 αιωρούμενα σωματίδια. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που αποτελούν μια εκ των βασικότερων κατηγοριών αέριων ρύπων εντός των μητροπολιτικών περιοχών.

Μολαταύτα παρουσιάζουν και κάποια θετική επίδραση στον πλανήτη και την υγεία και αυτή έγκειται στην υγρασία. Πάνω στα σωματίδια αυτά συμπυκνώνεται νερό και δημιουργούνται νέφη. Κάθε σταγόνα σε ένα σύννεφο είναι ένα σωματίδιο πάνω στο οποίο έχει συμπυκνωθεί νερό. Αν δεν υπήρχαν αυτά τα σωματίδια, τότε η υγρασία του πλανήτη θα ανέβαινε στο 500%. Ο λόγος που δεν συμβαίνει αυτό και φτάνει ως 100%, είναι πως το νερό που περισσεύει συμπυκνώνεται στα σωματίδια, μόλις φτάσει στο όριο του 100% (Seinfeld & Pandis, 2006).

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως είναι αδύνατη η έκφραση κοινής παραμέτρου μεγέθους για τα αιωρούμενα σωματίδια καθώς αυτά παρουσιάζουν πληθώρα σχημάτων. Έτσι, εφόσον πολλές ιδιότητες των σωματιδίων εξαρτώνται από το μέγεθός τους, έχει καταστεί αναγκαία η εισαγωγή της ισοδύναμης διαμέτρου. Κριτήριο καθορισμού της ισοδύναμης διαμέτρου είναι η συμπεριφορά του σωματιδίου και αναλόγως χρησιμοποιείται η διάμετρος Stokes (D_p) ή η αεροδυναμική διάμετρος (D_a). Η πρώτη βασίζεται στην αντίσταση που εμφανίζεται πάνω στο σωματίδιο, όταν αυτό κινείται μέσα σε ένα ρευστό με διαφορετική ταχύτητα. Σωματίδια με ίδια διάμετρο Stokes και ίδια πυκνότητα, έχουν την ίδια ταχύτητα εναπόθεσης. Η δεύτερη αντιστοιχεί σε ένα υποτιθέμενο σφαιρικό σωματίδιο μοναδιαίας πυκνότητας, του οποίου η τελική ταχύτητα κατακρήμνισης έχει την ίδια τιμή με αυτή της ταχύτητας του πραγματικού εξεταζόμενου σωματιδίου (Seinfeld & Pandis, 2006). Είναι πολύ χρήσιμη παράμετρος και χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις μεγέθους επειδή σχετίζεται με το χρόνο παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα καθώς και με την απόθεσή τους στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου. Η σχέση που συνδέει τη διάμετρο Stokes με την αεροδυναμική είναι η παρακάτω:

$$D_a = D_p \cdot \rho_p^{1/2} \text{ όπου } \rho_p \text{ η πυκνότητα του σωματιδίου.}$$

Στο σχήμα 2.2 γίνεται μία αναπαράσταση των δύο διαμέτρων που αναφέρθηκαν για ένα ακανόνιστου σχήματος αιωρούμενο σωματίδιο. Τα μεγέθη έχουν ως εξής: " d " και " ρ ", με τον ανάλογο δείκτη κάθε φορά, είναι η εκάστοτε διάμετρος και πυκνότητα αντίστοιχα. Η ταχύτητα καθίζησης είναι κοινή και για τις 3 περιπτώσεις V_{TS} .



Σχήμα 2.2: Διάμετρος Stokes (D_p) και αεροδυναμική διάμετρος (D_a) (Ανδρίτσος, 2017)

Αερολύματα με διαφορετικές πυκνότητες αλλά ίδιου μεγέθους και σχήματος θα έχουν ίδια διάμετρο Stokes αλλά διαφορετική αεροδυναμική. Όταν αναφερόμαστε σε σωματίδια διαμέτρου μεγαλύτερης των 0,5 μm , θα χρησιμοποιείται η αεροδυναμική διάμετρος καθότι από αυτή εξαρτάται η μεταφορά των σωματιδίων από αέρια ρεύματα και κατ' επέκταση η συλλογή τους από τα όργανα μέτρησης και η εισροή τους μέσα στον ανθρώπινο οργανισμό.

2.1.4.2 Κατηγοριοποίηση

Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την προέλευσή τους, τα φυσικά χαρακτηριστικά τους, τους μηχανισμούς δημιουργίας και εναπόθεσής τους, τη χημική τους σύσταση, καθώς και τις επιπτώσεις τους στην υγεία του ανθρώπου.

❖ Προέλευση

Οι βασικές αιτίες δημιουργίας των αερολυμάτων είναι οι φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο περιβάλλον (Φυτιανός, 2009):

- ✓ Τα ηφαίστεια. Η αιωρούμενη τέφρα που εκπέμπεται από ηφαιστειακές εκρήξεις, αποτελεί μια σημαντική πηγή δημιουργίας σωματιδίων που επηρεάζει κοντινές ή μέσης κλίμακας περιοχές, χωρίς να αποκλείονται και μεγάλης κλίμακας μεταφορές στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Για τον λόγο αυτό νέφη ηφαιστειακής σωματιδιακής ύλης παραμένουν στην ατμόσφαιρα για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα, κυρίως αυτά που

καταφέρνουν και φτάνουν στη στρατόσφαιρα, επιδρώντας έτσι στο κλίμα παγκοσμίως (π.χ. έκρηξη ηφαιστείου Πινατούμπο - Φιλιππίνες).

- ✓ Η θάλασσα. Η θραύση των κυμάτων και των μικρών φυσαλίδων στην επιφάνεια της θάλασσας δημιουργεί σταγονίδια με διάφορα άλατα που με την βοήθεια του ανέμου μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις.
- ✓ Η έρημος. Ισχυροί άνεμοι είναι ικανοί να μεταφέρουν σκόνη από ερημικές περιοχές (Σαχάρα) σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Τα σωματίδια που μεταφέρονται από τις περιοχές αυτές είναι συνήθως μεγάλης διαμέτρου (1 - 100 μm).
- ✓ Η επαναιώρηση της σκόνης εδάφους. Ισχυρά μετεωρολογικά φαινόμενα όπως άνεμος, υγρασία και θερμοκρασία εντείνουν το φαινόμενο της επαναιώρησης σκόνης που καθιζάνει στους δρόμους μεγάλων αστικών κέντρων.
- ✓ Οι πυρκαγιές. Εκλύουν μεγάλες ποσότητες ρύπων σε μορφή καπνού. Οι εκτεταμένες πυρκαγιές μπορούν να δημιουργήσουν ένα μεγάλο στρώμα νέφωσης που προκαλεί μείωση της ορατότητας σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από το σημείο της φωτιάς. Ανάλογα με την καύσιμη ύλη μπορεί να δημιουργηθούν τοξικές ουσίες που αλλοιώνουν την χημική σύσταση του αέρα.

Στις ανθρωπογενείς πηγές δημιουργίας αιωρούμενων σωματιδίων κατατάσσονται οι εξής:

- ✓ Οι Βιομηχανίες. Ο τύπος των αερολυμάτων που εκπέμπονται, εξαρτάται από τα είδη των διεργασιών που εφαρμόζονται στην εκάστοτε βιομηχανική μονάδα (παραγωγής ενέργειας, πετρελαίου, γεωργικών προϊόντων κ.α). Το μέγεθός των σωματιδίων αυτών εκτείνεται στα 0,5-100 μm (Querol et al., 2000).
- ✓ Τα οχήματα. Τα αιωρούμενα σωματίδια δημιουργούνται κυρίως σαν προϊόντα καύσεως από τους κινητήρες των αυτοκινήτων αλλά και από την φθορά των ελαστικών και των φρένων (Natural Resources Defense Council 1996).
- ✓ Οι συσκευές θέρμανσης των νοικοκυριών. Η καύση ξύλου στα τζάκια και pellet στις σόμπες, κατά τους χειμερινούς μήνες, αυξάνουν σημαντικά τα ποσοστά συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων δημιουργώντας ένα πυκνό νέφος πάνω από τα αστικά κέντρα, την αιθαλομίχλη. Φαινόμενο το οποίο παρατηρήθηκε έντονα τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα, εν μέσω οικονομικής κρίσης.
- ✓ Ο καπνός τσιγάρου. Μία από τις βασικότερες πηγές εσωτερικής ρύπανσης. Δεν είναι αντιπροσωπευτική της όποιας ανάλυσης ακολουθήσει, διότι στα σχολεία απαγορεύεται το κάπνισμα, παρ'όλα αυτά είναι πολύ σημαντικό να γίνει έστω μια μικρή αναφορά. Τα σωματίδια στον καπνό είναι εξαιρετικά επικίνδυνα λόγω της χημικής σύνθεσής τους και επειδή είναι στην κατηγορία των αναπνεύσιμων σωματιδίων (respirable) (0,1-1,0 μm) και παραμένουν στον αέρα για ώρες μετά το σταμάτημα του καπνίσματος. Οι Repace και Lowrey (1980), Repace (1981), Bock (1982), Girman et al., (1982) και πολλοί ακόμα

παρουσίασαν το ευρύ φάσμα των επιδράσεων του καπνίσματος αναφορικά με τη συγκέντρωση σωματιδίων.

Ένας άλλος διαχωρισμός στην προέλευση θα μπορούσε να είναι το αν γίνεται λόγος για πρωτογενή ή δευτερογενή σωματίδια, όπως αναφέρθηκε και πρωύτερα. Όπως υποδεικνύει και η λέξη τα πρώτα, παράγονται και εκπέμπονται άμεσα από πηγές και οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις τους είναι στη γενική περίπτωση ανάλογες προς τις εκπεμπόμενες ποσότητες. Δεν μπορεί να γίνει καμία πρόβλεψη των τελικών επιπτώσεων τους στον άνθρωπο, μιας και ένα πλήθος διεργασιών ενεργούν στα σωματίδια μέσα στο δυναμικό ατμοσφαιρικό σύστημα.

Από την άλλη μεριά, τα δευτερογενή είναι αυτά που σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα, από μετατροπή αερίων άμεσα εκπεμπόμενων από πηγές. Κύριες πρόδρομες ενώσεις για τα δευτερογενή σωματίδια είναι το διοξείδιο του θείου, η αμμωνία και τα οξείδια του αζώτου. Προϋπόθεση για τη μετάπτωση μιας αέριας ένωσης σε υγρή ή στερεά μορφή είναι η συγκέντρωσή της στην αέρια φάση να υπερβαίνει την τάση των ατμών της, κάτι που ικανοποιείται κατά τις εξής διαδικασίες:

- i. Χημικές αντιδράσεις που οδηγούν στην αύξηση της συγκέντρωσης αέριων ενώσεων με χαμηλές τάσεις ατμών
- ii. Ελάττωση της θερμοκρασίας που οδηγεί σε ελάττωση της τάσης ατμών
- iii. Σχηματισμός πολυδισπαρμένου αερολύματος, οπότε η τάση ατμών των απλών ενώσεων πάνω στο αερόλυμα μειώνεται από την παρουσία άλλων ενώσεων στο αερόλυμα (νόμος Raoult)

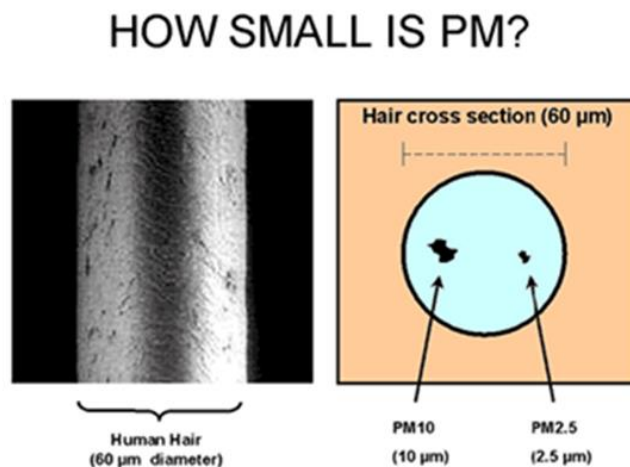
Ακόμα και πτητικές οργανικές ενώσεις μπορούν να μετατραπούν σε σωματίδια. Η πλειοψηφία αυτών των μετατροπών είναι αποτέλεσμα έντονων φωτοχημικών αντιδράσεων. Τέλος να αναφερθεί, πως οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των δευτερογενών σωματιδίων δεν είναι κατά ανάγκη ανάλογες προς τις εκπεμπόμενες ποσότητες των πρόδρομων ενώσεών τους, καθώς η ελάττωση του ρυθμού σχηματισμού μπορεί να καθορίζεται και από παράγοντες διαφορετικούς από τη συγκέντρωση των αντιδρώντων ουσιών (Kanakidou et al., 2005, Robinson et al., 2007, Kroll και Seinfeld, 2008, Hallquist et al., 2009).

❖ **Μέγεθος και μηχανισμός δημιουργίας**

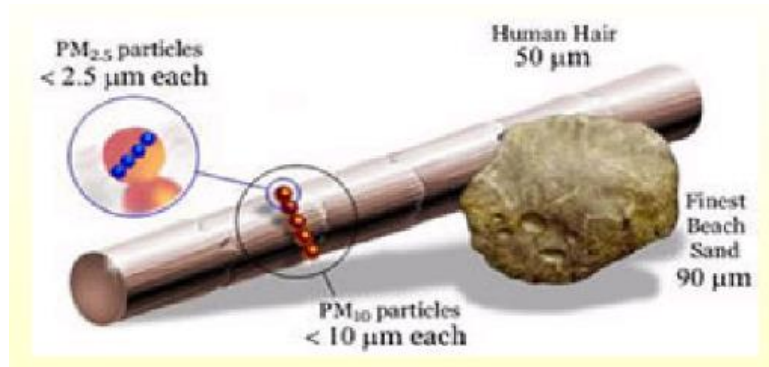
Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) αντιπροσωπεύουν ένα περίπλοκο μείγμα οργανικών και ανόργανων ουσιών. Τα μικρότερα σωματίδια περιέχουν τα δευτερευόντως σχηματισμένα αερολύματα (μετατροπή αερίου σε σωματίδια), τα σωματίδια καύσης και τους συμπυκνωμένους οργανικούς και μεταλλικούς ατμούς. Τα μεγαλύτερα σωματίδια συνήθως περιέχουν υλικά γαιοκάρπου και σκόνη προερχόμενη από δρόμους και βιομηχανίες. Όπως αναφέρθηκε στη παράγραφο 2.1.4.1 η αεροδυναμική διάμετρος ποικίλλει μεταξύ των αιωρούμενων σωματιδίων και αποτελεί ισχυρό κριτήριο διαχωρισμού τους. Το σύνολο των σωματιδίων και σταγονιδίων ονομάζεται TSP (Total Suspended Particles) με διαμέτρους από 0,01 μm έως μερικές εκατοντάδες μm. Ανάλογα με το μέγεθος και τη διαδικασία σχηματισμού τους, τα TSP χωρίζονται ως εξής (Φυτιανός, 2009):

- Χονδρόκοκκα σωματίδια (coarse): Έχουν διάμετρο μεγαλύτερη των 2,5 μm και σχηματίζονται από μηχανικές δράσεις.
- Λεπτόκοκκα σωματίδια (fine), τα οποία με τη σειρά τους αποτελούνται από τις παρακάτω υποκατηγορίες:
- Σωματίδια πυρηνοποίησης (nucleation mode): Η διάμετρός τους είναι μικρότερη των 0,1 μm και σχηματίζονται από συμπύκνωση θερμών ατμών ή διάχυση ατμών σε προϋπάρχοντα σωματίδια. Αποτελούνται από τα μεταβατικά σωματίδια πυρήνα (Aitken nuclei) με διάμετρο μικρότερη των 0,1 μm και τα υπερλεπτόκοκκα σωματίδια πυρήνα (Ultrafine nuclei) με διάμετρο μεγαλύτερη των 0,001 μm .
- Σωματίδια συσσώρευσης (accumulation mode): Η διάμετρός τους κυμαίνεται στο εύρος 0,1-2,5 μm και σχηματίζονται από τα σωματίδια πυρηνοποίησης με συσσωμάτωση ή συμπύκνωση ατμών. Τα σταγονίδια (droplet mode) δημιουργούνται όταν η συσσωμάτωση επέρχεται ως αποτέλεσμα αντιδράσεων υγρής φάσης επάνω στην επιφάνεια των αιωρούμενων σωματιδίων. Τα συμπυκνώματα (condensation mode) σχηματίζονται από τη συσσωμάτωση μη υγροσκοπικών σωματιδίων πυρήνα.

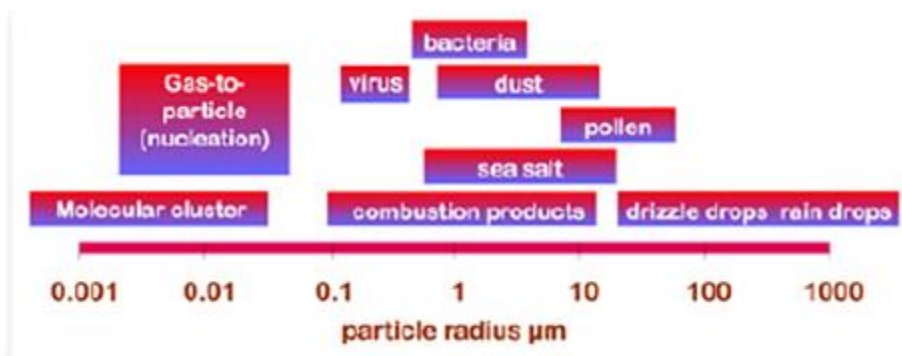
Οι εικόνες 2.2-4 καταστούν αντιληπτό το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων. Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζεται η διάμετρος μιας ανθρώπινης τρίχας των 60 μm και συγκριτικά με την κλίμακα αυτή απεικονίζονται τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} και $\text{PM}_{2.5}$. Στη δεύτερη εικόνα προστίθεται ένας κόκκος άμμου με διάμετρο 90 μm . Τέλος στη τρίτη εικόνα, ξεκινώντας από μοριακά συμπλέγματα του 1 nm, καταλήγει η κλίμακα μεγεθών να φθάνει στις σταγόνες βροχής στο 1 mm και ενδιάμεσα να υπάρχουν τα αιωρούμενα σωματίδια όλων των μεγεθών. Είναι μια καλή απεικόνιση των Total Suspended Particles (TSP).



Εικόνα 2.2: Αναπαράσταση ανθρώπινης τρίχας (60 μm διάμετρος) και σωματιδίων PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ (<https://www.arb.ca.gov/research/aaqs/pm/pm.htm>, 2015)



Εικόνα 2.3: Αναπαράσταση λεπτής άμμου (90 μm διάμετρος), ανθρώπινης τρίχας (50 μm διάμετρος) και σωματιδίων PM₁₀, PM_{2.5} (Ανδρίτσος, 2017)



Εικόνα 2.4: Total Suspended Particles (TSP) (Ανδρίτσος, 2017)

❖ Φυσικά Χαρακτηριστικά

Με κριτήριο τη φυσική τους κατάσταση τα σωματίδια χωρίζονται στις εξής κατηγορίες (Seinfeld και Pandis, 2006):

1) Στερεά Αερολύματα:

- Σκόνη (dust): στερεά σωματίδια μεγάλου σχετικά μεγέθους παραγόμενα από μηχανικές διεργασίες (θραύση, λείανση κ.α.) με διάμετρο $d > 1 \mu\text{m}$.
- Ατμός ή Κάπνα (fume): στερεά προϊόντα (δευτερογενή) συμπύκνωσης στην αέρια φάση, συχνά ύστερα από εξάτμιση και χημική αντίδραση (π.χ. οξείδωση) με διάμετρο $d < 1 \mu\text{m}$.
- Καπνός (smoke): μικρά σωματίδια που δημιουργήθηκαν από τη διαδικασία ατελούς καύσης ουσιών που περιέχουν άνθρακα με διάμετρο $d > 0,01 \mu\text{m}$.
- Αιθάλη (soot): συσσωματώματα από σωματίδια άνθρακα, αποτέλεσμα ατελούς καύσης.

- e. Ιπτάμενη τέφρα (flying ash): λεπτά ανόργανα σωματίδια που παρασύρονται από τα καυσαέρια (μπορεί να περιέχουν καύσιμο που δεν έχει καεί ακόμη).

2) Υγρά Αερολύματα:

- a. Ομίχλη (fog): υψηλή συγκέντρωση λεπτών σταγονιδίων (500-600 σταγονίδια/cm³). Είναι η διασπορά νερού κοντά στο έδαφος.
- b. Εκνέφωμα (mist): διασπορά λεπτών σταγονιδίων με διάμετρο $d > 1\mu\text{m}$, ικανά να αιωρούνται ή να καθιζάνουν στον αέρα (50-100 σταγονίδια/cm³). Είναι περισσότερο διαυγή από την ομίχλη.

3) Στερεά - Υγρά Αερολύματα:

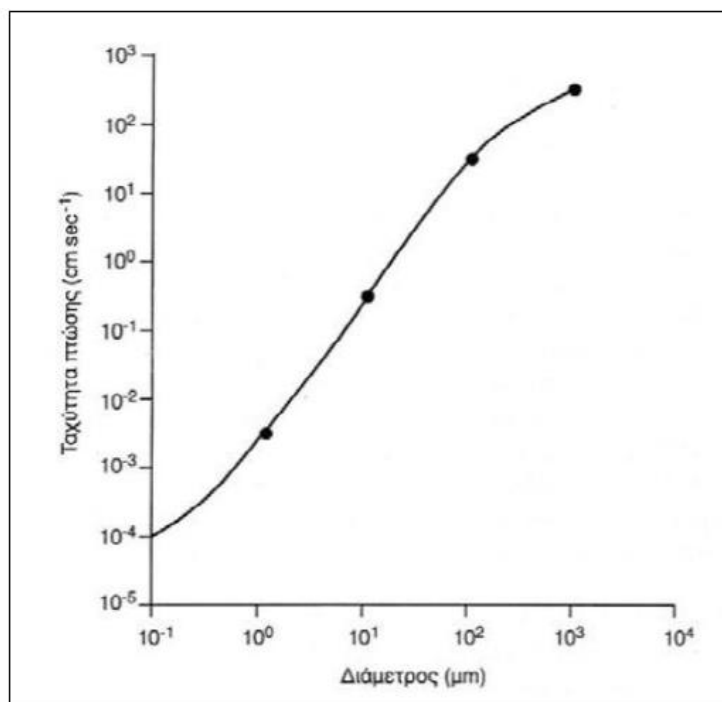
- a. Αχλός (haze): ορίζει την ελαττωμένη ορατότητα από την παρουσία σωματιδίων (λεπτή σκόνη + ομίχλη).
- b. Αιθαλομίχλη (smog, smoke + fog): συνδυασμός καπνού και ομίχλης. Έτσι χαρακτηρίζεται συχνά η εκτεταμένη ρύπανση της ατμόσφαιρας λόγω υψηλών συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων.

❖ Χρόνος παραμονής και εναπόθεση

Βασικό χαρακτηριστικό των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η διάρκεια ζωής τους στον αέρα ή όπως λέγεται, ο χρόνος παραμονής τους. Το στοιχείο αυτό είναι πολύ σημαντικό αφού φανερώνει ποια σωματίδια μπορούν να επιβαρύνουν το ατμοσφαιρικό περιβάλλον ακόμα και για δεκαετίες. Οι χρόνοι παραμονής των σωματιδίων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη διάμετρό τους, η οποία καθορίζει και την ταχύτητα πτώσης ενός σωματιδίου στο έδαφος (σχήμα 2.3). Η ταχύτητα πτώσης περιγράφεται από το νόμο του Stokes, ο οποίος ισχύει για σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από την ελεύθερη διαδρομή των αερίων, τη διαδρομή δηλαδή κατά την οποία ένα μόριο του αερίου θα συγκρουστεί με ένα γειτονικό του. Σύμφωνα με το νόμο του Stokes η ταχύτητα πτώσης είναι ανάλογη της διαμέτρου των αιωρούμενων σωματιδίων (Ruzer & Harley, 2005):

$$U_s = \frac{2g}{9} - \frac{(d - d')}{n} r^2$$

όπου U_s η οριακή ταχύτητα πτώσης των σωματιδίων, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, d η πυκνότητα του σωματιδίου, d' η πυκνότητα του μέσου πτώσης, r η ισοδύναμη αεροδυναμική ακτίνα του σωματιδίου και n ο συντελεστής ιξώδους του μέσου πτώσης.



Σχήμα 2.3: Ταχύτητα πτώσης αιωρούμενων σωματιδίων αναλόγως τη διάμετρο. Παραδοχές: σωματίδια σφαιρικά πυκνότητας 1 gr/cm³, ατμόσφαιρα ήρεμη, θερμοκρασία 0 °C, πίεση 760 mmHg (Pitts and Finlayson-Pitts, 2000)

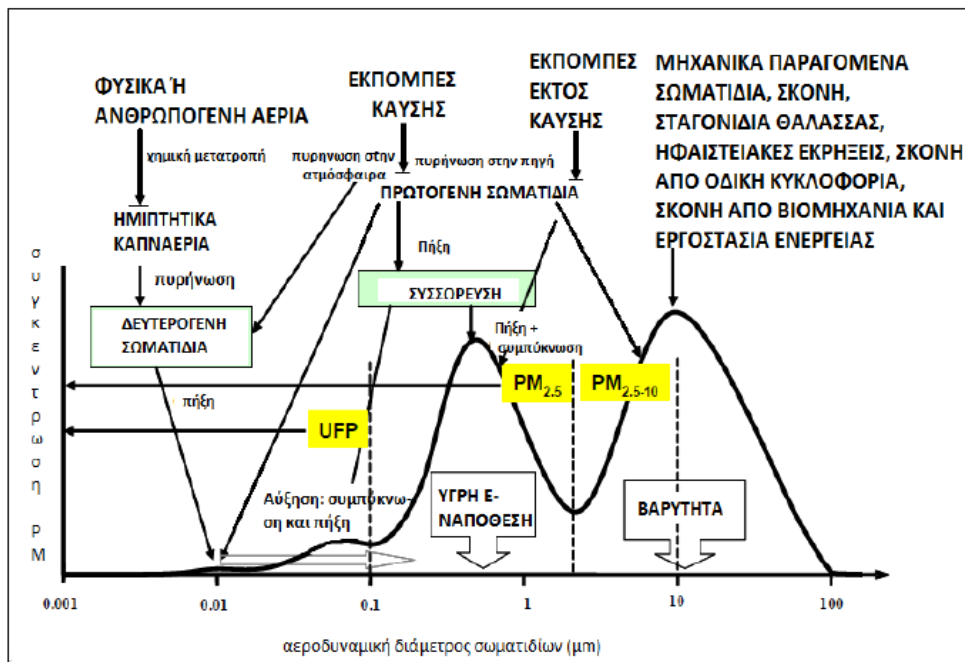
Το σχήμα 2.3 απεικονίζει ότι σε σταθερές συνθήκες, τα αιωρούμενα σωματίδια με ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη των 10 μm έχουν μεγάλη ταχύτητα πτώσης. Η αντίθετη συμπεριφορά ισχύει για τα σωματίδια διαμέτρου ίσης ή μικρότερης των 10 μm (PM₁₀) με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μεγαλύτερους χρόνους αιώρησης στην ατμόσφαιρα και να αποτελούν απειλή για την ανθρώπινη υγεία. Παρατηρείται μάλιστα ότι όσο μικραίνει η διάμετρος των αερολυμάτων (PM_{2.5}, PM₁, UFP) τόσο μεγαλύτερο χρόνο παραμονής παρουσιάζουν.

Μολονότι το μέγεθος των αερολυμάτων παίζει καθοριστικό ρόλο στον χρόνο παραμονής τους στον αέρα, δεν είναι ο μόνος παράγοντας επιρροής. Οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην εκάστοτε περιοχή μπορούν να επιδράσουν καθοριστικά στον τρόπο με τον οποίο τα σωματίδια εναποτίθενται στην επιφάνεια της γης. Οι βασικοί μηχανισμοί εναπόθεσης των αιωρούμενων σωματιδίων είναι τρεις (Chate & Pranesha, 2004):

- Ξηρή εναπόθεση. Τα πολύ μικρά σωματίδια ακολουθούν αδρανώς τις κινήσεις του αέρα και συγκρατούνται από το έδαφος κατά την επαφή τους με αυτό.
- Υγρή εναπόθεση. Φυσική διαδικασία κατά την οποία ύλη αφαιρείται μέσω υετού (βροχή, χιόνι, ομίχλη) από την ατμόσφαιρα και καθιζάνει στην επιφάνεια της γης. Η υγρή εναπόθεση συμπεριλαμβάνει όλες τις διαδικασίες με τις οποίες σωματίδια καθιζάνουν με τον υετό, όπως απόθεση αιωρούμενων σωματιδίων όταν αυτά λειτουργούν ως πυρήνες συμπύκνωσης νερού για τον σχηματισμό νεφών ή ομίχλης και απόθεση σωματιδίων όταν αυτά συγκρούονται με τα σταγονίδια.

- Κατακρήμνιση. Πτώση των σχετικά μεγάλων και βαρέων αιωρούμενων σωματιδίων λόγω βαρύτητας.

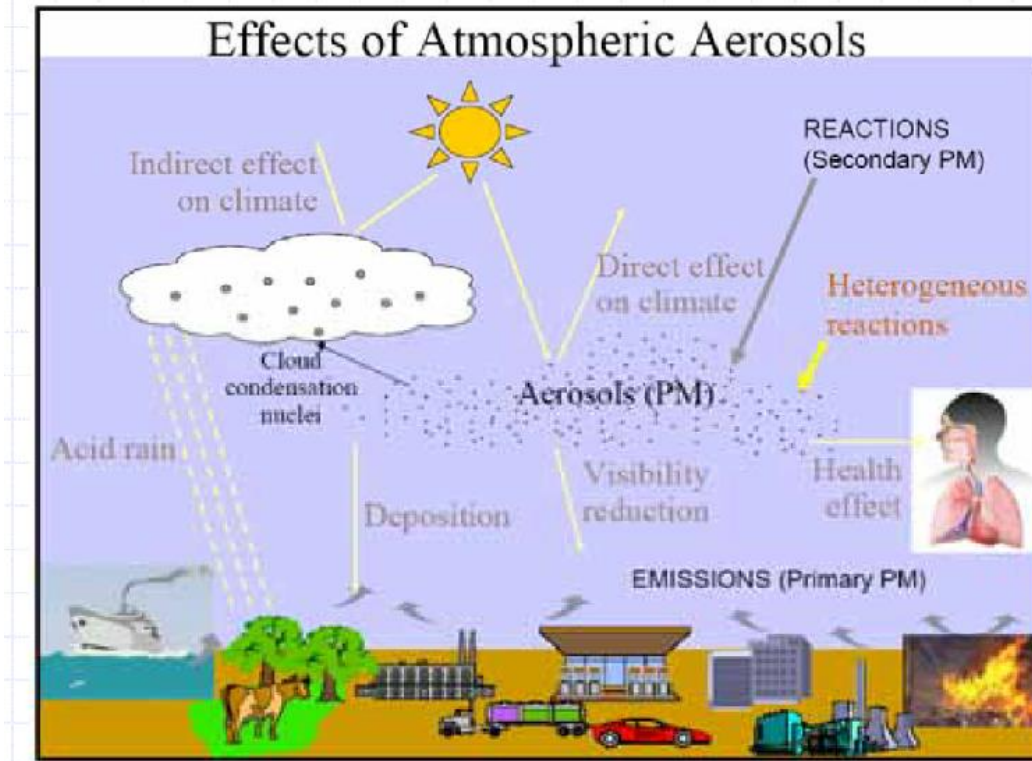
Στο σχήμα 2.4 περιγράφονται οι πηγές εκπομπής σωματιδίων, οι πολύπλοκοι τρόποι μετασηματισμού τους στην ατμόσφαιρα και οι μηχανισμοί απομάκρυνσης με υγρή εναπόθεση και με καθίζηση λόγω βαρύτητας. Ταυτόχρονα, γίνεται διαχωρισμός των σωματιδίων κατά την αεροδυναμική τους διάμετρο.



Σχήμα 2.4: Μηχανισμοί δημιουργίας και εναπόθεσης αιωρούμενων σωματιδίων κατά διάμετρο, σε αστικό περιβάλλον. Ως UFP ορίζονται τα Ultrafine particles (Salonen et al., 2008)

Στην εικόνα 2.5 φαίνεται η επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων που παραμένουν στην ατμόσφαιρα. Από τις πολλαπλές επιδράσεις τους οι πιο σημαντικές είναι:

- ✓ η οπισθοσκέδαση και ανάκλαση των ακτίνων του ήλιου, με αποτέλεσμα να καταφθάνει στην επιφάνεια της Γης μικρότερο ποσοστό ηλιακής ενέργειας (χαρακτηριστικό παράδειγμα η ηφαιστειακή τέφρα από την έκρηξη του Pinatubo στις Φιλιππίνες που είχε σαν αποτέλεσμα τη μείωση της παγκόσμιας θερμοκρασίας).
- ✓ Όξινη βροχή.
- ✓ Απορροφούν και διαχέουν την ορατή ακτινοβολία περιορίζοντας την ορατότητα της ατμόσφαιρας και συμβάλλοντας αρνητικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.
- ✓ Εισρέουν στον ανθρώπινο οργανισμό αναλόγως του μεγέθους τους.
- ✓ Χημικές αντιδράσεις με στοιχεία που εκπέμπονται ή υπάρχουν ήδη στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 2.5: Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων και αεροζόλ (Ανδρίτσος, 2017)

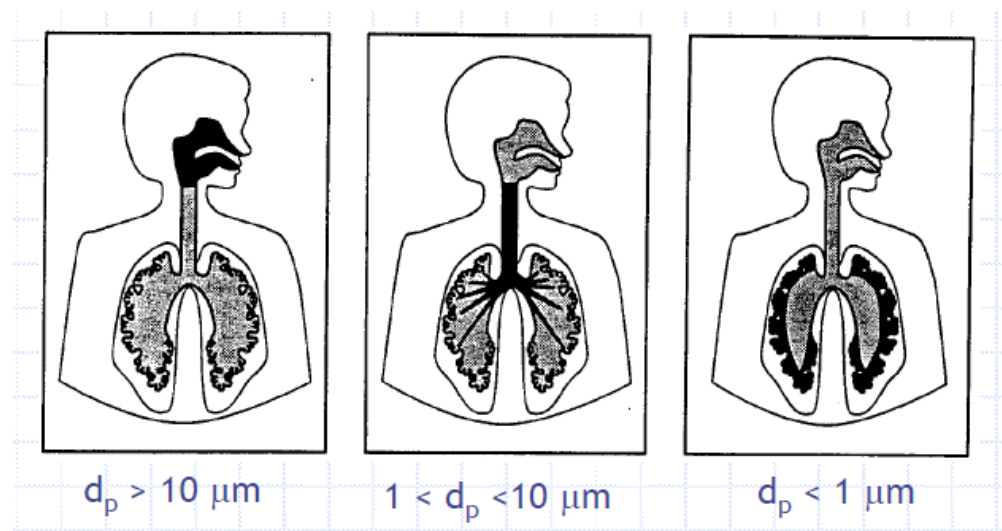
❖ **Επιπτώσεις στην υγεία**

Ο κυριότερος στόχος έρευνας και ανάλυσης των αιωρούμενων σωματιδίων αλλά και γενικότερα των ατμοσφαιρικών ρύπων, είναι η επίδραση που μπορεί να ασκούν στον οργανισμό του ανθρώπου. Πληθώρα παλιότερων αλλά και πιο πρόσφατων επιστημονικών συγγραμμάτων προειδοποιούν για σοβαρές επιπτώσεις, κυρίως στο αναπνευστικό σύστημα και καθορίζουν τις πιο ευπαθείς ομάδες του πληθυσμού (Di et al., 2017, Chen et al., 2017, Lelieveld et al., 2018). Μερικά από τα συμπτώματα που αναφέρονται είναι το άσθμα, η χρόνια βρογχίτιδα, η επιδείνωση αλλεργιών και οι πνευμονικές δυσλειτουργίες. Να συμπληρωθεί πως αυτά τα συμπτώματα έχουν άμεση εξάρτηση με την ηλικιακή ομάδα των ανθρώπων που προσβάλλουν. Αναφορικά, καταγράφονται οι θάνατοι γηραιότερων ανθρώπων από επεισόδια σωματιδιακής ρύπανσης. Οι πνευμονικές δυσλειτουργίες, που είναι σαφώς πιο επικίνδυνες για τα παιδιά με φόβο πρόκλησης μόνιμης βλάβης στους πνεύμονές τους, προκαλούνται με την εισπνοή των αιωρούμενων σωματιδίων τα οποία μέσω του αναπνευστικού συστήματος εισέρχονται στον οργανισμό δημιουργώντας σημαντικές βλάβες. Η έκθεση σε σωματιδιακή ρύπανση κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες είναι δυνατόν να προκαλέσει ή να επιδεινώσει καρδιαγγειακές ασθένειες, δυσλειτουργίες στους ιστούς των πνευμόνων, καρκινογενέσεις και πρόωρο θάνατο. Στις συνέπειες συγκαταλέγονται ακόμη και κάποιες λιγότερο επώδυνες, όπως ο επίμονος βήχας, φλέγματα, ζαλάδες και αδιαθεσία (Peters et al., 1997).

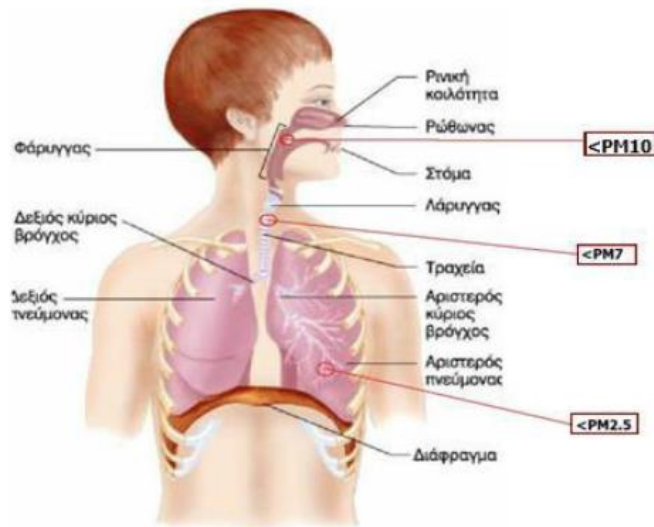
Αναλόγως του τρόπου εισαγωγής τους στον ανθρώπινο οργανισμό, τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες (Van Landuyt, 2012):

- Εισπνεύσιμα σωματίδια (inhalable particles). Έχουν διαμέτρους ίσες ή μικρότερες των 10 μm (PM_{10}). Αποτελούν τα σωματίδια που εισέρχονται κυρίως στο ανώτερο σύστημα της αναπνευστικής οδού (ρινοφάρυγγας) σε αντίθεση με τα μεγαλύτερα σωματίδια τα οποία κατακρατούνται στην στοματική και τη ρινική κοιλότητα.
- Θωρακικά σωματίδια (thoracic particles). Κατά την εισπνοή καταφέρνουν να διαπερνούν το ανώτερο τμήμα της αναπνευστικής οδού. Θεωρείται ότι έχουν μέγεθος μικρότερο των 7 μm (PM_7).
- Αναπνεύσιμα σωματίδια (respirable particles). Έχουν διάμετρο έως 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$). Καταφέρνουν να διεισδύουν έως τις κυψελίδες των πνευμόνων γεγονός που τα καθιστά τα πιο επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία.

Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην υγεία εξαρτώνται κυρίως από το μέγεθός τους. Στις εικόνες 2.6-7 παρουσιάζεται η εναπόθεση των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου σε σχέση με την αεροδυναμική τους διάμετρο.



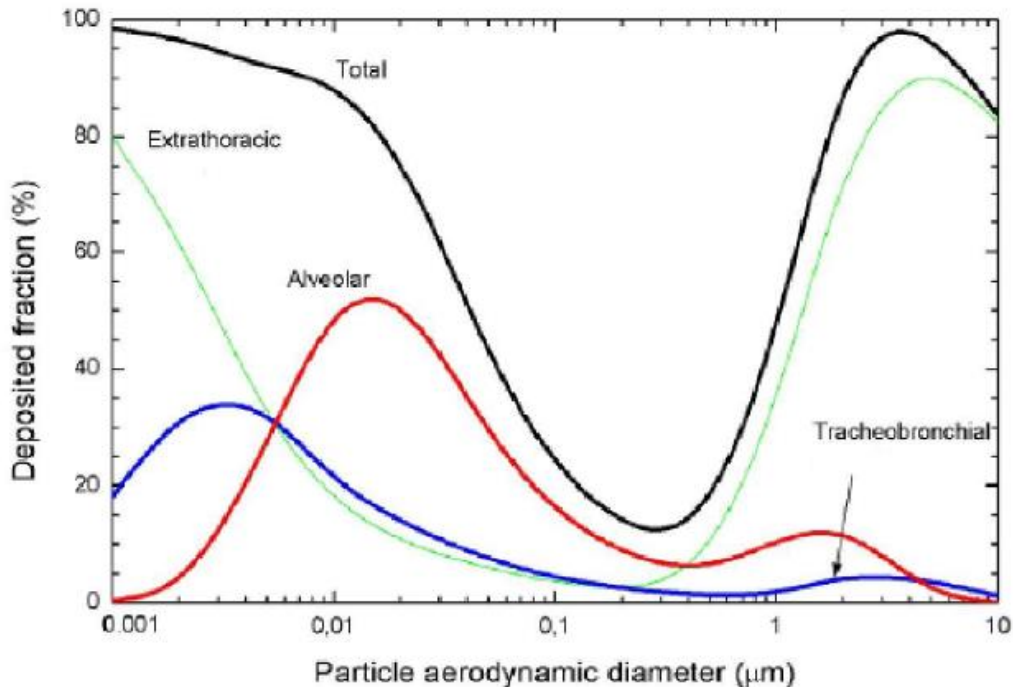
Εικόνα 2.6: Επίδραση των διαφόρων μεγεθών αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (με έντονο μαύρο χρώμα σημειώνονται τα καθέκαστα σημεία επιρροής) (Ανδρίτσος, 2017)



Εικόνα 2.7: Η διεισδυτικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου (Χουσιιάδας, 2005)

Όσο μικρότερη η διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων, τόσο περισσότερα προβλήματα προκαλούν κυρίως γιατί εισέρχονται βαθιά στο αναπνευστικό σύστημα αλλά και γιατί η χημική σύστασή τους είναι επικίνδυνη. Μελέτες αναφέρουν πειράματα στα οποία ανιχνεύτηκαν χημικές ουσίες στο αίμα, οι οποίες εισήχθησαν από τις κυψελίδες και δημιούργησαν προβλήματα και σε άλλα όργανα όπως το συκώτι και τα νεφρά (Oberdorster, 1995, Vlaanderen et al., 2017). Για αυτούς τους λόγους χρήζει εξέτασης η σύσταση των σωματιδίων που εκπέμπονται κυρίως από τις ανθρωπογενείς πηγές.

Στο σχήμα 2.5 παρατίθεται η εναπόθεση των αερολυμάτων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα συναρτήσει της ισοδύναμης αεροδυναμικής τους διαμέτρου. Παρατηρείται ότι τα μεγάλα σωματίδια κατακάθονται κυρίως στη περιοχή του ρινοφάρυγγα (Extrathoracic). Η καμπύλη που αντιστοιχεί στη περιοχή της τραχείας και των βρόγχων (Tracheobronchial) καλύπτει ένα ευρύ φάσμα διαμέτρων με σχετικά χαμηλά ποσοστά απόθεσης. Τα μικρής διαμέτρου σωματίδια εμφανίζουν μέγιστο ποσοστό εναπόθεσης στις κυψελίδες των πνευμόνων (Alveolar).



Σχήμα 2.5: Εναπόθεση αερολυμάτων στον ανθρώπινο οργανισμό με βάση το μέγεθός τους (Χουσιάδας, 2005)

Ιδιαίτερης προσοχής χρήζει μια συγκεκριμένη κατηγορία σωματιδίων, οι πολυκυρηνικοί ή πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH). Εντοπίζονται σε σπίτια ή κλειστούς χώρους γενικότερα, όπου καίγεται ξύλο και ανήκουν στην κατηγορία των αναπνεύσιμων (respirable) σωματιδίων, κάτι που τα καθιστά άκρως επικίνδυνα. Ο κυριότερος όμως λόγος που προκαλούν ανησυχία είναι η καρκινογόνα φύση τους, λόγω του δυναμικού τους. Οι ενώσεις αυτές περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό οργανικών μορίων τα οποία περιέχουν δύο ή περισσότερους βενζολικούς δακτυλίους. Αυτές οι ενώσεις παράγονται ως αποτέλεσμα ατελούς καύσης. Είναι ελάχιστα διαλυτά στο νερό, αλλά είναι πολύ διαλυτά σε λίπος. Παρόλα αυτά, οι ενώσεις αυτές μεταβολίζονται γρήγορα στο σώμα και δεν τείνουν να συσσωρεύονται στους λιπώδεις ιστούς. Θεωρείται ότι η καρκινογόνος επίδραση των PAH οφείλεται σε διόλ-εποξειδία (diol-epoxides) που είναι μεταβολίτες των ενώσεων στον οργανισμό (Lui et al., 2017). Μόλις οι ενώσεις εισέλθουν στον αέρα, μπορούν να απορροφηθούν σε σωματίδια και να εισαχθούν στους πνεύμονες. Οι ενώσεις PAH είναι επίσης παρούσες σε τρόφιμα (καπνιστά, ψημένα, ραφινρισμένα) και στο νερό. Στην πραγματικότητα, η λήψη από το στόμα των PAH μπορεί να είναι πολύ υψηλότερη από το εισπνεόμενο ποσό στον γενικό πληθυσμό (Chen et al., 2016).

2.1.5 Θεσμοθετημένα όρια έκθεσης

Τα τελευταία χρόνια οι επιπτώσεις των αερίων ρύπων στην υγεία του πληθυσμού κατέστησε αναγκαία την θεσμοθέτηση κανόνων και ορίων έκθεσης σε αυτούς, προς ενημέρωση και προφύλαξη των πολιτών. Η Ευρωπαϊκή Ένωση εκδίδει Οδηγίες - Πλαίσια, βάσει των οποίων οφείλουν τα κράτη μέλη να προσαρμόζουν την εθνική τους νομοθεσία. Κάθε Οδηγία - Πλαίσιο της Ε.Ε. προβλέπει την έκδοση θυγατρικών Οδηγιών, οι οποίες αναφέρονται σε ένα ρύπο ή μία κατηγορία ρύπων. Στην Ελλάδα, αν και το νομοθετικό πλαίσιο δεν μπορεί να θεωρηθεί ολοκληρωμένο, γίνεται σημαντική

προσπάθεια ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι και οι απαιτήσεις της επιθυμητής ποιότητας της ατμόσφαιρας με τον καθορισμό στρατηγικών και τη χρήση εργαλείων που βοηθούν στον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Μασσαρά, 2011) .

2.1.5.1 Αιωρούμενα Σωματίδια

Στον πίνακα 2.3 παρατίθενται οι οριακές τιμές για τα αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀ και PM_{2.5} όπως έχουν οριστεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή σύμφωνα με την Οδηγία 2008/50/EC. Το ημερήσιο όριο για έκθεση σε PM₁₀ αντιστοιχεί σε 50 μg/m³ και δεν πρέπει να παραβιάζεται πάνω από 35 ημέρες μέσα σε ένα ημερολογιακό έτος. Επιπλέον, το ετήσιο όριο για τα PM₁₀ ανέρχεται στα 40 μg/m³. Το ετήσιο όριο έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια PM_{2.5} είναι 25 μg/m³. Επίσημο όριο για τα σωματίδια PM₁ δεν έχει θεσμοθετηθεί προς το παρόν.

Πίνακας 2.3: Οριακές τιμές για τα σωματίδια PM₁₀ και PM_{2.5} σύμφωνα με την Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης το 2008. (<http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>)

Αιωρούμενα σωματίδια	Θεσμοθετημένο όριο	Περίοδος έκθεσης	Όριο παράβασης	Ημερομηνία επίτευξης
PM10	50 μg /m ³	24 ώρες	35 ημέρες	Σε ισχύ από την 1/1/2005
	40 μg /m ³	Ένα Ημερολογιακό έτος	-	Σε ισχύ από την 1/1/2005
PM2.5	25 μg /m ³	Ένα Ημερολογιακό έτος	-	Τέθηκε την 1/1/2010 Σε ισχύ από την 1/1/2015

Επιπροσθέτως, ο πίνακας 2.4 παρουσιάζει τα επίπεδα αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, όπως οριοθετούνται από τον Ευρωπαϊκό οργανισμό υγείας των πνευμόνων (European Lung Foundation), σύμφωνα με τα οποία ο πολίτης μπορεί να ενημερώνεται για την επικινδυνότητά τους. Στη ζώνη χαμηλής επικινδυνότητας (0-49 μg/m³) δεν παρουσιάζεται κανένα πρόβλημα για τον πληθυσμό. Στην μεσαία ζώνη (50-74 μg/ m³) ενδέχεται να δημιουργηθούν αναπνευστικά προβλήματα σε ομάδες υψηλού κινδύνου και καλό είναι να αποφεύγονται οι μεγάλες μετακινήσεις. Η ζώνη υψηλής επικινδυνότητας (>75 μg/m³) αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης αναπνευστικών προβλημάτων και στη περίπτωση αυτή συστήνεται να αποφεύγεται εντελώς η έκθεση σε τέτοιο περιβάλλον.

Πίνακας 2.4: Ζώνες επικινδυνότητας των αιωρούμενων σωματιδίων (PM).
(<http://www.europeanlung.org/en/>)

Ζώνη	Δείκτης επικινδυνότητας	Συγκέντρωση PM [=]μg/m ³
Χαμηλή	1	0-16
	2	17-32
	3	33-49
Μεσαία	4	50-57
	5	58-66
	6	67-74
Υψηλή	7	75-82
	8	83-91
	9	92-99
Υπερβολικά υψηλή	10	>99

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (European Environment Agency), στη πρόσφατη έκθεσή του (EEA Report No 12/2018) για την ατμοσφαιρική ρύπανση της περιοχής της Ευρώπης παραθέτει κάποια πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, από ένα δίκτυο 2900 μετεωρολογικών σταθμών σε 39 χώρες (μεταξύ αυτών και η Ελλάδα), καταλήγει στο ότι το 2016 εμφανίστηκαν συγκεντρώσεις άνω της ετήσιας οριακής τιμής των PM₁₀ (40 μg/m³) στο 6% επί του συνόλου των σταθμών μέτρησης. Ειδικότερα, το 92% αυτών των σταθμών βρίσκονταν στην Τουρκία (116), στην Πολωνία (29), στην Πρώην Γιουγκοσλαβική Δημοκρατία της Μακεδονίας (13) και στη Βουλγαρία (11). Η πιο χαμηλή οριακή τιμή του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO) για τον ετήσιο μέσο όρο των PM₁₀ (20 μg/m³) παραβιάστηκε στο 48% των σταθμών και σχεδόν για όλες τις χώρες που υπέβαλαν επίσημα αποτελέσματα, με εξαίρεση την Εσθονία, την Ισλανδία, την Ιρλανδία και την Ελβετία. Αναφορικά με τα λεπτόκοκκα σωματίδια PM_{2,5} το θεσμοθετημένο μέσο ετήσιο όριο των 10 μg/m³ από τον WHO, ξεπεράστηκε στο 68% των σταθμών. Η Εσθονία, η Φινλανδία, η Ουγγαρία, η Νορβηγία και η Ελβετία είναι οι μόνες χώρες - μέλη που δεν ανέφεραν τέτοιες υπερβάσεις.

2.1.5.2 Διοξείδιο του Άνθρακα

Ο διεθνώς αναγνωρισμένος οργανισμός ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers) αναφέρει ως μεγίστη τιμή για συνεχόμενη έκθεση σε CO₂ επί οκτώωρου βάσεως, τα 1000 ppm (ASHRAE, 2007). Οριοθέτηση συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα τοποθετείται και σε σχετική Τεχνική Οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 2425/86). Σύμφωνα με αυτή, η μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση ως μέση τιμή οκτώωρου είναι τα 9000 mg/m³ (ή 5001.14 ppm). Παρόλα αυτά, η οδηγία αναφέρει ότι έκθεση σε συγκεντρώσεις CO₂ άνω των 600 ppm για συνεχόμενο οκτάωρο, θεωρούνται οριακές για την υγεία. Συγκεκριμένα για εσωτερικούς χώρους ισχύει:

- ✓ Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες των 800 ppm φανερώνουν ανεπαρκή αερισμό.

- ✓ Συγκεντρώσεις από 600-800 ppm, δείχνουν επαρκή αερισμό.
- ✓ Συγκεντρώσεις μικρότερες των 600 ppm είναι οι συνιστώμενες για τα σχολεία.

Ως μέτρο περιορισμού του διοξειδίου του άνθρακα σε εσωτερικούς χώρους θεωρείται ο περιορισμός των πηγών εκπομπής του και ο συχνός και σωστά σχεδιασμένος αερισμός (Pantazaras et al., 2018).

Στις σχολικές αίθουσες η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας του αέρα εσωτερικού χώρου. Σύμφωνα με το πρότυπο ANSI/ASHRAE Standard 62-2001, η μέγιστη χωρητικότητα σε περιβάλλον τάξης που συνιστάται είναι 50 άτομα ανά 100 m². Επιπλέον, οι Shendell et al., 2004 αναφέρουν ότι μια σταθερή εσωτερική συγκέντρωση 1000 ppm έχει χρησιμοποιηθεί ως άτυπο όριο επαρκούς και ανεπαρκούς αερισμού του χώρου. Σε έρευνα των Annesi-Maesano et al., 2012 σε σχολεία του Βελγίου, αποδείχθηκε πως σε μέρες όπου υπήρχαν γεμάτες τάξεις, ένα μέρος από το δείγμα των μαθητών εμφάνιζαν το βράδυ συμπτώματα βήχα και ρινίτιδας που σχετιζόταν με τα ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα. Η προσαρμογή βέβαια σε αυξημένα ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα διαφέρει από άνθρωπο σε άνθρωπο. Η συνεχής παραμονή σε μια επιβαρυσμένη ατμόσφαιρα μπορεί γίνει ανεκτή σε περιεκτικότητες της τάξης του 3% τουλάχιστον για ένα μήνα και 4% για πάνω από μια εβδομάδα. Υποστηρίζεται μάλιστα σε μελέτες ότι συγκεντρώσεις του 2% θα μπορούσαν να γίνουν ανεκτές σε κλειστούς χώρους, δεδομένου ότι η προσαρμογή είναι φυσιολογική και αναστρέψιμη (Davidson, 2003).

2.1.5.3 Συνολικές Πτητικές Οργανικές Ενώσεις

Σαφή όρια έκθεσης ορίζονται για τις πτητικές οργανικές ενώσεις από τους Mølhave et al., 1997. Σύμφωνα με την δημοσίευση, η μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση του συνόλου των πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOC) σε κλειστούς χώρους επί οκταώρου βάσεως ανέρχεται στο 1 mg/m⁻³. Η τελική συγκέντρωση των οργανικών πτητικών ενώσεων στο εσωτερικό των κτιρίων εξαρτάται, από τον ρυθμό εκπομπής των εσωτερικών πηγών, την συγκέντρωση στο εξωτερικό περιβάλλον καθώς και τα επίπεδα του αερισμού στο κτίριο. Επίσης, οι Raatikainen et al., 2013 αναφέρονται σε αντίστοιχα όρια TVOC μετρημένα σε ppm τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα της παρούσας διατριβής. Οι πίνακες 2.5-6 συνοψίζουν τα επιτρεπτά όρια έκθεσης όπως και τις επιπτώσεις των TVOC στον ανθρώπινο οργανισμό.

Πίνακας 2.5: Οριοθέτηση συγκεντρώσεων TVOC ανάλογα με τις επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό για οκτάωρη έκθεση (Møhlhave et al., 1997)

Συγκέντρωση [=] mg/m ³	Συμπτώματα
<0.2	Κανένα
0.2-0.3	Πιθανός ερεθισμός ή δυσφορία
3-25	Πονοκέφαλος
>25	Νευροτοξικές συνέπειες (εγκεφαλοπάθεια, επιληπτικές κρίσεις, νευροπάθεια κρανιακών νεύρων)

Πίνακας 2.6: Κλίμακα έκθεσης σε συγκεντρώσεις συνολικών πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOC) (Raatikainen et al., 2013)

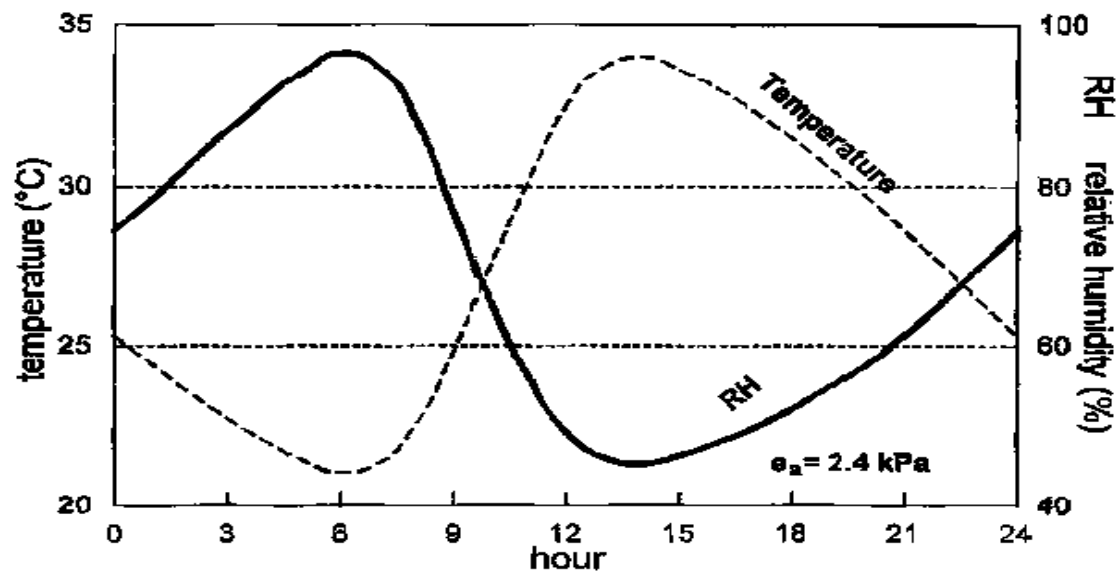
Ολική Συγκέντρωση	Ποιότητα αέρα
Έως 5 ppm	Πλήρως αποδεκτή
Από 5 έως 10 ppm	Αποδεκτή
Από 10 έως 15 ppm	Καλή
Από 15 έως 20 ppm	Κακή
Από 20 έως 25 ppm	Μη αποδεκτή
Πάνω από 25ppm	Επικίνδυνη

2.1.6 Θερμοκρασία-Σχετική Υγρασία

Ως σχετική υγρασία του αέρα, ορίζεται η επί τοις εκατό αναλογία της απόλυτης υγρασίας του αέρα προς τη μέγιστη δυνατή περιεκτικότητα του αέρα σε υδρατμούς (αέρας κορεσμένος σε υδρατμούς) σε μια ορισμένη θερμοκρασία, ή ομοίως, η επί τοις εκατό αναλογία της μερικής τάσης των υδρατμών προς την αντίστοιχη τάση των κορεσμένων υδρατμών (Nguyen et al., 2014). Εκφράζει την ποσότητα των υδρατμών που υπάρχουν σε συγκεκριμένο όγκο ατμοσφαιρικού αέρα σε σχέση με τη μέγιστη ποσότητα των υδρατμών που θα μπορούσαν να υπάρχουν, ή αλλιώς που θα μπορούσε να κρατήσει στη μάζα του ο συγκεκριμένος αέρας. Η σχετική υγρασία λοιπόν εκφράζει βαθμό κορεσμού. Αέρας με σχετική υγρασία 100% είναι κορεσμένος (saturated), περιέχει τη μέγιστη ποσότητα υδρατμών που μπορεί να κρατήσει. Όταν η σχετική υγρασία είναι μικρότερη από 100%, τότε ο αέρας είναι

ακόρεστος. Η απόλυτη υγρασία του αέρα ορίζεται ως η ποσότητα των υδρατμών η οποία περιέχεται σε 1 m^3 αέρα και μετράται σε γραμμάρια ανά κυβικό μέτρο (g/m^3). Για μια ορισμένη θερμοκρασία η περιεκτικότητα του αέρα σε υδρατμούς δεν είναι δυνατόν να ξεπεράσει μια καθορισμένη τιμή. Η θερμοκρασία με τη σειρά της, ως φυσική παράμετρος, είναι αντιστρόφως ανάλογη της σχετικής υγρασίας, καθώς όσο τα επίπεδά της αυξάνονται στον αέρα, τόσο περισσότεροι υδρατμοί μπορούν να συκρατηθούν. Αυξανόμενη λοιπόν της θερμοκρασίας, δίνεται περισσότερος "χώρος" στην κατακράτηση υδρατμών και έτσι ο αέρας καθυστερεί να γίνει κορεσμένος, με αποτέλεσμα η σχετική υγρασία να μειώνεται. Το σχήμα 2.6 απεικονίζει την ημερήσια πορεία της σχετικής υγρασίας η οποία είναι αντίστροφη της θερμοκρασίας του αέρα, υπό την επίδραση μίας συγκεκριμένης τάσης ατμών. Αντίστροφα, όπως είναι λογικό, όταν η θερμοκρασία του αέρα, που περιέχει ορισμένη ποσότητα υδρατμών ελαττώνεται, η σχετική υγρασία του αυξάνει (Stull et al.,2011).

Όσο αφορά την επίδραση στον άνθρωπο, παρατηρείται ότι όταν ο αέρας βρίσκεται πολύ κοντά στο σημείο κορεσμού, λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας των υδρατμών, συνήθως προκαλεί αίσθημα δυσφορίας και δυσχεραίνει την αναπνοή και την αποβολή του ύδατος από το δέρμα (Giannopoulou et al., 2013). Σε περίπτωση μάλιστα που το φαινόμενο συνδυάζεται με υψηλή θερμοκρασία, τότε ελλοχεύει κίνδυνος θερμοπληξίας. Ο θερμός και ξηρός αέρας είναι περισσότερο ανεκτός όταν δεν είναι πολύ υγρός. Σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 2425/86 η περιοχή των θερμοκρασιών ευεξίας χαμηλώνει, όσο αυξάνει η δραστηριότητα του ατόμου με την ελάχιστη θερμοκρασία για έντονη δραστηριότητα να είναι $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Οι συνιστάμενες θερμοκρασίες για χώρους γραφείων το χειμώνα είναι $21\text{-}23 \text{ }^\circ\text{C}$ και το καλοκαίρι $25\text{-}26 \text{ }^\circ\text{C}$. Σύμφωνα με την ίδια οδηγία, τα συνιστάμενα όρια για την υγρασία σε κτήρια γραφείων είναι 30-35% το χειμώνα και 40-50% το καλοκαίρι.



Σχήμα 2.6: Συσχέτιση θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας σε μια συγκεκριμένη τάση ατμών (Allen et al., 1998)

2.1.7 Βιοαερολύματα

Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων διαδραματίζουν τα αιωρούμενα σωματίδια βιολογικής προέλευσης. Μεταδίδονται, κυρίως, με τον αέρα δηλαδή με την εισπνοή σωματιδίων και σταγονιδίων που περιέχουν βακτήρια, μύκητες ή τμήματα αυτών. Αερομεταφερόμενοι οργανισμοί είναι μύκητες, τμήματα τους και τα σπόρια τους οι γυρεόκοκκοι, βακτήρια, ακάρεα, κ.ά. Το μεγαλύτερο ποσοστό των βιοαερολυμάτων αποτελούν συνήθως οι μύκητες.

Διεθνείς μελέτες (Shelton et al., 2002, Kim et al., 2017, Liu et al., 2018) αναφέρουν την ύπαρξη ισχυρής συσχέτισης μεταξύ υψηλών συγκεντρώσεων μυκήτων σε κλειστούς χώρους και της πρόκλησης αλλεργικών ή ασθματικών αντιδράσεων καθώς και πνευμονοπαθειών. Αριθμητικά το σύνολο του μικροβιακού φορτίου εκφράζεται σε αποικίες (Colony Forming Units) ανά κυβικό μέτρο αέρα (CFU / m³).

Συγκεντρώσεις ολικού μικροβιακού φορτίου που απαντώνται στον εσωτερικό αέρα μη βιομηχανικών κτιριακών συγκροτημάτων ανάλογα με τον αριθμό των αποικιών (CFU) ανά κυβικό μέτρο (m³) αέρα, ταξινομούνται από την Ευρωπαϊκή Ένωση σε πέντε κατηγορίες (πίνακας 2.7). Πρέπει να αναφερθεί ότι αναλόγως της μεθόδου δειγματοληψίας και ανάλυσης, τις κλιματολογικές συνθήκες, το περιβάλλον γύρω από τον χώρο εργασίας και την εποχή οι συγκεντρώσεις διαφέρουν και θα πρέπει να συγκρίνονται με την ποιότητα του εξωτερικού αέρα. Τα κυριότερα γένη μυκήτων που απαντώνται σε εσωτερικούς χώρους όπως και τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους, παρατίθενται στον πίνακα 2.8.

Ιδιαίτερο όμως ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχέση των αερομεταφερόμενων μυκήτων με τα αιωρούμενα σωματίδια. Διάφορες έρευνες της διεθνούς βιβλιογραφίας αναφέρουν ταυτόχρονη μέτρηση, αλληλεξάρτηση και αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των αέριων ρυπαντών στην ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένα, η μελέτη των Degobbi et al., 2011 ύστερα από μετρήσεις 39 ημερών το Σάο Πάολο της Βραζιλίας κατέληξε στο ότι τα σπόρια από διάφορα γένη μυκήτων βρέθηκαν να κατέχουν μεγάλο ποσοστό στα μετρούμενα PM_{2.5} της περιοχής. Οι ίδιοι ερευνητές συνδέουν τους μύκητες με την επαναίωση των σωματιδίων από το έδαφος. Άλλες δημοσιεύσεις όπως αυτές των Sousa et al., 2008 και Grinn-Gofroí et al., 2011 σε Πορτογαλία και Πολωνία αντίστοιχα, αναφέρουν ότι οι στατιστικά σημαντικές συσχέτισεις μεταξύ της συγκέντρωσης των βιοαερολυμάτων και των αιωρούμενων σωματιδίων επηρεάζονται από την εποχικότητα και άρα εξαρτώνται άμεσα από την περίοδο που λαμβάνουν χώρα τα πειράματα. Στους εσωτερικούς χώρους όμως φαίνεται να υπάρχει κάποια συσχέτιση στη συμπεριφορά των αέριων μυκήτων με τα αιωρούμενα σωματίδια αν και το θέμα είναι αρκετά περίπλοκο. Η έρευνα των Hargreaves et al., 2003 σε σπίτια στην Αυστραλία αναφέρει ότι τέτοιες συσχέτισεις εξαρτώνται τόσο από τη συγκέντρωση και το μέγεθος των σωματιδίων όσο και από το ρυθμό διάχυσης (diffusion rate) του ενός προς το άλλο. Από τις μετρήσεις τους, βρέθηκε μια αδύναμη αλλά στατιστικά σημαντική σχέση μεταξύ αερομεταφερόμενων μυκητιακών συγκεντρώσεων και αιωρούμενων σωματιδίων υπό συνθήκες σχεδόν μηδενικού αερισμού.

Στην Ελλάδα παρόμοια πειράματα έχουν λάβει χώρα σε σχολικά κτίρια. Η πρόσφατη μελέτη σε σχολεία της Αθήνας από την Δόριζα, 2014 αναφέρει σημαντικές θετικές συσχέτισεις εντός των

περισσότερων αιθουσών μεταξύ των PM₁₀ και του συνολικού μυκητιακού φορτίου, καθώς και των PM₁₀ και PM_{2.5} με το μυκητιακό γένος *Aspergillus*.

Πίνακας 2.7: Ταξινόμηση επιρροής στον ανθρώπινο οργανισμό με βάση το ολικό φορτίο μυκήτων (European Commission, 1993)

Κατηγορία Ταξινόμησης	Ολικό φορτίο μυκήτων (CFU/m ³)
Πολύ χαμηλό	0 - 25
Χαμηλό	25 - 100
Μεσαίο	100 - 500
Υψηλό	500 - 2000
Πολύ υψηλό	> 2000

Πίνακας 2.8: Κυρίαρχα γένη και χαρακτηριστικά αερομεταφερομένων μυκήτων (Barnett & Hunter, 1999)

Γένος	Χαρακτηριστικά
Penicillium	Οι κονιδιοφόροι του γένους <i>Penicillium</i> έχουν πολύ χαρακτηριστική εμφάνιση και μοιάζουν με ψήκτρα. Μπορεί να είναι απλοί ή να διακλαδίζονται κοντά στην κορυφή τους, η οποία καταλήγει σε ένα σύνολο φιαλιδίων. Τα κονίδια (φιαλιδιοσπόρια) είναι πράσινα μονοκύτταρα, συνήθως σφαιρικά και λιγότερο συχνά ωειδή και σχηματίζονται σε αλυσίδες από τα άκρα των φιαλιδίων.
Cladosporium	Οι αποικίες έχουν χρώμα σκούρο πράσινο. Τα κονίδια σχηματίζουν διακλαδισμένες αλυσίδες στην κορυφή του κονιδιοφόρου, όμως οι αλυσίδες διαλύονται πολύ εύκολα και η παρατήρησή τους στο μικροσκόπιο είναι σχεδόν αδύνατη. Τα κονίδια (βλαστοσπόρια) είναι

	σκουρόχρωμα και το τυπικό σχήμα τους είναι λεμονοειδές. Μπορούν επίσης, να παρατηρηθούν επιμήκη μονοκύτταρα ή δίκύτταρα σπόρια. Τα σπόρια έχουν χαρακτηριστικές «προεξοχές», λόγω του τρόπου σχηματισμού τους
Aspergillus	Απλοί κονιδιοφόροι, που καταλήγουν σε μια σφαιρική ή ροπαλοειδή κύστη, στην κορυφή της οποίας υπάρχουν φιαλίδια. Τα φιαλίδια μπορεί να σχηματίζονται απευθείας πάνω την κύστη ή να παρεμβαίνουν στηρίγματα. Τα κονίδια (φιαλιδοσπόρια) είναι μονοκύτταρα, σφαιρικά και παράγονται σε μακριές αλυσίδες από την άκρη των φιαλιδίων.
Ζύμες	Μονοκύτταροι μύκητες που αναπαράγονται αγενώς με εκβλάστηση. Οι αποικίες έχουν κρεμώδη εμφάνιση. Οι ζύμες ανήκουν κυρίως στο φύλο Ascomycotina και παράγουν ασκοσπόρια εντός των κυττάρων τους.

2.1.8 Αερισμός

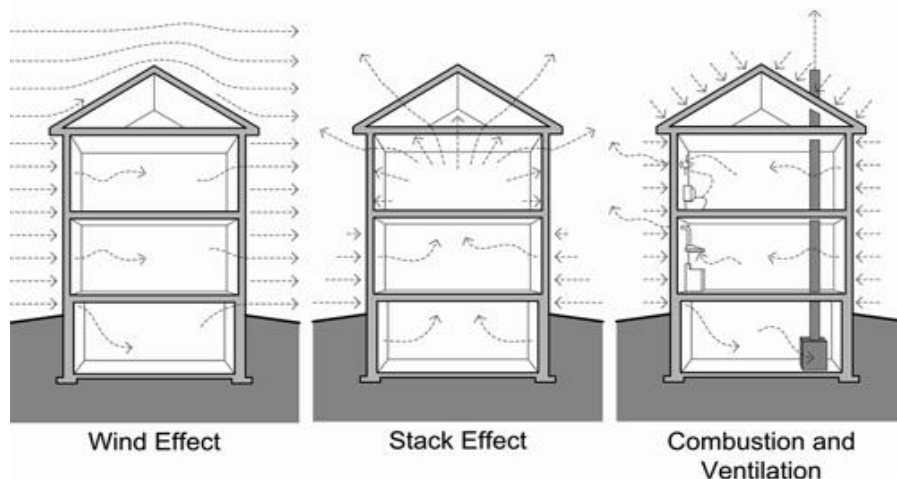
Κύρια παράμετρος καθορισμού της ποιότητας του αέρα, της ανθρώπινης υγείας και της θερμική άνεσης σε ένα εσωτερικό περιβάλλον κτιρίου είναι ο βαθμός αερισμού. Ο σωστός αερισμός διασφαλίζει την παροχή οξυγόνου για μεταβολισμό καθώς και την απομάκρυνση συγκεντρώσεων ρύπων και ανεπιθύμητων οσμών (Δόριζα, 2014). Στις περισσότερες των περιπτώσεων μάλιστα, αποτελεί και τη βέλτιστη λύση ενάντια στις υψηλές συγκεντρώσεις αέριων ρύπων. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (CEC, 1992), αερισμός ορίζεται ως «η παροχή ή η απομάκρυνση αέρα προς και από ένα χώρο, με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού του αέρα» αλλά και σύμφωνα με το πρότυπο της ASHRAE, ο αερισμός ορίζεται σαν «η διαδικασία παροχής και απομάκρυνσης κλιματιζόμενου αέρα με φυσικά ή μηχανικά μέσα προς και από ένα χώρο, με σκοπό τη διασφάλιση των επιθυμητών επιπέδων υγρασίας, θερμοκρασίας καθώς και των ρύπων στα εσωτερικά περιβάλλοντα», (ASHRAE, 2007). Η βασική αρχή του αερισμού είναι η βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα (IAQ), εισάγοντας φρέσκο αέρα από την έξωθεν ατμόσφαιρα, ελαττώνοντας έτσι τις συγκεντρώσεις των ρυπαντών (Ben-David και Waring, 2018). Σύμφωνα με τους (Miller, 1992) και (Silva et al., 2017), ο μη επαρκής αερισμός οδηγεί σε αυξήσεις βακτηριολογικών συγκεντρώσεων και στη δημιουργία των «άρρωστων κτιρίων» (SBS) που αναφέρθηκαν στις παραπάνω ενότητες. Η εισαγωγή φρέσκου εξωτερικού αέρα στους εσωτερικούς χώρους ίσως αποτελεί τη σημαντικότερη προσέγγιση για τη μείωση των συγκεντρώσεων των ρύπων στα εσωτερικά περιβάλλοντα.

Το παραπάνω είναι δυνατόν να επιτευχθούν με τη βοήθεια τόσο φυσικών όσο και μηχανικών μέσων και έτσι καθορίζονται δύο είδη αερισμού, ο φυσικός και ο μηχανικός. Ο φυσικός αερισμός συμπεριλαμβάνει τόσο την προμελετημένη μετακίνηση αέριων μαζών από το εξωτερικό περιβάλλον προς το εσωτερικό δια μέσω ανοιγμάτων όπως πόρτες και παράθυρα (ventilation), όσο και την ακούσια εισροή αέρα μέσω χαραμάδων και ρωγμών των κτιρίων (infiltration). Είναι σαφές ότι, ο θερμοκρασιακός έλεγχος σε χώρους στους οποίους λαμβάνει μέρος μόνο ο φυσικός αερισμός είναι εξαιρετικά δύσκολος. Ο αποτελεσματικός φυσικός αερισμός προϋποθέτει κατάλληλο σχεδιασμό ανοιγμάτων (CIBSE-AM10, 2005). Όσον αφορά τον μηχανικό ή εξαναγκασμένο αερισμό, η παροχή του επιτυγχάνεται με ηλεκτρικούς ανεμιστήρες οι οποίοι ως συνήθως αποτελούν τμήμα του συστήματος ψύξης, θέρμανσης και αερισμού του κτιρίου. Στην περίπτωση αυτή ο θερμοκρασιακός έλεγχος και άρα άνεση στο εσωτερικό των κτιρίων είναι εύκολο να επιτευχθεί (Alevantis, 1995).

Κινητήριες δυνάμεις του φυσικού αερισμού αποτελούν:

- Ο άνεμος (wind effect). Οι δυνάμεις του ανέμου λειτουργούν σε όλα τα κτίρια, δημιουργώντας τυπικά μια θετική πίεση στην προσήνεμη επιφάνεια και αρνητικές πιέσεις στους τοίχους (φαινόμενο αναρρόφησης).
- Οι πιέσεις δημιουργούμενες από θερμοκρασιακές διαφορές (stack effect) μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος ή από τις διαφορές στις θερμικές απολαβές μεταξύ των εσωτερικών χώρων.

Για την περίπτωση του μηχανικού αερισμού (mechanical ventilation), οι ανεμιστήρες προκαλούν την κίνηση του αέρα μέσα στα κτίρια και μέσω διάφορων εσοχών. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούνται εξαιρετικά μεγάλες πιέσεις. Εάν η ποσότητα του αέρα που εξάγεται από ένα κτίριο είναι μεγαλύτερη από την παρεχόμενη, τότε δημιουργείται αρνητική πίεση και αντιστρόφως. Η εικόνα 2.8 συνοψίζει τις διάφορες δυνάμεις που οδηγούν τη ροή του αέρα στο κτίριο μέσα από τις εσοχές του.



Εικόνα 2.8: Τρεις διαφορετικές μορφές αερισμού ενός κτιρίου βάσει δυνάμεων καθοδήγησης του ανέμου (Straube, 2014).

Η απαραίτητη ποσότητα αέρα που χρειάζεται το εκάστοτε κτίριο ούτως ώστε να εξασφαλίζεται η καλή ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος εξαρτάται κυρίως από τις συγκεντρώσεις και τη φύση των ρύπων που υπάρχουν στο χώρο. Στην πράξη, ένας κλειστός χώρος εμπεριέχει πολλούς και διαφορετικούς ρύπους. Στην περίπτωση που είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά της πηγής εκπομπής του κάθε ρύπου τότε είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο απαραίτητος ρυθμός αερισμού (σε h^{-1}) για την αποφυγή των υπερβάσεων προκαθορισμένων οριακών τιμών έκθεσης στον συγκεκριμένο ρυπαντή. Συνεπώς, για τον καθορισμό του απαραίτητου ρυθμού αερισμού είναι χρήσιμο να καθοριστεί ο επικρατέστερος ρύπος στον χώρο. Ο ελάχιστος αποδεκτός ρυθμός αερισμού είναι αυτός που απαιτείται για την εξασθένιση του επικρατέστερου ρύπου σε επιτρεπτά επίπεδα συγκεντρώσεων (Liddament, 1996).

Πληθώρα διεθνών δημοσιεύσεων έχει ασχοληθεί με το θέμα του επαρκούς ή μη αερισμού για διάφορους τύπους κτιρίων. Ενδιαφέρον έχει η διερεύνηση των αποτελεσμάτων από πειράματα που διεξήχθησαν σε σχολεία με φυσικό αερισμό, όπως είναι και η περίπτωση του υπό εξέταση κτιρίου της παρούσας διατριβής. Στην Ελλάδα η ενδιαφέρουσα δημοσίευση των Santamouris et al., 2008 παραθέτει αποτελέσματα εκτενών μετρήσεων αερισμού και διοξειδίου του άνθρακα σε 27 σχολεία στην Αθήνα. Το 77% των υπό εξέταση τάξεων βρέθηκε με ρυθμούς αερισμού κάτω από το θεσμοθετημένο όριο των 8 l/p/s (ASHRAE, 1989), τονίζοντας την ανεπάρκεια του συστήματος αερισμού ενώ κατά τις διδακτικές ώρες το CO_2 ξεπερνούσε σταθερά τα 1000ppm. Άλλωστε οι Bartlett et al., 2004 αναφέρουν την εξέταση της συμπεριφοράς των εσωτερικών συγκεντρώσεων CO_2 σαν έναν καλό επιπρόσθετο δείκτη επαρκούς ή μη αερισμού σε 11 σχολικές αίθουσες του Καναδά. Παρόμοια αποτελέσματα και σε τρία φυσικώς αεριζόμενα σχολεία (με συμβατικά κουφώματα) στη Πορτογαλία όπου οι Almeida et al., 2011 διαπίστωσαν ανεπαρκή επίπεδα αερισμού και υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων ιδιαίτερα στη διάρκεια των μαθημάτων. Ύστερα από μετρήσεις αερισμού και ποιότητας αέρα σε σχολεία του Ισραήλ, οι Becker et al., 2007 κατέληξαν στο ότι στα θερμά κλίματα, ο νυχτερινός αερισμός κρίνεται απαραίτητος αφενός μεν για ψύξη και αφετέρου για βελτίωση της IEQ. Επιπροσθέτως, οι Mumonic et al., 2009 διενήργησαν μετρήσεις ποιότητας αέρα, θερμικής άνεσης και θορύβου σε νεόκτιστες σχολικές αίθουσες στην Αγγλία. Κατέληξαν σε σχεδιαστικά σενάρια κατά τα οποία ο φυσικός αερισμός μέσω παραθύρων και πορτών διατηρούσε και τις τρεις μεταβλητές εντός θεσμοθετημένων ορίων. Αξίζει να αναφερθεί επίσης ο σημαντικός ρόλος της εξωτερικής αέριας ρύπανσης με την οποία έρχεται σε επαφή ένα κτίριο με φυσικό αερισμό. Η έρευνα των Tirrayawong et al., 2009 περιελάμβανε μετρήσεις αερισμού και ποιότητας αέρα σε ένα σχολικό κτίριο στη πόλη Τσιάνγκ Μάι της Ταϊλάνδης, μια περιοχή ιδιαίτερα επιβαρυνμένη σωματιδιακά. Οι ερευνητές παρατήρησαν ότι οι συγκεντρώσεις των εσωτερικών αιωρούμενων σωματιδίων καταγράφηκαν σε υψηλότερα επίπεδα κατά τη διάρκεια της νύχτας σε σχέση με τις αντίστοιχες πρωινές μετρήσεις ενώ παρατήρησαν αυξητικές τάσεις και τα Σαββατοκύριακα. Τα αποτελέσματα αυτά οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η συμβολή των εξωτερικών αιωρούμενων σωματιδίων στα εσωτερικά ήταν σημαντική και προέκυψε από τη εύκολη διείσδυση αέρα στις αίθουσες, λόγω υψηλών ρυθμών αερισμού (Air Exchange Rates).

2.2 Πράσινες οροφές στα κτίρια

2.2.1 Ορισμός και βασικές έννοιες

Ως “πράσινη ταράτσα” ορίζεται η στέγη ενός κτιρίου μερικώς ή εντελώς καλυμμένη με βλάστηση και ένα αυξανόμενο μέσο, όπου πραγματοποιούνται παρεμβάσεις, σύμφωνα με τις αρχές της επιστήμης και τεχνικής για την εγκατάσταση βλάστησης. Η χρήση του όρου «πράσινη» αναφέρεται στην αυξανόμενη τάση του περιβαλλοντισμού και όχι σε κτίρια που είτε έχουν χρωματισμένες πράσινες τις ταράτσες τους, είτε έχουν τοποθετήσει πράσινα κεραμίδια ή βότσαλα στεγών (Γιαννακούλα, 2012). Τρία είναι τα είδη πράσινης στέγης ή όπως συχνά αναφέρεται οροφόκηπου, ανάλογα με την χρήση τους, το είδος της βλάστησης, το ύψος εφαρμογής του συστήματος υποδομής και τους παράγοντες που επηρεάζουν την συντήρησή του (Czerniel Berndtsson, 2010, Mayrand και Clergeau, 2018):

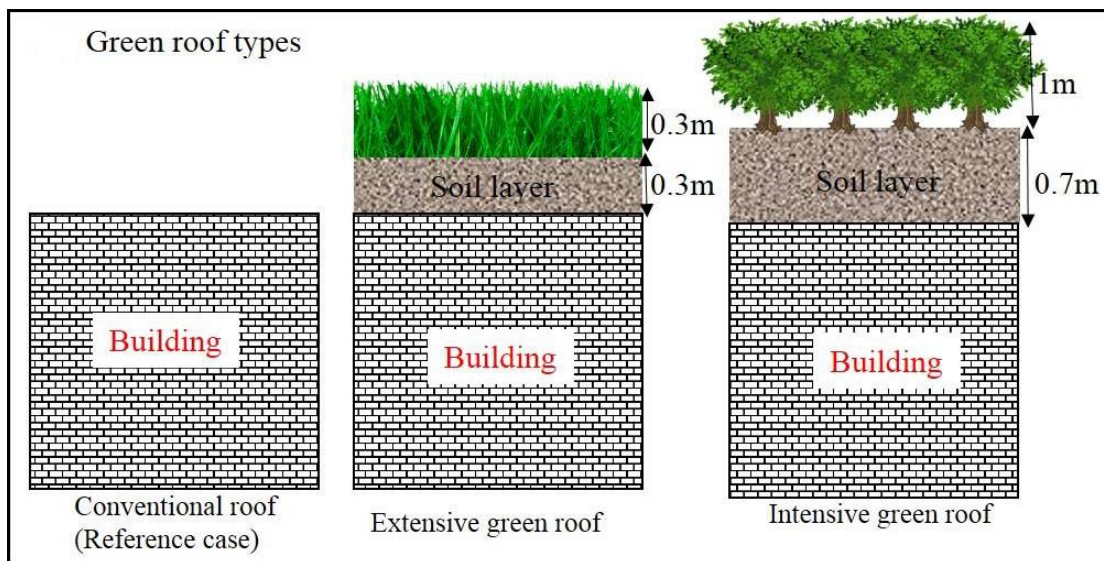
- Ο εκτατικός ή εκτενής τύπος (extensive green roof) που καλύπτεται από ένα ελαφρύ στρώμα βλάστησης και είναι ο ελαφρύτερος εκ των τριών τύπων (De-Ville et al., 2018). Η φυτοκάλυψη σε τέτοιου τύπου πράσινες ταράτσες δημιουργεί ένα μόνιμο οικοσύστημα για τη συντήρηση του οποίου απαιτείται ελάχιστη φροντίδα. Το κορεσμένο φορτίο του κυμαίνεται από 70-120 kg/m², και το ριζικό σύστημα των φυτών είναι επιφανειακό. Η κατασκευή στο σύνολο της, λόγω σχετικά χαμηλού βάρους, επιτρέπει την εγκατάστασή της σχεδόν σε οποιαδήποτε οροφή με κλίση έως και 45°. Λόγω αυτών των ευκολιών χρησιμοποιείται κατά κόρον στα κατοικήσιμα κτίρια. Σε κλίσεις άνω των 10° είναι απαραίτητη η πρόσθετη χρήση γεωκυψελών ή στοιχείων συγκράτησης του υποστρώματος ανάπτυξης φυτών από διάβρωση. Οι οροφές εκτατικού τύπου συνήθως αποτελούν αρκετά σκληρά περιβάλλοντα με αποτέλεσμα τα κατάλληλα φυτικά είδη να είναι στη πλειοψηφία τους εκείνα που απαντώνται σε απότομους βράχους. Ιδανικά για αυτό το είδος είναι τα φυτά χαμηλής βλάστησης, όπως θάμνοι, φυτικοί τάπητες, χλοοτάπητες, αγριολούλουδα και φυτά εδαφοκάλυψης με επιφανειακό ριζικό σύστημα που αναβλασταίνουν εύκολα. Η βλάστηση αυτή χρησιμοποιείται συχνότερα στα Μεσογειακά κλίματα (Monteiro et al., 2017).
- Ο ημιεντατικός τύπος (semi-intensive green roof) ένας ενδιάμεσος τύπος πράσινης οροφής μεταξύ του εντατικού και του εκτατικού τύπου. Εφαρμόζεται αυστηρά σε επίπεδες οροφές και αποτελείται από το σύστημα υποδομής και ένα ελαφρύ υπόστρωμα ανάπτυξης φυτών ύψους 12-40cm, με κορεσμένο φορτίο 120-250 kg/m² (Nagase et al., 2017). Απαιτεί τη βασική συντήρηση (άρδευση-λίπανση). Οι ημιεντατικοί τύποι πράσινης στέγης έχουν βαθύτερα χώματα και άρα παχύτερο υπόστρωμα από εκείνο του εκτατικού τύπου ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν μία ευρύτερη ποικιλία φυτικών ειδών (Kotsiris et al., 2012). Εντούτοις, το βάθος τους τις καθιστά βαριές, με αποτέλεσμα να απαιτούν ισχυρή δομή για να τις υποστηρίξει (Ntoulas et al., 2012). Για την εφαρμογή του σε επικλινείς στέγες είναι απαραίτητη η χρήση γεωκυψελών ή στοιχείων για την συγκράτηση του υποστρώματος και την υποστήριξη του φορτίου.
- Ο εντατικός τύπος (intensive green roof) έχει παχύτερο υπόστρωμα και μπορεί να συμπεριλάβει μια ευρύτερη ποικιλία φυτικών ειδών (Karachaliou et al., 2015). Μολαταύτα, είναι βαρύτερος και απαιτεί περισσότερη συντήρηση (Jim et al., 2011). Ο εντατικός τύπος συνίσταται στη δημιουργία ενός κήπου, σε περίπτωση δηλαδή που δεν επιθυμούμε απλώς μία

πράσινη στέγη με χαμηλή βλάστηση, αλλά τη δημιουργία ενός οροφώκηπου με δένδρα. Το υπόστρωμα του τύπου αυτού έχει εύρος 15-150cm και κορεσμένο φορτίο περίπου 250 kg/m². Όπως αναφέρθηκε, απαιτείται τακτική συντήρηση των φυτών (άρδευση, λίπανση). Τα είδη φυτοκάλυψης ξεκινούν από θάμνους μέχρι και μικρά δένδρα αρκεί να υφίσταται η απαραίτητη υποδομή στήριξης από το κτίριο (Spreak et al., 2013). Για την κατασκευή τους προτιμώνται συνήθως ευρείες παλαιές επιφάνειες ικανές να υποστηρίξουν ακόμη και μεγάλης έκτασης κήπους. Δεδομένου ότι οι εντατικοί τύποι αποτελούν μεγάλες κατασκευές ισχυρής στατικής υποστήριξης είναι κατάλληλοι ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν όχι μόνο τη φυτική μάζα και το σύστημα του υποστρώματος, αλλά επιπλέον μονοπάτια και υδάτινες ή οποιουδήποτε άλλου είδους κατασκευές.

Ο πίνακας 2.9 συνοψίζει τα βασικότερα χαρακτηριστικά των τριών τύπων πράσινης οροφής. Επιπροσθέτως, στην εικόνα 2.9 παρουσιάζονται τα ύψη χώματος – βλάστησης όπως και το διαφορετικό είδος φυτών για τον εκτατικό και εντατικό τύπο σχετικά με την οροφή του κτιρίου.

Πίνακας 2.9: Ταξινόμηση επιρροής στον ανθρώπινο οργανισμό με βάση το ολικό φορτίο μυκήτων (Κορδάτος, 2012)

Παράμετροι	Εκτατικός	Ημιεντατικός	Εντατικός
Είδος Χλωρίδας	Sedum spp, παχύφυτα, γλοοτάπητες, ποώδη, αρωματικά φυτά και μεσογειακά φυτά εδαφοκάλυψης	Μεσογειακά φυτά εδαφοκάλυψης, αρωματικά φυτά, θάμνοι μικρού/μεσαίου μεγέθους	Αρωματικά φυτά, θάμνοι μεσαίας/μεγάλης ανάπτυξης, μικρά/μεσαίας ανάπτυξης Δέντρα
Πότισμα	Ελάχιστο	Σε τακτά διαστήματα	Συχνό
Κόστος τοποθέτησης	Χαμηλό	Μέτριο	Υψηλό
Κόστος συντήρησης	Ελάχιστο	Κατά διαστήματα υψηλό	Υψηλό
Απόσβεση	Άμεση	Σχετικά Αργή	Αργή



Εικόνα 2.9: Βασικά χαρακτηριστικά φύτευσης εκτατικού (extensive) και εντατικού (intensive) τύπου πράσινης οροφής σε συμβατική (conventional) ταράτσα κτιρίου (Morakinyo et al., 2017).

Σε ό,τι αφορά τα κατασκευαστικά στοιχεία, η βασική δομή μιας πράσινης στέγης περιλαμβάνει τα ακόλουθα στρώματα (Στρατηγέα, 2013):

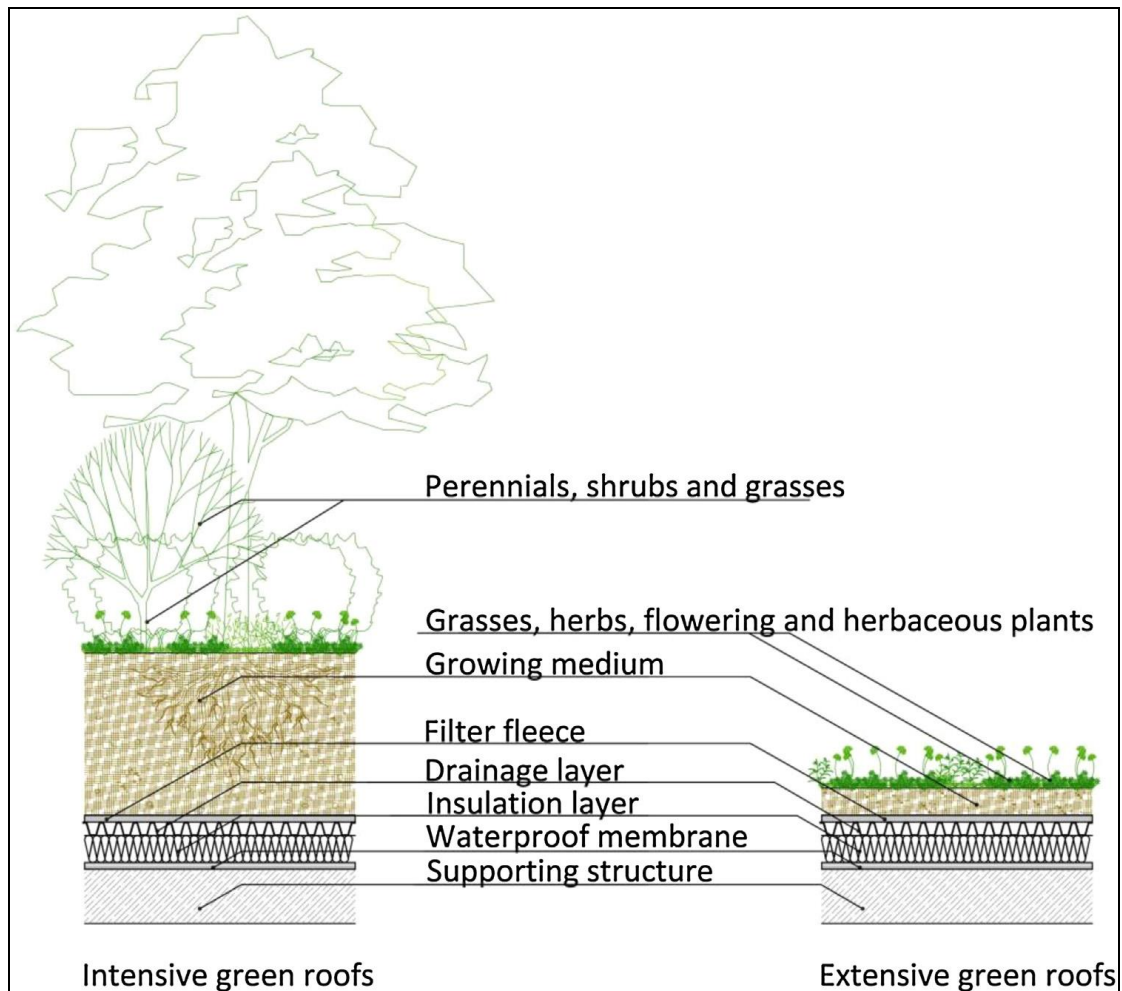
- Τμήμα για στατική στήριξη των επιπλέον φορτίων της στέγης (conventional structural support)
- Προστατευτική στρώση:
 - Υπόστρωμα συγκράτησης υγρασίας (vapour control)
 - Θερμομονωτική μεμβράνη ή θερμομονωτικό στρώμα (thermal insulation)
 - Μονωτική μεμβράνη στέγης (waterproof roofing membrane)
 - Μεμβράνη ελέγχου ριζών (root repellent system)
- Αποστραγγιστικό δίκτυο ή σύστημα αποστράγγισης (drainage system)
- Φύλλο διήθησης ή διηθητικό φύλλο (filtering layer)
- Ειδικό ελαφρύ υπόστρωμα ανάπτυξης φυτών (growing medium)
- Βλάστηση – φυτοκάλυψη (plants).

Πολλές φορές, ανάμεσα στο αποστραγγιστικό στρώμα και στη μεμβράνη ελέγχου ριζών υπάρχει μια επιπλέον προστατευτική ζώνη.

Στην εικόνα 2.10 παρουσιάζονται τα στρώματα μιας ανεστραμμένης πράσινης στέγης, με την ακόλουθη σειρά:

- Κατασκευή δώματος με εφαρμογή στρώσης στεγανοποίησης
- Μεμβράνη προστασίας όμβριων υδάτων
- Θερμομονωτική στρώση
- Αποστραγγιστικό στρώμα

- Διηθητικό φύλλο συγκράτησης υποστρώματος ανάπτυξης
- Υπόστρωμα ανάπτυξης φυτών (χώμα)
- Βλάστηση για εντατικό τύπο (γρασίδι, χορτώδη, λουλούδια, χαμηλή βλάστηση)
- Βλάστηση για εκτατικό τύπο (πολυετή δένδρα, υψηλοί θάμνοι, γρασίδι)



Εικόνα 2.10: Τυπική στρωμάτωση εντατικής και εκτατικής πράσινης οροφής (Brudermann και Sangkakool, 2017).

Η ποικιλία των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει η μετατροπή μιας συμβατικής οροφής σκυροδέματος σε μια πράσινη, είναι μεγάλη. Αρχικά σε ενεργειακό επίπεδο, καθώς μειώνεται σημαντικά το κόστος θέρμανσης του κτιρίου. Η διαστρωμάτωση, αναλόγως του πάχους της, αποτελεί επιπρόσθετη θερμομόνωση για την οροφή του κτιρίου και μειώνει σημαντικά τις απώλειες θέρμανσης κατά τις ψυχρές περιόδους. Την ίδια στιγμή, κατά τη διάρκεια των θερμών περιόδων, μειώνεται το κόστος ψύξης ολόκληρου του κτιρίου μέχρι και 49% (Κορδάτος, 2012). Αυτό οφείλεται στην αντανάκλαση και την απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων ηλιακής ενέργειας από τα φυτά καθώς επίσης και στην σκίαση που αυτά παρέχουν στην επιφάνεια της ταράτσας. Έτσι επιτυγχάνεται ενεργειακό και οικονομικό όφελος, ειδικά σε περιοχές όπου κατά τους θερινούς μήνες σημειώνονται αρκετά υψηλές θερμοκρασίες (Tam et al., 2016, Perini και Rosasco, 2016, Cascone et al., 2018). Εκτός όμως των

πλεονεκτημάτων που αφορούν άμεσα ένα κτιριακό συγκρότημα, η συμβολή των φυτεμένων οροφών στο έξωθεν περιβάλλον αλλά και γενικότερα στο κλίμα μιας πόλης είναι αξιοπρόσεκτη (Santamouris, 2014, Jayasooriya et al., 2016). Τα φυτά παράγοντας οξυγόνο μέσω της φωτοσύνθεσης και απορροφώντας διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα μπορούν βελτιώνουν σε τοπικό επίπεδο την ποιότητα του αέρα μιας περιοχής. Συγχρόνως, απορροφούν ποσότητες σκόνης και αέριων ρύπων και συμβάλλουν παράλληλα στη μείωση της ηχορύπανσης (Pugh et al., 2012, Scharf και Zluwa, 2017). Επιπλέον, επιτυγχάνουν μείωση της απορροής όμβριων υδάτων στους υπονόμους έως και 90% αφού μεγάλη ποσότητα νερού απορροφάται από τα φυτά που βρίσκονται στις στέγες (Tan et al., 2017, Zhang et al., 2018). Ο βαθμός απορρόφησης του ύδατος, εξαρτάται σημαντικά από τον τύπο βλάστησης που χρησιμοποιείται στην εκάστοτε πράσινη οροφή. Οι πράσινες οροφές άλλωστε αποτελούν έναν από τους λίγους τρόπους επαναφοράς της βλάστησης στα αστικά κέντρα και μπορούν να αποτελέσουν καταφύγιο ακόμη και για την τοπική χλωρίδα και πανίδα. Επιπροσθέτως, παρέχουν πυροπροστασία αλλά και προστασία από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η δημοσίευση των Köhler et al., 2002 από την Γερμανία, αναφέρει ότι οι φυτεμένες οροφές εμποδίζουν την πιθανή εξάπλωση της φωτιάς σε μεγαλύτερο βαθμό από αντίστοιχες με χαλίκι. Επίσης, η διείδυση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και μικροκυμάτων στο κτίριο, με την εγκατάσταση της πράσινης ταράτσας, περιορίστηκε σε πολύ μεγάλο ποσοστό.

Πέραν των ενεργειακών και τα περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων, σημαντικά είναι και τα οικονομικά οφέλη τα οποία προσφέρει η φύτευση μιας συμβατικής οροφής. Με την εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος, η μόνωση του δώματος ενισχύεται και προστατεύεται από εξωτερικούς παράγοντες που θα ελάττωναν σημαντικά τη διάρκεια ζωής της (Shafique et al., 2018, Berto et al., 2018, Mahdiygar et al., 2018). Επιπλέον, το κτίριο αναβαθμίζεται αισθητικά και συνεπώς αυξάνεται η εμπορική του αξία. Η δημιουργία πράσινων στεγών στα κτίρια μητροπολιτικών περιοχών θα μπορούσε ενδεχομένως να συμβάλλει στην ενίσχυση της ψυχικής υγείας - ηρεμίας των κατοίκων καθώς και στη σύσφιξη των σχέσεων μεταξύ τους (McInvor et al., 2014, Vijayaraghavan 2016). Το γεγονός επίσης ότι αυξάνονται πλέον οι προς εκμετάλλευση χώροι του κτιρίου, οδηγεί και πάλι στην αύξηση της αξίας του ακινήτου. Τέλος, σε ορισμένες περιπτώσεις που το κλίμα της περιοχής το επιτρέπει, ευνοείται και η καλλιέργεια εδώδιμων φυτών πάνω στις πράσινες οροφές. Με τον τρόπο αυτό, ενισχύεται ακόμη περισσότερο η βιώσιμη ανάπτυξη και μιας μικρής κλίμακας αγροτική δραστηριότητα εντός μιας αστικής περιοχής (Samangoeei et al., 2016, Grard et al., 2017, Russo et al., 2017).

Σχετικά με τα μειονεκτήματα των πράσινων οροφών, το υψηλό κόστος κατασκευής και εγκατάστασης αποτελεί το βασικότερο (Carter et al., 2008). Στις πιο σεισμογενείς περιοχές, οι διάφοροι τύποι πράσινων οροφών έχουν μεγαλύτερη στατική και δομική απαίτηση από ένα κτίριο. Σε ορισμένα είδη κτιρίων μάλιστα, για λόγους στατικότητας απαγορεύεται η κατασκευή φυτεμένων οροφών με αυξημένο ολικό φορτίο υποστρώματος και βλάστησης. Αναλόγως του τύπου της πράσινης στέγης (εκτατικός, ημιεντατικός, εντατικός), το κόστος συντήρησης μπορεί να είναι ιδιαίτερα ψηλό ή χαμηλό. Σε μερικές περιπτώσεις οι πράσινες ταράτσες έχουν υψηλότερες απαιτήσεις από το σύστημα στεγανοποίησης επειδή το νερό παραμένει στη στέγη λόγω της δυνατότητας των ριζών να διαπερνούν την αδιάβροχη μεμβράνη (Wolf και Lundholm, 2008). Μολαταύτα, ένα συγκεκριμένο είδος φυτού (το sedum), παρουσιάζεται ανθεκτικό στην ανομβρία (Bouzouidja et al., 2016, Tapia et al., 2017). Δεν

χρειάζεται μεγάλες ποσότητες νερού για να επιβιώσει στις στέγες αφού έχει τη δυνατότητα να αντέξει για μεγάλες περιόδους ξηρασίας και έτσι ένα αποστραγγιστικό στρώμα μπορεί να καταπολεμήσει αυτό το πρόβλημα. Επιπλέον, τα πιο σύγχρονα σχεδιασμένα και εγκατεστημένα συστήματα στεγανοποίησης, περιλαμβάνουν εμπόδια ρίζας (Lazzarin et al., 2005, Chagolla-Aranda et al., 2017). Πρέπει να αναφερθεί ότι η εγκατάσταση των επαρκών στεγανοποιητικών συστημάτων και εμποδίων ρίζας ενδέχεται να αυξήσει το αρχικό κόστος εγκατάστασης της πράσινης οροφής, εντούτοις, με τη πάροδο του χρόνου οδηγεί σε απόσβεση αυτού του κόστους. Αυτό συμβαίνει διότι, μια πράσινη στέγη προστατεύει τη στεγανοποιητική μεμβράνη από την ηλιακή ακτινοβολία UV (Getter και Rowe, 2006), με συνέπεια η αρχικώς υπολογιζόμενη διάρκεια ζωής της μεμβράνης να διπλασιάζεται ή τριπλασιάζεται, και με τον τρόπο αυτό το αρχικό κόστος κατασκευής να αποσβένεται.

2.2.2 Θερμική επίδραση φυτεμένων οροφών

Η φύτευση οροφών είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται από αρχαιοτάτων χρόνων. Η τεχνική αυτή θεωρείται μια αποτελεσματική λύση για τη βελτίωση του εσωτερικού κι εξωτερικού περιβάλλοντος στα κτήρια και τις πόλεις. Σύμφωνα με διεθνής μελέτες, συγκριτικά με κοινές οροφές, οι πράσινες οροφές κάνουν καλύτερη διαχείριση του νερού της βροχής (Mentens et al. 2006, Fioretti et al. 2010) και μειώνουν τη ρύπανση του αέρα (Yang et al. 2008 & Li et al. 2010), καθώς και το θόρυβο (Schradler et al. 2006). Ακόμα, βελτιώνουν τη θερμική μόνωση ενός κτηρίου ώστε η πρόσληψη ενέργειας από τον ήλιο, κι η απώλεια ενέργειας, μειώνονται κατά 70% με 90% το καλοκαίρι, και 10% με 30% το χειμώνα αντίστοιχα (Liu et al., 2005).

Η τεχνολογία πράσινων οροφών καταφέρνει επίσης να μειώσει την ενεργειακή κατανάλωση του κτηρίου, και να βελτιώσει την εσωτερική άνεση κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού, σε κλίματα που χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές θερμοκρασίας κι ακτινοβολίας (Mahmoud et al., 2017). Οι Fioretti et al., 2010 πραγματοποιώντας μετρήσεις πάνω σε ασφαλτοστρωμένη ταράτσα στην Ιταλία, παρατήρησαν πως η θερμοκρασία της άγγιξε τους 60°C μια ημέρα του Αυγούστου ενώ η αντίστοιχη σε μια πράσινη οροφή της ίδιας περιοχής (εικόνα 2.11) μετρήθηκε 20°C χαμηλότερη. Επιπλέον, στην Όσακα της Ιαπωνίας, οι Onmura et al., 2001, μέτρησαν 30°C υψηλότερη θερμοκρασία σε τσιμεντένια οροφή σε σχέση με την πράσινη οροφή.

Η βελτίωση που προσφέρουν οι πράσινες οροφές στην θερμική άνεση όμως, ξεπερνάει τα όρια της εξωτερικής στέγασης, με αποτέλεσμα να παρατηρείται βελτίωση θερμικών συνθηκών και στις αίθουσες εντός του κτηρίου που είναι και το ζητούμενο. Οι Huang et al., 2015 εντόπισαν λιγότερες περιπτώσεις υπερθέρμανσης στις αίθουσες σχολικού κτιρίου στη Ταιβάν που ήταν καλυμμένες με πράσινη οροφή, σε σχέση με τις κοινές αίθουσες. Οι Jaffal et al., 2012, διαπίστωσαν πως το εύρος της διακύμανσης της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα είναι σαφώς μικρότερο στην περίπτωση της πράσινης οροφής κατά τη διάρκεια της ημέρας, και πως η πράσινη οροφή προστατεύει το κτήριο από ακραίες θερμοκρασίες. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξε και η πιο πρόσφατη έρευνα των Rakotondramiarana et al., 2013. Στη μελέτη των Moghbel και Salim 2017, βρέθηκε ότι η εσωτερική θερμοκρασία κάτω από πράσινη οροφή ενός κτιρίου στο Ιράν ήταν 3,7°C χαμηλότερη από την αντίστοιχη υπό ασφαλτοστρωμένη οροφή. Συγκεκριμένα, το εύρος θερμοκρασίας με πράσινη οροφή

ήταν 23-36°C, ενώ με τη συμβατική 32-44°C. Αντίστοιχα, σε κτίριο στο Ελλαδικό χώρο (περιοχή Λουτρακίου) οι Niachou et al., 2001 μέτρησαν την μέση ημερήσια θερμοκρασία δωματίου κάτω από πράσινη οροφή να μην ξεπερνάει τους 30°C κατά τη διάρκεια μιας τυπικής καλοκαιρινής ημέρας. Εκτός όμως από το καλύτερο περιβάλλον στην οροφή κι εντός του κτηρίου, το ψυκτικό αποτέλεσμα των πράσινων οροφών εκτείνεται μέχρι το έδαφος βελτιώνοντας ακόμα το μικροκλίμα της γειτονιάς όπως παρατηρείται στη μελέτη των Peng και Jim, 2013 για μια αστική συνοικία στο Χονγκ Κονγκ.

Μολαταύτα, πρέπει να αναφερθεί ότι έχουν γίνει μελέτες που επεξεργάζονται τα αποτελέσματα επίδρασης των πράσινων οροφών σε σύγκριση με τα αντίστοιχα όταν χρησιμοποιούνται ειδικά μονωτικά υλικά. Έχει βρεθεί λοιπόν, από τους Sailor, 2008 και Kotsiris et al., 2012 ότι το θερμικό αποτέλεσμα των πράσινων οροφών είναι αμελητέο σε ήδη θερμικά μονωμένα κτήρια. Ταυτοχρόνως, έχει βρεθεί πως στα Μεσογειακά κλίματα τα συστήματα πράσινων οροφών δεν μπορούν να υποκαταστήσουν τα θερμομονωτικά υλικά για να τηρηθούν τα συνιστάμενα όρια (Perini, 2013). Επιπλέον, η έρευνα των Zinzi και Agnoli, 2011 ύστερα από μετρήσεις σε Βαρκελώνη, Παλέρμο και Κάιρο, αναφέρει ότι οι πράσινες οροφές μπορούν να βελτιώσουν τις συνθήκες υγρασίας και ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου με βασικό προαπαιτούμενο τη σωστή χρήση του συστήματος ποτισμού.



Εικόνα 2.11: Μετρήσεις μετεωρολογικών παραμέτρων πάνω σε πράσινη οροφή κτιρίου στη περιοχή της Αγκόνα, Ιταλία (Fioretti et.al, 2010).

2.3 Ποιότητα αέρα και πράσινες οροφές σε σχολεία

Η πρώτη ιστορικά σημαντική σειρά ερευνών της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων (Indoor Air Quality - IAQ) σε σχολεία, διεξήχθη με βάση τη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) ως μέτρο του ρυθμού του εξαερισμού ανά άτομο. Ο Σουηδός καθηγητής δημόσιας υγείας, Elias Heyman (1829-1889) από το Ινστιτούτο Καρολίνσκα, διεξήγαγε μια εκτεταμένη έρευνα στα σχολεία της Στοκχόλμης (Sundell, 2004). Στα σχολικά συγκροτήματα χωρίς εξαερισμό μέτρησε συγκεντρώσεις του CO₂ έως και πάνω από 5000 ppm, ενώ σε σχολικά κτίρια με κάποιο είδος εξαερισμού, τυπικά μετρούσε μέγιστες συγκεντρώσεις μεταξύ 400 και 1500 ppm. Συμπέρανε λοιπόν, ότι ούτε μία σχολική αίθουσα δεν είχε επαρκή εξαερισμό. Έκανε επίσης ένα ενδιαφέρον σχόλιο ως προς συχνά παράπονα 'ξηρού αέρα' σε ένα κτίριο με παροχή θερμού αέρα (έως 60 °C), μία αίσθηση η οποία δεν είχε καμία σχέση με την υγρασία αλλά ήταν αποτέλεσμα των ρυπαντών του αέρα που εισέρχονταν στο σύστημα από μία γειτονική καμινάδα. Παράλληλα με τα παράπονα 'ξηρού αέρα', υπήρχαν αναφορές για ερεθισμούς/φλεγμονές βλεννογόνων και δερματολογικά προβλήματα. Ο Heyman επίσης το 1881 μελέτησε την ποιότητα του αέρα εσωτερικών χώρων σε σπίτια και συμπέρανε ότι δεν μπορούμε να βασιστούμε στον 'φυσικό' εξαερισμό αν θέλουμε να ζήσουμε σε 'καθαρό' αέρα.

Το θέμα αυτό βέβαια χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, καθώς καμία εκ των παραπάνω εργασιών που έλαβαν χώρα στα σχολεία δεν κατέληξε σε σαφές συμπέρασμα για άμεση συσχέτιση των συμπτωμάτων υγείας με την χαμηλή ποιότητα αέρα εσωτερικού περιβάλλοντος. Η κυριότερη αιτία που δεν μπορεί να υπάρξει τέτοια συσχέτιση είναι, διότι τα παιδιά μπορεί να έχουν βεβαρημένο ιστορικό με παθήσεις όπως για παράδειγμα άσθμα, και αλλεργίες, οι οποίες απλά επιβαρύνονται με τις άσχημες συνθήκες που επικρατούν, παρά δημιουργούνται λόγω αυτών των συνθηκών. Αυτό ήταν ένα από τα βασικά συμπεράσματα που στηρίχθηκε στο γεγονός ότι, τα παιδιά με αλλεργικά συμπτώματα παρουσιάζονται τελικά ως πιο ευάλωτα σε ένα επιβαρυσμένο αέριο περιβάλλον (Braback et al., 1994 και Wichmann et al., 2009). Επιπλέον, εφόσον οι ανήλικοι δεν βρίσκονται μόνο μέσα σε χώρους όπως τα σχολεία, είναι αρκετά πιθανό τα οποιαδήποτε συμπτώματα να έχουν άμεση συσχέτιση με άλλους χώρους όπου περνούν κάποιες ώρες της μέρας τους. Βέβαια το σημαντικότερο μικροπεριβάλλον είναι το σπίτι τους και μια από τις κυριότερες αιτίες-πηγές αέριας ρύπανσης είναι το κάπνισμα των γονέων εντός της οικίας. Το ουσιαστικότερο συμπέρασμα που προκύπτει από τις παραπάνω έρευνες είναι πως τα παιδιά είναι ιδιαίτερα ευάλωτα σε ένα ήδη επιβαρυσμένο εσωτερικό περιβάλλον και πως τα προβλήματα που προκύπτουν λόγω αυτού ίσως να μην είναι πάντα ορατά, κάτι που το καθιστά ακόμα πιο επικίνδυνο για την υγεία τους (USEPA, 1996). Πληθώρα δημοσιεύσεων έχει ασχοληθεί με το ζήτημα της ποιότητας του αέρα με τον οποίο έρχονται σε επαφή οι μαθητές, με μετρήσεις σε διάφορα σχολικά κτίρια ανά τον κόσμο.

Στην Ευρώπη, οι Madureira et al., 2015 πραγματοποίησαν μετρήσεις σε 73 αίθουσες από 27 δημοτικά σχολεία στο Οπόρτο της Πορτογαλίας. Τα αποτελέσματά τους κατέδειξαν χαμηλές συγκεντρώσεις σε TVOC και υψηλές σε PM_{2.5}, PM₁₀ και αερομεταφερόμενους μύκητες. Επιπλέον κατάφεραν να συσχετίσουν τα διάφορα επίπεδα IEQ με αντίστοιχα συμπτώματα που εμφάνιζαν οι μαθητές, μέσω χορήγησης ειδικών ερωτηματολογίων. Στην ίδια περιοχή η μελέτη των Rufo et al., 2016 εξέτασε το ποσοστό βελτίωσης της IEQ όταν σε ένα σχολείο ακολουθούνταν το πρωτόκολλο SINGPHONIE (Schools Indoor Pollution and Health Observatory Network in Europe - Annesi Maesano et al, 2013), το

οποίο μεταξύ άλλων προβλέπει συχνότερο καθαρισμό των πινάκων και συγκεκριμένα ανοίγματα παραθύρων στις αίθουσες. Παρατήρησαν μείωση κατά 40% σε αιωρούμενα σωματίδια, μολονότι οι υπόλοιπες εξεταζόμενες παράμετροι (T, RH και CO) δεν παρουσίασαν βελτίωση. Σε τρία δημοτικά σχολεία της πόλης Κασσίνο, στη κεντρική Ιταλία, οι Stabile et al., 2017 διερεύνησαν την επιρροή της εποχικότητας στις μετρήσεις τους, διαχωρίζοντας τη πειραματική περίοδο σε θερμή (ανοιχτά παράθυρα) και ψυχρή (λειτουργία θέρμανσης στα κτίρια). Η ενδιαφέρουσα αυτή προσέγγιση κατέληξε στο ότι το ακόμη και τους θερμούς μήνες, όπου τα παράθυρα παραμένουν ανοιχτά, παρατηρήθηκε έντονη επιρροή από τα εξωτερικά σωματίδια λόγω της συχνής κυκλοφορίας οχημάτων. Προτείνουν τη χρήση ειδικών κλιματιστικών μονάδων με ιονιστή. Στο Γκλίβιτσε της Πολωνίας, οι Mainka et al., 2015 πραγματοποίησαν μετρήσεις ποιότητας αέρα σε δύο νηπιαγωγεία κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Παρατήρησαν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές σε αιωρούμενα σωματίδια και CO₂, υποδεικνύοντας εσωτερικές πηγές εκπομπής αέριων ρύπων. Στο Κλερμόν-Φεράν της κεντρικής Γαλλίας, η έρευνα των Canha et al., 2016 σε 51 αίθουσες από 17 σχολεία κατέδειξε ότι το 91% των τάξεων είχε μη επαρκή επίπεδα αερισμού ενώ οι δραστηριότητες των μαθητών επηρεάζουν τα επίπεδα της εσωτερικής αέριας ρύπανσης. Παρόμοια πειράματα με χρήσιμα αποτελέσματα έχουν διεξαχθεί στην Ολλανδία (Janssen et al., 2003), στην Γερμανία (Oeder et al., 2012), στην Ισπανία (Rivas et al., 2014), στη Δανία (Meyer et al., 2011), στη Λιθουανία (Krugly et al., 2014), στην Ουγγαρία (Szoboszlai et al., 2011), στη Τσεχία (Branis et al., 2005), στο Βέλγιο (Allaerts et al., 2017) και σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες. Στην Ελλάδα, οι κυριότερες έρευνες που αφορούν σχολικά κτίρια αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 1. Παρ' όλα αυτά, αξίζει να αναφερθεί επιπρόσθετα η μελέτη των Dorizas et al., 2013, η οποία σε μετρήσεις σε σχολεία της Αθήνας αναφέρει μεγάλη συνεισφορά των σωματιδίων που απελευθερώνονται από τις κιμωλίες στα συνολικά μετρούμενα PM₁₀ των αιθουσών.

Στην Ασία, όπως και στην Ευρώπη, παρουσιάζεται ένας σημαντικός αριθμός δημοσιεύσεων που αφορά στη ποιότητα αέρα εσωτερικών χώρων σε σχολεία καθώς οι περιοχές εκεί είναι ιδιαίτερα επιβαρυνμένες με υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η έρευνα των Goyal et al., 2009 σε μία αίθουσα δημοτικού σχολείου στο Νέο Δελχί της Ινδίας, κοντά σε έναν πολυσύχναστο δρόμο. Οι ερευνητές εκεί συμπέραναν ότι η υψηλή εξωτερική αέρια ρύπανση είχε άμεση επίδραση στα αιωρούμενα σωματίδια (PM₁₀ και PM_{2.5}) της τάξης, ενώ ο ρυθμός αερισμού και οι μετεωρολογικές παράμετροι επίσης επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των Yang et al., 2009 σε 55 ανακαινισμένα σχολεία της Νοτίου Κορέας. Τα αποτελέσματα στις αίθουσες αυτές παρουσίασαν υψηλές τιμές φορμαλδεΐδης (HCHO) κυρίως λόγω της μαζικής χρήσης ξύλου, τύπου MDF. Στη Μαλαισία, οι Ismail et al., 2010 ύστερα από μετρήσεις σε 3 δημοτικά σχολεία, τονίζουν τη διαφορά στα αποτελέσματα, κυρίως για τα αιωρούμενα σωματίδια, αναλόγως με χαρακτήρα της εκάστοτε περιοχής (εμπορικό κέντρο, προάστιο ή περίχωρα). Πιο πρόσφατα, η έρευνα των Ma et al., 2019 στη πόλη Σενγιάνγκ της Βορειοανατολικής Κίνας, μιας περιοχή με πολύ χαμηλές μέσες ετήσιες θερμοκρασίες, απέδειξε ότι τα κλειστά παράθυρα των αιθουσών μπορεί να οδηγήσουν σε συγκεντρώσεις CO₂ έως και 3863ppm, σχεδόν τέσσερις φορές άνω του επιτρεπτού ορίου των 1000ppm που προτείνεται από το πρότυπο ASHRAE, 2007. Η εγκατάσταση ενός μηχανικού συστήματος αερισμού σε αυτές τις τάξεις κρίνεται αναγκαία. Η σημασία των ακραίων μετεωρολογικών συνθηκών τονίζεται και στην εργασία του Abdel-Salam, 2019 ο οποίος από μετρήσεις που έλαβαν χώρα σε 16 σχολεία από διάφορες πόλεις του Κατάρ, αναφέρει αυξημένα επίπεδα

χονδρόκοκκων σωματιδίων PM_{10} λόγω επεισοδίων μεταφοράς σκόνης στο εξωτερικό περιβάλλον, ακόμα και αν τα συγκεκριμένα κτίρια ήταν εξοπλισμένα με σύστημα μηχανικού αερισμού.

Στις ΗΠΑ, οι Petronella et al., 2005 διεξάγοντας πειράματα σε ένα σχολείο στο Τέξας κατέγραψαν ικανοποιητικές τιμές PM_{10} και TVOC αλλά υψηλές συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μυκήτων (μεγαλύτερες των αντίστοιχων εξωτερικών) υποδεικνύοντας εσωτερικές πηγές εκπομπής. Αυξημένα επίπεδα αερομεταφερόμενων μυκήτων αναφέρονται και στη μελέτη των Levetin et al., 1995 σε 14 σχολεία σε διάφορες πόλεις της Αμερικής. Επιπλέον, σε μία μεγάλη έρευνα σε 64 σχολεία του Μίσιγκαν, οι Godwin και Batterman, 2007 κατέγραψαν υψηλές συγκεντρώσεις CO_2 και μη επαρκή φυσικό αερισμό. Παρ'όλα αυτά τα επίπεδα αιωρούμενων σωματιδίων και TVOC μετρήθηκαν κάτω από τα θεσμοθετημένα όρια. Η πιο πρόσφατη έρευνα των Majd et al., 2019 σε 16 σχολεία της Βαλτιμόρης τονίζει το θέμα της εισροής εξωτερικών αέριων ρύπων στο εσωτερικό περιβάλλον των κτιρίων μέσω του φυσικού αερισμού. Είναι ενδιαφέρον ότι στα πειράματα αυτά, οι επιστήμονες κατέγραψαν υψηλές τιμές μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και διοξειδίου του αζώτου (NO_2) εντός των αιθουσών, ενώ οι συγκεκριμένοι ρύποι απαντώνται κυρίως στο εξωτερικό περιβάλλον ως προϊόντα καύσης.

Στον υπόλοιπο κόσμο, η ενδιαφέρουσα έρευνα των Guo et al., 2010 που έλαβε χώρα σε ένα δημοτικό σχολείο στο Μπρίσμπεϊν της Αυστραλίας, δίνει έμφαση στην επιρροή των αποτελεσμάτων από τα αιωρούμενα σωματίδια του άμεσου εξωτερικού περιβάλλοντος. Στο σχολείο αυτό κατά τη διάρκεια των μετρήσεων πραγματοποιούνταν συχνά εργασίες συντήρησης του εξωτερικού κήπου (π.χ. κόψιμο γκαζόν) το οποίο βρέθηκε να αυξάνει τα επίπεδα των $PM_{2.5}$. Επιπροσθέτως, στην πόλη Κουρίτιμπα της Βραζιλίας, οι Avigo et al., 2008 ύστερα από μετρήσεις σε δύο σχολικά κτίρια παρατήρησαν ότι το μεγαλύτερο κλάσμα των μετρούμενων αιωρούμενων σωματιδίων αποτελούνταν κυρίως από αιθάλη, μύκητες και αργίλιο εφιστώντας τη προσοχή για τη ποιότητα του αέρα στους χώρους αυτούς. Επιπλέον, η έρευνα των Trebilcock et al., 2017 σε 16 σχολεία του Σαντιάγο στη Χιλή, προσανατολίζεται στα ιδιαίτερα χαμηλά ποσοστά θερμικής άνεσης των μαθητών εντός των τάξεων κατά τη διάρκεια ψυχρών ημερών ενώ αντίστοιχες μετρήσεις των Mustapha et al., 2011 στο Δέλτα του Νίγηρα, τονίζουν και πάλι την επίδραση του επιβαρυσμένου εξωτερικού περιβάλλοντος στον εσωτερικό αέρα των αιθουσών.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η διεθνής βιβλιογραφία που αφορά σε μετρήσεις ποιότητας αέρα σε σχολεία είναι πλούσια καθώς το θέμα παρουσιάζει ενδιαφέρον. Παρ'όλα αυτά ένας αρκετά μικρότερος αριθμός δημοσιεύσεων αναφέρεται σε μετρήσεις είτε αέριας ρύπανσης, είτε ενεργειακής κατανάλωσης σε σχολικά κτίρια τα οποία διαθέτουν φυτοκαλυμμένη οροφή. Χαρακτηριστικά οι έρευνες των Kim et al., 2012 και Hong et al., 2012 αναφέρονται σε μετρήσεις από δημοτικά σχολεία που κατέχουν πράσινη οροφή στη Σεούλ της Νότιας Κορέας. Οι ερευνητές αναφέρουν ικανοποιητικά επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας, μειωμένες εκπομπές CO_2 σε σχέση με συμβατικά κτίρια και εξοικονόμηση ενέργειας. Παρ'όλα αυτά βελτίωση στη ποιότητα του αέρα παρατηρήθηκε μόνο στο εξωτερικό περιβάλλον ενώ το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης της φυτοκαλυμμένης οροφής αναφέρεται ως πολύ σημαντικό κριτήριο για την τοποθέτησή της. Σε ότι αφορά τα Μεσογειακά κλίματα, στη Γένοβα της Ιταλίας η Perini, 2013 παρατήρησε βελτίωση στις συνθήκες θερμικής άνεσης στους χώρους ενός εκπαιδευτικού ιδρύματος με πράσινη στέγη. Πρέπει να σημειωθεί ωστόσο, ότι το είδος της βλάστησης έχει σημαντικό ρόλο τόσο στο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας (χαμηλές

απαιτήσεις ποτίσματος) όσο και στην μείωση των αέριων ρύπων, σύμφωνα με τους Ascione et al., 2015. Οι ίδιοι ερευνητές προτείνουν για το κτίριο της μελέτης τους, τη χρήση πλατύφυλλων φυτών. Στην Ελλάδα μέχρι τώρα δεν υπάρχει κάποια παρόμοια δημοσίευση που να αφορά σχολικό κτίριο με φυτοκαλυμμένη οροφή. Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα διατριβή καλείται να πραγματοποιήσει μια πρώτη προσπάθεια προς αυτή τη κατεύθυνση, παρουσιάζοντας αναλυτικά τα αποτελέσματα ποιότητας αέρα αλλά και θερμικών συνθηκών που επικρατούν σε ένα δημοτικό σχολείο (2^ο Νέας Σμύρνης) μέρος του οποίου καλύπτεται από πράσινη οροφή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

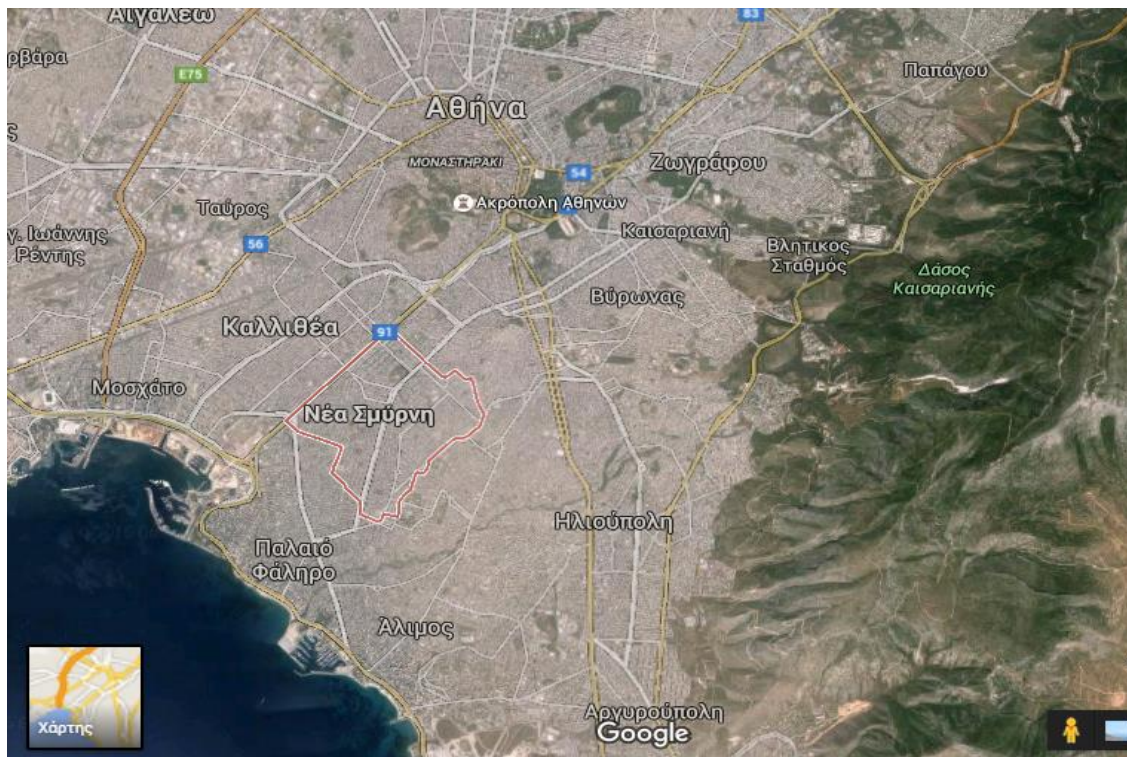
3.1 Μεθοδολογία πειραματικής μελέτης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται λεπτομερώς η μεθοδολογία της πειραματικής καμπάνιας που έλαβε χώρα στο 2^ο Δημοτικό σχολείο Νέας Σμύρνης, το οποίο βρίσκεται εντός μιας περιοχής με έντονα αστικά χαρακτηριστικά. Αρχικά, περιγράφονται τα γεωγραφικά και κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής στην οποία βρίσκεται το κτιριακό συγκρότημα και εν συνεχεία οι θέσεις δειγματοληψίας εντός αυτού. Ακολούθως, παρατίθενται οι βασικοί στόχοι του πειράματος και τέλος περιγράφεται το ακολουθούμενο πρωτόκολλο μετρήσεων.

3.1.1 Τοποθεσία πειράματος – θέσεις πειραματικού εξοπλισμού

Η πειραματική εκστρατεία πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της Νέας Σμύρνης η οποία βρίσκεται στα Νότια Προάστια της Αττικής πλησίον της θάλασσας και συγκεκριμένα κοντά στις ακτές του Σαρωνικού κόλπου (εικόνα 3.1). Το κλίμα της περιοχής είναι εύκρατο-μεσογειακό διατηρώντας το σύνολο των γενικών χαρακτηριστικών του λεκανοπεδίου Αττικής. Στα Ανατολικά περιβάλλεται από το όρος Υμηττός. Η συνολική έκταση του Δήμου Νέας Σμύρνης είναι 3487 km² και ο πληθυσμός του φτάνει τους 73076 κατοίκους. Ο χαρακτήρας της περιοχής είναι καθαρά αστικός με ομογενοποιημένες συνοικίες και πολυσύχναστους δρόμους.

Οι πηγές αέριας ρύπανσης είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες γύρω από την περιοχή της Νέας Σμύρνης συνδυάζοντας την κυκλοφορία των οχημάτων κυρίως από το κεντρικό τμήμα της Αθήνας (βόρεια διεύθυνση), τις εκπομπές από τα καράβια και άλλες παρόμοιες δραστηριότητες από το λιμάνι του Πειραιά (νοτιοδυτική διεύθυνση) καθώς και τις εκπομπές καυσίμων θέρμανσης από τις κοντινές κατοικίες. Το 2^ο Δημοτικό σχολείο Νέας Σμύρνης (εικόνα 3.2) είναι ένα διώροφο κτίριο, πλησίον ενός πολυσύχναστου δρόμου (οδός Αγίας Σοφίας) με συντεταγμένες 37 ° 56'19.8 "B, 23 ° 42'57.8" E. Δεν υπάρχει παρουσία εργοστασίων ή βαριάς βιομηχανίας εντός της περιοχής.



Εικόνα 3.1: Η περιοχή της Νέας Σμύρνης εντός του λεκανοπεδίου Αττικής



Εικόνα 3.2: Πανοραμική εικόνα του κτιρίου και το μέρος του που καλύπτεται από πράσινη οροφή

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέταση των τοπικών μετεωρολογικών συνθηκών και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του εξωτερικού περιβάλλοντος κατά τις περιόδους εκτέλεσης των πειραμάτων. Όπως αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία (παράγραφος 2.1.3.2) η μετεωρολογία και οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην πόλη παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση κάποιων κλιματικών στοιχείων ενός μικροπεριβάλλοντος. Για το λόγο αυτό, στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται μηνιαίες μετρήσεις θερμοκρασίας, βροχόπτωσης, ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου, οι οποίες παραχωρήθηκαν από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών με βάση τον μετεωρολογικό σταθμό Νέας Σμύρνης. Περισσότερες πληροφορίες για τα δεδομένα αυτά μπορούν να βρεθούν στον δικτυακό τόπο <https://penteli.meteo.gr/stations/neasmyrni/>. Τα στοιχεία δείχνουν ότι κατά τη διάρκεια του Ιουνίου 2016 και 2017 παρατηρήθηκαν αυξημένες βροχοπτώσεις για την εποχή. Επιπλέον, σημειώνονται αρκετά χαμηλές μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες από τον Δεκέμβρη έως τον Φλεβάρη του 2017. Επιπροσθέτως, σημασία έχει και η αναφορά στην ποιότητα του αέρα που επικρατούσε στη περιοχή τη συγκεκριμένη περίοδο. Σύμφωνα με στοιχεία του Υπουργείου Ενέργειας Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής (<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=495&language=el-GR>), τα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ όπως καταγράφηκαν από τον σταθμό μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης στη Νέα Σμύρνη, κυμάνθηκαν από 22,6 έως 30,8 μg/m³ χωρίς να υπερβαίνουν το όριο 24ωρης έκθεσης των 50 μg/m³. Η μεγαλύτερη μέση μηνιαία συγκέντρωση PM₁₀ παρατηρείται κατά τον μήνα Φεβρουάριο λόγω της αυξημένης χρήσης καύσιμης ύλης για θέρμανση.

Πίνακας 3.1: Μέσες μηνιαίες τιμές μετεωρολογικών παραμέτρων και σωματιδιακής συγκέντρωσης στην περιοχή της Νέας Σμύρνης κατά τους μήνες πραγματοποίησης των πειραμάτων

Ημερομηνία	Θερμοκρασία (°C)			Βροχόπτωση (mm)	Ταχύτητα Ανέμου (km/h)	Διεύθυνση Ανέμου	Συγκέντρωση PM ₁₀ (μg/m ³)
	Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Συνολική	Μέση		Μέση
Ιούνιος 2016	38,8	18,7	27,6	23,4	3,8	SW	29,1
Ιούλιος 2016	36,1	23,8	29,6	0,0	5,9	NNW	22,7
Αύγουστος 2016	37,4	22,5	29,2	0,0	5,7	NNW	26,4
Σεπτέμβριος 2016	33,2	17,4	24,9	12,6	3,7	NNW	23,9
Οκτώβριος 2016	31,1	13,2	20,5	44,0	3,7	NNW	22,6
Νοέμβριος 2016	25,5	7,2	16,0	95,4	2,9	NNW	26,5
Δεκέμβριος 2016	19,0	1,4	9,9	20,2	4,6	NNW	28,9
Ιανουάριος 2017	11,8	6,1	8,8	44,2	3,5	NNW	25,8
Φεβρουάριος 2017	15,7	9,7	12,4	15,0	2,9	NNW	30,8

Μάρτιος 2017	19,0	11,8	15,0	67,4	3,1	NNW	25,6
Απρίλιος 2017	22,2	14,1	17,8	3,0	2,2	SW	24,7
Μάιος 2017	26,2	18,4	21,9	46,8	3,1	NNW	26,6
Ιούνιος 2017	30,9	22,5	26,4	58,8	1,8	SW	29,8

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για τη διεξαγωγή του πειράματος που διήρκησε από τον Ιούνιο του 2016 ως τον Ιούνιο του 2017, επιλέχθηκε το 2^ο Δημοτικό σχολείο Νέας Σμύρνης. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του κτιρίου αυτού είναι πως παρουσιάζει τον σπάνιο συνδυασμό πράσινης και συμβατικής (από τσιμέντο) οροφής. Συγκεκριμένα, το συγκρότημα αποτελείται από 3 κτίρια που ενώνονται σε σχήμα "Π", από 2 ορόφους έκαστο. Η πλευρά με δυτικό προσανατολισμό, κατέχει την φυτοκαλυμμένη οροφή, ενώ οι άλλες 2 (βόρεια και ανατολική) αποτελούνται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Συνοπτικά λοιπόν, η πράσινη οροφή καλύπτει περίπου το 1/3 της συνολικής επιφάνειας του σχολείου, ενώ το υπόλοιπο αποτελείται από τσιμέντο. Το σχολικό συγκρότημα κατασκευάστηκε σταδιακά από το 1954 ως και το 2000, ενώ το έτος 2008 προστέθηκε το πράσινο τμήμα της στέγης (εικόνα 3.3). Βάσει των στοιχείων που παρατίθενται στην υποενότητα 2.2.1, η πράσινη οροφή του συγκεκριμένου σχολείου μπορεί να χαρακτηριστεί εκτατικού τύπου. Έχει μεγάλο όγκο, ελαφρύ υπόστρωμα (κάτω από 150 kg / m²) και καλύπτει μια έκταση 374 m². Τα στρώματά επιστρώσής της περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- μεμβράνη απομάκρυνσης ρίζας
- προστατευτική μεμβράνη
- δίκτυο αποστράγγισης
- μη διαπερατή μεμβράνη
- ελαφρό έδαφος πάχους 150 mm
- χαμηλή βλάστηση, συμπεριλαμβανομένων ποωδών φυτών, θάμνων, γρασιδιού κλπ. Οι απαιτήσεις ύδατος είναι ελάχιστες και το νερό αρδεύεται κυρίως από αυτόματο σύστημα ποτίσματος.

Οι δύο συμβατικές οροφές έχουν πρότυπο σχέδιο και αποτελούνται από στρώμα οπλισμένου σκυροδέματος, καλυμμένο με θερμομονωτικό υλικό και μεμβράνη στεγανοποίησης.



Εικόνα 3.3: Άποψη της πράσινης οροφής του 2ου Δημοτικού Νέας Σμύρνης

Η βασική ιδέα του πειράματος ήταν να εξεταστεί η επίδραση της πράσινης ταράτσας στις αίθουσες με τις οποίες έρχεται σε επαφή κυρίως όσον αφορά στην ποιότητα του αέρα αλλά και σε άλλες παραμέτρους καθώς και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες που βρίσκονται κάτω από τις συμβατικές οροφές. Με αυτό το κριτήριο λοιπόν, ύστερα από μελέτη των χώρων και αρκετές επισκέψεις της ερευνητικής ομάδας στο σχολείο, οι θέσεις δειγματοληψίας του πειραματικού εξοπλισμού που περιγράφεται αναλυτικώς στην ενότητα 3.1, καθορίστηκαν ως εξής:

- ✚ Επιλέχθηκαν έξι αίθουσες, δύο σε κάθε κτίριο και από μια σε κάθε όροφο. Η επιλογή των αιθουσών έγινε ύστερα από προκαταρκτικές μετρήσεις σε όλες τις αίθουσες καθώς δόθηκε έμφαση σε αυτές που παρουσίασαν τα πιο ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Σε αυτές τοποθετήθηκαν επί μονίμου βάσεως από ένα μετρητικό σύστημα διάφορων παραμέτρων IAQ Tongdy, τα οποία κατέγραφαν δεδομένα θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, διοξειδίου του άνθρακα και πτητικών οργανικών ενώσεων καθημερινά και συνεχόμενα όλο το 24ωρο σε χρονικά διαστήματα του ενός τετάρτου. Επιπροσθέτως, τα ίδια συστήματα τοποθετήθηκαν στις 2 ταράτσες, πράσινη και ανατολική, στις 12/1/2017, με σκοπό τη καταγραφή μόνο εξωτερικών πτητικών ενώσεων, ούτως ώστε να καταστεί ικανή η σύγκριση του εσωτερικού (αίθουσες) με το εξωτερικό περιβάλλον (ταράτσες).
- ✚ Εντός μιας αίθουσας του πρώτου ορόφου (Γ3), η οποία βρίσκεται ακριβώς κάτω από την πράσινη ταράτσα τοποθετήθηκαν δύο αντλίες αέρα SKC (με φίλτρα χαλαζία PM_{10}), οι οποίες μετρούσαν για 24 ώρες συνεχόμενα. Τα φίλτρα συλλέγονταν σε καθημερινή βάση και στη θέση τους τοποθετούνταν νέα έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ροή των δεδομένων. Απαραίτητη προϋπόθεση ήταν να αρχίσει η καινούρια μέτρηση πριν την

έναρξη των μαθημάτων, οπότε η αλλαγή των φίλτρων λάμβανε χώρα λίγο πριν τις 8:00π.μ. Η διαδικασία αυτή διαρκούσε τις 5 εργάσιμες μέρες της εβδομάδας (Δευτέρα-Παρασκευή) κατά τις οποίες λειτουργούσε το σχολείο.

- ✚ Στην πράσινη οροφή είχε τοποθετηθεί αντλία αέρα Derenda η οποία χρησιμοποιούσε κασετίνες 10 και 15 θέσεων, με φίλτρα χαλαζία PM₁₀ και η αλλαγή της εκάστοτε κασετίνας πραγματοποιούνταν ανά δυο βδομάδες. Όπως και στην περίπτωση των SKC, το κάθε φίλτρο αντιστοιχούσε σε μετρήσεις ενός 24ώρου.
- ✚ Σε 2 οροφές, και συγκεκριμένα στην πράσινη και την απέναντί της ανατολική από τσιμέντο, τοποθετήθηκαν από ένας αισθητήρας Tinytag, ρυθμιζόμενα να λαμβάνουν μετρήσεις τετάρτου.
- ✚ Αρχικά, στην αίθουσα κάτω από την πράσινη οροφή (Γ3), αρχικά τοποθετήθηκε ο αυτόματος μετρητής Lighthouse για συνεχόμενη καταγραφή αιωρούμενων σωματιδίων. Αντιστοίχως, πάνω στην φυτοκαλυμμένη οροφή εγκαταστάθηκε ο μετρητής σωματιδίων Osiris. Ο λόγος της επιλογής αυτής, ήταν να καταστεί ικανή η σύγκριση μεταξύ των αιωρούμενων σωματιδίων εσωτερικού και άμεσου εξωτερικού περιβάλλοντος και οποιαδήποτε πιθανή επίδραση της πράσινης ταράτσας. Τα δύο όργανα ρυθμίστηκαν να λαμβάνουν δεδομένα ανά ένα τέταρτο.
- ✚ Αντιστοίχως, το ζευγάρι των παραπάνω μετρητών τοποθετούνταν ανά δύο εβδομάδες στην αίθουσα κάτω από την ανατολική οροφή (B1) και πάνω στη ίδια την οροφή. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται επιπλέον η σύγκριση με τα δεδομένα ενός τυπικού σχολείου με ταράτσα σκυροδέματος.

Στην εικόνα 3.4 παρουσιάζονται όλες οι θέσεις δειγματοληψίας των αντίστοιχων οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν για την περάτωση του πειράματος.

Όλες οι αίθουσες διδασκαλίας έχουν φυσικό αερισμό από ανοίγματα πορτών – παραθύρων. Συγκεκριμένα, το κτίριο δεν διέθετε κανένα σύστημα μηχανικού εξαερισμού ή κάποια κλιματιστική μονάδα. Κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου, η θέρμανση βασίζεται στη καύση πετρελαίου καθ' όλη τη διάρκεια των μαθημάτων. Για την ίδια περίοδο, τα παράθυρα ήταν ανοιχτά μόνο για λίγα λεπτά πριν και μετά τις ώρες μαθήματος, ενώ κατά τη διάρκεια των μαθημάτων παρέμεναν κλειστά. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια των θερμών περιόδων, τα παράθυρα παρέμεναν ανοικτά όταν το σχολείο είχε μαθητές και εργαζόμενους, καθώς όπως προαναφέρθηκε, το κτίριο δεν διαθέτει σύστημα κλιματισμού. Όλες οι τάξεις διατηρούν ένα μωσαϊκό δάπεδο (μίγμα τσιμέντου με κομμάτια από μάρμαρο και γρανίτη) και μαυροπίνακα με κιμωλία. Οι αίθουσες καθαρίζονταν από συνεργείο μία φορά την ημέρα μετά την λήξη των μαθημάτων (αφορά μόνο εργάσιμες ημέρες). Ο πίνακας 3.2 συνοψίζει τα κυριότερα χαρακτηριστικά κάθε τάξης. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τις επισκέψεις στο σχολείο, η ερευνητική ομάδα διέθετε ημερολόγιο δραστηριοτήτων (logbook), προκειμένου να συμπεριληφθούν σε αυτό σημαντικά στοιχεία της έρευνας. Στοιχεία όπως, οι ώρες διδασκαλίας, οι συνήθειες των μαθητών, το είδος των μαθημάτων, ο αριθμός των ατόμων στις τάξεις, οι συναντήσεις Συλλόγου Γονέων - δασκάλων και άλλες σχολικές εκδηλώσεις. Οι στατιστικές διαφορές μεταξύ ομάδων όλων των μετρούμενων παραμέτρων ελέγχθηκαν ως προς τη σημαντικότητά τους χρησιμοποιώντας τον μη παραμετρικό έλεγχο Mann Whitney – U test. Όλες οι τιμές (p values) βρέθηκαν να ικανοποιούν το κριτήριο στατιστικής

σημαντικότητας ($p < 0,05$), επιτρέποντας έτσι την απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης ότι δεν υπάρχει σημαντική στατιστική διαφορά μεταξύ των μεταβλητών ομαδοποίησης.

Πίνακας 3.2: Συνοπτικά στοιχεία των υπό εξέταση αιθουσών

1^{ος} Όροφος		
Αίθουσα: Γ3 (κάτω από πράσινη οροφή) Εμβαδόν: 70 m ² Όγκος: 210 m ³ Αριθμός ατόμων: 24	Αίθουσα: Β3 (κάτω από συμβατική οροφή) Εμβαδόν: 50 m ² Όγκος: 150 m ³ Αριθμός ατόμων: 25	Αίθουσα: Β1 (κάτω από συμβατική οροφή) Εμβαδόν: 56 m ² Όγκος: 168 m ³ Αριθμός ατόμων: 26
Ισόγειο		
Αίθουσα: Β2 (κάτω από πράσινη οροφή) Εμβαδόν: 45 m ² Όγκος: 135 m ³ Αριθμός ατόμων: 22	Αίθουσα: Α3 (κάτω από συμβατική οροφή) Εμβαδόν: 56 m ² Όγκος: 168 m ³ Αριθμός ατόμων: 25	Αίθουσα: Ε3 (κάτω από συμβατική οροφή) Εμβαδόν: 55 m ² Όγκος: 165 m ³ Αριθμός ατόμων: 24

<p><u>Πράσινη οροφή</u></p> <ul style="list-style-type: none"> i. Derenda (φίλτρα PM₁₀) ii. Osiris/ Dustrak (PM₁,PM_{2.5},PM₁₀) iii. IAQ Tongdy (TVOC) iv. Tiny Tag (T,RH) v. Burkard (Μύκητες) 	<p><u>Κεντρική οροφή (οπλισμένου σκυροδέματος)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> i. Burkard (Μύκητες) 	<p><u>Ανατολική οροφή (οπλισμένου σκυροδέματος)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> i. Osiris/ Dustrak (PM₁,PM_{2.5},PM₁₀) ii. IAQ Tongdy (TVOC) iii. Tiny Tag (T,RH) iv. Burkard (Μύκητες)
1^{ος} Όροφος		
<p>Γ3</p> <ul style="list-style-type: none"> i. SKC (φίλτρα PM₁₀) ii. Lighthouse/Osiris (PM₁,PM_{2.5},PM₁₀) iii. IAQ Tongdy (T,RH,CO₂,TVOC) iv. Burkard (Μύκητες) 	<p>B3</p> <ul style="list-style-type: none"> i. IAQ Tongdy (T,RH,CO₂,TVOC) ii. Burkard (Μύκητες) 	<p>B1</p> <ul style="list-style-type: none"> i. IAQ Tongdy (T,RH,CO₂,TVOC) ii. Lighthouse/Osiris (PM₁,PM_{2.5},PM₁₀) iii. Burkard (Μύκητες)
Ισόγειο		
<p>B2</p> <ul style="list-style-type: none"> i. IAQ Tongdy (T,RH,CO₂,TVOC) ii. Burkard (Μύκητες) 	<p>A3</p> <ul style="list-style-type: none"> i. IAQ Tongdy (T,RH,CO₂,TVOC) ii. Burkard (Μύκητες) 	<p>E3</p> <ul style="list-style-type: none"> i. IAQ Tongdy (T,RH,CO₂,TVOC) ii. Burkard (Μύκητες)

Εικόνα 3.4: Δειγματοληπτικές θέσεις και ο αντίστοιχος πειραματικός εξοπλισμός

3.1.2 Πρωτόκολλο και περίοδοι μετρήσεων

Αρχικά, για τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του πειράματος διενεργήθηκε μεγάλος αριθμός προκαταρκτικών ενεργειών που αφορούσαν τη δημιουργία επαφών με τις αρμόδιες αρχές και τη Διεύθυνση του 2^{ου} Δημοτικού σχολείου Νέας Σμύρνης. Ταυτοχρόνως, υπήρξε συνεχής συνεργασία με τις αντίστοιχες περιβαλλοντικές εταιρείες με σκοπό τον έλεγχο σωστής λειτουργίας των επιλεγμένων οργάνων μέτρησης. Οι ενέργειες αυτές πραγματοποιήθηκαν για διάστημα περίπου έξι μηνών (Ιανουάριος - Ιούνιος 2016), λίγο πριν την έναρξη της περιόδου δειγματοληψίας. Κατά το διάστημα αυτό, εξασφαλίστηκε η απαραίτητη άδεια από το από το Ινστιτούτο Εκπαιδευτικής Πολιτικής (ΙΕΠ) που αποτελεί το αρμόδιο όργανο του Υπουργείου Παιδείας, Έρευνας και Θρησκευμάτων για θέματα έρευνας όπως και η προσβασιμότητα της ερευνητικής ομάδας στο κτίριο, ύστερα από συνεννόηση με τη Διεύθυνση του σχολείου.

Πρωτόκολλο μετρήσεων

Οι μετρήσεις στο σχολείο ήταν καθημερινές και συνεχόμενες όλο το 24ωρο. Η συνολική διάρκεια δειγματοληψίας από όλα τα σημεία ήταν 10 μήνες. Στόχος ήταν η αποτύπωση της κατάστασης για ένα σχολικό έτος. Το βήμα μέτρησης για καθένα από τους αυτόματους δειγματολήπτες ήταν τα 15 λεπτά εξαιρουμένων των μετρητών που χρησιμοποιούσαν φίλτρα, οι οποίοι πραγματοποιούσαν μια δειγματοληψία ανά ημέρα. Όλα τα όργανα είχαν ρυθμιστεί για ταυτόχρονη καταγραφή δεδομένων, ούτως ώστε να επιτευχθεί εύκολα η μετέπειτα άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα συνολικά σε 6 σχολικές αίθουσες με κριτήριο τη θέση τους ως προς την φυτοκαλυμμένη οροφή όπως επίσης και πάνω στη πράσινη αλλά και τη συμβατική οροφή του σχολείου. Η συλλογή των δεδομένων από τους αισθητήρες συνεχούς μέτρησης πραγματοποιούνταν κάθε 2 εβδομάδες (3 ή 4 σε περιπτώσεις εορτών ή αργίας) από επιτόπιες επισκέψεις της ερευνητικής ομάδας με τη χρήση φορητών υπολογιστών σε απογευματινές ώρες, μετά το σχολάσμα. Η αλλαγή των φίλτρων στους δειγματολήπτες PM₁₀ πραγματοποιούνταν καθημερινώς (πλην Σαββατοκύριακου) λίγο πριν την έναρξη των μαθημάτων ούτως ώστε να μην διακόπτεται η διαδικασία. Όπως αναφέρεται στην ενότητα 3.1, τα όργανα ήταν τοποθετημένα 1.1m από το δάπεδο σύμφωνα με το πρότυπο ISO 7726:1998 και ταυτοχρόνως σε σημεία που δεν θα επηρέαζαν την ομαλή διεξαγωγή των μαθημάτων. Επίσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, οποιοσδήποτε δραστηριότητες που ενδεχομένως να επιδρούσαν στις συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων όπως η παρουσία των μαθητών, τα ανοίγματα των παραθύρων, οι δραστηριότητες του προσωπικού και οποιαδήποτε άλλη σημαντική λεπτομέρεια, καταγράφονταν σε ημερολόγιο (logbook) το οποίο διατηρούσε η ερευνητική ομάδα καθόλη τη διάρκεια του πειράματος.

Η επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων και η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση των στατιστικών λογισμικών πακέτων SPSS Inc PASW Statistics 18, Statsoft Statistica 10 και Microsoft Office Excel 2007. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται πίνακες με τα βασικότερα στατιστικά αποτελέσματα καθώς και γραφήματα διακύμανσης αέριων ρύπων και μετεωρολογικών δεδομένων συνολικά αλλά και για την εκάστοτε πειραματική ημέρας ενδιαφέροντος.

Τέλος, εξάγονται θηκογράμματα (boxplots), γραμμικές εξισώσεις και συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών που αφορούν το πείραμα.

Πειραματικές περιόδους

Κατά τον αρχικό σχεδιασμό του πειράματος, κρίθηκε σκόπιμος ο διαχωρισμός των μετρήσεων σε δύο πειραματικές εκστρατείες. Συγκεκριμένα από τον Ιούνιο μέχρι τον Ιούλιο 2016 και από τον Οκτώβριο 2016 έως τον Ιούνιο 2017. Το βασικότερο κριτήριο της επιλογής αυτής ήταν η παρουσία ή μη, των μαθητών στο σχολείο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Ειδικότερα, οι μετρήσεις που διεξήχθησαν κατά τη καλοκαιρινή περίοδο του 2016 εν τη απουσία των μαθητών, επέτρεψαν την εξαγωγή τιμών υποβάθρου για τις αίθουσες και τις αντίστοιχες οροφές του κτιρίου. Παράλληλα, τα μετέπειτα αποτελέσματα της 2^{ης} πειραματικής εκστρατείας καταλήγουν σε αντίστοιχα αποτελέσματα της πρώτης αλλά με την πολύ σημαντική προσθήκη της ανθρώπινης παρουσίας στους χώρους. Με τον τρόπο αυτό, οι δραστηριότητες και οι συνήθειες των μαθητών εντός των τάξεων (ανοίγματα παραθύρων-πορτών, κίνηση στον χώρο με επαναιώρηση ρύπων) είναι εμφανής. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρόγραμμα των επισκέψεων αναπροσαρμόστηκε αρκετές φορές καθώς έπρεπε να συμβαδίζει με τη διαθεσιμότητα του κτιρίου κατά τη διάρκεια μιας ολόκληρης σχολικής χρονιάς.

Συνολικά οι μετρήσεις διήρκησαν 10 μήνες, συμπεριλαμβάνοντας όλες τις εποχές του χρόνου καθιστώντας ικανό τον έλεγχο της εποχικότητας των φαινομένων. Το μάθημα στις αίθουσες διαρκούσε συνολικά 5 ώρες (από τις 08:00 έως τις 13:00). Η θέρμανση κατά την ψυχρή περίοδο λάμβανε χώρα από τις 7:00 έως τις 14:00 κατά τις εργάσιμες ημέρες. Στον πίνακα 3.3 παρατίθενται αναλυτικά οι πειραματικές εκστρατείες, οι περίοδοι μέτρησης και ο τρόπος ψύξης - θέρμανσης των αιθουσών.

Πίνακας 3.3: Περίοδοι μετρήσεων ανά εποχικότητα

Πειραματική εκστρατεία	Πειραματική περίοδος	Θέρμανση - Ψύξη
1 ^η (θερμή)	17/06/2016 – 08/07/2016	Φυσικός Αερισμός
2 ^η (ψυχρή)	11/10/2016 – 31/03/2017	Καυστήρας πετρελαίου
2 ^η (θερμή)	01/04/2017 – 29/06/2017	Φυσικός Αερισμός

3.2 Πειραματικός εξοπλισμός

Στην ενότητα αυτή, περιγράφονται τα όργανα και οι διαδικασίες μέτρησης όλων των παραμέτρων που καταγράφηκαν στο πλαίσιο του πειραματικού σκέλους της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Ο εξοπλισμός διατέθηκε από το διαπιστευμένο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας Αέρα Εσωτερικού Περιβάλλοντος του τμήματος Φυσικής και από το εργαστήριο Οικολογίας & Ταξινομικής του τμήματος Βιολογίας του Πανεπιστημίου Αθηνών. Χρησιμοποιήθηκαν εξειδικευμένα όργανα περιβαλλοντικών μετρήσεων που σκοπό είχαν την καταγραφή αέριων ρύπων, μετεωρολογικών δεδομένων και βιολογικών παραγόντων, σε όλους τους πειραματικούς χώρους. Περεταίρω πληροφορίες σχετικά με τα δύο εργαστήρια είναι διαθέσιμες στις ιστοσελίδες:

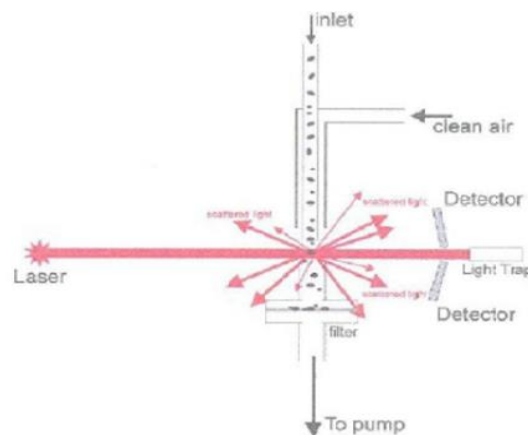
- <http://env.phys.uoa.gr/ereynhtikes-omades.html> (Τμήμα Φυσικής).
- <http://www.biol.uoa.gr/tomeis/tomeas-oikologias-ta3inomikis.html> (Τμήμα Βιολογίας).

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά όλων των οργάνων αποτυπώνονται στο **Παράρτημα Α**

Μετρητές αιωρούμενων σωματιδίων

Turnkey OSIRIS

Στο άμεσο εξωτερικό περιβάλλον του υπό εξέταση κτιρίου, ο καθορισμός των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM10, PM2.5 και PM1 μεγέθους από περίπου 0,4 μm ($1\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$) έως περίπου τα 10 μm σε διάμετρο, έγινε με τη βοήθεια του αυτόματου μετρητή Osiris σε μονάδες μάζας ανά όγκο, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Airborne Particle Monitor, Turnkey Instruments Ltd.). Επιπλέον, καταγράφει τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων χρησιμοποιώντας λέιζερ (νεφελόμετρο). Καθώς ο αέρας διοχετεύεται στην εσωτερική αντλία, το νεφελόμετρο αναλύει τη σκέδαση του φωτός από μεμονωμένα σωματίδια, που διαπερνούν την δέσμη του λέιζερ. Τα σωματίδια, στη συνέχεια συλλέγονται σε φίλτρο αναφοράς. Το φως που σκεδάζεται από τα επιμέρους σωματίδια μετατρέπεται σε ένα ηλεκτρικό σήμα το οποίο είναι ανάλογο με το μέγεθος του σωματιδίου. Ο μικροεπεξεργαστής του νεφελόμετρου εντοπίζει τα σωματίδια, ακόμη και αν υπάρχουν εκατομμύρια από αυτά ανά μονάδα όγκου (εικόνα 3.1). Αυτό επιτρέπει την ακριβή ανίχνευσή τους σε συγκεντρώσεις της τάξης του $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



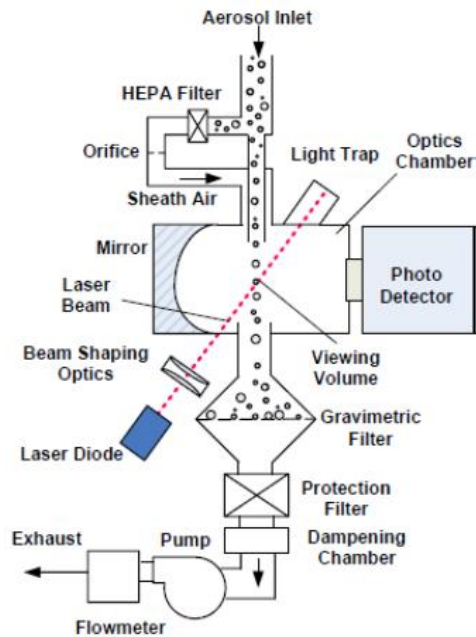
Εικόνα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας του OSIRIS (A.M.Irving, 2008)

Lighthouse Handheld 3016

Οι εσωτερικές συγκεντρώσεις των συγκεντρώσεων μάζας αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 μετρήθηκαν με τη βοήθεια του φορητού μετρητή Handheld3016, IAQ (Lighthouse, worldwide solutions) σε μονάδες $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Το όργανο χρησιμοποιεί παρόμοια αρχή λειτουργίας με το Turnkey Osiris χρησιμοποιώντας πηγή φωτός λέιζερ η οποία αλλάζει τους παλμούς σήματος, ανάλογα με τα αιωρούμενα σωματίδια που ανιχνεύονται. Επίσης, έχει βαθμονομηθεί σύμφωνα με το πρότυπο ISO 21501-4 με τη χρήση λάτεξ σφαιριδίων πολυστερίνης (Polystyrene Latex Spheres). Τα σωματίδια αυτά είναι σφαιρικά και λευκά τα οποία αποτελούν ιδανικά χαρακτηριστικά για την εκτέλεση της βαθμονόμησης μεγέθους σε αισθητήρες σκέδασης φωτός που βασίζονται στην κοκκομετρική ανάλυση (sieve analysis).

