



ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΩΝ

Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

«Ποιότητα αέρα σε εσωτερικό χώρο κατοικίας»

Τζεγιαννάκης Χαράλαμπος

Επιβλέπων καθηγητής: Ραψομανίκης Νικόλαος

Πάτρα, Ιούνιος, 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



«Ποιότητα αέρα σε εσωτερικό χώρο κατοικίας»

Τζεγιαννάκης Χαράλαμπος

Επιτροπή Επίβλεψης Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Συν-Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Ραγομανίκης Νικόλαος

Τσέλιου Αρετή

Σ.Ε.Π. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

Σ.Ε.Π. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

Πάτρα, Ιούνιος, 2026

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ραψομανίκη Νικόλαο για την ουσιαστική στήριξη και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος «Περιβαλλοντικού Σχεδιασμού» με σκοπό τη διερεύνηση της ποιότητας εσωτερικού αέρα εντός οικίας στην Αθήνα. Πρόκειται για ένα συνηθισμένο διαμέρισμα στον κεντρικό τομέα της Αθήνας, επιφάνειας 70,50 m² σε πολυκατοικία κατασκευής του 1979 χωρίς παρεμβάσεις όσον αφορά την ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου, παρά μόνο στα παράθυρα. Οι ένοικοι της οικίας είναι δύο ενήλικες και υπάρχει επίσης και κατοικίδιος μικρός σκύλος.

Οι μετρήσεις εντός της οικίας λήφθηκαν με χρήση του αισθητήρα AI-2002W της Edimax, για το χρονικό διάστημα από 20 Ιανουαρίου, 2026 έως και 19 Μαρτίου, 2026 όπου και καταγραφόταν ανά 4 ώρες η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία (RH), τα αιωρούμενα σωματίδια (PM2.5 & PM10), το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), η φορμαλδεΐδη (HCHO) και συνολικές οργανικές πτητικές ενώσεις (TVOC).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, έδειξαν αποδεκτά όρια για τους περισσότερους ρύπους, κάτι στο οποίο συνέβαλλε η πολύωρη απουσία των ενοίκων από το χώρο λόγω εργασίας σε συνδυασμό με τον φυσικό αερισμό για αρκετές ώρες. Εξαίρεση αποτέλεσαν τα αιωρούμενα σωματίδια όπου ο 24ώρος μέσος όρος των συγκεντρώσεών τους υπερέβαινε τα επιτρεπτά επίπεδα που ορίζει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) σε συνδυασμό με έντονες αιχμές, φαινόμενα τα οποία συνδέθηκαν με χρήση προϊόντων καπνού, είτε μόνο από τους ενοίκους είτε σε συναθροίσεις. Υψηλά επίπεδα επίσης παρατηρήθηκαν και στα επίπεδα της σχετικής υγρασίας σε σχέση με τα διεθνώς προτεινόμενα όρια, ειδικά τον Ιανουάριο και Φεβρουάριο, κάτι που οφείλεται στην παλαιότητα του κτιρίου και την ανεπαρκή θερμομόνωση και υγραμόνωση.

Οι προαναφερθείς υπερβάσεις, αν και είναι μόνο σε τρεις δείκτες από τους επτά που μετρήθηκαν, δεν θα πρέπει να παραμεληθούν αφού οι επιπτώσεις στην υγεία υψηλών επιπέδων αιωρούμενων σωματιδίων και υγρασίας σε εσωτερικούς χώρους είναι γνωστές.

Προτείνονται ήπιες αλλά και εκτεταμένες μέθοδοι αντιμετώπισης των παραπάνω προβλημάτων όπως και η αναγκαιότητα συμπεριφορικών αλλαγών, καθώς η κύρια αιτία που συνδέθηκε με υψηλότερα επίπεδα ρύπων, ήταν η χρήση προϊόντων καπνού.

Λέξεις – Κλειδιά

Εσωτερική ρύπανση, Ρύποι εσωτερικού αέρα, Ποιότητα αέρα στο εσωτερικό οικίας, PM_{2.5}, PM₁₀, VOC, HCHO

«Indoor Air Quality in a Residential Environment»

Charalampos Tzegiannakis

Abstract

This thesis was conducted within the framework of the Postgraduate Program in “Environmental Design”, aiming to investigate indoor air quality (IAQ) in a residential apartment in Athens. The subject of the study is a typical 70.50 m² apartment located in the central sector of Athens, situated in a residential building constructed in 1979. No energy-efficiency interventions have been performed on the building envelope, except for the replacement of windows. The occupants of the residence are two adults and a small pet dog.

Measurements within the residence were obtained using the Edimax AI-2002W sensor for the period from January 20, 2026 to March 19, 2026. Temperature, relative humidity (RH), particulate matter (PM_{2.5} 7 PM₁₀), carbon dioxide (CO₂), formaldehyde (HCHO), and total volatile organic compounds (TVOC) were recorded at 4-hour intervals.

The measurement results indicated acceptable limits for most pollutants, which was facilitated by the occupants' prolonged absence from the house due to work, combined with several hours of natural ventilation. An exception to this was particulate matter, where mean concentrations exceeded the permissible levels established by the World Health Organization (WHO). This was accompanied by intense concentration peaks, phenomena that were linked to the use of tobacco products, either exclusively by the occupants or during social gatherings within the apartment. Elevated levels were also observed in relative humidity compared to internationally recommended limits, particularly during January and February, an issue attributed to the age of the building and insufficient thermal insulation and waterproofing.

The exceedances, although limited to only three of the seven measured indicators, should not be overlooked, given that the health impacts of high indoor levels of particulate matter and humidity are well-documented.

Both minor and extensive mitigation methods are proposed to address these issues, alongside the necessity for behavioral changes, given that the primary cause associated with high pollutant levels was the use of tobacco products.

Keywords

Indoor air quality, Indoor air pollutants, IAQ, PM2.5, PM10, VOC, HCHO

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	V
ABSTRACT	VII
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	IX
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	XI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	XI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	XII
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ & ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	XIV
ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΑ ΣΗΜΕΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	XV
ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	XVI
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	3
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ (IAQ).....	4
2.2 ΚΥΡΙΟΙ ΡΥΠΟΙ & ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ	5
2.2.1 Αιωρούμενα σωματίδια (ΑΣ – PM)	6
2.2.2 Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	8
2.2.3 Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs).....	9
2.2.4 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO).....	9
2.2.5 Θερμοκρασία και σχετική υγρασία (RH).....	10
2.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗ ΓΝΩΣΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΨΥΧΙΚΗ ΥΓΕΙΑ	12
2.4 ΟΣΦΡΗΤΙΚΗ ΆΝΕΣΗ	13
2.5 ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΥΠΩΝ	14
2.5.1 Συσχέτιση ρύπανσης εξωτερικού και εσωτερικού αέρα	14
2.5.2 Εσωτερικές πηγές ρύπανσης.....	17
2.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΙΚΩΝ ΜΟΤΙΒΩΝ	18
2.7 Η ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΕΝΑΝΤΙ ΑΕΡΙΣΜΟΥ.....	19
2.8 ΚΟΙΝΩΝΙΚΕΣ ΑΝΙΣΟΤΗΤΕΣ.....	20
2.9 Η ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΕΠΑΡΚΗ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΟ ΑΕΡΙΣΜΟ.....	21
2.10 ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ - ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ	23

2.11	ΕΓΧΩΡΙΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	27
2.12	ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΚΕΝΟ	29
3.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	31
3.1	ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΧΩΡΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΟΙΚΟΙ.....	31
3.2	ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ	33
3.3	ΜΕΤΡΗΤΙΚΟ ΟΡΓΑΝΟ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	34
3.3.1	Περιγραφή μετρητικού οργάνου και τεχνικών χαρακτηριστικών.....	34
3.3.2	Διαδικασία συλλογής δεδομένων.....	35
4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	36
4.1	ΟΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΡΥΠΩΝ	36
4.2	ΜΕΣΗ ΩΡΙΑΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ, ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΥΠΩΝ	39
4.3	ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ, ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΥΠΩΝ	43
4.4	ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΗΜΕΡΗΣΙΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΥΠΩΝ	49
4.5	ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΗΜΕΡΗΣΙΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΥΠΩΝ	52
4.6	ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΣΗ ΩΡΙΑΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ, ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΥΠΩΝ	55
5.	ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	57
5.1	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΡΥΠΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΤΟΙΚΙΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΔΙΕΘΝΗ ΘΕΣΠΙΣΜΕΝΑ ΟΡΙΑ.....	58
5.1.1	Θερμοκρασία & σχετική υγρασία	58
5.1.2	Αιωρούμενα σωματίδια PM _{2.5} & PM ₁₀	60
5.1.3	Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	61
5.1.4	Φορμαλδεΐδη (HCHO)	62
5.1.5	Ολικές πτητικές οργανικές ενώσεις TVOC	62
5.2	ΠΙΘΑΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ	64
5.2.1	Συμπεριφορικές παρεμβάσεις και τεχνικές παρεμβάσεις μικρού κόστους και κλίμακας.....	64
5.2.2	Εκτεταμένες παρεμβάσεις	66
5.3	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΜΕΛΕΤΗΣ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	69
5.3.1	Περιορισμοί μελέτης.....	69
5.3.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	70
6.	ΣΥΝΟΨΗ.....	71
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73

Κατάλογος Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΒΑΣΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΙΑQ (PM ₁₀ , PM _{2.5} , UFP, CO ₂ , VOCs, CO, RH): ΟΔΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ/ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΚΥΡΙΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.	14
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΚΑΤΟΨΗ ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ. ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΚΥΚΛΟ ΣΗΜΕΙΩΝΕΤΑΙ Η ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΡΥΠΩΝ.	32
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΡΥΠΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ AI-2002W ΤΗΣ EDIMAX	34
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΤΟΠΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΕΡΙΣΜΟΥ DNC ΤΗΣ ΣΟΥΗΔΙΚΗΣ NIBE (NIBE.EU).....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΟΙΚΙΑ (NIBE ERS, NIBE.EU). Α: ΜΟΝΑΔΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΜΕ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. Β: ΑΠΑΓΩΓΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ. C: ΔΙΚΤΥΟ ΑΠΑΓΩΓΗΣ. Ο ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΑΕΡΑ ΑΝΑΡΡΟΦΑΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗ ΜΟΝΑΔΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ. D: ΕΞΑΓΩΓΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ, ΑΦΟΥ ΓΙΝΕΙ ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΟΝ ΑΕΡΑ ΠΟΥ ΕΙΣΕΡΧΕΤΑΙ ΣΤΟΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ. Ε: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΦΡΕΣΚΟΥ ΑΕΡΑ ΑΠΟ ΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ. F: ΠΡΟΣΑΓΩΓΗ ΦΡΕΣΚΟΥ ΑΕΡΑ, ΑΦΟΥ ΕΧΕΙ ΠΡΟΗΓΗΘΕΙ ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΟΝ ΑΕΡΑ ΠΟΥ ΑΠΑΓΩΓΗΤΗΣ (ΧΩΡΙΣ ΝΑ ΕΧΟΥΝ ΕΡΘΕΙ ΣΕ ΕΠΑΦΗ ΤΑ ΔΥΟ ΡΕΥΜΑΤΑ). G: Ο ΑΕΡΑΣ ΕΝΤΟΣ ΤΗΣ ΟΙΚΙΑΣ, ΚΥΚΛΟΦΟΡΕΙ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΟΠΟΥ ΓΙΝΕΤΑΙ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗ, ΠΡΟΣ ΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΟΠΟΥ ΓΙΝΕΤΑΙ Η ΑΠΑΓΩΓΗ ΜΕΣΩ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΚΕΝΩΝ ΣΤΙΣ ΠΟΡΤΕΣ.....	68

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΜΕΣΕΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ. ΕΘΝΙΚΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ.....	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΜΕΣΕΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΕΤΗ 2023, 2024 & 2025. FREE WEATHER API (HTTPS://OPEN-METEO.COM).....	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΤΟΥ ΜΕΤΡΗΤΗ AI-2002W ΤΗΣ EDIMAX.	35
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ, ΜΕΣΕΣ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ.....	36
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ ΡΥΠΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΠΟΥ ΑΝΑΦΕΡΟΝΤΑΙ ΣΤΟΝ ΤΙΤΛΟ ΚΑΘΕ ΣΤΗΛΗΣ. ΟΙ ΧΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ ΑΝΑΦΕΡΟΝΤΑΙ ΣΕ ΚΑΘΕ ΓΡΑΜΜΗ. Όσο πιο έντονη η διαβαθμίση, τόσο υψηλότερη η συγκέντρωση του ρυπού στον οριζόντιο άξονα.....	37
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΙΟ ΕΠΙΒΑΡΥΜΕΝΕΣ ΗΜΕΡΕΣ. ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.	
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΔΙΕΘΝΩΣ ΘΕΣΠΙΣΜΕΝΑ ΟΡΙΑ ΑΝΕΣΗΣ	58

ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΑ ΟΡΙΑ ΠΟΥ ΘΕΤΕΙ Ο ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΥΓΕΙΑΣ (WHO, 2021).....	60
ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΟΡΙΟ ΠΟΥ ΘΕΤΕΙ Η ΓΕΡΜΑΝΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ (UBA) (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE IRK/AOLG, 2008)	61
ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΦΟΡΜΑΛΔΕΨΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΟΡΙΟ ΠΟΥ ΘΕΤΕΙ Ο ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΥΓΕΙΑΣ (WHO, 2010).....	62
ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΟΛΙΚΩΝ ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΟΡΙΟ ΠΟΥ ΘΕΤΕΙ Η ΓΕΡΜΑΝΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ (UBA) (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE IRK/AOLG, 2007).	62

Κατάλογος Διαγραμμάτων

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΝΟΛΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ “EXCELLENT”, “GOOD”, “MILD POLLUTION”, “MODERATELY POLLUTION” ΚΑΙ “SEVER POLLUTION”	37
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΩΝ ΣΥΝΟΛΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΘΕ ΡΥΠΟΥ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΕΘΝΕΣ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΜΕΝΟ ΟΡΙΟ ΠΟΥ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ (ΒΛ. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4).....	38
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: ΜΕΣΕΣ ΩΡΙΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΥΓΡΑΣΙΑΣ.	39
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4: ΜΕΣΕΣ ΩΡΙΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΘΕ ΜΗΝΑ.	40
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5: ΜΕΣΗ ΩΡΙΑΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ PM _{2.5} & PM ₁₀	41
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6: ΜΕΣΗ ΩΡΙΑΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ CO ₂	42
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7: ΜΕΣΗ ΩΡΙΑΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ HCHO	42
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8: ΜΕΣΗ ΩΡΙΑΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ TVOC	43
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9: ΜΕΣΕΣ ΗΜΕΡΗΣΙΕΣ ΤΙΜΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΥΓΡΑΣΙΑΣ.	44
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10: ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ PM _{2.5}	45
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11: ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ PM ₁₀	45
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12: ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ CO ₂	46
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13: ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ HCHO.....	46
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14: ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ TVOC.	47
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15: ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ PM _{2.5}	50
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16: ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ PM ₁₀	50
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 17: ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ CO ₂	51
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 18: ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ TVOC.	51
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 19: ΜΕΓΙΣΤΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ PM _{2.5}	52
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 20: ΜΕΓΙΣΤΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ PM ₁₀	53
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 21: ΜΕΓΙΣΤΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ CO ₂	53

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 22: ΜΕΓΙΣΤΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ Η ₂ CO.....	54
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 23: ΜΕΓΙΣΤΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ TVOC.....	54
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 24: ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΣΗ ΩΡΙΑΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΥΠΩΝ	56

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

ΕΑΠ	Ελληνικό Ανοικτό πανεπιστήμιο
HVAC	Heating, Ventilation, Air Conditioning (Θέρμανση, Ψύξη, Κλιματισμός)
IAQ	Indoor Air Quality (Ποιότητα εσωτερικού αέρα)
PM / ΑΣ	Particulate Matter / Αιωρούμενα Σωματίδια
PM2.5	Αιωρούμενα Σωματίδια με διάμετρο < 2,5μm
PM10	Αιωρούμενα Σωματίδια με διάμετρο < 10μm
CO ₂	Carbon dioxide (Διοξείδιο του άνθρακα)
CO	Carbon monoxide (Μονοξείδιο του άνθρακα)
VOCs	Volatile Organic Compounds (Πτητικές Οργανικές Ενώσεις)
TVOCs	Total Volatile Organic Compounds (Ολικές Πτητικές Οργανικές Ενώσεις)
HCHO	Formaldehyde (Φορμαλδεϋδη)
RH	Relative Humidity (Σχετική υγρασία)
WHO	World Health Organization (Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας – ΠΟΥ)

Σημαντικότερα σημεία εργασίας

- Παρατηρήθηκαν υψηλά επίπεδα υγρασίας, πάνω από το επίπεδο άνεσης, ειδικά τους πιο κρύους μήνες.
- Παρατηρήθηκαν συχνές αιχμές σε ρύπους, κυρίως για τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{2.5} & PM₁₀.
- Ο βασικός λόγος αύξησης του επιπέδου των ρύπων είναι η χρήση προϊόντων καπνού.
- Οι δυσμενέστερες ημέρες, χαρακτηρίζονται από συνδυασμό συναθροίσεων και χρήσης προϊόντων καπνού.
- Γενικά η ποιότητα του εσωτερικού αέρα κρίνεται επαρκής, με περιθώρια βελτίωσης ειδικά στα αιωρούμενα σωματίδια.

Συνεισφορά εργασίας

Με την συγγραφή αυτής της εργασίας, επιδιώκεται να καλυφθεί ένα μέρος του βιβλιογραφικού κενού που παρατηρείται όσον αφορά τις εμπειρικές μελέτες ποιότητας εσωτερικού αέρα σε κατοικίες στον μεσογειακό και ειδικά στον ελληνικό χώρο. Ενώ η βιβλιογραφία στον υπόλοιπο κόσμο είναι εκτενής, στην Ελλάδα φαίνεται πιο περιορισμένη, ειδικά όσον αφορά μία συνολική αποτίμηση των συνηθισμένων ρύπων που συναντώνται σε εσωτερικά περιβάλλοντα. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε ένα τυπικό διαμέρισμα 79 τ.μ. του κεντρικού τομέα των Αθηνών, με δύο ενοίκους και ένα μικρό κατοικίδιο που μπορεί να θεωρηθεί ως μία τυπική περίπτωση του σύγχρονου τρόπου ζωής.

1. Εισαγωγή

Οι σημαντικές μεταβολές του σύγχρονου τρόπου ζωής, σε συνδυασμό με τις νέες κατασκευαστικές πρακτικές των τελευταίων δεκαετιών, έχουν αναδείξει την ποιότητα του εσωτερικού αέρα (Indoor Air Quality - IAQ) σε κυρίαρχο ζήτημα της περιβαλλοντικής υγείας. Οι σύγχρονοι άνθρωποι περνούν το 80-90% του χρόνου τους σε εσωτερικούς χώρους και το σημαντικότερο μέρος αυτού του χρόνου δαπανάται στο σπίτι (Vardoulakis κ.α., 2020; Pietrogrande κ.α., 2021; Romero κ.α., 2022). Αυτή η παρατεταμένη παραμονή σε εσωτερικούς χώρους αλλάζει ουσιαστικά τον τρόπο περιβαλλοντικής έκθεσης μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος και του εσωτερικού χώρου, αυξάνοντας έτσι την ανησυχία για την υγεία από τα περιβάλλοντα εσωτερικού αέρα. Κατά συνέπεια, το ζήτημα της IAQ δεν θεωρείται απλά ως ένα πρόσθετο περιβαλλοντικό ζήτημα, αλλά ως καθοριστικός παράγοντας για την υγεία του πληθυσμού και την άνεσή του, καθώς και την ευημερία του. Όπως θα φανεί και από την ανάλυση της βιβλιογραφίας παρακάτω, ανεπαρκής IAQ, συνδέεται με προβλήματα υγείας, χαμηλό αίσθημα άνεσης ακόμα και με μειωμένο επίπεδο γνωσιακής συμπεριφοράς.

Η παρούσα εργασία ακολουθεί μια μεθοδολογική προσέγγιση ολοκληρωμένου ερευνητικού σχεδιασμού, που συνδυάζει βιβλιογραφική ανασκόπηση και εμπειρικές μετρήσεις πεδίου σε πραγματικό οικιστικό περιβάλλον. Η εργασία αποσκοπεί στην αξιολόγηση της IAQ στον εσωτερικό χώρο της οικίας, μέσω καταγραφής των συγκεντρώσεων των PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂, HCHO, TVOC της θερμοκρασίας και της υγρασίας, σύνδεση των αιχμών/κατανομών που παρουσιάζουν με συγκεκριμένες δραστηριότητες των ενοίκων και τέλος αξιολόγηση τους με βάση διεθνή πρότυπα και οδηγίες. Αφού στηθεί το θεωρητικό υπόβαθρο, ακολουθούν τα αποτελέσματα και η αξιολόγηση του πειραματικού μέρους. Συγκεκριμένα η δομή της εργασίας έχει ως εξής:

Στο **Κεφάλαιο 2**, γίνεται μια ολοκληρωμένη αναζήτηση επιστημονικών πηγών για το θέμα στην παγκόσμια βιβλιογραφία, για τον προσδιορισμό της θεωρητικής και εννοιολογικής βάσης της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων, των κύριων ρύπων αυτού και την κριτική ανάλυση των πηγών τους, των επιπτώσεων στην υγεία και των ρυθμιστικών ορίων.

Στο **Κεφάλαιο 3** ορίζεται το πλαίσιο μέσα στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Παρουσιάζεται ο χώρος της μελέτης, τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής και οι συνθήκες δραστηριότητες των ενοίκων. Περιγράφεται επίσης το μεθοδολογικό πλαίσιο, δηλαδή οι ιδιότητες του εξοπλισμού παρακολούθησης, το πρωτόκολλο μέτρησης και οι διαδικασίες επεξεργασίας των δεδομένων.

Στο **Κεφάλαιο 4**, παρουσιάζονται τα ευρήματα των μετρήσεων από την κατοικία, επισημαίνοντας τις αιχμές, τις συσχετίσεις των συγκεντρώσεων μέσω κανονικοποίησης των αποτελεσμάτων και τη σύνδεση υψηλών συγκεντρώσεων με συγκεκριμένες δραστηριότητες.

Στο **Κεφάλαιο 5**, κρίνεται η ποιότητα της IAQ της οικίας μέσα από την αξιολόγηση των επιπέδων των συγκεντρώσεων των ρύπων με βάση διεθνώς θεσπισμένων ορίων. Προτείνονται ήπιες ή και εκτεταμένης κλίμακας παρεμβάσεις για την βελτίωση της IAQ και αναφέρονται οι περιορισμοί της μελέτης και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 6**, γίνεται μία σύνοψη της επικρατούσας κατάστασης και η γενική αξιολόγηση της IAQ της κατοικίας.

Η επιστημονική αξία της εργασίας έγκειται στο γεγονός ότι η παρούσα μελέτη κάλυψε εμπειρικά τις συνθήκες ποιότητας του εσωτερικού αέρα σε οικιακό περιβάλλον στην περιοχή της Αθήνας, συνέκρινε κριτικά τα μετρούμενα αποτελέσματα με τα διεθνή πρότυπα και παρήγαγε στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη περαιτέρω μεθόδων αερισμού και να επηρεάσουν τη μελλοντική έρευνα και τη διαμόρφωση πολιτικής στον τομέα της υγείας του εσωτερικού περιβάλλοντος.

2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας αποτελεί βασική φάση του σχεδιασμού και της επιστημονικής αναφοράς οποιασδήποτε ερευνητικής μελέτης, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως περίγραμμα στο πλαίσιο της κατανόησης του εκάστοτε προβλήματος, αλλά και ως εργαλείο για τον προσδιορισμό τυχόν κενών στις θεωρητικές, μεθοδολογικές και εμπειρικές πτυχές. Στην παρούσα εργασία, η βιβλιογραφική ανασκόπηση δεν αντιμετωπίζεται απλώς ως παράθεση προηγούμενων ερευνών, αλλά ως σύνθεση και κριτική προσέγγιση, αποτυπώνεται η πολυπαραγοντική φύση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα (IAQ) ως φαινομένου στις κατοικίες και αποδεικνύεται η αναγκαιότητα της εμπειρικής έρευνας υπό τις συνθήκες της πραγματικής χρήσης.

Ο κύριος στόχος της παρούσας βιβλιογραφικής ανασκόπησης είναι να προσδιοριστούν οι κύριοι ρύποι που υπάρχουν στο οικιακό περιβάλλον, οι κύριες πηγές τους, οι επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία και οι μέθοδοι/τρόποι για την μείωση των επιπέδων τους. Την παγκόσμια βιβλιογραφία ενώνει η έμφαση σε ρύπους όπως τα αιωρούμενα σωματίδια (PM_{2.5}, PM₁₀), οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) και η φορμαλδεΰδη (HCHO) ως οι σημαντικότεροι ρύποι λόγω της σχέσης τους με αναπνευστικές, καρδιαγγειακές και αλλεργικές παθήσεις (Vardoulakis κ.α., 2020; Zhang κ.α., 2022). Ταυτόχρονα, η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα γίνεται όλο και περισσότερο δείκτης της επάρκειας του αερισμού και έμμεσο μέτρο της συσσώρευσης των συνεκπεμπόμενων ρύπων (Sundell κ.α., 2011; Arya κ.α., 2024).

Τέλος, η βιβλιογραφική ανασκόπηση θα χρησιμοποιηθεί ως συνδεδετικός παράγοντας μεταξύ της θεωρητικής γνώσης και του παρόντος σχεδιασμού μελέτης περίπτωσης. Έρευνες του παρελθόντος υποδεικνύουν την αναγκαιότητα μετρήσεων πεδίου για την εξέταση της χρονικής μεταβολής των ρύπων, της πραγματικής κατάστασης κατοίκησης και της συμπεριφοράς των ενοίκων, ιδίως αφού δεν υπάρχει επαρκής προσφορά δεδομένων στο μεσογειακό αστικό περιβάλλον (Pelliccioni κ.α., 2020; Kakoulli κ.α., 2022). Από την άποψη αυτή, η παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση δεν χρησιμεύει απλώς ως θεωρητικό υπόβαθρο, αλλά ως κατευθυντήρια γραμμή για τη μεθοδολογική επιλογή, την εστίαση και την ερμηνεία των εμπειρικών δεδομένων που θα ακολουθήσουν.

2.1 Εισαγωγή στην ποιότητα εσωτερικού αέρα (IAQ)

Η IAQ είναι μια έννοια που περιγράφει τη φύση του αέρα στο εσωτερικό των χώρων και τις επιπτώσεις του στην ανθρώπινη υγεία, άνεση και ευεξία. Σε αντίθεση με την παρουσία ή την απουσία συγκεκριμένων ρύπων, η IAQ είναι ένα σύμπλεγμα πολυδιάστατων παραμέτρων, όπως οι συγκεντρώσεις των ρύπων, το θερμικό περιβάλλον, η υγρασία και αισθητηριακά στοιχεία όπως η αντίληψη της οσμής. Ο Οργανισμός Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ ορίζει την IAQ ως την αλληλεπίδραση των πηγών ρύπων εσωτερικών χώρων, της αποτελεσματικότητας του εξαερισμού και των περιβαλλοντικών συνθηκών, ως παράγοντες που επηρεάζουν την έκθεση των ενοίκων (Tahsiin κ.α., 2020; Settimo κ.α., 2020). Μια τέτοια ολοκληρωμένη προοπτική έχει σταδιακά υιοθετηθεί στη βιβλιογραφία, γεγονός που αποτελεί ένδειξη της μετακίνησης προς συστήματα αξιολόγησης πολλαπλών ρύπων αντί για μεμονωμένα. Οι Vardoulakis κ.α. (2020) και Tran κ.α. (2020) σημειώνουν ότι η IAQ είναι ένα κοινωνικό ζήτημα και όχι απλώς ένα τεχνικό χαρακτηριστικό ενός κτιρίου και, ως εκ τούτου, η συστηματική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για το θέμα είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί το κατάλληλο υπόβαθρο της μελέτης.

Οι ερευνητικές δραστηριότητες σχετικά με την IAQ σε κτίρια κατοικιών έχουν αυξηθεί δραματικά τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς εκτιμάται το γεγονός ότι τα άτομα περνούν την πλειονότητα του χρόνου τους στο εσωτερικό και ότι εκτίθενται σε ρύπους με δυνητικά σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία (Pegas κ.α., 2010; Sundell κ.α., 2011). Η έρευνα σε διάφορα γεωγραφικά και κοινωνικά περιβάλλοντα έχει υπογραμμίσει το γεγονός ότι τα επίπεδα ρύπων σε οικιστικά περιβάλλοντα συνήθως αποτελούνται από ένα σύνθετο μείγμα εσωτερικών πηγών, εισροής εξωτερικής ρύπανσης, κελύφους κτιρίου και συνηθειών εξαερισμού (Morawska κ.α., 2017; Jung και Mahmoud, 2023). Ταυτόχρονα, η εστίαση στην ενεργειακή απόδοση και την αεροστεγανότητα των σύγχρονων κατασκευών έχει ενισχύσει την επιστημονική προσοχή στις ανεπιθύμητες επιπτώσεις μιας τέτοιας προσέγγισης στην IAQ, ιδίως στο πλαίσιο όπου η αντίστοιχη προσέγγιση δεν υποστηρίζεται από επαρκή μηχανικό αερισμό (Wallner κ.α., 2015; Bekö κ.α., 2020).

Οι πολυάριθμες έρευνες υπογραμμίζουν ότι το IAQ είναι συγκυριακό και δυναμικό στη φύση του. Οι Panaras κ.α. (2022) αποδεικνύουν ότι, λόγω των μεταβαλλόμενων συνθηκών αερισμού και κατοίκησης, ακόμη και εντός ενός κτιρίου, οι χρονικές μεταβολές στους ρύπους

εσωτερικών χώρων μπορεί να είναι σημαντικές ακόμη και μεταξύ παρόμοιων χώρων. Στο ίδιο πνεύμα, ο Berger κ.α. (2022) σημειώνουν ότι οι αποφάσεις σχεδιασμού που σχετίζονται με το κτίριο, όπως η αεροστεγανότητα, η επιλογή των δομικών υλικών και οι τεχνικές εξαερισμού, είναι καθοριστικές για τη διαμόρφωση των συνθηκών του εσωτερικού αέρα. Τέτοια ευρήματα υπογραμμίζουν το γεγονός ότι η IAQ δεν μπορεί να μετρηθεί χωρίς να ληφθούν υπόψη η λειτουργία του κτιρίου και η ανθρώπινη συμπεριφορά, και ότι απλουστευμένα ρυθμιστικά μέτρα που βασίζονται αποκλειστικά σε σταθερές τιμές κατωφλίου είναι δύσκολο να υιοθετηθούν.

2.2 Κύριοι ρύποι & παράμετροι και επιπτώσεις στην υγεία

Έχει αποδειχθεί ότι η ανεπαρκής IAQ συνδέεται με έναν αριθμό ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων για την υγεία. Οι Vardoulakis κ.α. (2020) αναπτύσσουν μια μετα-ανάλυση των διαθέσιμων επιδημιολογικών δεδομένων σχετικά με τη συσχέτιση μεταξύ της έκθεσης σε σωματίδια εσωτερικών χώρων, πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) και ρύπους που σχετίζονται με την καύση, και αναπνευστικών και καρδιαγγειακών ασθενειών. Όπως αναλύεται, τα εσωτερικά περιβάλλοντα μπορούν να περιέχουν έναν συνδυασμό ρύπων που είναι εξίσου τοξικός με εκείνον του εξωτερικού αέρα και παρακολουθείται και ελέγχεται λιγότερο τακτικά. Επιπλέον, οι Cincinelli & Martellini (2017) υπογραμμίζουν το γεγονός ότι η χημική ρύπανση των εσωτερικών χώρων συχνά αποτελείται από πολύπλευρες αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφόρων ενώσεων σε χαμηλά επίπεδα, γεγονός που καθιστά δύσκολη την αξιολόγηση της έκθεσης και τον έλεγχο του κινδύνου.

Η συσχέτιση μεταξύ της IAQ και των αποτελεσμάτων της υγείας των ανθρώπων ενισχύεται επίσης από έρευνες σχετικά με τη συνολική επιβάρυνση από ασθένειες. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις των Tran κ.α. (2020), ο αριθμός των πρόωρων θανάτων που προκαλούνται από τη ρύπανση του αέρα εσωτερικών χώρων είναι εκατομμύρια παγκοσμίως, και οι βασικοί παράγοντες νοσηρότητας είναι οι VOCs και τα λεπτά σωματίδια. Τα ευρήματα αυτά υποστηρίζονται από τους Maung κ.α. (2022), οι οποίοι τονίζουν ότι οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της έκθεσης σε εσωτερικούς χώρους είναι σωρευτικές. Η σχέση μεταξύ της IAQ και συνδρόμων όπως το σύνδρομο του άρρωστου κτιρίου (SBS) και η ασθένεια που

σχετίζεται με το κτίριο (BRI) έχει ήδη αναφερθεί, και διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν διακριτά πρότυπα συμπτωμάτων που σχετίζονται με ενδείξεις ανισοτήτων αερισμού και χημικής έκθεσης (Singh κ.α., 2010). Επισημαίνεται επίσης από τους Mannan & Al-Ghamdi (2021) ότι αυτού του είδους οι καταστάσεις μπορεί να παραμείνουν υποδιαγνωσμένες λόγω της πολυπαραγοντικής και μη ειδικής φύσης τους.

2.2.1 Αιωρούμενα σωματίδια (ΑΣ – PM)

Μια από τις πιο ευρέως διερευνημένες ομάδες ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι τα αιωρούμενα σωματίδια (PM), λόγω των διαπιστωμένων και εξαιρετικά διαφοροποιημένων επιπτώσεών τους στην υγεία. Τα PM συνήθως κατηγοριοποιούνται με βάση τη διάμετρό τους, όπου τα PM10 υποδηλώνουν σωματίδια μεγέθους μικρότερου από 10 μm και τα PM2.5 σωματίδια μεγέθους μικρότερου από 2.5 μm . Αυτά τα κλάσματα μεγέθους έχουν κυρίως εφαρμογή στις μετρήσεις υγείας, καθώς υπαγορεύουν το βαθμό διεύθυνσης στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου. Τα σωματίδια των PM10 μπορούν να εισέλθουν στους ανώτερους αεραγωγούς, ενώ τα PM2.5 μπορούν να εισέλθουν στις βαθύτερες περιοχές των πνευμόνων, που ονομάζονται κυψελίδες και, σε ορισμένες περιπτώσεις, να εισέλθουν στην κυκλοφορία του αίματος. Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν καταστεί θέμα σημαντικής παγκόσμιας ανησυχίας για τη δημόσια υγεία, με μια μελέτη των Anderson κ.α. (2011), οι οποίοι συνθέτουν επιδημιολογικές έρευνες για το θέμα για λογαριασμό του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, να εκτιμά τη συμβολή περίπου 800.000 πρόωρων θανάτων ετησίως λόγω της έκθεσης στα αιωρούμενα σωματίδια σε παγκόσμιο επίπεδο.

Υπάρχει ένα σύνολο επιδημιολογικών στοιχείων που αποδεικνύουν ότι τα υψηλά επίπεδα PM συνδέονται στενά με υψηλότερη αναπνευστική νοσηρότητα και θνησιμότητα. Οι Leikauf κ.α. (2020) και Ristovski κ.α. (2012) δείχνουν ότι τα άτομα με ιστορικό αναπνευστικών ασθενειών (συμπεριλαμβανομένου του άσθματος και της χρόνιας αποφρακτικής πνευμονοπάθειας) έχουν χειρότερα συμπτώματα σε αιχμές υψηλών επιπέδων αιωρούμενων σωματιδίων. Αυτές οι παροξύνσεις χαρακτηρίζονται από αυξημένη λήψη φαρμάκων, συχνότερες επισκέψεις στο τμήμα επειγόντων περιστατικών και μειωμένη πνευμονική ικανότητα. Οι Cheng κ.α. (2019) τονίζουν επίσης την αυξημένη ευαισθησία των παιδιών,

αναφέροντας ότι η έκθεση στα PM_{2.5} συνδέεται με υψηλότερο ποσοστό πνευμονίας, γεγονός που προκαλεί ιδιαίτερη ανησυχία, καθώς το αναπνευστικό σύστημα των παιδιών είναι ακόμη σε ανάπτυξη και το ποσοστό εισπνοής είναι υψηλότερο. Οι επιπτώσεις αυτές, με τη σειρά τους, εξηγούνται κυρίως από φλεγμονώδεις διεργασίες και οξειδωτικό στρες που προκαλούνται από τα εισπνεόμενα σωματίδια, όπως εξηγούν οι Thangavel κ.α. (2022) και Johnston κ.α. (2019). Αυτές οι έρευνες υπογραμμίζουν ότι η εισπνοή σωματιδίων προκαλεί περίπλοκες βιολογικές διεργασίες που περιλαμβάνουν εκλύσεις κυτταροκινών, επιθηλιακή βλάβη και συστηματική φλεγμονή.

Εκτός από τα παραδοσιακά κλάσματα μεγέθους των PM, μεγαλύτερη έμφαση έχει δοθεί στα υπερλεπτά σωματίδια (UFP), τα οποία αποτελούν μια υποκατηγορία που έχουν διάμετρο μικρότερη από 0,1 μm . Σύμφωνα με τους Bössmann κ.ά. (2016) και Chalvatzaki κ.ά. (2019), τα UFPs έχουν αυξημένο τοξικολογικό δυναμικό λόγω της μεγάλης επιφάνειάς τους σε σχέση με τη μάζα, καθώς και της δυνατότητας μεταφοράς τους σε άλλους ιστούς/όργανα μετά την εναπόθεσή τους στους πνεύμονες. Τα σωματίδια αυτά έχει παρατηρηθεί ότι προκαλούν χρόνιες αναπνευστικές παθήσεις και καρδιαγγειακή νοσηρότητα, επομένως οι επιπτώσεις τους στην υγεία δεν περιορίζονται στο αναπνευστικό σύστημα. Στις πρώιμες επιδημιολογικές μελέτες, η εργασία των Schwartz κ.ά. (1993) στα δεδομένα του Σιάτλ αποκάλυψε ότι όσο υψηλότερες ήταν οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων, τόσο υψηλότερες ήταν οι εισαγωγές σε νοσοκομεία που σχετίζονταν με το άσθμα, και αποτέλεσε μια από τις πρώτες ενδείξεις της οξείας επιβάρυνσης της υγείας από την έκθεση στα αιωρούμενα σωματίδια σε επίπεδο πληθυσμού. Παρόλο που η εργασία αυτή είναι παλαιότερη σε σχέση με νεότερες εξελίξεις στον τομέα της εκτίμησης της έκθεσης, τα ευρήματά της υπήρξαν θεμελιώδη και επιβεβαιώθηκαν από άλλες μελέτες.

Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι επίσης ετερογενή, γεγονός που περιπλέκει περαιτέρω τις επιπτώσεις τους στην υγεία. Τα αιωρούμενα σωματίδια δεν είναι μία ουσία αλλά ένα περίπλοκο μείγμα μετάλλων, οργανικών ενώσεων, θεικών και νιτρικών αλάτων και άλλων συστατικών, με διαφορετικά τοξικολογικά χαρακτηριστικά (Thangavel κ.α., 2022; Chalvatzaki κ.α., 2019). Αυτή η μεταβλητότητα της σύνθεσης καθιστά δύσκολη τη ρύθμιση με τη χρήση μόνο δεικτών συγκέντρωσης μάζας και υποδεικνύει πιθανή μεγάλη κλίμακας μεταβλητότητα στην τοξικότητα ανάλογα με την πηγή των εκπομπών. Οι Kurmi κ.ά. (2012)

εστιάζουν επίσης στο ζήτημα των κοινωνικών και χωρικών ανισοτήτων στην έκθεση στα PM, όπου οι κάτοικοι των πόλεων, ιδίως σε κοινωνικοοικονομικά μη προνομιούχες περιοχές, τείνουν να αντιμετωπίζουν δυσανάλογα υψηλά φορτία ρύπων. Τα αποτελέσματα αυτά αποκαλύπτουν τη σύνδεση μεταξύ της περιβαλλοντικής δικαιοσύνης, της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της υγείας του πληθυσμού.

2.2.2 Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)

Αν και το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) δεν είναι τοξικό για τον άνθρωπο σε κανονικές συνθήκες εσωτερικού χώρου, αποτελεί πολύ κρίσιμο δείκτη της επάρκειας του αερισμού στο εσωτερικό περιβάλλον. Οι υψηλές εσωτερικές συγκεντρώσεις CO₂ προκαλούνται κυρίως από την ανθρώπινη αναπνοή σε κλειστούς ή πολυσύχναστους χώρους και υποδεικνύουν ανεπαρκή ανανέωση του αέρα με εξωτερικό αέρα. Σύμφωνα με τους Kurmi κ.ά. (2012), η παρουσία υψηλών επιπέδων CO₂ συνοδεύεται συχνά από τη συσσώρευση άλλων ρύπων σε εσωτερικούς χώρους, όπως αιωρούμενα σωματίδια, πτητικές οργανικές ενώσεις και βιολογικοί ρύποι. Ως εκ τούτου, το CO₂ χρησιμοποιείται ως ένδειξη της συνολικής ποιότητας του εσωτερικού αέρα, παρά ως ρύπος που αποτελεί από μόνος του κίνδυνο για την υγεία σε μέτρια επίπεδα.

Η εμπειρική έρευνα έχει συγκεντρώσει στοιχεία ότι το υψηλό CO₂ στους εσωτερικούς χώρους συνδέεται με δυσμενή συμπτώματα και μειωμένη γνωστική απόδοση. Σύμφωνα με τους Park κ.ά. (2016) και Wang κ.ά. (2021), υπάρχουν συσχετίσεις μεταξύ επιπέδων CO₂ πάνω από τα τυπικά όρια αναφοράς (π.χ. 1000 ppm) και συμπτωμάτων όπως μειωμένη εγρήγορση, πονοκέφαλος και αναπνευστική δυσφορία. Οι Wang κ.ά. (2021) διατυπώνουν επίσης την άποψη ότι η μακροχρόνια έκθεση σε υψηλό CO₂ μπορεί να σχετίζεται με αναπνευστικές επιπτώσεις, αλλά σημειώνουν ότι είναι μεθοδολογικά δύσκολο να διαχωριστεί η επίδραση του υψηλού CO₂ από εκείνη άλλων παράλληλων ρύπων. Τα αποτελέσματα αυτά υπογραμμίζουν τον ρόλο του κατάλληλου αερισμού στη ρύθμιση του CO₂, καθώς και στη μείωση της συνολικής επιβάρυνσης από ρύπους σε εσωτερικούς χώρους.

2.2.3 Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs)

Μια άλλη σημαντική ομάδα ρύπων του αέρα εσωτερικών χώρων με καλά τεκμηριωμένες επιπτώσεις στην υγεία είναι οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs). Οι πτητικές οργανικές ενώσεις είναι μια ποικίλη ομάδα οργανικών ενώσεων, οι οποίες μπορούν εύκολα να εξατμιστούν σε θερμοκρασία δωματίου και απελευθερώνονται από μεγάλο αριθμό πηγών, όπως χρώματα, διαλύτες, καύσιμα, προϊόντα καθαρισμού και δομικά υλικά. Οι Delfino κ.α. (2003) δείχνουν ότι η έκθεση σε VOCs συνδέεται με αύξηση των συμπτωμάτων άσθματος, ιδίως σε παιδιά που διαμένουν σε αστικές περιοχές με μεγάλη κυκλοφορία. Τα ευρήματά τους υποδεικνύουν τον διπλό ρόλο εσωτερικών και εξωτερικών πηγών στα προφίλ έκθεσης σε VOCs. Οι Arif & Shah (2007) επεκτείνουν τα στοιχεία αυτά σε επαγγελματικά περιβάλλοντα, διαπιστώνοντας ότι η μακροχρόνια έκθεση σε VOCs σχετίζεται με δερματίτιδα και αναπνευστικές παθήσεις, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία τους σε διαφορετικά περιβάλλοντα.

Οι συνέπειες των VOCs στην υγεία είναι πολύ διαφορετικές και εξαρτώνται από τον τύπο των ενώσεων, τη διάρκεια της έκθεσης και την ατομική ευπάθεια. Τα συνήθη οξέα συμπτώματα της έκθεσης σε VOCs, όπως πονοκέφαλοι, ζάλη και ερεθισμός της αναπνευστικής οδού και των ματιών, περιγράφονται από τους Cigánek & Neča (2008), ενώ οι Götschi κ.α. (2008) παραθέτουν συσχετίσεις μεταξύ μακροχρόνιας έκθεσης σε VOCs και μειωμένης πνευμονικής λειτουργίας. Οι μελέτες υποδεικνύουν τη δυνατότητα σωρευτικών επιπτώσεων στην υγεία ακόμη και σε περιπτώσεις έκθεσης σε μείγματα VOCs σε χαμηλά επίπεδα και σε χρόνια βάση. Η φορμαλδεΐδη (HCHO) τα επίπεδα τη οποίας μετρήθηκαν στην παρούσα μελέτη, συγκαταλέγεται στους VOCs.

2.2.4 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι ένας από τους πιο επικίνδυνους ρύπους του αέρα εσωτερικών χώρων, επειδή έχει υψηλή συγγένεια με την αιμοσφαιρίνη και παρεμποδίζει τη μεταφορά του οξυγόνου στο αίμα. Σύμφωνα με τους Braubach κ.α. (2012), η έκθεση στο CO μπορεί να οδηγήσει τόσο σε σχετικά ήπια νευρολογικά συμπτώματα όσο και σε απειλητική

για τη ζωή δηλητηρίαση. Οι Kao & Nañagas (2004) περιγράφουν την παθοφυσιολογία της δηλητηρίασης από CO, σημειώνοντας τον ύπουλο χαρακτήρα της λόγω της άχρωμης και άοσμης φύσης του αερίου. Οι ιδιότητες αυτές συμβάλλουν στο γεγονός ότι το CO είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο σε κατοικίες όπου οι συσκευές καύσης δεν συντηρούνται επαρκώς.

Σε επιδημιολογικές μελέτες έχουν βρεθεί ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ καρδιαγγειακής νοσηρότητας και έκθεσης στο CO. Οι Wu & Wang (2005) και οι Prockop & Chichkova (2007) τεκμηριώνουν σχέση μεταξύ χρόνιας έκθεσης σε CO και ισχαιμίας του μυοκαρδίου, καθώς και μακροπρόθεσμων νευρολογικών συνεπειών. Οι Sircar κ.α. (2015) και Mattiuzzi & Lippi (2019) αναφέρουν εποχιακή αύξηση των περιστατικών δηλητηρίασης από CO, υποδεικνύοντας ότι τα περιστατικά είναι συχνότερα τον χειμώνα, όταν η χρήση θέρμανσης είναι εντονότερη. Τα αποτελέσματα αυτά αναδεικνύουν παράγοντες κινδύνου που δύναται να προληφθούν και που σχετίζονται με τη συντήρηση συσκευών και τον αερισμό.

Έχει αποδειχθεί από θεραπευτικές έρευνες ότι η θεραπεία με υπερβαρικό οξυγόνο μπορεί να ελαχιστοποιήσει την πιθανότητα μόνιμων νευρολογικών βλαβών μετά από δηλητηρίαση από CO (Weaver κ.α., 2002). Παρ' όλα αυτά, η πρόληψη παραμένει η πιο αποτελεσματική προσέγγιση, σύμφωνα με τους Kao & Nañagas (2004). Οι ανιχνευτές CO και η περιοδική επιθεώρηση/συντήρηση των συσκευών καύσης αποτελούν βασικά μέτρα, ιδίως δεδομένου ότι πιο ευπαθείς ομάδες του πληθυσμού, συμπεριλαμβανομένων των βρεφών και των ηλικιωμένων, υπόκεινται σε αυξημένους κινδύνους λόγω φυσιολογικής ευπάθειας και συνθηκών έκθεσης (Ruas κ.α., 2014; Öz κ.α., 2023).

2.2.5 Θερμοκρασία και σχετική υγρασία (RH)

Εκτός από τους χημικούς ρύπους, η IAQ συνδέεται επίσης στενά με τη θερμική και υγρομετρική άνεση. Η θερμική άνεση αναφέρεται ευρέως ως υποκειμενική εμπειρία ικανοποίησης από το θερμικό περιβάλλον, με βάση τη θερμοκρασία του αέρα, την υγρασία, την ταχύτητα κίνησης του αέρα και άλλους ατομικούς παράγοντες. Οι Kim κ.ά. (2019) δείχνουν ότι οι μη βέλτιστες θερμικές συνθήκες μπορεί να προκαλέσουν δυσμενείς επιπτώσεις στην αντιλαμβανόμενη άνεση και στη φυσιολογική αντίδραση, γεγονός που έχει

ως αποτέλεσμα τη μείωση της παραγωγικότητας και την αύξηση προβλημάτων που σχετίζονται με την υγεία. Οι Settimo κ.ά. (2020) υποστηρίζουν αυτό το επιχείρημα, δηλώνοντας ότι η θερμική δυσφορία συνδέεται συχνά με ανθυγιεινό IAQ και ότι τα κακά αποτελέσματα για την υγεία αυξάνονται με την παρουσία της, αντί να δρουν από μόνα τους.

Η σχετική υγρασία (RH) είναι μία από τις βασικές περιβαλλοντικές παραμέτρους που σχετίζονται με την ποιότητα του αέρα εσωτερικών χώρων, τη θερμική άνεση και τη βιολογική επιβάρυνση. Υψηλά επίπεδα RH, ιδιαίτερα όταν συνδυάζονται με υψηλές θερμοκρασίες, δημιουργούν ευνοϊκό περιβάλλον για την ανάπτυξη μούχλας και μικροβιακής δραστηριότητας. Οι Burr (2001) και Zhang κ.α. (2020) δείχνουν ότι το εύρος θερμοκρασιών μεταξύ 24°C και 28°C, μαζί με υψηλή υγρασία, μπορεί να προωθήσει σημαντικά τη βιωσιμότητα της μούχλας. Οι Yang κ.α. (2024) συσχετίζουν επίσης τέτοιες συνθήκες με συχνότερες λοιμώξεις του αναπνευστικού, ιδίως στα παιδιά.

Η ρύθμιση της υγρασίας συνδέεται στενά με τη θερμική άνεση. Όπως κατέδειξαν οι Ormandy & Ezratty (2012) και οι Jing κ.ά. (2012), η ανεπαρκής διαχείριση της υγρασίας αποτελεί πηγή δυσφορίας και μπορεί έμμεσα να επιβαρύνει την ποιότητα του αέρα εσωτερικών χώρων, ενισχύοντας τη βιολογική ανάπτυξη. Σύμφωνα με τα προσαρμοστικά μοντέλα θερμικής άνεσης που παρουσιάστηκαν από τους Rijal κ.α. (2015), οι κάτοικοι προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους στις μεταβολές υγρασίας και θερμοκρασίας, επηρεάζοντας τα πρότυπα αερισμού και, κατά συνέπεια, τη συγκέντρωση των ρύπων.

Όσον αφορά τον σχεδιασμό των κτιρίων, η άνεση και η υγεία μπορούν να διατηρηθούν μόνο με τη διασφάλιση κατάλληλων επιπέδων υγρασίας. Οι Korjenic κ.ά. (2010) και οι An & Yamamoto (2015) υπογραμμίζουν τη σημασία των συστημάτων εξαερισμού και των τεχνολογιών μεταφοράς υγρασίας στον έλεγχο της υγρασίας εσωτερικών χώρων. Οι Cao κ.ά. (2025) αναφέρουν επίσης ότι ο καλύτερος έλεγχος της υγρασίας μπορεί να βελτιώσει ταυτόχρονα την IAQ και τη θερμική άνεση, αποτελώντας παράδειγμα «συν-οφελών» της συνδυασμένης διαχείρισης του εσωτερικού περιβάλλοντος.

Οι επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε μούχλα λόγω υψηλής υγρασίας είναι γνωστές. Οι Mendell κ.α. (2011) προσφέρουν ισχυρή επιδημιολογική υποστήριξη της σχέσης μεταξύ υγρασίας/μούχλας σε εσωτερικούς χώρους και άσθματος, καθώς και αλλεργικών νοσημάτων.

Οι επιπτώσεις της οξείας έκθεσης περιλαμβάνουν ερεθισμό του δέρματος, της αναπνευστικής οδού και των ματιών, βήχα και συριγμό, ιδίως σε χώρους με εμφανή/ενεργή ανάπτυξη μούχλας (Mendell κ.α., 2011; Yang κ.α., 2024). Σύμφωνα με τους Seguel κ.α. (2016), οι ηλικιωμένοι και τα άτομα με χρόνιες παθήσεις είναι ιδιαίτερα ευάλωτα σε ρύπους που σχετίζονται με τη μούχλα.

Η αναπνευστική δυσλειτουργία και η χαμηλότερη ποιότητα ζωής έχουν συνδεθεί με την παρατεταμένη έκθεση σε υγρές και μούχλιασμένες συνθήκες. Σύμφωνα με τον Burr (2001) και τους Mendell κ.α. (2011), αναφέρονται επίσης επίμονη κόπωση, πονοκέφαλοι και καταθλιπτική συμπτωματολογία στους πληθυσμούς που επηρεάζονται. Οι Mansouri κ.α. (2022) αναφέρουν ακόμη υψηλότερη χρήση υπηρεσιών υγείας και χαμηλότερη ικανοποίηση από τη ζωή μεταξύ ατόμων που διαμένουν σε επίμονα υγρές κατοικίες. Το γενικό συμπέρασμα αυτών των μελετών είναι ότι ο έλεγχος της υγρασίας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη διαχείριση της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων.

2.3 Επίδραση στη γνωστική λειτουργία και την ψυχική υγεία

Εκτός από τη σωματική υγεία, έχει διαπιστωθεί ότι η IAQ επηρεάζει το επίπεδο άνεσης και ικανοποίησης, καθώς και την παραγωγικότητα. Οι Sakellaris κ.α. (2016) παρουσιάζουν στοιχεία ότι η καλύτερη ποιότητα του αέρα σχετίζεται με την αντιλαμβανόμενη άνεση και τη γνωστική απόδοση, ενώ οι Horr κ.α. (2016) δείχνουν ότι υπάρχουν ισχυρές σχέσεις μεταξύ της βελτίωσης της IAQ και της μείωσης των απουσιών στον χώρο εργασίας. Οι Allen κ.α. (2016) δείχνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές στη μειωμένη απόδοση κατά τη λήψη αποφάσεων σε σχέση με τα υψηλά επίπεδα εσωτερικού CO₂ και VOCs σε γραφεία. Οι Zhang κ.α. (2022) εστιάζουν στο οικιακό περιβάλλον, υποδεικνύοντας ότι η βελτίωση της IAQ μπορεί να συμβάλει έμμεσα στην ψυχική υγεία μέσω της αύξησης της θερμικής και αισθητηριακής άνεσης. Οι Strøm-Tejsen κ.α. (2015) ερευνούν στρατηγικές αερισμού στα υπνοδωμάτια και συσχετίζουν τον καλό αερισμό και τον καλό ύπνο με την ποιότητα της γνωστικής απόδοσης την επόμενη ημέρα.

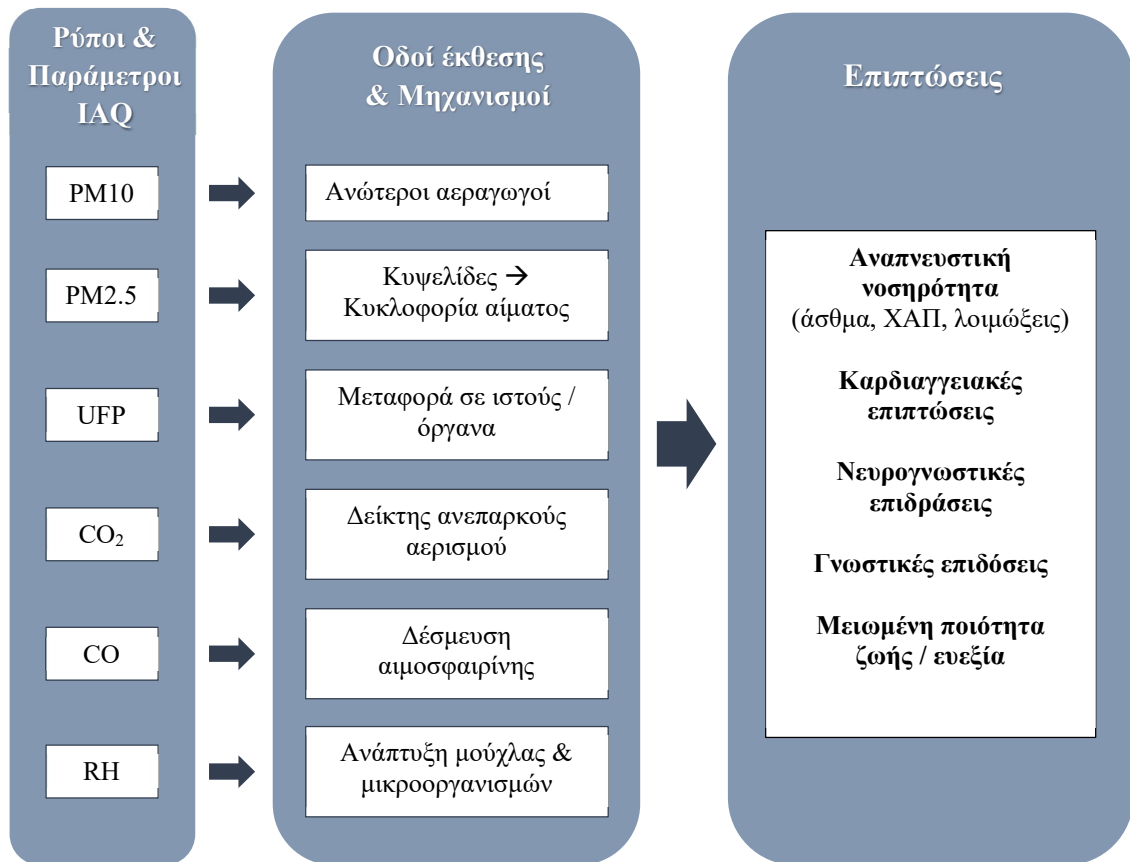
Τέλος, οι Pulimeno κ.ά. (2020) δείχνουν ότι το κακό εσωτερικό μικροκλιματικό περιβάλλον στις αίθουσες διδασκαλίας πλήττει τόσο την υγεία όσο και τα μαθησιακά αποτελέσματα, γεγονός που εξηγεί πώς το IAQ είναι συνυφασμένο με άλλες διαστάσεις κοινωνικών και εκπαιδευτικών ζητημάτων. Αν και ήταν προσανατολισμένοι στο σχολείο, τα συμπεράσματά τους επιβεβαιώνουν ότι η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος αποτελεί μέρος της καθημερινής ζωής και της μελλοντικής ευημερίας.

Οι ψυχοκοινωνικές πτυχές της IAQ έχουν επίσης έρθει στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος. Ο Loraas (2024) διατυπώνει την κακή IAQ ως παράγοντα ψυχοκοινωνικού στρες, δηλώνοντας ότι η αντίληψη της κακής ποιότητας του αέρα από τους ενοίκους μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην ικανοποίηση και την ευημερία, ανεξάρτητα από τις μετρήσεις των ρύπων.

2.4 Οσφρητική Άνεση

Αν και έχει παραμεληθεί σε μεγάλο βαθμό, η οσφρητική άνεση συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην αντίληψη του εσωτερικού περιβάλλοντος από τους ενοίκους. Σύμφωνα με τους Ha κ.ά. (2020), οι έντονες οσμές, ακόμη και σε επίπεδα που δεν είναι τοξικά, μπορούν να προκαλέσουν δυσφορία, άγχος και αρνητικές αξιολογήσεις των εσωτερικών χώρων. Οι Stamp κ.ά. (2021) υποστηρίζουν επίσης ότι η αντίληψη της οσμής είναι συχνά ένας πολύ πρώιμος δείκτης κακού αερισμού ή μιας κρυφής πηγής ρύπανσης, αλλά η χρήση των οσφρητικών αισθήσεων δεν μπορεί να είναι αξιόπιστη από μόνη της, καθώς δεν έχουν όλοι οι επικίνδυνοι ρύποι οσμή.

Στην **Εικόνα 1** συνοψίζονται οι κύριες κατηγορίες ρύπων και παραμέτρων του εσωτερικού αέρα, μαζί με τις βασικές οδούς διεύθυνσης και τους βιολογικούς μηχανισμούς μέσω των οποίων συνδέονται με αναπνευστικές, καρδιαγγειακές και νευρογνωστικές επιπτώσεις.



Εικόνα 1: Βασικοί ρύποι και παράμετροι IAQ (PM10, PM2.5, UFP, CO₂, VOCs, CO, RH): οδοί έκθεσης/μηχανισμοί και κύριες επιπτώσεις στην υγεία σύμφωνα με τη βιβλιογραφία.

2.5 Πηγές και παράγοντες αύξησης συγκεντρώσεων ρύπων

2.5.1 Συσχέτιση ρύπανσης εξωτερικού και εσωτερικού αέρα

Μια σημαντική διάσταση στην έρευνα για την IAQ αφορά τις διαφορές μεταξύ της ρύπανσης του εξωτερικού και του εσωτερικού αέρα. Ενώ η ποιότητα του εξωτερικού αέρα επηρεάζεται σημαντικά από τις εκπομπές της κυκλοφορίας, τις βιομηχανικές δραστηριότητες και τις τοπικές ατμοσφαιρικές διεργασίες, οι εσωτερικοί χώροι διαμορφώνονται από ένα πιο εκτεταμένο και λιγότερο ρυθμιζόμενο φάσμα πηγών εκπομπών. Οι D'Amico κ.ά. (2020) και Lingua κ.ά. (2023) τεκμηριώνουν ότι τα επίπεδα ορισμένων ρύπων εντός του εσωτερικού περιβάλλοντος μπορεί να είναι δύο έως πέντε φορές υψηλότερα από ό,τι σε εξωτερικούς

χώρους, ιδίως στα σπίτια όπου υπάρχει ανεπαρκής αερισμός. Η διαφορά αυτή προκαλείται κυρίως από πηγές εσωτερικών χώρων, όπως τα προϊόντα καθαρισμού, τα οικοδομικά υλικά, το μαγείρεμα και η παρουσία κατοίκων. Επιπλέον, οι Putri κ.α. (2022) και Jo κ.α. (2020) παρατηρούν ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) και τα λεπτά σωματίδια αποτελούν ρύπους που προέρχονται από πηγές εσωτερικών χώρων, ενώ στους εξωτερικούς χώρους οι ρύποι είναι κυρίως προϊόντα καύσης.

Παρ' όλα αυτά, η αλληλεπίδραση μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού αέρα δεν είναι «όλα ή τίποτα». Οι El-Sharkawy & Noweir (2014) και οι Gaspéri κ.α. (2018) αναφέρουν ότι, στις αστικές περιοχές, οι εξωτερικοί ρύποι μπορεί να εισέλθουν στους εσωτερικούς χώρους μέσω του εξαερισμού και των διαρροών του κελύφους του κτιρίου. Η μελέτη των Scheepers κ.α. (2017) αποτελεί μια κριτική ανάλυση αυτής της αλληλεπίδρασης και αναφέρει ότι τα εσωτερικά περιβάλλοντα είναι συνήθως υποδοχείς και τροποποιητές της εξωτερικής ρύπανσης. Η εργασία τους υποστηρίζει την ιδέα να δίνεται προσοχή στην ποιότητα του εξωτερικού αέρα κατά την ερμηνεία των μετρήσεων σε εσωτερικούς χώρους, ιδίως σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Οι Jung & Mahmoud (2023) δείχνουν ότι έντονα επεισόδια εξωτερικής ρύπανσης συμβάλλουν σημαντικά στη συγκέντρωση σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους, ιδίως σε κτίρια με υψηλή αεροδιαπερατότητα. Οι Morawska κ.α. (2017) σημειώνουν ότι η μεθοδολογική σημασία του διαχωρισμού των σωματιδίων που παράγονται σε εσωτερικούς χώρους από εκείνα που προέρχονται από εξωτερικούς χώρους έγκειται στο ότι, χωρίς αυτό, οι πηγές έκθεσης μπορεί να παρερμηνευθούν και να αναπτυχθούν ανεπαρκείς στρατηγικές παρέμβασης.

Οι Krebs κ.α. (2021) σημειώνουν επίσης ότι ο βαθμός διείσδυσης από τον εξωτερικό προς τον εσωτερικό χώρο είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που συμβάλλει στον κίνδυνο για την υγεία και που συνδέεται με την έκθεση στη ρύπανση του περιβάλλοντος. Τα συμπεράσματά τους δείχνουν ότι η αποτελεσματικότητα της διείσδυσης καθορίζεται από το μέγεθος των σωματιδίων, τη φύση του κτιρίου και τη μέθοδο εξαερισμού. Ιδιαίτερη ανησυχία προκαλούν τα υπερλεπτά σωματίδια (UFP), τα οποία οι Jung & Mahmoud (2023) σημειώνουν ότι, λόγω του μικρότερου μεγέθους τους, διεισδύουν ευκολότερα σε εσωτερικούς χώρους σε σχέση με τα μεγαλύτερα σωματίδια. Αυτό θέτει κρίσιμα ερωτήματα σχετικά με το πώς τα κτίρια θα

μπορούσαν να λειτουργήσουν προστατευτικά κατά τη διάρκεια επεισοδίων υψηλής εξωτερικής ρύπανσης, ιδίως σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές.

Η συμπεριφορά των ενοίκων έχει μεγάλη επίδραση στη συσχέτιση μεταξύ της έκθεσης στην εξωτερική ρύπανση και της έκθεσης σε εσωτερικούς χώρους. Όπως απέδειξαν οι Taylor κ.ά. (2014), οι πρακτικές ανοίγματος των παραθύρων έχουν τη δυνατότητα να αυξήσουν σημαντικά την είσοδο εξωτερικών ρύπων σε ημέρες υψηλής περιβαλλοντικής ρύπανσης. Παρόλο που ο φυσικός αερισμός προβάλλεται συχνά ως μια φθηνή λύση για τη βελτίωση του IAQ, τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν ότι η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον και μπορεί να είναι ακόμη και αντιφατική υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Παρομοίως, οι Park κ.ά. (2014) εστιάζουν στο ρόλο του σχεδιασμού του κτιρίου και στην αλληλεπίδρασή του με τη συμπεριφορά των ενοίκων για τον προσδιορισμό των ποσοστών διείσδυσης, γι' αυτό και απαιτείται προσαρμοστικός αερισμός, με βάση τις συνθήκες ποιότητας του εξωτερικού αέρα.

Παρατηρείται περαιτέρω διαμόρφωση των συγκεντρώσεων των ρύπων στους εσωτερικούς χώρους από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και τα πρότυπα τρόπου ζωής. Οι Dales κ.α. (2008) αποδεικνύουν ότι ο αστικός πληθυσμός είναι περισσότερο εκτεθειμένος σε εσωτερικούς ρύπους σε σύγκριση με τον αγροτικό, κυρίως επειδή βρίσκεται πιο κοντά σε εξωτερικές πηγές ρύπανσης, όπως η κυκλοφορία. Τα ευρήματα αυτά υποστηρίζονται από τους Hulin κ.α. (2010), οι οποίοι αναφέρουν ότι τα πυκνοκατοικημένα αστικά περιβάλλοντα έχουν υψηλότερα επίπεδα εσωτερικών σωματιδίων λόγω της εξωτερικής διείσδυσης, αλλά και λόγω αυξημένης δραστηριότητας σε εσωτερικούς χώρους. Οι Pegas κ.α. (2010) εισάγουν μια χρονική διάσταση στη συζήτηση, αναφέροντας ότι ο σύγχρονος τρόπος ζωής, όπου οι άνθρωποι περνούν το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου τους σε εσωτερικούς χώρους, ιδίως σε κατασκευές εξοικονόμησης ενέργειας, μπορεί να καθιστά τη συσσώρευση ρύπων πιο σοβαρή όταν υπάρχει έλλειψη αερισμού και ελέγχου των πηγών.

2.5.2 Εσωτερικές πηγές ρύπανσης

Οι πηγές της ρύπανσης των εσωτερικών χώρων είναι σε μεγάλο βαθμό εσωτερικές, δεδομένου ότι πολλές συνήθειες οικιακές δραστηριότητες εκπέμπουν μεγάλο αριθμό σωματιδίων (PM) και πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs). Ορισμένες από τις σημαντικότερες δραστηριότητες που δημιουργούν εκπομπές είναι το μαγείρεμα, η θέρμανση και ο καθαρισμός. Πρώιμα εμπειρικά στοιχεία παρουσιάζονται από τους Long κ.α. (2001), δείχνοντας ότι επεισόδια μαγειρέματος και καθαρισμού μπορούν να οδηγήσουν σε αναλογίες εσωτερικών προς εξωτερικά σωματίδια που ξεπερνούν κατά πολύ τη μονάδα, ιδίως σε περιόδους ανεπαρκούς αερισμού. Τα αποτελέσματά τους δείχνουν ότι οι εσωτερικοί χώροι δεν δέχονται παθητικά τη ρύπανση που παράγεται από τους εξωτερικούς χώρους, αλλά μπορεί να αποτελούν και κύριες πηγές έκθεσης καθ' αυτές. Η παρατήρηση αυτή υποστηρίχθηκε από μεταγενέστερες έρευνες που επισήμαναν την επεισοδιακή αλλά υψηλής έντασης φύση των εκπομπών σε εσωτερικούς χώρους, οι οποίες συνδέονται με τακτικές οικιακές δραστηριότητες.

Στο παρελθόν, οι μελέτες έχουν επικεντρωθεί σε μεγάλο βαθμό στους εξωτερικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους, ενώ πολύ λίγες μελέτες έχουν γίνει για τα εσωτερικά περιβάλλοντα. Οι Mannan & Al-Ghamdi (2021) σημειώνουν κριτικά ότι τα πρώιμα πλαίσια στην περιβαλλοντική υγεία υπέθεταν αρκετά ότι η ποιότητα του αέρα στους εσωτερικούς χώρους θα ήταν μια αντανάκλαση των όσων συμβαίνουν στους εξωτερικούς χώρους, κάτι που γενικά θεωρείται λανθασμένη υπόθεση. Πιο πρόσφατες έρευνες διαπίστωσαν ότι τα εσωτερικά περιβάλλοντα καθορίζονται από συγκεκριμένες πηγές εκπομπών, πρότυπα συμπεριφοράς και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά που πρέπει να διερευνηθούν ξεχωριστά (Cincinelli & Martellini, 2017). Οι Leung (2015) και Moreno-Rangel κ.ά. (2020) προσδιορίζουν τις καθημερινές δραστηριότητες των νοικοκυριών, συμπεριλαμβανομένου του μαγειρέματος, του καπνίσματος και των προϊόντων καθαρισμού, ως σημαντικές πηγές φορτίων ρύπων εσωτερικών χώρων, τα οποία τείνουν να αυξάνονται σε βραχυπρόθεσμες συγκεντρώσεις, πάνω από τις κατευθυντήριες γραμμές που βασίζονται στην υγεία. Ο Abdel-Salam (2022) προσθέτει ότι οι εν λόγω εκπομπές είναι δυνατόν να είναι σωρευτικές και να εντείνονται λόγω ανεπαρκούς αερισμού, καθώς και λόγω μακροχρόνιας χρήσης.

Οι Tofful κ.ά. (2020), μετρούν το ρόλο διαφόρων οικιακών λειτουργιών, όπως η χρήση καθαριστικών και τα συστήματα θέρμανσης κατοικιών, στα επίπεδα των ρύπων σε εσωτερικούς χώρους. Το έργο τους είναι ενδεικτικό ότι η αθροιστική επίδραση αυτών των δραστηριοτήτων μπορεί να αυξήσει σημαντικά το επίπεδο των ρύπων, ιδίως σε σπίτια που έχουν μικρή έως καθόλου ανταλλαγή αέρα. Οι Fernández-Agüera κ.ά. (2019) υπογραμμίζουν επίσης τη σημασία των υλικών εσωτερικών χώρων και δείχνουν ότι τα συνθετικά έπιπλα και τα υποστρώματα επιφανειών μπορούν να αποτελέσουν πηγές συνεχούς εκπομπής πτητικών οργανικών ενώσεων και σωματιδίων PM. Οι Singleton κ.ά. (2016) αναφέρουν τις εκπομπές διοξειδίου του αζώτου και φορμαλδεΐδης από συσκευές αερίου και σύνθετα υλικά, ενώ οι Becher κ.ά. (2018) τονίζουν ότι τα χαλιά και τα επικαλυμμένα έπιπλα παγιδεύουν και επανααιωρούν τα σωματίδια. Οι εκθέσεις που σχετίζονται με τα υλικά συνδέονται επίσης με αναπνευστικά συμπτώματα, τα οποία οι Colton κ.ά. (2014) συσχετίζουν με κατοικίες χαμηλού εισοδήματος, όπου η αναβάθμιση του εξαερισμού δεν είναι πάντα δυνατή. Όλα αυτά τα ευρήματα είναι ενδεικτικά ότι η IAQ δεν είναι μόνο αποτέλεσμα της συμπεριφοράς των ενοίκων, αλλά και ένδειξη ευρύτερων δομικών και κοινωνικοοικονομικών παραγόντων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η επίδραση των συσκευών που βασίζονται στην καύση. Οι Taylor κ.ά. (2015) αποδεικνύουν ότι οι εκπομπές από σόμπες/εστίες αερίου αποτελούν σημαντική συμβολή στα PM_{2.5} σε εσωτερικούς χώρους. Όλες αυτές οι μελέτες οδηγούν στο συμπέρασμα ότι απαιτείται και μετριασμός στην πηγή, αντί να βασίζεται κανείς αποκλειστικά στον εξαερισμό.

2.6 Επίδραση συμπεριφορικών μοτίβων

Οι παρεμβάσεις συμπεριφοράς και η ευαισθητοποίηση του κοινού γίνονται μέρος συμπληρωματικών εργαλείων για τη βελτίωση της IAQ. Οι Cincinelli & Martellini (2017) υποστηρίζουν ειδικές εκστρατείες ενημέρωσης για τη μείωση της κατανάλωσης προϊόντων με υψηλές εκπομπές και ενθαρρύνουν συμπεριφορές αποτελεσματικού αερισμού. Οι Sharpe κ.ά. (2020) δείχνουν ότι η πρακτική διατήρησης των παραθύρων κλειστών (για λόγους ιδιωτικότητας, ασφάλειας ή θορύβου) μπορεί να ενισχύσει τη συσσώρευση CO₂ και, εάν συνυπάρχουν βιολογικοί παράγοντες να καταστήσει τα υπνοδωμάτια μικροπεριβάλλοντα έκθεσης. Οι Amoatey κ.ά. (2018) κινούνται στην ίδια κατεύθυνση και διαπιστώνουν ότι

ακόμη και απλές αλλαγές στη συμπεριφορά, όπως το να ανοίγει περισσότερο το παράθυρο κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων υψηλών εκπομπών, μπορούν να προσφέρουν σημαντική μείωση των ρύπων εσωτερικού χώρου. Ωστόσο, οι εν λόγω συγγραφείς προειδοποιούν ότι η εξάρτηση από την ατομική συμπεριφορά μπορεί να διευρύνει τις ανισότητες, δεδομένου ότι δεν έχει κάθε νοικοκυριό την ίδια πρόσβαση σε πληροφορίες, τεχνολογία ή διαρθρωτικές βελτιώσεις.

2.7 Η σύγκρουση: ενεργειακή απόδοση έναντι αερισμού

Η αεροστεγανότητα έχει πλέον αναδειχθεί σε πρότυπο ενεργειακά αποδοτικής κατασκευής λόγω των αυστηρότερων οικοδομικών κανονισμών. Οι Milner κ.α. (2014), Bekö κ.ά. (2020) και Derbez κ.ά. (2014) εκφράζουν επιφυλάξεις σχετικά με τη διττή έννοια της αεροστεγανότητας, καθώς, από τη μία πλευρά, η διαρροή αέρα είναι μικρότερη, γεγονός που μειώνει τη ζήτηση θέρμανσης, αλλά, από την άλλη πλευρά, η συγκέντρωση των εσωτερικών ρύπων μπορεί να αυξηθεί λόγω της έλλειψης αερισμού. Σε παρόμοια γραμμή, έρχονται και οι μελέτες των Niculita-Hirzel (2022) και Hernez κ.ά. (2025) όπου αναφέρουν ότι, αν και η αεροστεγής κατασκευή βοηθά στην ελαχιστοποίηση της ανεξέλεγκτης εισροής εξωτερικών ρύπων, περιορίζει επίσης τη φυσική ανταλλαγή αέρα, αυξάνοντας την πιθανότητα συσσώρευσης ρύπων σε εσωτερικούς χώρους. Παρόμοιες τάσεις αναφέρονται από τους Otaegi κ.ά. (2022) σε ευρωπαϊκά στεγαστικά αποθέματα, διότι, παρά τη ρυθμιστική εστίαση στην ενίσχυση της μόνωσης και της αεροδιαπερατότητας, η αντίστοιχη αύξηση του αερισμού δεν έχει πάντα πραγματοποιηθεί. Αυτοί που κινδυνεύουν φαίνεται να είναι κυρίως τα παιδιά, καθώς οι Kovesi κ.ά. (2007) αναφέρουν αυξημένη συχνότητα αναπνευστικών λοιμώξεων σε παιδιά που διαμένουν σε κατοικίες με κακό εσωτερικό αέρα.