TSI DustTrak

Για την καταγραφή συγκεντρώσεων PM_1 , $PM_{2.5}$ και PM_{10} σε ορισμένες από τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε το DustTrak (TSI, model 8520) όπου τα σωματίδια μετρώνται σε μονάδες μάζας ανά όγκο, mg/m^3 . Το DustTrak είναι ένα φορητό όργανο καταγραφής ρύπων όπου με ένα laser φωτόμετρο του οποίου η λειτουργία βασίζεται στη σκέδαση του φωτός, μετρά και καταγράφει τις συγκεντρώσεις μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων σε πραγματικό χρόνο συλλέγοντας τα σωματίδια με ένα δειγματοληπτικό ακροφύσιο (εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.6: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του DustTrak

Βαρυμετρική μέθοδος μέτρησης σωματιδίων

Για συγκεκριμένες ημέρες δειγματοληψίας τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} μετρήθηκαν με την πρότυπη βαρυμετρική μέθοδο τόσο στο εξωτερικό όσο και το εσωτερικό περιβάλλον με τη βοήθεια των δειγματοληπτών Derenda (LVS3.1/PNS3) χαμηλού όγκου με ελεγχόμενο ρυθμό ροής ($2,3 \text{ m}^3/\text{h}$) και SKC Universal Deluxe 224 - PCTX8 (4 L/min) συλλέγοντας τα αιωρούμενα σωματίδια σε φίλτρα χαλαζία (Quartz filters) διαμέτρου 47 mm και 37mm αντιστοίχως. Τα φίλτρα αυτά προθερμαίνονταν πριν τη χρήση στους $550 \text{ }^\circ\text{C}$ με σκοπό να μειωθούν τα επίπεδα υπολειμματικού άνθρακα και στη συνέχεια τοποθετούνταν σε ένα δωμάτιο με ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας ($T=20\pm 1^\circ\text{C}$ and $RH=50\pm 5\%$). Ο προσδιορισμός συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων διεξήχθη βαρυμετρικά με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροζυγού με ανάλυση $1\mu\text{g}$ σύμφωνα με το πρότυπο EN 12341, 2014. Πριν τη χημική ανάλυση τα φίλτρα κόβονταν σε διάφορα τμήματα για διαφορετικού είδους αναλύσεων. Τα υδροδιαλυτά ιόντα ανιχνεύονταν με τη χρήση χρωματογράφων ιόντων (Ion chromatography-IC) ακολουθώντας τη μέθοδο που δίνεται από τους Bardouki et al., 2003. Τα στοιχεία του άνθρακα (οργανικού & στοιχειακού-Organic Carbon-OC & Elemental Carbon-EC) προσδιορίζονταν με τη χρήση ενός αναλυτή άνθρακα (Sunset Lab, USA). Οι λεπτομέρειες της ανάλυσης δίνονται από τους Koulouri et al., 2008.

- **Derenda**

Όργανο καταγραφής αιωρούμενων σωματιδίων. Στο συγκεκριμένο πείραμα, αφορούσε σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο ως $10\mu\text{m}$ (PM_{10}). Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε διέθετε αυτόματο σύστημα δειγματοληψίας PNS για συνεχή καταμέτρηση σωματιδίων χωρίς χειροκίνητες αλλαγές φίλτρου. Το PNS αποτελείται από δειγματολήπτη χαμηλού / μέσου όγκου (LVS ή MVS) και εναλλάκτη φίλτρων με σωλήνα εισαγωγής και είσοδο δειγματοληψίας για τα σωματίδια. Το περίβλημα του εναλλάκτη φίλτρου αερίζεται για να αποφευχθεί η δημιουργία πάγου. Για τη συλλογή των σωματιδίων, μια αντλία κενού αντλεί αέρα από τον περιβάλλοντα χώρο και το σύστημα κλασματοποιεί τα αερομεταφερόμενα σωματίδια σε μια είσοδο δειγματοληψίας. Ο αέρας που περιέχει το επιθυμητό κλάσμα σωματιδίων περνά από το φίλτρο, όπου τα σωματίδια συλλέγονται και διατίθενται για την επακόλουθη βαρυμετρική αξιολόγηση ή ανάλυση. Ο αυτόματος εναλλάκτης φίλτρων διευκολύνει τις διαδοχικές σειρές έως και 16 κύκλων δειγματοληψίας.

- **SKC**

Όργανο με δυνατότητα καταμέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_{10} .

Η αντλία προσροφά αέρα από τον περιβάλλοντα χώρο, ο οποίος οδηγείται μέσω του φίλτρου που υπάρχει μέσα στην κάψουλα. Ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων που έχει επιλεγεί (και κατά συνέπεια και της κάψουλας), τα αιωρούμενα σωματίδια που υπάρχουν στον αέρα θα εγκλωβιστούν στο φίλτρο. Σημαντικός παράμετρος είναι η σωστή ρύθμιση της η ογκομετρικής παροχής του αέρα. Τα αέρια και οι ατμοί συλλέγονται με χαμηλή ροή για να επιτευχθεί αποτελεσματική απορρόφηση των φίλτρων. Ο όγκος αέρα που απορροφήθηκε προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{ρυθμός ροής} \left(\frac{\text{ml}}{\text{min}} \right) * \text{χρόνος (min)} = \text{ποσότητα αέρα (ml)}$$

Απαραίτητη είναι η ακριβείς καταγραφή των ωρών που μέτρησε το όργανο. Ο τρόπος εύρεσης της συνολικής συγκέντρωσης των σωματιδίων επιτυγχάνεται με ζύγισμα του φίλτρου πριν και μετά τη χρήση του, βάσει προτύπων που αναλύθηκαν παραπάνω. Έτσι, το όποιο επιπλέον βάρος θα αποτελεί τη συνολική συγκέντρωση των ρύπων (<https://www.skcltd.com/uncategorised-articles/154-universal>).



Εικόνα 3.7: Η συνολική συναρμολόγηση του οργάνου εντός αίθουσας

Μετρητής TVOC, CO₂

HES - IAQ Tongdy

Ο αισθητήρας Tongdy Monitor επιτρέπει την παρακολούθηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα σε πραγματικό χρόνο μέσω ενσωματωμένων αισθητήρων ημιαγωγίου αερίου. Καταγράφει συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) με εύρος 0-2000 ppm και ακρίβεια $\pm 30 \text{ ppm} \pm 3\%$ της μετρούμενης τιμής και πτητικές οργανικές ενώσεις όπως το τολουόλιο που εκπέμπεται από προϊόντα φινιρίσματος και κατασκευής ξύλου, τη φορμαλδεΐδη, καπνό τσιγάρων, μονοξειδίο του άνθρακα, αμμωνία, υδρόθειο, αλκοόλ και αρώματα με εύρος εύρος 0-30 ppm και ακρίβεια $\pm 1 \text{ ppm}$. Παραλλήλως, έχει τη δυνατότητα να μετρήσει τη σχετική υγρασία και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου, με εύρος 0-95% και 0-50°C αντίστοιχα.

Μετρητής μετεωρολογικών παραμέτρων

Tinytag Plus 2, TGP-4500

Η καταγραφή της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας τόσο στο εσωτερικό όσο και το εξωτερικό περιβάλλον έγινε με τη χρήση αισθητήρων Tinytag. Ο μετρητής λειτουργεί με ενσωματωμένο ηλεκτρικό αντιστατή (θερμίστορ) του οποίου η αντίσταση μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμότητα. Διαθέτει 2 εσωτερικούς συναγερμούς και δυνατότητα προγραμματιζόμενης λειτουργίας (καταγραφή των στοιχείων με συχνότητα από 1 δευτερόλεπτο μέχρι και 10 ημέρες). Αποτελεί έναν μικροϋπολογιστή

που αντέχει σε αντίξοες μετεωρολογικές συνθήκες και μεταφέρεται εύκολα λόγω του μεγέθους και του πολύ μικρού του βάρους.

Μετρητής βιολογικών παραμέτρων

Burkard

Οι αερομεταφερόμενοι μύκητες συλλέχθηκαν σε πλάκες άγαρ με τη βοήθεια φορητής αντλίας Burkard. Τρία τριβλία με άγαρ ήταν συνεχώς εκτεθειμένα σε κάθε τόπο δειγματοληψίας για 3 λεπτά ανά τριβλίο και στη συνέχεια επωάζονταν εντός του εργαστηρίου για δύο εβδομάδες στους 28°C. Με το πέρας αυτού του διαστήματος και αφού διαπιστώθηκε η ανάπτυξη των μυκήτων, τα τριβλία αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την καταμέτρηση των αποικιών μυκήτων οι οποίες αναπτύχθηκαν. Η καταμέτρηση των αποικιών διορθώθηκε και εκφράστηκε σε μονάδες σχηματισμού αποικιών ανά κυβικό μέτρο (Colony Forming Units CFU/m³).

Εξασφάλιση καλής λειτουργίας πειραματικού εξοπλισμού

Η οργάνωση και διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων έγινε βάση αυστηρού πειραματικού πρωτοκόλλου στο οποίο αναφέρονται όλες οι πραγματοποιηθείσες ενέργειες για τη διασφάλιση της ποιότητας των μετρούμενων παραμέτρων. Όπως θα αναφερθεί σε επόμενο κεφάλαιο τα αιωρούμενα σωματίδια σε ορισμένες από τις πειραματικές μετρήσεις μετρήθηκαν με διαφορετικούς τύπους οργάνων δειγματοληψίας. Για το λόγο αυτό και με σκοπό να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα από τους διαφορετικούς δειγματολήπτες πραγματοποιήθηκαν κατά την περίοδο των προκαταρκτικών μετρήσεων συγκριτικές και παράλληλες μετρήσεις στο εργαστήριο υπό σταθερές συνθήκες χωρίς την παρουσία πηγών ρύπων, με σκοπό τον έλεγχο και την αξιολόγηση των μετρήσεων. Συγκεκριμένα πριν την έναρξη των μετρήσεων και για χρονικό διάστημα 4 μηνών πραγματοποιούνταν έλεγχος καλής λειτουργίας και βαθμονόμηση των οργάνων με σκοπό τη διασφάλιση της ακρίβειας και ορθότητας των μετρήσεων κάθε πειραματικής διαδικασίας. Επιπλέον, έλαβαν χώρα αλληπάλληλες προκαταρκτικές μετρήσεις στο εργαστήριο υπό σταθερές συνθήκες για τον έλεγχο καλής λειτουργίας των οργάνων σύμφωνα με το πρότυπο ISO/IEC 17025:2005. Όλες οι πληροφορίες σχετικά με τους συντελεστές βαθμονόμησης των οργάνων παρατίθενται στο **Παράρτημα Α**.

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

συστηματικών σφαλμάτων πληροφόρησης, διεξάγονταν επανειλημμένοι έλεγχοι πληρότητας, ακρίβειας και ορθότητας των δεδομένων και των χρονοσειρών.

Δειγματοληπτικές θέσεις

Οι θέσεις τοποθέτησης των οργάνων στα εσωτερικά περιβάλλοντα των τάξεων ήταν σύμφωνα με το πρότυπο ISO 16000-1. Συγκεκριμένα, το κέντρο του χώρου μέτρησης ήταν ιδανικά το καταλληλότερο σημείο για τη δειγματοληψία ωστόσο στις περιπτώσεις που αυτό δεν ήταν εφικτό λαμβάνονταν υπόψη τα ακόλουθα:

- Τα όργανα τοποθετούνταν σε απόσταση τουλάχιστον ενός μέτρου από τους τοίχους και σε ύψος 1.1 m από το δάπεδο
- Αποφεύχθηκαν σημεία που ήταν εκτεθειμένα στον ήλιο και που ήταν κοντά σε συστήματα θέρμανσης (καλοριφέρ).

Επιπλέον αναφορικά με τις μετρήσεις στα σχολεία, τηρήθηκαν όλα τα μέτρα ασφάλειας για την επιλογή της θέσης τοποθέτησης των δειγματοληπτών και επίσης δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο να μη διαταραχθεί η φυσιολογική δραστηριότητα των μαθητών. Οι αντίστοιχες μετρήσεις στο εξωτερικό περιβάλλον πραγματοποιούνταν ταυτόχρονα με τις εσωτερικές μετρήσεις. Οι θέσεις τοποθέτησης των οργάνων ήταν σε σημεία αντιπροσωπευτικά του εξωτερικού αέρα μακριά από τοπικές πηγές παραγωγής ρύπων (πχ. καπνοδόχους, κλιματιστικές μονάδες κτλ.) και σε σημεία μη προσιτά από τους χρήστες των κτιρίων. Δείγματα αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος πρέπει να λαμβάνονται από σημεία που βρίσκονται κοντά στο κτίριο αλλά όχι πλησιέστερα του 1m σύμφωνα με το πρότυπο ISO 16000-1. Επίσης, οι δειγματολήπτες τοποθετούνταν σε κλωβούς με σκοπό την αποφυγή άμεσης έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία αλλά και τη βροχόπτωση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΑΣΙΝΗΣ ΣΤΕΓΗΣ ΚΑΙ ΑΕΡΙΣΜΟΣ

4.1 Γενικά

Τα πρωτογενή δεδομένα που ελήφθησαν σε όλες τις πειραματικές θέσεις, έχρηζαν ελέγχου, ώστε να απομακρυνθούν τα χονδροειδή σφάλματα (outliers) και να επιτευχθεί η δημιουργία ενός συνόλου από αξιόπιστα αποτελέσματα (high quality data base). Σε όλα τα πειράματα που διαρκούν μεγάλα χρονικά διαστήματα, εμφανίζονται ανεπιθύμητες ακραίες τιμές λόγω πιθανής δυσλειτουργίας του οργάνου καταγραφής, στιγμιαίου λάθους από τον χειριστή ή εμφάνισης κάποιου ακραίου συμβάντος στο περιβάλλον των μετρήσεων. Η διαδικασία διόρθωσης που ακολουθήθηκε στηρίζεται στην κανονικοποίηση των δεδομένων (z-scores) και στη μετέπειτα σύγκρισή τους με τις ανάλογες τυπικές αποκλίσεις. Η διαδικασία παρατίθεται αναλυτικά στο **Παράρτημα Β**. Κατά την εφαρμογή της διόρθωσης εντοπίστηκε μικρός αριθμός σφαλμάτων σε σχέση με το σύνολο των μετρήσεων με αποτέλεσμα οι αλλαγές στους μέσους όρους κάθε μεταβλητής να είναι αμελητέες. Η διαδικασία της διόρθωσης αφορούσε το σύνολο των μετρήσεων που έλαβαν χώρα στο 2^ο Δημοτικό Νέας Σμύρνης για όλες τις πειραματικές ημέρες.

4.1.1 Αποτελέσματα για όλη την πειραματική περίοδο

Επιλέχθηκαν δύο αίθουσες διδασκαλίας ίδιου προσανατολισμού (Γ3 και Β1) ακριβώς κάτω από τις δύο διαφορετικού τύπου στέγες, στον 1^ο όροφο. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι ο τύπος στέγης επηρεάζει τις εσωτερικές θερμικές συνθήκες των εξεταζόμενων τάξεων.

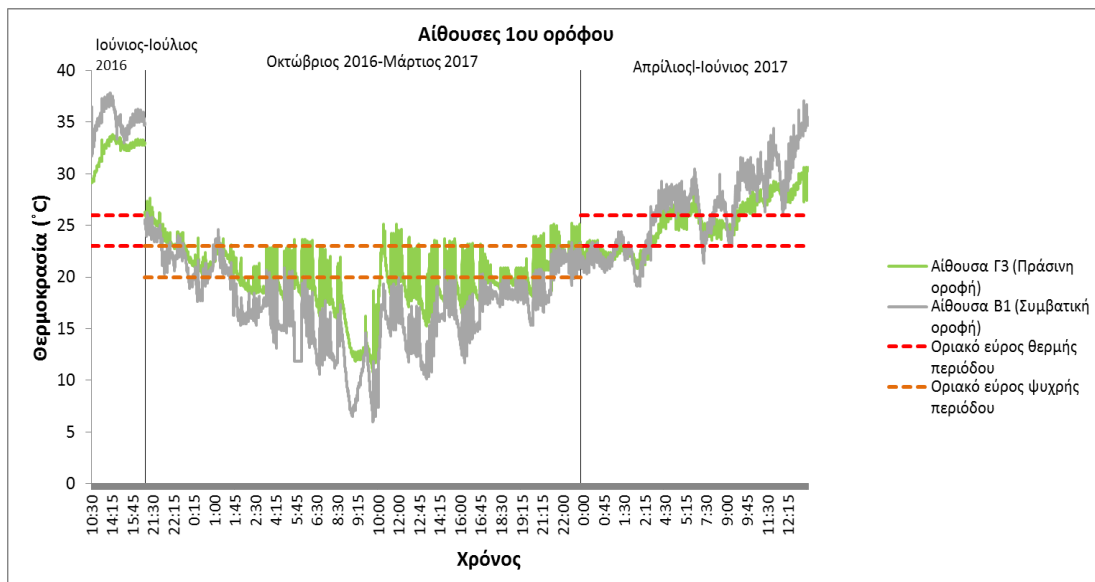
Αναλυτικότερα, ο πίνακας 4.1 απεικονίζει ποσοτικά τα επίπεδα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας για τις δύο αίθουσες διδασκαλίας καθώς και για τις στέγες του σχολείου. Από τον Ιούνιο έως τον Ιούλιο του 2016 η μέση θερμοκρασία της τάξης κάτω από τη πράσινη στέγη (Γ3) μετρήθηκε στους 32,4 °C ενώ η αντίστοιχη κάτω από τη συμβατική (Β1) βρέθηκε να είναι 35,2 °C. Για την ίδια περίοδο, η μέση εξωτερική θερμοκρασία πάνω από το πράσινο της στέγης βρέθηκε να είναι 30,1 °C ενώ στο επίπεδο του οπλισμένου σκυροδέματος της στέγης 31,4 °C, αντίστοιχα. Επιπλέον, από τον Απρίλιο έως τον Ιούνιο του 2017 οι μέσες θερμοκρασίες κάτω από την πράσινη και την συμβατική στέγη ήταν 25,1 °C και 26,4 °C ενώ οι αντίστοιχες εξωτερικές θερμοκρασίες καταγράφηκαν στους 21,9 °C και 23,5 °C. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η πράσινη στέγη οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας του αέρα κατά περίπου 2,8 °C για την πρώτη και 1,3 °C για τη δεύτερη θερμή περίοδο. Μολαταύτα, η σχετική υγρασία αυξήθηκε κατά 5,9% και 1,2% αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου, το κτίριο θερμαίνεται μέσω λέβητα που χρησιμοποιεί πετρέλαιο θέρμανσης και λειτουργεί μόνο κατά τη διάρκεια των ωρών διδασκαλίας. Η μέση εσωτερική θερμοκρασία, εκείνο το διάστημα, κυμάνθηκε από 19,7 °C στην αίθουσα κάτω από τη πράσινη στέγη έως 16,4 °C στην αντίστοιχη στο εσωτερικό της στέγης, ενώ η μέση σχετική υγρασία μετρήθηκε 47,4% κάτω από πράσινη στέγη και 59,2% κάτω από την συμβατική. Η εξωτερική θερμοκρασία πάνω στη πράσινη οροφή παρουσίασε μέση τιμή 12,2 °C ενώ η αντίστοιχη στη συμβατική στέγη μετρήθηκε στους 13,4 °C.

Αξιοσημείωτες διαφορές μεταξύ των δύο τάξεων σημειώνονται επίσης και στις μέγιστες τιμές θερμοκρασίας, ιδιαίτερα κατά τις θερμές περιόδους. Συγκεκριμένα, στην αίθουσα B1, κάτω από τη συμβατική στέγη, η μέγιστη θερμοκρασία κατά τον Ιούνιο-Ιούλιο 2016 έφτασε τους 37,8 °C, υψηλότερη κατά 8 °C σχετικά με την Γ3 κάτωθεν της πράσινης στέγης (33,8 °C). Η ίδια διαφορά μέγιστων καταγράφηκε στους 6,5 °C κατά το διάστημα Απριλίου-Ιουνίου 2017. Σε ότι αφορά τις ελάχιστες καταγραφόμενες θερμοκρασίες κατά την ψυχρή περίοδο, στην αίθουσα Γ3 μετρήθηκε στους 10,8 °C ενώ στην B1 στους 6 °C. Είναι προφανές ότι η πράσινη στέγη δημιουργεί καλύτερες εσωτερικές κλιματικές συνθήκες κατά τη διάρκεια μιας θερμής αλλά και μίας ψυχρής περιόδου. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρονται και στην έρευνα των Xing et al., 2019 οι οποίοι τονίζουν τη βελτίωση στις εσωτερικές κλιματικές συνθήκες που επιφέρει η εγκατάσταση φυτοκαλυμμένης οροφής σε κτίριο της Κίνας.

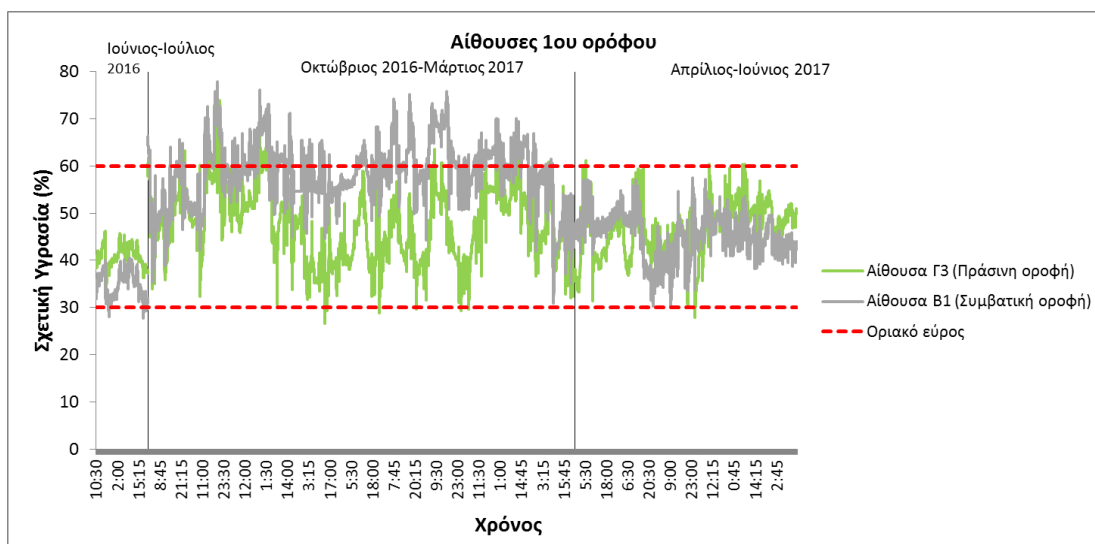
Επιπροσθέτως, στο σχήμα 4.1α μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου, η θερμοκρασία στην αίθουσα Γ3 βρίσκεται εντός του συνιστώμενου εύρους εσωτερικών θερμοκρασιών (20-23 °C) για την πλειοψηφία των μετρήσεων, δημιουργώντας έτσι ένα θερμικά πιο άνετο μικροπεριβάλλον. Κατά τις θερμές περιόδους το επιτρεπόμενο θερμοκρασιακό εύρος (23-26°C) παραβιάζεται για τις περισσότερες μετρήσεις, με τη θερμοκρασία στη Γ3 όμως να είναι μικρότερη από αυτή στη B1. Επίσης, στο σχήμα 4.1β φαίνεται ότι για τις δύο θερμές περιόδους η σχετική υγρασία και στις δύο αίθουσες διδασκαλίας είναι εντός του συνιστώμενου εύρους. Κατά τη διάρκεια των ψυχρών μηνών, στην αίθουσα κάτω από την πράσινη στέγη, τα επιτρεπόμενα όρια σχετικής υγρασίας δεν παραβιάζονται (30-60% ετησίως). Οι προαναφερθείσες οριακές τιμές εσωτερικής θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας βασίζονται στο πρότυπο ANSI/ASHRAE Standard 55-2004, το οποίο αναφέρεται στην δημοσίευση των Pegas et al., 2011. Από τα ίδια στοιχεία υπολογίστηκε το ποσοστό του χρόνου, όπου οι τιμές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας ήταν εκτός της συνιστώμενης οριακής περιοχής. Αποδεικνύεται αριθμητικά ότι η πράσινη στέγη έχει θετική επίδραση στις θερμικές συνθήκες της αίθουσας κατά τη διάρκεια μιας σχολικής χρονιάς αλλά με πολύ μεγάλα ποσοστά εκτός των επιτρεπτών ορίων. Ενδεικτικά, ανάμεσα στις θερμές περιόδους το 80,6% των μετρήσεων θερμοκρασίας υπερέβη το θεσμοθετημένο οριακό εύρος στην τάξη κάτω από το πράσινη στέγη (Γ3) και το 86,2% στην αντίστοιχη κάτω από τη συμβατική (B1). Κατά την ψυχρή περίοδο, η διαφορά μεταξύ πράσινης και συμβατικής στέγης είναι μεγαλύτερη καθώς το 65,1% των μετρήσεων θερμοκρασίας ήταν εκτός της οριακής περιοχής για την αίθουσα Γ3 ενώ 81,8% στη B1. Όσον αφορά τη σχετική υγρασία, μόνο το 3,3% των μετρήσεων βρέθηκε εκτός ορίων στην Γ3 για όλη τη πειραματική περίοδο, ενώ το 27,1% στην αντίστοιχη αίθουσα κάτω από την στέγη οπλισμένου σκυροδέματος (B1). Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με την έρευνα των Ran και Tang, 2017 οι οποίοι αναφέρουν έως και 20% βελτίωση των εσωτερικών θερμικών συνθηκών, ύστερα από μετρήσεις ενός χώρου με πράσινη οροφή στη Σανγκάη.

Πίνακας 4.1: Στατιστικά στοιχεία των μετρήσεων θερμοκρασίας (T) και σχετικής υγρασίας (RH) για αίθουσες διδασκαλίας πρώτου ορόφου κάτω από πράσινη και συμβατική ταράτσα και για άμεσο εξωτερικό περιβάλλον κατά τη διάρκεια διαφορετικών περιόδων

Πειραματική θέση	Στατιστικά στοιχεία	Ιούνιος - Ιούλιος 2016		Οκτώβριος 2016 - Μάρτιος 2017		Απρίλιος - Ιούνιος 2017	
		T (°C)	RH (%)	T (°C)	RH (%)	T (°C)	RH (%)
	Μέσος όρος	32,4	41,0	19,7	47,4	25,1	46,7
Αίθουσα 1 ^{ου} ορόφου κάτω από πράσινη στέγη (Γ3)	Τυπική απόκλιση	1,1	2,4	3,1	7,9	2,4	5,4
	Ελάχιστο	29,1	29,5	10,8	26,6	20,8	28,0
	Μέγιστο	33,8	46,1	27,7	74,1	30,6	61,1
	Μέσος όρος	35,2	35,1	16,4	59,2	26,4	45,5
Αίθουσα 1 ^{ου} ορόφου κάτω από συμβατική πλάκα οροφής (B1)	Τυπική απόκλιση	1,2	2,9	4,2	6,4	3,8	4,6
	Ελάχιστο	30,9	27,7	6,0	35,4	19,1	30,1
	Μέγιστο	37,8	40,5	26,2	78,0	37,1	57,5
	Μέσος όρος	30,1	53,7	12,2	67,8	21,9	57,0
Εξωτερική (πράσινη στέγη)	Τυπική απόκλιση	4,7	15,5	5,9	23,6	6,0	17,1
	Ελάχιστο	19,8	0,0	-2,9	0,0	6,5	0,0
	Μέγιστο	43,3	100,0	29,9	100,0	37,0	100,0
	Μέσος όρος	31,4	47,8	13,4	66,6	23,5	51,0
Εξωτερική (συμβατική πλάκα οροφής)	Τυπική απόκλιση	4,2	14,5	5,5	16,2	5,5	16,1
	Ελάχιστο	22,0	0,0	-1,4	17,2	10,3	16,0
	Μέγιστο	41,0	100,0	29,0	100,0	38,8	100,0



(α)



(β)

Σχήμα 4.1: Χρονοσειρές (α) θερμοκρασίας και (β) σχετικής υγρασίας για δύο αίθουσες διδασκαλίας κάτω από πράσινη και συμβατική στέγη καθ’ όλη τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου

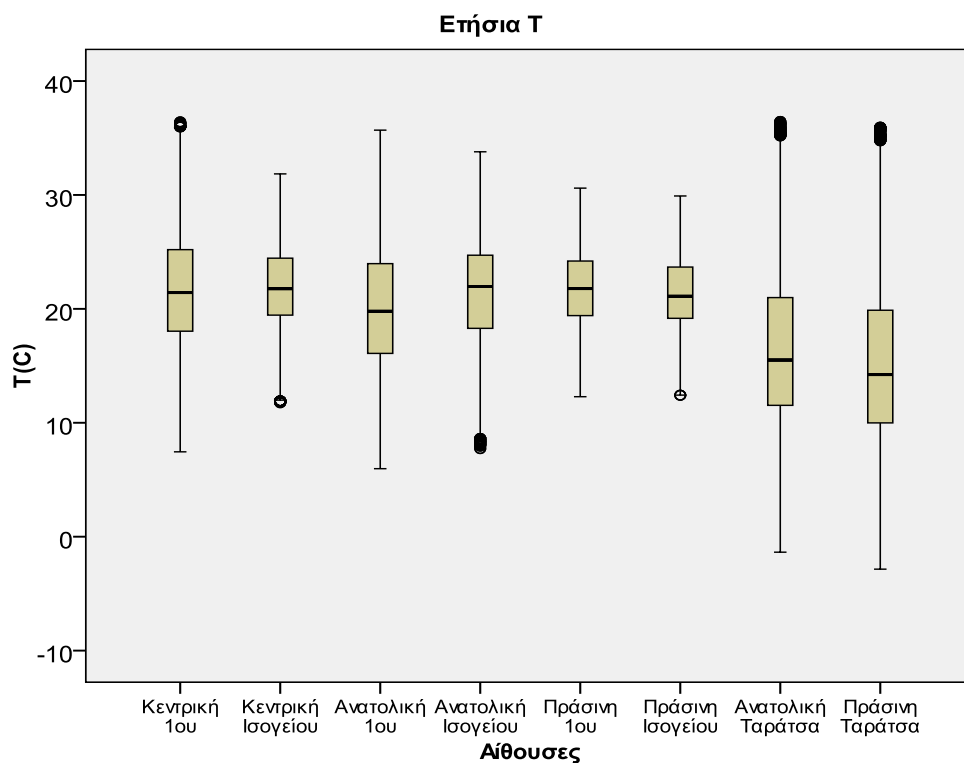
Στον πίνακα 4.2, φαίνεται ότι η μέγιστη εσωτερική θερμοκρασία εμφανίστηκε στην κεντρική αίθουσα του 1^{ου} ορόφου (B3) φτάνοντας τους 36,42 °C, μια τιμή υψηλή και πάρα πολύ κοντινή στην μέγιστη εξωτερική θερμοκρασία της ανατολικής ταράτσας (36,45 °C). Την ίδια στιγμή η μέγιστη θερμοκρασία στην αίθουσα 1^{ου} ορόφου κάτω από την πράσινη στέγη (Γ3) μετρήθηκε στους 30,60 °C. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει πως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες η μόνωση των συμβατικών ταρασών είναι ελλιπής και δημιουργούνται αφόρητες συνθήκες ζέστης στις αίθουσες του πρώτου ορόφου που βρίσκονται κάτω από αυτές. Επιπρόσθετα, όμως ναι μεν η θερμοκρασία κάτω από την πράσινη στέγη είναι χαμηλότερη αλλά όχι αποδεκτή καθώς ξεπερνάει του 30 °C. Όπως είναι αναμενόμενο και σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Perini et al.,2013), η πράσινη οροφή βοηθά αλλά δεν

αποτελεί λύση από μόνη της. Η ελάχιστη εσωτερική θερμοκρασία εμφανίστηκε στην ανατολική αίθουσα του 1^{ου} ορόφου (B1) στους 5,97 °C. Παράλληλα, η μέση μέγιστη εσωτερική θερμοκρασία βρέθηκε στην κεντρική αίθουσα του ισογείου (A3) με τιμή 21,98 °C με πολύ μικρή διαφορά από την μέση ελάχιστη (20,21 °C) για την ανατολική αίθουσα του 1^{ου} ορόφου (B1). Μια γενική παρατήρηση είναι ότι οι μέσες θερμοκρασίες όλων των αιθουσών δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους. Ο βασικότερος λόγος του φαινομένου αυτού είναι η επιρροή των μετρήσεων κατά τις κρύες ημέρες του έτους όπου όλες οι αίθουσες θερμαίνονται κεντρικά τις ίδιες ώρες δημιουργώντας έτσι, περίπου παρόμοιες εσωτερικές συνθήκες.

Επιπλέον, η αίθουσα του 1^{ου} ορόφου (Γ3), που βρίσκεται κάτω από την πράσινη ταράτσα, εμφανίζει υψηλότερη μέση θερμοκρασία από την αντίστοιχη που βρίσκεται κάτω από την ανατολική ταράτσα (B1), ωστόσο το γεγονός αυτό, οφείλεται στις μετρήσεις που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου. Ακόμα, παρατηρείται ότι οι αίθουσες κάτω από την πράσινη ταράτσα έχουν τις μικρότερες τυπικές αποκλίσεις και ελάχιστες έως καθόλου ακραίες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες κάτω από τις οροφές σπλισμένου σκυροδέματος. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σημαντικό, καθώς φαίνεται ότι η πράσινη ταράτσα ικανοποιεί το στόχο για ένα σχετικά σταθερό μικροκλίμα εντός του κτιρίου, χωρίς ακραίες διακυμάνσεις. Το σχήμα 4.2 παρουσιάζει γραφικά τα συνολικά αποτελέσματα των θερμοκρασιακών επιπέδων από όλα τα σημεία καταγραφής εντός του σχολείου.

Πίνακας 4.2: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας για τη σχολική χρονιά 2016-2017

Θερμοκρασία (°C)	Κεντρική 1 ^{ου} (B3)	Κεντρική Ισογείου (A3)	Ανατολική 1 ^{ου} (B1)	Ανατολική Ισογείου (E3)	Πράσινη 1 ^{ου} (Γ3)	Πράσινη Ισογείου (B2)	Ανατολική Ταράτσα	Πράσινη Ταράτσα	
Μέσος όρος	21,74	21,98	20,21	21,52	21,83	21,34	16,22	15,04	
Τυπική απόκλιση	5,36	3,76	5,90	4,85	3,52	3,31	7,06	7,21	
Ελάχιστο	7,45	11,75	5,97	7,73	12,29	12,42	-1,36	-2,85	
Μέγιστο	36,42	31,85	35,69	33,79	30,60	29,91	36,45	35,96	
Τεταρτημόρια	25	18,04	19,45	16,09	18,29	19,41	19,17	11,52	9,99
	50	21,43	21,77	19,79	21,96	21,78	21,11	15,51	14,23
	75	25,20	24,45	23,97	24,71	24,20	23,67	20,99	19,88



Σχήμα 4.2: Τιμές ετήσιας θερμοκρασίας (T) για όλες τις πειραματικές θέσεις

Αναφορικά με τη σχετική υγρασία, ο πίνακας 4.3 παρουσιάζει ότι τα υψηλότερα επίπεδα εμφανίζονται στην ανατολική αίθουσα του 1^{ου} ορόφου (B1) και ως προς τη μέγιστη τιμή (77,9%) αλλά και ως προς το μέσο όρο του έτους (54,2%). Μια πιθανή αιτία είναι ότι η τάξη αυτή βρίσκεται υπό την άμεση επιρροή του ποτιστικού συστήματος της πράσινης ταράτσας, γεγονός που αυξάνει κατά συχνά διαστήματα τα ποσοστά σχετικής υγρασίας που εισρέουν στο χώρο. Πάραυτα, είναι σημαντικό το γεγονός ότι τα θερμοθετημένα όρια έκθεσης δεν παραβιάζονται κατά το μεγαλύτερο διάστημα των μετρήσεων. Η χαμηλότερη τιμή σχετικής υγρασίας μετρήθηκε στην αίθουσα του ισογείου που βρίσκεται κάτω από την πράσινη ταράτσα (B2) φτάνοντας στο 17,2%, ποσοστό αρκετά χαμηλό. Η ίδια αίθουσα εμφάνισε και την μικρότερη μέση ετήσια σχετική υγρασία η οποία βρίσκεται σε φυσιολογικά επίπεδα της τάξης του 43,9%. Όπως και στην περίπτωση των εσωτερικών θερμοκρασιών, το εύρος των διαφορών μεταξύ των μέσω ετησίων επιπέδων σχετικής υγρασίας είναι σχετικά μικρό, της τάξης περίπου του 10%, γεγονός που επισημαίνει τη διατήρηση σχετικά σταθερών κλιματικών συνθηκών εντός των αιθουσών διδασκαλίας.

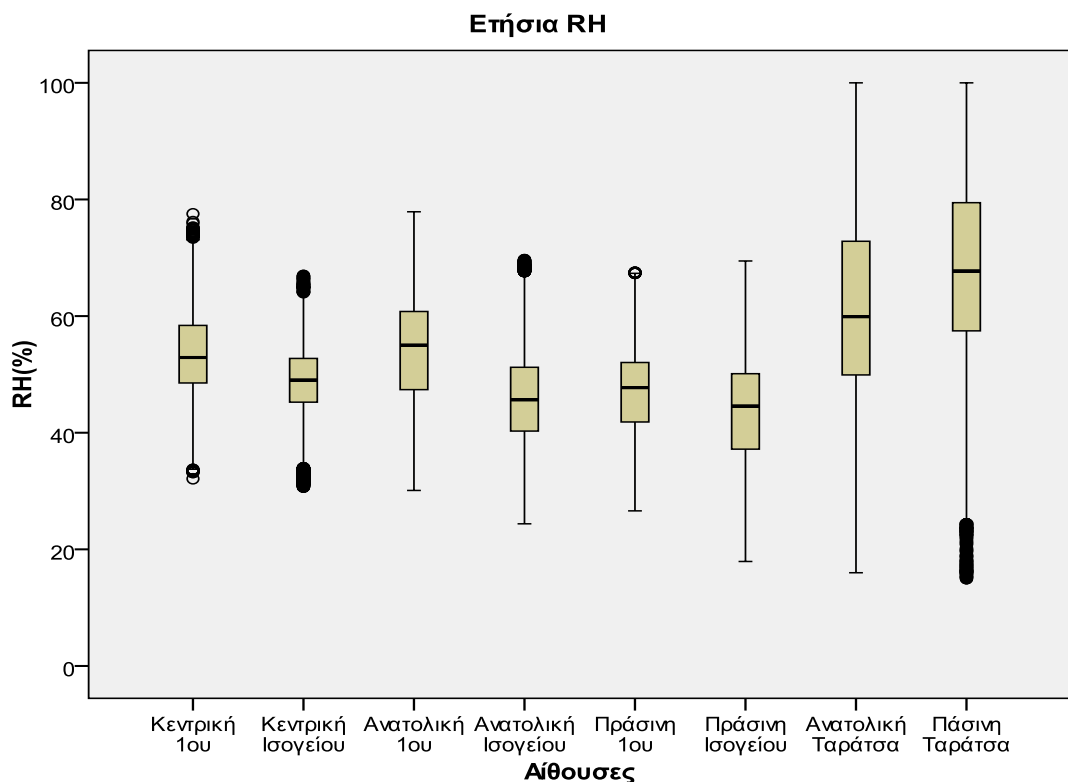
Αξίζει να σημειωθεί ότι από την σύγκριση μεταξύ των αιθουσών του 1^{ου} ορόφου, παρατηρείται ότι η Γ3 (κάτω από την πράσινη στέγη) παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές κορεσμένης υγρασίας, συγκριτικά με τις αίθουσες που βρίσκονται κάτω από τις συμβατικές οροφές (B3 και B1). Επιπλέον, εμφανίζει και μικρότερη τυπική απόκλιση (6,7%). Οι τιμές αυτές, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της αίθουσας B2 καταδεικνύουν και πάλι ότι εντός των τάξεων κάτωθεν της φυτοκαλυμμένης στέγης

δημιουργούνται καλύτερες και σχετικά πιο σταθερές εσωτερικές κλιματικές συνθήκες σε σύγκριση με τις υπόλοιπες αίθουσες.

Σε ό,τι αφορά τις εξωτερικές μετρήσεις, όπως ήταν αναμενόμενο η μέση ετήσια σχετική υγρασία βρέθηκε κατάτι μεγαλύτερη στην πράσινη στέγη (67,8%) σε σχέση με την ανατολική στέγη από σπλισμένο σκυρόδεμα (61,5%) κυρίως λόγω της περιοδικής χρήσης του ποτιστικού συστήματος. Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονιστεί η μεγάλη επίδραση της τοπικής μετεωρολογίας στις μετρήσεις αυτές καθώς τα ακραία ποσοστά σχετικής υγρασίας επιπέδου 100% εμφανίστηκαν λόγω ραγδαίας βροχόπτωσης που έλαβε χώρα αρκετές ημέρες εκείνης της χρονιάς. Το σχήμα 4.3 παραθέτει γραφικά τα συνολικά αποτελέσματα από τις μετρήσεις σχετικής υγρασίας σε όλα τα σημεία καταγραφής εντός του κτιριακού συγκροτήματος.

Πίνακας 4.3: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας για τη σχολική χρονιά 2016-2017

Σχετική Υγρασία (%)	Κεντρική 1 ^{ου} (B3)	Κεντρική Ισογείου (A3)	Ανατολική 1 ^{ου} (B1)	Ανατολική Ισογείου (E3)	Πράσινη 1 ^{ου} (Γ3)	Πράσινη Ισογείου (B2)	Ανατολική ή Ταράτσα	Πράσινη Ταράτσα	
Μέσος όρος	53,4	48,8	54,2	46,5	47,3	43,9	61,5	67,8	
Τυπική απόκλιση	7,2	6,2	8,7	7,8	6,7	8,8	17,2	17,1	
Ελάχιστο	32,1	30,7	30,1	24,4	26,6	17,9	16	15	
Μέγιστο	77,54	67	77,9	69,7	67,5	69,5	100	100	
Τεταρτημόρια	25	48,5	45,2	47,4	40,3	41,8	37,2	49,9	57,5
	50	52,9	49	55	45,6	47,7	44,6	59,9	67,7
	75	58,4	52,7	60,8	51,2	52	50,1	72,8	79,5



Σχήμα 4.3: Τιμές ετήσιας σχετικής υγρασίας (RH) για όλες τις πειραματικές θέσεις

4.1.2. Μηνιαίες μεταβολές

Στην υποενότητα αυτή οι μηνιαίες τιμές παρουσιάζονται και πάλι σχηματικά με τη μορφή θηκογράμματος, ούτως ώστε οι διαφορές μεταξύ των αιθουσών αλλά και του άμεσου εξωτερικού περιβάλλοντος να είναι εμφανείς. Οι οριζόντιες γραμμές που αντικατοπτρίζουν τα συνιστάμενα οριακά εύρη εσωτερικής θερμοκρασίας και κορεσμένης υγρασίας. Στόχος είναι απεικόνιση των αποτελεσμάτων από τις πιο ψυχρές ως τις πιο θερμές κλιματικές συνθήκες. Για το λόγο επιλέχθηκαν τρεις αντιπροσωπευτικοί μήνες. Ο Οκτώβριος όπου οι εξωτερικές θερμοκρασίες κυμαίνονται σε μέτρια επίπεδα, ο Ιανουάριος ο οποίος αποτελεί έναν μήνα με χαμηλές θερμοκρασίες και αντιστοίχως ο Ιούνιος με υψηλές. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τους υπόλοιπους μήνες παρατίθενται στο **Παράρτημα Γ**.

4.1.2.1 Αποτελέσματα Οκτωβρίου

Ο πίνακας 4.4 συνοψίζει όλα τα αποτελέσματα θερμοκρασίας κατά το μήνα Οκτώβριο. Σε ότι αφορά τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου, η αίθουσα Γ3 παρουσιάζει υψηλότερη μέση θερμοκρασία (κατά 1.3°C) σε σχέση με την αντίστοιχη αίθουσα κάτω από την ανατολική ταράτσα (B1) καθώς και υψηλότερη μέγιστη κι ελάχιστη τιμή. Τα υψηλότερα επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας παρατηρούνται στην αίθουσα B3 που βρίσκεται κάτω από την κεντρική στέγη από σπλισμένο σκυρόδεμα. Για το μήνα

Οκτώβριο, που η θερμοκρασία κυμαίνεται σε μέτρια επίπεδα, η επίδραση της πράσινη στέγης δεν φαίνεται να είναι ισχυρή καθώς οι θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των αιθουσών είναι μικρές. Μια επιπρόσθετη σημαντική παρατήρηση είναι ότι στην αίθουσα Γ3, η θερμοκρασιακή τυπική απόκλιση είναι μικρότερη, κάτι που δείχνει σχετικά σταθερότερο περιβάλλον.

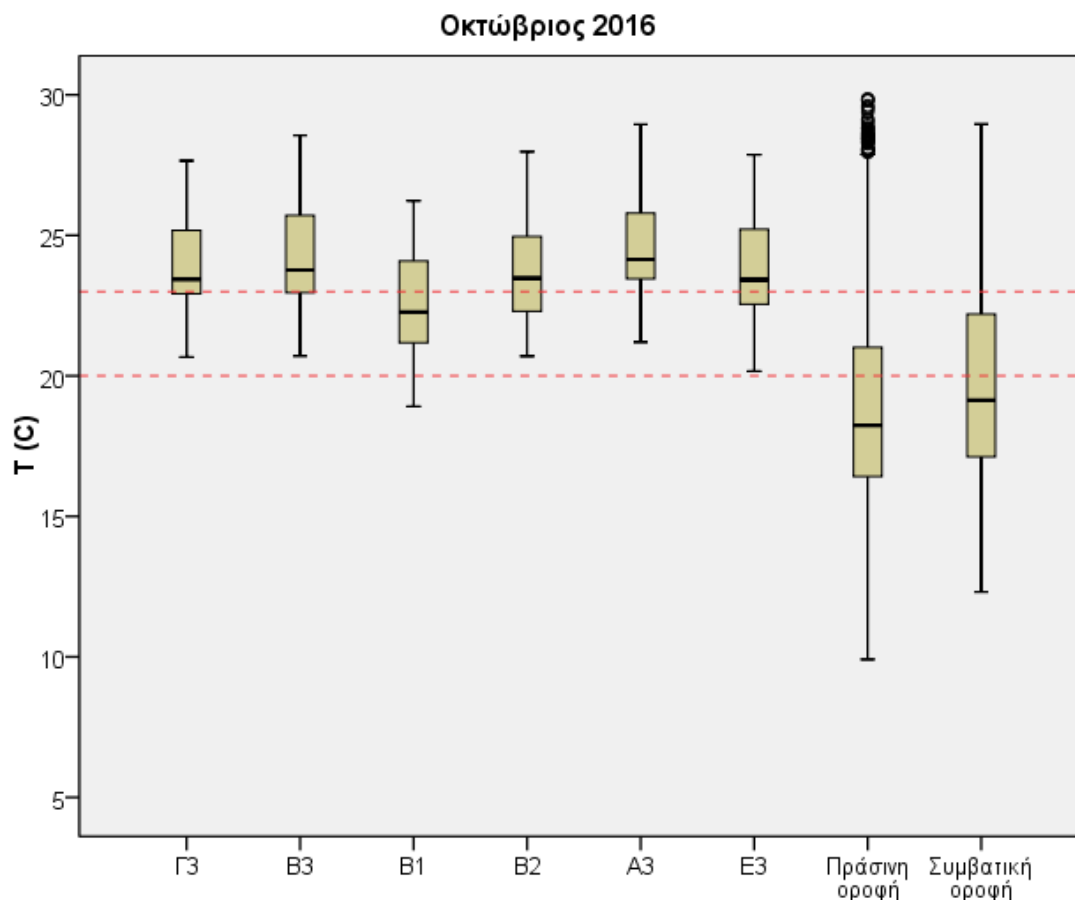
Για τις αίθουσες του ισογείου, η γενική εικόνα είναι παρόμοια με τις αίθουσες του 1^{ου} ορόφου. Οι αίθουσες Β2 και Ε3, δηλαδή αυτή που βρίσκεται κάτω από την πράσινη κι η αντίστοιχη κάτω από την ανατολική συμβατική στέγη, εμφανίζουν σχεδόν ίδια μέση, μέγιστη κι ελάχιστη εσωτερική θερμοκρασία. Ελάχιστα πιο αυξημένα επίπεδα μέσης θερμοκρασίας μετρήθηκαν εντός της τάξεως Α3 (24,48°C) ενώ εμφανίζεται και η μικρότερη τυπική απόκλιση ($\pm 1,51^\circ\text{C}$) καταδεικνύοντας το πιο σταθερό περιβάλλον από θερμοκρασιακής άποψης.

Πίνακας 4.4: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Οκτωβρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία

Θερμοκρασία (°C)	Κεντρική 1 ^{ου} (Β3)	Κεντρική Ισογείου (Α3)	Ανατολική 1 ^{ου} (Β1)	Ανατολική Ισογείου (Ε3)	Πράσινη 1 ^{ου} (Γ3)	Πράσινη Ισογείου (Β2)	Ανατολική Ταράτσα	Πράσινη Ταράτσα
Μέσος όρος	24,1	24,5	22,5	23,7	23,8	23,6	19,8	19,1
Τυπική απόκλιση	1,8	1,5	1,8	1,8	1,5	1,6	3,5	3,8
Ελάχιστο	20,7	21,2	18,9	20,2	20,7	20,7	12,3	9,9
Μέγιστο	28,6	29,0	26,2	27,9	27,7	28,0	29,0	29,9
Τεταρτημόρια	23	23,5	21,8	22,6	22,9	22,3	17,1	16,4
25	23,8	24,1	22,3	23,4	23,4	23,5	19,1	18,2
50								
75	25,7	25,8	24,1	25,2	25,2	25,0	22,2	21,0

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στο σχήμα 4.4. Στον πρώτο όροφο η επίδραση της πράσινης στέγης κατά τη διάρκεια μέτριων εξωτερικών θερμοκρασιών δεν είναι μεγάλη καθώς το μεγαλύτερο πλήθος μετρήσεων εντός των συνιστώμενων ορίων (20-23°C) βρέθηκε στην τάξη Β1, κάτω από την ανατολική στέγη από σπλισμένο σκυρόδεμα. Η αίθουσα Γ3 παρουσιάζει μέτρια επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας, σχετικά με τις άλλες δύο αίθουσες 1^{ου} ορόφου. Αξίζει να τονιστεί πως σε καμία από τις τρεις αίθουσες δεν παρατηρείται εμφάνιση ακραίων τιμών, γεγονός που αποδεικνύει την μη ύπαρξη απότομων μεταβολών στις εσωτερικές θερμοκρασίες των τριών σημείων καταγραφής. Σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζει και η εποχή καθώς κατά το μήνα Οκτώβριο τα επίπεδα εξωτερικής θερμοκρασίας δεν εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλές ή χαμηλές τιμές. Στο ισόγειο, η τάξη με τις περισσότερες μετρήσεις εντός του θεσμοθετημένου θερμοκρασιακού εύρους είναι η Β2, κάτω από την πράσινη στέγη με πολύ μικρή διαφορά όμως συγκριτικά με την αίθουσα Ε3 κάτω από την ανατολική στέγη σπλισμένου σκυροδέματος. Στην αίθουσα Α3, η οποία όπως τονίστηκε και παραπάνω εμφάνισε τις μεγαλύτερες θερμοκρασιακές τιμές στο επίπεδο του ισογείου, οι περισσότερες μετρήσεις βρίσκονται πάνω από το επιτρεπόμενο οριακό εύρος (20-23°C). Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί πως όπως και στον πρώτο όροφο, οι αίθουσες δεν παρουσιάζουν καμία ακραία τιμή εσωτερικής

θερμοκρασίας, γεγονός που καταδεικνύει τη μη ύπαρξη απότομων μεταβολών θερμοκρασίας στους χώρους αυτούς. Συμπερασματικά, η επίδραση της πράσινης στέγης κατά τη διάρκεια του Οκτώβρη στα επίπεδα θερμοκρασίας της αίθουσας που βρίσκεται από κάτω της (B2) δεν είναι σημαντική καθώς οι διαφορές σε σχέση με τις άλλες δύο αίθουσες κάτω από τις συμβατικές οροφές (E3 και A3) είναι σχεδόν αμελητέες.



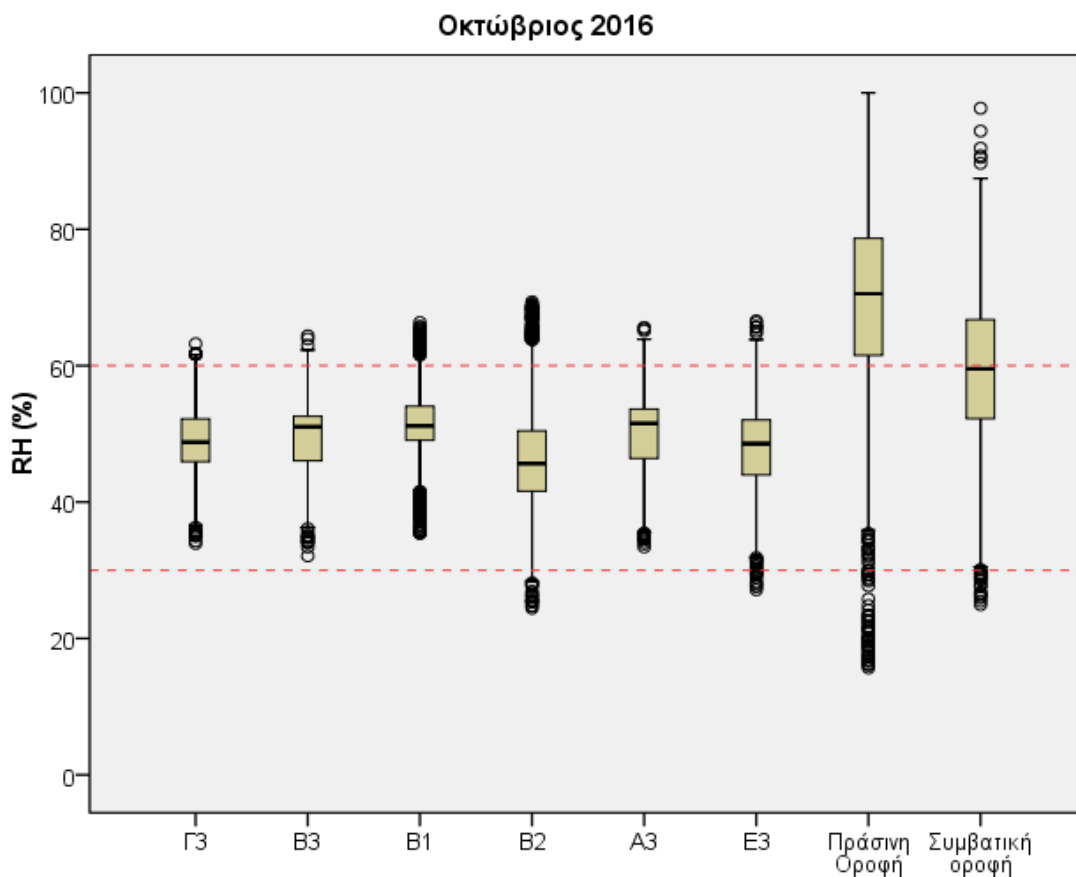
Σχήμα 4.4: Επίπεδα θερμοκρασίας Οκτωβρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία

Ο πίνακας 4.5 συνοψίζει τα αποτελέσματα σχετικής υγρασίας σε όλα τα σημεία καταγραφής. Στον πρώτο όροφο, η αίθουσα Γ3 κάτω από τη πράσινη ταράτσα εμφανίζει χαμηλότερη μέση σχετική υγρασία συγκριτικά με τις υπόλοιπες τάξεις (48,6%). Επίσης, παρουσιάζει την μικρότερη τυπική απόκλιση της τάξης του $\pm 4,9\%$. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, βελτιωμένες συνθήκες υγρασίας κάτω από την πράσινη στέγη αλλά με πολύ μικρές διαφορές σε σχέση με τις άλλες δύο τάξεις. Από το σχήμα 4.5 ενισχύεται το παραπάνω συμπέρασμα καθώς οι περισσότερες μετρήσεις εντός του θερμοθετημένου εύρους εσωτερικής σχετικής υγρασίας (30-60%) φαίνονται στην αίθουσα Γ3, στη πραγματικότητα όμως και οι τρεις αίθουσες του πρώτου ορόφου δεν παραβιάζουν σημαντικά τα επιτρεπόμενα όρια.

Στο επίπεδο του ισογείου, η σχετική υγρασία εμφανίζεται σε χαμηλότερα επίπεδα εντός της τάξης κάτω από την πράσινη στέγη (B2) συγκριτικά με τις αντίστοιχες κάτω από τις συμβατικές οροφές. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο πίνακα 4.5 η μέση εσωτερική σχετική υγρασία στη B2 κυμάνθηκε στο 46,6% ενώ η ελάχιστη παρατήρηση βρέθηκε στο 24,4%. Το φαινόμενο αυτό ενισχύεται και από την μεγάλη τυπική απόκλιση της σχετικής υγρασίας στη συγκεκριμένη αίθουσα (8,4%) σε σχέση με τις αντίστοιχες στις αίθουσες E3 και A3 (6,1% και 5,5% αντιστοίχως) όπως και από το μεγάλο πλήθος ακραίων τιμών που εμφανίζεται στο σχήμα 4.5 για τη περίπτωση της αίθουσας B2. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται ότι για την πλειοψηφία των μετρήσεων και στις τρεις αίθουσες ισογείου, οι τιμές εσωτερικής σχετικής υγρασίας δεν παραβιάζουν ιδιαίτερα το θεσμοθετημένο οριακό εύρος (30-60%). Είναι εμφανές ότι κατά τη διάρκεια ενός μήνα με ήπιες θερμοκρασίες όπως ο Οκτώβρης του 2016 (ενότητα 3.2.1), η πράσινη στέγη δεν είχε ιδιαίτερη επίδραση στις θερμικές συνθήκες των τάξεων που βρίσκονται υπό την επιρροή της.

Πίνακας 4.5: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας Οκτωβρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία

Σχετική Υγρασία (%)	Κεντρική 1 ^{ου} (B3)	Κεντρική Ισογείου (A3)	Ανατολική 1 ^{ου} (B1)	Ανατολική Ισογείου (E3)	Πράσινη 1 ^{ου} (Γ3)	Πράσινη Ισογείου (B2)	Ανατολική Ταράτσα	Πράσινη Ταράτσα
Μέσος όρος	49,3	49,9	51,6	47,9	48,6	46,6	59,6	69,9
Τυπική απόκλιση	5,3	5,5	5,5	6,1	4,9	8,4	11,03	16,2
Ελάχιστο	32,1	33,4	35,4	27,1	33,9	24,4	25,0	15,7
Μέγιστο	64,4	65,6	66,3	66,6	63,2	69,4	97,8	100,0
Τεταρτημόρια								
25	46	46,4	49,1	44	45,9	41,6	52,2	61,5
50	51	51,5	51,2	48,6	48,8	45,6	59,6	70,6
75	52,6	53,6	54	52,4	52,2	50,4	66,8	78,7



Σχήμα 4.5: Επίπεδα σχετικής υγρασίας Οκτωβρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία

4.1.2.2 Αποτελέσματα Ιανουαρίου

Κατά τη διάρκεια του Ιανουαρίου, του μήνα με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες στο εξωτερικό περιβάλλον (πίνακας 3.1 - ενότητα 3.2.1) οι καλύτερες εσωτερικές θερμοκρασιακές συνθήκες που διαμορφώνει η πράσινη στέγη στις αίθουσες επιρροής της είναι ξεκάθαρες συγκριτικά με τα αποτελέσματα του Οκτωβρίου. Πιο αναλυτικά, για τις τάξεις του 1^{ου} ορόφου, ο πίνακας 4.6 δείχνει πως η αίθουσα (Γ3), παρουσιάζει μέση εσωτερική θερμοκρασία που φτάνει τους 17,4°C, υψηλότερη κατά 4,6°C συγκριτικά με την αντίστοιχη αίθουσα κάτω από την ανατολική ταράτσα (Β1) και κατά 2,4°C υψηλότερη σε σχέση με την τάξη κάτω από τη συμβατική κεντρική στέγη από σπλισμένο σκυρόδεμα (Β3). Επιπροσθέτως, στην ίδια αίθουσα εμφανίζονται η μεγαλύτερη μέγιστη (25,12°C) και ελάχιστη θερμοκρασία (10,81°C) με εξίσου σημαντικές διαφορές από τις άλλες δύο τάξεις. Παρατηρείται επίσης πως η αίθουσα Γ3 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση ($\pm 3,8$ °C), με πολύ μικρή διαφορά από τις υπόλοιπες.

Η θετική επίδραση της επιπλέον μόνωσης της πράσινης στέγης στη τάξη με την οποία έρχεται σε επαφή είναι εμφανής, καθώς κατά τη ψυχρή περίοδο του Ιανουαρίου, όλες οι τάξεις θερμαίνονται ομοιόμορφα και το ίδιο χρονικό διάστημα (ώρες διδασκαλίας) ενώ τα παράθυρα παραμένουν κλειστά

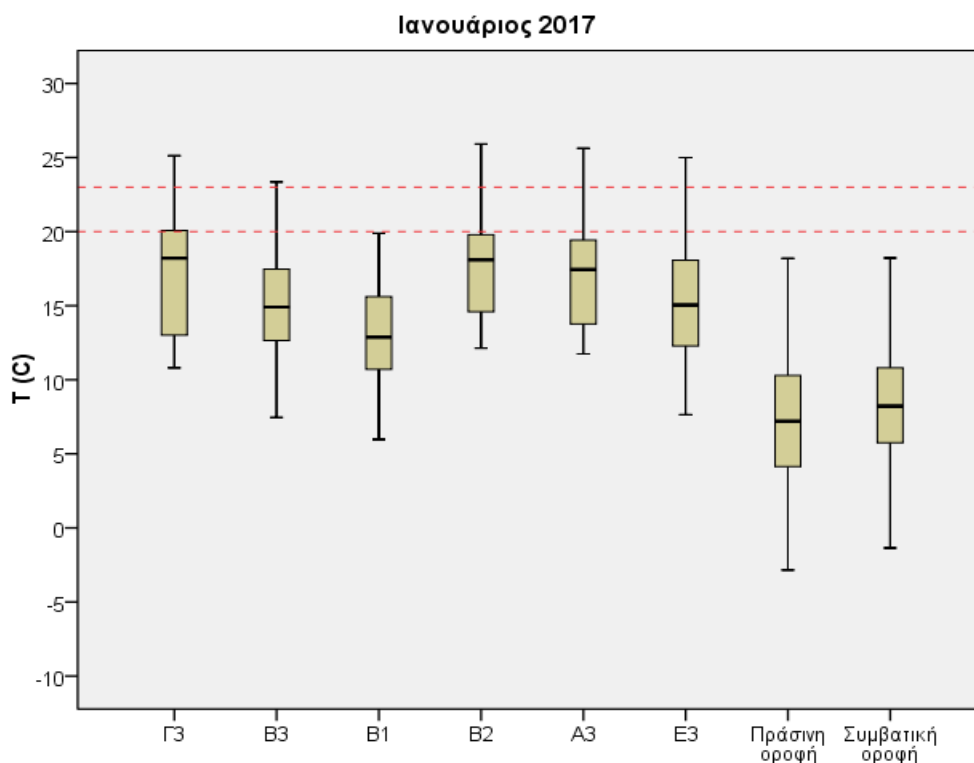
κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια της ημέρας. Η διαπίστωση αυτή ενισχύεται και από το γεγονός ότι η αίθουσα Γ3 κάτω από την πράσινη στέγη, κατέχει τον μικρότερο αριθμό μαθητών (24) την ίδια στιγμή που οι αντίστοιχες αίθουσες κάτω από τις συμβατικές οροφές (B1 και B3) φιλοξενούν 26 και 25 παιδιά αντίστοιχα. Έτσι, τα αυξημένα επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας εντός της τάξης Γ3 δεν μπορούν να αιτιολογηθούν από την ανθρώπινη παρουσία. Στην πραγματικότητα, πρόκειται για τρεις χώρους με ίδιο σύστημα και διάρκεια θέρμανσης όπως και παρόμοιες συνθήκες των ατόμων (κλειστές πόρτες και παράθυρα) που βρίσκονται εντός.

Πίνακας 4.6: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Ιανουαρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία

Θερμοκρασία (°C)	Κεντρική 1 ^{ου} (B3)	Κεντρική Ισογείου (A3)	Ανατολική 1 ^{ου} (B1)	Ανατολική Ισογείου (E3)	Πράσινη 1 ^{ου} (Γ3)	Πράσινη Ισογείου (B2)	Ανατολική Ταράτσα	Πράσινη Ταράτσα
Μέσος όρος	15,0	17,3	12,8	15,4	17,4	17,7	8,2	7,2
Τυπική απόκλιση	3,3	3,4	3,3	4,1	3,8	3,3	3,9	4,3
Ελάχιστο	7,5	11,8	6,0	7,6	10,8	12,1	-1,4	-2,9
Μέγιστο	23,4	25,6	19,9	25,0	25,1	25,9	18,2	18,2
Τεταρτημόρια								
25	12,7	13,8	10,7	12,3	13,0	14,6	5,8	4,1
50	14,9	17,4	12,9	15,1	18,2	18,1	8,2	7,2
75	17,5	19,4	15,6	18,1	20,1	19,8	10,8	10,3

Στο επίπεδο του ισογείου, ακολουθείται το ίδιο μοτίβο θερμοκρασιών αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό όπως στον 1^ο όροφο. Η αίθουσα B2 που βρίσκεται κάτω από την πράσινη στέγη εμφάνισε τη μεγαλύτερη μέση εσωτερική θερμοκρασία φτάνοντας τους 17,7°C, ωστόσο με πολύ μικρή διαφορά από την αντίστοιχη της τάξης A3 κάτω από την κεντρική ταράτσα οπλισμένου σκυροδέματος (17,28°C). Στην αίθουσα E3 κάτω από την ανατολική συμβατική στέγη, η μέση θερμοκρασία βρέθηκε σε πιο χαμηλά επίπεδα της τάξης των 15,40°C. Η υψηλότερη μέγιστη κι ελάχιστη παρατήρηση (25,9°C και 12,1°C) μετρήθηκαν στην αίθουσα B2 και πάλι όμως με πολύ μικρές διαφορές από τις αντίστοιχες στην A3 (25,6°C και 11,8°C). Εξαιρετικά μικρές διαφορές παρατηρούνται και στις τυπικές αποκλίσεις των τριών τάξεων με την μικρότερη τυπική απόκλιση ($\pm 3,3^\circ\text{C}$) να εμφανίζεται για την B2 κάτω από την πράσινη στέγη. Από τα αποτελέσματα στο ισόγειο, είναι ξεκάθαρο ότι η πράσινη ταράτσα ασκεί θετική επιρροή στις θερμικές συνθήκες της αντίστοιχης αίθουσας διδασκαλίας, αλλά το βασικότερο ρόλο παίζει η επιπρόσθετη μόνωση από τον πρώτο όροφο καθώς οι διαφορές είναι μικρές.

Τα πλεονεκτήματα της επιπρόσθετης θερμικής μόνωσης που παρέχει η πράσινη οροφή ως προς την εσωτερική θερμοκρασία παρατίθενται και γραφικά στο σχήμα 4.6. Είναι ενδιαφέρον πως η αίθουσα B1 δεν εμφάνισε καμία τιμή εντός του οριακού εύρους καταδεικνύοντας μη επαρκή μόνωση της Ανατολικής συμβατικής οροφής.

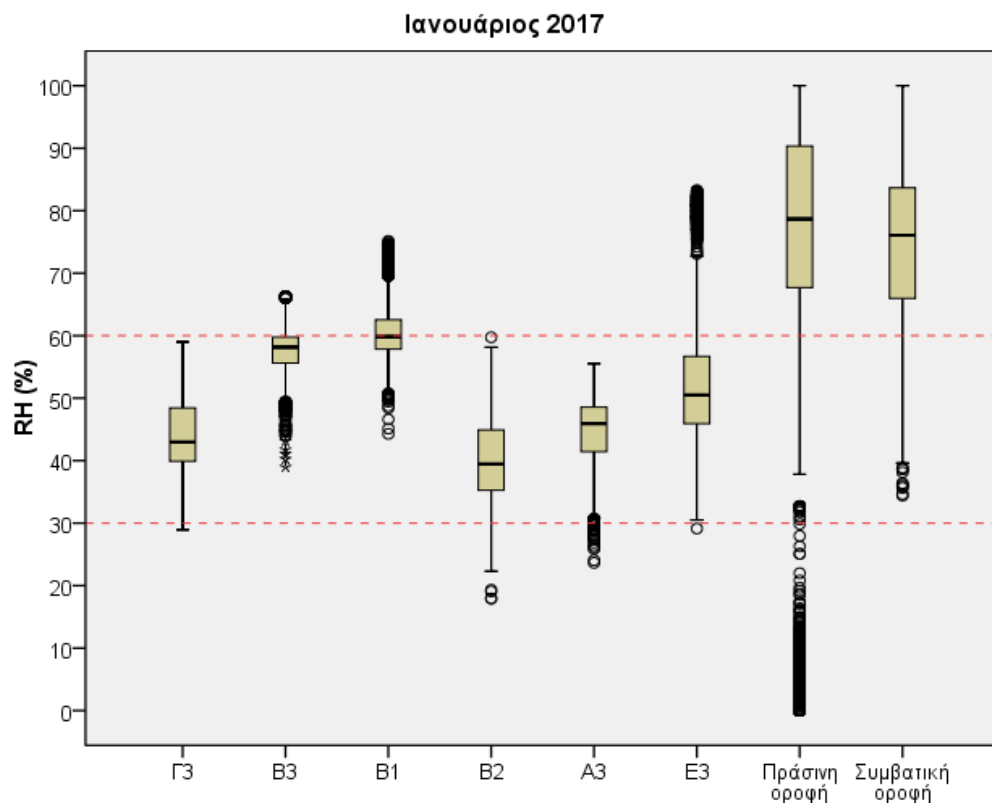


Σχήμα 4.6: Επίπεδα θερμοκρασίας Ιανουαρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία

Σε ότι αφορά την εσωτερική σχετική υγρασία παρουσιάζει και πάλι ικανοποιητικότερα αποτελέσματα στην αίθουσα Γ3. Σύμφωνα με τον πίνακα 4.7 εμφανίζει τη χαμηλότερη μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή (44,0%, 28,9% και 59,0%) συγκριτικά με τις άλλες αίθουσες. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7, η εσωτερική σχετική υγρασία εντός της τάξης Γ3 όχι μόνο διατηρεί σχεδόν όλες τις μετρήσεις εντός του θεσμοθετημένου οριακού εύρους (30-60%) αλλά ταυτοχρόνως δεν εμφανίζει καμία ακραία τιμή.

Πίνακας 4.7: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας Ιανουαρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία

Σχετική Υγρασία (%)	Κεντρική 1 ^{ου} (Β3)	Κεντρική Ισογείου (Α3)	Ανατολική 1 ^{ου} (Β1)	Ανατολική Ισογείου (Ε3)	Πράσινη 1 ^{ου} (Γ3)	Πράσινη Ισογείου (Β2)	Ανατολική Ταράτσα	Πράσινη Ταράτσα
Μέσος όρος	57,7	17,3	60,6	15,40	44,0	17,7	75,4	71,0
Τυπική απόκλιση	3,7	3,4	4,5	4,06	5,7	3,3	12,9	29,2
Ελάχιστο	39,0	11,8	44,3	7,64	28,9	12,1	34,4	5,0
Μέγιστο	66,3	25,6	75,8	25,0	59,0	25,9	100,0	100,0
Τεταρτημόρια								
25	55,6	13,8	57,9	12,3	39,9	14,6	66,0	67,7
50	58,2	17,4	59,9	15,1	43,0	18,1	76,1	78,7
75	59,8	19,4	62,5	18,1	48,4	19,8	8,7	90,4



Σχήμα 4.7: Επίπεδα σχετικής υγρασίας Οκτωβρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία

4.1.2.3 Αποτελέσματα Ιουνίου

Οι αυξημένες εξωτερικές θερμοκρασίες του Ιουνίου κατέδειξαν τη διαφορά εσωτερικών θερμικών συνθηκών μεταξύ των αιθουσών κάτω από την πράσινη και αντιστοίχως κάτω από τις συμβατικά μονωμένες οροφές οπλισμένου σκυροδέματος. Τα επίπεδα θερμοκρασίας εντός των τάξεων κάτω από την φυτοκαλύμενη στέγη μετρήθηκαν σε χαμηλότερα επίπεδα από τις θερμοκρασίες των υπόλοιπων χώρων.

Ο πίνακας 4.8 παρουσιάζει όλα τα αποτελέσματα θερμοκρασίας στα σημεία καταγραφής. Αναλυτικότερα, για τις τάξεις 1^{ου} ορόφου, στην αίθουσα Γ3 που βρίσκεται κάτω από τη πράσινη στέγη, η μέση εσωτερική θερμοκρασία κυμάνθηκε στους 27,8°C, χαμηλότερη κατά 2,6°C συγκριτικά με την αντίστοιχη αίθουσα κάτω από την ανατολική στέγη (Β1) η οποία μετρήθηκε στους 30,4°C. Στα ίδια περίπου επίπεδα με την Β1 και η αίθουσα Β3, κάτω από τη συμβατική κεντρική στέγη από οπλισμένο σκυροδέμα (31°C). Επίσης, στην αίθουσα Γ3 εμφανίζονται η χαμηλότερη ελάχιστη (24,6°C) και μέγιστη μετρούμενη θερμοκρασία (30,6°C) την ίδια στιγμή όπου οι αντίστοιχες τιμές στην Β1 μετρήθηκαν στους 25,7°C και 35,7°C και στην Β3 στους 27,4°C και 36,4°C αντιστοίχως. Επιπροσθέτως η αίθουσα Γ3 πέραν των χαμηλότερων επιπέδων θερμοκρασίας εμφανίζει και τη μικρότερη τυπική απόκλιση ($\pm 1,2^\circ\text{C}$), καταδεικνύοντας ένα σχετικά σταθερό μικροπεριβάλλον.

Είναι εμφανές λοιπόν ότι, κατά τη διάρκεια ενός καλοκαιρινού μήνα όπου οι συνθήκες εντός των αιθουσών είναι παρόμοιες καθώς τα παράθυρα παραμένουν ανοιχτά όση ώρα διαρκούν τα μαθήματα και δεν υφίσταται οποιαδήποτε κλιματιστική μονάδα εντός του κτιρίου, υπάρχει θετική επίδραση της πράσινης στέγης. Η αίθουσα αυτή, λόγω της επιπρόσθετης μόνωσης με την οποία έρχεται σε επαφή από τη φυτοκαλυμμένη οροφή, δέχεται μικρότερα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας και έτσι παρουσιάζει αισθητά χαμηλότερες θερμοκρασίες από τις άλλες δύο τάξεις του πρώτου ορόφου. Πρέπει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με την ενότητα 3.2.1, ο αριθμός των μαθητών και στις τρεις εξεταζόμενες αίθουσες είναι περίπου ο ίδιος (24 -26) και έτσι, οι εσωτερικές θερμοκρασιακές διαφορές του επιπέδου των 2°C δεν μπορούν να αιτιολογηθούν από την ανθρώπινη παρουσία στην εκάστοτε τάξη. Όπως και στη περίπτωση του Ιανουαρίου (ψυχρή περίοδος), έτσι και για τον Ιούνιο (θερμή περίοδος) οι τρεις αίθουσες χρησιμοποιούν το ίδιο σύστημα ψύξης (φυσικός δροσισμός) για την ίδια χρονική διάρκεια (ώρες διδασκαλίας), με παρόμοιο αριθμό ατόμων που βρίσκονται εντός και με ίδιες εσωτερικές συνθήκες (ανοιχτά παράθυρα).

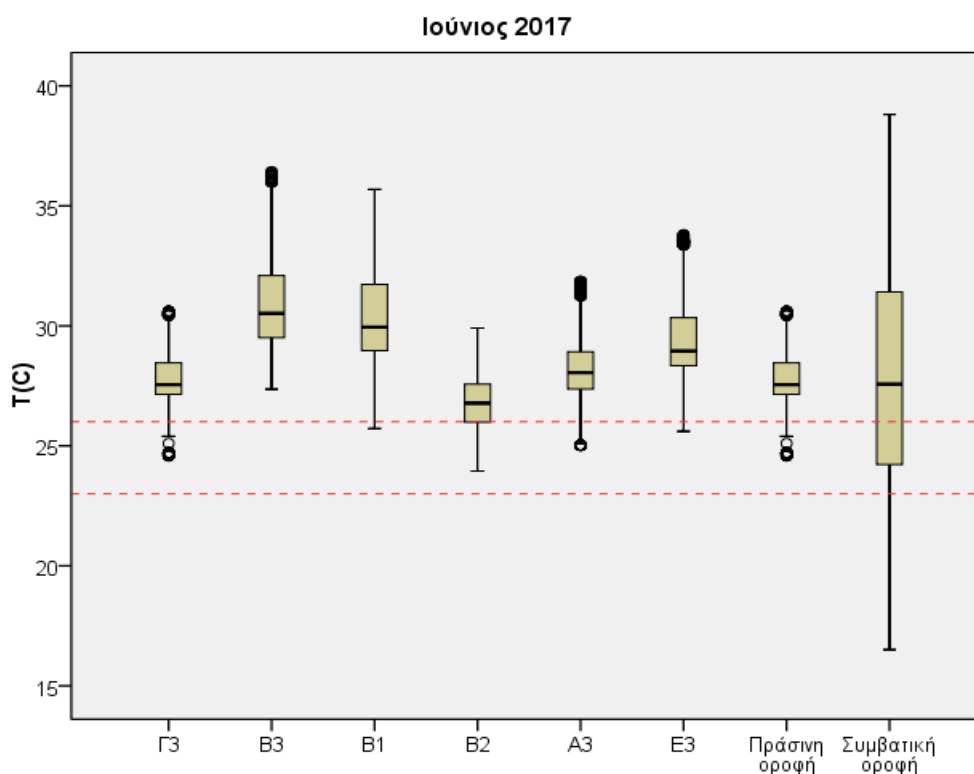
Στις αίθουσες του ισογείου η επιρροή της πράσινης στέγης είναι επίσης θετική. Συγκεκριμένα, από τον πίνακα 4.8 φαίνεται ότι η αίθουσα B2 που βρίσκεται κάτω από την πράσινη στέγη, εμφάνισε τη χαμηλότερη μέση, μέγιστη κι ελάχιστη εσωτερική θερμοκρασία (26,9°C, 24,0°C και 29,9°C αντίστοιχα). Η διαφορά μάλιστα συγκριτικά με τη μέση εσωτερική θερμοκρασίας της τάξης E3 κάτω από την ανατολική συμβατική στέγη φτάνει τους 2,6°C ίδια τιμή με τη διαφορά των αντίστοιχων αιθουσών πρώτου ορόφου. Μια γενική παρατήρηση είναι ότι όλες οι αίθουσες του ισογείου παρουσιάζουν μειωμένες εσωτερικές θερμοκρασίες της τάξης των 1-2°C σε σύγκριση με της αντίστοιχες του 1ου ορόφου, φαινόμενο απολύτως λογικό καθότι δεν έρχονται σε άμεση επαφή με τα μεγάλα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών.

Πίνακας 4.8: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Ιουνίου σε όλα τα πειραματικά σημεία

Θερμοκρασία (°C)	Κεντρική 1 ^{ου} (B3)	Κεντρική Ισογείου (A3)	Ανατολική 1 ^{ου} (B1)	Ανατολική Ισογείου (E3)	Πράσινη 1 ^{ου} (Γ3)	Πράσινη Ισογείου (B2)	Ανατολική Ταράτσα	Πράσινη Ταράτσα
Μέσος όρος	31,0	28,3	30,4	29,5	27,8	26,9	27,8	27,8
Τυπική απόκλιση	2,1	1,3	2,1	1,7	1,2	1,2	4,7	1,2
Ελάχιστο	27,4	25,0	25,7	25,6	24,6	24,0	16,5	24,6
Μέγιστο	36,4	31,9	35,7	33,8	30,6	29,9	38,8	30,6
Τεταρτημόρια								
25	29,5	27,4	29,0	28,3	27,2	26,0	24,2	27,2
50	30,5	28,1	30,0	29,0	27,6	26,8	27,6	27,6
75	32,1	28,9	31,8	30,3	28,5	27,6	31,4	28,5

Όλα τα παραπάνω συμπεράσματα σχετικά με την εσωτερική θερμοκρασιακή βελτίωση που επιφέρει η εγκατάσταση μιας πράσινης στέγης ενισχύονται από τα αποτελέσματα του σχήματος 4.8. Στο σχήμα αυτό, είναι εμφανές πως μόνο οι αίθουσες κάτω από την πράσινη στέγη βρίσκονται κοντά στο θερμοθετημένο οριακό εύρος εσωτερικών θερμοκρασιών (23-26°C). Η βελτίωση αυτή όμως, όπως

φαίνεται από το ίδιο σχήμα, δεν είναι αρκετή για να συμβάλει αποφασιστικά στη δημιουργία ανεκτού εσωτερικού περιβάλλοντος καθώς υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που συντελούν σε αυτό, με κυριότερους την θερμική μόνωση και τον επαρκή αερισμό (φυσικό ή μηχανικό) του κτιρίου. Σε παρόμοιο συμπέρασμα καταλήγει και η έρευνα των Dascalaki και Sermpetzoglou, 2011 για 135 αίθουσες σχολείων στην Ελλάδα. Οι υψηλότερες μετρούμενες θερμοκρασίες παρουσιάστηκαν στην αίθουσα Β3 (κάτω από την κεντρική στέγη οπλισμένου σκυροδέματος) με κάποιες ακραίες μετρήσεις να ξεπερνάνε τους 36°C. Μια αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι ότι στη συγκεκριμένη αίθουσα καμία μέτρηση (ακόμη και η πιο χαμηλή) δε βρέθηκε εντός του συνιστώμενου οριακού εύρους κάτι που δεν συμβαίνει στις άλλες δύο αίθουσες.

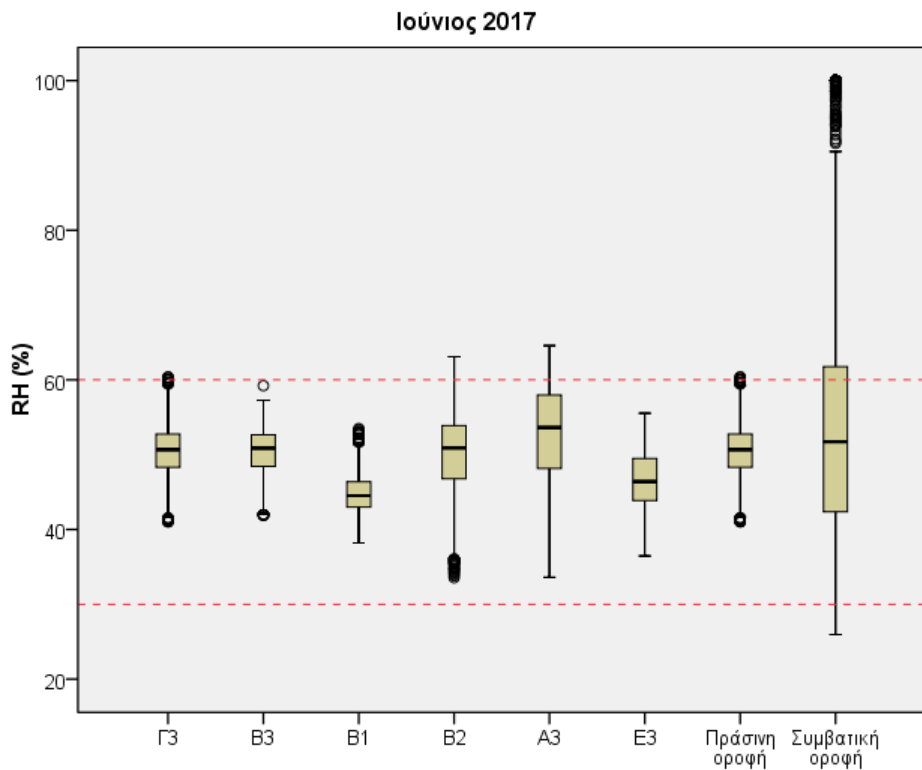


Σχήμα 4.8: Επίπεδα θερμοκρασίας Ιανουαρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία

Η εσωτερική σχετική υγρασία στην αίθουσα Γ3 φαίνεται ανεβασμένη συγκριτικά με τις άλλες δύο αίθουσες πρώτου ορόφου (πίνακας 4.9). Συγκεκριμένα, η μέση σχετική υγρασία είναι μεγαλύτερη στην αίθουσα Γ3 (50,5%), με μικρή διαφορά όμως από την αντίστοιχη στην Β3 (50,3%) κάτω από την κεντρική συμβατική στέγη και στην Β1 (44,8%) κάτω από την ανατολική στέγη. Είναι εξίσου σημαντικό όμως να σημειωθεί ότι από το σχήμα 4.9, φαίνεται ότι η εσωτερική σχετική υγρασία εντός όλων των αιθουσών βρίσκεται δεν παραβιάζει σημαντικά το οριακού εύρος (30-60%) για τη συντριπτική πλειοψηφία των μετρήσεων εκτός κάποιων ελαχίστων ακραίων τιμών. Συνεπώς, σε αυτή τη περίπτωση η πράσινη στέγη αύξησε μεν τα επίπεδα υγρασίας, σε φυσιολογικά όμως επίπεδα ανεκτικότητας.

Πίνακας 4.9: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας Ιουνίου σε όλα τα πειραματικά σημεία

Σχετική Υγρασία (%)	Κεντρική 1 ^{ου} (B3)	Κεντρική Ισογείου (A3)	Ανατολική 1 ^{ου} (B1)	Ανατολική Ισογείου (E3)	Πράσινη 1 ^{ου} (Γ3)	Πράσινη Ισογείου (B2)	Ανατολική Ταράτσα	Πράσινη Ταράτσα
Μέσος όρος	50,3	28,3	44,8	29,5	50,5	26,9	54,4	50,5
Τυπική απόκλιση	3,1	1,3	2,6	1,7	3,4	1,2	17,0	3,4
Ελάχιστο	41,9	25,0	38,2	25,6	41	24,0	26,0	41,0
Μέγιστο	59,2	31,9	53,5	33,8	60,4	29,9	100,0	60,4
Τεταρτημόρια								
25	48,4	27,4	43	28,3	48,3	26,0	42,4	48,3
50	50,9	28,1	44,5	29,0	50,7	26,8	51,7	50,7
75	52,7	28,9	46,4	30,3	52,8	27,6	61,8	52,8



Σχήμα 4.9: Επίπεδα θερμοκρασίας Ιανουαρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία

4.1.3. Ποσοστά εκτός ορίων και ημέρες ενδιαφέροντος

Ιδιαίτερης σημασίας είναι η εξέταση των θερμικών συνθηκών που επικρατούσαν εντός των τάξεων με τη παρουσία μαθητών. Για το λόγο αυτό υπολογίζεται το ποσοστό των μετρήσεων που βρέθηκε εκτός των ορίων των συνιστώμενων οριακών τιμών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας σε όλες τις αίθουσες. Ο πίνακας 4.10 δείχνει ότι σε όλες τις αίθουσες, το 71,81% επί του συνόλου των μετρήσεων εσωτερικής θερμοκρασίας, υπολογίστηκε εκτός θερμοθετημένων ορίων. Αυτό το αποτέλεσμα, αν και θεωρείται γενικό, τονίζει τα προβλήματα θερμικής συμπεριφοράς αυτού του κτιρίου.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα εντοπίζεται στις αίθουσες 1ου ορόφου οι οποίες έρχονται σε άμεση επαφή με τις οροφές. Η Γ3 λόγω της πράσινης οροφής και άρα πιο ενισχυμένης μόνωσης κατέχει το χαμηλότερο ποσοστό (67,55%) μετρήσεων εκτός ορίων συγκριτικά με τη Β3 (75,46%) και τη Β1 (81,24%). Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 4.1.1 η πράσινη στέγη βελτιώνει τις θερμικές συνθήκες στην αίθουσα επιρροής της, σε καμία περίπτωση όμως το ποσοστό που εμφάνισε δεν μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικό. Οι αίθουσες του ισόγειου παρουσιάζουν χαμηλότερα ποσοστά εκτός ορίων λόγω ενισχυμένης μόνωσης από τον 1ο όροφο όμως και πάλι τα ποσοστά αυτά είναι σημαντικά. Οι μήνες κατά τους οποίους εμφανίζονται τα μεγαλύτερα ποσοστά εκτός ορίων στις αίθουσες είναι ο Ιανουάριος (88,41%) και ο Ιούνιος (94,29%). Είναι χαρακτηριστικό μάλιστα ότι κατά το διάστημα αυτών των δύο μηνών, στην αίθουσα Β3 δεν βρέθηκε καμία τιμή εντός του συνιστώμενου εύρους θερμοκρασιών. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει τη μη επαρκή μόνωση στην ανατολική συμβατική οροφή που οδηγεί σε συνθήκες θερμοκρασίας μη ανεκτές για τους μαθητές που βρίσκονται στην αίθουσα επιρροής της.

Αντιθέτως, σε ότι αφορά τα εσωτερικά επίπεδα σχετικής υγρασίας εντός των τάξεων, τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. Το ποσοστό των μετρήσεων που βρέθηκαν εκτός οριακού εύρους για όλο το κτίριο είναι ίσο με 12,38%. Ωστόσο, και πάλι η αίθουσα Β1 εμφανίζει συνολικά τα μεγαλύτερα ποσοστά εκτός ορίων (27,95%) και ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του Φεβρουαρίου (73,36%). Ο πίνακας 4.11 συνοψίζει τα αποτελέσματα σχετικής υγρασίας.

Βάσει των ανωτέρω κρίνεται σκόπιμη η διερεύνηση της ημερήσιας διακύμανσης της εσωτερικής θερμοκρασίας στην αίθουσα Β1, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του Ιανουαρίου και του Ιουνίου που όπως αναφέρθηκε, όλες οι εσωτερικές μετρήσεις βρέθηκαν να παραβιάζουν τα όρια. Στο σχήμα 4.10 φαίνεται η τυπική συμπεριφορά της θερμοκρασίας στη Β1, τη Γ3 και τις αντίστοιχες οροφές κατά τη διάρκεια μιας ημέρας του Ιανουαρίου (16/1) με την παρουσία μαθητών. Τα παράθυρα παραμένουν κλειστά καθ'όλη την ημέρα και όπως είναι εμφανές με την έναρξη των μαθημάτων (8:30), οι εσωτερικές θερμοκρασίες αυξάνονται έως και 4 °C λόγω της λειτουργίας του κεντρικού συστήματος θέρμανσης έως το σχολάσμα (13:30). Παρ'όλα αυτά η βασική διαφορά μεταξύ των δύο αιθουσών είναι ότι ενώ η Γ3 λόγω της μόνωσης από τη πράσινη οροφή διατηρεί τη θερμοκρασία σε ανεκτά επίπεδα, στη Β1 η αντίστοιχη θερμοκρασία δεν κατορθώνει να φτάσει το οριακό εύρος ακόμα και κατά τη διάρκεια του μαθήματος.

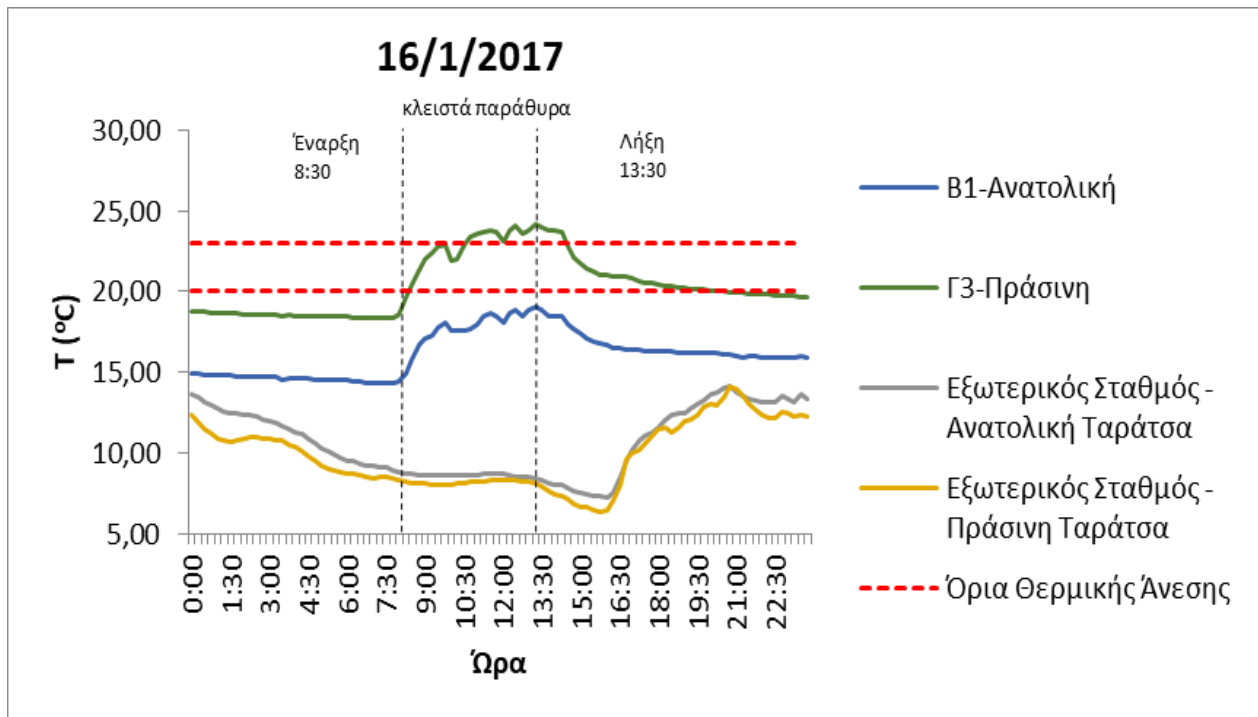
Αντιστοίχως, το γράφημα 4.11 παρουσιάζει τη τυπική διακύμανση της θερμοκρασίας, στα ίδια σημεία ενδιαφέροντος, για μια ημέρα του Ιουνίου (5/6). Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι η θερμοκρασία και στις δύο αίθουσες βρίσκεται συνεχώς πάνω από το οριακό εύρος, σε υψηλότερα επίπεδα όμως στη Β1. Τα παράθυρα ανοίγουν με την έναρξη των μαθημάτων στις 8:30 και κλείνουν με την αποχώρηση του συνεργείου καθαρισμού στις 16:00 χωρίς να μεταβάλουν ιδιαίτερα τα επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας. Τις απογευματινές ώρες όμως, παρατηρείται μια μικρή αύξηση στην εσωτερική θερμοκρασία των τάξεων (εντονότερη στη Β1) λόγω του συνδυασμού μικρής θερμοπερατότητας (αργής μετάβασης της θερμότητας διάμεσο του υλικού) και μεγάλης θερμοχωρητικότητας (αποθήκευσης θερμότητας) του σκυροδέματος. Αυτό δεν ισχύει μόνο για τις οροφές αλλά και για τους τοίχους του κτιρίου. Η θερμότητα που έχει απορροφηθεί από την ηλιακή ακτινοβολία το μεσημέρι διαχέεται στα δομικά υλικά το απόγευμα, ανεβάζοντας τη θερμοκρασία, γεγονός που αποτελεί ένα επιπρόσθετο στοιχείο μη επαρκούς θερμομόνωσης του κτιρίου. Το φαινόμενο αυτό δεν είναι τόσο έντονο για την αίθουσα κάτω από τη πράσινη οροφή λόγω μικρότερης θερμοχωρητικότητας.

Πίνακας 4.10: Ποσοστά μετρήσεων θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα εκτός των θερμοθετημένων ορίων για όλες τις αίθουσες

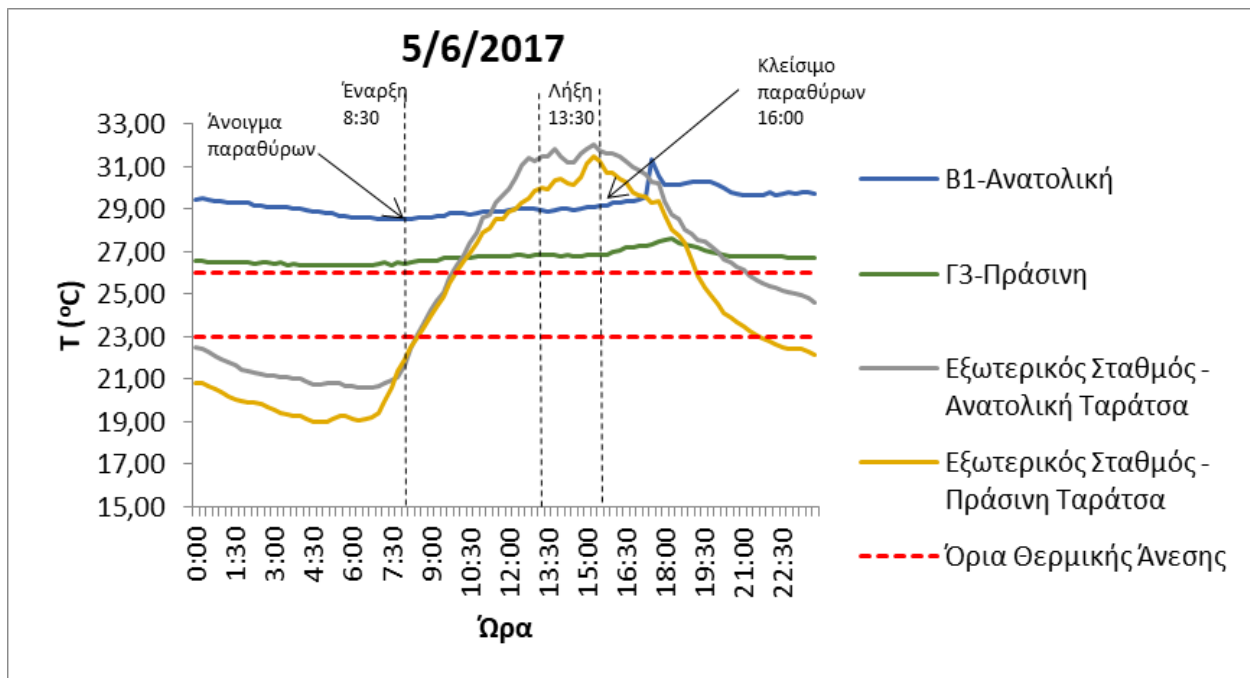
Εσωτερική θερμοκρασία								
%	Κεντρική Οροφή		Πράσινη Οροφή		Ανατολική Οροφή		Μηνιαίο Σύνολο	Όρια (°C)
	B3 - 1ος όροφος	A3 - Ισόγειο	Γ3 - 1ος όροφος	B2 - Ισόγειο	B1 - 1ος όροφος	E3 - Ισόγειο		
Οκτώβριος	74,25	85,10	71,07	63,57	49,23	62,18	67,57	20-23
Νοέμβριος	56,88	50,17	40,96	41,83	70,48	54,55	52,48	
Δεκέμβριος	91,11	82,72	77,66	82,38	99,33	88,38	86,93	
Γενάρης	92,22	85,11	79,78	83,32	100,00	90,03	88,41	
Φλεβάρης	80,82	62,20	76,53	78,10	99,37	85,60	80,44	
Μάρτιος	51,57	16,83	47,08	52,82	62,53	61,89	48,79	
Απρίλιος	50,49	89,67	85,59	98,30	76,37	74,88	79,22	23-26
Μάιος	81,80	26,79	33,97	9,64	73,81	62,96	48,16	
Ιούνιος	100,00	97,17	95,30	74,50	100,00	98,75	94,29	
Σύνολο Αίθουσας	75,46	66,20	67,55	64,94	81,24	75,47	71,81	

Πίνακας 4.11: Ποσοστά μετρήσεων σχετικής υγρασίας εκτός των θερμοθετημένων ορίων για όλες τις αίθουσες

Εσωτερική σχετική υγρασία								
%	Κεντρική Οροφή		Πράσινη Οροφή		Ανατολική Οροφή		Μηνιαίο Σύνολο	Όρια (%)
	B3 - 1ος όροφος	A3 - Ισόγειο	Γ3 - 1ος όροφος	B2 - Ισόγειο	B1 - 1ος όροφος	E3 - Ισόγειο		
Οκτώβριος	1,70	0,92	1,70	11,41	7,35	4,11	4,53	30-60
Νοέμβριος	48,16	16,90	23,57	13,84	59,14	29,62	31,87	
Δεκέμβρης	4,21	2,76	0,64	22,14	27,59	25,64	13,83	
Γενάρης	21,29	0,74	0,24	5,83	49,12	20,18	16,23	
Φλεβάρης	45,71	3,06	3,47	10,67	73,36	20,26	26,09	
Μάρτιος	38,41	0,00	1,82	9,34	34,94	9,81	15,72	
Απρίλιος	0,00	1,60	0,10	3,58	0,00	0,00	0,88	
Μάιος	0,00	0,27	0,37	5,29	0,00	0,24	1,03	
Ιούνιος	0,00	5,54	0,18	1,54	0,00	0,00	1,21	
Σύνολο Αίθουσας	17,72	3,53	3,57	9,29	27,95	12,21	12,38	



Σχήμα 4.10: Ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας σε B1, Γ3 και οροφές στις 16/1/2017



Σχήμα 4. 11: Ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας σε Β1, Γ3 και οροφές στις 5/6/2017

4.2 Επίπεδα αερισμού και συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα

4.2.1 Αποτελέσματα ολόκληρης της πειραματικής περιόδου

Στην ενότητα αυτή θα πραγματοποιηθεί μια γενική ανάλυση των δεδομένων των συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) αρχικά κατά την πρώτη περίοδο μετρήσεων χωρίς την παρουσία των μαθητών (Ιούνιος-Ιούλιος 2016) και στην συνέχεια κατά τη διεξαγωγή μαθημάτων για τους μήνες Οκτώβριο 2016 - Ιούνιο 2017, για σχεδόν ολόκληρη τη σχολική χρονιά. Εν συνεχεία, τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο επαρκούς ή μη αερισμού της εκάστοτε αίθουσας.

Κατά την θερινή περίοδο μέτρησης του 2016 (χωρίς τους μαθητές) οι εσωτερικές συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα κυμάνθηκαν σε χαμηλά επίπεδα με μέσες τιμές από 430 ppm στην αίθουσα Β1 κάτω από την ανατολική οροφή σκυροδέματος μέχρι και 460ppm στη τάξη ισογείου Α3 όπως φαίνεται στον πίνακα 4.12. Τα αποτελέσματα αυτά είναι απολύτως λογικά καθώς όλες οι αίθουσες ήταν άδειες μέσα στην ημέρα λόγω της διακοπής των μαθημάτων για καλοκαίρι. Σε αυτό οφείλονται και οι πολύ χαμηλές παρατηρήσεις τυπικών αποκλίσεων καθώς κυμαίνονται από 19-33 ppm καταδεικνύοντας πολύ σταθερά μικροπεριβάλλοντα από άποψη έκθεσης σε συγκεντρώσεις CO₂. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται και οι πολύ χαμηλές μέγιστες τιμές συγκεντρώσεων, με την μεγαλύτερη παρατήρηση να μην ξεπερνάει τα 589 ppm. Όσο για τις ελάχιστες τιμές, αυτές κυμάνθηκαν κοντά στην ελάχιστη οριακή τιμή (baseline) των 400ppm που απαντάται το διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Πίνακας 4.12: Στατιστικά στοιχεία διοξειδίου του άνθρακα κατά την πρώτη πειραματική περίοδο

Ιούνιος-Ιούλιος 2016 (απουσία μαθητών) CO ₂ (ppm)		B2	A3	E3	Γ3	B3	B1
Μέσος όρος		437	460	437	436	433	430
Τυπική απόκλιση		19	33	21	22	22	20
Ελάχιστο		408	409	408	409	407	407
Μέγιστο		552	550	522	551	517	589
Τεταρτημόρια	25	424	423	421	421	418	416
	50	432	469	432	429	424	422
	75	443	492	448	444	446	441

Εξαίρεση στη συμπεριφορά των συγκεντρώσεων CO₂ που παρατηρήθηκε παραπάνω αποτελεί η εμφάνιση αρκετών ακραίων τιμών με στιγμιαία μέγιστα σχεδόν εντός όλων των αιθουσών. Οι τιμές αυτές οφείλονται κυρίως στην παρουσία του συνεργείου καθαρισμού και συντήρησης του σχολικού συγκροτήματος καθ' όλο το διάστημα των μετρήσεων ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

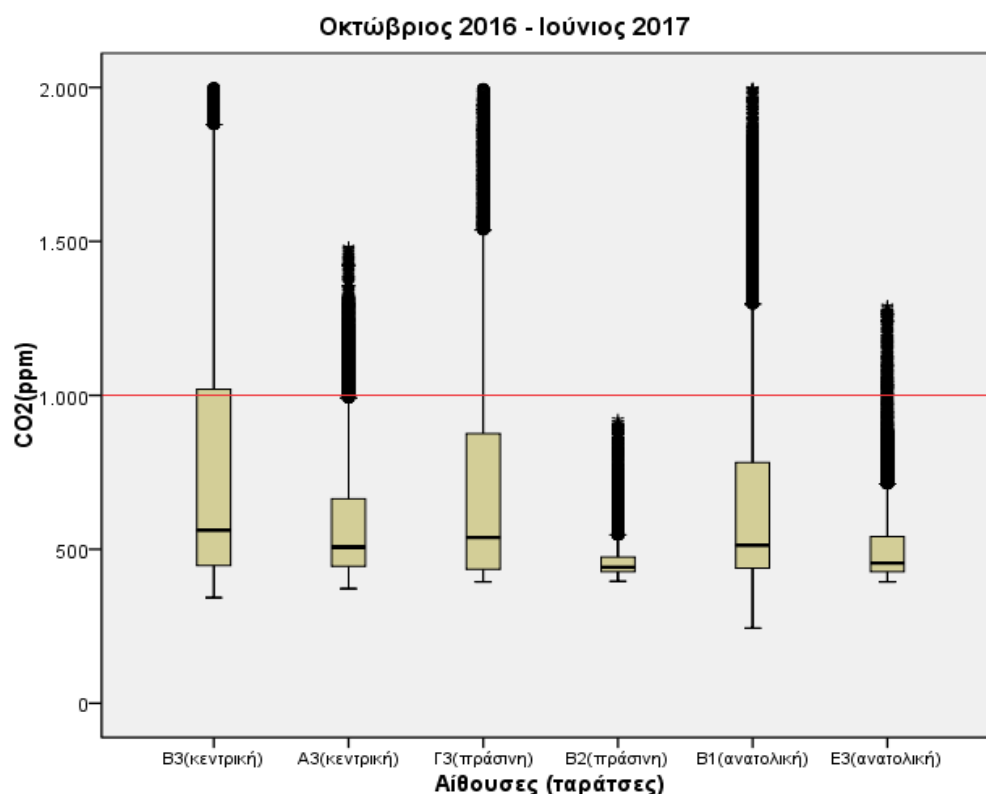
Για το διάστημα που αφορά την παρουσία των μαθητών στο σχολείο (Οκτώβριος 2016 - Ιούνιος 2017), παρατηρήθηκαν οι αναμενόμενες διακυμάνσεις, με βάσει τις γνώσεις μας για τη συμπεριφορά του διοξειδίου του άνθρακα. Για παράδειγμα, όταν εισέρχονταν οι μαθητές μέσα στην αίθουσα, καταγράφεται αύξηση στις συγκεντρώσεις. Αντίθετα, στα διαλείμματα ή το σχολασμα, παρατηρείται πτώση στις τιμές, άλλοτε σταδιακή που υποδεικνυε το μόνιμο αερισμό που υφίστανται οι τάξεις ακόμα και με κλειστά παράθυρα και άλλοτε πιο απότομη, γεγονός που υποδήλωνε το άνοιγμα παραθύρων (ή/και πορτών) για περισσότερο αερισμό.

Στη συνέχεια, αναλύοντας τα συγκεντρωτικά δεδομένα, όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.12, είναι φανερό, πως η λιγότερο επιβαρυμένη τάξη είναι η Β2. Οι συγκεντρώσεις σε αυτή την αίθουσα δεν ξεπερνούν ούτε το προτεινόμενο όριο των 1000 ppm. Ο πίνακας 4.13 δείχνει ότι σε αυτή την αίθουσα εμφανίζεται η μικρότερη μέση τιμή στα 473 ppm και διασπορά 77 ppm. Φαίνεται, δηλαδή, να είναι ένα μικροπεριβάλλον που εμφανίζει τα μεγαλύτερα επίπεδα φυσικού αερισμού με συνέπεια το μοτίβο των συγκεντρώσεων CO₂ να μην παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις. Κατόπιν ακολουθεί η Ε3 με μέση τιμή 526 ppm και διασπορά 153 ppm και τέλος η Α3 με μέση τιμή 585 ppm και διασπορά 200 ppm. Για την Ε3 παρατηρείται, πως σχεδόν οι μισές ακραίες τιμές ξεπερνούν το όριο των 1000 ppm ενώ στην Α3 το ξεπερνούν όλες. Ωστόσο αυτό δεν καθιστά τις τάξεις επιβαρυμένες, καθώς περισσότερο από το 75% των μετρήσεων είναι κάτω από το όριο. Κατά συνέπεια, οι τάξεις ισογείου διατηρούν καλές συνθήκες ως προς το διοξείδιο του άνθρακα. Τονίζεται ότι στον ίδιο πίνακα οποιαδήποτε τιμή είναι κατώτερη της ελάχιστης οριακής τιμής CO₂ στην ατμόσφαιρα (400 ppm) εμπίπτει στα όρια ακρίβειας των οργάνων.

Στον αντίποδα, ο πρώτος όροφος εμφανίζεται πιο επιβαρυμένος. Οι συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα σε αυτές τις τάξεις παρουσιάζουν αρκετά συχνά ακρότατα, με υψηλές διασπορές και σαφώς μεγαλύτερες μέσες τιμές συγκριτικά με το ισόγειο. Η πιο επιβαρυμένη αίθουσα βρέθηκε η Β3 με μέση τιμή 816 ppm και τυπική απόκλιση 457 ppm. Οι άλλες δύο αίθουσες του 1^{ου} ορόφου όπως έχει προαναφερθεί είναι η Γ3 (κάτω από την πράσινη ταράτσα) που παρουσιάζει μέση τιμή 746 ppm και διασπορά 393 ppm και τέλος η Β1 με μέση τιμή 717 ppm και τυπική απόκλιση 383 ppm. Στο **Παράρτημα Δ1** παρουσιάζονται όλα τα διαγράμματα από την αρχή του πειράματος και μπορεί ο αναγνώστης να διαπιστώσει πως υπάρχουν αρκετά υψηλές τιμές στις αίθουσες που περιγράφηκαν μόλις, αλλά επίσης μπορεί να δει και την ομαλή συμπεριφορά του CO₂ των υπόλοιπων τάξεων (Β2, Ε3, Α3) συγκεντρωτικά. Σε όλες τις προαναφερθείσες αίθουσες 1^{ου} ορόφου οι μέγιστες τιμές συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα βρέθηκαν να παραβιάζουν το επιτρεπτό όριο των 1000ppm. Είναι αξιοπρόσεκτο ότι στην αίθουσα Β3 το σύνολο των μετρήσεων, δεν παρουσιάζει ακραίες τιμές κάτι που σημαίνει πως οι αυξημένες συγκεντρώσεις που αγγίζουν ακόμα και τα 2000 ppm είναι ένα συχνό φαινόμενο στον χώρο αυτό. Για το λόγο αυτό η τάξη χρήζει περισσότερης παρακολούθησης για να διαπιστωθεί το γιατί καταγράφονται τέτοιες τιμές. Οι πιθανότερες εξηγήσεις θα δοθούν εξετάζοντας το εμβαδό της αίθουσας, των αριθμό των μαθητών εντός αυτής όπως και τον αρχιτεκτονικό της σχεδιασμό εντός του κτιριακού συγκροτήματος.

Πίνακας 4.13: Στατιστικά στοιχεία διοξειδίου του άνθρακα κατά τη δεύτερη πειραματική περίοδο

Οκτώβριος 2016 - Ιούνιος 2017 (εν τη παρουσία μαθητών) CO ₂ (ppm)		B3	A3	Γ3	B2	B1	E3
Μέσος όρος		816	585	746	473	717	526
Τυπική απόκλιση		457	200	393	77	383	153
Ελάχιστο		384	372	394	396	360	394
Μέγιστο		1999	1481	1996	922	1997	1291
Τεταρτημόρια	25	454	440	440	427	442	427
	50	604	509	579	444	549	464
	75	1078	670	927	482	840	560



Σχήμα 4.12: Συγκεντρώσεις διοξειδίου άνθρακα όλων των τάξεων κατά τη περίοδο .

Ένας λόγος για το γεγονός ότι οι τάξεις παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις στις συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα, οφείλεται στις διαφορετικές αναλογίες εμβαδού τάξεων και ατόμων μέσα στις τάξεις. Ο πίνακας 4.14 παραθέτει τα απαραίτητα στοιχεία για την εκάστοτε αίθουσα.

Πίνακας 4.14: Αναλογία μαθητή ανά m^2 σε όλους τους υπό εξέταση χώρους

1^{ος} Όροφος		
Αίθουσα: Γ3 Εμβαδόν: 70 m^2 Αριθμός ατόμων: 24 Δείκτης μαθητή/ m^2 : 0,34	Αίθουσα: Β3 Εμβαδόν: 50 m^2 Αριθμός ατόμων: 25 Δείκτης μαθητή/ m^2 : 0,50	Αίθουσα: Β1 Εμβαδόν: 56 m^2 Αριθμός ατόμων: 26 Δείκτης μαθητή/ m^2 : 0,46
Ισόγειο		
Αίθουσα: Β2 Εμβαδόν: 45 m^2 Αριθμός ατόμων: 22 Δείκτης μαθητή/ m^2 : 0,49	Αίθουσα: Α3 Εμβαδόν: 56 m^2 Αριθμός ατόμων: 25 Δείκτης μαθητή/ m^2 : 0,45	Αίθουσα: Ε3 Εμβαδόν: 55 m^2 Αριθμός ατόμων: 24 Δείκτης μαθητή/ m^2 : 0,43

Σύμφωνα με τους δείκτες του παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι οι μικρότερες τάξεις με περισσότερα άτομα δημιουργούν μεγαλύτερη συσσώρευση διοξειδίου του άνθρακα στο χώρο, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της Β3. Πρέπει να τονιστεί όμως, ότι σημαντικό ρόλο στα εσωτερικά επίπεδα συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα, εκτός των δεικτών μαθητή/ m^2 , παίζει και ο επαρκής αερισμός της κάθε αίθουσας κυρίως μέσω ανοιχτών παραθύρων. Οπότε οι συνήθειες των μαθητών-δασκάλων ή καλύτερα η ορθή χρήση του φυσικού αερισμού εντός της εκάστοτε τάξης μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα. Στην περίπτωση, όμως της Β3 συντελεί ένας επιπλέον παράγοντας στις τόσο υψηλές παρατηρήσεις (χωρίς ακρότατα). Με βάση τα δεδομένα από το σημειωματάριο (logbook), παρατηρήθηκε πως μόνο όταν άνοιγαν τα παράθυρα, η τάξη είχε επαρκή αερισμό. Όλες οι υπόλοιπες αίθουσες, ακόμα και με κλειστές όλες τις πιθανές διόδους διαφυγής αέρα, έχουν έστω και μικρές διαρροές. Στην προκειμένη περίπτωση όμως, με ανοιχτή μόνο την πόρτα, δεν μπορούσε να επιτευχθεί επαρκής αερισμός και ο λόγος που συνέβη αυτό, είναι η αρχιτεκτονική της τάξης. Η πόρτα της, βρίσκεται μέσα σε εσοχή τοίχου, όποτε δεν είναι εύκολη η ανταλλαγή αέρα στο σημείο αυτό. Συνεπώς, τους κρύους μήνες όπου δεν άνοιγαν τα παράθυρα, επικρατούσε το φαινόμενο των υψηλών συγκεντρώσεων καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας. Αυτό, δίνει εξήγηση και στο φαινόμενο της μη ύπαρξης στιγμιαίων μεγίστων (ακραίων τιμών) όπως και σε υψηλές σχετικά τιμές τις βραδινές ώρες.

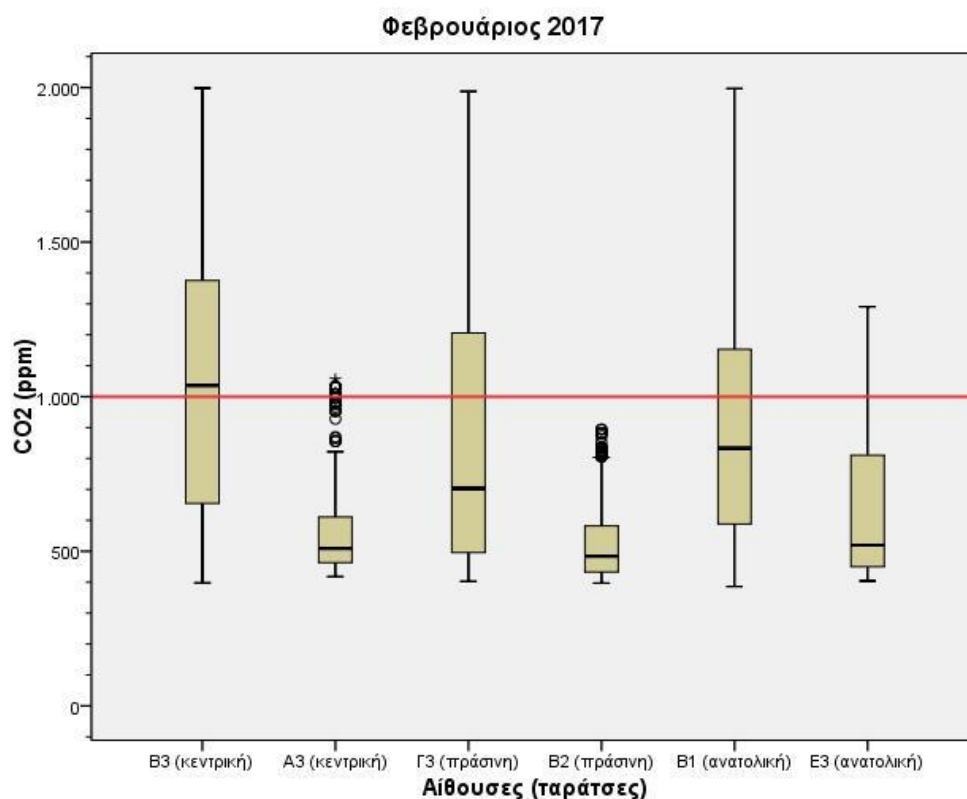
Αντίθετα η Γ3, που είναι από τις αίθουσες που παρουσιάζουν υψηλές τιμές διοξειδίου του άνθρακα, δεν συμβαδίζει με την παραπάνω λογική, καθώς είναι η μεγαλύτερη αίθουσα σε μέγεθος και με άτομα όχι περισσότερα από τις υπόλοιπες. Άρα αναλογικά θα έπρεπε να είναι από τις αίθουσες με χαμηλές συγκεντρώσεις. Δεν ανήκει, όμως στην κατηγορία αυτή και ένας λόγος για αυτό το φαινόμενο ενδέχεται να είναι ο μη επαρκής αερισμός της αίθουσας. Στον αντίποδα, μια τάξη με μεγάλο αριθμό μαθητών/ m^2 όπως παρουσιάζεται να είναι η Β2, εμφανίζει μειωμένες συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα λόγω επαρκούς αερισμού. Όπως ήδη αποδείχθηκε, ο μη επαρκής αερισμός και η δυσαναλογία εμβαδού αιθουσών και αριθμού μαθητών, συνεισφέρουν το μεγαλύτερο ποσοστό στη διαμόρφωση της συγκέντρωσης στις τάξεις και ο συνδυασμός τους προκαλεί μια επιβαρυσμένη ατμόσφαιρα, όπως στην αίθουσα Β3. Βεβαίως και η έντονη δραστηριότητα των ατόμων μέσα στις αίθουσες συμβάλει στις όποιες αυξήσεις των τιμών. Είναι εξίσου σημαντικό να αναφερθεί ότι η

πράσινη οροφή δεν αποτελεί παράγοντα επιρροής στις συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα στις αντίστοιχες τάξεις καθώς δεν παρουσιάζεται κάποια συνάφεια στα αποτελέσματα όπως έγινε στην περίπτωση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας. Συμπερασματικά, τα επίπεδα συγκέντρωσης του CO₂ στις αίθουσες εξαρτώνται κυρίως από τον αερισμό και τη παρουσία/δραστηριότητες των μαθητών. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγει και η έρευνα των Mentese et al., 2009, οι οποίοι ύστερα από μετρήσεις σε σχολικά κτίρια της Τουρκίας διαπίστωσαν τον κυρίαρχο ρόλο της παρουσίας των μαθητών και της συχνότητας αερισμού των αιθουσών στις εσωτερικές συγκεντρώσεις CO₂.

4.2.2 Αποτελέσματα ανά μήνα

Η γενική εικόνα των συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα δείχνει αρχικά, πως το ετήσιο μοτίβο που δημιουργήθηκε με το διαχωρισμό επιβαρυσμένων και μη αιθουσών, ισογείου και 1^{ου} ορόφου αντίστοιχα, συνεχίζει να ισχύει και σε μηνιαία βάση, κάτι που φανερώνει τη σταθερότητα του συγκεκριμένου αέριου ρύπου εντός των αιθουσών με το πέρασμα του χρόνου. Επίσης, παρατηρείται και η εποχικότητα που προαναφέρθηκε, με εξαίρεση δύο μηνών. Οι ψυχροί μήνες: Νοέμβρης, Δεκέμβρης, Γενάρης, Φλεβάρης παρουσιάζονται ως οι πιο επιβαρυσμένοι για την υγεία των μαθητών και κυρίως αυτών που βρίσκονται στον 1^ο όροφο, πιθανώς λόγω ανεπαρκούς αερισμού και μεγάλης ανθρώπινης παρουσίας, ενώ αντιθέτως οι μήνες Απρίλης και Μάης, με την έναρξη πιο καλών καιρικών συνθηκών, καταδεικνύουν μία πιο ήπια συμπεριφορά. Πιο πιθανή αιτία για το φαινόμενο αυτό είναι το άνοιγμα των παραθύρων, με συνέπεια τον πολύ καλύτερο αερισμό της εκάστοτε τάξης.

Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο μήνας Φεβρουάριος. Στο σχήμα 4.13 παρατίθενται τα αποτελέσματα συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα για όλες τις αίθουσες του κτιρίου. Οι μέγιστες τιμές στον 1^ο όροφο (B3,Γ3,B1) είναι από τις μεγαλύτερες που έχουν καταγραφεί σε όλη τη πειραματική περίοδο. Επίσης, παρατηρείται η ύπαρξη πολύ λίγων ακραίων τιμών, κάτι που υποδηλώνει μια γενική σταθερότητα της κάθε τάξης να παρουσιάζει τις συγκεντρώσεις αυτές. Ακόμα και τα λίγα ακρότατα που παρατηρούνται, βρίσκονται στις αίθουσες A3 και B2, αίθουσες οι οποίες είναι πρακτικά μη επιβαρυσμένες, γιατί μόνο η πρώτη ξεπερνά το θεσμοθετημένο όριο των 1000ppm για ελάχιστες παρατηρήσεις.



Σχήμα 4.13: Συγκεντρωτικές μετρήσεις διοξειδίου του άνθρακα για τον Φεβρουάριο 2017

Οι μετρήσεις συγκεντρώσεων CO₂ παραβιάζουν σε ποσοστό άνω του 50% το επιτρεπτό όριο. Ο πίνακας 4.15 συνοψίζει τα στατιστικά δεδομένα για όλες τις αίθουσες κατά το μήνα Φεβρουάριο. Συγκεκριμένα, δείχνει ότι για την αίθουσα B3, ο μέσος όρος της (1043 ppm) ξεπερνάει το θεσμοθετημένο όριο ανεκτικότητας καθιστώντας τη την πιο επιβαρυσμένη τάξη. Επιπλέον, φαίνεται ότι η B1 εμφανίζει το πιο σταθερό και καθαρό περιβάλλον με μέση συγκέντρωση 517 ppm και διασπορά 107 ppm. Στο **Παράρτημα Δ2** παρατίθενται πληροφορίες για τους υπόλοιπους μήνες μέτρησης.

Πίνακας 4.15: Στατιστικά στοιχεία διοξειδίου του άνθρακα για όλες τις αίθουσες κατά τον Φεβρουάριο 2017

Φεβρουάριος 2017 CO ₂ (ppm)	Μέσος όρος	Διασπορά
B3	1043	439
A3	554	122
Γ3	890	473
B2	517	107
B1	934	425
E3	648	257

4.2.3 Συσχετίσεις και κατανομές συχνοτήτων

Στις προηγούμενες ενότητες έγινε προσπάθεια να αναλυθούν στο μέγιστο δυνατό βαθμό οι μετρήσεις διοξειδίου του άνθρακα που κατεγράφησαν από τα όργανα κατά τη σχολική χρονιά, με στόχο την ανάδειξη ουσιωδών αποτελεσμάτων. Φτάνοντας στο τέλος του κυρίου θέματος, δεν θα μπορούσε να μην γίνει και μια επιπλέον στατιστική ανάλυση που να αφορά το συσχετισμό των μεγεθών που μελετήθηκαν.

Σκοπός, λοιπόν, στην ενότητα αυτή είναι μια πιο ποιοτική προσέγγιση των δεδομένων. Η ανάλυση θα γίνει σε δύο ομάδες μεταβλητών. Με βάση την κάθε τάξη και κριτήριο κάθε φορά το CO₂ και με βάση τους χώρους ομαδοποιημένους (ισόγειο και 1^{ος} όροφος). Θα μελετηθούν όλοι οι χώροι, για όλες τις συγκεντρώσεις CO₂ που μετρήθηκαν στο πείραμα. Η αρχή θα γίνει εξετάζοντας όλες τις αίθουσες ως προς τις συγκεντρώσεις CO₂. Παρακάτω, στον πίνακα 4.16, παρατίθενται τα αποτελέσματα από τη συσχέτιση των αιθουσών για τις συγκεντρώσεις CO₂ καθ' όλη τη πειραματική περίοδο. Η θεωρία των συσχετίσεων, περιγράφεται με περισσότερες λεπτομέρειες στο **Παράρτημα Δ3**.

Ως πρώτη παρατήρηση, όλοι οι παράμετροι που εξετάστηκαν βρέθηκαν να έχουν στατιστική σημαντικότητα ($p < 0,01$) και επομένως μπορούν να μελετηθούν. Ο λόγος που έχουν χρωματιστεί με πράσινο τα κελιά που αναφέρονται στα ζευγάρια αιθουσών B3-B1 και Γ3-E3 είναι, γιατί παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συσχέτιση. Με συντελεστή Spearman σχετικά κοντά στη μονάδα μπορεί να πει κανείς, πως έχουμε μια αρκετά καλή και ισχυρή θετική συσχέτιση καταδεικνύοντας ότι οι αυξομειώσεις των συγκεντρώσεων στις αίθουσες αυτές γίνονται χρονικά με παρόμοιο τρόπο. Η συσχέτιση που παρατηρείται για την περίπτωση των αιθουσών Γ3 και E3 που είναι δύο μακρινές αίθουσες μπορεί να αιτιολογηθεί από το γεγονός ότι οι παράμετροι που εισέρχονται στην συγκεκριμένη περίπτωση και δίνουν το αποτέλεσμα αυτό είναι κατά σειρά προτεραιότητας ο τρόπος αερισμού των αιθουσών (συχνότητα ανοίγματος παραθύρων), ο αριθμός των ατόμων και τα εμβαδά τους. Αυτές οι τρεις παράμετροι συνδυασμένοι, μας δείχνουν πως οι διακυμάνσεις του CO₂ στις τάξεις B1-B3 και Γ3-E3, ανά ζευγάρια, είναι παραπλήσιες. Να τονισθεί εδώ, πως ειδικά για το δεύτερο ζευγάρι, που ως προς τις συγκεντρώσεις CO₂ είχαν εκ διαμέτρου αντίθετα αποτελέσματα, η συσχέτιση έχει να κάνει μόνο με τη συμπεριφορά του ρύπου στον εκάστοτε χώρο.

Υπάρχουν όμως και άλλοι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ διαφόρων τάξεων που κινούνται κοντά στα υψηλά νούμερα που σχολιάστηκαν και αυτές είναι: B3-Γ3, B3-E3, A3-Γ3, A3-E3, Γ3-B1 και B1-E3. Οι συντελεστές Spearman για τα ζευγάρια αυτά κυμαίνονται μεταξύ 0,629 και 0,704 επομένως και αυτά χαρακτηρίζονται ως ελαφρά ισχυρές θετικές συσχετίσεις, απλά σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με τις προηγούμενες δύο. Σχεδόν κάθε αίθουσα εμφανίζει κάποια σχετικά καλή συσχέτιση με την άλλη εκτός από τη B2. Το αποτέλεσμα είναι λογικό μιας και όπως τονίστηκε στις παραπάνω ενότητες ήταν η τάξη στην οποία παρουσιάστηκαν λίγα μέγιστα και το CO₂ είχε πιο σταθερή συμπεριφορά. Δεν πρέπει το αποτέλεσμα αυτό να παρερμηνευτεί και να βγει το συμπέρασμα, πως τα ζευγάρια αυτά καθιστούν τις αντίστοιχες αίθουσες απολύτως όμοιες. Αντίθετα, τονίζει κυρίως τις συνήθειες (ως προς τον αερισμό) που είχαν τα άτομα εντός των διάφορων χώρων.

Πίνακας 4.16: Συσχετίσεις διοξειδίου του άνθρακα μεταξύ όλων των αιθουσών για όλη τη πειραματική περίοδο

Συσχέτιση όλων των τάξεων για CO2

			B3	A3	Γ3	B2	B1	E3
Spearman's rho	B3	Correlation Coefficient	1,000	,583**	,704**	,403**	,746**	,674**
		Sig. (2-tailed)	.	,000	,000	,000	,000	,000
		N	20386	20386	20386	20386	20386	20386
	A3	Correlation Coefficient		1,000	,672**	,269**	,505**	,629**
		Sig. (2-tailed)		.	,000	,000	,000	,000
		N		20386	20386	20386	20386	20386
	Γ3	Correlation Coefficient			1,000	,418**	,696**	,776**
		Sig. (2-tailed)			.	,000	,000	,000
		N			20386	20386	20386	20386
	B2	Correlation Coefficient				1,000	,426**	,450**
		Sig. (2-tailed)				.	,000	,000
		N				20386	20386	20386
	B1	Correlation Coefficient					1,000	,650**
		Sig. (2-tailed)					.	,000
		N					20386	20386
	E3	Correlation Coefficient						1,000
		Sig. (2-tailed)						.
		N						20386

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Εν συνεχεία παρατίθεται ο πίνακας 4.17 που αφορά σε συσχέτιση συγκεντρώσεων CO₂ μεταξύ ορόφων για όλη τη πειραματική περίοδο. Το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο, έχοντας σχηματίσει την εικόνα από την προηγούμενη ανάλυση τάξη προς τάξη, πως δεν θα υπήρχε ιδιαίτερα ισχυρή συσχέτιση, όπως και φαίνεται από τον συντελεστή Spearman, ο οποίος βρέθηκε στο 0,571. Συμπερασματικά, η απόπειρα εξεύρεσης συσχετίσεων ανάμεσα στις τάξεις για το CO₂, εμφάνισε κάποια ενδιαφέροντα αποτελέσματα, αλλά σε γενικές γραμμές δεν αναδείχθηκε κάποια ουσιαστική συσχέτιση. Βρέθηκαν μόλις δύο ζευγάρια τάξεων με σχεδόν παρόμοια συμπεριφορά.

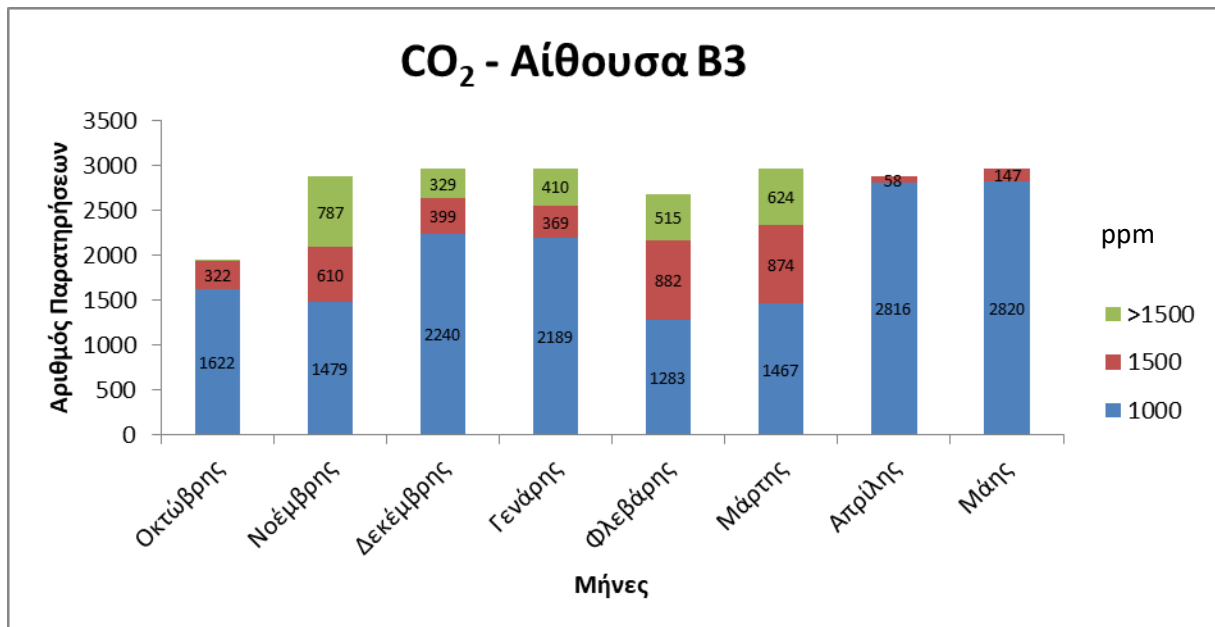
Πίνακας 4.17: Συγκεντρωτικός πίνακας συσχέτισης ορόφων ως προς CO₂

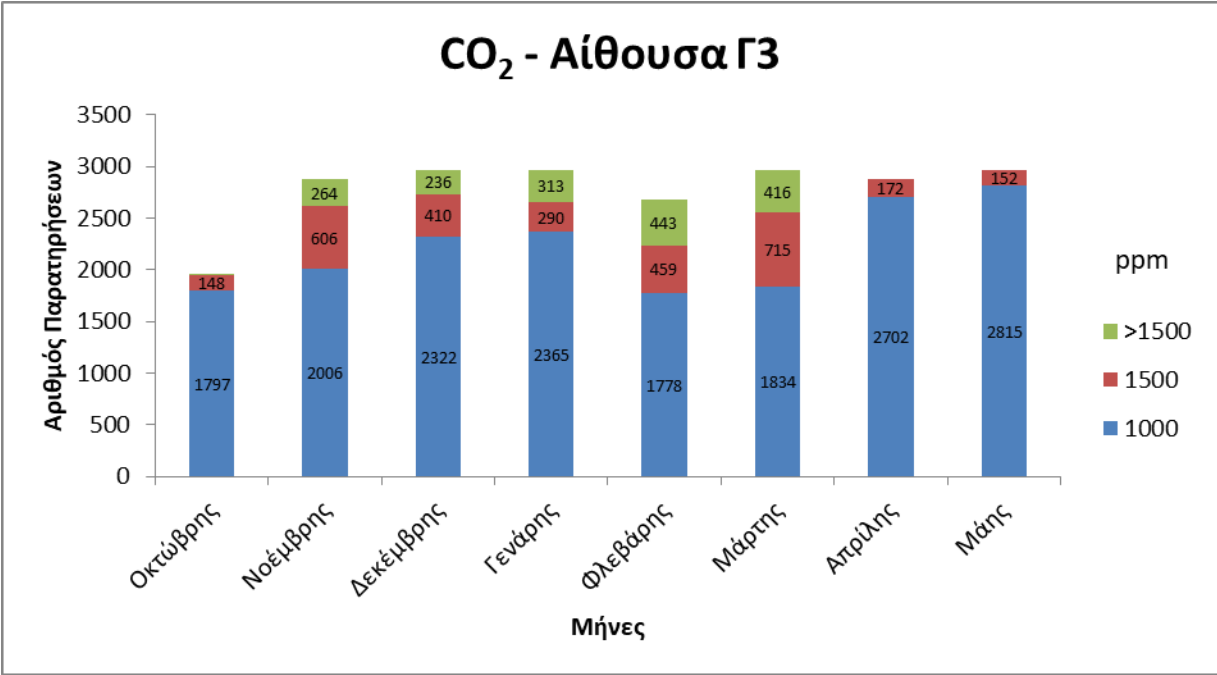
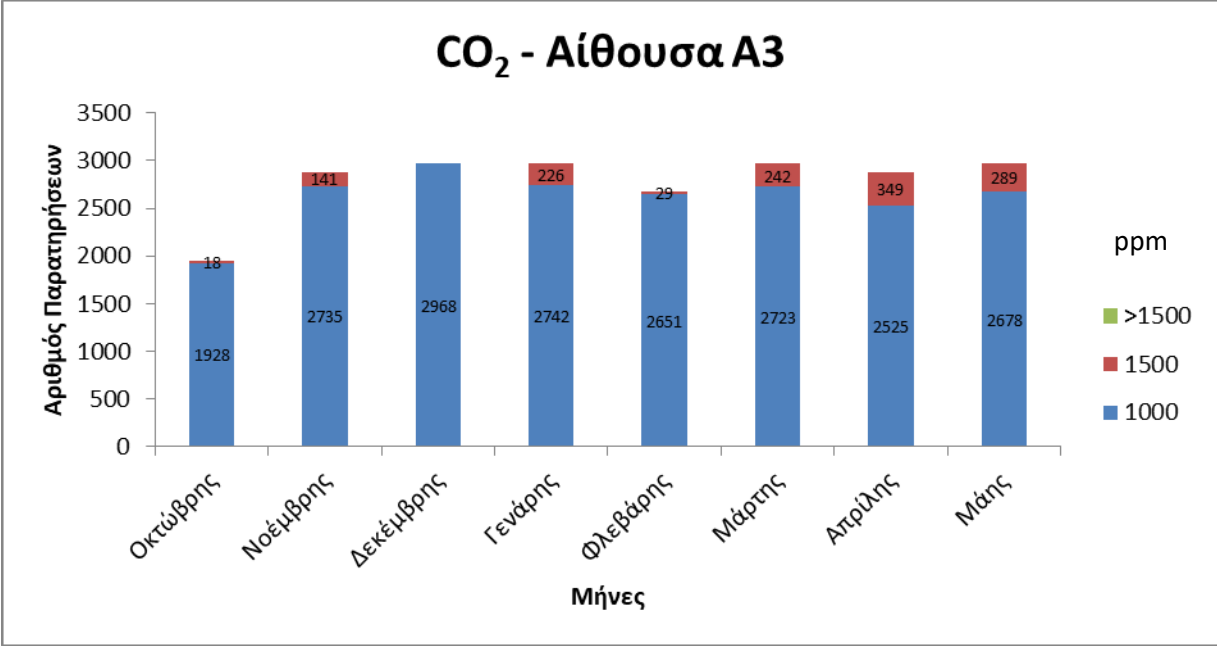
Οριζόντια συσχέτιση CO2 1ου ορόφου - Ισόγειο

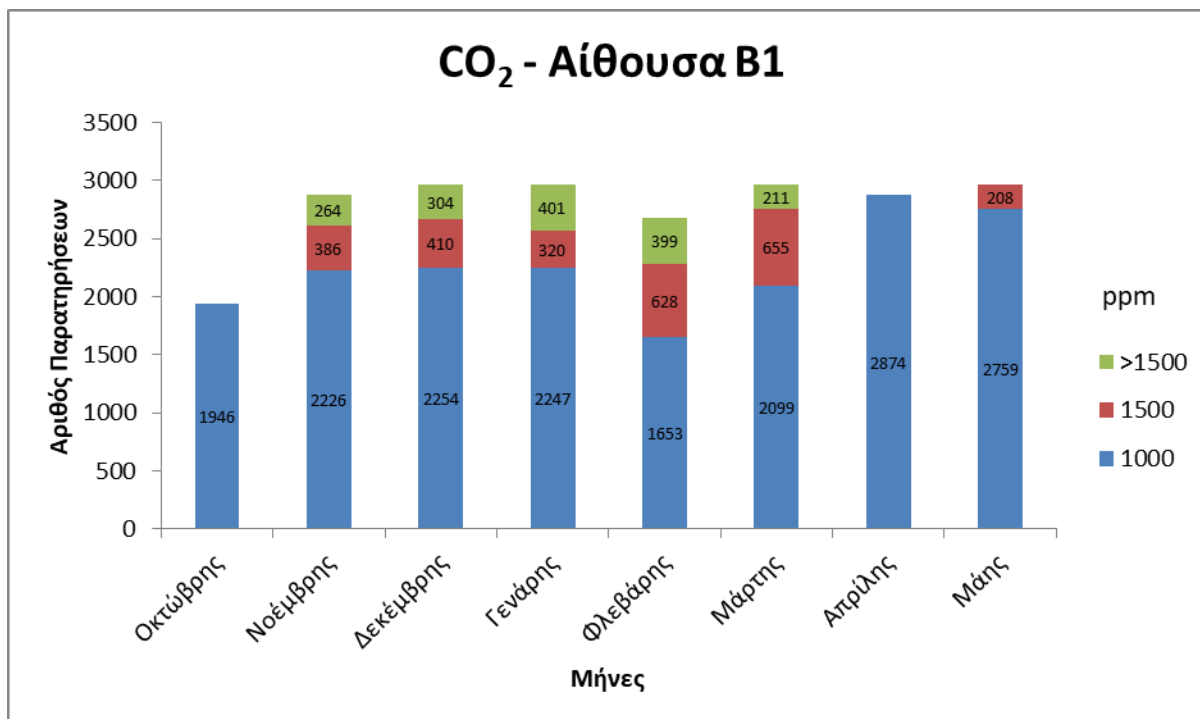
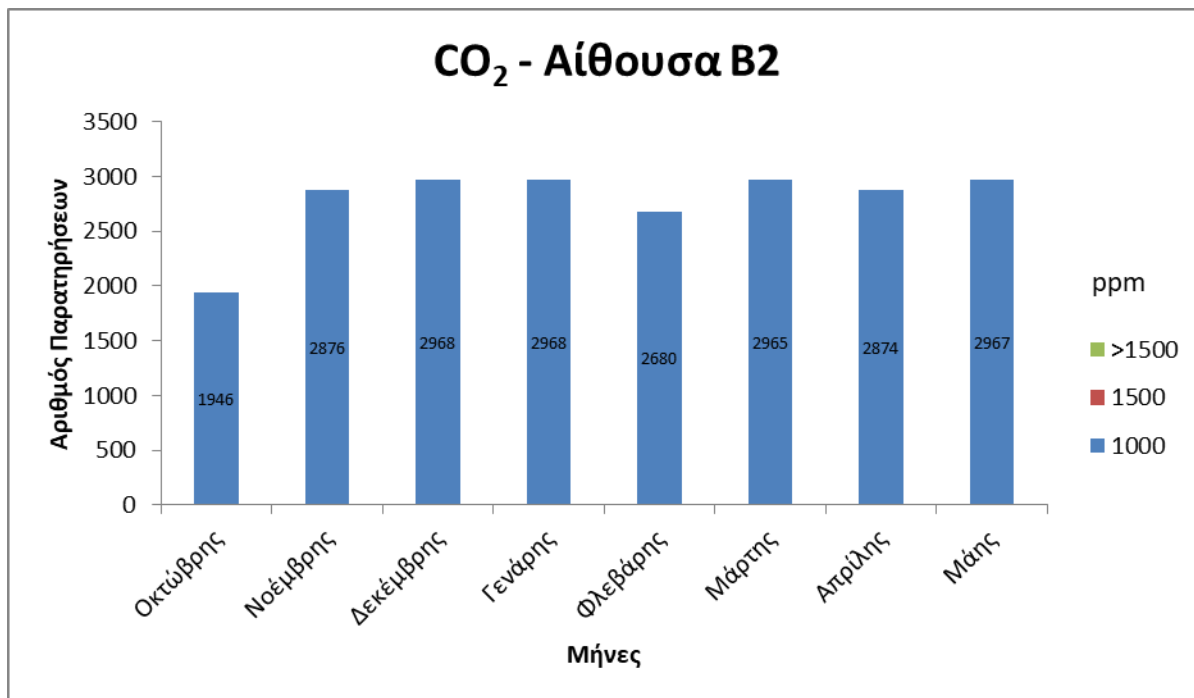
			1ος όροφος	Ισόγειο
Spearman's rho	1ος όροφος	Correlation Coefficient	1,000	,571**
		Sig. (2-tailed)	.	,000
		N	61158	61158
	Ισόγειο	Correlation Coefficient		1,000
		Sig. (2-tailed)		.
		N		61158

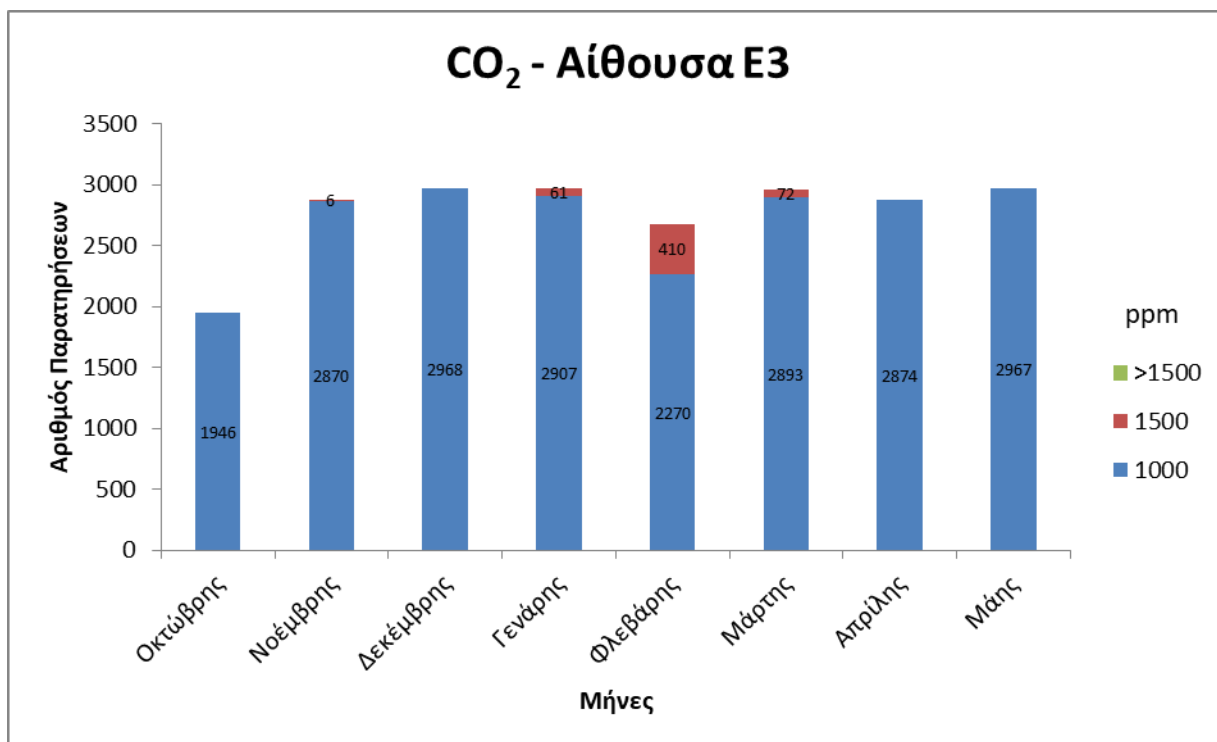
** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Το τελευταίο μέρος της παραγράφου 4.2.4, παραθέτει διαγράμματα συχνοτήτων από μετρήσεις CO₂ στις αίθουσες. Τα σχήματα 4.14-19 εμφανίζουν το πλήθος των τιμών που μετρήθηκαν να φτάνουν έως και το όριο έκθεσης των 1000 ppm όπως και οι αντίστοιχες που ξεπέρασαν το όριο αυτό. Συγκεκριμένα, η ομαδοποίηση γίνεται ως εξής: α) τιμές από 0-1000 ppm όπου βρίσκεται και το θεσμοθετημένο όριο έκθεσης, β) τιμές από 1001-1500 ppm και γ) τιμές από 1501 ppm και άνω. Η ενδιάμεση τιμή των 1500 ppm δεν αναπαριστά κάποιο όριο, τέθηκε απλά για να δώσει στον αναγνώστη μια καλύτερη αντίληψη για το που κυμαίνονται οι συγκεντρώσεις. Δεν προσφέρουν κάποια επιπλέον πληροφορία σε σχέση με αυτά που έχουν ήδη αναλυθεί, παρά μόνο ποσοτικοποιούν τη συχνότητα εμφάνισης των ακραίων τιμών.









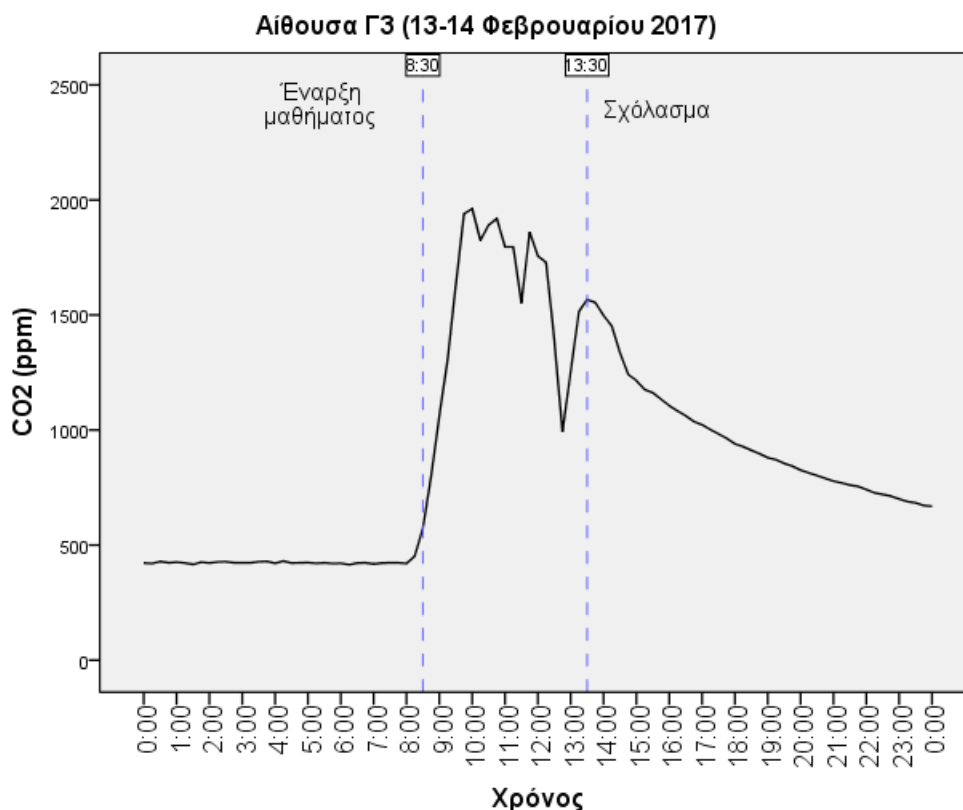
Σχήματα 4.14-15-16-17-18-19: Διαγράμματα συχνότητων συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα ανά αίθουσα

Όπως φαίνεται, η αίθουσα με τις συχνότερες ακραίες τιμές CO₂ πάνω από τα 1500 ppm είναι η Β3 και ακολούθως η Β1. Ταυτοποιούνται λοιπόν αυτές οι δύο αίθουσες ως οι πιο επιβαρυνμένες από διοξείδιο του άνθρακα με συγκεντρώσεις που δυνητικά θα μπορούσαν να έχουν επιπτώσεις στην απόδοση των μαθητών. Επιπροσθέτως, παρατηρείται ότι οι περισσότερες ακραίες παρατηρήσεις εμφανίζονται κατά τη ψυχρή περίοδο, ένα λογικό αποτέλεσμα καθότι στο διάστημα αυτό τα παράθυρα και οι πόρτες παραμένουν κλειστά τις ώρες που διεξάγονται μαθήματα λόγω χαμηλών εξωτερικών θερμοκρασιών.

4.2.4 Ρυθμός αερισμού (Air Exchange Rate)

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το αναπνευστικό σύστημα όπως και τις μαθησιακές ικανότητες των μαθητών κατά τις ώρες διδασκαλίας. Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 2.1.8, τα επίπεδα συγκέντρωσης του CO_2 και κατ' επέκταση ο επαρκής αερισμός ενός χώρου, εξαρτώνται κυρίως από ρυθμό ροής νωπού αέρα (Air Exchange Rate - AER) και το συνολικό του όγκο (m^3). Ειδικώς για την περίπτωση των εξεταζόμενων τάξεων σημαντική επιρροή έχει ο αριθμός των μαθητών και οι διάφορες δραστηριότητές τους εντός της κάθε αίθουσας. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα AER για τις 6 εξεταζόμενες αίθουσες διδασκαλίας (πίνακας 4.18). Η επιλεγμένη μέθοδος που έχει προταθεί από διάφορους ερευνητές (Roulet et al., 2002, Thatcher et al., 2002, Singer et al., 2004,) βασίζεται στην εκθετικά μειούμενη συγκέντρωση του CO_2 σε βάθος χρόνου (decay method). Σύμφωνα με αυτή τη διαδικασία, μια ποσότητα αερίου ιχνηθέτη (tracer gas), όπως το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται με ανθρώπινη εκπνοή στον εξεταζόμενο χώρο, αναμιγνύεται με φρέσκο αέρα και αποκτά μια ομοιόμορφη συγκέντρωση μέσα στο χώρο. Μετά το τέλος των μαθημάτων, όταν οι συγκεντρώσεις CO_2 παρουσιάζουν μέγιστη τιμή, μετράται ο ρυθμός μείωσης της συγκέντρωσης αυτής κατά ένα επιλεγμένο διάστημα ωρών που παρατηρείται εκθετική πτώση (Asadi et al., 2011).

Σε αυτό το πείραμα, η καταγραφή του CO_2 στις αίθουσες διδασκαλίας διήρκεσε 12 ώρες ανά ημέρα (από τις 18:00 έως τις 6:00 LST) όταν το σχολείο ήταν άδειο. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου μέτρησης, απαραίτητη προϋπόθεση ήταν οι πόρτες και τα παράθυρα σε όλες τις τάξεις να παραμείνουν κλειστά. Οι πληροφορίες σχετικά με τα ανοίγματα των παραθύρων που λάμβαναν χώρα στις τάξεις, στη διάρκεια της ημέρας, αντλούνταν από τα ημερολόγια (logbooks) στα οποία πέραν της ακριβούς ώρας και διάρκειας των ανοιγμάτων των παραθύρων σημειωνόταν επίσης η συμπεριφορά των μαθητών σε σχέση με το άνοιγμά τους. Το σχήμα 4.20 δείχνει μια τυπική κατανομή συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα (για 24 ώρες) κατά τη διάρκεια μιας πειραματικής ημέρας στην τάξη Γ3, όπου η εκθετική περίοδος μείωσης του CO_2 κατά το απόγευμα είναι προφανής.



Σχήμα 4.20: Ημερήσια κατανομή διοξειδίου του άνθρακα στην αίθουσα Γ3

Ο τύπος για τον υπολογισμό του AER που έχει προταθεί από τους You et al., 2007 σε γενική μορφή και απλοποιήθηκε από τους Turanjanin et al., 2014 για την περίπτωση του CO₂ δίδεται από την εξίσωση 1 και είναι:

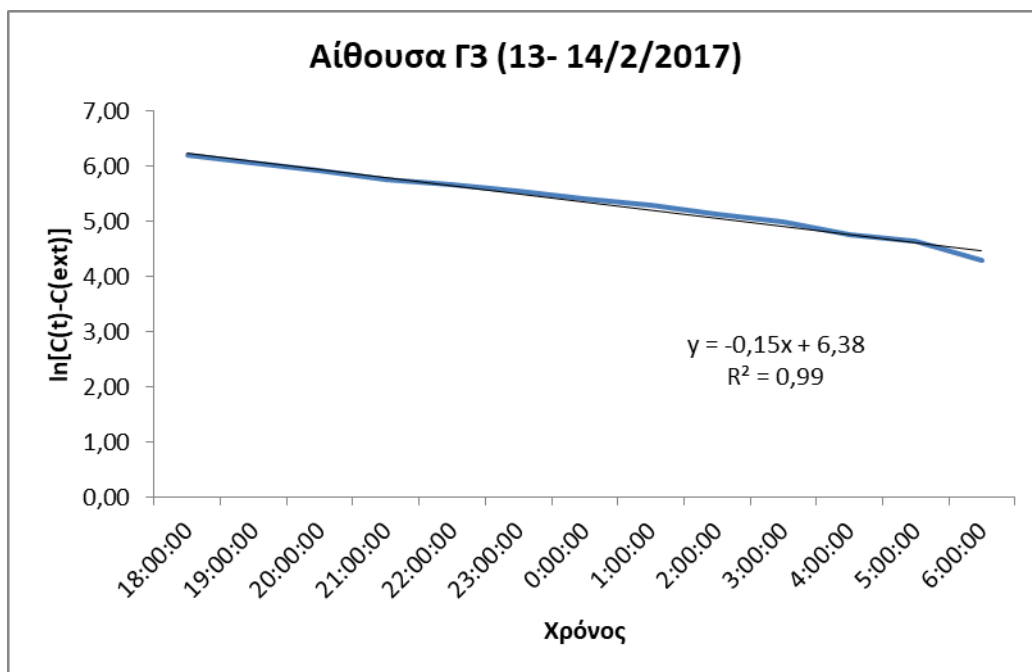
$$AER = -\frac{1}{t - t_0} \cdot \ln\left(\frac{C(t) - C_{ext}}{C_0 - C_{ext}}\right) \quad (1)$$

Όπου C₀ είναι η συγκέντρωση CO₂ στο χρόνο t₀, C (t) είναι οι παρατηρούμενες τιμές του CO₂ σε χρόνο t και C_{ext} είναι η εξωτερική συγκέντρωση του CO₂. Στη περίπτωση των εξεταζόμενων τάξεων, το t₀ αντιπροσωπεύει τη στιγμή που το CO₂ αρχίζει να μειώνεται εκθετικά κατά τη διάρκεια του χρόνου t. Το AER κάθε τάξης υπολογίστηκε από την κλίση (γ=αx+β) του λογαρίθμου των συγκεντρώσεων CO₂ έναντι του χρόνου, για διαφορετικές ημέρες. Κάθε πειραματική ημέρα επιλέχθηκε με βάση την απουσία ανθρώπινης παρουσίας και μη ανοίγματος θυρών / παραθύρων κατά την καταγραφή του CO₂. Στο σχήμα 4.21 παρουσιάζεται η περίπτωση της τάξης Γ3, όπου οι μετρήσεις έλαβαν χώρα από τις 13 έως τις 14 Φεβρουαρίου 2017 και καταδεικνύουν AER=0,15h⁻¹. Η υψηλή τιμή του συντελεστή πρόβλεψης (R² = 0,99) δείχνει σχετικά σταθερές συνθήκες. Ο πίνακας 4.18 δείχνει ότι για όλες τις αίθουσες διδασκαλίας τα αποτελέσματα εμφανίζουν πολύ χαμηλές μέσες τιμές AER, από 0,06 h⁻¹ στην

τάξη A3 έως $0,34 \text{ h}^{-1}$ στη B2, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στα προσφάτως εγκατεστημένα κουφώματα νέας γενιάς που παρέχουν καλύτερη μόνωση από το εξωτερικό περιβάλλον. Ωστόσο, οι περισσότερες αίθουσες παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα στις τιμές AER με τις A3 και B3 να δείχνουν την πιο σταθερή συμπεριφορά κυρίως λόγω της θέσης τους στο εσωτερικό του κτιρίου (προστατευμένες από την επίδραση του ανέμου).

Πίνακας 4.18: Αποτελέσματα ρυθμού αερισμού για επιλεγμένες μέρες σε όλες τις τάξεις

Ρυθμός Αερισμού (AER h^{-1})						
Ημέρες	Αίθουσες					
	Γ3	B2	B3	A3	B1	E3
31/1 - 1/2	0,13	0,09	0,12	-	0,07	0,09
1/2 - 2/2	0,09	0,15	-	-	0,06	-
2/2-3/2	0,07	-	0,02	-	-	-
6/2 - 7/2	0,21	-	-	0,11	0,09	0,15
13/2 - 14/2	0,15	-	0,06	0,06	0,07	0,16
14/2 - 15/2	0,10	-	0,04	-	0,03	-
15/2-16/2	0,08	-	0,03	-	-	-
16/2-17/2	0,11	0,31	0,33	-	0,06	0,10
17/2 - 18/2	0,15	0,60	0,04	-	0,09	-
23/2-24/2	0,08	-	0,04	-	0,08	0,10
24/2-25/2	0,06	0,87	0,03	-	0,04	-
28/2-1/3	0,07	-	-	-	0,03	0,09
1/3-2/3	0,01	-	0,04	-	0,06	0,12
2/3-3/3	0,07	-	0,03	-	-	0,05
7/3-8/3	0,14	-	0,05	-	0,36	0,14
8/3-9/3	0,09	0,18	0,04	-	0,04	-
27/3-28/3	0,12	-	-	0,05	0,06	0,15
6/4-7/4	0,08	-	-	0,05	-	0,08
5/5-6/5	0,06	0,20	0,04	0,05	0,06	0,17
9/5-10/5	0,09	-	-	0,05	-	0,32
17/5-18/5	0,10	-	0,08	0,06	-	-
Μέσος όρος	0,10	0,34	0,07	0,06	0,08	0,13



Σχήμα 4.21: Δωδεκάωρη περίοδος ελάττωσης συγκέντρωσης (decay period) και γραμμική παλινδρόμηση του CO₂ στην τάξη Γ3 για μια συγκεκριμένη ημέρα

Η δημοσίευση της Dimitrouloroulou, 2012 αναφέρει ότι η τιμή 0,5 h⁻¹ εμφανίζεται συχνά στα εθνικά πρότυπα και σε κανονισμούς εσωτερικού αερισμού κτιρίων σε πολλές χώρες στην Ευρώπη και θεωρείται ως ένα κατώτατο όριο επαρκούς ρυθμού διείσδυσης νωπού αέρα. Ωστόσο, δεν πρέπει να συνδέεται με συμπτώματα υγείας. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι ο αερισμός στις φυσικά αεριζόμενες αίθουσες του εξεταζόμενου κτιρίου είναι ανεπαρκής και πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο εγκατάστασης ενός μηχανικού συστήματος. Τα διαγράμματα ρυθμών αερισμού των υπόλοιπων τάξεων για όλες τις πειραματικές ημέρες παρατίθενται στο **Παράρτημα Δ4**.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΕΡΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

5.1 Συνολικές Πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOC)

5.1.1 Αποτελέσματα ολόκληρης της πειραματικής περιόδου

Στην ενότητα αυτή θα γίνει μια αρχική και γενική ανάλυση των αποτελεσμάτων των συνολικών πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOC) που μετρήθηκαν μέσα στις τάξεις για την πρώτη πειραματική περίοδο μετρήσεων με την απουσία μαθητών (Ιούνιος-Ιούλιος 2016) όπως και για την δεύτερη με τη παρουσία των παιδιών στο σχολείο (Οκτώβριος 2016 - Ιούνιο 2017), σχεδόν για ολόκληρη δηλαδή τη σχολική χρονιά. Οι μετρήσεις αφορούν το πρώτο δεκαπενθήμερο του Ιουνίου 2017 όπου και υπήρχαν μαθητές στις τάξεις.

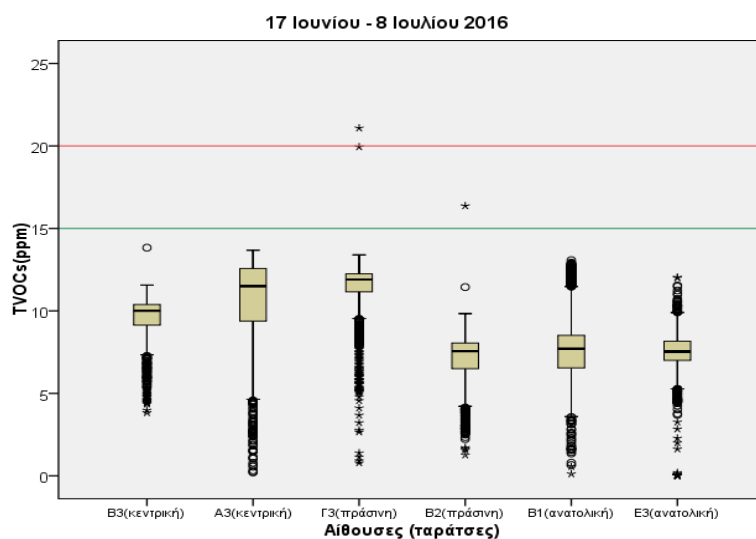
Κατά την περίοδο μέτρησης του καλοκαιριού 2016 χωρίς την παρουσία μαθητών στις τάξεις, οι εσωτερικές συγκεντρώσεις των TVOC εμφανίστηκαν σε πολύ χαμηλά επίπεδα σχετικά με τα επιτρεπόμενα όρια που προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία (15 και 20 ppm). Όλες οι οριακές τιμές αναφέρθηκαν πλήρως στην ενότητα 2.1 διαχωρίζοντας την εσωτερική ατμόσφαιρα, αναλόγως συγκέντρωσης ρύπου, σε επιβαρυμένη ή μη.

Ο πίνακας 5.1 παρουσιάζει τα κυριότερα στατιστικά στοιχεία των TVOCs στις αίθουσες, ούτως ώστε να εξαχθούν τιμές υποβάθρου. Παρατηρούνται μέσες τιμές από 7,2 ppm στην αίθουσα ισογείου Β2 κάτω από την πράσινη οροφή μέχρι και 11,5 ppm στη τάξη 1^{ου} ορόφου Γ3 κάτω από την ίδια στέγη. Φαίνεται λοιπόν πως τα υλικά του κτιρίου είτε δομικά, είτε γενικής χρήσεως (μπογιές και έπιπλα) που υπάρχουν στις αίθουσες δεν αυξάνουν τις συγκεντρώσεις των TVOC σε υψηλά επίπεδα. Αυτό έχει αντίκτυπο και στα αποτελέσματα των τυπικών αποκλίσεων του ίδιου πίνακα καθότι βρίσκονται μεταξύ 1,2 και 2,8 ppm, τιμές πάρα πολύ μικρές που καταδεικνύουν πολύ σταθερά μικροπεριβάλλοντα. Παρατηρούνται επιπροσθέτως κάποια υψηλά στιγμιαία μέγιστα όπως στη περίπτωση της αίθουσας Γ3 (21,1 ppm) ή της Β2 (16,4 ppm) τα οποία οφείλονται πιθανώς στις επισκέψεις του συνεργείου καθαρισμού, οι οποίες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού δεν πραγματοποιούνταν καθημερινώς αλλά ανά τακτά διαστήματα. Όπως έχει προαναφερθεί στην ενότητα 2.1 τα υλικά καθαρισμού αποτελούν μια εκ των βασικότερων πηγών εκπομπής TVOC σε έναν χώρο (Yrieix et al., 2010). Αντιστοίχως και οι ελάχιστες τιμές κυμάνθηκαν σε πολύ χαμηλά επίπεδα, με αρκετές μετρήσεις μάλιστα να φτάνουν το όριο ακρίβειας καταγραφής των αισθητήρων και να συμβολίζονται ως <1 όπως προτείνεται από τον κατασκευαστή των οργάνων.

Πίνακας 5.1: Στατιστικά στοιχεία πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOCs) κατά την πρώτη πειραματική περίοδο

Ιούνιος-Ιούλιος 2016 (απουσία μαθητών) TVOCs (ppm)		B3	A3	Γ3	B2	B1	E3
Μέσος όρος		9,7	10,5	11,5	7,2	7,7	7,5
Τυπική απόκλιση		1,2	2,8	1,5	1,4	1,9	1,3
Ελάχιστο		3,8	<1	<1	1,3	<1	<1
Μέγιστο		13,8	13,7	21,1	16,4	13,1	12,0
Τεταρτημόρια	25	9,1	9,4	11,2	6,5	6,5	7,0
	50(διάμεσος)	10,0	11,5	11,9	7,6	7,7	7,5
	75	10,4	12,6	12,2	8,0	8,5	8,2

Στο σχήμα 5.1 πέραν των χαμηλών συγκεντρώσεων των TVOC, είναι εμφανής και η παρουσία αρκετών ακραίων τιμών με στιγμιαία ελάχιστα και μέγιστα σχεδόν εντός όλων των αιθουσών. Όπως και στην περίπτωση του διοξειδίου του άνθρακα στη προηγούμενη ενότητα, έτσι κι εδώ ο λόγος ύπαρξης αυτών των ακραίων τιμών, οφείλεται κυρίως στην παρουσία του συνεργείου καθαρισμού και συντήρησης του σχολικού συγκροτήματος αλλά και κάποιων μελών του εκπαιδευτικού προσωπικού που επιθεωρούσαν τους χώρους. Οι επισκέψεις αυτές επέφεραν αρχικά ραγδαία στιγμιαία αύξηση των συγκεντρώσεων των TVOC εντός των αιθουσών λόγω της χρήσης μεγάλης ποσότητας καθαριστικών και εν συνεχεία μεγάλη πτώση των αντίστοιχων τιμών (ακραία ελάχιστα) λόγω του ανοίγματος πορτών και παραθύρων που έχει ως αποτέλεσμα την εισροή μεγάλων ποσοτήτων φρέσκου αέρα εντός του χώρου. Να τονιστεί ότι στο ίδιο σχήμα, η πράσινη οριζόντια γραμμή απεικονίζει το επιτρεπτό όριο για μια "καθαρή" εσωτερική ατμόσφαιρα ενώ η κόκκινη συμβολίζει το όριο για μία "επιβαρυσμένη".



Σχήμα 5.1: Συγκεντρώσεις πτητικών οργανικών ενώσεων όλων των τάξεων κατά την πρώτη πειραματική περίοδο

Κατά τη 2^η πειραματική περίοδο, με τη παρουσία των μαθητών στο σχολείο (Οκτώβριος 2016 - Ιούνιος 2017), αντίστοιχα με την περίπτωση του διοξειδίου του άνθρακα, για τα TVOC εμφανίστηκε ένα παρόμοιο μοτίβο συγκεντρώσεων, δηλαδή να παρατηρείται αύξηση καθώς τα παιδιά θα εισέρχονταν στις τάξεις, μείωση όταν θα υπήρχαν ανοιχτά παράθυρα ή πόρτες. Άλλωστε οι Singer et al., 2006 αναφέρουν ότι η ανθρώπινη παρουσία και δραστηριότητα στο χώρο μπορεί να αυξήσει τις συγκεντρώσεις των TVOC. Η γενική εικόνα λοιπόν που δημιουργείται είναι ότι στις αίθουσες εμφανίζονται κάποιες χαμηλές τιμές υποβάθρου από πιθανές πηγές εκπομπής όπως τα έπιπλα, τα χρώματα και δομικά υλικά του κτιρίου, όμως και η παρουσία του ανθρώπινου παράγοντα μπορεί να αυξήσει τις συγκεντρώσεις αυτές.

Ο επιθυμητός διαχωρισμός των αιθουσών σε επιβαρυμένες ή μη, όσον αφορά τα TVOCs, είναι σαφώς ένα πιο δύσκολο έργο συγκριτικά με τις συγκεντρώσεις CO₂ καθώς οι πηγές εκπομπής και οι παράμετροι επιρροής είναι πολυάριθμες. Παρατηρήθηκε μερική αύξηση, όταν εισέρχονταν οι μαθητές στις αίθουσες αλλά υπήρχαν και έντονες διακυμάνσεις, οι οποίες ίσως οφείλονται σε άλλους παράγοντες πέραν του ανθρώπινου, μιας και πολλές από τις πηγές των TVOC (όπως τα δομικά υλικά, τα χρώματα και τα έπιπλα) είναι ανεξάρτητες από την ανθρώπινη παρουσία (Sowa 2002, Goodman 2019). Το γεγονός αυτό, καθιστά το διαχωρισμό των αιθουσών λίγο πιο δύσκολο. Ωστόσο παρακάτω θα γίνει μια προσπάθεια κατηγοριοποίησής τους.

Κάνοντας μια πρώτη και γενική εκτίμηση των αποτελεσμάτων του πίνακα 5.2, φαίνεται ότι η λιγότερο επιβαρυμένη αίθουσα για τα παιδιά είναι η Γ3 που βρίσκεται στον 1^ο όροφο κάτω από την πράσινη ταράτσα. Με μέσο όρο 7,4 ppm και διασπορά 1,9 ppm αποτελεί ένα πολύ καθαρό και σταθερό μικροπεριβάλλον. Το αποτέλεσμα αυτό ενισχύεται και από το σχήμα 5.2 καθώς όπως φαίνεται σχεδόν το 100% των μετρήσεων στην ίδια αίθουσα δεν ξεπερνά το πρώτο κατώφλι των 15 ppm που ουσιαστικά είναι το προτεινόμενο όριο για να υπάρχει μία καλή ατμόσφαιρα στην τάξη. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η Γ3 εμφάνισε τις μεγαλύτερες τιμές TVOC υποβάθρου και κατά τη διάρκεια της σχολικής χρονιάς τις χαμηλότερες, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι σε αυτή την αίθουσα η ανθρώπινη παρουσία είχε τελικά θετική επίδραση στις συγκεντρώσεις μέσω του αερισμού. Κάτι αντίστοιχο αλλά σε μικρότερη κλίμακα ίσχυσε και για την αίθουσα Β2 η οποία εμφάνισε μέσο όρο υποβάθρου 7,2 ppm ενώ κατά την παρουσία των μαθητών 6,6 ppm. Ο ισχυρισμός αυτός βέβαια είναι αρκετά γενικευμένος καθώς στην ίδια αίθουσα η τυπική απόκλιση των TVOC είναι 4,1 ppm κάτι που σημαίνει μεγάλες αυξομειώσεις και ότι η μέση τιμή δεν μπορεί να δώσει μια καθαρή εικόνα συμπεριφοράς. Στις υπόλοιπες αίθουσες φαίνεται ότι η ανθρώπινη παρουσία αυξάνει τις τιμές. Ίδιες διαπιστώσεις αναφέρονται και στην έρευνα των (Lee και Chang, 2000). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι σε όλες τις αίθουσες, σύμφωνα με το ίδιο σχήμα, τουλάχιστον το 75% των μετρήσεων βρίσκονται κοντά στο όριο των 15 ppm, ποσοστό αρκετά μεγάλο που καθιστά γενικώς όλες τις αίθουσες ως μη επιβαρυμένους χώρους. Παρόλα αυτά ο χαρακτηρισμός αυτός δεν είναι τόσο απλός και ο λόγος ακολουθεί στην παρακάτω ανάλυση των τάξεων.

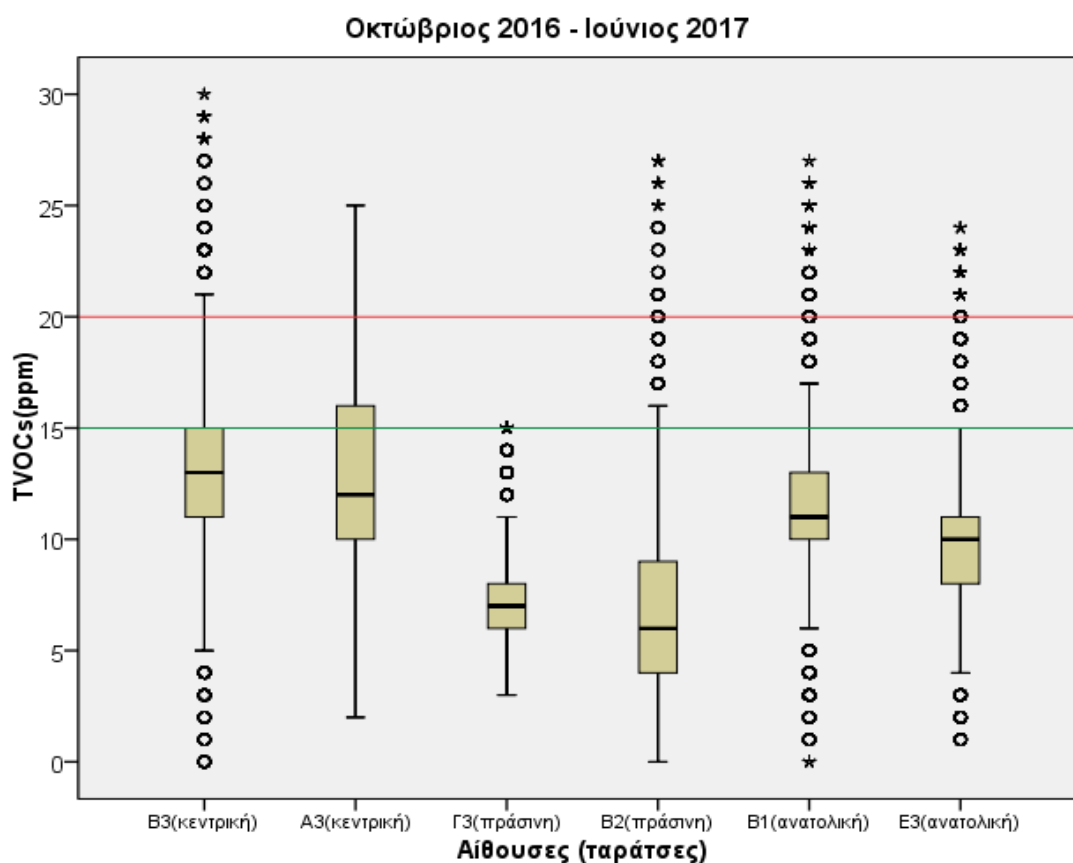
Η Ε3 είναι τάξη όπου πάνω από το 75% των μετρήσεων βρίσκεται στο όριο των 15 ppm με τη δεύτερη μικρότερη διασπορά και σχετικά λίγες ακραίες τιμές στην οποία παρατηρείται μία σχετικά σταθερή συμπεριφορά. Κάνοντας μια ανασκόπηση στο διάγραμμα 5.3, παρατηρεί κανείς πως κατά τη διάρκεια του Φεβρουαρίου, για τις ώρες των μαθημάτων, οι συγκεντρώσεις συνήθως αυξάνονται λόγω

της ανθρώπινης παρουσίας εμφανίζοντας μέγιστα κοντά στα 15 ppm. Στο γεγονός αυτό βέβαια συντελούν και τα συνήθως κλειστά παράθυρα λόγω χαμηλών εξωτερικών θερμοκρασιών. Η αίθουσα αυτή λοιπόν, ενώ ορίστηκε γενικά ως μη επιβαρυσμένη, εμφάνισε σχετικά αυξημένες τιμές κατά τις ψυχρές περιόδους. Η Β2 φαίνεται μία περίπτωση αντίστοιχη σχεδόν με την Ε3. Έχει τη μικρότερη μέση τιμή, αλλά με σημαντικά πιο αυξημένη διασπορά. Όπως προαναφέρθηκε, το γεγονός, ότι υπάρχουν ακραίες τιμές και μεγάλη διασπορά μπορεί να μεταφραστεί ως ένας δείκτης αστάθειας μιας και τα ακρότατα είναι στιγμιαία, επομένως η Β2 είναι η πιο ασταθής αίθουσα σε συγκεντρώσεις TVOC. Είναι μια ενδιαφέρουσα περίπτωση, διότι αποτελεί τη δεύτερη αίθουσα μετά την Γ3 με το μεγαλύτερο ποσοστό συγκεντρώσεων κάτω από τα 15 ppm, αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζει και μία ασταθή συμπεριφορά. Βλέποντας, λοιπόν, τη γενική εικόνα, μπορεί να υπάρχουν κάποια λίγα τοπικά μέγιστα σε όλη τη διάρκεια της σχολικής χρονιάς και αρκετά περισσότερα το χειμώνα αλλά σαν σύνολο τιμών, η αίθουσα χαρακτηρίζεται από χαμηλές συγκεντρώσεις TVOC.

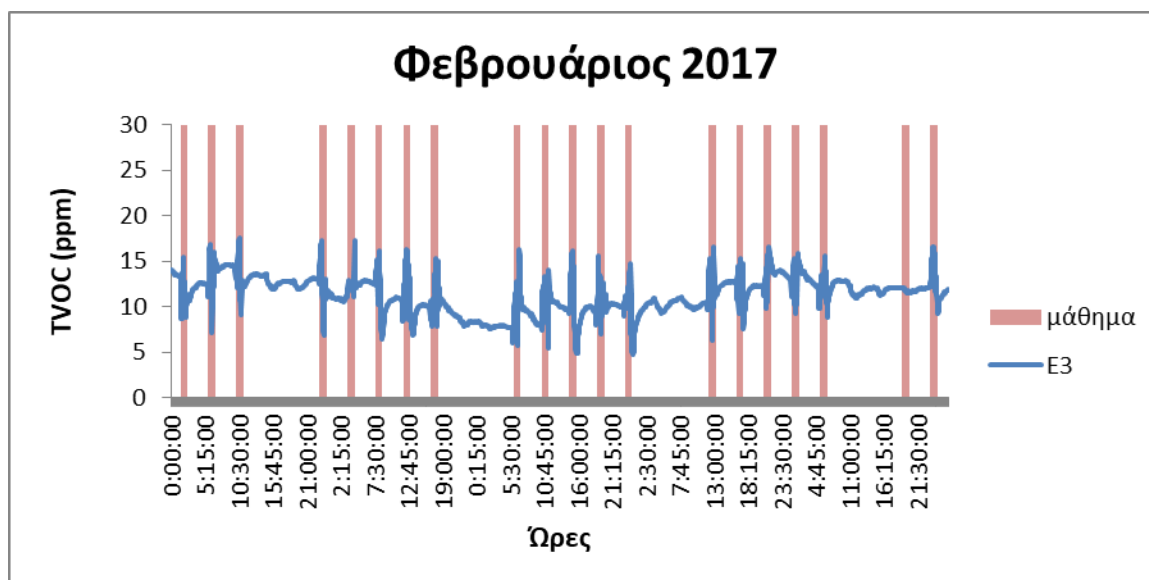
Οι υπόλοιπες αίθουσες παρουσιάζουν αυξημένες μέσες τιμές, μη παραβιάζοντας ωστόσο σημαντικά το οριακό εύρος. Συγκεκριμένα, η Β3 έχει μέση τιμή 13,3 ppm και διασπορά 3,4 ppm, η Α3 έχει μέση τιμή 12,6 ppm και διασπορά 4 ppm και τέλος η Β1 έχει μέση τιμή 11,8 ppm και διασπορά 3,6 ppm. Για τις δύο αίθουσες της κεντρικής οροφής (Α3 και Β3) παρατηρείται πως είναι παραπλήσιες μιας και σχεδόν το 25% των μετρήσεων ξεπερνάει όριο των 15 ppm. Η μόνη διαφοροποίηση μεταξύ αυτών των αιθουσών, έγκειται στο ότι το η Α3 δεν εμφανίζει καμία ακραία τιμή, οπότε αυτομάτως βγαίνει το συμπέρασμα πως αντιπροσωπεύει το πιο σταθερό μικροπεριβάλλον με μικρές στιγμιαίες μεταβολές. Τέλος, τα διαγράμματα με τις χρονοσειρές των TVOC όλων των αιθουσών για το σύνολο της πειραματικής περιόδου, παρατίθενται στο **Παράρτημα Ε**. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με τις έρευνες των Pegas et al., 2009 και Mečiarová et al., 2018 οι οποίοι μετά από μετρήσεις σε δημοτικά σχολεία με φυσικό αερισμό σε Πορτογαλία και Σλοβακία αντίστοιχα, διαπίστωσαν αυξημένες τιμές TVOC λόγω κλειστών παραθύρων.

Πίνακας 5.2: Στατιστικά στοιχεία πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOCs) κατά την δεύτερη πειραματική περίοδο

Οκτώβριος 2016 - Ιούνιος 2017 (παρουσία μαθητών) TVOCs (ppm)		B3	A3	Γ3	B2	B1	E3
Μέσος όρος		13,3	12,6	7,4	6,6	11,8	10,1
Τυπική απόκλιση		3,4	4,0	1,9	4,1	3,6	2,9
Ελάχιστο		<1	2,0	3,0	<1	<1	1,0
Μέγιστο		30,0	25,0	15,0	27,0	27,0	24,0
Τεταρτημόρια	25	11,0	10,0	6,0	4,0	10,0	8,0
	50	13,0	12,0	7,0	6,0	11,0	10,0
	75	15,0	16,0	8,0	9,0	13,0	11,0



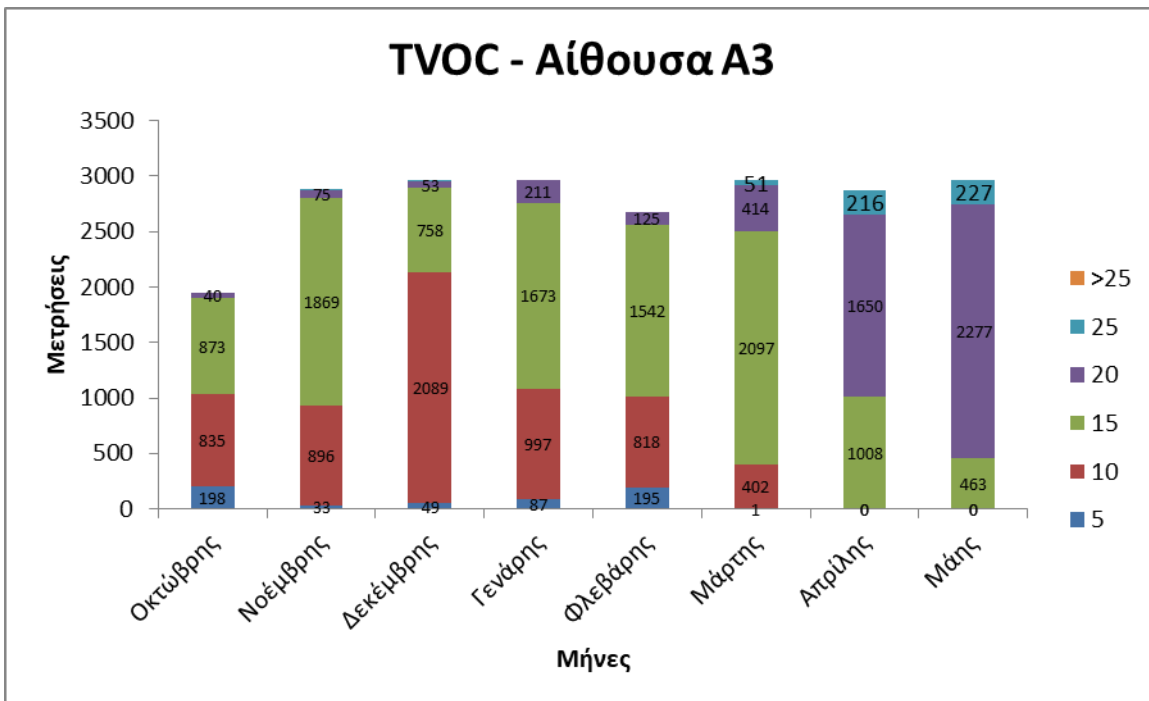
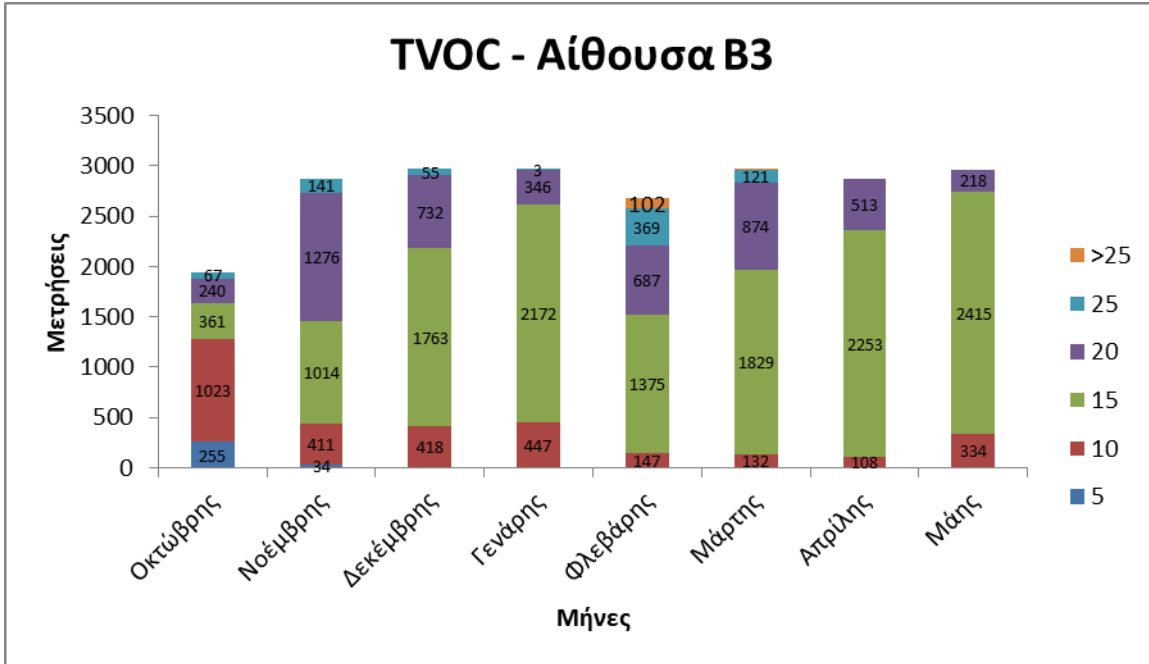
Σχήμα 5.2: Συγκεντρώσεις πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOC) όλων των τάξεων κατά την δεύτερη πειραματική περίοδο

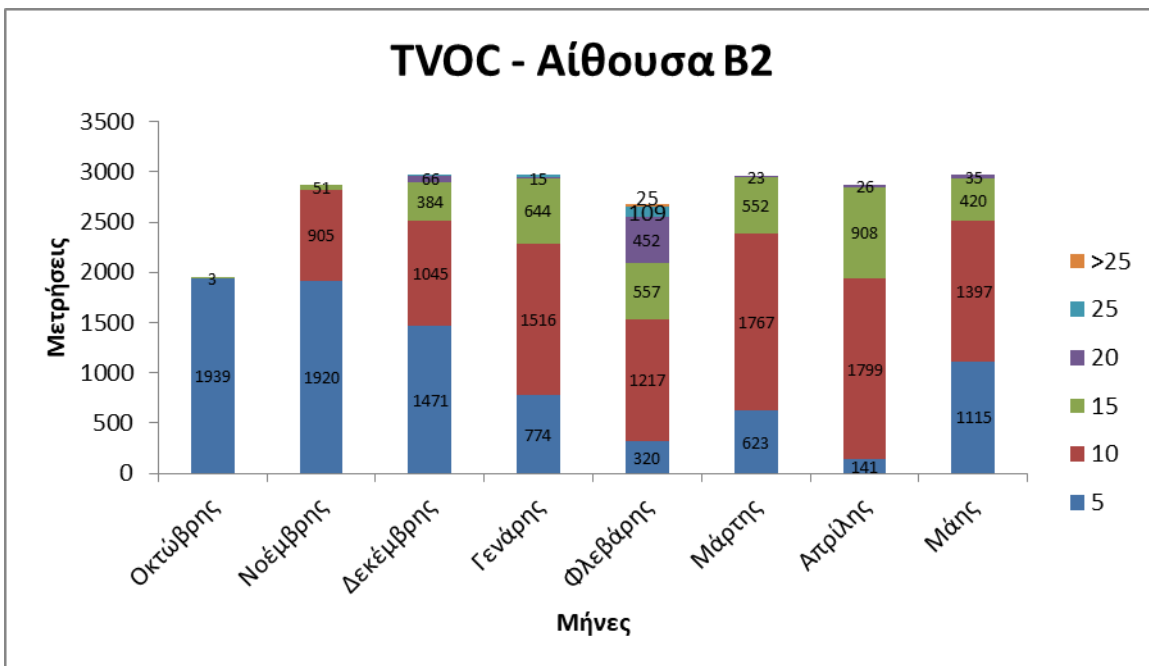
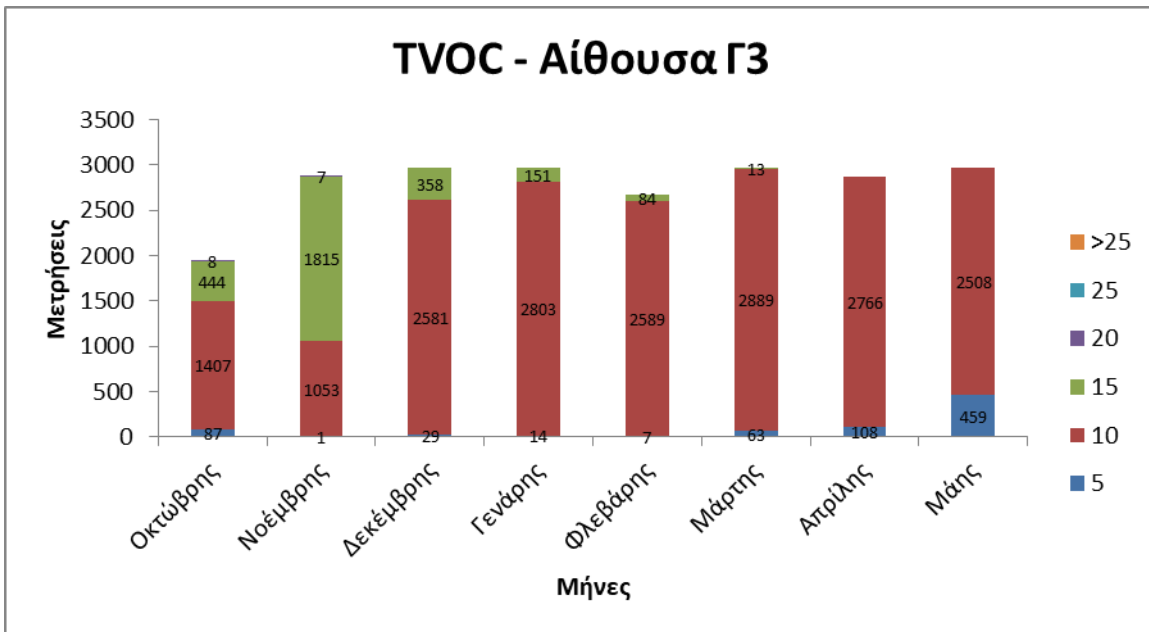


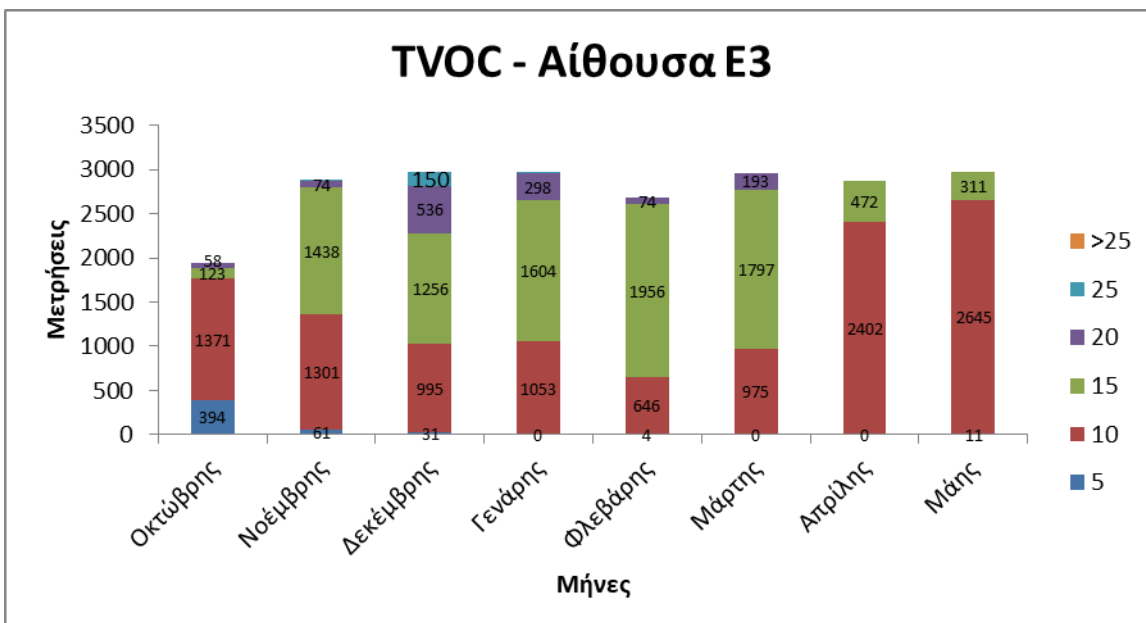
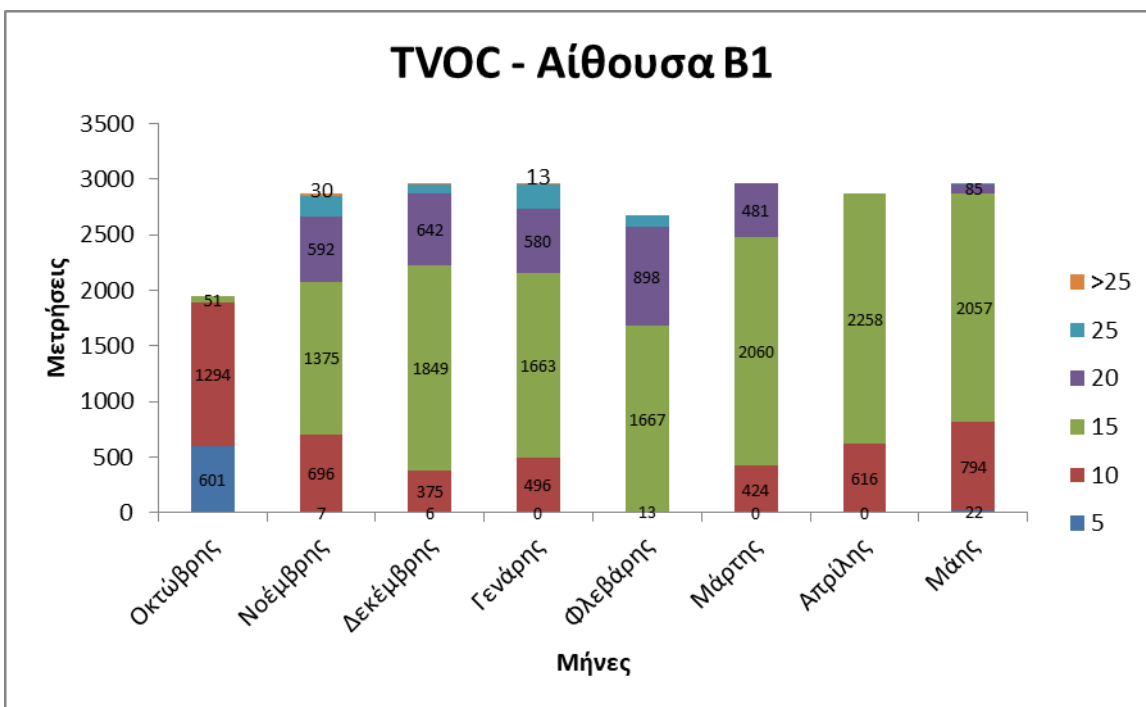
Σχήμα 5.3: Συγκεντρώσεις TVOC στην Ε3 κατά τον Φεβρουάριο 2017

5.1.2 Αποτελέσματα ανά μήνα

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται διαγράμματα συχνοτήτων ανά τάξη και ανά μήνα για τα TVOC (σχήματα 5.4-9). Στους σχήματα αυτά παρουσιάζονται οι συχνότητες με τις οποίες εμφανίζονται ομάδες τιμών των συγκεκριμένων ρύπων, οι οποίες χωρίζονται ως εξής: α) τιμές από 0-5 ppm, β) από 6-10 ppm, γ) από 11-15 ppm, δ) από 16-20 ppm, ε) από 21-25 ppm και στ) τιμές μεγαλύτερες των 25 ppm.







Σχήματα 5.4-5-6-7-8-9: Διαγράμματα συχνότητας συγκεντρώσεων TVOC ανά αίθουσα

Στα παραπάνω γραφήματα, παρατηρείται ότι η πιο επιβαρυνόμενη αίθουσα είναι η Β3. Η αίθουσα αυτή στον 1^ο όροφο, όπως και στη περίπτωση του CO₂ έτσι και για τα TVOC εμφάνισε τις πιο αυξημένες συγκεντρώσεις κάτι που σε συνδυασμό με τους πολύ μικρούς δείκτες ρυθμού αερισμού που υπολογίστηκαν στη προηγούμενη ενότητα, την καθιστά την πιο επιβαρυνόμενη αίθουσα του σχολείου. Ακολουθεί η αίθουσα Β1. Στις δύο αυτές αίθουσες, κυρίως κατά τους ψυχρούς μήνες (Νοέμβριος-Φεβρουάριος), παρατηρείται μεγάλο πλήθος μετρήσεων στην περιοχή από 16 ppm. Ιδιαίτερα κατά τον

Φεβρουάριο 2017, όπου τα παράθυρα παρέμεναν κυρίως κλειστά, στη τάξη Β3 εμφανίστηκαν 102 παρατηρήσεις που ξεπέρασαν τα 25 ppm.

Σε ότι αφορά την αίθουσα Α3, που από την ανάλυση των ετησίων μετρήσεων βρέθηκε να είναι ήπια από πλευράς συγκεντρώσεων TVOC, θα μπορούσε ίσως να χαρακτηριστεί και μία αίθουσα σχεδόν καθαρής ατμόσφαιρας, αν δεν υπήρχαν οι μετρήσεις του τριμήνου από τον Γενάρη έως τον Μάρτη. Ειδικά προς τους δύο τελευταίους μήνες οι υψηλές τιμές TVOC ανέρχονται στα εξής: για τον μήνα Απρίλιο, το 65% των μετρήσεων ήταν από 16 ppm και πάνω και για το μήνα Μάιο, το 85%. Φαίνεται να είναι μία ιδιαίτερη περίπτωση, σε θερμούς μήνες όπου παρατηρείται πτώση στις υπόλοιπες τάξεις, λόγω καλύτερου αερισμού από το άνοιγμα παραθύρων, στη συγκεκριμένη αίθουσα να υπάρχουν αυξήσεις. Βεβαίως πρέπει να ληφθεί υπόψη πως πρόκειται για τάξη μαθητών Α' Δημοτικού στην οποία πραγματοποιούνταν διάφορες καλλιτεχνικές δραστηριότητες, κατά τις οποίες τα παιδιά χρησιμοποιούν χρώματα, κόλλες, κλπ. Στην αίθουσα Ε3, οι παρατηρήσεις από τα σχήματα συχνοτήτων καταδεικνύουν χειρότερους μήνες τον Δεκέμβρη και τον Ιανουάριο και πάλι λόγω κλειστών παραθύρων. Οι υπόλοιποι μήνες, με εξαίρεση τους Απρίλη και Μάη, έχουν λίγες υψηλές τιμές κυρίως στην ομάδα 16-20 ppm, αλλά, επειδή είναι λίγες μπροστά στον μεγάλο όγκο δεδομένων κάθε μήνα, κρίνονται αδιάφορες, σαν μικρές διαταραχές.

Για την τάξη ισογείου Β2, είναι εμφανές ότι οι δύο πρώτοι μήνες (Οκτώβριος, Νοέμβριος) είναι ιδανικοί, καθώς στην τάξη, η πλειονότητα των παρατηρήσεων για τα TVOC βρίσκονται εντός του εύρους 0-5 ppm. Κατόπιν, για όλο το επόμενο χρονικό διάστημα, έχουμε μετρήσεις κυρίως στην ομάδα των 5-10 ppm και λιγότερες στην αντίστοιχη των 10-16 ppm κατά συνέπεια οι συγκεντρώσεις αυτές να μην αποτελούν σοβαρό πρόβλημα για την υγεία των μαθητών. Ο μοναδικός μήνας κατά τον οποίο τα TVOC βρέθηκαν σε αυξημένα επίπεδα σε αυτή την αίθουσα, ήταν και πάλι ο Φεβρουάριος, στον οποίο, λίγο παραπάνω από το 25% των μετρήσεων είναι από 16 ppm και άνω. Δεδομένου του κρύου που επικρατούσε το χειμώνα του 2017 τα παράθυρα παρέμεναν κλειστά και οι συγκεντρώσεις των TVOC ως εκ τούτου αυξάνονταν. Στο ίδιο μηνιαίο σχήμα συχνοτήτων, η αίθουσα Γ3 εμφανίζει εξαιρετικά αποτελέσματα καθώς σχεδόν το 100% των παρατηρήσεων παρέμεινε εντός του οριακού εύρους 0-15 ppm, αποτέλεσμα που συμφωνεί και με την προηγούμενη ετήσια ανάλυση.

Σε αντιστοιχία με το CO₂, έτσι και οι συγκεντρώσεις των TVOC σε γενικές γραμμές, ακολουθούν το μηνιαίο πρότυπο που αναλύθηκε στην ενότητα 4.2. Σταθερά, η λιγότερο επιβαρυνόμενη αίθουσα βρέθηκε να είναι η Γ3 ακολουθούμενη από τις Β2 και Ε3, έχοντας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ακρότατα για κάποιους μήνες, ενώ οι περισσότερο επιβαρυνόμενες αίθουσες με TVOC είναι κατά φθίνουσα σειρά οι Β3, Β1 και Α3. Αναφορικά με το θέμα της εποχικότητας, φαίνεται, πως κατά τους χειμερινούς μήνες παρουσιάζονται συστηματικά πιο υψηλές τιμές TVOC με αρκετά στιγμιαία ακρότατα. Το φαινόμενο παρατηρείται κυρίως κατά τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο και Φεβρουάριο με εξαίρεση να αποτελεί ο Οκτώβριος όταν και το άνοιγμα των παραθύρων ήταν συχνότερο λόγω πιο ήπιων εξωτερικών θερμοκρασιών. Ένας μήνας που κατέδειξε ενδιαφέροντα αποτελέσματα για τα TVOC είναι ο Φεβρουάριος. Το γεγονός αυτό βέβαια, ως ένα βαθμό δεν είναι τυχαίο, διότι τον μήνα αυτό, ο αερισμός των αιθουσών ήταν περιορισμένος.

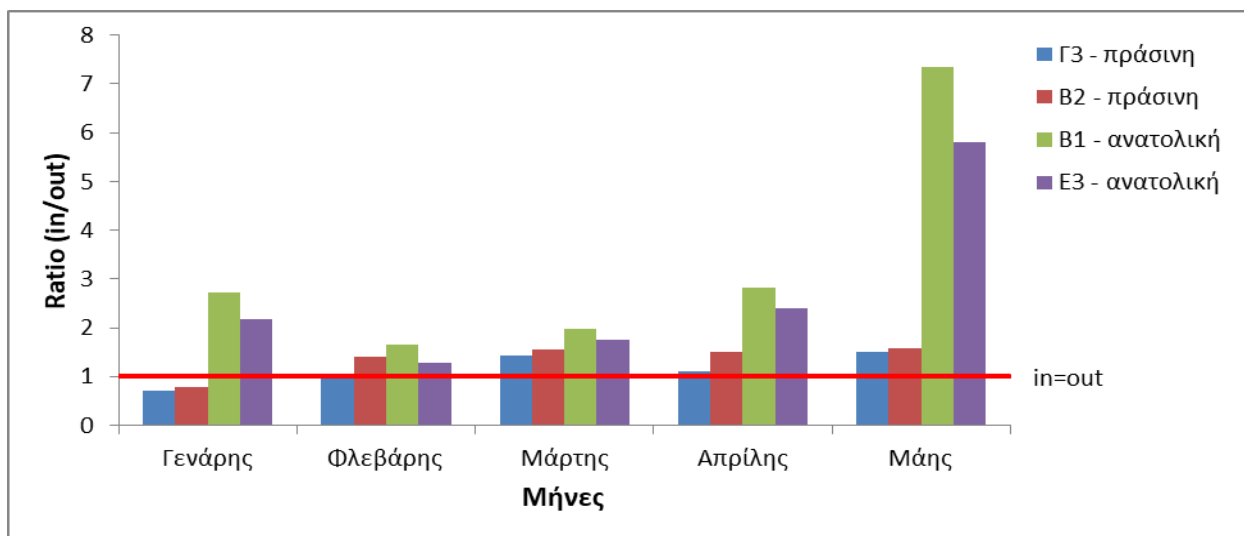
5.1.3 Αναλογία εσωτερικών-εξωτερικών συγκεντρώσεων (In/Out ratio)

Στην ενότητα αυτή, εξετάζεται η επιρροή των μετρούμενων εσωτερικών συγκεντρώσεων από τις αντίστοιχες εξωτερικές μέσω των Indoor/Outdoor (I/O) αναλογιών. Στόχος είναι ο υπολογισμός το ποσοστού επιρροής των TVOC του άμεσου εξωτερικού περιβάλλοντος (οροφές) στο εσωτερικό (τάξεις). Πρέπει να αναφερθεί πως για όλους τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν τα εξωτερικά δεδομένα από την πράσινη και την ανατολική οροφή σπλισμένου σκυροδέματος και τα εσωτερικά από τις αντίστοιχες τάξεις 1^{ου} ορόφου και ισογείου που βρίσκονται υπό την άμεση επιρροή τους (Γ3, Β2, Β1, Ε3). Αναφέρεται επίσης ότι το διάστημα που κατέστησαν δυνατές οι εξωτερικές μετρήσεις των TVOC είναι από τον Γενάρη έως τον Μάη 2017.

Τα αποτελέσματα των I/O αναλογιών για τις εξεταζόμενες αίθουσες παρατίθενται αριθμητικά στον πίνακα 5.3 και γραφικά στο σχήμα 5.10 παρακάτω.

Πίνακας 5.3: I/O αναλογίες πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOCs) για τις αίθουσες της πράσινης και ανατολικής οροφής

Μήνες	Γ3 - πράσινη	Β2 - πράσινη	Β1 - ανατολική	Ε3 - ανατολική
Γενάρης	0,72	0,78	2,71	2,18
Φλεβάρης	1,03	1,41	1,65	1,29
Μάρτης	1,43	1,56	1,98	1,74
Απρίλης	1,1	1,51	2,81	2,41
Μάης	1,5	1,59	7,35	5,81



Σχήμα 5.10: Γραφική παράσταση των I/O αναλογιών πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOCs) για τις εξεταζόμενες αίθουσες (η μονάδα ορίζεται ως in=out)

Όπως είναι εμφανές, οι I/O αναλογίες των TVOC, με εξαίρεση τις αίθουσες Γ3 και Β2 (μόνο τον Γενάρη), κυμαίνονται σε τιμές μεγαλύτερες της μονάδας, κάτι που σημαίνει πως τα εσωτερικά TVOCs είναι περισσότερα από τα εξωτερικά τα οποία μικρή επίδραση έχουν στους εσωτερικούς χώρους των αιθουσών. Οι μετρήσεις των ταρατσών βρέθηκαν σε μέσους όρους περίπου 7 ppm στην πράσινη οροφή και 6 ppm στην ανατολική οπλισμένου σκυροδέματος. Όπως αναφέρθηκε στις παραπάνω ενότητες, οι αίθουσες Γ3 και Β2 είχαν σταθερά χαμηλές εσωτερικές συγκεντρώσεις και μη ύπαρξη ισχυρών πηγών εκπομπής TVOC. Βεβαίως είναι αντιφατικό το γεγονός ότι τον Ιανουάριο με κλειστά παράθυρα μπορεί αυτές οι αίθουσες να επηρεάστηκαν από το εξωτερικό περιβάλλον. Η πιο πιθανή εξήγηση έγκειται στις αυξημένες συγκεντρώσεις της πράσινης οροφής σε TVOC λόγω κοντινής βλάστησης (Benjamin και Winer, 1998) που σε συνδυασμό με τις χαμηλές εσωτερικές συγκεντρώσεις των δύο τάξεων κατά τον Ιανουάριο, επέφερε αυτό το αποτέλεσμα.

Οι υψηλές συγκεντρώσεις TVOC στη Β1, δημιουργούν υψηλές I/O αναλογίες σε σύγκριση με την ανατολική οροφή, που έχει ακόμη μικρότερες τιμές. Ειδικά κατά το Μάιο οι εσωτερικές συγκεντρώσεις στην τάξη αυτή ήταν περίπου επταπλάσιες των εξωτερικών (7,35 για την ακρίβεια). Όσο για την Ε3, τον Ιανουάριο είχε μία αρκετά μεγάλη αύξηση, οπότε είναι λογικό και η I/O αναλογία να φτάνει στο 2,18. Μολτατά, τους μήνες Απρίλη και Μάη, είχε σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις, με ακόμη μικρότερες όμως πάνω στην αντίστοιχη οροφή. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με την έρευνα των Kinney et al., 2002 που αφορά μετρήσεις ποιότητας αέρα σε σχολεία της Νέας Υόρκης. Οι ερευνητές αναφέρουν ότι τα μετρούμενα TVOC εμφάνισαν λόγους I/O από 1 έως 10 δίνοντας έμφαση στις υψηλότερες συγκεντρώσεις εσωτερικών χώρων. Το φαινόμενο έγινε εντονότερο κατά τους χειμερινούς μήνες μετρήσεων.

Στη συνέχεια, παρατίθεται ο συγκεντρωτικός πίνακας 5.4 που αφορά μέσες τιμές I/O αναλογιών για όλους τους μήνες που μελετήθηκαν.

Πίνακας 5.4: Μέσες τιμές I/O αναλογιών TVOCs στις αίθουσες (Ιανουάριος-Μάιος 2017)

Αίθουσες	Ολικές Μέσες Τιμές I/O Ratios
Γ3 – πράσινη 1 ^{ος} όροφος	1,2
Β2 – πράσινη ισόγειο	1,4
Β1 – ανατολική 1 ^{ος} όροφος	3,3
Ε3 – ανατολική ισόγειο	2,7

5.1.4 Συσχετίσεις μεταξύ των αιθουσών

Ολοκληρώνοντας το υποκεφάλαιο των TVOC, η μελέτη επικεντρώνεται στην ανεύρεση οποιασδήποτε συσχέτισης μεταξύ αιθουσών για τους αέριους αυτούς ρύπους. Ο πίνακας 5.5 συγκεντρώνει τα αποτελέσματα για όλους τους συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των όλων των υπό εξέταση αιθουσών. Ως γνωστόν, ο συντελεστής Spearman που είναι κοντά στο μηδέν, υποδηλώνει πως δεν υπάρχει καμία απολύτως συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων. Επομένως, αν στο διοξειδίο του άνθρακα θεωρήσαμε συσχετίσεις του επιπέδου 0,5 μη ισχυρές, τότε το σίγουρο είναι, πως, όσο αφορά τις πτητικές οργανικές ενώσεις, δεν υπάρχει κανένας ουσιαστικός συσχετισμός μεταξύ των αιθουσών. Για την ακρίβεια, τιμές κοντά στο 0,5 και λίγο πιο πάνω από αυτό, δείχνουν τάσεις προς συσχέτιση, αλλά δεν είναι ικανές για εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Εύκολα λοιπόν κανείς διαπιστώνει ότι όσον αφορά τα TVOC δεν υπάρχει καμία ισχυρή συσχέτιση. Θα πρέπει να τονιστεί βέβαια ότι όλα τα αποτελέσματα έχουν στατιστική σημαντικότητα ($p < 0,01$) και επομένως μπορούν να μελετηθούν. Οι μοναδικοί συντελεστές που πλησιάζουν το επίπεδο αυτό είναι ο συντελεστής Spearman μεταξύ των αιθουσών B1 και E3 με αποτέλεσμα 0,566 και σε χαμηλότερο επίπεδο ο αντίστοιχος μεταξύ των B1 και E3 (0,455). Επομένως, όλα τα υπόλοιπα δεδομένα είναι ασυσχέτιστα. Ένα άλλο ενδιαφέρον στοιχείο είναι η εμφάνιση αρνητικών συντελεστών Spearman, αδύναμων όμως για να αποφανθούμε εάν οι συμπεριφορές είναι αντιστρόφως ανάλογες. Πρέπει να τονιστεί ότι για τις πτητικές οργανικές ενώσεις, υπάρχει μια πληθώρα πιθανών πηγών εκπομπής οι οποίες διαφοροποιούνται από τάξη σε τάξη, τόσο στο είδος όσο και στο χρόνο εμφάνισής τους. Αυτός ίσως είναι ο κυριότερος λόγος που προκύπτουν τόσο αδύναμες ασυσχέτιστες.

Πίνακας 5.5: Συσχετίσεις πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOC) μεταξύ όλων των αιθουσών για όλη τη πειραματική περίοδο

			Συσχέτιση όλων των τάξεων για VOC					
			B3	A3	Γ3	B2	B1	E3
Spearman's rho	B3	Correlation Coefficient	1,000	,186 ^{**}	,218 ^{**}	,297 ^{**}	,455 ^{**}	,378 ^{**}
		Sig. (2-tailed)	.	,000	,000	,000	,000	,000
		N	20386	20386	20386	20386	20386	20386
	A3	Correlation Coefficient		1,000	-,219 ^{**}	,229 ^{**}	-,017 ^{**}	-,012
		Sig. (2-tailed)		.	,000	,000	,013	,090
		N		20386	20386	20386	20386	20386
	Γ3	Correlation Coefficient			1,000	-,198 ^{**}	,207 ^{**}	,290 ^{**}
		Sig. (2-tailed)			.	,000	,000	,000
		N			20386	20386	20386	20386
	B2	Correlation Coefficient				1,000	,347 ^{**}	,277 ^{**}
		Sig. (2-tailed)				.	,000	,000
		N				20386	20386	20386
	B1	Correlation Coefficient					1,000	,566 ^{**}
		Sig. (2-tailed)					.	,000
		N					20386	20386
	E3	Correlation Coefficient						1,000
		Sig. (2-tailed)						.
		N						20386

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Στον πίνακα 5.6 συγκεντρώνονται όλα τα δεδομένα, ομαδοποιημένα ανά ορόφους. Ο συντελεστής Spearman (0,495) δείχνει ξεκάθαρα πως ούτε σε αυτή την περίπτωση υπάρχει ιδιαίτερα δυνατή συσχέτιση. Αποτέλεσμα που φαίνεται λογικό δεδομένου ότι οι αίθουσες από μόνες τους ανεξάρτητα έδειξαν ασυσχέτιστα αποτελέσματα.

Πίνακας 5.6: Συγκεντρωτικός πίνακας συσχέτισης ορόφων για διοξείδιο του άνθρακα

Οριζόντια συσχέτιση VOC 1ου ορόφου - Ισόγειο

			1ος όροφος	Ισόγειο
Spearman's rho	1ος όροφος	Correlation Coefficient	1,000	,495**
		Sig. (2-tailed)	.	,000
		N	61158	61158
	Ισόγειο	Correlation Coefficient		1,000
		Sig. (2-tailed)		.
		N		61158

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Συμπερασματικά, λοιπόν, δεν αναδείχτηκαν ιδιαίτερες συσχετίσεις σε καμία από τις παραπάνω περιπτώσεις, κάτι που υποδεικνύει την διαφοροποίηση της κάθε αίθουσας από την άλλη. Να τονισθεί, ωστόσο, πως οι περισσότερες συσχετίσεις ήταν θετικές και στατιστικά σημαντικές ($p < 0,01$), παρουσιάζοντας μια αναλογία μεταξύ των αιθουσών αλλά μη ισχυρή.

5.2 Αερομεταφερόμενοι μύκητες (Airborne Fungi)

5.2.1 Ανάπτυξη σπορίων υπό διαφορετικές εσωτερικές κλιματικές συνθήκες

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθούν οι συνθήκες θερμοκρασίας και κορεσμένης υγρασίας εντός των αιθουσών που σχετίζονται με την παρουσία των αερομεταφερόμενων μυκήτων όπως και η πιθανή συσχέτισή τους με τα αιωρούμενα σωματίδια. Η μελέτη σχετικά με την ποιοτική και ποσοτική κατανομή των αερομεταφερόμενων μυκήτων έχει παρουσιαστεί από την Άρτεμη Ζόμα (Ζόμα, 2017).

Οι εσωτερικές κλιματολογικές συνθήκες, οι οποίες επηρεάζονται άμεσα από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κτιρίου, τη γεωγραφική του θέση όπως και τη τοπική μετεωρολογία, μπορούν να διαδραματίσουν βασικό ρόλο στις συγκεντρώσεις των διαφόρων τύπων αερομεταφερόμενων μυκήτων σύμφωνα με τους Pei-Chih et al, 2000 και Burge et al., 2000. Η παρουσία των αερομεταφερόμενων μυκήτων σε σχέση με τα εσωτερικά επίπεδα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας διερευνήθηκε σε όλες τις αίθουσες διδασκαλίας κατά τη διάρκεια διαφορετικών πειραματικών ημερών του έτους, προκειμένου να εξεταστεί επιπρόσθετα η εποχικότητα των φαινομένων. Πρέπει να επισημανθεί ότι στο συγκεκριμένο κτίριο, η εσωτερική θερμοκρασία και σχετική υγρασία δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των δειγματοληπτικών θέσεων κυρίως λόγω του φυσικού αερισμού και του συστήματος κεντρικής θέρμανσης. Ωστόσο, όπως αναλύθηκε εκτενώς στην ενότητα 4.1, οι αίθουσες διδασκαλίας που βρίσκονται υπό την επίδραση της πράσινης οροφής (Γ3 στον 1^ο όροφο και Β2 στο ισόγειο) παρουσιάζουν καλύτερα επίπεδα θερμοκρασίας (υψηλότερα κατά τη διάρκεια του χειμώνα και χαμηλότερα κατά το καλοκαίρι) συγκριτικά με τις αντίστοιχες αίθουσες κάτω από τις οροφές οπλισμένου σκυροδέματος, προφανώς λόγω επιπρόσθετης μόνωσης. Τα σχήματα 5.11-16 απεικονίζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων που προέκυψαν για τα επικρατέστερα γένη μυκήτων (*Aspergillus*, *Cladosporium*, *Penicillium*) και ζύμες (Yeasts) μαζί με τα εσωτερικά επίπεδα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας σε κάθε αίθουσα για όλες τις πειραματικές ημέρες. Οι αριθμοί στην κορυφή των ιστογραμμάτων αντιστοιχούν στο συνολικό φορτίο μυκήτων που καταγράφηκε την εκάστοτε ημέρα. Παρομοίως, οι εμφανιζόμενες τιμές στις χρονοσειρές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας αντιπροσωπεύουν την ελάχιστη και μέγιστη παρατήρηση όλης της πειραματικής περιόδου για κάθε περίπτωση μαζί με τις παρατηρήσεις που σχετίζονται με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις μυκητιακού φορτίου στις αίθουσες. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να παρατηρηθούν:

α) Τα εύρη τιμών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εντός των οποίων υπήρξε ανάπτυξη μυκήτων στους χώρους του σχολείου.

β) Οι βέλτιστες εσωτερικές κλιματικές συνθήκες κάτω από τις οποίες κατεγράφησαν οι υψηλότερες συγκεντρώσεις συνολικών αερομεταφερόμενων μυκήτων σε κάθε τάξη.

Το γένος *Cladosporium* βρίσκεται αυξημένο μέσα στις αίθουσες κατά τις θερμές ημέρες (κυρίως τον Ιούνιο) και σε μέτρια επίπεδα σχετικής υγρασίας (40-55%). Όπως αναφέρουν στην έρευνα τους οι Garrett et al., 1998, μια εξήγηση γι' αυτό είναι ο αερισμός από ανοιχτά παράθυρα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων που οδηγεί αφενός σε μειωμένη σχετική υγρασία και αφετέρου επιτρέπει την εισροή μεγάλων ποσοτήτων σπορίων *Cladosporium* εξωτερικού περιβάλλοντος να εισέλθουν στους χώρους. Επιπλέον, φαίνεται ότι το γένος *Penicillium* επικρατεί για τις περισσότερες πειραματικές ημέρες,

επιδεικνύοντας τις υψηλότερες συγκεντρώσεις σε εσωτερική θερμοκρασία από 19,80C έως 23,10C και σχετική υγρασία από 42,3% μέχρι 53,6%. Το συγκεκριμένο γένος μυκήτων σχετίζεται άμεσα με το άσθμα, ειδικά κατά τη διάρκεια του χειμώνα, σύμφωνα με όσα αναφέρει ο Golden, 2011. Οι συνθήκες λοιπόν υπό τις οποίες το γένος *Penicillium* αυξάνεται, δεν έχουν μεγάλες διαφορές από τις λεγόμενες “συνθήκες δωματίου”. Αντιθέτως, οι συγκεντρώσεις των *Aspergillus* και *Yeasts* βρέθηκαν να είναι σχετικά μειωμένες στις περισσότερες αίθουσες διδασκαλίας, με μερικές εξαιρέσεις να παρατηρούνται στις αίθουσες Γ3 και Β2 ειδικά κατά τις θερμές περιόδους, προερχόμενες κυρίως από το εξωτερικό περιβάλλον.

Ειδικότερα, στην αίθουσα Β2 (σχήμα 5.11) φαίνεται πως η χαμηλότερη μέση εσωτερική θερμοκρασία στην οποία ανιχνεύθηκε ανάπτυξη μυκήτων (102 CFU m^{-3}) βρέθηκε στους $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και η υψηλότερη στους $27,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (με 387 CFU m^{-3}). Επίσης, η υψηλότερη ημερήσια τιμή κορεσμένης υγρασίας ήταν 66,2% ενώ η χαμηλότερη 26,4% αντίστοιχα. Η πλέον αυξημένη συγκέντρωση συνολικών αερομεταφερόμενων μυκήτων, η οποία σε αυτή την τάξη βρέθηκε να είναι 1630 CFU m^{-3} καταγράφηκε στις 26 Απριλίου 2017 υπό συνθήκες θερμοκρασίας $21 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και σχετικής υγρασίας 43%, αποτελούμενη κυρίως από *Penicillium*. Το ίδιο γένος ανιχνεύεται επιπρόσθετα στην αίθουσα Α3 στις 7 Δεκεμβρίου 2016 αλλά σε χαμηλότερη συγκέντρωση (σχήμα 5.12).

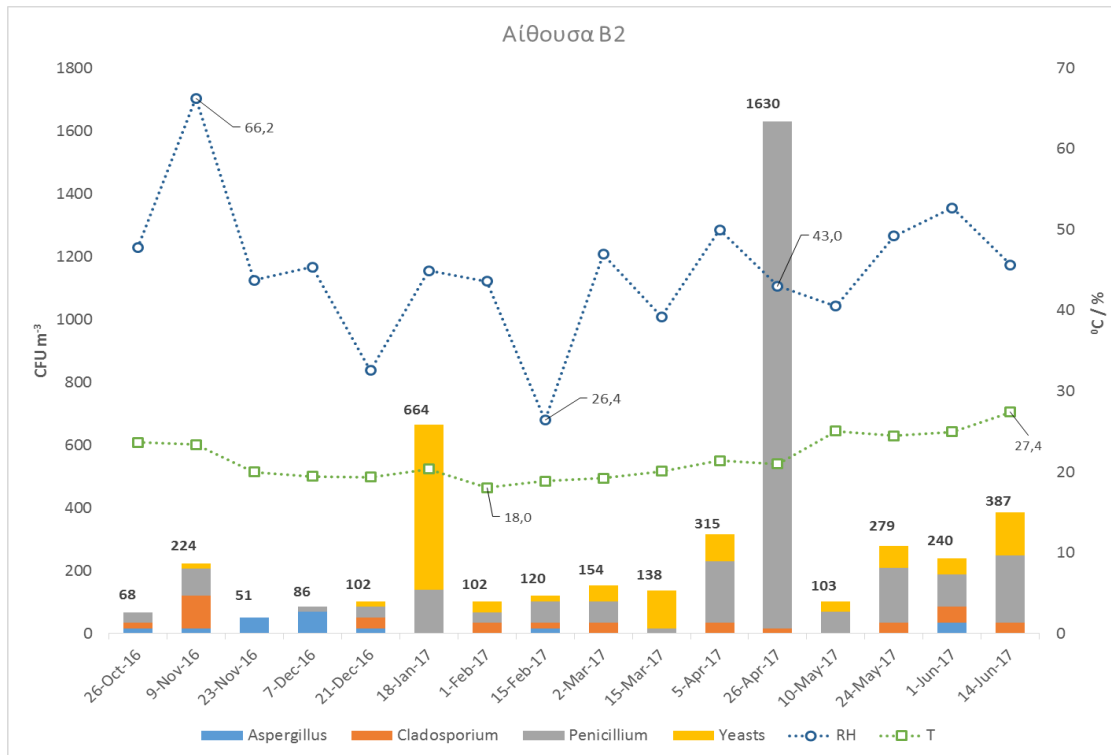
Συνεχίζοντας στο σχήμα 5.13, παρατηρούμε ότι το γένος *Penicillium* κυριαρχεί στην αίθουσα Ε3 καθώς παρουσιάζει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις για τις περισσότερες πειραματικές ημέρες. Όπως στην αίθουσα Β2 έτσι κι εδώ, η μέση μέγιστη συνολική συγκέντρωση спорίων (531 CFU m^{-3}) παρατηρήθηκε την 26η Απριλίου 2017 με μέση εσωτερική θερμοκρασία $22,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και σχετική υγρασία 45%. Εντός της τάξης Γ3, κάτω από την πράσινη οροφή, το σχήμα 5.14 δείχνει ότι η υψηλότερη μέση τιμή σχετικής υγρασίας (69,2%) σχετίζεται με χαμηλές συγκεντρώσεις ολικού μυκητιακού φορτίου (17 CFU m^{-3} αποτελούμενο μόνο από *Penicillium*). Για τη χαμηλότερη μέση παρατήρηση (37,5%) η συγκέντρωση του *Penicillium* στο χώρο αυτό έφτασε τα 34 CFU m^{-3} . Αντίστοιχα, για το υψηλότερο επίπεδο μετρούμενης εσωτερικής θερμοκρασίας $27,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ τα συνολικά επίπεδα μυκήτων, βρέθηκαν υψηλά (120 CFU m^{-3}) και για το χαμηλότερο ($18,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) αρκετά μειωμένα (34 CFU m^{-3}).

Το σχήμα 5.15 δείχνει ότι στην αίθουσα Β3, η υψηλότερη συγκέντρωση μυκήτων (875 CFU m^{-3}) καταγράφηκε στις 5 Απριλίου 2017 με το μεγαλύτερο ποσοστό συγκέντρωσης να ανήκει και πάλι στο γένος *Penicillium* ενώ μικρότερες ποσότητες να αντιστοιχούν στα γένη των *Cladosporium* και *Aspergillus*, υπό συνθήκες μέσης εσωτερικής θερμοκρασίας – σχετικής υγρασίας στους $23,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και 53,6%, αντίστοιχα. Επιπλέον, από το σχήμα 5.16 φαίνεται ότι στην τάξη Β1 παρουσιάζονται αρκετά υψηλές συνολικές συγκεντρώσεις μυκήτων (470 CFU m^{-3}) για μέση εσωτερική θερμοκρασία $22,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και σχετική υγρασία 52,2% κατά τη διάρκεια του Απριλίου του 2017. Σημειώνεται ότι στο χώρο αυτό, κατά την περίοδο Απριλίου - Ιουνίου 2017, οι συγκεντρώσεις των αερομεταφερόμενων μυκήτων (κυρίως το γένος *Penicillium*) βρέθηκαν αυξημένες, ένα φαινόμενο που παρατηρήθηκε και στις υπόλοιπες τάξεις και έρχεται σε συμφωνία με τα αντίστοιχα αποτελέσματα προγενέστερων διεθνών δημοσιεύσεων (Holt 1990, Sterling and Lewis 1998, και Gots et al., 2003). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι οριακές συνθήκες για την εσωτερική ανάπτυξη спорίων μυκήτων σχετίζονται με θερμοκρασίες δωματίου περίπου από 20 έως $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ κάτι που προέκυψε και από τα παραπάνω αποτελέσματα.

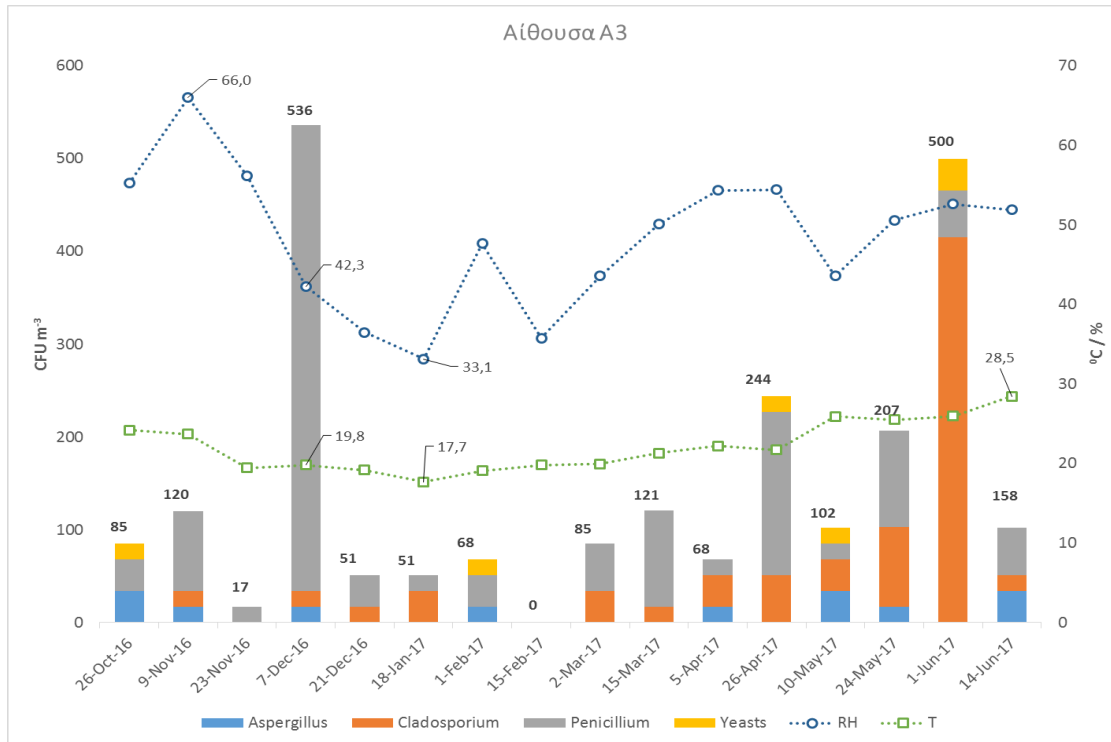
Είναι σαφές ότι για όλες σχεδόν τις πειραματικές ημέρες παρατηρείται έντονη εποχικότητα στα επίπεδα συγκεντρώσεων μυκήτων που αυξάνονται ιδιαίτερα κατά τις θερμές περιόδους (άνοιξη - καλοκαίρι) και μειώνονται κατά τις ψυχρές (φθινόπωρο - χειμώνας). Παρόμοια αποτελέσματα έχουν δημοσιευθεί και σε άλλες διεθνείς εργασίες που αφορούν πειράματα σε αστικές κατοικίες της Ευρώπης (Herbath et al., 2003 και Haas et al., 2007) και της Αυστραλίας (Garett et al., 1997). Η σημασία της εποχικότητας των φαινομένων τονίζεται στη μελέτη του Atkison et al., 2006, ο οποίος αναφέρει πως είναι πολύ σημαντικό να προσδιορίζονται οι μήνες κατά τους οποίους αυξάνονται οι συγκεντρώσεις των μυκήτων καθώς η χρονική διακύμανση των σπορίων μυκήτων συνδέεται στενά με τα συμπτώματα άσθματος στα παιδιά. Σε αυτό το κτίριο, τα κατώφλια τιμών στα οποία ανιχνεύθηκαν σημαντικές συγκεντρώσεις σπορίων στις τάξεις μετρήθηκαν από 13 °C έως 31,1 °C για θερμοκρασία εσωτερικού αέρα και από 26,4% έως 69,6% για εσωτερική σχετική υγρασία. Τα επίπεδα των 21 °C και 43% βρέθηκαν να είναι οι βέλτιστες εσωτερικές συνθήκες για τη μέγιστη παρατηρούμενη συνολική συγκέντρωση μυκήτων (1630CFU m⁻³) ενώ ο Απρίλιος ήταν ένας μήνας συνεχούς αυξημένης συγκέντρωσης μυκήτων (κυρίως γένους *Penicillium*).

Τέλος, προκειμένου να διερευνηθεί οποιαδήποτε πιθανή συσχέτιση στη συμπεριφορά μεταξύ των αερομεταφερόμενων μυκήτων με τα επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και αιωρούμενων σωματιδίων σε όλες τις αίθουσες διδασκαλίας, παρατίθεται ο πίνακας 5.7 (πίνακας συσχετίσεων Spearman) που αφορά όλες τις πειραματικές ημέρες δειγματοληψίας. Μόνο οι τιμές p (p-values) που βρέθηκαν κάτω από το όριο του 0,05 θεωρούνται στατιστικά σημαντικές και μπορούν να σχολιαστούν.

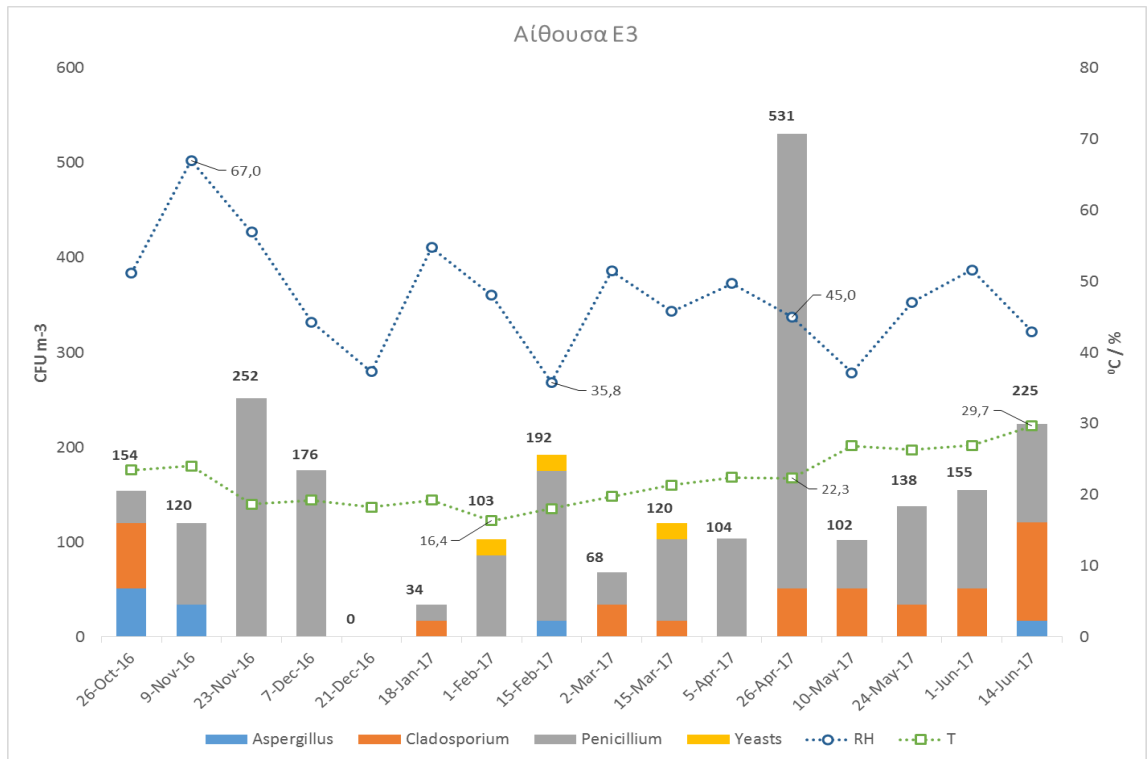
Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι το σύνολο των μυκήτων συσχετίζεται θετικά με την εσωτερική θερμοκρασία (με συντελεστή 0,246) με μια σχετικά ισχυρή συμβολή από το γένος *Cladosporium* που κορυφώθηκε κατά τους ζεστούς μήνες (συντελεστής 0,392). Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται σε συμφωνία με την αντίστοιχη μελέτη του Frankel et al., 2012, ωστόσο στη παρούσα εργασία δεν βρέθηκε σημαντική συσχέτιση μεταξύ αερομεταφερόμενων μυκήτων και εσωτερικής σχετικής υγρασίας. Η ανάλυση της συσχέτισης μεταξύ των PM₁₀ σε σχέση με τα γένη *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Yeasts* και τις συνολικές συγκεντρώσεις μυκητιακού φορτίου για την αίθουσα Γ3 απεικόνισε ισχυρή θετική σχέση μεταξύ PM₁₀ και *Aspergillus*. Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται σε συμφωνία με τα ευρήματα των Dorizas et al., 2012 σε αίθουσες Ελληνικών σχολείων. Η ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρος των σπορίων *Aspergillus* κυμαίνεται μεταξύ 2,5 και 10 μm, μέγεθος που αντιστοιχεί στο στα εξεταζόμενα αιωρούμενα σωματίδια της αίθουσας (PM₁₀). Τα PM₁₀ καταγράφηκαν σε υψηλά επίπεδα όταν οι κυρίαρχοι μύκητες καθώς και το συνολικό μυκητιακό φορτίο παρουσίαζαν σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις. Βάσει αυτής της παρατήρησης, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι μόνο ένα μικρό μέρος των PM₁₀ στην αίθουσα Γ3 είναι ενδέχεται να είναι μυκητιακής προέλευσης.



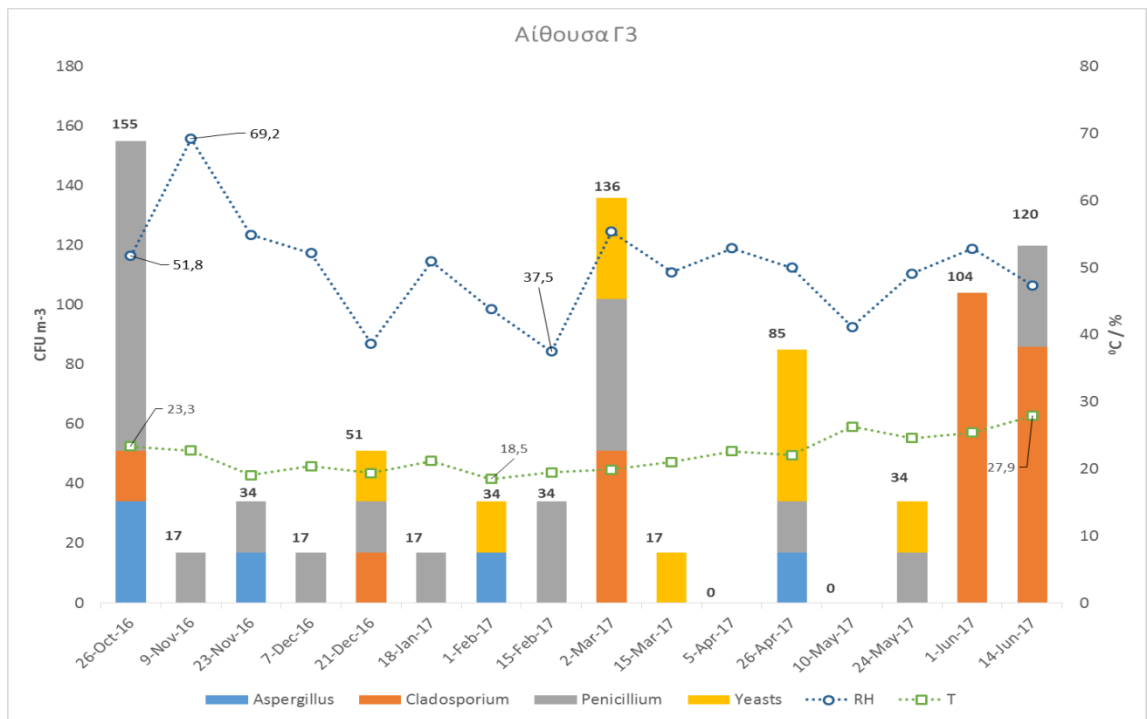
Σχήμα 5.11: Συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μυκήτων για διαφορετικές πειραματικές ημέρες στην αίθουσα B2



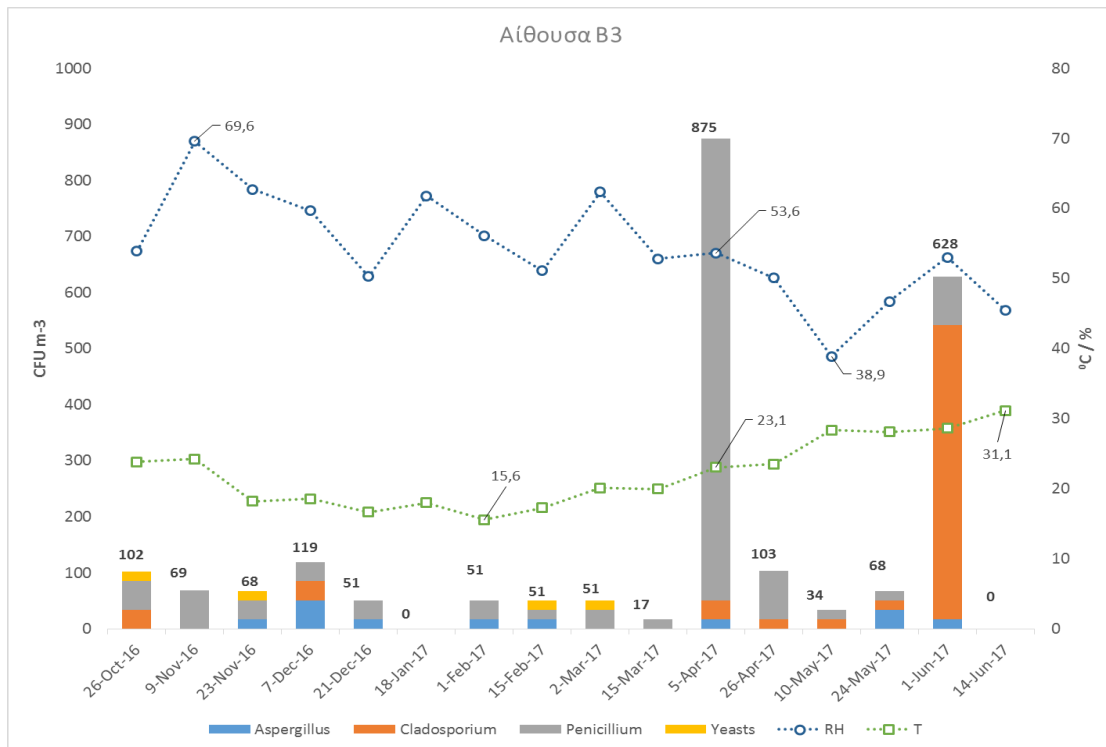
Σχήμα 5.12: Συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μυκήτων για διαφορετικές πειραματικές ημέρες στην αίθουσα A3



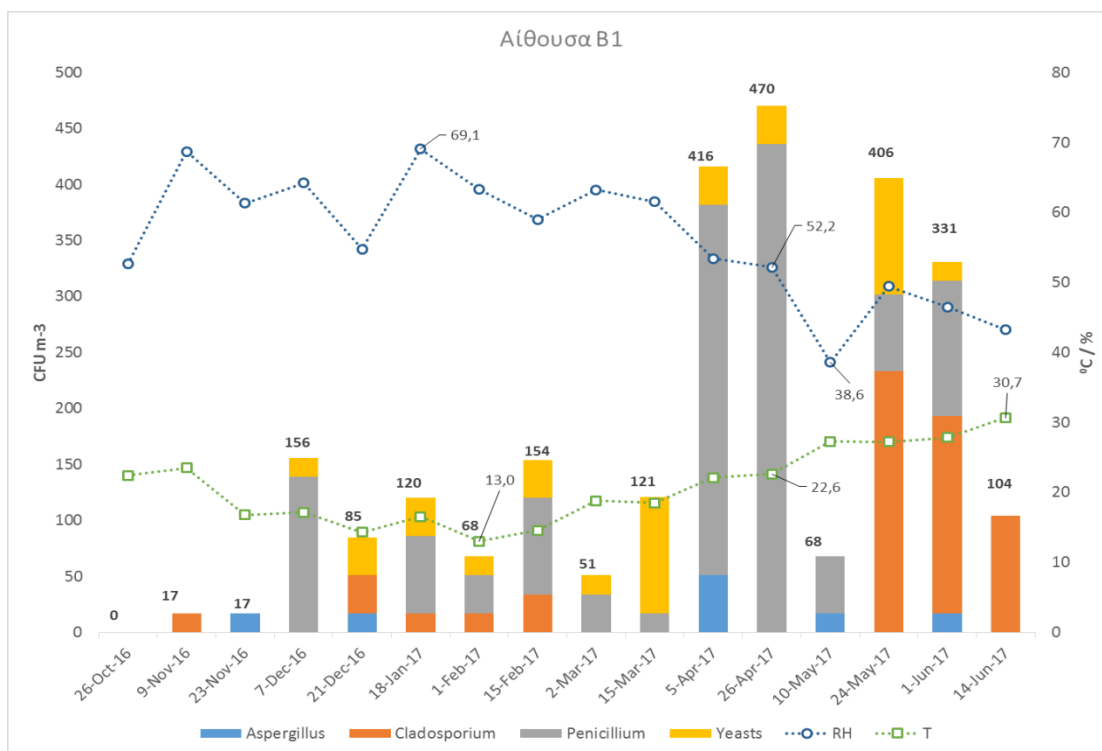
Σχήμα 5.13: Συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μυκήτων για διαφορετικές πειραματικές ημέρες στην αίθουσα Ε3



Σχήμα 5.14: Συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μυκήτων για διαφορετικές πειραματικές ημέρες στην αίθουσα Γ3



Σχήμα 5.15: Συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μυκήτων για διαφορετικές πειραματικές ημέρες στην αίθουσα Β3



Σχήμα 5.16: Συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μυκήτων για διαφορετικές πειραματικές ημέρες στην αίθουσα Β1

Πίνακας 5.7: Συσχέτιση μεταξύ αερομεταφερόμενων μυκήτων (γένος και σύνολο), εσωτερικής θερμοκρασίας (T), σχετικής υγρασίας (RH) και PM₁₀ σε όλες τις αίθουσες διδασκαλίας

Spearman's rho		T	RH	PM ₁₀
Aspergillus	Correlation Coefficient	,048	,054	,586*
	P-value	,645	,604	,045
Cladosporium	Correlation Coefficient	,392**	-,075	-,573
	P-value	,000	,467	,051
Penicillium	Correlation Coefficient	,146	,008	-,185
	P-value	,155	,936	,564
Yeasts	Correlation Coefficient	-,162	,031	-,016
	P-value	,115	,767	,961
Total fungi	Correlation Coefficient	,246*	-,016	-,201
	P-value	,016	,880	,530

** . Correlation is significant at p<0.01 level

* . Correlation is significant at p<0.05 level

5.2.2 Υπολογισμός δείκτη έκθεσης σε αερομεταφερόμενους μύκητες (Exposure Dose)

Εκτός από την διερεύνηση των συγκεντρώσεων των αερομεταφερόμενων μυκήτων μέσα στις τάξεις για διάφορες περιόδους, κρίνεται επίσης απαραίτητος ο υπολογισμός μιας άλλης εξίσου σημαντικής παραμέτρου όπως ο δείκτης προσωπικής έκθεσης των παιδιών (Exposure Dose ή ED) σε αυτούς τους ρύπους του αέρα εσωτερικού περιβάλλοντος. Διεθνείς δημοσιεύσεις όπως των Johnson-Restrepo και Kannan, 2009 έχουν επίσης μελετήσει τα αποτελέσματα του συντελεστή ED σε κλειστούς εκπαιδευτικούς χώρους. Η παρούσα εργασία αποτελεί την πρώτη προσπάθεια υπολογισμού τέτοιου δείκτη για ένα Ελληνικό εκπαιδευτικό κτίριο. Πέραν των μετρήσεων στις αίθουσες διδασκαλίας, χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον απαραίτητα δεδομένα που παρατίθενται αναλυτικά στο Εγχειρίδιο Προστασίας Παιδικής Έκθεσης (Child-Specific Exposure Handbook, 2011) του Οργανισμού Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (EPA). Συγκεκριμένα, η πρόσφατη μελέτη των Bragoszewska et al., 2018 που αναφέρεται στον υπολογισμό του ED για μαθητές σε σχολεία της Πολωνίας, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η ποσότητα των βακτηρίων που εισπνέεται από τα παιδιά, επηρεάζεται κυρίως από το βάρος και τις δραστηριότητες των μαθητών εντός των χώρων και δευτερευόντως από τα επίπεδα της εσωτερικής συγκέντρωσης μυκήτων. Για τον υπολογισμό του δείκτη έκθεσης (ED) σε μύκητες και στις 6 εξεταζόμενες τάξεις του 2^{ου} Δημοτικού σχολείου Νέας Σμύρνης, χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση 2:

$$ED = \frac{C \times IR \times IEF}{BW} \quad (2)$$

Όπου,

ED: Ο δείκτης προσωπικής έκθεσης σε σπόρια μυκήτων (Exposure dose) (CFU kg^{-1})

C: Μέση συγκέντρωση αερομεταφερόμενων μυκήτων (CFU m^{-3})

IEF: Εσωτερικό κλάσμα έκθεσης (Indoor exposure fraction) ή ώρες που δαπανώνται από τους μαθητές σε κάθε αίθουσα (h)

IR: Συντελεστής εισπνοής του κάθε μαθητή για διάφορες δραστηριότητες (Inhalation rate coefficient for different activities) ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)

BW: Μέσο βάρος του κάθε μαθητή (Average body weight) (kg)

Πρέπει να σημειωθεί ότι για να υπολογιστεί ο δείκτης IEF, χρησιμοποιήθηκε το επίσημο καθημερινό ωράριο του σχολείου (08:15 - 13:15 ή 5 ώρες) το οποίο ισχύει για όλους τους μαθητές. Επιπλέον, οι δραστηριότητες των παιδιών (χαμηλής, μέσης ή υψηλής έντασης) (δείκτης IR) αξιολογούνται συνδυάζοντας το ημερήσιο πρόγραμμα διδασκαλίας των μαθητών με τις παρατηρήσεις από το ημερολόγιο (logbook) που διατηρούσε επιστημονική ομάδα ύστερα από καθημερινές επισκέψεις στο σχολείο. Οι πληροφορίες αυτές, σε συνδυασμό με τις προτεινόμενες τιμές ανά κατηγορία δραστηριότητας που δίδονται από το Εγχειρίδιο Προστασίας Παιδικής Έκθεσης (Child-Specific Exposure Handbook) της EPA, οδήγησαν στον υπολογισμό του δείκτη IR για κάθε περίπτωση. Από την ίδια βιβλιογραφική πηγή, χρησιμοποιήθηκε η προτεινόμενη τιμή σωματικού βάρους (BW) για παιδιά ηλικίας 6 έως 11 ετών, καθότι δεν μπορούμε να γνωρίζουμε το βάρος κάθε παιδιού ξεχωριστά. Να σημειωθεί ότι το όνομα κάθε αίθουσας αντιπροσωπεύει την αντίστοιχη βαθμίδα των μαθητών (π.χ. Α για την 1^η τάξη, Ε για την 5^η τάξη κλπ.). Ο πίνακας 5.8 συνοψίζει τα αποτελέσματα.

Πίνακας 5.8: Συντελεστής προσωπικής έκθεσης (ED) σε αερομεταφερόμενους μύκητες για τους μαθητές όλων των εξεταζόμενων τάξεων

Αίθουσες		A3	B1	B2	B3	Γ3	Ε3
Μέση Συγκέντρωση μυκήτων (CFU m^{-3})		187,4	227,6	411,7	191,5	71,3	211,9
IEF (h)	Καθιστική / παθητική δραστηριότητα (IR: $4.8\text{E}-03 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$)	2	3	3	3	4	4
	Δραστηριότητα χαμηλής έντασης (IR: $1.1\text{E}-02 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$)	2	2	2	2	1	1
	Δραστηριότητα μέσης έντασης (IR: $2.2\text{E}-02 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$)	1	0	0	0	0	0
	Δραστηριότητα υψηλής έντασης (IR: $4.2\text{E}-02 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$)	0	0	0	0	0	0
Average BW (kg)		21,7	25,5	25,5	25,5	28,1	41,5
ED (CFU kg^{-1})		27,8	19,5	35,3	16,4	4,6	9,3

Όπως προκύπτει, ο υψηλότερος δείκτης έκθεσης ED σε αερομεταφερόμενους μύκητες ($35,3 \text{ CFU kg}^{-1}$) βρέθηκε στην αίθουσα διδασκαλίας B2, η οποία στην ενότητα 4.4.1 κατέδειξε και την πιο υψηλή μέση συγκέντρωση μυκήτων. Ωστόσο, οι ώρες που δαπανώνται για διαφορετικά επίπεδα

δραστηριότητας (χαμηλής, μέσης ή υψηλής έντασης) φαίνεται να διαδραματίζουν βασικό ρόλο στα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, στην τάξη Α3 όπου οι μικρότεροι σε ηλικία μαθητές πραγματοποιούν αρκετές δραστηριότητες (παιχνίδια, καλλιτεχνικές δραστηριότητες κλπ.), ο δείκτης ED έφτασε στο επίπεδο των $27,8 \text{ CFU kg}^{-1}$ για μέση συγκέντρωση αερομεταφερόμενων μυκήτων $187,4 \text{ CFU m}^{-3}$. Στην αίθουσα Ε3, παρόλο που η μέση συγκέντρωση των μυκήτων ήταν υψηλότερη ($211,9 \text{ CFU m}^{-3}$), οι μεγαλύτερης ηλικίας μαθητές είχαν μόνο 1 ώρα δραστηριότητας (χαμηλής) και έτσι ο δείκτης ED βρέθηκε πιο μειωμένος ($9,3 \text{ CFU kg}^{-1}$) από τον αντίστοιχο στην τάξη Α3. Παρόμοια αποτελέσματα απεικονίζονται και για τις υπόλοιπες αίθουσες. Ο συντελεστής σωματικού βάρους επίσης επηρέασε τον δείκτη ED στη παρούσα εργασία, καθώς οι προτεινόμενες τιμές για τα παιδιά ηλικίας 6-11 ετών (1η έως 5η τάξη) έχουν εύρος, από τη βιβλιογραφία, από 21,7 έως 41,5 kg.

5.3 Αιωρούμενα σωματίδια (PM)

5.3.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα, παρατίθεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} , $PM_{2,5}$ και PM_{10} τα οποία καταγράφηκαν στο εσωτερικό και άμεσο εξωτερικό περιβάλλον του κτιριακού συγκροτήματος. Όπως αναφέρεται στην ενότητα 3.2.1 οι μετρήσεις αφορούν τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου Γ3 και Β1 όπως και τις αντίστοιχες οροφές τους (πράσινη και ανατολική οπλισμένου σκυροδέματος). Η ανάλυση αναφέρεται στη πρώτη πειραματική περίοδο μετρήσεων με την απουσία μαθητών (Ιούνιος-Ιούλιος 2016) και στη περίοδο Ιανουάριος - Ιούνιος 2017, με τη παρουσία μαθητών στο σχολείο. Έτσι καλύπτεται το φάσμα σχεδόν μιας ολόκληρης σχολικής χρονιάς και εξετάζεται η εποχικότητα όπως και η επιρροή της ανθρώπινης δραστηριότητας στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων.

Τα αποτελέσματα δείχνουν σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων και για τις δύο αίθουσες διδασκαλίας συγκριτικά με θερμοθετημένα από την Ευρωπαϊκή Ένωση όρια έκθεσης. Η θέση της κάθε τάξης (κάτω από την πράσινη ή ανατολική οροφή) δεν φαίνεται να επηρεάζει τα επίπεδα σωματιδίων από τα πιο λεπτόκοκκα έως τα πιο χονδρόκοκκα. Ενδεικτικά, όπως παρουσιάζει ο πίνακας 5.9 οι μέσες συγκεντρώσεις των PM_{10} , $PM_{2,5}$ και PM_{10} κατά την περίοδο των μαθημάτων μετρήθηκαν στα 0,82, 3,30 και 12,21 $\mu\text{g m}^{-3}$ για την τάξη κάτω από την πράσινη οροφή (Γ3) και ελαφρώς χαμηλότερες στην αίθουσα Β1 κάτω από την ανατολική οροφή οπλισμένου σκυροδέματος (0,77, 2,76 και 10,77 $\mu\text{g m}^{-3}$ αντιστοίχως). Ωστόσο, η ανθρώπινη παρουσία και δραστηριότητα φαίνεται να παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην κατανομή των σωματιδίων όπως αναφέρεται και στην έρευνα των Buonanno et al., 2013 ύστερα από μετρήσεις σε σχολείο της Ιταλίας. Συγκεκριμένα, οι μέσες τιμές των λόγων των εσωτερικών προς τις εξωτερικές συγκεντρώσεις (I/O) των τριών ειδών αερομεταφερόμενων σωματιδίων υπολογίστηκαν με και χωρίς την παρουσία μαθητών. Κατά τις ώρες διδασκαλίας (περίοδος Ιανουαρίου-Ιουνίου 2017) ο μέσος λόγος I/O για τα PM_{10} βρέθηκε να είναι ίσος με 1,03. Αντιθέτως, το καλοκαίρι του 2016, όταν δεν υπήρχε ανθρώπινη παρουσία στο σχολείο, ο ίδιος λόγος I/O των PM_{10} υπολογίστηκε 0,60 τον Ιούνιο και αντίστοιχα 0,46 τον Ιούλιο. Συνάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι οι συγκεντρώσεις PM_{10} εσωτερικών χώρων εμφανίζονται σε υψηλότερα επίπεδα από τις αντίστοιχες εξωτερικές, όταν λειτουργεί το σχολείο. Οι διάφορες δραστηριότητες των μαθητών εντός των τάξεων, προκαλούν την επαναιώρηση των χονδρόκοκκων κυρίως σωματιδίων και ευθύνονται για τη μεγαλύτερη έκθεση των μαθητών σε PM_{10} εντός των αιθουσών διδασκαλίας. Το συμπέρασμα αυτό έρχεται σε συμφωνία με προηγούμενες αντίστοιχες έρευνες των Alves et al., 2014 και Fromme et al., 2007. Αντιθέτως, για τα ίδια διαστήματα, η μέση αναλογία I/O για τα $PM_{2,5}$ και PM_{10} παρέμεινε μικρότερη της μονάδος (<1), γεγονός που αποδεικνύει τη σημαντική επίδραση των εξωτερικών πηγών εκπομπής στα σωματίδια αυτά, όπως και την απουσία οποιασδήποτε εσωτερικής πηγής εκπομπής στις εξεταζόμενες αίθουσες. Με βάση τον προσανατολισμό του σχολείου και την κατεύθυνση του ανέμου, δυνητικές εξωτερικές πηγές θα μπορούσαν να είναι η κίνηση των οχημάτων στο κέντρο της Αθήνας (NNW) όπως και οι εκπομπές από τα πλοία στο λιμάνι του Πειραιά (SW).

Πίνακας 5.9: Στατιστικά στοιχεία για συγκεντρώσεις και λόγους I/O στις αίθουσες Γ3 και Β1 από τον Ιανουάριο έως τον Ιούνιο του 2017.

Ιανουάριος–Ιούνιος 2017									
Ρύπος	PM ₁ (μg m ⁻³)	PM _{2.5} (μg m ⁻³)	PM ₁₀ (μg m ⁻³)	PM ₁ (μg m ⁻³)	PM _{2.5} (μg m ⁻³)	PM ₁₀ (μg m ⁻³)	PM ₁ I/O	PM _{2.5} I/O	PM ₁₀ I/O
Αίθουσα	Γ3	Γ3	Γ3	Β1	Β1	Β1	Γ3&Β1	Γ3&Β1	Γ3&Β1
Μέσος Όρος	0,82	3,30	12,25	0,77	2,76	10,77	0,57	0,48	1,03
Διάμεσος	0,77	2,97	6,30	0,68	2,30	4,23	0,58	0,44	0,92
Τυπική απόκλιση	0,38	0,94	13,69	0,44	1,73	15,76	0,16	0,11	0,69
Ελάχιστο	0,16	0,73	0,90	0,10	0,50	0,70	0,37	0,40	0,40
Μέγιστο	2,31	11,72	71,62	4,72	13,05	95,63	0,76	0,63	2,10

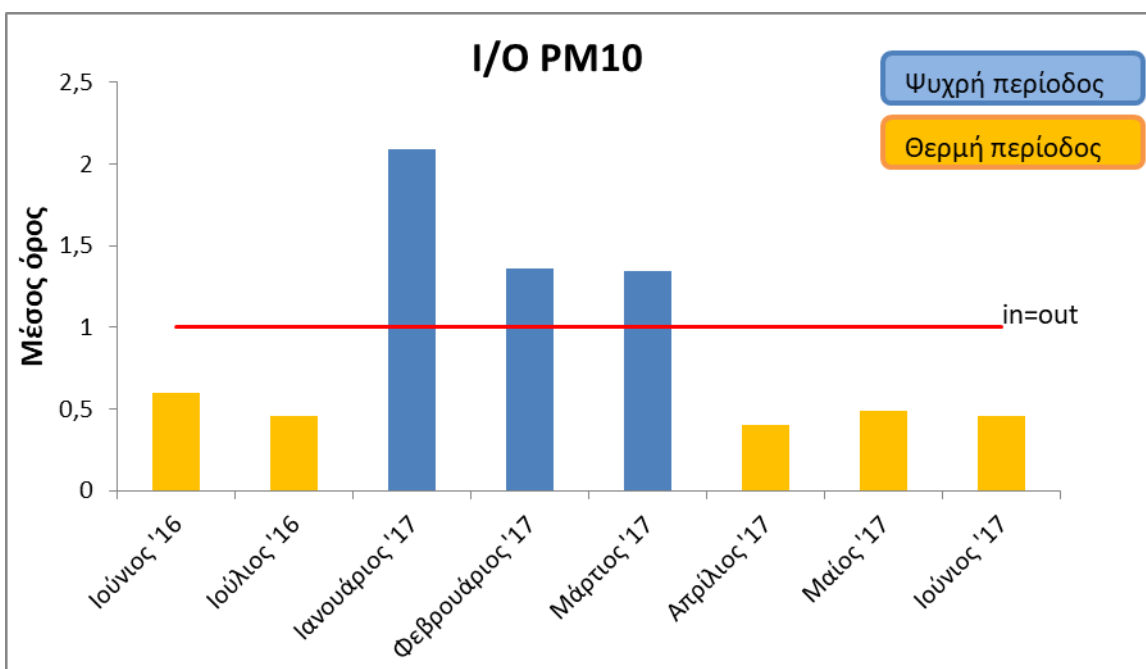
Αναλύοντας τα αποτελέσματα των I/O αναλογιών ανά μηνά προκύπτουν κάποια επιπρόσθετα συμπεράσματα για την επιρροή της εποχικότητας και της ανθρώπινης δραστηριότητας στις συγκεντρώσεις των αιρούμενων σωματιδίων, εντός των αιθουσών. Αρχικά γίνεται αναφορά στα PM₁₀ τα οποία παρουσίασαν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Στο σχήμα 5.17 εμφανίζονται οι μέσες τιμές των λόγων I/O για κάθε μήνα που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με ή χωρίς την παρουσία μαθητών εντός των αιθουσών. Έχουν χωριστεί σε δυο κατηγορίες με βάση την εποχή και πιο συγκεκριμένα την περίοδο λειτουργίας του κεντρικού συστήματος θέρμανσης του σχολείου (έως αρχές Απριλίου). Κατά συνέπεια οι μήνες Ιανουάριος, Φεβρουάριος και Μάρτιος αντιπροσωπεύουν την ψυχρή περίοδο ενώ οι υπόλοιποι τη θερμή.

Σε αυτό το διάγραμμα είναι εμφανές ότι οι μέσοι όροι των I/O λόγων συγκεντρώσεων PM₁₀ για τους ψυχρούς μήνες υπερβαίνουν τη μονάδα ενώ οι αντίστοιχοι των θερμών μηνών βρίσκονται κάτω από αυτήν ανεξάρτητα εάν η περίοδος μέτρησης αφορά ανθρώπινη παρουσία ή μη εντός των αιθουσών. Το αποτέλεσμα αυτό οδηγεί σε δύο σημαντικά συμπεράσματα. Αφενός καταδεικνύει τη σημασία των κλειστών παραθύρων και ως εκ τούτου τον μη επαρκή εξαερισμό των αιθουσών κατά τη ψυχρή περίοδο, όπου λόγω της κίνησης των μαθητών μέσα στη τάξη τα εσωτερικά PM₁₀ τείνουν να κυριαρχούν έναντι των εξωτερικών. Αφετέρου, είναι εμφανές ότι πέραν της επαναιώρησης των χονδρόκοκκων σωματιδίων λόγω ανθρώπινης δραστηριότητας, δεν υπάρχει κάποια άλλη σημαντική εσωτερική πηγή εκπομπής PM₁₀ καθώς κατά τους θερμούς μήνες, με ανοιχτά παράθυρα, τα εξωτερικά PM₁₀ υπερισχύουν έναντι των εσωτερικών. Για κανένα μήνα της θερμής περιόδου δεν παρατηρείται μέση τιμή της I/O αναλογίας PM₁₀ που να υπερβαίνει ή έστω να πλησιάζει τη μονάδα. Όλες οι παραπάνω παρατηρήσεις παρατίθενται αριθμητικά στον πίνακα 5.10 όπου φαίνεται ξεκάθαρα ότι κατά

του ψυχρού μήνες οι μέσοι λόγοι I/O των PM₁₀ βρέθηκαν μεγαλύτεροι της μονάδας (από 1,35 τον Μάρτιο έως 2,10 τον Ιανουάριο) ενώ κατά τους θερμούς μήνες όλες οι τιμές βρίσκονται κάτω από τη μονάδα με ή χωρίς την παρουσία μαθητών.

Πίνακας 5.10: Μέσοι όροι των I/O αναλογιών PM₁₀ για περιόδους με και χωρίς μαθητές

Μέσες Μηνιαίες Τιμές λόγω I/O	
Χρονική Περίοδος	PM ₁₀
2016 (απουσία μαθητών)	
Ιούνιος	0,60
Ιούλιος	0,46
2017 (παρουσία μαθητών)	
Ιανουάριος	2,10
Φεβρουάριος	1,36
Μάρτιος	1,35
Απρίλιος	0,40
Μάιος	0,49
Ιούνιος	0,45



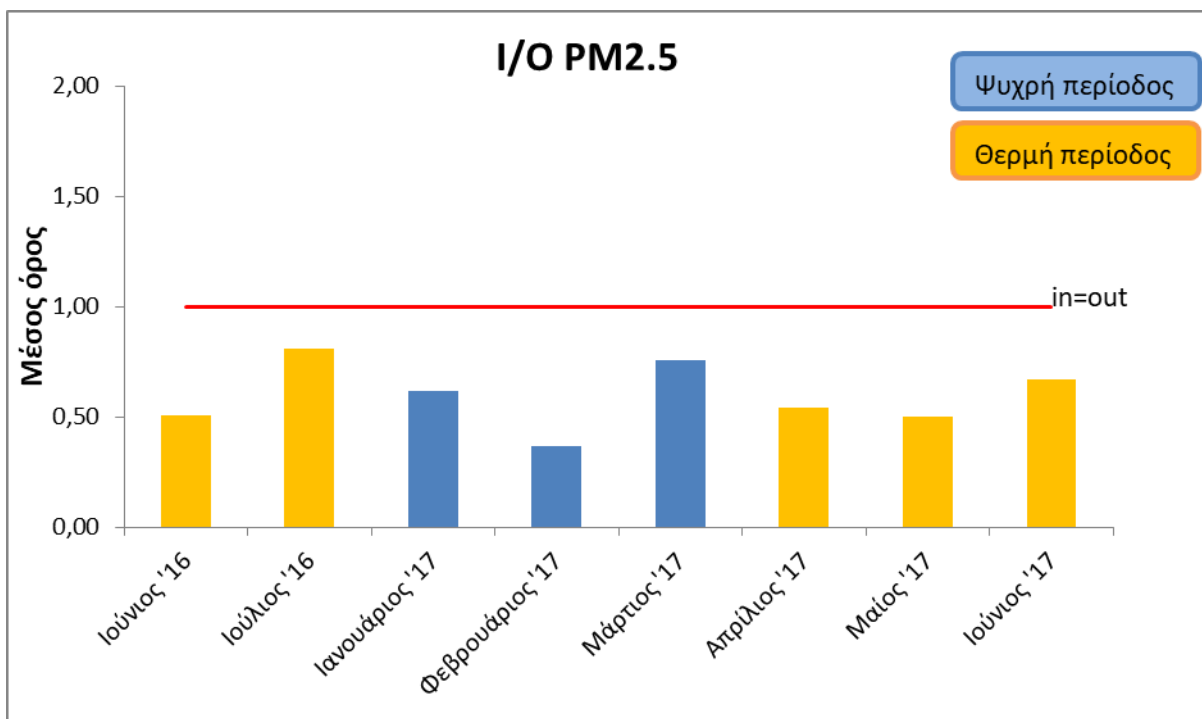
Σχήμα 5.17: I/O αναλογίες PM₁₀ για κάθε μήνα μέτρησης

Αντίθετα με τα χονδρόκοκκα, τα λεπτόκοκκα σωματίδια PM₁ και PM_{2.5} δεν εμφάνισαν καμία εσωτερική πηγή στις αίθουσες Γ3 και Β1. Η εποχικότητα και οι δραστηριότητες των μαθητών δεν φαίνεται να επηρεάζουν τις εσωτερικές συγκεντρώσεις των ρύπων αυτών καθώς οι λόγοι των μέσων τιμών I/O δεν ξεπερνούν την μονάδα για κανένα από τους μήνες κατά τους οποίους

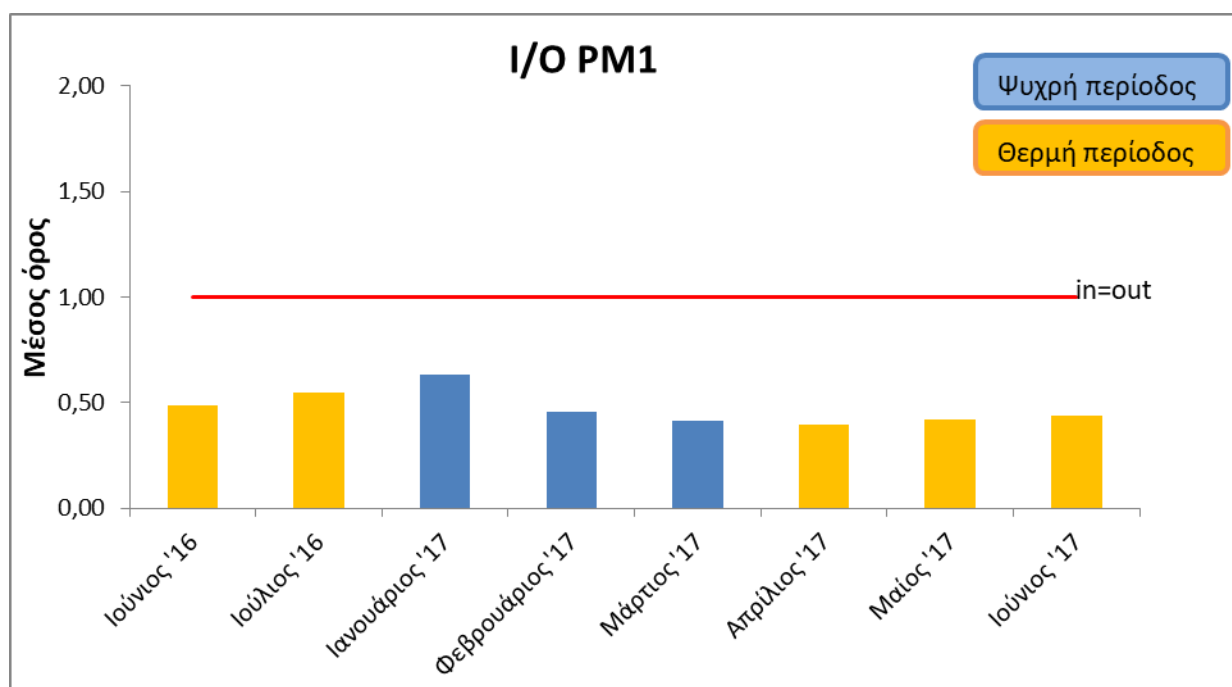
πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις. Αυτό σημαίνει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των σωματιδίων PM_{1} και $PM_{2,5}$ προέρχεται από τον έξω χώρο, γεγονός πολύ θετικό όσον αφορά την υγεία των μαθητών. Στο πίνακα 5.11 όπως και στα σχήματα 5.18-19 παρατίθενται αριθμητικά και γραφικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Είναι ξεκάθαρο ότι όλες οι μέσες τιμές των λόγων I/O είναι μικρότερες της μονάδος και κυμαίνονται για τα PM_{1} από 0,40 έως 0,63 και για τα $PM_{2,5}$ από 0,37 έως 0,81. Επιπλέον, δεν φαίνεται να υπάρχει κάποιου είδους πρότυπο στη συμπεριφορά των σωματιδίων πέραν του ότι τα εξωτερικά υπερσχύουν των εσωτερικών σε όλες τις περιπτώσεις.

Πίνακας 5.11: Μέσοι όροι των I/O αναλογιών PM_{1} & $PM_{2,5}$ για περιόδους με και χωρίς μαθητές

Μέσες Μηνιαίες Τιμές λόγων I/O		
Περίοδος	PM_{1}	$PM_{2,5}$
2016 (απουσία μαθητών)		
Ιούνιος	0,49	0,51
Ιούλιος	0,55	0,81
2017 (παρουσία μαθητών)		
Ιανουάριος	0,63	0,62
Φεβρουάριος	0,46	0,37
Μάρτιος	0,41	0,76
Απρίλιος	0,40	0,54
Μάιος	0,42	0,50
Ιούνιος	0,44	0,67



Σχήμα 5.18: I/O αναλογίες PM_{2.5} για κάθε μήνα μέτρησης



Σχήμα 5.19: I/O αναλογίες PM₁ για κάθε μήνα μέτρησης

Σε ότι αφορά τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στα διάφορα πειραματικά σημεία, όπως προαναφέρθηκε βρέθηκαν σε χαμηλά επίπεδα σχετικά με τα θεσμοθετημένα όρια ($50 \mu\text{g m}^{-3}$ ημερησίως για τα PM_{10} και $25 \mu\text{g m}^{-3}$ ετησίως για τα $\text{PM}_{2.5}$). Η πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει από τα σχήματα 5.20-22 είναι ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των μετρήσεων (πάνω από το 75%) βρίσκεται κάτω από τα επιτρεπτά όρια έκθεσης. Αυτό ισχύει τόσο για τα PM_{10} όσο και για τα $\text{PM}_{2.5}$ γεγονός που είναι θετικό για την ποιότητα του αέρα στις αίθουσες όπως και για το άμεσο εξωτερικό περιβάλλον (οροφές). Για τα PM_1 παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχει θεσμοθετημένο όριο έκθεσης, οι τιμές τους είναι πολύ χαμηλές σχεδόν στο όριο ανίχνευσης του οργάνου. Οι περισσότερες ακραίες τιμές των PM_{10} βρίσκονται στην αίθουσα B1 όπως και η μεγαλύτερη τιμή που σημειώθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος. Αυτό ίσως οφείλεται και στην αυξημένη δραστηριότητα των παιδιών της 2^{ης} τάξης (B1) συγκριτικά με τους μαθητές της 3^{ης} (Γ3). Η επιρροή της αυξημένης δραστηριότητας των παιδιών των μικρότερων τάξεων στα αποτελέσματα της εσωτερικής ποιότητας του αέρα είναι κάτι που παρατηρήθηκε και σε άλλους αέριους ρύπους όπως τα TVOC και οι αερομεταφερόμενοι μύκητες (ενότητες 4.3 και 4.4.). Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι η εμφάνιση πληθώρας ακραίων τιμών, που αφενός είναι οι μόνες τιμές που ξεπερνούν τα επιτρεπτά όρια για την περίπτωση των PM_{10} και $\text{PM}_{2.5}$ και αφετέρου αντικατοπτρίζουν το φαινόμενο της επαναιώρησης των αιρούμενων σωματιδίων εντός των αιθουσών που καταγράφονται ως στιγμιαία μέγιστα. Το φαινόμενο αυτό είναι ένας συνδυασμός της κίνησης των παιδιών εντός των αιθουσών αλλά και του ανοίγματος ή κλεισίματος των πορτών και παραθύρων για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα (διαλείμματα). Ο απότομος αερισμός της εκάστοτε αίθουσας από τη μια μεριά δημιουργούσε συνθήκες βεβιασμένης κυκλοφορίας και ρεύματα αέρα, που λειτουργούν ως μέσα απομάκρυνσης των αέριων ρύπων, αλλά από την άλλη μεριά, λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας δημιουργούσε συνθήκες επαναιώρησής τους. Συγκεκριμένα, οι μέσοι όροι συγκεντρώσεων PM_{10} στις δύο αίθουσες έχουν πολύ μικρή διαφορά ($12,25 \mu\text{g m}^{-3}$ στη Γ3 και $10,77 \mu\text{g m}^{-3}$ στη B3) θεωρητικά ασήμαντη, όπως φαίνεται στο πίνακα 5.12. Από τον ίδιο πίνακα είναι εμφανές ότι η πράσινη οροφή έχει ελαφρώς χαμηλότερα επίπεδα μέσης συγκέντρωσης συγκριτικά με την ανατολική ($14,66 \mu\text{g m}^{-3}$ και $16,76 \mu\text{g m}^{-3}$) ίσως λόγω της παρουσίας των φυτών τα οποία έχουν τη δυνατότητα ανά περιόδους να συκρατούν ποσότητες αιωρούμενων σωματιδίων στα φυλλώματά τους όπως αναφέρουν στην έρευνά τους οι Yang et al., 2008. Στη συγκεκριμένη μελέτη ύστερα από μετρήσεις σε πράσινες οροφές στο Σικάγο, συμπεραίνεται ότι τα φυτά μπορούν να παρακρατήσουν έως και 14% των μετρούμενων PM_{10} ετησίως. Όπως είναι αναμενόμενο οι τυπικές αποκλίσεις των PM_{10} εντός των τάξεων βρέθηκαν μεγαλύτερες των αντίστοιχων εξωτερικών, λόγω της κίνησης των παιδιών που επιφέρει επαναιώρηση των σωματιδίων και καταγραφή μεγίστων από τους αισθητήρες καταγραφής. Παρόμοια εικόνα και για τα $\text{PM}_{2.5}$ και PM_1 (πίνακες 5.13-14) με τις συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων είτε εσωτερικού είτε εξωτερικού περιβάλλοντος να βρίσκονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

Πίνακας 5.12: Στατιστικά στοιχεία των PM₁₀ στις αίθουσες και στις αντίστοιχες οροφές για όλη τη πειραματική περίοδο

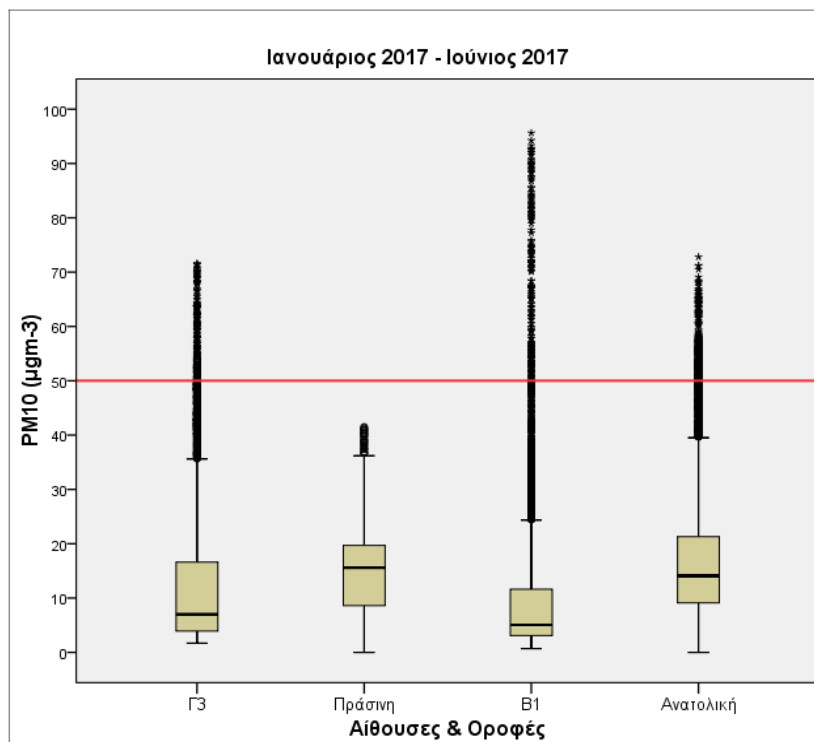
PM ₁₀ (μg m ⁻³)		Αίθουσα Γ3	Πράσινη Οροφή	Αίθουσα Β1	Ανατολική Οροφή
Μέσος Όρος		12,25	14,66	10,77	16,76
Διάμεσος		6,30	15,60	4,23	14,00
Τυπική Απόκλιση		13,69	7,17	15,75	11,68
Ελάχιστο		1,33	2,90	1,30	3,00
Μέγιστο		71,62	41,50	95,63	72,80
Τεταρτημόρια	25,00	3,70	8,60	2,70	9,70
	50,00	6,30	15,60	4,23	14,00
	75,00	15,19	19,70	9,33	19,53

Πίνακας 5.13: Στατιστικά στοιχεία των PM_{2.5} στις αίθουσες και στις αντίστοιχες οροφές για όλη τη πειραματική περίοδο

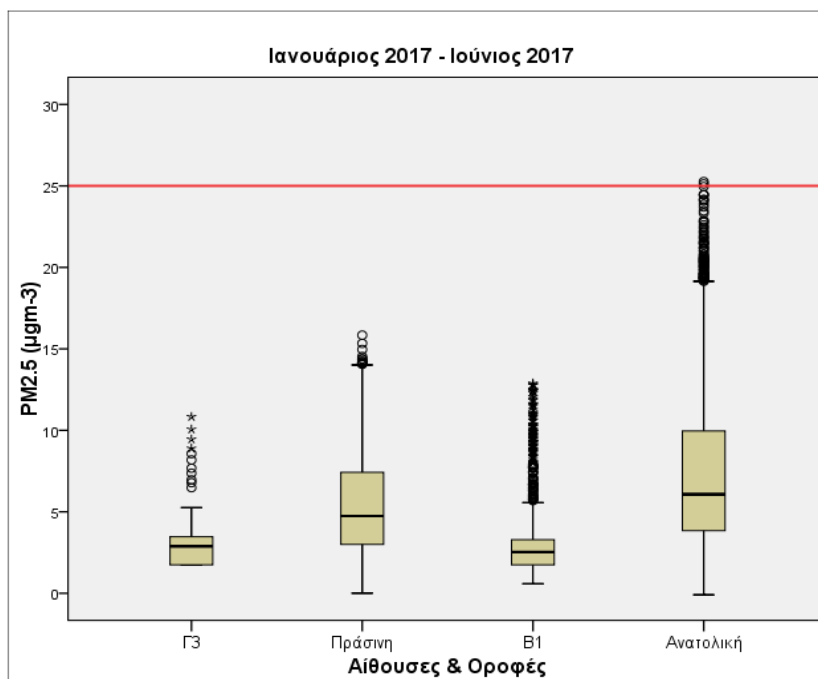
PM _{2.5} (μg m ⁻³)		Αίθουσα Γ3	Πράσινη Οροφή	Αίθουσα Β1	Ανατολική Οροφή
Μέσος Όρος		3,30	5,45	2,76	6,65
Διάμεσος		2,97	4,74	2,30	5,31
Τυπική Απόκλιση		1,71	3,18	1,73	4,55
Ελάχιστο		1,25	1,29	1,30	1,20
Μέγιστο		11,72	15,84	13,05	25,26
Τεταρτημόριο	25,00	2,09	3,00	1,72	3,51
	50,00	2,97	4,74	2,30	5,31
	75,00	3,91	7,43	3,28	8,39

Πίνακας 5.14: Στατιστικά στοιχεία των PM₁ στις αίθουσες και στις αντίστοιχες οροφές για όλη τη πειραματική περίοδο

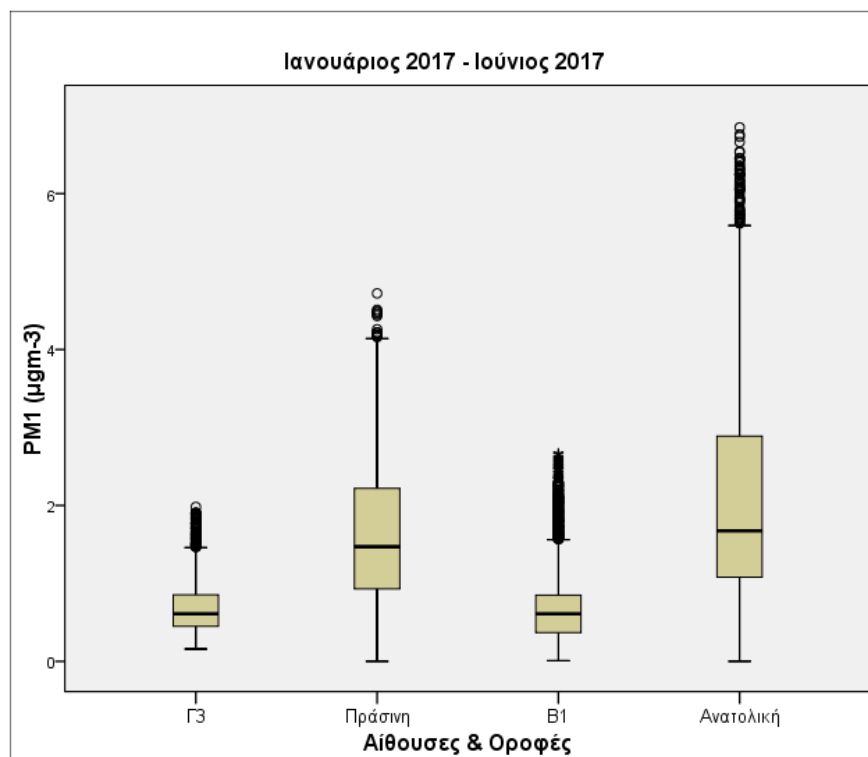
PM ₁ (μg m ⁻³)		Αίθουσα Γ3	Πράσινη Οροφή	Αίθουσα Β1	Ανατολική Οροφή
Μέσος Όρος		0,82	1,65	0,77	1,82
Διάμεσος		0,77	1,47	0,68	1,41
Τυπική Απόκλιση		0,38	0,91	0,44	1,28
Ελάχιστο		0,23	0,80	0,20	0,90
Μέγιστο		2,31	4,72	2,67	6,85
Τεταρτημόρια	25,00	0,53	0,93	0,46	0,92
	50,00	0,77	1,47	0,68	1,41
	75,00	1,03	2,22	0,99	2,37



Σχήμα 5.20: Συνολικές συγκεντρώσεις PM₁₀ στις αίθουσες και στις αντίστοιχες οροφές για τη πειραματική περίοδο Ιανουάριος- Ιούνιος 2017



Σχήμα 5.21: Συνολικές συγκεντρώσεις PM_{2.5} στις αίθουσες και στις αντίστοιχες οροφές για τη πειραματική περίοδο Ιανουάριος- Ιούνιος 2017



Σχήμα 5.22: Συνολικές συγκεντρώσεις PM_1 στις αίθουσες και στις αντίστοιχες οροφές για τη πειραματική περίοδο Ιανουάριος- Ιούνιος 2017

Ύστερα από την ανάλυση των συνολικών αποτελεσμάτων σειρά έχει η μελέτη επιλεγμένων τμημάτων από τις μετρήσεις με στόχο την εμβάθυνση και την εξειδίκευση σε μια κλίμακα μικρότερη από αυτή του μήνα, ιδιαίτερα κατά τις ώρες των μαθημάτων όπου οι μαθητές βρίσκονται εντός των αιθουσών και η έκθεσή τους στα αιρούμενα σωματίδια είναι άμεση. Στην ακόλουθη ενότητα αποτυπώνονται τα αποτελέσματα μιας τέτοιου είδους ανάλυσης.

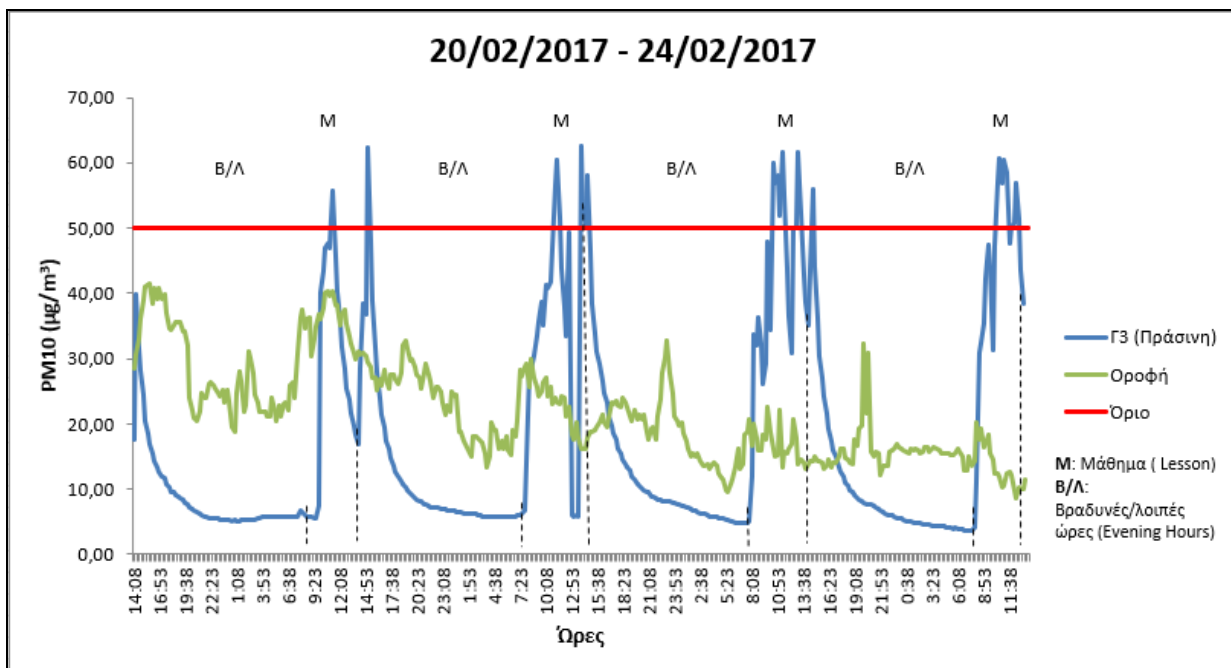
5.3.2 Ημερήσια αποτελέσματα

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι να διερευνηθεί η συμπεριφορά των αιωρούμενων σωματιδίων κατά τη διάρκεια μιας τυπικής εβδομάδας. Αφού γίνει αυτό θα σημειωθούν μερικές ημέρες οι οποίες παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον ξεφεύγοντας από το τυπικό προφίλ και χρήζουν παρατήρησης. Πρόκειται για ημέρες στις οποίες σε ώρα μαθήματος ή και όχι, η συγκέντρωση των σωματιδίων ξεπερνούσε κατά πολύ το επιτρεπτό όριο (extreme cases) ή ακόμα και για ημέρες στις οποίες επικρατούσαν ακραία καιρικά φαινόμενα. Οπότε αξίζει να αναφερθούν ημέρες για τις οποίες υπήρχε μεγάλη ή μικρή σχετική υγρασία και θερμοκρασία. Το πλήθος των τιμών που ξεπερνούν το όριο μπορεί να είναι μικρό αλλά όπως θα δειχθεί και παρακάτω ότι συμβαίνει κατά βάση τις ώρες που πραγματοποιούνται δραστηριότητες μέσα στην αίθουσα. Ιδιαίτερα για τα $PM_{2.5}$, οι συγκεντρώσεις είναι αρκετά μικρότερες σε σχέση με το θεσμοθετημένο όριο έκθεσης. Παρακάτω, παρατίθενται τα σημαντικότερα διαγράμματα ημερήσιων χρονοσειρών αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ όλα τα επιπλέον στοιχεία παρατίθενται στο **Παράρτημα ΣΤ1**.

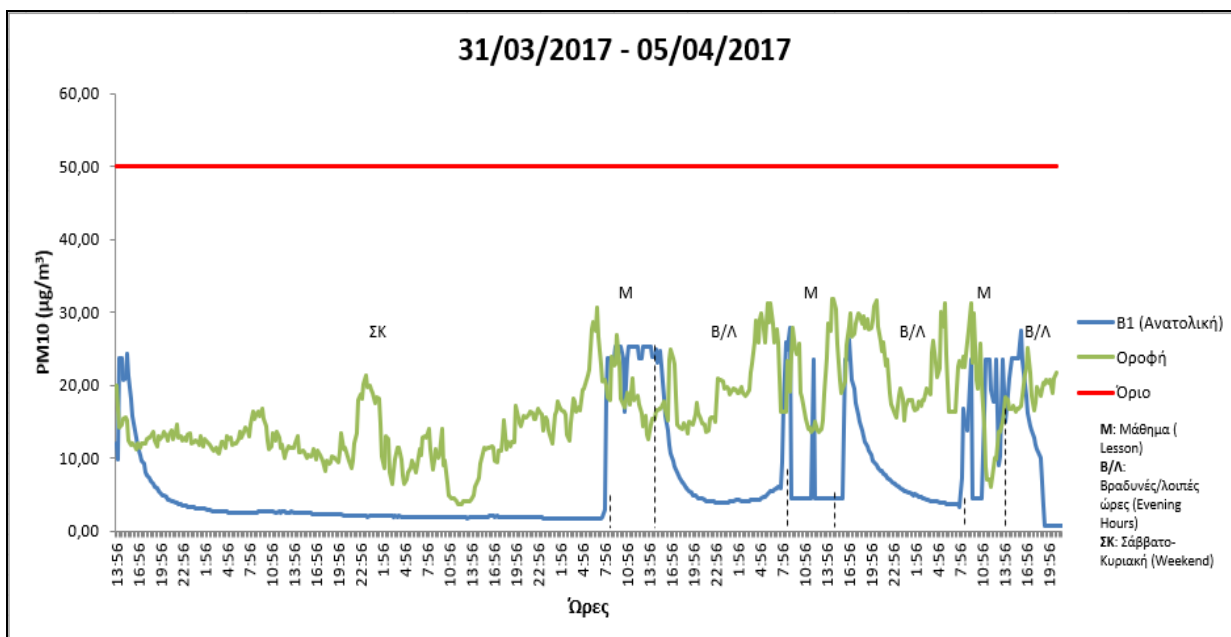
Προτού γίνει αναφορά σε ημέρες ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι μείζονος σημασίας να μελετηθούν οι ημέρες τυπικής συμπεριφοράς των σωματιδίων. Στο σχήμα 5.23 (α και β) που αφορά σε συγκεντρώσεις PM_{10} για διάστημα πέντε ημερών, για τις αίθουσες Γ3 και Β1 όπως και για αντίστοιχα εξωτερικά τους περιβάλλοντα (την πράσινη οροφή και την ανατολική οροφή οπλισμένου σκυροδέματος). Επιλέχθηκαν δυο χρονικά διαστήματα για τα οποία δεν παρατηρείται κάποιο ακραίο φαινόμενο. Σε κάθε διάγραμμα υπάρχουν κάθετες διακεκομμένες γραμμές με σκοπό την ανάδειξη των ωρών διδασκαλίας μέσα σε κάθε αίθουσα. Το επεξηγηματικό πλαίσιο σχετικά με τους συμβολισμούς των διαγραμμάτων έχει ως εξής:

- **Μ** : Μάθημα (Lesson) , πρόκειται για τις ώρες στις οποίες το σχολείο λειτουργούσε και γινόταν μαθήματα και λοιπές δραστηριότητες μέσα στην αίθουσα.
- **Β/Λ** : Βραδινές/Λοιπές ώρες (Evening Hours), είναι οι υπόλοιπες ώρες μέσα στη μέρα μέχρι την επόμενη που ξεκινά το σχολείο να λειτουργεί. Δηλαδή είναι απογευματινές ώρες και βραδινές στις οποίες δεν υπάρχουν άνθρωποι στο χώρο.
- **ΣΚ** : Σάββατο – Κυριακή (Weekend). Πρόκειται για τις δυο μέρες της εβδομάδας στις οποίες το σχολείο είναι κλειστό.

Στο σχήμα 5.23 (α και β), είναι εμφανές και στις δύο αίθουσες ότι τις ώρες που δεν υπάρχει δραστηριότητα οι συγκεντρώσεις των PM_{10} είναι αρκετά χαμηλές, κάτω από τα $10 \mu\text{g m}^{-3}$. Όταν η ώρα πλησιάζει 8:00 το πρωί που το σχολείο ανοίγει και γίνονται οι πρώτες δραστηριότητες, οι συγκεντρώσεις ανεβαίνουν κατακόρυφα και στη περίπτωση της αίθουσας Γ3, τα μέγιστα ξεπερνούν το ημερήσιο όριο των $50 \mu\text{g m}^{-3}$. Είναι επίσης ξεκάθαρο ότι κατά το διάστημα του σχολάσματος παρατηρείται μια μείωση των συγκεντρώσεων PM_{10} με σχεδόν λογαριθμικό τρόπο. Οποιαδήποτε υψηλή συγκέντρωση μετά τις 13:15 οφείλεται στις τακτικές επισκέψεις του συνεργείου καθαρισμού των αιθουσών. Η επιρροή της ανθρώπινης δραστηριότητας φαίνεται ξεκάθαρα από τις κορυφές των συγκεντρώσεων που σημειώνονται μόνο κατά τις ώρες των μαθημάτων. Οι αυξομειώσεις κατά τη διάρκεια του μαθήματος οφείλεται στα διαλείμματα ανά τακτά χρονικά διαστήματα τα οποία είχαν χρονική διάρκεια περίπου 15 λεπτών. Είναι σημαντικό λοιπόν να σχολιαστεί ότι δεν υπάρχει κάποια εσωτερική πηγή εκπομπής PM_{10} πέραν της επαναίωσης από τη δραστηριότητα των μαθητών στις αίθουσες, καθώς τις βραδινές ώρες με κλειστά τα παράθυρα, οι συγκεντρώσεις είναι πολύ χαμηλές. Οι μετρήσεις στις οροφές δε φαίνεται να ακολουθούν κάποια ιδιαίτερη πορεία ή να έχουν κάποιο συγκεκριμένο πρότυπο. Οι συγκεντρώσεις των PM_{10} στο άμεσο εξωτερικό περιβάλλον του σχολείου επηρεάζονταν κυρίως από τα καιρικά φαινόμενα που επικρατούσαν τη κάθε ημέρα όπως και από τις τοπικές πηγές ρύπανσης.



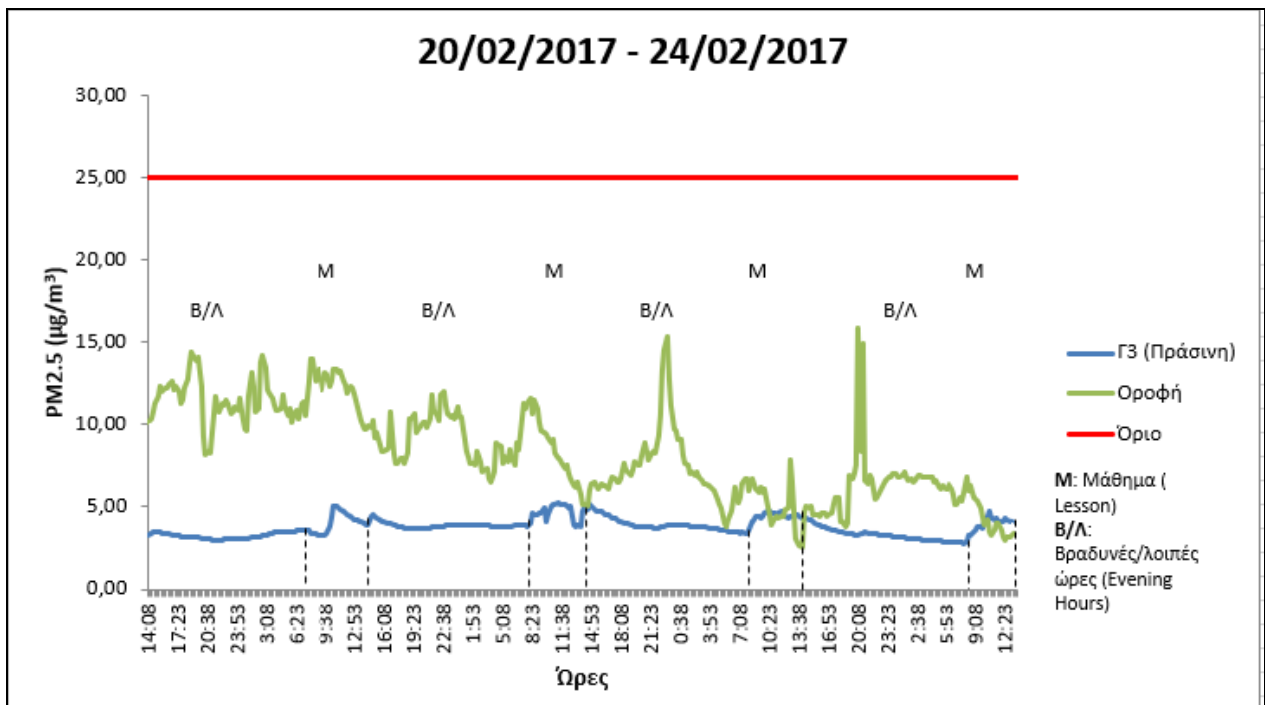
(α)



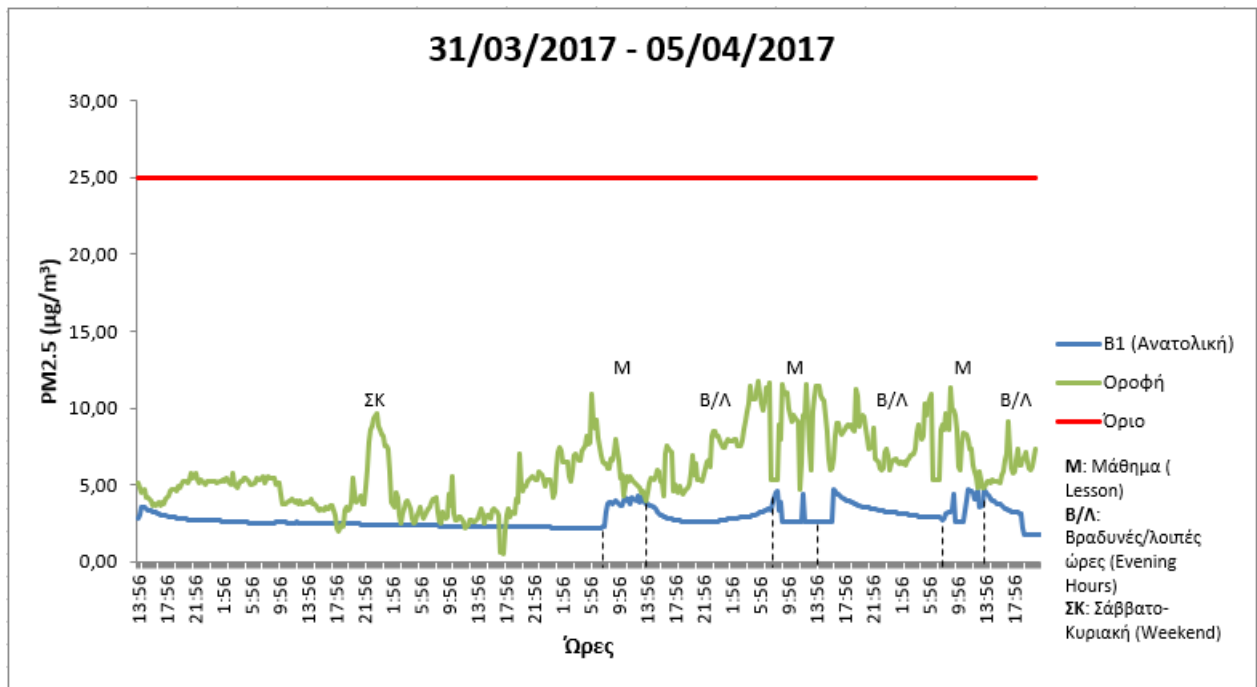
(β)

Σχήμα 5.23: Απεικόνιση τυπικής συμπεριφοράς συγκεντρώσεων PM₁₀ για διαφορετικές περιόδους για (α) την αίθουσα Γ3 κάτω από την πράσινη οροφή και (β) την αίθουσα Β1 κάτω από την ανατολική οροφή σπλισμένου σκυροδέματος

Στα σχήματα 5.24 (α και β) και 5.25 (α και β) φαίνονται οι χρονοσειρές για $PM_{2.5}$ και PM_{10} για τις ίδιες εβδομάδες που επιλέχθηκαν για τα PM_{10} . Τα συμπεράσματα είναι παρόμοια με την περίπτωση των PM_{10} , φαίνεται πως και αυτά τα δύο είδη αιωρούμενων σωματιδίων σχετίζονται άμεσα με τη δραστηριότητα των παιδιών μέσα στις αίθουσες. Η διαφορά εδώ είναι ότι οι εξωτερικές μετρήσεις υπερβαίνουν σχεδόν πάντα τις αντίστοιχες εσωτερικές. Επιπλέον, οι εσωτερικές συγκεντρώσεις όχι μόνο δεν υπερβαίνουν πουθενά τα επιτρεπτά όρια (για τη περίπτωση των $PM_{2.5}$) αλλά είναι τόσο χαμηλές που με σιγουριά συμπεραίνεται η απουσία εσωτερικών πηγών εκπομπής. Όπως και στην περίπτωση των χονδρόκοκκων σωματιδίων (PM_{10}) παρατηρείται μια αύξηση των συγκεντρώσεων κατά τις ώρες μαθήματος και μια μείωση όταν το σχολείο κλείνει. Επιπροσθέτως και σε αυτή τη περίπτωση, τα PM_{10} και $PM_{2.5}$ στις οροφές δε φαίνεται να ακολουθούν κάποιο πρότυπο συμπεριφοράς.

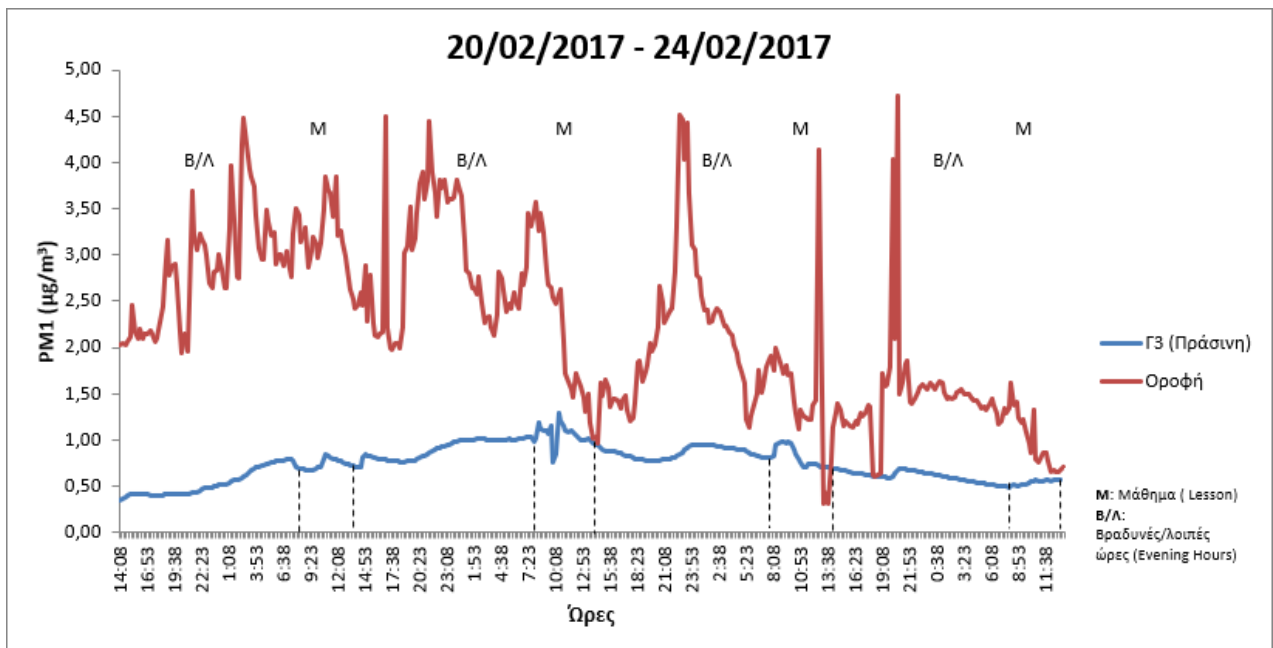


(α)

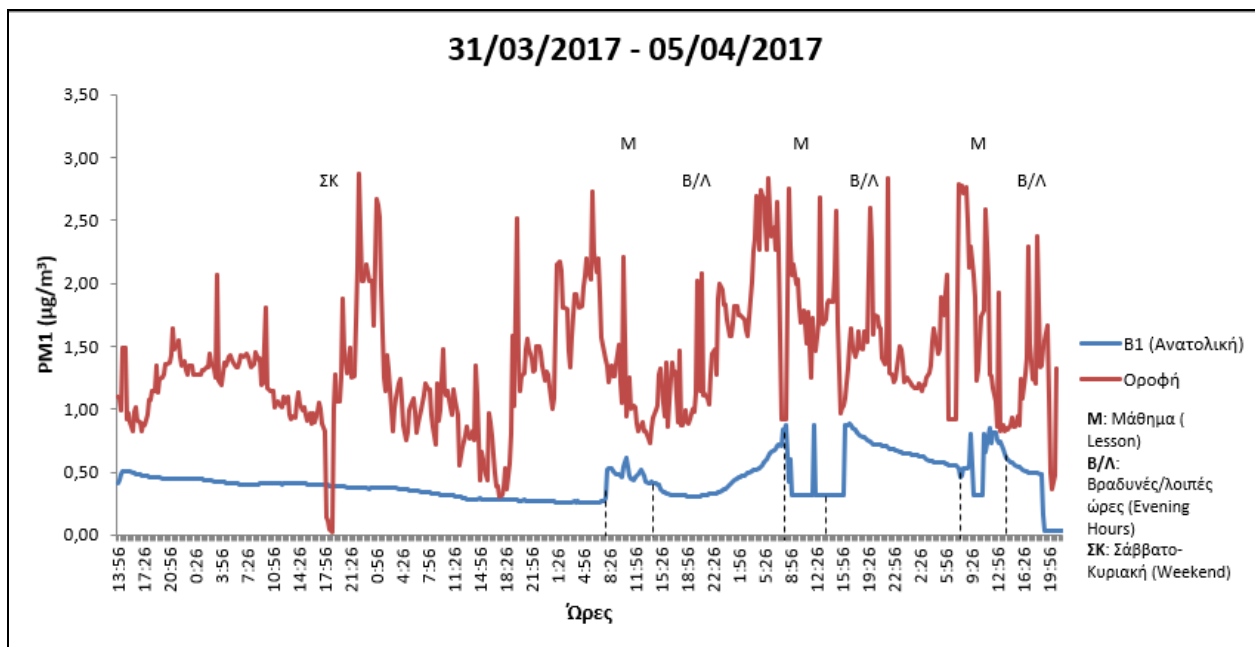


(β)

Σχήμα 5.24: Απεικόνιση τυπικής συμπεριφοράς συγκεντρώσεων $PM_{2.5}$ για (α) την αίθουσα Γ3 κάτω από την πράσινη οροφή και (β) την αίθουσα Β1 κάτω από την ανατολική οροφή σπλισμένου σκυροδέματος



(α)

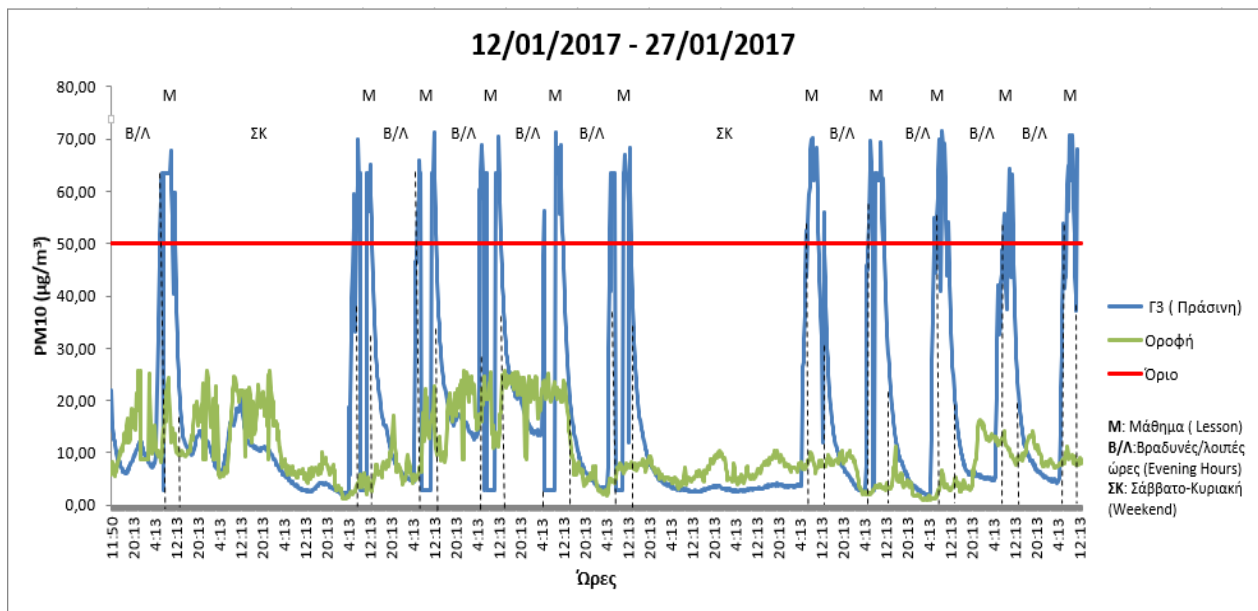


(β)

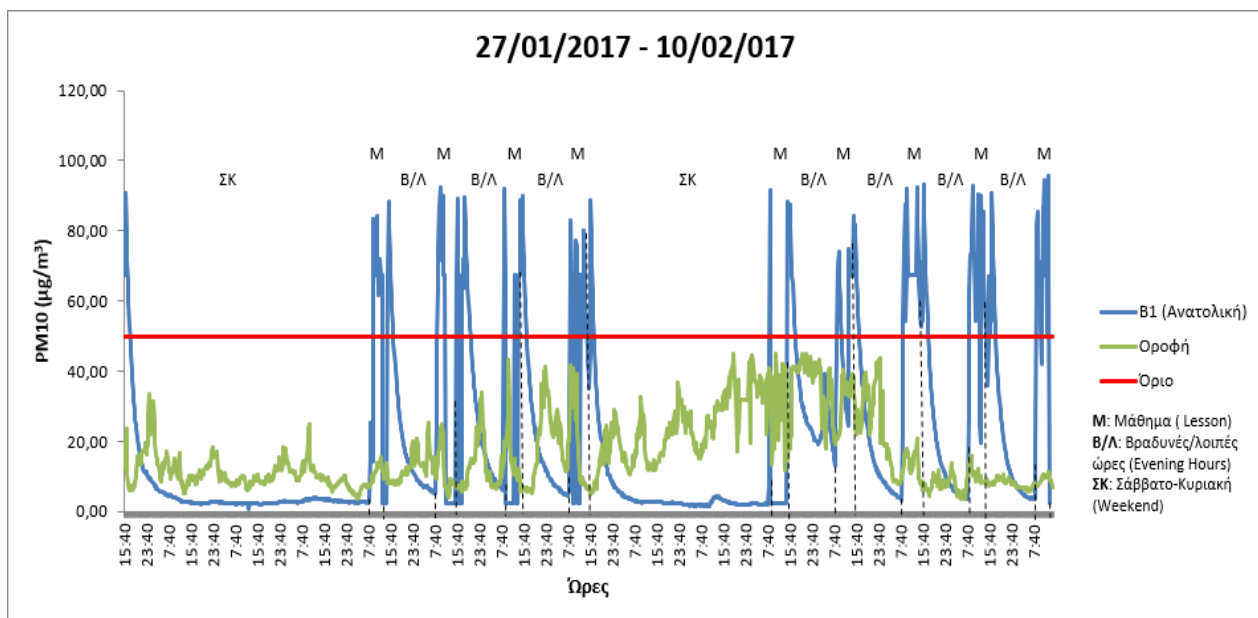
Σχήμα 5.25: Απεικόνιση τυπικής συμπεριφοράς συγκεντρώσεων PM_{10} για (α) την αίθουσα Γ3 κάτω από την πράσινη οροφή και (β) την αίθουσα Β1 κάτω από την ανατολική οροφή σπλισμένου σκυροδέματος

Στη συνέχεια παρουσιάζονται δυο εβδομάδες της ψυχρής περιόδου, μια για κάθε αίθουσα, για τις οποίες η ποιότητα εσωτερικού αέρα βρέθηκε επιβαρυνμένη σε αιωρούμενα σωματίδια. Στο σχήμα 5.26 (α και β), οι κορυφές των PM_{10} κατά τη διάρκεια του μαθήματος φαίνονται να ξεπερνούν αρκετά το επιτρεπτό όριο έκθεσης. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται και στην έρευνα των Kalimeri et al., 2016 σε σχολικές αίθουσες της Κοζάνης κατά το διάστημα μιας ψυχρής περιόδου.

Συγκεκριμένα, πρόκειται για τις εβδομάδες κατά τις οποίες σημειώθηκαν οι μέγιστες τιμές συγκεντρώσεων και στις δυο αίθουσες ($95,63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ στη Β1 και $71,62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για στη Γ3). Πολύ σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση αυτών των τιμών παίζει η περίοδος στην οποία αναφέρονται τα διαγράμματα. Πρόκειται για τα πρώτες εβδομάδες των μετρήσεων αιωρούμενων σωματιδίων κατά τη διάρκεια του χειμώνα με λειτουργία της κεντρικής θέρμανσης από τις 7:00 έως τις 14:00 (ενότητα 3.2.3), μεγαλύτερη παραμονή των παιδιών εντός των αιθουσών και κλειστά παράθυρα (σύμφωνα με τις σημειώσεις από το logbook). Βέβαια και σε άλλα χρονικά διαστήματα έχουν υπάρξει μετρήσεις PM_{10} πάνω από το όριο έκθεσης αλλά στη συγκεκριμένη περίπτωση πρόκειται για τις εβδομάδες εμφάνισης των μεγαλύτερων τιμών. Στον αντίποδα, οι εξωτερικές συγκεντρώσεις των PM_{10} δεν σημείωσαν υψηλές τιμές κατά το διάστημα 12/01-10/2/2017 ούτε στην πράσινη αλλά ούτε και στην ανατολική οροφή σπλισμένου σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, καμία μέτρηση στο εξωτερικό περιβάλλον του σχολείου δεν ξεπέρασε το επιτρεπόμενο ημερήσιο όριο έκθεσης των $50 \mu\text{g m}^{-3}$.



(α)



(β)

Σχήμα 5.26: Απεικόνιση εβδομάδων μέγιστων συγκεντρώσεων PM₁₀ για (α) την αίθουσα Γ3 κάτω από την πράσινη οροφή και (β) την αίθουσα B1 κάτω από την ανατολική οροφή σπλισμένου σκυροδέματος

5.3.3 Αποτελέσματα συσχετίσεων

Ύστερα από μια συνολική απεικόνιση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό και άμεσο εξωτερικό περιβάλλον του σχολείου, ιδιαίτερης σημασίας κρίνεται ο έλεγχος της συμπεριφοράς των παραμέτρων που μελετήθηκαν, μεταξύ τους, μέσω μη παραμετρικών συσχετίσεων (Spearman) για όλη τη πειραματική περίοδο. Στην ενότητα αυτή, αναπτύσσονται τρεις κατηγορίες συσχετίσεων κάθε μία με διαφορετικό κριτήριο. Συνοπτικά αναφέρονται τα παρακάτω:

1. Συσχέτιση που μπορεί να υπάρχει μεταξύ των αιωρούμενων σωματιδίων, δηλαδή κατά πόσο συνδέονται τα PM_1 , $PM_{2.5}$ και PM_{10}
2. Συσχέτιση χρησιμοποιώντας ως παράγοντα την αίθουσα και την αντίστοιχη οροφή όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Συγκεκριμένα, η αίθουσα Γ3 με την πράσινη οροφή και η Β1 με την ανατολική οπλισμένου σκυροδέματος.