Στην πραγματικότητα, η σύγκρουση μεταξύ ενεργειακής απόδοσης και IAQ είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της σύγχρονης κατασκευής κτιρίων. Οι Franco και Schito (2020) δείχνουν ότι αυτοί οι αντικρουόμενοι στόχοι μπορούν να εξισορροπηθούν μέσω του ελέγχου του αερισμού με βάση το CO₂, αλλάζοντας δυναμικά τους ρυθμούς ροής αέρα ανάλογα με τα ποσοστά πληρότητας. Σύμφωνα με τους Rupp κ.ά. (2015) και Zhang κ.ά. (2022), τα συστήματα Θέρμανσης, Αερισμού και Κλιματισμού (Heating, Ventilation & Air

Conditioning – HVAC) απορροφούν σημαντικό μέρος της ενέργειας του κτιρίου, γι' αυτό και απαιτούνται λύσεις σχεδιασμού βάσει επιδόσεων. Προτείνονται λύσεις όπως προηγμένοι έλεγχοι, συστήματα ανάκτησης ενέργειας και εναλλάκτες θερμότητας, αλλά η αποτελεσματικότητά τους βασίζεται κυρίως στη σωστή εγκατάσταση και στις ενέργειες των χρηστών (Hesaraki κ.α., 2015; Awad και Jung, 2021).

Οι ερευνητές στον χώρο της υγειονομικής περιθαλψής Kembel κ.α. (2012) δίνουν μεγάλη έμφαση στο ότι τα αεροστεγή κτίρια πρέπει να διαθέτουν σωστά μελετημένο μηχανικό αερισμό, ώστε να αποφεύγεται η συσσώρευση εσωτερικών ρύπων. Η μελέτη τους αφορά τα νοσοκομεία, ωστόσο, η έννοια ισχύει και για κτίρια κατοικιών, καθώς υιοθετούνται πρότυπα αεροστεγούς κατασκευής. Οι Yang κ.α. (2009) δείχνουν επίσης ότι νέα σχολικά κτίρια με σύγχρονα συστήματα παραθύρων τείνουν να αντιμετωπίζουν δυσκολίες ως προς τον επαρκή αερισμό, γεγονός που αυξάνει τα επίπεδα εσωτερικών ρύπων. Οι McGill κ.α. (2015) αποδίδουν το πρόβλημα στο ότι ο σχεδιασμός των παραθύρων εστιάζει περισσότερο στη θερμική απόδοση παρά στην ευελιξία της ροής του αέρα, εμποδίζοντας έτσι τους ενοίκους να ελέγχουν αποτελεσματικά τον αερισμό.

Μεταξύ των θετικών ευρημάτων, οι Földváry κ.ά. (2017) αναφέρουν ότι, στην Καλιφόρνια, με ενδεδεγμένη εκσυγχρονισμό και ενισχυμένο μηχανικό αερισμό, οι συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος βελτιώθηκαν, γεγονός που δείχνει ότι οι ενεργειακές ανακαινίσεις μπορούν να υποστηρίξουν την IAQ όταν ο αερισμός ενταχθεί ουσιαστικά στο έργο. Οι Ala-Kotila κ.ά. (2020) παρουσιάζουν έργα ανακαίνισης στη Σουηδία που βελτίωσαν την IAQ και την ικανοποίηση των ενοίκων και μείωσαν την απαίτηση θέρμανσης κατά 39%, ως παράδειγμα ότι οι στόχοι υγείας και ενέργειας μπορούν να συνδυαστούν με κατάλληλο σχεδιασμό και κατασκευή αλλά και οι Liu κ.ά. (2015) αναφέρουν θετικά αποτελέσματα μετασκευών σε σουηδικές πολυκατοικίες, όταν η μειωμένη ανάγκη θέρμανσης συνδυάζεται με ενισχυμένη IAQ.

2.8 Κοινωνικές ανισότητες

Οι κοινωνικοοικονομικές διαβαθμίσεις έκθεσης και κινδύνου είναι επίσης σαφείς στη βιβλιογραφία. Σύμφωνα με τους Muindi κ.α. (2014; 2016), καταγράφονται υψηλές εκθέσεις

σε λεπτά σωματίδια στα νοικοκυριά αστικών παραγκουπόλεων, τις οποίες οι συγγραφείς αποδίδουν στις παραδοσιακές πρακτικές μαγειρέματος και στο κάπνισμα σε εσωτερικούς χώρους. Οι αναλύσεις τους είναι σημαντικές όχι μόνο λόγω του εντοπισμού των κυρίαρχων πηγών, αλλά και επειδή αποσαφηνίζουν ότι η μείωση της έκθεσης περιορίζεται από την πρόσβαση στην ενέργεια, τον συνωστισμό και την αδυναμία διαρθρωτικών αλλαγών. Οι Das κ.ά. (2018) σημειώνουν ότι οι παρεμβάσεις σε υποδομές και πρακτικές αερισμού θα πρέπει να λειτουργούν σε συνδυασμό. Ήταν εύστοχο να επικρίνουν την προσέγγιση που αντιμετωπίζει τη ρύπανση των νοικοκυριών ως ζήτημα επιλογής, αντί ως αποτέλεσμα περιορισμών του δομημένου περιβάλλοντος. Μια τέτοια συνδυαστική θεώρηση συνάδει με μοντέλα δημόσιας υγείας που τοποθετούν την έκθεση σε εσωτερικούς χώρους ως συνδυασμό τεχνολογίας, συμπεριφοράς και ανισότητας.

2.9 Η ανάγκη για επαρκή και ποιοτικό αερισμό

Ο κεντρικός ρόλος του αερισμού στις προσεγγίσεις για τη διαχείριση της IAQ είναι ότι αποτελεί τον βασικό μηχανισμό αραίωσης των ρύπων εσωτερικού χώρου. Τα ευρήματα που παρέχονται από τους Sundell κ.α. (2011) είναι αρκετά ισχυρά για να αποδείξουν ότι το επίπεδο επαρκούς αερισμού συνδέεται με καλύτερη αναπνευστική υγεία και μειωμένη επικράτηση συμπτωμάτων. Ωστόσο, προειδοποιούν ότι η αποτελεσματικότητα του εξαερισμού δεν περιορίζεται μόνο στα ποσοστά ροής του αέρα, αλλά και στον σχεδιασμό του συστήματος, στη συντήρησή του και στην αλληλεπίδραση των ενοίκων. Οι Amoatey κ.ά. (2020) συμμερίζονται αυτό το ζήτημα, λέγοντας ότι τα κακοσυντηρημένα μηχανικά συστήματα δεν θα παρέχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα για την υγεία και μπορούν ακόμη και να μετατραπούν σε δευτερογενή πηγή ρύπανσης, ενώ οι Goodarzi κ.ά. (2023) επεκτείνονται στην αναγκαιότητα εξισορρόπησης των συστημάτων εξαερισμού ώστε να αποφευχθούν διαφορές πίεσης που άθελα καταλήγουν σε συγκέντρωση ρύπων. Οι Mannan και Al-Ghamdi (2021) δίνουν έμφαση σε ολοκληρωμένα σχέδια εξαερισμού που λαμβάνουν υπόψη την πηγή των ρύπων, την κατοίκηση και τους κλιματικούς παράγοντες, αντί για γενικούς στόχους ροής αέρα.

Όπως παρουσιάζεται από τους Ferdyn-Grygierek & Grygierek (2024), τα επίπεδα πτητικών οργανικών ενώσεων, φορμαλδεΐδης και αιωρούμενων σωματιδίων είναι σημαντικά μειωμένα σε κατοικίες με μηχανικό αερισμό σε σύγκριση με κατοικίες με φυσικό αερισμό. Εν τούτοις, απαιτείται κριτική ερμηνεία: η αποτελεσματικότητα των μηχανικών συστημάτων εξαρτάται από τη θέση σε λειτουργία, την αντικατάσταση φίλτρων, την εξισορρόπηση της ροής αέρα και την αποδοχή από τους ενοίκους. Οι Niculita-Hirzel κ.α. (2020) δείχνουν ότι σε κατοικίες με μηχανικό αερισμό η διακύμανση των μυκήτων και το επίπεδο τοξικής μούχλας είναι χαμηλότερα σε σχέση με κατοικίες με φυσικό αερισμό. Αυτό ενισχύει το επιχείρημα ότι ο αερισμός δεν αφορά μόνο χημικούς και σωματιδιακούς ρύπους, αλλά και τη μικροβιολογία των εσωτερικών χώρων.

Σύμφωνα με τους Milner κ.ά. (2014), ο κατάλληλος μηχανικός αερισμός μπορεί να συμβάλει στη μείωση του κινδύνου καρκίνου του πνεύμονα που συνδέεται με την έκθεση στο ραδόνιο και αναδεικνύει πώς ο αερισμός μπορεί να λειτουργήσει ως στρατηγική πρόληψης, όταν εξετάζεται υπό το πρίσμα συγκεκριμένων ρύπων. Σύμφωνα με τους Singer κ.ά. (2020), τα οφέλη βελτίωσης του εξαερισμού αποτυπώνονται σε χαμηλότερα επίπεδα φορμαλδεΐδης σε σπίτια με σύστημα μηχανικού εξαερισμού, σε σύγκριση με παλαιότερες κατασκευές που προηγήθηκαν αυστηρότερων απαιτήσεων. Τα παραπάνω ευρήματα είναι πειστικά ως προς τη σύνδεση πολιτικής, οικοδομικής πρακτικής και μείωσης της έκθεσης, και υποδηλώνουν ότι η επιβολή και η εξέλιξη των οικοδομικών κανονισμών μπορεί να αποφέρει σημαντικά οφέλη για το IAQ.

Η βιβλιογραφία καταγράφει τις αρνητικές εκβάσεις από την παράβλεψη του εξαερισμού. Όπως επισημαίνουν οι Noris κ.ά. (2013) και οι Ferguson κ.ά. (2020), κατασκευές έπειτα από ανακαινίσεις μπορούν να οδηγήσουν όχι μόνο σε επιδείνωση της ρύπανσης εσωτερικών χώρων, αλλά και στην εμφάνιση συμπτωμάτων συνδρόμου «άρρωστου κτιρίου», όταν αυξάνεται η αεροστεγανότητα χωρίς την αναγκαία ανταλλαγή αέρα. Οι Ferguson κ.α. (2020) εστιάζουν επίσης στην ισότητα, σημειώνοντας ότι οι αναβαθμίσεις σε κατοικίες χαμηλού εισοδήματος μπορεί να επιδεινώσουν την υγεία, εάν δεν παρακολουθείται και δεν αντιμετωπίζεται η IAQ μετά την παρέμβαση, με κίνδυνο να ενισχυθούν οι ανισότητες αντί να μετριαστούν.

Η δημοφιλής λύση σε αυτό το δίλημμα ήταν η προώθηση των συστημάτων μηχανικού αερισμού με ανάκτηση θερμότητας (MVHR) όπου επιτυγχάνεται συμβιβασμός μεταξύ των στόχων της IAQ και της ενεργειακής απόδοσης. Οι Milner κ.ά. (2014) δείχνουν ότι τα συστήματα αυτά είναι αποτελεσματικά όσον αφορά τη μείωση των επιπέδων ρύπων σε εσωτερικούς χώρους (όπως ραδόνιο και πτητικές οργανικές ενώσεις), καθώς και των απωλειών θερμότητας. Ωστόσο, τα αποτελέσματά τους δείχνουν επίσης ότι η απόδοση του συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σωστή εγκατάσταση, τη γνώση των χρηστών και την τακτική συντήρηση. Οι Hernandez κ.α. (2025) παραδέχονται ότι μπορούν να βελτιώσουν την IAQ και να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες ενέργειας, αλλά προειδοποιούν ότι η απόδοσή τους μπορεί να διαφέρει σημαντικά υπό κλιματικές συνθήκες, ιδίως σε υγρές περιοχές.

Υπό την προϋπόθεση ότι είναι καλά σχεδιασμένα και συντηρημένα, τα συστήματα μηχανικού αερισμού παρέχουν έναν πιο ελεγχόμενο τρόπο διαχείρισης της IAQ. Οι Mansouri κ.ά. (2022) επισημαίνουν την αποτελεσματικότητα τόσο του μηχανικού αερισμού όσο και των τοπικών συστημάτων απαγωγής σε χώρους κουζίνας και μπάνιου στη μείωση των συγκεντρώσεων ρύπων σε εσωτερικούς χώρους. Οι Sánchez-Fernández κ.ά. (2023) προτείνουν επίσης ότι ο δυναμικός έλεγχος της ροής του αέρα μέσω ενσωμάτωσης αισθητήρων CO₂ στα συστήματα ελέγχου του εξαερισμού επιτρέπει τη μεγιστοποίηση της IAQ, με ταυτόχρονη μείωση της περιττής κατανάλωσης ενέργειας.

Σύμφωνα με τους Holopainen κ.ά. (2015) και Elsayed κ.ά. (2024), η ανεπαρκής διαχείριση των συστημάτων εξαερισμού μπορεί να επιδεινώσει τη δυσαρέσκεια για την ποιότητα του εσωτερικού αέρα παρά τις αναβαθμίσεις, γι' αυτό και είναι απαραίτητες η συνεχής παρακολούθηση, η σωστή θέση σε λειτουργία και οι σαφείς οδηγίες προς τους χρήστες, αντί για τεχνικές παρεμβάσεις που πραγματοποιούνται άπαξ.

2.10 Κατευθυντήριες οδηγίες - νομοθεσία

Οι διεθνείς κατευθυντήριες γραμμές και τα κανονιστικά πλαίσια έχουν κεντρική σημασία για τις πολιτικές και τις πρακτικές που πρέπει να ακολουθούνται για το IAQ, δεδομένου ότι υπάρχουν όλο και περισσότερα στοιχεία που αποδεικνύουν ότι η ρύπανση των εσωτερικών

χώρων οδηγεί σε δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας υπήρξε ένας από τους πιο σημαντικούς διεθνείς οργανισμούς που έχουν θεσπίσει κριτήρια αναφοράς με βάση την υγεία για την ποιότητα του αέρα, συμπεριλαμβανομένου του εσωτερικού περιβάλλοντος. Ο ΠΟΥ τονίζει τακτικά ότι το κακό IAQ έχει σημαντικό μερίδιο σε ένα ευρύ φάσμα αποτελεσμάτων για την υγεία, συμπεριλαμβανομένων των αναπνευστικών και καρδιαγγειακών παθήσεων και των γνωστικών διαταραχών, καθιστώντας έτσι τη ρύπανση του αέρα στους εσωτερικούς χώρους ένα εξαιρετικά σημαντικό πρόβλημα δημόσιας υγείας, αντί για μια πρόκληση που σχετίζεται αποκλειστικά με την τεχνική και την οικοδομή (Awad & Jung, 2021; Alegría-Sala κ.α., 2022). Η τελευταία αναθεώρηση των κατευθυντήριων γραμμών για την ποιότητα του αέρα από τον ΠΟΥ το 2021 αντιπροσωπεύει μια πιο προσεκτική στρατηγική, προτείνοντας αυστηρότερο καθορισμό των ορίων συγκέντρωσης των ρύπων, σε συνάρτηση με τον αυξανόμενο όγκο επιδημιολογικών δεδομένων.

Στις κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ συνιστάται ότι, μακροπρόθεσμα, η έκθεση στα λεπτά σωματίδια (PM_{2.5}) δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ αέρα, ενώ τα PM₁₀ δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ αέρα κατά μέσο όρο ετησίως. Οι Haruna κ.α. (2024) και Newby κ.α. (2014) τονίζουν ότι τα όρια αυτά βασίζονται σε μεγάλες πληθυσμιακές μελέτες που έχουν αποδείξει στατιστικά σημαντική νοσηρότητα και θνησιμότητα ακόμη και σε συγκριτικά χαμηλά επίπεδα έκθεσης. Ειδικότερα, ο ΠΟΥ παραδέχεται ότι δεν υπάρχει οριστικά αναγνωρισμένο «ασφαλές» όριο για την έκθεση στα PM_{2.5}. Σύμφωνα με τους Alonso-Blanco κ.ά. (2025) και Strak κ.ά. (2021), έχουν διαπιστωθεί αρνητικές καρδιαγγειακές και αναπνευστικές επιπτώσεις ακόμη και σε επίπεδα χαμηλότερα από τις τρέχουσες κατευθυντήριες τιμές, γεγονός που ενισχύει την ανάγκη συνεχούς επαναξιολόγησης και σταδιακής μείωσης των ρυθμιστικών δεικτών. Η στάση αυτή αντιπροσωπεύει μια ευρύτερη τάση στην πολιτική περιβαλλοντικής υγείας, η οποία προκρίνει τη μείωση της έκθεσης πέραν της απλής συμμόρφωσης με τα πρότυπα.

Τα περιφερειακά πρότυπα για την ποιότητα του εσωτερικού αέρα στην Ευρώπη διαμορφώνονται από ένα πλέγμα υγειονομικών συστάσεων και τεχνικών προτύπων κτιριακής απόδοσης. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN) έχει εναρμονίσει τα σχετικά πρότυπα, με τους Pinault κ.α. (2016) να αναφέρονται στο ιστορικό πρότυπο EN 15251 (το

οποίο πλέον έχει αντικατασταθεί από το σύγχρονο EN 16798-1:2019). Το εν λόγω πρότυπο επιχειρεί να συνδυάσει τις απαιτήσεις ποιότητας του εσωτερικού αέρα με τη θερμική άνεση και την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Αν και μια τέτοια ολιστική προσέγγιση εναρμονίζεται με τους στόχους της βιώσιμης δόμησης, έχει δεχθεί έντονη κριτική. Η βασική ένσταση έγκειται στο γεγονός ότι τα συγκεκριμένα πρότυπα τείνουν να δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στις παραμέτρους άνεσης και στους ρυθμούς αερισμού, παρά στον καθορισμό ρητών οριακών τιμών για συγκεκριμένους χημικούς ρύπους, γεγονός που ενδέχεται να υπονομεύει την αποτελεσματική προστασία των ευάλωτων ομάδων του πληθυσμού.

Ταυτόχρονα, τα αμερικάνικα πρότυπα αναφοράς που αναπτύσσονται από την ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) έχουν ισχυρό αντίκτυπο και εκτός Βόρειας Αμερικής. Το πρότυπο αποδεκτής ποιότητας εσωτερικού αέρα ASHRAE 62.1 χαρακτηρίζεται από απαιτούμενους ρυθμούς αερισμού και ελεγχόμενες πηγές και αναφέρεται ότι τουλάχιστον το 80% των ενοίκων δεν πρέπει να αισθάνονται δυσφορία (Arya κ.α., 2024). Παρόλο που αυτή η προσέγγιση «βάσει επιδόσεων» επιτρέπει ευελιξία στον σχεδιασμό, έχει επικριθεί ότι στηρίζεται σε υποκειμενικές μετρήσεις άνεσης, αντί σε άμεσους δείκτες υγείας. Σύμφωνα με τους Arya κ.α. (2024), η ασυνέπεια μεταξύ των κατευθυντήριων γραμμών της ASHRAE, της Ευρώπης και του ΠΟΥ, ιδίως ως προς τα όρια των PM_{2.5}, μπορεί να προκαλέσει κανονιστική αβεβαιότητα και να αφήσει πληθυσμούς εκτεθειμένους σε υψηλότερα επίπεδα PM από εκείνα που υπαγορεύουν τα πρότυπα υγείας, ακόμη και όταν τηρούνται οι περιφερειακοί κανονισμοί.

Εκτός από τα αιωρούμενα σωματίδια, υπάρχουν κατευθυντήριες τιμές και για άλλους ρύπους εσωτερικών χώρων, οι οποίες επίσης παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις στη ρυθμιστική φιλοσοφία. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), που χρησιμοποιείται ευρέως ως δείκτης επάρκειας αερισμού, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα. Παρόλο που η ASHRAE συχνά αναφέρεται σε επίπεδα γύρω στα 1.000 ppm ως πρακτικό όριο άνεσης, ο ΠΟΥ δεν καθορίζει συγκεκριμένη οριακή τιμή, αλλά προωθεί την αρχή της διατήρησης του CO₂ όσο το δυνατόν χαμηλότερα μέσω επαρκούς αερισμού (Arya κ.α., 2024). Η διαφορά αυτή αντανακλά τη συνειδητοποίηση ότι το CO₂ καθαυτό δεν αποτελεί συνήθως το κύριο ζήτημα υγείας στα επίπεδα που απαντώνται στους εσωτερικούς χώρους, αλλά λειτουργεί ως δείκτης ανεπαρκούς εναλλαγής αέρα και συσσώρευσης συν-εκπεμπόμενων ρύπων.

Στην περίπτωση χημικών ρύπων με άμεσες τοξικολογικές επιπτώσεις, οι κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ είναι πιο συγκεκριμένες. Συνιστάται η φορμαλδεΰδη να μην υπερβαίνει τα $0,1 \text{ mg/m}^3$, λόγω στοιχείων που δείχνουν ότι προκαλεί ερεθισμό, αναπνευστικά συμπτώματα και πιθανή καρκινογόνο δράση (Zhang κ.α., 2022). Αντίστοιχα, για το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) αναφέρονται τιμές αναφοράς 200 μg/m^3 για βραχυπρόθεσμη έκθεση και 40 μg/m^3 ως ετήσιος μέσος όρος, καθώς συνδέεται με φλεγμονή των αεραγωγών και αυξημένη ευπάθεια σε αναπνευστικές λοιμώξεις (Zhang κ.α., 2022). Οι Wei κ.ά. (2015) και Pegas κ.ά. (2010) σημειώνουν ότι ορισμένα κράτη, όπως ο Καναδάς και η Πορτογαλία, έχουν ενσωματώσει αυτές τις συστάσεις του ΠΟΥ σε εθνικά πλαίσια IAQ, καταδεικνύοντας ότι οι διεθνείς οδηγίες μπορούν να μεταφραστούν σε εφαρμόσιμη πολιτική.

Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, η IAQ ρυθμίζεται λιγότερο άμεσα, καθώς εντάσσεται στην ευρύτερη περιβαλλοντική νομοθεσία. Ο έμμεσος αντίκτυπος της οδηγίας για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, μέσω του καθορισμού ορίων ρύπανσης στον εξωτερικό αέρα, επηρεάζει τις συνθήκες σε εσωτερικούς χώρους, ιδίως σε αστικά περιβάλλοντα όπου οι εξωτερικοί ρύποι μπορούν να εισέλθουν στα κτίρια (Wargocki κ.α., 2002). Σύμφωνα με τους Szabados κ.α. (2021), ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες έχουν συμπληρώσει τις οδηγίες της ΕΕ με εθνικές κατευθυντήριες γραμμές για την IAQ σε οικιστικά, εκπαιδευτικά και εμπορικά κτίρια. Παρ' όλα αυτά, οι προσπάθειες αυτές διαφέρουν ως προς την έκταση και την εφαρμογή, με αποτέλεσμα να μην διασφαλίζεται ισοδύναμο επίπεδο προστασίας σε όλα τα κράτη-μέλη.

Το ρυθμιστικό σύστημα των Ηνωμένων Πολιτειών εμφανίζεται πιο αποσπασματικό. Η ευθύνη για την ποιότητα του εσωτερικού αέρα στους χώρους εργασίας έχει ανατεθεί κυρίως στην Υπηρεσία Επαγγελματικής Ασφάλειας και Υγείας (OSHA), ενώ η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (EPA) παρέχει οδηγίες και εθελοντικά προγράμματα, όπως το Indoor Air Quality Tools for Schools (Seppänen & Fisk, 2002). Οι Szabados κ.ά. (2021) αναφέρουν ότι η απουσία ενιαίου εθνικού προτύπου IAQ στις ΗΠΑ περιορίζει την ομοιομορφία και την εφαρμογή πρωτοβουλιών, ιδίως στο οικιακό περιβάλλον, σε σύγκριση με τις ευρωπαϊκές προσεγγίσεις.

Παρόλο που υπάρχουν περιφερειακές διαφοροποιήσεις, υπάρχει ευρεία επιστημονική συναίνεση ότι ο επαρκής αερισμός αποτελεί έναν από τους πυλώνες ρύθμισης του IAQ. Όπως

αναφέρουν οι Mannan & Al-Ghamdi (2021) και Apte κ.α. (2000), υψηλότερα ποσοστά αερισμού συσχετίζονται με μικρότερη συχνότητα εμφάνισης του συνδρόμου του άρρωστου κτιρίου και αναπνευστικών συμπτωμάτων. Οι Li κ.ά. (2007) προτείνουν επίσης ότι, με τον καθορισμό σαφών προτύπων αερισμού, μπορούν να επιτευχθούν σημαντικά οφέλη για τη δημόσια υγεία, ιδίως σε υπερπλήρη κτίρια. Ωστόσο, οι ίδιοι συγγραφείς προειδοποιούν ότι ο σχεδιασμός του αερισμού πρέπει να είναι προσαρμοσμένος στο γενικότερο πλαίσιο, διότι η υπερβολική εισαγωγή εξωτερικού αέρα μπορεί να αυξήσει την είσοδο ρύπων ή να ενισχύσει την ενεργειακή κατανάλωση.

Παρόλο που η Ελλάδα συμμορφώνεται επίσημα με τους κανονισμούς της ΕΕ για την ποιότητα του αέρα, η εφαρμογή προτύπων IAQ σε κτίρια κατοικιών στην πράξη δεν είναι ευρέως διαδεδομένη (Kakoulli κ.α., 2022). Στο ελληνικό πλαίσιο, η TOTEE (Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας) αποτελεί σημαντικό σημείο αναφοράς ως προς την παροχή τεχνικών απαιτήσεων για αερισμό και ποιότητα εσωτερικού αέρα στους οικοδομικούς κανονισμούς. Σύμφωνα με τους Nikolakou & Spyropoulos (2023) και Spentzou κ.α. (2017), οι συστάσεις της TOTEE μπορούν να αξιοποιηθούν για τον σχεδιασμό μέτρων φυσικού και μηχανικού αερισμού, ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής παροχή νωπού αέρα και απομάκρυνση ρύπων μέσω αραίωσης. Οι Kakoulli κ.α. (2022) επισημαίνουν ότι η τήρηση τέτοιων κατευθυντήριων γραμμών μπορεί να συμβάλει στη μείωση συμπτωμάτων που σχετίζονται με το IAQ (συμπεριλαμβανομένων αλλεργιών και άσθματος). Παρόλα αυτά, η TOTEE δεν αποτελεί και υποχρέωση προς τον κατασκευαστή όσον αφορά τον αερισμό εσωτερικών χώρων.

2.11 Εγχώρια βιβλιογραφία

Αναφορικά με την εγχώρια βιβλιογραφία, μια από τις πιο πρόσφατες ελληνικές μελέτες για την ποιότητα του εσωτερικού αέρα είναι αυτή των Bikaki κ.α. (2024), η οποία εξέτασε την IAQ σε σχολικά κτίρια στην περιοχή της Αργολίδας στο Νομό Πελοποννήσου. Στην έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φυσικών παραμέτρων (θερμοκρασία, σχετική υγρασία) και κοινών ρύπων (CO_2 , NO_2 , VOCs, $\text{PM}_{2.5}$ και PM_{10}) σε 14 αίθουσες διδασκαλίας σε επτά σχολικά κτίρια, αποκαλύπτοντας ότι οι συγκεντρώσεις VOCs ήταν διαρκώς πάνω από 0,8

ppm σε όλα τα εξεταζόμενα δωμάτια, ενώ σε σημαντικό ποσοστό των χώρων υπήρχαν επίπεδα CO₂ που ξεπερνούσαν τα 700 ppm. Παράλληλα, υψηλά επίπεδα υγρασίας καθιστούσαν μη άνετες τις συνθήκες σε πολλές αίθουσες, δείχνοντας ότι η IAQ επηρεάζεται από τον αριθμό των μαθητών, τον ρυθμό αερισμού και την εξωτερική εγγύτητα σε κεντρικούς δρόμους και κατασκευαστικές δραστηριότητες, με πιθανές επιπτώσεις για την υγεία και την άνεση των χρηστών χώρου. Αντίστοιχη μελέτη είχε πραγματοποιηθεί από τους Dorizas κ.α. (2015) σε 9 σχολικές μονάδες της Αθήνας με φυσικό αερισμό. Βρέθηκε ότι στη πλειονότητα των περιπτώσεων, τα επίπεδα του CO₂ ήταν πάνω από τα προτεινόμενα όρια με θετική συσχέτιση με τον αριθμό των μαθητών και αρνητική συσχέτιση με τον αριθμό των εναλλαγών αέρα. Επίσης, μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων διαφόρων μεγεθών, όπου και διαπιστώθηκε πως στην πλειονότητα των περιπτώσεων, οι συγκεντρώσεις των PM₁₀ υπερέβαιναν τα συνιστώμενα όρια κατά 10 φορές. Οι συγκεντρώσεις των PM_{2.5} υπερέβαιναν επίσης τα επιτρεπτά όρια σε πολλές περιπτώσεις. Αντίστοιχα και με τα επίπεδα του CO₂ και τα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων επηρεάζονταν από την παρουσία μαθητών και τις εναλλαγές αέρα. Μάλιστα, η αναλογία εσωτερικών/εξωτερικών συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων ήταν πολύ υψηλότερη της μονάδας, που υποδηλώνει ότι η ποιότητα του εσωτερικού αέρα αναφορικά με τα αιωρούμενα σωματίδια επηρεάζεται κατά βάση από εσωτερικές πηγές με τη χρήση κιμωλίας ή μαρκαδόρων για πίνακες να κρίνεται σημαντική.

Σε επίπεδο κατοικιών, η μελέτη των Nikolakou και Spyropoulos (2023) διερεύνησε την ποιότητα του αέρα σε μια κατοικία στο κέντρο της Αθήνας με χρήση χαμηλού κόστους αισθητήρων PurpleAir για τη συνεχή παρακολούθηση συγκεντρώσεων σωματιδίων, ιδίως των PM_{2.5}, σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον. Τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν την ανάγκη ολοκληρωμένων στρατηγικών αερισμού και χρήσης συστημάτων παρακολούθησης από τους ίδιους τους κατοίκους, καθώς και τη σημασία σύνδεσης των εσωτερικών μετρήσεων με δεδομένα εξωτερικής ρύπανσης, προκειμένου να επιτευχθούν αποτελεσματικά επίπεδα ποιότητας αέρα σε οικιακούς χώρους.

Μεγάλη μελέτη πραγματοποιήθηκε και από τους Santamouris κ.α. (2007), όπου έγιναν μετρήσεις των επιπέδων CO₂, CO, TVOC και PM_{2.5}, PM₁₀ σε συνδυασμό με τα επίπεδα θερμοκρασίας και υγρασίας σε 50 κατοικίες στην Αθήνα. Οι συγγραφείς επικεντρώθηκαν σε

νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος σε φτωχές περιοχές της Αθήνας. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τη συνεισφορά του φυσικού αερισμού στη μείωση των συγκεντρώσεων των ρύπων, ειδικά των αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ παρουσιάζεται η αναμενόμενη δυσμενής συσχέτιση αριθμού καπνίζόντων τσιγάρων και ποιότητας εσωτερικού αέρα.

2.12 Σύνοψη της Βιβλιογραφίας και Ερευνητικό Κενό

Όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση του παρόντος κεφαλαίου, είναι σαφές ότι η ποιότητα του αέρα εσωτερικών χώρων (IAQ) είναι ένα πολύ δυναμικό φαινόμενο και δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί απλή αντανάκλαση της εξωτερικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Αντίθετα, το εσωτερικό κλίμα των κατοικιών αποδεικνύεται ένα ανεξάρτητο μικροπεριβάλλον, όπου αλληλεπιδρούν οι εσωτερικές και εξωτερικές πηγές ρύπων, οι ιδιότητες του κελύφους του κτιρίου, τα μέτρα αερισμού και οι ανθρώπινες συμπεριφορικές συνήθειες (Vardoulakis κ.α., 2020; Tran κ.α., 2020). Η ακαδημαϊκή βιβλιογραφία συγκλίνει στο γεγονός ότι οι συγκεντρώσεις των ρύπων παρουσιάζουν μεγάλη χωρική και χρονική μεταβλητότητα, γεγονός που υποδεικνύει την υπεροχή των μακροχρόνιων και συνεχών μετρήσεων έναντι των επιφανειακών μετρήσεων (Farmer κ.α., 2019; Logue κ.α., 2012).

Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στις πηγές ρύπανσης που εμφανίζονται σε εσωτερικούς χώρους, όπως το μαγείρεμα, η θέρμανση, η χρήση προϊόντων καθαρισμού και οι εκπομπές των δομικών υλικών και των επίπλων, οι οποίες μπορεί να βρίσκονται στο ίδιο ή και σε υψηλότερο επίπεδο ρύπανσης με τις πηγές ρύπανσης σε εξωτερικούς χώρους (Long κ.α., 2001; Fernández-Agüera κ.α., 2019). Παράλληλα, η διεύθυνση των εξωτερικών ρύπων, ιδίως στις πόλεις, και εντός των κτιρίων υψηλής αεροδιαπερατότητας θεωρείται επίσης κρίσιμη, ενώ ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στα υπερλεπτά σωματίδια, καθώς μπορούν εύκολα να εισέλθουν στον εσωτερικό χώρο (Morawska κ.α., 2017; Jung & Mahmoud, 2023).

Ο εξαερισμός είναι αυτός που καθίσταται σημαντικός ελεγκτής του IAQ, αλλά η βιβλιογραφία δεν τον θεωρεί καν πανάκεια. Ο φυσικός αερισμός μπορεί να αποδίδει καλά στις ευνοϊκές εξωτερικές συνθήκες, αλλά μπορεί να επιδεινώσει την έκθεση σε περιόδους αυξημένης εξωτερικής ρύπανσης (Taylor κ.α., 2014). Ο μηχανικός αερισμός, ειδικά σε

συνδυασμό με ανάκτηση θερμότητας και κατάλληλο φιλτράρισμα, παρουσιάζεται, αντίθετα, ως λιγότερο ανεξέλεγκτη επιλογή, εφόσον σχεδιάζεται σωστά, συντηρείται και γίνεται αποδεκτός από τους ενοίκους (Milner κ.α., 2014; Ferdyn-Grygierek & Grygierek, 2024). Παράλληλα, η βιβλιογραφία επισημαίνει το σημαντικό δίλημμα μεταξύ ενεργειακής απόδοσης και IAQ, καθώς όσο υψηλότερη είναι η αεροστεγανότητα, τόσο χειρότερη μπορεί να είναι η βλάβη στην ποιότητα του εσωτερικού αέρα (Wallner κ.α., 2015; Bekö κ.α., 2020).

Σε επίπεδο πολιτικής και κανονιστικού πλαισίου, η προφανής ασυμφωνία είναι μεταξύ της διεθνούς κατευθυντήριας γραμμής (ΠΟΥ), των ευρωπαϊκών προτύπων και των εθνικών εφαρμογών, γεγονός που οδηγεί στην άνιση προστασία των πληθυσμών και στις προκλήσεις στην εφαρμογή των επιστημονικών συστάσεων στην πράξη (Arya κ.α., 2024; Szabados κ.α., 2021). Η βιβλιογραφία αναδεικνύει επίσης κενά στην εφαρμογή και τον έλεγχο των κατευθυντήριων οδηγιών για το IAQ και την ανεπαρκή εφαρμογή συστηματικών μετρήσεων σε κτίρια κατοικιών στην ελληνική πραγματικότητα (Pelliccioni κ.α., 2020; Kakoulli κ.α., 2022).

Παρόλο που η βιβλιογραφία είναι αρκετά εκτεταμένη σε μελέτες με διεθνή βάση, υπάρχει αυξανόμενο ερευνητικό κενό σχετικά με την απουσία εμπειρικών και μακροχρόνιων μετρήσεων IAQ σε πραγματικές κατοικίες, ιδιαίτερα στο μεσογειακό και ελληνικό αστικό περιβάλλον, όπου οι κλιματικές συνθήκες, η κατοίκηση και οι πρακτικές αερισμού δεν είναι παρόμοιες με αυτές που συναντώνται κυρίως στη διεθνή βιβλιογραφία. Επιπλέον, τα δεδομένα που αφορούν σε μετρήσεις ρύπων ταυτόχρονα με τις ιδιότητες του κτιρίου και τις παραμέτρους συμπεριφοράς των ενοίκων στην ίδια δομή ανάλυσης είναι ελάχιστα. Η παρούσα μελέτη θα τοποθετηθεί άμεσα σε αυτό το κενό και αποσκοπεί στην παροχή εμπειρικών δεδομένων στο πεδίο και στη συμβολή στην υπάρχουσα γνώση σχετικά με την IAQ σε οικιστικά περιβάλλοντα στο πλαίσιο πραγματικής κατοίκησης.

3. Μεθοδολογία

Η μελέτη περίπτωσης αφορά κατοικία στο δήμο Αθήνας. Αρχικά, θα περιγραφεί το διαμέρισμα και ο αριθμός των ενοίκων και οι συνήθειες δραστηριότητές τους. Θα παρουσιαστεί το μετρητικό όργανο που χρησιμοποιήθηκε, οι ρύποι που μετρήθηκαν, η διαδικασία που εφαρμόστηκε για τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων, και το γενικότερο πλαίσιο μέσα στο οποίο έλαβε χώρα η παρακάτω μελέτη περίπτωσης.