Στο κυρίως κείμενο παρατίθενται ενδεικτικά οι πίνακες που αφορούν το τμήμα της πράσινης οροφής και της αίθουσας Γ3 ενώ οι αντίστοιχοι για την ανατολική οροφή οπλισμένου σκυροδέματος και την αίθουσα Β1 δίδονται στο **Παράρτημα ΣΤ2**. Αρχικά, εξετάστηκε η σχέση που μπορεί να έχουν οι τρεις τύποι αιωρούμενων σωματιδίων μεταξύ τους στην ίδια αίθουσα (εν προκειμένω στη Γ3). Στον πίνακα 5.15 η πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι όλοι οι συντελεστές Spearman έχουν στατιστική σημαντικότητα ($p < 0,01$). Επιπλέον, είναι εμφανές ότι όλες οι κατηγορίες σωματιδίων έχουν θετική συσχέτιση, γεγονός βέβαια που είναι απολύτως φυσικό καθότι τα μικρότερα σε μέγεθος σωματίδια PM_1 και $PM_{2.5}$ αποτελούν μέρος των χονδροκόκκων PM_{10} . Όλες οι κατηγορίες έχουν άμεση σχέση μεταξύ τους εφόσον μερικά από τα μικρότερου μεγέθους σωματίδια προσκολλώνται μεταξύ τους ή με άλλα και συγκροτούν ένα μεγαλύτερο συσσωμάτωμα. Τα PM_1 με τα $PM_{2.5}$ της Γ3 αίθουσας έχουν τον μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης (0,637) ενώ αντίστοιχα με τα PM_{10} εμφανίζουν συντελεστή 0,628. Τα αποτελέσματα αυτά είναι λογικά καθότι τα μετρούμενα PM_1 και $PM_{2.5}$ αποτελούν μέρος των PM_{10} .

Πίνακας 5.15: Συσχέτιση των PMs στην αίθουσα Γ3.

Correlations			Γ3_PM ₁	Γ3_PM _{2.5}	Γ3_PM ₁₀
Spearman's rho	Γ3_PM ₁	Correlation Coefficient	1,000	,637**	,614**
		Sig. (2-tailed)	.	,000	,000
		N	6594	6594	6594
	Γ3_PM _{2.5}	Correlation Coefficient		1,000	,628**
		Sig. (2-tailed)		.	,000
		N		6594	6594
	Γ3_PM ₁₀	Correlation Coefficient			1,000
		Sig. (2-tailed)			.
		N			6594

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Εφόσον εξετάστηκε η συμπεριφορά των αιωρούμενων σωματιδίων με κριτήριο το μέγεθος τους, μελετάται η συμπεριφορά τους με βάση τον χώρο (εσωτερικό – εξωτερικό) μέτρησης στην ίδια πτέρυγα του κτιρίου (πράσινη). Στον πίνακα 5.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συσχετίσεων για τα τρία είδη αιωρούμενων σωματιδίων μεταξύ της πράσινης οροφής και της αίθουσας Γ3 που βρίσκεται ακριβώς από κάτω της. Οι συντελεστές Spearman που εμφανίζουν σημαντικά αποτελέσματα τονίζονται με μπλε χρώμα. Είναι ξεκάθαρο ότι σε αυτή την πτέρυγα τα εσωτερικά με τα εξωτερικά αιωρούμενα σωματίδια και ανά είδος αλλά και συνολικά έχουν θετικές, αλλά μέτριες συσχετίσεις. Το γεγονός αυτό έχει να κάνει με τη συχνότητα ανοίγματος των παραθύρων και του φυσικού αερισμού του χώρου, καθώς όπως αποδείχτηκε στις ενότητες 4.5.1 και 4.5.2 δεν υπάρχει εσωτερική πηγή για PM₁ και PM_{2.5} ενώ η μοναδική εσωτερική πηγή εκπομπής PM₁₀ ήταν η επαναιώρηση από τις δραστηριότητες των μαθητών. Για αυτό και οι συντελεστές Spearman μεταξύ εσωτερικών κι εξωτερικών PM₁ και PM_{2.5} (0,471 και 0,389) είναι ελαφρώς ισχυρότεροι από τον αντίστοιχο για PM₁₀ (0,226).

Μία ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι οι αντίστοιχες συσχετίσεις σωματιδίων στην απέναντι πτέρυγα του κτιρίου (συμβατική) δεν είναι τόσο ισχυρές μεταξύ ανατολικής οροφής και αίθουσας Β1. Το αποτέλεσμα αυτό απεικονίζει τη διαφορετική συμπεριφορά ως προς τη συχνότητα ανοίγματος των παραθύρων και άρα το επίπεδο αερισμού σε εκείνη την αίθουσα (προφανώς λιγότερο συχνός σε σχέση με την Γ3).

Πίνακας 5.16: Συσχέτιση PMs στη πτέρυγα της πράσινης ταράτσας (ΠΤ).

			Correlations					
			ΠΤ_PM1	ΠΤ_PM2.5	ΠΤ_PM10	Γ3_PM1	Γ3_PM2.5	Γ3_PM10
Spearman's rho	ΠΤ_PM1	Correlation Coefficient	1,000	,878**	,732**	,471**	,362**	,103**
		Sig. (2-tailed)	.	,000	,000	,000	,000	,000
		N	3836	3836	3836	3836	3836	3836
	ΠΤ_PM2.5	Correlation Coefficient		1,000	,922**	,473**	,389**	,181**
		Sig. (2-tailed)		.	,000	,000	,000	,000
		N		3836	3836	3836	3836	3836
	ΠΤ_PM10	Correlation Coefficient			1,000	,453**	,445**	,226**
		Sig. (2-tailed)			.	,000	,000	,000
		N			5271	5271	5271	5271
	Γ3_PM1	Correlation Coefficient				1,000	,637**	,614**
		Sig. (2-tailed)				.	,000	,000
		N				6594	6594	6594
	Γ3_PM2.5	Correlation Coefficient					1,000	,628**
		Sig. (2-tailed)					.	,000
		N					6594	6594
	Γ3_PM10	Correlation Coefficient						1,000
		Sig. (2-tailed)						.
		N						6594

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

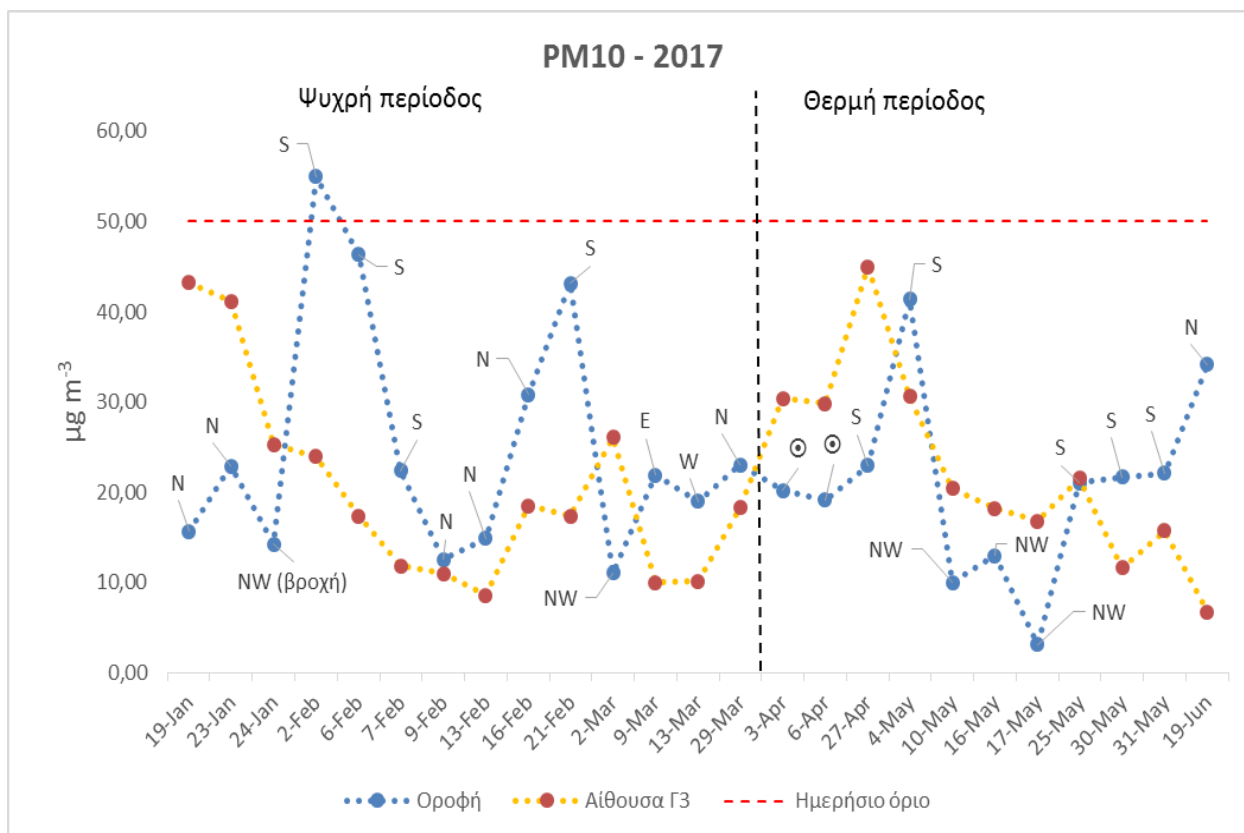
5.3.4 Χημική ανάλυση αιωρούμενων σωματιδίων

5.3.4.1 Πρωτογενή αποτελέσματα

Η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων ποικίλλει σημαντικά και καθορίζει την πηγή εκπομπής. Η δυνατότητα ταυτοποίησης των πηγών είναι ιδιαίτερα σημαντική τόσο για την εξέταση των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία όσο και για πιθανά μέτρα πρόληψης για την ελάττωση των συγκεντρώσεων. Πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι χημικές ουσίες (συστατικά) που περιέχονται συνήθως στα αιωρούμενα σωματίδια είναι πιθανό να είναι παρόντα στα λεπτόκοκκα και ταυτοχρόνως στα χονδροκόκκα. Αυτό που διαφέρει, όμως, είναι η συνεισφορά τους στη συνολική μάζα των σωματιδίων (Putaud et al., 2004, Μπέσα, 2015). Στην ενότητα αυτή γίνεται προσπάθεια καθορισμού των πηγών εκπομπής των μετρούμενων PM_{10} στο εσωτερικό (αίθουσα Γ3) και άμεσα εξωτερικό περιβάλλον του σχολικού συγκροτήματος (πράσινη οροφή). Εξετάζεται η χημική σύσταση των δειγμάτων ως προς τις βασικότερες χημικές ενώσεις, δηλαδή τον οργανικό και στοιχειακό άνθρακα (OC, EC), τα κυριότερα ανιόντα (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) και τα μέταλλα (Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Tl, Mn, Ni, Pb, Sr, V, Zn).

Αρχικά, για να γίνει κατανοητή η γενική συμπεριφορά των PM_{10} κατά τη συγκεκριμένη πειραματική περίοδο παρατίθεται το σχήμα 5.27, στο οποίο απεικονίζονται οι μέσες συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων τόσο εντός της τάξης Γ3 (με παρουσία μαθητών) όσο και στην πράσινη οροφή. Όπως φαίνεται από το σχήμα αυτό, οι συγκεντρώσεις των PM_{10} και στα δύο σημεία καταγραφής δεν παραβιάζουν το ημερήσιο όριο έκθεσης των $50 \mu g m^{-3}$ με εξαίρεση την εξωτερική μέτρηση στις 2 Φεβρουαρίου 2017. Επιπλέον, όπως παρατηρήθηκε και στις προηγούμενες ενότητες (4.5.1-4.5.3) η εποχικότητα επηρεάζει τα αποτελέσματα καθώς κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου το 71,4% των μετρήσεων παρουσιάστηκαν μεγαλύτερες στο εξωτερικό περιβάλλον και μόλις το 28,6% στο εσωτερικό, υπό την επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων που έφταναν στο μετρητή από τζάκια ή άλλες εστίες θέρμανσης των τριγύρω κατοικιών. Αντιθέτως, το 63,6% των τιμών που αφορούν τη θερμή περίοδο παρουσιάστηκαν μεγαλύτερες εντός της αίθουσας Γ3 ενώ το 36,4% στη πράσινη οροφή. Στη περίπτωση αυτή, τις περισσότερες πειραματικές ημέρες κυριαρχεί η επαινωίωση των αιωρούμενων σωματιδίων λόγω των δραστηριοτήτων των παιδιών εντός της τάξης, ενώ στο εξωτερικό περιβάλλον οι πιθανές πηγές μειώνονται σε σχέση με το χειμώνα (εκπομπές από οχήματα γειτονικών δρόμων, επεισόδια σκόνης). Αξίζει να αναφερθεί από την θεωρία, ότι τα PM_{10} θεωρούνται πρωτογενή σωματίδια, δηλαδή προέρχονται άμεσα από πηγές, όπως τριβή ελαστικών/φρένων, διάβρωση εδάφους (Agudelo-Castañeda et al., 2019).

Για να υπάρχει όμως μια ολοκληρωμένη εικόνα ως προς τα αίτια των αποτελεσμάτων των PM_{10} εκείνες τις ημέρες είναι απαραίτητο να εξεταστεί και η συμπεριφορά του ανέμου ανά περίπτωση καθώς αποτελεί ίσως την πιο βασική μετεωρολογική παράμετρο επιρροής των συγκεντρώσεων όλων των αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Από το ίδιο σχήμα φαίνεται ότι η διεύθυνση του ανέμου έχει σημαντικό ρόλο στις εξωτερικές μετρήσεις καθότι με το Νότιο άνεμο (S) σχετίζονται οι υψηλότερες καταγραφές (κυρίως κατά την ψυχρή περίοδο) ενώ με τον Βορειοδυτικό (NW) οι χαμηλότερες. Βεβαίως πρέπει να σημειωθεί ότι η αναφορά γίνεται σε κυρίαρχες διευθύνσεις ανέμου καθότι εντός της ημέρας ο άνεμος μπορεί να αλλάξει διάφορες διευθύνσεις. Για τις υπόλοιπες παρατηρούμενες διευθύνσεις δεν παρατηρείται κάποιο αυστηρό πρότυπο. Η ένταση του ανέμου για τις συγκεκριμένες πειραματικές ημέρες δεν ήταν ιδιαίτερα υψηλή και κυμάνθηκε από 0 (νηνεμία) έως 4 Bf.



Σχήμα 5.27: Συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων και κυρίαρχες διευθύνσεις ανέμου κατά επιλεγμένες πειραματικές ημέρες του 2017. Με "☉" συμβολίζεται η κατάσταση νηνεμίας.

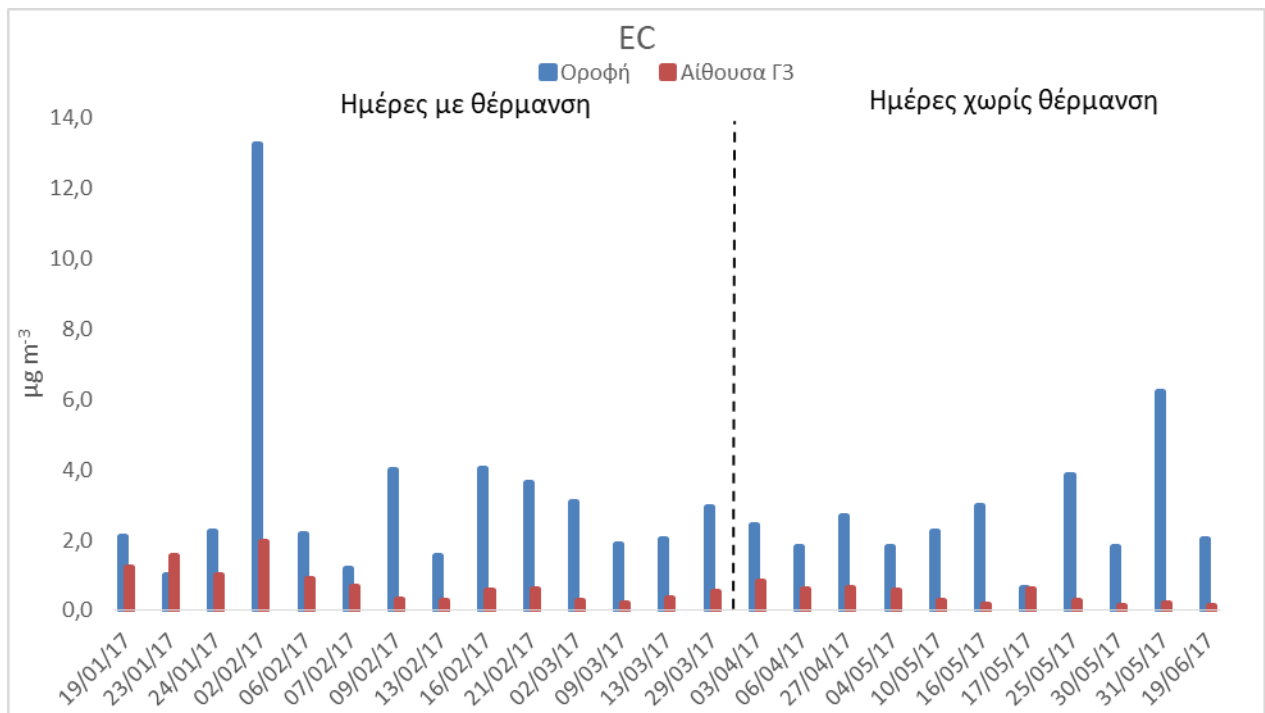
Ξεκινώντας με τη διερεύνηση των βασικών χημικών ενώσεων που μπορούν να ανιχνευτούν στα αιωρούμενα σωματίδια, παρατίθεται ο πίνακας 5.17. Ο πίνακας αυτός εμπεριέχει όλη τη πληροφορία σχετικά με τις συγκεντρώσεις οργανικού - στοιχειακού άνθρακα (OC-EC), ανιόντων και μετάλλων που ανιχνεύτηκαν στα φίλτρα των μετρητών εντός και εκτός του κτιρίου κατά τις εξεταζόμενες πειραματικές ημέρες. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι ο οργανικός και στοιχειακός άνθρακας (OC-EC), το νιτρικό (NO_3^-) και θειικό ανιόν (SO_4^{2-}) όπως και τα μέταλλα αργίλιο (Al), σίδηρος (Fe) και ψευδάργυρος (Zn) εμφανίζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον καθώς παρουσιάζουν τις υψηλότερες μέσες συγκεντρώσεις και τυπικές αποκλίσεις. Παρακάτω αναλύεται η συνεισφορά καθενός στα μετρούμενα εσωτερικά και εξωτερικά σωματίδια PM_{10} .

Πίνακας 5.17: Στατιστικά δεδομένα κύριων χημικών στοιχείων στα μετρούμενα PM_{10}

Χημικά στοιχεία		Αίθουσα Γ3 ($\mu\text{g m}^{-3}$)		Πράσινη οροφή ($\mu\text{g m}^{-3}$)	
		Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Άνθρακας	EC	0,60	0,44	2,94	2,45
	OC	16,53	7,70	17,79	14,05
Ανιόντα	Cl^-	0,36	0,20	0,35	0,57
	NO_3^-	0,44	0,27	1,23	,89
	SO_4^{2-}	1,50	0,98	2,12	1,08

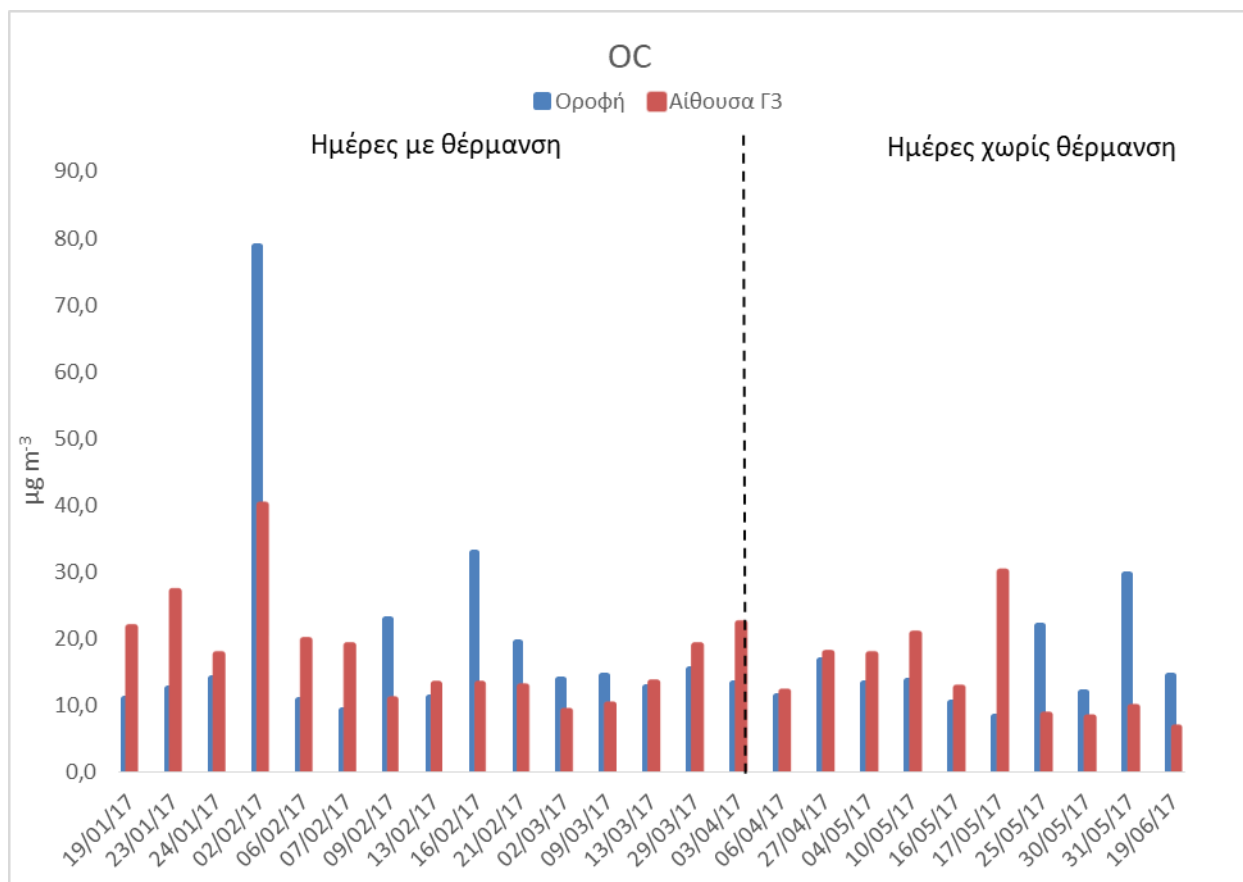
Μέταλλα	Al	2,87	3,01	1,36	1,41
	V	0,04	0,05	0,08	0,08
	Cr	0,15	0,14	0,06	0,01
	Mn	0,05	0,04	0,07	0,03
	Fe	3,15	2,01	4,39	2,00
	Co	0,01	0,004	0,004	0,002
	Ni	0,05	0,03	0,05	0,03
	Cu	0,09	0,14	0,12	0,08
	Zn	0,72	0,32	0,52	0,96
	As	0,002	0,001	0,004	0,002
	Sr	0,04	0,04	0,03	0,03
	Cd	0,001	0,001	0,001	0,001
	Cs	0,000	0,000	0,000	0,000
	Ba	0,14	0,03	0,11	0,05
	Ti	0,000	0,000	0,000	0,000
Pb	0,03	0,01	0,05	0,02	

Σε ότι αφορά τα αποτελέσματα του άνθρακα στα φίλτρα PM₁₀, οι πηγές του στοιχειακού άνθρακα (EC) είναι πιο εύκολα αναγνωρίσιμες από αυτές του πιο περίπλοκου οργανικού (OC). Η έρευνα των Saraga et al., 2017 αναφέρει ότι ο EC εκπέμπεται με τη μορφή πρωτογενών σωματιδίων ατελούς καύσης. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί η χρήση ντίζελ. Τα οργανικά σωματίδια (OC) από την άλλη, μπορούν είτε να εκπεμφθούν άμεσα στην ατμόσφαιρα (πρωτογενή οργανικά αερολύματα/primary organic aerosol-POA), για παράδειγμα προϊόντα καύσης ορυκτών καυσίμων, καύση βιομάζας, αποσύνθεση φυτών και μικροβίων είτε να δημιουργηθούν (έμμεσα) στην ατμόσφαιρα από αντιδράσεις οργανικών στοιχείων με πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC) όπως βενζόλιο, ξυλόλιο, τερπένιο ή ισοπρένιο (δευτερογενή οργανικά αερολύματα/secondary organic aerosol-SOA). Τα SOA είναι σωματίδια που δημιουργούνται στην ατμόσφαιρα από την οξείδωση αέριων υδρογονανθράκων. Αυτά τα σωματίδια μπορούν να επηρεάσουν την ανθρώπινη νοσηρότητα και θνησιμότητα, την ορατότητα και το ισοζύγιο ακτινοβολίας της Γης (Eldering and Cass, 1996, Pilinis et al., 1995, Schwartz et al., 1996). Στο σχήμα 5.28 φαίνεται ότι οι συγκεντρώσεις του EC στο εξωτερικό περιβάλλον (πράσινη οροφή) βρέθηκαν μεγαλύτερες συγκριτικά με τις αντίστοιχες εντός της αίθουσας Γ3 σχεδόν για όλες τις πειραματικές ημέρες της ψυχρής και της θερμής περιόδου. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό καθώς η πιθανότερη πηγή εκπομπής στοιχειακού άνθρακα είναι τα οχήματα των γειτονικών δρόμων και έτσι οι καταγραφές είναι υψηλότερες στα φίλτρα του εξωτερικού αισθητήρα. Εξαιρέση αποτελεί η μέτρηση στις 23/1/17 όπου τα εσωτερικά επίπεδα EC είναι λίγο μεγαλύτερα των εξωτερικών, κάτι που μπορεί να δικαιολογηθεί πιθανόν από τη χρήση σόμπας κηροζίνης (σύμφωνα με το logbook της ερευνητικής ομάδας) στην αίθουσα Γ3 ή σε μετρητικό σφάλμα. Στις μετρήσεις των Ruiz et al., 2010 σε σπίτια με σόμπες κηροζίνης στη Χιλή, αναφέρονται ανεβασμένες τιμές EC σε σχέση με τους άλλους τύπους θέρμανσης (φυσικό αέριο και ηλεκτρικό ρεύμα).



Σχήμα 5.28: Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις EC για όλες τις ημέρες δειγματοληψίας

Αντιθέτως, οι συγκεντρώσεις του OC εντός και εκτός της αίθουσας φαίνεται να παρουσιάζουν μια πιο πολύπλοκη συμπεριφορά. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.29, για το 60% των συνολικών μετρήσεων οι συγκεντρώσεις του OC εντός της αίθουσας Γ3 εμφανίζονται υψηλότερες συγκριτικά με τις αντίστοιχες εξωτερικές. Το αποτέλεσμα αυτό πιθανόν να συνδέεται με τις εσωτερικές πηγές εκπομπής OC όπως είναι η επαναίωση σκόνης από τις δραστηριότητες των μαθητών, μικρά σωματίδια χαρτιού, υπολείμματα δέρματος και ίνες ρουχισμού (Pegas et al., 2012). Όσο για τις περιπτώσεις όπου ο εξωτερικός OC παρατηρήθηκε πιο ανεβασμένος από τον εσωτερικό, κατά τη ψυχρή περίοδο είναι δεδομένη η συμβολή των σωματιδίων από καύση βιομάζας των τριγύρω κατοικιών για λόγους θέρμανσης ενώ τους πιο θερμούς μήνες η αποσύνθεση φυτών όπως και η δημιουργία SOA από υδρογονάνθρακες λόγω αυξημένης ηλιοφάνειας.

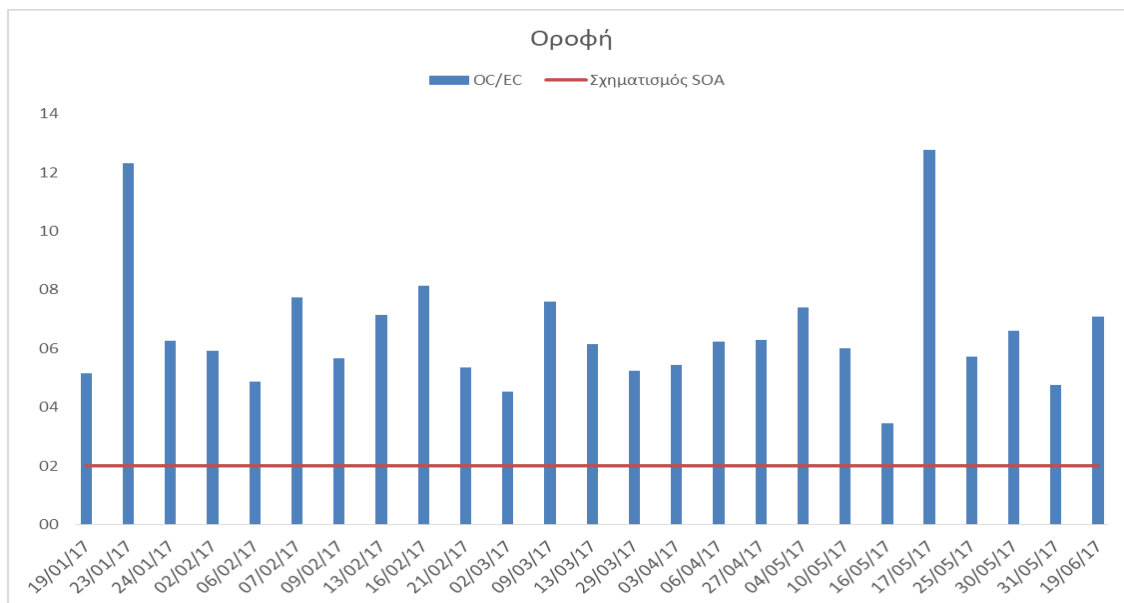


Σχήμα 5.29: Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις OC για όλες τις πειραματικές ημέρες

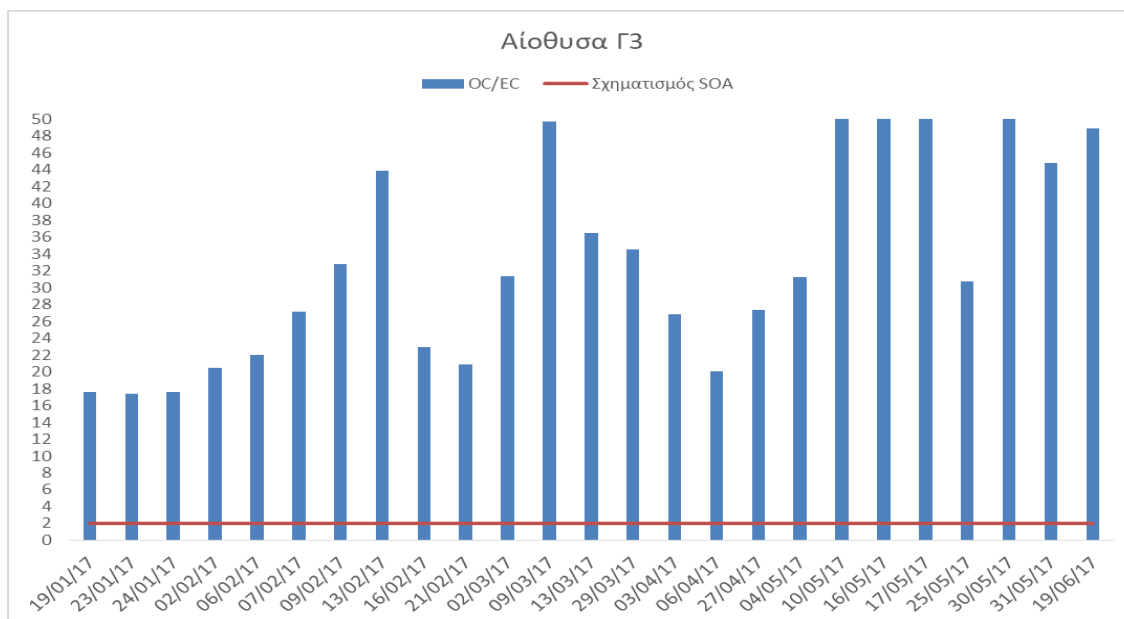
Εξίσου σημαντική είναι και η διερεύνηση του λόγου OC/EC, καθώς αποτελεί έναν χρήσιμο δείκτη σχηματισμού δευτερογενών οργανικών αερολυμάτων (SOA). Συγκεκριμένα σύμφωνα με τη μελέτη των Assimakorou et al., 2018, όταν το πηλίκο αυτό είναι μεγαλύτερο του 2, τότε θεωρείται ότι αποτελεί ένδειξη σχηματισμού SOA, δηλαδή ο επιπλέον οργανικός άνθρακας ο οποίος προκαλεί την αύξηση του λόγου OC/EC, θεωρείται ότι είναι δευτερογενής. Σύμφωνα με την ίδια δημοσίευση που αφορούσε αιωρούμενα σωματίδια PM_{2.5}, η υψηλότερη τιμή OC/EC στους εσωτερικούς χώρους σε σύγκριση με το εξωτερικούς, αντικατοπτρίζει την ύπαρξη πολλαπλών εσωτερικών πηγών εκπομπής OC. Η ίδια διαπίστωση φαίνεται να ισχύει και για την παρούσα έρευνα καθώς από τα σχήματα 5.30-31 είναι ολοφάνερο πως αφενός ο λόγος OC/EC είναι μεγαλύτερος του 2 τόσο για το εσωτερικό όσο και για το εξωτερικό περιβάλλον, υποδεικνύοντας την πιθανή παραγωγή SOA, αφετέρου οι λόγοι OC/EC των εσωτερικών μετρήσεων είναι υψηλότεροι των αντίστοιχων εξωτερικών. Επιπροσθέτως, παρατίθεται ο πίνακας 5.18 ο οποίος παρουσιάζει τιμές OC/EC εξωτερικού περιβάλλοντος σε διάφορες πόλεις του κόσμου και αντικατοπτρίζει την υψηλή παραγωγή SOA για την περίπτωση του εξεταζόμενου σχολείου στη Νέα Σμύρνη.

Πίνακας 5.18: Σύγκριση των μέσων συγκεντρώσεων OC, EC και λόγων OC/EC στην εξεταζόμενη περιοχή με μετρήσεις από άλλες πόλεις (Zhang et al., 2009).

Τοποθεσία μετρήσεων	Ημερομηνία	OC ($\mu\text{g m}^{-3}$)	EC ($\mu\text{g m}^{-3}$)	OC/EC
Πεκίνο, Κίνα	Ιανουάριος 2004	21,2	8,9	2,3
Πεκίνο, Κίνα	Μάρτιος και Απρίλιος 2004	13,5	7,1	2,0
Περίχωρα Πεκίνου, Κίνα	Σεπτέμβριος–Δεκέμβριος 2002	21,2	7,3	3,0
Κέντρο Πεκίνου, Κίνα	Ιούλιος 1999–Σεπτέμβριος 2000	21,5	8,7	2,5
Λος Άντζελες, ΗΠΑ	Νοέμβριος και Δεκέμβριος 1987	18,5	7,3	2,5
Σεούλ, Κορέα	Ιούνιος 1994	11,1	8,4	1,3
Σεούλ, Κορέα	Ιούνιος 1994	10,3	8,4	1,3
Καοσιούνγκ, Ταϊβάν	Νοέμβριος 1998–Απρίλιος 1999	10,4	4,0	2,6
Ελσίνκι, Φινλανδία	Ιούλιος 2000–Ιούλιος 2001	3,0	1,2	2,5
Χονγκ Κόνγκ	Ιανουάριος και Φεβρουάριος 2002	19,7	7,8	2,5
Ξί-Αν, Κίνα	Σεπτέμβριος και Οκτώβριος 2004	43,2	15,0	3,2
Ούτζι, Ιαπωνία	Ιούνιος 1998–Δεκέμβριος 1999	3,0	6,2	0,5
Αθήνα, Ελλάδα	Ιανουάριος-Ιούνιος 2017	17,8	2,9	6,6



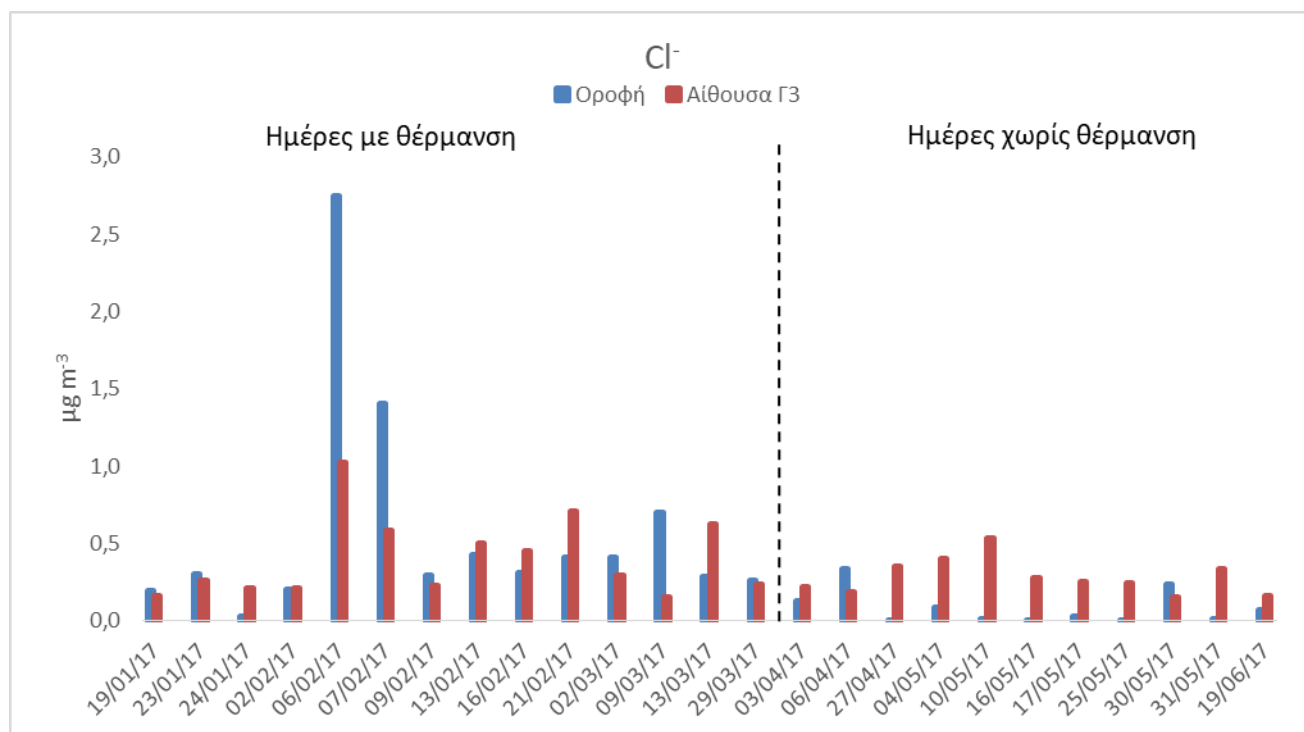
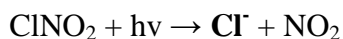
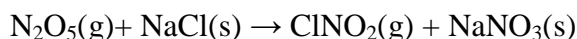
Σχήμα 5.30: Εξωτερικές συγκεντρώσεις OC/EC για όλες τις πειραματικές ημέρες



Σχήμα 5.31: Εσωτερικές συγκεντρώσεις OC/EC για όλες τις πειραματικές ημέρες

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των PM_{10} ως προς τη σύστασή τους σε υδατοδιαλυτά ανιόντα. Το χλωριούχο ανιόν (Cl^-) μετρήθηκε σε χαμηλές συγκεντρώσεις καταλαμβάνοντας μόλις το 1,54% των συνολικών PM_{10} εξωτερικά και το 1,65% εντός της αίθουσας. Το σχήμα 5.32 παρουσιάζει τις διαφορές μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών ανιόντων Cl^- . Όπως είναι εμφανές κατά τις ψυχρές ημέρες το Cl^- στις εξωτερικές μετρήσεις φαίνεται να είναι ανεβασμένο συγκριτικά με τις αντίστοιχες εσωτερικές. Εσωτερικά οι συγκεντρώσεις του χλωρίου

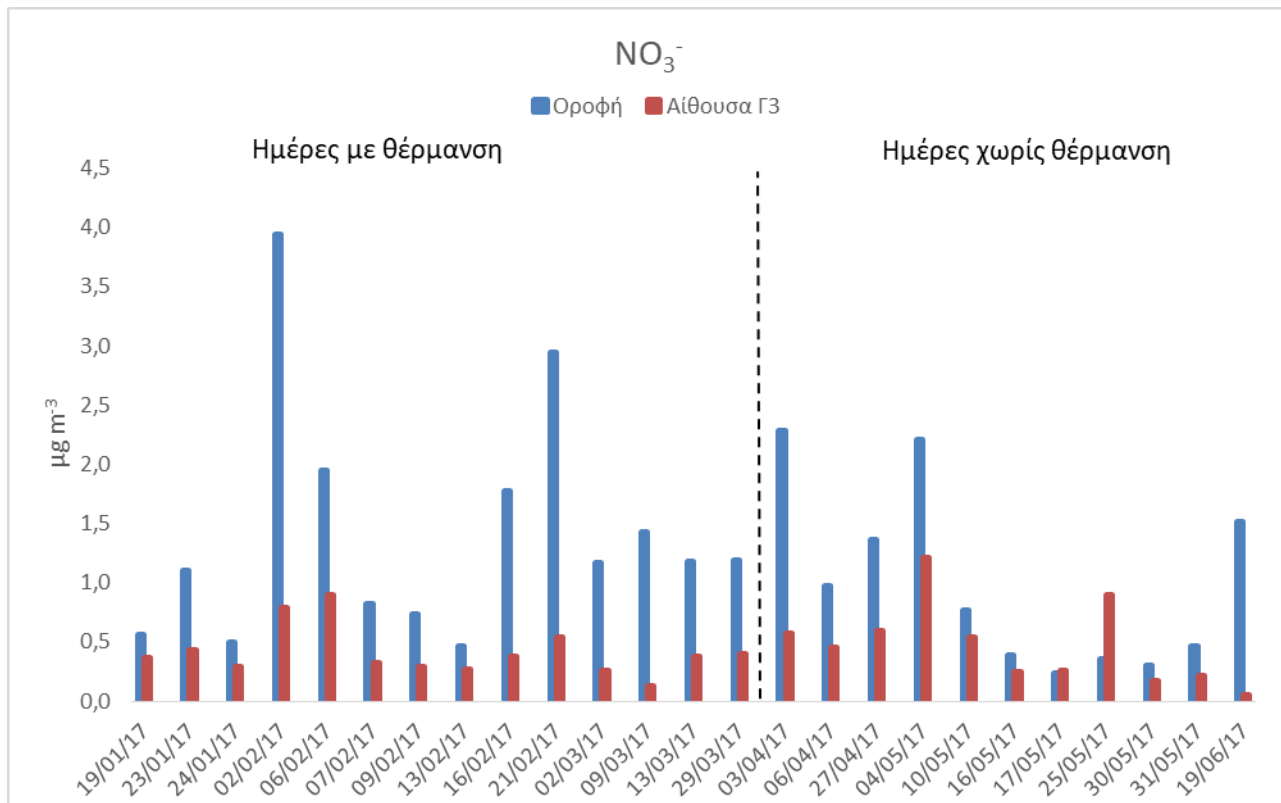
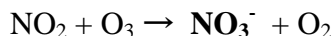
επηρεάζονται από τη σκόνη που επαναιωρείται στην αίθουσα και από τα προϊόντα καθαρισμού (Kefeni και Okonkwo, 2012 και Jaradat, 2004). Η κύρια εξωτερική πηγή προέλευσης των ιόντων χλωρίου είναι σωματίδια που φτάνουν στη περιοχή από τη θάλασσα (Hassanvand et al., 2014) και σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα αρχικώς κατά τη αντίδραση του πεντοξειδίου του αζώτου (N_2O_5) με τα σωματίδια αλατιού ($NaCl$) και εν συνεχεία με φωτόλυση (με ακτινοβολία UV) του παραγόμενου χλωριούχου νιτριλίου ($ClNO_2$) ως εξής:



Σχήμα 5.32: Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις Cl⁻ για όλες τις πειραματικές ημέρες

Σε ότι αφορά τα νιτρικά ανιόντα (NO_3^-), οι συγκεντρώσεις τους μετρήθηκαν μεγαλύτερες των χλωριούχων και συγκεκριμένα η συνεισφορά τους στα συνολικά PM_{10} ήταν 5,27% για τα σωματίδια στο εξωτερικό περιβάλλον και 2,06% για τα αντίστοιχα στο εσωτερικό. Από το σχήμα 5.33 φαίνεται ξεκάθαρα η υπεροχή των νιτρικών ανιόντων του εξωτερικού περιβάλλοντος σε σχέση με τα εσωτερικά για όλες σχεδόν τις πειραματικές ημέρες. Μάλιστα, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται κατά τις ψυχρές ημέρες όπου υπάρχει έντονη η συμβολή της καύσης βιομάζας από τα γειτονικά σπίτια για θέρμανση. Το αποτέλεσμα αυτό σχετίζεται άμεσα με τις εξωτερικές πηγές NO_3^- , το οποίο σχηματίζεται έμμεσα στην ατμόσφαιρα μέσω της οξειδωσης του διοξειδίου του αζώτου (NO_2), το οποίο με τη σειρά του αποτελεί προϊόν καύσης από οχήματα, τζάκια και βιομηχανική δραστηριότητα (Ho et al., 2003).

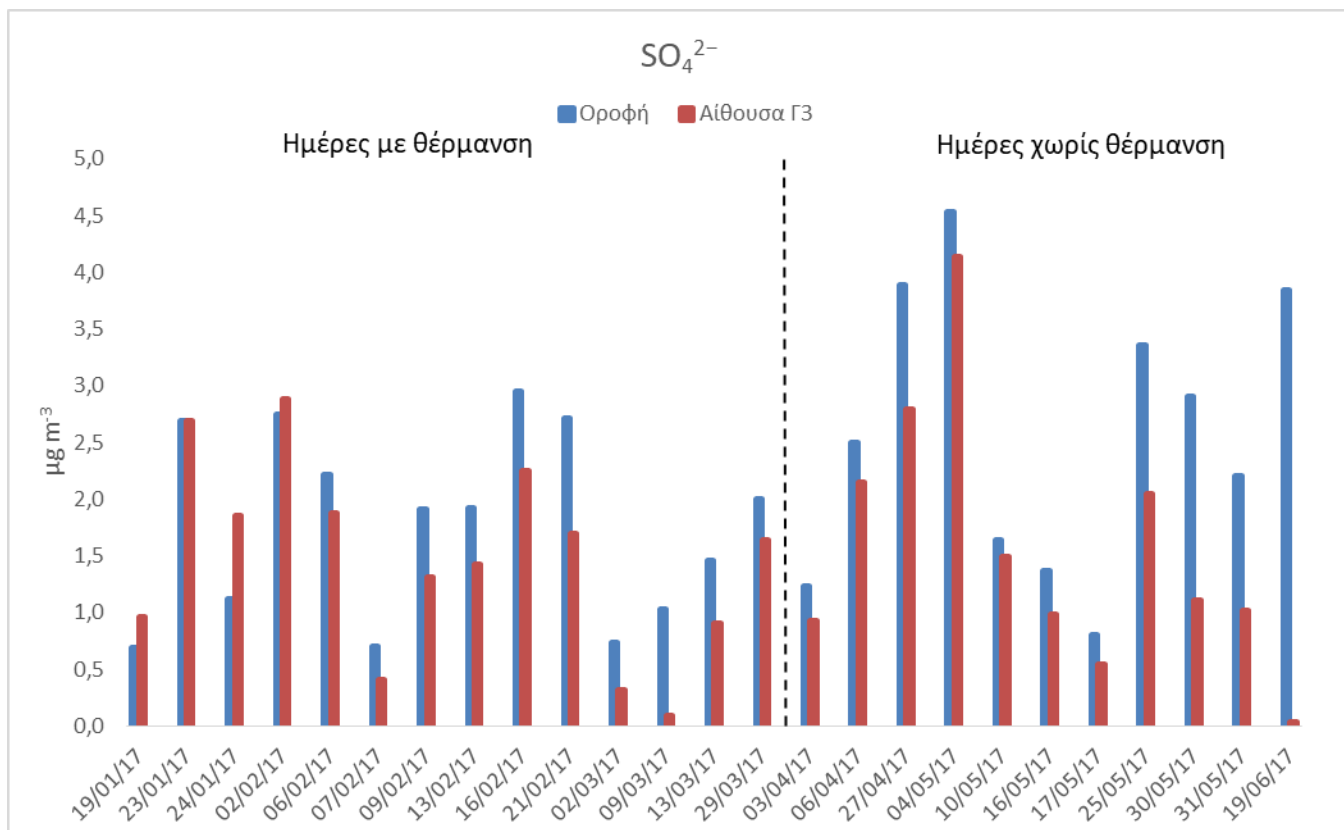
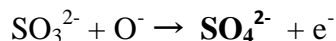
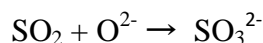
Έτσι, ιόντα NO_3^- σχηματίζονται όταν το NO_2 αντιδρά με το ατμοσφαιρικό όζον ακολουθώντας την χημική εξίσωση:



Σχήμα 5.33: Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις NO_3^- για όλες τις πειραματικές ημέρες

Τα θειικά ανιόντα (SO_4^{2-}) είναι αυτά που εμφάνισαν τις μεγαλύτερες μέσες συγκεντρώσεις σε σχέση με τα προηγούμενα τόσο στα εσωτερικά όσο και στα εξωτερικά μετρούμενα PM_{10} . Τα εξωτερικά SO_4^{2-} συνεισέφεραν στο 9,15% του συνόλου των εξωτερικών μετρούμενων PM_{10} ενώ τα εσωτερικά στο 7,04% των αντιστοίχων. Στο σχήμα 5.34 είναι εμφανές ότι κατά τη θερμή περίοδο (ημέρες χωρίς θέρμανση) οι εξωτερικές συγκεντρώσεις SO_4^{2-} είναι υψηλότερες των εσωτερικών για όλες τις περιπτώσεις. Κατά τις ψυχρές ημέρες μέτρησης, η συμπεριφορά αυτή δεν ισχύει για το διάστημα 19/01-02/02/2017. Τα θειικά ανιόντα σχηματίζονται στο εξωτερικό περιβάλλον μέσω των ετερογενών ή ομοιογενών αντιδράσεων διοξειδίου του θείου (SO_2), ενός από τους βασικότερους ρυπαντές της ατμόσφαιρας που εκλύεται ως προϊόν καύσης από οχήματα ή βιομηχανίες (Cheng et al, 2000). Η χρήση της σόμπας κηροζίνης εντός της αίθουσας κατά το διάστημα κάποιων εκ των ψυχρών ημερών (όπως καταγράφηκε στο logbook της ερευνητικής ομάδας) αύξησε τα επίπεδα των εσωτερικών SO_4^{2-} . Παρόμοια καταγραφή αναφέρεται στη δημοσίευση των Leaderer et al., 1999 σε κατοικίες που χρησιμοποιούσαν αυτές τις συσκευές θέρμανσης. Υπάρχουν διάφορες χημικές εξισώσεις κατά τις

οποίες το SO_2 μετατρέπεται σε SO_4^{2-} με κυριότερη την οξείδωση του τριοξειδίου του θείου (SO_3) σε περιβάλλον χαμηλής σχετικής υγρασίας ως εξής (Wang et al., 2018):

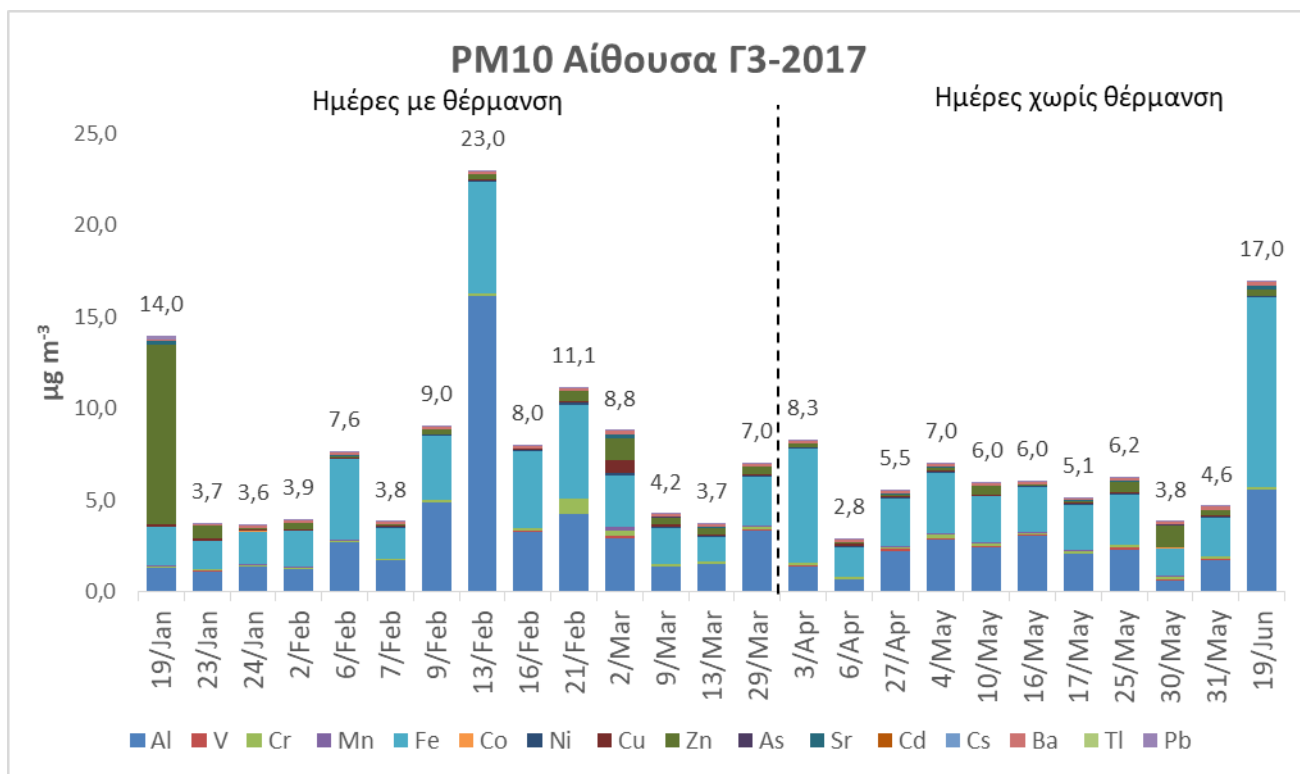


Σχήμα 5.34: Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις SO_4^{2-} για όλες τις πειραματικές ημέρες

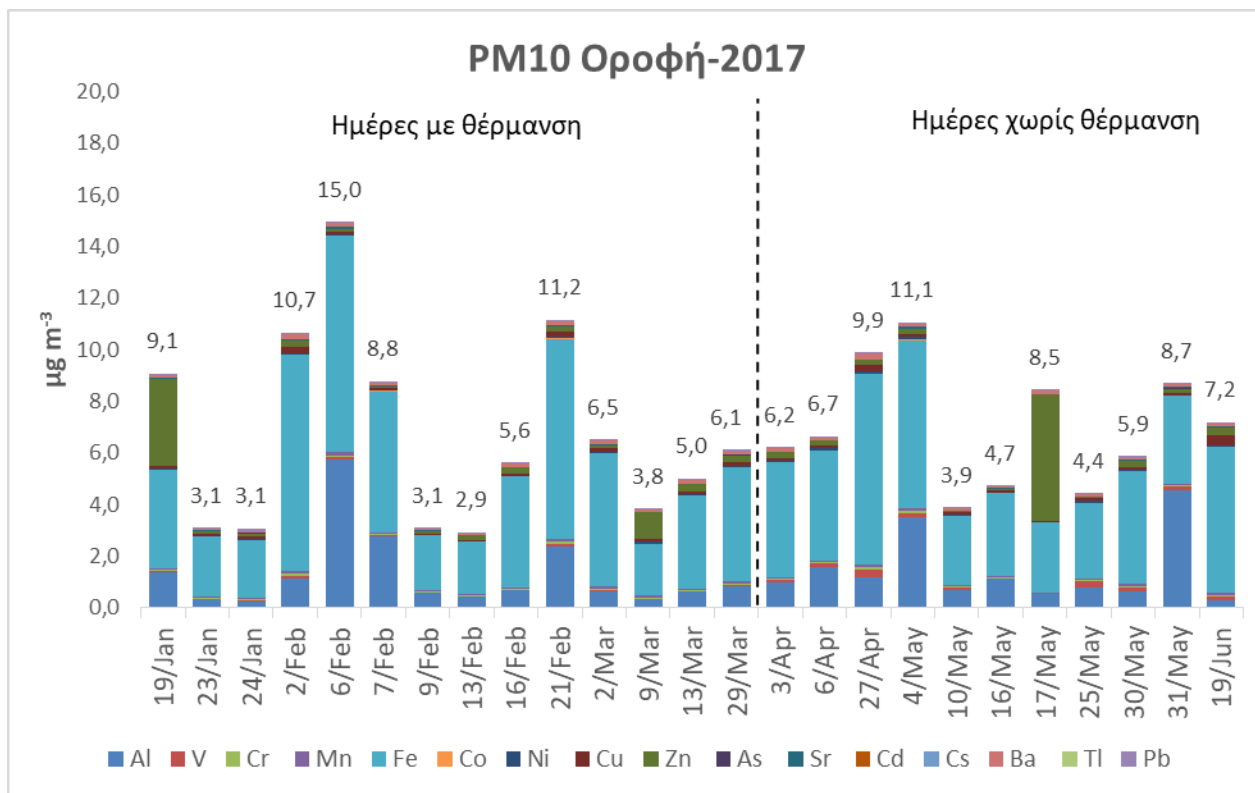
Από τη χημική ανάλυση 16 μετάλλων (Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Cd, Cs, Ba, Ti και Pb) στα εσωτερικά και εξωτερικά αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} , φάνηκε ότι τα κυρίαρχα στοιχεία στις συνολικές συγκεντρώσεις ήταν τα Al και Fe. Ειδικότερα, η συνεισφορά του Al στο σύνολο των μετάλλων των PM_{10} της αίθουσας Γ3 ήταν 38,98% και του Fe 42,87%. Το μετρούμενο ποσοστό των δύο στοιχείων επί του συνόλου των εξωτερικών μετάλλων (στην οροφή) βρέθηκαν 19,82% για το Al και 64,08% για το Fe αντίστοιχα. Τα συγκεκριμένα μέταλλα είναι γεωλογικής προέλευσης και ανήκουν στην οικογένεια των στοιχείων που απαρτίζουν το φλοιό της Γής (earth crust). Εύκολα λοιπόν διαπιστώνεται ότι η σκόνη από το έδαφος που περιέχει αυτά τα σωματίδια αφενός φτάνει μέσω του ανέμου στον μετρητή που βρίσκεται στην οροφή του κτιρίου, αφετέρου εισρέει εντός της τάξης. Μάλιστα, οι δραστηριότητες των μαθητών συμβάλουν σημαντικά στην επαναιώρηση αυτών των μετάλλων και άρα σε καταγραφή υψηλότερων συγκεντρώσεων για κάποιες περιπτώσεις. Προηγούμενες δημοσιεύσεις κατέληξαν επίσης

στο συμπέρασμα ότι τα μέταλλα γήινου φλοιού κυριαρχούσαν στα εσωτερικά PM₁₀ (Almeida et al., 2011, Tran et al., 2012). Οι συμπεριφορές αυτές παρατίθενται στα σχήματα 5.35-36.

Από τα ίδια σχήματα, είναι εμφανής η επιπρόσθετη παρουσία κάποιων ιδιαίτερως τοξικών μετάλλων που με βάση τον πίνακα 5.17 ακολουθούν την εξής σειρά συγκεντρώσεων: Zn>Cu>Ba>V>Mn>Cr>Ni>Pb>Sr>As>Co>Cd>Cs>Ti. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Boman et al., 2009; Calvo et al., 2013) κυρίως τα μέταλλα Zn,Cu,Ba,V,Mn,Cr,Ni και Pb σχετίζονται με τη κίνηση των οχημάτων, είτε αυτά αφορούν εκπομπές από καύσιμα, είτε υπολείμματα φρένων και λάστιχων μέσω τριβής (road dust particles). Τα τελευταία έχουν το χαρακτηριστικό να επαναιωρούνται στην ατμόσφαιρα από την κίνηση των οχημάτων (Srivastava and Jain , 2007).



Σχήμα 5.35: Εσωτερικές συγκεντρώσεις μετάλλων για όλες τις πειραματικές ημέρες



Σχήμα 5.36: Εξωτερικές συγκεντρώσεις μετάλλων για όλες τις πειραματικές ημέρες

Παλαιότερες έρευνες για τη διερεύνηση της παρουσίας οργανικού-στοιχειακού άνθρακα, ιόντων και μετάλλων σε χονδρόκοκκα αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀ έχουν πραγματοποιηθεί σε σχολικά κτίρια της Ελλάδας (Diarouli et al., 2007), της Κίνας (Xu et al., 2015), της Πορτογαλίας (Pegas et al., 2012) και της Ινδίας (Chithra και Nagendra, 2013) με αποτελέσματα παρόμοια της παρούσας έρευνας. Ο πίνακας 5.19 συνοψίζει τα αποτελέσματα.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό οι παράμετροι επιρροής της χημικής σύστασης των εσωτερικών και εξωτερικών PM₁₀ είναι πολυάριθμοι και πολύπλοκοι. Στην επόμενη ενότητα θα πραγματοποιηθεί μια προσπάθεια μοντελοποίησης όλων των χημικών στοιχείων που μετρήθηκαν εντός και εκτός του σχολικού συγκροτήματος ούτως ώστε από τη βάση δεδομένων να προκύψουν οι επικρατέστερες πηγές εκπομπής των αέριων ρύπων.

Πίνακας 5.19: Σύγκριση των συγκεντρώσεων χημικών στοιχείων PM_{2.5} και PM₁₀ με μετρήσεις από άλλες παρόμοιες έρευνες.

Χημικά στοιχεία PM ₁₀ ($\mu\text{g m}^{-3}$)		Τοποθεσία Σχολείων								
		Ελλάδα- Αθήνα (2007)		Κίνα- Σιάν (2015)		Πορτογαλία- Αβέιρο (2012)		Ινδία- Μαντράς (2012)	Ελλάδα- Αθήνα Αθήνα (2017)	
		Εντός	Εκτός	Εντός	Εκτός	Εντός	Εκτός	Εντός (χειμώνα)	Εντός	Εκτός
Άνθρακας	EC	-	-	7,9 ± 3,0	8,8 ± 4,2	1,70±0,50	1,42±0,54	-	0,60	2,94
	OC	-	-	22,5±6,6	24,9 ± 9,8	14,1±2,71	4,98±2,35	-	16,53	17,79
Ανιόντα	Cl ⁻	-	-	-	-	0,67±0,60	0,93±1,05	3,59	0,36	0,35
	NO ₃ ⁻	2,3±1,8	3,8±2,2	-	-	1,02±1,00	1,86±1,40	5,92	0,44	1,23
	SO ₄ ²⁻	5,2±1,4	6,7±2,6	-	-	1,27±0,79	1,96±1,25	10,57	1,50	2,12
Μέταλλα	Al	-	-	-	-	-	-	1,73	2,87	1,36
	V	-	-	-	-	-	-	0,18	0,04	0,08
	Cr	-	-	-	-	-	-	0,17	0,15	0,06
	Mn	-	-	-	-	-	-	0,07	0,05	0,07
	Fe	-	-	-	-	-	-	3,64	3,15	4,39
	Co	-	-	-	-	-	-	-	0,01	0,004
	Ni	-	-	-	-	-	-	0,15	0,05	0,05
	Cu	-	-	-	-	-	-	0,18	0,09	0,12
	Zn	-	-	-	-	-	-	0,45	0,72	0,52
	As	-	-	-	-	-	-	-	0,002	0,004
	Sr	-	-	-	-	-	-	0,02	0,04	0,03
	Cd	-	-	-	-	-	-	-	0,001	0,001
	Cs	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00
	Ba	-	-	-	-	-	-	0,14	0,14	0,11
Ti	-	-	-	-	-	-	0,05	0,000	0,000	
Pb	-	-	-	-	-	-	-	0,03	0,05	

5.3.4.2 Εκτίμηση πηγών εκπομπής (source apportionment)

Στην ενότητα αυτή, το σύνολο των δεδομένων όλων των χημικών στοιχείων που ανιχνεύτηκαν στα εσωτερικά και εξωτερικά δείγματα των PM₁₀ αναλύονται στατιστικά με σκοπό την όσο πιο ακριβή κατηγοριοποίηση των πηγών προέλευσής τους. Η στατιστική μέθοδος που επιλέχθηκε ανήκει στην κατηγορία της παραγοντικής ανάλυσης (Factor Analysis). Σύμφωνα με τους Horke, 2003 και Watson et al., 2002 αποτελεί μία πολυμεταβλητή στατιστική μέθοδο με βασικό στόχο την εύρεση του ελάχιστου αριθμού παραγόντων οι οποίοι εξηγούν το μεγαλύτερο ποσοστό της διακύμανσης του υπό μελέτη συστήματος. Αποβλέπει στο να καθορίσει αν οι παρατηρούμενες μεταβλητές (σε αυτή τη περίπτωση συγκεντρώσεις χημικών στοιχείων) μπορούν να εξηγηθούν σε μεγάλο βαθμό με όρους από ένα πολύ μικρότερο πλήθος μεταβλητών, τις ανεξάρτητες μεταβλητές, που ονομάζονται παράγοντες (factors). Υπάρχουν διάφορα μαθηματικά μοντέλα επίτευξης της παραγοντικής ανάλυσης μιας βάσης δεδομένων όπως η ανάλυση των κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis ή PCA). Ωστόσο, το πιο πρόσφατο και επιτυχημένο στατιστικό μοντέλο παραγοντοποίησης είναι η Positive Matrix Factorization ή PMF (Saraga, 2018), το οποίο επιλέχθηκε για την παρούσα διατριβή.

Το μοντέλο της PMF αναπτύχθηκε από τον Καθηγητή του Πανεπιστημίου του Ελσίνκι P. Paatero, (Paatero, 1997) και το λογισμικό διατίθεται δωρεάν στο διαδίκτυο από την U.S.A. Environmental Protection Agency (EPA). Η εξίσωση (3) αντιπροσωπεύει το ισοζύγιο μάζας και γράφεται ως εξής:

$$\mathbf{X} = \mathbf{GF} + \mathbf{E} \quad (3)$$

Όπου

- \mathbf{X} είναι ο $n \times m$ πίνακας που αποτελείται από τα στοιχεία x_{ij} δηλαδή τη μετρούμενη συγκέντρωση του i στοιχείου στο j δείγμα ($i = 1, \dots, m$ στοιχεία, $j = 1, \dots, n$ δείγματα)
- \mathbf{G} είναι ένας $n \times p$ πίνακας που αποτελείται από τα στοιχεία g_{kj} δηλαδή τη συνεισφορά της k πηγής στο j δείγμα ($k = 1, \dots, p$ πηγές)
- \mathbf{F} είναι ο $p \times m$ πίνακας που αποτελείται από τα στοιχεία f_{ik} δηλαδή τη συγκέντρωση του i στοιχείου που εκπέμπεται από την k πηγή
- \mathbf{E} είναι ένας πίνακας υπολοίπων (Residuals matrix), τα στοιχεία e_{ij} του οποίου ορίζονται ως η διαφορά της πραγματικής τιμής από την τιμή που υπολογίζει το μοντέλο:

$$e_{ij} = x_{ij} - y_{ij} = x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{ik} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m; k = 1, 2, 3, \dots, p) \quad (4)$$

Οι μονάδες των στοιχείων των πινάκων \mathbf{X} , \mathbf{F} είναι μονάδες συγκέντρωσης σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ή αριθμό σωματιδίων/ cm^3 ενώ του πίνακα \mathbf{G} είναι $\mu\text{g}/\mu\text{g}$ ή αριθμός σωματιδίων/αριθμό σωματιδίων. Το μοντέλο της PMF προσεγγίζει τη λύση της εξίσωσης (4) με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων και απαραίτητη προϋπόθεση είναι να εξαχθούν μόνο θετικές τιμές για όλα τα σημεία των πινάκων \mathbf{F} και \mathbf{G} . Η μέθοδος χρησιμοποιεί την αβεβαιότητα των δεδομένων (η οποία είναι γνωστή για κάθε δείγμα) ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη κλιμάκωση όλων των σημείων του πίνακα \mathbf{X} . Η λύση προκύπτει από την εφαρμογή των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων, όπου η αβεβαιότητα των πειραματικών δεδομένων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του σταθμισμένου υπολοίπου e_{ij} . Έτσι, ορίζεται μία αντικειμενική συνάρτηση Q για ελαχιστοποίηση (object function) ως εξής (5):

$$Q(\mathbf{E}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{e_{ij}}{s_{ij}} \right]^2 \quad (5)$$

όπου s_{ij} είναι μία εκτίμηση της “αβεβαιότητας” της i μεταβλητής (στοιχείου) στο j δείγμα. Η PMF έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση της $Q(\mathbf{E})$ ως προς τους \mathbf{G} και \mathbf{F} , με τον επιπλέον περιορισμό κάθε ένα από τα στοιχεία των \mathbf{G} και \mathbf{F} να είναι μη αρνητικά. Η θεωρητική τιμή της Q είναι ίση με τον αριθμό των σημείων του πίνακα \mathbf{X} . Όμως, σε πραγματικά περιβαλλοντικά δείγματα (όπου μπορεί να λείπουν τιμές ή να είναι μικρότερες του ορίου ανίχνευσης του οργάνου), η τιμή της παραμέτρου Q είναι αρκετά μεγαλύτερη. Η μαθηματική λύση της ελαχιστοποίησης της συνάρτησης Q παρατίθεται αναλυτικά στο **Παράρτημα ΣΤ3**. Ο χρήστης του μοντέλου της PMF πρέπει να εξετάζει τις μεταβολές της παραμέτρου Q με την αύξηση του αριθμού των παραγόντων ενώ παράλληλα το αποτέλεσμα του πίνακα των συνεισφορών των πηγών \mathbf{G} θα πρέπει να είναι λογικό και να έχει φυσική σημασία. Η PMF καταλήγει σε έναν αριθμό παραγόντων (factors), δίνοντας τη χρονική διακύμανση και το προφίλ τους ανά κατηγορία

και ο χρήστης καλείται να τους ταυτοποιήσει με τις ανάλογες πηγές εκπομπής. Έτσι, τα τελικά αποτελέσματα δίνουν τις εξής πληροφορίες:

- A. Ποιες είναι οι πηγές που διαμορφώνουν τις μετρούμενες συγκεντρώσεις
- B. Ποια είναι η συνεισφορά της κάθε πηγής

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο (input data) είναι οι συγκεντρώσεις όλων των χημικών στοιχείων (OC-EC, ανιόντα και μέταλλα) που ανιχνεύτηκαν στα PM_{10} εντός της αίθουσας Γ3 και στην πράσινη οροφή του σχολείου κατά το διάστημα 19/01-19/06/2017. Από το μοντέλο εξήχθησαν έξι παράγοντες (ή πηγές) προέλευσης των μετρούμενων αιωρούμενων σωματιδίων. Τα σχήματα 5.37-39 απεικονίζουν γραφικά:

- Τα ποσοστά συνεισφοράς κάθε χημικού στοιχείου στον αντίστοιχο παράγοντα-πηγή που ανιχνεύτηκε από το μοντέλο (σχήμα 5.37).
- Τα ποσοστά συνεισφοράς κάθε πηγής στο σύνολο των μετρούμενων εσωτερικών και εξωτερικών PM_{10} (σχήμα 5.38).
- Τις μέσες συγκεντρώσεις των χημικών στοιχείων κάθε πηγής, ανά σημείο καταγραφής και χρονική περίοδο (σχήμα 5.39).

Ο πρώτος παράγοντας σχετίζεται με τα δευτερογενή θειικά σωματίδια (SO_4^{2-}) σε ποσοστό 65,95% και κάποια ελάχιστα ποσοστά οργανικών. Ο σχηματισμός των ανιόντων SO_4^{2-} στην ατμόσφαιρα οφείλεται στις αντιδράσεις οξειδωσης του πρωτογενούς ρυπαντή SO_2 που συζητήθηκε αναλυτικά στην ενότητα 4.5.4.1. Πρέπει ωστόσο να αναφερθεί ότι το δευτερογενές SO_4^{2-} σχετίζεται συνήθως με επεισόδια διασυννοριακής μεταφοράς, καθώς θεωρείται συστατικό των "γηρασμένων" αέριων μαζών, επειδή η οξειδωση του SO_2 σε SO_4^{2-} είναι βραδεία. Επομένως, το χημικό αυτό συστατικό των PM_{10} , σχετίζεται περισσότερο με τη μεταφορά σωματιδίων από πιο μακρινές πηγές ρύπανσης (Manousakas et al., 2017) και έχει εντοπιστεί σε αρκετές περιοχές της Ελλάδας (Gerasopoulos et al., 2006, Lazaridis et al., 2006). Η συγκεκριμένη πηγή αντιστοιχεί στο 15,79% του συνόλου των πηγών PM_{10} . Σε ότι αφορά την εποχικότητα εμφάνισης της συγκεκριμένης πηγής, κατά την ψυχρή περίοδο (Ιανουάριος-Μάρτιος 2017) οι μέσες συγκεντρώσεις είναι σχετικά χαμηλές ($0,9 \mu\text{g m}^{-3}$) και εντός της τάξης πιθανόν να ενισχύονται από την χρήση σόμπας κηροζίνης μέχρι τα τέλη Φεβρουαρίου. Κατά τη θερμή περίοδο αυξάνονται ελαφρώς εξωτερικά ($1,4 \mu\text{g m}^{-3}$) επηρεάζοντας και τις μέσες εσωτερικές συγκεντρώσεις ($1,2 \mu\text{g m}^{-3}$) λόγω ανοιχτών παραθύρων (ή και πορτών).

Ο δεύτερος παράγοντας αποτελεί ένα μίγμα σκόνης από στοιχεία του εδάφους της γης και κατάλοιπα των αυτοκινήτων. Συγκεκριμένα, η συνεισφορά των μετάλλων Mn και Fe που απαντώνται στο χώμα (Saeedi et al., 2012), σε αυτόν τον παράγοντα αγγίζουν το ποσοστό του 40,84% και 33,26% αντίστοιχα ενώ τα βαρέα μέταλλα Pb, Cu και Cd (Penkala et al., 2018) που δημιουργούνται κυρίως από την τριβή των φρένων και των ελαστικών στο δρόμο συνεισφέρουν κατά 38,84%, 31,91% και 17,55%. Τα σωματίδια αυτά επαναιωρούνται με το πέρασμα των οχημάτων από τους γειτονικούς δρόμους και καταγράφονται από τους μετρητές. Η πηγή αυτή συνεισφέρει σε ποσοστό 7,49% της συγκέντρωσης μάζας των PM_{10} . Στο εξωτερικό περιβάλλον, οι υψηλότερες μέσες συγκεντρώσεις αυτού του παράγοντα μετρήθηκαν κατά την θερμή περίοδο στα $1,9 \mu\text{g m}^{-3}$ προφανώς λόγω περισσότερης κίνησης αυτοκινήτων και ευνοϊκότερων καιρικών συνθηκών ενώ σχετικά χαμηλότερες κατά τη ψυχρή, με μέση

συγκέντρωση $1 \mu\text{g m}^{-3}$. Πιο χαμηλές μετρήθηκαν οι μέσες συγκεντρώσεις εντός της Γ3 λόγω και της απουσίας εσωτερικών πηγών, στα $0,5 \mu\text{g m}^{-3}$ κατά τη θερμή και $0,7 \mu\text{g m}^{-3}$ κατά τη ψυχρή περίοδο.

Ο τρίτος παράγοντας σχετίζεται με την παραγωγή δευτερογενών νιτρικών ανιόντων NO_3^- κατά 58,24% με μια επιπρόσθετη συνεισφορά του στοιχειακού άνθρακα EC (29,46%). Είναι ξεκάθαρο πως η πηγή αυτή οφείλεται κυρίως στο πρωτογενές διοξείδιο του αζώτου (NO_2) που απελευθερώνεται στη ατμόσφαιρα σαν προϊόν καύσης, μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις και μετατρέπεται σε NO_3^- με τις χημικές αντιδράσεις που παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην ενότητα 4.5.4.1. Στην ίδια ενότητα σχολιάζεται και ο τρόπος πιθανής παραγωγής του σε εσωτερικά περιβάλλοντα μέσω της διάσπασης του νιτρικού αμμωνίου (NH_4NO_3). Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι το ποσοστό του EC απεικονίζει την ύπαρξη προϊόντων ατελούς καύσης. Στο σύνολο των μετρούμενων PM_{10} , ο τρίτος παράγοντας κατέχει το μικρότερο ποσοστό και συγκεκριμένα το 3,66%. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό της πηγής αυτής είναι ότι εμφανίζεται κυρίως στον εξωτερικό αισθητήρα της οροφής με μεγαλύτερες μέσες συγκεντρώσεις ($2,3 \mu\text{g m}^{-3}$) κατά τη ψυχρή περίοδο και μικρότερες ($1,3 \mu\text{g m}^{-3}$) κατά τη θερμή πιθανώς λόγω των έντονων εκπομπών NO_2 σε συνδυασμό με τις διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες (Han et al., 2008 και Lee et al., 2001). Σε πολύ πιο χαμηλά επίπεδα οι εσωτερικές μέσες συγκεντρώσεις, στα $0,2 \mu\text{g m}^{-3}$ τις κρύες ημέρες και $0,3 \mu\text{g m}^{-3}$ τις θερμές, αποδεικνύοντας την μη ύπαρξη εσωτερικής πηγής εκπομπής.

Ο τέταρτος παράγοντας που ανιχνεύτηκε από το μοντέλο PMF αφορά σε εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων από καύσιμα οχημάτων και καύση βιομάζας από τα τζάκια των τριγύρω κατοικιών. Ειδικότερα, οι συνεισφορές του οργανικού και στοιχειακού άνθρακα (OC και EC) στον παράγοντα αυτόν αντιστοιχούν σε 68,96% και στο 63,13%. Τα μεγάλο ποσοστό του OC σε συνδυασμό με τις υψηλές τιμές του λόγου OC/EC στο εξωτερικό περιβάλλον (ενότητα 4.5.4.1) αυξάνει τη πιθανότητα εμφάνισης αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} από καύση βιομάζας όπως αναφέρεται και στην έρευνα των Waked et al., 2014. Συνδυαστικά, το μεγάλο ποσοστό του EC σχετίζεται με εκπομπές σωματιδίων από καύση βενζινοκίνητων ή πετρελαιοκίνητων κινητήρων των οχημάτων που διέρχονται από τη γύρω περιοχή (Yau et al., 2013 και Cheng and Hu, 2010). Το συμπέρασμα αυτό ενισχύει και ένα μη αμελητέο ποσοστό Cu στον ίδιο παράγοντα, ένα μέταλλο (25,20%) που άμεσα σχετίζεται με τις καύσεις των οχημάτων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο παράγοντας αυτός βρέθηκε να κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό από όλες τις πιθανές πηγές προέλευσης των PM_{10} με 30,30%. Αυτό σημαίνει ότι περίπου το 1/3 των συνολικών μετρούμενων χονδροκόκκων σωματιδίων προέρχονται από τη συγκεκριμένη πηγή. Φυσικά σε τέτοιου είδους σωματίδια το φαινόμενο της εποχικότητας είναι έντονο. Οι μεγαλύτερες μέσες τιμές ($1,5 \mu\text{g m}^{-3}$) παρατηρούνται στο εξωτερικό περιβάλλον κατά τη διάρκεια των ψυχρών ημερών καθώς τότε η συνεισφορά των τζακιών από τα γειτονικά σπίτια είναι εντονότερη. Αντιθέτως, κατά τις ημέρες με υψηλότερη θερμοκρασία η εξωτερική μέση συγκέντρωση οφείλεται μόνο στα οχήματα και έτσι εμφανίζεται ελαφρώς μικρότερη ($1,2 \mu\text{g m}^{-3}$). Στο εσωτερικό περιβάλλον οι μέσες συγκεντρώσεις αυτής της πηγής είναι χαμηλότερες συγκριτικά με το εξωτερικό περιβάλλον και ουσιαστικά οφείλονται στη διείσδυση των σωματιδίων μέσω των φαινομένων μεταφοράς ($0,8 \mu\text{g m}^{-3}$ τη ψυχρή περίοδο και $0,5 \mu\text{g m}^{-3}$ τη θερμή).

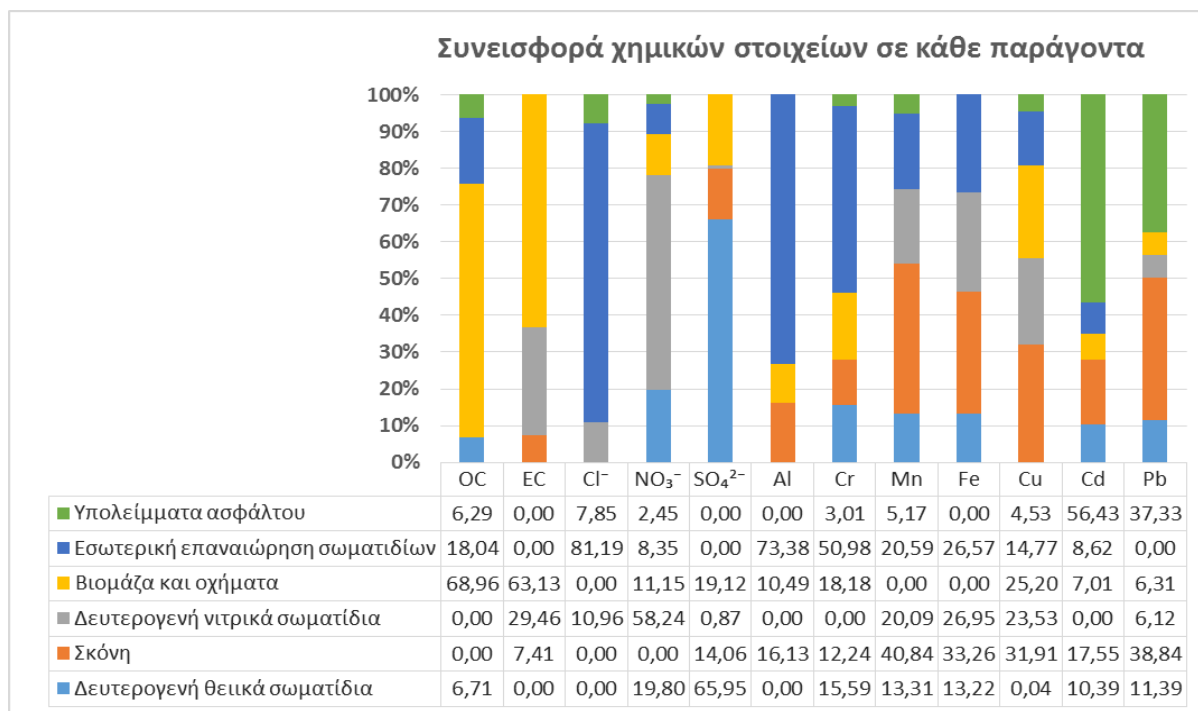
Ο πέμπτος παράγοντας αντιστοιχεί στα αιωρούμενα σωματίδια που επανααιρούνται εντός της αίθουσας Γ3 από τις διάφορες δραστηριότητες των μαθητών. Αποτελεί τη μοναδική εσωτερική πηγή

εκπομπής PM₁₀ που ανιχνεύτηκε από το μοντέλο PMF και οποία έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των ενοτήτων 4.5.1 και 4.5.2. Το προφίλ της πηγής διαμορφώνεται κυρίως από τα ανιόντα χλωρίου (Cl⁻) με ποσοστό 81,19% και από μέταλλα που απαντώνται στο ανώτατο στρώμα του φλοιού της γης (Earth crust) και συγκεκριμένα από 73,38% σε Al, 50,98% σε Cr και 26,57% σε Fe. Η έντονη παρουσία των ανιόντων χλωρίου οφείλεται στη τακτική χρήση χλωρίνης (και άλλων απορρυπαντικών) από το συνεργείο καθαρισμού εντός της αίθουσας (Zhong et al., 2014) ενώ τα στοιχεία φλοιού της γης αποτελούν τη σκόνη που κατακάθεται σε δάπεδο, θρανία και άλλες επιφάνειες της τάξης (Latif et al., 2014). Το ποσοστό συνεισφορά του πέμπτου παράγοντα στα συνολικά PM₁₀ είναι το δεύτερο μεγαλύτερο (29,89%). Γίνεται λοιπόν αντιληπτή η σημασία της ταυτοποίησης αυτής της εσωτερικής πηγής καθώς αποτελεί ένα μεγάλο κομμάτι της μετρούμενης σωματιδιακής ρύπανσης. Οι μέσες συγκεντρώσεις δεν φαίνεται να επηρεάζονται τόσο από την εποχή (ψυχρή ή θερμή) όσο από τη τοποθεσία των μετρήσεων (εξωτερική ή εσωτερική). Όπως προαναφέρθηκε τα στοιχεία αυτά απαντώνται περισσότερο στα εσωτερικά περιβάλλοντα και για το λόγο αυτό η μέση συγκέντρωση εντός της αίθουσας βρέθηκε στα 1,6 μg m⁻³ κατά την ψυχρή περίοδο (με τα παράθυρα κλειστά) και 1,4 μg m⁻³ κατά τη θερμή (με περισσότερο αερισμό). Μικρότερες οι συγκεντρώσεις στο εξωτερικό περιβάλλον με 0,9 μg m⁻³ κατά τη ψυχρή και 0,2 μg m⁻³ κατά τη θερμή περίοδο μετρήσεων. Εκεί έχουμε τη συμβολή των αιωρούμενων σωματιδίων από το αλάτι της θάλασσας (NaCl) για το σχηματισμό ανιόντων χλωρίου (Cl⁻) με τις χημικές αντιδράσεις που αναφέρονται στην ενότητα 4.5.4.1.

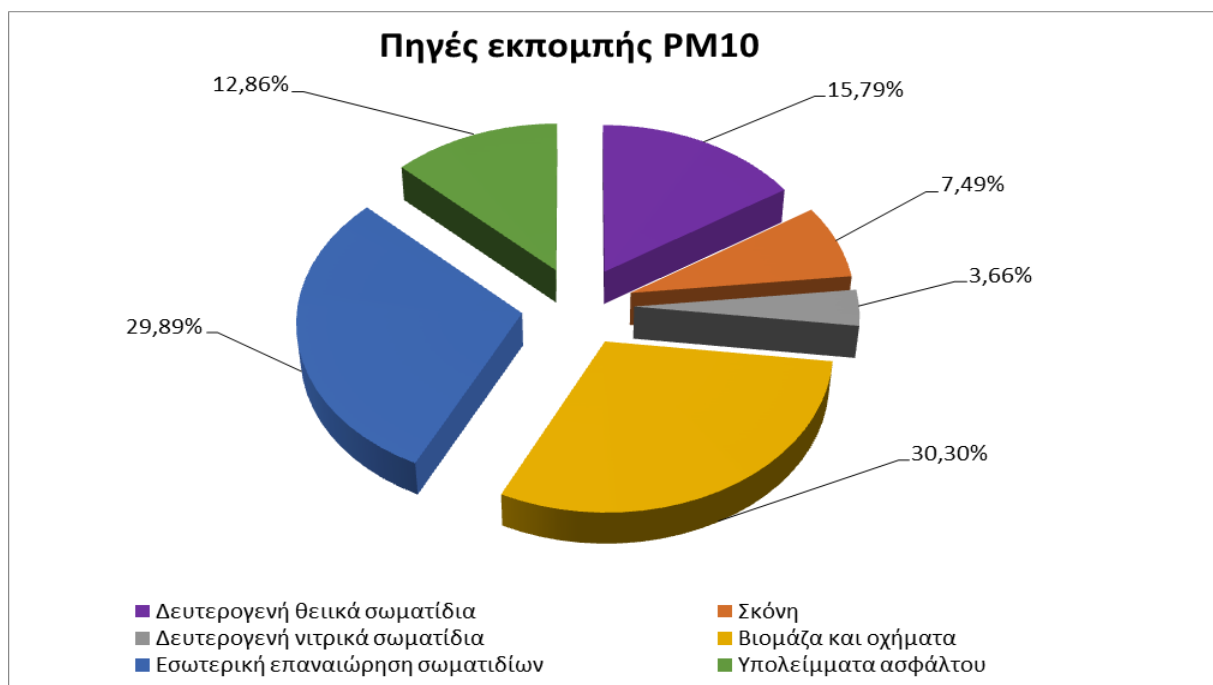
Ο έκτος και τελευταίος παράγοντας εμπεριέχει τα αιωρούμενα σωματίδια που προέρχονται από την άσφαλτο, τα ελαστικά, τα φρένα κλπ. (road dust). Δεν πρέπει να συγχέονται με τον δεύτερο παράγοντα (σκόνη) καθώς δεν εμπεριέχουν σχεδόν καθόλου στοιχεία από το έδαφος της γης. Αποτελούνται κυρίως από Cd (56,43%) και Pb (37,33%). Αποτελεί μια εξωτερική πηγή προέλευσης αέριων ρύπων καθώς σύμφωνα με τους Lucarelli et al., 2004 εμφανίζονται κατά την τριβή των φρένων, των ελαστικών και των μηχανικών εξαρτημάτων των διερχόμενων αυτοκινήτων ή μοτοσυκλετών. Η συγκεκριμένη πηγή συνεισφέρει στο σύνολο των εξεταζόμενων PM₁₀ κατά 12,86%, ένα ποσοστό που δεν είναι αμελητέο και σε συνδυασμό με τον τέταρτο παράγοντα καταδεικνύει αρκετά συχνή κυκλοφορία οχημάτων στη περιοχή γύρω από το σχολικό κτίριο. Η εποχικότητα φαίνεται να επηρεάζει τα σωματίδια αυτά αφού κατά τη ψυχρή περίοδο όπου η κίνηση είναι αυξημένη οι μέσες συγκεντρώσεις είναι μεγαλύτερες εκτός (1,5 μg m⁻³) και εντός του κτιρίου (0,9 μg m⁻³) συγκριτικά με τα αντίστοιχα αποτελέσματα κατά τη θερμή περίοδο (0,8 μg m⁻³ εντός και εκτός της αίθουσας).

Συμπερασματικά, το μαθηματικό μοντέλο PMF κατέδειξε τα προφίλ των έξι κυριότερων πηγών εκπομπής PM₁₀ στον άμεσο εξωτερικό και εσωτερικό χώρο του σχολείου για το διάστημα 19/01-19/06/2017, όπως και τα αντίστοιχα ποσοστά της καθεμιάς από αυτές στο σύνολο των αερολυμάτων. Αναμφισβήτητα τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην τοπική αέρια ρύπανση έχουν τα οχήματα τόσο λόγω της καύσης ντίζελ ή βενζίνης όσο και λόγω των υπολειμμάτων φρένων και ελαστικών από την τριβή με την άσφαλτο. Συνδυαστικά με τα οχήματα, αιωρούμενα σωματίδια ίδιας περίπου χημικής σύστασης ενισχύονται και από τη καύση βιομάζας (τζάκια, σόμπες κλπ.) κατά τις ψυχρές ημέρες. Η δεύτερη πιο σημαντική πηγή ρύπανσης είναι εσωτερική (εντός της αίθουσας Γ3) και αναφέρεται στην επαναιώρηση σωματιδίων που εμφανίζονται στη τάξη λόγω της συχνής χρήσης χλωρίνης και άλλων καθαριστικών

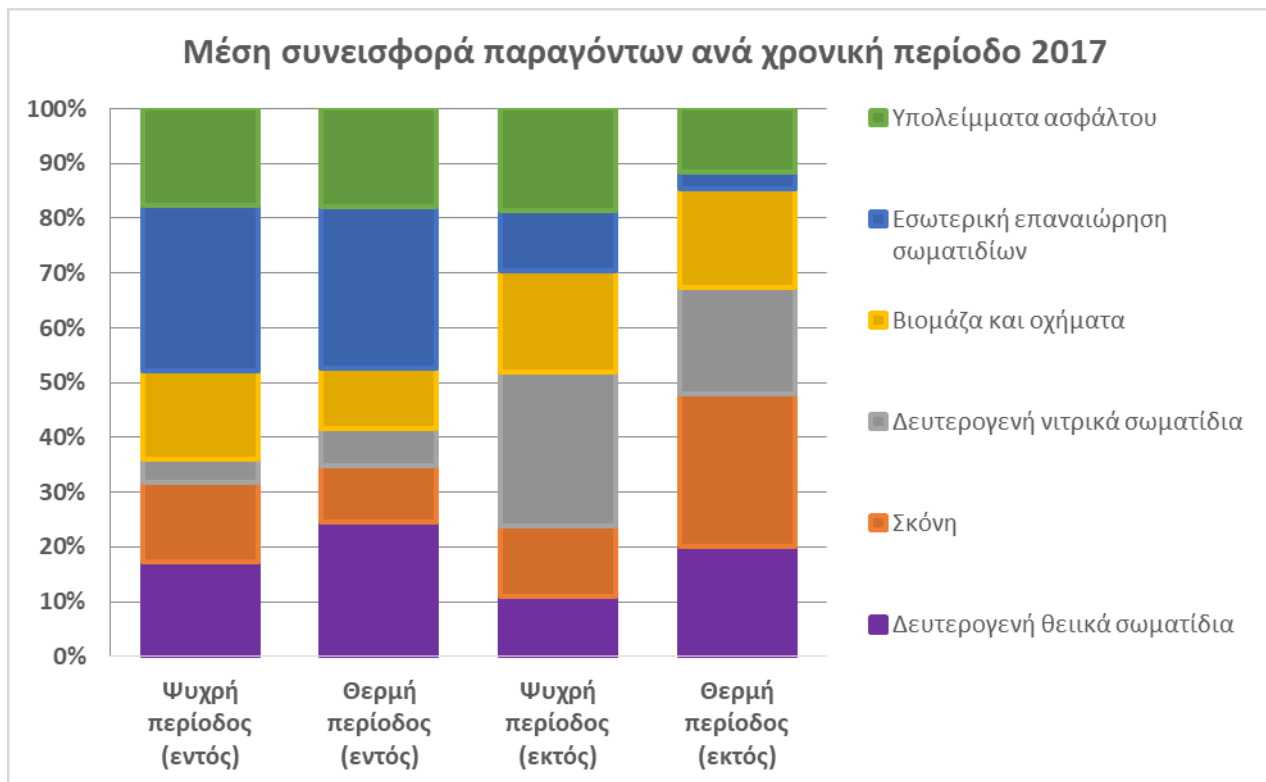
αλλά και από υπολείμματα σκόνης. Τέλος, μια μη αμελητέα πηγή PM₁₀ βρέθηκε να είναι ο σχηματισμός θειικών και νιτρικών δευτερογενών αιωρούμενων σωματιδίων (SOA) μέσω μηχανισμών μεταφοράς.



Σχήμα 5.37: Ποσοστά συνεισφοράς χημικών στοιχείων σε κάθε παράγοντα-πηγή



Σχήμα 5.38: Ποσοστά συνεισφοράς κάθε πηγής στο σύνολο των μετρούμενων PM₁₀



Σχήμα 5.39: Μέση συνεισφορά κάθε πηγής ανά σημείο καταγραφής και χρονική περίοδο

5.4 Συσχετισμός και συνδυαστική ανάλυση των μετρούμενων παραμέτρων

Στα παραπάνω υποκεφάλαια δόθηκε μια πλήρης εικόνα για προφίλ της κάθε μετρούμενης παραμέτρου, ανά εποχή, στο 2^ο Δημοτικό σχολείο Νέας Σμύρνης. Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται προσπάθεια πιθανής σύνδεσης μεταξύ όλων των μετρούμενων μεγεθών και καθορισμού των κυριότερων παραμέτρων που καθορίζουν τα επίπεδα αέριας ρύπανσης στο κτίριο. Για το λόγο αυτό διερευνάται η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας (T), σχετικής υγρασίας (RH), διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), συνολικών πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOC) και αιωρούμενων σωματιδίων (PM₁, PM_{2.5} και PM₁₀), επί του συνόλου του κτιρίου και κατά τη διάρκεια όλης της πειραματικής διαδικασίας. Η μεθοδολογία η οποία ακολουθείται περιλαμβάνει αρχικά την εξέταση πιθανών συσχετίσεων μεταξύ των παραμέτρων μέσω χρήσης των συντελεστών Spearman (για μη παραμετρικά δεδομένα). Εν συνεχεία εφαρμόζονται μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (Multiple Linear Regression) μεταξύ των παραμέτρων ενδιαφέροντος με στόχο τον υπολογισμό συντελεστών προσδιορισμού (coefficients of determination – R²). Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη ανάλυση όλων των δεδομένων εφαρμόζονται έλεγχοι στατιστικής σημαντικότητας (ANOVA tests, p<0,05) ούτως ώστε να εξασφαλίζεται η ανεξαρτησία μεταξύ των επιλεγμένων χρονοσειρών όπως και η στατιστική σημαντικότητα των αποτελεσμάτων.

Αρχικά η ανάλυση επικεντρώνεται στο σύνολο των δεδομένων και συγκεκριμένα εξετάζονται συσχετίσεις μεταξύ όλων των μετρούμενων παραμέτρων, σε όλους τους χώρους του κτιρίου και για όλες τις περιόδους μέτρησης. Ο πίνακας 5.20 συνοψίζει τα αποτελέσματα.

Πίνακας 5.20: Συντελεστές συσχέτισης Spearman μεταξύ όλων των μετρούμενων παραμέτρων, σε όλες τις αίθουσες και καθ' όλη τη πειραματική περίοδο

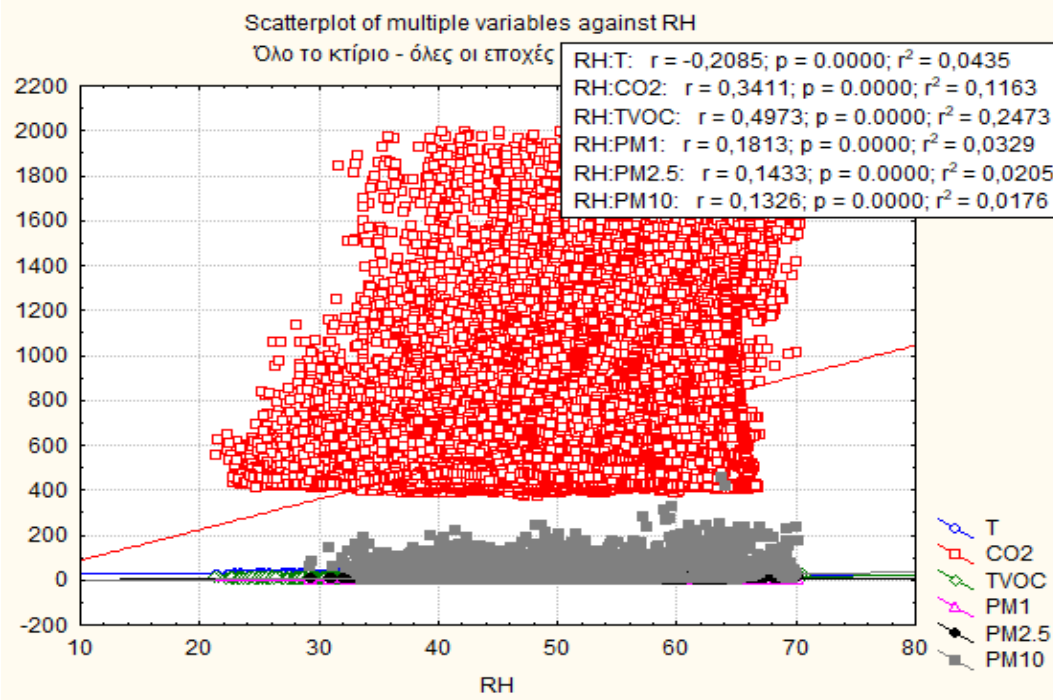
Spearman Rank Order Correlations (Όλο το κτίριο - όλες οι εποχές) MD pairwise deleted Marked correlations are significant at p <,05000							
Variable	T	RH	CO2	TVOC	PM1	PM2.5	PM10
T	1.000	-0.228	-0.138	-0.029	-0.652	-0.403	-0.368
RH	-0.228	1.000	0.242	0.482	0.147	0.072	0.055
CO2	-0.138	0.242	1.000	0.299	0.306	0.425	0.494
TVOC	-0.029	0.482	0.299	1.000	0.150	-0.001	-0.017
PM1	-0.652	0.147	0.306	0.150	1.000	0.782	0.639
PM2.5	-0.403	0.072	0.425	-0.001	0.782	1.000	0.921
PM10	-0.368	0.055	0.494	-0.017	0.639	0.921	1.000

Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι η συσχέτιση μεταξύ RH και TVOC. Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των δύο αυτών μεταβλητών ισούται με 0,482 και θεωρείται μια ισχυρή συσχέτιση καθώς πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι πρόκειται για σύγκριση δεδομένων 11 μηνών και σε 6 διαφορετικά σημεία μέτρησης. Επιπλέον, σχετικά καλές συσχετίσεις εμφανίζει το CO₂ με σχεδόν όλες τις μεταβλητές, ένα αποτέλεσμα το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς ο ρύπος αυτός σχετίζεται άμεσα με την ανθρώπινη παρουσία/δραστηριότητα, η οποία όπως φάνηκε και στα παραπάνω υποκεφάλαια

επηρεάζει όλους τους αέριους ρύπους εντός των αιθουσών. Επιπροσθέτως, εμφανίζονται ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ των αιωρούμενων σωματιδίων κάτω το οποίο εξηγείται από το ότι τα PM_{10} και $PM_{2.5}$ αποτελούν μέρος των συνολικών μετρούμενων PM_{10} .

Η επίδραση της RH στα εκπεμπόμενα TVOC εσωτερικών χώρων αναφέρεται σε διάφορες έρευνες της διεθνούς βιβλιογραφίας. Ειδικότερα, οι Markowicz και Larsson, 2015 μετά από πειράματα σε δύο κλειστές αποθήκες, αναφέρουν ότι καθώς η RH ξεπερνούσε το 58%, παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση στα μετρούμενα VOC. Συγκεκριμένα μάλιστα αναφέρουν μεγάλες συγκεντρώσεις τολουολίου και στυρενίου ακολουθούμενες από υψηλά επίπεδα RH. Πρέπει να αναφερθεί ότι οι συγκεκριμένες πτητικές οργανικές ενώσεις συμπεριλαμβάνονται στα TVOCs των οργάνων μέτρησης της παρούσας έρευνας. Παρόμοια αποτελέσματα και στη μελέτη του Wolkoff, 1998 στην οποία παρατηρήθηκε ότι οι μεγάλες ποσότητες υδρατμών μπορούν να απορροφήσουν πτητικές ενώσεις από τις επιφάνειες των υλικών. Στο συμπέρασμα αυτό έχουν καταλήξει και πιο πρόσφατες μελέτες, όπου αναφέρουν ξεκάθαρα ισχυρές συσχετίσεις της RH με συγκεκριμένα VOC (όπως το τολουόλιο) εντός διαφορετικών εσωτερικών χώρων (Manoukian et al., 2016, Wolkoff, 2017) .

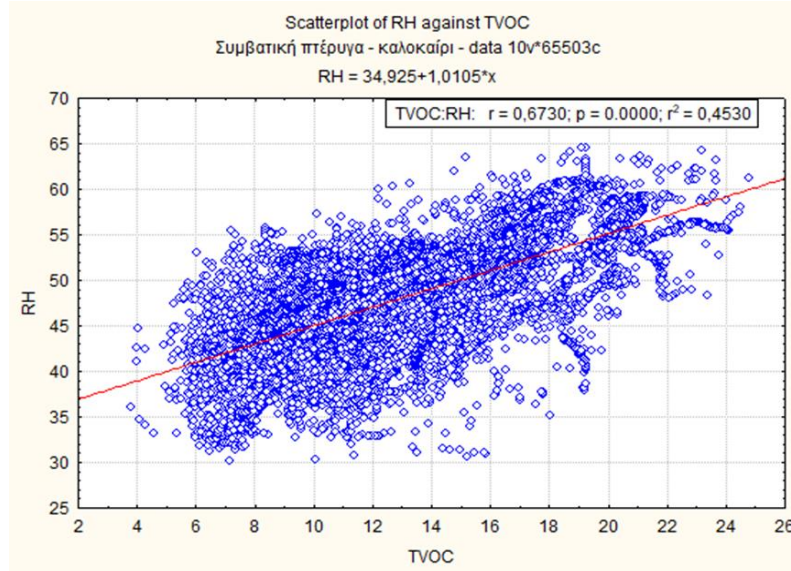
Βάσει του πίνακα 5.20 φαίνεται ότι το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και στις υπό εξέταση αίθουσες διδασκαλίας. Για το λόγο αυτό πρέπει να διερευνηθούν οι συνθήκες και οι παράγοντες που συντελούν στη συσχέτιση της RH με τα TVOC. Αρχικώς, στο σχήμα 5.40 παρατίθεται πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ της RH και όλων των υπόλοιπων μεταβλητών για όλες τις πειραματικές ημέρες, στις αίθουσες διδασκαλίας. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 που προκύπτει από τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων μεταξύ της RH και των TVOC είναι ίσος με 0,2473. Αυτό σημαίνει ότι το 24,73% της διακύμανσης των TVOC στο σύνολο των μετρήσεων μπορεί να εξηγηθεί από τις μεταβολές στα εσωτερικά επίπεδα RH. Δεν παρατηρείται κάποιος άλλος ισχυρός συντελεστής R^2 με άλλη μεταβλητή. Επιπρόσθετα όλες οι τιμές p (p values) τείνουν στο 0 οπότε το αποτέλεσμα που προκύπτει έχει στατιστική σημαντικότητα.



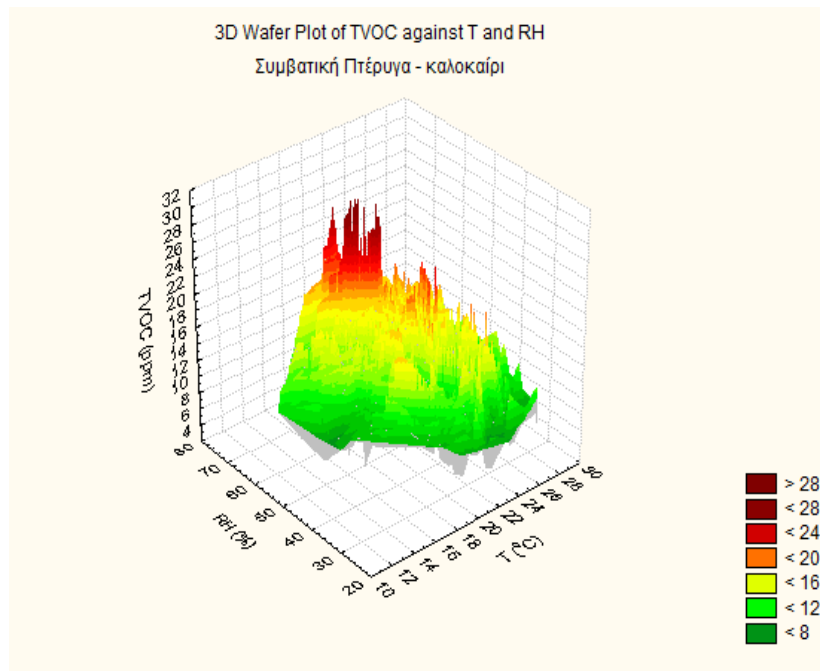
Σχήμα 5.40: Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ της RH και των υπόλοιπων μεταβλητών σε όλο το κτίριο και καθ'όλη τη πειραματική περίοδο

Εφόσον διαφαίνεται μια ξεκάθαρη σχέση μεταξύ της RH και των επιπέδων TVOC στις διάφορες αίθουσες, η ανάλυση γίνεται πιο στοχευμένη διαχωρίζοντας τα δεδομένα ανά εποχή (ψυχρή και θερμή) και ανά πτέρυγα του κτιρίου (πράσινη και συμβατική). Οι συντελεστές R^2 που προκύπτουν για τη κάθε περίπτωση εξάγουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Για τη περίπτωση της πράσινης πτέρυγας συντελεστής R^2 κατά τη ψυχρή περίοδο βρέθηκε 0,0791 και αντιστοίχως 0,0637 κατά τη θερμή. Φαίνεται λοιπόν ότι οι συνθήκες που δημιουργεί η πράσινη οροφή δεν ευνοούν κάποια πιθανή σύνδεση μεταξύ TVOC και RH. Αντιθέτως, στη συμβατική πτέρυγα του κτιρίου ο συντελεστής R^2 μεταξύ των δύο μεταβλητών υπολογίστηκε ίσος με 0,1976 για τη ψυχρή περίοδο ενώ κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου βρέθηκε να είναι 0,4530. Το αποτέλεσμα αυτό παρουσιάζεται και γραφικά στο σχήμα 5.41. Όπως προκύπτει, στις αίθουσες κάτω από τις συμβατικές οροφές κατά τις ημέρες που επικρατούν υψηλές εσωτερικές θερμοκρασίες, το 45,30% των διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων TVOC μπορεί να εξηγηθεί από τις αλλαγές στα επίπεδα RH. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι οι υψηλές θερμοκρασίες εντός του εκάστοτε χώρου ευνοούν την ισχυρή συσχέτιση μεταξύ TVOC και RH. Στη πραγματικότητα η αυξημένη θερμοκρασία αποτελεί ικανή συνθήκη ούτως ώστε όταν η RH είναι ανεβασμένη, να αυξάνονται και οι συγκεντρώσεις των TVOC. Στην ίδια παρατήρηση κατέληξε και η έρευνα των Zhou et al., 2017 ύστερα από μετρήσεις που έλαβαν χώρα σε 604 κατοικίες εντός δύο μεγαλουπόλεων στη Κίνα. Οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι όταν η θερμοκρασία στο χώρο είναι άνω των 30°C , η διαλυτότητα συγκεκριμένων VOC (όπως το τολουόλιο και τα ξυλόλια) στις επιφάνειες των διάφορων υλικών του χώρου (έπιπλα, δομικά υλικά, κ.α.) μειώνεται. Ταυτοχρόνως ευνοείται η απορρόφηση σταγονιδίων νερού από τα υλικά αυτά λόγω αυξημένων επιπέδων RH. Έτσι αυξανόμενη

της RH, αυξάνονται και οι συγκεντρώσεις TVOC με το φαινόμενο να ορίζεται ως “sink effect”. Παρόμοια συμπεράσματα αναφέρονται και στη δημοσίευση των Lin et al., 2008. Στο σχήμα 5.42 παρατίθεται σε τρισδιάστατη απεικόνιση η ραγδαία αύξηση των TVOC στη συμβατική πτέρυγα του εξεταζόμενου κτιρίου όταν αυξάνεται η σχετική υγρασία, υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας.



Σχήμα 5.41: Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ της RH και των υπόλοιπων μεταβλητών σε όλο το κτίριο και καθ’όλη τη πειραματική περίοδο



Σχήμα 5.42: Συνδυαστική επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας στις συγκεντρώσεις TVOC στη συμβατική πτέρυγα του σχολείου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η παρούσα διατριβή ασχολήθηκε με θέματα ποιότητας αέρα και θερμικών συνθηκών εσωτερικών χώρων. Ο λόγος αποκτά αξία είναι το γεγονός ότι το πείραμα διεξήχθη σε ένα Δημοτικό σχολείο και αφορά κυρίως μια ευπαθή ομάδα του πληθυσμού, τα παιδιά. Εντός του χώρου του σχολείου οι μαθητές περνάνε πάνω από το μισό ποσοστό της ημέρας τους. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το ότι οι πνεύμονές τους είναι λιγότερο ανεπτυγμένοι σε σχέση με των ενηλίκων, καθιστά τη διερεύνηση της φυσικής και της ποιότητας του αέρα, σε ένα τέτοιο κτίριο, αναγκαία. Αφενός εξετάστηκαν οι θερμικές συνθήκες (θερμοκρασία και σχετική υγρασία) που επικράτησαν στο κτίριο κατά τη διάρκεια μιας σχολικής χρονιάς και κυρίως η επίδραση της πράσινης (φυτοκαλυμμένης) οροφής στις αίθουσες που βρίσκονται υπό την επιρροή της. Αφετέρου διερευνήθηκε σε βάθος το μέγεθος της εσωτερικής και άμεσης εξωτερικής αέριας ρύπανσης του σχολείου, δημιουργώντας έτσι ένα ολοκληρωμένο προφίλ των αέριων ρύπων τόσο για τις ίδιες τις αίθουσες όσο και για μια αστική περιοχή της Αθήνας, όπως είναι η Νέα Σμύρνη. Στις προηγούμενες ενότητες, αναλύθηκε εκτενώς μια πληθώρα αποτελεσμάτων για τους κυριότερους ρύπους που μπορεί να συναντήσει κάποιος σε εσωτερικούς χώρους μέσα από μια μεγάλη βάση δεδομένων από μετρήσεις σχεδόν ενός χρόνου. Επιπλέον, παρατέθηκε αναλυτικά και ο βαθμός αερισμού της εκάστοτε αίθουσας καθώς αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο για την επεξήγηση της συμπεριφοράς των συγκεντρώσεων των ρύπων. Οι κυριότεροι ρυπαντές διαχωρίστηκαν σε κατηγορίες και αποτελούνταν από το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), τις ολικές πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOC), τους αερομεταφερόμενους μύκητες (airborne fungi) και τα αιωρούμενα σωματίδια διάφορων αεροδυναμικών διαμέτρων (PM₁, PM_{2.5} και PM₁₀). Ειδικότερα για τα τελευταία, έγινε προσπάθεια εκτίμησης των πηγών εκπομπής τους με εξειδικευμένες μετρήσεις (χρήση φίλτρων) και τη εφαρμογή ενός σύγχρονου στατιστικού μοντέλου (PMF). Τέλος επιχειρήθηκε προσπάθεια σύνδεσης όλων των παραμέτρων μεταξύ τους και ομαδοποίησης των κυριότερων παραγόντων διαμόρφωσης της εσωτερικής ποιότητας αέρα.

6.1 Ανακεφαλαίωση αποτελεσμάτων

Ο σκοπός της διατριβής είναι ξεκάθαρος. Μέσα από τις διαδικασίες μετρήσεων μιας σχολικής χρονιάς, να μελετήσει τις ενδεχόμενες διαφορές που επιφέρει η εγκατάσταση μιας πράσινης οροφής στις εσωτερικές θερμικές συνθήκες και τη ποιότητα του αέρα των αιθουσών και να αποτυπώσει όσο το δυνατόν αναλυτικότερα την αέρια επιβάρυνση του κτιρίου από τους σημαντικότερους ρυπαντές. Πραγματοποιώντας μια αναδρομή στα κεφάλαια 4 και 5, τα σημαντικότερα συμπεράσματα που εξάγονται είναι τα εξής:

- Η αίθουσα Γ3 (1^{ου} ορόφου) η οποία βρίσκεται ακριβώς κάτω από την πράσινη οροφή παρουσίασε γενικά καλύτερες θερμοκρασιακές συνθήκες συγκριτικά με την αντίστοιχη αίθουσα (B1) κάτω από την ανατολική οροφή σπλισμένου σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, κατά τη πρώτη πειραματική περίοδο (θερμή) και χωρίς τη παρουσία μαθητών στο σχολείο η μέση θερμοκρασία της Γ3 μετρήθηκε κατά 2,8 °C μικρότερη από την αντίστοιχη της B1. Τα επίπεδα θερμοκρασίας όμως και στις δύο αίθουσες ήταν υψηλότερα από τα θεσμοθετημένα όρια άνεσης. Κατά τη δεύτερη πειραματική περίοδο (ψυχρή) με τη παρουσία μαθητών η πράσινη οροφή διατήρησε τη μέση θερμοκρασία στην αντίστοιχη αίθουσα κατά 3,3 °C υψηλότερη και εντός ορίων άνεσης λόγω καλύτερης μόνωσης για τα ίδια διαστήματα λειτουργίας της κεντρικής θέρμανσης. Τη τρίτη περίοδο (θερμή) με παρουσία μαθητών, η πράσινη στέγη οδήγησε σε μείωση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα κατά περίπου 1,3 °C σε σχέση με την ανατολική σπλισμένου σκυροδέματος.
- Στην αίθουσες ισογείου η επίδραση της πράσινης οροφής στα θερμοκρασιακά επίπεδα φέρεται να φθίνει καθώς οι διαφορές με τις αντίστοιχες τάξεις είναι πολύ μικρές. Ειδικότερα για τους μήνες Οκτώβριο, Μάρτιο και Απρίλιο που είναι πιο ήπιοι, οι θερμοκρασιακές διαφορές σε αυτούς του χώρους είναι σχεδόν μηδενικές.
- Η σχετική υγρασία κινήθηκε σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα στις αίθουσες με σχεδόν όλες τις παρατηρήσεις της χρονιάς να μην παραβιάζουν τα θεσμοθετημένα όρια. Κατά τη ψυχρή περίοδο βρέθηκε χαμηλότερη στην αίθουσα κάτω από την πράσινη οροφή σε σχέση με την αίθουσα κάτω από την ανατολική οροφή σπλισμένου σκυροδέματος ενώ κατά τις θερμές περιόδους συμβαίνει το αντίθετο. Μολαταύτα οι διαφορές είναι μικρές και δεν δημιουργούνται συνθήκες δυσφορίας.
- Οι εντονότερες διαφορές μεταξύ των τάξεων (ως προς τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία) εντοπίζονται του μήνες που παρατηρούνται ακραίες χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες (Ιανουάριο-Ιούνιο).
- Πάνω στη πράσινη οροφή μετρήθηκαν χαμηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας και υψηλότερα κορεσμένης υγρασίας λόγω της ύπαρξης βλάστησης και της χρήσης του αυτόματου ποτιστικού συστήματος ιδιαίτερα κατά τις θερμές ημέρες.
- Για το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), παρατηρήθηκε ένας σαφής διαχωρισμός μεταξύ των τάξεων του 1^{ου} ορόφου και του ισογείου. Ο 1^{ος} όροφος βρέθηκε κατά γενική ομολογία ο πιο επιβαρυσμένος από αυτόν το ρύπο. Στις αίθουσες αυτές εμφανίστηκαν πολλά μέγιστα, ξεπερνώντας κατά πολύ τα επιτρεπόμενα όρια. Ο βασικός λόγος που οδήγησε σε αυτό το

αποτέλεσμα είναι η αναλογία ατόμων-εμβαδού (δείκτης μαθητή/m²) μέσα στην εκάστοτε τάξη όπως και ο εκάστοτε ρυθμός αερισμού.

- Η συμπεριφορά του CO₂ χρησιμοποιήθηκε επιπλέον σαν δείκτης αερισμού της εκάστοτε αίθουσας και μέσο υπολογισμού του ρυθμού αερισμού των χώρων (AER h⁻¹). Οι τιμές ήταν πολύ χαμηλές αντικατοπτρίζοντας τον μη επαρκή φυσικό αερισμό των τάξεων. Οι χαμηλότερες εξ αυτών βρέθηκαν στις αίθουσες Α3 και Β3, ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός των οποίων, δεν επιτρέπει την άμεση εισροή φρέσκου αέρα στο εσωτερικό τους καθώς ο προσανατολισμός των πορτών τους είναι προς το εσωτερικό μέρος του κτιρίου.
- Οι συνολικές πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOC) παρουσίασαν μεγάλο ενδιαφέρον καθότι δεν ακολουθούσαν ένα συγκεκριμένο πρότυπο συμπεριφοράς, όπως στην περίπτωση του CO₂. Ο βασικότερος λόγος του φαινομένου αυτού είναι η ύπαρξη εσωτερικών πηγών (έπιπλα, καθαριστικά, δομικά υλικά κλπ.). Συνδυαστικά, ο ανθρώπινος παράγοντας αποδείχτηκε ότι συνδράμει στις απότομες αυξομειώσεις των ρύπων αυτών.
- Οι μέσες συγκεντρώσεις των TVOC σε όλες τις αίθουσες κυμάνθηκαν γενικώς σε χαμηλά επίπεδα. Μόνο κάποια στιγμιαία μέγιστα κατά τις ώρες των μαθημάτων παραβίασαν τα θεσμοθετημένα όρια, πράγμα που σημαίνει ότι οι τιμές δεν δημιουργούν ένα επικίνδυνο περιβάλλον για την υγεία των παιδιών.
- Οι αερομεταφερόμενοι μύκητες είναι μια εξίσου σημαντική παράμετρος διαμόρφωσης της ποιότητας του εσωτερικού αέρα στις αίθουσες. Τα εύρη τιμών στα οποία ανιχνεύθηκαν σημαντικές συγκεντρώσεις σπορίων ήταν από 13 °C έως 31,1 °C για θερμοκρασία εσωτερικού αέρα και από 26,4% έως 69,6% για εσωτερική σχετική υγρασία. Τα επίπεδα των 21 °C και 43% εμφανίζονται ως οι βέλτιστες εσωτερικές συνθήκες για τη μέγιστη συγκέντρωση ενώ ο Απρίλιος φάνηκε να είναι ένας μήνας συνεχούς αυξανόμενης συγκέντρωσης του γένους *Penicilium*. Επιπλέον, το σύνολο των μυκήτων συσχετίζεται θετικά αλλά όχι ισχυρά με την εσωτερική θερμοκρασία και σχεδόν καθόλου με την εσωτερική σχετικής υγρασίας. Σημαντική συσχέτιση όμως παρατηρήθηκε μεταξύ των εσωτερικών PM₁₀ και του γένους *Aspergillus*.
- Ο υπολογισμός του δείκτη έκθεσης (Exposure Dose) των παιδιών στο μυκητιακό φορτίο του αέρα των αιθουσών κατέδειξε κάτι σημαντικό. Τον μεγαλύτερο ρόλο στη προσωπική έκθεση του κάθε μαθητή στους μύκητες δεν έχει τόσο η συγκέντρωση των αέριων αυτών ρυπαντών στο χώρο, όσο τα διαφορετικά επίπεδα δραστηριότητας (χαμηλής, μέσης ή υψηλής έντασης) των παιδιών εντός των τάξεων. Αυτός είναι και ο λόγος που οι μαθητές νεότερης ηλικίας εμφανίζουν συχνότερα συμπτώματα ασθενειών, καθώς επιδίδονται περισσότερες ώρες σε δραστηριότητες μέσα στην αίθουσα, εισπνέουν μεγάλες ποσότητες αερομεταφερόμενων βακτηρίων και ταυτόχρονα το ανοσοποιητικό τους σύστημα είναι ευάλωτο.
- Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM₁, PM_{2.5} και PM₁₀) εντός των αιθουσών κυμάνθηκαν γενικώς σε χαμηλές συγκεντρώσεις μη παραβιάζοντας κατά γενικό κανόνα τα θεσμοθετημένα όρια έκθεσης. Η εμφάνιση ακραίων τιμών, κυρίως PM₁₀, που ξεπερνούν το επιτρεπτό όριο οφείλεται στην ανθρώπινη δραστηριότητα. Για αρκετές πειραματικές ημέρες παρατηρήθηκε απότομη αύξηση των σωματιδιακών ρύπων κατά τη διάρκεια του μαθήματος, είτε στη πτέρυγα της πράσινης οροφής είτε στην αντίστοιχη της ανατολικής οροφής οπλισμένου σκυροδέματος. Οι μεγαλύτερες τιμές εμφανίστηκαν τη χειμερινή περίοδο όπου η ανθρώπινη δραστηριότητα ήταν

περισσότερη λόγω των καιρικών συνθηκών και του περιορισμένου αερισμού λόγω των κλειστών παραθύρων. Η όλη κίνηση εντός της αίθουσας προκαλούσε την επαναιώρηση των αερολυμάτων με συνέπεια την καταγραφή πολλών ακραίων τιμών και αυξημένων συγκεντρώσεων από τα όργανα μέτρησης. Αντιθέτως, τις ημέρες που ο καιρός ήταν πιο ζεστός και τα παράθυρα ήταν ανοιχτά οι συγκεντρώσεις ως επί το πλείστο δεν έφταναν το επιτρεπτό όριο ακόμα και με τα παιδιά εντός της αίθουσας. Η δημιουργία κυκλοφορίας του αέρα βοήθησε στην απομάκρυνση των ρύπων στο έξω περιβάλλον το οποίο δεν βρέθηκε ιδιαίτερα επιβαρυνόμενο από αερολύματα.

- Η κύρια διάφορα των αιωρούμενων σωματιδίων εντός και εκτός των αιθουσών είναι ότι στην πρώτη περίπτωση υπάρχει ένα σχεδόν σταθερό πρότυπο συμπεριφοράς με απότομη αύξηση των συγκεντρώσεων στην αρχή της ημέρας (ώρες μαθημάτων) και σταδιακή μείωση τις απογευματινές ώρες, ενώ στη δεύτερη η συμπεριφορά είναι ακανόνιστη και απρόβλεπτη. Τα καιρικά φαινόμενα είναι αυτά που καθορίζουν τη κίνηση των αερολυμάτων στην εξωτερική ατμόσφαιρα. Η διεύθυνση του ανέμου έχει τη σημασία της στις εξωτερικές μετρήσεις καθώς όπως παρατηρήθηκε με το Νότιο άνεμο (S) σχετίζονται οι υψηλότερες καταγραφές PM_{10} (κυρίως κατά τη ψυχρή περίοδο) ενώ με τον Βορειοδυτικό (NW) οι χαμηλότερες.
- Η σύγκριση των εσωτερικών και εξωτερικών συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων έδειξε ότι ενώ τα $PM_{2.5}$ και τα PM_1 προέρχονται περισσότερο από το εξωτερικό περιβάλλον όλη τη χρονιά, τα PM_{10} ενισχύονται αρκετά από την εσωτερική επαναιώρηση κατά τους χειμερινούς μήνες, λόγω κλειστών παραθύρων. Συγκεκριμένα, ο πιο επιβαρυνμένος μήνας βρέθηκε να είναι ο Ιανουάριος.
- Η χημική ανάλυση των PM_{10} κατέδειξε σημαντικά αποτελέσματα. Ο στοιχειακός άνθρακας (EC) κυριαρχεί στις μετρήσεις εξωτερικού περιβάλλοντος έναντι των αντίστοιχων εσωτερικών ως προϊόν ατελούς καύσης. Ο οργανικός άνθρακας (OC) εμφανίζεται σε υψηλότερες συγκεντρώσεις εντός της αίθουσας Γ3 λόγω επαναιώρησης σκόνης από τις δραστηριότητες των μαθητών.
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των PM_{10} ως προς τη σύστασή τους σε υδατοδιαλυτά ανιόντα. Τα θειικά ανιόντα (SO_4^{2-}) είναι αυτά που εμφάνισαν τις μεγαλύτερες μέσες συγκεντρώσεις τόσο στην αίθουσα όσο και στην οροφή. Τα τελευταία σχηματίζονται στο εξωτερικό περιβάλλον μέσω των ετερογενών ή ομοιογενών αντιδράσεων διοξειδίου του θείου (SO_2). Ακολουθούν τα νιτρικά ανιόντα (NO_3^-) που μετρήθηκαν υψηλότερα στο εξωτερικό περιβάλλον συγκριτικά με το εσωτερικό ιδίως κατά τις ψυχρές ημέρες όπου υπάρχει έντονη η συμβολή της καύσης βιομάζας από τα γειτονικά σπίτια για θέρμανση. Τη μικρότερη συνεισφορά ανιόντων στα PM_{10} έχουν τα ανιόντα χλωρίου όπου εσωτερικά οφείλονται στη σκόνη που επαναιωρείται στην αίθουσα και στα προϊόντα καθαρισμού ενώ κύρια εξωτερική πηγή προέλευσης είναι σωματίδια που φτάνουν στη περιοχή από τη θάλασσα.
- Από τη χημική ανάλυση 16 μετάλλων στα εσωτερικά και εξωτερικά PM_{10} , φάνηκε ότι τα κυρίαρχα στοιχεία στις συνολικές συγκεντρώσεις ήταν τα Al και Fe. Τα μέταλλα αυτά είναι γεωλογικής προέλευσης και ανήκουν στην οικογένεια των στοιχείων που απαρτίζουν το φλοιό της Γης, (earth crust). Εύκολα λοιπόν διαπιστώνεται ότι η σκόνη από το έδαφος που περιέχει αυτά τα σωματίδια, αφενός φτάνει μέσω του ανέμου στον μετρητή που βρίσκεται στην οροφή

του κτιρίου, αφετέρου εισρέει εντός της τάξης και ενισχύεται με την επαναιώρηση. Ανιχνεύτηκαν όμως και κάποια τοξικά μέταλλα (Zn, Cu, Mn, Cr, και Pb) που σχετίζονται με τη κίνηση των οχημάτων είτε αυτά αφορούν εκπομπές από καύσιμα, είτε υπολείμματα φρένων και λάστιχων μέσω τριβής (road dust particles).

- Το στατιστικό μοντέλο PMF αναλύοντας τις συγκεντρώσεις όλων των χημικών παραμέτρων κατέδειξε 6 σημαντικές πηγές (παράγοντες) προέλευσης για τα μετρούμενα PM_{10} εντός και εκτός του σχολείου. Όπως φάνηκε, το μεγαλύτερο ποσοστό συνεισφοράς έχουν τα προϊόντα καύσης των οχημάτων και βιομάζας από τα γειτονικά τζάκια ιδιαίτερα κατά τη χειμερινή περίοδο. Η δεύτερη πιο σημαντική πηγή ρύπανσης προέρχεται από υπολείμματα σκόνης που εμφανίζονται μέσω του μηχανισμού της επαναιώρησης. Σημαντική είναι και η συνεισφορά των υπολειμμάτων από την χρήση των φρένων και ελαστικών των οχημάτων. Τέλος, μη αμελητέες εξωτερικές πηγές PM_{10} βρέθηκαν να είναι ο σχηματισμός θεικών και νιτρικών δευτερογενών αιωρούμενων σωματιδίων (SOA) μέσω μηχανισμών μεταφοράς.
- Οι εσωτερικές συγκεντρώσεις TVOC συνδέονται άμεσα με τα επίπεδα σχετικής υγρασίας στις αίθουσες της συμβατικής πτέρυγας. Ο λόγος είναι ότι σε συνθήκες υψηλής εσωτερικής θερμοκρασίας τα δύο μεγέθη λειτουργούν ανταγωνιστικά ως προς την απορρόφησή τους από τις διάφορες επιφάνειες με αποτέλεσμα καθώς αυξάνονται τα επίπεδα σχετικής υγρασίας να αυξάνονται και τα TVOC (sink effect).

6.2 Γενικά Συμπεράσματα

- Η πράσινη οροφή έχει σαφέστατα θετική επίδραση στις κλιματικές συνθήκες κυρίως στη θερμοκρασία της αίθουσας με την οποία έρχεται σε επαφή. Στους πιο απομακρυσμένους χώρους του κτιρίου όπως στην αίθουσα του ισογείου, η επίδραση αυτή φθίνει. Επιπροσθέτως, δεν επηρεάζει τη ποιότητα του εσωτερικού αέρα η οποία εξαρτάται καθαρά από πρακτικές επαρκούς αερισμού, (άνοιγμα παραθύρων). Παρ'όλα αυτά η παρουσία της απλά ενισχύει και σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να υποκαταστήσει τη θερμική μόνωση που είναι απαραίτητη για κάθε κτίριο.
- Ο ρυθμός αερισμού (AER) της κάθε τάξης παρουσιάζει πολύ χαμηλές τιμές. Ωστόσο, υπάρχει μεγάλο εύρος τιμών AER ανάμεσά τους λόγω της διαφορετικής χωροθεσίας και του προσανατολισμού τους στο κτίριο. Το γεγονός αυτό επηρεάζει και τις συγκεντρώσεις των ρύπων που διαφοροποιούνται από τάξη σε τάξη.
- Ο διαχωρισμός των αιθουσών σε επιβαρυμένες ή μη είναι δύσκολος καθότι εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων που καθορίζουν το προφίλ της κάθε τάξης. Είναι δεδομένο ότι η αίθουσα Β3 αποτελεί τη πιο επιβαρυμένη αίθουσα λόγω του μεγέθους της και αρχιτεκτονικού της σχεδιασμού. Αναμφίβολα, η αίθουσα Γ3, η οποία βρίσκεται στον 1^ο όροφο κάτω από την πράσινη οροφή παρουσιάζει τις καλύτερες θερμοκρασιακές συνθήκες ενώ παράλληλα οι εσωτερικές συγκεντρώσεις αέριων ρύπων είναι αρκετά χαμηλές.
- Γενικότερα οι συγκεντρώσεις υποβάθρου όλων των εξεταζόμενων ρύπων κυμάνθηκαν σε χαμηλά επίπεδα (κάτω από τα επιτρεπτά όρια) καθιστώντας τον αέρα στις τάξεις μη επικίνδυνο για την υγεία των μαθητών. Μολαταύτα, εδώ πρέπει να τονιστεί η εποχικότητα των φαινομένων καθώς κατά τις ψυχρές ημέρες που τα παράθυρα είναι κυρίως κλειστά έχουμε απότομες αυξήσεις, στιγμιαία μέγιστα και παραβιάσεις των θεσμοθετημένων ορίων. Για αέριους ρύπους όπως το CO₂ αυτό οφείλεται στην ανθρώπινη εκπονή, για τα PM₁₀ στην επαναιώρηση και για TVOC στο συνδυασμό εκπομπών από υλικά κατασκευής και ανθρώπινης δραστηριότητας. Η μεγάλη σημασία της ανθρώπινης δραστηριότητας εντός των αιθουσών φάνηκε και στους δείκτες έκθεσης σε αερομεταφερόμενους μύκητες καθώς αποτελεί πιο σημαντικό παράγοντα από τις ίδιες τις συγκεντρώσεις των спорίων.
- Από τη διερεύνηση όλων των ανωτέρω αποτελεσμάτων, σε μια προσπάθεια ομαδοποίησης των βασικότερων παραγόντων επιρροής της εσωτερικής αέριας ρύπανσης του 2ου Δημοτικού Νέας Σμύρνης θα μπορούσε να υποστηριχτεί ότι το βασικότερο ρόλο επιρροής σε όλους τους ρύπους παίζει η ανθρώπινη παρουσία και οι δραστηριότητες των μαθητών στην εκάστοτε τάξη. Εξίσου σημαντικό όμως, για τα PM₁₀, είναι το επίπεδο εξωτερικής αέριας ρύπανσης που διαμορφώνεται από τα οχήματα και τα τζάκια της περιοχής γύρω από το σχολείο. Τέλος η σχετική υγρασία, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, βρέθηκε να επιδρά καθοριστικά στις συγκεντρώσεις των TVOC εντός των αιθουσών.

6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στο πείραμα που έλαβε χώρα στο 2^ο Δημοτικό σχολείο Νέας Σμύρνης, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, έγινε η προσπάθεια να καλυφθούν όσες περισσότερες περιβαλλοντικές πτυχές ήταν δυνατό, για να προκύψει ένα ορθό και σύγχρονο επιστημονικά αποτέλεσμα. Διερευνήθηκαν θέματα θερμικών συνθηκών και ποιότητας αέρα του κτιρίου το οποίο έχει το χαρακτηριστικό να διατηρεί σε ένα μέρος του πράσινη οροφή και να βρίσκεται σε μια πυκνοκατοικημένη περιοχή της Αθήνας. Αυτό δεν σημαίνει όμως, ότι η όποια έρευνα σταματά στο σημείο αυτό, καθώς πάντα θα υπάρχουν καινούριες παράμετροι και νέα δεδομένα προς μελέτη. Παρακάτω παρατίθενται κάποιες αξιόλογες προτάσεις για παρόμοια μελλοντικά πειράματα:

- Μετρήσεις ενεργειακής κατανάλωσης και σχεδιασμός ενός σύγχρονου συστήματος θέρμανσης για πλήρη εκμετάλλευση της πράσινης οροφής.
- Διεξαγωγή νέων μετρήσεων στο σχολείο και χημική ανάλυση των καταμετρούμενων VOCs για να ταυτοποιηθούν επακριβώς οι εσωτερικές πηγές εκπομπής που διαμορφώνουν το υπόβαθρο.
- Μελέτη και σχεδιασμός ενός σύγχρονου συστήματος μηχανικού εξαερισμού που θα ενισχύει το παρόν σύστημα φυσικού αερισμού του κτιρίου επιτυγχάνοντας τις βέλτιστες συνθήκες για το εσωτερικό περιβάλλον.
- Μετρήσεις ενεργειακής κατανάλωσης και σχεδιασμός ενός σύγχρονου συστήματος θέρμανσης για πλήρη εκμετάλλευση της πράσινης οροφής.

Βιβλιογραφία

1. Spengler J.D., Sexton K. (1983). Indoor air pollution: a public health perspective. *Science*, 221,9–17.
2. Montgomery D., Kalman A. (1989). Indoor/outdoor air quality: reference pollutant concentrations in complaintfree residences. *Applied Industrial Hygiene*, 4(1), 17-20.
3. Kreiss K. (1990). The Sick Building Syndrome: Where is the Epidemiologic Basis? *Am. J. Public Hlth.*, 80,1172–1173.
4. Burge S., Hedge A., Wilson S., Harris-Bass J., Robertson A.S. (1987). Sick building syndrome: A study of 4373 office workers. *Annals of Occupational Hygiene*, 31, 493-504.
5. Mendell M.J. (1993). Non-specific symptoms in office workers: A review and summary of the epidemiologic literature. *Indoor Air*, 3, 227-236.
6. Skov P., Valbjorn O. (1987). The "sick" building syndrome in the office environment: The Danish town hall study. *Environment International*, 13, 339-349.
7. Sundell J. (1994). On the Association between Building Ventilation Characteristics, some Indoor Environmental Exposures, some Allergic Manifestations and Subjective Symptom Reports. *Indoor Air*. Supplement 2.
8. Höpfe P. (2002). Different aspects of assessing indoor an outdoor thermal comfort. *Energy Buildings*, 34, 661–665.
9. Leech J.A., Raizenne M., Gusdorf J. (2004). Health in occupants of energy efficient new homes. *Indoor Air*, 14, 169– 173.
10. World Health Organazation (WHO): <http://www.who.int/whr/1995/en/> (Last reviewed 2015).
11. Jenkins P.L., Phillips T.J., Mulberg E.J., Hui S.P. (1992). Activity Patterns of Californians: Use of and Proximity to Indoor Pollutant Sources. *Atmos. Environ.*, 26A (12), 2141-2148.
12. Srivastava A., Jain V.K. (2007). A study to characterize the suspended particulate matters in an indoor environment in Delhi, India. *Build. Environ.*, 42, 2046–2052.
13. Sundell J., Andersson B., Andersson K., Lindvall T. (1993). Volatile organic compounds in ventilating air in buildings at different sampling points in the buildings and their relationship with the prevalence of occupant symptoms. *Indoor Air*, 3, 82– 93.
14. Bornehag C.G., et al. (2001). Dampness in buildings and health. Nordic interdisciplinary review of the scientific evidence on associations between exposure to dampness in buildings and health effects (NORDDAMP). *Indoor air*, 11, 72-86.
15. Sundell J., Lindvall T., Berndt S. (1994). Associations between type of ventilation and air flow rates in office buildings and the risk of SBS-symptoms among occupants. *Environment International*, 20(2), 239-251.
16. Wargocki P., et al. (2002). Ventilation and health in non-industrial indoor environments: report from a European Multidisciplinary Scientific Consensus Meeting (EUROVEN). *Indoor air*, 12(2), 113-128.
17. Klepeis N.E., Nelson W.C., Ott W.R., Robinson J.P., Tsang A.M., Switzer P., Behar J.V., Hern S.C. and Engelmann W.H. (2001). The national human activity pattern survey (NHAPS): A resource for

- assessing exposure to environmental pollutants. *Journal Expo. Anal. Environ. Epidemiol.*, 11, 231–252.
18. Erdmann C.A., Apte M.G. (2004). Mucous membrane and lower respiratory building related symptoms in relation to indoor carbon dioxide concentrations in the 100-building BASE dataset. *Indoor Air*, 14,8.
 19. Lee Y.S., Guerin D.A. (2009). Indoor environmental quality related to occupant satisfaction and performance in LEED-certified buildings. *Indoor and Built Environment*, 18, 293-300.
 20. Annesi-Maesano I., Hulin M., Lavaud F., et al. (2012). Poor air quality in classrooms related to asthma and rhinitis in primary schoolchildren of the French 6 Cities Study. *Thorax*, 67, 682–688.
 21. Faustman E.M., Silbernagel S.M., Fenske R.A., Burbacher T.M., Ponce R.A. (2000). Mechanisms underlying Children’s susceptibility to environmental toxicants. *Environmental Health Perspectives*, 108, 13–21.
 22. Godoi R., Avigo D., Campos V., Tavares T., de Marchi M., Grieken R., et al. (2009). Indoor air quality assessment of elementary schools in Curitiba, Brazil. *Water, Air, Soil Pollution*, 9, 171–177.
 23. Madureira J., I. Paciência, E. OliveiraFernandes. (2012). Levels and indoor-outdoor relationships of size-specific particulate matter in naturally ventilated Portuguese schools. *Journal Toxicol. Environ. Health A*, 75 (22-23), 1423–1436.
 24. Rovelli S., Cattaneo A., Nuzzi C.P., Spinazzè A., Piazza S., Carrer P., Cavallo D.M. (2014). Airborne particulate matter in school classrooms of northern Italy. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 11, 1398–1421.
 25. Peters A., Perz S., Döring A., Stieber J., König W., Wichmann H.E. (2000). Activation of the autonomic nervous system and blood coagulation in association with an air pollution episode. *Inhal. Toxicol.*, 12, 51–61.
 26. Samet J.M., Dominici F., Curriero F.C., Coursac I., Zeger S.L. (2000). Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987–1994. *N. Engl. J. Med.*, 343, 1742–1749.
 27. Le Tertre A., Medina S., Samoli E., et al. (2002). Short-term effects of particulate air pollution on cardiovascular diseases in eight European cities. *J. Epidemiol. Community Health*, 56, 773–779.
 28. Lee S.C., Chang M. (2000). Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong. *Chemosphere*, 41,109–113.
 29. Shendell D. G., Prill R., Fisk W. J., Apte M. G., Blake D., Faulkner D. (2004). Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*, 14, 333–341.
 30. Hummelgaard J., Juhl P., Sæbjornsson K.O., Clausen G., Toftum J., Langkilde G. (2007). Indoor air quality and occupant satisfaction in five mechanically and four naturally ventilated open-plan office buildings. *Building and Environment*,42,(12),4051–8.
 31. Daisey J.M., Angell W.J., Apte M.G. (2003). Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: analysis of existing information. *Indoor Air*, 13, 53–64.
 32. Stranger M., Potgieter-Vermaak S.S., Van Grieken R. (2007). Comparative overview of indoor air quality in Antwerp, Belgium. *Environ Int.*,33,789–97.
 33. Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία (ΕΛΣΤΑΤ), <http://www.statistics.gr/>. (Last reviewed 2016)

34. Dascalaki E.G., Sermpetzoglou V.G. (2011). Energy performance and indoor environmental quality in Hellenic schools. *Energ. Build.*,43,718-27.
35. Κοκμοτού Κωνσταντίνα. (2013). Διδακτικά σενάρια για το γλωσσικό μάθημα Γ'-Δ' και Ε'-ΣΤ' Δημοτικού. Μεταπτυχιακή Εργασία, Σχολή Κοινωνικών Και Ανθρωπιστικών Σπουδών – Παιδαγωγικό Τμήμα Δημοτικής Εκπαίδευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών.
36. Diapouli E., A. Chaloulakou, et al. (2007a). Levels of ultrafine particles in different microenvironments-implications to children exposure. *The Science of the total environment*, 388 (1-3), 128-136.
37. Chaloulakou A., Mavroidis I. (2002). Comparison of indoor and outdoor concentrations of CO at a public school. Evaluation of an indoor air quality model. *Atmospheric Environment*, 36, 1769–1781.
38. Siskos P.A., Bouba K.E., Stroubou A.P. (2001). Determination of selected pollutants and measurement of physical parameters for the evaluation of indoor air quality in school buildings in Athens, Greece. *Indoor Built Environ*, 10 (3–4), 185–192.
39. Synnefa A., Polichronaki E., Papagiannopoulou E., Santamouris M., Mihalakakou G., Doukas P., et al. (2003). An Experimental Investigation of the Indoor Air Quality in Fifteen School Buildings in Athens, Greece. *International Journal of Ventilation*, 2:3, 185-201.
40. Dorizas P.V., Kapsanaki-Gotsi E., Assimakopoulos M.N., Santamouris M. (2013). Particulate matter and airborne fungi concentrations in schools in Athens. *Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics (Helmis CG and Nastos PT eds.)*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Springer Atmospheric Sciences, 2, 931-937.
41. Dimoudi A., Kostarela P. (2009). Energy monitoring and conservation potential in school buildings in the C climatic zone of Greece. *Renewable Energy*, 34, 289–296.
42. Kalimeri K.K., Saraga D.E., Lazaridis V.D., et al. (2016). Indoor air quality investigation of the school environment and estimated health risks: Two season measurements in primary schools in Kozani, Greece. *Atmos. Pollut. Res.*, 1– 15.
43. Spala A., Bagiorgas H.S., Assimakopoulos M.N., Kalavrouziotis J., Matthopoulos D., Mihalakakou G. (2008). On the green roof system: selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece. *Renew Energy*, 33, 173–177.
44. Lakey S. J. P., Berkemeier T., Tong H., Arangio A. M., Lucas K., Pöschl U., Shiraiwa M. (2016). Chemical exposure-response relationship between air pollutants and reactive oxygen species in the human respiratory tract. *Sci. Rep.*, 6, 32916.
45. Brunekreef B., Holgate S.T. (2002). Air Pollution and Health, *Lancet*, 360, 1233-1242.
46. Xu H., Guinot B., Cao J., et al. (2018). Source, health risk and composition impact of outdoor very fine particles (VFPs) to school indoor environment in Xi'an, Northwestern China. *Sci. Total Environ.*, 612, 238-246.
47. Α. Αυγέρης, Α. Γεράνιος, Ε. Γιαμά. Ι. Δεληγιαννάκης, Α. Κατσογιάννης, Σ. Κεφαλόπουλος, Δ. Κολοκοτσά, Δ. Ματθόπουλος, Π. Μιχαλακάκου, Τ. Νικολάου, Μ. Παπαγλάστρα, Α. Παπαδόπουλος, Μ. Σανταμούρης, Π. Τσέζος. (2007). Ρύπανση και Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος στα Κτίρια. Εκδόσεις: ΣΕΛΚΑ 4Μ ΤΕΚΔΟΤΙΚΗ.
48. Das I., Pedit J., Handa S., Jagger P. (2018). Household air pollution (HAP), microenvironment and child health: strategies for mitigating HAP exposure in urban Rwanda. *Environ. Res. Lett.*, 13,045011.

49. ANSI/ASHRAE Standard 62-1989, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers Inc.: Atlanta, GA, USA, 1989.
50. von Pettenkofer M., 1858. Über den Luftwechsel in Wohngebäuden, Cotta'sche Buchhandlung, München.
51. Βασιλικιώτης Γ. Σ. 1986. Χημεία Περιβάλλοντος, 2η Εκδ, University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
52. Wolkoff P. (2018). *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 221, 376.
53. Santamouris M., Synnefa A., Assimakopoulos M. (2008). Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation. *Energy Build*, 40,1833-43.
54. Fromme H., Diemer J., Dietrich S., Cyrus J. (2008). Chemical and morphological properties of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}) in school classrooms and outdoor air. *Atmos. Environ.*,42, 6597–6605.
55. Hanninen O. (2013). Novel second degree solution to single zone mass-balance equation improves the use of build-up data in estimating ventilation rates in classrooms. *J. Chem. Health Saf.*, 20, 14-19.
56. Emmerich S. J., Teichman K. Y., Persily A. K. (2017). Literature review on field study of ventilation and indoor air quality performance verification in high-performance commercial buildings in North America. *Science and Technology for the Built Environment*, 23, 1159.
57. Blondeau P., Iordache V., Poupard O., Genin D., Allard F. (2005). Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools. *Indoor Air*, 15, 2–12.
58. Huber G., Wanner H.U. (1983). Indoor air quality and minimum ventilation rate. *Environ. Int.*, 9, 153-156.
59. Maroni M., Seifert B., Lindvall T. (1995). *Indoor Air Quality: A comprehensive reference book. Air quality monographs*, vol. 3.
60. Meislich H., Nechamkin H., Sharefkin J. (1983). Οργανική Χημεία. Μετάφραση: Βάρβογλης Α., ΕΣΠΙ ΕΚΔΟΤΙΚΗ Ε.Π.Ε., Αθήνα.
61. Häggström M. (2014). *WikiJournal of Medicine*, 1(2).
62. Lubes G., Goodarzi M. (2018). GC-MS based metabolomics used for the identification of cancer volatile organic compounds as biomarkers. *J. Pharm. Biomed. Anal.*, 147, 313-322.
63. Goodman N.B., Steinemann A., Wheeler A.J., Paevere P.J., Cheng M. (2017). Volatile organic compounds within indoor environments in Australia. *Building and Environment*, 122, 116-125.
64. Krol S., Zabiegata B., Namiesnik J. (2010). Monitoring VOCs in atmospheric air. I. On-line gas analyzers. *Trends Anal. Chem.*, 29(9), 1092–1100.
65. Johansson I. (1978). Determination of organic compounds in indoor air with potential reference to air quality. *Atmos. Environ.*, 12, 1371-1377.
66. Seifert B., Abraham H.J. (1982). Indoor air concentrations of benzene and some other aromatic hydrocarbons, *Ecotoxicol. Environ. Safety*, 6, 190-192.
67. Raysoni A.U., Stock T.H., Sarnat J.A., et al. (2017). Evaluation of VOC concentrations in indoor and outdoor microenvironments at near road schools. *Environ. Pollut.*,231 (Pt 1),681–93.

68. Jarke F.H., Dravnieks A., Gordon S.M. (1981). Organic contaminants in indoor air and their relation to outdoor contaminants. *ASHRAE Transactions*, 87 I, 153-166.
69. Berglund B., Berglund U., Lindvall T. (1986). Assessment of discomfort and irritation from the indoor air. In: *Proc. IAQ-86. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (Ashrae)*, Atlanta, GA, pp. 138-149.
70. EPA, 1989. Record of Decision for Fairchild, Intel and Raytheon Sites, Middlefield/Ellis/ Whisman (MEW) Study Area, Mountain View, California. Region 9, San Francisco, CA (<https://yosemite.epa.gov/r9/sfund/r9sfdocw.nsf/>). (Last reviewed 2017).
71. Παπαγιαννακόπουλος Π., Μπάρτζης Ι., Σίσκος Π. (1996). Τελική Έκθεση: Σύστημα καταγραφής VOC και λοιπών μη συμβατικών ρύπων.
72. Guo H., Lee S.C., Chan L.Y., Li W.M. (2004). Risk assessment of exposure to volatile organic compounds in different indoor environments. *Environmental Research*, 94, 57–66.
73. Sakamoto Y., Shoji K., Bui M.T., Pham T.H., Ly B.T., Kajii Y., (2017). Air quality study in Hanoi, Vietnam in 2015–2016 based on a one-year observation of NO_x, O₃, CO and a one-week observation of VOCs. *Atmospheric Pollution Research*. 9(3), 544–551.
74. Campagnolo D., Saraga D.E., Cattaneo A., Spinazzè A., Mandin C., Mabilia R., Perreca E., Sakellaris I., Canha N., Mihucz V.G., Szigeti T. (2017). VOCs and aldehydes source identification in European office buildings-The OFFICAIR study. *Building and Environment*, 115, 18-24.
75. Wiglusz R., Sitko E., Nikel G., Jarnuszkiewicz I., Igielska B. (2002). The effect of temperature on the emission of formaldehyde and volatile organic compounds (VOCs) from laminate flooring- Case study. *Building Environ.*, 37, 41–44.
76. Lerner C.J.E., Sanchez E.Y., Sambeth J.E., Porta A.A. (2012). Characterization and health risk assessment of VOCs in occupational environments in Buenos Aires, Argentina. *Atmos. Environ.*, 55, 440–447.
77. Correa S. M., Teixeira, J. R., Sodr e, E. D., Souza, C. V. (2010). Emissions of VOC from a landfill and its plume dispersion modeling. *Linnaeus ECO-TECH* 10, Kalmar, Sweden, November 22-24.
78. Cui P., Wu S., Li F., Xiao Y., Zhang, H. (2014a). Investigation on using SBS and active carbon filler to reduce the VOC emission from bituminous materials. *Materials*, 7(9), 6130–6143.
79. Norb ack D., Hashim J.H., Hashim Z., Ali F. (2017) Volatile organic compounds (VOC), formaldehyde and nitrogen dioxide (NO₂) in schools in Johor Bahru, Malaysia: Associations with rhinitis, ocular, throat and dermal symptoms, headache and fatigue. *Sci. Total Environ.*, 92, 153–160.
80. A.P. Jones. (1999). Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, 33, 4535-4564.
81. Minnesota Department of Health. (2010, April). Volatile organic compounds (VOCs) in your home. (Last reviewed 2016) <https://www.environment.com/wp-content/uploads/VOC-Fact-Sheet.pdf>
82. Levin H. (1989). Sick building syndrome: Review and exploration of causation hypotheses and control methods. In: *IAQ89 the Human Equation: Health and Comfort, Proceedings of the ASHRAE/ SOEH Conference IAQ89*, San Diego, CA, pp. 263–274.
83. Zhang M., Zhang S., Feng G., Su H., Zhu F., Ren M. Cai Z. (2017). Indoor airborne particle sources and outdoor haze days effect in urban office areas in Guangzhou. *Environ. Res.*, 154, 60–65.

84. Mendell M.J. (1993). Non-specific symptoms in office workers: a review and summary of the epidemiologic literature. *Indoor Air*, 3, 227–236.
85. Chao H.J., Schwartz J., Milton D.K., Burge H.A. (2003). The work environment and workers' health in four large office buildings. *Environ. Health Perspec.*, 111, 1242–1248.
86. Fisk W.J. (2000). Health and productivity gains from better indoor environments and their relationship with building energy efficiency. *Ann. Rev. Energy Environ.*, 25, 537–566.
87. Wargocki, P. Wyon D.P., Baik Y.K., Clausen G., Fanger P.O. (1999b). Perceived air quality, Sick Building Syndrome (SBS) symptoms and productivity in an office with two different pollution loads. *Indoor Air*, 9, 165-179.
88. Seppanen O., Fisk W.J. (2002). Association of ventilation system type with SBS symptoms in office workers. *Indoor Air*, 12, 98–112.
89. Seinfeld J., Pandis S. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics - From Air Pollution to Climate Change* (2nd Edition).
90. Δρ. Χουσιάδας Χ. (2005). Φυσική και Δυναμική των Αιωρούμενων Μικροσωματιδίων, Θερινό Σχολείο «ΕΚΕΦΕ-Δημόκριτος».
91. Ανδρίτσος Ν. (Last reviewed 2017). Σωματιδιακοί Ρύποι, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. <https://docplayer.gr/31524782-3-somatidiakoi-rypoi-aioroymena-somatidia-particulate-matter.html>
92. Φυτιανός Κ., Σαμαρά-Κωνσταντίνου Κ. (2009). Χημεία περιβάλλοντος. University studio Press, Θεσσαλονίκη, 47-145.
93. Querol X., Alastuey A., Lopez-Soler A., Plana F. (2000). Levels and Chemistry of Atmospheric Particulates induced by a Spill of Heavy Metal Mining Wastes in Donana Area, Southwest Spain. *Atmospheric Environment*, 34, 239 - 253.
94. Natural Resources Defense Council. (1996a), Air Pollution FAQ, Natural Resources Defense Council.
95. Repace J.L., Lowrey A.H. (1980). Indoor air pollution, tobacco smoke, and public health. *Science*, 208, 464-472.
96. Repace J.L. (1981). The problem of passive smoking. *Bull. N.Y. Acad. Med.*, 57, 936-946.
97. Girman J.R., Apte M.G., Traynor G.W., Allen J.R., Hollowell C.D. (1982). Pollutant emission rates from indoor combustion appliances and sidestream cigarette smoke. *Environ. Int.*, 8, 213-221.
98. Kanakidou, M. et al. (2005). Organic aerosol and global climate modelling: a review. *Atmos. Chem. Phys.* 5, 1053–1123.
99. Robinson A.L., Donahue N.M., Shrivastava M.K., Weitkamp E.A., Sage A.M., Grieshop A.P., Lane T.E., Pierce J.R., Pandis S.N. (2007). Rethinking organic aerosols: semivolatile emissions and photochemical aging. *Science*, 315, 1259–1262.
100. Kroll J. H., Seinfeld, J. H. (2008). Chemistry of secondary organic aerosol: Formation and evolution of low-volatility organics in the atmosphere, *Atmos. Environ.*, 42, 3593–3624.
101. Hallquist M. et al. (2009). The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 5155–5236.
102. Ambient Air Quality Standards (AAQS) for Particulate Matter (<https://www.arb.ca.gov/research/aqs/pm/pm.htm>) (Last reviewed 2015).
103. Ruzer L.S., Harley N.H. (eds) (2005). *Aerosols handbook: Measurement, dosimetry, and health effects*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
104. Pitts N. J., Finlayson-Pitts J.B. (1999). *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere* Academic Press: New York, p 969.

105. Chate D.M., Pranesha T.S. (2004). Field measurements of sub-micron aerosol concentrations during cold season in India. *Current Science*, 86, 1610–1613.
106. Salonen R., Kreyling W., Cassee F. R., Riediker M. (2008). Heterogeneities of PM associated to health effects: sources and PM characteristics. COST 633 Workshop, Brussels.
107. Di Q., Wang Y., Zanobetti A., Wang Y., Koutrakis P., Choirat C., Dominici F., Schwartz J.D. (2017). Air pollution and mortality in the medicare population. *N. Engl.J. Med.*, 376,2513–2522.
108. Chen R., Yin P., Meng X., et al. (2017). Fine particulate air pollution and daily mortality. A nationwide analysis in 272 Chinese cities. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 196,73–81.
109. Lelieveld J., Haines A., Pozzer A. (2018). Age dependent health risk from ambient air pollution: childhood mortality in middle and low-income countries. *Lancet Planet Health*, 2, 292–300.
110. Peters A., Dockery D.W., Heinrich J., Wichmann H.E. (1997b). Short-Term Effects of Particulate Air Pollution on Respiratory Morbidity in Asthmatic Children. *European Respiratory Journal*, 10, 872-879.
111. Van Landuyt K.L. et al. (2012). Should we be concerned about composite (nano) dust? *Dent. Mater.*,28 , 1162–70.
112. Oberdorster O., Gelein R.M., Ferin J. and Weiss B. (1995): «Association of particulate air pollution and cute mortality: involvement of ultrafine particles, *Inhalation Toxicology*, 7, 124».
113. Vlaanderen J.J., Janssen N.A., Hoek G., Keski-Rahkonen P., Barupal D.K., Cassee F.R., et al. (2017). The impact of ambient air pollution on the human blood metabolome. *Environ. Res.* 156, 341–348.
114. Lui K.H., Bandowe B.A.M., Tian L., Chan C.S., Cao J.J., Ning, Z., Lee S.C., Ho K.F. (2017). Cancer risk from polycyclic aromatic compounds in fine particulate matter generated from household coal combustion in Xuanwei, China. *Chemosphere*, 169, 660–668.
115. Chen H., Du W., Shen G., et al. (2016). Household air pollution and personal exposure to nitrated and oxygenated polycyclic aromatics (PAHs) in rural households: Influence of household cooking energies. *Indoor Air*, 27(1),169–178.
116. Μασσαρά Β., 2011. Αιωρούμενα Σωματίδια Στην Ατμόσφαιρα Της Πάτρας. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών.
117. European Commission (Last reviewed 2016) (<http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>).
118. European Lung Foundation (Last reviewed 2016) (<http://www.europeanlung.org/en/>).
119. EEA. Air Quality in Europe—2018 Report. EEA Report No 12/2018. European Environment Agency, 2018 (Last reviewed 2016) (<https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2018>)
120. ASHRAE, 62.1.2007 (2007). Ventilation for Acceptable indoor air quality, Atlanta, GA, American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE Standard 62-2007).
121. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 2425/86), Εγκαταστάσεις σε κτίρια. Στοιχεία υπολογισμού φορτίων κλιματισμού κτιριακών χώρων. Ε΄ΕΚΔΟΣΗ.
122. Pantazaras A., Santamouris M., Lee S.E., Assimakopoulos M.N. (2018). A decision tool to balance indoor air quality and energy consumption: a case study. *Energy Build* 2018, 165, 246–258.