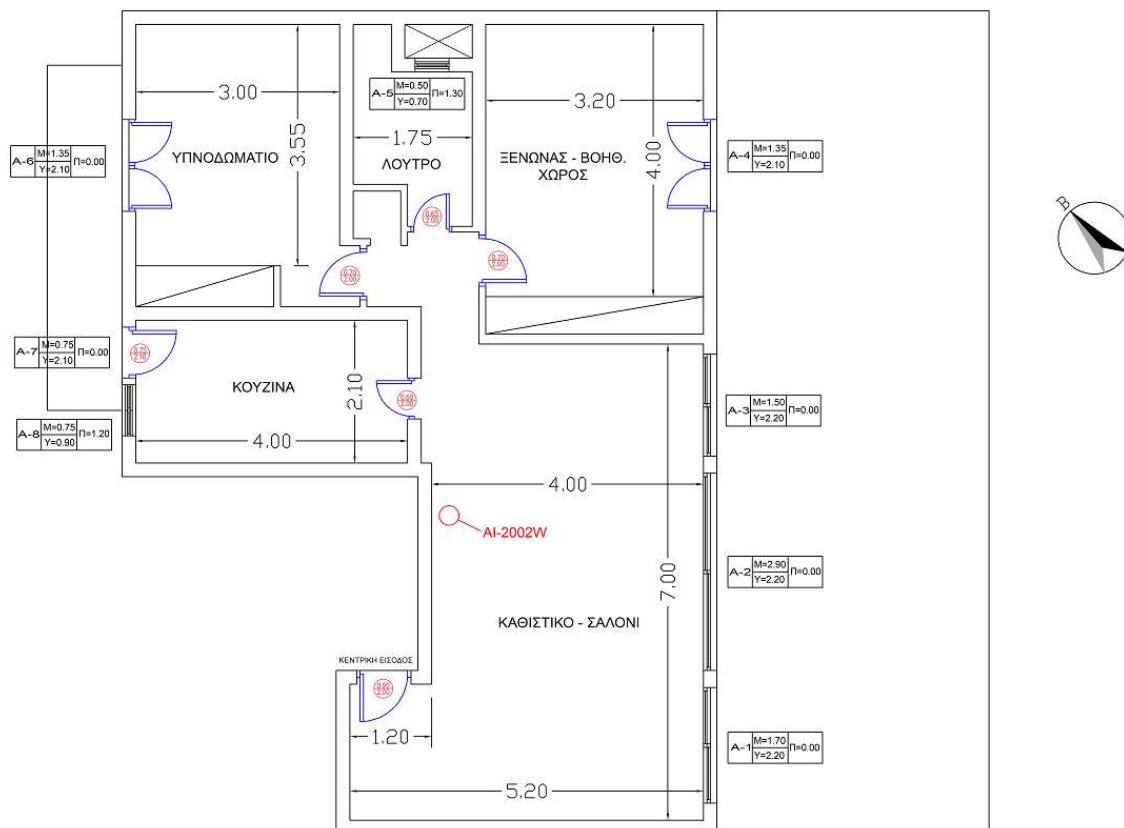
3.1 Υπό μελέτη χώρος και κάτοικοι

Η κατοικία όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις βρίσκεται στο δήμο Αθήνας, επί της λεωφόρου Μεσογείων, απέναντι από το νοσοκομείο «Σωτηρία». Βρίσκεται στον 4^ο (τελευταίο) όροφο πολυκατοικίας κατασκευής 1979. Έχει καθαρή επιφάνεια (χωρίς τοιχοποιία και ντουλάπες) 70,50 τ.μ. και αποτελείται από έναν μεγάλο χώρο ως καθιστικό-σαλόνι, χωριστό δωμάτιο κουζίνας, ένα υπνοδωμάτιο, έναν ξενώνα-βοηθητικό χώρο και ένα λουτρό. Στο σαλόνι υπάρχει μεγάλο κούφωμα που καταλαμβάνει σχεδόν το σύνολο του τοίχου με όψη τη λεωφόρο Μεσογείων (νοτιοανατολικός προσανατολισμός). Τα υπόλοιπα δωμάτια έχουν όλα από ένα κούφωμα συνηθισμένων διαστάσεων (**Εικόνα 2**).

Το διαμέρισμα δεν έχει αναβαθμιστεί ενεργειακά όσον αφορά την τοιχοποιία (θερμομόνωση, υγρομόνωση, αεροδιαπερατότητα) συνεπώς στους τοίχους και την ταράτσα θεωρούμε τυπικές έως καθόλου μονώσεις, χαρακτηριστικό των κατασκευών της εποχής. Τα παράθυρα είναι αλουμινίου χωρίς θερμοδιακοπή με διπλούς υαλοπίνακες και ενώ είναι νεότερα σε σχέση με την ηλικία του κτιρίου, παρόλα αυτά δεν είναι τελευταίας τεχνολογίας και στερούνται καλής ενεργειακής συμπεριφοράς. Όλα τα παράθυρα προστατεύονται τις ημέρες όπου επικρατεί έντονη ηλιοφάνεια με χρήση τέντας. Το παράθυρο του λουτρού είναι συνεχώς σκιασμένο. Η αεροστεγανότητα των κουφωμάτων, λόγω παλαιότητας μπορεί να θεωρηθεί χαμηλού βαθμού και όχι αντίστοιχη σύγχρονων κουφωμάτων, κάτι συνήθως ευνοϊκό όσον αφορά την ποιότητα του εσωτερικού αέρα αλλά δυσμενές όσον αφορά τις θερμικές απώλειες της κατοικίας.

Στην υπό μελέτη κατοικία διαμένουν δύο ένοικοι και ένα μικρό κατοικίδιο ζώο (σκύλος). Οι ακριβείς δραστηριότητες των ενοίκων δεν ήταν δυνατόν να καταγραφούν με ακρίβεια, αλλά

μπορούν να θεωρηθούν τυπικές δραστηριότητες ενοίκων, οι οποίες περιλαμβάνουν πρωινή εργασία, απογευματινή απουσία λόγω γυμναστικής, συχνές συναθροίσεις με άλλα άτομα κ.α. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι οι ένοικοι δεν μαγειρεύαν, συνεπώς δε θα δούμε την επίδραση που αυτό θα δύναται να είχε στους ρύπους εσωτερικού αέρα. Και οι δύο ένοικοι εργάζονται τις πρωινές έως τις απογευματινές ώρες τις καθημερινές, ενώ τυχαίνει και να εργάζονται ή να λείπουν κάποιες ώρες τα Σαββατοκύριακα. Υπάρχουν αρκετές απογευματινές ώρες μέσα στην εβδομάδα όπου θα λείπουν εκτός σπιτιού. Είναι σημαντικό επίσης να αναφερθεί ότι και οι δύο ένοικοι κάνουν μέτρια χρήση προϊόντων καπνού και συγκεκριμένα χρήση συσκευής θέρμανσης καπνού (IQOS) και όχι συνηθισμένου τσιγάρου. Επίσης, μέσα στο διάστημα όπου έγιναν οι μετρήσεις υπήρξαν αρκετές φορές όπου είχαμε συναθροίσεις αρκετών ατόμων με παράλληλη χρήση προϊόντων καπνού ή συσκευών θέρμανσης καπνού, όπου και θα φανεί παρακάτω - στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων - ότι παρατηρήθηκαν αυξημένες τιμές σε ρύπους, και ειδικά σε σωματίδια PM2.5 και PM10.



Εικόνα 2: Κάτοψη της υπό μελέτη κατοικίας. Με κόκκινο κύκλο σημειώνεται η θέση του ανιχνευτή ρύπων.

Στο διαμέρισμα δεν υπάρχει σύστημα μηχανικού αερισμού, συνεπώς αυτός διενεργείται ανοίγοντας τα κουφώματα (φυσικός αερισμός). Το παράθυρο του υπνοδωματίου και του λουτρού μένουν ανοικτά για περίπου 12 ώρες την ημέρα (από το πρωί που θα λείπουν για εργασία έως το απόγευμα) και του καθιστικού ανοίγει για περίπου μισή με μία ώρα την ημέρα, τα απογεύματα.

3.2 Κλιματικές συνθήκες περιοχής υπό μελέτη κατοικίας

Όπως προαναφέρθηκε, το υπό μελέτη διαμέρισμα βρίσκεται στον δήμο Αθηναίων. Για τους μήνες που έγιναν οι μετρήσεις έχουμε τα μετεωρολογικά δεδομένα που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1**. Βέβαια εδώ να αναφέρουμε ότι τα κλιματολογικά αυτά δεδομένα αναφέρονται στα έτη 1955-2010, για το λόγο αυτό παρουσιάζουμε και τα δεδομένα του **Πίνακα 2** καθώς γίνεται μεγάλη αναφορά τελευταία στην αλλαγή των κλιματολογικών δεδομένων λόγω υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Μήνας	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος
Μέση μηνιαία θερμοκρασία	8,8 °C	9,3 °C	11,3 °C
Μέση μηνιαία υγρασία	74,4 %	72,0 %	68,4 %
Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου	4,9 m/s	5,3 m/s	5,6 m/s
Επικρατούσα διεύθυνση ανέμου	BA	BA	BA

Πίνακας 1: Μέσες κλιματικές συνθήκες για την περιοχή της Αθήνας. Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία.

Μήνας	Ιανουάριος			Φεβρουάριος			Μάρτιος		
Έτος	2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025
Μέση μηνιαία θερμοκρασία	10,5 °C	9,7 °C	10,9 °C	8,3 °C	11,5 °C	8,2 °C	12,5 °C	13,2 °C	13,8 °C
Μέση μηνιαία υγρασία	77,9 %	74,1 %	81,1 %	70,8 %	74,4 %	72,8 %	67,9 %	70,6 %	62,8 %
Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (10m)	10,7 m/s	9,1 m/s	4,4 m/s	9,7 m/s	8,2 m/s	5,5 m/s	9,0 m/s	8 m/s	6,2 m/s
Επικρατούσα διεύθυνση ανέμου	B	B	BA	B	BA	BA	B	BA	BA

Πίνακας 2: Μέσες κλιματικές συνθήκες για την περιοχή της Αθήνας για τα έτη 2023, 2024 & 2025. Free Weather API (<https://open-meteo.com>).

3.3 Μετρητικό όργανο και συλλογή δεδομένων

3.3.1 Περιγραφή μετρητικού οργάνου και τεχνικών χαρακτηριστικών

Ο μετρητής/ανιχνευτής που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη περίπτωσης είναι ο Smart Wireless AI-2002W της Edimax και ανήκει στην οικογένεια προϊόντων Edigreen Home. Ενσωματώνει πολλαπλούς αισθητήρες μέσω των οποίων ανιχνεύει θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$), υγρασία (RH%), αιωρούμενα σωματίδια $\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) και PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), διοξείδιο του άνθρακα CO_2 (ppm), φορμαλδεΰδη HCHO (mg/m^3) και συνολικές οργανικές πτητικές ενώσεις TVOC (ppb). Η συσκευή έχει μικρές διαστάσεις όπως ένα κοινό router και μπορεί να τοποθετηθεί με ευκολία εντός μίας οικίας αρκεί να υπάρχει διαθέσιμη κοντά παροχή ρεύματος (**Εικόνα 3**).



Εικόνα 3: Μετρητής ρύπων εσωτερικού αέρα AI-2002W της Edimax

Ο ανιχνευτής κατά την εγκατάστασή του απαιτεί σύνδεση στο δίκτυο Wi-Fi της κατοικίας ούτως ώστε οι μετρήσεις να ανεβαίνουν μέσω διαδικτύου στο νέφος (cloud) της εταιρίας. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα της παρακολούθησης των δεδομένων μέσω της εφαρμογής EdiGreen Home η οποία είναι διαθέσιμη για android / iOS. Η παρακολούθηση των ρύπων καθώς και της θερμοκρασίας/υγρασίας μπορεί να γίνει είτε σε πραγματικό χρόνο είτε μέσω ιστορικού μετρήσεων, το οποίο είναι διαθέσιμο σε 4 επιλογές, μετρήσεις εντός 1 ώρας, 1 ημέρας, 1 εβδομάδας και 1 μήνα. Επίσης ο μετρητής διαθέτει ενδεικτικές λυχνίες LED, οι οποίες αλλάζουν χρώμα ανάλογα το επίπεδο των ρύπων. Τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας των αισθητήρων της συσκευής καθώς και η αξιολόγηση του επιπέδου των ρύπων μέσα στο λογισμικό παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3**.

Χαρακτηριστικά αισθητήρων AI-2002W & χαρακτηρισμός επιπέδων ρύπων στο λογισμικό						
Ρύπος	Μονάδα μέτρησης & ευαισθησία	Χαρακτηρισμός επιπέδου ρύπων και χρώμα λυχνίας				
		Excellent	Good	Mild Pollution	Moderately pollution	Severe Pollution
PM2.5	0 - 500 µg/m ³ , min. 0.3µm	0 - 34	35 - 74	75 - 114	115 - 149	≥ 150
PM10	0 - 500 µg/m ³ , min. 0.3µm	0 - 49	50 - 149	150 - 249	250 - 349	≥ 350
CO ²	400 - 2000 ppm	0 - 699	700 - 999	1000 - 1499	1500 - 1999	≥ 2000
HCHO	0 - 1 mg/m ³	0.0 - 0.07	0.08 - 0.09	0.1 - 0.79	0.8 - 4.99	≥ 5.0
Ρύπος	Μονάδα μέτρησης & ευαισθησία	Χαρακτηρισμός επιπέδου ρύπων και χρώμα λυχνίας				
		Excellent			Severe Pollution	
TVOC	0 - 1000 ppb	0 - 559			≥ 560	
Παράμετρος	Ευαισθησία					
Θερμοκρασία	0 - 65°C ± 1 °C					
Υγρασία	0 - 100%RH, ± 5% RH					

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά αισθητήρων του μετρητή AI-2002W της Edimax.

Ο μετρητής τοποθετήθηκε σε κεντρικό σημείο της κατοικίας στο χώρο του καθιστικού όπως σημειώνεται και στην κάτοψη της **Εικόνα 2**.

3.3.2 Διαδικασία συλλογής δεδομένων

Οι ρύποι που μετρήθηκαν και καταγράφηκαν είναι αυτοί του **Πίνακας 3** όπως και η θερμοκρασία και η υγρασία. Η καταχώρηση των μετρήσεων έπρεπε να γίνεται χειροκίνητα, ανοίγοντας κάθε φορά την εφαρμογή καθώς δεν επιτρέπει την εξαγωγή δεδομένων σε κάποια επεξεργάσιμη μορφή. Ο χρήστης ενώ έχει τη δυνατότητα παρακολούθησης στην εφαρμογή παρελθοντικών μετρήσεων, αυτές είναι σε μορφή διαγραμμάτων και δεν δίνεται η δυνατότητα λήψης και αποθήκευσης. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε οι μετρήσεις να καταγράφονται ανά 4 ώρες, κάτι που κρίθηκε αξιόπιστο καθώς φάνηκε πως μπορούν να αποτυπωθούν οι διακυμάνσεις και η αιχμές στις συγκεντρώσεις των ρύπων. Πολύ υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων που παρατηρήθηκαν σε συνδυασμό με μεμονωμένα γεγονότα, π.χ. λόγω συναθροίσεων, θα παρουσιαστούν παρακάτω και ας έλαβαν χώρα σε διαφορετικές από τις προεπιλεγμένες ώρες καταγραφής.

Στην παρούσα μελέτη έχουν καταγραφεί μετρήσεις από **20/01/2026 έως και 19/03/2026** (λόγω τεχνικού προβλήματος του λογισμικού που θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 5.3.1) και για τις ώρες: **00:00, 04:00, 08:00, 12:00, 16:00, 20:00**.

4. Αποτελέσματα

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Όπως θα φανεί και παρακάτω, η συγκέντρωση των ρύπων παρουσιάζει κάποιες συνηθισμένες κατανομές κάθε ημέρα, σχετική με την δραστηριότητα των χρηστών. Βασικοί παράγοντες που είχαν θετική επίδραση στα επίπεδα των συγκεντρώσεων των ρύπων είναι η απουσία τους από το σπίτι και το άνοιγμα δύο παραθύρων για αρκετές ώρες μέσα στην ημέρα ενώ σχεδόν όλες τις απογευματινές προς βράδυνες ώρες, παρουσιάζεται μία αυξητική τάση στους ρύπους που έχει να κάνει προφανώς με την επιστροφή των ενοίκων στην κατοικία αλλά και τη μέτρια χρήση προϊόντων καπνού.

4.1 Ολικές συγκεντρώσεις ρύπων

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές των συγκεντρώσεων των ρύπων για το σύνολο της περιόδου όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Οι μέσες τιμές, για όλους τους ρύπους είναι σε καλά επίπεδα και μέσα στα όρια όπου το λογισμικό χαρακτηρίζει την ποιότητα αέρα ως «Excellent» αλλά όσον αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια, όχι σύμφωνα με τα όρια που θέτει ο παγκόσμιος οργανισμός υγείας (Κεφάλαιο 5.1.2). Οι μέγιστες συγκεντρώσεις (αιχμές) παρουσιάζουν τιμές εκτός αποδεκτών ορίων και ειδικά όσον αφορά τα σωματίδια PM_{2.5} και PM₁₀, τιμές όπου στο λογισμικό χαρακτηρίζονται ως «Severe Pollution». Στον Error! Reference source not found. παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των υπόλοιπων ρύπων για τις μέγιστες συγκεντρώσεις των ρύπων που αναφέρονται στον τίτλο κάθε στήλης.

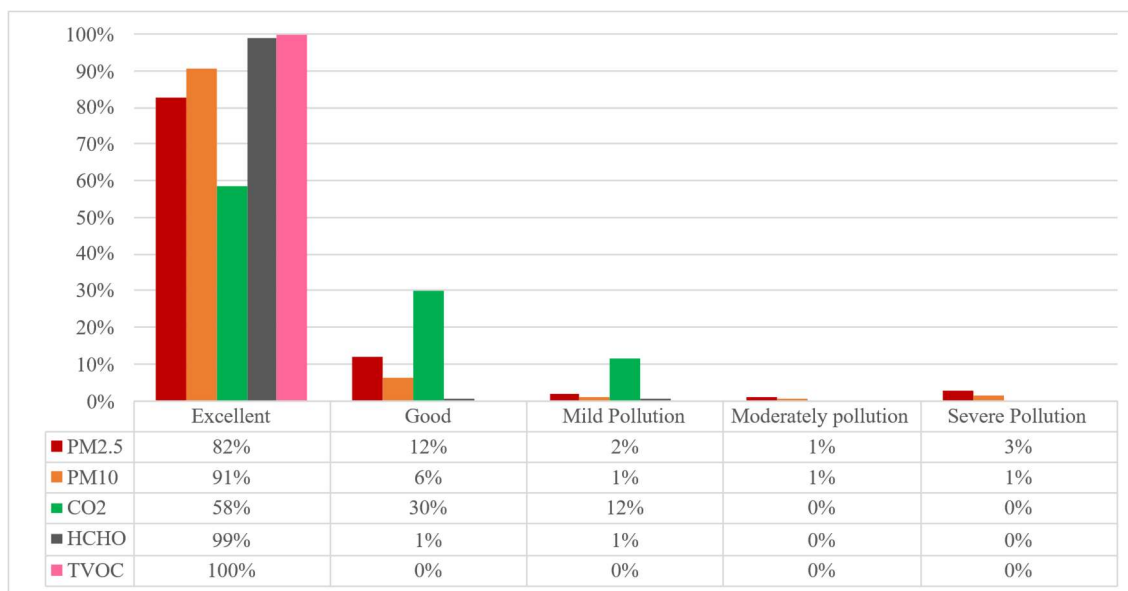
Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές ρύπων							
	Θερμοκρασία	Υγρασία	PM _{2.5}	PM ₁₀	CO ₂	HCHO	TVOC
Ελάχιστες τιμές	17,5	42	2	2	400	0	142
	20/1/26 12:00	26/2/26 16:00	17/2/26 20:00	20/2/26 20:00	20/1/26 12:00	20/1/26 4:00	24/1/26 12:00
Μέσες τιμές	21,95	61	33	35	661	0,005	306
Μέγιστες τιμές	26	74	468	496	1497	0,11	568
	26/2/26 16:00	13/2/26 0:00	15/2/26 0:00	15/2/26 0:00	18/2/26 20:00	22/1/26 20:00	18/2/26 20:00

Πίνακας 4: Ελάχιστες, μέσες και μέγιστες τιμές των ρύπων.

Τιμές υπόλοιπων ρύπων όταν παρουσιάζονται τα μέγιστα							
	Θερμοκρασία	Υγρασία	PM2.5	PM10	CO ₂	HCHO	TVOC
Θερμοκρασία (°C)		23	24	24	23,3	21,3	23,3
Υγρασία (%)	42		62	62	59	72	59
PM2.5 (μg/m ³)	6	267		468	432	16	432
PM10 (μg/m ³)	6	276	496		456	19	456
CO ₂ (ppm)	400	602	1272	1272		840	1497
HCHO (mg/m ³)	0	0,04	0,06	0,06	0,09		0,09
TVOC (ppb)	153	551	521	521	568	406	

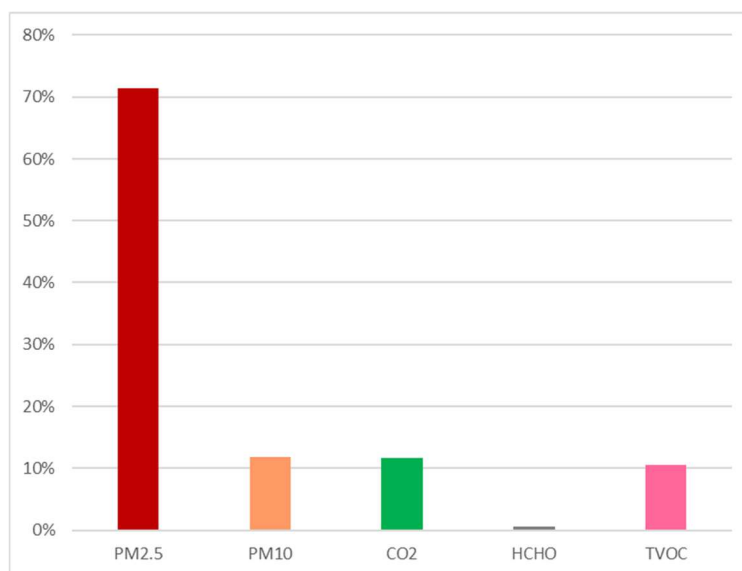
Πίνακας 5: Συγκεντρώσεις των υπόλοιπων ρύπων για τις μέγιστες συγκεντρώσεις των ρύπων που αναφέρονται στον τίτλο κάθε στήλης. Οι χρωματικές διαβαθμίσεις αναφέρονται σε κάθε γραμμή. Όσο πιο έντονη η διαβάθμιση, τόσο υψηλότερη η συγκέντρωση του ρύπου στον οριζόντιο άξονα.

Όπως φαίνεται και στη συνέχεια, υπάρχει συσχέτιση της διακύμανσης των συγκεντρώσεων των PM2.5 & PM10 και των CO₂ & TVOC. Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκε ότι το λογισμικό χαρακτηρίζει το επίπεδο των ρύπων με βάση προκαθορισμένα όρια που έχει θέσει ο κατασκευαστής (βλ. Error! Reference source not found.). Στο **Διάγραμμα 1** παρουσιάζεται για κάθε χαρακτηρισμό, το ποσοστό των συνολικών μετρήσεων κάθε ρύπου.



Διάγραμμα 1: Ποσοστό συνολικών μετρήσεων για χαρακτηρισμό του λογισμικού “Excellent”, “Good”, “Mild Pollution”, “Moderately Pollution” και “Sever Pollution”.

Το **Διάγραμμα 1** διαμορφώθηκε με βάση τους χαρακτηρισμούς (βλ. **Πίνακας 3**: Χαρακτηριστικά αισθητήρων του μετρητή AI-2002W της Edimax, που είναι ενσωματωμένοι στο λογισμικό. Οι χαρακτηρισμοί αυτοί, συμφωνούν με τα διεθνή θεσπισμένα/συμφωνημένα όρια όσον αφορά το CO₂ και το HCHO, είναι κοντά όσον αφορά τα PM₁₀ και TVOC ενώ υπάρχει μεγάλη απόκλιση για τα PM_{2.5}. (Ανάλυση σχετικά με τα διεθνή αυτά όρια ακολουθεί στο Κεφάλαιο 5). Για να υπάρχει συμφωνία με τα διεθνή όρια, διαμορφώθηκε το **Διάγραμμα 2**: Ποσοστό των συνολικών μετρήσεων κάθε ρύπου πάνω από το διεθνές αναγνωρισμένο όριο που του αντιστοιχεί, όπου παρουσιάζεται το ποσοστό των συνολικών μετρήσεων κάθε ρύπου όπου ξεπερνάει το όριο που του αντιστοιχεί.



Διάγραμμα 2: Ποσοστό των συνολικών μετρήσεων κάθε ρύπου πάνω από το διεθνές αναγνωρισμένο όριο που του αντιστοιχεί (βλ. Κεφάλαιο 5)

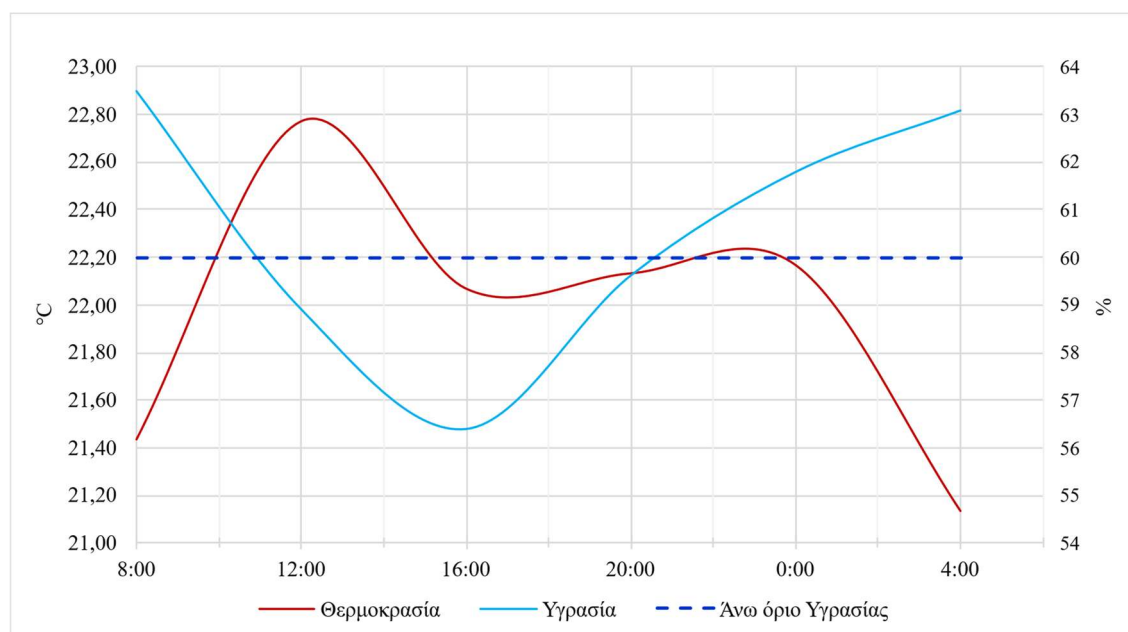
Από το **Διάγραμμα 1** συμπεραίνεται πως στο σύνολο των μετρήσεων, τα επίπεδα των ρύπων βρίσκονται μέσα σε καλά επίπεδα σύμφωνα πάντα με τον χαρακτηρισμό του λογισμικού, ενώ στην κατηγορία «Severe Pollution» παρατηρήθηκαν μετρήσεις μόνο για τα σωματίδια PM_{2.5} και PM₁₀. Σύμφωνα με το **Διάγραμμα 2**: Ποσοστό των συνολικών μετρήσεων κάθε ρύπου πάνω από το διεθνές αναγνωρισμένο όριο που του αντιστοιχεί τα συμπεράσματα διαφοροποιούνται. Η συγκέντρωση του PM_{2.5} φαίνεται να είναι εκτός ορίων σε περίπου 70% των μετρήσεων, το HCHO μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι σχεδόν πάντα εντός ορίων, ενώ για

τους υπόλοιπους ρύπους, οι συγκεντρώσεις τους ξεφεύγουν από τα όρια περίπου για 10% των μετρήσεων.

Οι αυξημένες τιμές των αιωρούμενων σωματιδίων, ιδίως του PM_{2.5}, όπως παρατηρήθηκε από τις μετρήσεις αλλά και τις αναφορές των ενοίκων, οφείλονται κατά κύριο λόγο στη χρήση προϊόντων καπνού, είτε μόνο των ενοίκων, είτε σε περιπτώσεις συναθροίσεων περισσότερων ατόμων, για αυτό όπως θα φανεί και στη συνέχεια οι αιχμές παρουσιάζονται βραδινές ώρες.

4.2 Μέση ωριαία κατανομή θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκεντρώσεων ρύπων

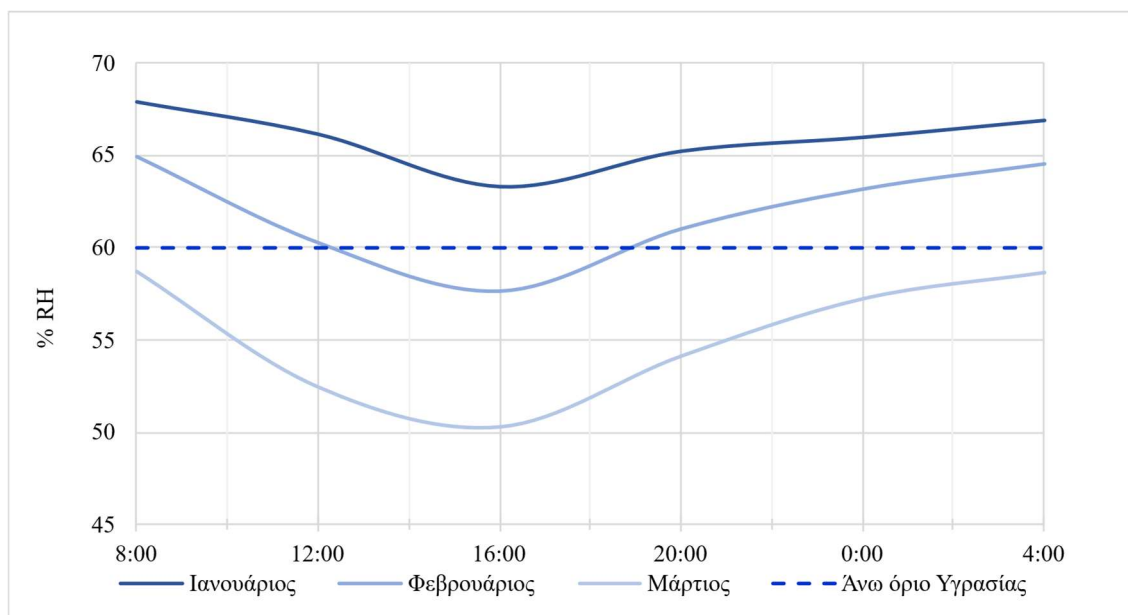
Στον Πίνακα 4, παρουσιάστηκαν οι συνολικές μέσες τιμές για το σύνολο των μετρήσεων. Στα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζεται η μέση ωριαία κατανομή της θερμοκρασίας, της υγρασίας και των συγκεντρώσεων των ρύπων, ούτως ώστε να φανεί η διακύμανση αυτών μέσα στην ημέρα. Παράλληλα στα διαγράμματα έχει επισημανθεί το όριο για κάθε παράμετρο/ρύπο που έχει θεσπιστεί/συμφωνηθεί από διεθνή πρότυπα ή οργανισμούς. Περισσότερη ανάλυση σχετικά με τα όρια αυτά, ακολουθεί στο κεφάλαιο 5.



Διάγραμμα 3: Μέσες ωριαίες τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας.

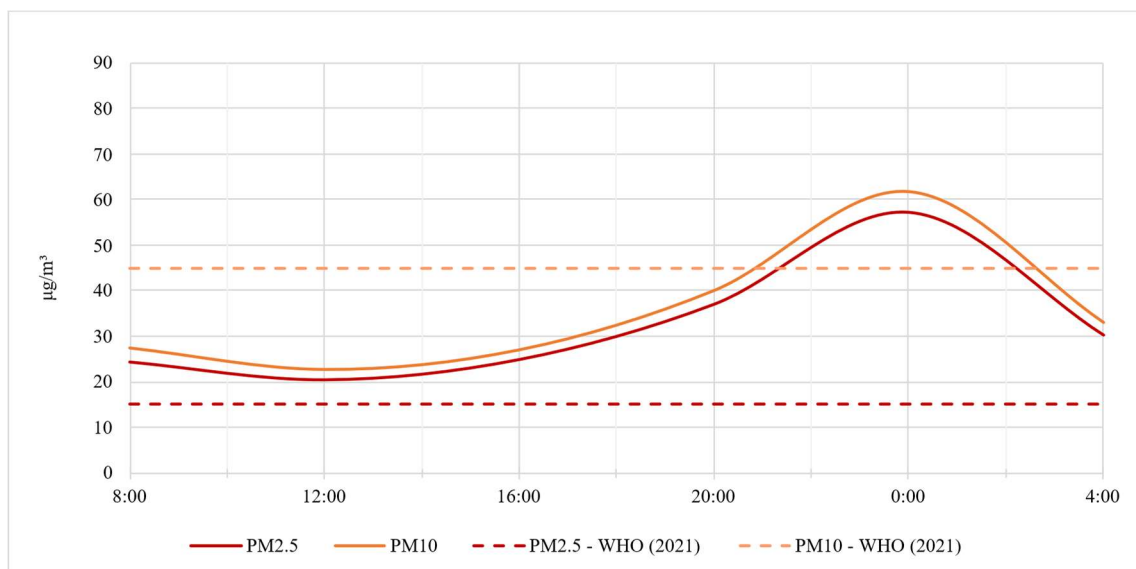
Οι συνθήκες άνεσης εντός ενός διαμερίσματος εξαρτώνται σε γενικές γραμμές από την θερμοκρασία και την υγρασία. Σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 16798-1 (2019), το αμερικάνικο ASHRAE 55 (2020) αλλά και τις τεχνικές οδηγίες του τεχνικού επιμελητηρίου Ελλάδας (TOTEE 20701-1, 2017) η θερμοκρασία πρέπει να κυμαίνεται περίπου μεταξύ 20-24°C. Σε συνδυασμό με τα δεδομένα του **Διάγραμμα 3**, συμπεραίνεται ότι οι μέσες τιμές θερμοκρασίας είναι σε καλά επίπεδα όσον αφορά την άνεση για συνθήκες περιόδου θέρμανσης. Βέβαια, σύμφωνα με τα πρότυπα, θα έπρεπε ιδανικά να υπολογισθεί η «ενεργός» θερμοκρασία, η οποία αναφέρεται στη θερμοκρασία του αέρα και τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας των επιφανειών. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη ανάλυση ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας μελέτης.

Τα ευρέως αποδεκτά όρια της υγρασίας για άνεση ατόμων εντός διαμερίσματος είναι μεταξύ 40-60% (ASHRAE 55, 2020), ενώ το χειμώνα κατά τη διάρκεια της θέρμανσης είναι προτιμότερο να μην ξεπερνούν το 50%, ειδικά σε παλαιότερα κτίρια, για αποφυγή δημιουργίας συμπυκνωμάτων πάνω στις επιφάνειες σε επικοινωνία με τον εξωτερικό αέρα (EN 16798-1, 2019). Σύμφωνα με τις παραπάνω πηγές, ποσοστά υψηλότερα από 60%, είναι πιθανό να δημιουργήσουν μούχλα και να ευνοήσουν την ανάπτυξη μικροοργανισμών, ενώ παράλληλα μειώνεται η αίσθηση θερμικής άνεσης.

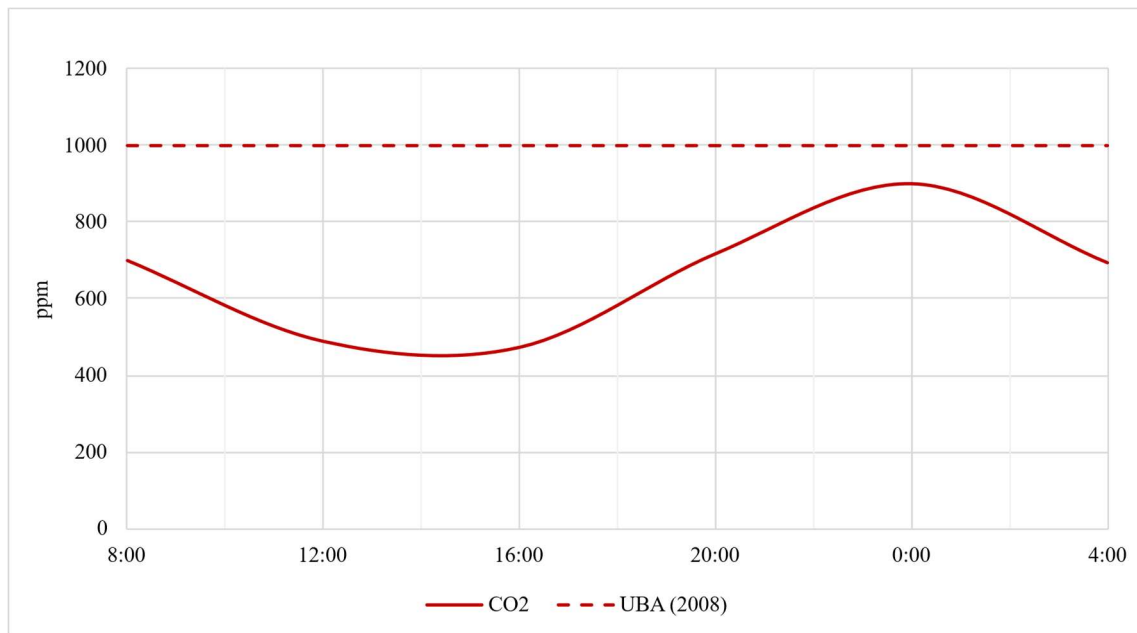


Διάγραμμα 4: Μέσες ωριαίες τιμές υγρασίας για τις μετρήσεις κάθε μήνα.