123. ANSI/ASHRAE Standard 62-2001, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc.: Atlanta, GA, USA, 2001.
124. Davidson C. (2003). Marine Notice : Carbon Dioxide : Health Hazard. Australian Maritime Safety Authority.
125. Mølhave L., Clausen G., Berglund B., et al. (1997). Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in Indoor Air Quality Investigations, *Indoor Air*, 7, 225-240.
126. Raatikainen M., Skön J.P., Turunen M., Leiviskä K., Kolehmainen M. (2013). Evaluating Effects of Indoor Air Quality in School Buildings and Students' Health: A Study in Ten Schools of Kuopio, Finland. In Proceedings of the 2nd International Conference on Environment, Energy and Biotechnology (PCBEE), Kuala Lumpur, Malaysia, 8–9 June.
127. Nguyen J.L., Schwartz J., Dockery D.W. (2014). The relationship between indoor and outdoor temperature, apparent temperature, relative humidity, and absolute humidity. *Indoor Air*, 24(1), 103–112.
128. Stull R. (2011). Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, 2267–2269.
129. Giannopoulou K., Livada I., Santamouris M., Saliari M., Assimakopoulos M., Caouris Y. (2013). The influence of air temperature and humidity on human thermal comfort over the greater Athens area. *Sustainable Cities Soc.*, 10, 184–194.
130. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998). Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage, Paper No. 56. FAO, Rome, Italy, pp. 300.
131. Shelton B. G., Kirkland K. H., Flanders W. D., Morris G. K. (2002). Profiles of airborne fungi in buildings and outdoor environments in the United States. *Appl. Environ. Microbiol.*, 68, 1743–1753.
132. Kim K.H., Kabir E., Jahan S.A. (2017). Airborne bioaerosols and their impact on human health. *J. Environ. Sci.*, 67, 23–35.
133. Liu Z., Cheng K., Li H., Geo G., Wu D., Shi Y. (2018). Exploring the potential relationship between indoor air quality and the concentration of airborne culturable fungi: A combined experimental and neural network modeling study. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 25, 3510–3517.
134. European Commission. (1993). Indoor Air Quality and its impact on man. Report no 12. Biological Particles in Indoor Environments.
135. Barnett H. L., Hunter B. B. (1999). Illustrated genera of imperfect fungi, St. Paul: APS, 4th Ed., p. 218.
136. Degobbi C. et al. (2011). Correlation of fungi and endotoxin with PM_{2.5} and meteorological parameters in atmosphere of Sao Paulo, Brazil, *Atmospheric Environment*, 45, 13, 2277-2283.
137. Sousa S.I.V., Martins F.G., Pereira M.C et al. (2008). Influence of atmospheric ozone, PM₁₀ and meteorological factors on the concentration of airborne pollen and fungal spores. *Atmospheric Environment*, 42, 32, 7452-7464.
138. Grinn-Gofroń A., Strzelczak A., Wolski T. (2011). The relationships between air pollutants, meteorological parameters and concentration of airborne fungal spores. *Environmental Pollution*, 159, 2, 602-608.
139. Hargreaves M., Parappukaran S., Morawska L., Hitchins J., He C., Gilbert D. (2003) A pilot investigation into associations between indoor airborne fungal and non-biological particle concentrations in residential houses in Brisbane, Australia. *Science of the total environment*, 312, 1-3, 89-101.

140. Δόριζα Παρασκευή Βίβιαν (2014). Ρύπανση του εσωτερικού περιβάλλοντος από αιωρούμενα σωματίδια υπό ελεγχόμενες συνθήκες αερισμού σε σχολικά κτίρια και κατοικίες. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Φυσικής, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
141. CEC (1992). Guidelines for ventilation requirements in buildings. Commission of the European Communities. Luxemburg: Office for publications of the European Communities Report No 11. (European Concerned Action: Indoor Air Quality and its Impact on Man. EUR 14449 EN.).
142. Ben-David T., Waring M. (2018). Interplay of ventilation and filtration: Differential analysis of cost function combining energy use and indoor exposure to PM_{2.5} and ozone. *Building and Environment*, 128, 320-335.
143. Miller J.D. (1992). Microbial contamination of indoor air. Proc. Indoor air quality, ventilation and energy conservation, 5th International Jacques Cartier Conference, Montreal, Canada.
144. Silva M.F., Maas S., de Souza H.A., Gomes A.P. (2017). Post-occupancy evaluation of residential buildings in Luxembourg with centralized and decentralized ventilation systems, focusing on indoor air quality (IAQ). Assessment by questionnaires and physical measurements. *Energy Build.*, 148, 119–127.
145. CIBSEAM10 (2005). The Chartered Institution of Building Services Engineers. Natural ventilation in non-domestic buildings. Applications Manual, London.
146. Alevantis P. (CIENE 1995). Indoor air Quality in Practice. Energy conservation in buildings. European Commission Directorate General XVII for Energy.
147. Straube J.F. (2007). Air Flow Control in Buildings. Building Science Corporation, (<https://buildingscience.com/documents/digests/bsd-014-air-flow-control-in-buildings>) (Last reviewed 2017).
148. Liddament, M. (1996). AIVC:A guide to energy efficient ventilation. AIVC, Coventry, Great Britain.
149. Bartlett K.H., Martinez M., Bert J. (2004). Modeling of occupant-generated CO₂ dynamics in naturally ventilated classrooms. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 1, 139–148.
150. Almeida S.M., Canha N., Silva A., Freitas M.C., Pegas P., Alves C., Evtugina M., Pio C.A. (2011). Children exposure to atmospheric particles in indoor of Lisbon primary schools. *Atmospheric Environment*, 45, 7594-7599.
151. Becker R., Goldberger I., Paciuk M. (2007). Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation. *Building and Environment*, 42,3261-76.
152. Mumovic D., Palmer J., Davies M., M. Orme, et al. (2009). Winter indoor air quality, thermal comfort and acoustic performance of newly built secondary schools in England. *Building and Environment*, 44 (7), 1466-1477.
153. Tippayawong N., Khuntong P., Nitatwichit C., Khunatorn Y., Tantakitti C. (2009). Indoor/outdoor relationships of size-resolved particle concentrations in naturally ventilated school environments. *Building and Environment*, 44, 188-197.
154. Γιαννακούλα Αικατερίνη (2012). Πράσινες στέγες - Νομικό πλαίσιο και Συγκριτική Θεώρηση. Πτυχιακή Διατριβή Τμήματος Αρχιτεκτονικής Τοπίου, ΑΤΕΙ Καβάλας.
155. Czerniel Berndtsson J. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review. *Ecological Engineering*, 36, 351-360.
156. Mayrand F., Clergeau P. (2018). Green Roofs and Green Walls for Biodiversity Conservation: A Contribution to Urban Connectivity? *Sustainability*, 10(4), 985.

157. De-Ville S., Menon M., Stovin V. (2018). Temporal variations in the potential hydrological performance of extensive green roof systems. *J. Hydrol.*, 558, 564–578.
158. Monteiro C.M., Calheiros C.S., Martins J.P., Costa F.M., Palha P., De Freitas S., Ramos N.M., Castro P.M. (2017). Substrate influence on aromatic plant growth in extensive green roofs in a Mediterranean climate. *Urban Ecosyst.*, 20 (6), 1347-1357.
159. Nagase A., Dunnett N., Choi M.S. (2017). Investigation of plant growth and flower performance on a semi-extensive green roof. *Urban For. Urban Green.*, 23, 61–73.
160. Kotsiris G., Nektarios P.A., Paraskevopoulou A.T. (2012). *Lavandula angustifolia* growth and physiology is affected by substrate type and depth when grown under Mediterranean semi-intensive green roof conditions. *HortScience*, 47, 311-317.
161. Ntoulas N., Nektarios P.A., Spaneas K., Nikolaos K. (2012). Semi-extensive green roof substrate type and depth effects on *Zoysia matrella* ‘Zeon’ growth and drought tolerance under different irrigation regimes. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 62, 165-173.
162. Karachaliou P., Santamouris M., Pangalou H. (2015). Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens. *Energy Build.*, 114,15.
163. Jim C.Y., Tsang S.W. (2011). Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. *Build. Environ.*, 46, (6), 1263-74.
164. Speak A. F., Rothwell J. J., Lindley S. J., Smith C. L. (2013). Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof. *Science of the Total Environment*, 461, 28–38.
165. Κορδάτος Χάρης (2012). Πράσινες Οροφές. *ECO-Garden*.
166. Morakinyo T.E., et al. (2017). Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study. *Energy Build.*, 145, 226–237.
167. Στρατηγέα Δομνίκη (2013). Αποκεντρωμένη διαχείριση αστικού νερού: συνδυασμένη χρήση πράσινων στεγών με πρακτικές επαναχρησιμοποίησης βρόχινου και γκρι νερού. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Διεπιστημονικό–Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών “Επιστήμη Και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
168. Brudermann T., Sangkakool T. (2017). Green roofs in temperate climate cities in Europe – An analysis of key 562 decision factors. *Urban Forestry & Urban Greening*, 21, 224-234.
169. Tam V.W.Y., Wang J., Le K.N. (2016). Thermal insulation and cost effectiveness of green-roof systems: An empirical study in Hong Kong. *Build. Environ.*, 110, 46–54.
170. Perini K., Rosasco P. (2016). Is greening the building envelope economically sustainable? An analysis to evaluate the advantages of economy of scope of vertical greening systems and green roofs. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, 328–337.
171. Cascone S., Catania F., Gagliano A., Sciuto G. (2018). A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings, *Build. Environ.*, 136, 227–239.
172. Santamouris M. (2014). Cooling the cities – a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682-703.
173. Jayasooriya V.M., et al. (2016). Green Infrastructure 983 Practices for Improvement of Urban Air Quality. *Urban For. Urban Green.*, 21, 34–47.
174. Besir A.B., Cuce E. (2018). Green roofs and facades: a comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 82 (1), 915–939.
175. Pugh M.T.A., MacKenzie A.R., Whyatt J.D., Hewitt C.N. (2012). Effectiveness of Green 1103 Infrastructure for Improvement of Air Quality in Urban Street Canyons. *Environ. Sci. Technol.*, 46, 7692–7699.

176. Scharf B., Zluwa I. (2017) Case study investigation of the building physical properties of seven different green roof systems. *Energy Build.*, 151, 564–573.
177. Tan C.L., Tan P.Y., Wong N.H., Takasuna H., Kudo T., Takemasa Y., Lim C.V.J., Chua H.X.V. (2017). Impact of soil and water retention characteristics on green roof thermal performance. *Energy Build.*, (2017), 830-842.
178. Zhang Z., Szota C., Fletcher T.D., Williams N.S.G., Werdin J., Farrell C. (2018). Influence of plant composition and water use strategies on green roof stormwater retention. *Sci. Total Environ.*, 625, 775–781.
179. Köhler M., Schmidt M., Grimme F.W., Laar M., de Assunção Paiva V.L., Tavares S. (2002). Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics—far beyond the aesthetics. *Environment and Health*, 13, 382–391.
180. Shafique M., Kim R., Rafiq M. (2018). Green roof benefits, opportunities and challenges – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 757-773.
181. Berto R., Stival C. A., Rosato P. (2018). Enhancing the environmental performance of industrial settlements: An economic evaluation of extensive green roof competitiveness. *Build. Environ.*, 127, 58–68.
182. Mahdiyari A., Tabatabaee S., Abdullah A., Marto, A. (2018). Identifying and assessing the critical criteria affecting decision-making for green roof type selection. *Sustainable Cities and Society*, 39, 772-783.
183. Vijayaraghavan K. (2016). Green roofs: a critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 57, 740–752.
184. McIvor J.S., Ruttan A., Salehi B. (2014). Exotics on exotics: pollen analysis of urban bees visiting *Sedum* on a green roof. *Urban Ecosyst.*, 18, 419–430.
185. Samangoeei M., Sassi P., Lack A. (2016). Soil-less systems vs. soil-based systems for cultivating edible plants on buildings in relation to the contribution towards sustainable cities. *Futur food*, 4, 24–39.
186. Grard B.J.P., Chenu C., Manouchehri N., Houot S., Frascaria-Lacoste N., Aubry C. (2017). Rooftop farming on urban waste provides many ecosystem services. *Agron. Sustain. Dev.*, 38, 2.
187. Russo A., Escobedo F.J., Cirella G.T., Zerbe S. (2017). Edible green infrastructure: an approach and review of provisioning ecosystem services and disservices in urban environments. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 242, 53–66.
188. Carter T., Fowler L. (2008). Establishing green roof infrastructure through environmental policy instruments. *Environmental Management*, 42 (1), 151– 164.
189. Wolf D., Lundholm J.T. (2008). Water uptake in green roof microcosms: effects of plant species and water availability. *Ecol. Eng.*, 33, 179–186.
190. Bouzouidja R., Rousseau G., Galzin V., Claverie R., Lacroix D., Séré G. (2016). Green roof ageing or isolatic technosol's pedogenesis? *J. Soils Sediments.*, 18, 418-425.
191. Tapia N.F., Rojas C., Bonilla C.A., Vargas I.T. (2017). Evaluation of *sedum* as driver for plant microbial fuel cells in a semi-arid green roof ecosystem. *Ecol. Eng.*, 108, 203–210.
192. Lazzarin R.M., Castellotti F., Busato F. Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings*, 37 (12), 1260–1267.
193. Chagolla-Aranda M.A., Sima E., Xaman J., Alvarez G., Hernandez-Perez I., Tellez-Velazquez E. (2017). Effect of irrigation on the experimental thermal performance of a green roof in a semi-warm climate in Mexico. *Energy and Buildings*, 154, 232–243.
194. Getter KL, Rowe DB. 2006. The role of green roofs in sustainable development. *HortScience* 41: 1276–1286.
195. Mentens J., Raes D., Hermy, M., (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century. *Landsc. Urban Plan.*, 77, 21–226.

196. Fioretti R., Palla A., Lanza L.G., Principi P. (2010). Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Build. Environment*, 45, 1890–1904.
197. Yang J., Yu Q., Gong P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmos Environ.*, 42, 7266-7273.
198. Li J.F., Wai O.W., Li Y., Zhan J.M., Ho Y.A., Li J., Lam E. (2010). Effect of green roof on ambient CO₂ concentration. *Build Environment.*, 45, 2644-2651.
199. Schrader S., Böning M. (2006). Soil formation on green roofs and its contribution to urban biodiversity with emphasis on Collembolans. *Pedobiologia*, 50, 347-356.
200. Liu K., Minor J. (2005). Performance Evaluation of an Extensive Green Roof in Proceedings of Green Rooftops for Sustainable Communities, Washington, DC, USA, 5–6 May, pp. 1-11.
201. Mahmoud A., Asif M., Hassanain M., Babsail M., Sanni-Anibire M. (2017). Energy and Economic Evaluation of Green Roofs for Residential Buildings in Hot-Humid Climates. *Buildings*, 7, 30.
202. Onmura S., Matsumoto M., Hokoi S. (2001). Study on evaporative cooling effect of rooflawn gardens. *Energy and Buildings*, 33, 653-666.
203. Huang K.-T., Huan W.-P., Lin, T.-P., Hwang R.-L. (2015). Implementation of green building specification credits for better thermal conditions in naturally ventilated school buildings. *Build. Envir.*, 86, 141–50.
204. Jaffal I., Ouldboukhitine S., Belarbi R. (2012). A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renew. Energy*, 43, 157-164.
205. Rakotondramiarana H.T., Andriamamonjy A.L. (2013). Matlab automation algorithm for performing global sensitivity analysis of complex system models with a derived FAST method. *J. Comput. Model*, 3(3), 17–56.
206. Moghbel M., Salim R.E. (2017). Environmental benefits of green roofs on microclimate of Tehran with specific focus on air temperature, humidity and CO₂ content. *Urban Climate*, 20, 46-58.
207. Niachou A., Papakonstantinou K., Santamouris M., Tsangrassoulis A., Mihalakakou G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy Building*, 33,719-729.
208. Peng L.L., Jim C. (2013). Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation. *Energies*, 6 (2), 598-618.
209. Sailor D.J. (2008). A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 40, 1466–1478.
210. Kotsiris G., Androutsopoulos A., Polychroni E., Nektarios P.A. Dynamic U-value estimation and energy simulation for green roofs. (2012). *Energy Build.*, 45, 240-249.
211. Perini K. (2013). Retrofitting with vegetation recent building heritage applying a design tool – the case study of a school building. *Front Archit. Res.*, 2, 267–77.
212. Zinzi M., Agnoli S., (2011). Cool and green roofs: an energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy Buildings*, 55, 66-76.
213. Sundell J. (2004). On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air*, 14, 51-8.

214. Braback L., Breborowicz A., Dreborg S., Knutsson A., Pieklik H., Bjorksten B. (1994) Atopic sensitization and respiratory symptoms among Polish and Swedish school children. *Clin. Exp. Allergy*, 24, 826–835.
215. Wichmann F.A., Müller A., Busi L.E., Cianni N., Massolo L., Porta A., Schlink U., Sly P.D. (2009). Increased asthma and respiratory symptoms in children exposed to petrochemical pollution. *J. Allergy Clin. Immunol.*, 12 (3), 632-638.
216. USEPA, 1996. *Indoor Air Quality Basics for Schools*. United States Environmental Protection Agency.
217. Madureira J., Paciencia I., Rufo J., Ramos E., Barros H., Teixeira J.P., de Oliveira Fernandes E., (2015). Indoor air quality in schools and its relationship with children's respiratory symptoms. *Atmos. Environ.*, 118, 145–156.
218. Rufo J.C., Madureira J., Paciência I., Aguiar L., Teixeira J.P., Moreira A., et al. (2016). Indoor air quality and atopic sensitization in primary schools: A follow-up study. *Porto Biomed. J.*, 1 (4) 3–7.
219. Annesi-Maesano I., Baiz N., Banerjee S., et al. (2013). Indoor air quality and sources in schools and related health effects. *J. Toxicol. Environ. Health B*, 16 (8),491-550.
220. Stabile L., Dell'Isola M., Russi A., Massimo A., Buonanno G. (2017). The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools. *Science of The Total Environment*, 595, 894-902.
221. Mainka A., Bragoszewska E., Kozielska B., Pastuszka J.S., Zajusz-Zubek E. (2015). Indoor air quality in urban nursery schools in Gliwice, Poland. Analysis of the case study. *Atmos. Polut. Res.*, 6, 1098–1104.
222. Canha N., Mandin C., Ramalho O., Wyart G., Ribéron J., Dassonville C., Hänninen O., Almeida S.M., Derbez M. (2016). Assessment of ventilation and indoor air pollutants in nursery and elementary schools in France. *Indoor Air*, 26, 350–365.
223. Janssen N.A., Brunekreef B., van Vliet P., Aarts F., Meliefste K., Harssema H., et al. (2003). The Relationship between air pollution from heavy traffic and allergic sensitization, bronchial hyperresponsiveness, and respiratory symptoms in Dutch schoolchildren. *Environ. Health Perspect*, 111, 1512-8.
224. Oeder S., Dietrich S., Weichenmeier I., Schober W., Pusch G., Jörres R.A., et al. (2012) Toxicity and elemental composition of particulate matter from outdoor and indoor air of elementary schools in Munich, Germany. *Indoor Air*, 22, 148–58.
225. Rivas I., et al. (2014). Child exposure to indoor and outdoor air pollutants in schools in Barcelona, Spain. *Environ. Int.*, 69, 200–212.
226. Meyer H.W., Suadecani P., Nielsen P.A., et al. (2011). Moulds in floor dust—a particular problem in mechanically ventilated rooms? A study of adolescent schoolboys under the Danish moulds in buildings program. *Scand. J. Work Environ. Health*, 37, 332–40.
227. Krugly E., Martuzevicius D., Sidaraviciute R., Ciuzas D., Prasauskas T., Kauneliene V., et al. (2014). Characterization of particulate and vapor phase polycyclic aromatic hydrocarbons in indoor and outdoor air of primary schools. *Atmos. Environ.*, 82, 298–306.

228. Szoboszlai Z., Furu E., Angyal A., Szikszai Z., Zs K. (2011.) Investigation of indoor aerosols collected at various educational institutions in Debrecen, Hungary. *X-Ray Spectrom*, 40, 176–180.
229. Branis M., Rezacova P., Domasova M. (2005). The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ in a classroom. *Environ. Res.*, 99, 143–149.
230. Allaerts K., Koussa J.A., Desmedt J., Salenbien R. (2017). Improving the energy efficiency of ground-source heat pump systems in heating-dominated school buildings: a case study in Belgium. *Energy & Building*, 138, 559-568.
231. Dorizas P.V., Assimakopoulos M.N., Helmis C., Santamouris M. Analysis of the indoor air quality in Greek primary schools. (2013). 34th AIVC-3rd TightVent-2nd Cool Roofs'-1st Venticool Conference, Athens, Greece, 25-26 September, 110-113.
232. Goyal R., Khare M. (2009). Indoor-outdoor concentrations of RSPM in classroom of a naturally ventilated school building near an urban traffic roadway. *Atmos. Environ.*, 43, 6026–6038.
233. Yang W., Sohn J., Kim J., Son B., Park J. (2009). Indoor air quality investigation according to age of the school buildings in Korea. *J. Environ. Man.*, 90, 348–54.
234. Ismail M., Sofian M., Zafirah N., Abdullah A.M., (2010). Indoor air quality in selected samples of primary schools in Kuala Terengganu, Malaysia. *Environment Asia*, (3), 103-108.
235. Ma F., Zhan C., Xu X. (2019). Investigation and Evaluation of Winter Indoor Air Quality of Primary Schools in Severe Cold Weather Areas of China. *Energies*, 12, 1602.
236. Abdel-Salam M.M.M. (2019). Investigation of indoor air quality at urban schools in Qatar. *Indoor Built Environ.*, 28 (2), 278-288.
237. Petronella S.A., Thomas R., Stone J.A., Goldblum R.M., Brooks E.G. (2005). Clearing the air: a model for investigating indoor air quality in Texas schools. *J. Environ. Health.*, 67(10), 35-42
238. Levetin E., Shaughnessy R., Fisher E. (1995). Indoor air quality in schools: Exposure to fungal allergens. *Aerobiologia*, 11, 27–34 .
239. Godwin C., Batterman S. (2007). Indoor air quality in Michigan schools. *Indoor Air*, 17, 109–121.
240. Majd E., McCormack M., Davis M., et al. (2019). Indoor air quality in inner-city schools and its associations with building characteristics and environmental factors. *Environmental Research*, 170, 83-91.
241. Guo H., Morawska L., He C., Zhang Y.L., Ayoko G. and Cao M. (2010). Characterization of particle number concentrations and PM_{2.5} in a school: influence of outdoor air pollution on indoor air, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 17, 1268–1278.
242. Avigo D., Godoi A.F.L., Janissek P.R. (2008). Particulate matter analysis at elementary schools in Curitiba, Brazil. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 391, 1459-1468.
243. Trebilcock M., Soto-Munoz J., Yanez M., Figueroa-San Martin R. (2017). The right to comfort: a field study on adaptive thermal comfort in free –running schools in Chile. *Build. Environ.*, 114, 455-469.

244. Mustapha B. A., Blangiardo M., Briggs D. J., Hansell A. L. (2011). Traffic air pollution and other risk factors for respiratory illness in schoolchildren in the Niger-Delta region of Nigeria. *Environ. Health Perspect.*, 119, 1478–82.
245. Kim J., Hong T., Koo C. (2012). Economic and environmental evaluation model for selecting the optimum design of green roof systems in elementary schools. *Environ. Sci. Technol.*, 46, 8475–8483.
246. Hong T., Kim J., Koo C. (2012). LCC and LCCO₂ analysis of green roofs in elementary schools with energy saving measures. *Energy Build.*, 45, 229–239.
247. Ascione F., Bianco N., De Masi R.F., De Rossi F., Vanoli, G.P. (2015). Mitigating the cooling need and improvement of indoor conditions in Mediterranean educational buildings, by means of green roofs. Results of a case study. *Journal of Physics: Conference Series*, 33rd UIT (Italian Union of Thermo-fluid-dynamics) Heat Transfer Conference, 22-24 June, L'Aquila, Italy.
248. Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (δεδομένα από τον Σταθμό Νέας Σμύρνης) <https://penteli.meteo.gr/stations/neasmyrni/> (Last reviewed 2016)
249. Υπουργείο Ενέργειας Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής (δεδομένα από τον Σταθμό Νέας Σμύρνης) <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=495&language=el-GR> (Last reviewed 2016)
250. Διαπιστευμένο Εργαστήριο Μέτρησης Ποιότητας Εσωτερικού Περιβάλλοντος – ΕΚΠΑ (<http://env.phys.uoa.gr/ereynhtikes-omades.html>) (Last reviewed 2015)
251. Εργαστήριο Οικολογίας & Ταξινομικής – ΕΚΠΑ (<http://www.biol.uoa.gr/tomeis/tomeas-oikologias-ta3inomikis.html>) (Last reviewed 2015)
252. Irving A.M. (2008). Draft Report on Turnkey Osiris Particle Results at the Market and Havre des Pas Sites in Jersey for 2008.
253. Προσδιορισμός κλάσματος PM₁₀ της αιωρούμενης σωματιδιακής ύλης (μέθοδος αναφοράς) ΕΛΟΤ EN 12341:2014.
254. Bardouki H., Liakakou H., Economou C., Sciare J., Smolík J., Zdímal V. et al. (2003). Chemical composition of size-resolved atmospheric aerosols in the eastern Mediterranean during summer and winter. *Atmospheric Environment*, 37, 195–208.
255. Koulouri E., Saarikoski S., Theodosi C., Markaki Z., Gerasopoulos E., Kouvarakis G., et al. (2008). Chemical composition and sources of fine and coarse aerosol particles in the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment*, 42, 6542–50.
256. SKC Ltd: <https://www.skcltd.com/uncategorised-articles/154-universal> (Last reviewed 2016)
257. Xing Q.W., Hao X.L., Lin Y.L. (2019). Experimental investigation on the thermal performance of a vertical greening system with green roof in wet and cold climates during winter. *Energy Build.*, 183, 105–117.
258. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy; American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers Inc.: Atlanta, GA, USA, 2004.

259. Pegas P., Alves C., Evtyugina M., Nunes T., Cerqueira M., Franchi M., Pio, C., Almeida S. Freitas M. (2011). Indoor air quality in elementary schools of Lisbon in Spring. *Environ. Geochem. Health*, 33, 455–468.
260. Ran J.D., Tang M.F. (2017). Effect of Green Roofs Combined with Ventilation on Indoor Cooling and Energy Consumption. *Energy Procedia*, 141, 260–266.
261. Mentese S., Arisoy M., Rad A.Y., Gullu G. (2009). Bacteria and fungi levels in various indoor and outdoor environments in Ankara, Turkey. *Clean Soil Air Water*, 37, 487–493.
262. Roulet C.A., Foradini F. (2002). Simple and cheap air change rate measurements using carbon-dioxide concentration decays. *Int. J. Ventilat.*, 1, 39–44.
263. Thatcher T.L., Lai A.C.K., Moreno-Jackson M., Sextro R.G., Nazaroff W.W. (2002). Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors. *Atmos. Environ.*, 36, 1811–1819.
264. Singer B.C., Revzan K.L., Hotchi T., Hodgson A.T., Brown N.J. (2004). Sorption of organic gases in a furnished room. *Atmos. Environ.*, 38, 2483–2494.
265. Asadi E., Costa J.J., Gameiro da Silva M. (2011). Indoor air quality audit implementation in a hotel building in Portugal. *Building Environ.*, 46, 1617–1623.
266. You Y., Bai Z., Jia C., Wan Z., Ran W., Zhang J. (2007). Measuring Air Exchanges Rates Using Continuous CO₂ Sensors. In *Proceedings of Symposium on Air Quality Measurement Methods and Technology*, San Francisco, CA, USA, 101–108.
267. Turanjanin V., Vutiaevic B., Jovanovic M., Mirkov N., Lazovic I. (2014). Indoor CO₂ measurements in Serbian schools and ventilation rate calculation. *Energy*, 77, 290–296.
268. Dimitroulopoulou C. (2012). Ventilation in European dwellings: A review. *Build. Environ.* 47, 109–125.
269. Yrieix C., Dulaurent A., Laffargue C., Maupetit F., Pacary T., Uhde E. (2010). Characterization of VOC and formaldehyde emissions from a wood based panel: Results from an inter-laboratory comparison. *Chemosphere*, 79, 414–419.
270. Singer B.C., Destailats H., Hodgson A.T., Nazaroff W.W. (2006). Cleaning products and air fresheners: Emissions and resulting concentrations of glycol ethers and terpenoids. *Indoor Air*, 16, 179–191.
271. Sowa J. (2002). Air quality and ventilation rates in schools in Poland—requirements, reality and possible improvements. In *Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, vol. 2, Monterey, CA, 68–73.
272. Dr. Goodman N.B. (2019). Evaluating and reducing exposure to indoor pollutants from volatile organic compounds. PhD Thesis, University of Melbourne.
273. Pegas P.N., Evtyugina M.G., Alves C.A., Nunes T., Cerqueira M., Franchi M., Pio C.A., Almeida S.M., Freitas M.C. (2009). Outdoor/indoor air quality in primary schools in Lisbon: a preliminary study. In the 11th International Conference on Environmental Science and Technology, 3rd-5th of September, Chania, Crete, Greece.

274. Mečiarová L., Vilčeková S., Burdová E.K., Kapalo P., Mihaľová N. (2018). The real and subjective indoor environmental quality in schools. *Int. J. Environ. Health Res.*, (28), 1–22.
275. Benjamin M.T., Winer A.M. (1998). Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs. *Atmospheric Environment*, 32, 53–68.
276. Kinney P.L., Chillrud S.N., Ramstrom S., Ross J., Spengler J.D. (2002). Exposures to multiple air toxics in New York City. *Environ. Health Perspect.*, 110, 539–46.
277. Ζόμα Άρτεμις (2017). Μελέτη των αερομεταφερόμενων μυκήτων και εκτίμηση της ποιότητας του αέρα στο 2ο Δημοτικό Σχολείο Νέας Σμύρνης. Διπλωματική Εργασία. Τμήμα Βιολογίας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
278. Pei-Chih W., Huey-Jen S., L. Chia-Yin. (2000). Characteristics of indoor and outdoor airborne fungi at suburban and urban homes in two seasons. *Sci. Total Environ.*, 253, 111–118.
279. Burge H.A., Pierson D.L., Groves T.O., Strawn K.F., Mishra S.K. (2000). Dynamics of airborne fungal populations in a large office building. *Current Microbiol.* 40 (10), 10–16.
280. Garrett M.H., Rayment P.R., Hooper M.A., Abramson M.J., Hooper B.M. (1998). Indoor airborne fungal spores, house dampness and associations with environmental factors and respiratory health in children. *Clin. Exp. Allergy*, 8, 459–467.
281. Golden R. (2011). Identifying an indoor air exposure limit for formaldehyde considering both irritation and cancer hazards. *Crit. Rev. Toxicol.*, 41, 672–721.
282. Holt G.L. (1990). Seasonal indoor/outdoor fungi ratios and indoor bacteria levels in noncomplaint office buildings. In *Indoor Air: The Fifth International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Toronto, Canada, pp. 33–38. Ottawa, Canada: International Society for Indoor Air Quality.
283. Sterling D.A., Lewis R.D. (1998). Pollen and fungal spores indoor and outdoor of mobile homes. *Ann. Allergy Asthma Immunol.*, 80, 279–285.
284. Gots R.E., Layton N.J., Pirages S.W. (2003). Indoor health: Background levels of fungi. *AIHA Journal*, 64, 427–438.
285. Herbarth O., Schlink U., Muller A., Richter M. (2003). Spatiotemporal distribution of airborne mould spores in apartments. *Mycol. Res.* 107, 1361–1371.
286. Haas D., et al. (2007). Assessment of indoor air in Austrian apartments with and without visible mold growth. *Atmos. Environ.*, 41, 5192–5201.
287. Garrett M.H., Hooper B.M., Cole M.F., Hooper M.A. (1997). Airborne fungal spores in 80 homes in the Latrobe Valley, Australia: levels, seasonality and indoor-outdoor relationship. *Aerobiologia*, 13, 121–126.
288. Atkinson R.W., Strachan D.P., Anderson H.R., Hajat S., Emberlin J. (2006). Temporal associations between daily counts of fungal spores and asthma exacerbations. *Occup. Environ. Med.* 63, 580–590.
289. Frankel M., Bekö G., Timm M., Gustavsen S., Hansen E.W., Madsen. M. (2012). Seasonal variation of indoor microbial exposures and their relations to temperature, relative humidity and air exchange rates. *Appl. Environ. Microbiol.*, 78, 8289–97.
290. Johnson-Restrepo B., Kannan K. (2009). An assessment of sources and pathways of human exposure to polybrominated diphenyl ethers in the United States. *Chemosphere*, 76, 542–548.

291. U.S. EPA. Exposure Factors Handbook; EPA, Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, September 2011.
292. Bragoszewska E., Mainka A., Pastuszka J.S., et al. (2018). Assessment of bacterial aerosol in a preschool, primary school and high school in Poland. *Atmosphere*, 9(3), 87.
293. Buonanno G., Fuoco .F, Marini S., Stabile L. (2013). Particle resuspension in school gyms during physical activities. *Aerosol Air Qual. Res.*, 12, 803-13.
294. Alves C.A., Urban R.C., Pegas P.N., Nunes T. (2014). Indoor/Outdoor relationships between PM₁₀ and associated organic compounds in a primary school. *Aerosol Air Qual. Res.* 14, 86–98.
295. Fromme H., Twardella D., Dietrich S., Heitmann D., Schierl R., Liebl B., Rüden H. (2007). Particulate matter in the indoor air of classrooms-exploratory results from Munich and surrounding area. *Atmos. Environ.*, 41, 854–866.
296. Putaud J. P., Van Dingenen R., Alastuey A., Bauer H., Birmili W., Cyrys J., Flentje H., et al. (2004). A European aerosol phenomology -3: Physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban and kerbside sites across Europe. *Atmospheric Environment*, 44, 1308-1320.
297. Μπέσα Μαρία (2015), Συγκριτική μελέτη της πρότυπης σταθμικής μεθόδου μέτρησης PM₁₀ με τη μέθοδο αυτόματης καταγραφής. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος.
298. Agudelo-Castañeda D.M., Teixeira E.C., Braga M., Rolim S.B.A., Silva L.F.O., Beddows D.C.S, Harrison R.M., Querol X. (2019). Cluster analysis of urban ultrafine particles size distributions. *Atmos. Pollut. Res.*, 10(1), 45–52.
299. Saraga D., Maggos T., Sadoun E., Fthenou E., Hassan H., Tsiouri, V., Karavoltsos S., Sakellari A., Vasilakos C., Kakosimos K. (2017). Chemical characterization of indoor and outdoor particulate matter (PM_{2.5}, PM₁₀) in Doha, Qatar. *Aerosol Air Qual. Res.*, 17, 1156–1168.
300. Eldering A., Cass G. R. (1996). Source-oriented model for air pollutant effects on visibility. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 101 (D14), 19343-19369.
301. Pilinis C., Pandis S., Seinfeld J. (1995). Sensitivity of direct climate forcing by atmospheric aerosols to aerosol size and composition. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 100 (D9), 18739-18754.
302. Schwartz J., Dockery D., Neas L. (1996). Is daily mortality associated specifically with fine particles? *Journal of the Air & Waste Management Association*. 46(10), 927-939.
303. Ruiz P. A., Toro C., Caceres J., Lopez G., Oyola P., Koutrakis P. (2010). Effect of gas and kerosene space heaters on indoor air quality: A study in homes of Santiago, Chile. *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 60, 98–108.
304. Pegas P., Nunes T., Alves C., Silva J., Vieira S., Caseiro A., Pio C. (2012). Indoor and outdoor characterisation of organic and inorganic compounds in city centre and suburban elementary schools of Aveiro, Portugal. *Atmos. Environ.*, 55, 80-89.
305. Assimakopoulos V.D., Bekiari T., Pateraki S., Maggos Th., Stamatias P., Nicolopoulou P., Assimakopoulos M.N. (2018). Assessing personal exposure to PM using data from an integrated indoor-outdoor experiment in Athens-Greece. *Sci. Total Environ.*, 636, 1303–1320.
306. Zhang R.J., Ho K.F., Cao J.J., Han Z.W., Zhang M.G., Cheng Y., et al. (2009). Organic carbon and elemental carbon associated with PM₁₀ in Beijing during spring time. *J. Hazard Mater.*, 172, 970–7.

307. Kefeni K.K., Okonkwo J.O. (2012). Analysis of major congeners of polybromobiphenyls and polybromodiphenyl ethers in office dust using high resolution gas chromatography-mass spectrometry. *Chemosphere*, 87, 1070-1075.
308. Jaradat Q.M., Momani K.A. et al. (2004). Inorganic analysis of dust fall and office dust in an industrial area of Jordan. *Environ. Res.*, 96, 139–144.
309. Hassanvand M.S., Naddafi K., Faridi S., Arhami M., Nabizadeh R., Sowlat M.H. et al. (2014). Indoor/outdoor relationships of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ mass concentrations and their water-soluble ions in a retirement home and a school dormitory. *Atmos. Environ.*, 82, 375–382.
310. Ho K., Lee S., Chan C.K., Yu J.C., Chow J.C., Yao X., (2003). Characterization of chemical species in PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in Hong Kong. *Atmos. Environ.*, 37, 31-39.
311. Cheng Z., Lam K., Chan L., Wang T., Cheng K., (2000). Chemical characteristics of aerosols at coastal station in Hong Kong. I. Seasonal variation of major ions, halogens and mineral dusts between 1995 and 1996. *Atmos. Environ.*, 34, 2771-2783.
312. Leaderer B.P., Naeher L., Jankum T., Balenger K., Holford T.R., Toth C., Sullivan J., Wolfson J.M., Koutrakis P. (1999). Indoor, outdoor, and regional summer and winter concentrations of PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂⁻⁴, H⁺, NH₄⁺, NO₃⁻, NH₃, and nitrous acid in homes with and without kerosene space heaters. *Environmental Health Perspectives*, 107 (3), 223-231.
313. Wang T., Liu Y., Deng Y., et al. (2018). Adsorption of SO₂ on mineral dust particles influenced by atmospheric moisture. *Atmospheric Environment*, 191, 153-161.
314. Tran D.T., Alleman L.Y., Coddeville P., Galloo J., (2012). Elemental characterization and source identification of size resolved atmospheric particles in French classrooms. *Atmospheric Environment*, 54, 250-259.
315. Boman J., Gatari M.J., Janhall S., Shannigrahi A.S., Wagner A. (2009). Elemental content of PM_{2.5} aerosol particles collected in Goteborg during the Gote - 2005 campaign in February 2005. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 2597-2606.
316. Calvo A.I., Alves C., Castro A., Pont V., Vicente A.M., Fraile R. (2013). Research on aerosol sources and chemical composition: past, current and emerging issues. *Atmospheric Research*, 120-121, 1-28.
317. Diapouli E., Chaloulakou A., Mihalopoulos N., Spirellis N. (2008). Indoor and outdoor PM mass and number concentrations at schools in the Athens area. *Environ. Monit. Assess.*, 136, 13–20.
318. Xu H., Guinot B., Shen Z., Ho K.F., Niu X., Xiao S., Huang, R.J., Cao J. (2015) Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM_{2.5} and PM_{0.25} in Indoor and Outdoor Environments of a Middle School: Secondary Formation of Organic Carbon and Sources Identification. *Atmosphere*, 6, 361–379.
319. Chithra V. S., Nagendra S. M. S. (2013). Chemical and Morphological Characteristics of Indoor and Outdoor Particulate Matter in an Urban Environment. *Atmos. Environ.*, 77, 579–587.
320. Hopke P.K. (2003). Recent developments in receptor modeling. *J. Chemometrics*, 17, 255-265.
321. Watson J., Zhu T., Chow J., Engelbrecht J., Fujita E., Wilson W. (2002). Receptor modeling application framework for particle source attribution. *Chemosphere*, 49, 1093–1136.
322. Saraga D., Tolis E.I., Maggos T., Vasilakos C., Bartzis J. (2018). PM_{2.5} source apportionment for the port city of Thessaloniki, Greece. *Science of the Total Environment.*, 650, 2337-2354.

323. Paatero P. (1997). Least squares formulation of robust non-negative factor analysis. *Chemometr. Intelligent Lab. Syst.*, 6037, 23-35.
324. Manousakas M., Papaefthymiou H., Diapouli E., Migliori A., Karydas A.G., Bogdanovic-Radovic I., Eleftheriadis K. (2017). Assessment of PM_{2.5} sources and their corresponding level of uncertainty in a coastal urban area using EPA PMF 5.0 enhanced diagnostics. *Sci. Total Environ.*, 574, 155–164.
325. Gerasopoulos E., Kouvarakis G., Babasakalis P., Vrekoussis M., Putaud J., Mihalopoulos N. (2006). Origin and variability of particulate matter (PM₁₀) mass concentrations over the Eastern Mediterranean. *Atmos. Environ.*, 40 (25), 4679–4690.
326. Lazaridis M., Eleftheriadis K., Smolik J., Colbeck I., Kallos G., Drossinos Y., et al. (2006). Dynamics of fine particles and photo-oxidants in the Eastern Mediterranean (SUBAERO). *Atmos. Environ.*, 40, 6214–6228.
327. Saeedi M., Li L.Y., Salmanzadeh M. (2012). Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons: Pollution and ecological risk assessment in street dust of Tehran. *Journal of Hazardous Materials*, 227–228, 9-17.
328. Penkala M., Ogrodnik P., Rogula-Kozłowska W. (2018). Particulate Matter from the Road Surface Abrasion as a Problem of Non-Exhaust Emission Control. *Environments*, 5, 9.
329. Han Y.-J., Kim T.-S., Kim H. (2008). Ionic constituents and source analysis of PM_{2.5} in three Korean cities. *Atmospheric Environment*, 42 (19), 4735-4746.
330. Lee, J.H., Kim, Y.P., Moon, K.-C., Kim, H.-K., Lee, C.B. (2001). Fine particle measurements at two background sites in Korea between 1996 and 1997. *Atmospheric Environment* 35,635–643.
331. Waked A., Favez O., Alleman L.Y., et al. (2014). Source apportionment of PM₁₀ in a north-western Europe regional urban background site (Lens, France) using positive matrix factorization and including primary biogenic emissions. *Atmos. Chem. Phys.*, 14 (7), 3325–3346.
332. Yau P.S., Lee S.C., Cheng Y., Huang Y., Lai S.C., Xu X.H. (2013). Contribution of ship emissions to the fine particulate in the community near an international port in Hong Kong. *Atmos. Res.*, 124, 61–72.
333. Cheng H., Hu Y., (2010). Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: current and future practices in China. *Bioresour. Technol.*, 101, 3816–3824.
334. Zhong J. N. M., Latif M. T., Mohamad N., Abd-Wahid N. B., Dominick D., Juahir H. (2014). Source apportionment of particulate matter (PM₁₀) and indoor dust in a university building. *Environmental Forensics*, 15(1), 8–16.
335. Latif M.T., Yong S.M., Saad A., Mohamad N., Baharudin N.H., Mokhtar M.B., Tahir N.M. (2014). Composition of heavy metals in indoor dust and their possible exposure: A case study of preschool children in Malaysia. *Air Qual. Atmos. Heal.*, 7, 181–193.
336. Lucarelli F., Mandò P.A., Nava S., Prati P., Zucchiatti A. (2004). One-year study of the elemental composition and source apportionment of PM₁₀ aerosols in Florence, Italy. *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 54, 1372–1382.
337. Markowicz P., Larsson L. (2015). Influence of relative humidity on VOC concentrations in indoor air. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 22, 5772–5779.
338. Wolkoff P. (1998). Impact of air velocity, temperature, humidity, and air on long-term voc emissions from building products. *Atmos. Environ.*, 32, 2659-2668.

339. Manoukian A., Buiron D., Temime-Roussel B., Wortham H., Quivet E. (2016). Measurements of VOC/SVOC emission factors from burning incenses in an environmental test chamber: influence of temperature, relative humidity, and air exchange rate. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 23, 6300-6311.
340. Wolkoff P. (2017). External eye symptoms in indoor environments. *Indoor Air*, 27, 246–260.
341. Zhou C., Zhan Y., Chen S., Xia M., Ronda C., Sun M., Chen H., Shen X. (2017). Combined effects of temperature and humidity on indoor VOC pollution: intercity comparison. *Build. Environ.*, 121, 26–34.
342. Lin C.C., Yu K.P., Zhao P., Lee G.W.M. (2009). Evaluation of impact factors on VOC emissions and concentrations from wooden flooring based on chamber tests. *Build. Environ.*, 44, 525–533.

Δημοσιεύσεις σχετικές με τη διδακτορική διατριβή σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά

1. Barmpareos N., Assimakopoulos M.N., Assimakopoulos V.D., Loumos N., Sotiriou M.A., Koukoumtzis A. (2018). Indoor Air Quality and Thermal Conditions in a Primary School with a Green Roof System. *Atmosphere*, 9(2), 75.
2. Barmpareos N., Assimakopoulos V., Assimakopoulos M., Tsairidi E. (2016). Particulate matter levels and comfort conditions in the trains and platforms of the Athens underground metro. *AIMS Environ Sci.*, 3(2), 199–219.
3. Barmpareos, N.; Papadaki, D.; Karalis, M.; Fameliari, K.; Assimakopoulos, M.N. In Situ Measurements of Energy Consumption and Indoor Environmental Quality of a Pre-Retrofitted Student Dormitory in Athens. *Energies* 2019, 12, 2210
4. Assimakopoulos M.N., Barmpareos N., Pantazaras A., Karlessi T., Lee S.E. (2017). On the comparison of occupancy in relation to energy consumption and indoor environmental quality: a case study. *Energy Procedia*, 134, 875-884.
5. Pyrri I., Zoma A., Barmpareos N., Assimakopoulos V. D., Assimakopoulos M. N., Kapsanaki-Gotsi E. Characterization of fungal aerosol and exposure assessment in classrooms of a school with green roof system. Submitted.

Κατάλογος Συντομογραφιών

- **ΕΚΠΑ** Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
- **Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α** Ινστιτούτου Πυρηνικών & Ραδιολογικών Επιστημών & Τεχνολογίας, Ενέργειας & Ασφάλειας
- **IEQ** Indoor Environmental Quality
- **WHO** World Health Organization
- **BRS** Building Related Symptoms
- **SBS** Sick Building Syndrome
- **IAQ** Indoor Air Quality
- **ASHRAE** American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers
- **EPA** United States Environmental Protection Agency
- **WHO** World Health Organization
- **Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.** Τεχνικές Οδηγίες του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας
- **Κ.Δ.Π.** (Κανονιστική Διοικητική Πράξη)
- **CEC** Civil & Environmental Consultants
- **CIBSE** Chartered Institution of Building Services Engineers
- **ISO** International Organization for Standardization
- **ΙΕΠ** Ινστιτούτο Εκπαιδευτικής Πολιτικής
- **ΥΠΕΠΘ** Υπουργείο Παιδείας και Θρησκευμάτων
- **Ε.Κ.Ε.Φ.Ε.** Εθνικό Κέντρο Φυσικών Επιστημών
- **IAQ** Air Quality
- **PM** Particulate Matter
- **TSP** Total Suspended Particles
- **CO** Μονοξείδιο του Άνθρακα (Carbon Monoxide)
- **POA** Πρωτογενή Οργανικά Αερολύματα (Primary Organic Aerosols)

- **SOA** Δευτερογενή Οργανικά Αερολύματα (Secondary Organic Aerosols)
- **VOCs** Οργανικές Πτητικές Ενώσεις (Volatile Organic Compounds)
- **ACH** Εναλλαγές αέρα την ώρα (Air Changes per Hour)
- **PCA** Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis)
- **PMF** Πίνακας Παραγοντοποίησης Θετικών Συντεταγμένων (Positive Matrix Factorization)
- **SBS** Σύνδρομο Άρρωστου Κτιρίου (Sick Building Syndrome)
- **I/O** Εσωτερικός/Εξωτερικός (Indoor / Outdoor)
- **CFU** Αριθμός σχηματιζόμενων αποικιών μυκήτων (Colony Forming Units)
- **AER** Ρυθμός Αερισμού (Air Exchange Rate)
- **LST** Local Sidereal Time
- **MVS** Maximum Volume Sampler

Συμβολισμοί

- **T** Θερμοκρασία (OC)
- **RH** Σχετική υγρασία (%)
- **CO₂** Διοξείδιο του Άνθρακα (ppm)
- **TVOC** Σύνολο Πτητικών Οργανικών Ενώσεων (ppm)
- **VOCs** Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (ppm)
- **PM** Αιωρούμενα Σωματίδια (μg/m³)
- **ppm** Parts per million
- **ppb** Parts per billion
- **Rn** Ραδόνιο
- **Dp** Διάμετρος Stokes
- **pp** Πυκνότητα σωματιδίου
- **VTS** Ταχύτητα καθίζησης
- **ED** Ο δείκτης προσωπικής έκθεσης σε σπόρια μυκήτων (Exposure dose)
- **C** Μέση συγκέντρωση αερομεταφερόμενων μυκήτων
- **IEF** Εσωτερικό κλάσμα έκθεσης (Indoor exposure fraction) ή ώρες που δαπανώνται από τους μαθητές σε κάθε αίθουσα
- **IR** Συντελεστής εισπνοής του κάθε μαθητή για διάφορες δραστηριότητες (Inhalation rate coefficient for different activities)
- **BW** Μέσο βάρος του κάθε μαθητή (Average body weight) (kg)
- **TSP** Συνολικά αιωρούμενα σωματίδια
- **Al** Αργίλιο
- **V** Βανάδιο
- **Pb** Μόλυβδος
- **Mn** Μαγγάνιο

- **Ba** Βάριο
- **Cu** χαλκός
- **Mn** μαγγάνιο
- **Fe** Σίδηρος
- **Pb** Μόλυβδος
- **Ni** Νικέλιο
- **Zn** Ψευδάργυρος
- **Sn** Κασσίτερος
- **Sr** Στρόντιο
- **Cs** Καίσιο
- **Cr** Χρώμιο
- **Co** Κοβάλτιο
- **As** Αρσενικό
- **Cd** Κάδμιο
- **Ba** Βάριο
- **Ti** Τιτάνιο
- **Bi** Βισμούθιο
- **Ca** Ασβέστιο
- **K** Κάλιο
- **NH₄** Αμμώνιο
- **C** Άνθρακας
- **OC** Οργανικός άνθρακας
- **EC** Ανόργανος άνθρακας
- **TC** Ολικός άνθρακας
- **PAHs** Αρωματικοί υδρογονάνθρακες

- **N₂** Άζωτο
- **H₂** Υδρογόνο
- **H₂SO₄** Θειικό οξύ
- **U_s** Οριακή ταχύτητα πτώσης των σωματιδίων
- **g** Επιτάχυνση της βαρύτητας
- **d** Πυκνότητα του σωματιδίου
- **d'** Πυκνότητα του μέσου πτώσης
- **r** Ισοδύναμη αεροδυναμική ακτίνα του σωματιδίου
- **n** Συντελεστής ιξώδους του μέσου πτώσης
- **UFP** Υπομετρικά σωματίδια (Ultrafine Particulate Matter, UFP)
- **LVS** Low Volume Sampler
- **IC** Ion chromatography
- **U** Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας (W / m²K)
- **Cl⁻** Ανιόν Χλωρίου
- **N₂O₅** Πεντοξείδο του Αζώτου
- **UV** Ακτινοβολία Υπεριώδης (Ultra Violet)
- **ClNO₂** Χλωριούχο Νιτρίλιο
- **NaNO₃** Νιτρικό νάτριο
- **NaCl** Χλωριούχο Νάτριο (θαλασσινό Αλάτι)
- **NO_x** Οξειδία του Αζώτου
- **NO₃⁻** Νιτρικό Ανιόν
- **NO₂** Διοξείδιο του Αζώτου
- **O₂** Οξυγόνο
- **O₃** Όζον
- **NH₄NO₃** Νιτρικό Αμμώνιο

- NH_4^+ Κατιόν Αμμωνίου
- SO_4^{2-} Θεικό Ανιόν
- SO_3^{2-} Σουλφίδιο
- **Pb** Μόλυβδος
- SO_2 Διοξείδιο του Θείου
- e^- Ηλεκτρόνιο
- $h\nu$ Ηλιακή ακτινοβολία (h : Σταθερά του Planck, ν : Συχνότητα φωτονίου)

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1: Οι επιπτώσεις του διοξειδίου του άνθρακα στον ανθρώπινο οργανισμό, ανάλογα με την περιεκτικότητά του στον αέρα (Häggström, 2014).....	21
Εικόνα 2.2: Αναπαράσταση ανθρώπινης τρίχας (60 μm διάμετρος) και σωματιδίων PM ₁₀ , PM _{2.5} (https://www.arb.ca.gov/research/aaqs/pm/pm.htm , 2015)	31
Εικόνα 2.3: Αναπαράσταση λεπτής άμμου (90 μm διάμετρος), ανθρώπινης τρίχας (50 μm διάμετρος) και σωματιδίων PM ₁₀ , PM _{2.5} (Andritsos, 2017)	32
Εικόνα 2.4: Total Suspended Particles (TSP) (Andritsos, 2017)	32
Εικόνα 2.5: Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων και αεροζόλ (Andritsos, 2017)	36
Εικόνα 2.6: Επίδραση των διαφόρων μεγεθών αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (με έντονο μαύρο χρώμα σημειώνονται τα καθέκαστα σημεία επιρροής) (Andritsos, 2017).....	37
Εικόνα 2.7: Η διεισδυτικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου (Housiadas, 2005)	38
Εικόνα 2.8: Τρεις διαφορετικές μορφές αερισμού ενός κτιρίου βάσει δυνάμεων καθοδήγησης του ανέμου (Straube, 2014).	48
Εικόνα 2.9: Βασικά χαρακτηριστικά φύτευσης εκτατικού (extensive) και εντατικού (intensive) τύπου πράσινης οροφής σε συμβατική (conventional) ταράτσα κτιρίου (Morakinio et al., 2017).	52
Εικόνα 2.10: Τυπική στρωμάτωση εντατικής και εκτατικής πράσινης οροφής (Brudermann και Sangkakool, 2017).....	53
Εικόνα 2.11: Μετρήσεις μετεωρολογικών παραμέτρων πάνω σε πράσινη οροφή κτιρίου στη περιοχή της Αγκόνα, Ιταλία (Fioretti et.al, 2010).....	56
Εικόνα 3.1: Η περιοχή της Νέας Σμύρνης εντός του λεκανοπεδίου Αττικής.....	62
Εικόνα 3.2: Πανοραμική εικόνα του κτιρίου και το μέρος του που καλύπτεται από πράσινη οροφή	62
Εικόνα 3.3: Άποψη της πράσινης οροφής του 2ου Δημοτικού Νέας Σμύρνης	65
Εικόνα 3.4: Δειγματοληπτικές θέσεις και ο αντίστοιχος πειραματικός εξοπλισμός.....	68
Εικόνα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας του OSIRIS (A.M.Irving, 2008)	71
Εικόνα 3.6: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του DustTrak	72
Εικόνα 3.7: Η συνολική συναρμολόγηση του οργάνου εντός αίθουσας	74

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση των παραγόντων που επηρεάζουν την εσωτερική ατμοσφαιρική ποιότητα (Nikolaou et al., 2007).....	18
Πίνακας 2.2: Ποσοστό παραγωγής του διοξειδίου του άνθρακα για διάφορες δραστηριότητες (Nikolaou et al.,2007).....	22
Πίνακας 2.3: Οριακές τιμές για τα σωματίδια PM ₁₀ και PM _{2.5} σύμφωνα με την Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης το 2008. (http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm)	40
Πίνακας 2.4: Ζώνες επικινδυνότητας των αιωρούμενων σωματιδίων (PM). (http://www.europeanlung.org/en/).....	41
Πίνακας 2.5: Οριοθέτηση συγκεντρώσεων TVOC ανάλογα με τις επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό για οκτάωρη έκθεση (Mølhavé et al., 1997).....	43
Πίνακας 2.6: Κλίμακα έκθεσης σε συγκεντρώσεις συνολικών πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOC) (Raatikainen et al., 2013)	43
Πίνακας 2.7: Ταξινόμηση επιρροής στον ανθρώπινο οργανισμό με βάση το ολικό φορτίο μυκήτων (European Commission, 1993).....	46
Πίνακας 2.8: Κυρίαρχα γένη και χαρακτηριστικά αερομεταφερομένων μυκήτων (Barnett & Hunter, 1999).....	46
Πίνακας 2.9: Ταξινόμηση επιρροής στον ανθρώπινο οργανισμό με βάση το ολικό φορτίο μυκήτων (Kordatos, 2012)	51
Πίνακας 3.1: Μέσες μηνιαίες τιμές μετεωρολογικών παραμέτρων και σωματιδιακής συγκέντρωσης στην περιοχή της Νέας Σμύρνης κατά τους μήνες πραγματοποίησης των πειραμάτων	63
Πίνακας 3.2: Συνοπτικά στοιχεία των υπό εξέταση αιθουσών	67
Πίνακας 3.3: Περίοδοι μετρήσεων ανά εποχικότητα	70
Πίνακας 4.1: Στατιστικά στοιχεία των μετρήσεων θερμοκρασίας (T) και σχετικής υγρασίας (RH) για αίθουσες διδασκαλίας πρώτου ορόφου κάτω από πράσινη και συμβατική ταράτσα και για άμεσο εξωτερικό περιβάλλον κατά τη διάρκεια διαφορετικών περιόδων	79
Πίνακας 4.2: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας για τη σχολική χρονιά 2016-2017.....	81
Πίνακας 4.3: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας για τη σχολική χρονιά 2016-2017	83

Πίνακας 4.4: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Οκτωβρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία.....	85
Πίνακας 4.5: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας Οκτωβρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία	87
Πίνακας 4.6: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Ιανουαρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία	89
Πίνακας 4.7: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας Ιανουαρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία.....	90
Πίνακας 4.8: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Ιουνίου σε όλα τα πειραματικά σημεία.....	92
Πίνακας 4.9: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας Ιουνίου σε όλα τα πειραματικά σημεία	94
Πίνακας 4.10: Ποσοστά μετρήσεων θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα εκτός των θερμοθετημένων ορίων για όλες τις αίθουσες.....	96
Πίνακας 4.11: Ποσοστά μετρήσεων σχετικής υγρασίας εκτός των θερμοθετημένων ορίων για όλες τις αίθουσες.....	97
Πίνακας 4.12: Στατιστικά στοιχεία διοξειδίου του άνθρακα κατά την πρώτη πειραματική περίοδο.....	99
Πίνακας 4.13: Στατιστικά στοιχεία διοξειδίου του άνθρακα κατά τη δεύτερη πειραματική περίοδο ...	101
Πίνακας 4.14: Αναλογία μαθητή ανά m^2 σε όλους τους υπό εξέταση χώρους	102
Πίνακας 4.15: Στατιστικά στοιχεία διοξειδίου του άνθρακα για όλες τις αίθουσες κατά τον Φεβρουάριο 2017.....	104
Πίνακας 4.16: Συσχετίσεις διοξειδίου του άνθρακα μεταξύ όλων των αιθουσών για όλη τη πειραματική περίοδο.....	106
Πίνακας 4.17: Συγκεντρωτικός πίνακας συσχέτισης ορόφων ως προς CO_2	106
Πίνακας 4.18: Αποτελέσματα ρυθμού αερισμού για επιλεγμένες μέρες σε όλες τις τάξεις	113
Πίνακας 5.1: Στατιστικά στοιχεία πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOCs) κατά την πρώτη πειραματική περίοδο.....	116
Πίνακας 5.2: Στατιστικά στοιχεία πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOCs) κατά την δεύτερη πειραματική περίοδο.....	118
Πίνακας 5.3: I/O αναλογίες πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOCs) για τις αίθουσες της πράσινης και ανατολικής οροφής	124
Πίνακας 5.4: Μέσες τιμές I/O αναλογιών TVOCs στις αίθουσες (Ιανουάριος-Μάιος 2017).....	125
Πίνακας 5.5: Συσχετίσεις πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOC) μεταξύ όλων των αιθουσών για όλη τη πειραματική περίοδο.....	126
Πίνακας 5.6: Συγκεντρωτικός πίνακας συσχέτισης ορόφων για διοξείδιο του άνθρακα	127
Πίνακας 5.7: Συσχέτιση μεταξύ αερομεταφερόμενων μυκήτων (γένος και σύνολο), εσωτερικής θερμοκρασίας (T), σχετικής υγρασίας (RH) και PM_{10} σε όλες τις αίθουσες διδασκαλίας	134

Πίνακας 5.8: Συντελεστής προσωπικής έκθεσης (ED) σε αερομεταφερόμενους μύκητες για τους μαθητές όλων των εξεταζόμενων τάξεων	135
Πίνακας 5.9: Στατιστικά στοιχεία για συγκεντρώσεις και λόγους I/O στις αίθουσες Γ3 και Β1 από τον Ιανουάριο έως τον Ιούνιο του 2017.....	138
Πίνακας 5.10: Μέσοι όροι των I/O αναλογιών PM_{10} για περιόδους με και χωρίς μαθητές	139
Πίνακας 5.11: Μέσοι όροι των I/O αναλογιών PM_1 & $PM_{2.5}$ για περιόδους με και χωρίς μαθητές.....	140
Πίνακας 5.12: Στατιστικά στοιχεία των PM_{10} στις αίθουσες και στις αντίστοιχες οροφές για όλη τη πειραματική περίοδο.....	143
Πίνακας 5.13: Στατιστικά στοιχεία των $PM_{2.5}$ στις αίθουσες και στις αντίστοιχες οροφές για όλη τη πειραματική περίοδο.....	143
Πίνακας 5.14: Στατιστικά στοιχεία των PM_1 στις αίθουσες και στις αντίστοιχες οροφές για όλη τη πειραματική περίοδο.....	143
Πίνακας 5.15: Συσχέτιση των PMs στην αίθουσα Γ3.	152
Πίνακας 5.16: Συσχέτιση PMs στη πτέρυγα της πράσινης ταράτσας (ΠΤ).....	153
Πίνακας 5.17: Στατιστικά δεδομένα κύριων χημικών στοιχείων στα μετρούμενα PM_{10}	155
Πίνακας 5.18: Σύγκριση των μέσων συγκεντρώσεων OC, EC και λόγων OC/EC στην εξεταζόμενη περιοχή με μετρήσεις από άλλες πόλεις (Zhang et al., 2009).	159
Πίνακας 5.19: Σύγκριση των συγκεντρώσεων χημικών στοιχείων $PM_{2.5}$ και PM_{10} με μετρήσεις από άλλες παρόμοιες έρευνες.....	166
Πίνακας 5.20: Συντελεστές συσχέτισης Spearman μεταξύ όλων των μετρούμενων παραμέτρων, σε όλες τις αίθουσες και καθ' όλη τη πειραματική περίοδο	173

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Το διοξείδιο του άνθρακα ως δείκτης των βιολογικών αποβολών. Η καμπύλη δείχνει την ποιότητα αέρα όπως γίνεται αντιληπτή (% δυσαρέσκεια – Percentage of Dissatisfaction) συναρτήσει της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα (Maroni et al.,1995)	20
Σχήμα 2.2: Διάμετρος Stokes (D_p) και αεροδυναμική διάμετρος (D_a) (Andritsos, 2017)	28
Σχήμα 2.3: Ταχύτητα πτώσης αιωρούμενων σωματιδίων αναλόγως τη διάμετρο. Παραδοχές: σωματίδια σφαιρικά πυκνότητας 1 gr/cm^3 , ατμόσφαιρα ήρεμη, θερμοκρασία $0 \text{ }^\circ\text{C}$, πίεση 760 mmHg (Pitts and Finlayson-Pitts, 2000)	34
Σχήμα 2.4: Μηχανισμοί δημιουργίας και εναπόθεσης αιωρούμενων σωματιδίων κατά διάμετρο, σε αστικό περιβάλλον. Ως UFP ορίζονται τα Ultrafine particles (Salonen et al.,2008)	35
Σχήμα 2.5: Εναπόθεση αερολυμάτων στον ανθρώπινο οργανισμό με βάση το μέγεθός τους (Housiadas, 2005).....	39
Σχήμα 2.6: Συσχέτιση θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας σε μια συγκεκριμένη τάση ατμών (Allen et al., 1998)	44
Σχήμα 4.1: Χρονοσειρές (α) θερμοκρασίας και (β) σχετικής υγρασίας για δύο αίθουσες διδασκαλίας κάτω από πράσινη και συμβατική στέγη καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου	80
Σχήμα 4.2: Τιμές ετήσιας θερμοκρασίας (T) για όλες τις πειραματικές θέσεις	82
Σχήμα 4.3: Τιμές ετήσιας σχετικής υγρασίας (RH) για όλες τις πειραματικές θέσεις	84
Σχήμα 4.4: Επίπεδα θερμοκρασίας Οκτωβρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία	86
Σχήμα 4.5: Επίπεδα σχετικής υγρασίας Οκτωβρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία	88
Σχήμα 4.6: Επίπεδα θερμοκρασίας Ιανουαρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία	90
Σχήμα 4.7: Επίπεδα σχετικής υγρασίας Οκτωβρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία	91
Σχήμα 4.8: Επίπεδα θερμοκρασίας Ιανουαρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία	93
Σχήμα 4.9: Επίπεδα θερμοκρασίας Ιανουαρίου σε όλα τα πειραματικά σημεία	94
Σχήμα 4.10: Ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας σε B1, Γ3 και οροφές στις 16/1/2017	97
Σχήμα 4. 11: Ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας σε B1, Γ3 και οροφές στις 5/6/2017	98
Σχήμα 4.12: Συγκεντρώσεις διοξειδίου άνθρακα όλων των τάξεων κατά τη περίοδο	101
Σχήμα 4.13: Συγκεντρωτικές μετρήσεις διοξειδίου του άνθρακα για τον Φεβρουάριο 2017	104

Σχήματα 4.14-15-16-17-18-19: Διαγράμματα συχνοτήτων συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα ανά αίθουσα.....	110
Σχήμα 4.20: Ημερήσια κατανομή διοξειδίου του άνθρακα στην αίθουσα Γ3	112
Σχήμα 4.21: Δωδεκάωρη περίοδος ελάτωσης συγκέντρωσης (decay period) και γραμμική παλινδρόμηση του CO ₂ στην τάξη Γ3 για μια συγκεκριμένη ημέρα	114
Σχήμα 5.1: Συγκεντρώσεις πτητικών οργανικών ενώσεων όλων των τάξεων κατά την πρώτη πειραματική περίοδο.....	116
Σχήμα 5.2: Συγκεντρώσεις πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOC) όλων των τάξεων κατά την δεύτερη πειραματική περίοδο.....	119
Σχήμα 5.3: Συγκεντρώσεις TVOC στην Ε3 κατά τον Φεβρουάριο 2017	119
Σχήματα 5.4-5-6-7-8-9: Διαγράμματα συχνοτήτων συγκεντρώσεων TVOC ανά αίθουσα	122
Σχήμα 5.10: Γραφική παράσταση των I/O αναλογιών πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOCs) για τις εξεταζόμενες αίθουσες (η μονάδα ορίζεται ως in=out)	124
Σχήμα 5.11: Συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μυκήτων για διαφορετικές πειραματικές ημέρες στην αίθουσα Β2	131
Σχήμα 5.12: Συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μυκήτων για διαφορετικές πειραματικές ημέρες στην αίθουσα Α3.....	131
Σχήμα 5.13: Συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μυκήτων για διαφορετικές πειραματικές ημέρες στην αίθουσα Ε3	132
Σχήμα 5.14: Συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μυκήτων για διαφορετικές πειραματικές ημέρες στην αίθουσα Γ3	132
Σχήμα 5.15: Συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μυκήτων για διαφορετικές πειραματικές ημέρες στην αίθουσα Β3	133
Σχήμα 5.16: Συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μυκήτων για διαφορετικές πειραματικές ημέρες στην αίθουσα Β1	133
Σχήμα 5.17: I/O αναλογίες PM ₁₀ για κάθε μήνα μέτρησης.....	139
Σχήμα 5.18: I/O αναλογίες PM _{2,5} για κάθε μήνα μέτρησης	141
Σχήμα 5.19: I/O αναλογίες PM ₁ για κάθε μήνα μέτρησης	141
Σχήμα 5.20: Συνολικές συγκεντρώσεις PM ₁₀ στις αίθουσες και στις αντίστοιχες οροφές για τη πειραματική περίοδο Ιανουάριος- Ιούνιος 2017	144

Σχήμα 5.21: Συνολικές συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ στις αίθουσες και στις αντίστοιχες οροφές για τη πειραματική περίοδο Ιανουάριος- Ιούνιος 2017.....	144
Σχήμα 5.22: Συνολικές συγκεντρώσεις PM_1 στις αίθουσες και στις αντίστοιχες οροφές για τη πειραματική περίοδο Ιανουάριος- Ιούνιος 2017.....	145
Σχήμα 5.23: Απεικόνιση τυπικής συμπεριφοράς συγκεντρώσεων PM_{10} για διαφορετικές περιόδους για (α) την αίθουσα Γ3 κάτω από την πράσινη οροφή και (β) την αίθουσα Β1 κάτω από την ανατολική οροφή οπλισμένου σκυροδέματος.....	147
Σχήμα 5.24: Απεικόνιση τυπικής συμπεριφοράς συγκεντρώσεων $PM_{2.5}$ για (α) την αίθουσα Γ3 κάτω από την πράσινη οροφή και (β) την αίθουσα Β1 κάτω από την ανατολική οροφή οπλισμένου σκυροδέματος.....	149
Σχήμα 5.25: Απεικόνιση τυπικής συμπεριφοράς συγκεντρώσεων PM_1 για (α) την αίθουσα Γ3 κάτω από την πράσινη οροφή και (β) την αίθουσα Β1 κάτω από την ανατολική οροφή οπλισμένου σκυροδέματος.....	150
Σχήμα 5.26: Απεικόνιση εβδομάδων μέγιστων συγκεντρώσεων PM_{10} για (α) την αίθουσα Γ3 κάτω από την πράσινη οροφή και (β) την αίθουσα Β1 κάτω από την ανατολική οροφή οπλισμένου σκυροδέματος.....	151
Σχήμα 5.27: Συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων και κυρίαρχες διευθύνσεις ανέμου κατά επιλεγμένες πειραματικές ημέρες του 2017. Με “ \odot ” συμβολίζεται η κατάσταση νηνεμίας.....	155
Σχήμα 5.28: Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις EC για όλες τις ημέρες δειγματοληψίας.....	157
Σχήμα 5.29: Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις OC για όλες τις πειραματικές ημέρες.....	158
Σχήμα 5.30: Εξωτερικές συγκεντρώσεις OC/EC για όλες τις πειραματικές ημέρες.....	160
Σχήμα 5.31: Εσωτερικές συγκεντρώσεις OC/EC για όλες τις πειραματικές ημέρες.....	160
Σχήμα 5.32: Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις Cl^- για όλες τις πειραματικές ημέρες.....	161
Σχήμα 5.33: Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις NO_3^- για όλες τις πειραματικές ημέρες.....	162
Σχήμα 5.34: Εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις SO_4^{2-} για όλες τις πειραματικές ημέρες.....	163
Σχήμα 5.35: Εσωτερικές συγκεντρώσεις μετάλλων για όλες τις πειραματικές ημέρες.....	164
Σχήμα 5.36: Εξωτερικές συγκεντρώσεις μετάλλων για όλες τις πειραματικές ημέρες.....	165
Σχήμα 5.37: Ποσοστά συνεισφοράς χημικών στοιχείων σε κάθε παράγοντα-πηγή.....	171
Σχήμα 5.38: Ποσοστά συνεισφοράς κάθε πηγής στο σύνολο των μετρούμενων PM_{10}	171
Σχήμα 5.39: Μέση συνεισφορά κάθε πηγής ανά σημείο καταγραφής και χρονική περίοδο.....	172
Σχήμα 5.40: Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ της RH και των υπόλοιπων μεταβλητών σε όλο το κτίριο και καθ’ όλη τη πειραματική περίοδο.....	175

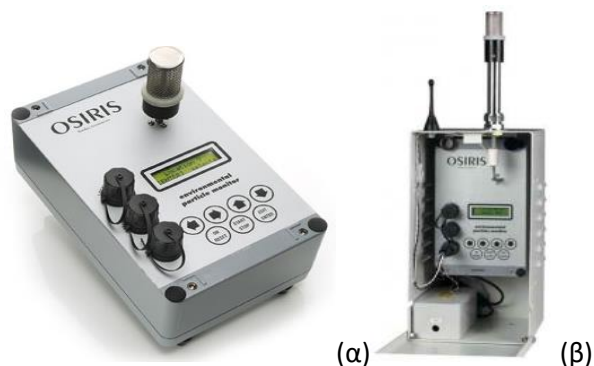
Σχήμα 5.41: Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ της RH και των υπόλοιπων μεταβλητών σε όλο το κτίριο και καθ'όλη τη πειραματική περίοδο	176
Σχήμα 5.42: Συνδυαστική επίδραση εσωτερικής θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας στις συγκεντρώσεις TVOC στη συμβατική πτέρυγα του σχολείου	176

Παράρτημα Α: Τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε

Στο παράρτημα αυτό αποτυπώνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συνόλου των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου. Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 3.1, ο εξοπλισμός αποτελείται από εξειδικευμένα όργανα περιβαλλοντικών μετρήσεων, απαραίτητα για την καταγραφή αέριων ρύπων και μετεωρολογικών στοιχείων στις επιλεγμένες πειραματικές θέσεις εντός του σχολείου. Παρακάτω απεικονίζονται οι αισθητήρες και αναφέρονται τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε οργάνου όπως τύπος μοντέλου, εύρη συγκεντρώσεων, ακρίβεια, ρυθμός ροής αέρα και χρόνοι απόκρισης. Τα στοιχεία αυτά είναι απαραίτητα για την κατανόηση και ερμηνεία των στοιχείων που μετρήθηκαν όπως και για την ακρίβεια των μετρήσεων.

Μετρητές αιωρούμενων σωματιδίων

Turnkey OSIRIS



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

Πίνακας Α.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του OSIRIS

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

Lighthouse Handheld 3016

Τα βασικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου συνοψίζονται στον πίνακα Α2.



Εικόνα Α.2: Μετρητής αιωρούμενων σωματιδίων Handheld 3016 IAQ (www.golighthouse.com)

Πίνακας Α.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μετρητή Handheld 3016

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

TSI DustTrak

Παρακάτω συνοψίζονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά του DustTrak.



Εικόνα Α.3: Το όργανο DustTrak 8520 Aerosol Dust Monitor (<http://www.tsi.com/dust-monitors/>)

Πίνακας Α.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά μετρητή DustTrak

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

Βαρυμετρική μέθοδος μέτρησης σωματιδίων

Πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο ο προσδιορισμός της μάζας με τη βαρυμετρική μέθοδο όσο και οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε συνεργασία με το εργαστήριο Περιβαλλοντικών Ερευνών του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος".

Derenda

Χαρακτηριστικά:

- Φίλτρα διαμέτρου 47 - 50 mm
- Ηλεκτρονικά ρυθμισμένη ογκομετρική παροχή
- Αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας
- Κασετίνα με 16 φυσίγγια φίλτρου (εικόνα 3.1.6)
- Διεπαφή RS-232

Οι καταγραφείσες τιμές αποθηκεύονται σε κάρτα SD και μπορούν επίσης να μεταφερθούν σε υπολογιστή χρησιμοποιώντας θύρα RS-232:

- ❖ Σειριακός αριθμός
- ❖ Αριθμός φίλτρου
- ❖ Ημερομηνία και ώρα της ημέρας για την έναρξη και το τέλος της δειγματοληψίας
- ❖ Απόδοση σε m³ / h και Nm³ / h
- ❖ Χρόνος δειγματοληψίας σε λεπτά
- ❖ Ποσότητα δειγματοληψίας σε m³ και Nm³
- ❖ Μέσες τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης / θερμοκρασίας / σχετική υγρασία

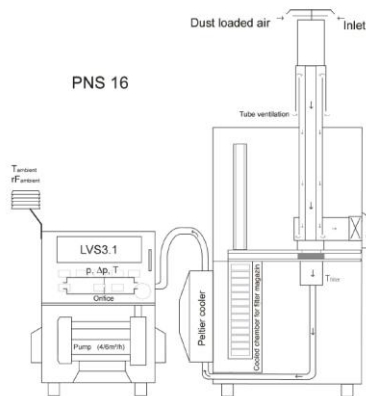
- ❖ Απώλεια πίεσης στο φίλτρο
- ❖ Θερμοκρασία αποθήκευσης φίλτρου



Εικόνα Α.4: Η κασετίνα με τα φίλτρα και οι κενές θέσεις όπου αυτά τοποθετούνται



A



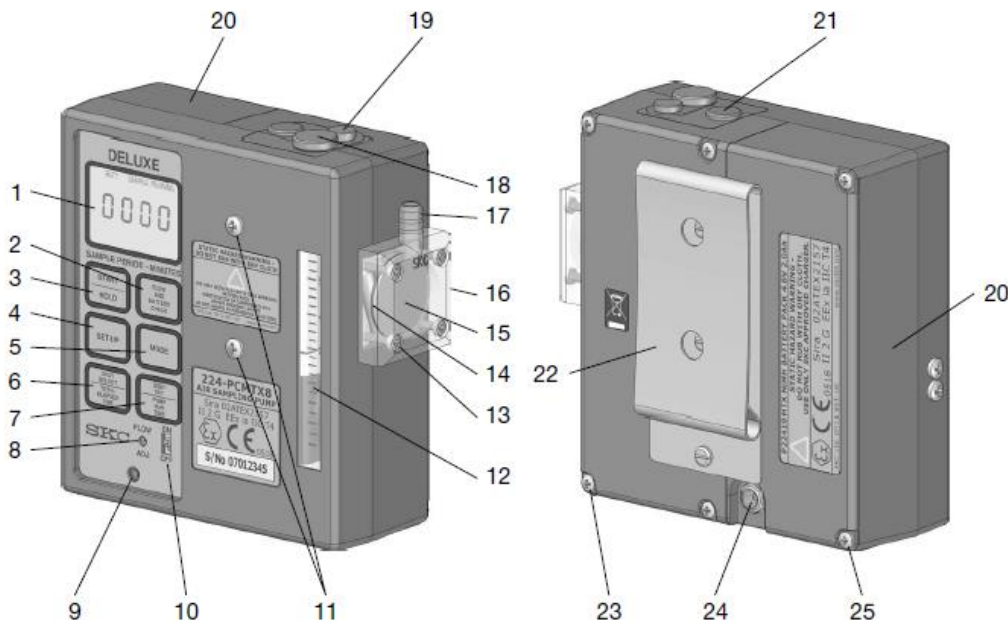
B

Εικόνα Α.5 (Α και Β): Το όργανο καταμέτρησης Derenda με την αντλία εισόδου πάνω δεξιά, τον δειγματολήπτη χαμηλού όγκου με την αντλία αριστερά και στο δεξιά μέλος, η κασετίνα με τα φίλτρα.

SKC

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στις αίθουσες του 2^{ου} Δημοτικού Νέας Σμύρνης ήταν το Universal Deluxe 224 - PCTX8 . Είναι κατάλληλο για δειγματοληψία σκόνης, αερίου / ατμού, έχει ευρεία περιοχή ροής με ενσωματωμένο ρυθμιστή πίεσης χαμηλής ροής και ενσωματωμένο δείκτη ροής. Επιπλέον, διαθέτει μεγάλο εύρος ροής: υψηλή ροή 1000 - 5000 ml/min ή χαμηλή ροή 5-500 ml/min αλλά απαιτεί ρυθμιζόμενο στήριγμα χαμηλής ροής, ενσωματωμένο ελεγκτή σταθερής πίεσης για δειγματοληψία χαμηλής ροής και ενσωματωμένη αντικαταστάσιμη παγίδα σωματιδίων για την πρόληψη μόλυνσης του δείγματος. Λειτουργεί σε εύρος θερμοκρασιών από -20 έως 40 °C.

Χαρακτηριστικά:



Εικόνα A.6: Το όργανο SKC Universal Deluxe 224 - PCTX8 και τα βασικά χαρακτηριστικά του

- 1) Οθόνη LCD
- 2) Πλήκτρο ελέγχου ροής και μπαταρίας
- 3) Πλήκτρο START / HOLD
- 4) Πλήκτρο SET-UP
- 5) Πλήκτρο MODE
- 6) Πλήκτρο SELECT
- 7) Πλήκτρο SET
- 8) Βίδα ρύθμισης ροής
- 9) Βίδα συγκράτησης προστατευτικού καλύμματος

- 10) Διακόπτης ενεργοποίησης / απενεργοποίησης
- 11) Βίδες στερέωσης εξαρτημάτων
- 12) Ένδειξη ροής
- 13) Βίδες του περιβλήματος φίλτρου
- 14) Σφραγίδα δακτυλίου Ο-φίλτρου
- 15) Φίλτρο προστασίας εισόδου
- 16) Περίβλημα φίλτρου προστασίας εισόδου
- 17) Εισαγωγή ειδικού σωλήνα για παροχή αέρα
- 18) Κάλυμμα θύρας εξάτμισης
- 19) Κάλυμμα βίδας για λειτουργία χαμηλής ροής
- 20) Μπαταρία
- 21) Κάλυμμα ρυθμιστή λειτουργίας χαμηλής ροής
- 22) Κλιπ ζώνης
- 23) Βίδες κύριας θήκης
- 24) Υποδοχή υποδοχής φόρτισης της μπαταρίας
- 25) Βίδες μπαταρίας

Αφού χρησιμοποιηθεί ο ειδικός σωλήνας (17), η μια προεξοχή που βρίσκεται στην αντλία αέρα συνδέεται με μία κάψουλα (εικόνα 3.1.9), στην οποία τοποθετούνται τα φίλτρα χαλαζία 37mm πάνω στα οποία κατακάθονται τα δεσμευόμενα αιωρούμενα σωματίδια.



A



B

Εικόνα A.7 (A και B): Κάψουλα φίλτρων για μέτρηση (A) PM_{10} και (B) $PM_{2.5}$.

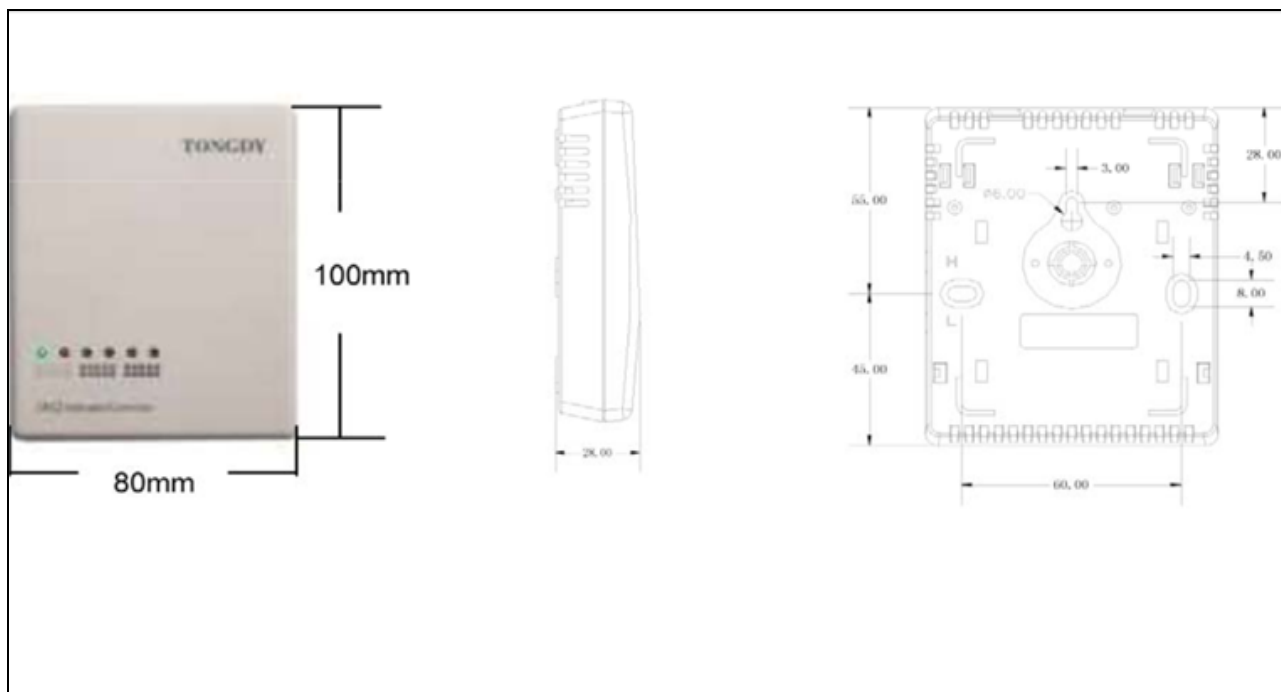
Μετρητής TVOC, CO₂

HES - IAQ Tongdy

Όργανο καταμέτρησης διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και συνολικών οργανικών πτητικών ενώσεων (TVOC) (προαιρετικά και θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας). Τα χαρακτηριστικά του:

- Ανίχνευση Ποιότητας Εσωτερικού Αέρα σε πραγματικό χρόνο
- Υψηλή ευαισθησία στις πτητικές οργανικές ενώσεις και τη μόλυνση του εσωτερικού αέρα
- 6 φωτεινές ενδείξεις για την ένδειξη των επιπέδων ποιότητας αέρα οι οποίες μεταφράζονται ως εξής:
 - 1ο πράσινο φως: Εξαιρετικό IAQ (VOC≤5ppm)
 - 1ο και 2ο πράσινο φως: Καλό IAQ (5<VOC≤10ppm)
 - 1ο κίτρινο φως: Μέσο IAQ (10<VOC≤15ppm)
 - 1ο και 2ο κίτρινο φως: Κακό IAQ (15<VOC≤20ppm)
 - 1ο κόκκινο φως: Πολύ κακό IAQ (20<VOC≤25ppm)
 - 1ο και 2ο κόκκινο φως: Χείριστο IAQ (VOC>25ppm)
- Συνεχή μέτρηση θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας με εύρος 0-50°C και 95% αντίστοιχα.
- Μέθοδος δειγματοληψίας: Διάχυση

Λειτουργεί συνεχόμενα, με σύνδεση μέσω πρίζας παροχής ρεύματος.



Εικόνα Α.8: Ο αισθητήρας HES IAQ Tongdy (<https://detail.en.china.cn/provide/p151770424.html>)

Μετρητής μετεωρολογικών παραμέτρων

Tinytag Plus 2, TGP-4500

Ακολούθως συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του μετρητή Tinytag Plus 2.



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

Πίνακας A.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά θερμο-υγρομέτρων Tinytag

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

Μετρητής βιολογικών παραμέτρων

Burkard

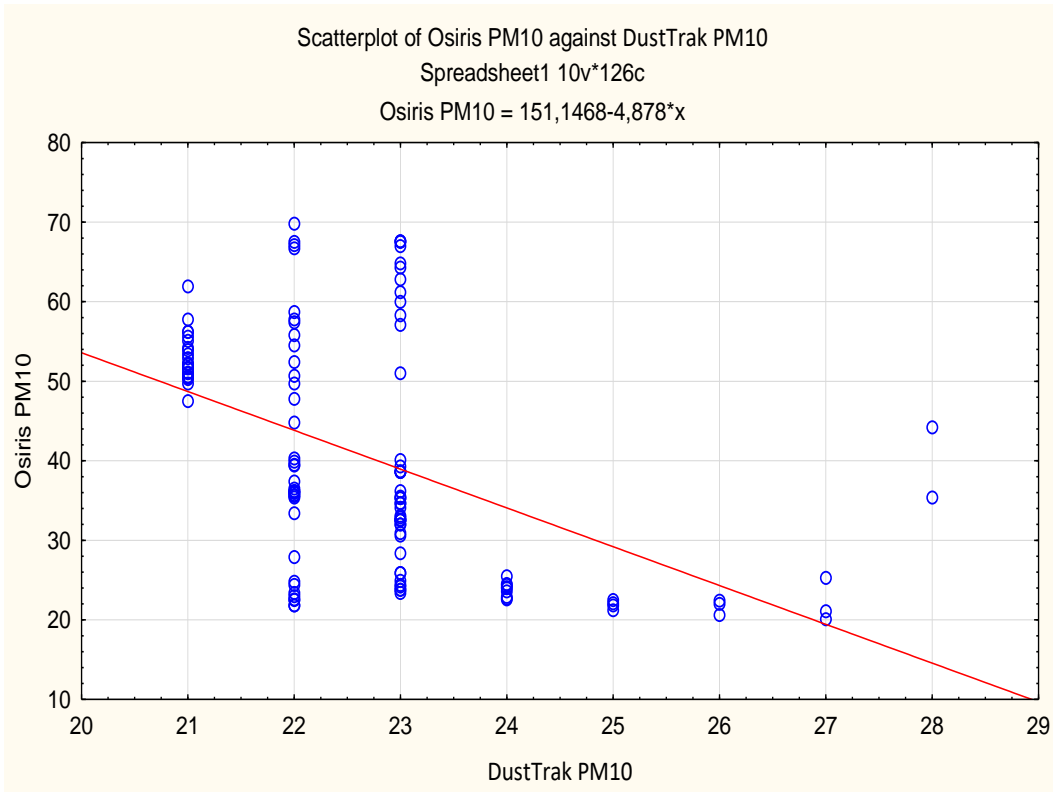
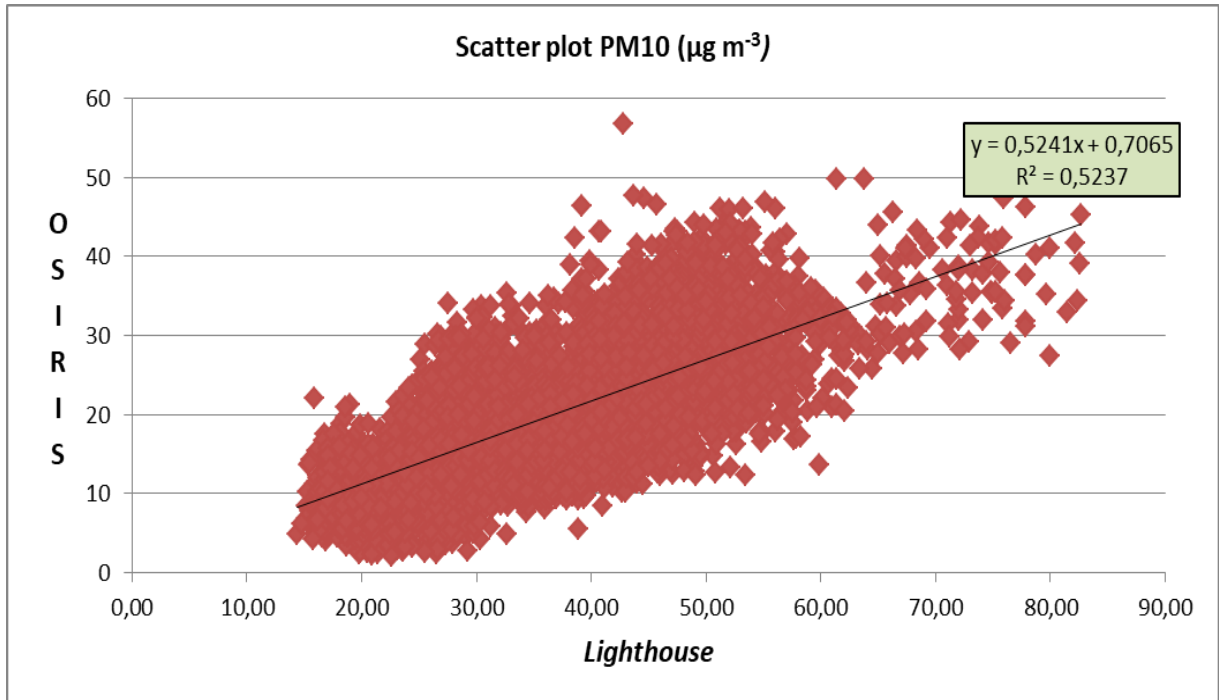
Στο συγκεκριμένο πείραμα, η αντλία λειτουργούσε με ρυθμό 10 ή 20 l/min οδηγούσε τον αέρα σε τριβλία διαμέτρου 90 mm πάνω στα οποία υπήρχε θρεπτικό υλικό το οποίο βοηθά στην ανάπτυξη των μυκήτων.). Οι αποικίες μυκήτων αναλύθηκαν περαιτέρω σε επίπεδο γένους. Τα επικρατέστερα γένη ήταν το Πενυσίλλιο (*Penicillium*), το Κλαντοσπόριο (*Cladosporium*) και ο Ασπέργιλλος (*Aspergillus*).



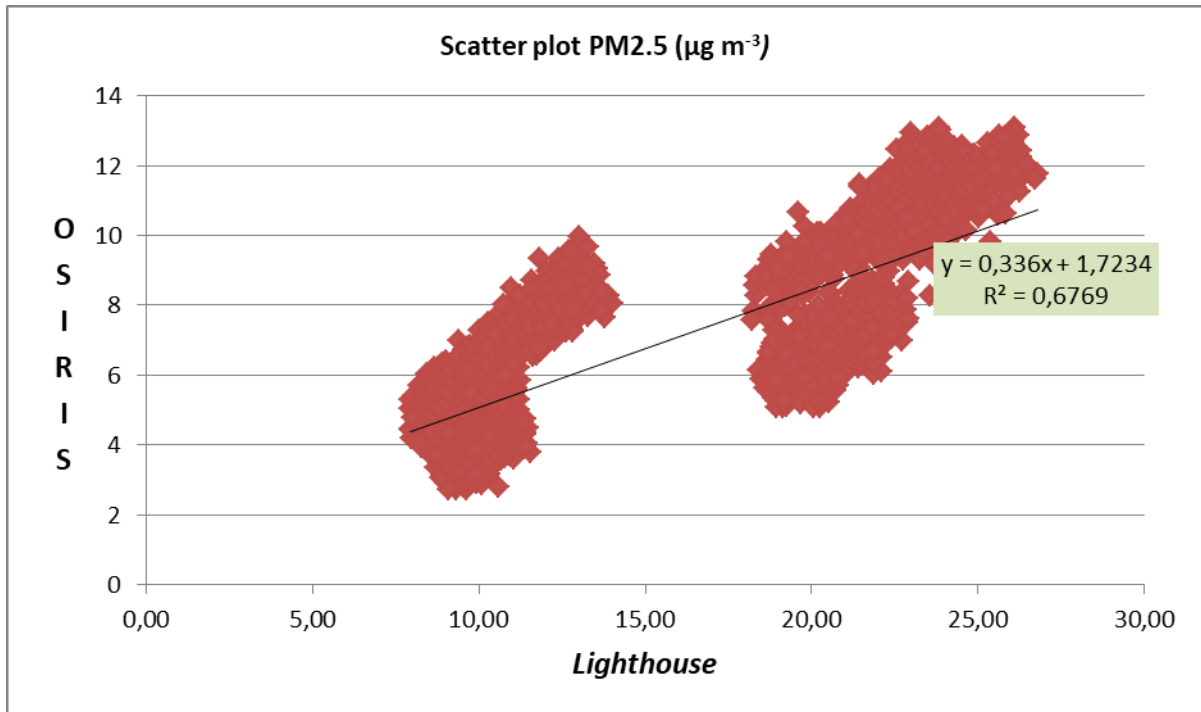
Εικόνα A.10: Φορητή αντλία Burkard (<http://burkard.co.uk/product/portable-air-sampler-for-agar-plates/>)

Εσωτερική βαθμονόμηση οργάνων αιωρούμενων σωματιδίων:

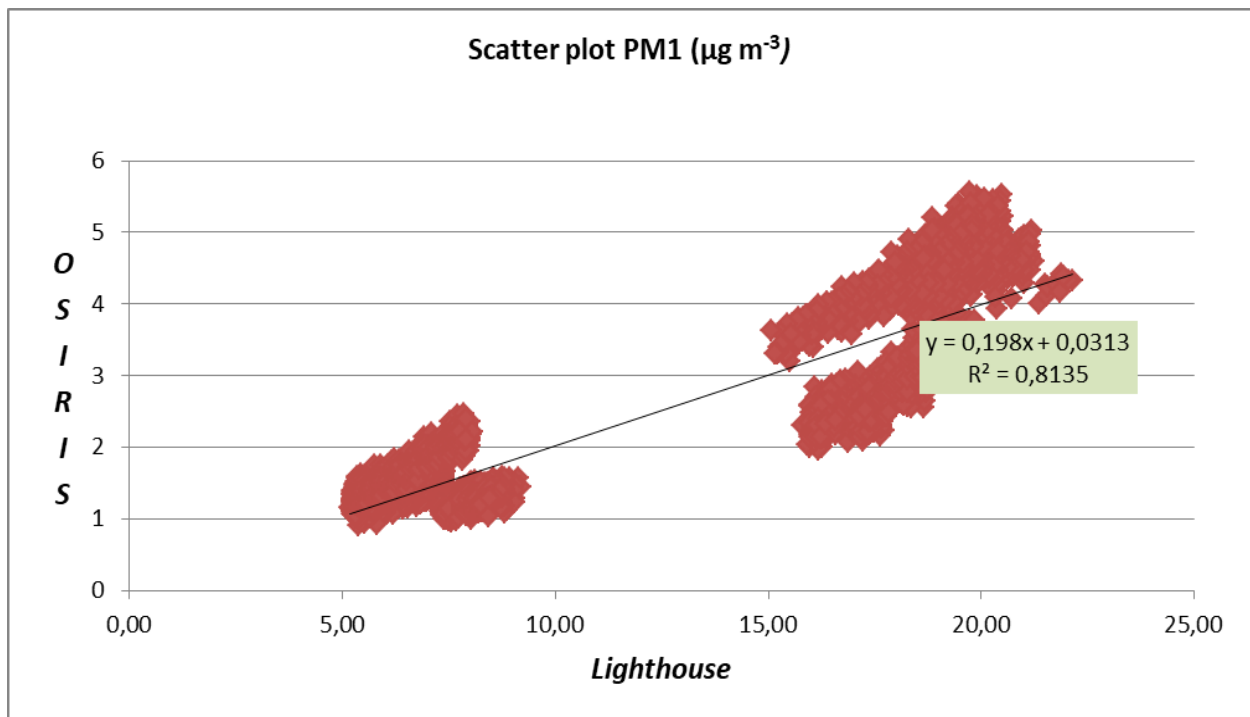
- PM₁₀



- PM_{2,5}



- PM₁



Παράρτημα Β: Βάση δεδομένων υψηλής ποιότητας

Η διαδικασία της διόρθωσης χονδροειδών σφαλμάτων βασίζεται στη κανονικοποίηση των εξεταζόμενων χρονοσειρών (Z-scores) και αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

- Εκτιμάται η τυπική απόκλιση (σ) μιας χρονοσειράς και ορίζεται μια ζώνη πλάτους από 3σ έως 5σ που αντιστοιχεί σε πιθανότητα περίπου 99-99.9999% μια τιμή που βρίσκεται έξω από αυτή να αντιστοιχεί σε χονδροειδές σφάλμα.
- Η σειρά κανονικοποιείται σύμφωνα με τη σχέση $Z = \frac{|\bar{X} - x_i|}{\sigma}$. Όπου \bar{x} ο μέσος όρος και x_i η υπό εξέταση τιμή.
- Οι τιμές που βρίσκονται εκτός της επιλεγμένης ζώνης ($Z > 5$) απομακρύνονται και τα αντίστοιχα σημεία θεωρούνται κενά.
- Οι κενές θέσεις συμπληρώνονται από τους μέσους όρους γειτονικών κελιών, ο αριθμός των οποίων επιλέγεται βάσει ενός χρονικού παραθύρου. Στη παρούσα μελέτη τα όργανα κατέγραφαν με συχνότητα μια μέτρηση ανά 15 λεπτά, γι' αυτό και επιλέχθηκε χρονικό παράθυρο 30 λεπτών πριν και μετά τη παρατήρηση της ακραίας τιμής (± 2 θέσεις).

Τα κριτήρια διόρθωσης ακραίων τιμών ποικίλλουν ανάλογα με το πείραμα, από το πιο αυστηρό (3σ) έως το λιγότερο (7σ). Η τεχνική με ζώνη πλάτους 5σ εφαρμοζόταν σε μετρήσεις του δικτύου USHCN (United States Historical Climatology Network- <http://www.ncdc.noaa.gov>). Είναι σημαντικό να επισημάνουμε ότι με την απομάκρυνση των χονδροειδών σφαλμάτων δεν αλλάζει το πλήθος των μετρήσεων αλλά ο μέσος όρος τους.

Παράρτημα Γ: Μηνιαία αποτελέσματα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας ανά αίθουσα

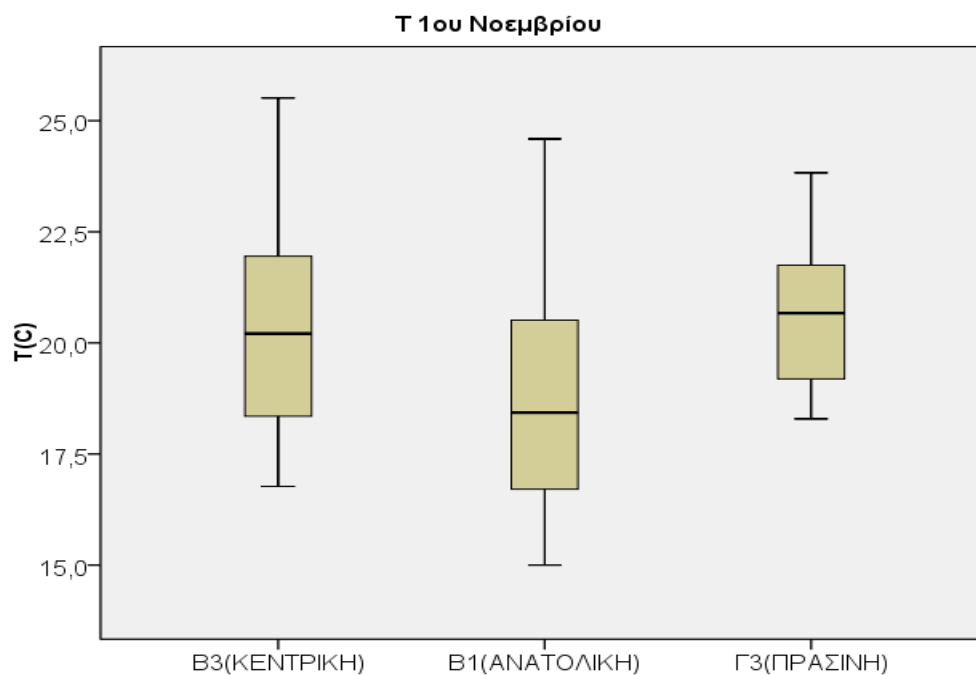
Στο παράρτημα αυτό παρατίθενται όλα τα μηνιαία αποτελέσματα που αφορούν στα επίπεδα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εντός των υπό εξέταση αιθουσών σε μορφή θηκογραμμάτων αλλά και σε στατιστικούς πίνακες. Στόχος είναι η αποτύπωση της επίδρασης της πράσινης οροφής στις θερμικές συνθήκες που διαμορφώνονται στις τάξεις που βρίσκονται από κάτω της. Στην ενότητα 4.1.3, αναλύθηκαν εκτενώς τα αποτελέσματα εσωτερικής θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας στις αίθουσες ισόγειου και 1^{ου} ορόφου για τους μήνες Οκτώβριο, Ιανουάριο και Ιούνιο της σχολικής χρονιάς 2016-17. Παρακάτω, ακολουθούν τα αποτελέσματα για τους υπόλοιπους μήνες του έτους που έλαβε χώρα η πειραματική διαδικασία.

Γ1. Νοέμβριος 2016

Για το μήνα Νοέμβριο, στον 1^ο όροφο του σχολείου, παρατηρούμε κάτω από την πράσινη οροφή υψηλότερη μέση θερμοκρασία (κατά 1.81°C), υψηλότερη μέγιστη θερμοκρασία αλλά χαμηλότερη ελάχιστη θερμοκρασία. Ακόμα, η διακύμανση είναι μικρότερη. Η μέση, μέγιστη κι ελάχιστη σχετική υγρασία είναι και πάλι μικρότερη κάτω από την πράσινη οροφή.

Για το ισόγειο, οι μετρήσεις δείχνουν και πάλι υψηλότερη μέση, μέγιστη, κι ελάχιστη θερμοκρασία στην αίθουσα κάτω από την πράσινη ταράτσα, με μικρότερη όμως διακύμανση. Στη περίπτωση του ισόγειου οι διαφορές θερμοκρασίας είναι μικρότερες, με $\Delta T=0.6^{\circ}\text{C}$ για τη μέση θερμοκρασία.

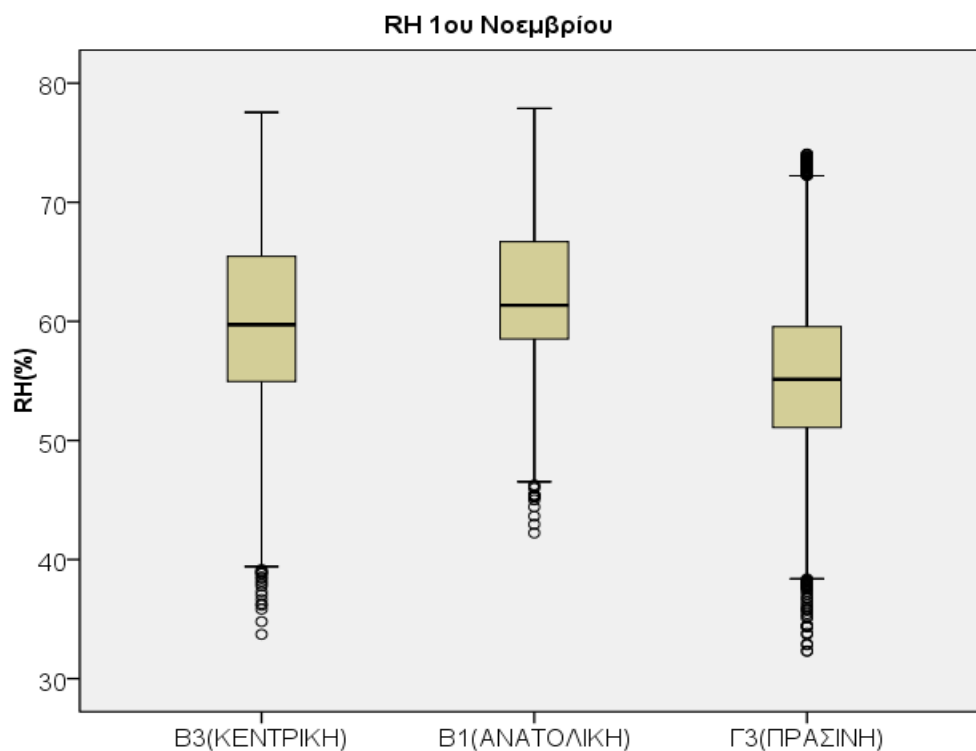
Η μέση κι η ελάχιστη σχετική υγρασία είναι υψηλότερη κάτω από την ανατολική αίθουσα, η μέγιστη σχετική υγρασία καθώς κι η διακύμανση είναι υψηλότερες.



Σχήμα Γ1.1: Επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας Νοεμβρίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

Πίνακας Γ1.1: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Νοεμβρίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

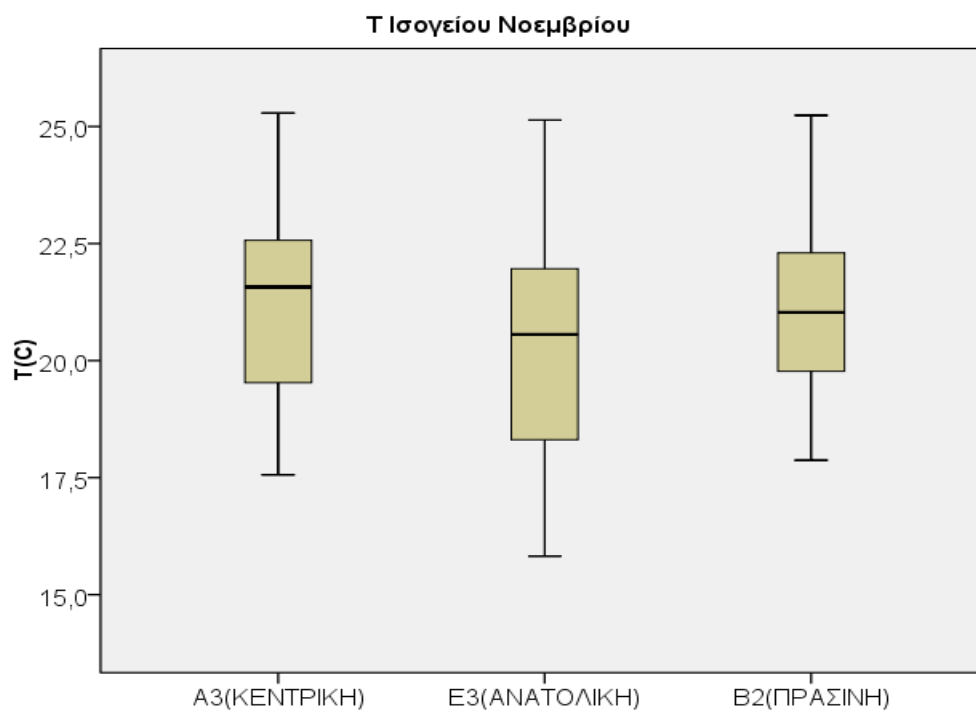
°C		B3(ΚΕΝΤΡΙΚΗ)	B1(ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ)	Γ3(ΠΡΑΣΙΝΗ)
Mean		20,31	18,75	20,76
Std. Deviation		2,00	2,20	1,41
Minimum		16,77	15,00	18,29
Maximum		25,51	24,59	23,83
Percentiles	25	18,35	16,70	19,19
	50	20,21	18,43	20,67
	75	21,95	20,51	21,75



Σχήμα Γ1.2: Επίπεδα εσωτερικής σχετικής υγρασίας Νοεμβρίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

Πίνακας Γ1.2: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας Νοεμβρίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

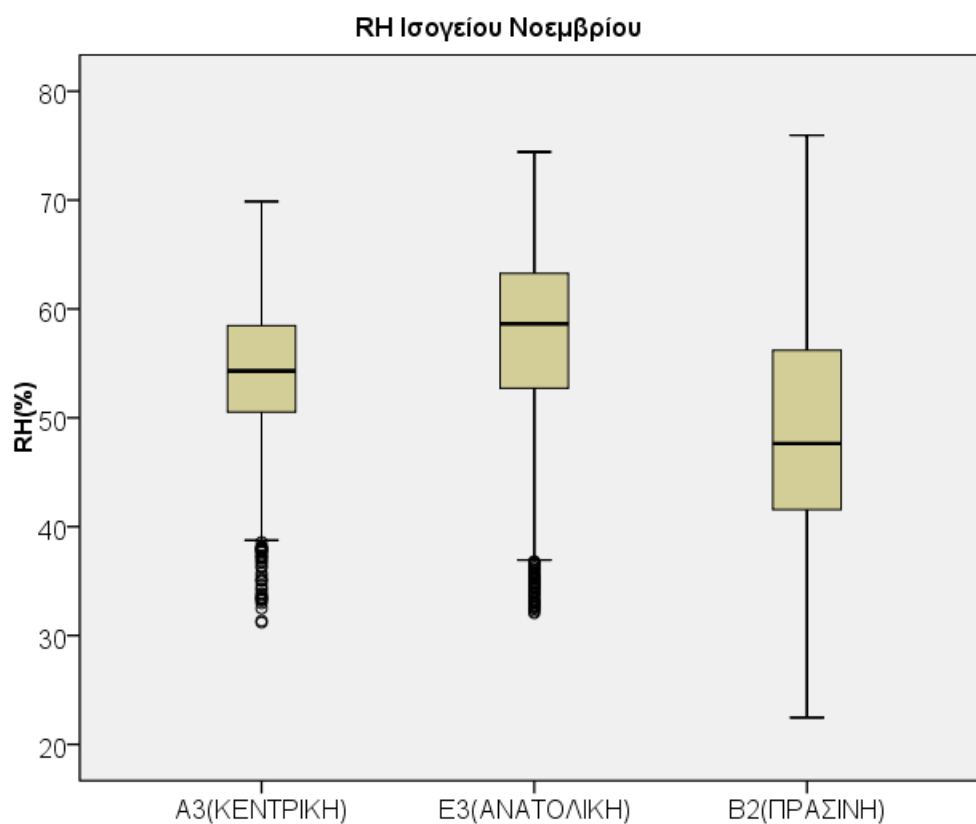
%		B3(ΚΕΝΤΡΙΚΗ)	B1(ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ)	Γ3(ΠΡΑΣΙΝΗ)
Mean		59,43	61,81	55,46
Std. Deviation		7,15	6,18	7,41
Minimum		33,72	42,23	32,31
Maximum		77,54	77,89	74,06
Percentiles	25	54,95	58,53	51,08
	50	59,73	61,35	55,13
	75	65,46	66,68	59,55



Σχήμα Γ1.3: Επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας Νοεμβρίου για τις αίθουσες ισογείου

Πίνακας Γ1.3: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Νοεμβρίου για τις αίθουσες ισογείου

°C		A3(ΚΕΝΤΡΙΚΗ)	E3(ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ)	B2(ΠΡΑΣΙΝΗ)
Mean		21,22	20,49	21,09
Std. Deviation		1,69	2,01	1,48
Minimum		17,56	15,82	17,87
Maximum		25,29	25,14	25,24
Percentiles	25	19,53	18,31	19,77
	50	21,57	20,56	21,03
	75	22,57	21,96	22,30



Σχήμα Γ1.4: Επίπεδα εσωτερικής σχετικής υγρασίας Νοεμβρίου για τις αίθουσες ισογείου

Πίνακας Γ1.4: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Νοεμβρίου για τις αίθουσες ισογείου

%		A3(ΚΕΝΤΡΙΚΗ)	E3(ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ)	B2(ΠΡΑΣΙΝΗ)
Mean		54,39	56,99	48,82
Std. Deviation		6,59	9,52	9,66
Minimum		31,20	32,07	22,46
Maximum		69,88	74,42	75,96
Percentiles	25	50,54	52,71	41,56
	50	54,31	58,64	47,65
	75	58,47	63,28	56,21

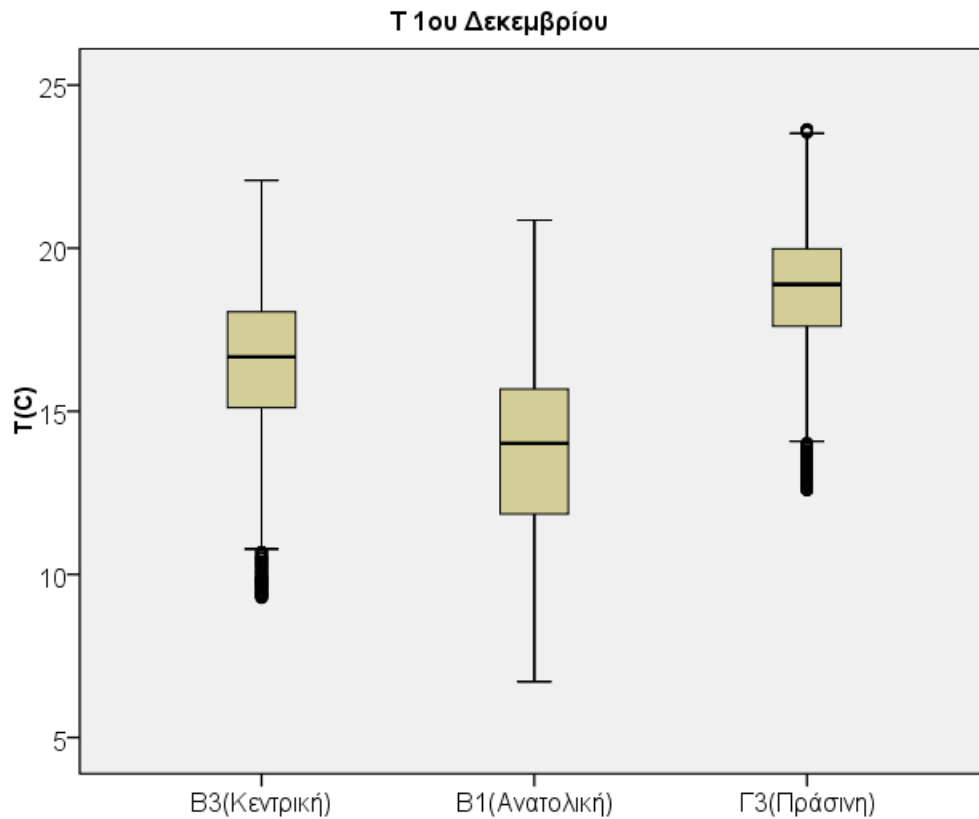
Γ2. Δεκέμβριος 2016

Για το Δεκέμβριο, παρατηρούμε ότι στον πρώτο όροφο, η αίθουσα κάτω από την πράσινη ταράτσα έχει υψηλότερη μέση θερμοκρασία (κατά 4.79°C), καθώς και μέγιστη κι ελάχιστη θερμοκρασία, σε σχέση με την αντίστοιχη ανατολική αίθουσα. Η διακύμανση βρέθηκε μικρότερη.

Για την σχετική υγρασία, στον 1^ο όροφο, βλέπουμε ότι κάτω από την πράσινη ταράτσα η μέση, η μέγιστη κι η ελάχιστη τιμή είναι μικρότερες, ενώ η διακύμανση είναι μεγαλύτερη.

Στον πρώτο όροφο, όπως και για τους προηγούμενους μήνες, παρατηρούμε μικρότερες διαφορές. Η μέση θερμοκρασία είναι λίγο μεγαλύτερη κάτω από την πράσινη ταράτσα (κατά 1.58°C), η μέγιστη θερμοκρασία επίσης, ενώ η ελάχιστη θερμοκρασία κι η διακύμανση είναι μικρότερες.

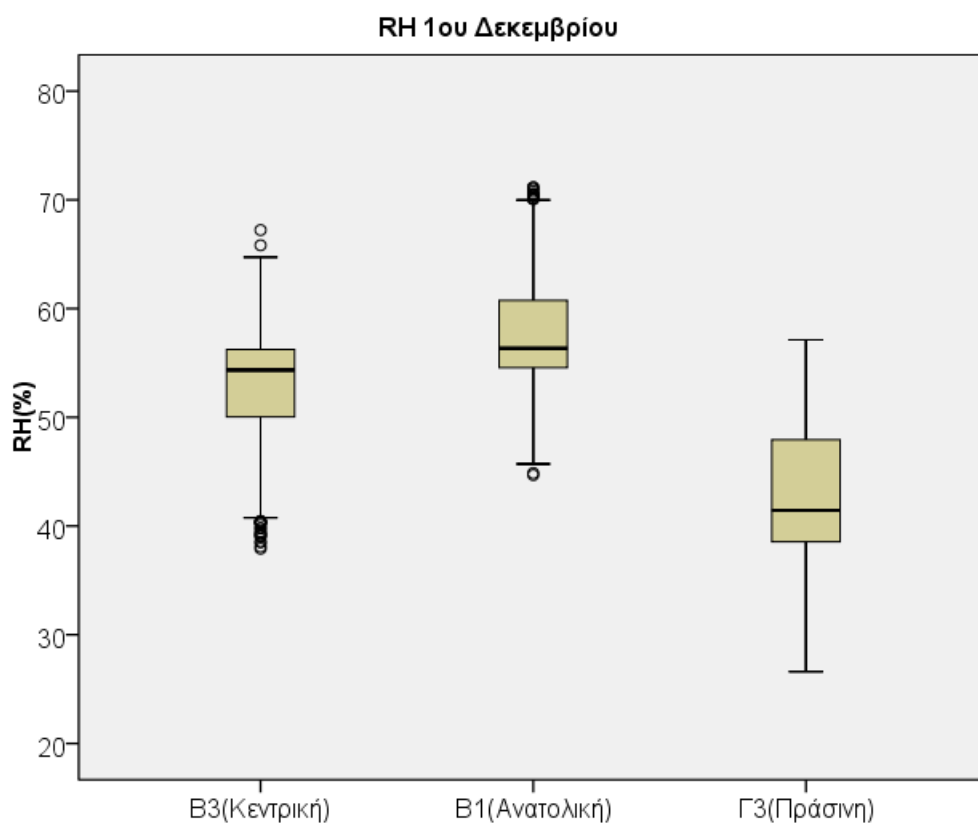
Η σχετική υγρασία έχει όλες τις τιμές της, δηλαδή μέση, μέγιστη, ελάχιστη τιμή και διακύμανση μικρότερες στην αίθουσα κάτω από την πράσινη ταράτσα.



Σχήμα Γ2.1: Επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας Δεκεμβρίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

Πίνακας Γ2.1: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Δεκεμβρίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

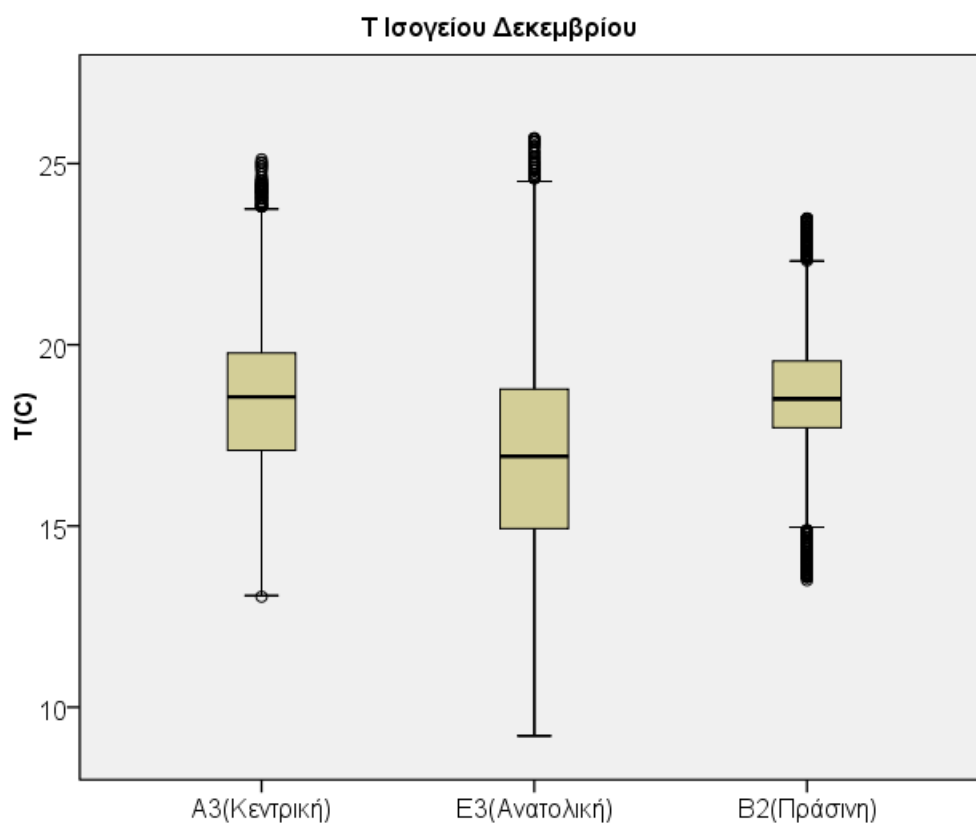
°C		B3(Κεντρική)	B1(Ανατολική)	Γ3(Πράσινη)
Mean		16,53	13,95	18,74
Std. Deviation		2,49	2,68	2,15
Minimum		9,28	6,71	12,58
Maximum		22,08	20,86	23,65
Percentiles	25	15,11	11,85	17,60
	50	16,67	14,02	18,89
	75	18,05	15,68	19,98



Σχήμα Γ2.2: Επίπεδα εσωτερικής σχετικής υγρασίας Δεκεμβρίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

Πίνακας Γ2.2: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας Δεκεμβρίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

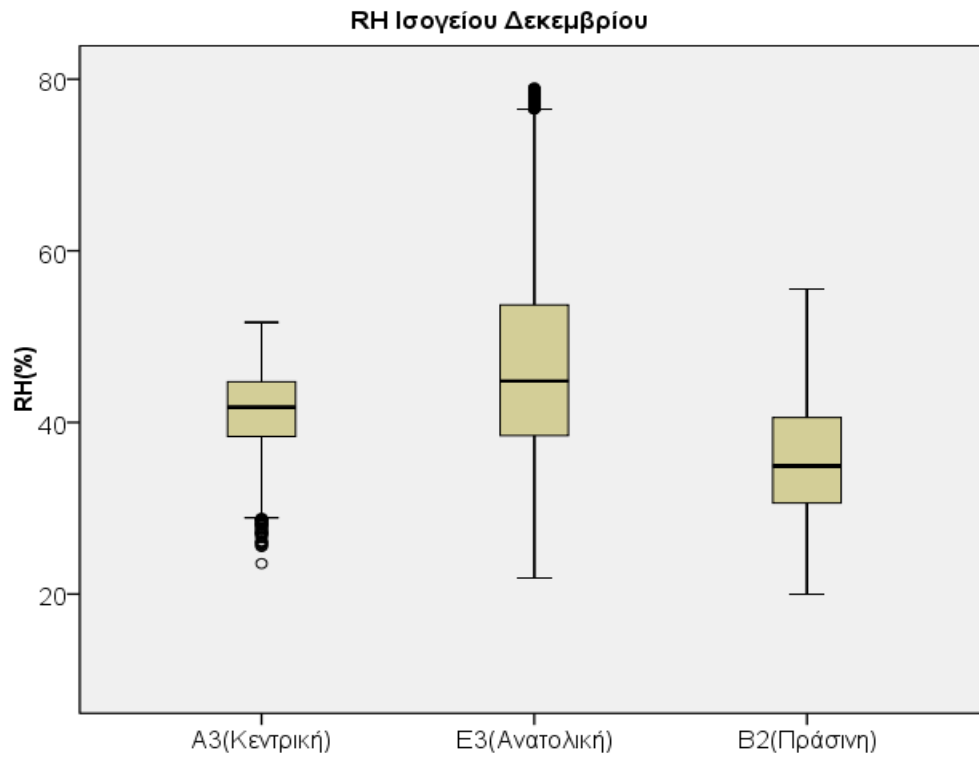
%		Β3(Κεντρική)	Β1(Ανατολική)	Γ3(Πράσινη)
Mean		53,38	57,19	42,60
Std. Deviation		4,56	4,20	5,76
Minimum		37,91	44,69	26,60
Maximum		67,22	71,16	57,13
Percentiles	25	50,04	54,57	38,53
	50	54,34	56,34	41,44
	75	56,24	60,75	47,93



Σχήμα Γ2.3: Επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας Δεκεμβρίου για τις αίθουσες ισογείου

Πίνακας Γ2.3: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Δεκεμβρίου για τις αίθουσες ισογείου

°C		A3(Κεντρική)	E3(Ανατολική)	B2(Πράσινη)
Mean		18,60	17,05	18,63
Std. Deviation		2,31	3,29	1,89
Minimum		13,05	9,21	13,50
Maximum		25,12	25,70	23,49
Percentiles	25	17,09	14,93	17,71
	50	18,56	16,92	18,51
	75	19,77	18,78	19,55



Σχήμα Γ2.4: Επίπεδα εσωτερικής σχετικής υγρασίας Δεκεμβρίου για τις αίθουσες ισογείου

Πίνακας Γ2.4: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας Δεκεμβρίου για τις αίθουσες ισογείου

%		A3(Κεντρική)	E3(Ανατολική)	B2(Πράσινη)
Mean		41,59	48,76	36,15
Std. Deviation		5,24	14,04	7,38
Minimum		23,56	21,87	19,98
Maximum		51,66	78,97	55,55
Percentiles	25	38,36	38,48	30,60
	50	41,78	44,82	34,92
	75	44,74	53,70	40,58

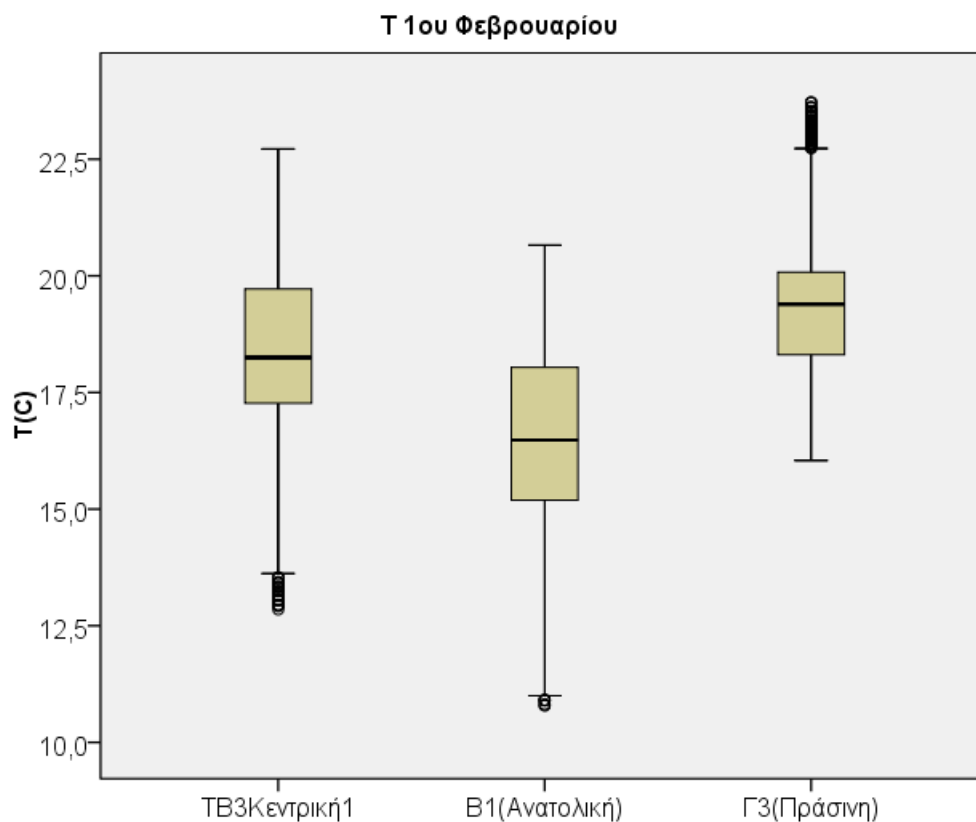
Γ3. Φεβρουάριος 2017

Για τον 1^ο όροφο, η μέση θερμοκρασία είναι υψηλότερη (κατά 3°C), όπως επίσης υψηλότερες μέγιστη κι ελάχιστη θερμοκρασία, ενώ η διακύμανση είναι μικρότερη, στην αίθουσα κάτω από την πράσινη οροφή.

Η σχετική υγρασία είναι μικρότερη στη μέση, μέγιστη, κι ελάχιστη τιμή για την αίθουσα κάτω από την πράσινη ταράτσα, κι η διακύμανση είναι μεγαλύτερη.

Για το ισόγειο βλέπουμε σχετικά με τη θερμοκρασία τα εξής χαρακτηριστικά: υψηλότερη μέση θερμοκρασία, αλλά με μικρότερη διαφορά σε σχέση με τις αίθουσες του 1^{ου} ορόφου ($\Delta T=0,58^{\circ}\text{C}$), υψηλότερη μέγιστη θερμοκρασία, χαμηλότερη ελάχιστη θερμοκρασία και μικρότερη διακύμανση, στην αίθουσα κάτω από την πράσινη ταράτσα.

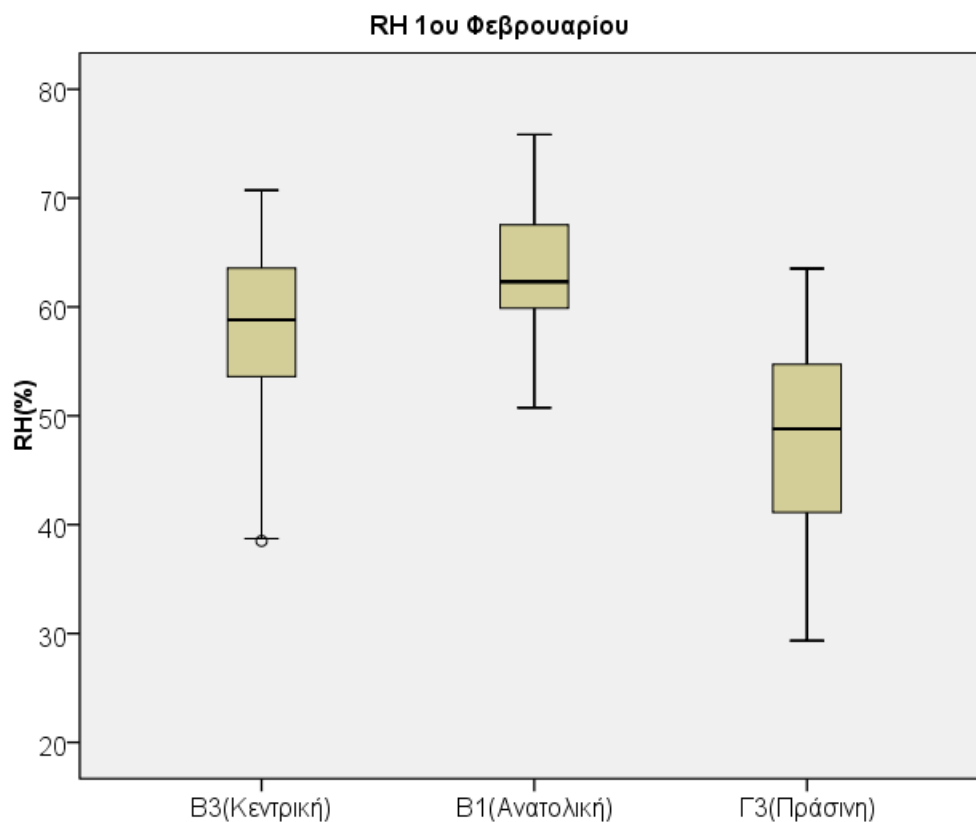
Για τη σχετική υγρασία παρατηρούμε ότι η μέση, μέγιστη κι ελάχιστη τιμή της είναι μικρότερες στην αίθουσα κάτω από την πράσινη ταράτσα, με μεγαλύτερη διακύμανση.



Σχήμα Γ3.1: Επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας Φεβρουαρίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

Πίνακας Γ3.1: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Φεβρουαρίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

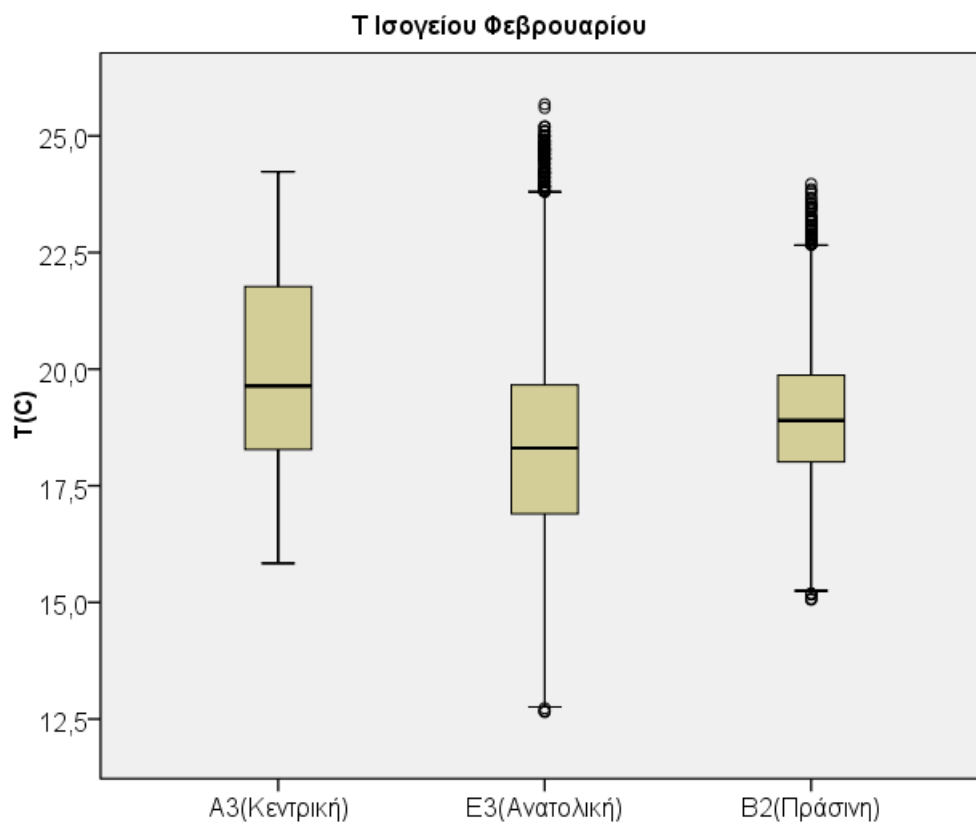
°C		B3(Κεντρική)	B1(Ανατολική)	Γ3(Πράσινη)
Mean		18,33	16,44	19,44
Std. Deviation		1,79	1,90	1,48
Minimum		12,85	10,79	16,04
Maximum		22,72	20,66	23,72
Percentiles	25	17,27	15,19	18,31
	50	18,25	16,48	19,39
	75	19,72	18,04	20,08



Σχήμα Γ3.2: Επίπεδα εσωτερικής σχετικής υγρασίας Φεβρουαρίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

Πίνακας Γ3.2: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας Φεβρουαρίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

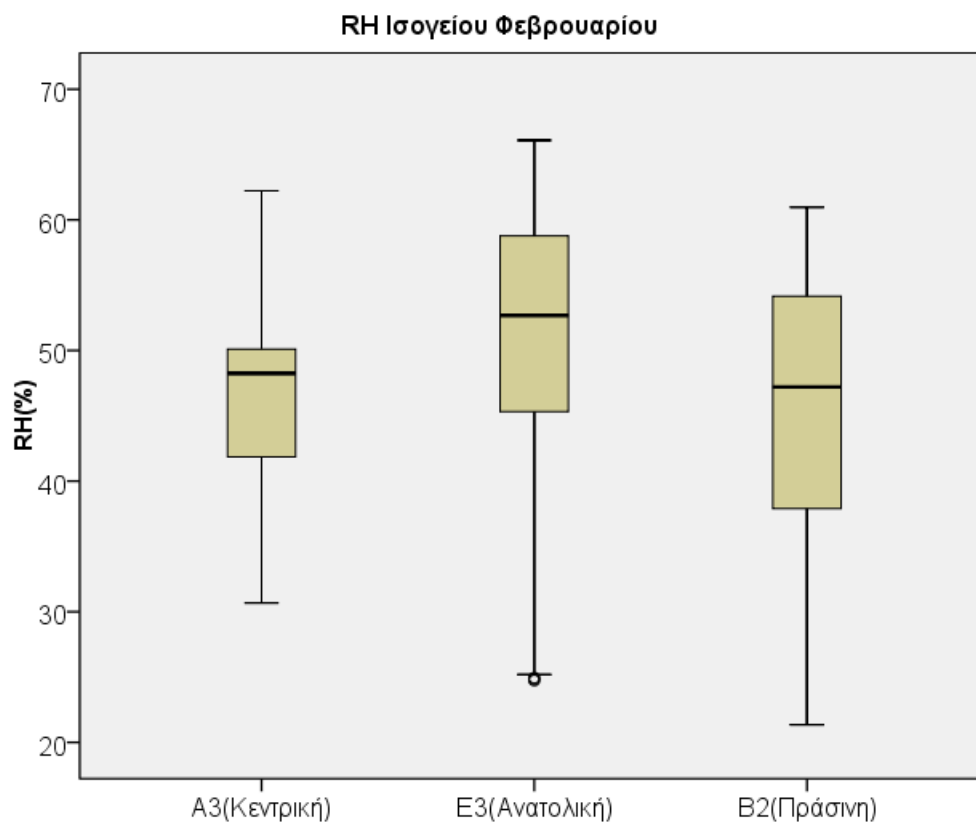
%		B3(Κεντρική)	B1(Ανατολική)	Γ3(Πράσινη)
Mean		58,46	63,07	48,28
Std. Deviation		6,88	5,04	7,38
Minimum		38,50	50,74	29,34
Maximum		70,72	75,84	63,52
Percentiles	25	53,60	59,88	41,12
	50	58,81	62,31	48,81
	75	63,58	67,55	54,72



Σχήμα Γ3.3: Επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας Φεβρουαρίου για τις αίθουσες ισογείου

Πίνακας Γ3.3: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Φεβρουαρίου για τις αίθουσες ισογείου

°C	A3(Κεντρική)	E3(Ανατολική)	B2(Πράσινη)
Mean	19,82	18,50	19,08
Std. Deviation	1,91	2,49	1,63
Minimum	15,84	12,65	15,06
Maximum	24,23	25,68	23,97
Percentiles			
25	18,28	16,90	18,01
50	19,64	18,31	18,90
75	21,77	19,66	19,87



Σχήμα Γ3.4: Επίπεδα εσωτερικής σχετικής υγρασίας Φεβρουαρίου για τις αίθουσες ισογείου

Πίνακας Γ3.4: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας Φεβρουαρίου για τις αίθουσες ισογείου

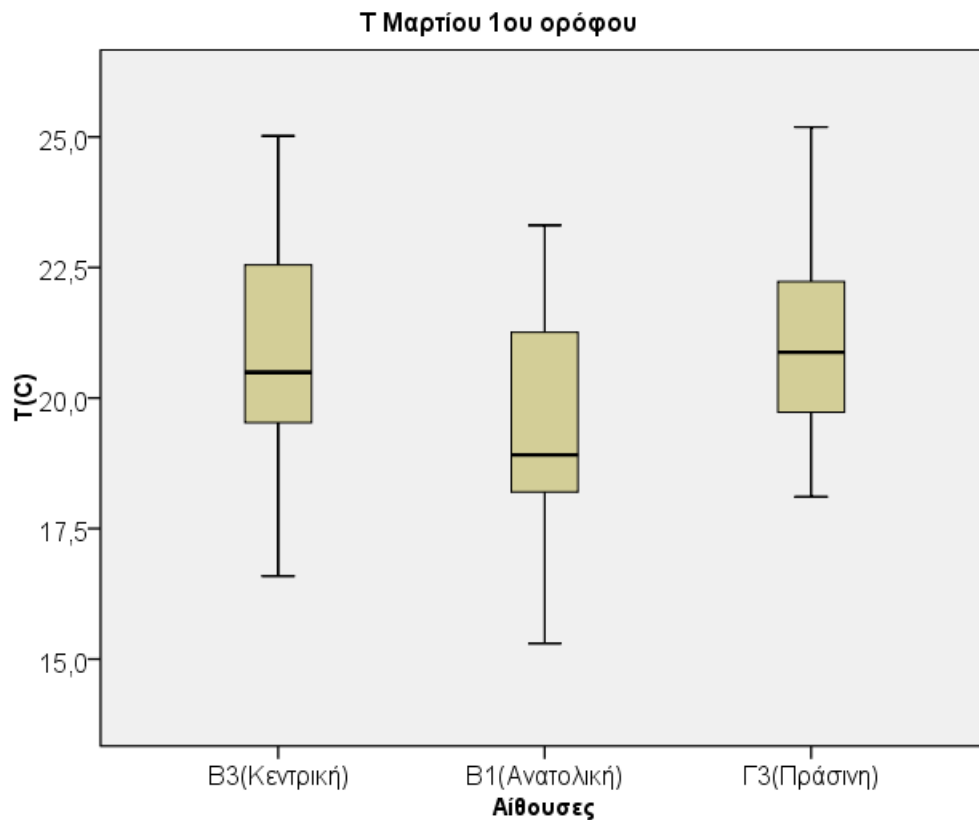
%		A3(Κεντρική)	E3(Ανατολική)	B2(Πράσινη)
Mean		46,27	51,27	45,78
Std. Deviation		5,75	8,75	9,90
Minimum		30,67	24,74	21,35
Maximum		62,23	66,09	60,96
Percentiles	25	41,84	45,30	37,89
	50	48,25	52,68	47,21
	75	50,10	58,78	54,16

Γ4. Μάρτιος 2017

Για τον πρώτο όροφο, βλέπουμε πως ακόμα η αίθουσα κάτω από την πράσινη ταράτσα εμφανίζει υψηλότερη μέση θερμοκρασία (κατά 1,65°C), και υψηλότερες μέγιστη κι ελάχιστη θερμοκρασία, με μικρότερη διακύμανση.

Αντίστοιχα, στην αίθουσα κάτω από την πράσινη ταράτσα βλέπουμε μικρότερη μέση σχετική υγρασία, με μικρότερη διακύμανση, μικρότερη μέγιστη σχετική υγρασία και μεγαλύτερη ελάχιστη.

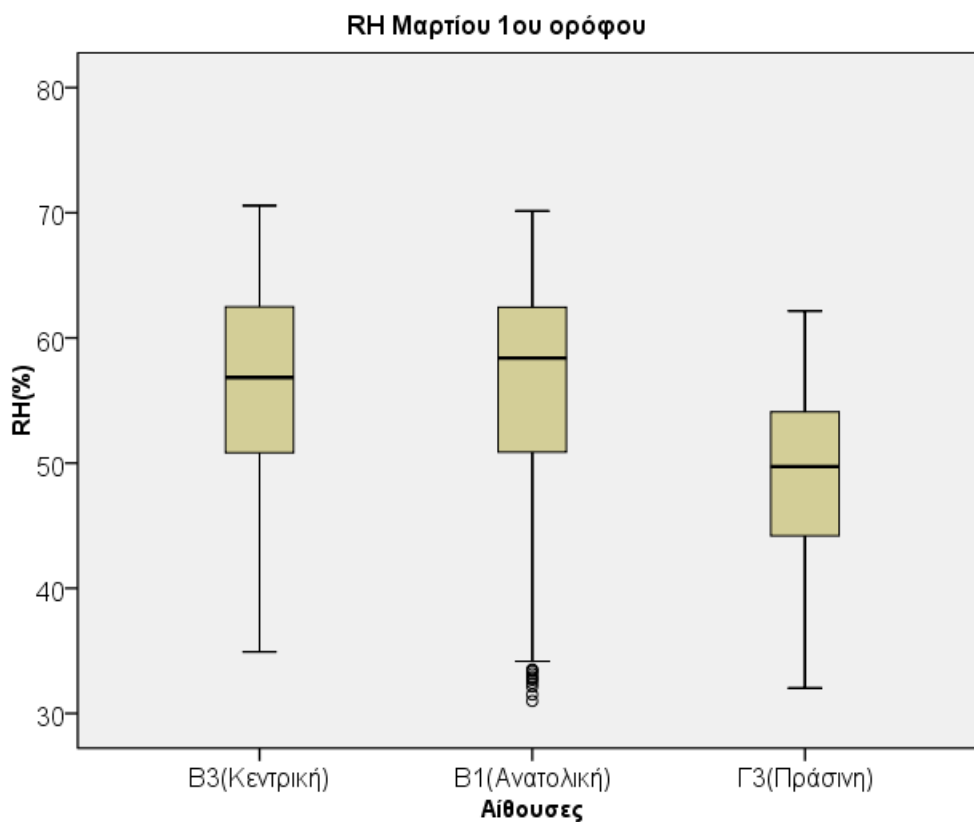
Στις αίθουσες ισογείου οι διαφορές μεταξύ των αιθουσών ως προς τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία είναι σχεδόν.



Σχήμα Γ4.1: Επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας Μαρτίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

Πίνακας Γ4.1: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Μαρτίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

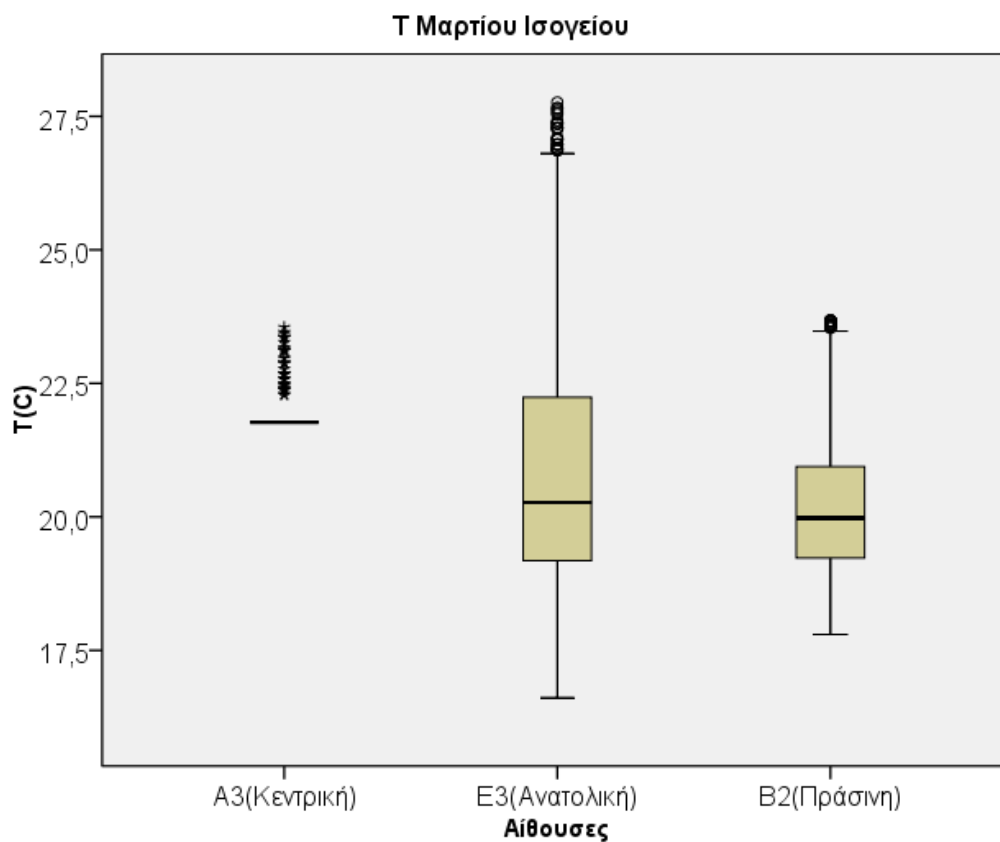
°C		B3(Κεντρική)	B1(Ανατολική)	Γ3(Πράσινη)
Mean		20,86	19,43	21,08
Std. Deviation		1,82	1,84	1,56
Minimum		16,59	15,30	18,11
Maximum		25,02	23,31	25,19
Percentiles	25	19,53	18,20	19,73
	50	20,49	18,91	20,87
	75	22,55	21,26	22,23



Σχήμα Γ4.2: Επίπεδα εσωτερικής σχετικής υγρασίας Μαρτίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

Πίνακας Γ4.2: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας Μαρτίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

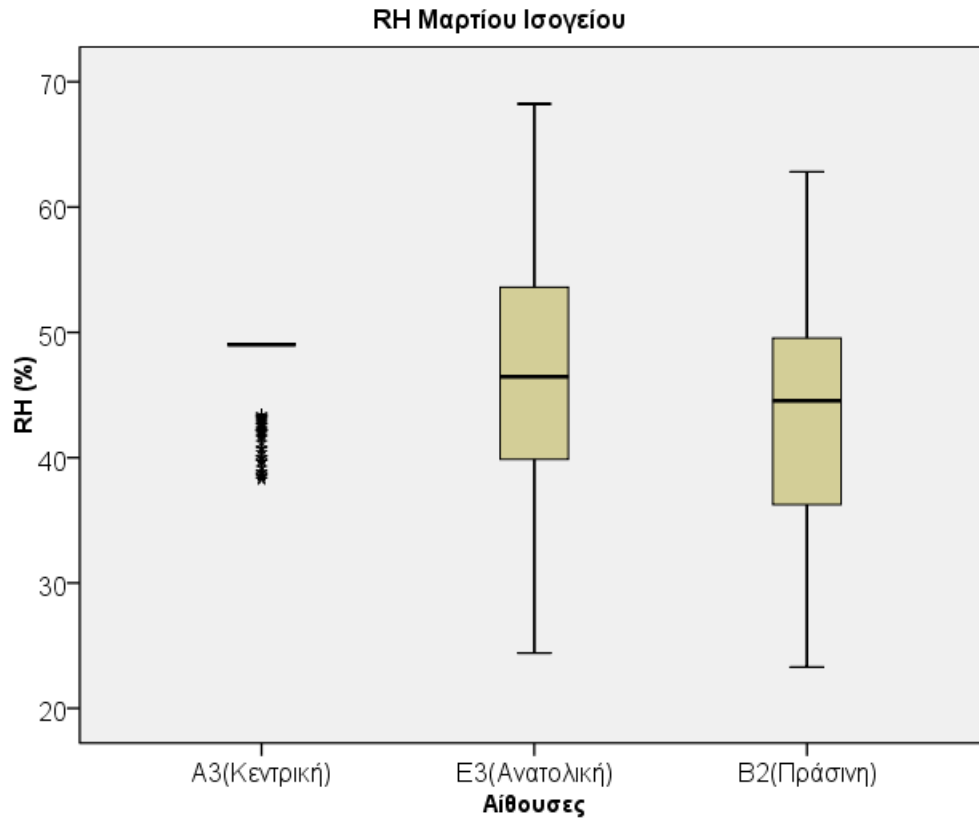
%		Β3(Κεντρική)	Β1(Ανατολική)	Γ3(Πράσινη)
Mean		56,30	56,50	48,84
Std. Deviation		7,59	7,59	6,51
Minimum		34,92	30,99	32,03
Maximum		70,58	70,15	62,15
Percentiles	25	50,82	50,88	44,20
	50	56,84	58,39	49,72
	75	62,48	62,45	54,09



Σχήμα Γ4.3: Επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας Μαρτίου για τις αίθουσες ισογείου

Πίνακας Γ4.3: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Μαρτίου για τις αίθουσες ισογείου

°C		A3(Κεντρική)	E3(Ανατολική)	B2(Πράσινη)
Mean		21,78	20,84	20,19
Std. Deviation		0,13	2,22	1,26
Minimum		21,77	16,61	17,80
Maximum		23,55	27,76	23,67
Percentiles	25	21,77	19,18	19,23
	50	21,77	20,27	19,98
	75	21,77	22,24	20,94



Σχήμα Γ4.4: Επίπεδα εσωτερικής σχετικής υγρασίας Μαρτίου για τις αίθουσες ισογείου

Πίνακας Γ4.4: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας Μαρτίου για τις αίθουσες ισογείου

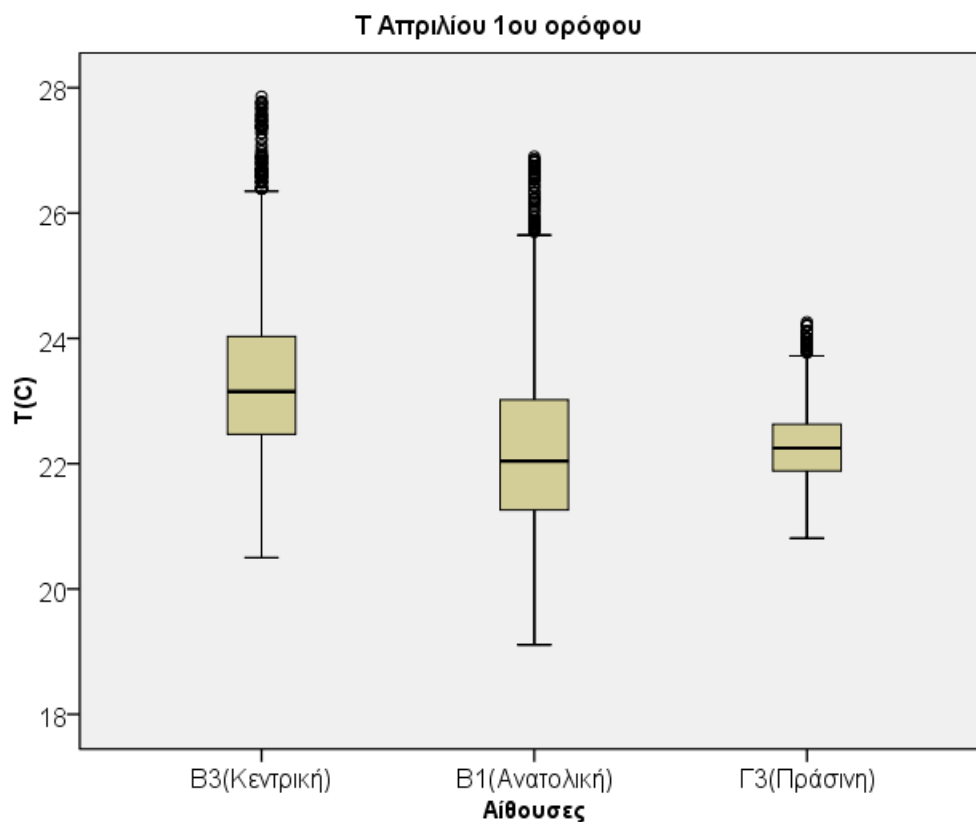
%		A3(Κεντρική)	E3(Ανατολική)	B2(Πράσινη)
Mean		48,90	46,67	43,18
Std. Deviation		0,92	8,82	8,68
Minimum		38,28	24,40	23,29
Maximum		49,01	68,23	62,82
Percentiles	25	49,01	39,87	36,26
	50	49,01	46,46	44,53
	75	49,01	53,61	49,55

Γ5. Απρίλιος 2017

Για τον Απρίλιο, που η εξωτερική θερμοκρασία αρχίζει και αυξάνει, βλέπουμε ότι και στον πρώτο όροφο, η αίθουσα κάτω από την πράσινη οροφή έχει σχεδόν ίση μέση θερμοκρασία με εκείνης κάτω από την ανατολική οροφή. Η αίθουσα Γ3, που βρίσκεται κάτω από την πράσινη ταράτσα, έχει υψηλότερη ελάχιστη τιμή θερμοκρασίας, και χαμηλότερη μέγιστη θερμοκρασία και διακύμανση. Η μέση σχετική υγρασία είναι μικρότερη στην αίθουσα Γ3, όπου επίσης μικρότερη είναι κι η ελάχιστη σχετική υγρασία. Η μέγιστη σχετική υγρασία κι η διακύμανση είναι μεγαλύτερες εκεί.

Στο ισόγειο βλέπουμε ότι η μέση θερμοκρασία στην αίθουσα κάτω από την πράσινη ταράτσα είναι μικρότερη από εκείνη της ανατολικής αίθουσας. Επίσης, μικρότερη είναι η διακύμανση κι η μέγιστη θερμοκρασία, ενώ η ελάχιστη θερμοκρασία είναι σχεδόν ίδια για τις δύο αίθουσες.

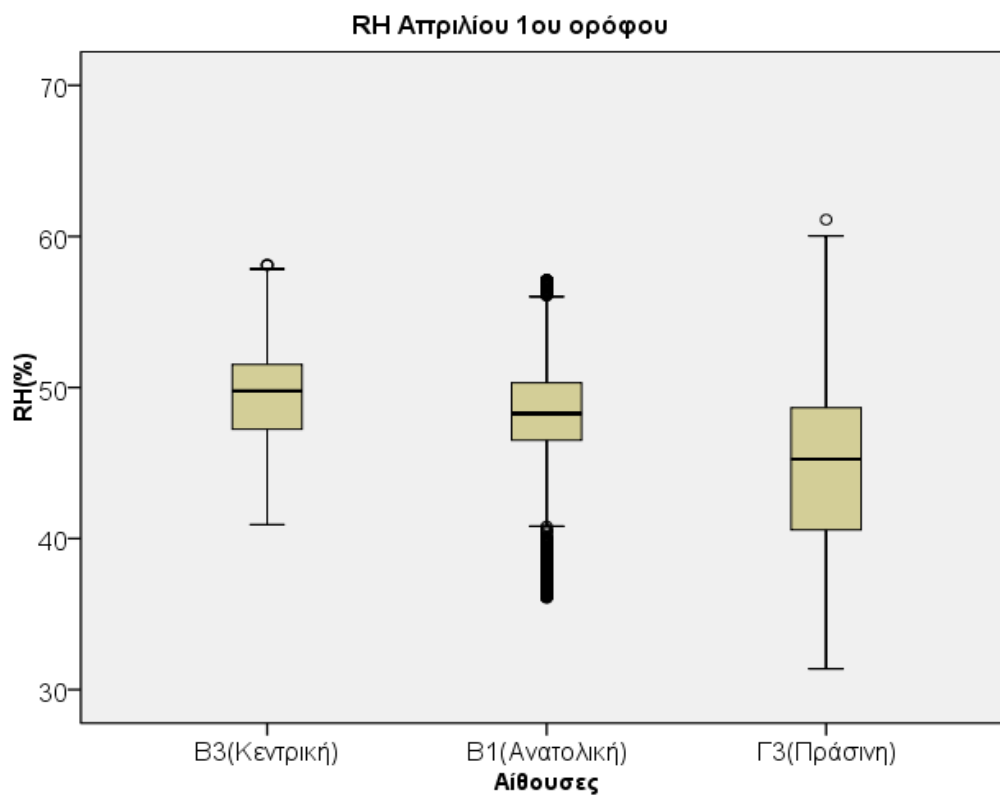
Η μέση σχετική υγρασία κι η ελάχιστη σχετική υγρασία είναι μικρότερες κάτω από την πράσινη ταράτσα, ενώ η μέγιστη σχετική υγρασία κι η διακύμανση είναι μεγαλύτερες στον χώρο αυτό.