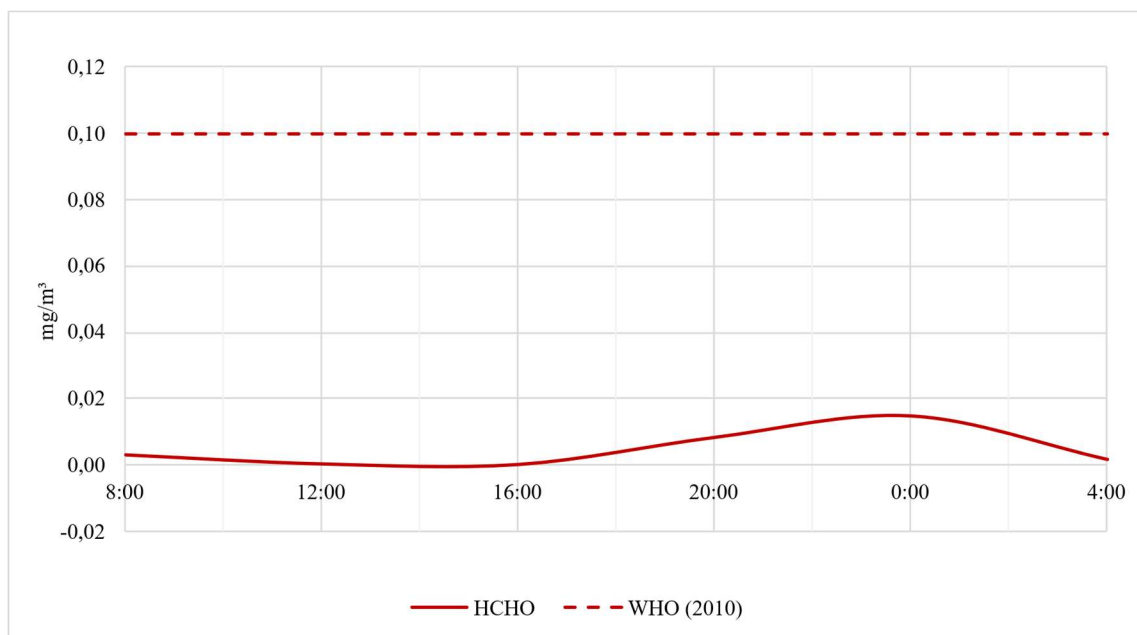
Παρατηρούμε στο **Διάγραμμα 3** ότι οι μέσες τιμές της υγρασίας ξεπερνούν το 60% για 12 ώρες την ημέρα. Αναλυτικότερα, από το **Διάγραμμα 4** φαίνεται ότι οι μέσες ωριαίες τιμές είναι σταθερά πάνω από το 60% για τις μετρήσεις του Ιανουαρίου, ενώ για το μήνα Φεβρουάριο και Μάρτιο είναι για 17 και 13 ώρες την ημέρα αντίστοιχα. Συνεπώς συμπεραίνεται ότι τα επίπεδα της υγρασίας είναι προβληματικά, κυρίως τους χειμερινούς - κρύους μήνες, ενώ θα είχε ενδιαφέρον να γίνουν αντίστοιχες μετρήσεις και για τους προηγούμενους (κρύους) μήνες. Ασφαλώς το πρόβλημα οφείλεται στην παλαιότητα του κτιρίου και στην έλλειψη κανόνων και πρακτικών μόνωσης και υγραμόνωσης την περίοδο που κατασκευάστηκε (1979). Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις των ρύπων.



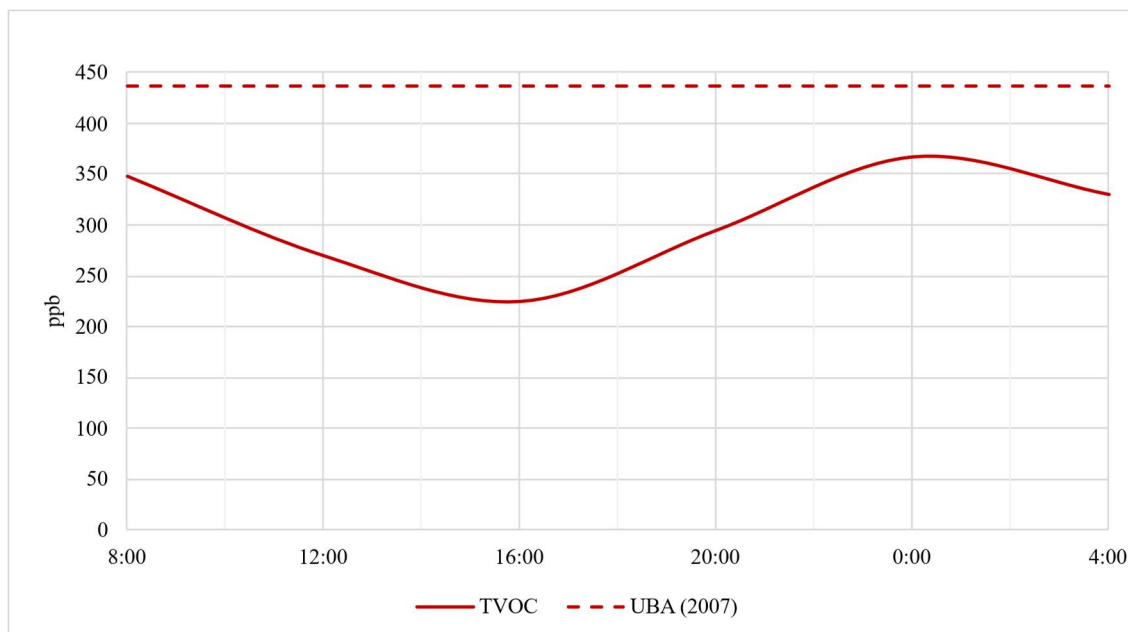
Διάγραμμα 5: Μέση ωριαία συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων PM2.5 & PM 10



Διάγραμμα 6: Μέση ωριαία συγκέντρωση CO₂



Διάγραμμα 7: Μέση ωριαία συγκέντρωση HCHO



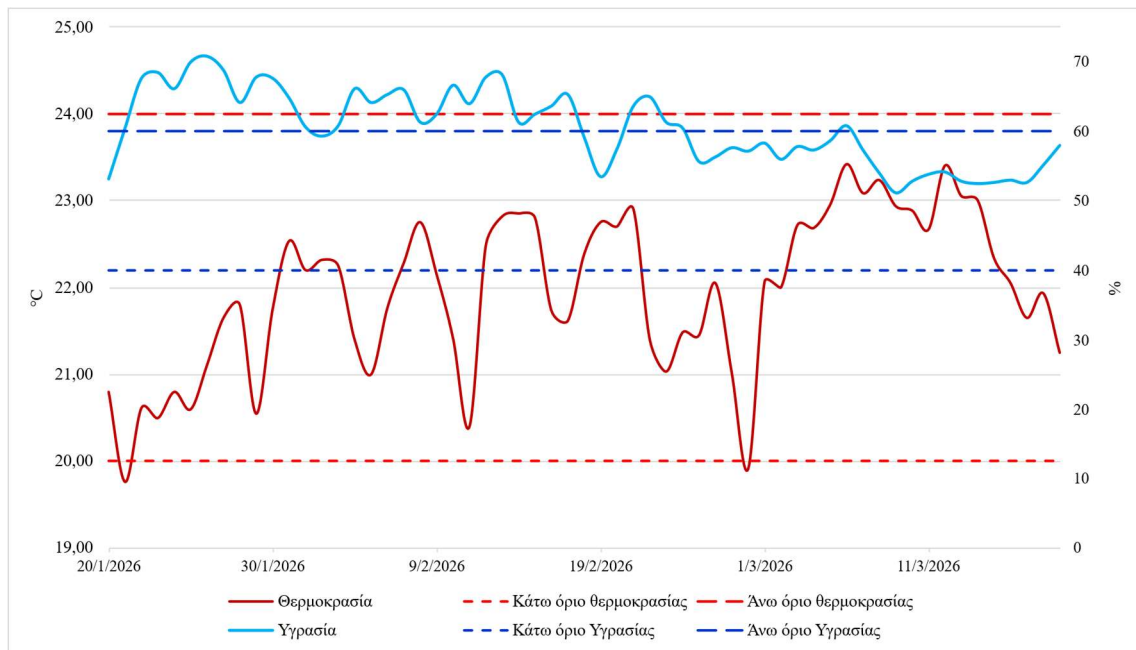
Διάγραμμα 8: Μέση ωριαία συγκέντρωση TVOC

Από τα παραπάνω διαγράμματα, διακρίνεται μία μικρή αύξηση στις συγκεντρώσεις των ρύπων τις πρωινές ώρες, αφού οι ένοικοι έχουν ξυπνήσει και ετοιμάζονται να φύγουν από το διαμέρισμα για εργασία. Στη συνέχεια μέσα στην ημέρα, τα επίπεδα των ρύπων ελαττώνονται σταδιακά, αφού όπως αναφέρθηκε, οι ένοικοι αφήνουν ανοικτά δύο παράθυρα για τον αερισμό της οικίας και τα κλείνουν το απόγευμα (γύρω στις 17:00 - 18:00), λίγο μετά αφού επιστρέψουν από την εργασία τους ή και λοιπές δραστηριότητες. Στη συνέχεια, αφού οι ένοικοι βρίσκονται συνήθως εντός της οικίας και παράλληλα γίνεται και μέτρια χρήση προϊόντων καπνού, οι ρύποι ανεβαίνουν σταδιακά περίπου μέχρι της 00:00, όπου και πηγαίνουν στο υπνοδωμάτιο για ύπνο. Οι συγκεντρώσεις του HCHO είναι σχεδόν πάντα κοντά στο μηδέν, συνεπώς έχει ελάχιστη σημασία.

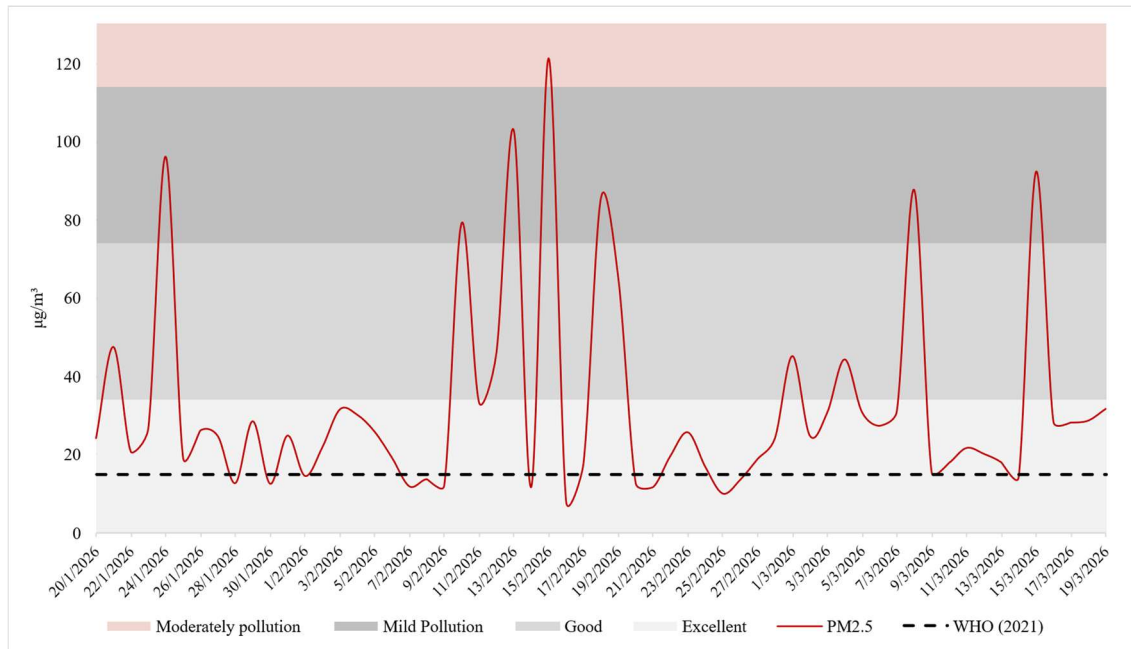
4.3 Μέση ημερήσια κατανομή θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκεντρώσεων ρύπων

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται η μέση ημερήσια θερμοκρασία, υγρασία και συγκέντρωση των αέριων ρύπων και θα σχολιαστούν οι αυξημένες συγκεντρώσεις που

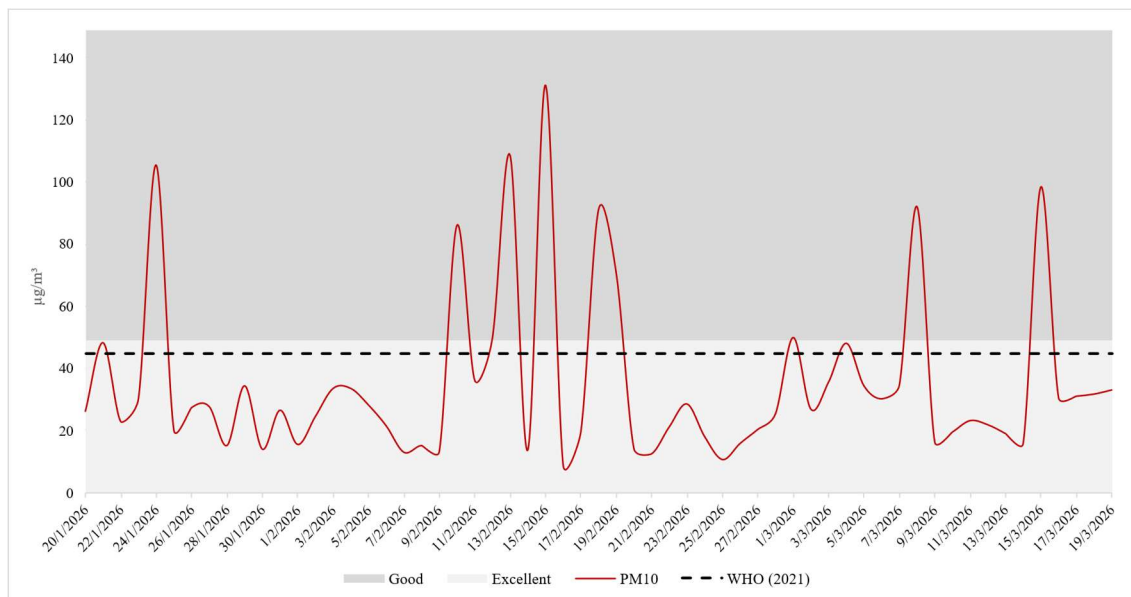
μετρήθηκαν για κάποιες συγκεκριμένες ημέρες και τις δραστηριότητες με τις οποίες αυτές συνδέονται. Στα διαγράμματα διακρίνονται τα όρια χαρακτηρισμού κάθε ρύπου με βάση το λογισμικό (Πίνακας 3) όπως και το όριο για κάθε παράμετρο/ρύπο που έχει θεσπιστεί/συμφωνηθεί από διεθνή πρότυπα ή οργανισμούς (Κεφάλαιο 5).



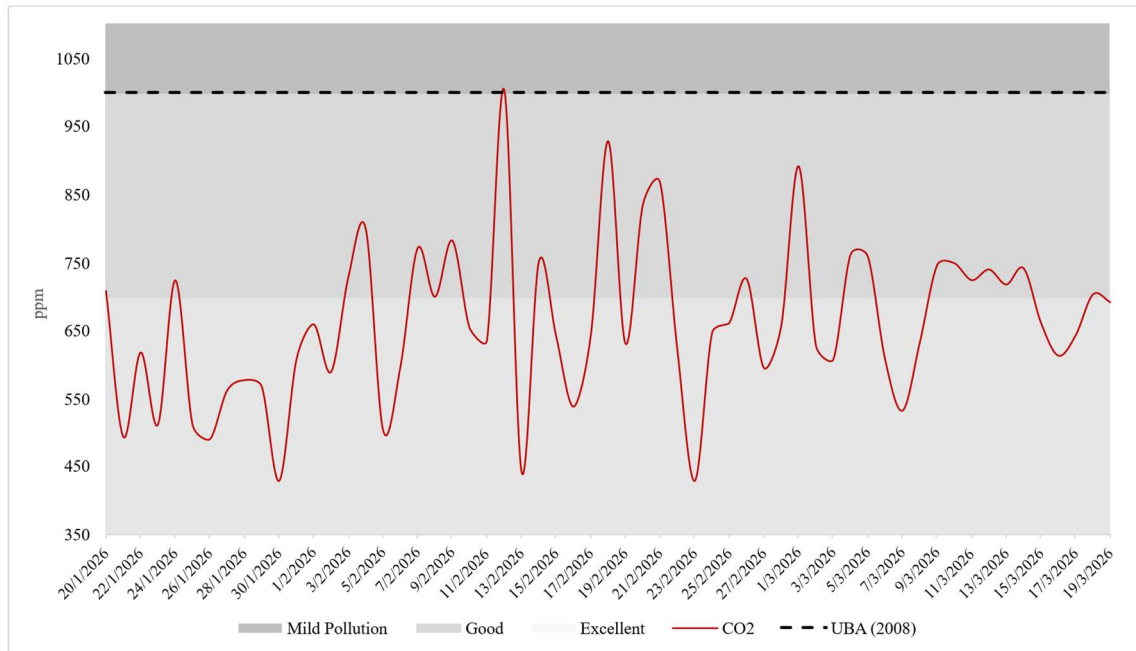
Διάγραμμα 9: Μέσες ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας.



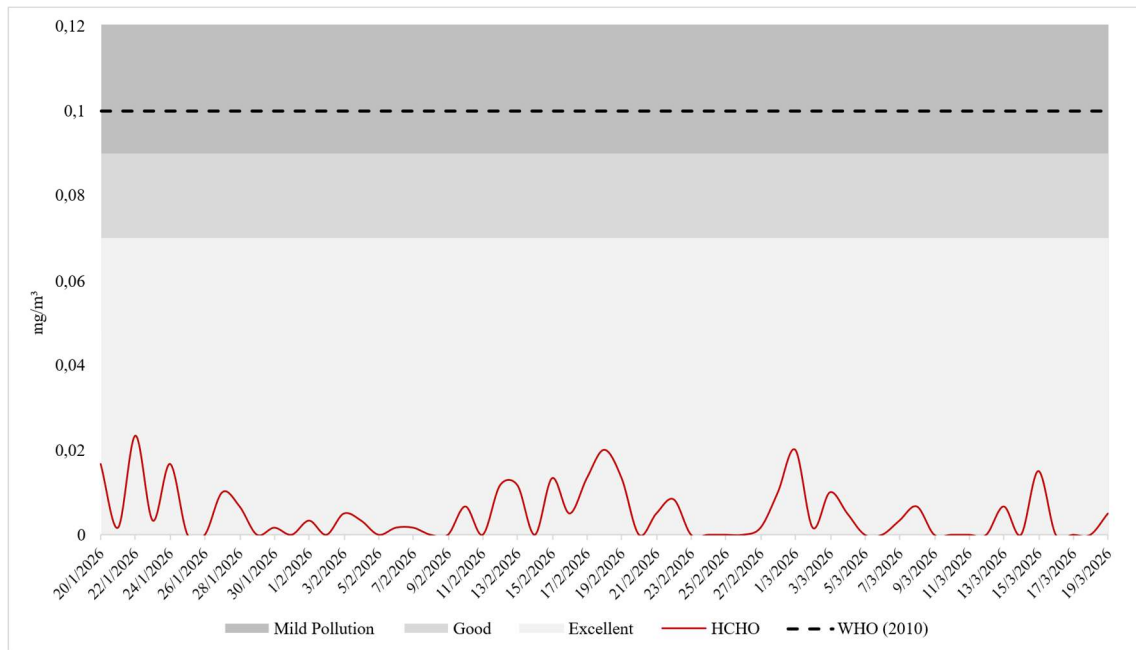
Διάγραμμα 10: Μέση ημερήσια συγκέντρωση PM2.5.



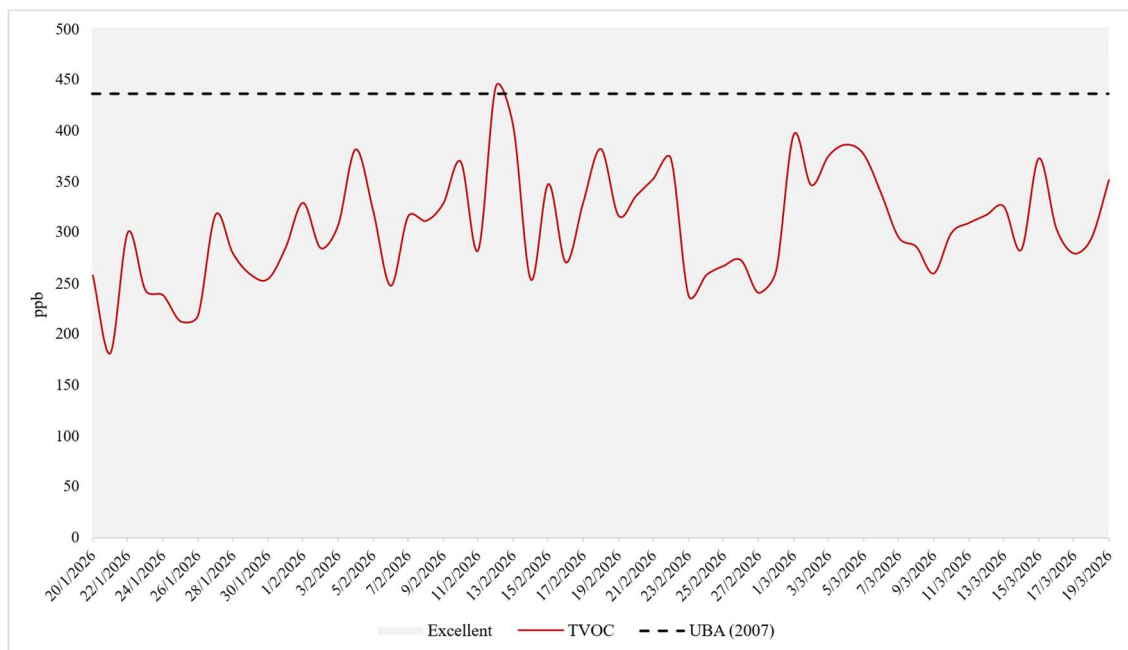
Διάγραμμα 11: Μέση ημερήσια συγκέντρωση PM10.



Διάγραμμα 12: Μέση ημερήσια συγκέντρωση CO₂.



Διάγραμμα 13: Μέση ημερήσια συγκέντρωση HCHO.



Διάγραμμα 14: Μέση ημερήσια συγκέντρωση TVOC.

Στα παραπάνω διαγράμματα των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων, παρατηρούνται αρκετές έντονες αιχμές για τα αιωρούμενα σωματίδια. Συγκεκριμένα για τις ημερομηνίες 24/01, 12 & 13/02, 15/02, 18/02 & 19/02, 08/03 και 15/03 παρατηρούνται συγκεντρώσεις που φτάνουν ή και ξεπερνούν το τριπλάσιο της συνολικής μέσης τιμής. Για να αιτιολογηθούν αυτές οι συγκεντρώσεις, θα χρειαστεί να συνδεθούν με τις δραστηριότητες των ενοίκων αυτές τις ημέρες:

- 24/01, 18/02-19/02, 08/03 & 15/03 υπήρχαν καλεσμένοι στο σπίτι τις απογευματινές ώρες όπου αρκετοί από αυτούς (καθώς και οι ένοικοι) έκανα χρήση προϊόντων καπνού.
- 12/02 ήταν η λεγόμενη «τσικνοπέμπτη», όπου είναι παράδοση στην Ελλάδα να χρησιμοποιούνται ψησταριές με κάρβουνο όπου ψήνονται επί το πλείστον προϊόντα ζωικής προέλευσης. Η επίδραση της συγκεκριμένης δραστηριότητας στα επίπεδα των ρύπων, άρχισε αργότερα μέσα στην ημέρα, μετά της 18:00 - 20:00 και συνεχίστηκε μέχρι τις πρώτες πρωινές ώρες στις 13/03, για αυτό το λόγο εμφανίζονται αυξημένες συγκεντρώσεις και για την επόμενη ημέρα. Στην οικία υπήρχαν καλεσμένοι, συνεπώς υπήρχε συνάθροιση αλλά κυρίως σε εξωτερικό χώρο, ενώ οι ένοικοι σχολίασαν ότι οι ίδιοι δεν έκαναν χρήση ψησταριάς με κάρβουνο αλλά με αέριο και ότι η έντονη επίδραση στα επίπεδα των ρύπων ήταν από γειτονικές πηγές.

- 15/02 ήταν ημέρα γενεθλίων ενός από τους ενοίκους όπου υπήρξε μεγάλη συγκέντρωση ατόμων (30-40 άτομα) και έντονη χρήση προϊόντων καπνού. Αν και υπήρχαν ανοιχτά παράθυρα, αυτή την ημέρα παρατηρούμε από τις υψηλότερες καταγεγραμμένες συγκεντρώσεις ρύπων, κάτι αναμενόμενο μιας και ο όγκος του διαμερίσματος είναι πολύ μικρός και οι δυνατότητες αερισμού πολύ περιορισμένες για τόσο μεγάλη συγκέντρωση ατόμων.

Στον **Πίνακα 6** παρουσιάζονται οι ωριαίες τιμές για κάποιες από τις παραπάνω ημερομηνίες (τις πιο επιβαρυνμένες ημέρες). Με μωβ χρώμα, έχουν σκιαστεί τα κελιά που περιέχουν πολύ υψηλές τιμές ρύπων και χαρακτηρίζονται από το λογισμικό ως “Severe pollution” (σοβαρή ρύπανση), με κόκκινο χρώμα οι τιμές που χαρακτηρίζονται ως “Moderately pollution” (μέτρια ρύπανση), με πορτοκαλί χρώμα οι τιμές που χαρακτηρίζονται ως “Mild pollution” (ήπια ρύπανση) ενώ χωρίς κάποιο χρώμα είναι οι τιμές που ανήκουν σε αποδεκτά επίπεδα ρύπανσης σύμφωνα με τον χαρακτηρισμό του λογισμικού.

Με πράσινη γραμματοσειρά στον **Πίνακα 6**, είναι οι συγκεντρώσεις των ρύπων όπου είναι εντός των διεθνώς θεσπισμένων ορίων (βλ. κεφάλαιο 5.1). Σύμφωνα με αυτά τα όρια, τα αιωρούμενα σωματίδια και ειδικά τα PM_{2.5} είναι σε μεγάλο βαθμό εκτός ορίων, το CO₂ ανεβαίνει λίγο εκτός ορίων για μερικές ημέρες, οι HCHO είναι πάντα εντός ορίων, ενώ οι TVOC είναι και αυτοί ελαφρά πάνω από το όριο κάποιες ημέρες (αν και τα όρια όσον αφορά τα TVOC και όπως αναλύονται στο Κεφάλαιο 5.1, δεν έχουν αυστηρό πλαίσιο).

Συμπεραίνεται και σε αυτό το σημείο λοιπόν, ότι το κύριο πρόβλημα όταν υπάρχει επιβαρυνμένος από ρύπους εσωτερικός αέρας, είναι τα αιωρούμενα σωματίδια. Για τις πολύ επιβαρυνμένες ημέρες, παρατηρούνται τιμές που υπερβαίνουν κατά πολύ τα αποδεκτά όρια και τα οποία διατηρούνται για αρκετές ώρες, όπως για παράδειγμα την ημέρα της «Τσικνοπέμπτης», όπου καταγράφονται 170 μg/m³ PM_{2.5} στις 20:00, αυξάνονται έως τα 267 μg/m³ στις 00:00 και οι υψηλές συγκεντρώσεις διατηρούνται περίπου μέχρι της 08:00 το επόμενο πρωί. Για τις περιπτώσεις όπου υπήρχαν καλεσμένοι στην οικία χωρίς να είναι κάποια ιδιαίτερη ημέρα (24/01, 18/02-19/02, 08/03 & 15/03) ο αισθητήρας κατέγραφε σχετικά αυξημένες συγκεντρώσεις PM_{2.5}, PM₁₀ & CO₂ για περίπου 3 – 3,5 ώρες, στη συνέχεια οι καλεσμένοι αποχωρούσαν και με κατάλληλο αερισμό της οικίας οι συγκεντρώσεις έπεφταν. Οι αιχμές των προαναφερθέντων ρύπων μπορούν να διακριθούν καλύτερα και στο **Κεφάλαιο 4.5** όπου παρουσιάζονται οι μέγιστες ημερήσιες συγκεντρώσεις για κάθε ρύπο.

Ημερομηνία & ώρα	Θερμοκρασία	Υγρασία	PM2.5	PM10	CO ₂	HCHO	TVOC
24/1/26 0:00	21,6	73	445	477	1266	0,07	435
12/2/26 20:00	24	68	170	178	793	0,04	484
13/2/26 0:00	23	74	267	276	602	0,04	551
13/2/26 4:00	21,9	73	172	180	401	0,02	482
13/2/26 8:00	23	69	89	92	430	0	415
15/2/26 0:00	24	62	468	496	1272	0,06	521
15/2/26 4:00	22,8	61	117	124	622	0,02	391
18/2/26 20:00	23,3	59	432	456	1497	0,09	568
19/2/26 0:00	23,2	59	216	228	1064	0,04	470
19/2/26 4:00	21,2	61	108	114	665	0	382

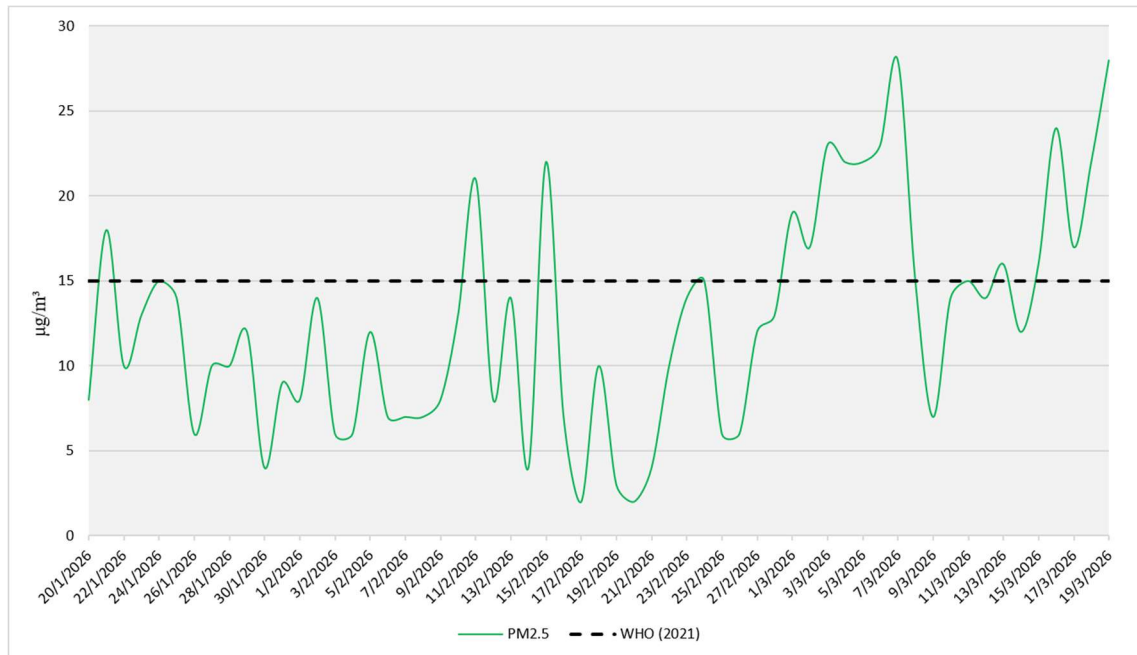
Πίνακας 6: Επίπεδα των ρύπων για τις πιο επιβαρυνμένες ημέρες. Με μωβ ο χαρακτηρισμός «Severe pollution», με κόκκινο «Moderately pollution» και με πορτοκαλί «Mild pollution».

Γενικότερα, στην πλειονότητα των περιπτώσεων όταν παρατηρούνταν υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων, αυτές δεν διαρκούσαν πάνω από 2 – 2,5 ώρες, εκτός από τις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα HCHO ήταν σχεδόν πάντα εντός αποδεκτών ορίων, όπως και τα TVOC.

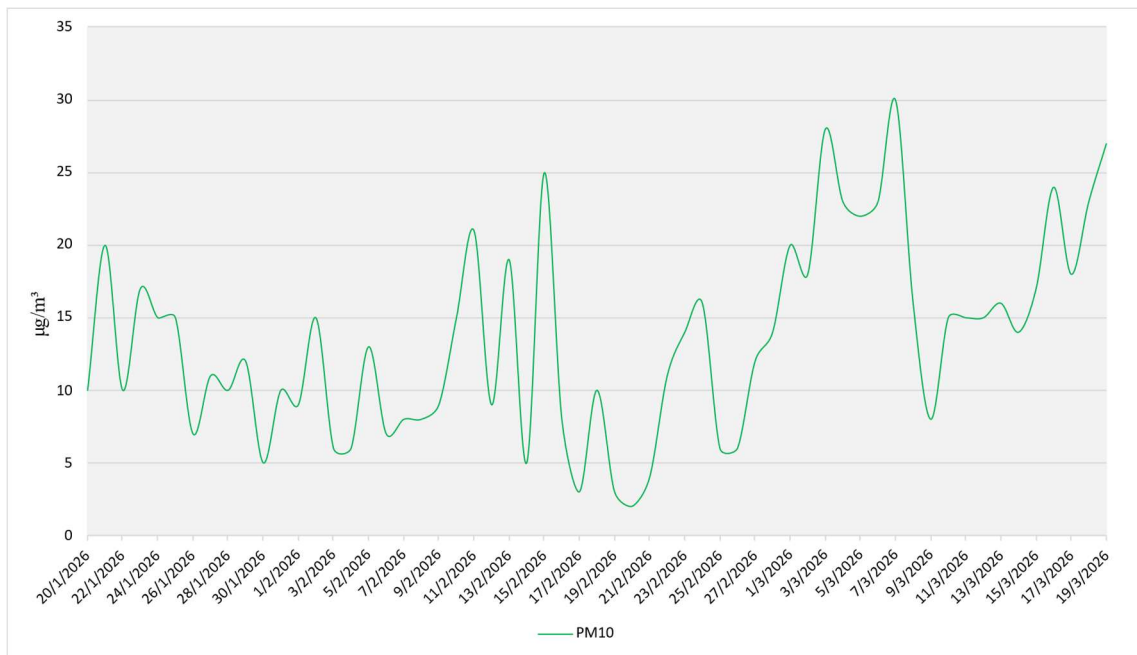
Από το **Διάγραμμα 10** και **Διάγραμμα 11** διακρίνεται μία σαφής συσχέτιση της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων PM2.5 και PM10. Για τους υπόλοιπους ρύπους είναι δύσκολο να εξαχθεί ένας ασφαλές συμπέρασμα μόνο από τα παραπάνω διαγράμματα. Για αυτό το λόγο, ακολουθούν στο **Κεφ. 4.6** οι κανονικοποιημένες ωριαίες κατανομές των μέσων συγκεντρώσεων των ρύπων, για σύγκρισή τους.

4.4 Κατανομή ελάχιστων ημερήσιων συγκεντρώσεων ρύπων

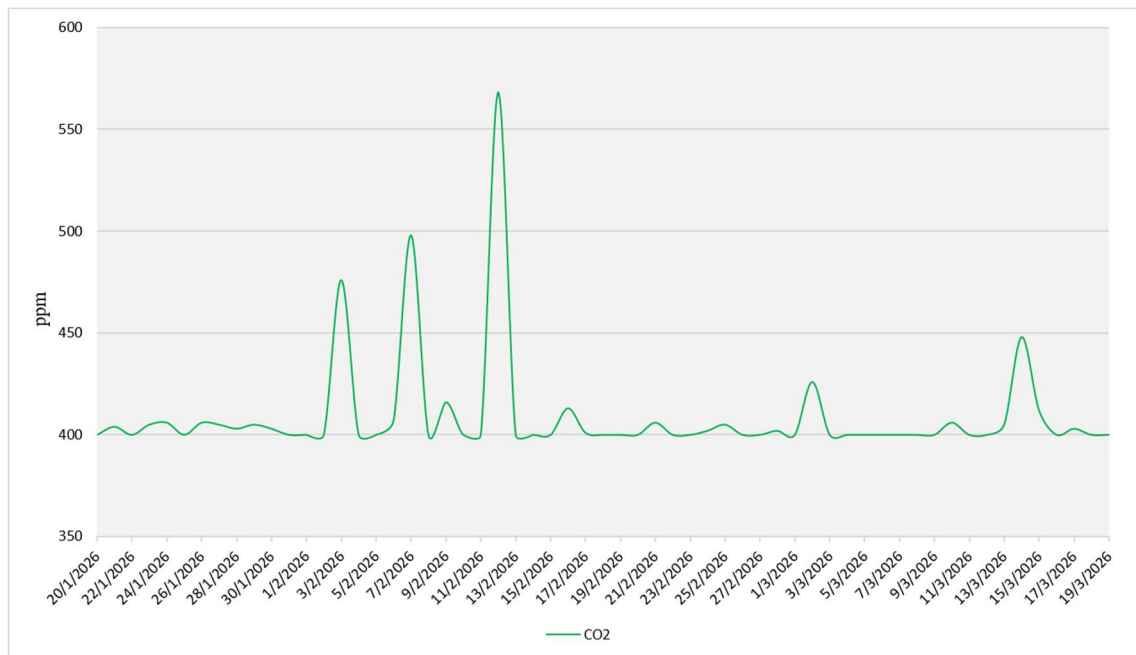
Παρακάτω θα παρουσιαστούν σε διαγράμματα οι ελάχιστες ημερήσιες τιμές που καταγράφηκαν για κάθε ρύπο, ώστε να διαπιστωθεί αν αυτά τα ελάχιστα διατηρούνται σε χαμηλές, αποδεκτές τιμές.



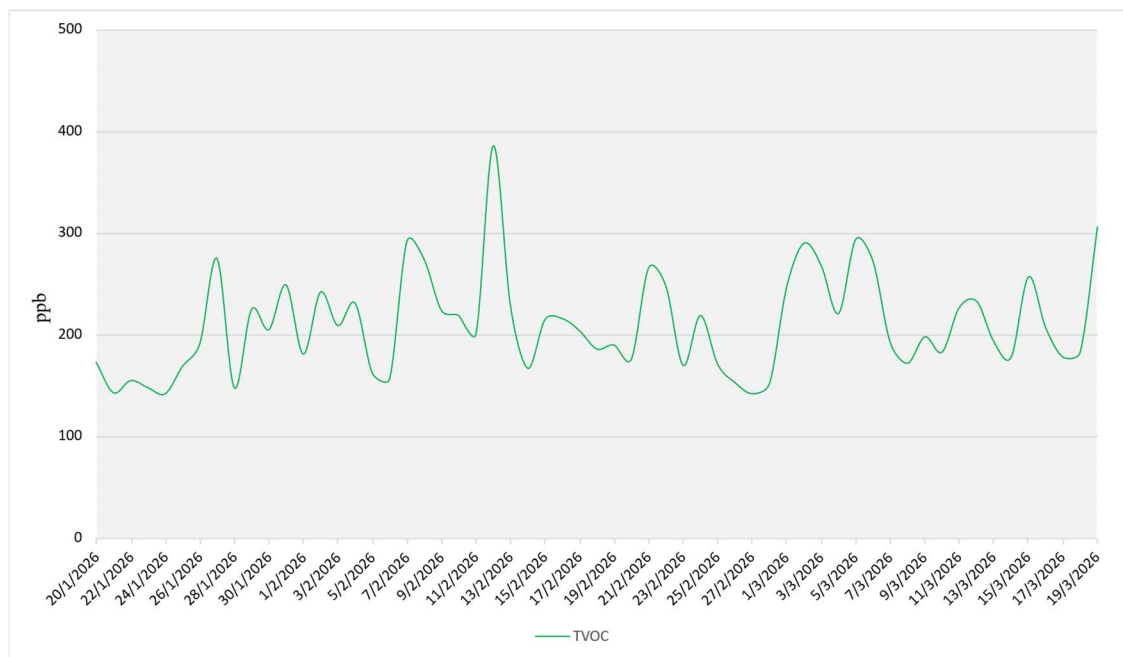
Διάγραμμα 15: Ελάχιστη ημερήσια συγκέντρωση PM2.5.



Διάγραμμα 16: Ελάχιστη ημερήσια συγκέντρωση PM10.



Διάγραμμα 17: Ελάχιστη ημερήσια συγκέντρωση CO₂.



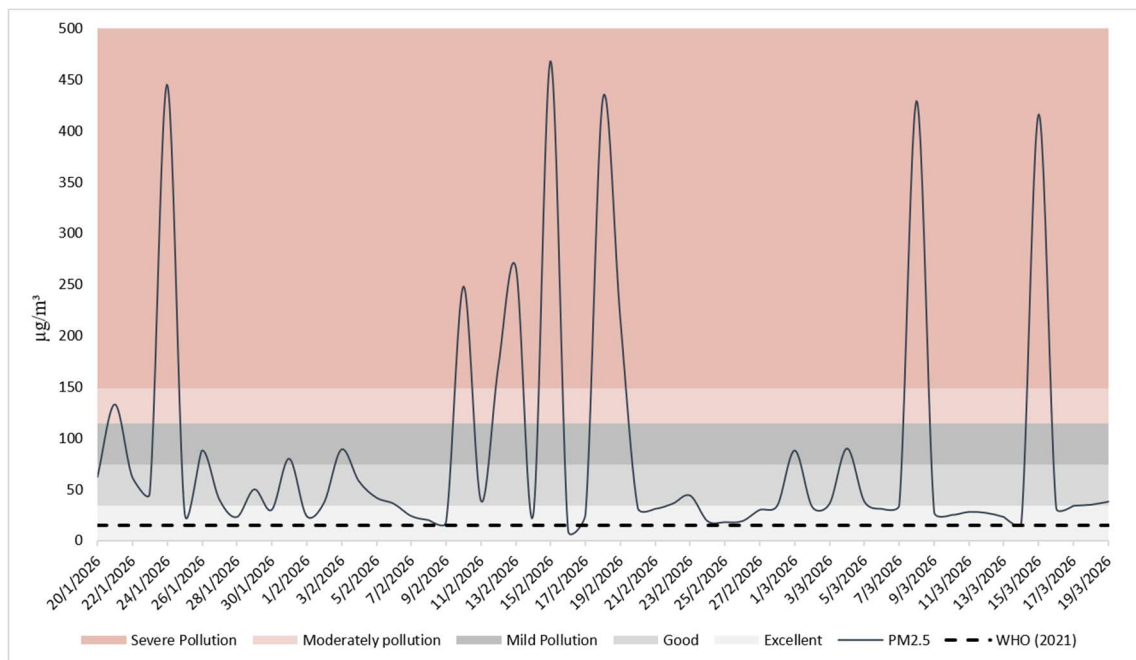
Διάγραμμα 18: Ελάχιστη ημερήσια συγκέντρωση TVOC.

Η ελάχιστη ημερήσια συγκέντρωση της HCHO δεν παρουσιάστηκε καθώς είναι κάθε μέρα μηδενική. Από τα διαγράμματα, κρίνεται ότι οι ελάχιστες ημερήσιες συγκεντρώσεις των ρύπων είναι σε αποδεκτά επίπεδα, εκτός για την περίπτωση των PM_{2.5}, όπου ακόμα και όταν τα δεδομένα αφορούν σε ελάχιστες τιμές ημέρας, παρατηρούνται συχνές υπερβάσεις πάνω

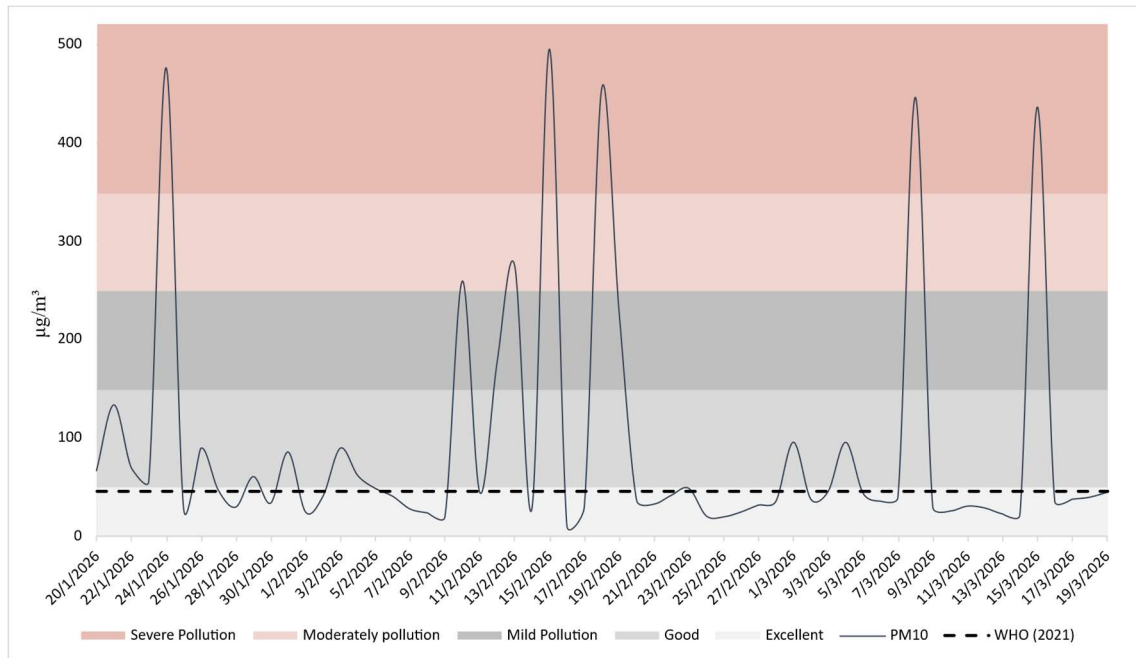
από το (24ώρο) όριο των $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ που ορίζει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO, 2021). Για το λόγο αυτό, μόνο σε αυτό το διάγραμμα έχει αποτυπωθεί το θεσπισμένο όριο συγκέντρωσης.

4.5 Κατανομή μέγιστων ημερήσιων συγκεντρώσεων ρύπων

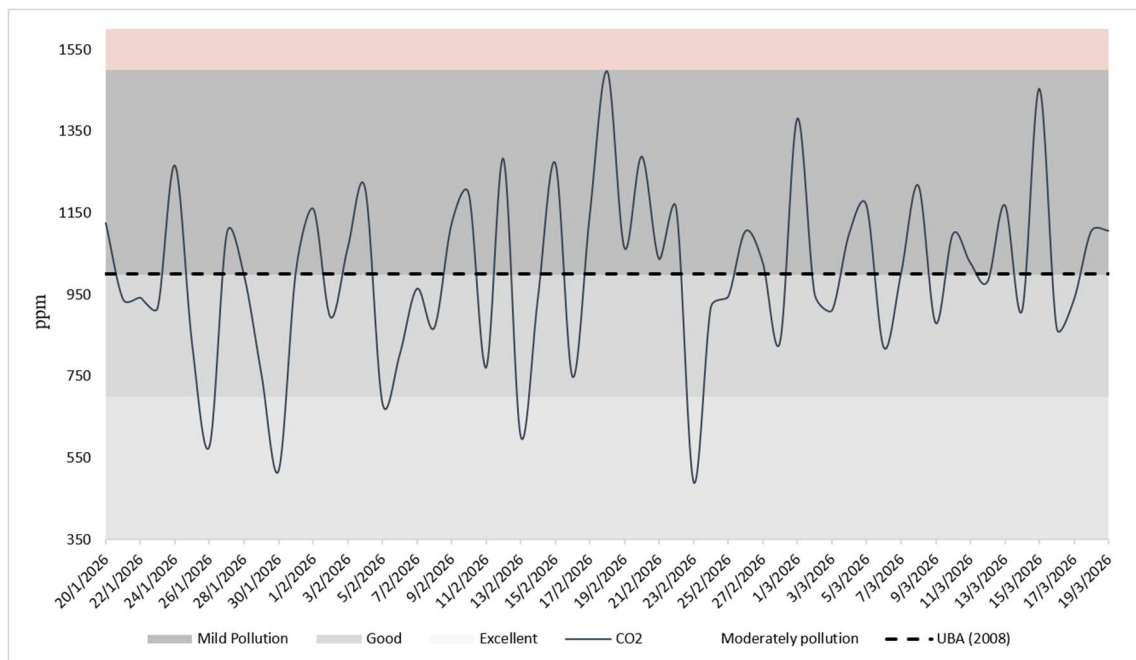
Αν και οι μέγιστες συγκεντρώσεις των ρύπων αφορούν αιχμές συνήθως μικρής διάρκειας, έχει αξία να παρουσιασθούν καθώς όπως θα αναφερθεί και σε επόμενο κεφάλαιο, ακόμα και σύντομες υπερβάσεις των επιτρεπτών ορίων για παράδειγμα στα αιωρούμενα σωματίδια, έχουν αρνητικές επιδράσεις στην υγεία (βλ. Κεφ. 5.1.2).



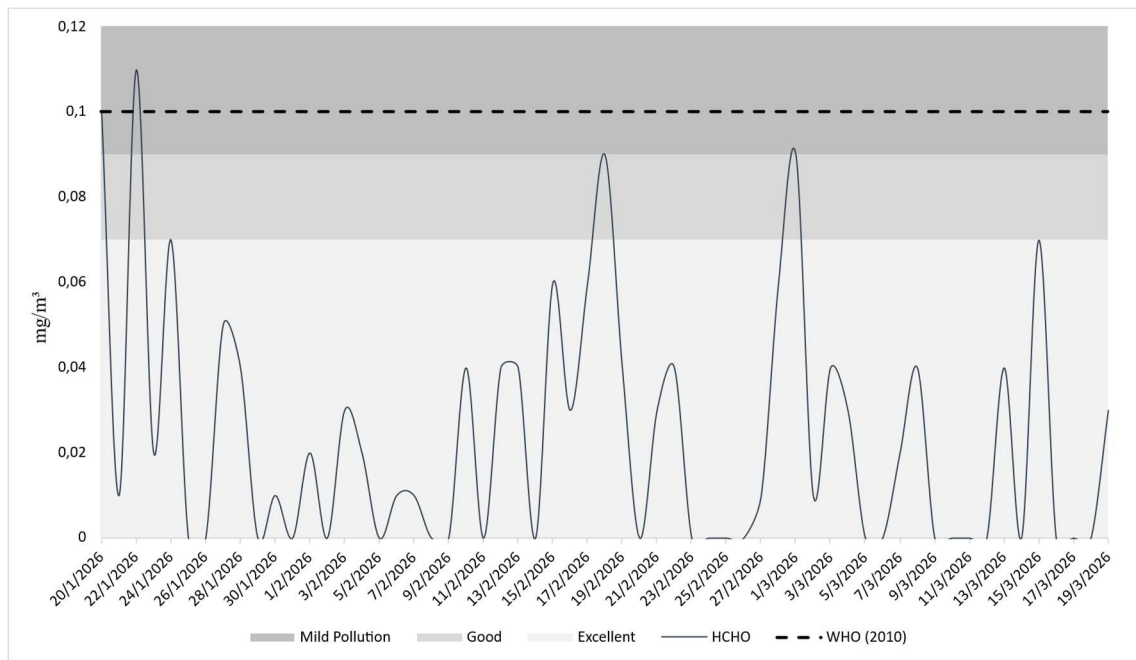
Διάγραμμα 19: Μέγιστη ημερήσια συγκέντρωση PM2.5



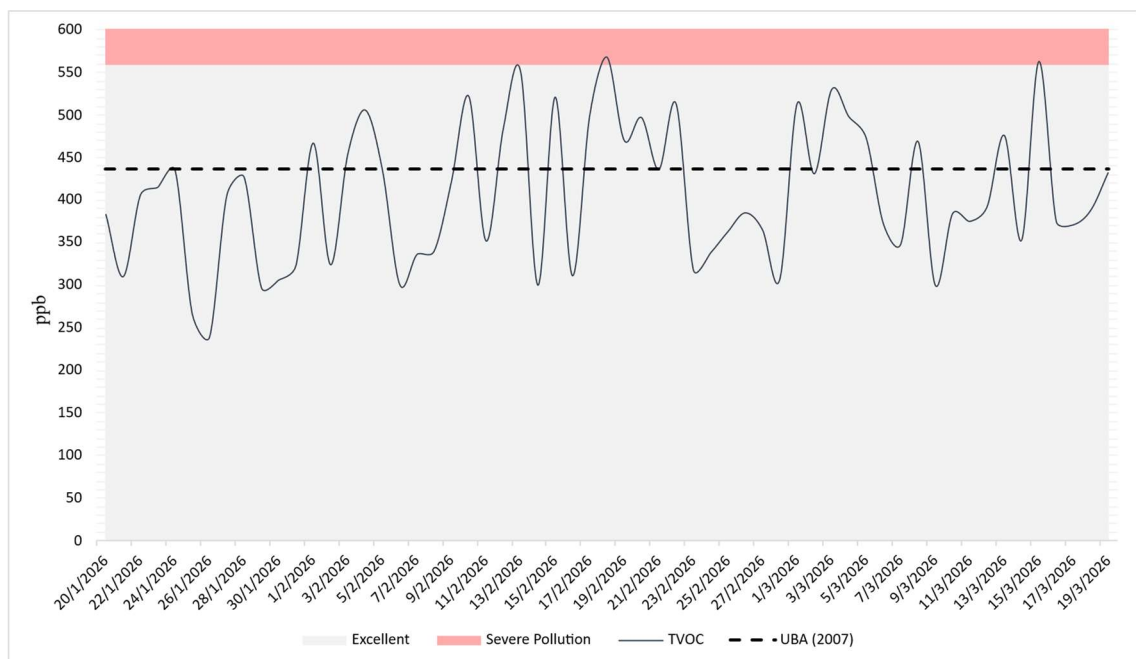
Διάγραμμα 20: Μέγιστη ημερήσια συγκέντρωση PM10.



Διάγραμμα 21: Μέγιστη ημερήσια συγκέντρωση CO₂.



Διάγραμμα 22: Μέγιστη ημερήσια συγκέντρωση HCHO.



Διάγραμμα 23: Μέγιστη ημερήσια συγκέντρωση TVOC.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, διακρίνεται ότι ο μεγαλύτερος προβληματισμός αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις των PM_{2.5} φτάνουν μέχρι και 30 φορές πάνω από το επιτρεπτό (24ώρο) όριο (WHO, 2021) ενώ η απλή υπέρβαση αυτού

παρατηρείται σε καθημερινή βάση. Οι υπέρβαση του αντίστοιχου ορίου της ημερήσιας μέγιστης συγκέντρωσης των PM10 είναι επίσης συχνή και υπάρχουν μέρες όπου φτάνει περίπου τις 10 φορές παραπάνω από το επιτρεπτό (24ώρο) όριο (WHO, 2021). Αν και αυτές οι συγκεντρώσεις αφορούν σύντομες καταγραφές, δεν γίνεται να αμεληθούν, καθώς οι τιμές τους είναι πολλές φορές πάνω από τα επιτρεπτά όρια που σημαίνει ότι για να πέσουν σε αποδεκτές τιμές, θα χρειαστεί ασφαλώς κάποιος χρόνος. Συνεπώς αναμένονται υψηλά επίπεδα συγκεντρώσεων τις προηγούμενες και τις επόμενες ώρες από την στιγμή που θα εμφανιστή η μέγιστη τιμή.

Για αρκετές ημέρες της περιόδου των μετρήσεων, παρατηρούνται μέγιστες συγκεντρώσεις για το CO₂ που υπερβαίνουν το προτεινόμενο όριο των 1000ppm. Αν και το CO₂ από μόνο του δεν αποτελεί ρύπο, παρόλα αυτά υψηλές συγκεντρώσεις μπορούν να έχουν αρνητική επίδραση στη γνωσιακή συμπεριφορά (βλ. **Κεφ. 2.2.2**). Παρόλα αυτά, σε γενικές γραμμές δεν παρατηρήθηκαν συχνές υπερβάσεις όσον αφορά τις συγκεντρώσεις του CO₂ και ακόμα και οι μέγιστες συγκεντρώσεις που παρατηρήθηκαν χαρακτηρίζονται ως “Mild Pollution” από το λογισμικό.

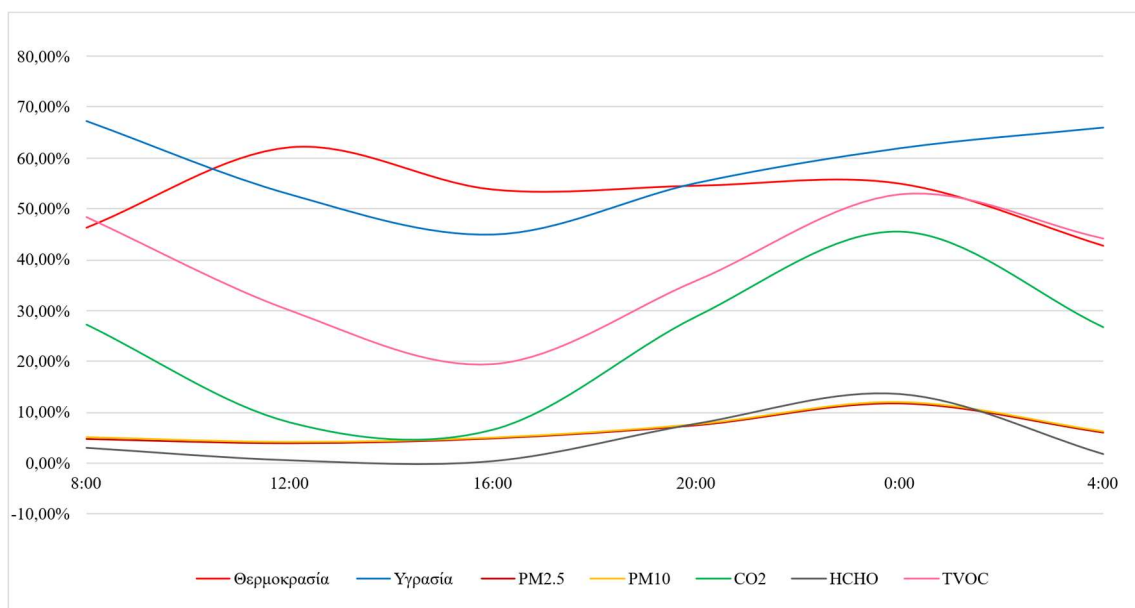
Οι μέγιστες συγκεντρώσεις της HCHO είναι σχεδόν πάντα χαμηλές και σε επιτρεπτά επίπεδα. Η μέγιστη ημερήσια συγκέντρωση των TVOC παρουσιάζει υπέρβαση πάνω από το συνιστώμενο όριο (Ad-hoc-Arbeitsgruppe IRK/AOLG, 2007) αλλά χωρίς να καταγράφονται πολύ υψηλές ή ανησυχητικές τιμές. Παρόλα αυτά το πλαίσιο γύρω από τα όρια των TVOC δεν είναι ακόμα σαφώς ορισμένο καθώς αφορά πολλές διαφορετικές χημικές ενώσεις (βλ. **Κεφ. 5.1.5**) ενώ όσον αφορά τον χαρακτηρισμό που δίνει το λογισμικό, ακόμα και οι μέγιστες συγκεντρώσεις βρίσκονται εντός του χαρακτηρισμού “Excellent”.

4.6 Κανονικοποιημένη μέση ωριαία κατανομή θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκεντρώσεων ρύπων

Αν και από τα διαγράμματα που έχουν ήδη παρουσιαστεί στα προηγούμενα κεφάλαια, διαφαίνεται κάποια συσχέτιση στις συγκεντρώσεις των ρύπων, αυτό δύναται να γίνει πιο ευδιάκριτο έπειτα από την κανονικοποίηση των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων των ρύπων (**Διάγραμμα 24**: Κανονικοποιημένη μέση ωριαία συγκέντρωση ρύπων).

Για την ορθή συγκριτική αξιολόγηση των διαφορετικών ρύπων, πραγματοποιήθηκε κανονικοποίηση των δεδομένων με τη μέθοδο ελάχιστου – μέγιστου. Συγκεκριμένα, οι τιμές μετατράπηκαν σε μια κοινή σχετική κλίμακα από 0 έως 1 (ή 0% έως 100%), εφαρμόζοντας τον τύπο (1).

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$



Διάγραμμα 24: Κανονικοποιημένη μέση ωριαία συγκέντρωση ρύπων, θερμοκρασίας και υγρασίας.

Αρχικά, από το **Διάγραμμα 24**, δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλής συσχέτιση μεταξύ θερμοκρασίας ή υγρασίας και των ρύπων. Οι συγκεντρώσεις των PM2.5 και PM10, συμπίπτουν απόλυτα κάτι αναμενόμενο αφού και οι δύο ρύποι αναφέρονται σε αιωρούμενα σωματίδια. Παρόμοια κατανομή και έντονη συσχέτιση παρατηρείται για το CO₂ και TVOC. Η HCHO φαίνεται να παρουσιάζει το μέγιστο όταν το παρουσιάζουν και οι υπόλοιποι ρύποι, βέβαια, οι συγκεντρώσεις της είναι τις περισσότερες φορές μηδενικές και εντός των αποδεκτών ορίων, συνεπώς δεν παρουσιάζουν κάποιο ιδιαίτερο ενδιαφέρον και δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με τη συσχέτιση της με τους υπόλοιπους ρύπους.

Διακρίνονται δύο μέγιστα εντός της ημέρας. Ένα τις πρωινές ώρες, που ξυπνούν οι ένοικοι και ετοιμάζονται για δουλειά και η οικία έχει μείνει με κλειστά παράθυρα για αρκετές ώρες

και ένα κατά τις βραδινές ώρες, όπου οι ένοικοι έχουν επιστρέψει στην οικία και υπάρχει μέτρια χρήση προϊόντων καπνού από νωρίτερα το απόγευμα. Όπως έχει αναφερθεί, οι ένοικοι αφήνουν ανοικτά δύο παράθυρα ενώ φεύγουν από την οικία, για το λόγο αυτό παρατηρείται και μείωση στις συγκεντρώσεις των ρύπων από τις πρωινές έως και τις απογευματινές ώρες.

Η αύξηση της θερμοκρασίας σε αυτή τη περίοδο οφείλεται στο ότι ο αισθητήρας βρίσκεται στο χώρο του καθιστικού όπου υπάρχει μεγάλο υαλοστάσιο από το οποίο εισχωρεί μεγάλη ποσότητα ηλιακής θερμικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπως επίσης και ότι το παράθυρο το οποίο μένει ανοικτό είναι σε διαφορετικό χώρο. Ο φρέσκος αέρας που μπαίνει από τα ανοικτά παράθυρα κατά τη διάρκεια της ημέρας και συνήθως είναι χαμηλότερης υγρασίας από τον εσωτερικό για παλιά μη επαρκώς μονωμένα κτίρια, σε συνδυασμό με την αύξηση της θερμοκρασίας στο χώρο όπου βρίσκεται ο αισθητήρας, ρίχνει τα επίπεδα της σχετικής υγρασίας μέχρι της απογευματινές ώρες που επιστρέφουν οι ένοικοι και κλείνουν τα παράθυρα, όπου η σχετική υγρασία αρχίζει να αυξάνεται σταδιακά. Συνεπώς η ωριαία κατανομή της υγρασίας δεν συσχετίζεται με αυτή των υπόλοιπων ρύπων αλλά έχει να κάνει με τη παρουσία των ενοίκων, την χωροθέτηση του αισθητήρα και τα φυσικά χαρακτηριστικά του κτιρίου.

5. Συζήτηση - συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη αφορούσε μέτρηση ρύπων εσωτερικού αέρα σε χώρο κατοικίας. Η κατοικία που επιλέχθηκε μπορεί να θεωρηθεί τυπική αστική κατοικία του κέντρου της Αθήνας, η οποία χαρακτηρίζεται από την παλαιότητα της και τη μη επαρκή θερμομόνωση/υγρομόνωση. Η συμπεριφορά και οι δραστηριότητες των ενοίκων μπορούν επίσης να θεωρηθούν τυπικές και χαρακτηρίζονται από πρωινή εργασία, μέτρια χρήση προϊόντων καπνού και περιστασιακή συνάθροιση ατόμων (καλεσμένοι). Θετική επίδραση είχε το άνοιγμα δύο παραθύρων της οικίας για αρκετές ώρες μέσα στην ημέρα.

5.1 Αξιολόγηση επιπέδων ρύπων στην κατοικία με βάση διεθνή θεσπισμένα όρια

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα γίνει μία σύγκριση των αποτελεσμάτων σε σχέση με τα όρια που έχουν θεσπιστεί από διάφορους οργανισμούς. Στα διαγράμματα που προηγήθηκαν, έχουν σκιαγραφηθεί τα όρια και οι χαρακτηρισμοί που περιέχει το λογισμικό της εταιρείας Edimax. Στις συγκεντρώσεις PM_{2.5} και TVOC, το λογισμικό δεν έχει θέσει τόσο αυστηρά όρια όπως έχουν κάνει διεθνείς οργανισμοί και υπηρεσίες, ενώ στους υπόλοιπους ρύπους σχεδόν συμφωνούν.

5.1.1 Θερμοκρασία & σχετική υγρασία

Παράμετρος	Μέση τιμή	Ελάχιστη τιμή	Προτεινόμενο εύρος	Παρατηρήσεις
Θερμοκρασία	22°C	17,5°C	20-24°C	Σχεδόν πάντα εντός ορίων
Παράμετρος	Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή	Προτεινόμενο εύρος	Παρατηρήσεις
Υγρασία	61%	74%	40 – 60%	Συχνά υψηλές τιμές, ειδικά τους πιο κρύους μήνες.

Πίνακας 7: Εκτίμηση επιπέδων θερμοκρασίας και υγρασίας με διεθνώς θεσπισμένα όρια άνεσης

Το προτεινόμενο εύρος της θερμοκρασίας εντός οικίας το χειμώνα προτείνεται σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 16798-1 (2019) στους 19-25°C με βάση ένα μέτριο (αποδεκτό) επίπεδο προσδοκιών, μιας και πρόκειται για παλαιό μη επαρκώς μονωμένο κτίριο. Το αμερικάνικο πρότυπο ASHRAE 55 (2020) ορίζει τα όρια στους 20-23.5°C, ενώ οι τεχνικές οδηγίες του τεχνικού επιμελητηρίου της Ελλάδας (TOTEE 20701-1, 2017) ορίζουν σαν ελάχιστη θερμοκρασία τους 20°C.

Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας στον υπό μελέτη χώρο έπεσαν ελάχιστες φορές κάτω από τους 20°C. Ωστόσο, στο σημείο αυτό απαιτείται μια σημαντική επιστημονική διευκρίνιση: Τα δεδομένα που καταγράφηκαν αφορούν τη θερμοκρασία αέρα (ξηρού βολβού), ενώ τα διεθνή πρότυπα θερμικής άνεσης βασίζονται τα όριά τους στη «θερμοκρασία λειτουργίας», η

οποία συνυπολογίζει και τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας των περιβαλλουσών επιφανειών.

Παρότι η θερμοκρασία λειτουργίας μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ίση με τη θερμοκρασία του αέρα σε σύγχρονα, καλά μονωμένα κτίρια (εφόσον απουσιάζει η άμεση ηλιακή ακτινοβολία και οι ταχύτητες του αέρα είναι χαμηλές), στην παρούσα μελέτη μια τέτοια παραδοχή δεν θα ήταν δόκιμη. Ο υπό εξέταση χώρος αποτελεί τμήμα ενός σχετικά παλαιού κτιρίου με ανεπαρκή θερμομόνωση, μεγάλες γυάλινες επιφάνειες και δυνατότητα θέρμανσης αποκλειστικά μέσω κλιματιστικής μονάδας.

Συνεπώς, κατά τη χειμερινή περίοδο, αναμένεται πως η θερμοκρασία ακτινοβολίας από τα δομικά στοιχεία διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Αυτό οφείλεται, αφενός, στο γεγονός ότι το σύστημα θέρμανσης (κλιματιστικό) αποδίδει θερμότητα στον χώρο αποκλειστικά μέσω εξαναγκασμένης συναγωγής (χωρίς ακτινοβολία) και, αφετέρου, στην απουσία επαρκούς μόνωσης. Η έλλειψη αυτή οδηγεί σε μεγάλες θερμικές απώλειες προς τον εξωτερικό αέρα, μην επιτρέποντας στους τοίχους να αξιοποιήσουν τη θερμοχωρητικότητά τους ώστε να ακτινοβολήσουν θερμότητα πίσω στο χώρο. Συνεπώς, η πραγματική θερμική αίσθηση των ενοίκων εκτιμάται ότι ήταν χαμηλότερη από την καταγεγραμμένη θερμοκρασία του αέρα.

Στην πραγματική θερμική αίσθηση συμβάλλει, ασφαλώς, και το επίπεδο της σχετικής υγρασίας. Υψηλότερα επίπεδα υγρασίας μειώνουν τη θερμική «μόνωση» που προσφέρει η ενδυμασία και καθιστούν τον αέρα περισσότερο θερμικά αγωγίμο, με αποτέλεσμα οι θερμικές απώλειες από το ανθρώπινο σώμα να είναι υψηλότερες. Βέβαια, το σημαντικότερο πρόβλημα όταν η υγρασία διατηρείται σε υψηλά επίπεδα, όπως αναφέρθηκε και στο **Κεφ. 2.2.5**, είναι η δημιουργία μούχλας και η διαμόρφωση ευνοϊκών συνθηκών για την ανάπτυξη μικροοργανισμών. Αν και τα επιτρεπτά όρια διαφέρουν ελαφρά από πρότυπο σε πρότυπο, οι περισσότεροι κανονισμοί συμφωνούν ότι η σχετική υγρασία δεν πρέπει να ξεπερνάει το ανώτατο όριο του 60%. Ένας γενικός κανόνας είναι η υγρασία να διατηρείται μεταξύ 40% και 60% (ASHRAE 55, 2020) ανεξαρτήτως εποχής, με τα χαμηλότερα ποσοστά αυτού του εύρους να προτιμώνται κατά τη χειμερινή περίοδο (περίοδο θέρμανσης) (EN 16798-1, 2019).

Στην υπό μελέτη οικία, περίπου οι μισές καταγραφές της υγρασίας εμφάνισαν τιμές άνω του 60%. Ειδικότερα, το 79% των μετρήσεων ξεπέρασε το 55%, ενώ το 90% κυμάνθηκε πάνω από το 50%. Όπως αποτυπώθηκε και στο **Διάγραμμα 4**, το πρόβλημα είναι εντονότερο κατά τους κρύους και βροχερούς μήνες, παρουσιάζοντας βελτίωση προς την άνοιξη. Παρά τη

βελτίωση αυτή, οι συχνά υψηλές τιμές υγρασίας είχαν ήδη αρνητικό αντίκτυπο στον χώρο, καθώς, σύμφωνα με αναφορές των ενοίκων, παλαιότερα είχε παρουσιαστεί πρόβλημα μούχλας στο υπνοδωμάτιο, το οποίο αντιμετωπίστηκε εκ των υστέρων με τη χρήση οικιακού αφυγραντήρα. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη συσκευή δεν λειτουργεί αδιάκοπα και δεν επαρκεί για να μειώσει τα επίπεδα της υγρασίας σε ολόκληρη την κατοικία, εξού και τα αυξημένα επίπεδα υγρασίας που παρατηρήθηκαν.

5.1.2 Αιωρούμενα σωματίδια PM2.5 & PM10

Ρύπος	Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή	Όριο	Παρατηρήσεις
PM2.5	32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	468 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Συστηματική υπέρβαση. Συσχέτιση με χρήση προϊόντων καπνού.
PM10	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	496 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Συχνή υπέρβαση, συσχέτιση με χρήση προϊόντων καπνού.

Πίνακας 8: Εκτίμηση επιπέδων αιωρούμενων σωματιδίων σύμφωνα με τα όρια που θέτει ο παγκόσμιος οργανισμός υγείας (WHO, 2021).

Παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις για τα αιωρούμενα σωματίδια για πολλές από τις μέρες καταγραφής και μάλιστα σε τιμές που υπερβαίνουν κατά πολύ τα διεθνώς θεσπισμένα όρια. Υπερβολικά υψηλές συγκεντρώσεις καταγράφονται για τις ειδικές περιπτώσεις – ημέρες που αναφέρθηκαν και στο **Κεφάλαιο 4.3**, όπου έλαβε χώρα συνάθροιση πολλών ατόμων με παράλληλη χρήση προϊόντων καπνού. Εδώ βέβαια να αναφερθεί ότι οι συγκεντρώσεις αυτές παρατηρήθηκαν για κάποιες ώρες, ενώ οι διεθνείς κανονισμοί συνήθως θεσπίζουν όρια για ολόκληρα 24ωρα ή μέρες μέσα στο έτος όπου υπάρχει υπέρβαση κάτι που δεν δίνει απάντηση στο κατά πόσο επηρεάζουν οι στιγμιαίες ή ωριαίες «αιχμές».

Πρόσφατη βιβλιογραφία αναδεικνύει τα προβλήματα υγείας που προκύπτουν ακόμα και από σύντομη έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, συνεπώς δεν θα ήταν συνετό να ληφθεί υπόψη μόνο η μέση συγκέντρωση της ημέρας στις περιπτώσεις όπου έχουν καταγραφεί υψηλές ωριαίες συγκεντρώσεις. Σύμφωνα με τον Xin Lv κ.α. (2023), σύντομες εκθέσεις σε υψηλά επίπεδα αιωρούμενων σωματιδίων συνδέονται με αυξημένο κίνδυνο

εισαγωγής και ισχαιμικά επεισόδια. Παράλληλα οι Lin κ.α. (2017) απέδειξαν ότι οι σύντομες αυτές εξάρσεις δρουν ως ισχυροί εκλυτικοί παράγοντες για καρδιαγγειακά και αναπνευστικά επεισόδια, ενώ η επικέντρωση μόνο στους ημερήσιους μέσους όρους ενδέχεται να υποεκτιμά δραματικά τον πραγματικό κίνδυνο πρόωρης θνησιμότητας.

Επιπλέον, κρίνεται σκόπιμο να συνυπολογιστεί η παρουσία του μικρόσωμου κατοικίδιου (σκύλου). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα οικιακά κατοικίδια αποτελούν αξιοσημείωτη εσωτερική πηγή αύξησης των αιωρούμενων σωματιδίων, και ειδικότερα των PM₁₀ και PM_{2.5}. Η συγκεκριμένη επιβάρυνση προέρχεται κυρίως από τη φυσιολογική απόρριψη νεκρών κυττάρων του δέρματος και τριχώματος, καθώς και από την επαναιώρηση της σκόνης από το δάπεδο, λόγω της κίνησης του ζώου (He κ.α., 2004).

5.1.3 Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)

Ρύπος	Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή	Όριο	Παρατηρήσεις
CO ₂	661 ppm	1497 ppm	1000 ppm	Διατήρηση σε επιτρεπτά όρια

Πίνακας 9: Εκτίμηση επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα σύμφωνα με το όριο που θέτει η Γερμανική Υπηρεσία Περιβάλλοντος (UBA) (Ad-hoc-Arbeitsgruppe IRK/AOLG, 2008)

Σε συγκεντρώσεις της τάξης των 1000 ppm, το CO₂ δεν αποτελεί τοξικό αέριο για τον άνθρωπο. Ωστόσο, τόσο ιστορικά, μέσω του καθιερωμένου ορίου στα 1000ppm από Pettenkofer (1858), όσο και στα σύγχρονα ευρωπαϊκά πρότυπα (EN 16798-1, 2019), το όριο αυτό χρησιμοποιείται ως δείκτης υγιεινής. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές της Γερμανικής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος (Ad-hoc-Arbeitsgruppe IRK/AOLG, 2008), η υπέρβαση των 1000 ppm υποδηλώνει ανεπαρκή αερισμό και συνδέεται με τη συσσώρευση άλλων, ενδεχομένως επιβλαβών, εσωτερικών ρύπων. Με άλλα λόγια, το CO₂ λειτουργεί ως δείκτης ποιότητας εσωτερικού αέρα, αν και από μόνο του δεν αποτελεί ρύπο.

Από το **Διάγραμμα 6** και το **Διάγραμμα 12** συμπεραίνεται ότι το CO₂ διατηρείται γενικά εντός ορίου. Με βάση τις τιμές του CO₂ μπορούμε να δηλώσουμε επαρκή αερισμό της

κατοικίας κάτι όμως που δε συμφωνεί με τα αποτελέσματα για τα αιωρούμενα σωματίδια και αυτό έχει να κάνει με την επίδραση που έχει η χρήση προϊόντων καπνού. Το CO₂ από μόνο του δεν μπορεί να δώσει ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με την ποιότητα αέρα στο εσωτερικό της οικίας. Βέβαια, υπάρχουν έρευνες (Allen, J. G. K.α., 2016 ; Satish, U. κ.α. 2012) όπου καταλήγουν πως συγκεντρώσεις CO₂ από 950-1400ppm επηρεάζουν την γνωστική λειτουργία των ατόμων σε εσωτερικούς χώρους, συνεπώς υφίσταται δυσμενή επίδραση στα άτομα, όχι όμως με την έννοια του ρύπου και τις επιπτώσεις στην υγεία.

5.1.4 Φορμαλδεΐδη (HCHO)

Ρύπος	Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή	Όριο	Παρατηρήσεις
HCHO	0,005 mg/m ³	0,11 mg/m ³	0,1 mg/m ³	Εντός ορίων (στην πλειονότητα των περιπτώσεων μηδενικό)

Πίνακας 10: Εκτίμηση επιπέδων φορμαλδεΐδης σύμφωνα με το όριο που θέτει ο παγκόσμιος οργανισμός υγείας (WHO, 2010).