Σχήμα Γ5.1: Επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας Απριλίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

Πίνακας Γ5.1: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Απριλίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

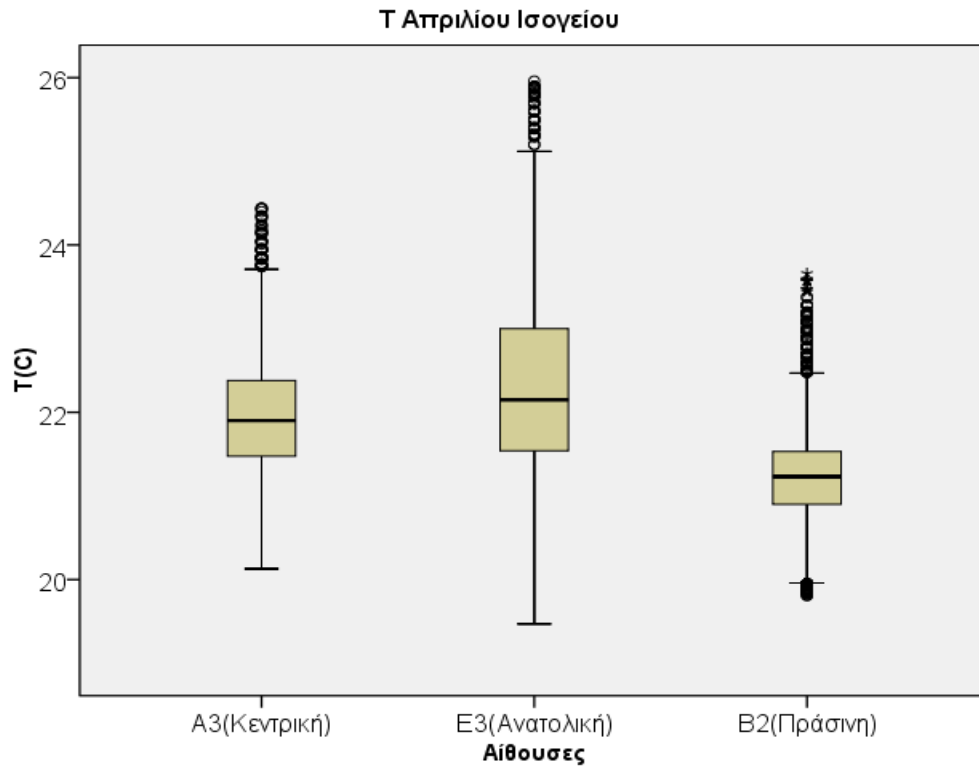
°C		B3(Κεντρική)	B1(Ανατολική)	Γ3(Πράσινη)
Mean		23,33	22,24	22,30
Std. Deviation		1,36	1,52	0,63
Minimum		20,50	19,11	20,81
Maximum		27,86	26,90	24,26
Percentiles	25	22,47	21,26	21,88
	50	23,15	22,04	22,25
	75	24,03	23,02	22,63



Σχήμα Γ5.2: Επίπεδα εσωτερικής σχετικής υγρασίας Απριλίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

Πίνακας Γ5.2: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας Απριλίου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

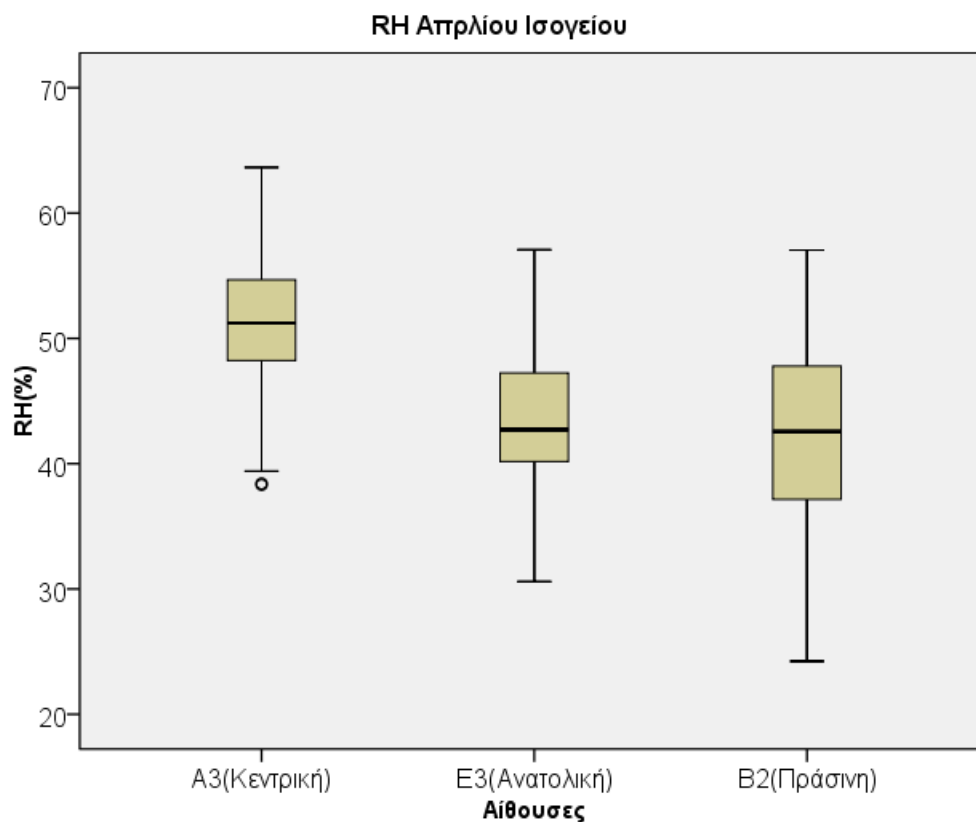
%		B3(Κεντρική)	B1(Ανατολική)	Γ3(Πράσινη)
Mean		49,55	48,15	44,97
Std. Deviation		3,12	4,11	5,54
Minimum		40,92	36,08	31,38
Maximum		58,13	57,11	61,11
Percentiles	25	47,23	46,51	40,58
	50	49,77	48,28	45,26
	75	51,52	50,32	48,66



Σχήμα Γ5.3: Επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας Απριλίου για τις αίθουσες ισογείου

Πίνακας Γ5.3: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Απριλίου για τις αίθουσες ισογείου

°C		A3(Κεντρική)	E3(Ανατολική)	B2(Πράσινη)
Mean		21,96	22,28	21,26
Std. Deviation		0,76	1,21	0,67
Minimum		20,13	19,47	19,81
Maximum		24,44	25,96	23,66
Percentiles	25	21,47	21,54	20,90
	50	21,90	22,15	21,23
	75	22,38	23,00	21,53



Σχήμα Γ5.4: Επίπεδα εσωτερικής σχετικής υγρασίας Απριλίου για τις αίθουσες ισογείου

Πίνακας Γ5.4: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας Απριλίου για τις αίθουσες ισογείου

%		B3(Κεντρική)	B1(Ανατολική)	Γ3(Πράσινη)
Mean		49,55	48,15	45,00
Std. Deviation		3,12	4,11	5,54
Minimum		40,92	36,08	31,38
Maximum		58,13	57,11	61,11
Percentiles	25	47,23	46,51	40,58
	50	49,77	48,28	45,26
	75	51,52	50,32	48,66

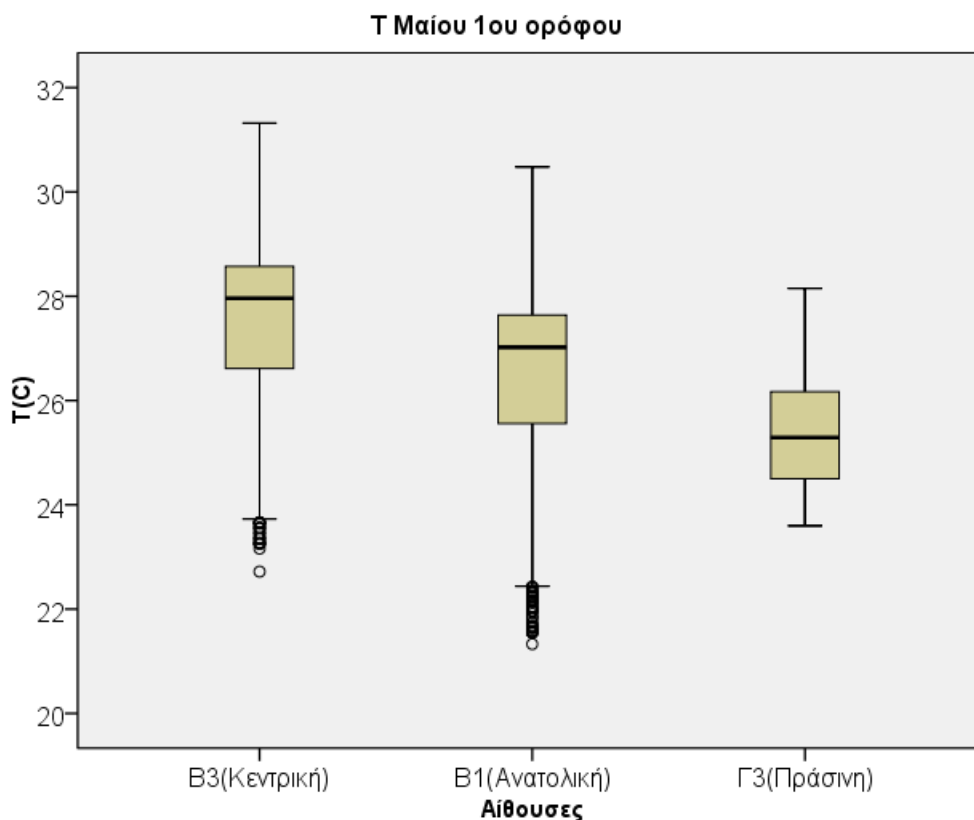
Γ6. Μάιος 2017

Στον 1^ο όροφο, βλέπουμε την αίθουσα Γ3 κάτω από την πράσινη οροφή να έχει μικρότερη μέση τιμή θερμοκρασίας από την αίθουσα Β1 κάτω από την ανατολική συμβατική τσιμέντου (κατά 1,20°C), και μικρότερη μέγιστη τιμή θερμοκρασίας, ενώ έχει μεγαλύτερη ελάχιστη τιμή και μικρότερη διακύμανση.

Στη Γ3, η μέση σχετική υγρασία είναι μεγαλύτερη, το ίδιο και η μέγιστη τιμή της. Η ελάχιστη τιμή κι η διακύμανση είναι μικρότερες.

Στο ισόγειο, η ανατολική αίθουσα (Ε3) έχει μεγαλύτερη μέση, μέγιστη κι ελάχιστη τιμή θερμοκρασίας, καθώς και διακύμανση θερμοκρασίας.

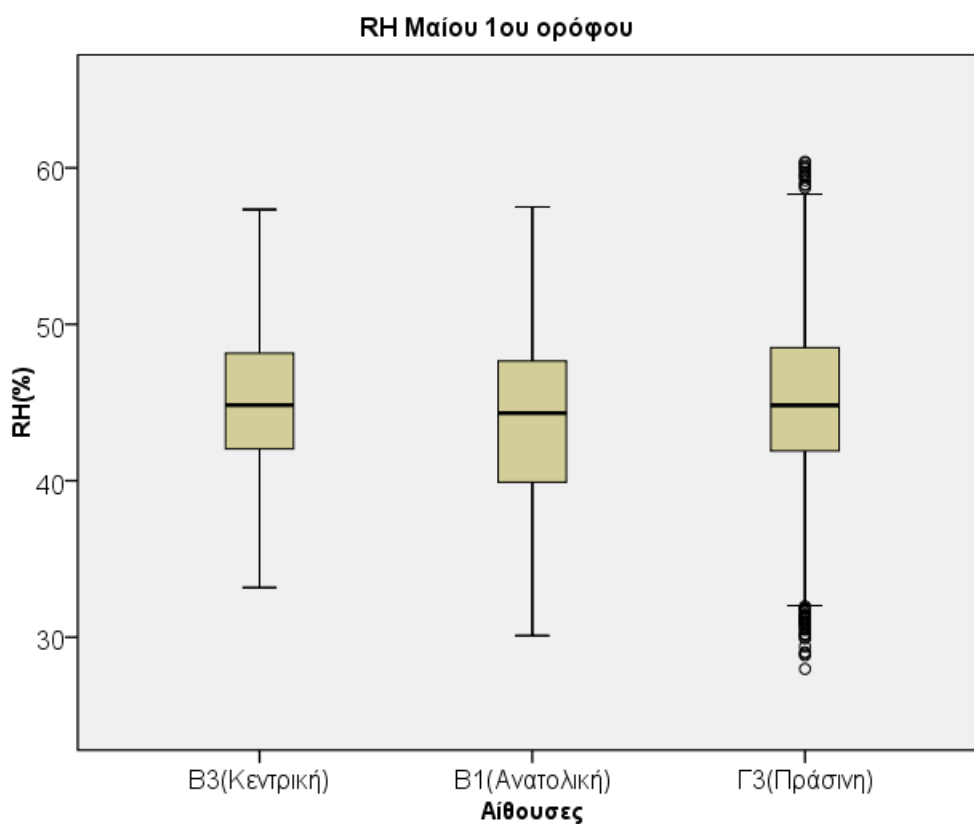
Αντίθετα, η μέση κι η μέγιστη σχετική υγρασία, όπως κι η διακύμανση είναι μεγαλύτερες στην αίθουσα κάτω από την πράσινη ταράτσα (Β2). Η ελάχιστη σχετική υγρασία βρέθηκε μικρότερη εκεί.



Σχήμα Γ6.1: Επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας Μαΐου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

Πίνακας Γ6.1: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Μαΐου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

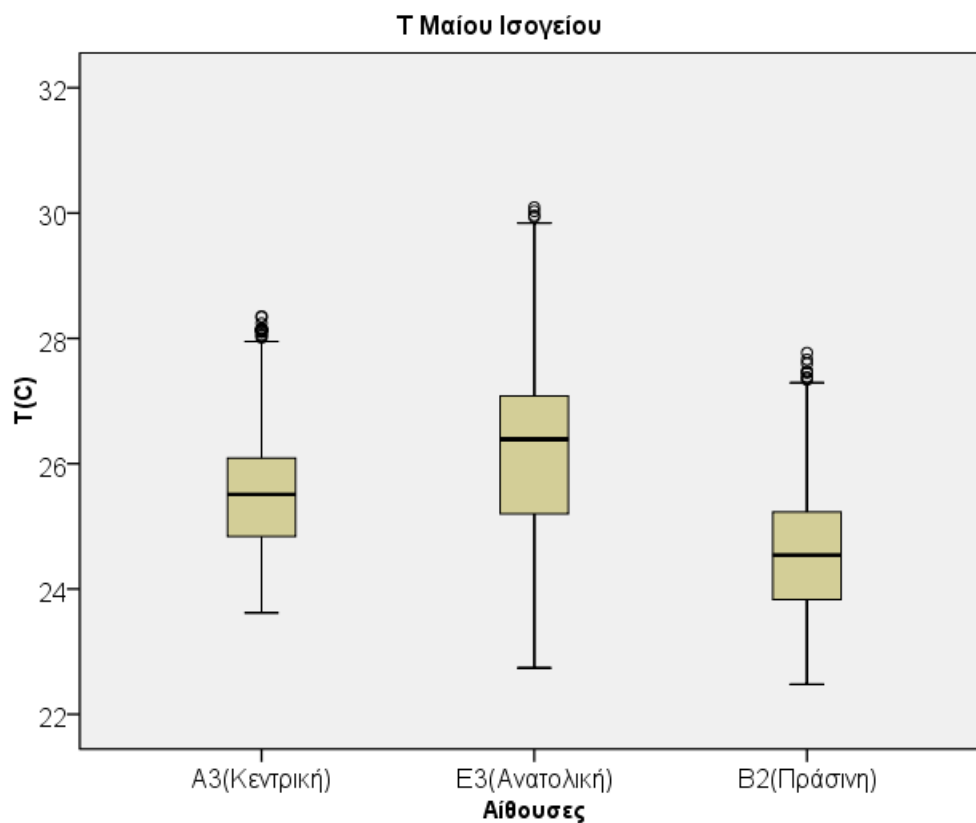
°C		B3(Κεντρική)	B1(Ανατολική)	Γ3(Πράσινη)
Mean		27,55	26,58	25,37
Std. Deviation		1,56	1,68	0,97
Minimum		22,72	21,33	23,60
Maximum		31,32	30,48	28,15
Percentiles	25	26,61	25,56	24,50
	50	27,96	27,02	25,29
	75	28,57	27,64	26,17



Σχήμα Γ6.2: Επίπεδα εσωτερικής σχετικής υγρασίας Μαΐου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

Πίνακας Γ6.2: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας Μαΐου για τις αίθουσες 1^{ου} ορόφου

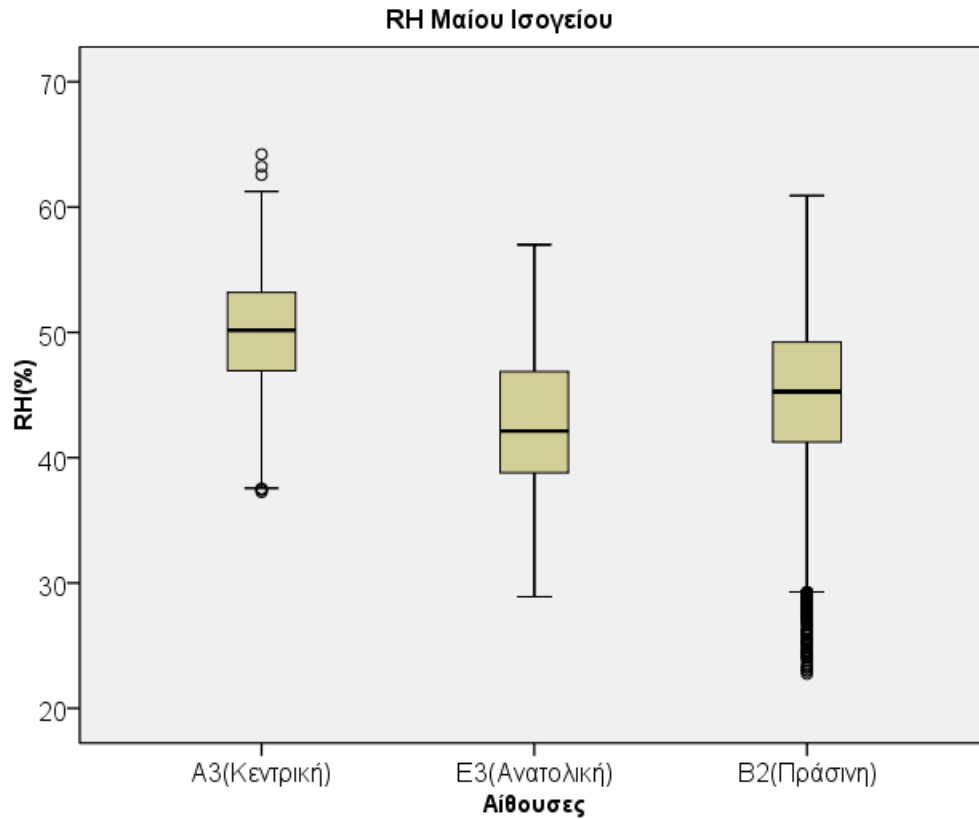
%		B3(Κεντρική)	B1(Ανατολική)	Γ3(Πράσινη)
Mean		44,86	43,58	44,87
Std. Deviation		4,64	5,32	5,10
Minimum		33,17	30,10	27,97
Maximum		57,33	57,50	60,38
Percentiles	25	42,03	39,91	41,91
	50	44,83	44,32	44,82
	75	48,16	47,65	48,50



Σχήμα Γ6.3: Επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας Μαΐου για τις αίθουσες ισογείου

Πίνακας Γ6.3: Στατιστικά στοιχεία θερμοκρασίας Μαΐου για τις αίθουσες ισογείου

°C		A3(Κεντρική)	E3(Ανατολική)	B2(Πράσινη)
Mean		25,51	26,21	24,54
Std. Deviation		0,86	1,29	0,92
Minimum		23,62	22,74	22,48
Maximum		28,35	30,09	27,77
Percentiles	25	24,84	25,20	23,83
	50	25,51	26,39	24,54
	75	26,09	27,08	25,23



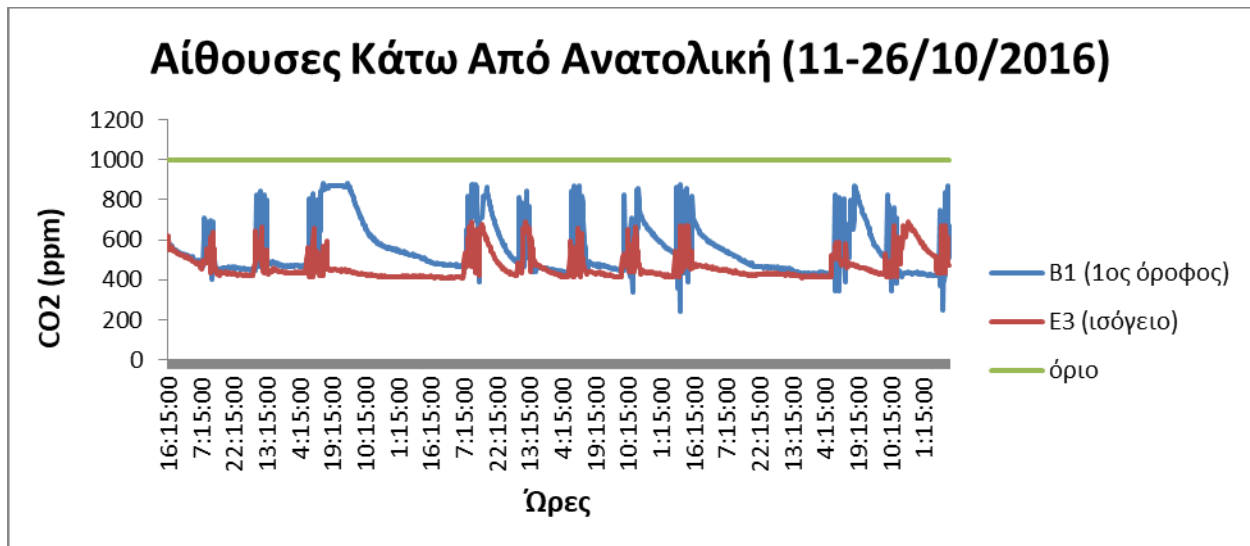
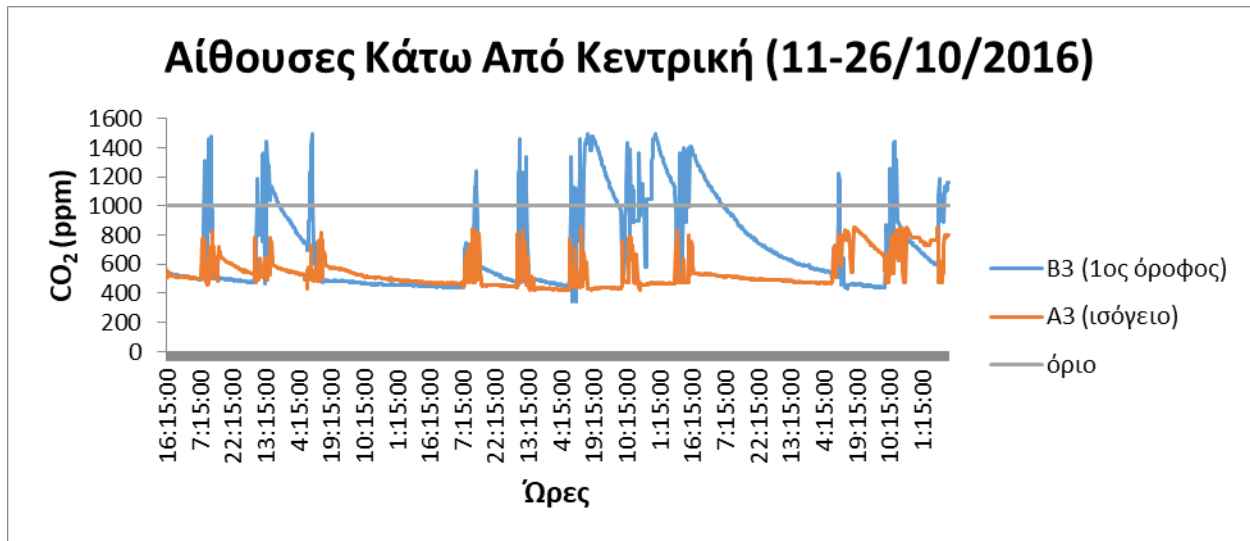
Σχήμα Γ6.4: Επίπεδα εσωτερικής σχετικής υγρασίας Μαΐου για τις αίθουσες ισογείου

Πίνακας Γ6.4: Στατιστικά στοιχεία σχετικής υγρασίας Μαΐου για τις αίθουσες ισογείου

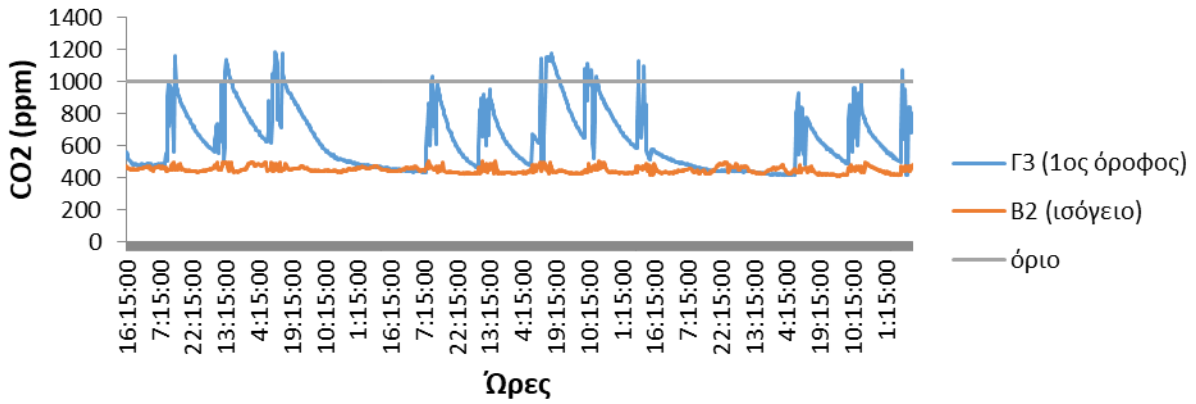
%		A3(Κεντρική)	E3(Ανατολική)	B2(Πράσινη)
Mean		49,93	42,46	44,34
Std. Deviation		4,50	5,20	6,96
Minimum		37,26	28,90	22,75
Maximum		64,21	56,99	60,91
Percentiles	25	46,93	38,80	41,25
	50	50,16	42,12	45,28
	75	53,19	46,88	49,23

Παράρτημα Δ: Αποτελέσματα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂)

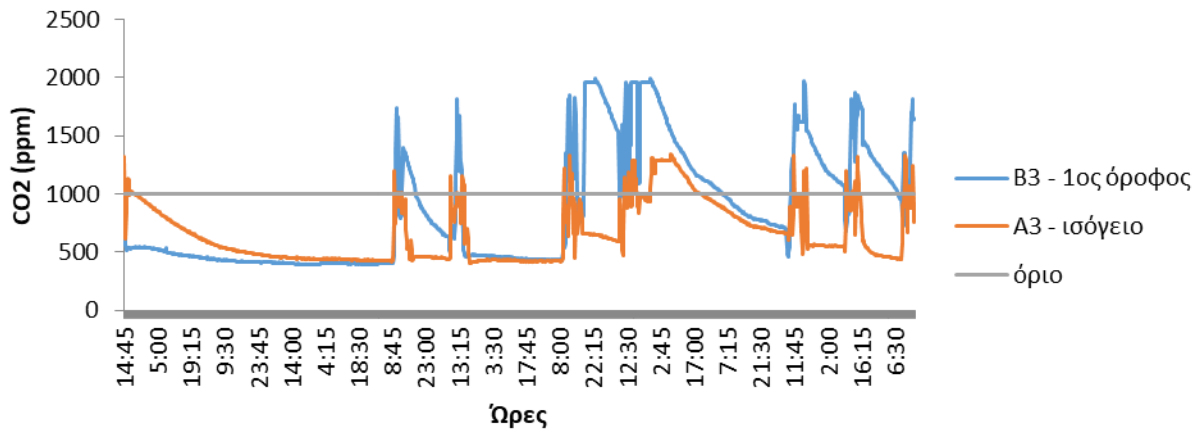
1) Συνολικά



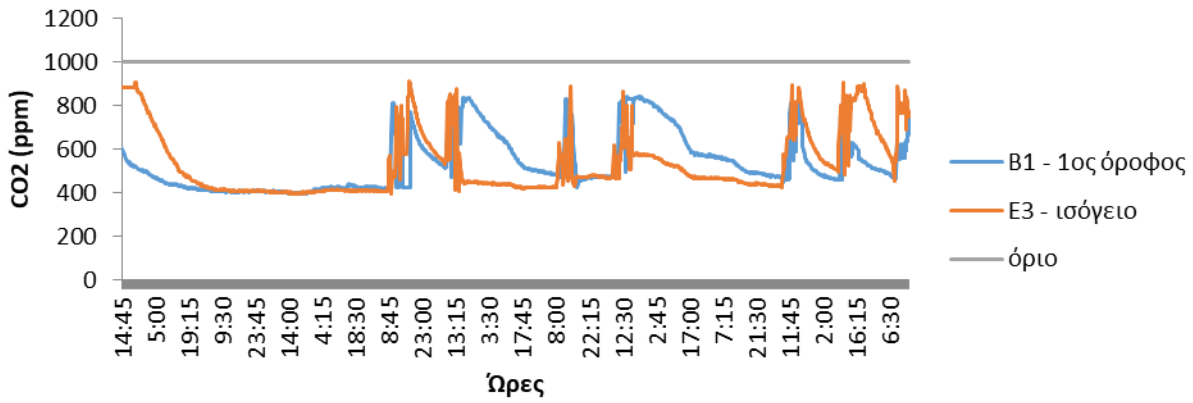
Αίθουσες Κάτω Από Πράσινη (11-26/10/2016)



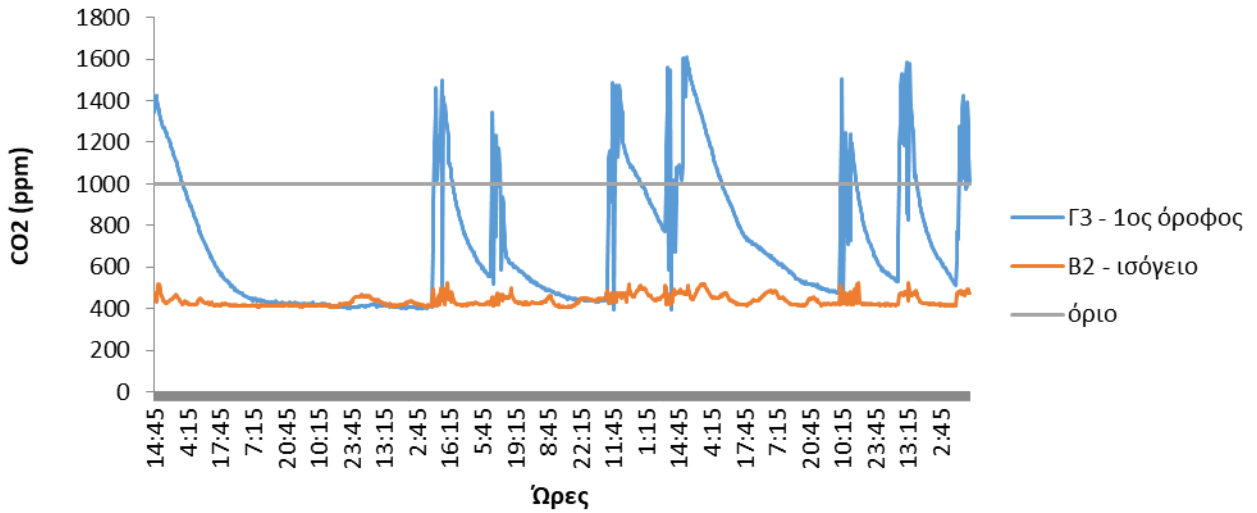
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική 26/10 - 9/11/2016



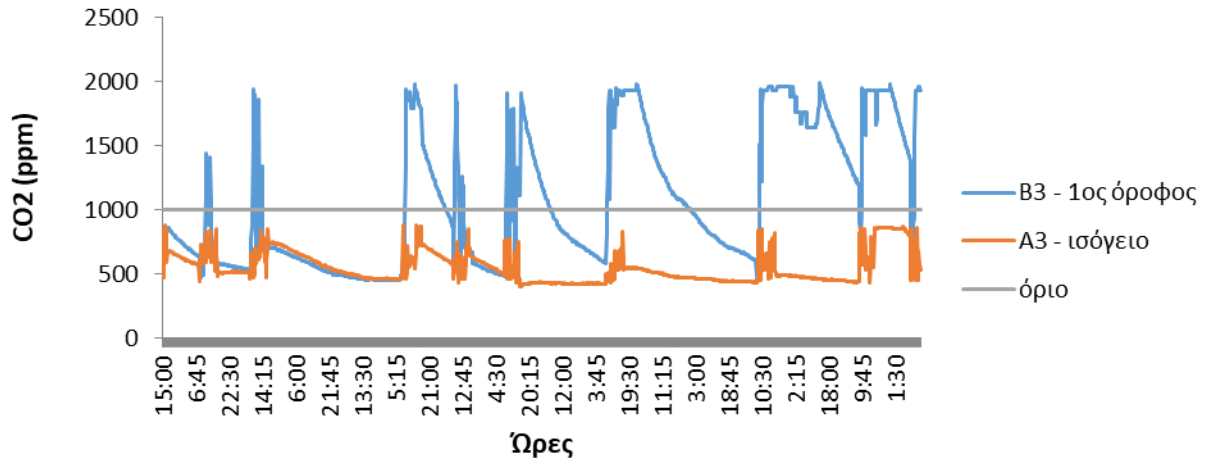
Αίθουσες Κάτω από Ανατολική 26/10 - 9/11/2016



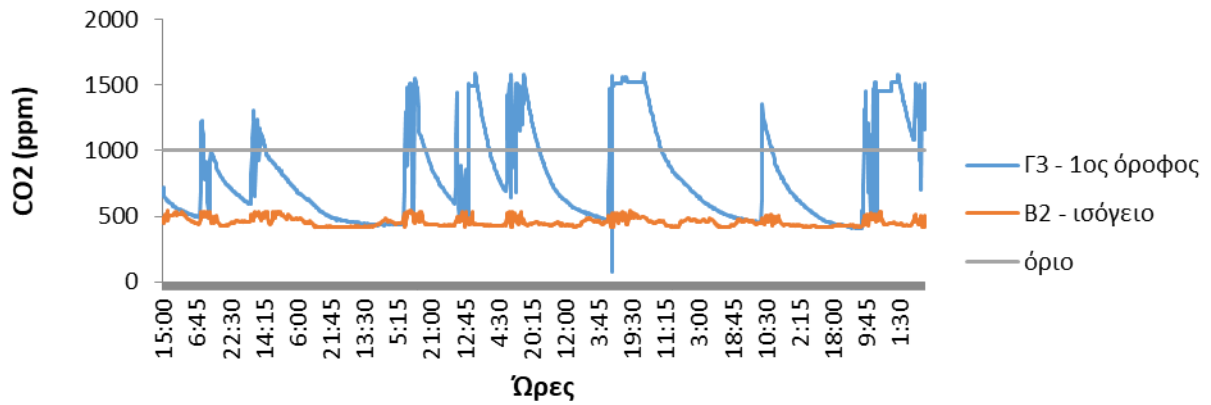
Αίθουσες Κάτω από Πράσινη 26/10 - 9/11/2016



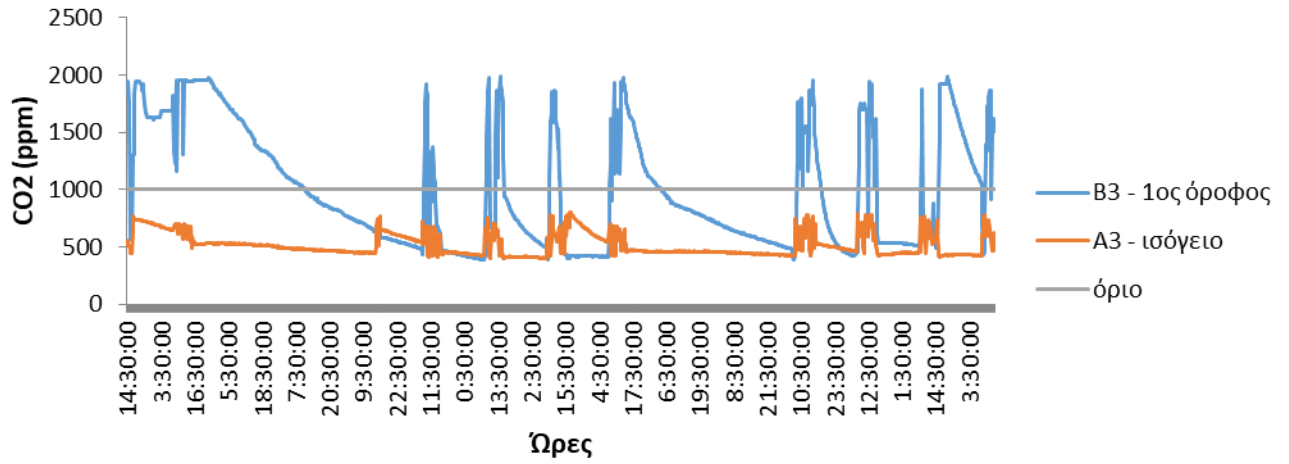
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική 9-24/11/2016



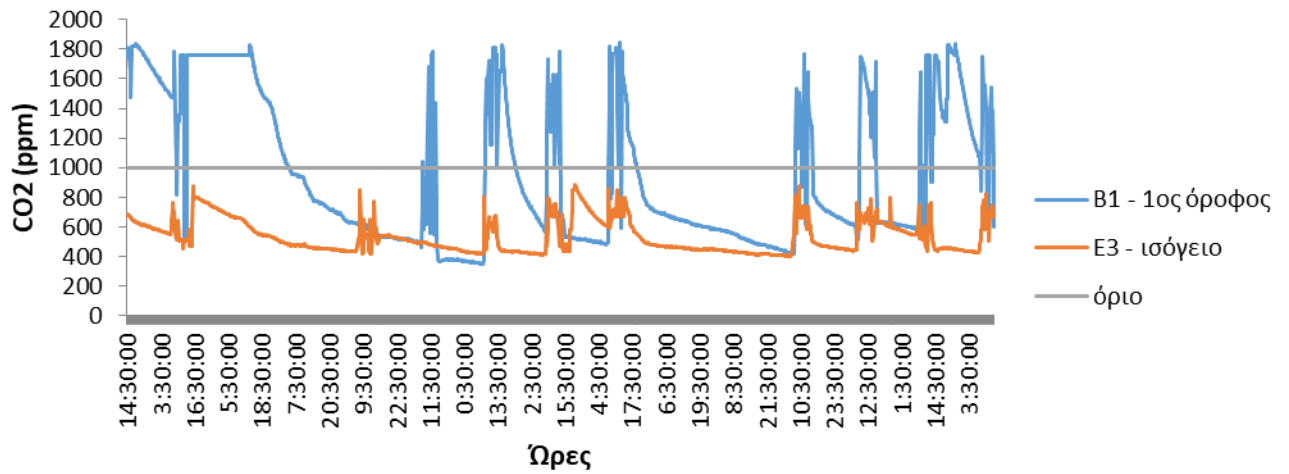
Αίθουσες Κάτω από Πράσινη 9-24/11/2016



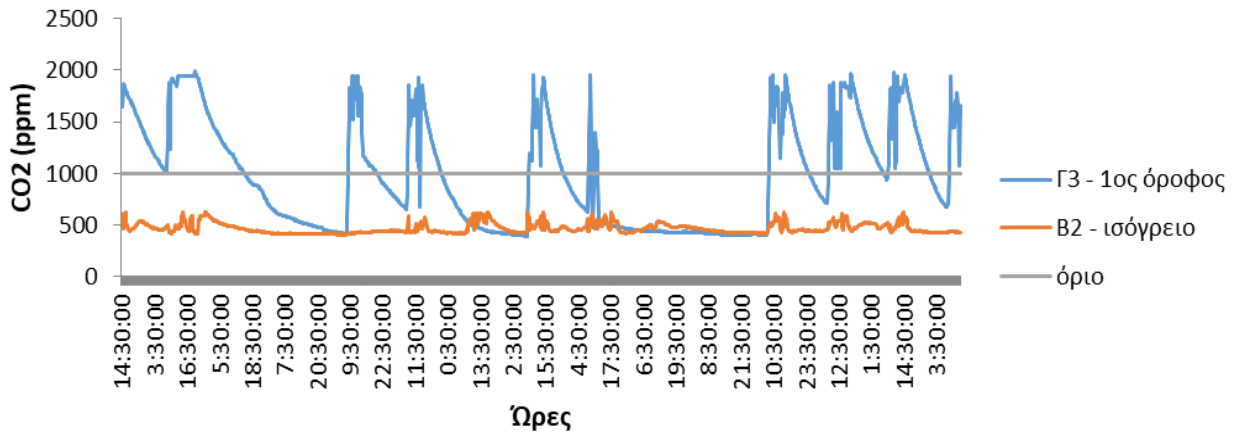
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (24/11 - 8/12/2016)



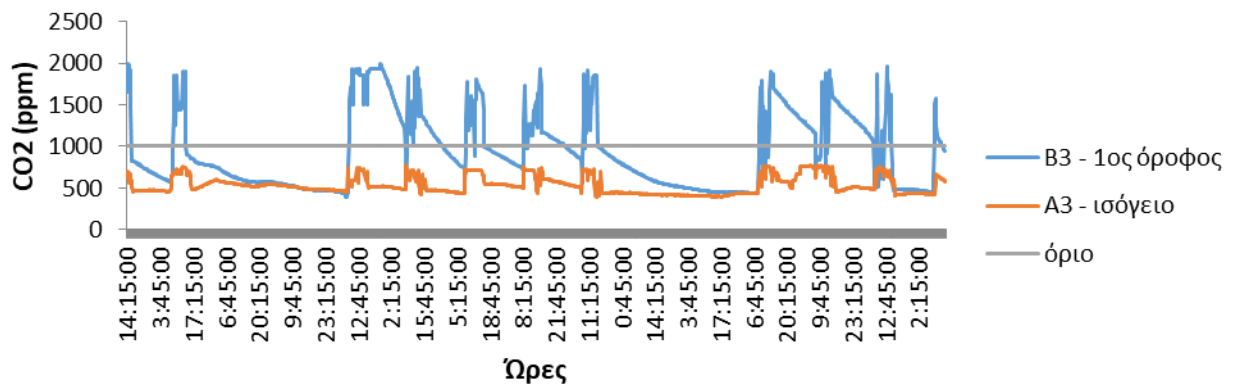
Αίθουσες Κάτω από Ανατολική (24/11 - 8/12/2016)



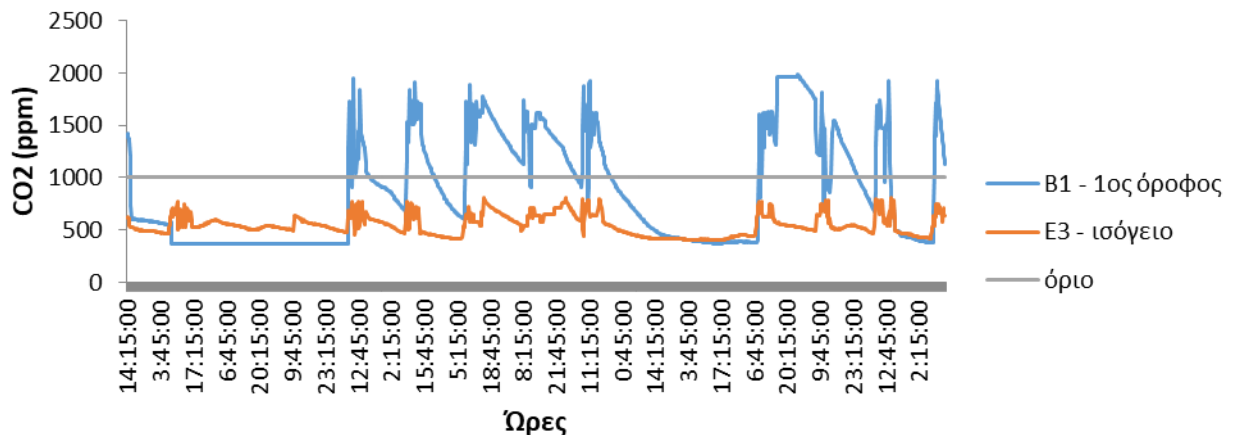
Αίθουσες Κάτω από Πράσινη (24/11 - 8/12/2016)

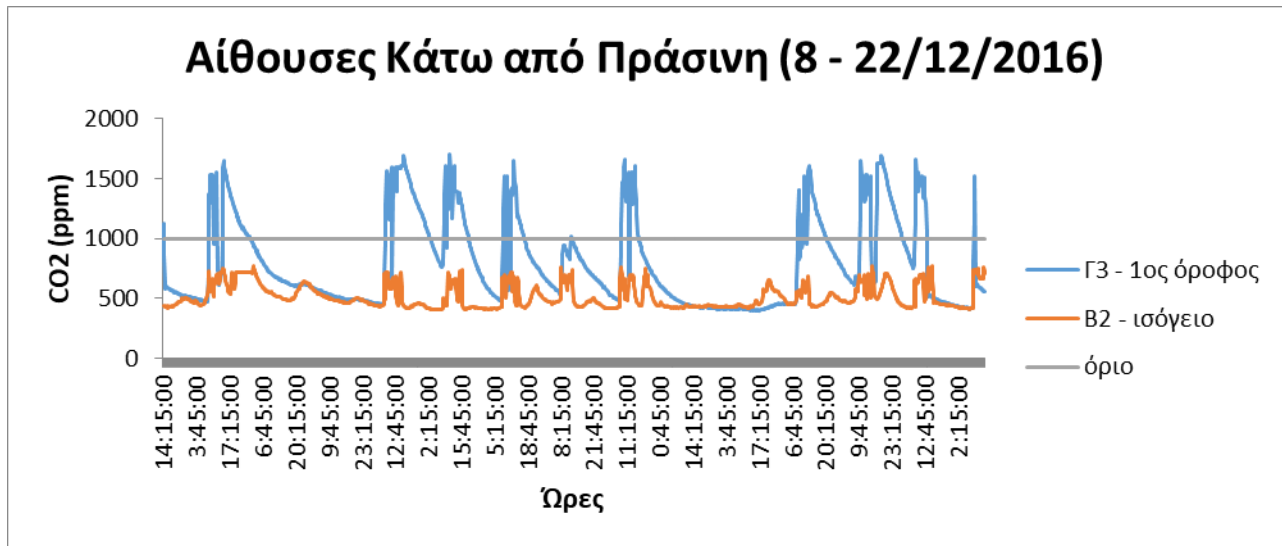


Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (8 - 22/12/2016)

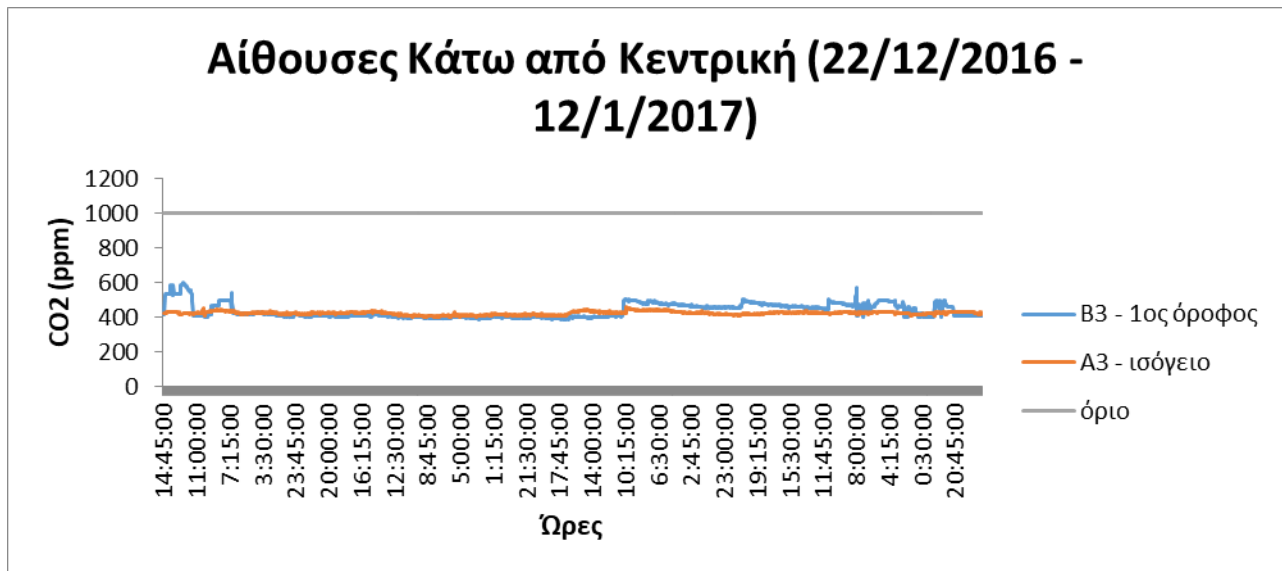


Αίθουσες Κάτω από Ανατολική (8 - 22/12/2016)

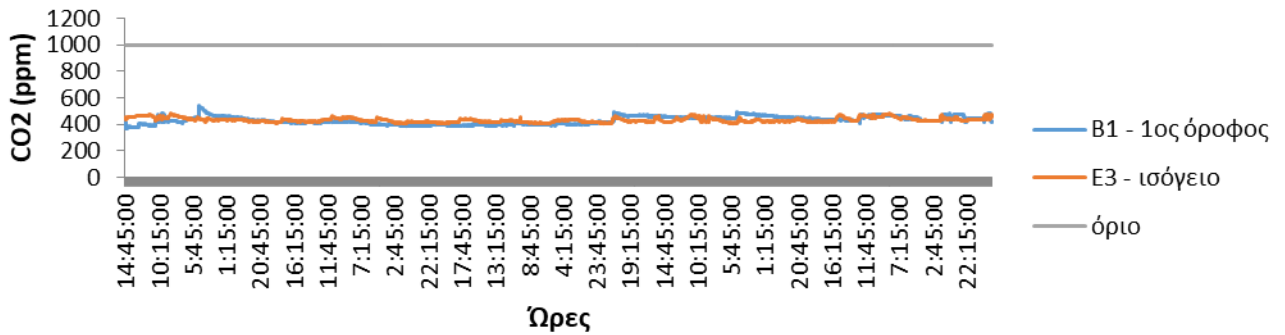




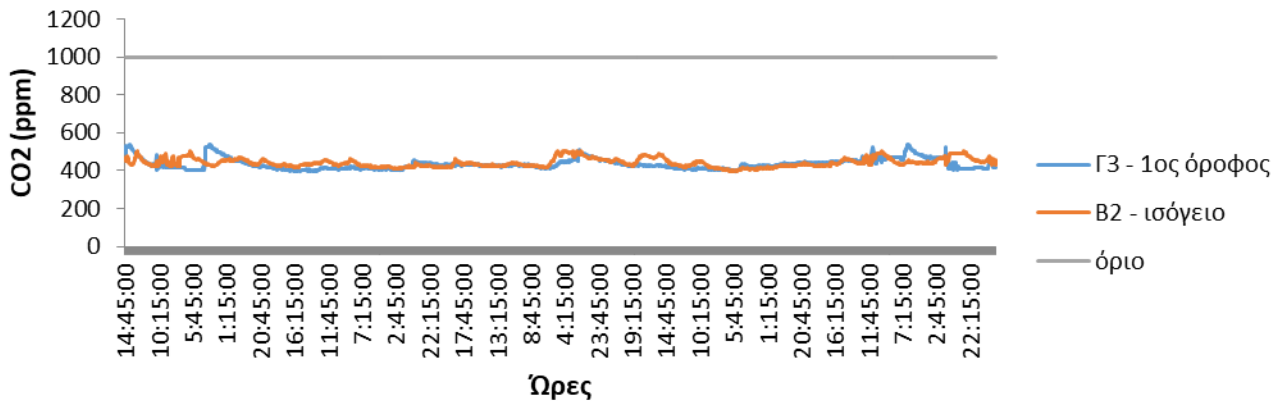
Χριστούγεννα: 23/12/2016-8/1/2017 (χωρίς άτομα φυσιολογικά δεν παρατηρούνται υψηλές τιμές)



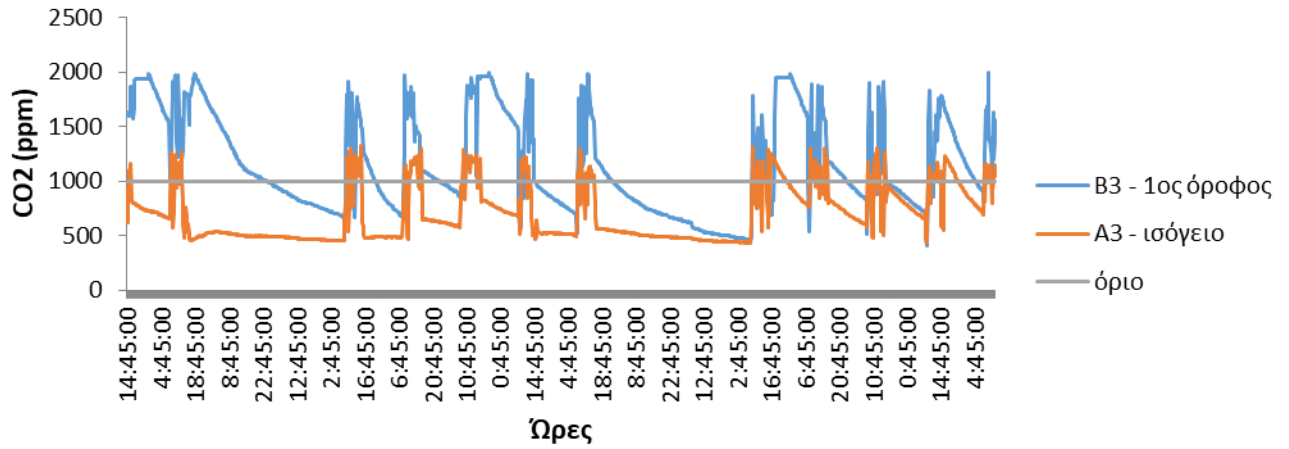
Αίθουσες Κάτω από Ανατολική (22/12/2016 - 12/1/2017)



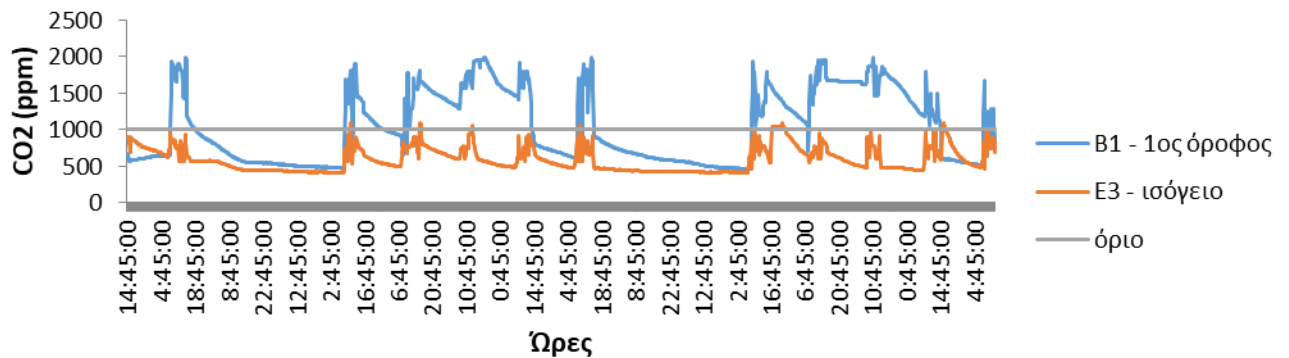
Αίθουσες Κάτω από Πράσινη (22/12/2016 - 12/1/2017)



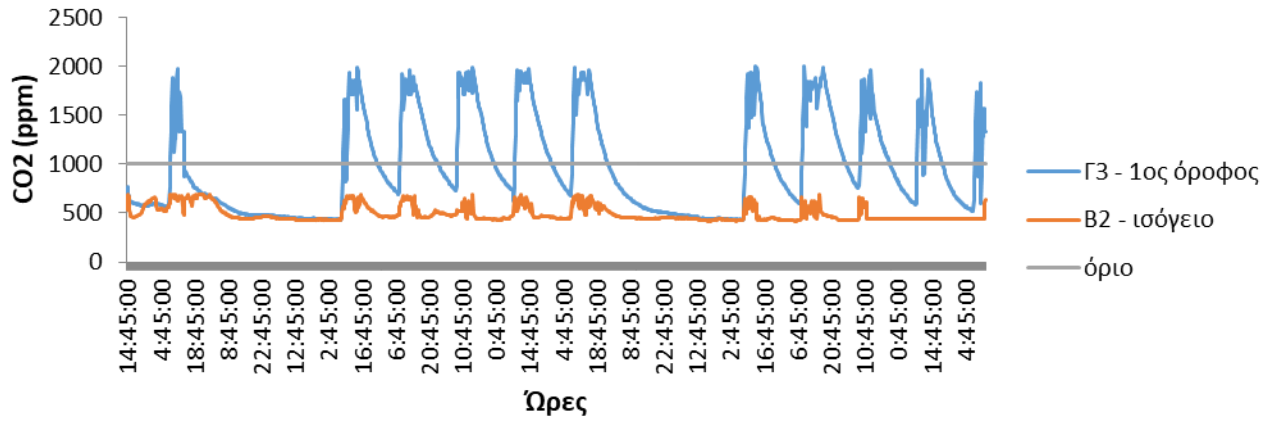
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (12/1/2017 - 27/1/2017)



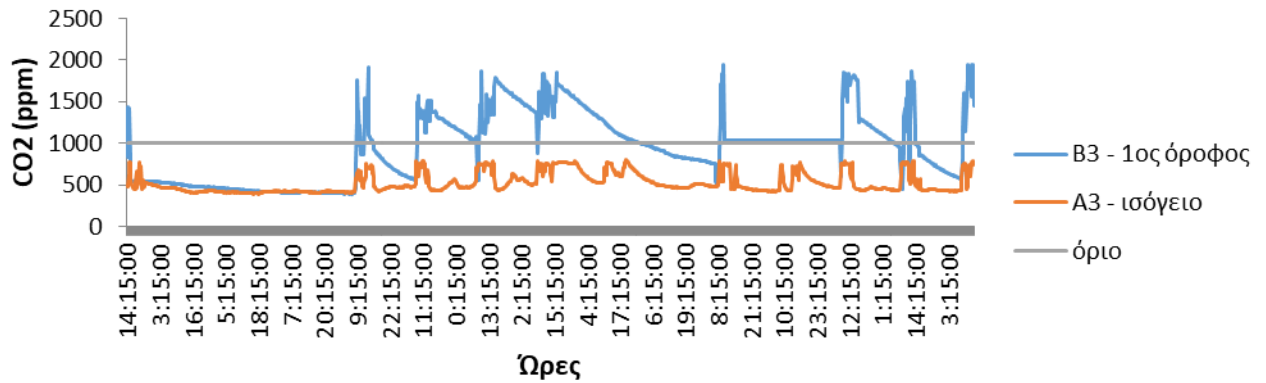
Αίθουσες Κάτω από Ανατολική (12/1/2017 - 27/1/2017)



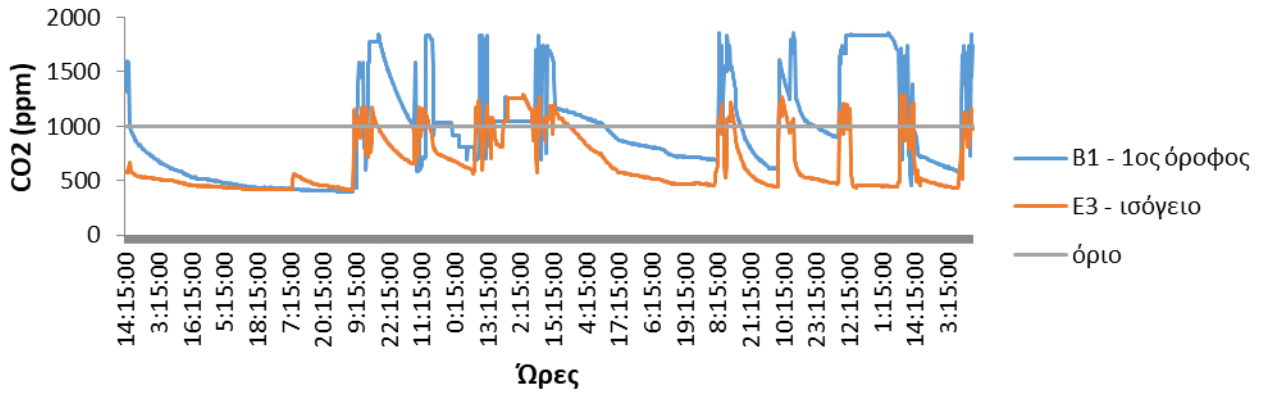
Αίθουσες Κάτω από Πράσινη (12/1/2017 - 27/1/2017)



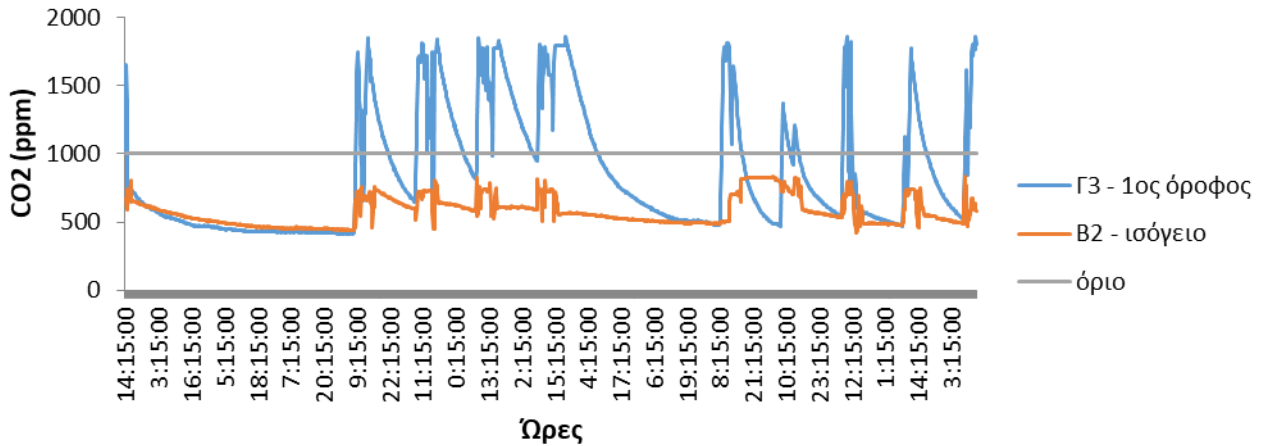
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (27/1/2017 - 10/2/2017)



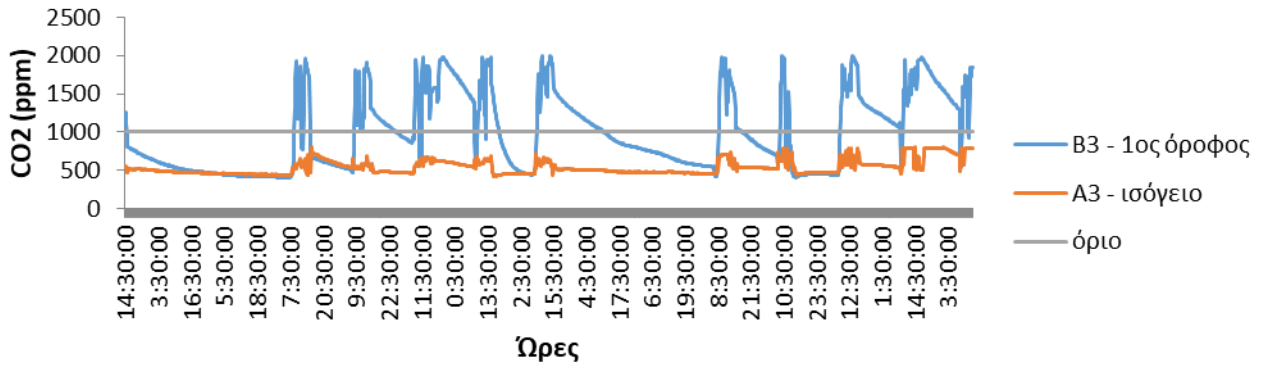
Αίθουσες Κάτω από Ανατολική (27/1/2017 - 10/2/2017)



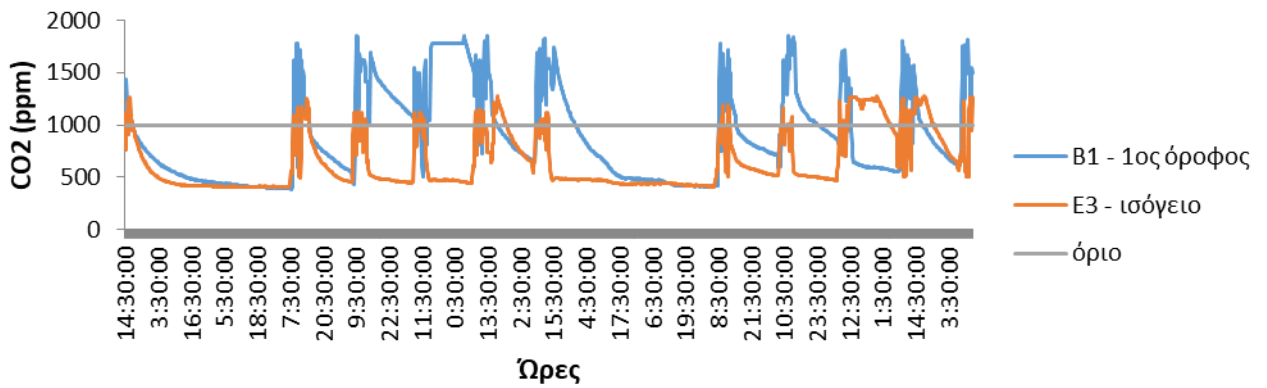
Αίθουσες Κάτω από Πράσινη (27/1/2017 - 10/2/2017)



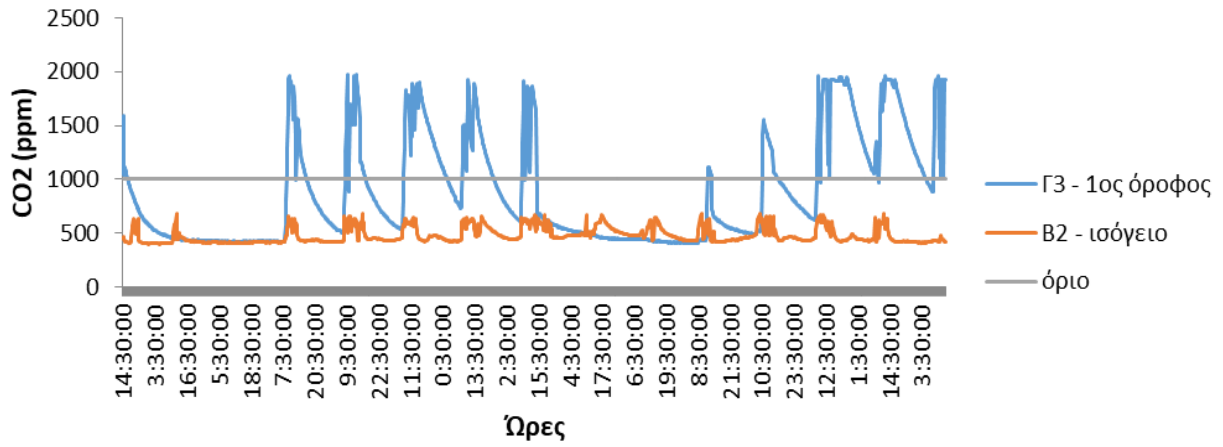
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (10/2/2017 - 24/2/2017)



Αίθουσες Κάτω από Ανατολική (10/2/2017 - 24/2/2017)

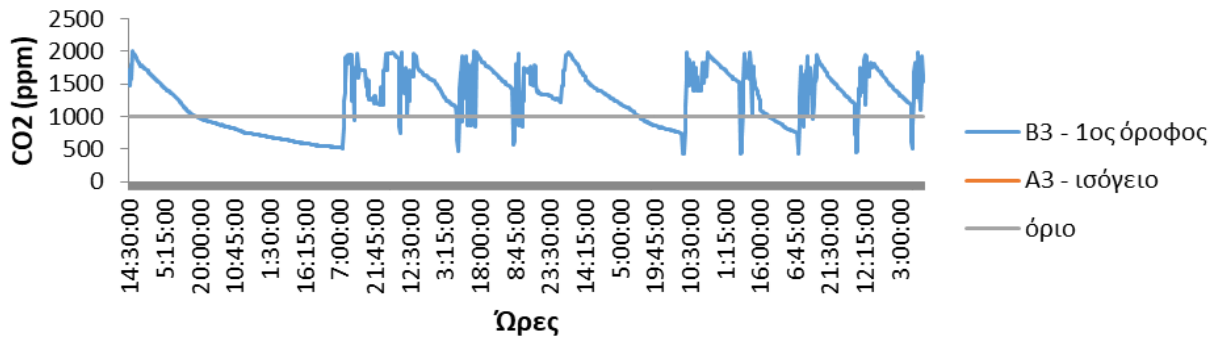


Αίθουσες Κάτω από Πράσινη (10/2/2017 - 24/2/2017)

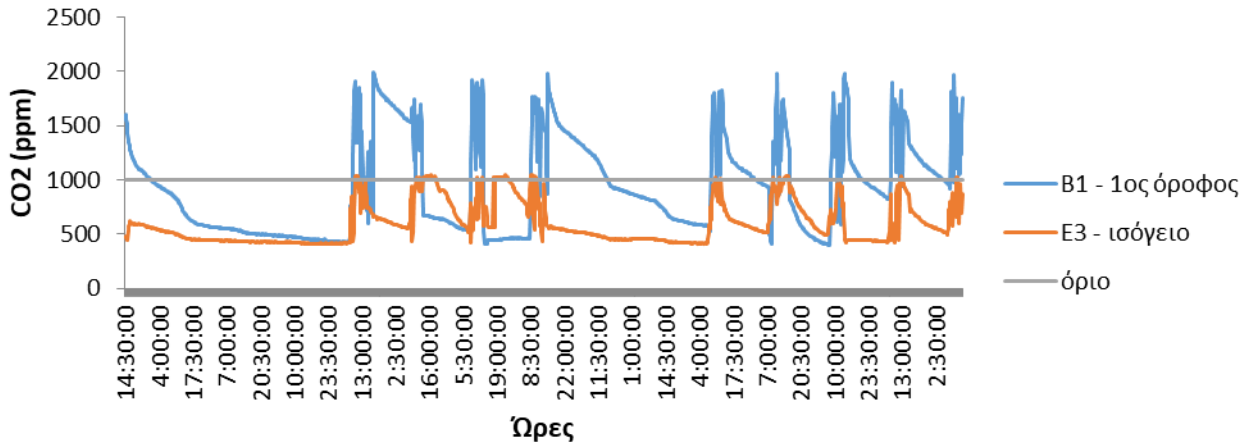


Για την Α3 δεν υπήρχαν δεδομένα.

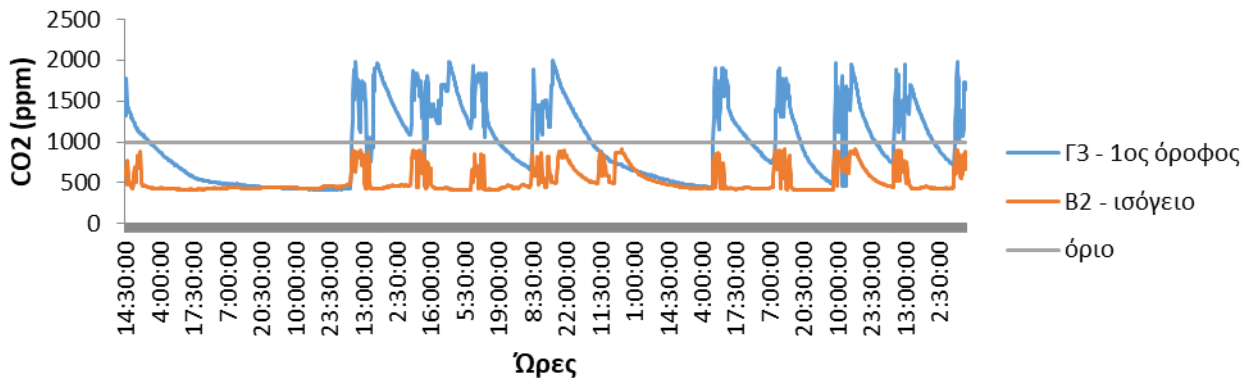
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (24/2/2017 - 10/3/2017)



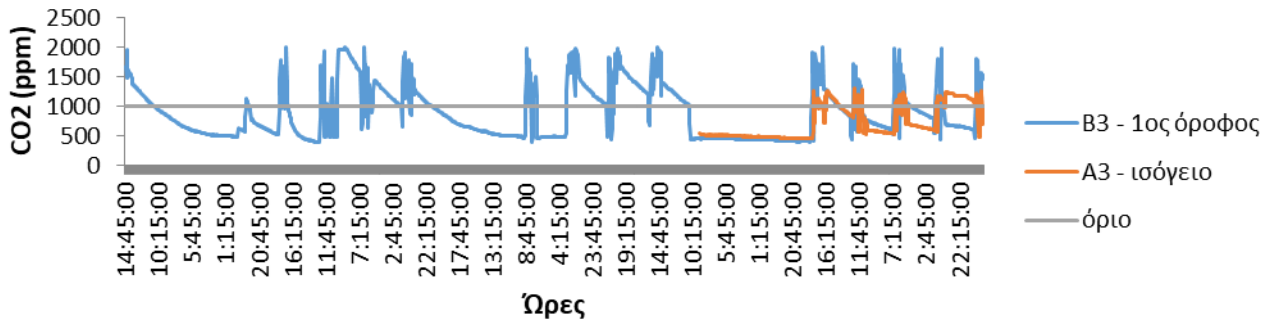
Αίθουσες Κάτω από Ανατολική (24/2/2017 - 10/3/2017)



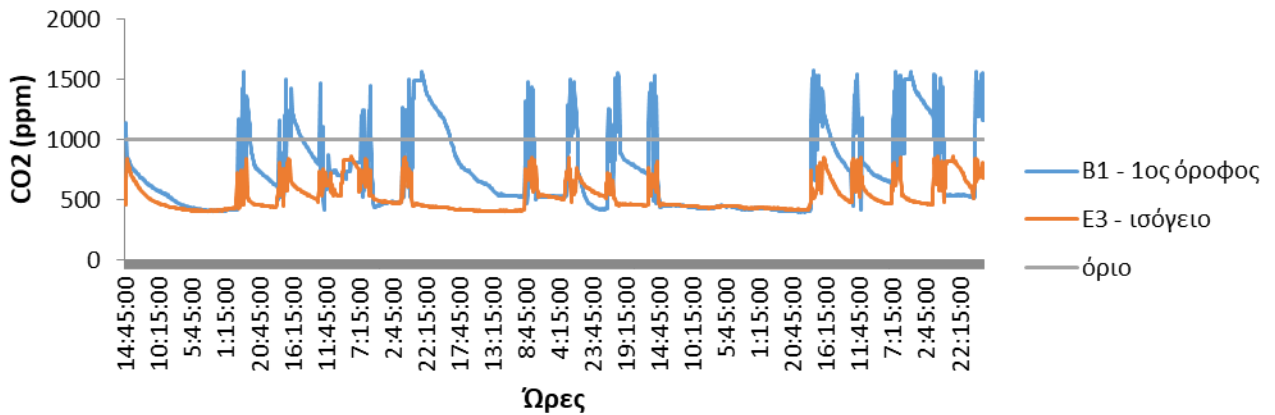
Αίθουσες Κάτω από Πράσινη (24/2/2017 - 10/3/2017)



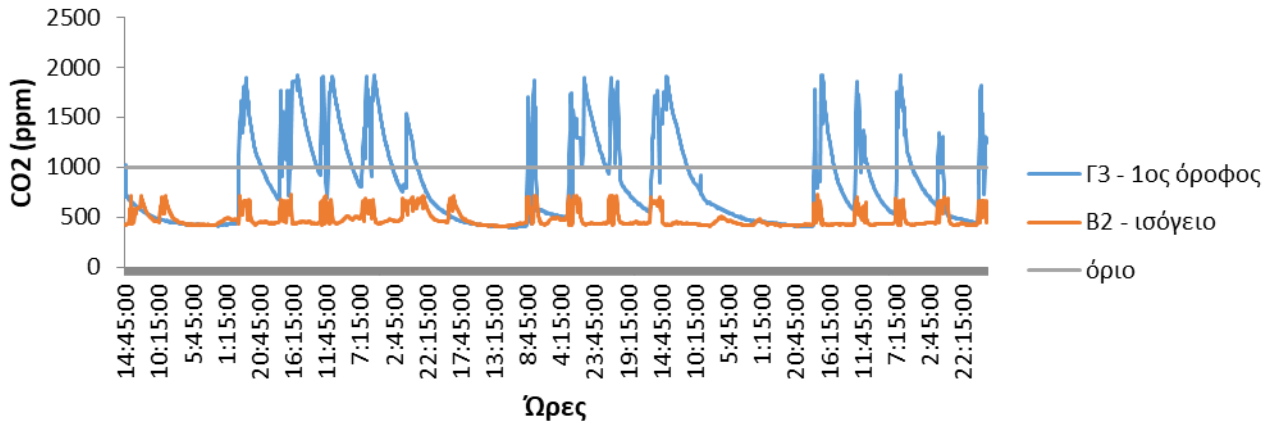
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (10/3/2017 - 31/3/2017)



Αίθουσες Κάτω από Ανατολική (10/3/2017 - 31/3/2017)

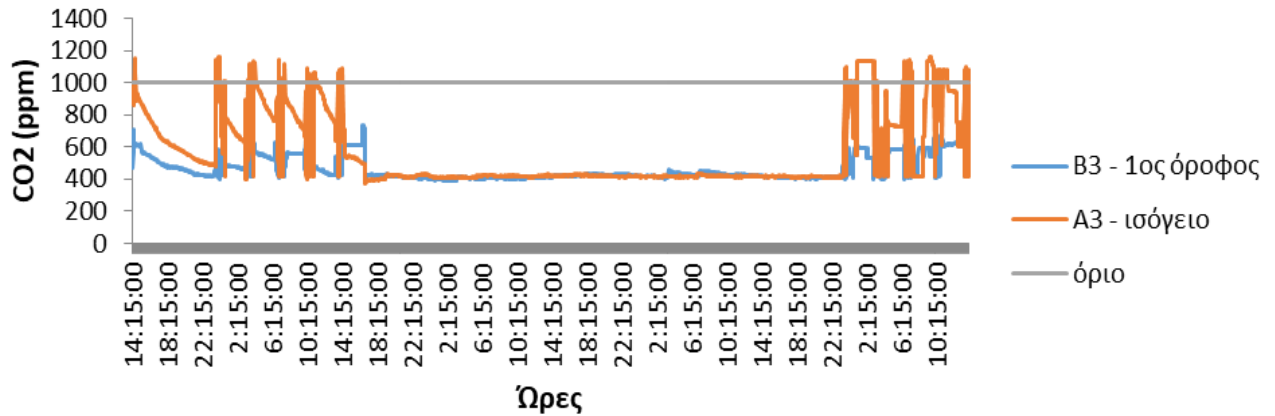


Αίθουσες Κάτω από Πράσινη (10/3/2017 - 31/3/2017)

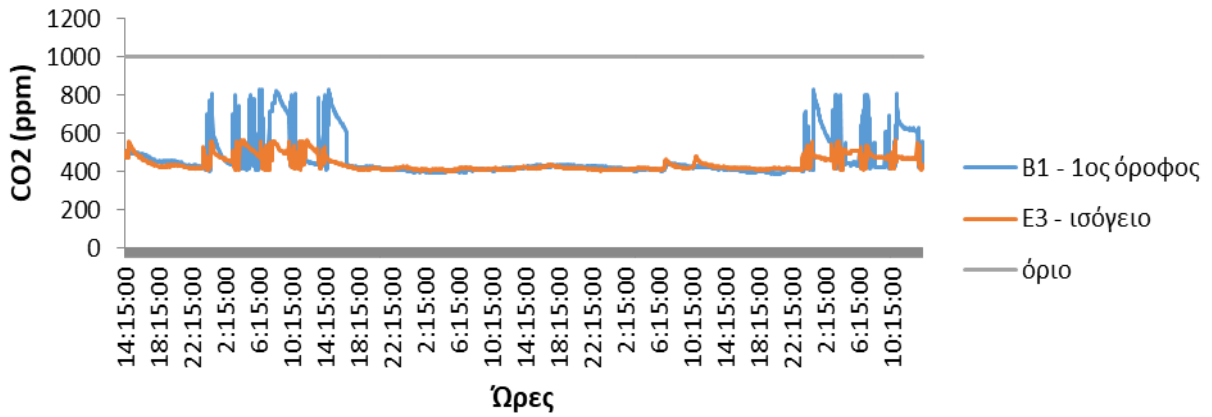


Πάσχα: 10-23/4/2017

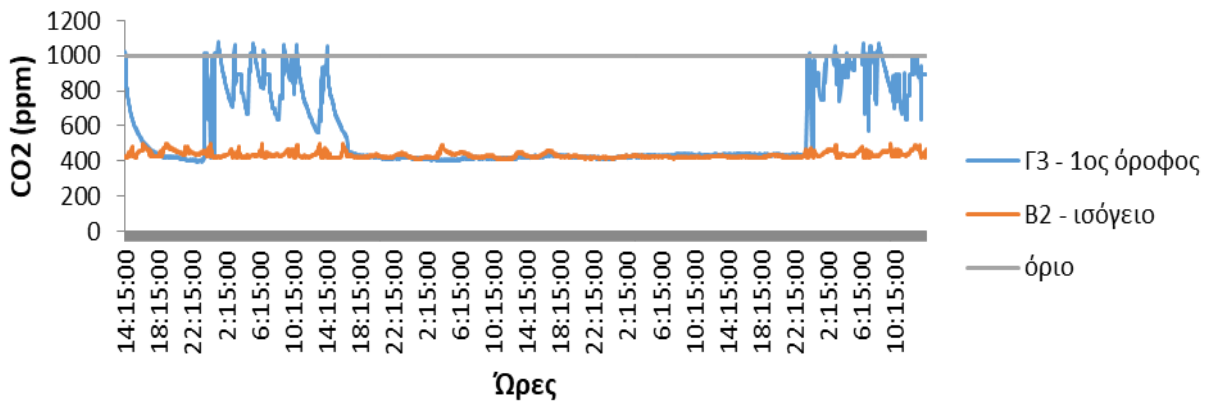
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (31/3/2017 - 28/4/2017)



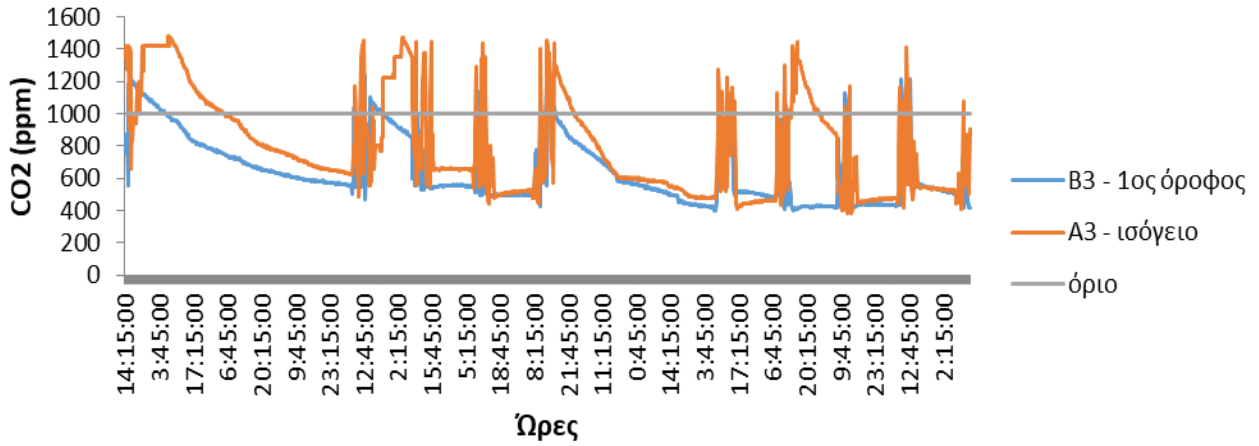
Αίθουσες Κάτω από Ανατολική (31/3/2017 - 28/4/2017)



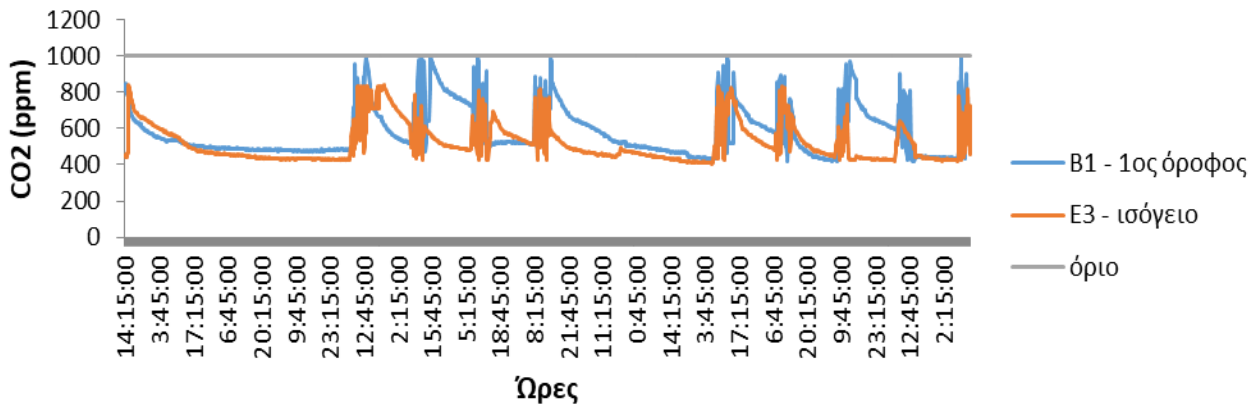
Αίθουσες Κάτω από Πράσινη (31/3/2017 - 28/4/2017)



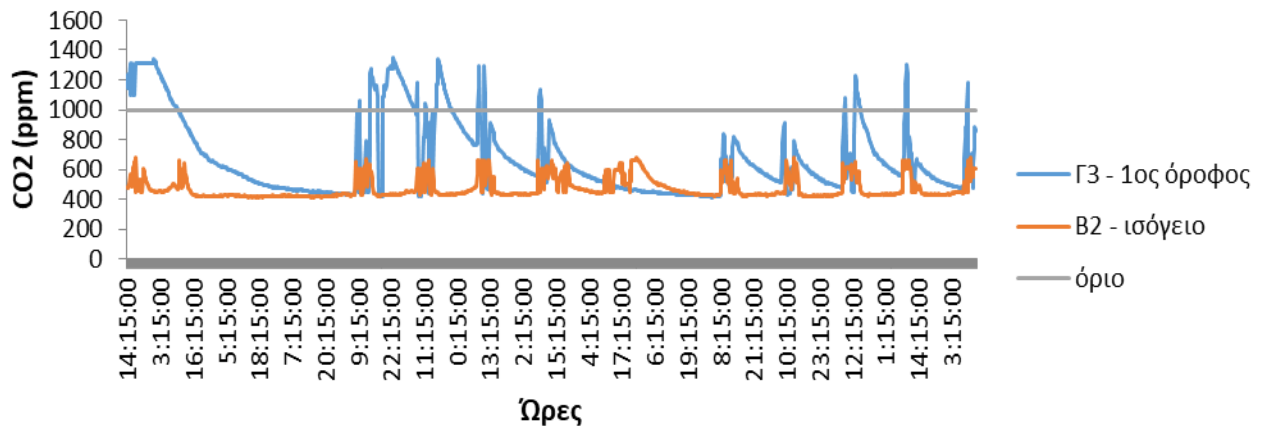
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (28/4/2017 - 12/5/2017)



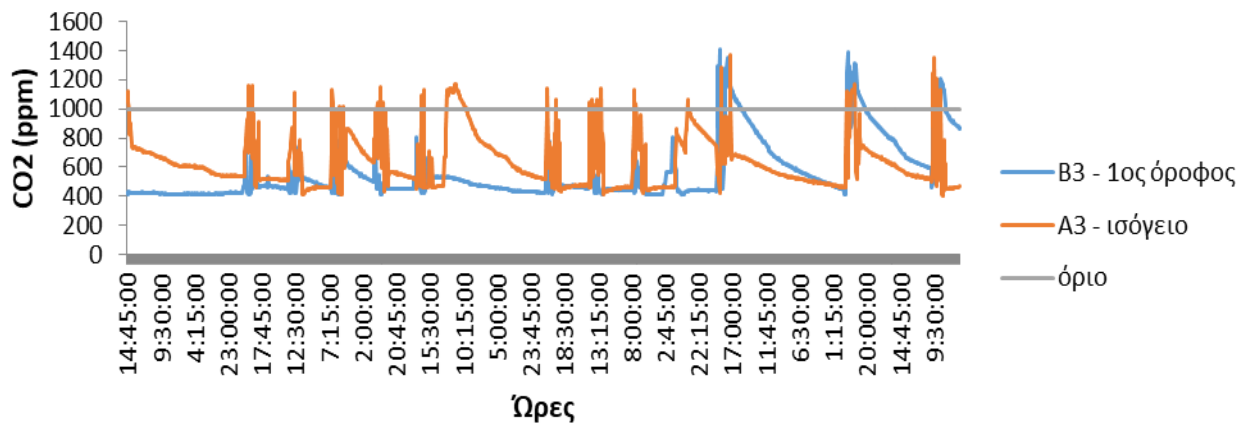
Αίθουσες Κάτω από Ανατολική (28/4/2017 - 12/5/2017)



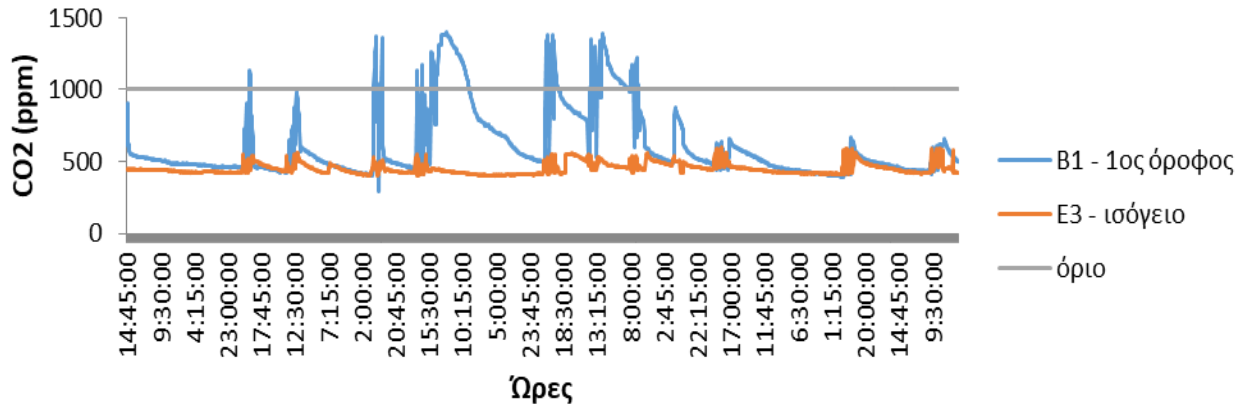
Αίθουσες Κάτω από Πράσινη (28/4/2017 - 12/5/2017)



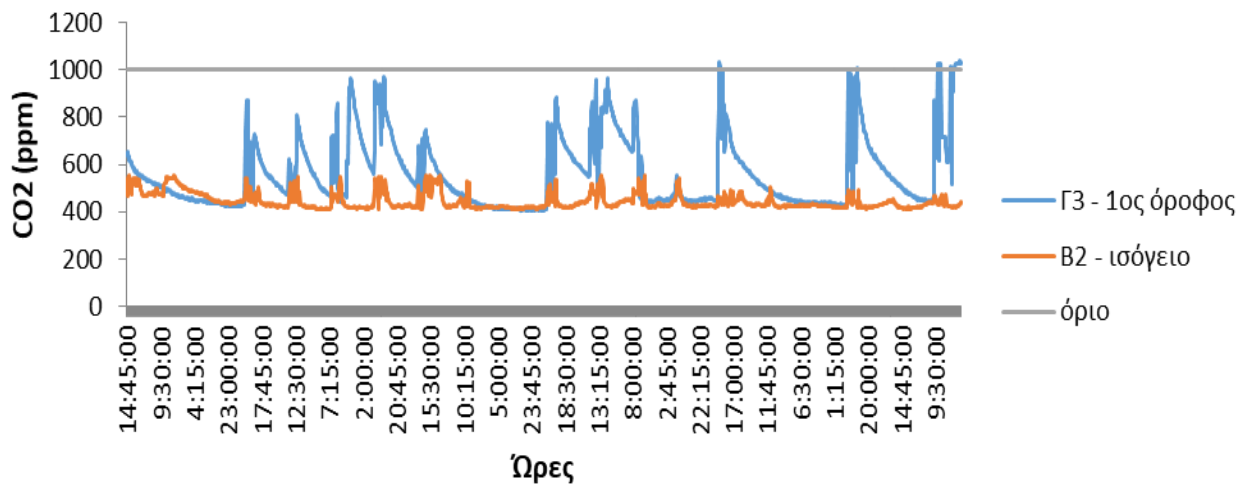
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (12/5/2017 - 31/5/2017)



Αίθουσες Κάτω από Ανατολική (12/5/2017 - 31/5/2017)

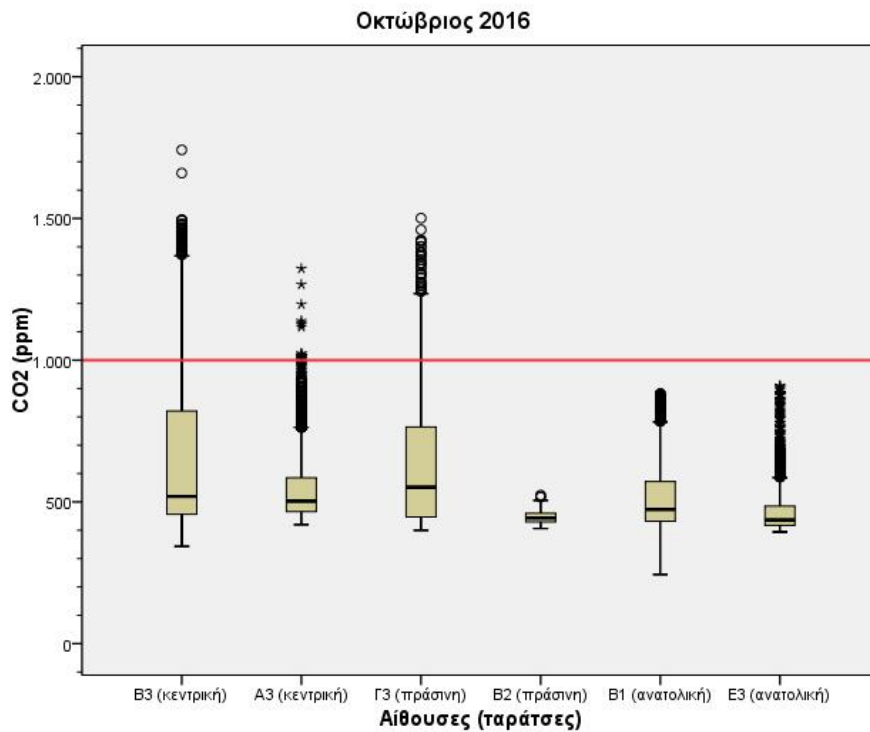


Αίθουσες Κάτω από Πράσινη (12/5/2017 - 31/5/2017)



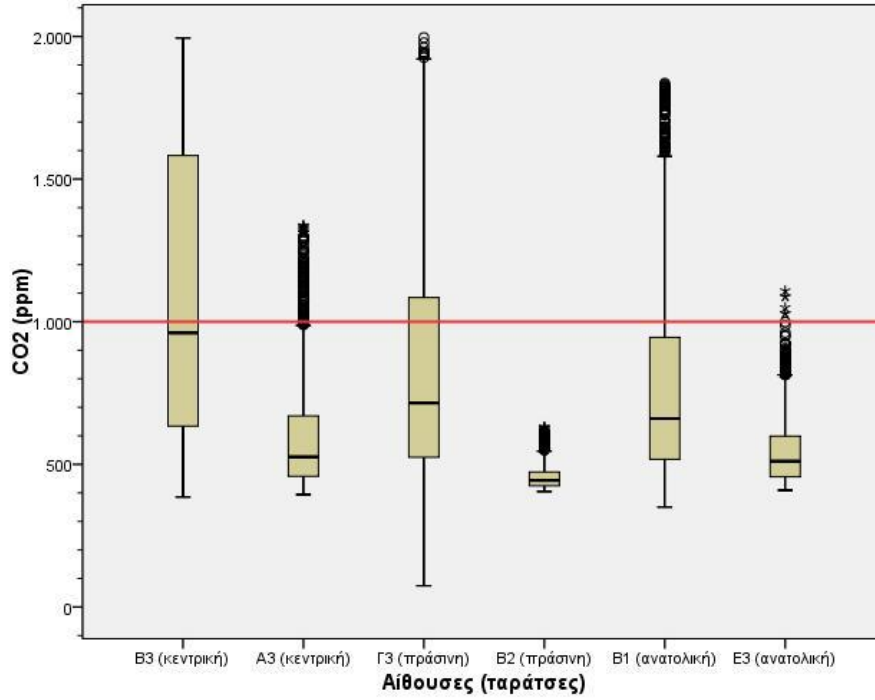
2) Ανά μήνα

Όλους του μήνες οι αίθουσες του ισογείου κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα ενώ οι αίθουσες του 1ου ορόφου εμφανίζουν αρκετές ακραίες τιμές. Η Β3 είναι η σταθερά επιβαρυμένη αίθουσα, ενώ η Β2 αποτελεί την πιο «καθαρή».



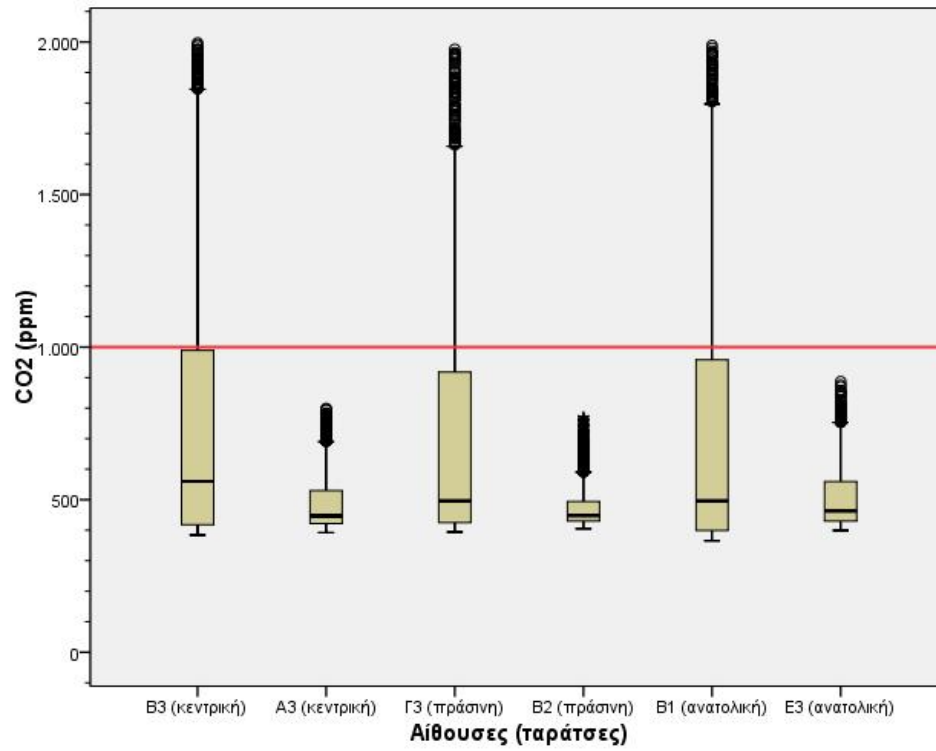
Οκτώβριος 2016	Μέσος όρος (ppm)	Διασπορά (ppm)
B3	666	294
A3	554	135
Γ3	630	221
B2	445	22
B1	523	125
E3	476	98

Νοέμβριος 2016

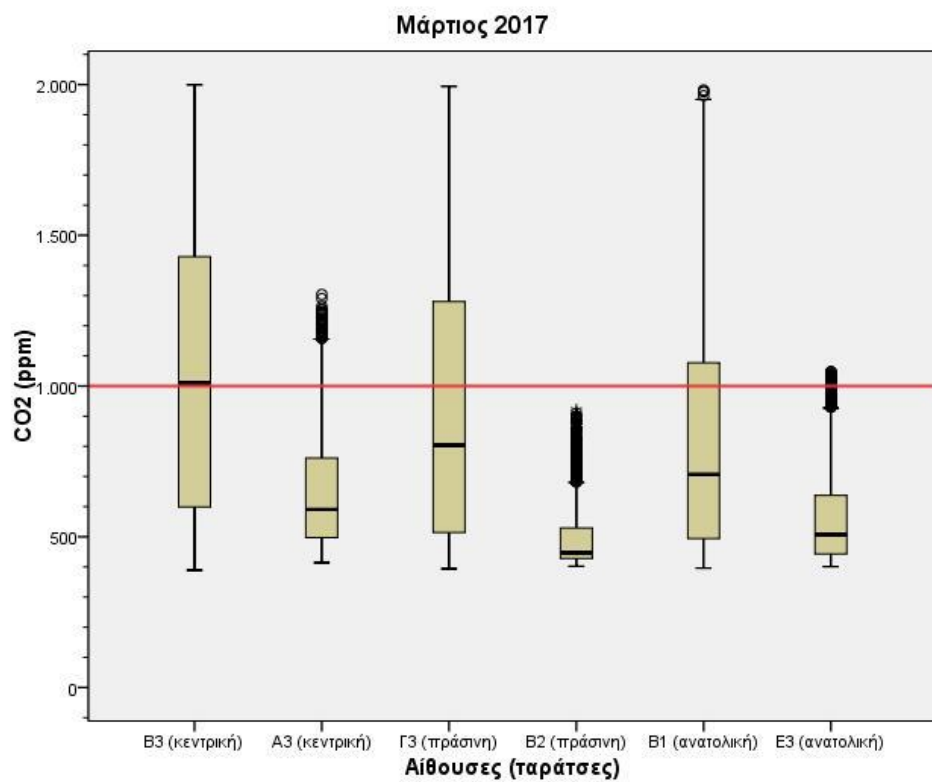


Νοέμβριος 2016	Μέσος όρος (ppm)	Διασπορά (ppm)
B3	1085	519
A3	597	192
Γ3	847	389
B2	454	38
B1	799	382
E3	544	118

Δεκέμβριος 2016

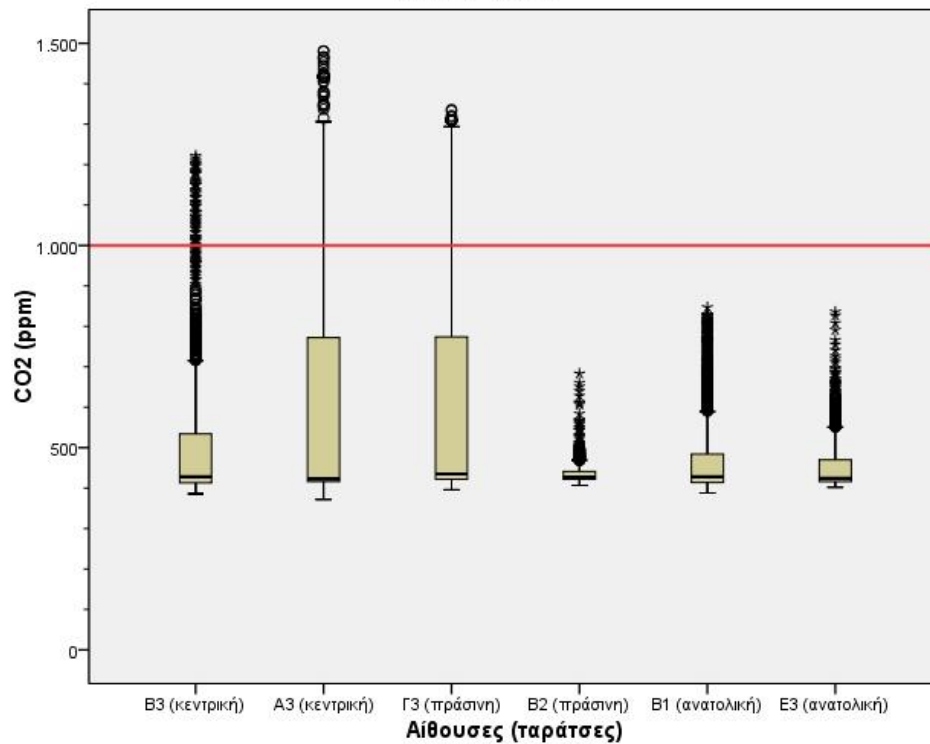


Δεκέμβριος 2016	Μέσος όρος (ppm)	Διασπορά (ppm)
B3	772	448
A3	491	97
Γ3	715	405
B2	479	76
B1	729	449
E3	507	101

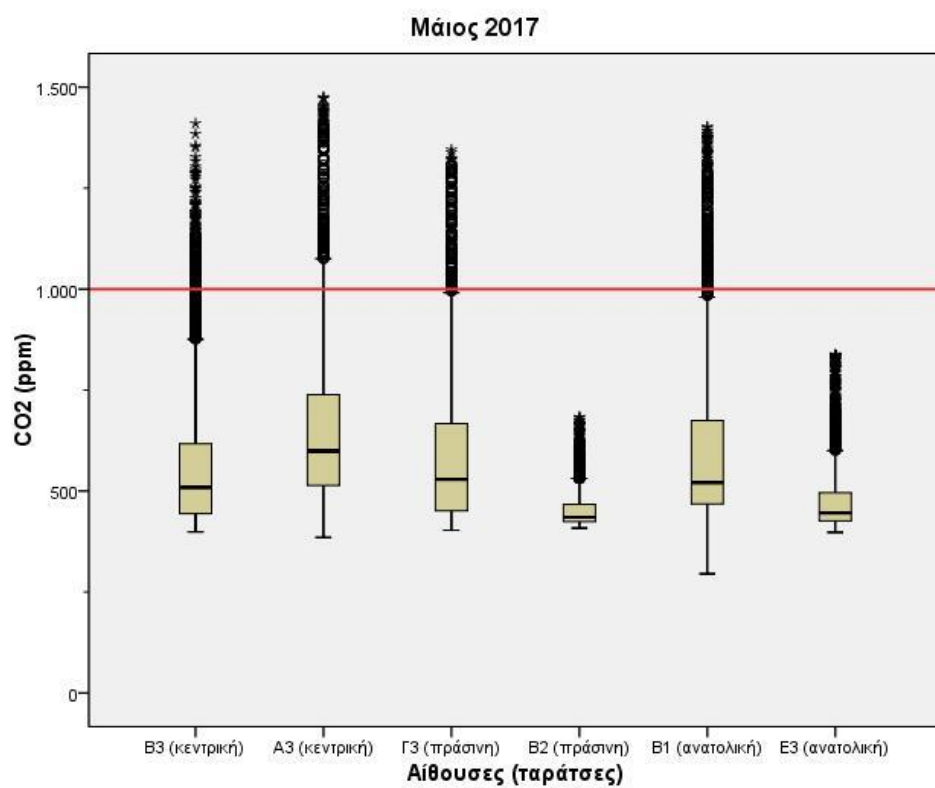


Μάρτιος 2017	Μέσος όρος (ppm)	Διασπορά (ppm)
B3	1044	474
A3	656	200
Γ3	920	444
B2	501	112
B1	816	379
E3	561	157

Απρίλιος 2017



Απρίλιος 2017	Μέσος όρος (ppm)	Διασπορά (ppm)
B3	491	137
A3	603	267
Γ3	587	234
B2	435	22
B1	472	100
E3	448	50



Μάιος 2017	Μέσος όρος (ppm)	Διασπορά (ppm)
B3	577	189
A3	664	218
Γ3	592	186
B2	456	53
B1	606	210
E3	476	80

3) Θεωρία συσχετίσεων

Οι συσχετίσεις (correlations) είναι ένα από τα βασικά στατιστικά στοιχεία που πρέπει κανείς να αντιληφθεί για τη για να εξετάσει κατά πόσο δύο ή περισσότερες μεταβλητές παρουσιάζουν (υπό προϋποθέσεις) ίδια ή αντίστροφη συμπεριφορά. Τα κύρια λοιπόν ερωτήματα που γεννώνται είναι τι είδους συσχέτιση θα χρησιμοποιηθεί και τι εκφράζει η P-value. Ξεκινώντας από το είδος της συσχέτισης, με τα συγκεκριμένα δεδομένα πρέπει να χρησιμοποιηθεί το Spearman's Rank-Order Correlation γιατί δεδομένα όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και μετρήσεις CO₂, TVOCs είναι ΜΗ-παραμετρικά, δεν έχουν δηλαδή συγκεκριμένη κατανομή. Spearman's Rank-Order Correlation είναι η μη παραμετρική εκδοχή του συσχετισμού Pearson. Ο συντελεστής συσχέτισης του Spearman ρ (ή αλλιώς r_s) μετρά τη δύναμη και την κατεύθυνση της συσχέτισης μεταξύ δύο ταξινομημένων μεταβλητών. Για να είναι όμως σωστό το κριτήριο που διαλέχτηκε πρέπει να πληρείται και μία ακόμα προϋπόθεση, πρέπει τα δεδομένα να έχουν μονοτονική σχέση μεταξύ τους, δηλαδή δεν θα πρέπει να αλλάζει η μονοτονία σε ένα διάγραμμα μεταξύ των δύο μεταβλητών. (<https://statistics.laerd.com/statistical-guides/spearman's-rank-order-correlation-statistical-guide.php>)

Καθαρά στο κομμάτι της συσχέτισης τα αποτελέσματα κυμαίνονται μεταξύ των τιμών +1 και -1:

Συντελεστής συσχέτισης = +1: που σημαίνει πως υπάρχει άριστη θετική συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων, δηλαδή συμπεριφέρονται ως ανάλογα μεγέθη.

Συντελεστής συσχέτισης = 0: που σημαίνει πως δεν υπάρχει καμία απολύτως συσχέτιση.

Συντελεστής συσχέτισης = -1: που σημαίνει πως τα μεγέθη έχουν άριστη αρνητική συσχέτιση, δηλαδή συμπεριφέρονται ως αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη.

Αυτά τα τρία παραδείγματα αντικατοπτρίζουν και τη γενική εικόνα των οποιωνδήποτε αποτελεσμάτων μπορεί να τύχουν. Για παράδειγμα μια συσχέτιση με συντελεστή 0,6 μπορεί να χαρακτηριστεί ως μέσης τάξης θετική συσχέτιση ή ελαφρά ισχυρή συσχέτιση επειδή κυμαίνεται από 0 έως +1 αλλά είναι και πάνω από το μέσο 0,5. Λιγότερο ισχυρά είναι τα αποτελέσματα μεταξύ 0 έως 0,5 καθώς και 0 έως -0,5. Επομένως η δύναμη που προαναφέρθηκε έχει να κάνει με το πόσο κοντά στα δύο άκρα φτάνουν οι συντελεστές ώστε να χαρακτηριστεί "ισχυρή" και η κατεύθυνση με το αν προσεγγίζουν το θετικό ή το αρνητικό άκρο.

Ωστόσο, ο συντελεστής συσχέτισης από μόνος του δεν προσφέρει πολλές πληροφορίες, καθώς πρέπει να ελεγχθεί η σημαντικότητα του τεστ στο οποίο υποβλήθηκαν τα δεδομένα. Το τεστ σημαντικότητας εξετάζει το αν είναι δυνατόν να απορριφθεί η μηδενική υπόθεση (null hypothesis) και πρακτικά είναι αυτό που υποδεικνύει το αν η συσχέτιση, στην οποία υπέβαλα τα δεδομένα, είναι στατιστικά σημαντική, δηλαδή έχει αξία και δεν είναι απλά ένα τυχαίο γεγονός. Τυχαίο γεγονός, για παράδειγμα, θα μπορούσε να είναι ένας μικρός όγκος δεδομένων, τότε δεν μπορεί κανείς να είναι σίγουρος για το αποτέλεσμα του. Άρα καταλήγοντας σε στατιστικά σημαντικό τεστ, μπορεί κάποιος να αποδεχτεί, ότι η συσχέτιση του είναι σωστή.

Η μηδενική υπόθεση, που συμβολίζεται και ως « H_0 », υποδεικνύει πως δεν υπάρχει καμία διαφορά μεταξύ των δεδομένων που εξετάζονται και συνεπώς δεν είναι στατιστικά σημαντική η συσχέτιση. Η H_0 είναι αυτή που τίθεται αρχικά σε ισχύ, χωρίς κάποιο συγκεκριμένο λόγο, απλά πρέπει κάπως να αρχίσει η στατιστική υπόθεση. Όταν, όμως, γίνονται κάποιες στατιστικές υποθέσεις, πρέπει να υπάρχει και η αντίθετη υπόθεση από τη μηδενική, η εναλλακτική (alternative hypothesis), η οποία συμβολίζεται με « H_1 » και εκφράζει το γεγονός, ότι υπάρχει διαφορά μεταξύ των δεδομένων και άρα έχω στατιστικά σημαντική συσχέτιση. Προσοχή εδώ στο εξής: οι δυνατές επιλογές είναι είτε να αποδειχτεί η μηδενική λανθασμένη και έτσι να προχωρήσει το πείραμα με την εναλλακτική, η οποία όμως δεν χαρακτηρίζεται αυτομάτως ως αληθής, παρά μόνο είναι η μοναδική επιλογή αφού η μηδενική απορρίφθηκε, είτε να υπάρξει αδυναμία απόρριψης της μηδενικής και να συνεχίσει το πείραμα με αυτή ως επικρατέστερη. Σε καμία περίπτωση δεν γίνεται αποδοχή καμίας εκ των δύο υποθέσεων, μιας και δεν μπορεί να συμβεί κάτι τέτοιο με το τεστ αυτό που πραγματοποιείται αλλά χρειάζονται και επιπλέον δεδομένα.

Η P-value, λοιπόν, είναι το στοιχείο που θα καθορίσει τη σημαντικότητα του τεστ αλλά όχι από μόνη της, πρέπει να συνοδεύεται και από τη στάθμη σημαντικότητας. Η P-value μπορεί να χαρακτηριστεί ως η πιθανότητα του να συμβεί κάτι όταν ισχύει η μηδενική υπόθεση, για το λόγο αυτό, όσο μειώνεται η πιθανότητα αυτή, μειώνεται και η ισχύ της null hypothesis. Η στάθμη σημαντικότητας, που συμβολίζεται με « α » είναι η μέγιστη πιθανότητα με την οποία μπορεί να γίνει δεκτό ένα σφάλμα τύπου 1, δηλαδή να απορριφθεί η μηδενική υπόθεση ενώ είναι αληθής και κυμαίνεται συνήθως στο 0,05 ή 5% και όταν η P-value είναι αρκετά μικρή, μπορεί να πάρει και τιμή 0,01 ή 1%. Εδώ, λοιπόν, είναι η ουσία της συσχέτισης.

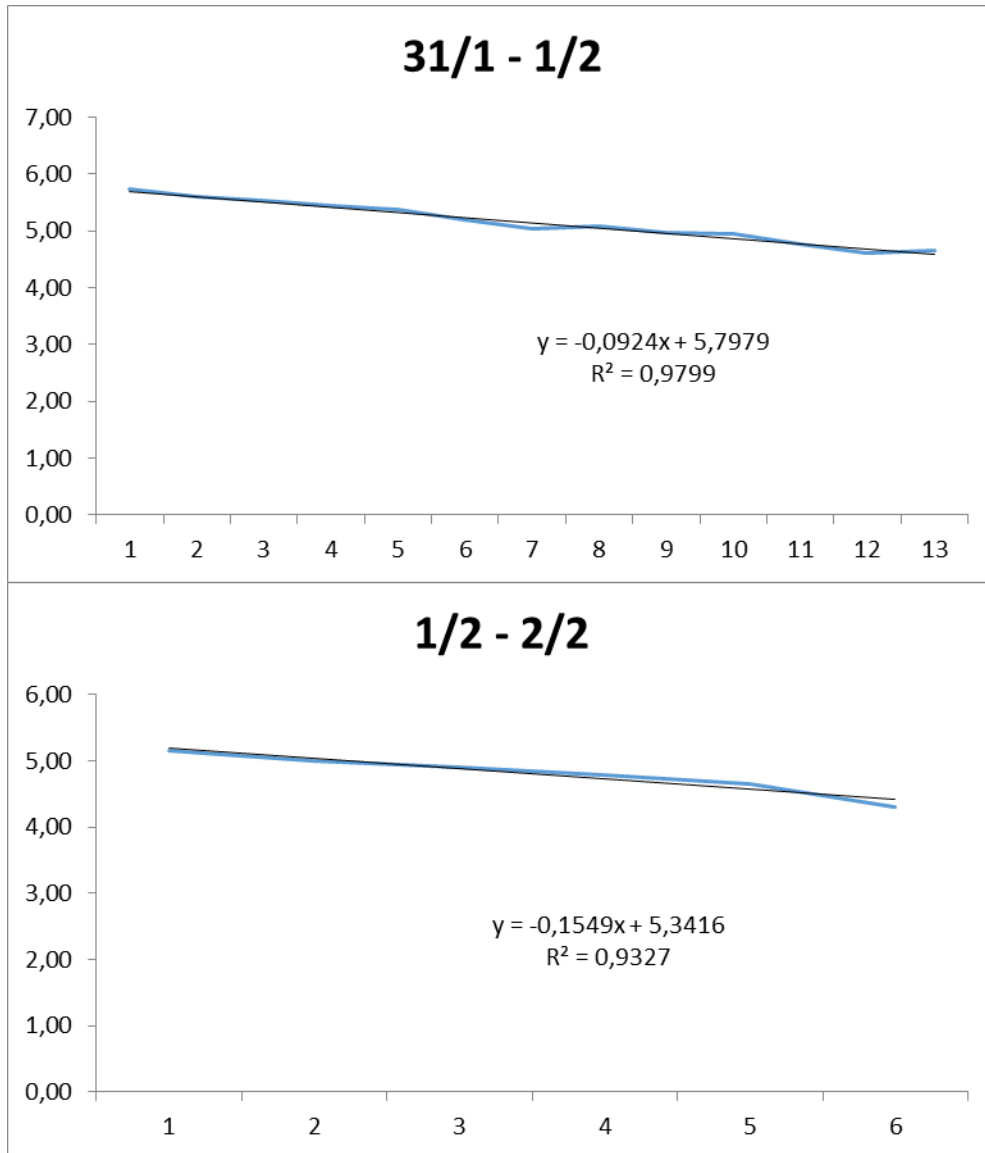
Αν $P\text{-value} < \alpha$: τότε απορρίπτεται η null hypothesis και δεχόμαστε την παραδοχή πως τα δεδομένα έχουν διαφορές. Τότε λέμε ότι έχουμε "στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δεδομένων".

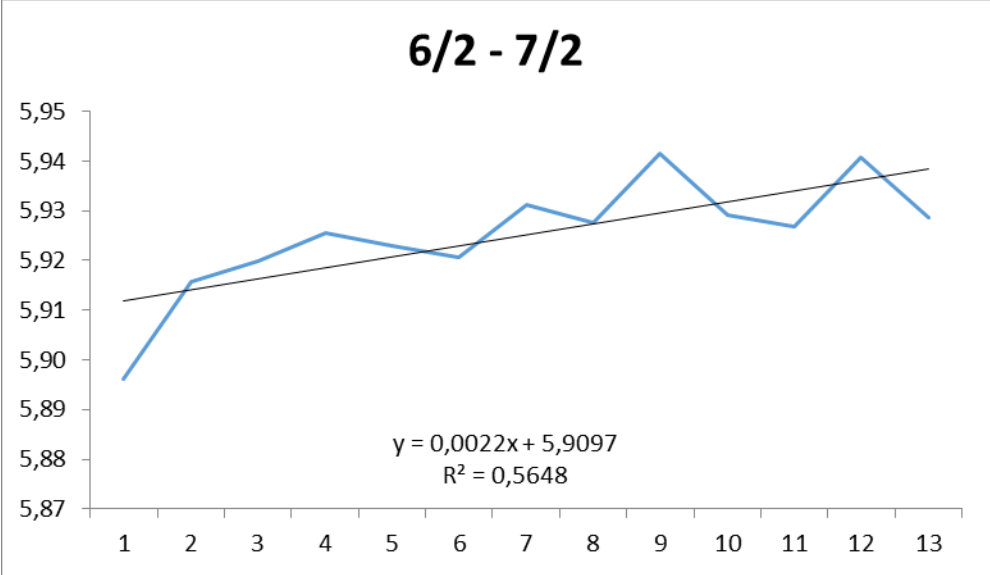
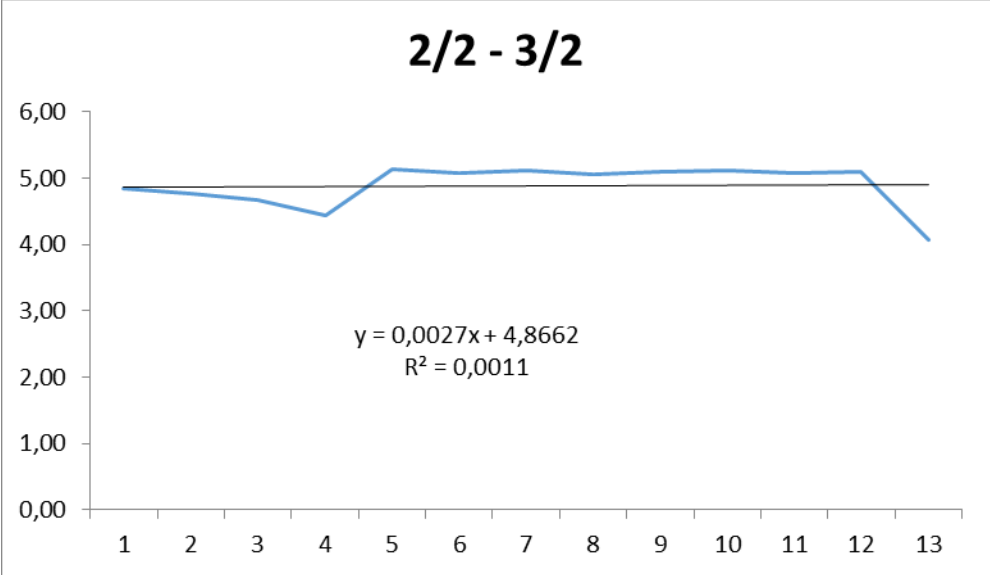
Αν $P\text{-value} > \alpha$: τότε υπάρχει αδυναμία απόρριψης της null hypothesis

Άρα γίνεται αντιληπτό, πως πρώτα πρέπει να δοθεί σημασία στο αν το τεστ είναι στατιστικά σημαντικό και κατόπιν να εξεταστεί ο συντελεστής συσχέτισης. Είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό, ότι η στατιστική σημασία δεν δείχνει τη δύναμη του συσχετισμού του Spearman. Στην πραγματικότητα, ο έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας του συσχετισμού Spearman δεν παρέχει καμία πληροφορία σχετικά με τη δύναμη της σχέσης. Έτσι, η επίτευξη μιας $P\text{-value} = 0,001$, για παράδειγμα, δεν σημαίνει ότι η σχέση είναι ισχυρότερη από ότι αν προέκυπτε μια $P\text{-value} = 0,04$. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η δοκιμή σημαντικότητας (test of significance) εξετάζει αν μπορεί να απορριφθεί ή όχι η μηδενική υπόθεση. Τελευταίο στοιχείο που χρήζει αναφοράς είναι το αν ο χρήστης επιθυμεί one-tailed ή two-tailed test of significance. Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε το two-tailed με αυτό να υποδεικνύει πως απαιτεί να ληφθεί υπόψη η πιθανότητα ότι το στατιστικό αποτέλεσμα της δοκιμής θα μπορούσε να "πέσει" σε οποιαδήποτε από τις δύο ουρές (two-tailed) της Gaussian καμπύλης, όπου αυτές οι ουρές είναι το P-value area. (<https://onlinecourses.science.psu.edu/statprogram/node/138>).

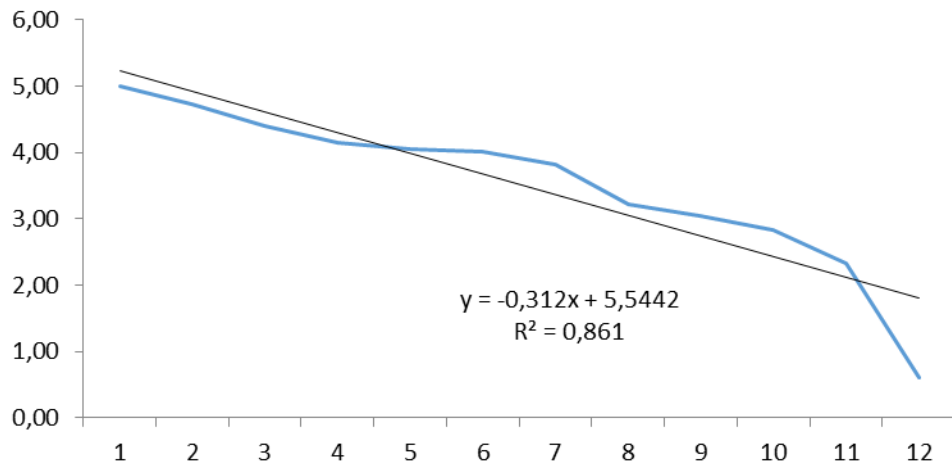
4) Ρυθμός αερισμού στις αίθουσες

Αίθουσα Β2:

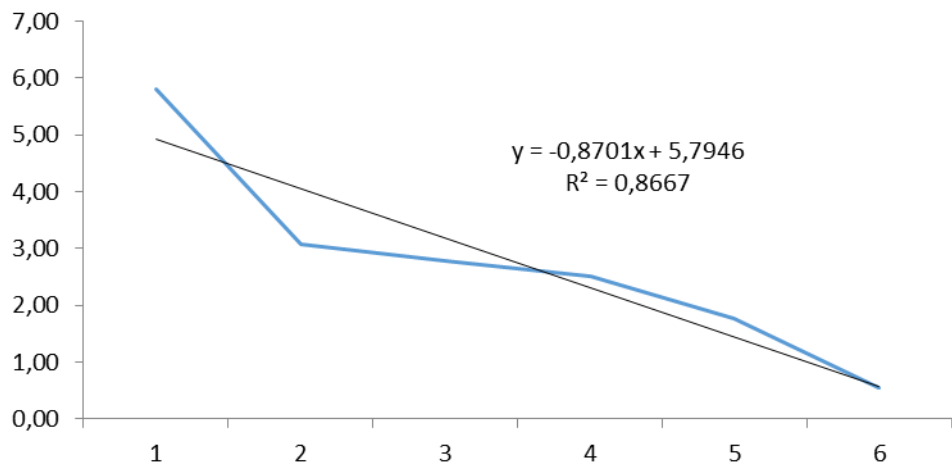


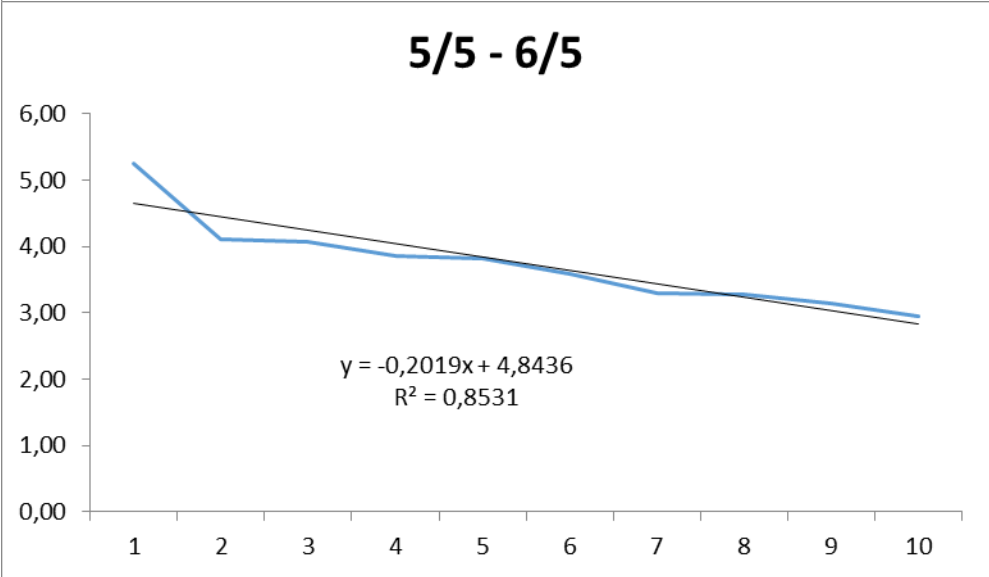
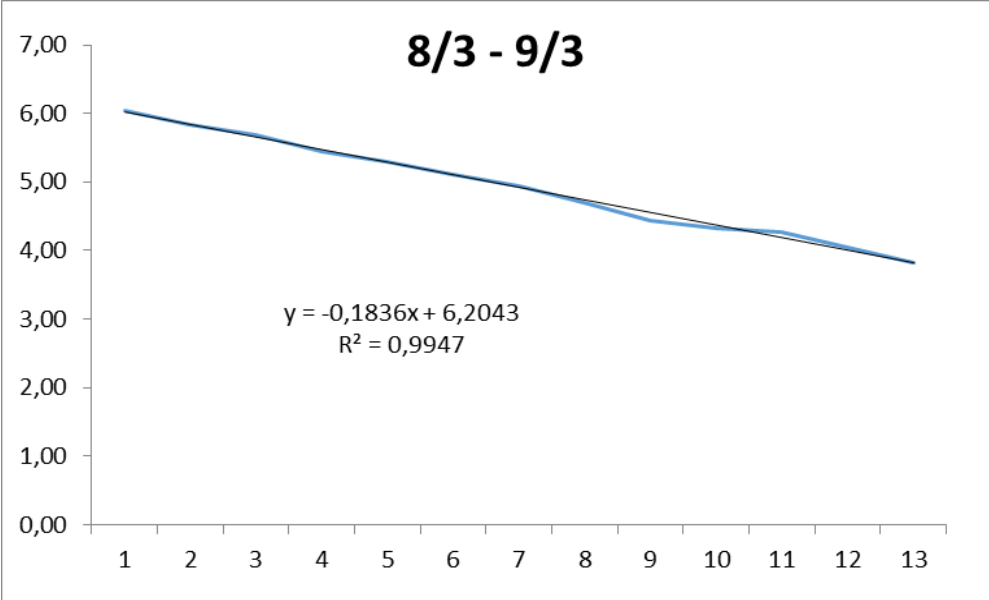


16/2 - 17/2

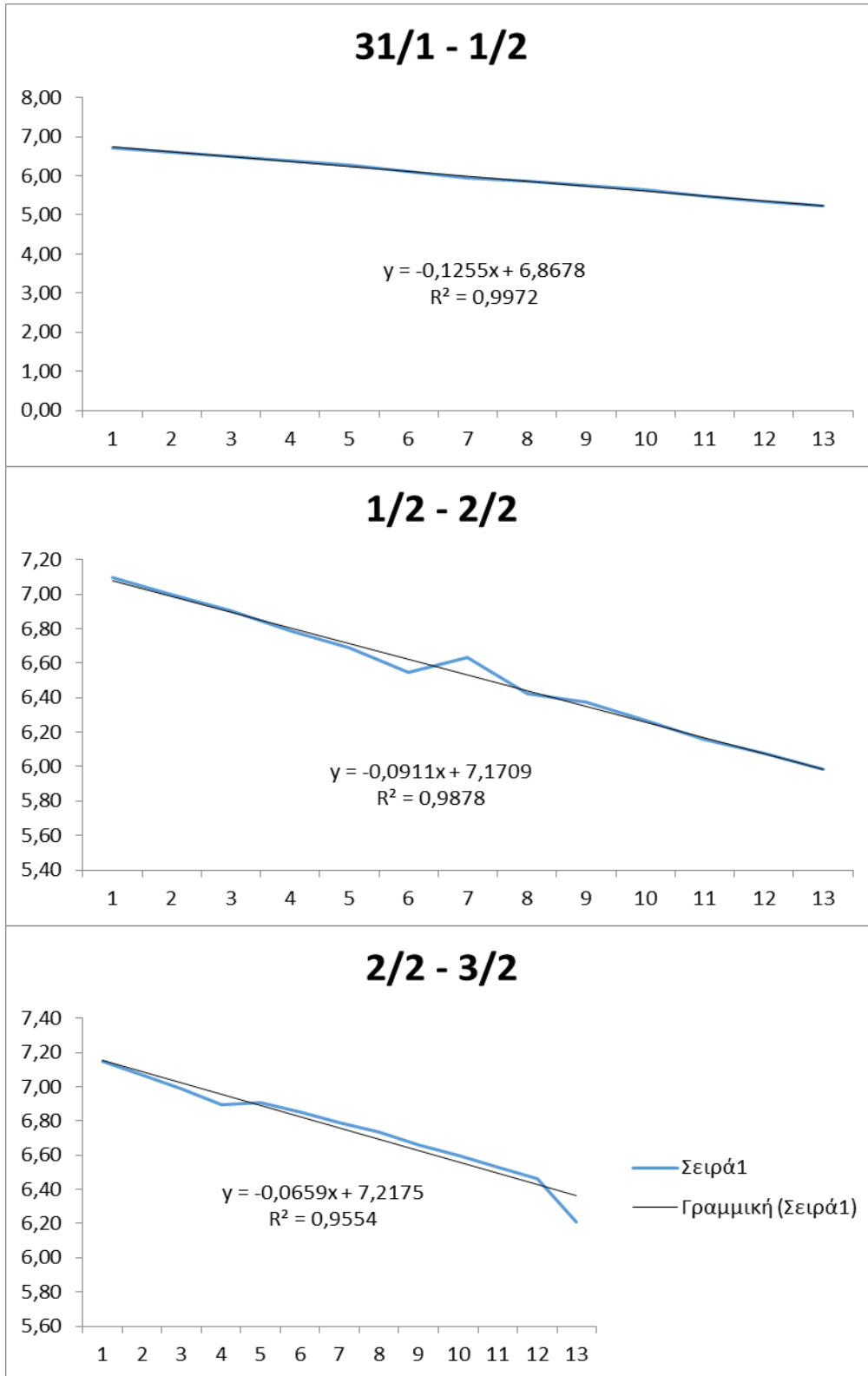


24/2 - 25/2

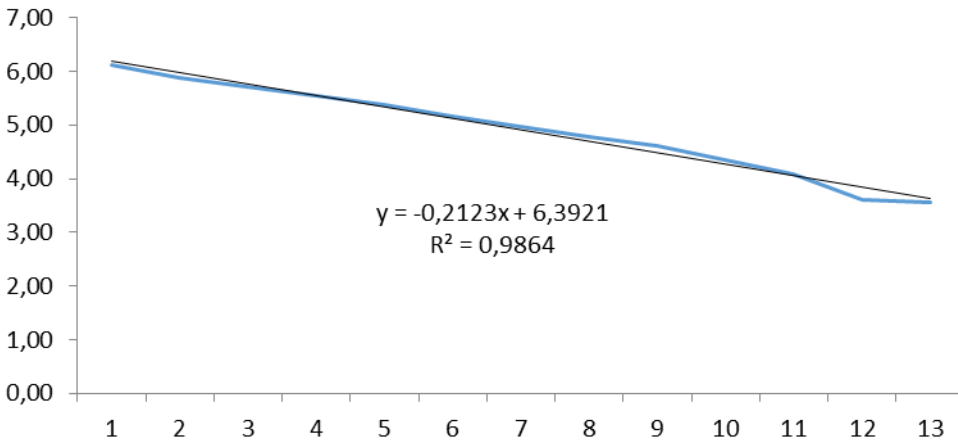




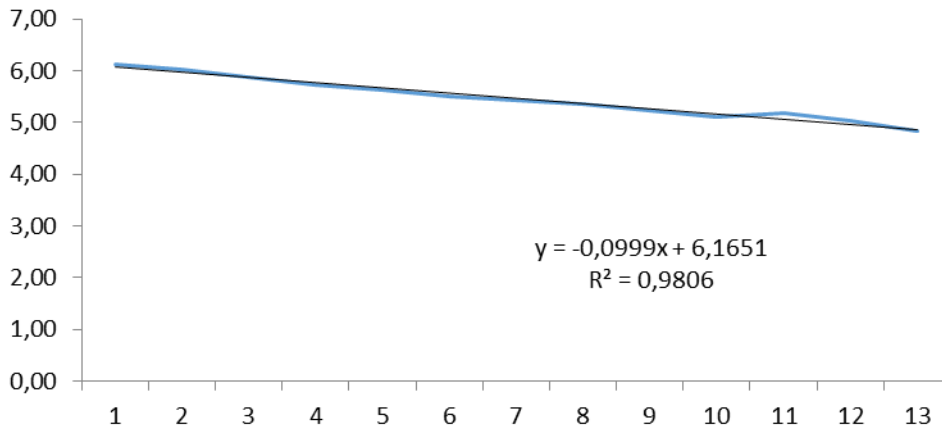
Αίθουσα Γ3:



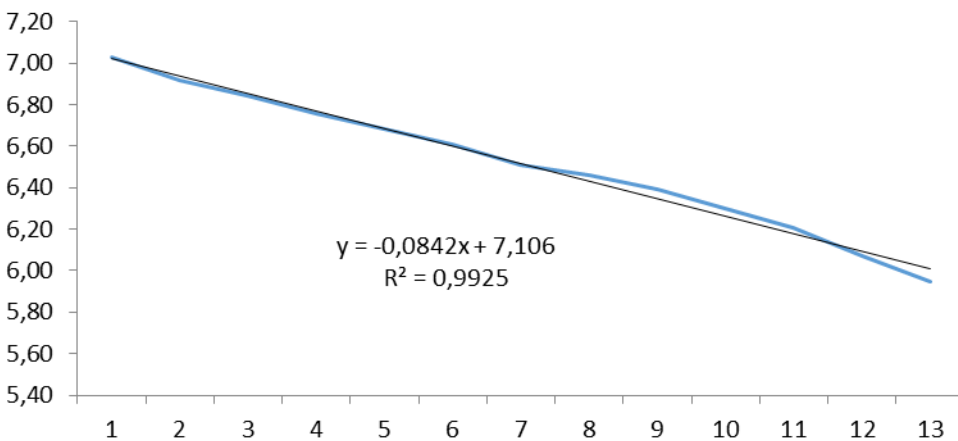
6/2 - 7/2



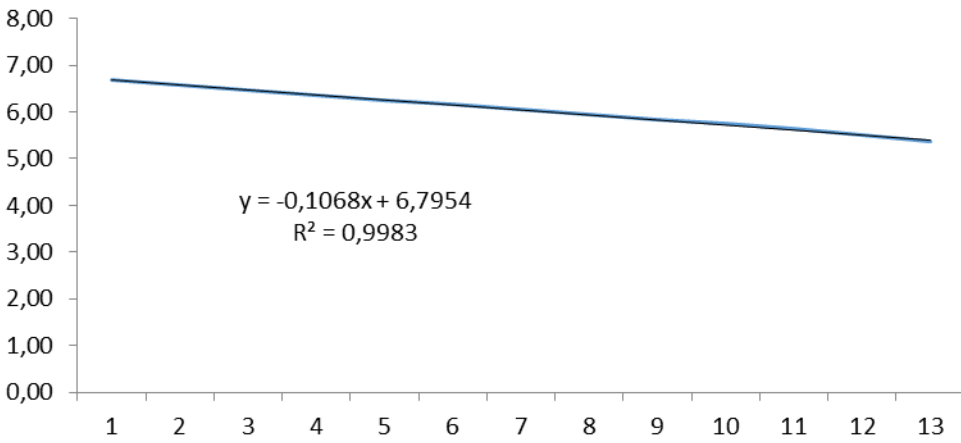
14/2 - 15/2



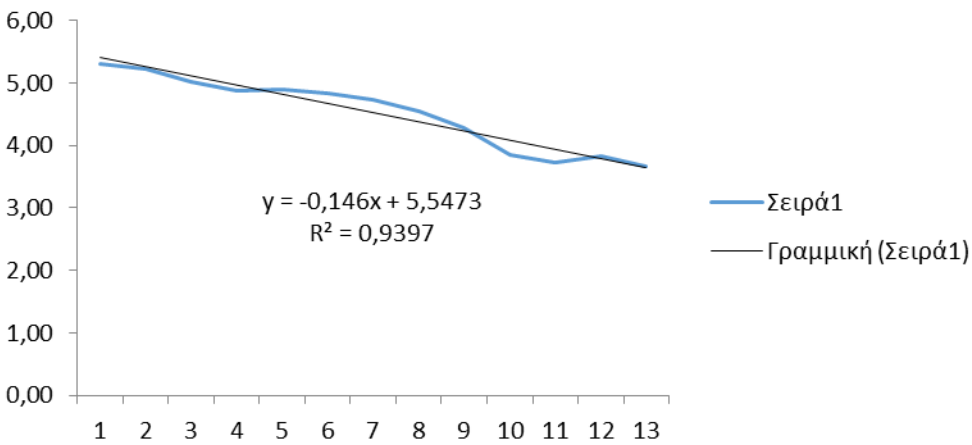
15/2 - 16/2



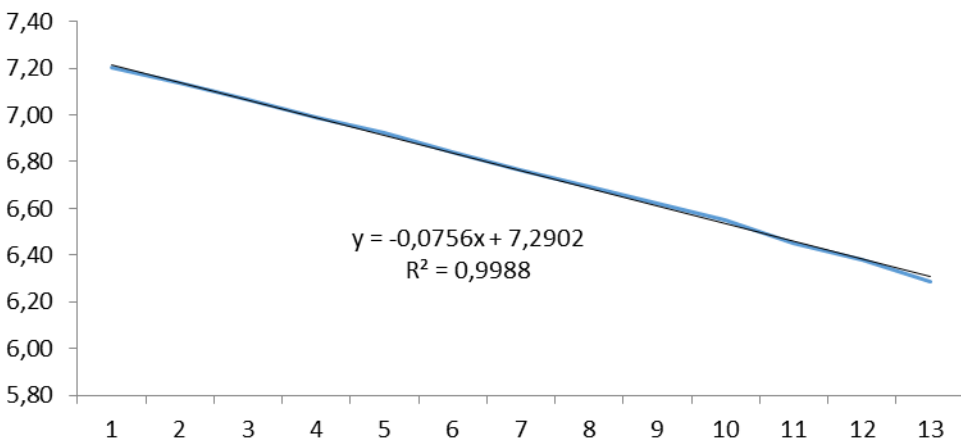
16/2 - 17/2

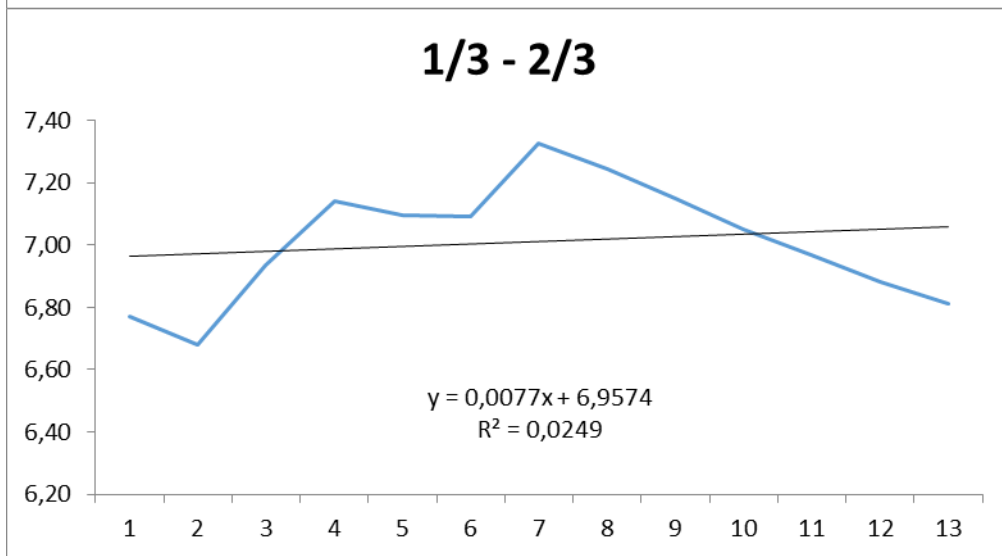
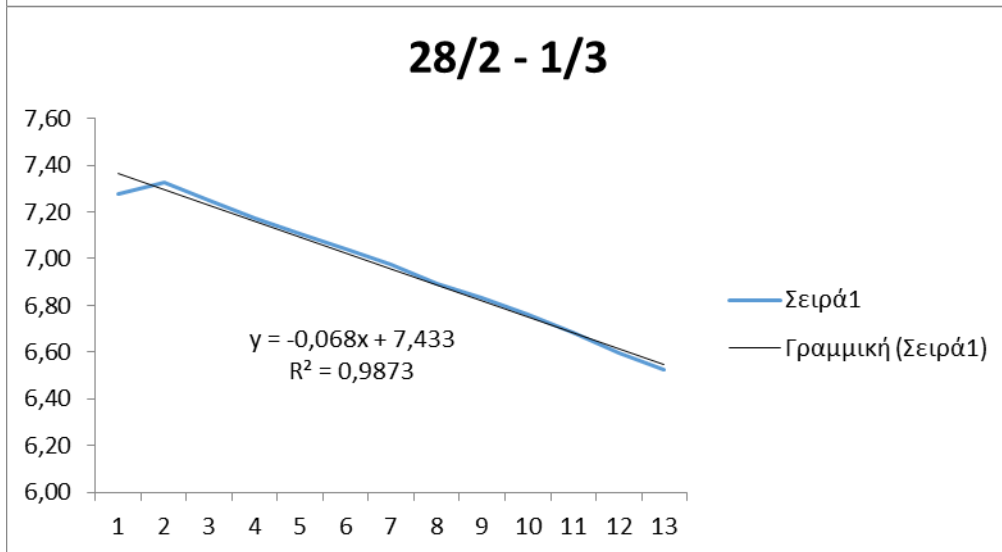
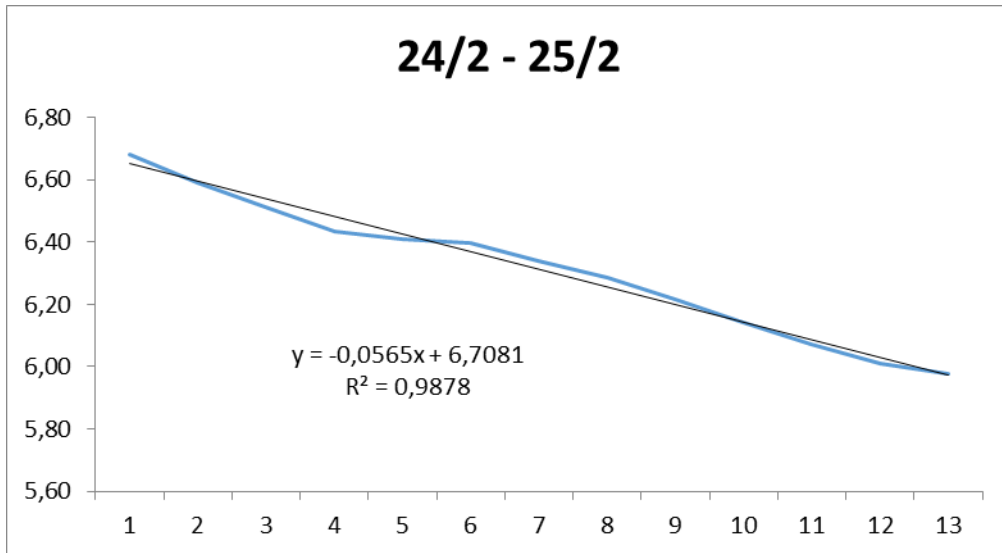


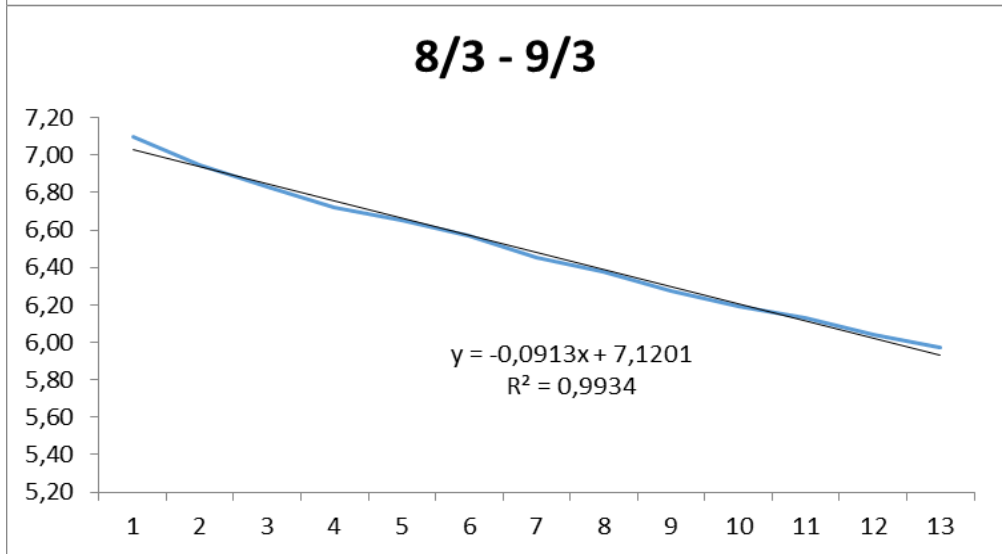
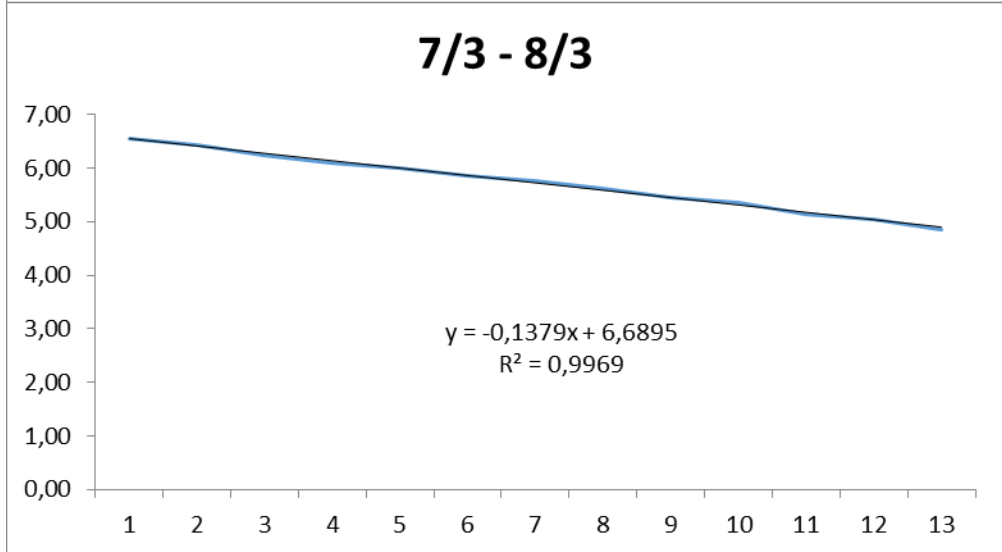
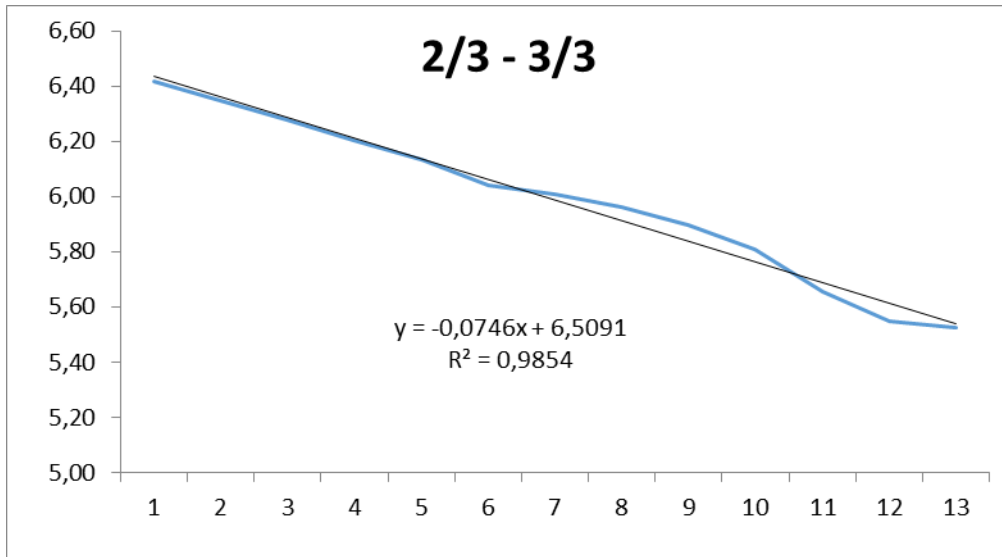
17/2 - 18/2



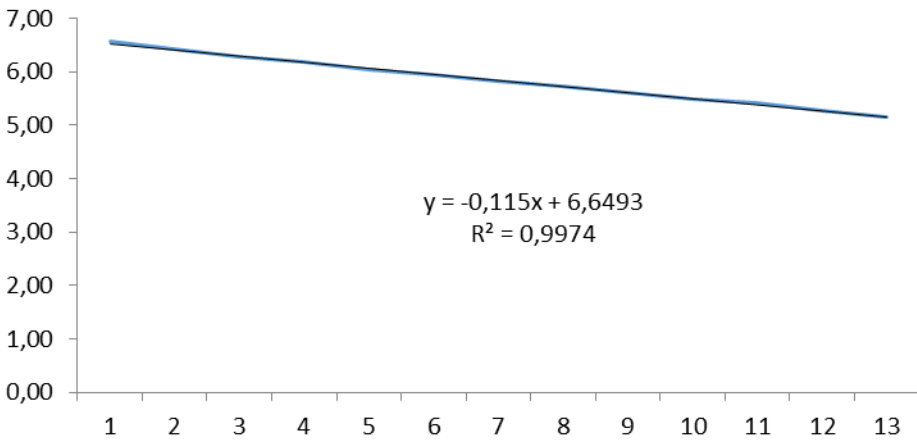
23/2 - 24/2



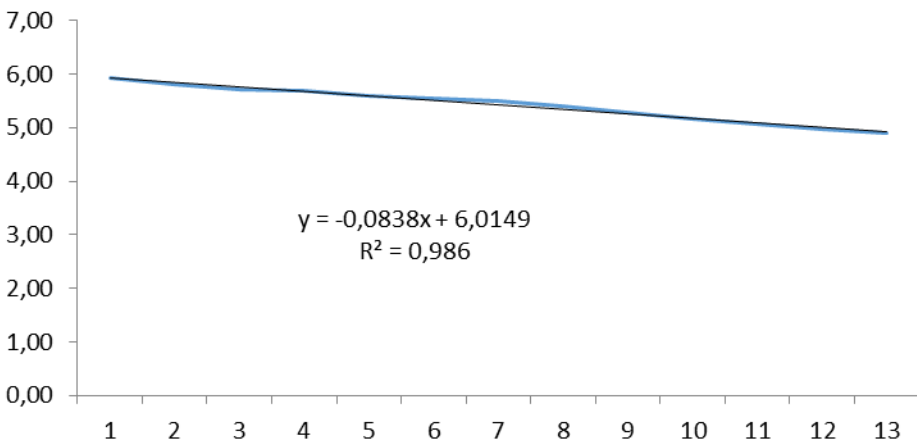




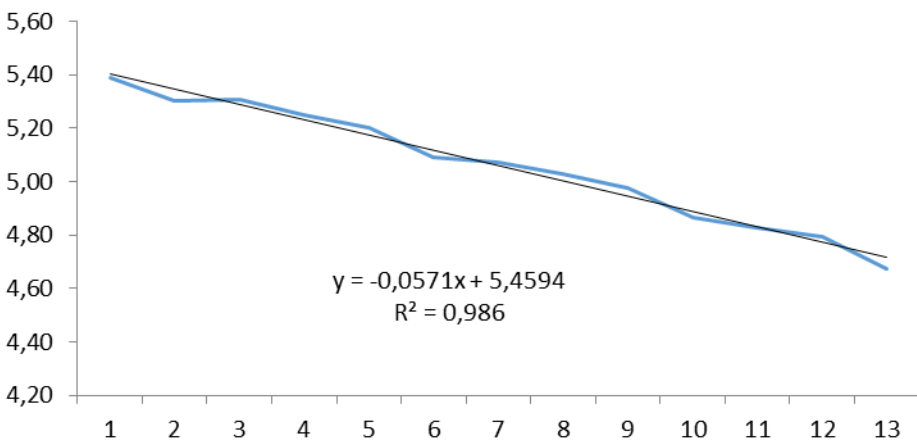
27/3 - 28/3

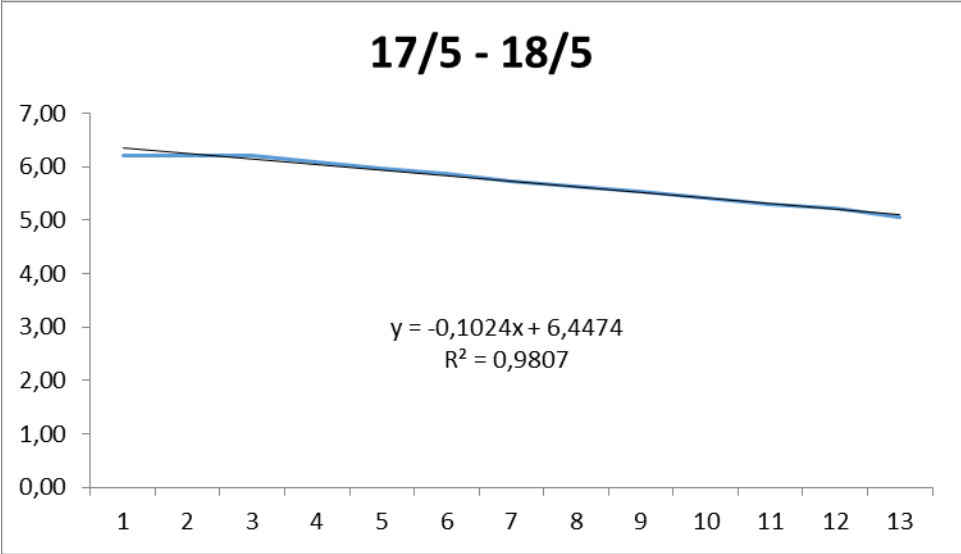
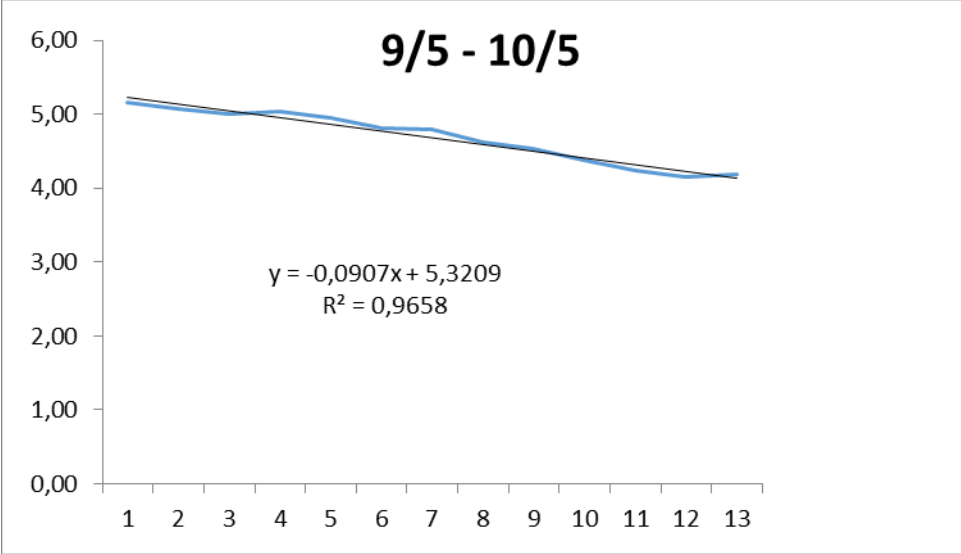


6/4 - 7/4

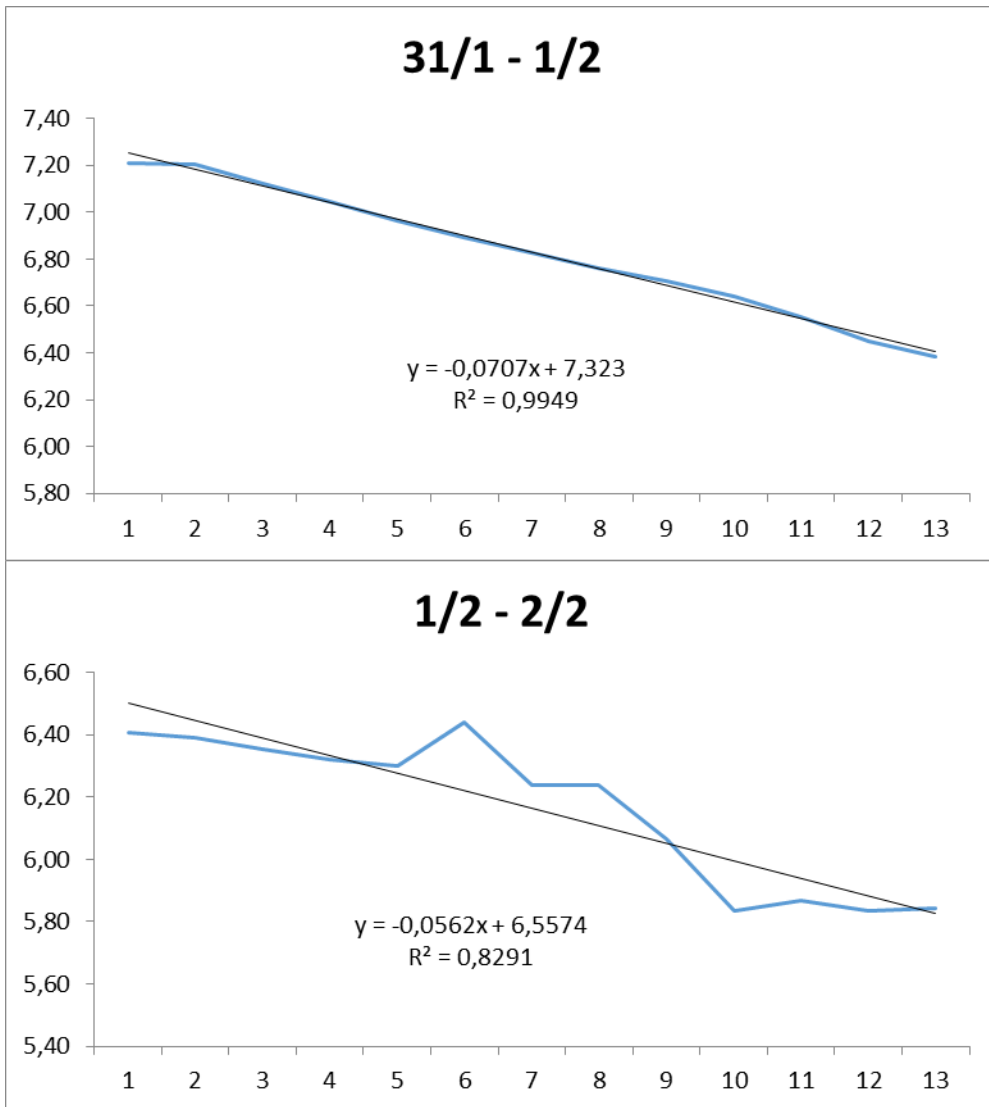


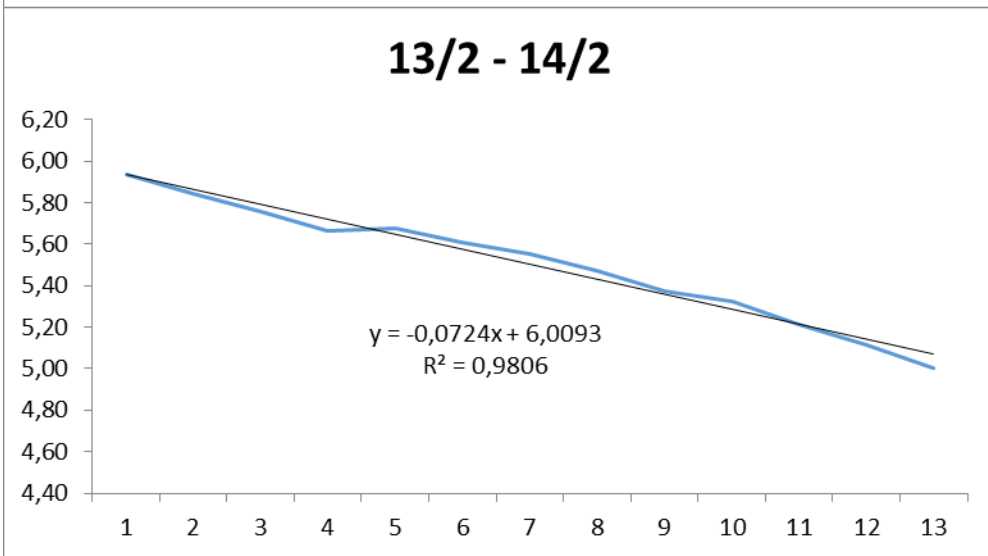
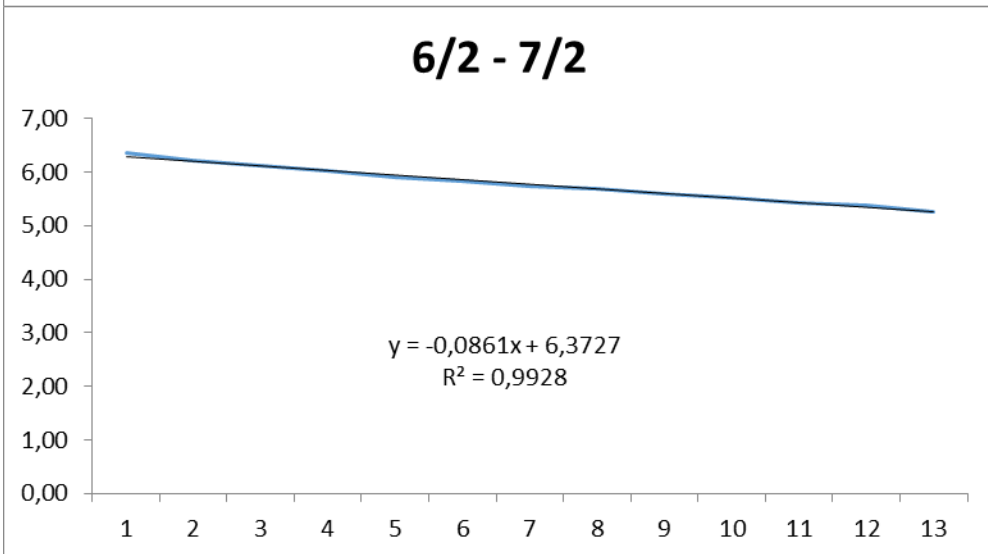
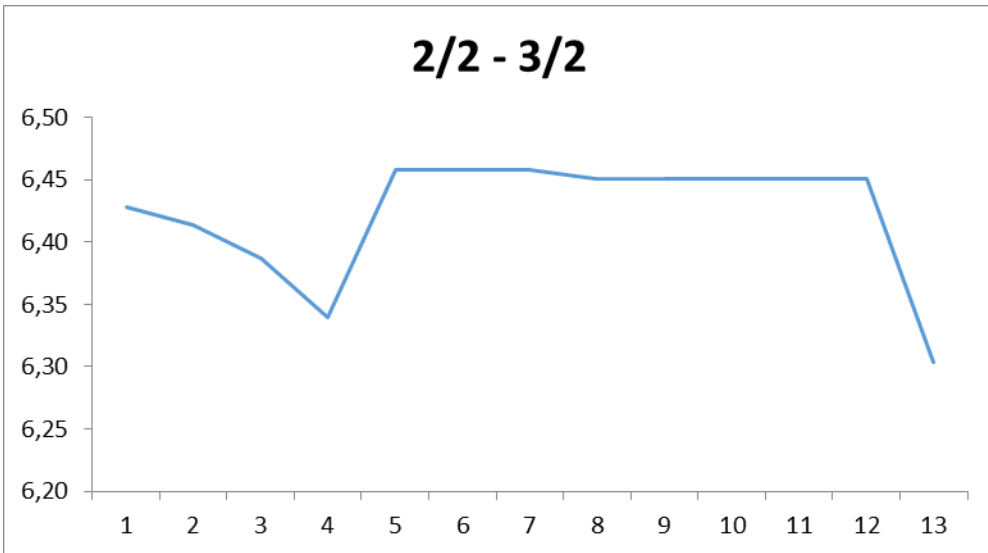
5/5 - 6/5