Η συγκέντρωση της φορμαλδεΐδης είναι σχεδόν πάντα μηδενική. Συγκεκριμένα (σύμφωνα με το **Διάγραμμα 1**) η συγκέντρωση των HCHO είναι εντός του ορίου όπου η ποιότητα του αέρα χαρακτηρίζεται ως “Excellent” (0,07 mg/m³) στο 99% των μετρήσεων.

5.1.5 Ολικές πτητικές οργανικές ενώσεις TVOC

Ρύπος	Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή	Όριο	Παρατηρήσεις
TVOC	306 ppb	568 ppb	436 – 1.308 ppb	Εντός ορίων στην πλειονότητα των περιπτώσεων

Πίνακας 11: Εκτίμηση επιπέδων ολικών πτητικών οργανικών ενώσεων σύμφωνα με το όριο που θέτει η Γερμανική Υπηρεσία Περιβάλλοντος (UBA) (Ad-hoc-Arbeitsgruppe IRK/AOLG, 2007).

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις αποτελούν ένα σύνολο πάρα πολλών ρύπων με ποικίλες μοριακές δομές, συνεπώς είναι δύσκολο να καθορισθεί ένα αυστηρό πλαίσιο σχετικά με επιτρεπόμενα όρια. Υπάρχουν κάποια προτεινόμενα όρια από οργανισμούς και υπηρεσίες, όπως η Γερμανική Υπηρεσία Περιβάλλοντος όπου αναφέρει πως τα επίπεδα TVOC αρχίζουν να θεωρούνται προβληματικά στα $1,0 - 3,0 \text{ mg/m}^3$ ($\sim 436 - 1.308 \text{ ppb}^1$) ενώ σοβαρότερο πρόβλημα ρύπανσης υπάρχει για πάνω από $3,0 \text{ mg/m}^3$. Σε συγκέντρωση από $0,3 - 1,0 \text{ mg/m}^3$ ($\sim 131 - 436 \text{ ppb}^1$) δεν υπάρχει ανησυχία, αλλά προτείνεται αερισμός (Ad-hoc-Arbeitsgruppe IRK/AOLG, 2007).

Άλλα όρια που έχουν προταθεί για τα TVOC είναι τα 500 µg/m^3 ($\sim 218 \text{ ppb}^1$) από το πρότυπο πιστοποίησης κτιρίων WELL ώστε να πιστοποιηθεί ένα κτίριο (International WELL Building Institute [IWBI], 2020), τα 600 µg/m^3 ($\sim 262 \text{ ppb}^1$) σύμφωνα με το Υπουργείο περιβάλλοντος του Χονγκ Κονγκ (Environmental Protection Department, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, 2019) και τα 400 µg/m^3 ($\sim 174 \text{ ppb}^1$) από το Υπουργείο Υγείας, Εργασίας και Πρόνοιας της Ιαπωνίας, το οποίο πρωτοπόρησε στην αντιμετώπιση του «Συνδρόμου του άρρωστου κτιρίου» (Ministry of Health, Labour και Welfare [MHLW], Japan, 2000). Με βάση λοιπόν άλλα αναφερόμενα – θεσπισμένα όρια, η συγκέντρωση των TVOC μπορεί να θεωρηθεί υψηλή και μη επιτρεπτή. Τέλος, με βάση το λογισμικό της Edimax, για συγκεντρώσεις TVOC έως τα 560 ppb η ποιότητα αέρα χαρακτηρίζεται ως “Excellent”, οπότε βασιζόμενοι σε αυτό μπορεί να υπάρξει και ο ισχυρισμός ότι δεν τίθεται καμία ανησυχία όσον αφορά τις συγκεντρώσεις των TVOC.

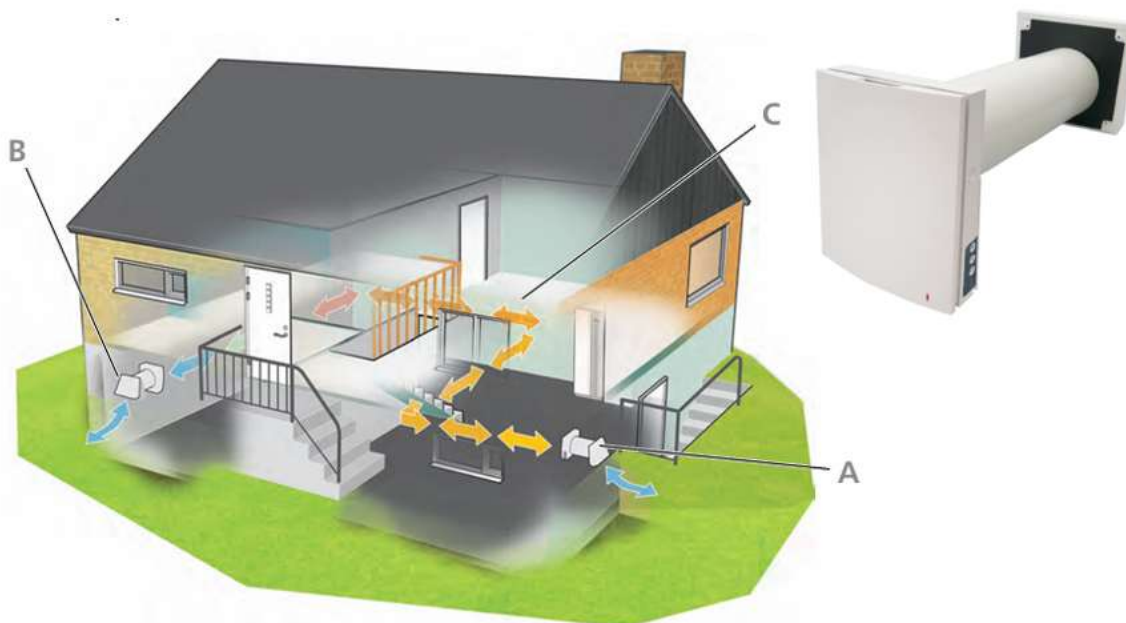
¹Η μετατροπή σε ppb γίνεται για συμφωνία με τις μονάδες μέτρησης της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη. Η μετατροπή δεν μπορεί να είναι ακριβής καθώς δεν γνωρίζουμε τις ακριβείς χημικές ενώσεις που εντοπίζει η συσκευή και τον ακριβή τρόπο που βαθμονομεί, για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση: $1 \text{ mg/m}^3 \approx 436 \text{ ppb}$ με βάση το ισοβουτυλένιο σε θερμοκρασία δωματίου.

5.2 Πιθανές τεχνικές ή συμπεριφορικές παρεμβάσεις

5.2.1 Συμπεριφορικές παρεμβάσεις και τεχνικές παρεμβάσεις μικρού κόστους και κλίμακας

Όπως φάνηκε και από την ανάλυση που προηγήθηκε, το μεγαλύτερο πρόβλημα έγκειται στη χρήση προϊόντων καπνού. Αν και αυτή αποτελείται κυρίως από συσκευές θέρμανσης καπνού (iQOS) και όχι την κλασική καύση, όπου θα υπήρχε πολύ έντονη έκλυση ρύπων, παρόλα αυτά παρατηρήθηκε σύνδεση μεταξύ αυτής της χρήσης και της μείωσης του επιπέδου της ποιότητας του εσωτερικού αέρα. Συνεπώς, θα χρειαστεί να αναλογιστούν οι ένοικοι αν η χρήση προϊόντων καπνού είναι προτιμότερο να γίνεται σε εξωτερικό χώρο ή να εγκατασταθεί ένα μικρό σύστημα εξαερισμού που να λειτουργεί τουλάχιστον κατά τη διάρκεια αυτής της χρήσης και ειδικά όταν συναθροίζονται άτομα, όπου το πρόβλημα οξύνεται. Τους μήνες που δεν υπάρχουν πολύ χαμηλές ή πολύ υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίες, ο αερισμός θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με απλό άνοιγμα των παραθύρων. Εν τούτοις, σύμφωνα με τους ενοίκους, τους πιο ζεστούς μήνες η χρήση προϊόντων καπνού, όπως και οι συναθροίσεις, λαμβάνουν χώρα κυρίως στον εξωτερικό χώρο της οικίας (μπαλκόνι), συνεπώς αν και δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αυτών των μηνών, οι παραπάνω δραστηριότητες εκτιμάται ότι δεν θα είχαν την επίδραση που παρατηρήθηκαν τους μήνες όπου έλαβαν χώρα οι μετρήσεις.

Μικρά τοπικά συστήματα με ανάκτηση ενέργειας και με εγκατάσταση τους απευθείας στον τοίχο χωρίς να χρειάζονται αεραγωγοί, είναι κάτι που μπορεί να μειώσει αισθητά τις θερμικές απώλειες που θα είχε ένας απλός εξαερισμός παράλληλα με την βελτίωση της ποιότητας του αέρα (Εικόνα 4). Τα συστήματα αυτά έχουν χαμηλό κόστος και εύκολη εγκατάσταση, αφού δεν απαιτείται εγκατάσταση συστήματος αεραγωγών, ενώ η εγκατάστασή τους μπορεί να ολοκληρωθεί μέσα σε λίγες ώρες. Επιπλέον, θα μπορούσαν να συνεισφέρουν στη μείωση της συγκέντρωσης του CO₂ που εκτιμάται ότι θα είναι υψηλή στο υπνοδωμάτιο την ώρα του ύπνου με την εγκατάσταση μίας συσκευής σε αυτό το δωμάτιο. Συνεπώς, σαν ελάχιστη αλλά επαρκής λύση, προτείνεται η εγκατάσταση δύο συσκευών, μία στο καθιστικό και μία στο υπνοδωμάτιο, όπου με αυτόν τον τρόπο θα δημιουργούταν και ευνοϊκή μετακίνηση αέριων μαζών εντός της οικίας.



Εικόνα 4: Τοπικό σύστημα αερισμού DVC της σουηδικής NIBE (nibe.eu).

Το δεύτερο σημαντικό πρόβλημα που καταγράφηκε στον υπό μελέτη χώρο είναι αυτό της υψηλής σχετικής υγρασίας. Το ζήτημα αυτό αντιμετωπίζεται ήδη εν μέρει με τη χρήση οικιακού αφυγραντήρα στο υπνοδωμάτιο. Ωστόσο, η συγκεκριμένη πρακτική δεν επιλύει το πρόβλημα στους υπόλοιπους χώρους της κατοικίας, για τους οποίους προτείνεται η χρήση μίας δεύτερης συσκευής, η οποία θα ελέγχει –στον βαθμό που είναι εφικτό– τα υψηλά επίπεδα υγρασίας στο σύνολο του σπιτιού.

Αναμφίβολα, η χρήση δύο συσκευών, οι οποίες πιθανότατα θα απαιτείται να λειτουργούν για αρκετές ώρες ημερησίως, θα επιφέρει αύξηση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Παρ' όλα αυτά, το συγκεκριμένο ενεργειακό κόστος θεωρείται ότι αντισταθμίζεται από τα σημαντικά οφέλη που προκύπτουν. Συγκεκριμένα, η μείωση της υγρασίας όχι μόνο βελτιώνει αισθητά τη θερμική άνεση των ενοίκων, αλλά διασφαλίζει και την απαραίτητη αναβάθμιση των συνθηκών υγιεινής του εσωτερικού περιβάλλοντος, αποτρέποντας την εμφάνιση μούχλας και την ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών.

5.2.2 Εκτεταμένες παρεμβάσεις

Οι παραπάνω προτάσεις συνιστούν ήπιες παρεμβάσεις χαμηλού κόστους, οι οποίες μπορούν να εξασφαλίσουν ένα ικανοποιητικό επίπεδο άνεσης για τους ενοίκους, δεδομένου ότι δεν καταγράφηκαν μεγάλα προβλήματα στην ποιότητα του εσωτερικού αέρα ή στη θερμική άνεση. Ωστόσο, εάν ο τελικός στόχος είναι η ριζική αναβάθμιση της κατοικίας, ώστε να εναρμονίζεται με τα σύγχρονα πρότυπα ιδανικής διαβίωσης - τόσο από πλευράς ενεργειακής απόδοσης όσο και ποιότητας αέρα - απαιτούνται παρεμβάσεις ευρύτερης κλίμακας και υψηλότερου κόστους.

Πιο συγκεκριμένα, το επίπεδο θερμικής άνεσης θα βελτιωνόταν δραστικά με την εφαρμογή συστήματος θερμομόνωσης στο σύνολο του εξωτερικού κελύφους (τοιχοποιία σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα), καθώς και στην πλάκα της οροφής, δεδομένου ότι το διαμέρισμα βρίσκεται στον τελευταίο όροφο. Παράλληλα, στην πλάκα οροφής κρίνεται επιβεβλημένη η εφαρμογή επαρκούς υγρομόνωσης, η οποία θα συμβάλει καθοριστικά στη διατήρηση της εσωτερικής υγρασίας εντός των συνιστομένων ορίων.

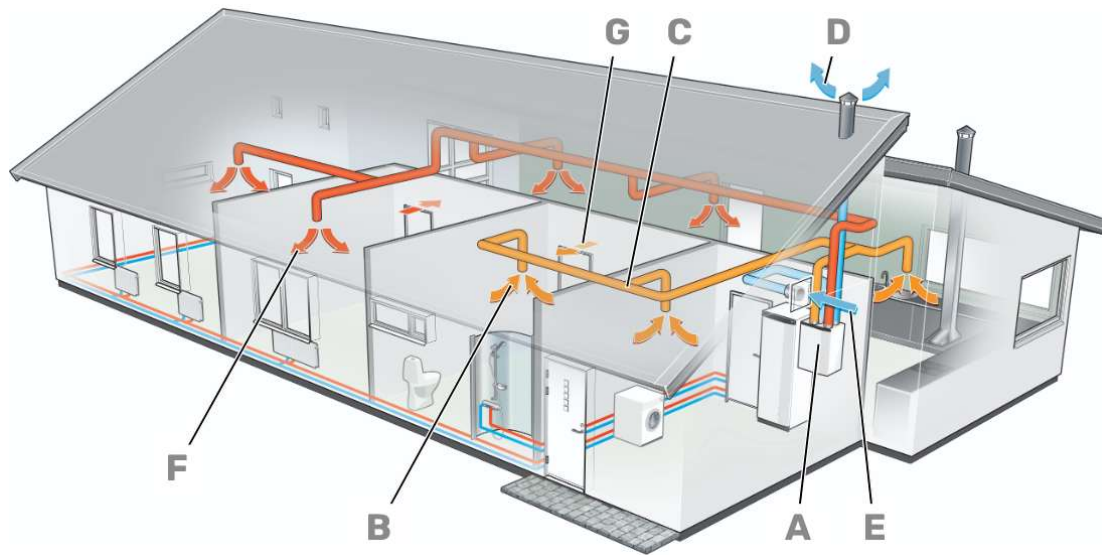
Προτείνεται επίσης η αξιολόγηση και η πιθανή αναβάθμιση των κουφωμάτων-υαλοστασίων. Τα κουφώματα, αν και είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο, δεν είναι σύγχρονης τεχνολογίας και στερούνται θερμοδιακοπής. Παρότι μια τέτοια παρέμβαση συνεπάγεται σημαντικό αρχικό κόστος, η αντικατάστασή τους με σύγχρονα ενεργειακά κουφώματα υψηλής απόδοσης κρίνεται σημαντική. Ειδικότερα, η προσθήκη υαλοπινάκων με ανακλαστική επίστρωση (Low-E) τουλάχιστον στο μεγάλο άνοιγμα του καθιστικού θα περιορίσει δραστικά τις θερμικές απώλειες κατά τη χειμερινή περίοδο, αποτρέποντας ταυτόχρονα τα ανεπιθύμητα ηλιακά κέρδη και την υπερθέρμανση του χώρου το καλοκαίρι.

Αν και οι προαναφερθείσες επεμβάσεις αποτελούν τη βάση για μία ολοκληρωμένη ενεργειακή αναβάθμιση, ο κατάλληλος μηχανολογικός εξοπλισμός είναι αυτός που θα εξασφαλίσει ένα άρτιο τελικό αποτέλεσμα. Αν προηγηθούν οι παραπάνω παρεμβάσεις, τα απαιτούμενα θερμικά και ψυκτικά φορτία αναμένεται να μειωθούν δραστικά. Παρόλα αυτά, η κάλυψη των αναγκών θέρμανσης με κλιματιστικές μονάδες (συστήματα αέρα-αέρα) δεν κρίνεται ως η βέλτιστη επιλογή. Ο συγκεκριμένος εξοπλισμός βασίζεται αποκλειστικά στη βεβιασμένη συναγωγή του αέρα, υστερώντας στη μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας, η οποία αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επίτευξη συνθηκών βέλτιστης θερμικής άνεσης (αίσθημα «θαλπωρής») των ενοίκων.

Δεδομένου ότι το διαμέρισμα διαθέτει υφιστάμενο δίκτυο θερμαντικών σωμάτων, το οποίο επί του παρόντος παραμένει ανενεργό, προτείνεται η αξιοποίησή του μέσω της σύνδεσής του με ένα σύγχρονο σύστημα παραγωγής θερμότητας, όπως ένας λέβητας συμπύκνωσης φυσικού αερίου ή μία αντλία θερμότητας αέρα-νερού. Η λειτουργία των υφιστάμενων θερμαντικών σωμάτων θα αναβαθμίσει ουσιαστικά το επίπεδο διαβίωσης, επιτυγχάνοντας ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας σε όλο το διαμέρισμα και αποτρέποντας τη δημιουργία τοπικών θερμοκρασιακών ανισοτήτων (θερμών ή ψυχρών ζωνών), ένα φαινόμενο που παρατηρείται εντόνως στη σημερινή κατάσταση λόγω της σημειακής λειτουργίας των κλιματιστικών μονάδων (μία στο καθιστικό και μία στο υπνοδωμάτιο). Επίσης, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας αέρα στον σύνολο του διαμερίσματος, θα μειωθούν τα ποσοστά της σχετικής υγρασίας. Οι προαναφερθείσες παρεμβάσεις συμβάλλουν καθοριστικά στη βελτίωση της θερμικής άνεσης, τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και τη συνολική αναβάθμιση του ενεργειακού αποτυπώματος του κτιρίου. Ωστόσο, αναφορικά με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα, η άμεση επίδρασή τους περιορίζεται κυρίως στη βελτιστοποίηση των επιπέδων υγρασίας.

Για τη βελτίωση των υπόλοιπων δεικτών ποιότητας που αφορά τους ρύπους, η πλέον ενδεδειγμένη λύση, είναι η εγκατάσταση ενός κεντρικού συστήματος αερισμού με ανάκτηση ενέργειας (**Εικόνα 5**: Σύστημα κεντρικού αερισμού σε οικία (NIBE ERS, nibe.eu). Μέσω του εναλλάκτη θερμότητας που διαθέτουν οι σύγχρονες μονάδες, ελαχιστοποιούνται οι θερμικές απώλειες τον χειμώνα και περιορίζεται η αύξηση του ψυκτικού φορτίου το καλοκαίρι, απώλειες που θα ήταν αναπόφευκτες με τη χρήση φυσικού αερισμού ή συμβατικών συστημάτων εξαερισμού. Ο ορθός σχεδιασμός του δικτύου αεραγωγών εξασφαλίζει τη συνεχή, ελεγχόμενη και ομοιόμορφη ανανέωση του αέρα σε ολόκληρη την κατοικία. Αυτή η σταθερή εναλλαγή αέριων μαζών αποτρέπει τη συσσώρευση εσωτερικών ρύπων διατηρώντας τους διαρκώς σε επιθυμητά χαμηλά επίπεδα. Παράλληλα, καθοριστικό ρόλο διαδραματίζουν τα ενσωματωμένα συστήματα φίλτρανσης της μονάδας. Τα σύγχρονα συστήματα εξοπλίζονται με φίλτρα υψηλής απόδοσης στην προσαγωγή (όπως κατηγορίας ePM2.5 ή ePM1, βάσει του προτύπου ISO 16890 (ISO 16890-1, 2016)). Σύμφωνα με την ονοματολογία του εν λόγω προτύπου, αυτά τα φίλτρα είναι πιστοποιημένα να κατακρατούν το αντίστοιχο αναγραφόμενο ποσοστό (π.χ. άνω του 70% με 80%) της μάζας των λεπτών αιωρούμενων

σωματιδίων (PM2.5 και PM1) του εξωτερικού αέρα, εξασφαλίζοντας την εισαγωγή νωπού αέρα υψηλής καθαρότητας στον χώρο διαβίωσης.



Εικόνα 5: Σύστημα κεντρικού αερισμού σε οικία (NIBE ERS, nibe.eu). A: Μονάδα μηχανικού αερισμού με ανάκτηση ενέργειας. B: Απαγωγή εσωτερικού αέρα. C: Δίκτυο απαγωγής. Ο εσωτερικός αέρας αναρροφάται από τη μονάδα μηχανικού αερισμού. D: Εξαγωγή εσωτερικού αέρα στο περιβάλλον, αφού γίνει εναλλαγή θερμικής ενέργειας με τον αέρα που εισέρχεται στον εσωτερικό εναλλάκτη της μονάδας. E: Εισαγωγή φρέσκου αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον. F: Προσαγωγή φρέσκου αέρα, αφού έχει προηγηθεί εναλλαγή θερμότητας με τον αέρα που απαγωγής (χωρίς να έχουν έρθει σε επαφή τα δύο ρεύματα). G: Ο αέρας εντός της οικίας, κυκλοφορεί από τους χώρους όπου γίνεται προσαγωγή, προς τους χώρους όπου γίνεται η απαγωγή μέσω ανοιγμάτων και διάκενων στις πόρτες.

Τα κεντρικά συστήματα αερισμού των κατοικιών σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των χώρων, την προβλεπόμενη χρήση τους και τον τυπικό αριθμό των ενοίκων. Ειδικές δραστηριότητες, όπως η χρήση προϊόντων καπνού, μπορούν να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό ως έναν βαθμό. Για παράδειγμα, δύναται να εγκατασταθεί βαλβίδα εξαγωγής αέρα στον χώρο του καθιστικού με προσαυξημένη παροχή σε σχέση με την τυπική απαίτηση ενός χώρου μη καπνίζόντων.

Ωστόσο, τα συστήματα αυτά δεν σχεδιάζονται με γνώμονα την πλήρη εξασφάλιση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα σε ακραία σενάρια φορτίου —όπως, για παράδειγμα, συναθροίσεις με ταυτόχρονη χρήση προϊόντων καπνού. Μια τέτοια σχεδιαστική προσέγγιση θα οδηγούσε σε υπερδιαστασιολόγηση του συστήματος για τον υπόλοιπο χρόνο όπου στην

οικία παρευρίσκονται μόνο οι ένοικοι, γεγονός που συνεπάγεται δυσανάλογα αυξημένο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. Συνεπώς, για την αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων υψηλών εκπομπών ρύπων, η πλέον ενδεδειγμένη λύση εναπόκειται στην υιοθέτηση συμπεριφορικών αλλαγών, όπως η χρήση προϊόντων καπνού μόνο σε εξωτερικούς χώρους (μπαλκόνι).

5.3 Περιορισμοί μελέτης & προτάσεις για μελλοντική έρευνα

5.3.1 Περιορισμοί μελέτης

Κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας προέκυψαν ορισμένοι μεθοδολογικοί και τεχνικοί περιορισμοί, οι οποίοι παρατίθενται παρακάτω.

Αρχικά, το λογισμικό της συσκευής μέτρησης δεν υποστήριζε τη δυνατότητα τοπικής αποθήκευσης των καταγραφών ή την εξαγωγή (downloading) αυτών σε επεξεργάσιμη μορφή. Το γεγονός αυτό απαίτησε αυστηρή δέσμευση και συνέπεια από την πλευρά του συγγραφέα για τη χειροκίνητη καταγραφή των δεδομένων, ενώ αποτέλεσε και τον λόγο όπου δεν ελήφθησαν περισσότερες μετρήσεις με μικρότερα χρονικά μεσοδιαστήματα. Παρ' όλα αυτά, εκτιμάται ότι ο όγκος των δεδομένων που συνελέγη αποτυπώνει σε ικανοποιητικό βαθμό τη διακύμανση των ρύπων στον εσωτερικό αέρα της οικίας.

Δεύτερον, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη συσκευή τοποθετημένη αποκλειστικά στον χώρο του καθιστικού (βλ. **Εικόνα 2**). Συνεπώς, δεν υπάρχει σαφής εικόνα για τις συγκεντρώσεις των ρύπων στο υπνοδωμάτιο, όπου θα παρουσίαζε ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον η παρακολούθηση των επιπέδων του CO₂, ειδικά κατά τις ώρες του ύπνου με κλειστή πόρτα. Μάλιστα, σύμφωνα με τους ενοίκους, το κατοικίδιο ζώο κοιμάται στον ίδιο χώρο με τους αυτούς, κάτι που αναμφίβολα συμβάλει στην περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης του εν λόγω ρύπου. Η επέκταση των μετρήσεων σε περισσότερους χώρους της οικίας, θα προϋπέθετε τη χρήση δεύτερης συσκευής, μια παράμετρος που προτείνεται να ληφθεί υπόψη σε μελλοντικές αντίστοιχες μελέτες.

Ένα τρίτο, σημαντικό εμπόδιο αφορούσε τη διαθεσιμότητα του λογισμικού και τη συνδεσιμότητα της συσκευής. Όπως προαναφέρθηκε, η συσκευή βρισκόταν σε διαρκή

σύνδεση με το διαδίκτυο, συγχρονίζοντας τις μετρήσεις στην υπηρεσία νέφους (cloud) της κατασκευάστριας εταιρείας. Αυτό παρείχε στον συγγραφέα τη δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, καθώς και προβολής του ιστορικού τους (μέσω διαγραμμάτων – καμπυλών). Ωστόσο, έπειτα από αλλαγή του παρόχου διαδικτύου στην υπό μελέτη οικία, η συσκευή αποσυνδέθηκε. Λόγω της γεωγραφικής απόστασης του συγγραφέα, απαιτήθηκε η εκ νέου εγκατάσταση και ρύθμιση της συσκευής από τους ενοίκους. Δυστυχώς, η διαδικασία αυτή δεν κατέστη εφικτή, καθώς η επίσημη εφαρμογή της Edimax είχε στο μεταξύ αποσυρθεί από τα ψηφιακά καταστήματα λήψης εφαρμογών (app stores), ενώ και οι προσπάθειες εγκατάστασής της από εναλλακτικές πηγές δεν είχαν αποτέλεσμα. Συνεπώς, η καταγραφή των ρύπων διακόπηκε αναγκαστικά στις 19 Μαρτίου, μολονότι ο αρχικός σχεδιασμός προέβλεπε τη συνέχιση των μετρήσεων για τον μήνα Απρίλιο και ενδεχομένως τον Μάιο. Εντούτοις, θεωρείται ότι τα βασικά μοτίβα της ημερήσιας κατανομής των ρύπων, καθώς και οι κύριες πηγές τους, αποτυπώθηκαν επαρκώς.

Τέλος, η αδυναμία επιτόπιας φυσικής παρακολούθησης του υπό μελέτη χώρου από τον ερευνητή κατέστησε δυσχερή τη λεπτομερή αποτύπωση των δραστηριοτήτων των ενοίκων και την ακριβή συσχέτισή τους με τις εξάρσεις των ρύπων. Βασικές ρυπογόνες δραστηριότητες, όπως η χρήση προϊόντων καπνού και η συνάθροιση ατόμων, καταγράφηκαν μεν, αλλά χωρίς απόλυτη ακρίβεια ως προς τις λεπτομέρειές τους (π.χ. ακριβής αριθμός καπνιζόντων, ακριβείς ώρες προσέλευσης/αποχώρησης κ.α.). Συνεπώς, η σύνδεση των αυξημένων συγκεντρώσεων με συγκεκριμένα γεγονότα βασίστηκε στις αναφορές των ίδιων των ενοίκων.

5.3.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, θα ήταν ενδιαφέρον να υπάρχουν μετρήσεις από τον χώρο ύπνου των ενοίκων, όπου αρκετές φορές υπάρχει κλειστή πόρτα, συνεπώς ένας αισθητήρας σε ένα κεντρικό σημείο του σπιτιού να μην μπορεί να αποτυπώσει ορθά τις συγκεντρώσεις τις βραδινές ώρες.

Θα είχε επίσης αξία, παράλληλα με τους εσωτερικούς ρύπους, να γίνεται μία καταγραφή αντίστοιχων εξωτερικών ρύπων με ανάλογο μετρητή και υπολογισμός του εσωτερικού προς εξωτερικού φορτίου για κάθε ρύπο, ώστε να φανεί κατά πόσο αυτοί συσχετίζονται. Αν και

όπως αναφέρθηκε και στην παρούσα εργασία, οι εσωτερικοί ρύποι δεν επηρεάζονται απαραίτητα από το εξωτερικό περιβάλλον αλλά υπάρχουν ποικίλες «εσωτερικές» πηγές, θα ήταν σημαντικό να φανεί κατά πόσο αυτό ισχύει σε μία περιοχή όπως αυτή της υπό μελέτη οικίας, όπου αναφέρεται στον κεντρικό τομέα Αθηνών και πάνω από μία λεωφόρο με μεγάλο όγκο διερχόμενων αυτοκινήτων.

Με γνώμονα την εκπόνηση μελλοντικών μελετών που θα αξιοποιούν αντίστοιχες μεθοδολογίες μέτρησης της ποιότητας του εσωτερικού αέρα, κρίνεται σκόπιμη η ανάπτυξη ενός αυτοματοποιημένου εργαλείου ανάλυσης δεδομένων. Είτε με τη μορφή αυτόνομου λογισμικού είτε μέσω ενός τυποποιημένου υπολογιστικού φύλλου (π.χ. Microsoft Excel), σκοπός του εργαλείου θα είναι η άμεση επεξεργασία των καταγεγραμμένων επιπέδων των ρύπων στο χρονικό πλαίσιο που εντάσσονται. Η αυτοματοποιημένη εξαγωγή βασικών στατιστικών δεικτών (όπως μέσες και μέγιστες τιμές συγκέντρωσης) και των αντίστοιχων διαγραμμάτων, αφενός θα ελαχιστοποιούσε αισθητά τον χρόνο εκπόνησης της μελέτης και αφετέρου θα εξασφάλιζε ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς, καθιστώντας άμεσα συγκρίσιμα τα αποτελέσματα ερευνών που εκπονούνται από διαφορετικούς μελετητές αλλά σε παρόμοιο πλαίσιο.

Τέλος, θα ήταν σαφώς καλύτερο όσον αφορά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, οι μετρήσεις να αφορούν μεγαλύτερη περίοδο του έτους και αν είναι δυνατόν όλο το έτος, για να δούμε πως και αν επηρεάζουν οι εξωτερικές συνθήκες/διαφορετικές εποχές. Για παράδειγμα φάνηκε στην παρούσα εργασία ότι η σχετική υγρασία ήταν υψηλότερη από τα συνιστώμενα όρια κάποιους πιο κρύους μήνες αλλά δεν υπήρχαν ολοκληρωμένα δεδομένα και για τους προηγούμενους μήνες. Σε ένα άλλο υποθετικό παράδειγμα, πιο ζεστές μέρες πιθανόν να οδηγούσαν σε αερισμό για περισσότερες ώρες και χαμηλότερες συγκεντρώσεις ρύπων στο εσωτερικό της οικίας.

6. Σύνοψη

Από την ανάλυση που προηγήθηκε, συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχει έντονο πρόβλημα ή ανησυχία σχετικά με την ποιότητα του εσωτερικού αέρα της κατοικίας ώστε να πρέπει να

ληφθούν άμεσα μέτρα. Οι ένοικοι σύμφωνα με τις δηλώσεις τους, αερίζουν επαρκώς την κατοικία μέσα στην ημέρα κάτι σημαντικό όσον αφορά την ποιότητα εσωτερικού αέρα, ενώ συμβάλει στους χαμηλούς ρύπους και η πολύωρη απουσία τους από την κατοικία. Βέβαια, υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης, καθώς τα επίπεδα των ρύπων δεν ήταν πάντα εντός επιτρεπτών ορίων, με τα αιωρούμενα σωματίδια να παρουσιάζουν έντονες αιχμές.

Παρατηρήθηκε ότι οι ρύποι (όχι πάντα όλοι) αυξάνονται σε υψηλότερα επίπεδα κάποιες απογευματινές – βραδινές ώρες όπου γίνεται χρήση προϊόντων καπνού ενώ ανεβαίνουν πολύ περισσότερο πάνω από τα επιτρεπτά επίπεδα όταν αυτό συνδυάζεται με συνάθροιση αρκετών ατόμων. Μικρές αυξήσεις, κυρίως στο CO₂, υπήρχαν και τις πρωινές ώρες μετά τον βραδινό ύπνο των ενοίκων, κάτι αναμενόμενο αφού το βράδυ δεν υπήρχε αερισμός της οικίας. Παρόλα αυτά, οι αυξήσεις στους ρύπους αυτές τις ώρες, ήταν συνήθως εντός επιτρεπτών ορίων ή ελάχιστα πάνω και για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα.

Σημασία λοιπόν θα πρέπει να δοθεί στις αιχμές που παρουσιάζουν κάποιοι ρύποι και όχι τόσο στην μέση ημερήσια τιμή τους, εκτός βέβαια για την περίπτωση των PM_{2.5}, όπου και οι μέσες τιμές είναι υψηλές. Επιβεβαιώνεται από έρευνες ότι οι έντονες αιχμές στα αιωρούμενα σωματίδια δεν πρέπει να παραβληθούν, κάτι που μπορεί να συμβεί, ειδικά για τα PM₁₀ αν η ποιότητα του εσωτερικού αέρα κριθεί με βάση μόνο ημερήσιες μέσες τιμές ή μέσες μακροχρόνιες τιμές. Μάλιστα, με βάση την παρούσα εργασία, η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων ήταν και αυτή που παρουσίασε τις υψηλότερες τιμές πάνω από τα επιτρεπτά όρια.

Παρατηρήθηκαν και κάποιες αιχμές για τις ολικές πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOC), συνήθως συνδεδεμένες και αυτές με τη χρήση προϊόντων καπνού. Βέβαια, ο συνδυασμός της πολυπαραγοντικότητας του συγκεκριμένου δείκτη με την έλλειψη σαφούς θεσμοθετημένου ορίου, δυσκολεύει την εξαγωγή σαφών οδηγιών.

Τέλος, δεν θα πρέπει να παραληφθεί η παρουσία του κατοικίδιου (μικρού σκύλου), όπου η έντονη κίνησή του και η επαφή του με τα έπιπλα και το ξύλινο δάπεδο μπορεί να δημιουργήσει παραπάνω σκόνη, έκλυση σωματιδίων κ.α. που πιθανόν να αυξάνουν την συγκέντρωση ρύπων. Βέβαια η επίδραση αυτού δεν υπήρχε δυνατότητα να μετρηθεί.

7. Βιβλιογραφία

Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (2026). Ανακτήθηκε 10/02/2026 από το http://oldportal.emy.gr/emv/el/climatology/climatology_city

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (ΤΕΕ). (2017). *Τεχνική Οδηγία ΤΕΕ (TOTE) 20701-1/2017: Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης (KENAK)*. Αθήνα: ΤΕΕ. Ανακτήθηκε 1 Μαΐου, 2026, από <https://web.tee.gr/>

Abdel-Salam, M. M. M. (2022). Assessment of children's exposure to air pollutants in urban residences during the COVID-19 pandemic. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1050623>

Ad-hoc-Arbeitsgruppe IRK/AOLG. (2007). Beurteilung von Innenraumluftkontaminationen mittels Referenz- und Richtwerten: Gesundheitliche Bewertung von VOC in der Innenraumluft. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 50(7), 990–1005. <https://doi.org/10.1007/s00103-007-0290-y>

Ad-hoc-Arbeitsgruppe IRK/AOLG. (2008). Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 51(11), 1358–1369. <https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2>

Al Horr, Y., Arif, M., Kaushik, A., Mazroei, A., Katafygiotou, M., & Elsarrag, E. (2016). Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature. *Building and Environment*, 105, 369–389. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.001>

Ala-Kotila, P., Vainio, T., & Laamanen, J. (2020). The Influence of Building Renovations on Indoor Comfort—A Field Test in an Apartment Building. *Energies*, 13(18), 4958. <https://doi.org/10.3390/en13184958>

Alegría-Sala, A., Tardío, E. C., Casals, L. C., Macarulla, M., & Salom, J. (2022). CO2 Concentrations and Thermal Comfort Analysis at Onsite and Online Educational Environments. *International Journal of Environmental Research and Public Health/International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 16039–16039. <https://doi.org/10.3390/ijerph192316039>

Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., & Spengler, J. D. (2016). Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments. *Environmental Health Perspectives*, 124(6), 805–812. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>

Alonso-Blanco, E., Gómez-Moreno, F. J., Díaz-Ramiro, E., Fernández, J., Coz, E., Yagüe, C., Román-Cascón, C., Gómez-Garre, D., Narros, A., Borge, R., & Artíñano, B. (2025). Indoor/Outdoor Particulate Matter and Related Pollutants in a Sensitive Public Building in Madrid (Spain). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(8), 1175. <https://doi.org/10.3390/ijerph22081175>

Amoatey, P., Omidvarborna, H., Baawain, M. S., & Al-Mamun, A. (2018). Indoor air pollution and exposure assessment of the gulf cooperation council countries: A critical review. *Environment International*, 121, 491–506. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.09.043>

Amoatey, P., Omidvarborna, H., Baawain, M. S., Al-Mamun, A., Bari, A., & Kindzierski, W. B. (2020). Association between human health and indoor air pollution in the Gulf Cooperation

Council (GCC) countries: a review. *Reviews on Environmental Health*, 35(2), 157–171.
<https://doi.org/10.1515/reveh-2019-0065>

An, C., & Yamamoto, N. (2015). Fungal compositions and diversities on indoor surfaces with visible mold growths in residential buildings in the Seoul Capital Area of South Korea. *Indoor Air*, 26(5), 714–723. <https://doi.org/10.1111/ina.12261>

Anderson, J. O., Thundiyil, J. G., & Stolbach, A. (2011). Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health. *Journal of Medical Toxicology*, 8(2), 166–175. <https://doi.org/10.1007/s13181-011-0203-1>

Apte, M. G., Fisk, W. J., & Daisey, J. M. (2000). Associations Between Indoor CO₂ Concentrations and Sick Building Syndrome Symptoms in U.S. Office Buildings: An Analysis of the 1994-1996 BASE Study Data. *Indoor Air*, 10(4), 246–257.
<https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2000.010004246.x>

Arif, A. A., & Shah, S. M. (2007). Association between personal exposure to volatile organic compounds and asthma among US adult population. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 80(8), 711–719. <https://doi.org/10.1007/s00420-007-0183-2>

Arya, V. K., Rasheed, E. O., Amila, D., & Wilkinson, S. (2024). Comparative Analysis of Indoor Air Quality and Thermal Comfort Standards in School Buildings across New Zealand with Other OECD Countries. *Buildings*, 14(6), 1556–1556.
<https://doi.org/10.3390/buildings14061556>

ASHRAE. (2020). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Awad, J., & Jung, C. (2021). Evaluating the Indoor Air Quality after Renovation at the Greens in Dubai, United Arab Emirates. *Buildings*, 11(8), 353. <https://doi.org/10.3390/buildings11080353>

Azmi, A. E., Rashid, A. A., & Razak, A. A. (2022). An Assessment of Indoor Air Quality (IAQ) in Foundry Laboratory. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1019(1), 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1019/1/012046>

Baeza-Romero, M. T., Dudzinska, M. R., Torkmahalleh, M. A., Barros, N., Coggins, M. A., Ruzgar, D. G., Kildsgaard, I., Naseri, M., Rong, L., Saffell, J., Scutaru, A. M., & Staszowska, A. (2022). A review of critical residential buildings parameters and activities when investigating indoor air quality and pollutants. 32(11). <https://doi.org/10.1111/ina.13144>

Becher, R., Øvrevik, J., Schwarze, P., Nilsen, S., Hongslo, J., & Bakke, J. (2018). Do Carpets Impair Indoor Air Quality and Cause Adverse Health Outcomes: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2), 184. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020184>

Bekö, G., Carslaw, N., Fauser, P., Kauneliene, V., Nehr, S., Phillips, G., Saraga, D., Schoemaeker, C., Wierzbicka, A., & Querol, X. (2020). The past, present, and future of indoor air chemistry. *Indoor Air*, 30(3), 373–376. <https://doi.org/10.1111/ina.12634>

Berger, C., Mahdavi, A., Azar, E., Bandurski, K., Bourikas, L., Harputlugil, T., Hellwig, R. T., Rupp, R. F., & Schweiker, M. (2022). Reflections on the Evidentiary Basis of Indoor Air Quality Standards. *Energies*, 15(20), 7727. <https://doi.org/10.3390/en15207727>

Bikaki, M. A., Dounias, G., Cavoura, O., Farantos, G., Damikouka, I., & Evrenoglou, L. (2024). *Study of indoor air quality in school buildings in Argolida's Sector at the Region of Peloponnese in Greece and potential Health Risks*. *European Scientific Journal, ESJ*, 31, 111. Retrieved from <https://eujournal.org/index.php/esj/article/view/18323>.