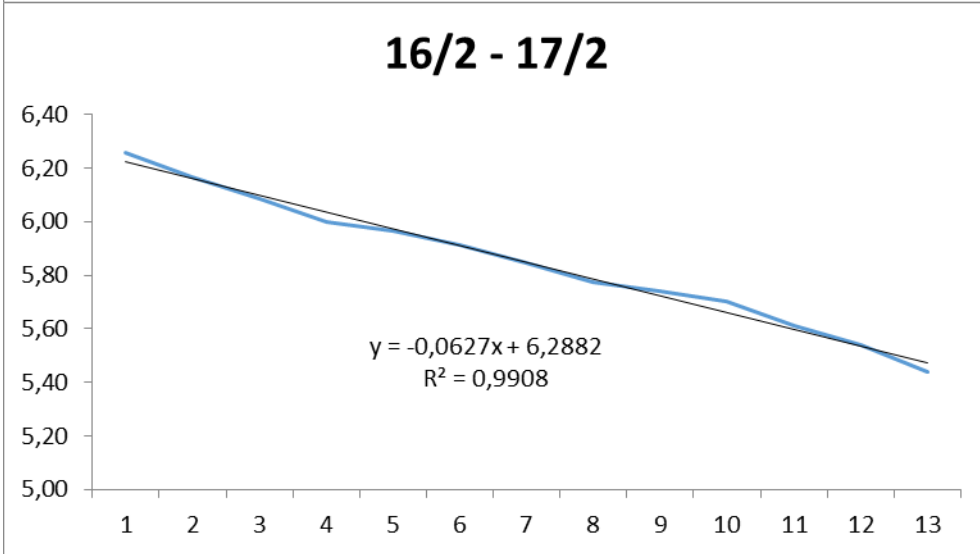
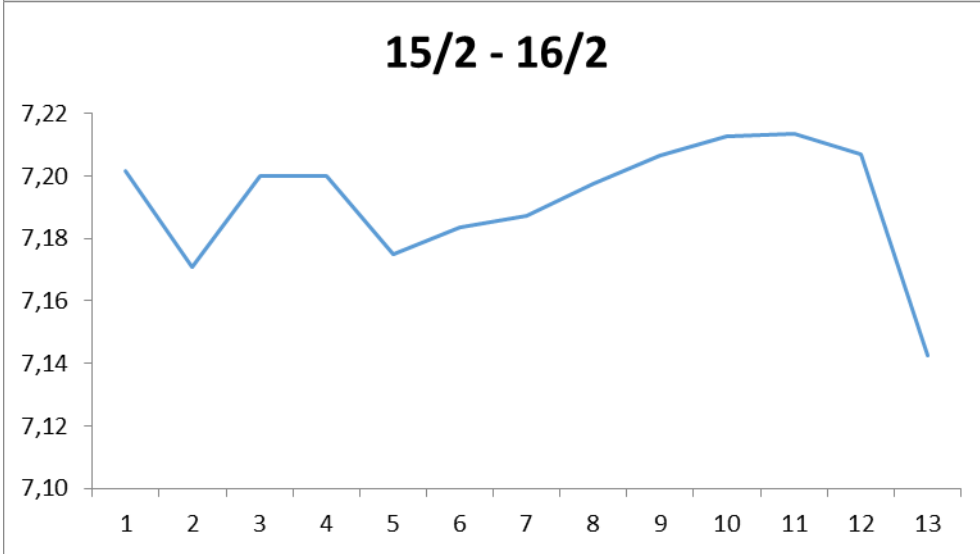
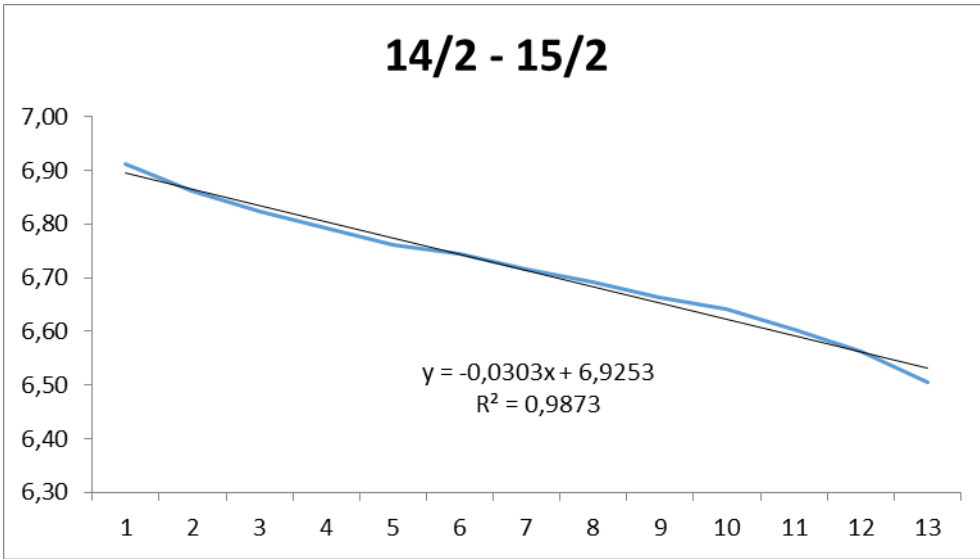


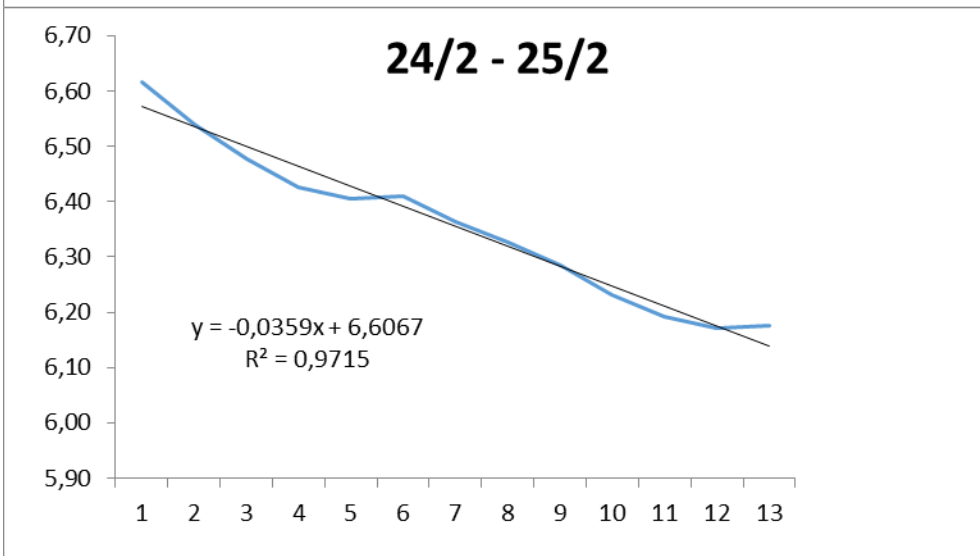
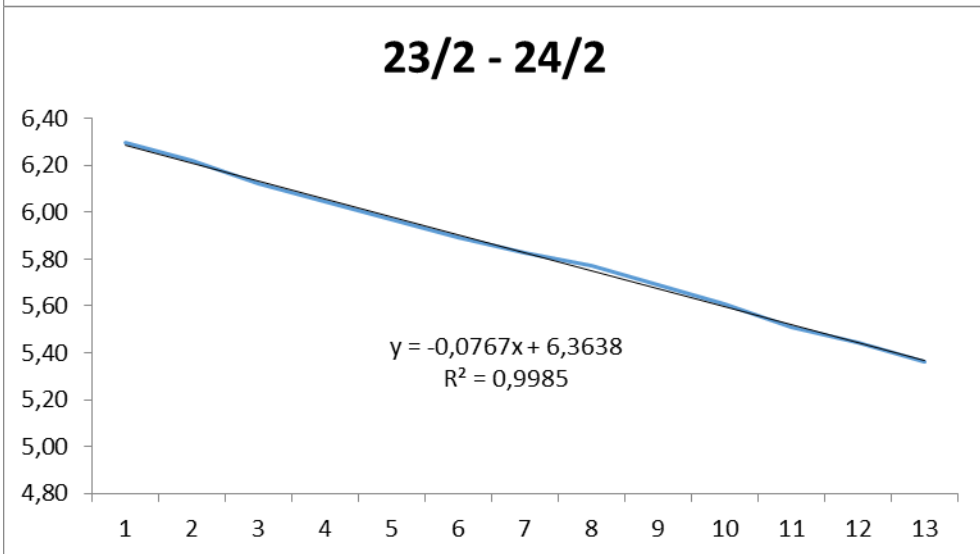
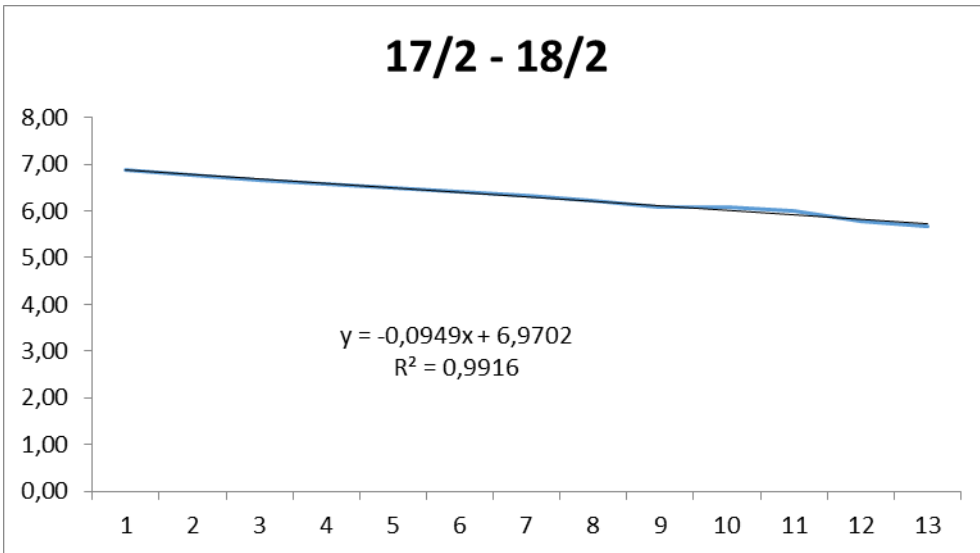


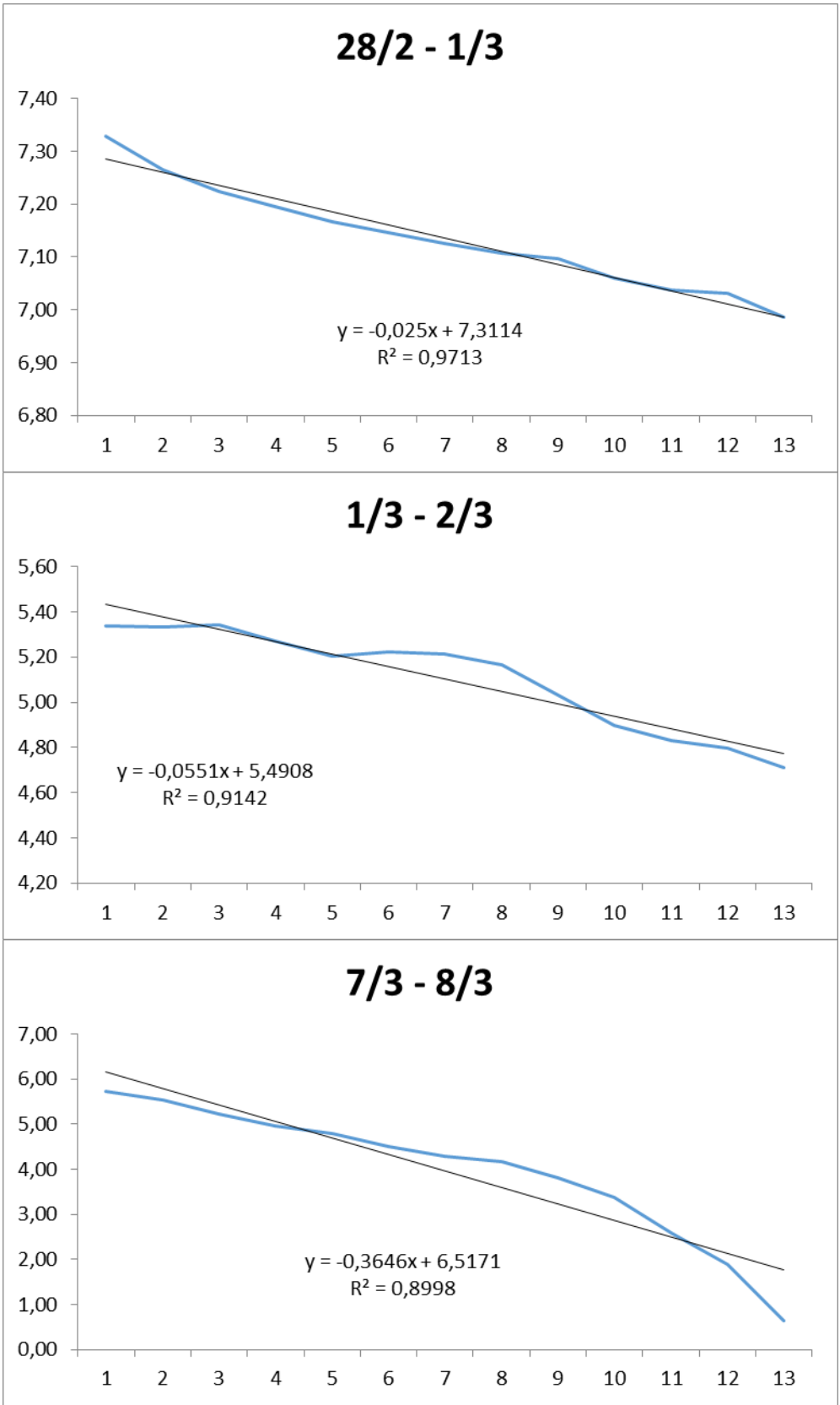
Αίθουσα Β1:



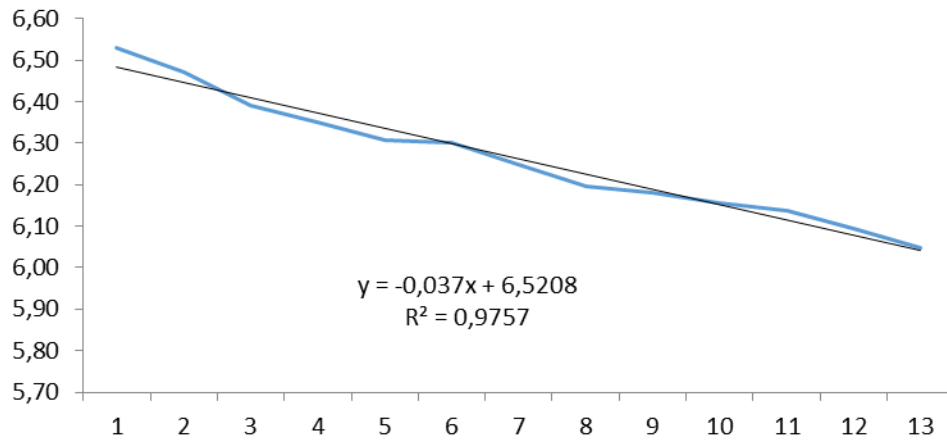




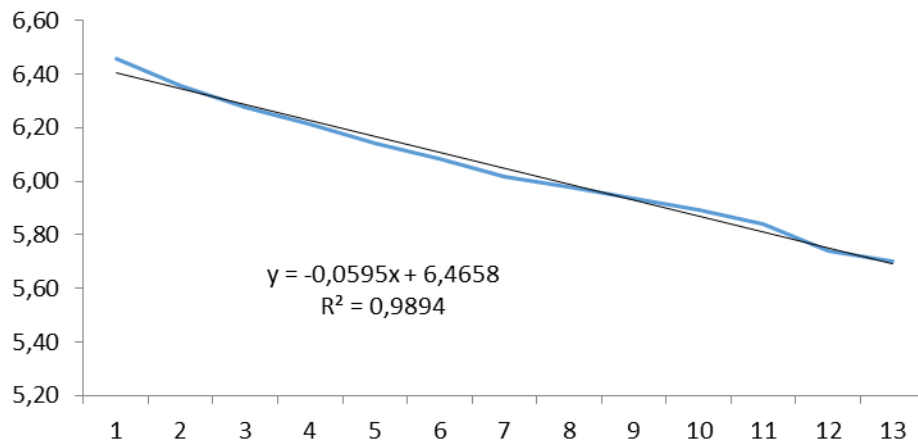




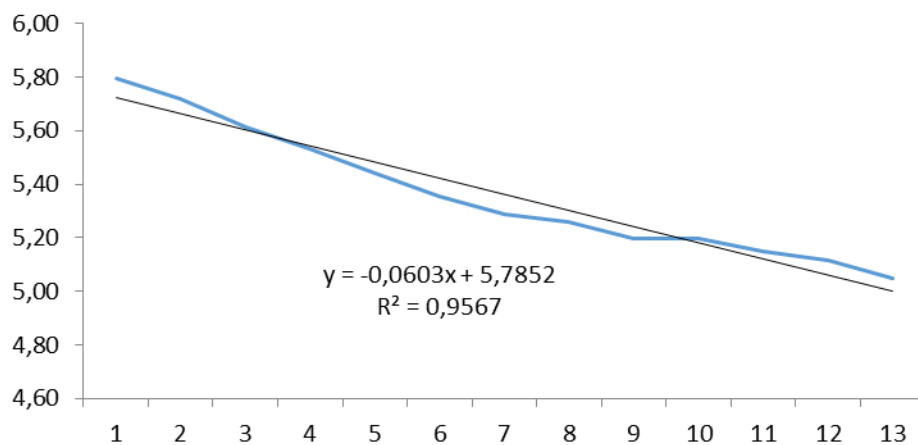
8/3 - 9/3



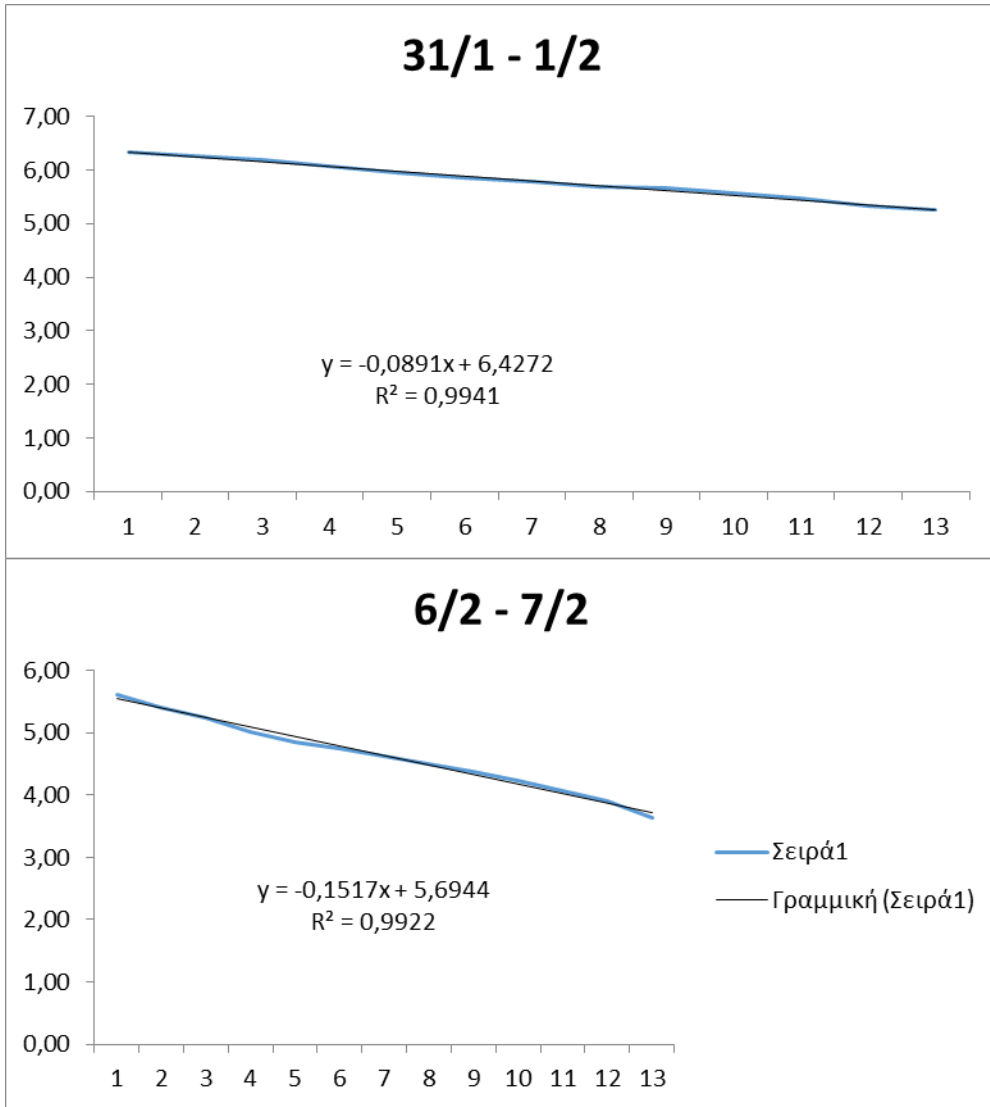
27/3 - 28/3



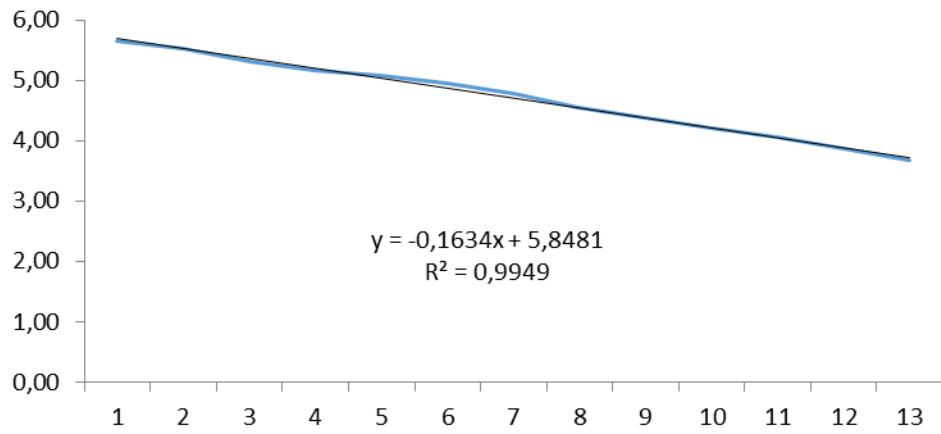
5/5 - 6/5



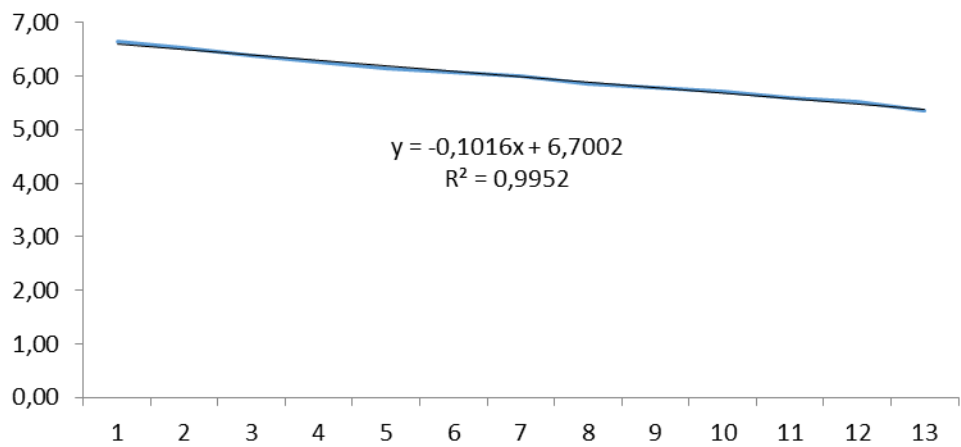
Αίθουσα Ε3:



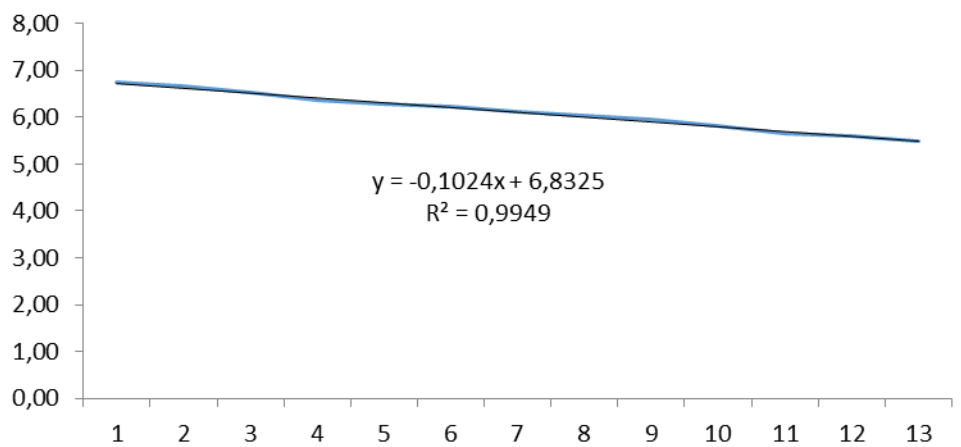
13/2 - 14/2

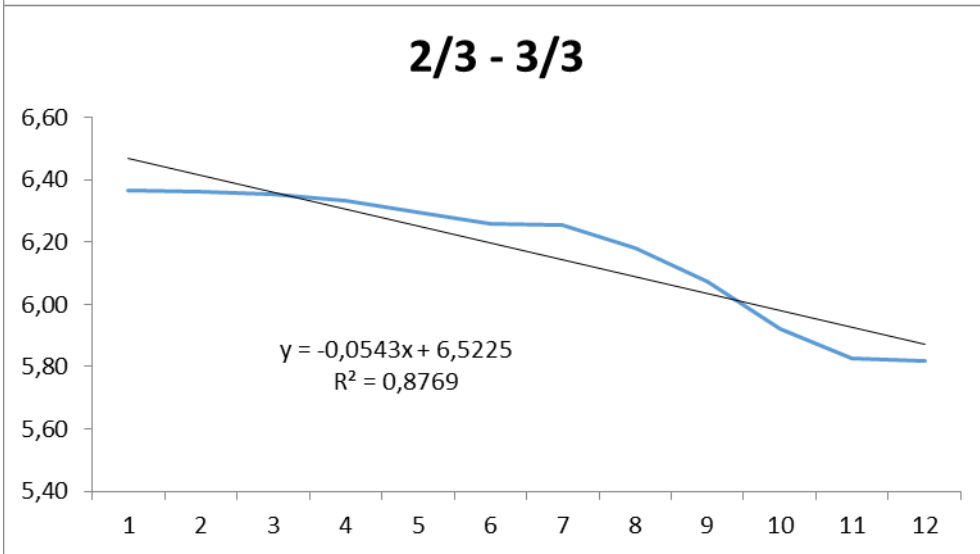
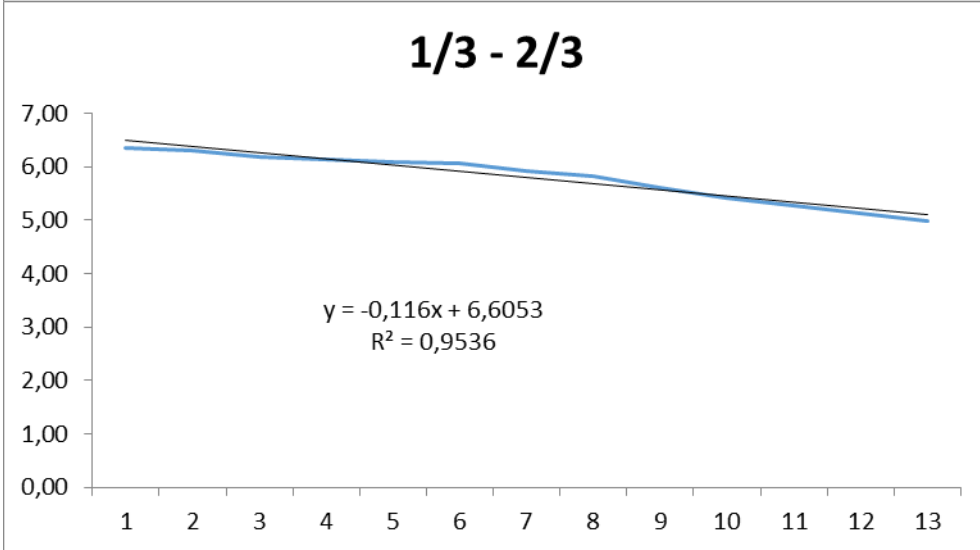
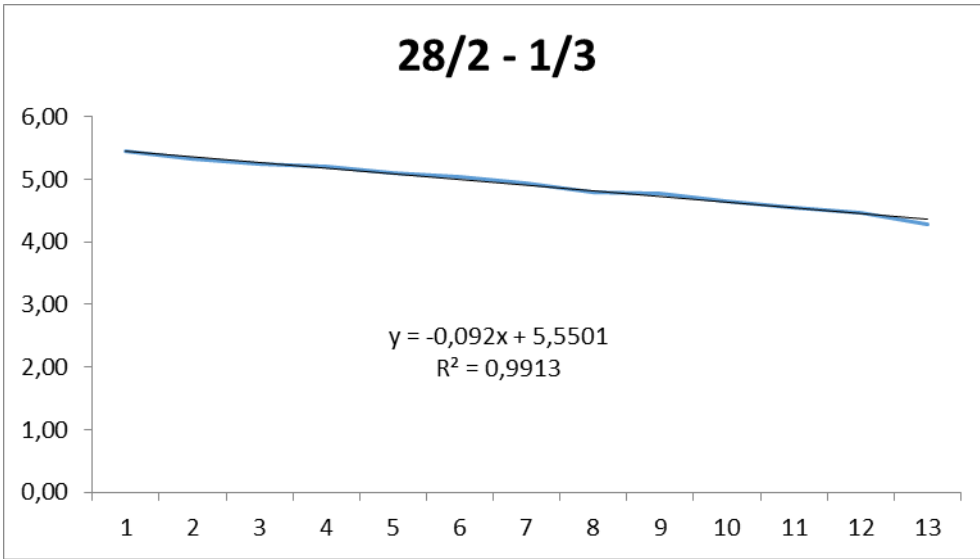


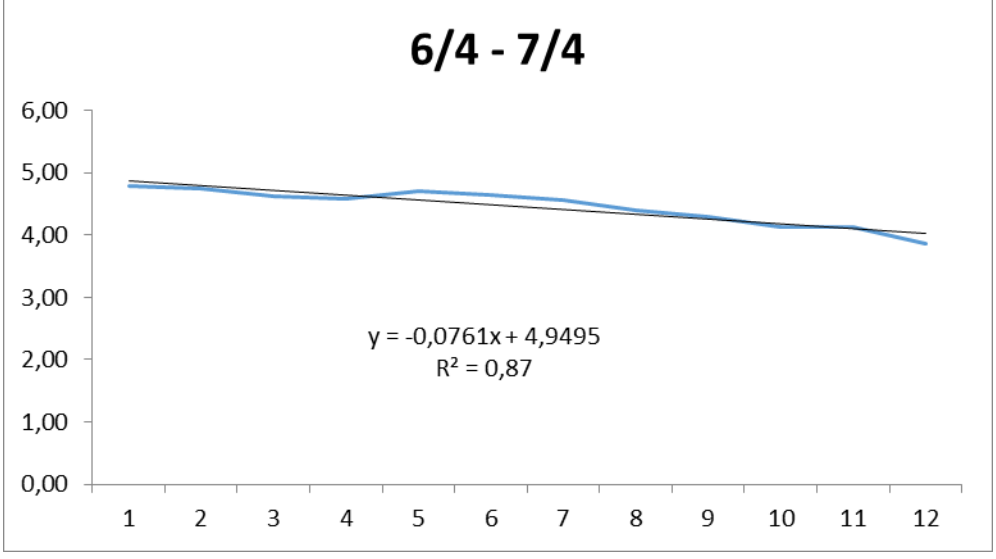
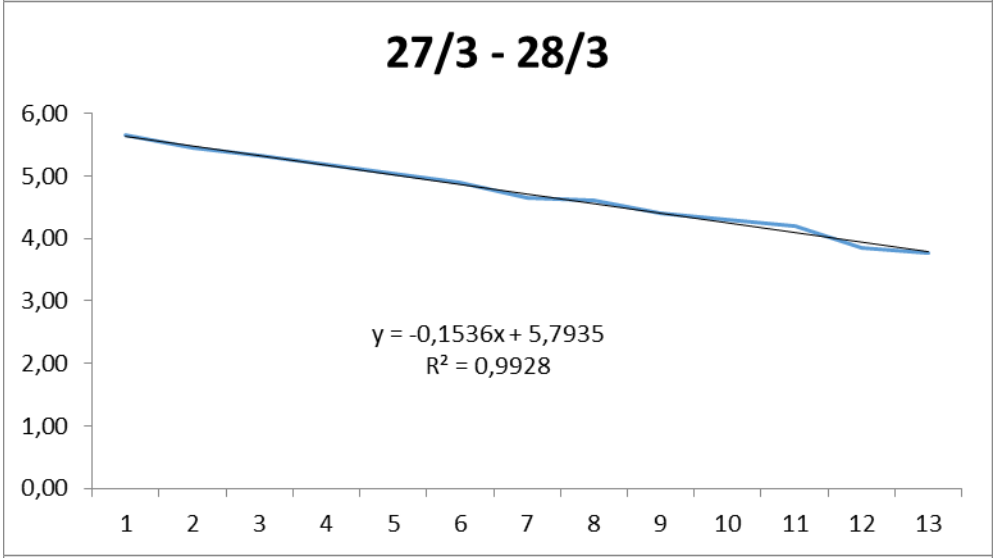
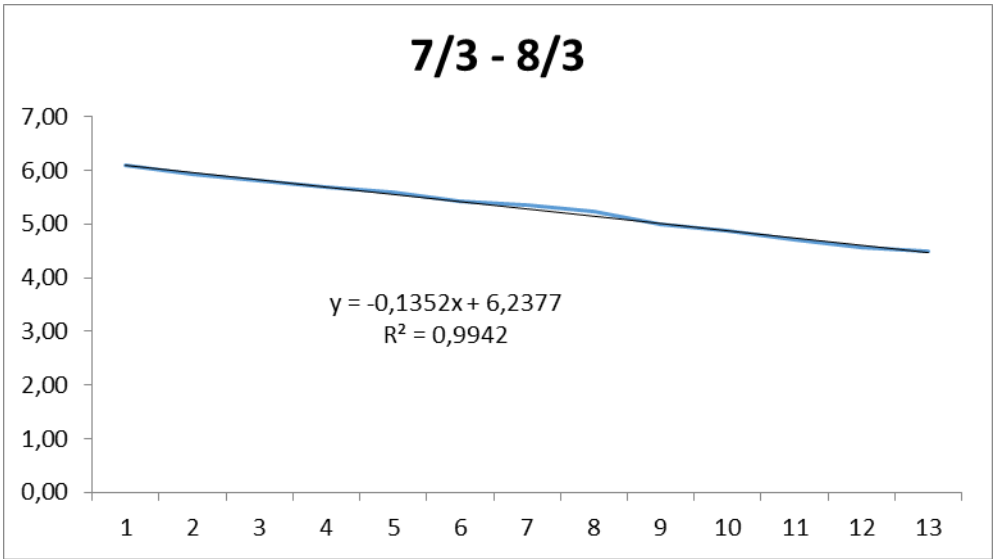
16/2 - 17/2

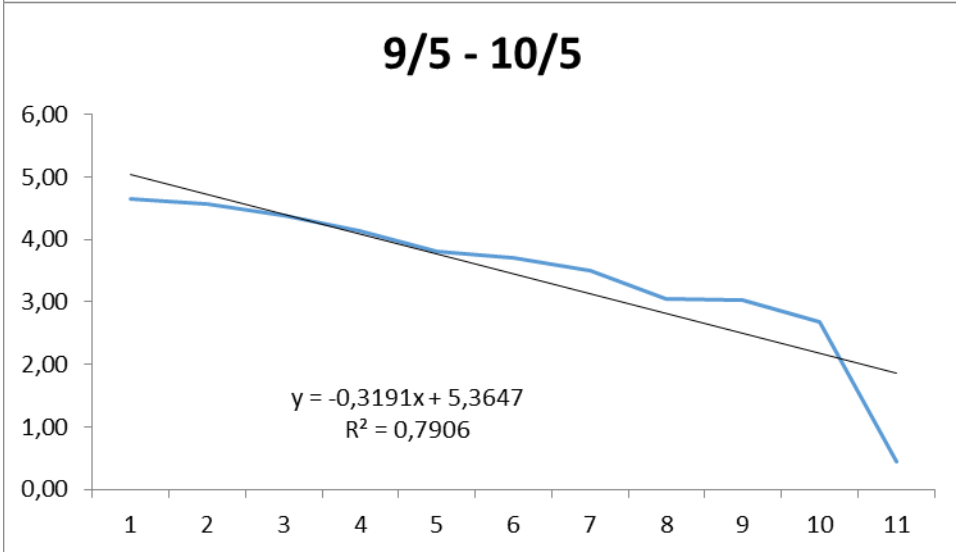
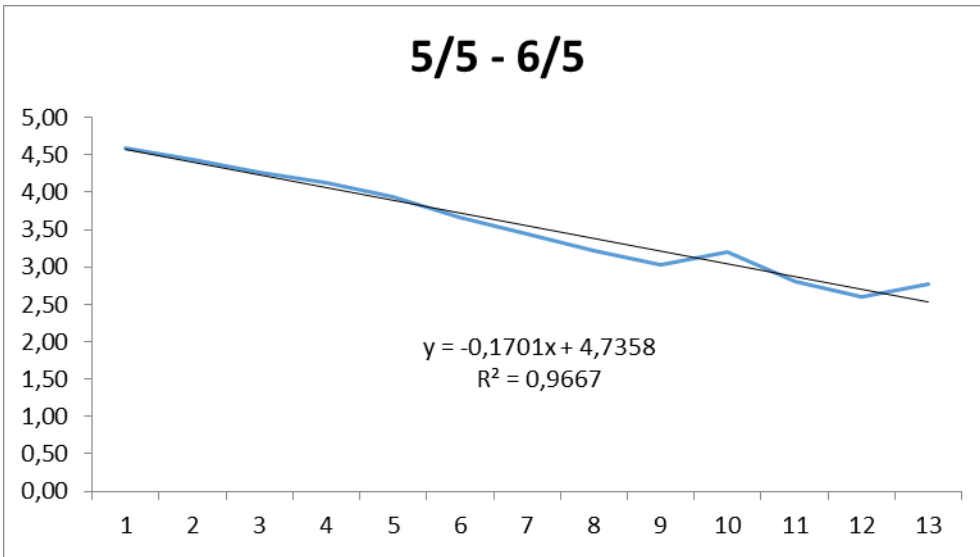


23/2 - 24/2

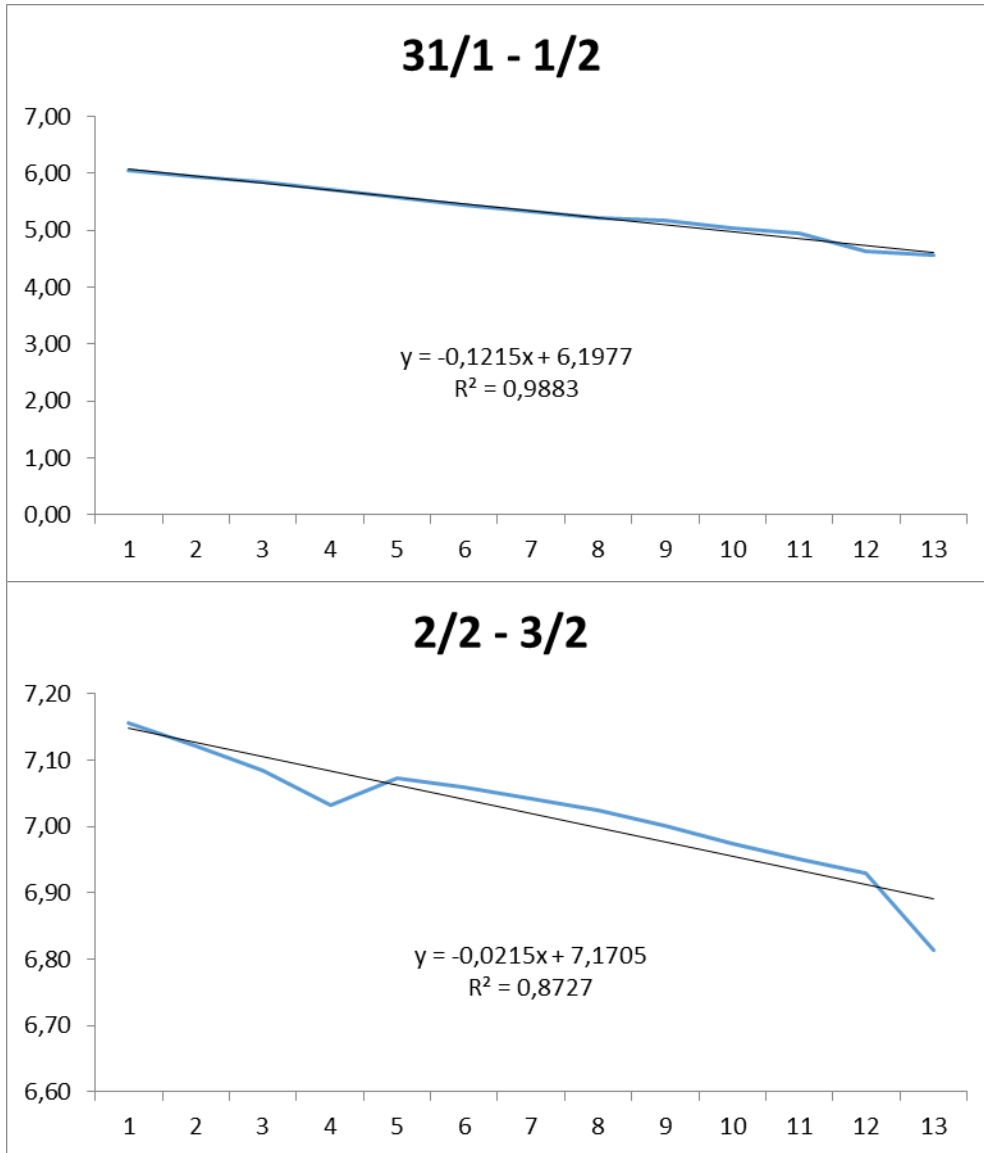


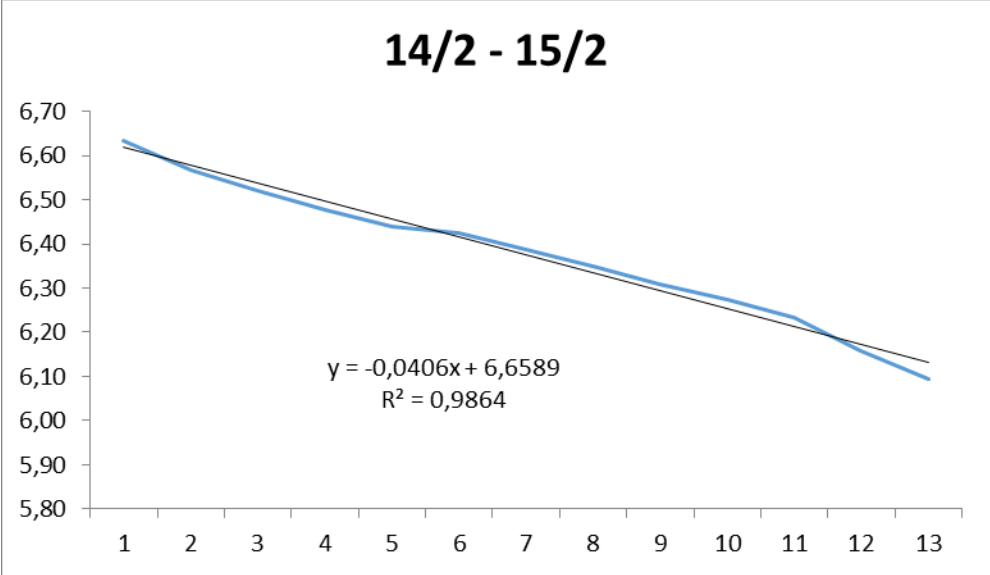
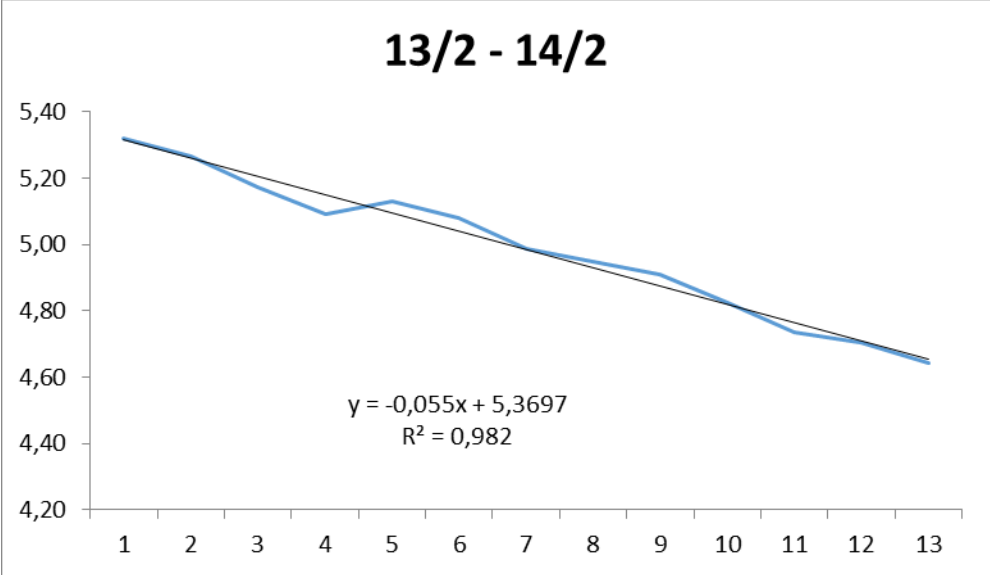


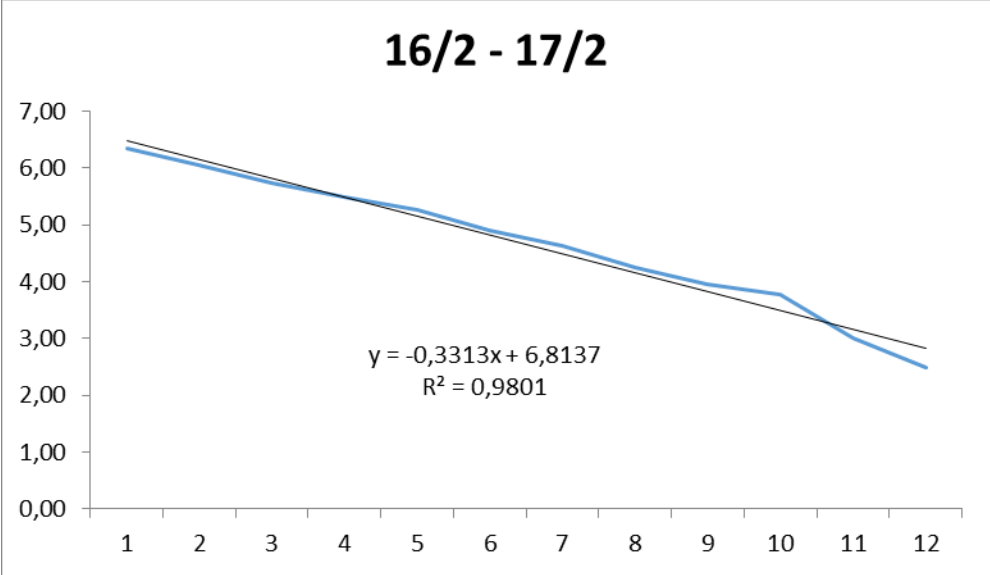
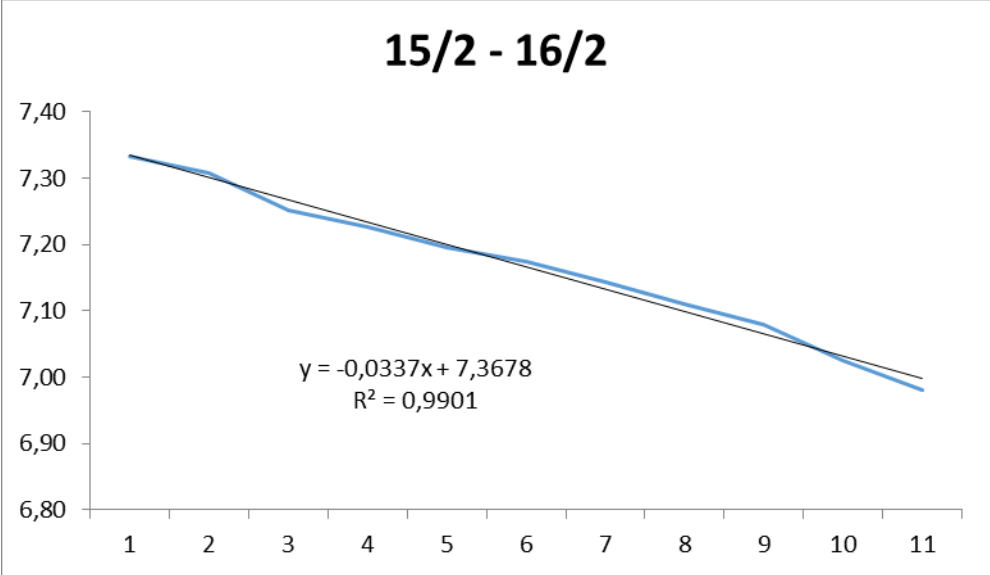




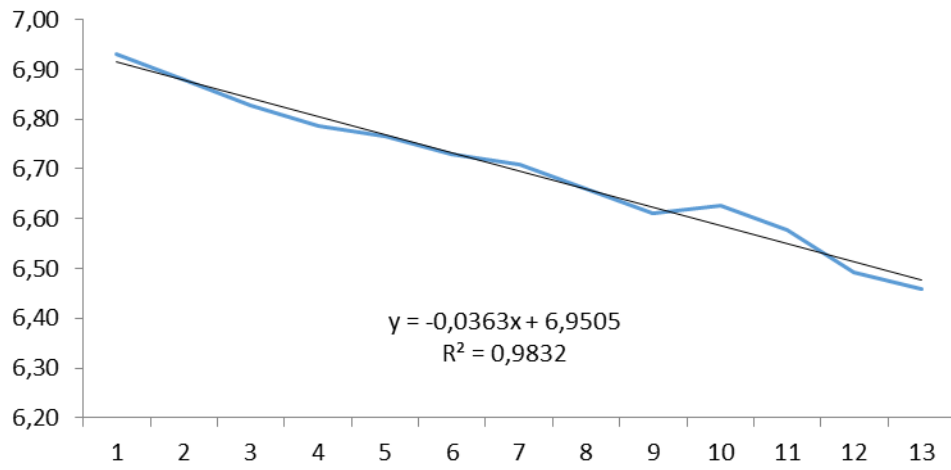
Αίθουσα Ε3:



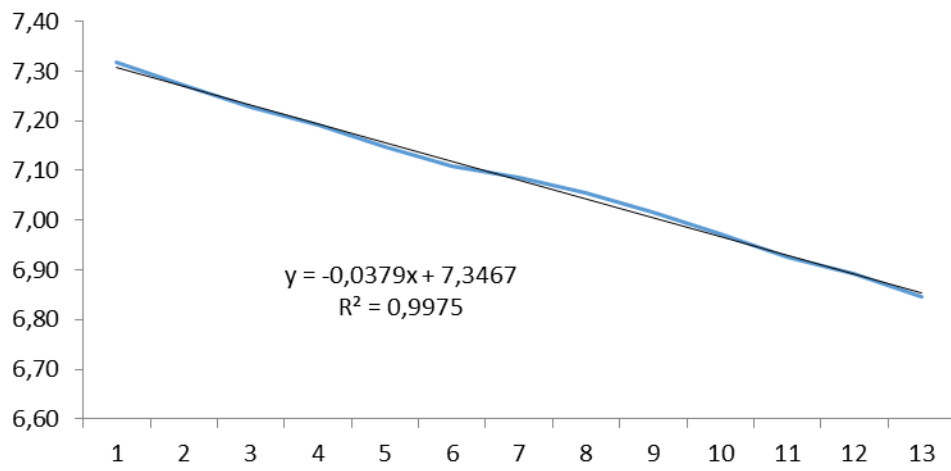




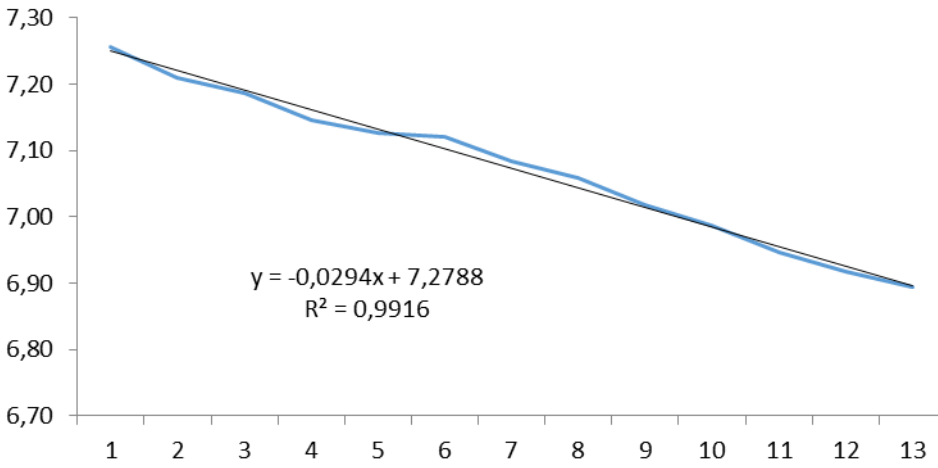
17/2 - 18/2



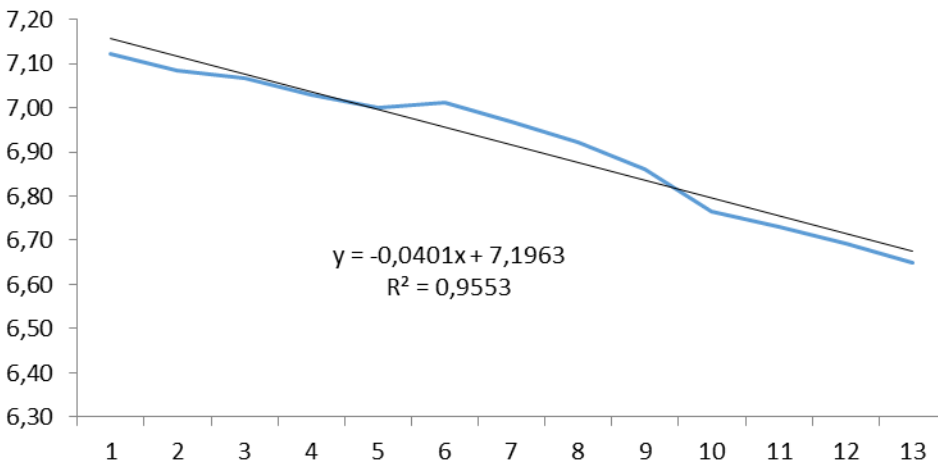
23/2 - 24/2

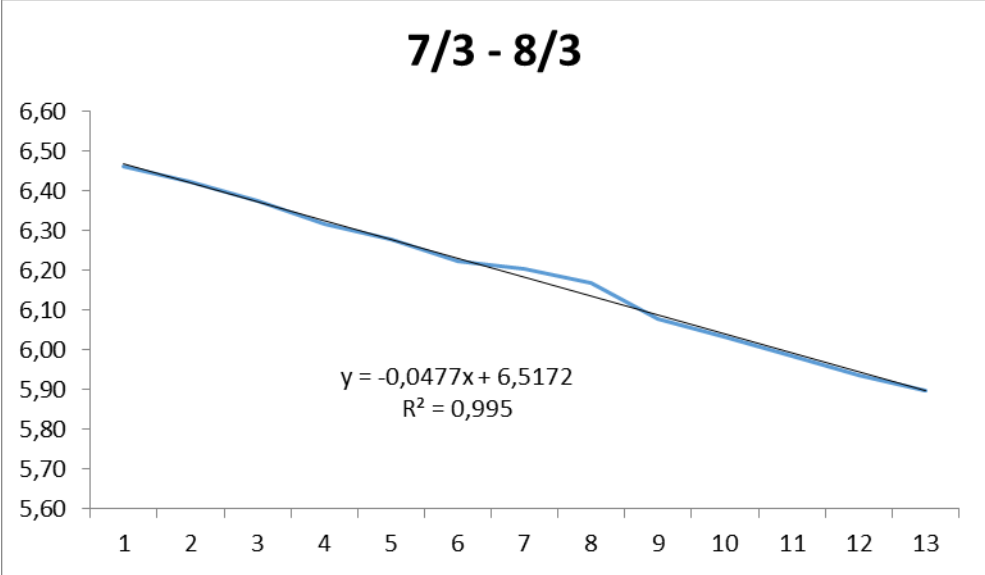
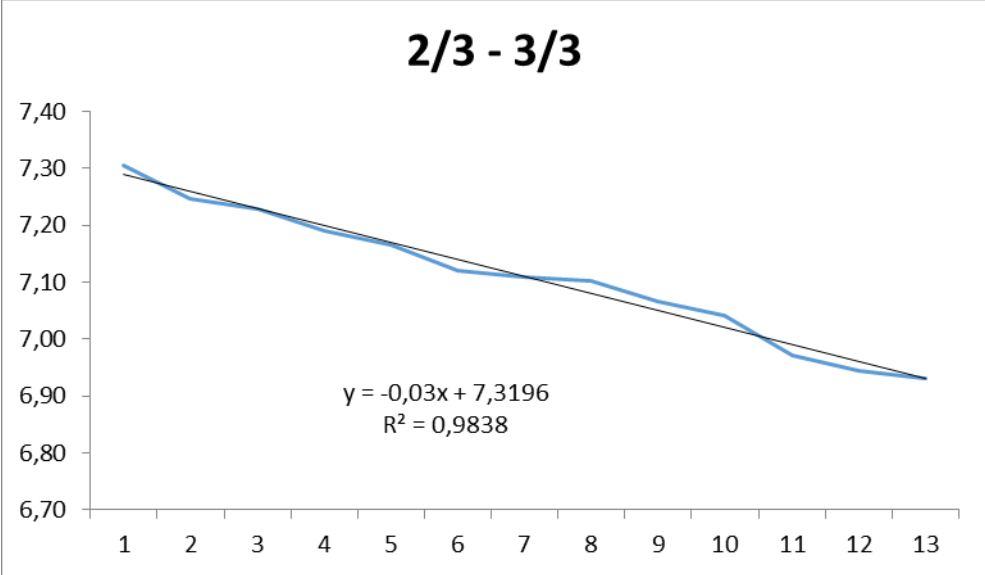


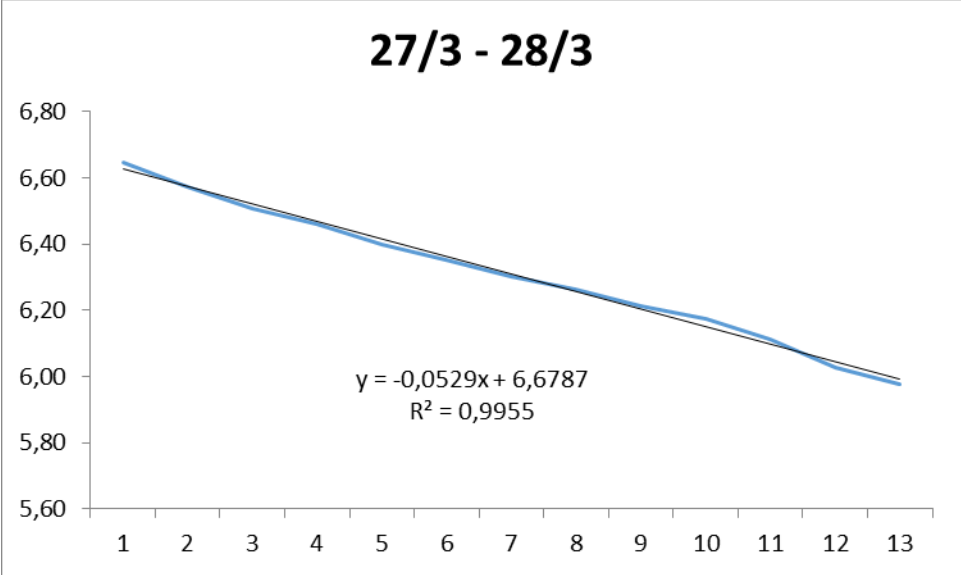
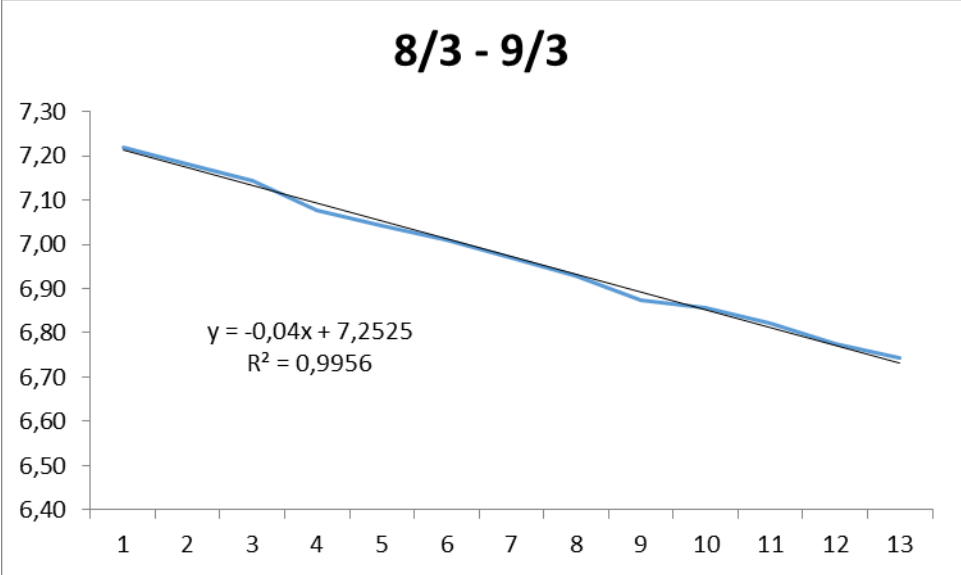
24/2 - 25/2

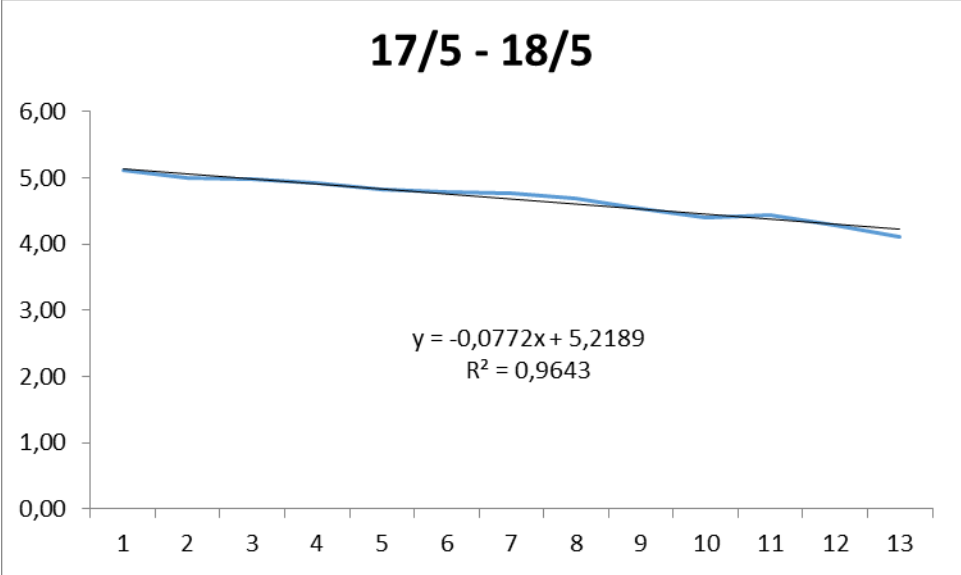
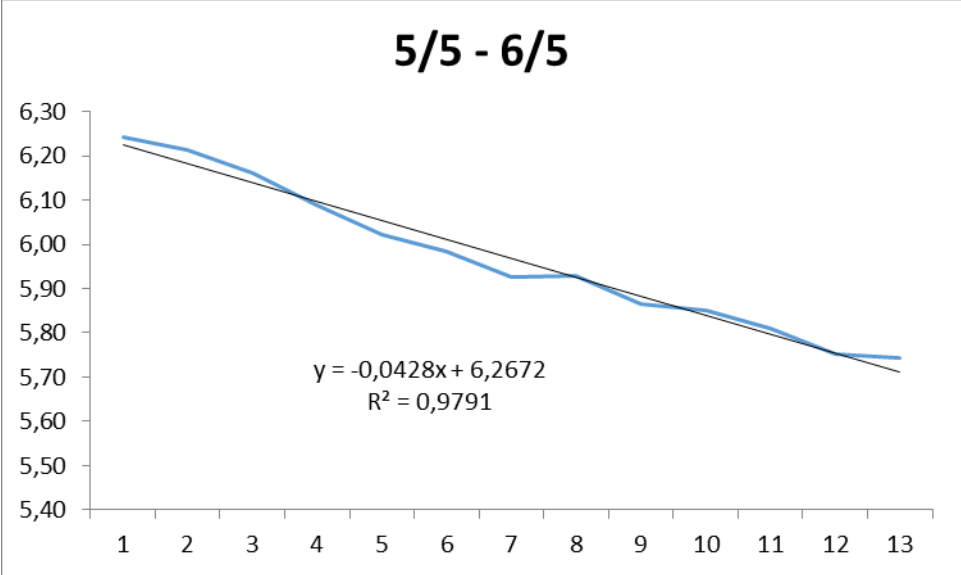


1/3 - 2/3

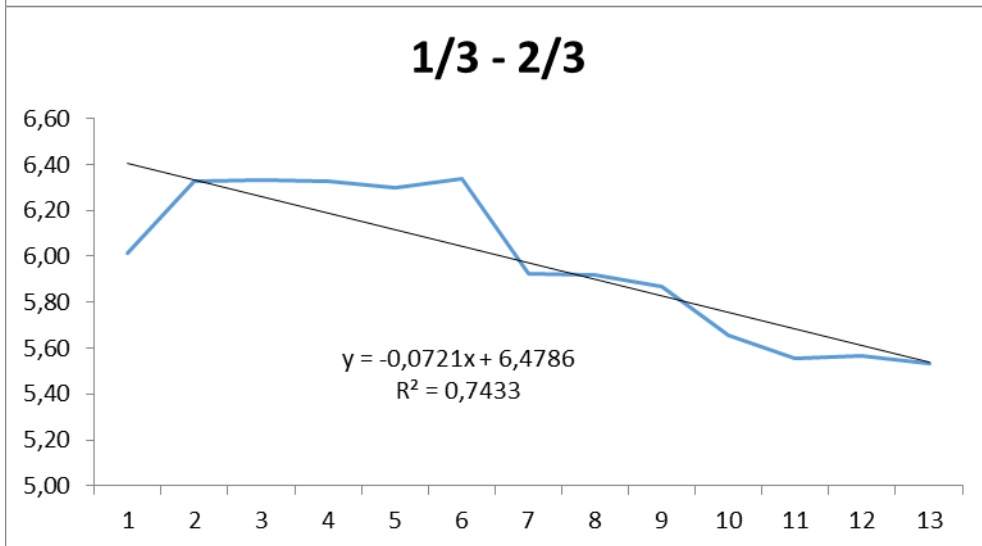
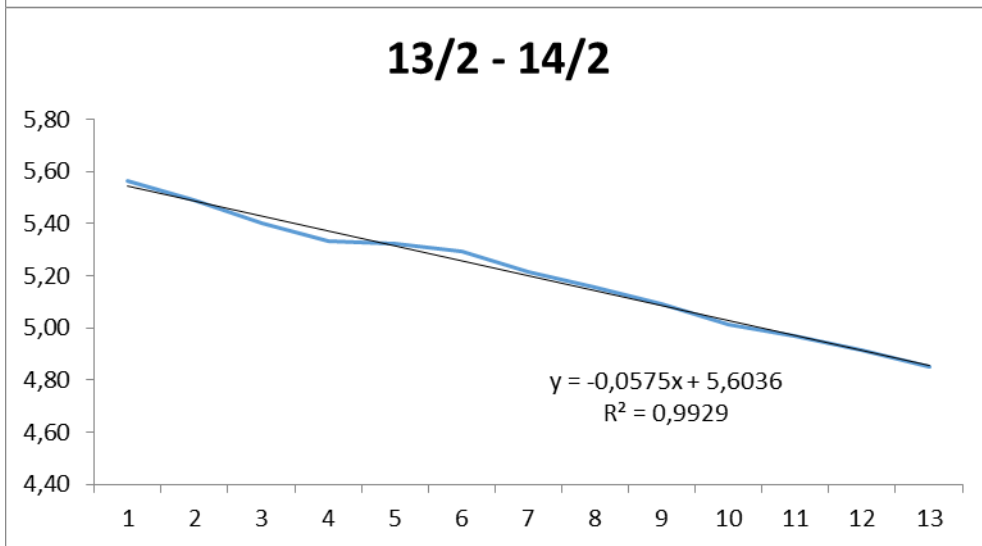
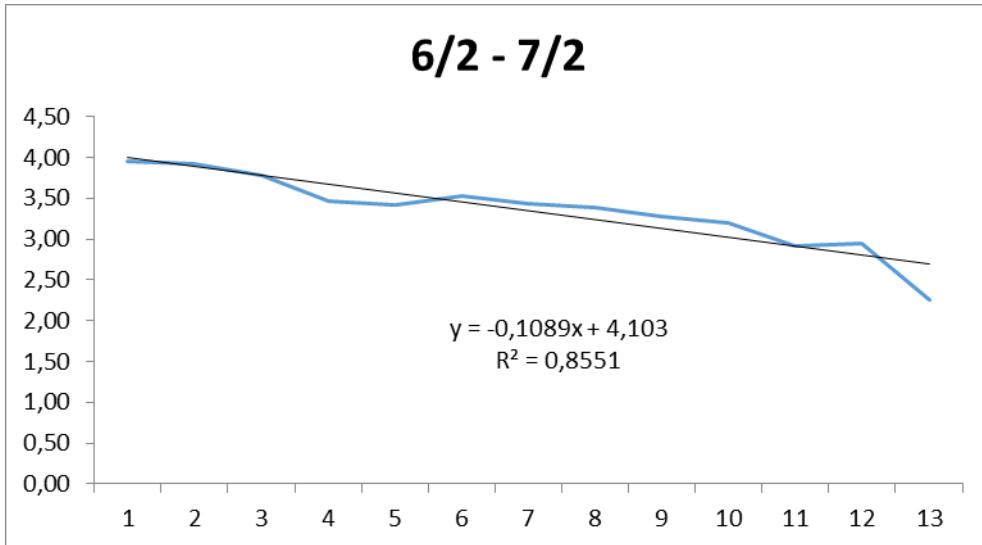


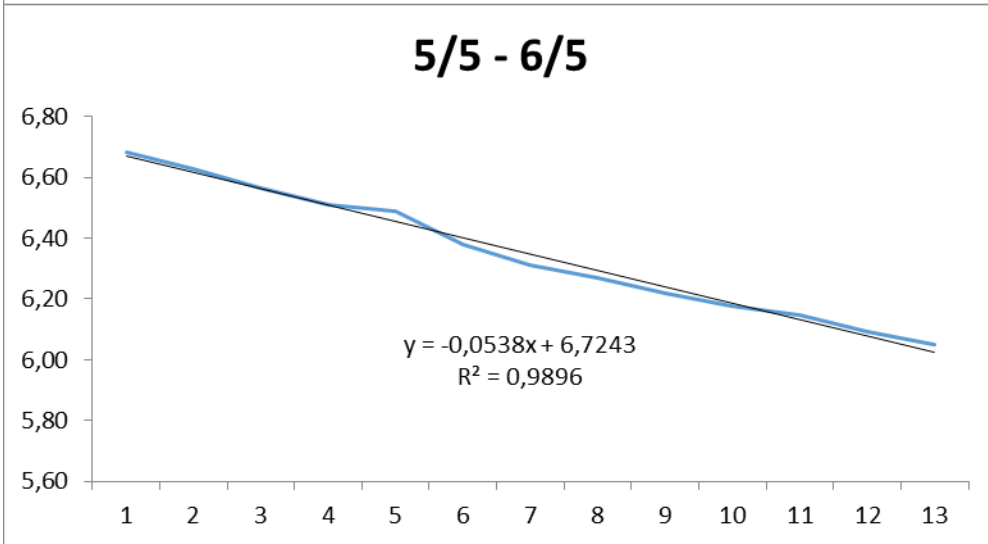
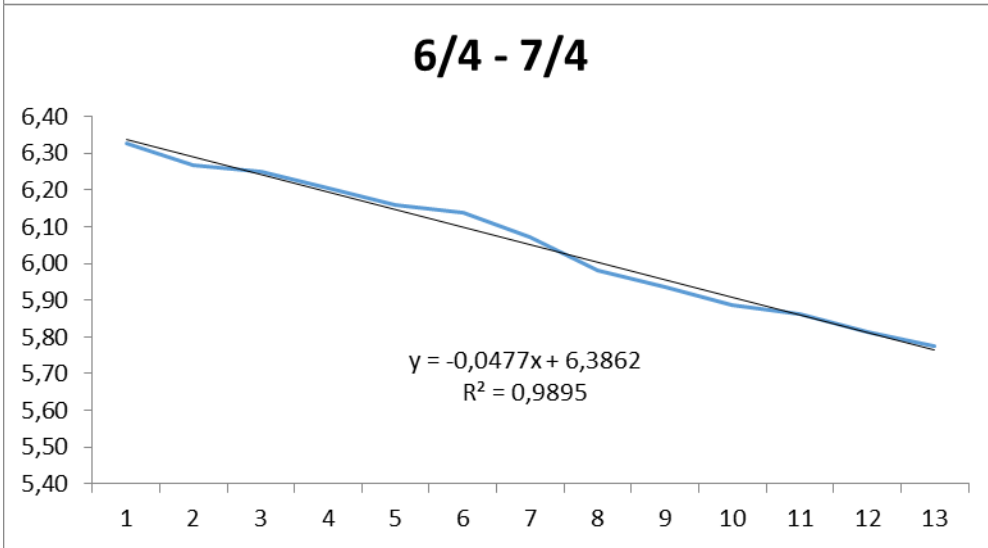
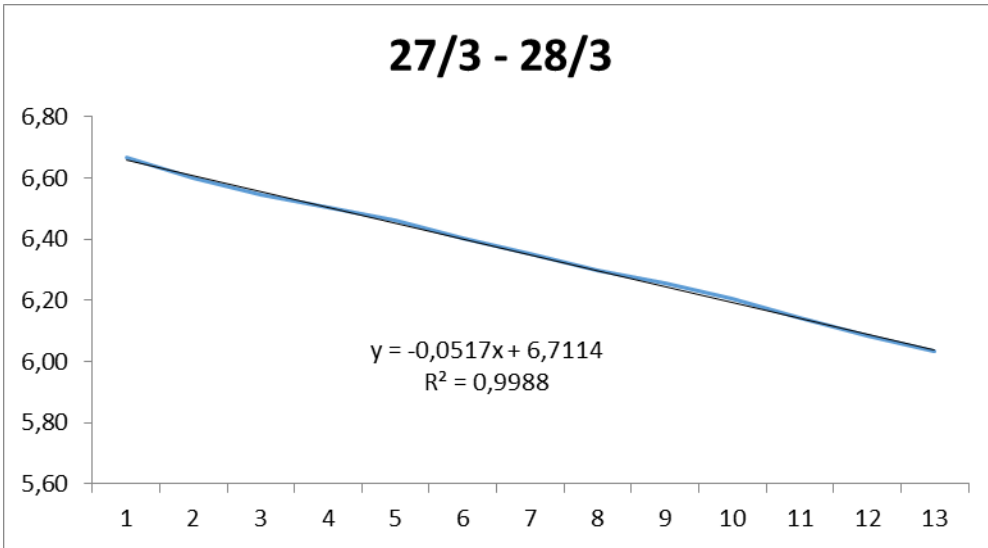




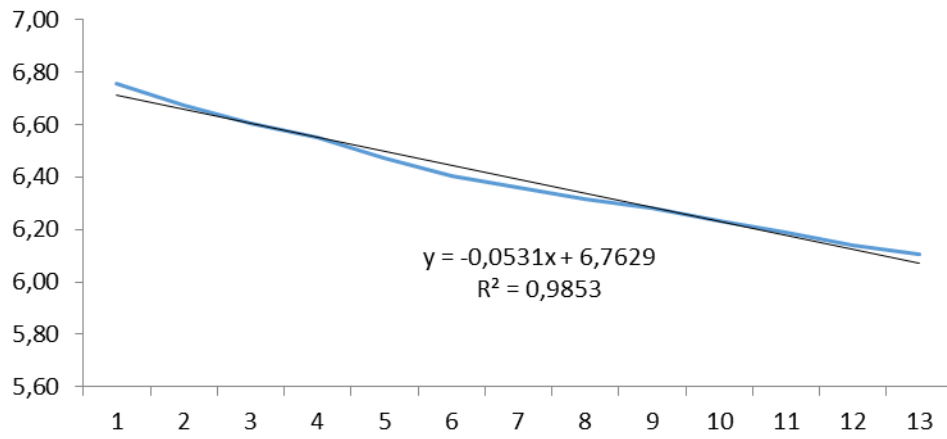


Αίθουσα Α3:

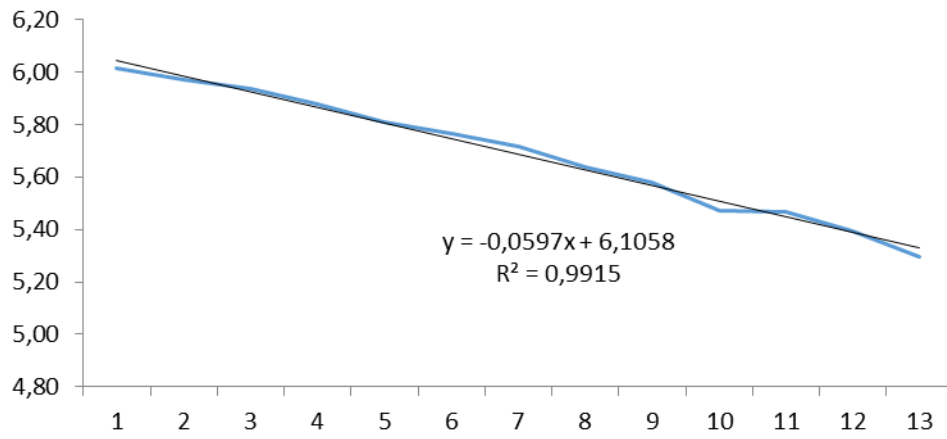




9/5 - 10/5

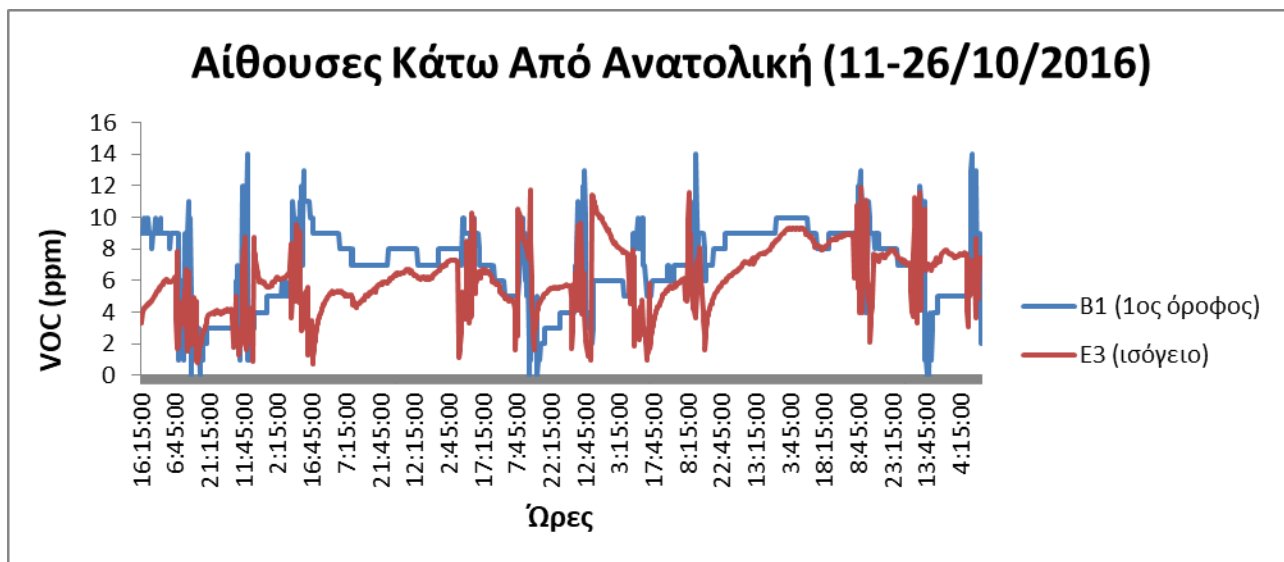
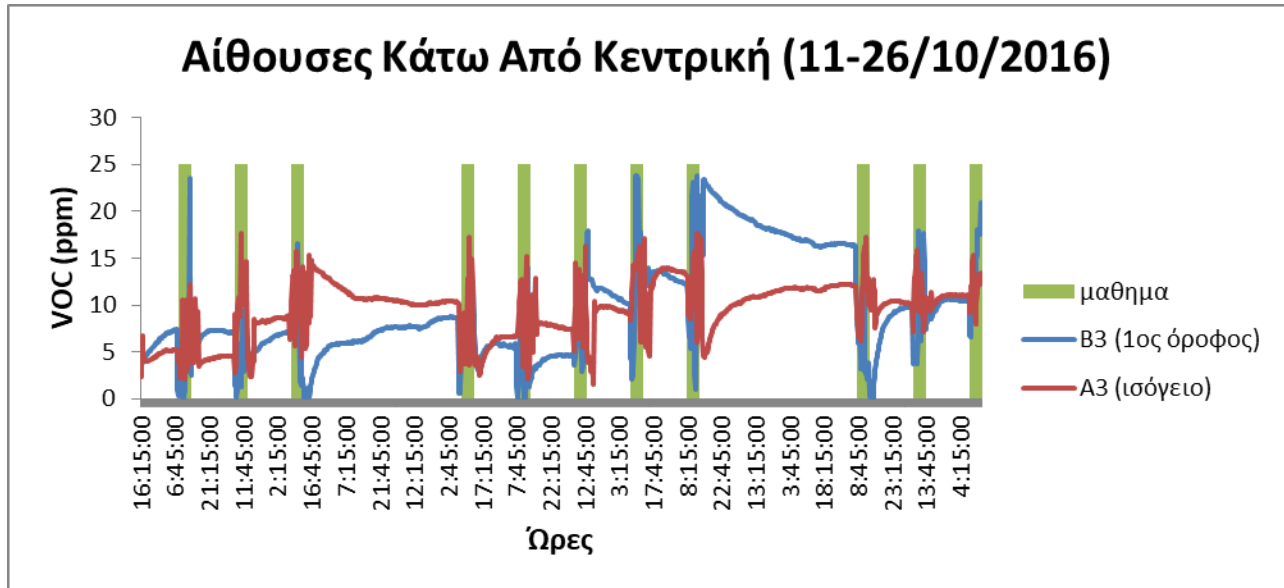


17/5 - 18/5

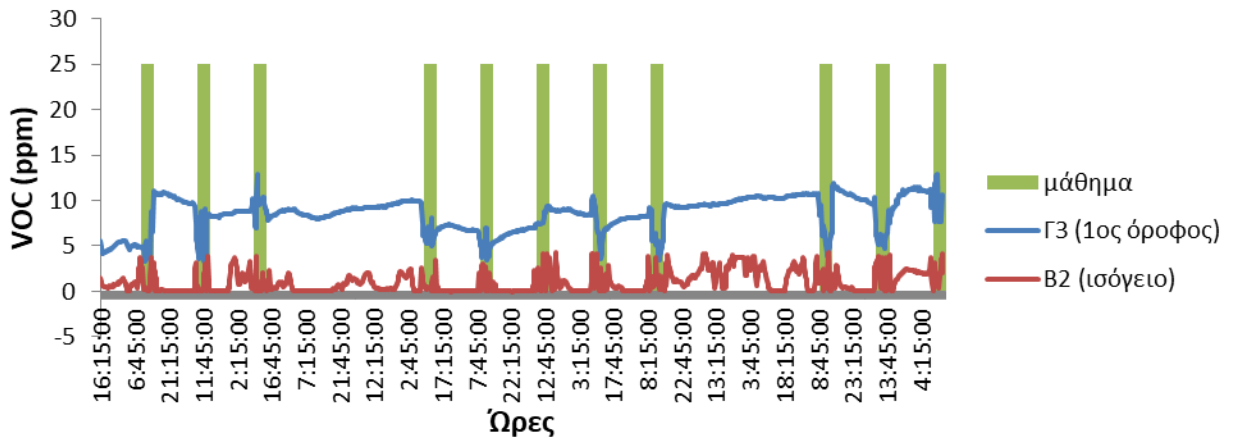


Παράρτημα Ε: Πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOC)

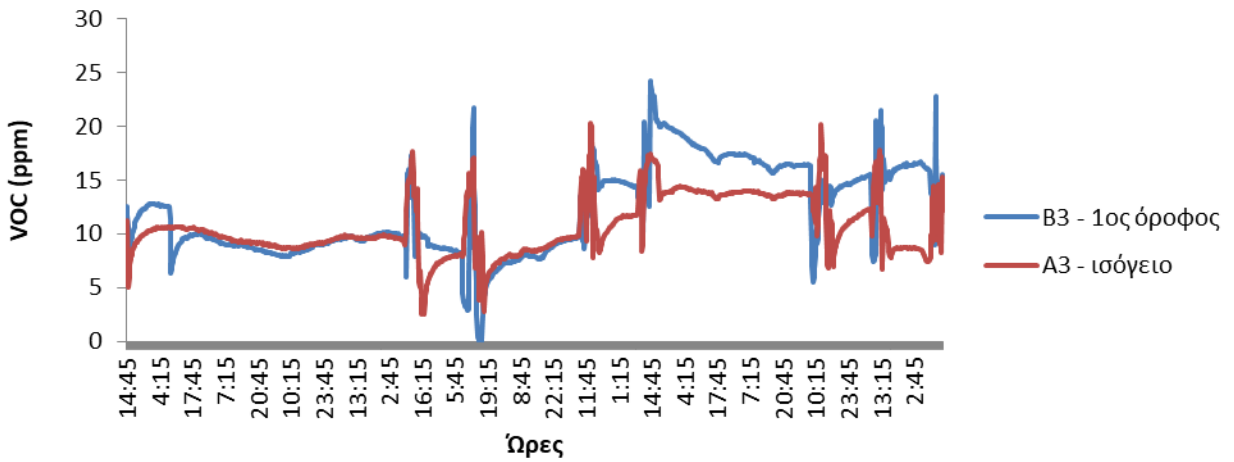
1) Ετήσια αποτελέσματα



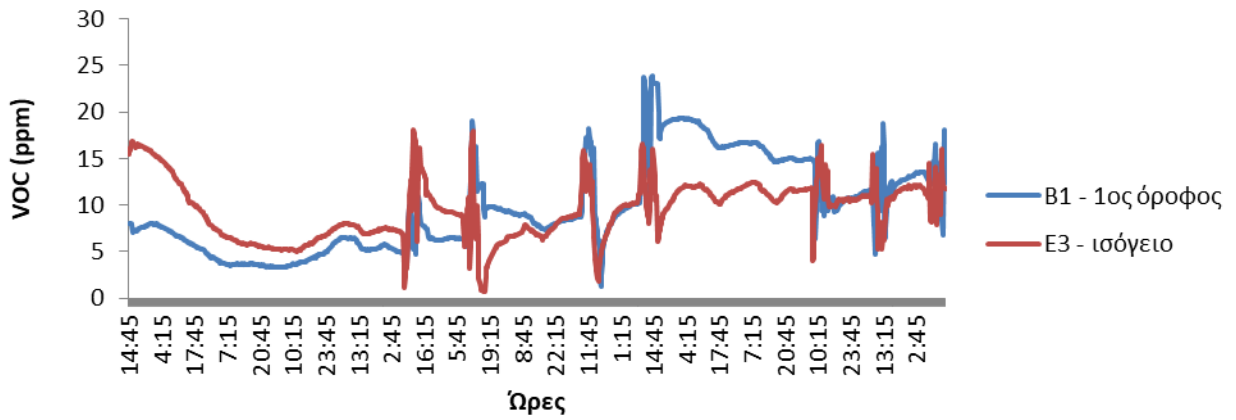
Αίθουσες Κάτω Από Πράσινη (11-26/10/2016)



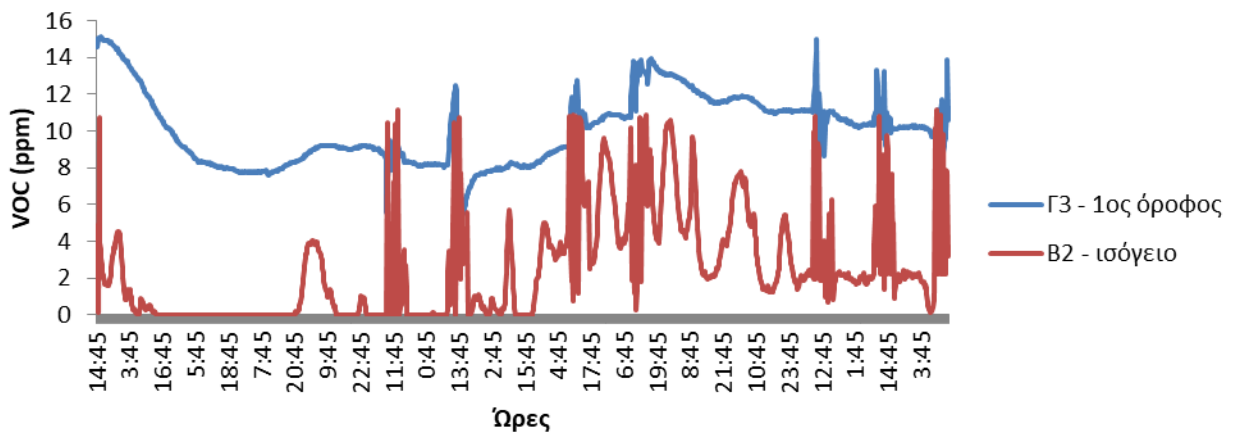
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική 26/10 - 9/11/2016



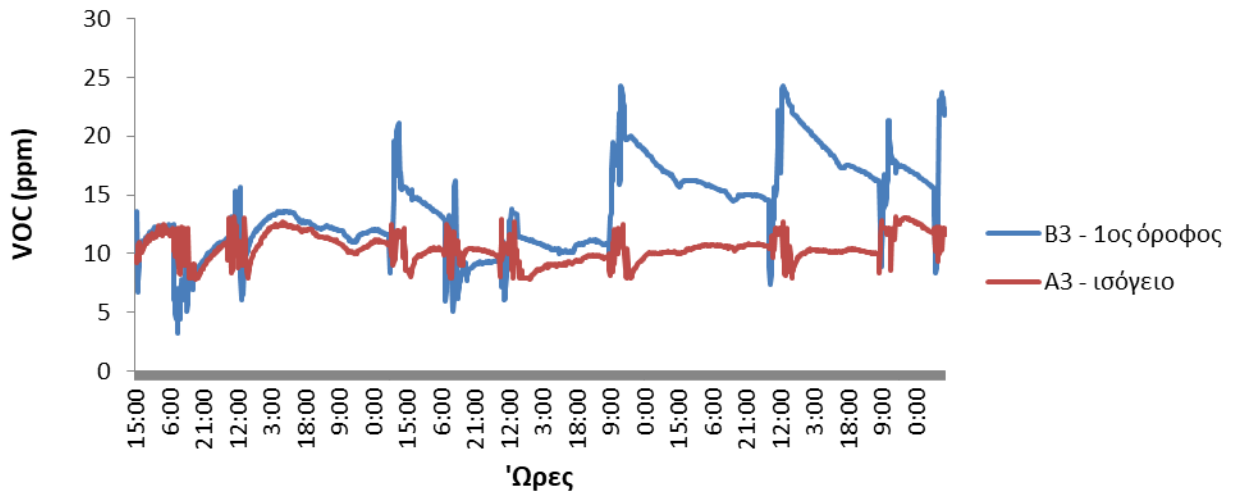
Αίθουσες Κάτω από Ανατολική 26/10 - 9/11/2016



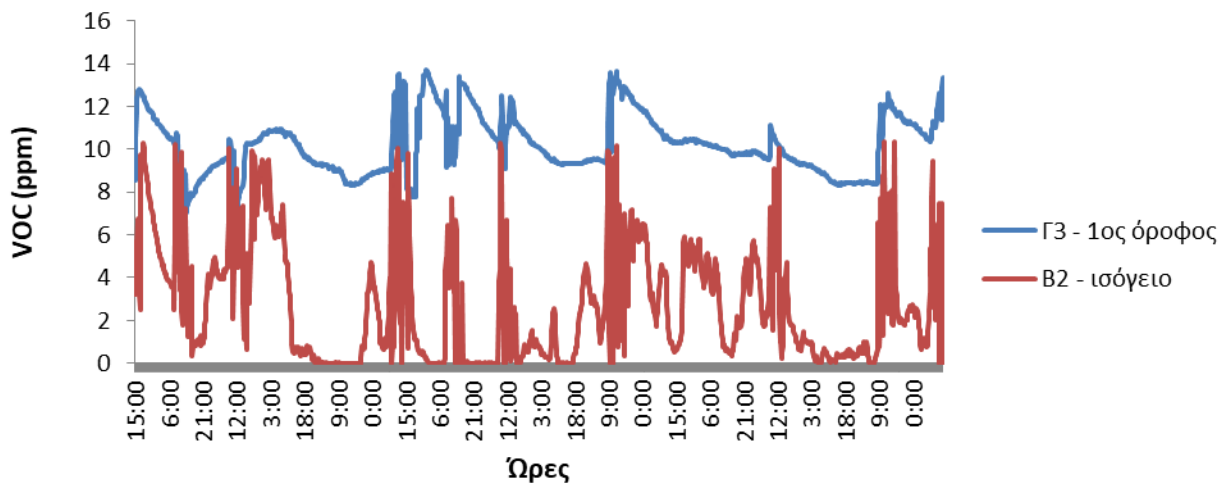
Αίθουσες Κάτω από Πράσινη 26/10 - 9/11/2016



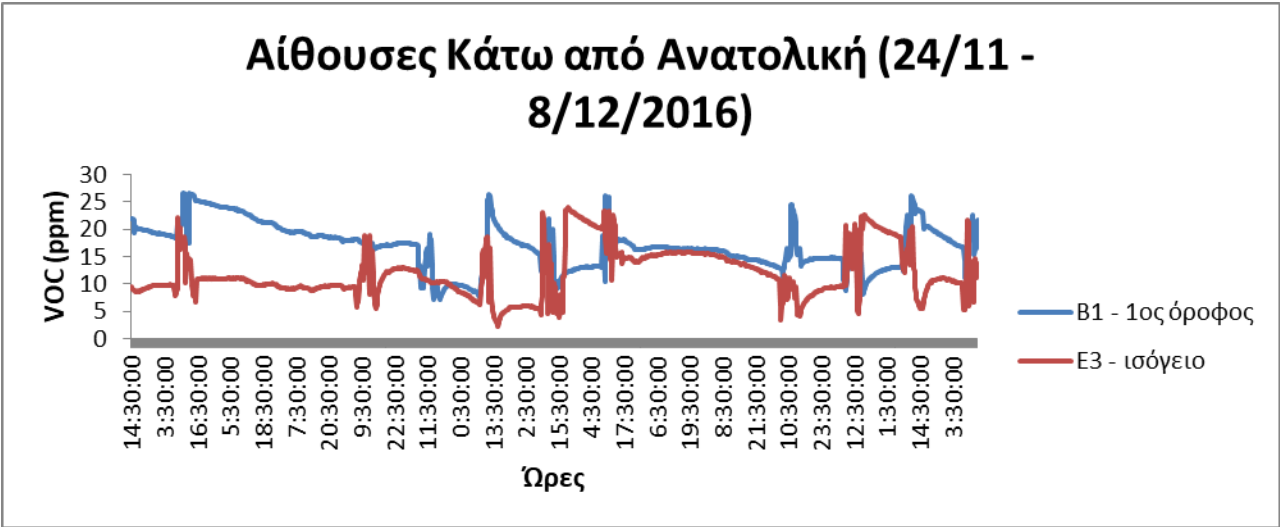
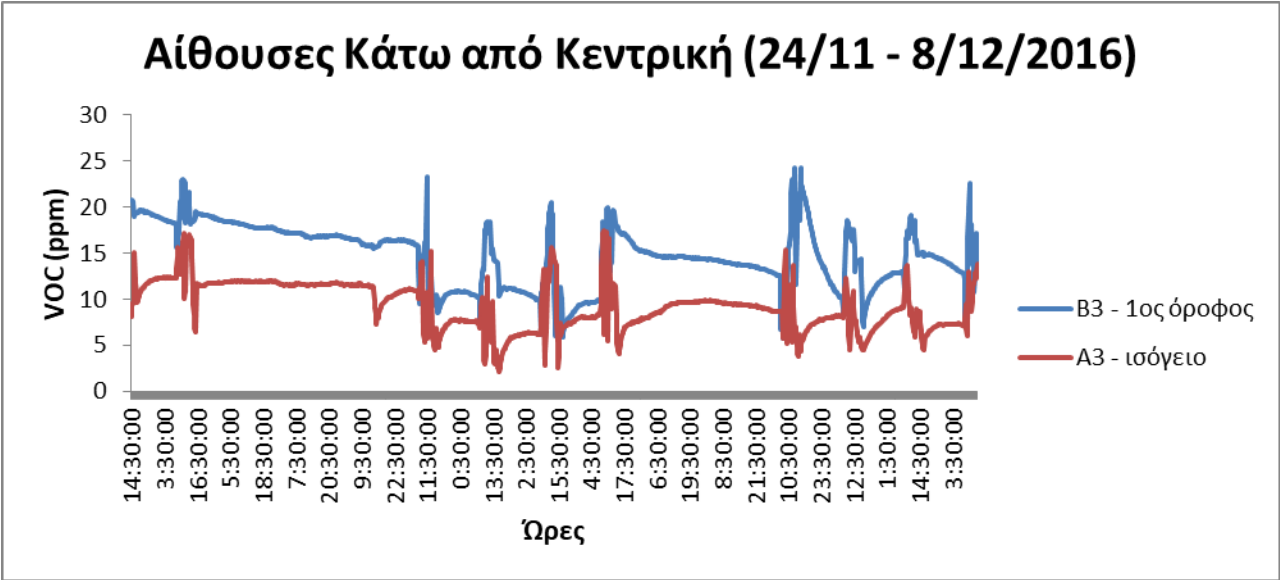
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική 9-24/11/2016



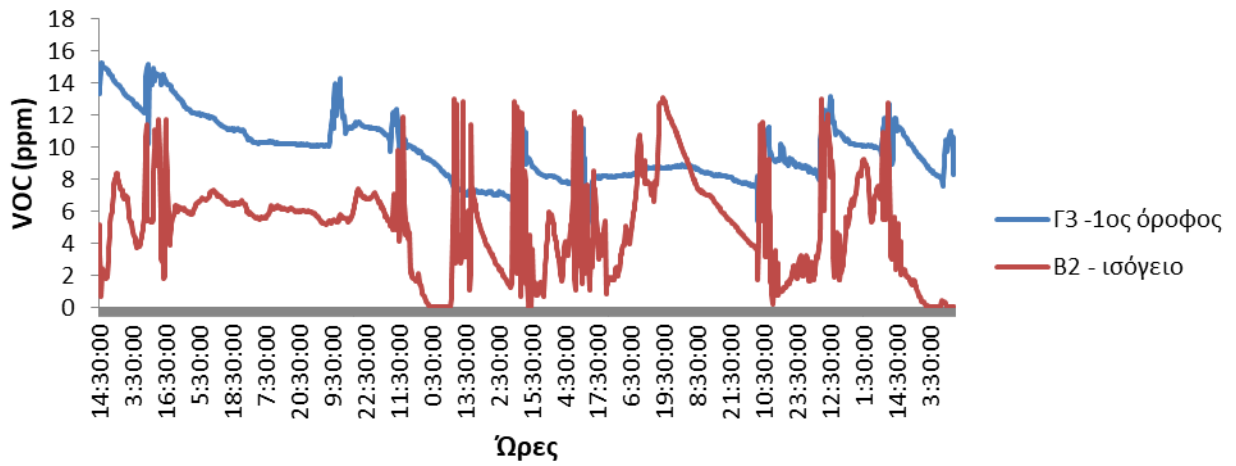
Αίθουσες Κάτω από Πράσινη 9-24/11/2016



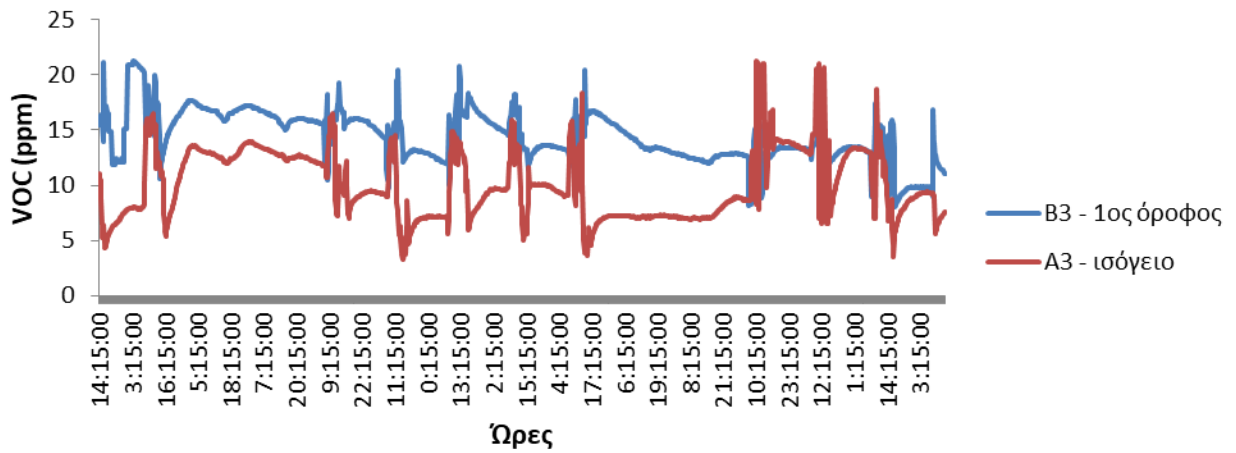
Για την ανατολική δεν υπήρχαν δεδομένα, παρόμοια με το διοξείδιο του άνθρακα.



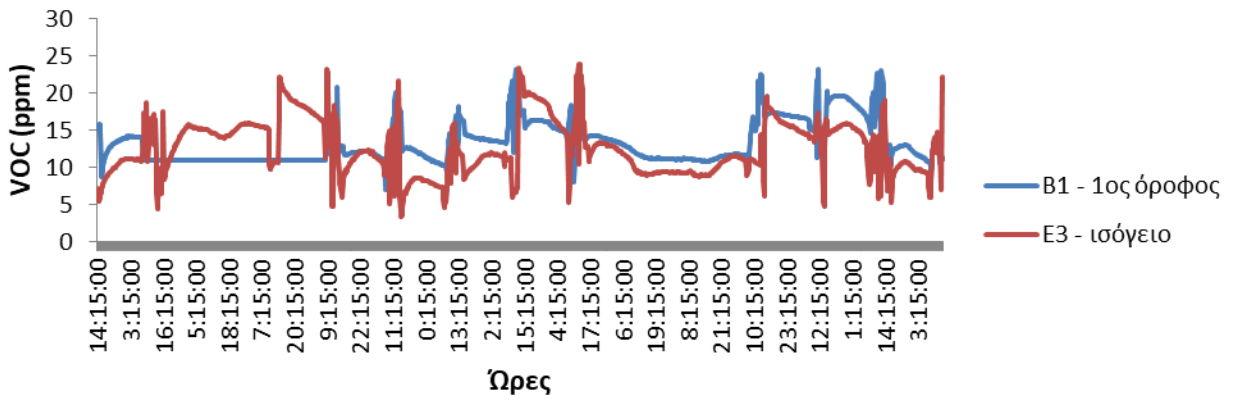
Αίθουσες Κάτω από Πράσινη (24/11 - 8/12/2016)



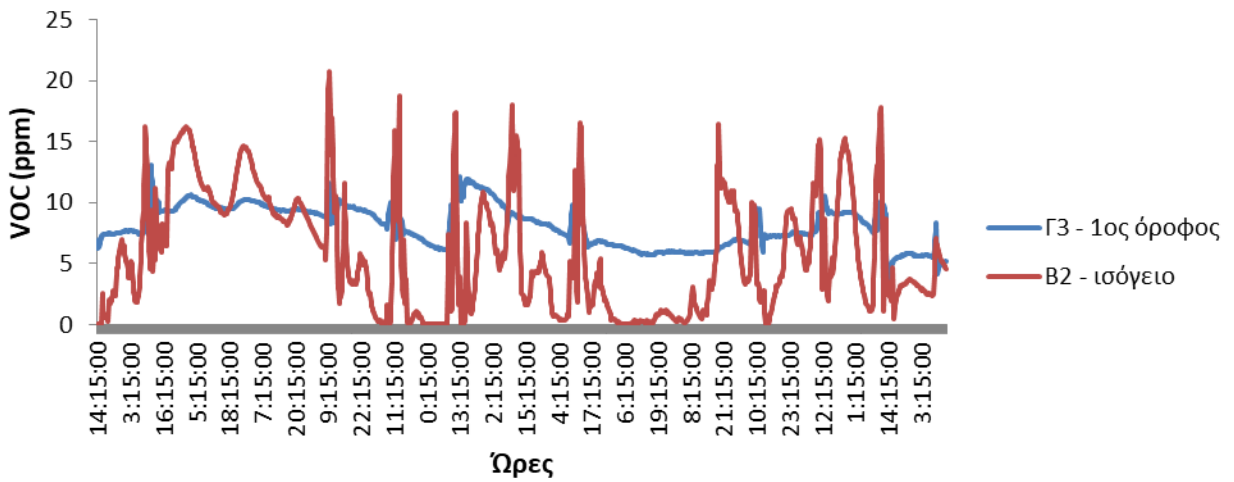
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (8 - 22/12/2016)



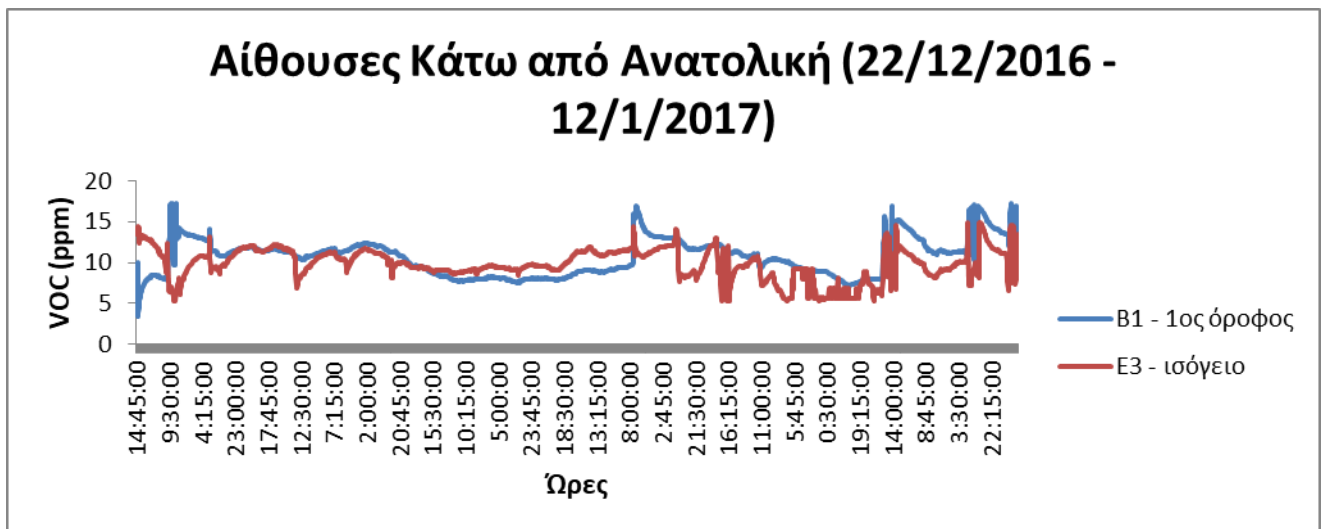
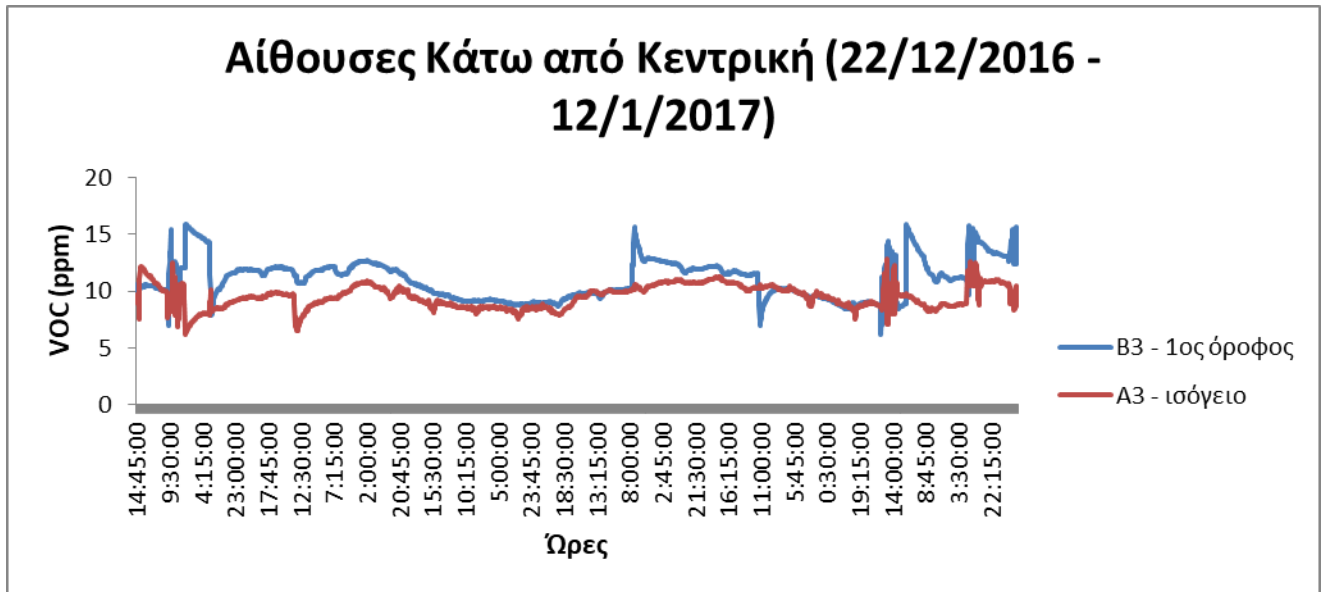
Αίθουσες Κάτω από Ανατολική (8 - 22/12/2016)



Αίθουσες Κάτω από Πράσινη (8 - 22/12/2016)



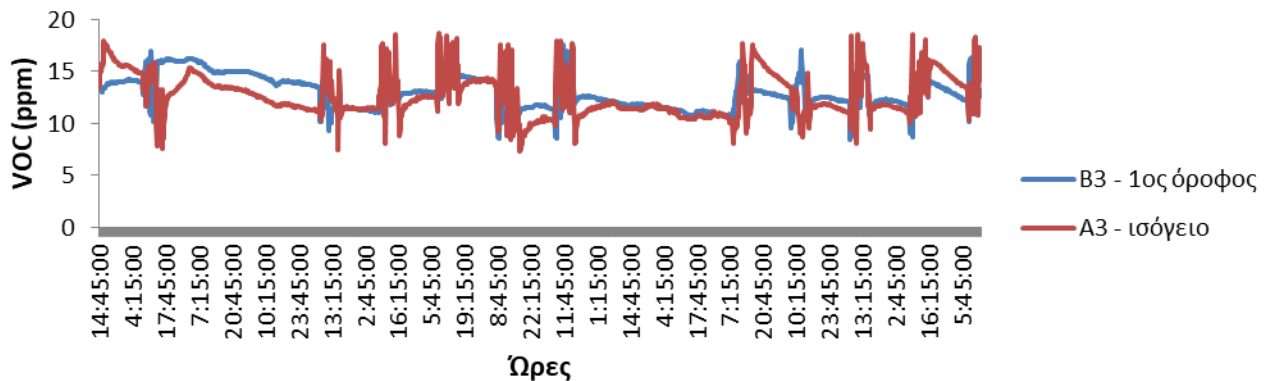
Χριστούγεννα: 23/12/2016-8/1/2017



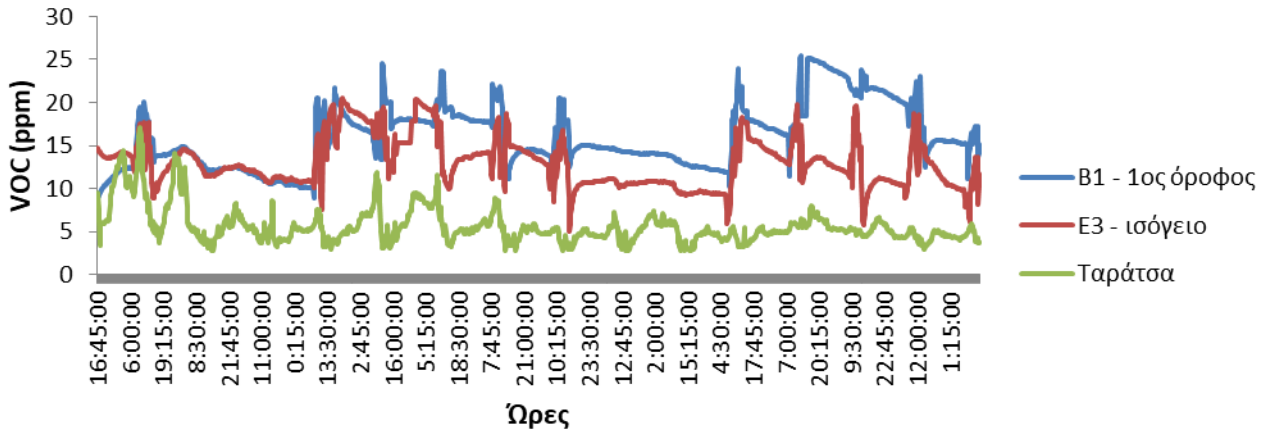
Αίθουσες Κάτω από Πράσινη (22/12/2016 - 12/1/2017)



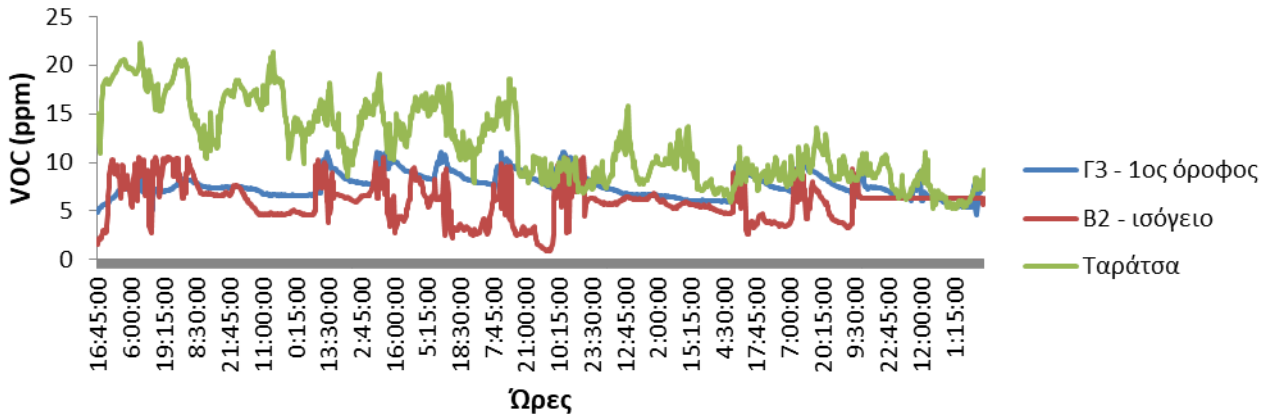
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (12/1/2017 - 27/1/2017)



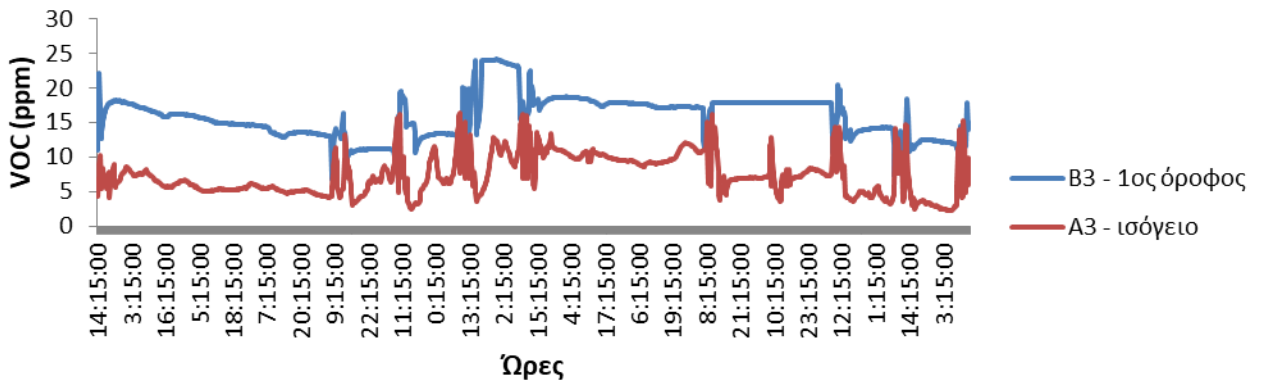
Ανατολική Ταράτσα - Αίθουσες (12/1/2017 - 27/1/2017)



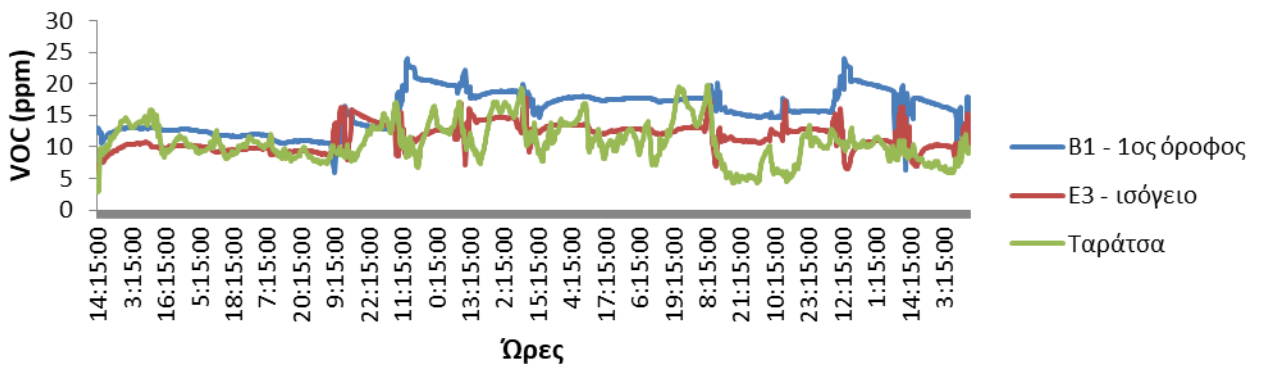
Πράσινη Ταράτσα - Αίθουσες (12/1/2017 - 27/1/2017)



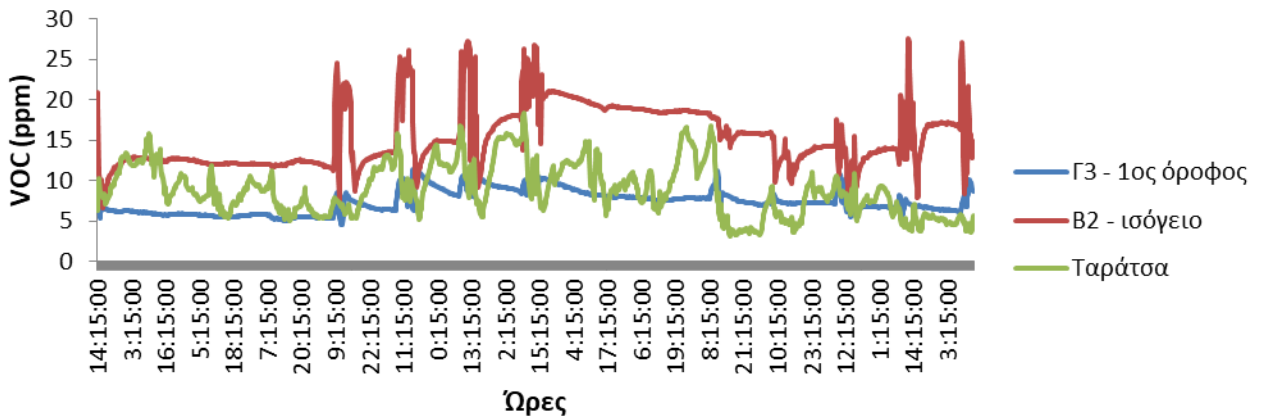
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (27/1/2017 - 10/2/2017)



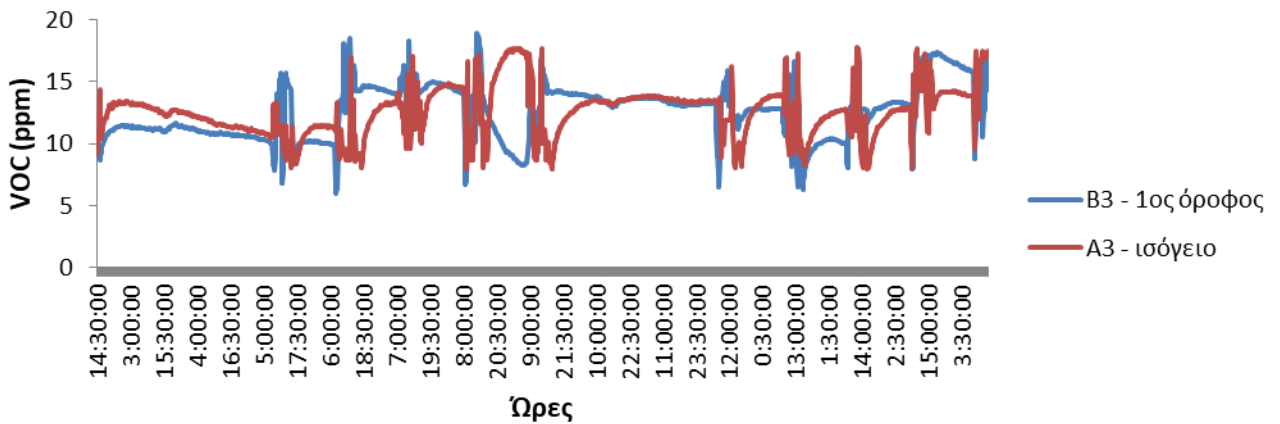
Ανατολική Ταράτσα - Αίθουσες (27/1/2017 - 10/2/2017)



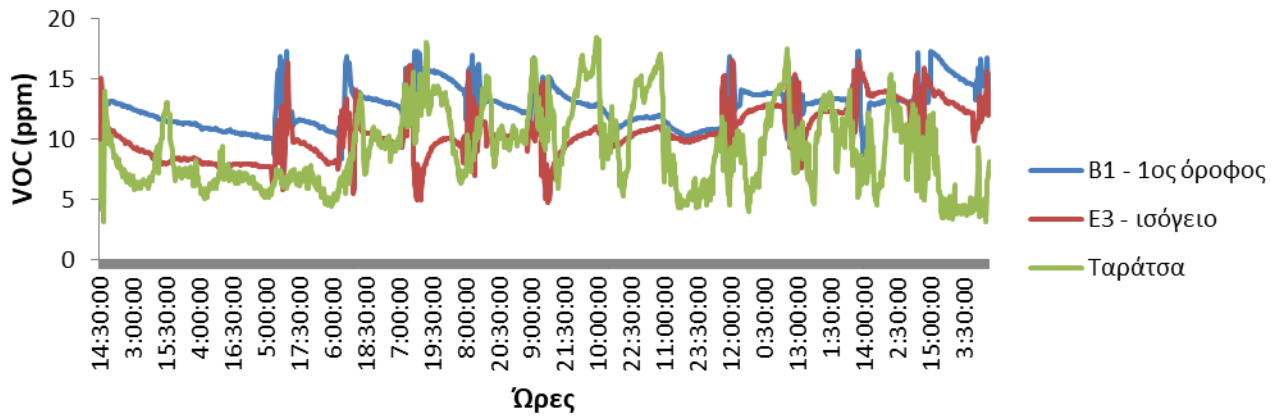
Πράσινη Ταράτσα - Αίθουσες (27/1/2017 - 10/2/2017)



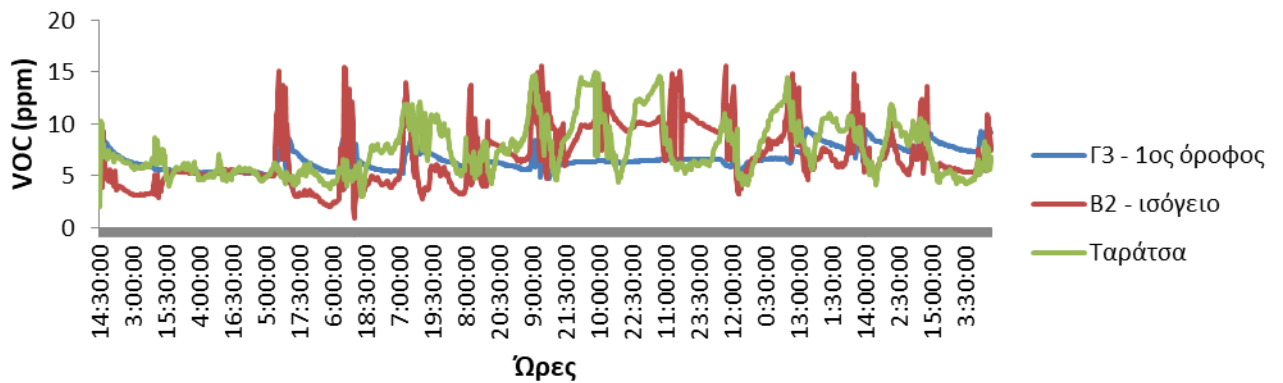
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (10/2/2017 - 24/2/2017)



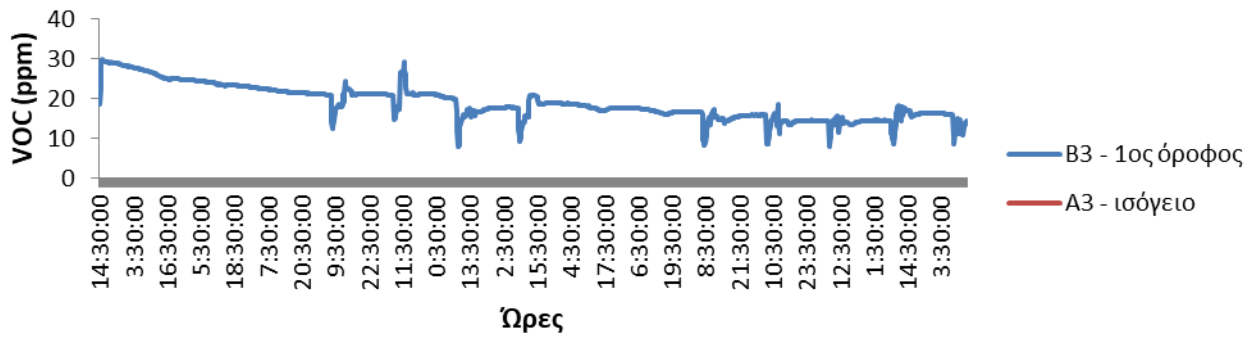
Ανατολική Ταράτσα - Αίθουσες (10/2/2017 - 24/2/2017)



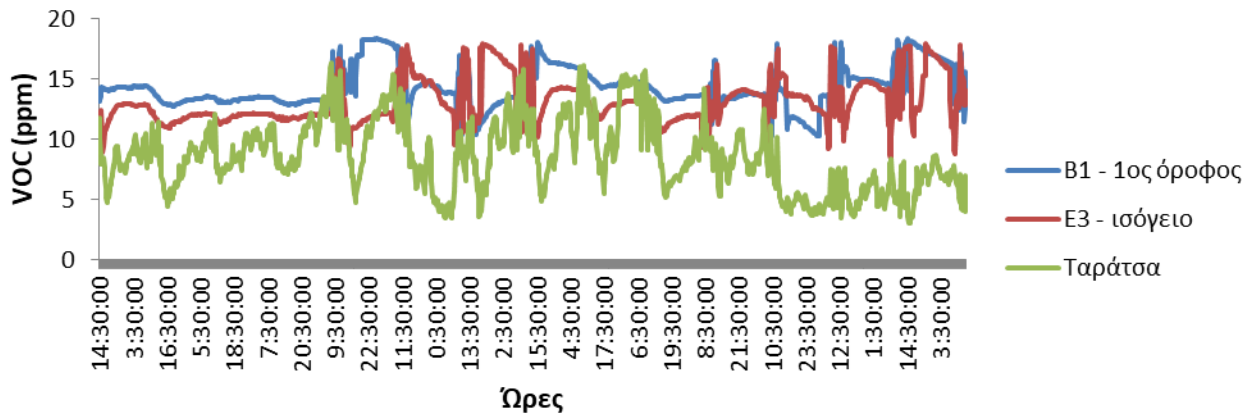
Πράσινη Ταράτσα - Αίθουσες (10/2/2017 - 24/2/2017)



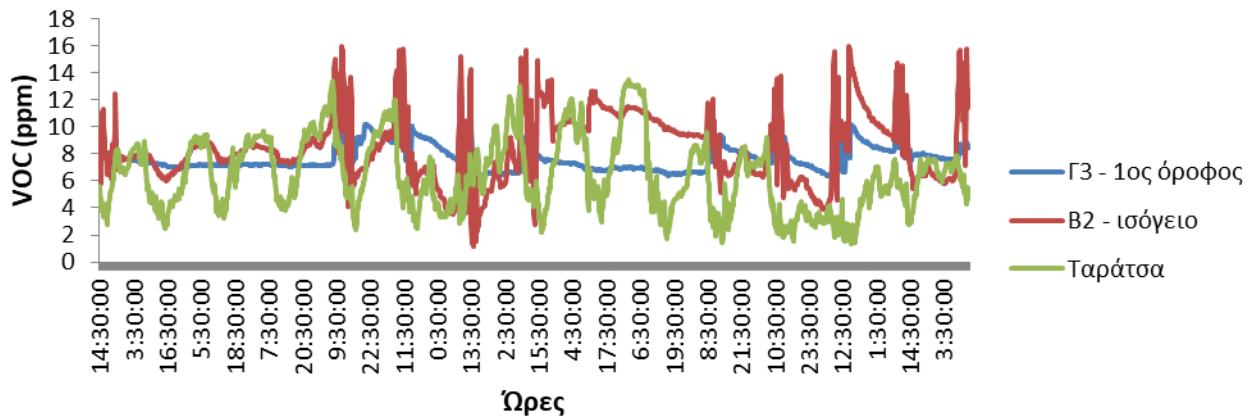
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (24/2/2017 - 10/3/2017)



Ανατολική Ταράτσα - Αίθουσες (24/2/2017 - 10/3/2017)

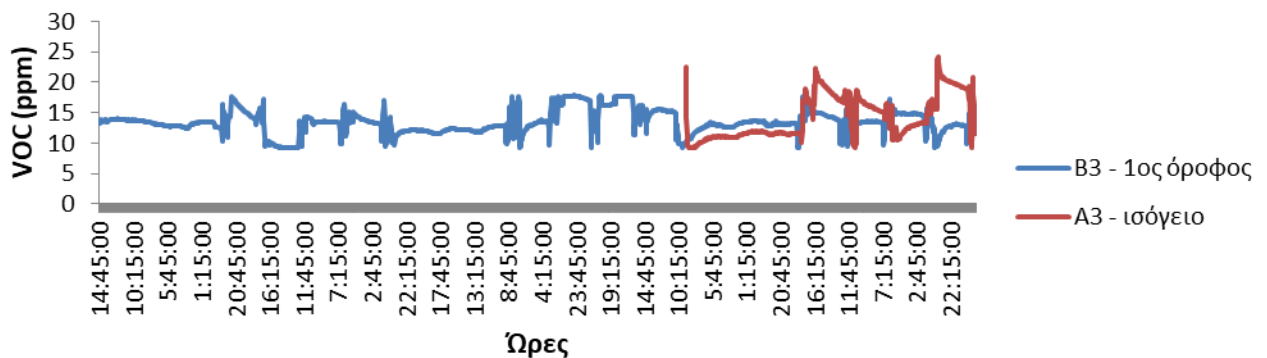


Πράσινη Ταράτσα - Αίθουσες (24/2/2017 - 10/3/2017)

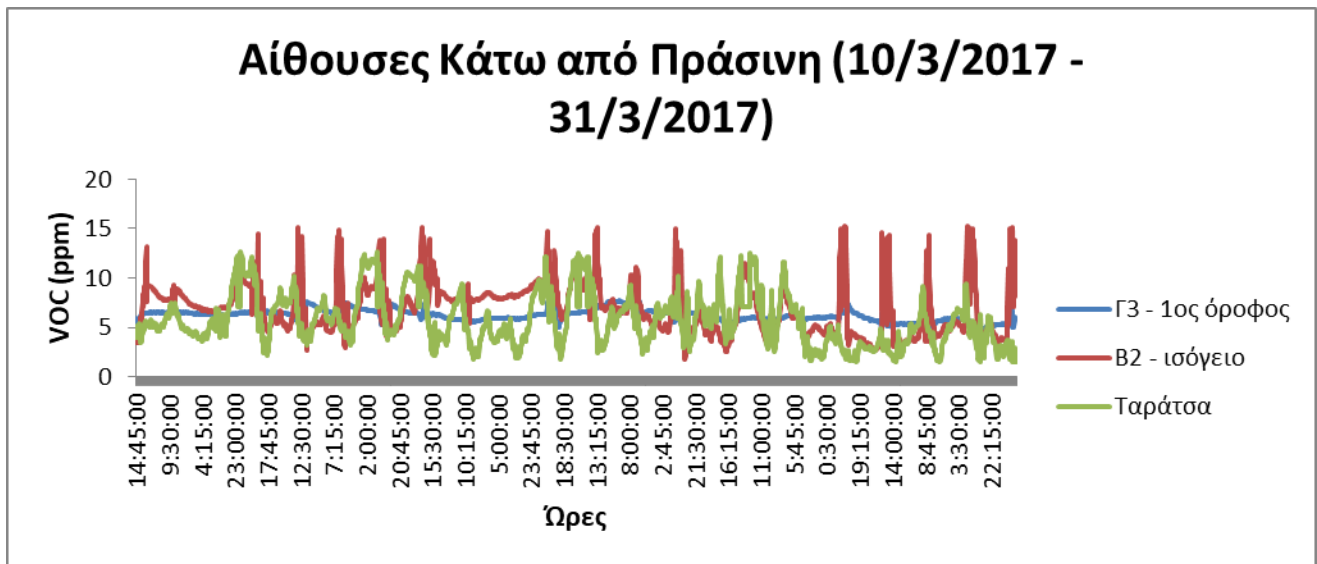
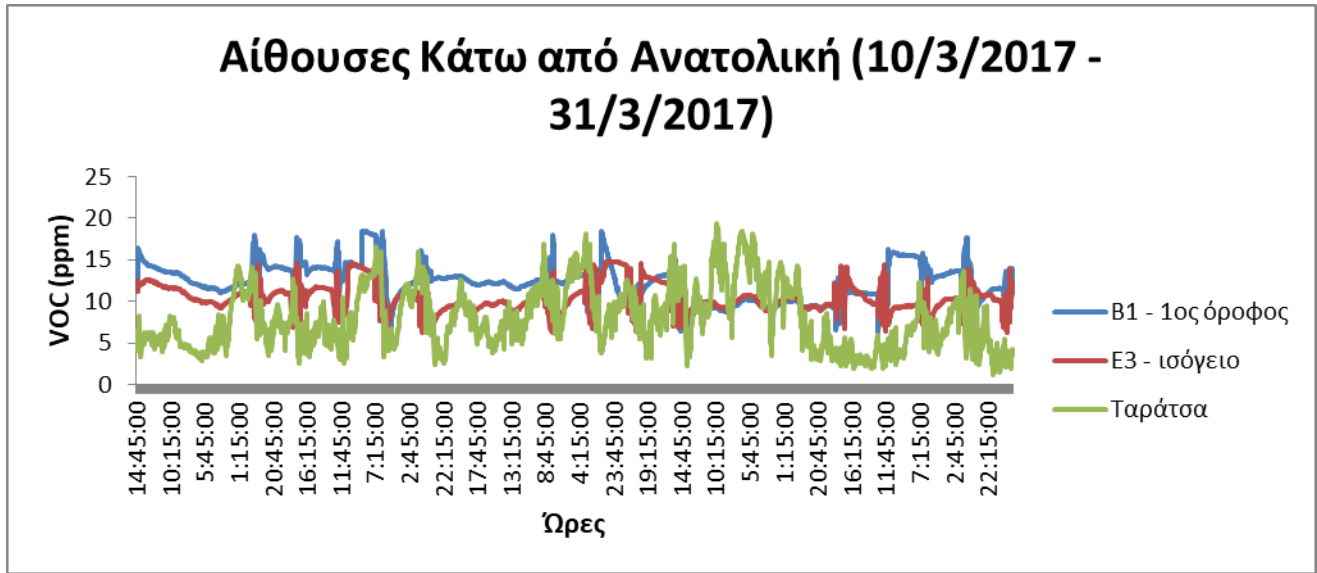


Για την Α3 υπήρχαν λίγα δεδομένα προς το τέλος.

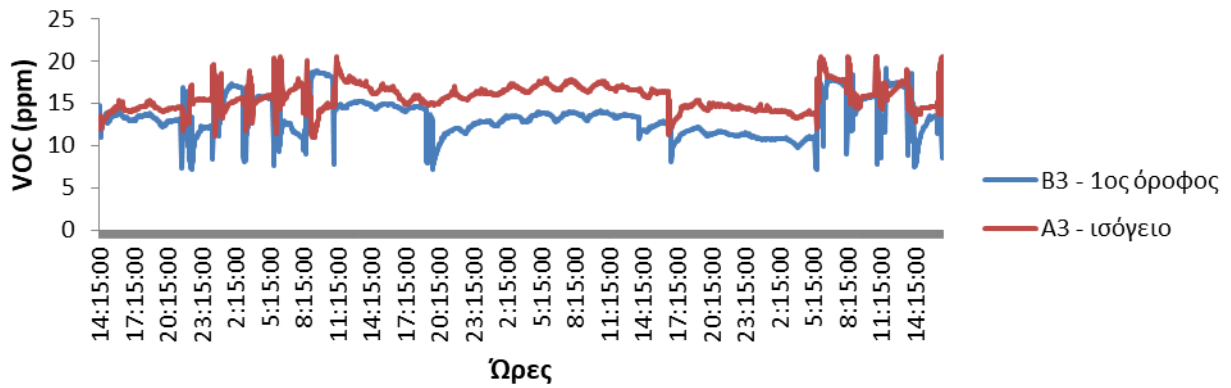
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (10/3/2017 - 31/3/2017)



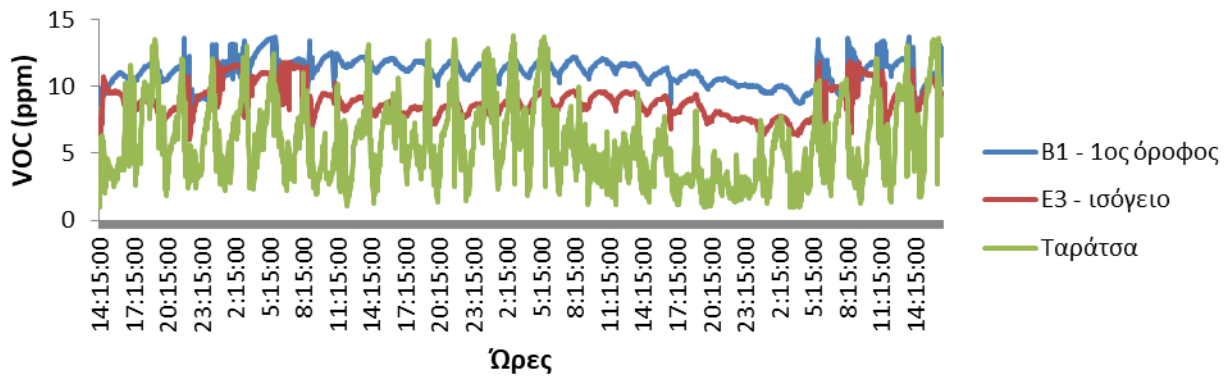
Πάσχα: 10-23/4/2017



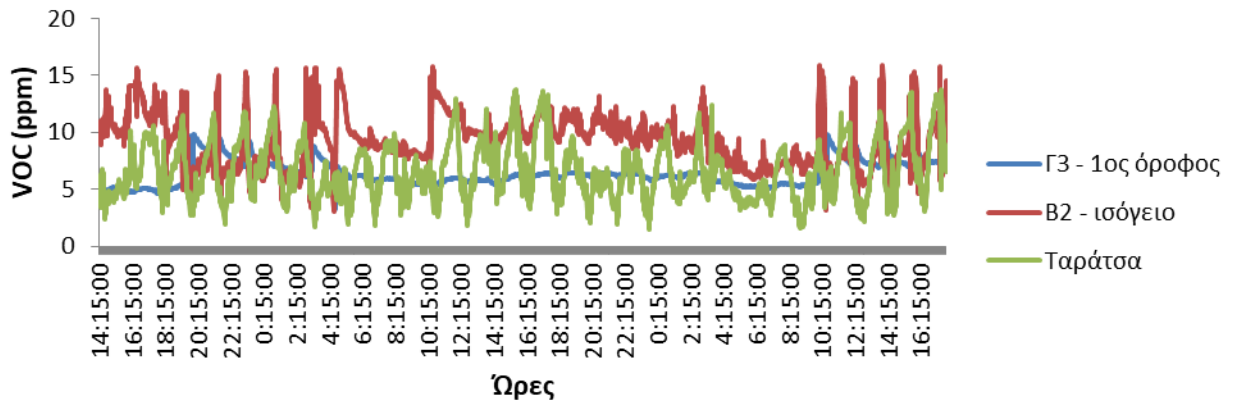
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (31/3/2017 - 28/4/2017)



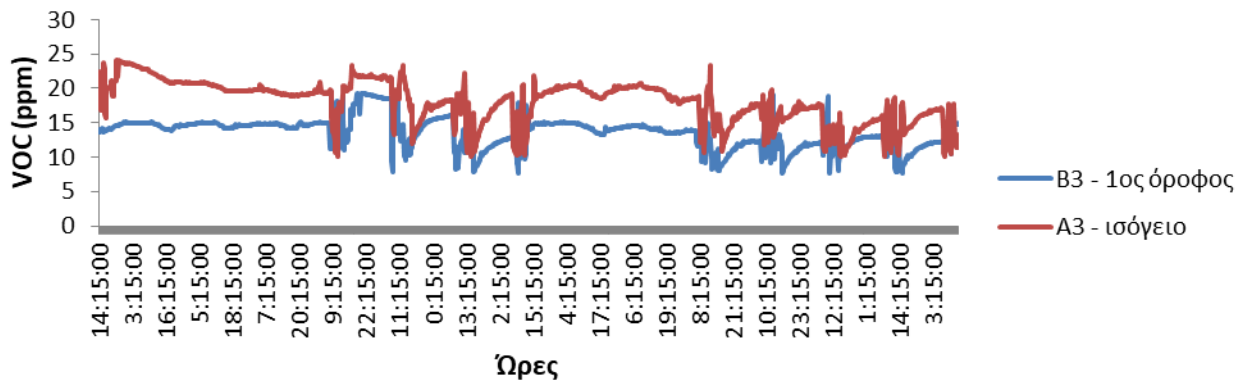
Ανατολική Ταράτσα - Αίθουσες (31/3/2017 - 28/4/2017)



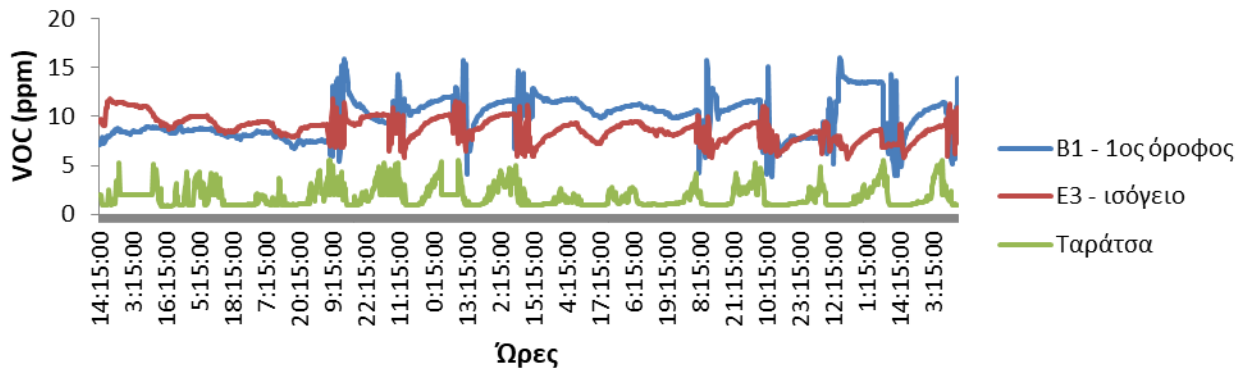
Πράσινη Ταράτσα - Αίθουσες (31/3/2017 - 28/4/2017)



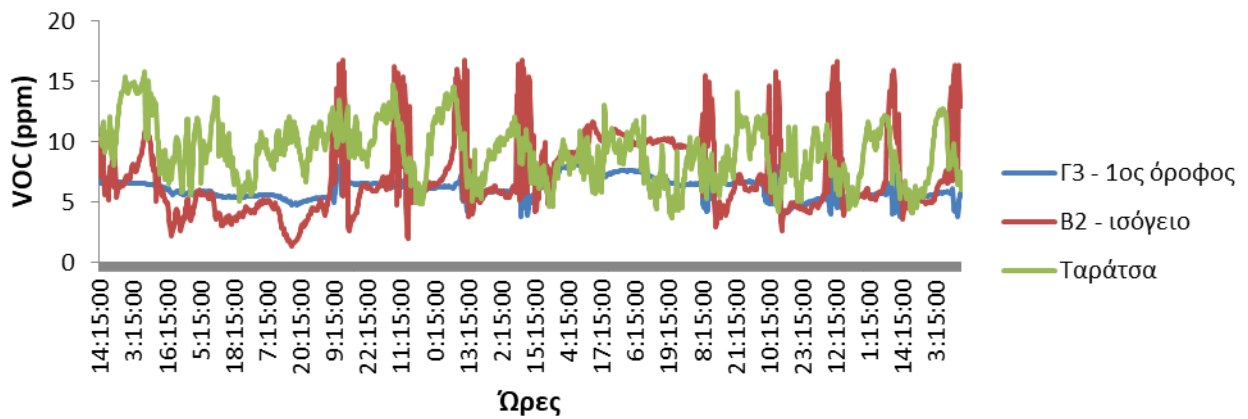
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (28/4/2017 - 12/5/2017)



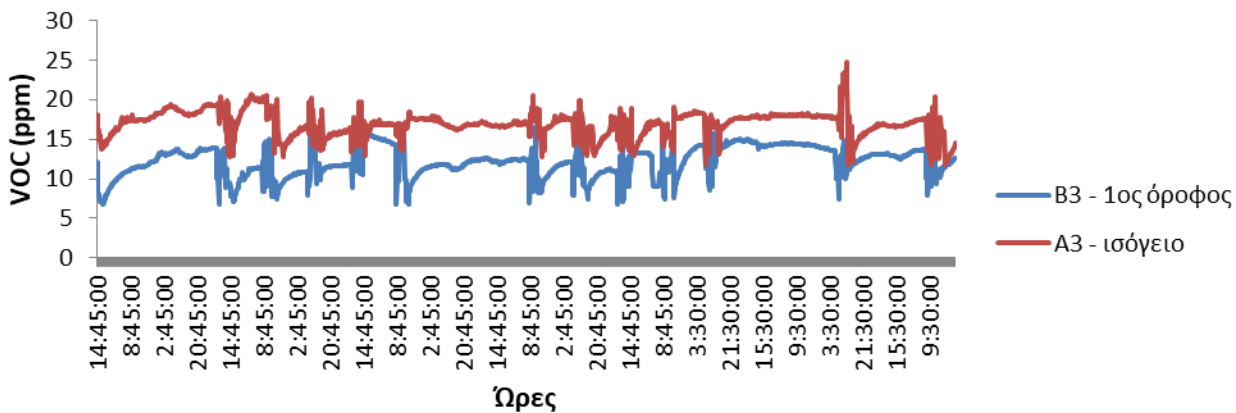
Ανατολική Ταράτσα - Αίθουσες (28/4/2017 - 12/5/2017)



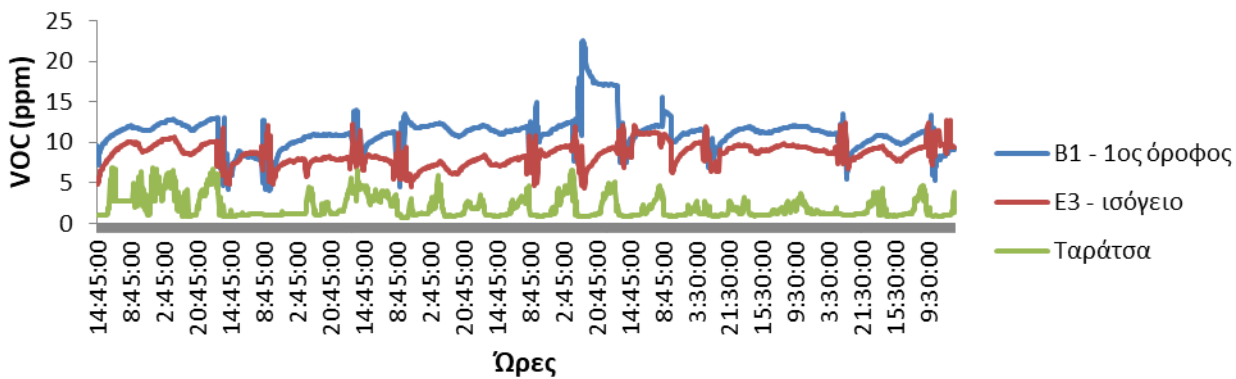
Πράσινη Ταράτσα - Αίθουσες (28/4/2017 - 12/5/2017)



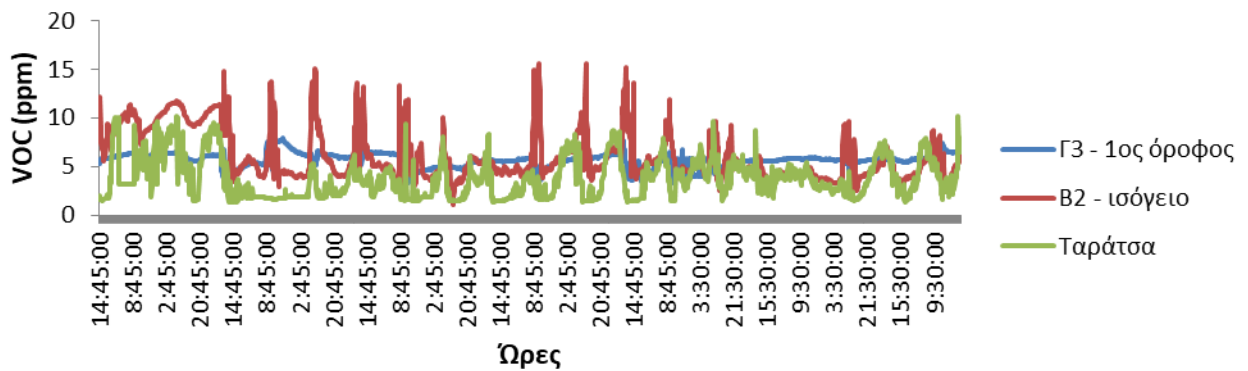
Αίθουσες Κάτω από Κεντρική (12/5/2017 - 31/5/2017)



Ανατολική Ταράτσα - Αίθουσες (12/5/2017 - 31/5/2017)



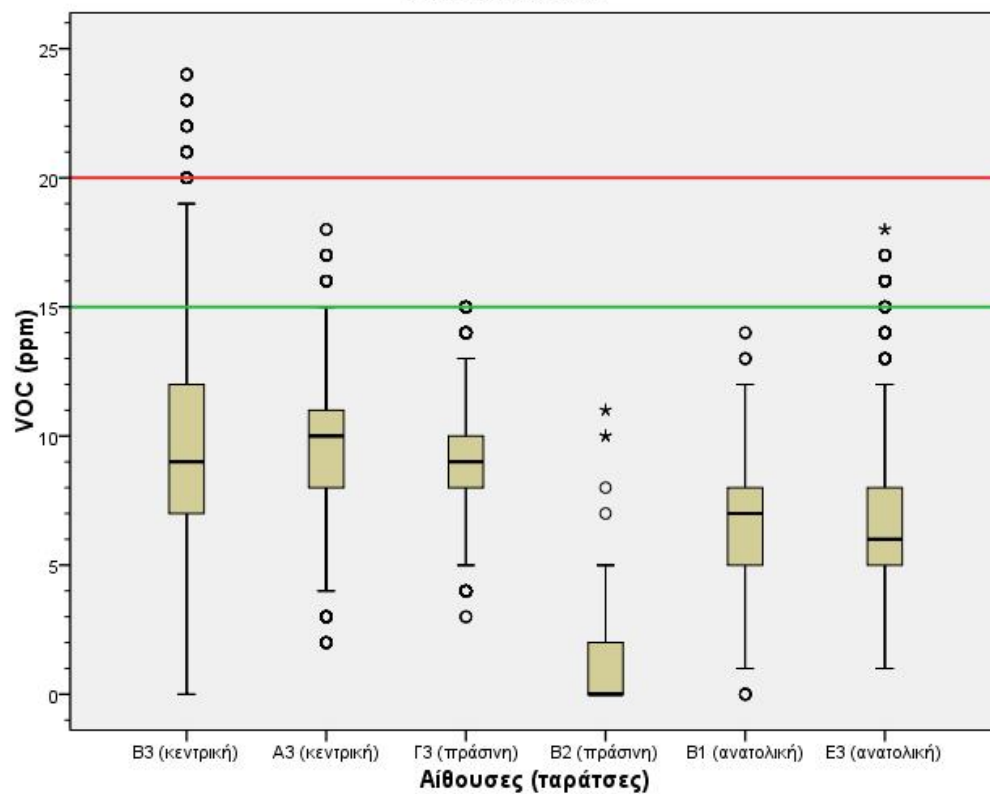
Πράσινη Ταράτσα - Αίθουσες (12/5/2017 - 31/5/2017)



2) Μηνιαία αποτελέσματα

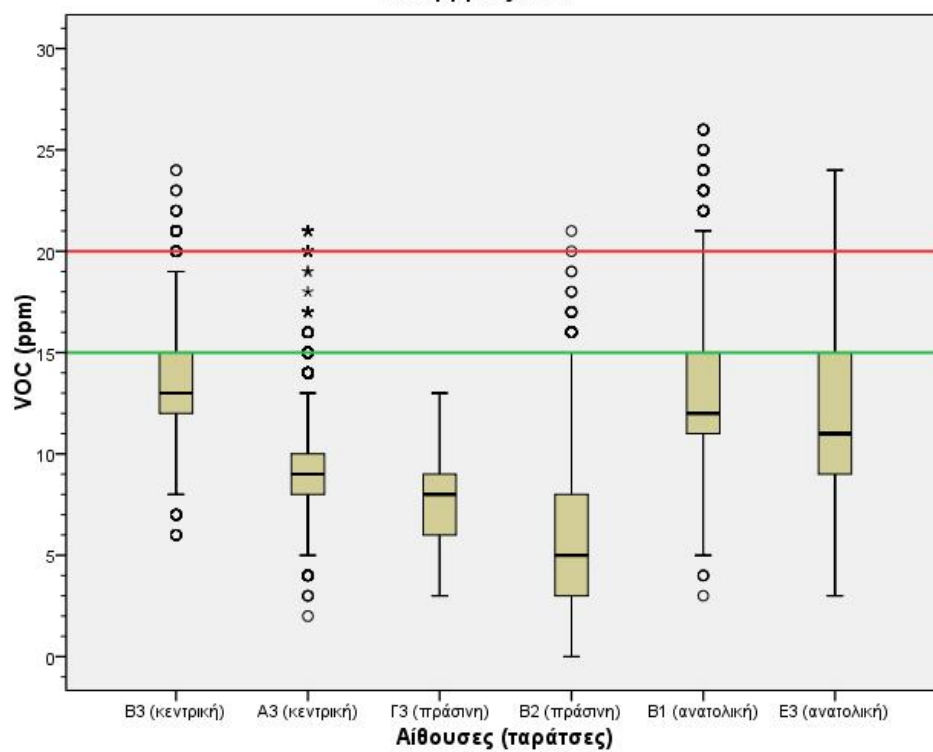
Οκτώβριος 2016 TVOC (ppm)	Μέσος όρος (ppm)	Διασπορά (ppm)
B3	9,6	4,7
A3	9,4	2,7
Γ3	8,7	2
B2	0,8	1
B1	6,5	2,3
E3	6,8	2,8

Οκτώβριος 2016

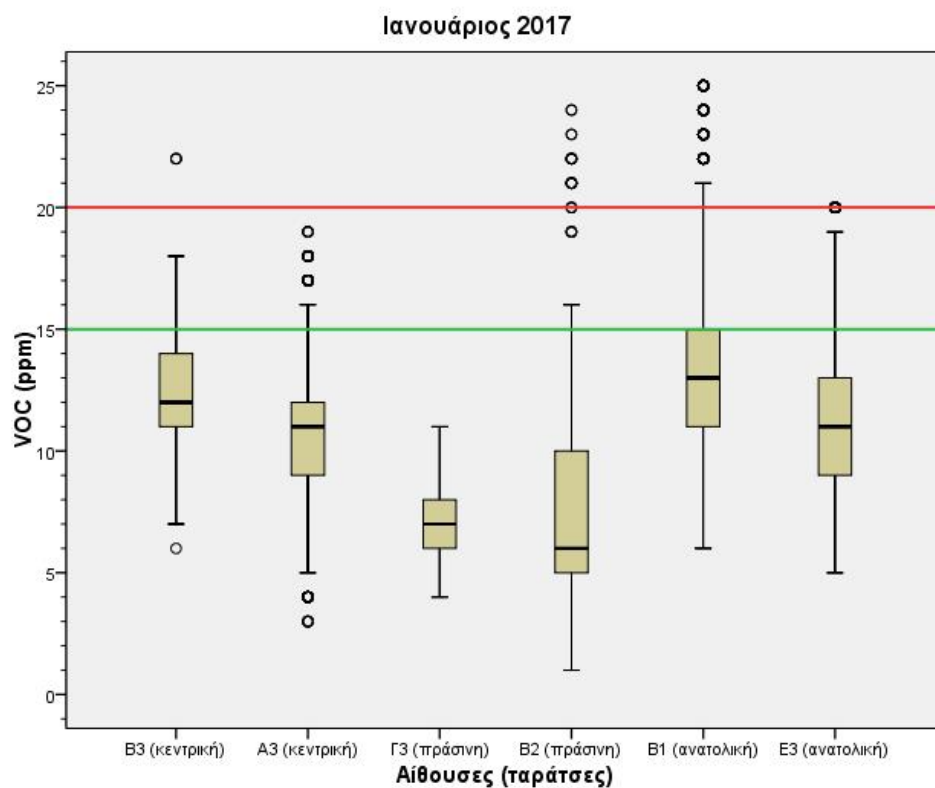


Δεκέμβριος 2016 TVOC (ppm)	Μέσος όρος (ppm)	Διασπορά (ppm)
B3	13,2	2,7
A3	9,4	2,5
Γ3	7,7	1,7
B2	5,6	3,9
B1	12,9	3,3
E3	12	3,8

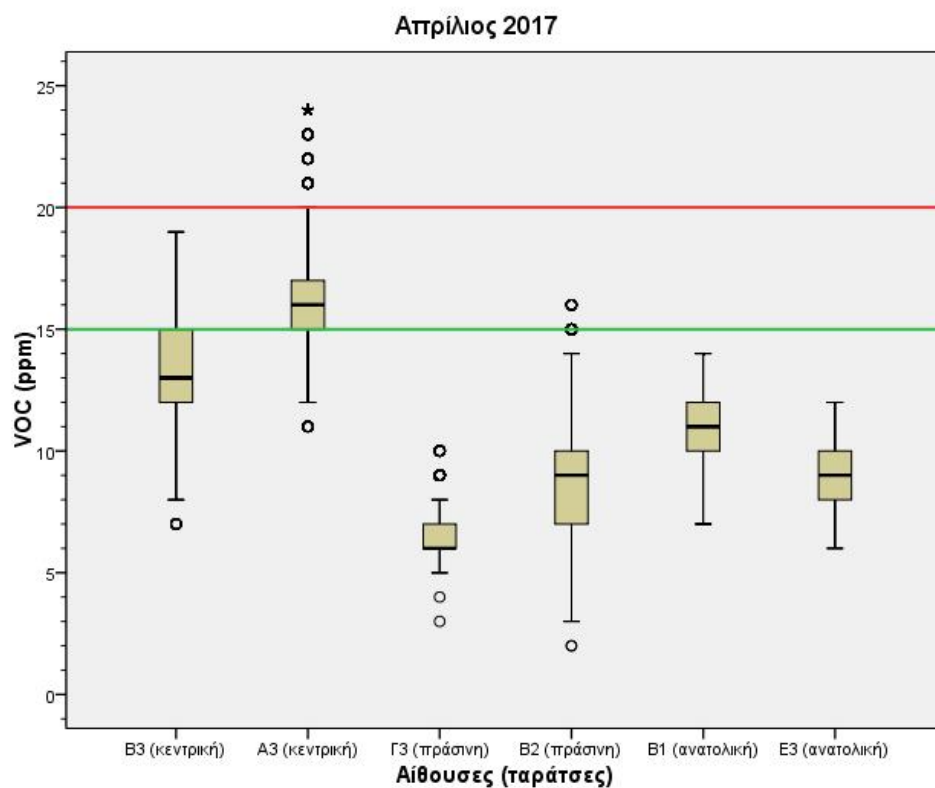
Δεκέμβριος 2016



Ιανουάριος 2017 TVOC (ppm)	Μέσος όρος (ppm)	Διασπορά (ppm)
B3	12,5	2,1
A3	10,6	2,8
Γ3	7,26	1,3
B2	7,34	3,2
B1	13,4	3,8
E3	11,2	2,9

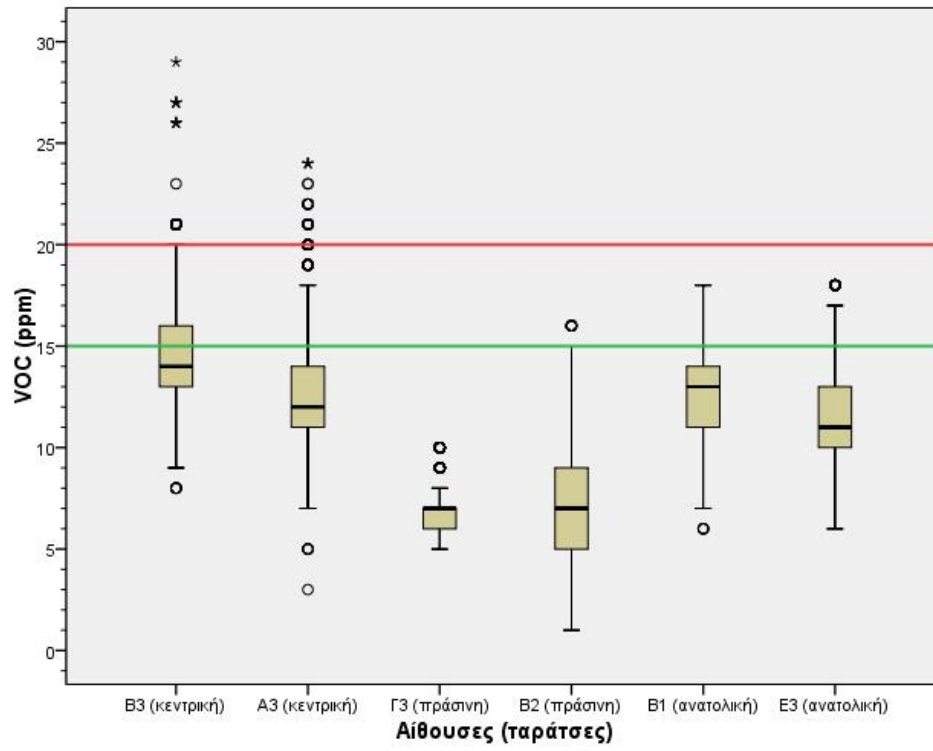


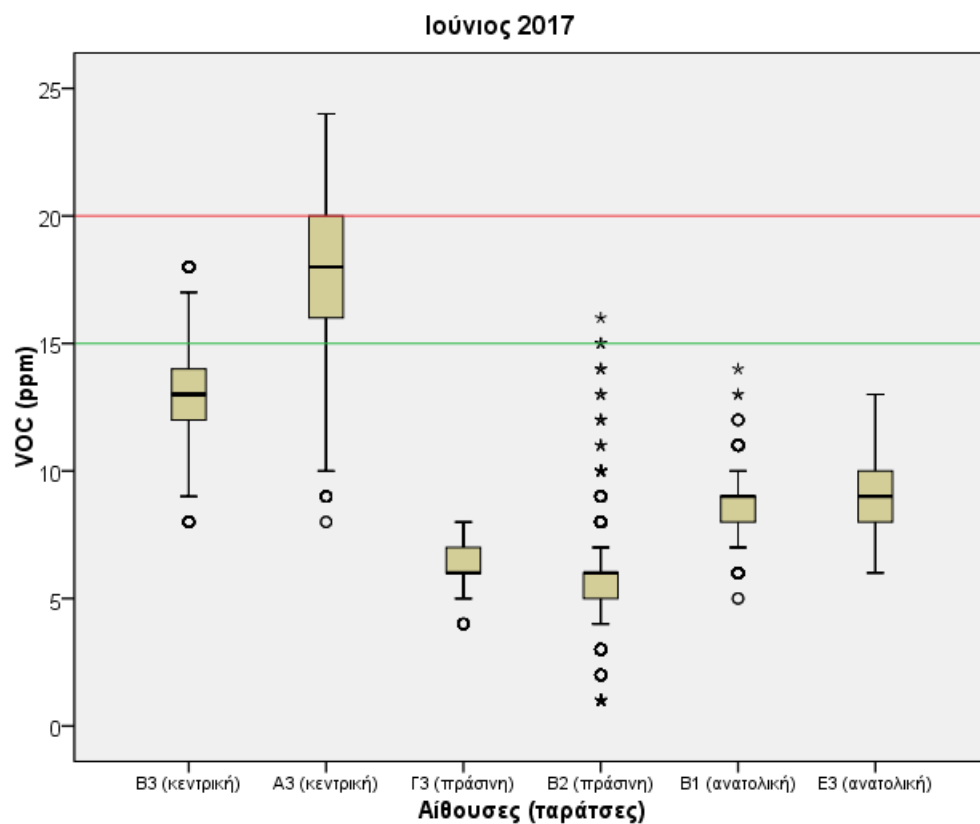
Απρίλιος 2017 TVOC (ppm)	Μέσος όρος (ppm)	Διασπορά (ppm)
B3	13,4	2,1
A3	16,1	2,1
Γ3	6,3	1,1
B2	8,9	2,5
B1	10,8	1,2
E3	8,9	1,2



Μάρτιος 2017 TVOC (ppm)	Μέσος όρος (ppm)	Διασπορά (ppm)
B3	14,4	2,6
A3	12,6	2,8
Γ3	6,7	1
B2	7,5	2,7
B1	12,8	2,4
E3	11,3	2,3

Μάρτιος 2017



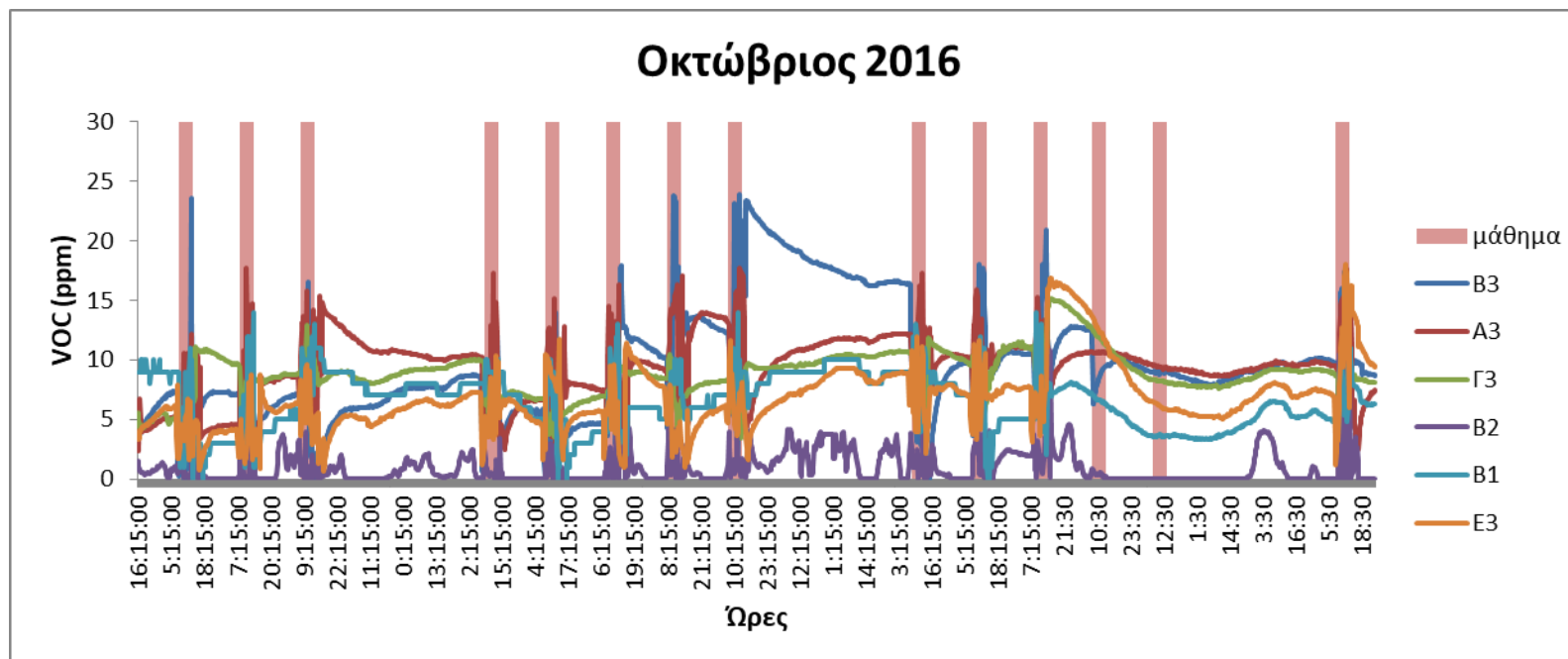


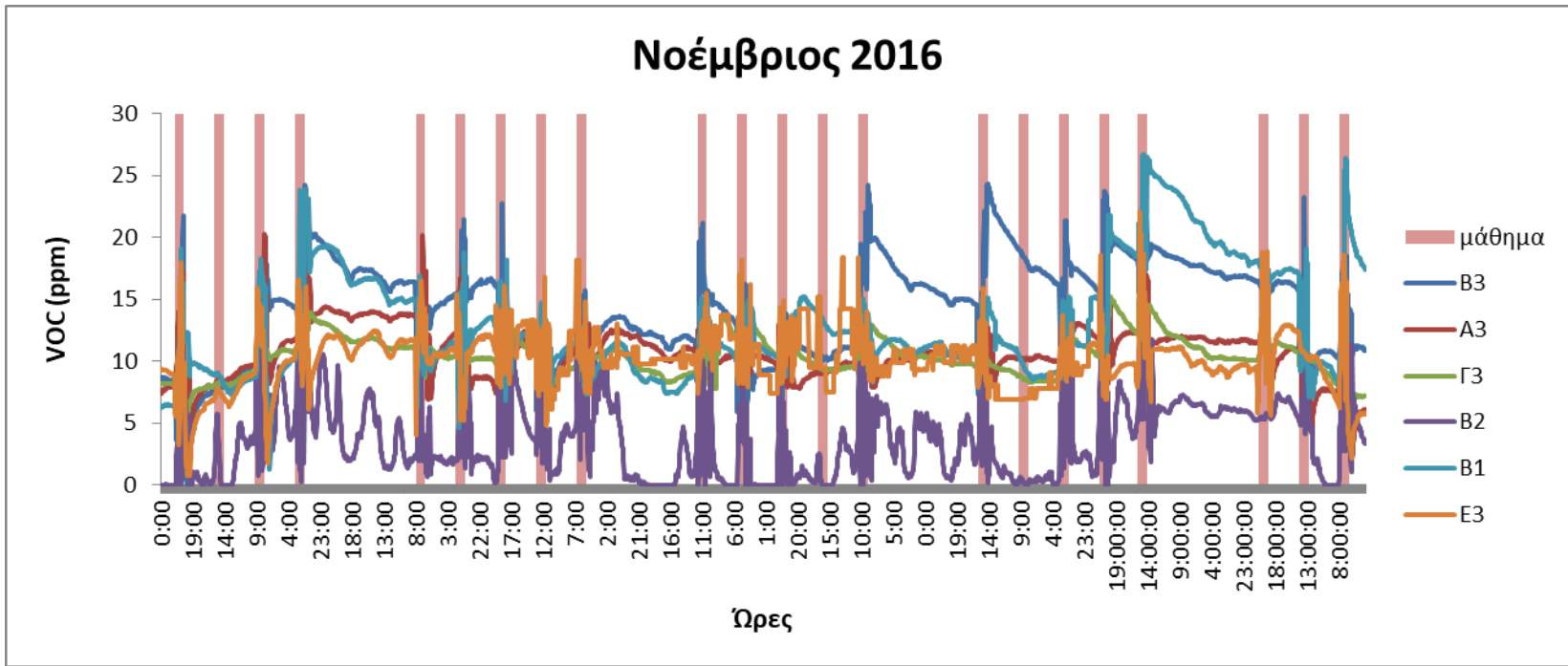
Ιούνιος 2017 TVOC (ppm)	Μέσος όρος (ppm)	Διασπορά (ppm)
B3	12,8	2,6
A3	17,8	2,8
Γ3	6,2	1
B2	5,6	2,7
B1	8,6	2,4
E3	9,1	2,3

Πίνακας συχνότητων TVOC σε όλες τις αίθουσες για Χριστούγεννα 2016-2017 και Πάσχα 2017

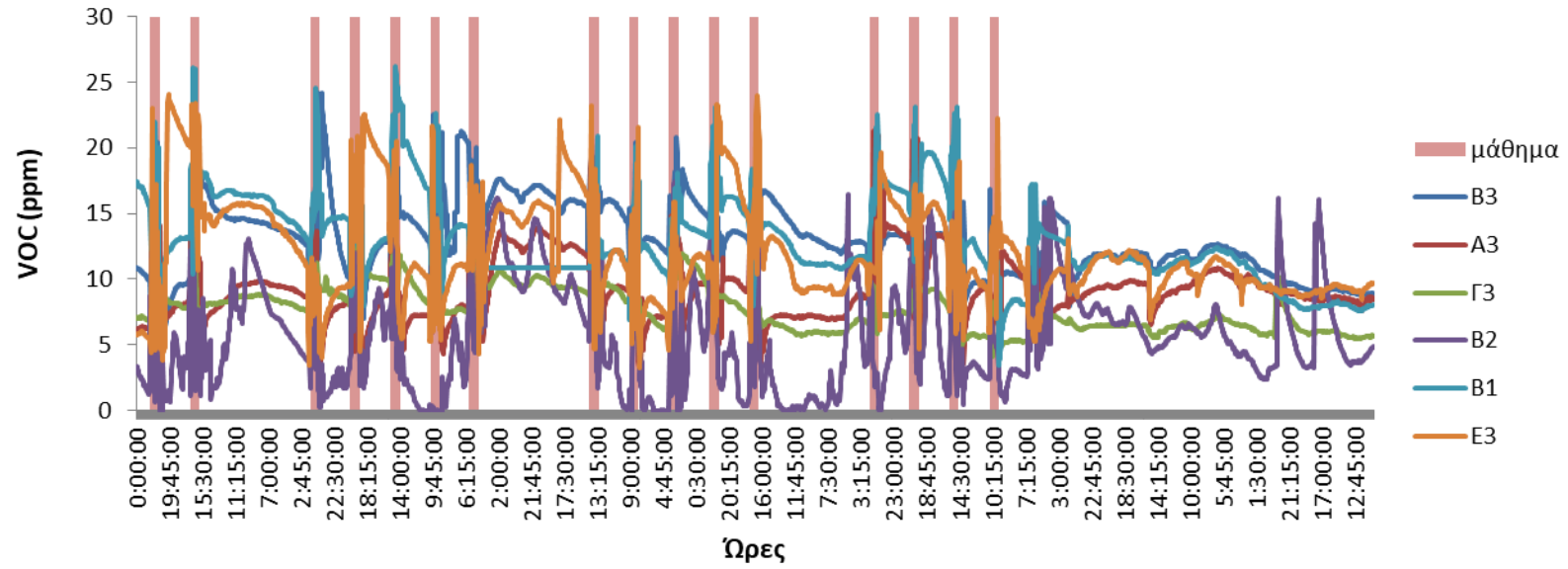
		ΧΡΙΣΤΟΥΓΕΝΝΑ	ΠΑΣΧΑ
B3	5	0	0
	10	642	41
	15	959	1303
	20	31	0
	25	0	0
	>25	0	0
A3	5	0	0
	10	1116	0
	15	516	465
	20	0	879
	25	0	0
	>25	0	0
Γ3	5	0	0
	10	1580	1344
	15	52	0
	20	0	0
	25	0	0
	>25	0	0
B2	5	525	0
	10	812	828
	15	281	512
	20	14	4
	25	0	0
	>25	0	0
B1	5	0	0
	10	745	175
	15	861	1169
	20	26	0
	25	0	0
	>25	0	0
E3	5	0	0
	10	940	1344
	15	692	0
	20	0	0
	25	0	0
	>25	0	0

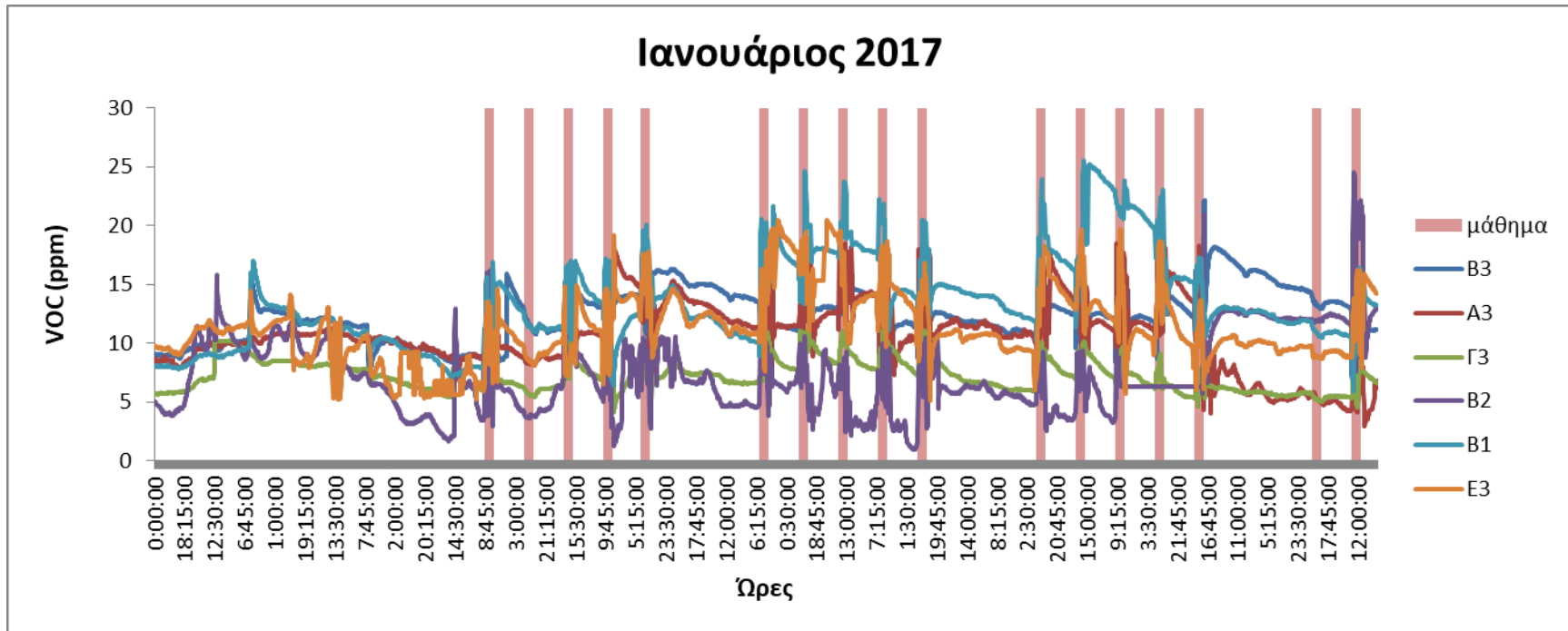
Μηνιαίες χρονοσειρές



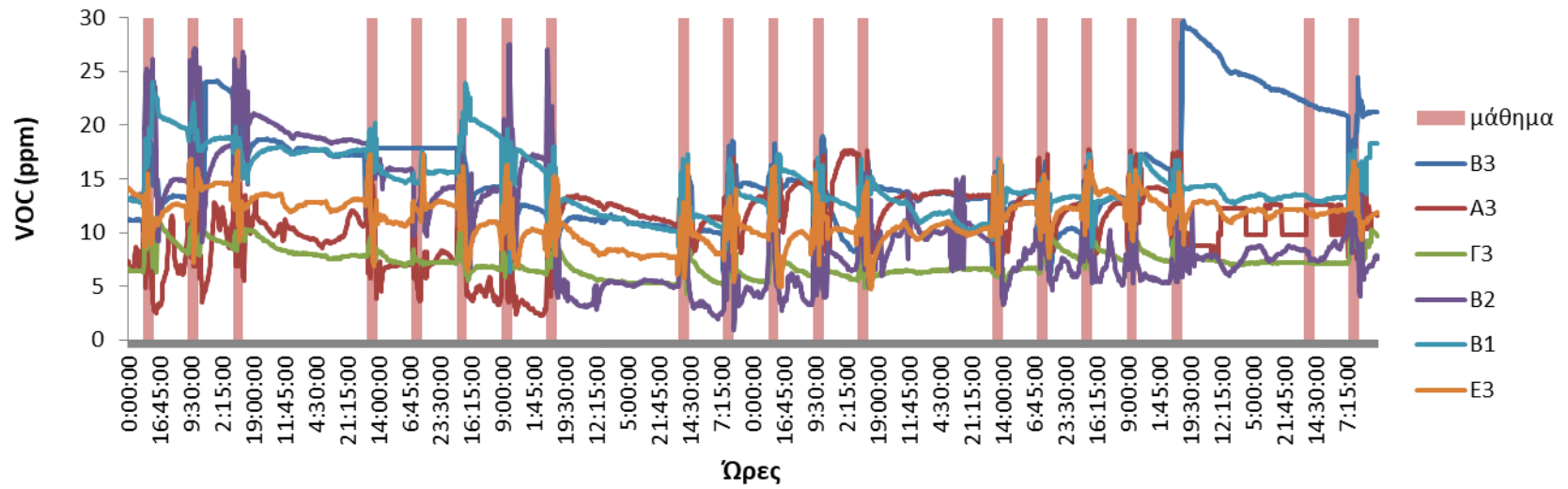


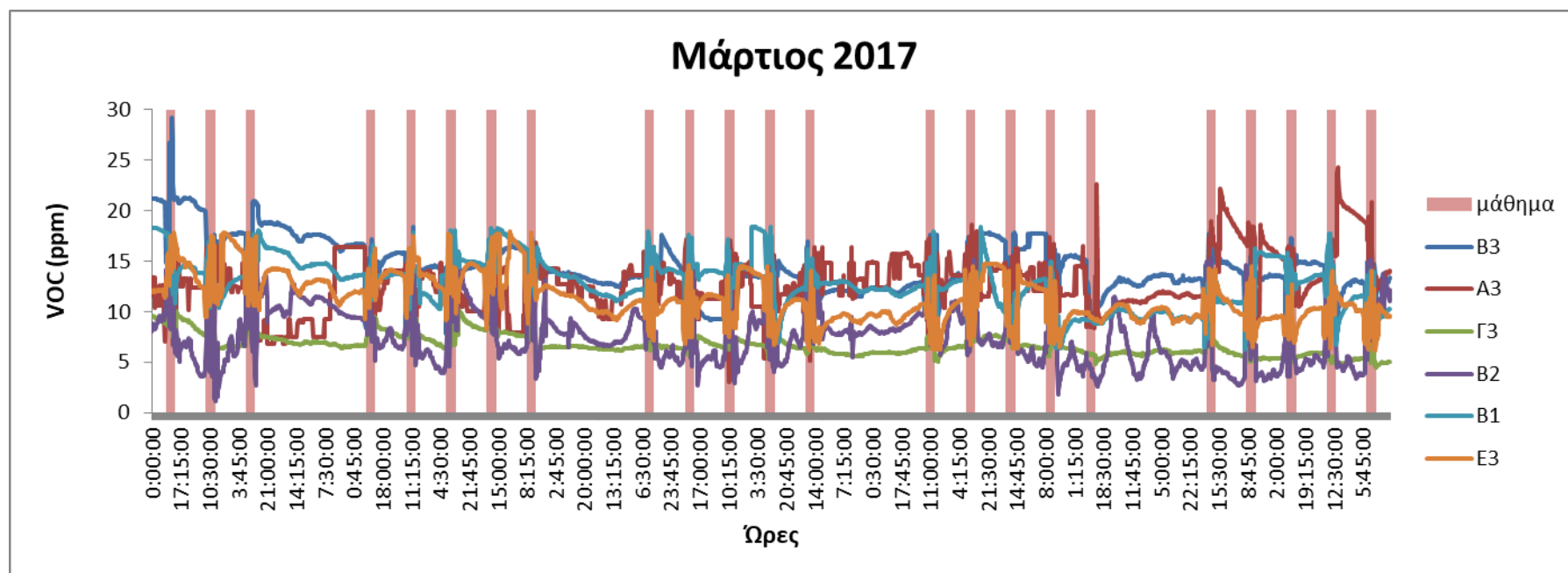
Δεκέμβριος 2016



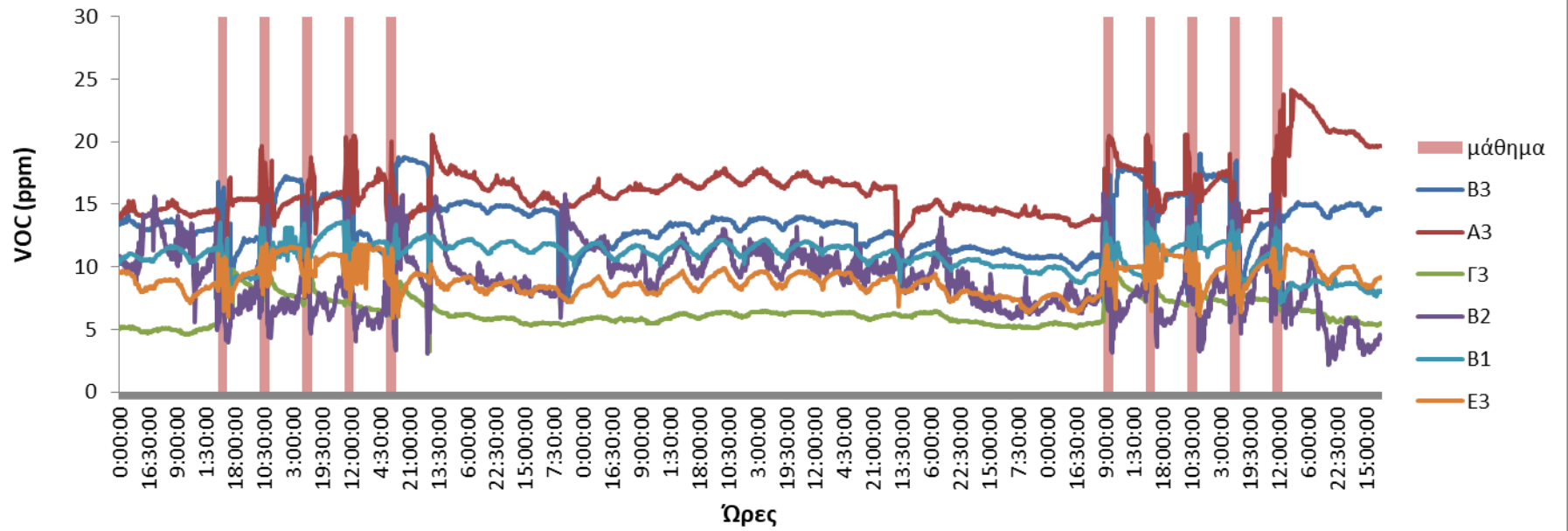


Φεβρουάριος 2017

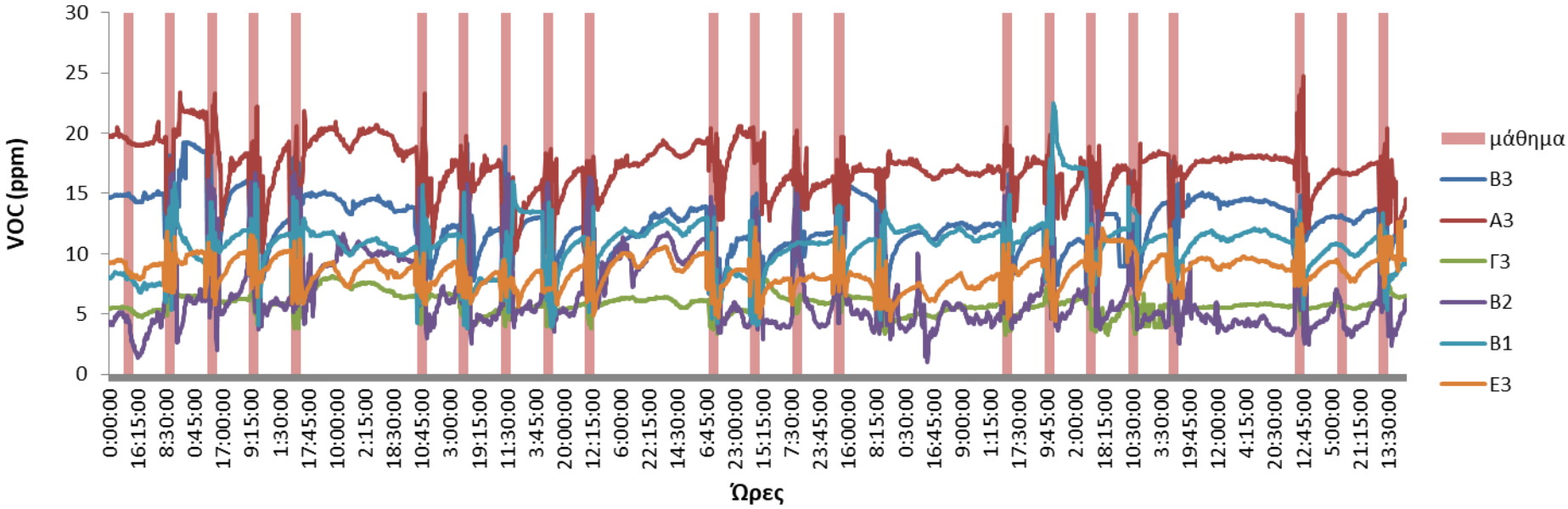




Απρίλιος 2017

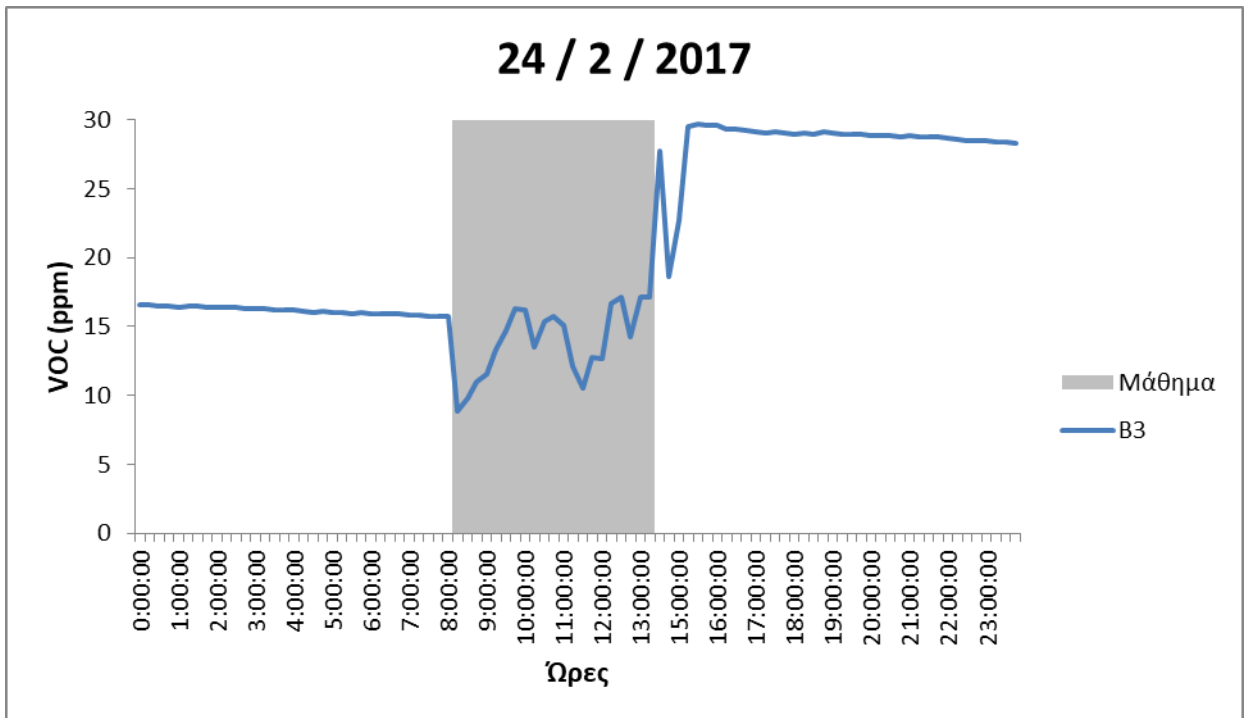


Μάιος 2017

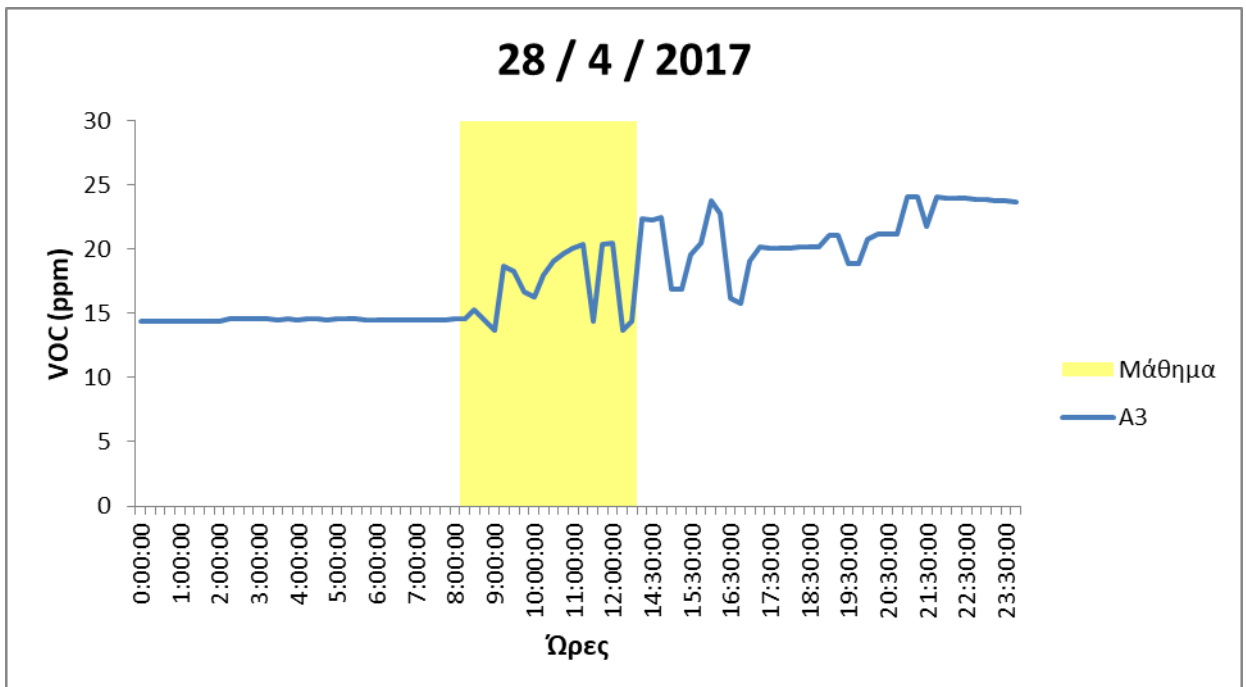


3) Αποτελέσματα ημερών ενδιαφέροντος

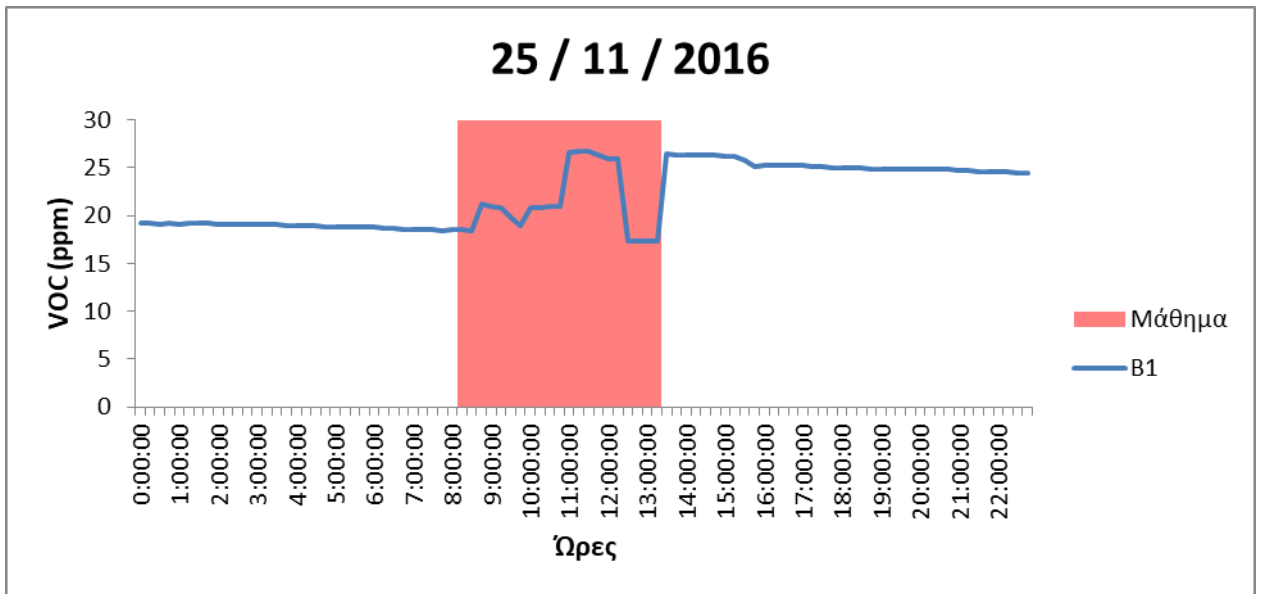
Αίθουσα Β3



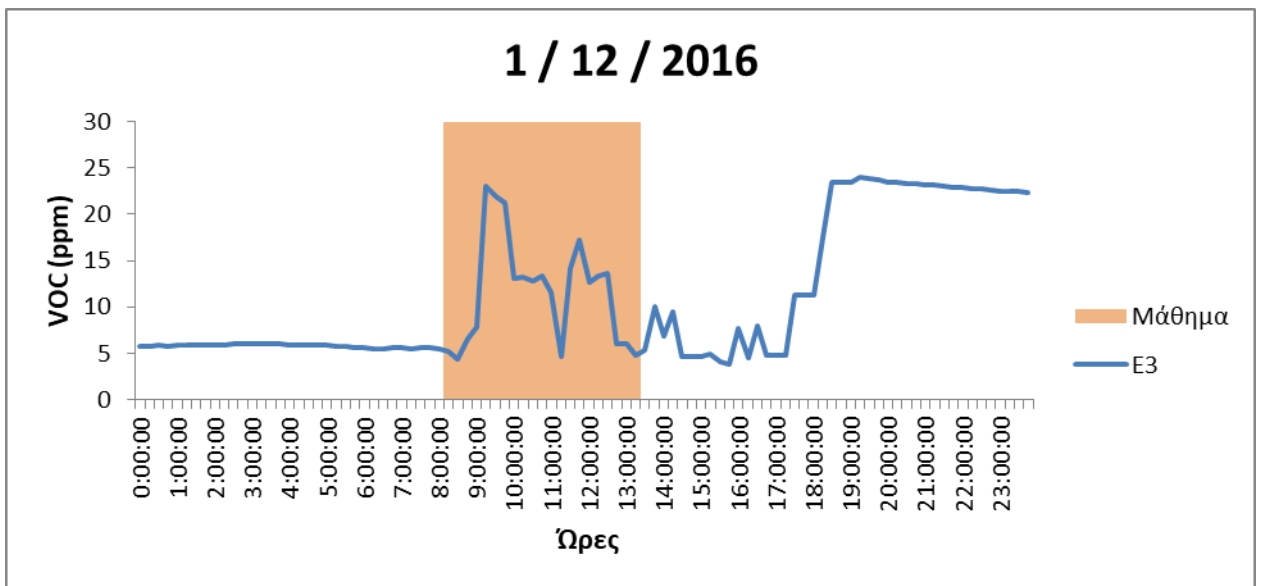
Αίθουσα Α3



Αίθουσα Β1



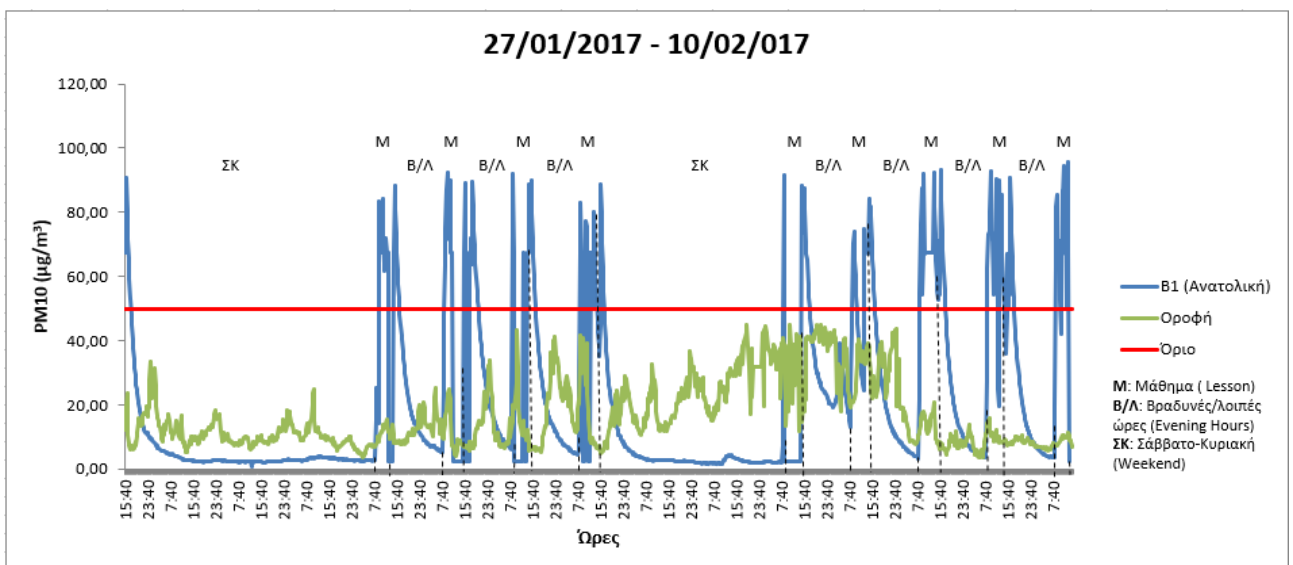
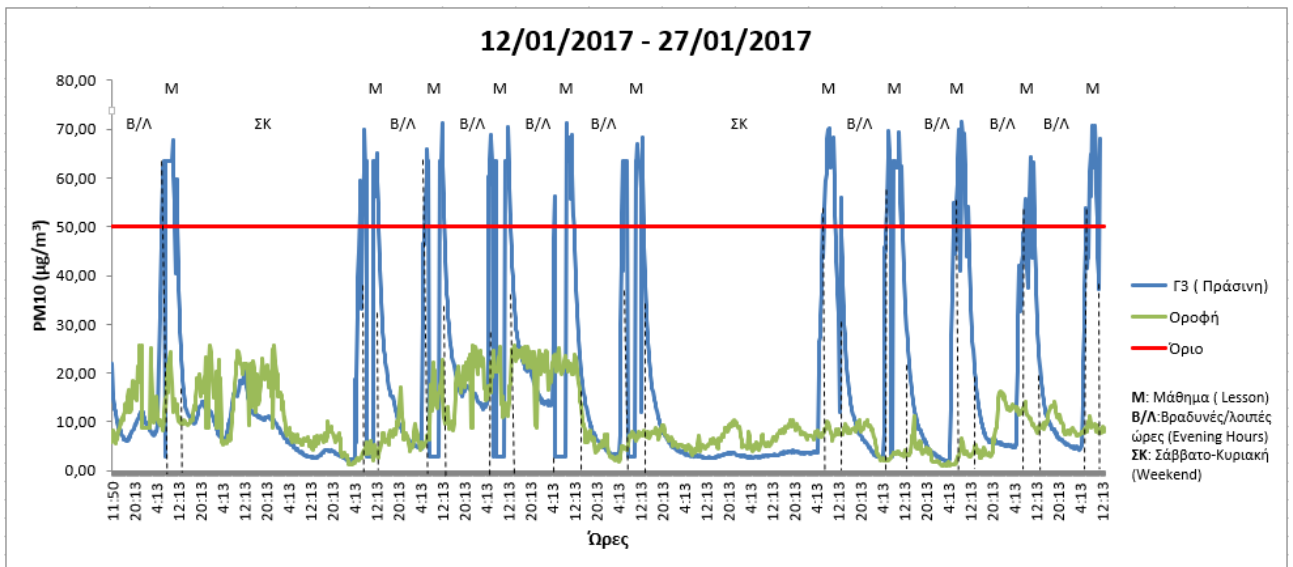
Αίθουσα E3

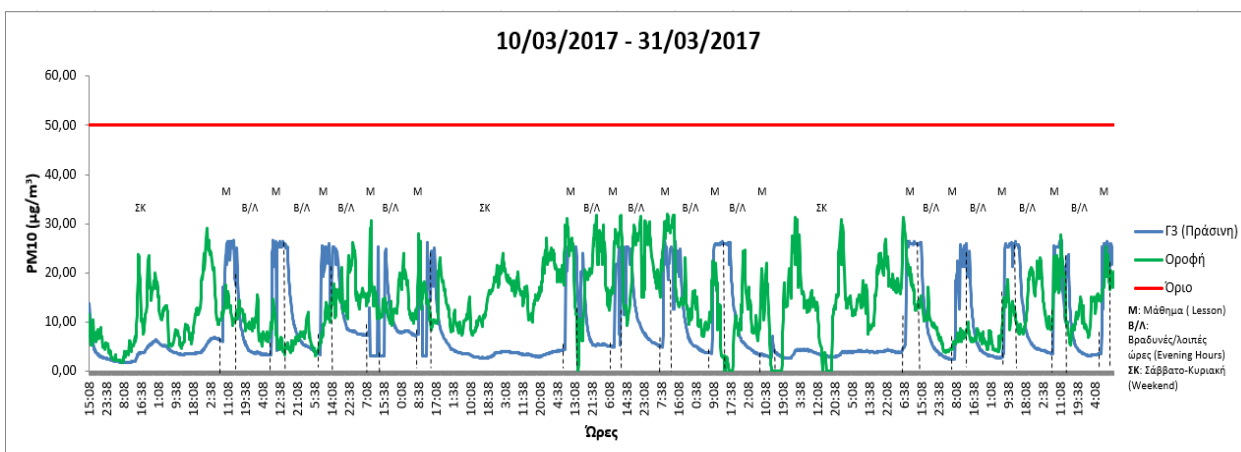
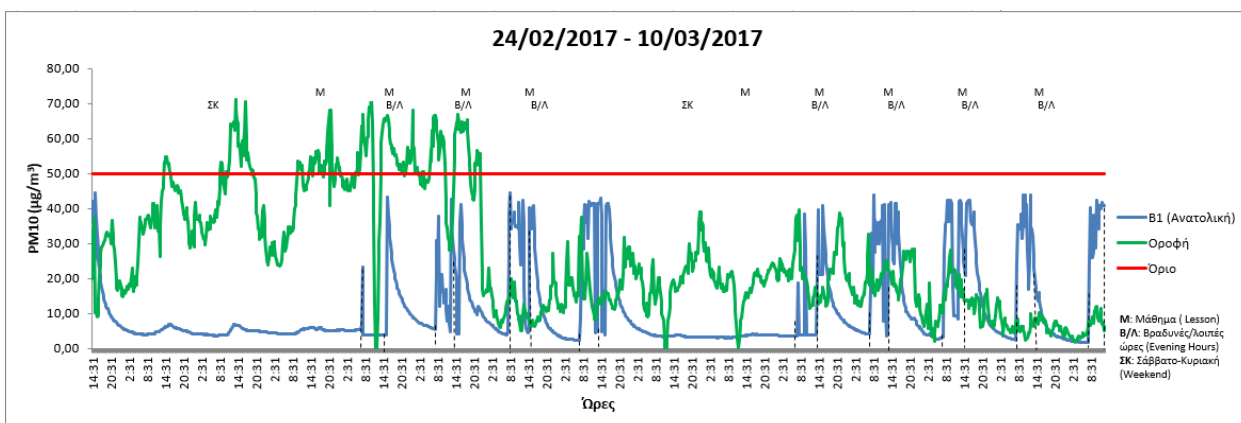
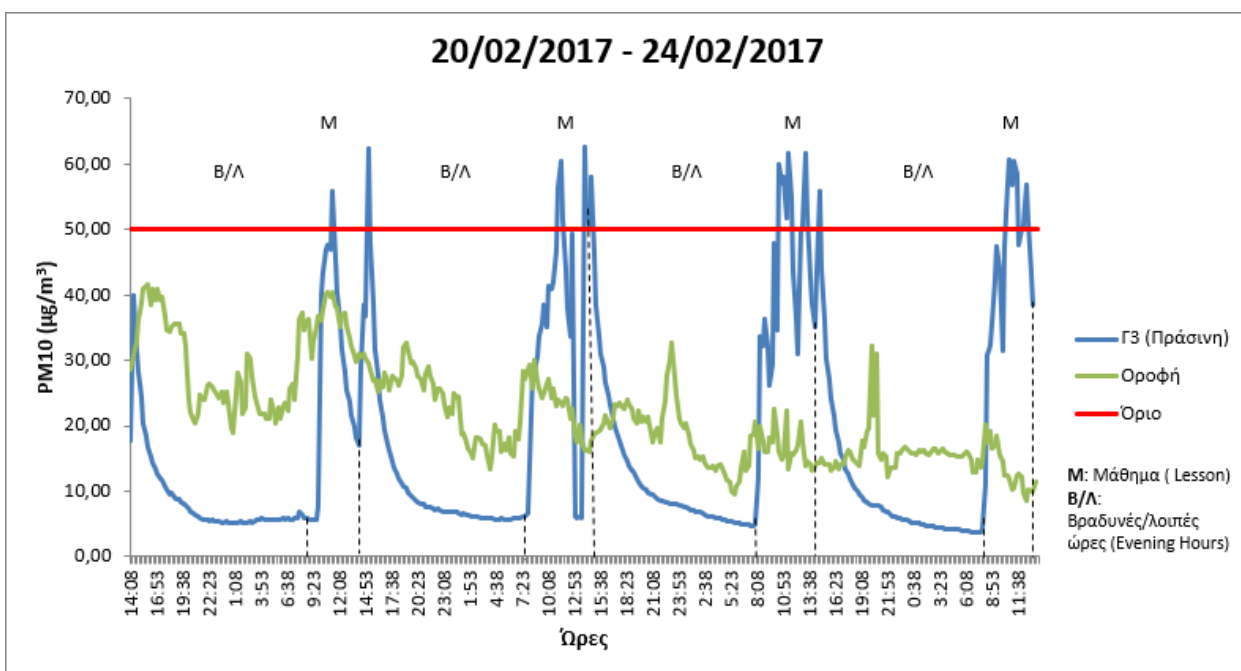


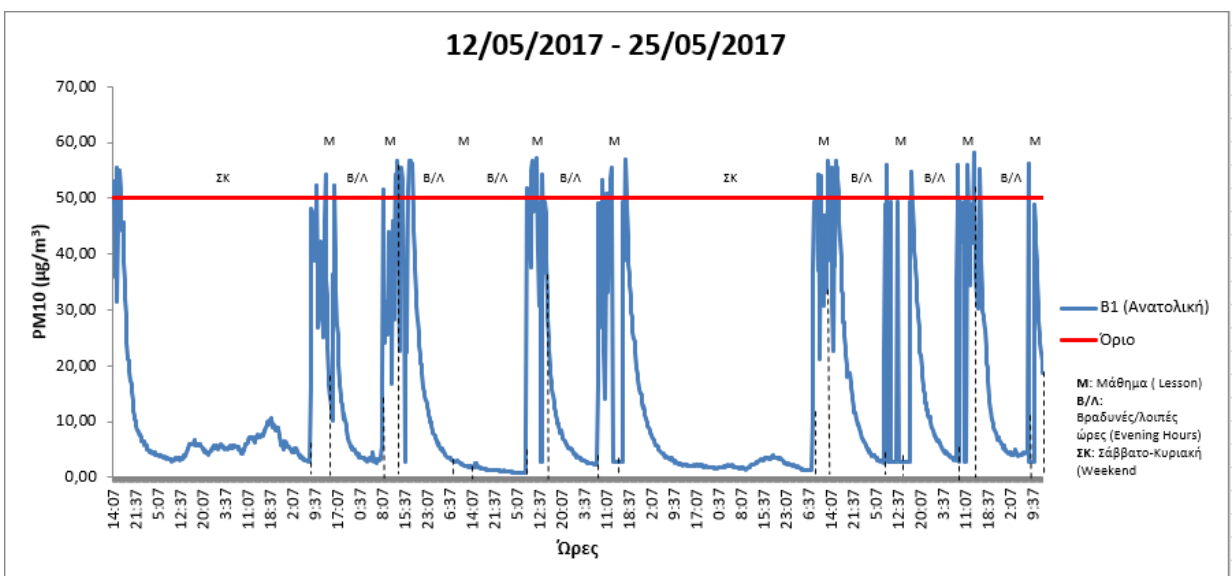
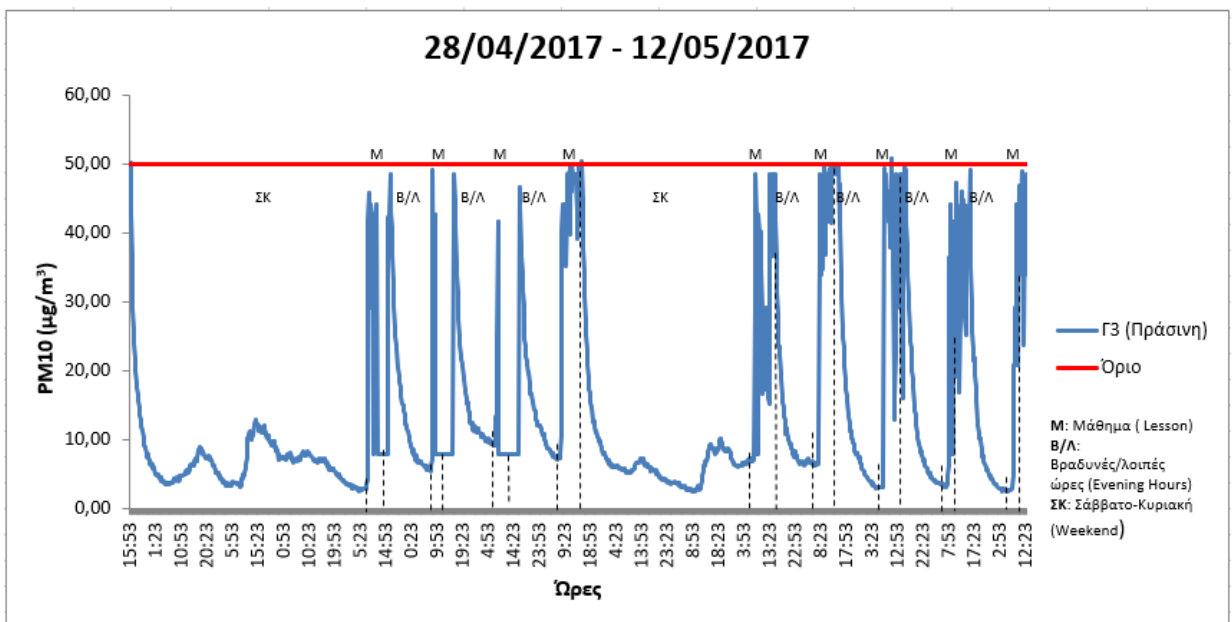
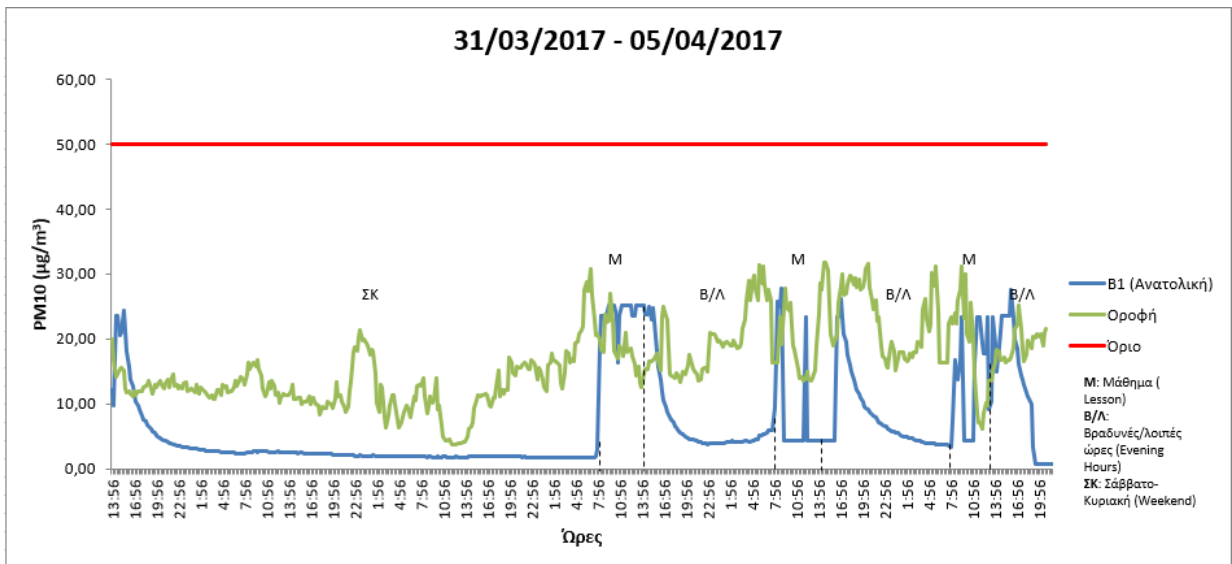
Παράρτημα ΣΤ: Αιωρούμενα Σωματίδια (PM)

1) Ημερήσια αποτελέσματα

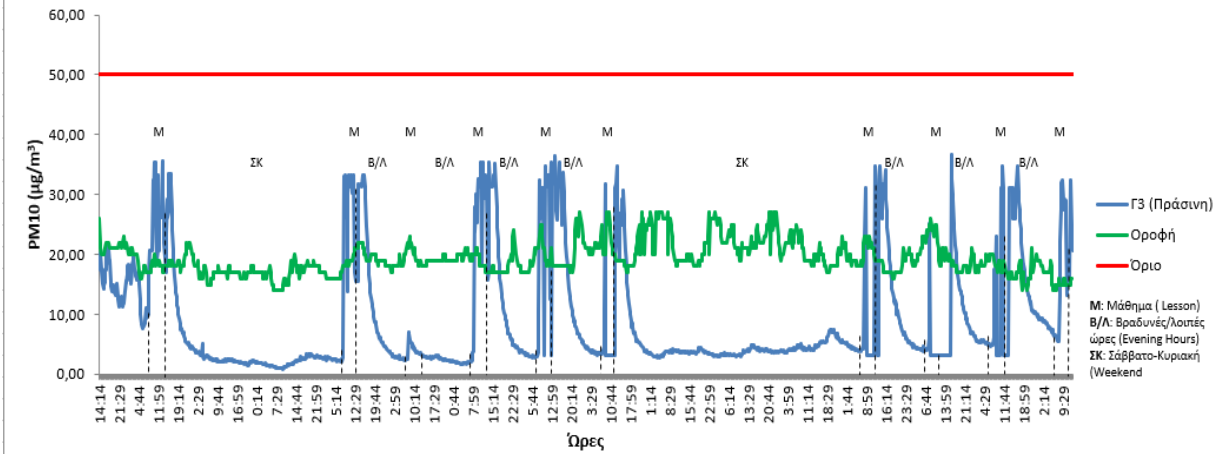
Εβδομαδιαία PM₁₀



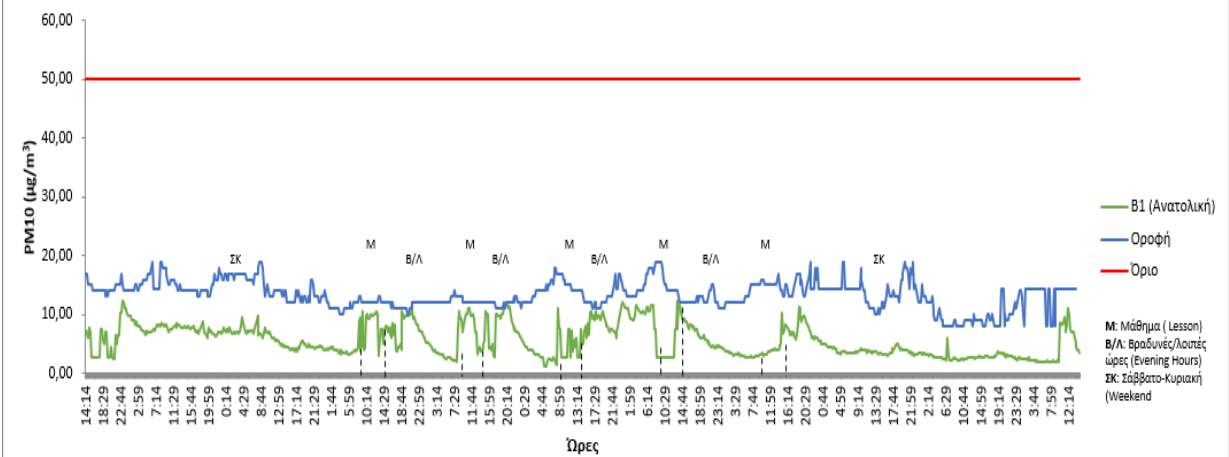




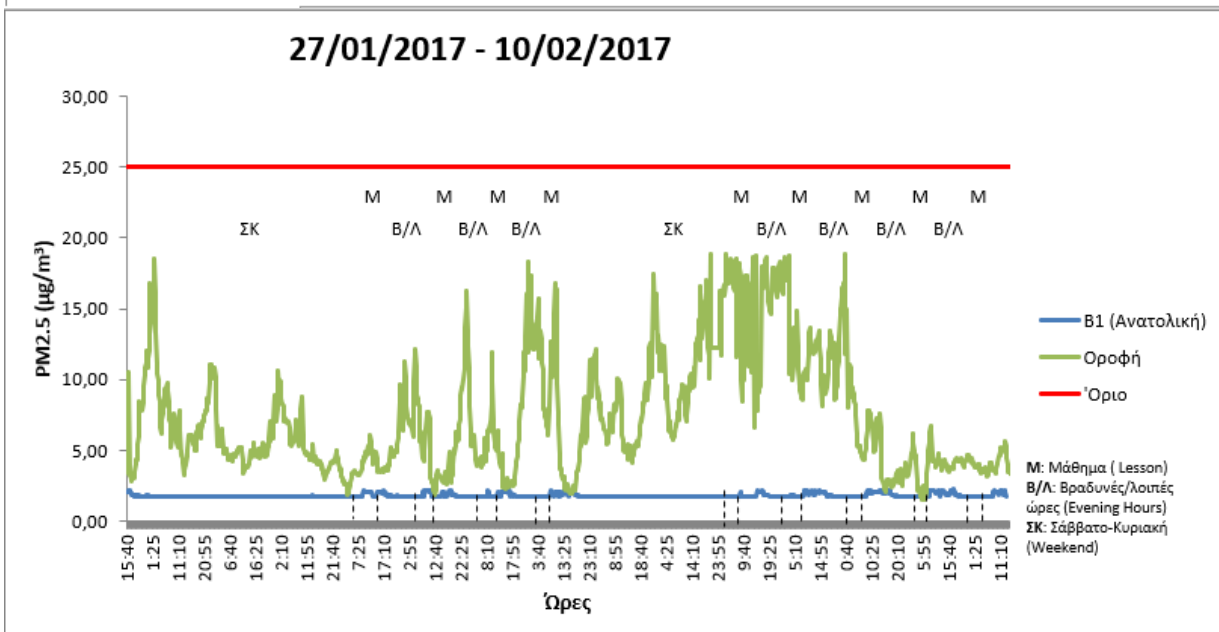
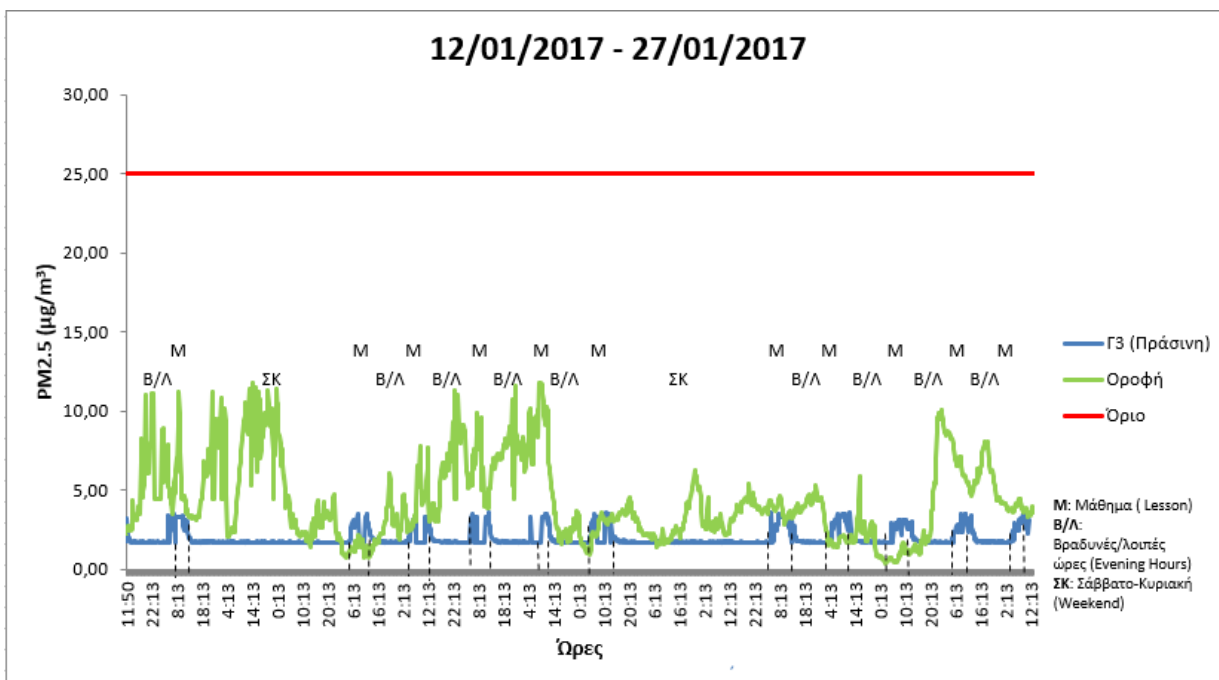
25/05/2017 - 09/06/2017

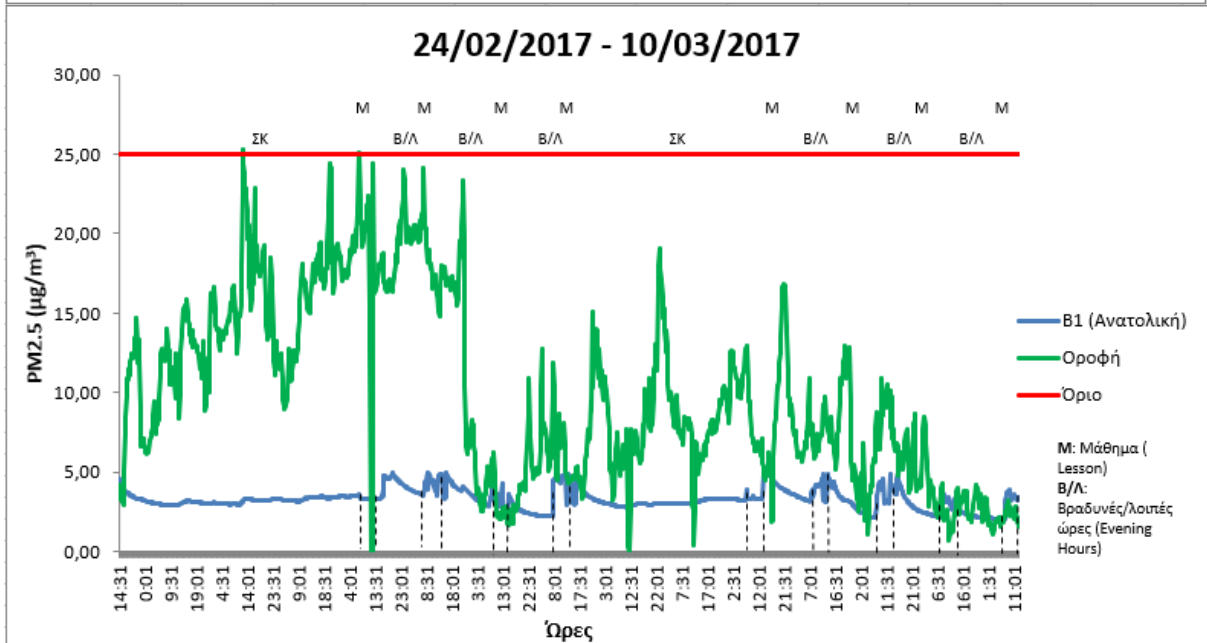
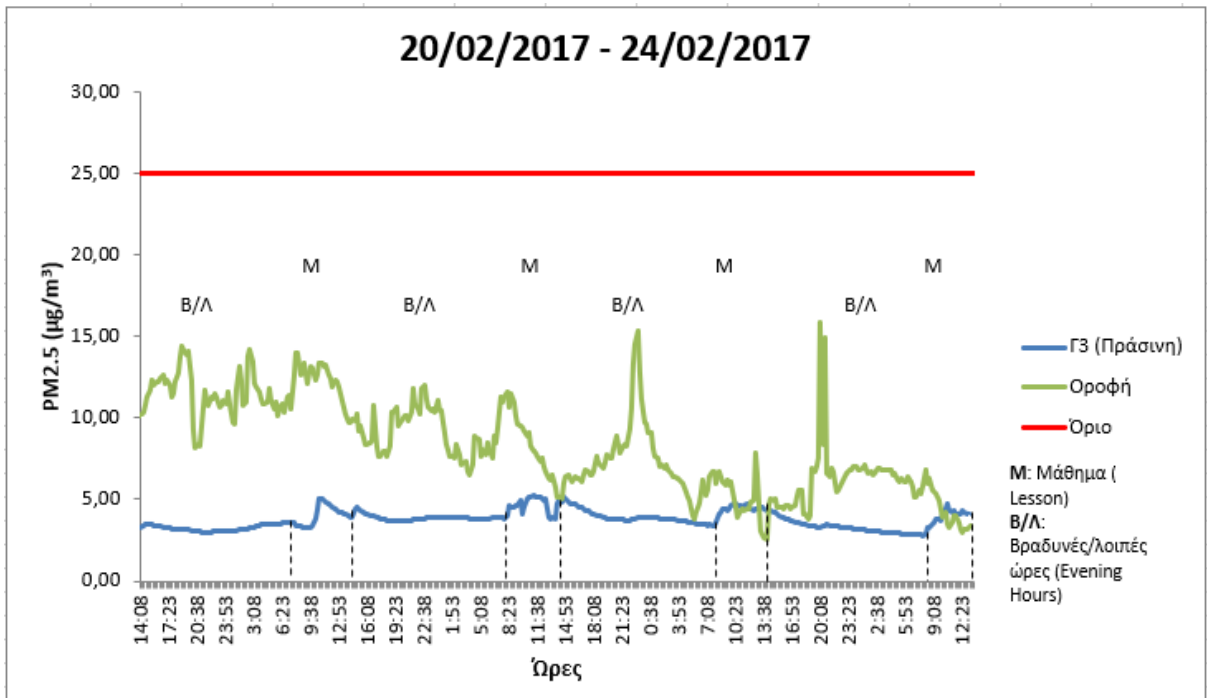


09/06/2017 - 19/06/2017

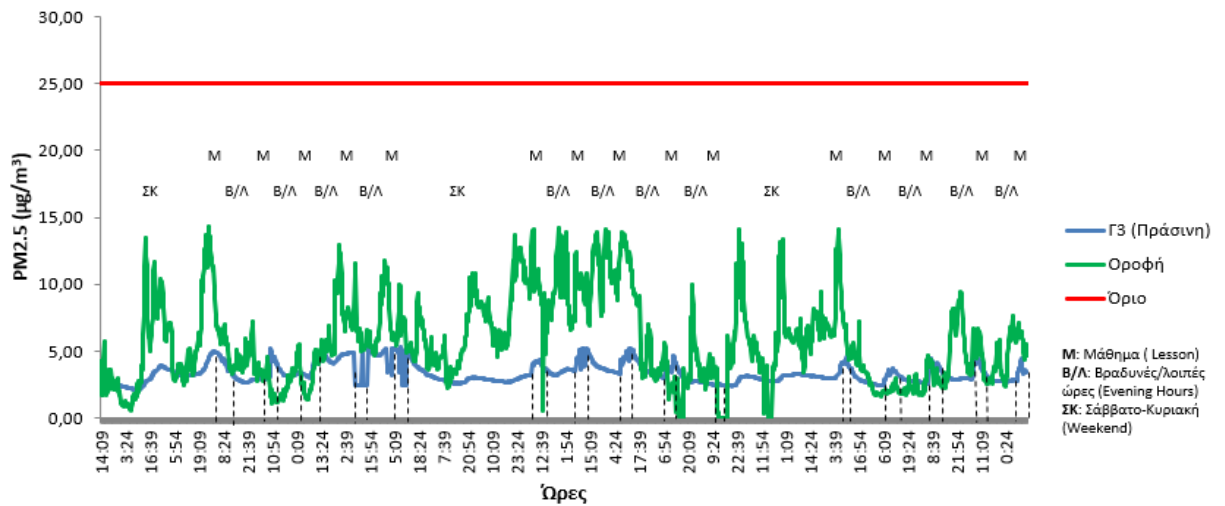


Εβδομαδιαία PM_{2.5}

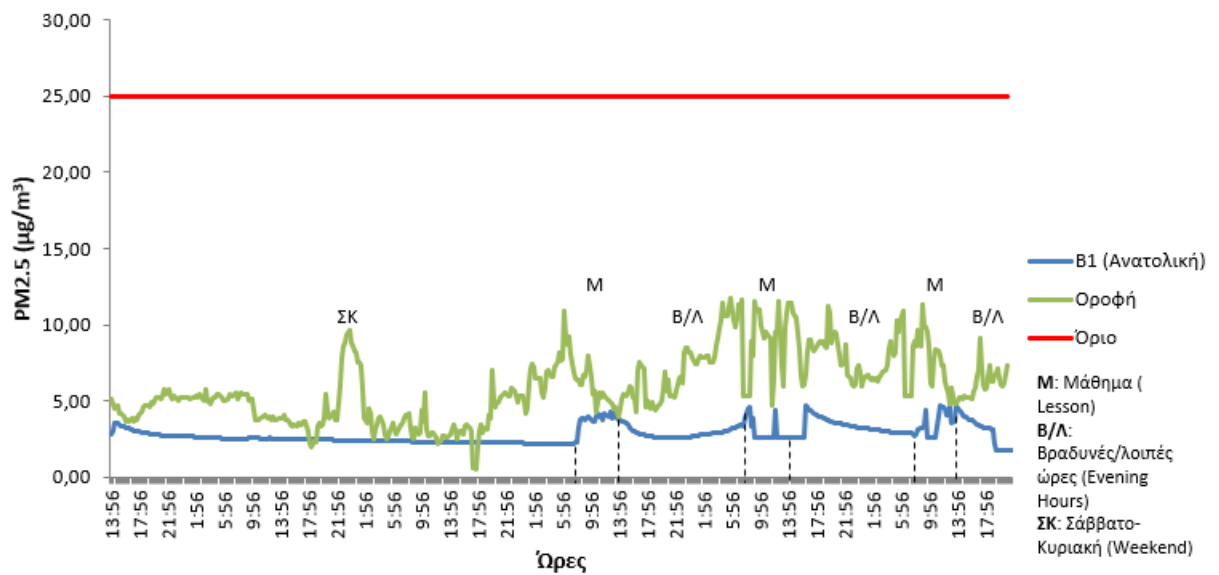


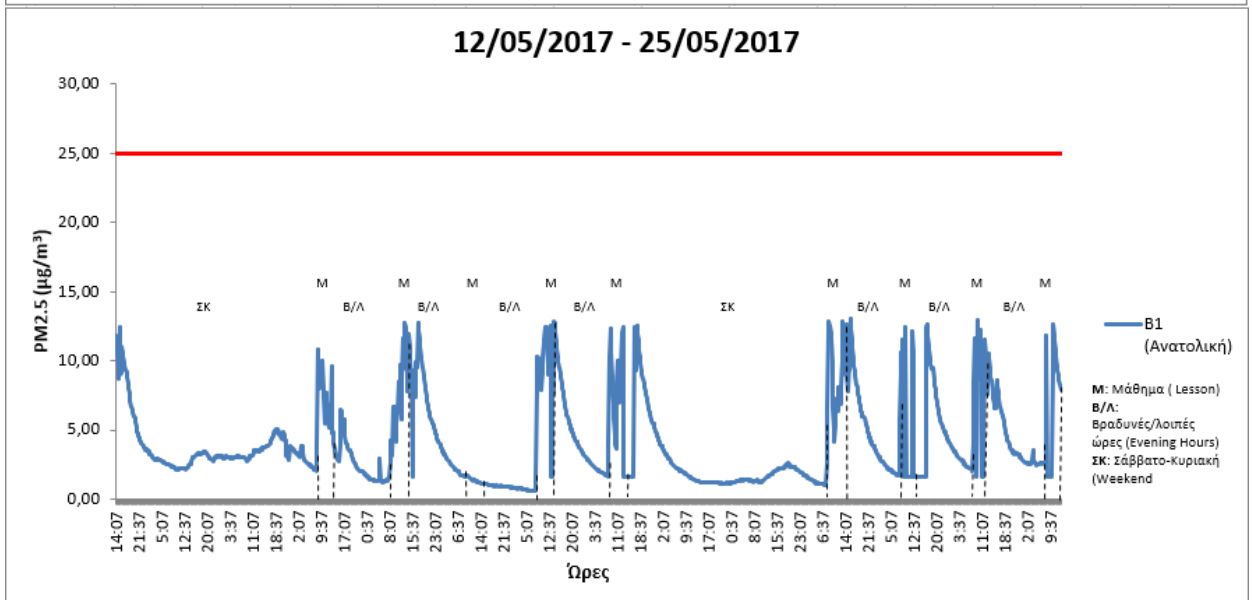
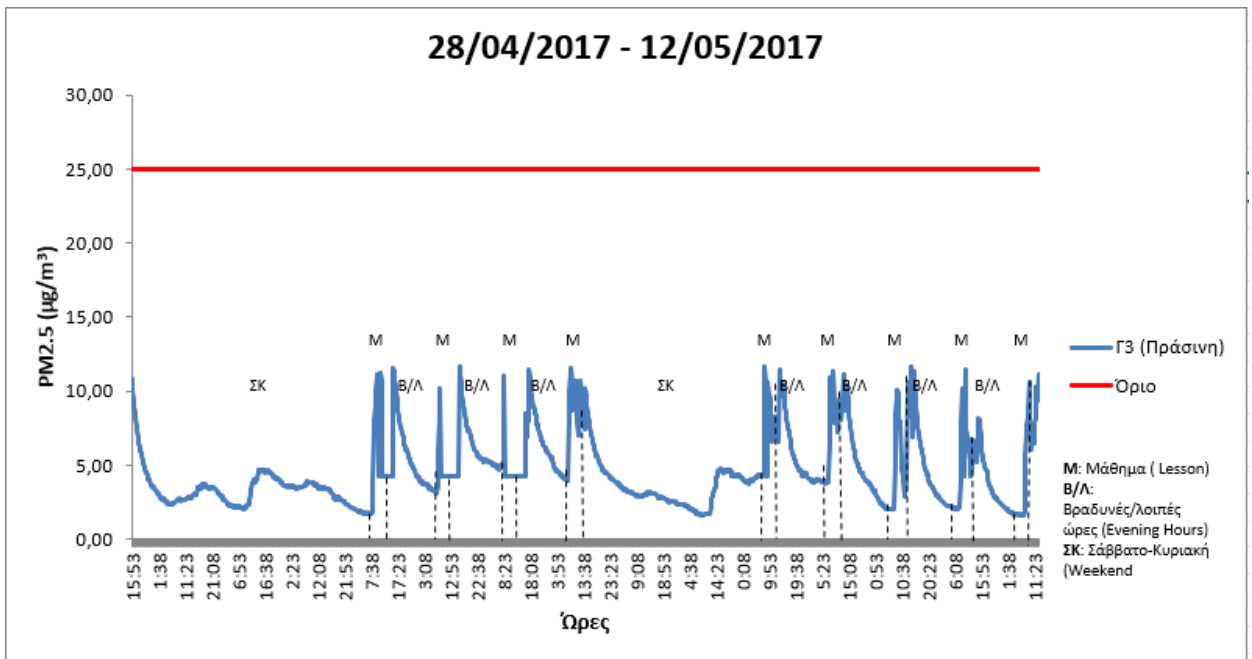


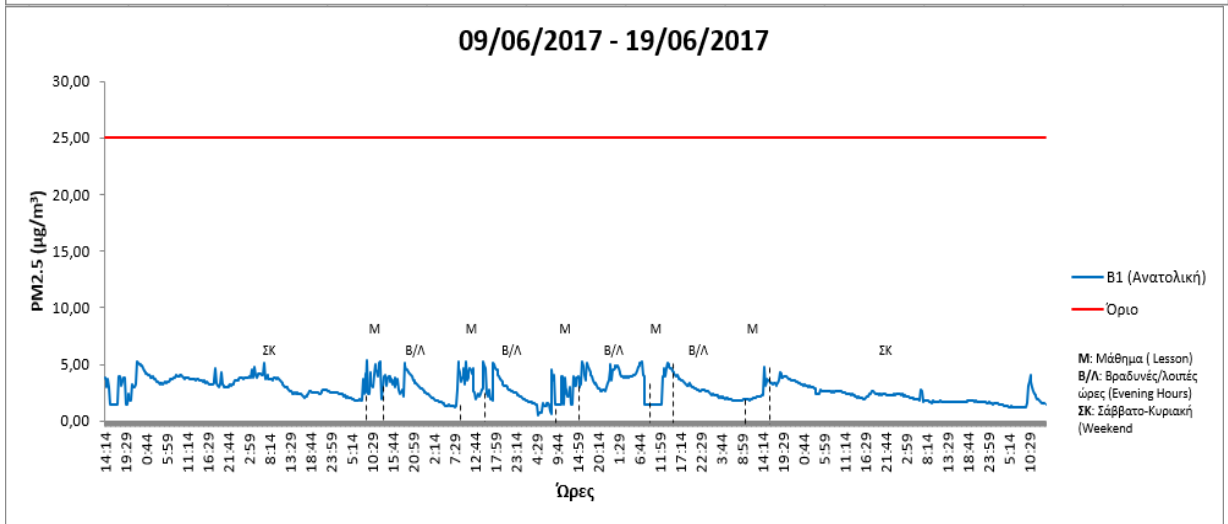
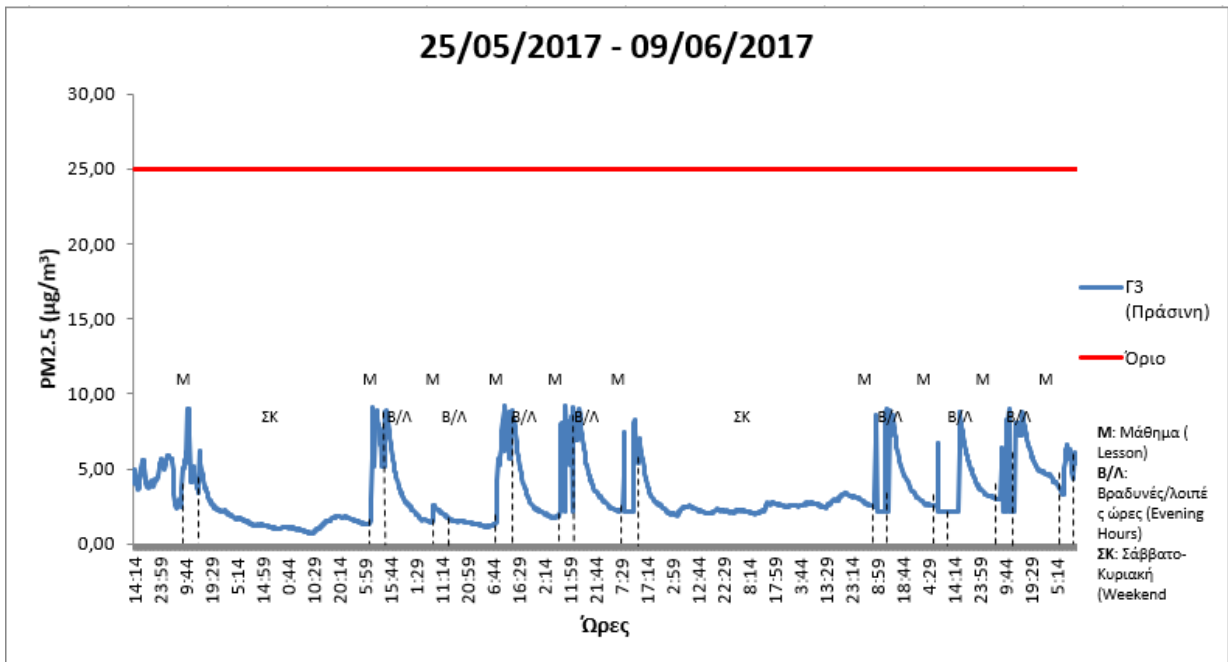
10/03/2017 - 31/03/2017



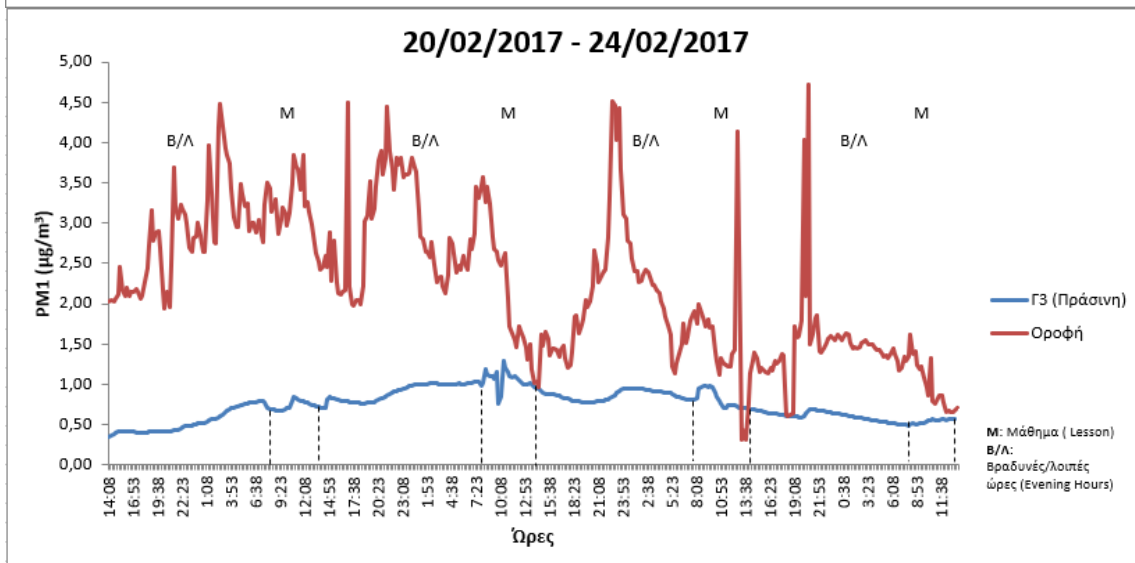
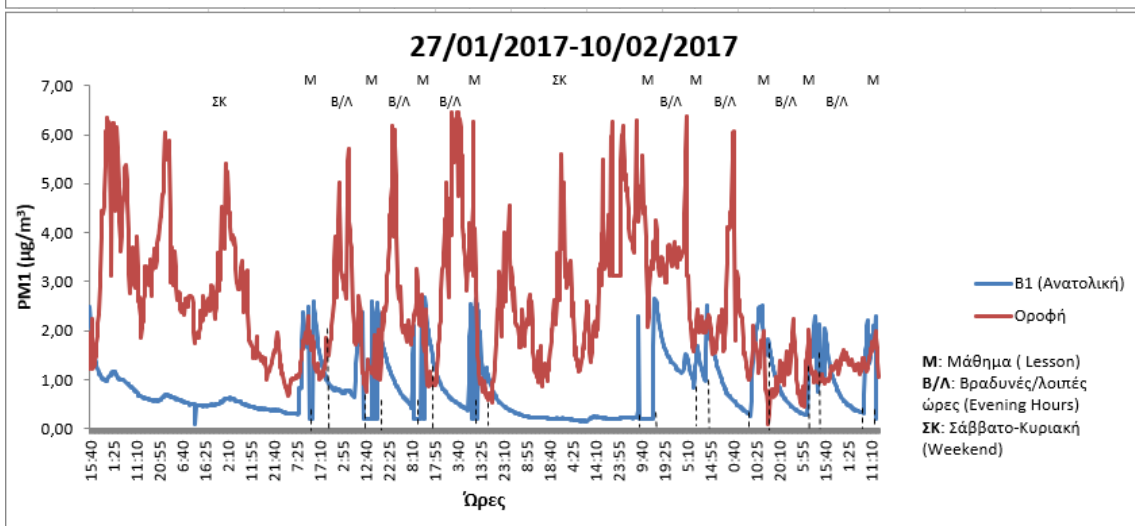
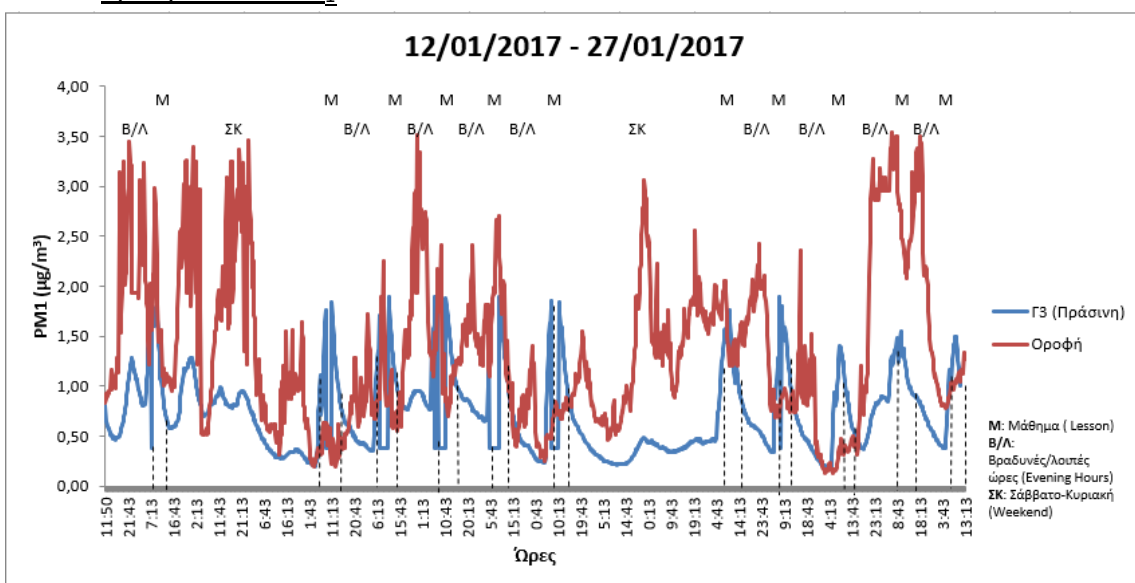
31/03/2017 - 05/04/2017

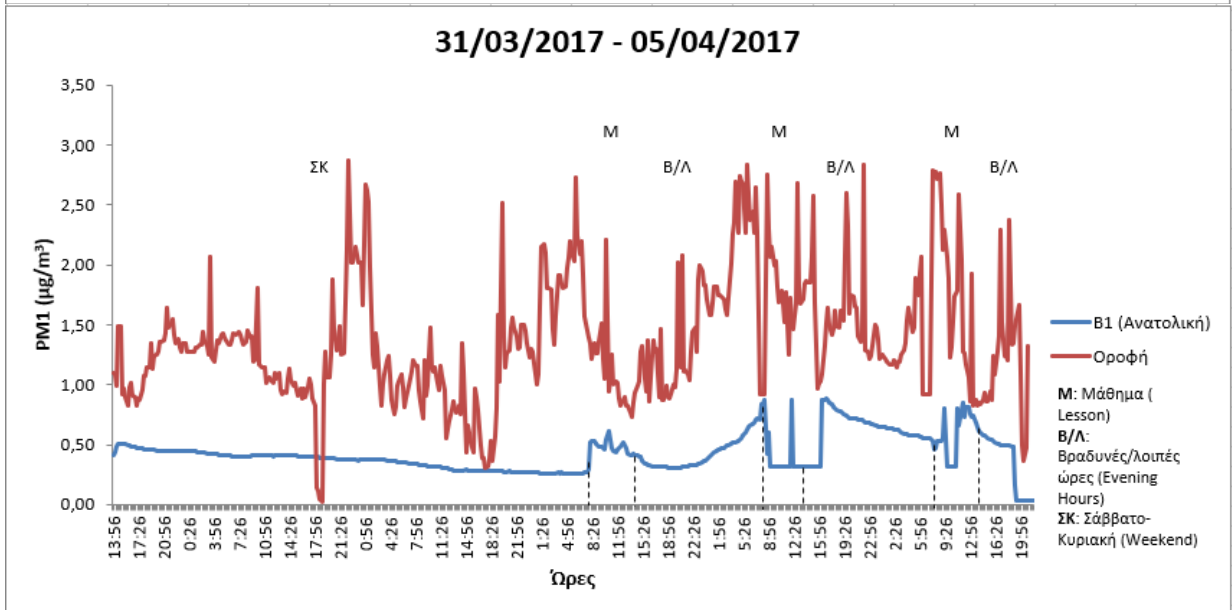
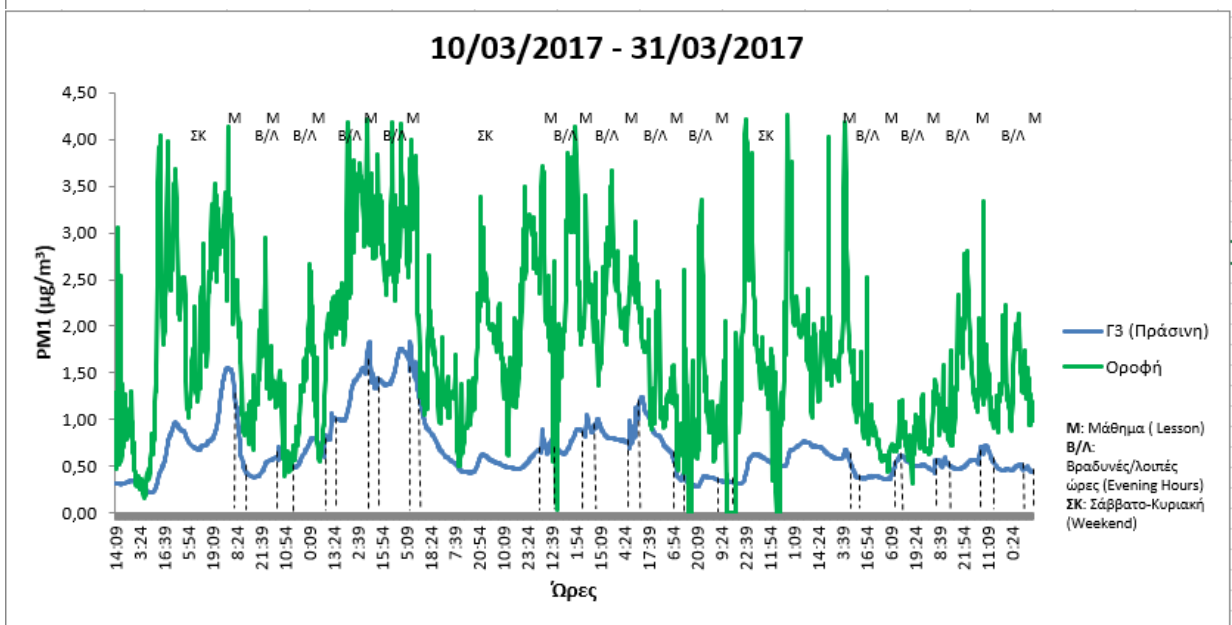
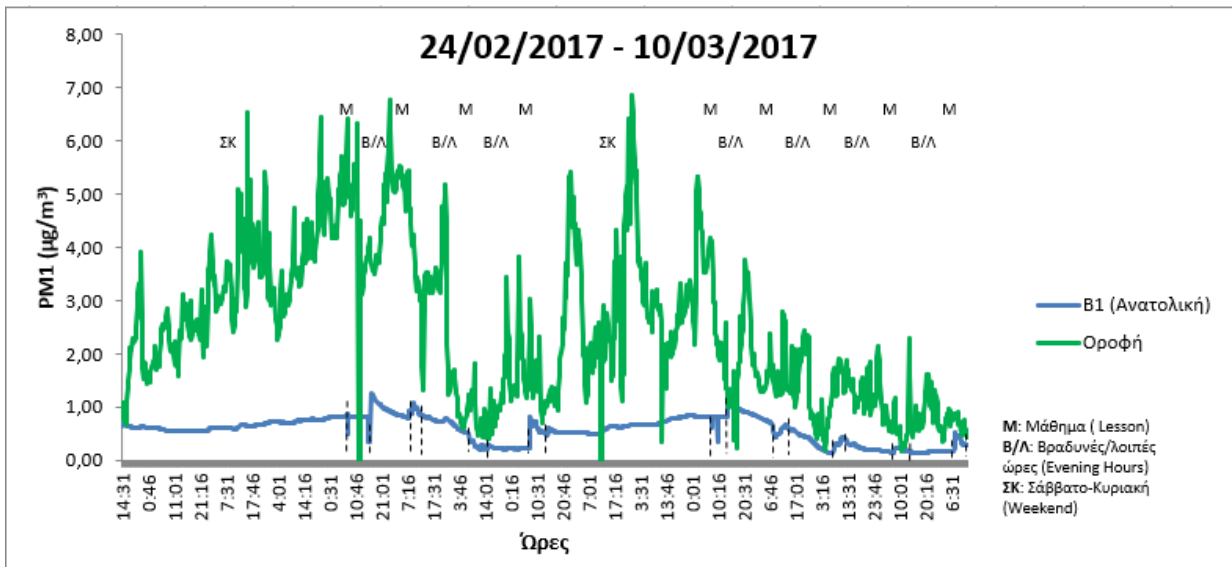


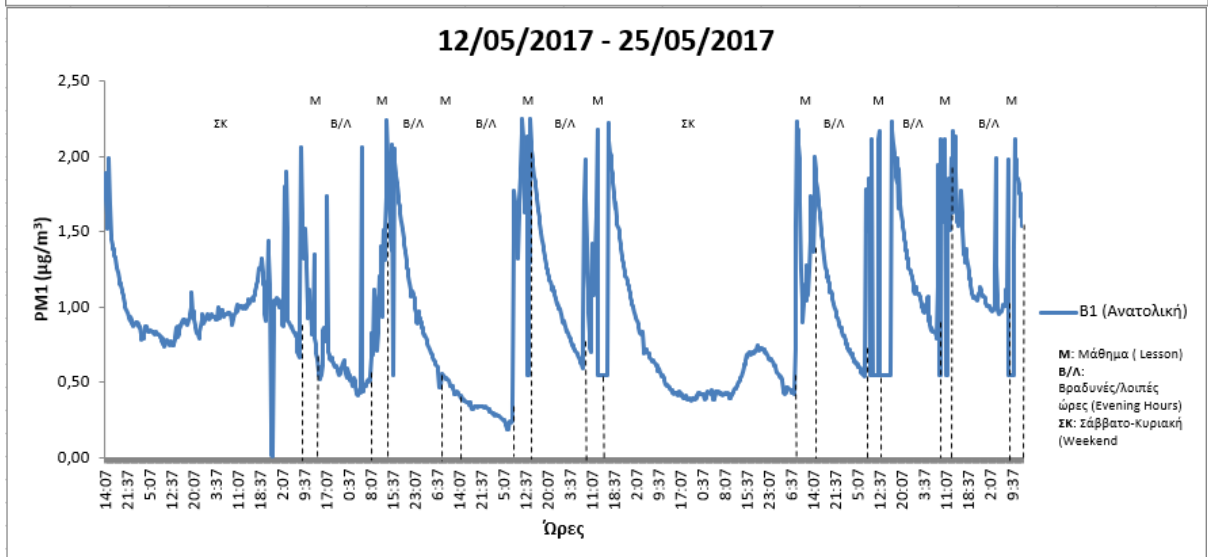
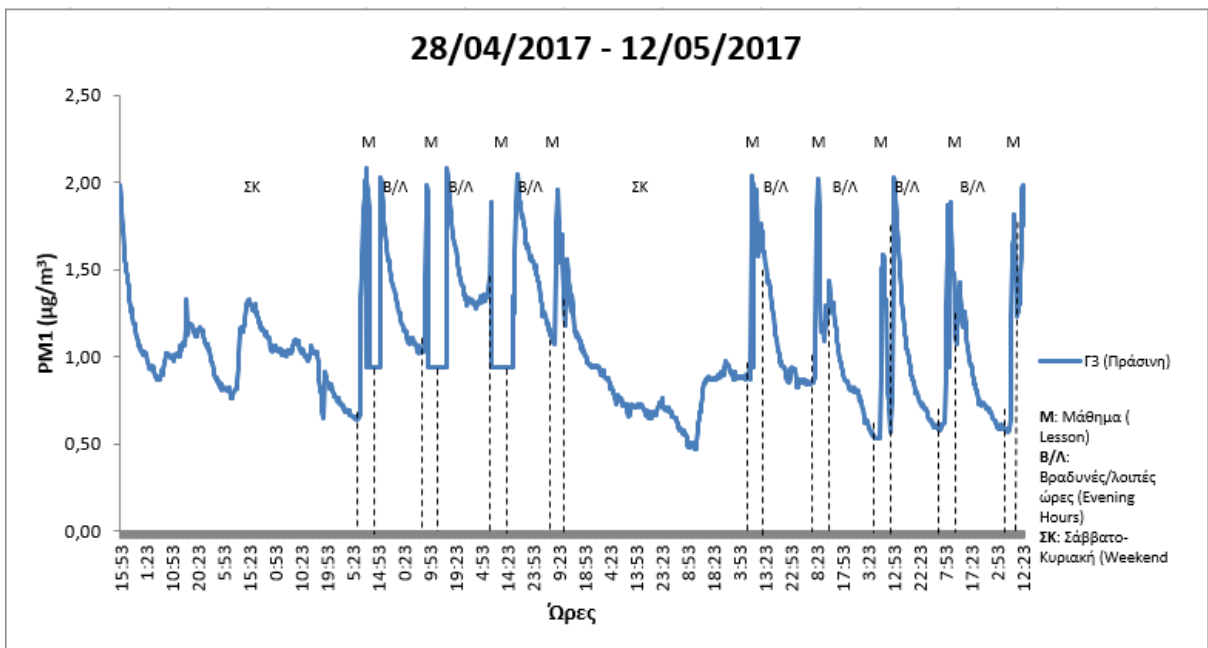


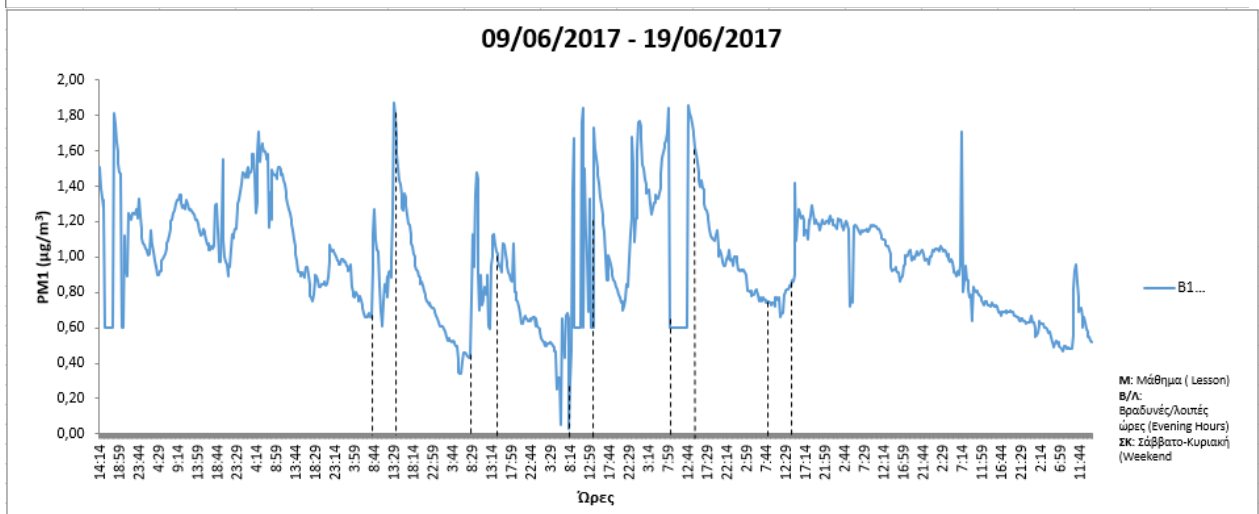
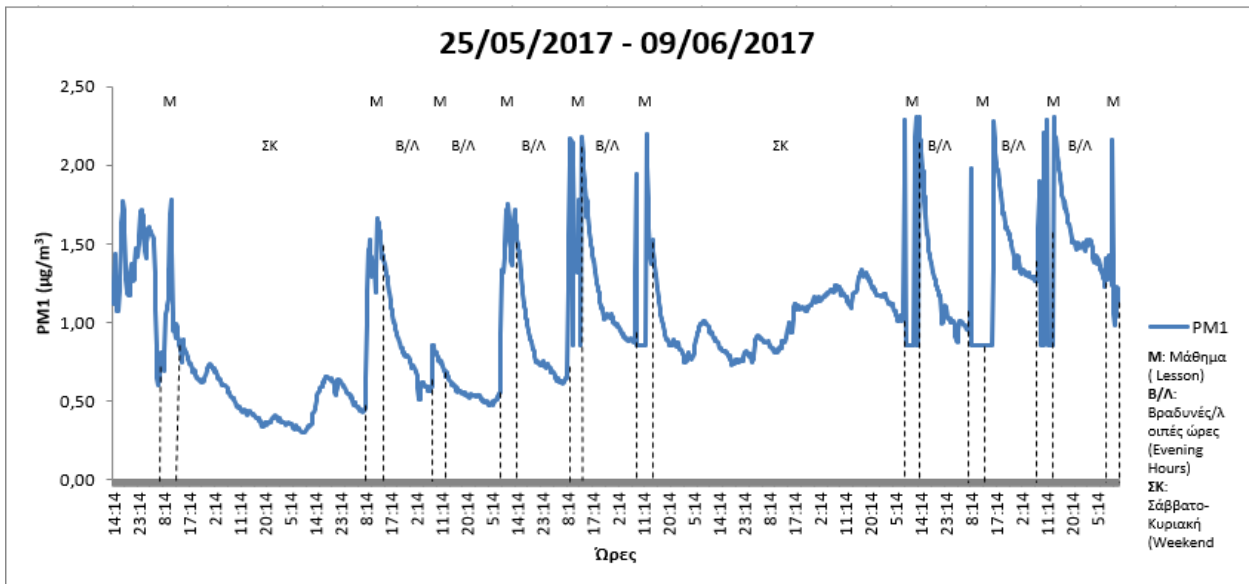


Εβδομαδιαία PM₁

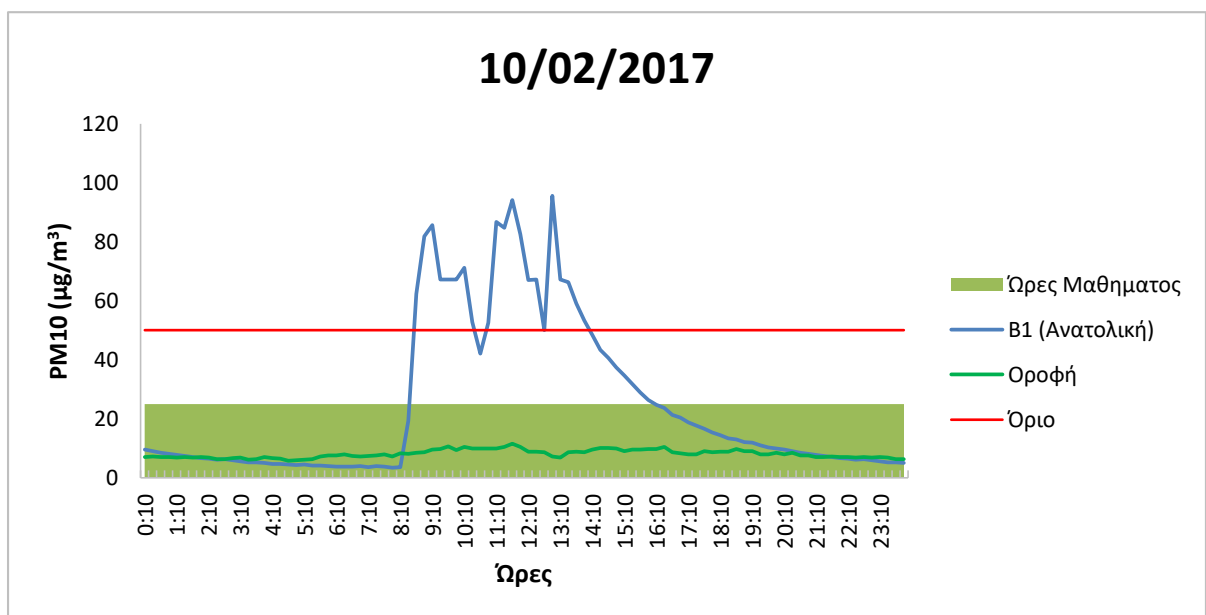
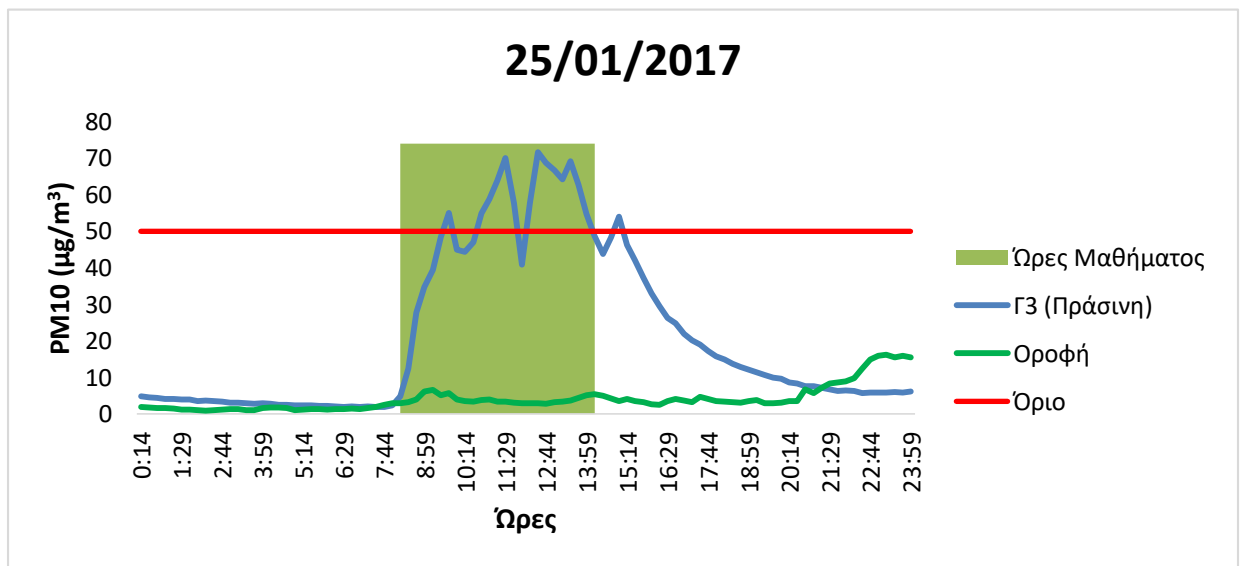


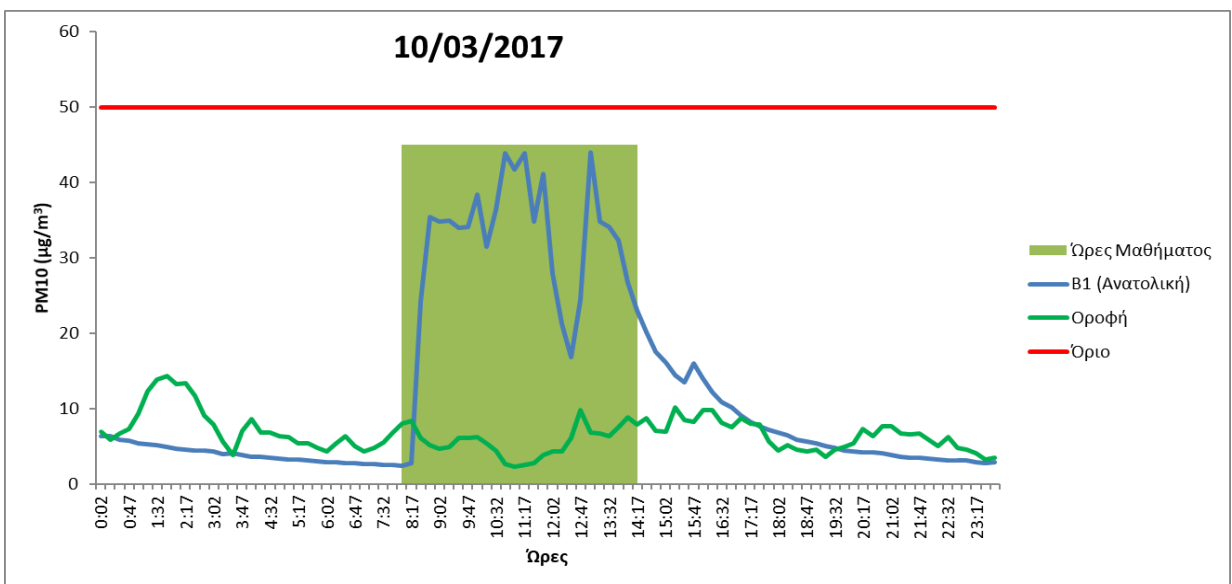
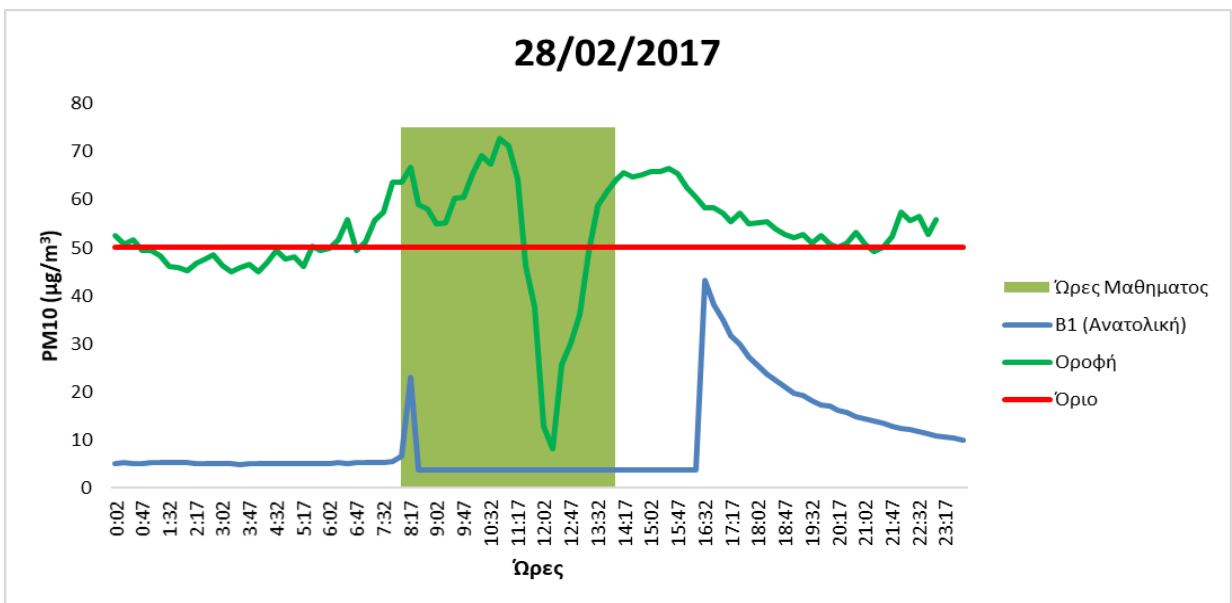
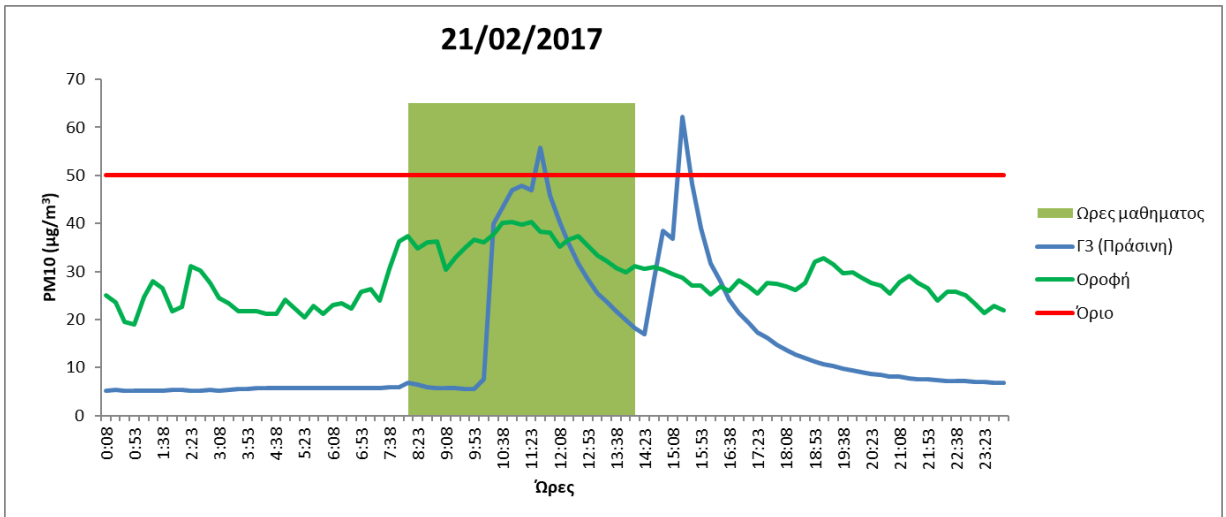




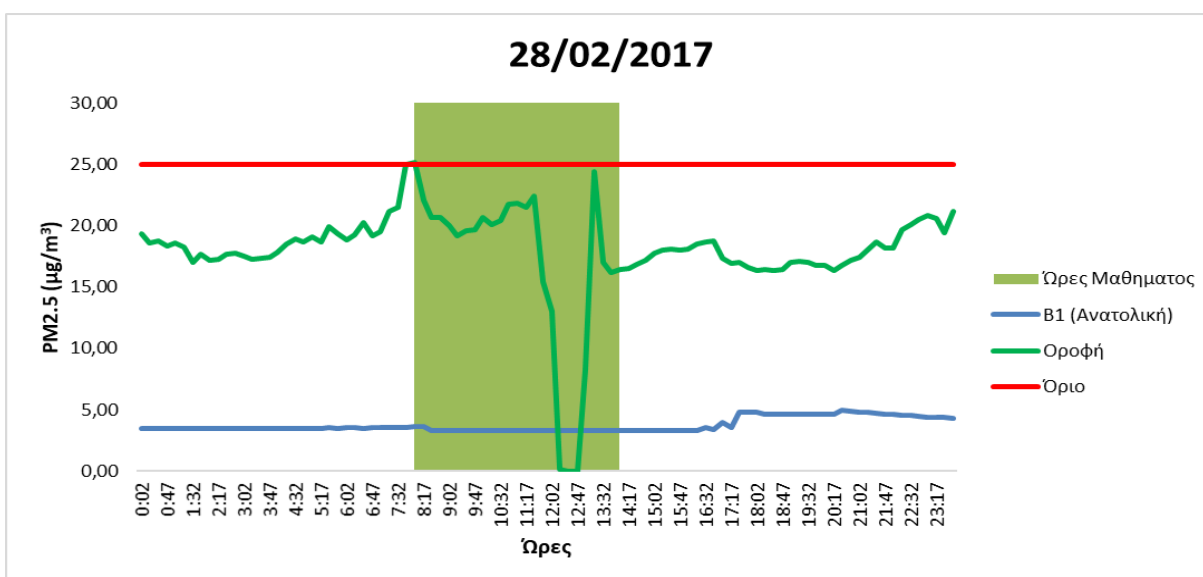
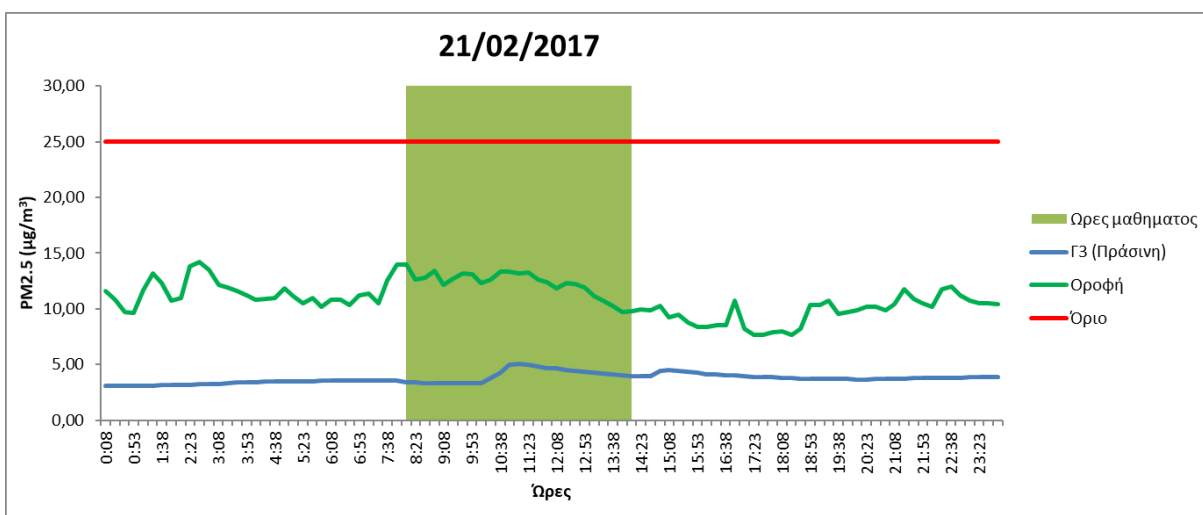
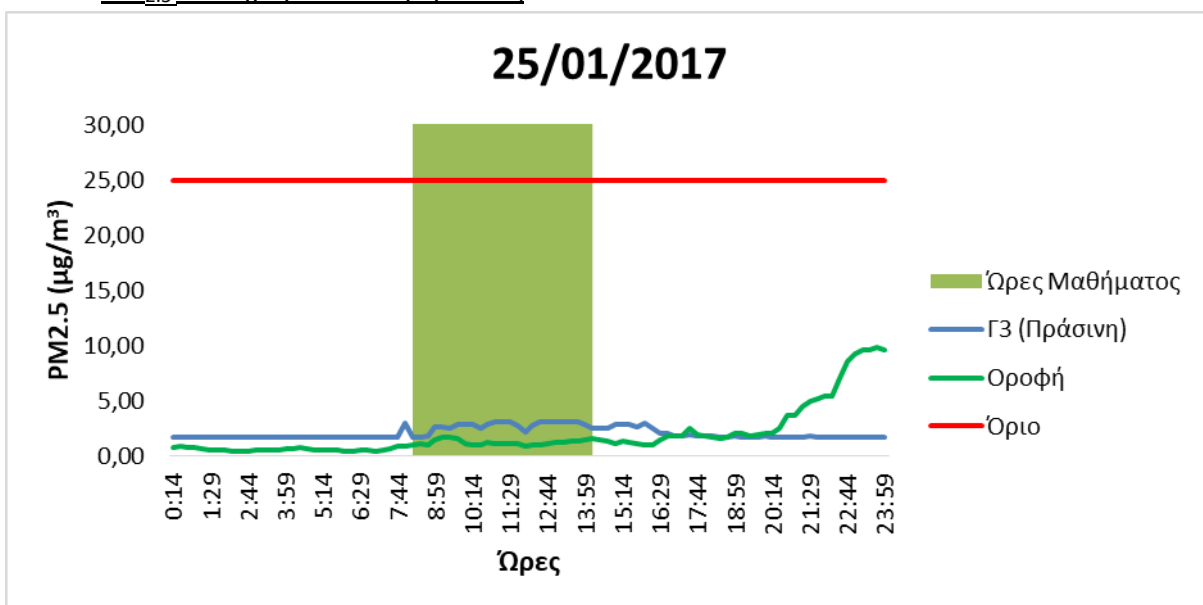


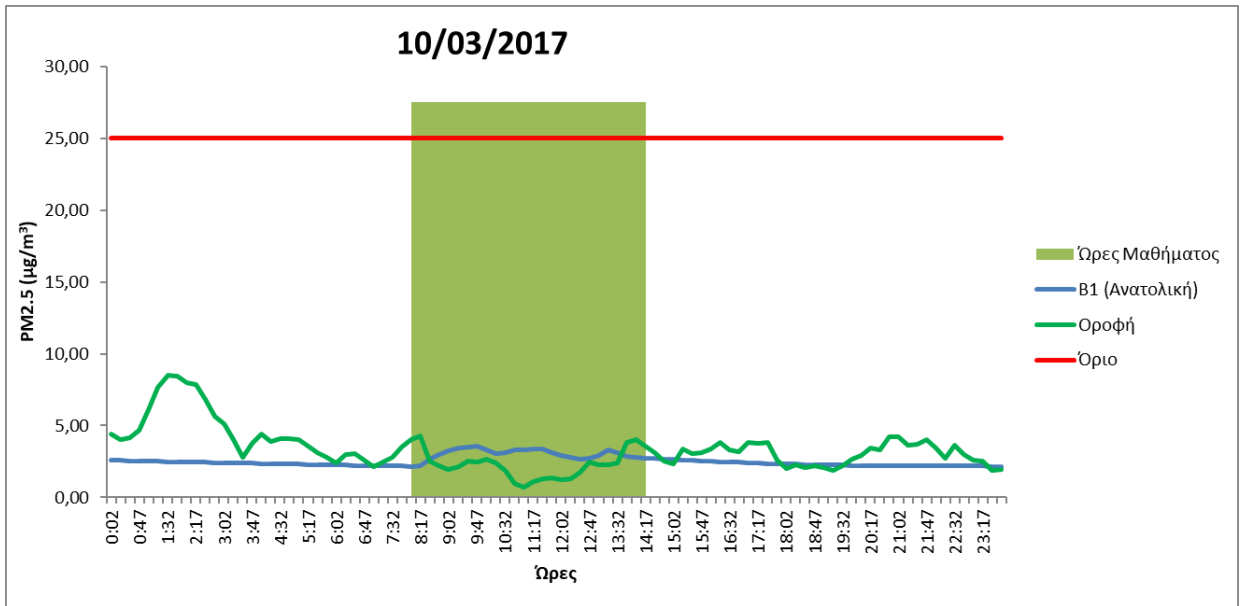
PM₁₀ ανά ημέρα ενδιαφέροντος



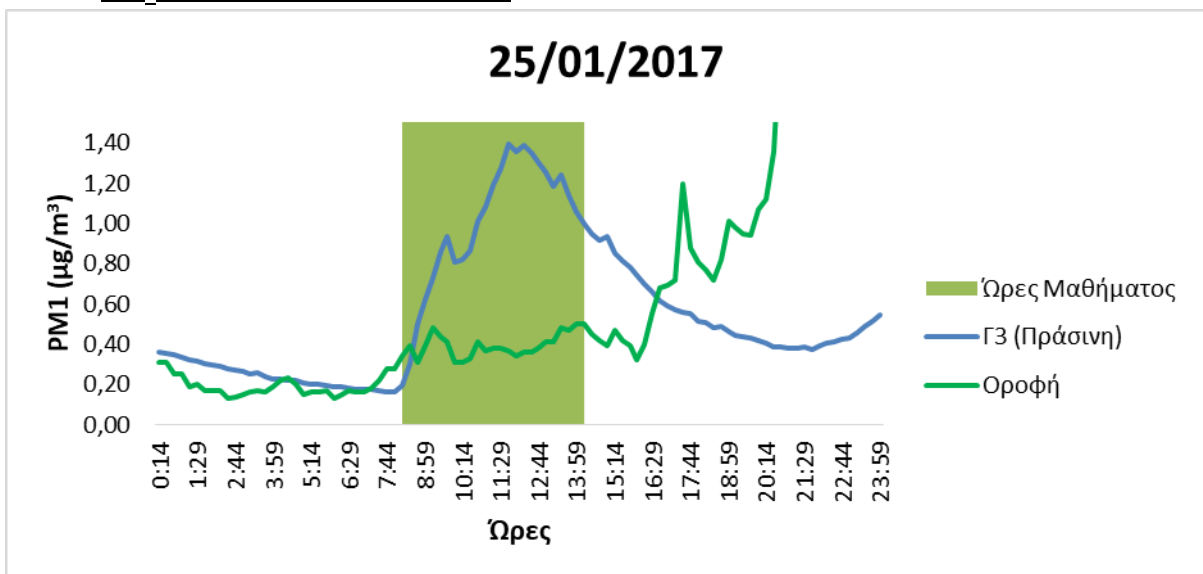


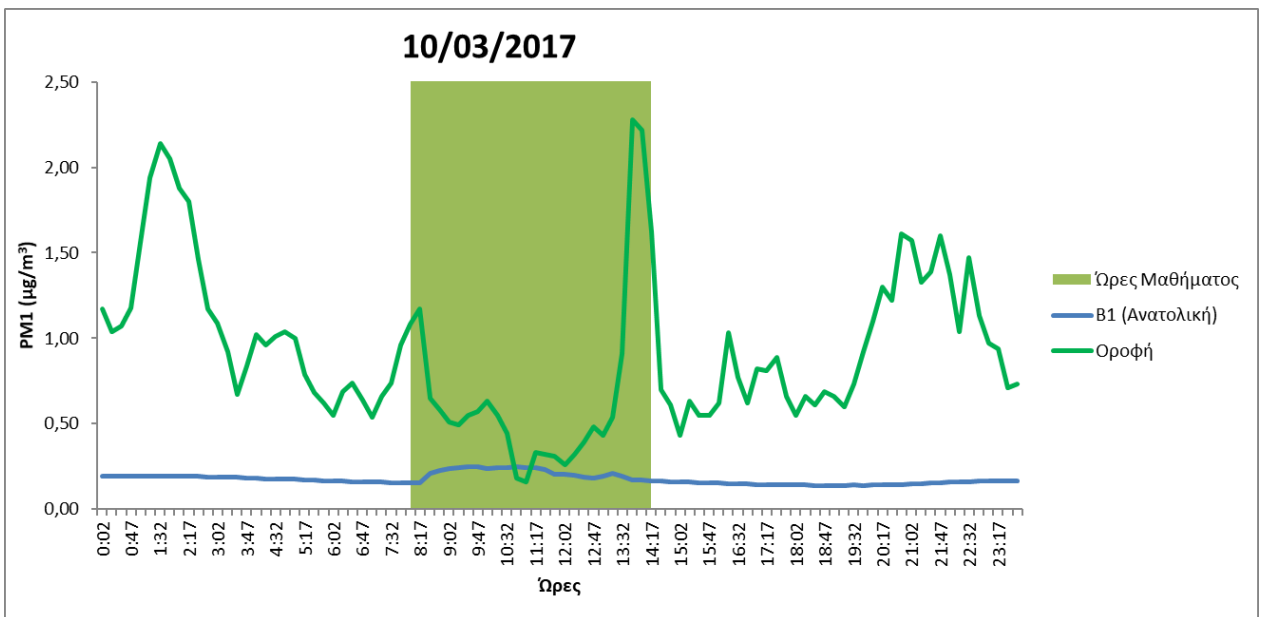
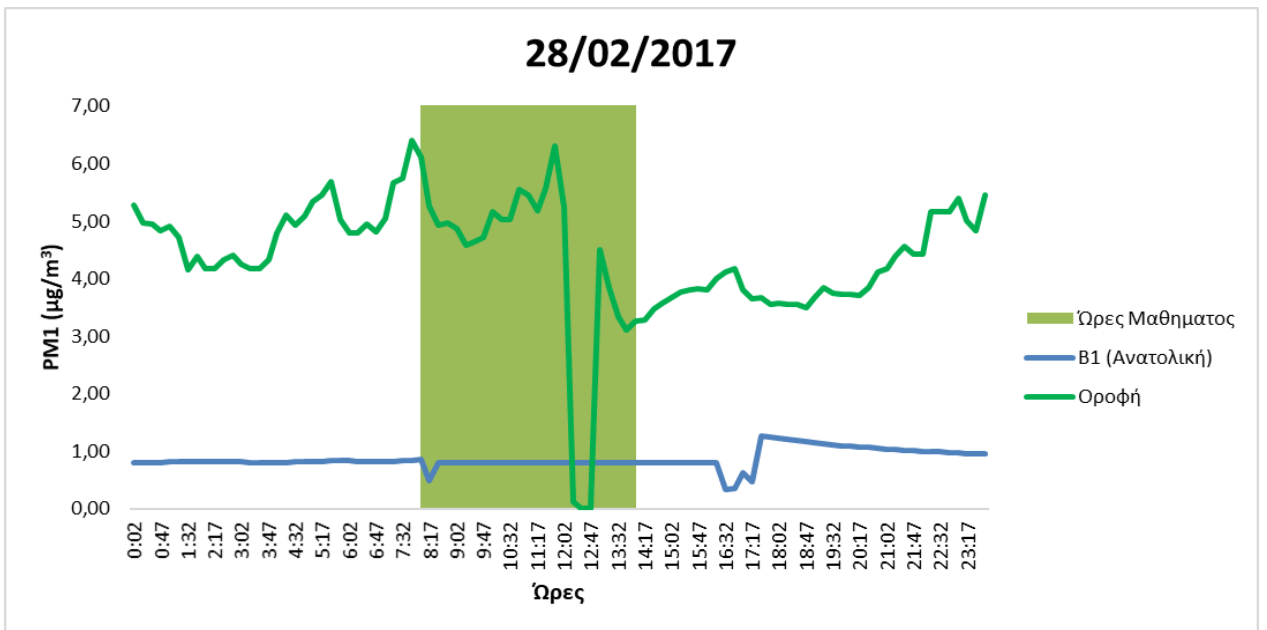
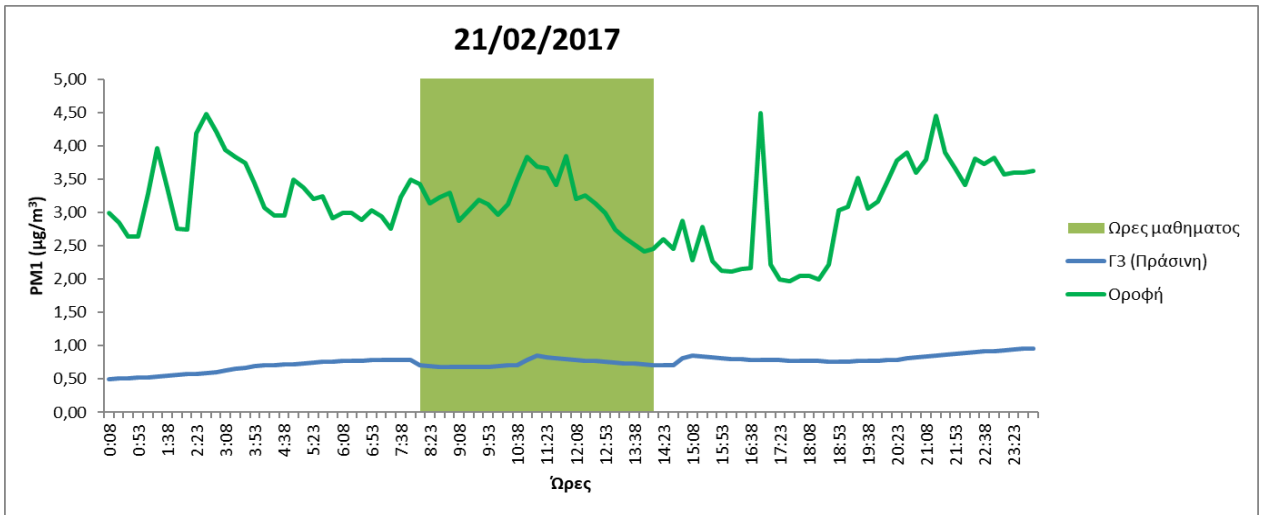
PM_{2.5} ανά ημέρα ενδιαφέροντος



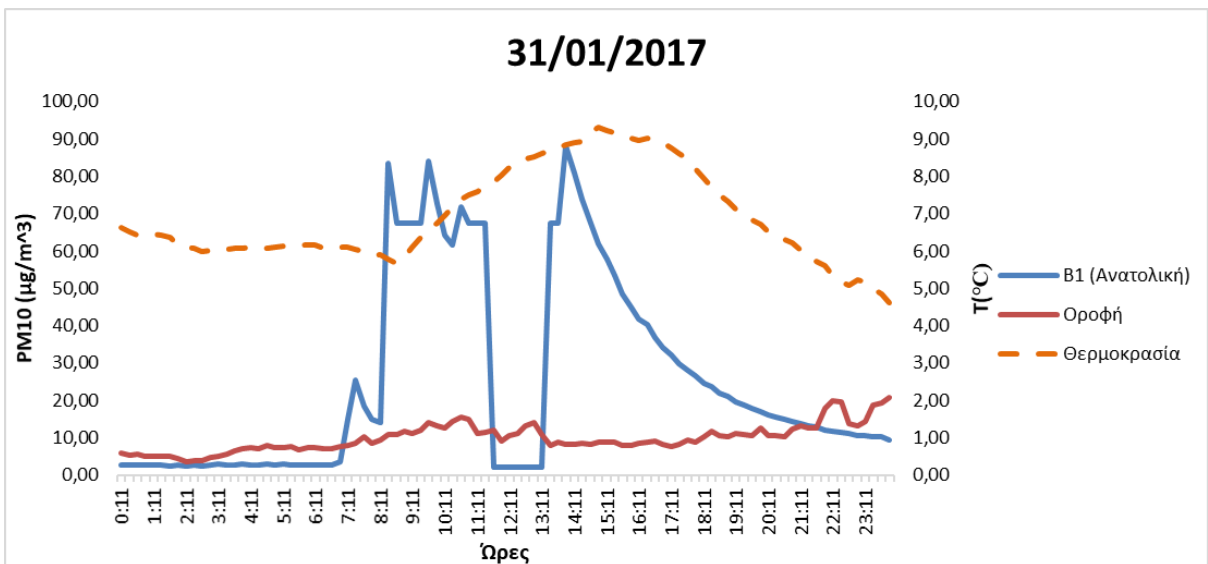
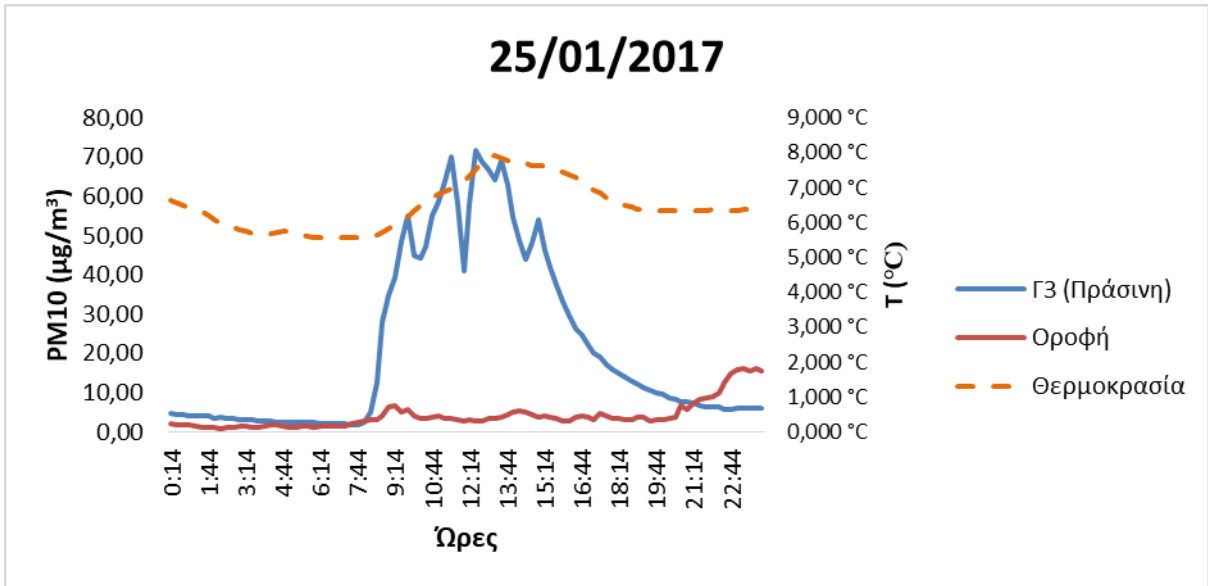


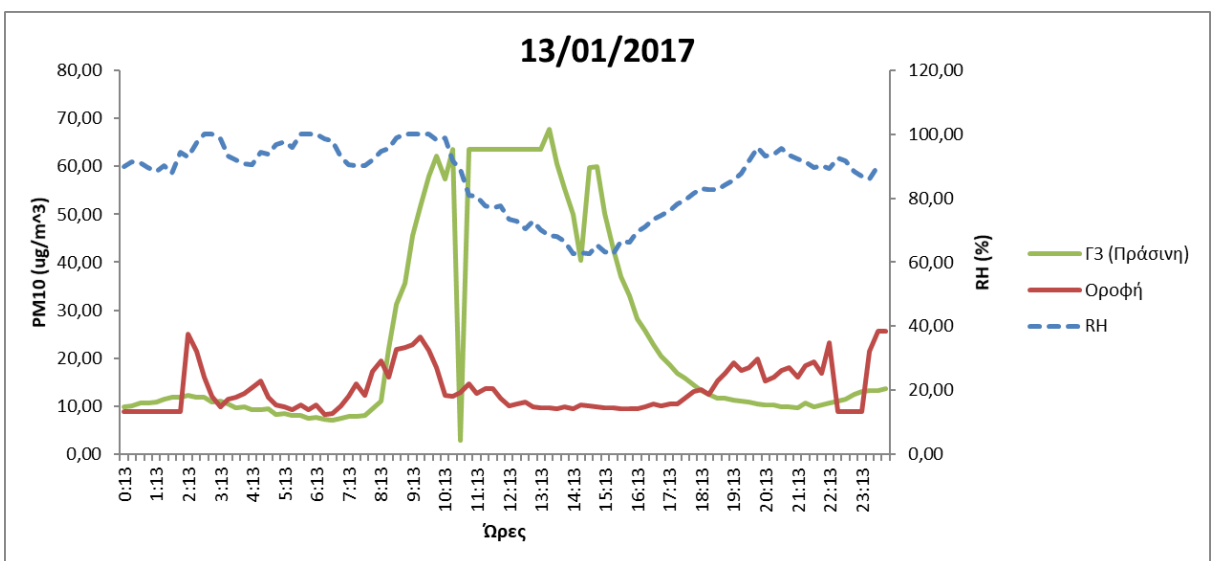
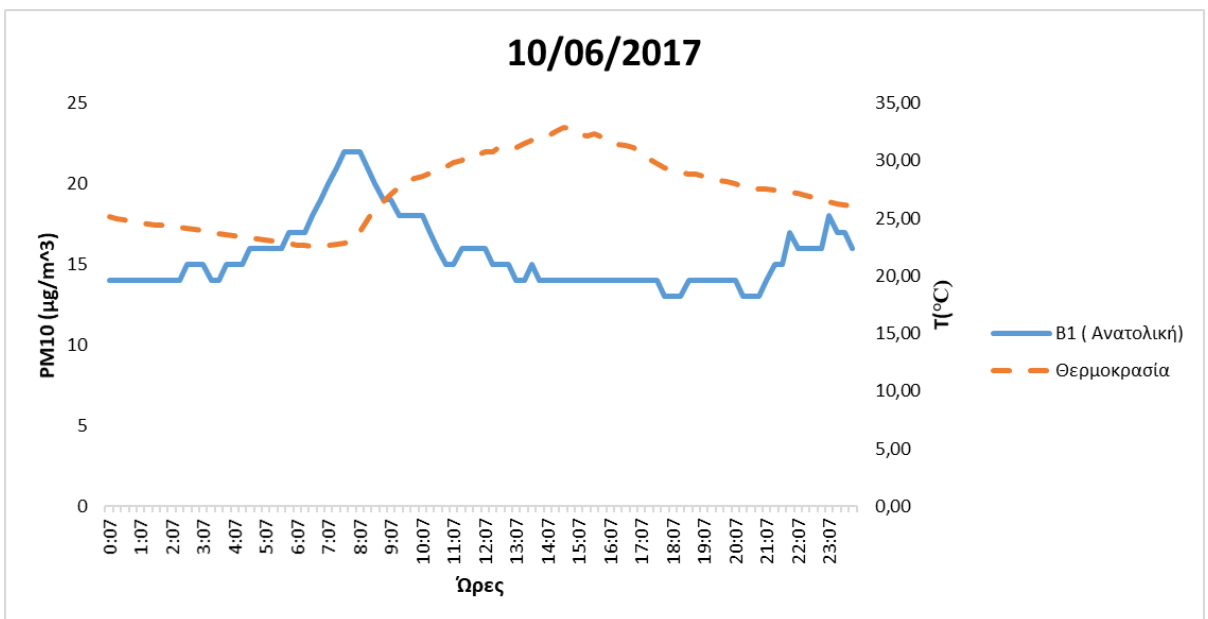
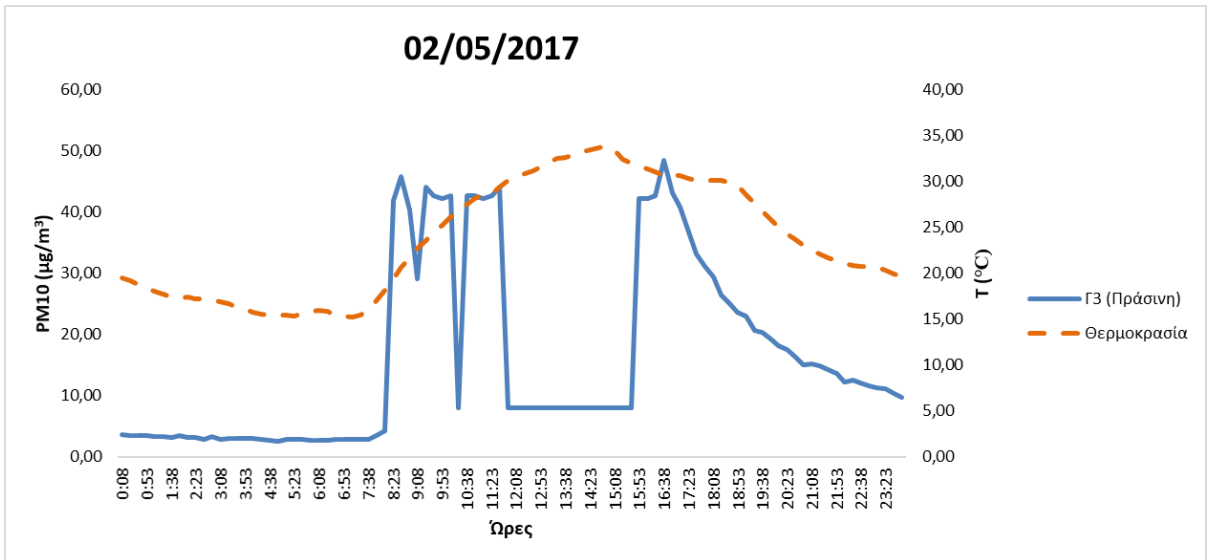
PM₁ ανά ημέρα ενδιαφέροντος

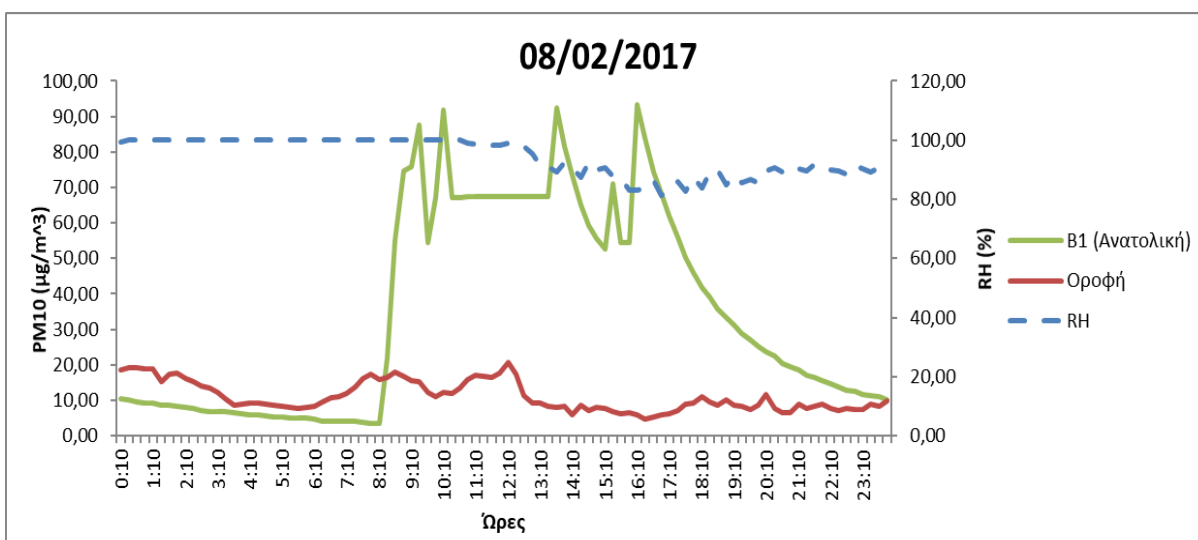




PM₁₀ με T και RH







2) Αποτελέσματα συσχετίσεων

Πίνακας συσχέτισης των PMs στην αίθουσα B1.

Correlations

			B1_PM ₁	B1_PM _{2,5}	B1_PM ₁₀
Spearman's rho	B1_PM ₁	Correlation Coefficient	1,000	,456**	,565**
		Sig. (2-tailed)	.	,000	,000
		N	6334	6334	6334
	B1_PM _{2,5}	Correlation Coefficient		1,000	,672**
		Sig. (2-tailed)		.	,000
		N		6334	6334
	B1_PM ₁₀	Correlation Coefficient			1,000
		Sig. (2-tailed)			.
		N			6334

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Πίνακας συσχέτισης των PMs στο τμήμα της ανατολικής οροφής στο κτίριο. (AT = Ανατολική Ταράτσα Σκυροδέματος)

			Correlations					
			AT_PM1	AT_PM2.5	AT_PM10	B1_PM1	B1_PM2.5	B1_PM10
Spearman's rho	AT_PM1	Correlation Coefficient	1,000	,887**	,732**	-,017	-,049**	-,010
		Sig. (2-tailed)	.	,000	,000	,227	,000	,454
		N	5349	5349	5349	5349	5349	5349
	AT_PM2.5	Correlation Coefficient		1,000	,910**	,023	,124**	,080**
		Sig. (2-tailed)		.	,000	,092	,000	,000
		N		5349	5349	5349	5349	5349
	AT_PM10	Correlation Coefficient			1,000	,058**	,209**	,117**
		Sig. (2-tailed)			.	,000	,000	,000
		N			6309	6309	6309	6309
	B1_PM1	Correlation Coefficient				1,000	,456**	,565**
		Sig. (2-tailed)				.	,000	,000
		N				6334	6334	6334
	B1_PM2.5	Correlation Coefficient					1,000	,672**
		Sig. (2-tailed)					.	,000
		N					6334	6334
	B1_PM10	Correlation Coefficient						1,000
		Sig. (2-tailed)						.
		N						6334

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Πίνακας συσχέτισης των PMs με τη σχετική υγρασία στο τμήμα της ανατολικής οροφής στο κτίριο. Όπου το RHB1 αντιστοιχεί στην αίθουσα B1 και το RH_AT στην ανατολική οροφή.

			Correlations				
			B1_PM1	B1_PM2.5	B1_PM10	RHB1	RH_AT
Spearman's rho	B1_PM1	Correlation Coefficient	1,000	,456**	,565**	-,080**	-,018
		Sig. (2-tailed)	.	,000	,000	,000	,225
		N	6334	6334	6334	4443	4444
	B1_PM2.5	Correlation Coefficient		1,000	,672**	-,143**	-,231**
		Sig. (2-tailed)		.	,000	,000	,000
		N		6334	6334	4443	4444
	B1_PM10	Correlation Coefficient			1,000	,220**	,083**
		Sig. (2-tailed)			.	,000	,000
		N			6334	4443	4444
	RHB1	Correlation Coefficient				1,000	,634**
		Sig. (2-tailed)				.	,000
		N				4443	4443
	RH_AT	Correlation Coefficient					1,000
		Sig. (2-tailed)					.
		N					4444

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

3) Συνάρτηση ελαχιστοποίησης (PMF)

Η λύση της PMF έγκειται στον ακριβή προσδιορισμό της αβεβαιότητας κάθε τιμής δεδομένων που εισάγεται. Στις περισσότερες μελέτες, ο υπολογισμός του σφάλματος s_{ij} γίνεται από το χρήστη βάσει των κανόνων των Polissar et al., 1998, οι οποίοι ομαδοποίησαν τα δεδομένα σε τρεις κατηγορίες και πρότειναν έναν τρόπο έκφρασης της συγκέντρωσης και της αντίστοιχης αβεβαιότητας για κάθε μία από αυτές:

1. Δεδομένα που περιλαμβάνουν την τιμή της συγκέντρωσης (x_{ij}) και την αντίστοιχη (γνωστή) αβεβαιότητα s_{ij} από τις μετρήσεις. Στην περίπτωση αυτή η συγκέντρωση x_{ij}^q και η αβεβαιότητα σ_{ij}^q δίνεται αντίστοιχα από τους τύπους:

$$x_{ij}^q = v_{ij}^q \quad \text{και} \quad (1)$$

$$\sigma_{ij}^q = u_{ij}^q + \frac{d_{ij}^q}{3}$$

όπου v_{ij} , u_{ij} και d_{ij} είναι η μετρούμενη συγκέντρωση, η αβεβαιότητα και το όριο ανίχνευσης του οργάνου μέτρησης για το στοιχείο j του δείγματος i , στο σημείο δειγματοληψίας q

2. Εκείνα που προέρχονται από δείγματα στα οποία η μετρούμενη συγκέντρωση ήταν κάτω από το όριο ανίχνευσης του οργάνου. Στην περίπτωση αυτή η συγκέντρωση x_{ij}^q και η αβεβαιότητα σ_{ij}^q δίνεται αντίστοιχα από τους τύπους:

$$\begin{aligned} x_{ij}^q &= \frac{d_{ij}^q}{2} \text{ και} & (2) \\ \sigma_{ij}^q &= \frac{\bar{d}_{ij}^q}{2} + \frac{d_{ij}^q}{3} \end{aligned}$$

Όπου d_{ij}^q όπως προηγουμένως και \bar{d}_{ij}^q είναι ο αριθμητικός μέσος του ορίου ανίχνευσης για το στοιχείο j στο σημείο δειγματοληψίας k.

3. Εκείνα στα οποία η τιμή της συγκέντρωσης λείπει. Στην περίπτωση αυτή η συγκέντρωση x_{ij}^q και η αβεβαιότητα σ_{ij}^q δίνεται αντίστοιχα από τους τύπους:

$$\begin{aligned} \chi_{ij}^q &= \tilde{v}_{ij}^q \text{ και} & (3) \\ \sigma_{ij}^q &= 4 \tilde{v}_{ij}^q \end{aligned}$$

Όπου \tilde{v}_{ij}^q είναι ο γεωμετρικός μέσος της μετρούμενης συγκέντρωσης του στοιχείου j στο σημείο δειγματοληψίας k. Να σημειωθεί πως “απουσία δεδομένων” σημαίνει απουσία τιμών για ορισμένα στοιχεία ενός δείγματος (πρακτικά τουλάχιστον ένα στοιχείο από το δείγμα πρέπει να είναι γνωστό). Στην περίπτωση αυτή, οι τιμές της συγκέντρωσης και της αβεβαιότητας υπολογίζονται από τις σχέσεις 1-3.

Ένα επίσης σημαντικό σημείο είναι οι πολύ μεγάλες τιμές και τα ακραία σημεία (outliers) που συναντώνται συχνά στα δεδομένα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Για την αποφυγή της αλλοίωσης της τελικής λύσης, εφαρμόζεται η “robust mode” της PMF, χρησιμοποιώντας την τεχνική του επαναληπτικού επαναπροσδιορισμού συντελεστών βαρύτητας για συγκεκριμένες τιμές δεδομένων (iterative reweighing of individual data values). Έτσι η προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων καταλήγει στην:

$$Q = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{e_{ij}}{h_{ij} s_{ij}} \right)^2 \text{ όπου}$$

$$h_{ij}^2 = 1 \text{ αν } \left| \frac{e_{ij}}{s_{ij}} \right| < 4 \text{ ή}$$

$$h_{ij}^2 = \left| \frac{e_{ij}}{s_{ij}} \right| / 4 \text{ αλλιώς.}$$

Όπου h_{ij} είναι η απόσταση ενός απομακρυσμένου σημείου (outlier distance). Τέλος, ένας τρόπος να εξετάζεται η επιτυχία της προσέγγισης του μοντέλου είναι να εξετάζονται τα “κατάλοιπα” e_{ij} . Τυπικά, είναι επιθυμητό να υπάρχει συμμετρική κατανομή των e_{ij} (± 3 την τυπική απόκλιση). Αν υπάρχει μεγάλη διασπορά των e_{ij} τότε ο αριθμός των παραγόντων πρέπει να επανεξεταστεί.