Braubach, M., Algoet, A., Beaton, M., Lauriou, S., Héroux, M.-E. , & Krzyzanowski, M. (2012). Mortality associated with exposure to carbon monoxide in WHO European Member States. *Indoor Air*, 23(2), 115–125. <https://doi.org/10.1111/ina.12007>

Burr, M. L. (2001). Health Effects of Indoor Molds. *Reviews on Environmental Health*, 16(2). <https://doi.org/10.1515/reveh.2001.16.2.97>

Cao, S., Pu, Y., Gong, W., & Wang, Y. (2025). Effects of humidity control and simulated natural airflow on indoor dynamic thermal comfort. *Building Services Engineering Research and Technology*. <https://doi.org/10.1177/01436244251325186>

Chalvatzaki, E., Chatoutsidou, S., Lehtomäki, H., Almeida, S., Eleftheriadis, K., Hänninen, O., & Lazaridis, M. (2019). Characterization of Human Health Risks from Particulate Air Pollution in Selected European Cities. *Atmosphere*, 10(2), 96. <https://doi.org/10.3390/atmos10020096>

Cheng, C.-Y., Cheng, S.-Y., Chen, C.-C., Pan, H.-Y., Wu, K.-H., & Cheng, F.-J. (2019). Ambient air pollution is associated with pediatric pneumonia: a time-stratified case–crossover study in an urban area. *Environmental Health*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12940-019-0520-4>

Cincinelli, A., & Martellini, T. (2017). Indoor Air Quality and Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(11), 1286. <https://doi.org/10.3390/ijerph14111286>

Colton, M. D., MacNaughton, P., Vallarino, J., Kane, J., Bennett-Fripp, M., Spengler, J. D., & Adamkiewicz, G. (2014). Indoor Air Quality in Green Vs Conventional Multifamily Low-Income Housing. *Environmental Science & Technology*, 48(14), 7833–7841. <https://doi.org/10.1021/es501489u>

Dales, R., Liu, L., Wheeler, A. J., & Gilbert, N. L. (2008). Quality of indoor residential air and health. *Canadian Medical Association Journal*, 179(2), 147–152. <https://doi.org/10.1503/cmaj.070359>

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. *Environmental Research Letters*, 13(4), 045011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab047>

Delfino, R. J., Gong, H., Linn, W. S., Pellizzari, E. D., & Hu, Y. (2003). Asthma symptoms in Hispanic children and daily ambient exposures to toxic and criteria air pollutants. *Environmental Health Perspectives*, 111(4), 647–656. <https://doi.org/10.1289/ehp.5992>

Derbez, M., Berthineau, B., Cochet, V., Lethrosne, M., Pignon, C., Riberon, J., & Kirchner, S. (2014). Indoor air quality and comfort in seven newly built, energy-efficient houses in France. *Building and Environment*, 72, 173–187. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.10.017>

El-Sharkawy, M. F., & Noweir, M. E. H. (2014). Indoor air quality levels in a University Hospital in the Eastern Province of Saudi Arabia. *Journal of Family & Community Medicine*, 21(1), 39–47. <https://doi.org/10.4103/2230-8229.128778>

Environmental Protection Department, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region. (2019). Guidance Notes for the Management of Indoor Air Quality in Offices and Public Places. Ανακτήθηκε 28 Απριλίου, 2026, από https://www.iaq.gov.hk/common/form/GN_for_Managemnet_of_IAQ_eng.pdf

European Committee for Standardization (CEN). (2019). EN 16798-1:2019 - Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Brussels, Belgium: CEN

Farmer, D. K., Vance, M. E., Abbatt, J. P. D., Abeleira, A., Alves, M. R., Arata, C., Boedicker, E., Bourne, S., Cardoso-Saldaña, F., Corsi, R., DeCarlo, P. F., Goldstein, A. H., Grassian, V. H., Hildebrandt Ruiz, L., Jimenez, J. L., Kahan, T. F., Katz, E. F., Mattila, J. M., Nazaroff, W. W., & Novoselac, A. (2019). Overview of HOMEChem: House Observations of Microbial and Environmental Chemistry. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 21(8), 1280–1300. <https://doi.org/10.1039/c9em00228f>

Ferdyn-Grygierek, J., & Grygierek, K. (2024). Ventilation Methods for Improving the Indoor Air Quality and Energy Efficiency of Multi-Family Buildings in Central Europe. *Energies*, 17(9), 2232. <https://doi.org/10.3390/en17092232>

Ferguson, L., Taylor, J., Davies, M., Shrubsole, C., Symonds, P., & Dimitroulopoulou, S. (2020). Exposure to indoor air pollution across socio-economic groups in high-income countries: A scoping review of the literature and a modelling methodology. *Environment International*, 143, 105748. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105748>

Fernández-Agüera, J., Dominguez-Amarillo, S., Fornaciari, M., & Orlandi, F. (2019). TVOCs and PM 2.5 in Naturally Ventilated Homes: Three Case Studies in a Mild Climate. *Sustainability*, 11(22), 6225. <https://doi.org/10.3390/su11226225>

Földvály, V., Bekö, G., Langer, S., Arrhenius, K., & Petráš, D. (2017). Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia. *Building and Environment*, 122, 363–372. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.009>

Franco, A., & Schito, E. (2020). Definition of Optimal Ventilation Rates for Balancing Comfort and Energy Use in Indoor Spaces Using CO2 Concentration Data. *Buildings*, 10(8), 135. <https://doi.org/10.3390/buildings10080135>

Free Weather API (2026). Ανακτήθηκε 10/02/2026 από το <https://open-meteo.com>.

Goodarzi, F., Palaniappan, K., Pillay, M., & Mahmoud Ershadi. (2023). A scoping review of indoor air quality assessment in refurbished buildings. *Smart and Sustainable Built Environment*. <https://doi.org/10.1108/sasbe-12-2022-0264>

Götschi, T., Heinrich, J., Sunyer, J., & Künzli, N. (2008). Long-Term Effects of Ambient Air Pollution on Lung Function. *Epidemiology*, 19(5), 690–701. <https://doi.org/10.1097/ede.0b013e318181650f>

Haruna, U., Mohammed, M. A., & Ajibade, Y. A. (2024). Evaluating the impacts of printing operations on indoor air quality in a printing press. *Facilities*. <https://doi.org/10.1108/f-03-2024-0043>

He, C., Morawska, L., Hitchins, J., & Gilbert, D. (2004). Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. *Atmospheric Environment*, 38(21), 3405-3415. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.027>

Hernandez, G., Borge, R., Blanchon, D., & Berry, T.-A. (2025). Effects of Positive Pressure Ventilation System on Indoor Particulate Matter Concentrations in a Subtropical Climate. *Indoor Air*, 2025(1). <https://doi.org/10.1155/ina/7602803>

Hesarakis, A., Myhren, J. A., & Holmberg, S. (2015). Influence of different ventilation levels on indoor air quality and energy savings: A case study of a single-family house. *Sustainable Cities and Society*, 19, 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.08.004>

Holopainen, R., Salmi, K., Kähkönen, E., Pasanen, P., & Reijula, K. (2015). Primary energy performance and perceived indoor environment quality in Finnish low-energy and conventional houses. *Building and Environment*, 87, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.024>

Hualiang Lin, Kendra Ratnapradipa, Xiaojie Wang, Yonghui Zhang, Yanjun Xu, Zhenjiang Yao, Guanghui Dong, Tao Liu, Jessica Clark, Rebecca Dick, Jianpeng Xiao, Weilin Zeng, Xing Li, Zhengmin (Min) Qian, Wenjun Ma. (2017). Hourly peak concentration measuring the PM_{2.5}-mortality association: Results from six cities in the Pearl River Delta study. *Atmospheric Environment*, 161, 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.04.015>

Hulin, M., Caillaud, D., & Annesi-Maesano, I. (2010). Indoor air pollution and childhood asthma: variations between urban and rural areas. *Indoor Air*, 20(6), 502–514. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00673.x>

International Organization for Standardization. (2016). Air filters for general ventilation — Part 1: Technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM) (ISO Standard No. 16890-1:2016). Ανακτήθηκε 2 Μαΐου 2026. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:16890:-1:ed-1:v1:en>

Jing, S., Li, B., Tan, M., & Liu, H. (2012). Impact of Relative Humidity on Thermal Comfort in a Warm Environment. *Indoor and Built Environment*, 22(4), 598–607. <https://doi.org/10.1177/1420326x12447614>

Jo, J., Jo, B., Kim, J., Kim, S., & Han, W. (2020). Development of an IoT-Based Indoor Air Quality Monitoring Platform. *Journal of Sensors*, 2020, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2020/8749764>

Johnston, F. H., Salimi, F., Williamson, G. J., Henderson, S. B., Yao, J., Dennekamp, M., Smith, K., Abramson, M. J., & Morgan, G. G. (2019). Ambient Particulate Matter and Paramedic Assessments of Acute Diabetic, Cardiovascular, and Respiratory Conditions. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 30(1), 11–19. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000929>

Jung, C., & Al Qassimi, N. (2022). Investigating the Emission of Hazardous Chemical Substances from Mashrabiya Used for Indoor Air Quality in Hot Desert Climate. *Sustainability*, 14(5), 2842. <https://doi.org/10.3390/su14052842>

Jung, C., & Sami, N. (2023). Navigating dust storms and urban living: an analysis of particulate matter infiltration in Dubai's residences. *Frontiers in Built Environment*, 9. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1297520>

Kakoulli, C., Kyriacou, A., & Michaelides, M. P. (2022). A Review of Field Measurement Studies on Thermal Comfort, Indoor Air Quality and Virus Risk. *Atmosphere*, 13(2), 191. <https://doi.org/10.3390/atmos13020191>

Kao, L. W., & Nañagas, K. A. (2004). Carbon monoxide poisoning. *Emergency Medicine Clinics of North America*, 22(4), 985–1018. <https://doi.org/10.1016/j.emc.2004.05.003>

Kembel, S. W., Jones, E., Kline, J., Northcutt, D., Stenson, J., Womack, A. M., Bohannon, B. J., Brown, G. Z., & Green, J. L. (2012). Architectural design influences the diversity and structure of the built environment microbiome. *The ISME Journal*, 6(8), 1469–1479. <https://doi.org/10.1038/ismej.2011.211>

Kim, J., Jang, M., Choi, K., & Kim, K. (2019). Perception of indoor air quality (IAQ) by workers in underground shopping centers in relation to sick-building syndrome (SBS) and store type: a cross-sectional study in Korea. *BMC Public Health*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12889-019-6988-6>

Korjenic, A., Teblich, H., & Bednar, T. (2010). Increasing the indoor humidity levels in buildings with ventilation systems: Simulation aided design in case of passive houses. *Building Simulation*, 3(4), 295–310. <https://doi.org/10.1007/s12273-010-0015-2>

Kovesi, T., Gilbert, N. L., Stocco, C., Fugler, D., Dales, R. E., Guay, M., & Miller, J. D. (2007). Indoor air quality and the risk of lower respiratory tract infections in young Canadian Inuit children. *Canadian Medical Association Journal*, 177(2), 155–160. <https://doi.org/10.1503/cmaj.061574>

Krebs, B., Burney, J., Zivin, J. G., & Neidell, M. (2021). Using Crowd-Sourced Data to Assess the Temporal and Spatial Relationship between Indoor and Outdoor Particulate

Matter. *Environmental Science & Technology*, 55(9), 6107–6115.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.0c08469>

Kurmi, O. P., Lam, K. B. H., & Ayres, J. G. (2012). Indoor air pollution and the lung in low- and medium-income countries. *European Respiratory Journal*, 40(1), 239–254.
<https://doi.org/10.1183/09031936.00190211>

Leikauf, G. D., Kim, S.-H., & Jang, A.-S. (2020). Mechanisms of ultrafine particle-induced respiratory health effects. *Experimental & Molecular Medicine*, 52.
<https://doi.org/10.1038/s12276-020-0394-0>

Leung, D. Y. C. (2015). Outdoor-indoor air pollution in urban environment: challenges and opportunity. *Frontiers in Environmental Science*, 2.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00069>

Lingua, C., Crespi, G., Becchio, C., & Corgnati, S. P. (2023). Designing IAQ-Resilient Post-Pandemic Buildings. *Sustainability*, 15(3), 2187. <https://doi.org/10.3390/su15032187>

Liu, L., Rohdin, P., & Moshfegh, B. (2015). Evaluating indoor environment of a retrofitted multi-family building with improved energy performance in Sweden. *Energy and Buildings*, 102, 32–44. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.021>

Logue, J. M., Price, P. N., Sherman, M. H., & Singer, B. C. (2012). A Method to Estimate the Chronic Health Impact of Air Pollutants in U.S. Residences. *Environmental Health Perspectives*, 120(2), 216–222. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104035>

Long, C. M., Suh, H. H., Catalano, P. J., & Koutrakis, P. (2001). Using Time- and Size-Resolved Particulate Data To Quantify Indoor Penetration and Deposition Behavior.

Environmental Science & Technology, 35(10), 2089–2099.
<https://doi.org/10.1021/es001477d>

Loraas, D. M. (2024). Breathing Uneasily: Employees' Stories of Coping With Poor Indoor Air Quality in the Workplace. *HERD*. <https://doi.org/10.1177/19375867241248598>

Mannan, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2021). Indoor Air Quality in Buildings: A Comprehensive Review on the Factors Influencing Air Pollution in Residential and Commercial Structure. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(6), 3276. <https://doi.org/10.3390/ijerph18063276>

Mansouri, A., Wei, W., Alessandrini, J.-M., Mandin, C., & Blondeau, P. (2022). Impact of Climate Change on Indoor Air Quality: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 15616. <https://doi.org/10.3390/ijerph192315616>

Mattiuzzi, C., & Lippi, G. (2020). Worldwide epidemiology of carbon monoxide poisoning. *Human & Experimental Toxicology*, 39(4), 387–392. <https://doi.org/10.1177/0960327119891214>

Maung, T. Z., Bishop, J. E., Holt, E., Turner, A. M., & Pfrang, C. (2022). Indoor Air Pollution and the Health of Vulnerable Groups: A Systematic Review Focused on Particulate Matter (PM), Volatile Organic Compounds (VOCs) and Their Effects on Children and People with Pre-Existing Lung Disease. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(14), 8752. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148752>

McGill, G., Oyedele, L. O., & McAllister, K. (2015). An investigation of indoor air quality, thermal comfort and sick building syndrome symptoms in UK energy efficient homes. *Smart*

and Sustainable Built Environment, 4(3), 329–348. <https://doi.org/10.1108/sasbe-10-2014-0054>

Mendell, M. J., Mirer, A. G., Cheung, K., Tong, M., & Douwes, J. (2011). Respiratory and Allergic Health Effects of Dampness, Mold, and Dampness-Related Agents: A Review of the Epidemiologic Evidence. *Environmental Health Perspectives*, 119(6), 748–756. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002410>

Milner, J., Shrubsole, C., Das, P., Jones, B., Ridley, I., Chalabi, Z., Hamilton, I., Armstrong, B., Davies, M., & Wilkinson, P. (2014). Home energy efficiency and radon related risk of lung cancer: modelling study. *The BMJ*, 348. <https://doi.org/10.1136/bmj.f7493>

Ministry of Health, Labour and Welfare (MHLW), Japan. (2000). *Indoor Air Quality Guidelines*. Ανακτήθηκε 28 Απριλίου, 2026, από <https://www.mhlw.go.jp/english/policy/health-medical/pharmaceuticals/07.html>

Morawska, L., Ayoko, G., Bae, G., Buonanno, G., Chao, C., Clifford, S., ... & Wierzbicka, A. (2017). Airborne particles in indoor environment of homes, schools, offices and aged care facilities: The main routes of exposure. *Environment International*, 108, 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.07.025>

Moreno-Rangel, A., Musau, F., Sharpe, T., & McGill, G. (2021). Indoor Air Quality Assessment of Latin America's First Passivhaus Home. *Atmosphere*, 12(11), 1477. <https://doi.org/10.3390/atmos12111477>

Moreno-Rangel, A., Sharpe, T., McGill, G., & Musau, F. (2020). Indoor Air Quality in Passivhaus Dwellings: A Literature Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(13), 4749. <https://doi.org/10.3390/ijerph17134749>

Moriyama, M., Hugentobler, W. J., & Iwasaki, A. (2020). Seasonality of Respiratory Viral Infections. *Annual Review of Virology*, 7, 83–101. <https://doi.org/10.1146/annurev-virology-012420-022445>

Muindi, K., Egondi, T., Kimani-Murage, E., Rocklov, J., & Ng, N. (2014). “We are used to this”: a qualitative assessment of the perceptions of and attitudes towards air pollution amongst slum residents in Nairobi. *BMC Public Health*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/1471-2458-14-226>

Muindi, K., Kimani-Murage, E., Egondi, T., Rocklov, J., & Ng, N. (2016). Household Air Pollution: Sources and Exposure Levels to Fine Particulate Matter in Nairobi Slums. *Toxics*, 4(3), 12. <https://doi.org/10.3390/toxics4030012>

Newby, D. E., Mannucci, P. M., Tell, G. S., Baccarelli, A. A., Brook, R. D., Donaldson, K., Forastiere, F., Franchini, M., Franco, O. H., Graham, I., Hoek, G., Hoffmann, B., Hoylaerts, M. F., Künzli, N., Mills, N., Pekkanen, J., Peters, A., Piepoli, M. F., Rajagopalan, S., & Storey, R. F. (2014). Expert position paper on air pollution and cardiovascular disease. *European Heart Journal*, 36(2), 83–93. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehu458>

Nibe.eu. Τελευταία προσπέλαση, 2 Μαΐου 2026. <https://www.nibe.eu/>

Niculita-Hirzel, H. (2022). Latest Trends in Pollutant Accumulations at Threatening Levels in Energy-Efficient Residential Buildings with and without Mechanical Ventilation: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6), 3538–3538. <https://doi.org/10.3390/ijerph19063538>

Niculita-Hirzel, H., Yang, S., Jörin, C. H., Perret, V., Licina, D., & Pernot, J. G. (2020). Fungal Contaminants in Energy Efficient Dwellings: Impact of Ventilation Type and Level of Urbanization. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(14), 4936–4936. <https://doi.org/10.3390/ijerph17144936>

Nikolakou, M.-L., & Spyropoulos, G. (2023). Urban Air Quality in a Residential Building in Athens, Greece. *DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals)*, 153–153. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2023026153>

Noris, F., Adamkiewicz, G., Delp, W. W., Hotchi, T., Russell, M., Singer, B. C., Spears, M., Vermeer, K., & Fisk, W. J. (2013). Indoor environmental quality benefits of apartment energy retrofits. *Building and Environment*, 68, 170–178. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.07.003>

Noris, F., Delp, W. W., Vermeer, K., Adamkiewicz, G., Singer, B. C., & Fisk, W. J. (2013). Protocol for maximizing energy savings and indoor environmental quality improvements when retrofitting apartments. *Energy and Buildings*, 61, 378–386. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.046>

Ormandy, D., & Ezratty, V. (2012). Health and thermal comfort: From WHO guidance to housing strategies. *Energy Policy*, 49, 116–121. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.003>

Otaegi, J., Hernández, R. J., Oregi, X., Martín-Garín, A., & Rodríguez-Vidal, I. (2022). Comparative Analysis of the Effect of the Evolution of Energy Saving Regulations on the Indoor Summer Comfort of Five Homes on the Coast of the Basque Country. *Buildings*, 12(7), 1047. <https://doi.org/10.3390/buildings12071047>

Öz, E., Küçükkelepçe, O., Kurt, O., & Vural, A. (2023). Carbon monoxide poisoning: beyond survival - mortality, morbidities, and risk factors, a Turkey sample. *PeerJ*, 11, e16093–e16093. <https://doi.org/10.7717/peerj.16093>

Panaras, G., Gropca, R., & Papadopoulos, G. (2022). Ventilation requirements and energy aspects: the case of hospitals. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1123(1), 012042–012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1123/1/012042>

Park, J. S., Jee, N.-Y. ., & Jeong, J.-W. . (2014). Effects of types of ventilation system on indoor particle concentrations in residential buildings. *Indoor Air*, 24(6), 629–638. <https://doi.org/10.1111/ina.12117>

Park, S., Seok, J. K., Kwak, J. Y., Suh, H.-J., Kim, Y. M., & Boo, Y. C. (2016). Anti-Inflammatory Effects of Pomegranate Peel Extract in THP-1 Cells Exposed to Particulate Matter PM10. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2016, e6836080. <https://doi.org/10.1155/2016/6836080>

Pegas, P. N., Alves, C., Evtyugina, M., Nunes, T. G., Cerqueira, M. T., Franchi, M., Pio, C., Susana Marta Almeida, & Maria. (2010). *Indoor air quality in elementary schools of Lisbon in spring*. 33(5), 455–468. <https://doi.org/10.1007/s10653-010-9345-3>

Pelliccioni, A., Monti, P., Cattani, G., Boccuni, F., Cacciani, M., Cavaliere, C., Capone, P., Catrambone, M., Cusano, M., Maria Concetta D'Ovidio, Antonella De Santis, Annalisa Di Bernardino, A. Di Bucchianico, Simona Di Renzi, Ferrante, R., Gaeta, A., Gaddi, R., Gherardi, M., Giusto, M., & Gordiani, A. (2020). Integrated Evaluation of Indoor Particulate Exposure: The VIEPI Project. *Sustainability*, 12(22), 9758–9758. <https://doi.org/10.3390/su12229758>

Pettenkofer, M. von. (1858). *Besprechung Allgemeiner auf die Ventilation bezüglichher Fragen. Über den Luftwechsel in Wohngebäuden*. J.G. Cottaische Buchhandlung.

Pietrogrande, M. C., Casari, L., Demaria, G., & Russo, M. (2021). Indoor Air Quality in Domestic Environments during Periods Close to Italian COVID-19 Lockdown. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8), 4060. <https://doi.org/10.3390/ijerph18084060>

Pinault, L., Tjepkema, M., Crouse, D. L., Weichenthal, S., van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., Chen, H., & Burnett, R. T. (2016). Risk estimates of mortality attributed to low concentrations of ambient fine particulate matter in the Canadian community health survey cohort. *Environmental Health*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0111-6>

Prockop, L. D., & Chichkova, R. I. (2007). Carbon monoxide intoxication: An updated review. *Journal of the Neurological Sciences*, 262(1), 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2007.06.037>

Pulimeno, M., Piscitelli, P., Colazzo, S., Colao, A., & Miani, A. (2020). Indoor air quality at school and students' performance: Recommendations of the UNESCO Chair on Health Education and Sustainable Development & the Italian Society of Environmental Medicine (SIMA). *Health Promotion Perspectives*, 10(3), 169–174. <https://doi.org/10.34172/hpp.2020.29>

Putri, A. N. A. R., Salam, R. A., Rachmawati, L. M., Ramadhan, A., Adiwidya, A. S., Jalasena, A., & Chandra, I. (2022). *Spatial Modelling of Indoor Air Pollution Distribution at Home*. 2243(1), 012072–012072. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012072>

Rijal, H., Humphreys, M., & Nicol, F. (2015). Adaptive Thermal Comfort in Japanese Houses during the Summer Season: Behavioral Adaptation and the Effect of Humidity. *Buildings*, 5(3), 1037–1054. <https://doi.org/10.3390/buildings5031037>

Ristovski, Z. D., Miljevic, B., Surawski, N. C., Morawska, L., Fong, K. M., Goh, F., & Yang, I. A. (2012). Respiratory health effects of diesel particulate matter. *Respirology*, 17(2), 201–212. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1843.2011.02109.x>

Ruas, F., Mendonça, M. C., Real, F. C., Vieira, D. N., & Teixeira, H. M. (2014). Carbon monoxide poisoning as a cause of death and differential diagnosis in the forensic practice: A retrospective study, 2000–2010. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 24, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2014.02.002>

Rupp, R. F., Vásquez, N. G., & Lamberts, R. (2015). A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings*, 105, 178–205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>

Sakellaris, I., Saraga, D., Mandin, C., Roda, C., Fossati, S., de Kluizenaar, Y., Carrer, P., Dimitroulopoulou, S., Mihucz, V., Szigeti, T., Hänninen, O., de Oliveira Fernandes, E., Bartzis, J., & Bluysen, P. (2016). Perceived Indoor Environment and Occupants' Comfort in European “Modern” Office Buildings: The OFFICAIR Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(5), 444. <https://doi.org/10.3390/ijerph13050444>

Sánchez-Fernández, A., Coll-Aliaga, E., Lerma-Arce, V., & Lorenzo-Sáez, E. (2023). Evaluation of Different Natural Ventilation Strategies by Monitoring the Indoor Air Quality Using CO2 Sensors. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(18), 6757. <https://doi.org/10.3390/ijerph20186757>

Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., & Fisk, W. J. (2012). Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance. *Environmental Health Perspectives*, 120(12), 1671–1677. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>

Scheepers, P., Van Wel, L., Beckmann, G., & Anzion, R. (2017). Chemical Characterization of the Indoor Air Quality of a University Hospital: Penetration of Outdoor Air Pollutants. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(5), 497. <https://doi.org/10.3390/ijerph14050497>

Schwartz, J., Slater, D., Larson, T. V., Pierson, W. E., & Koenig, J. Q. (1993). Particulate Air Pollution and Hospital Emergency Room Visits for Asthma in Seattle. *American Review of Respiratory Disease*, 147(4), 826–831. <https://doi.org/10.1164/ajrccm/147.4.826>

Seguel, J. M., Merrill, R., Seguel, D., & Campagna, A. C. (2016). Indoor Air Quality. *American Journal of Lifestyle Medicine*, 11(4), 284–295. <https://doi.org/10.1177/1559827616653343>

Seppanen, O., & Fisk, W. J. (2002). Association of ventilation system type with SBS symptoms in office workers. *Indoor Air*, 12(2), 98–112. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2002.01111.x>

Settimo, G., Manigrasso, M., & Avino, P. (2020). Indoor Air Quality: A Focus on the European Legislation and State-of-the-Art Research in Italy. *Atmosphere*, 11(4), 370. <https://doi.org/10.3390/atmos11040370>

Sharpe, T., McGill, G., Dancer, S. J., King, M.-F. ., Fletcher, L., & Noakes, C. J. (2020). Influence of ventilation use and occupant behaviour on surface microorganisms in

contemporary social housing. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68809-2>

Simonson, C. J., Salonvaara, M., & Ojanen, T. (2002). The effect of structures on indoor humidity - possibility to improve comfort and perceived air quality. *Indoor Air*, 12(4), 243–251. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2002.01128.x>

Singer, B. C., Chan, W. R., Kim, Y., Offermann, F. J., & Walker, I. S. (2020). Indoor Air Quality in California Homes with Code-Required Mechanical Ventilation. *Indoor Air*. <https://doi.org/10.1111/ina.12676>

Singh, A., Syal, M., Grady, S. C., & Korkmaz, S. (2010). Effects of Green Buildings on Employee Health and Productivity. *American Journal of Public Health*, 100(9), 1665–1668. <https://doi.org/10.2105/ajph.2009.180687>

Singleton, R., Salkoski, A. J., Bulkow, L., Fish, C., Dobson, J., Albertson, L., Skarada, J., Kovesi, T., McDonald, C., Hennessy, T. W., & Ritter, T. (2016). Housing characteristics and indoor air quality in households of Alaska Native children with chronic lung conditions. *Indoor Air*, 27(2), 478–486. <https://doi.org/10.1111/ina.12315>

Sircar, K., Clower, J., Shin, M. K., Bailey, C., King, M., & Yip, F. (2015). Carbon monoxide poisoning deaths in the United States, 1999 to 2012. *The American Journal of Emergency Medicine*, 33(9), 1140–1145. <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2015.05.002>

Śmiełowska, M., Marć, M., & Zabiegała, B. (2017). Indoor air quality in public utility environments—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(12), 11166–11176. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8567-7>

Spentzou, E., Cook, M. J., & Emmitt, S. (2017). Natural ventilation strategies for indoor thermal comfort in Mediterranean apartments. *Building Simulation*, 11(1), 175–191. <https://doi.org/10.1007/s12273-017-0380-1>

Stamp, S., Burman, E., Shrubsole, C., Chatzidiakou, L., Mumovic, D., & Davies, M. (2021). Seasonal variations and the influence of ventilation rates on IAQ: A case study of five low-energy London apartments. *Indoor and Built Environment*, 1420326X2110171. <https://doi.org/10.1177/1420326x211017175>

Strak, M., Weinmayr, G., Rodopoulou, S., Chen, J., de Hoogh, K., Andersen, Z. J., Atkinson, R., Bauwelinck, M., Bekkevold, T., Bellander, T., Boutron-Ruault, M.-C., Brandt, J., Cesaroni, G., Concin, H., Fecht, D., Forastiere, F., Gulliver, J., Hertel, O., Hoffmann, B., & Hvidtfeldt, U. A. (2021). Long term exposure to low level air pollution and mortality in eight European cohorts within the ELAPSE project: pooled analysis. *BMJ (Clinical Research Ed.)*, 374, n1904. <https://doi.org/10.1136/bmj.n1904>

Strøm, B. S., Ytrehus, S., & Grov, E.-K. (2016). Sensory stimulation for persons with dementia: a review of the literature. *Journal of Clinical Nursing*, 25(13-14), 1805–1834. <https://doi.org/10.1111/jocn.13169>

Strøm-Tejsen, P., Zukowska, D., Wargocki, P., & Wyon, D. P. (2015). The effects of bedroom air quality on sleep and next-day performance. *Indoor Air*, 26(5), 679–686. <https://doi.org/10.1111/ina.12254>

Sugiarto, E., Sundari, C. D., Chandra, I., Bangun, T. A., Saefullah, A., & Rabbani, S. M. (2025). An Implementation of PM_{2.5} Microsensors in an Indoor Air Quality Monitoring System Based on Wireless Sensor Networks. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1448(1), 012010–012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1448/1/012010>

Sun, X., Gou, Z., & Lau, S. S.-Y. (2018). Cost-effectiveness of active and passive design strategies for existing building retrofits in tropical climate: Case study of a zero energy building. *Journal of Cleaner Production*, 183, 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.137>

Sundell, J., Levin, H., Nazaroff, W. W., Cain, W. S., Fisk, W. J., Grimsrud, D. T., Gyntelberg, F., Li, Y., Persily, A. K., Pickering, A. C., Samet, J. M., Spengler, J. D., Taylor, S. T., & Weschler, C. J. (2011). Ventilation rates and health: multidisciplinary review of the scientific literature. *Indoor Air*, 21(3), 191–204. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00703.x>

Szabados, M., Csákó, Z., Kotlík, B., Kazmarová, H., Kozajda, A., Jutraz, A., Kukec, A., Otorepec, P., Dongiovanni, A., Di Maggio, A., Fraire, S., & Szigeti, T. (2021). Indoor air quality and the associated health risk in primary school buildings in Central Europe – The InAirQ study. *Indoor Air*, 31(4), 989–1003. <https://doi.org/10.1111/ina.12802>

Tahsiin, F., Anggraeni, L., Chandra, I., Salam, I., & Bethaningtyas, H. (2020). *Analysis of Indoor Air Quality Based on Low-Cost Sensors*. 10(6), 2627–2627. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.10.6.12989>

Taylor, J., Mavrogianni, A., Davies, M., Das, P., Shrubsole, C., Biddulph, P., & Oikonomou, E. (2015). Understanding and mitigating overheating and indoor PM_{2.5} risks using coupled temperature and indoor air quality models. *Building Services Engineering Research and Technology*, 36(2), 275–289. <https://doi.org/10.1177/0143624414566474>

Taylor, J., Shrubsole, C., Davies, M., Biddulph, P., Das, P., Hamilton, I., Vardoulakis, S., Mavrogianni, A., Jones, B., & Oikonomou, E. (2014). The modifying effect of the building envelope on population exposure to PM_{2.5} from outdoor sources. *Indoor Air*, 24(6), 639–651. <https://doi.org/10.1111/ina.12116>

Thangavel, P., Park, D., & Lee, Y.-C. (2022). Recent Insights into Particulate Matter (PM_{2.5})-Mediated Toxicity in Humans: An Overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9223652/>

Tofful, L., Perrino, C., & Canepari, S. (2020). Comparison Study between Indoor and Outdoor Chemical Composition of PM_{2.5} in Two Italian Areas. *Atmosphere*, 11(4), 368. <https://doi.org/10.3390/atmos11040368>

Tran, V. V., Park, D., & Lee, Y.-C. (2020). Indoor Air Pollution, Related Human Diseases, and Recent Trends in the Control and Improvement of Indoor Air Quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2927. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082927>

Vardoulakis, S., Giagloglou, E., Steinle, S., Davis, A., Smeuwenhoek, A., Galea, K. S., Dixon, K., & Crawford, J. O. (2020). Indoor Exposure to Selected Air Pollutants in the Home Environment: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(23). <https://doi.org/10.3390/ijerph17238972>

Wallner, P., Munoz, U., Tappler, P., Wanka, A., Kundi, M., Shelton, J. F., & Hutter, H.-P. (2015). Indoor Environmental Quality in Mechanically Ventilated, Energy-Efficient Buildings vs. Conventional Buildings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(11), 14132–14147. <https://doi.org/10.3390/ijerph121114132>

Wang, X., Xu, Z., Su, H., Ho, H. C., Song, Y., Zheng, H., Hossain, M. Z., Khan, M. A., Bogale, D., Zhang, H., Wei, J., & Cheng, J. (2021). Ambient particulate matter (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀) and childhood pneumonia: The smaller particle, the greater short-term impact?

Science of the Total Environment, 772, 145509.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145509>

Wargocki, P., Sundell, J., Bischof, W., Brundrett, G., Fanger, P. O., Gynzelberg, F., Hanssen, S. O., Harrison, P., Pickering, A., Seppanen, O., & Wouters, P. (2002). Ventilation and health in non-industrial indoor environments: report from a European Multidisciplinary Scientific Consensus Meeting (EUROVEN). *Indoor Air*, 12(2), 113–128.
<https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2002.01145.x>

Weaver, L. K., Hopkins, R. O., Chan, K. J., Churchill, S., Elliott, C. G., Clemmer, T. P., Orme, J. F., Thomas, F. O., & Morris, A. H. (2002). Hyperbaric Oxygen for Acute Carbon Monoxide Poisoning. *New England Journal of Medicine*, 347(14), 1057–1067.
<https://doi.org/10.1056/nejmoa013121>

Wei, W., Ramalho, O., & Mandin, C. (2015). Indoor air quality requirements in green building certifications. *Building and Environment*, 92, 10–19.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.035>

WHO. (2021). Global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Ανακτήθηκε 19 Απριλίου, 2026.
<https://iris.who.int/handle/10665/345329>

WHO. (2010). guidelines for indoor air quality: selected pollutants. Geneva: World Health Organization. Ανακτήθηκε 20 Απριλίου, 2026, από <https://iris.who.int/handle/10665/260127>

Wu, L., & Wang, R. (2005). Carbon Monoxide: Endogenous Production, Physiological Functions, and Pharmacological Applications. *Pharmacological Reviews*, 57(4), 585–630.
<https://doi.org/10.1124/pr.57.4.3>

Xin Lv. κ.α. (2023). Hourly Air Pollution Exposure and Emergency Hospital Admissions for Stroke: A Multicenter Case-Crossover Study. *Stroke*, 54(12), 3038–3045. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.123.044191>

Yang, W., Sohn, J., Kim, J., Son, B., & Park, J. (2009). Indoor air quality investigation according to age of the school buildings in Korea. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 348–354. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.10.003>

Yang, Z., Gao, W., Yang, D., Hu, X., & Xu, T. (2024). Impact of Air Velocity on Mold Growth in High Temperature and Humidity Conditions: An Experimental Approach. *Buildings*, 14(7), 2145–2145. <https://doi.org/10.3390/buildings14072145>

Zhang, F., Liu, S., Hu, W., & Yadav, M. (2022). Editorial: Effects of indoor environmental quality on human performance and productivity. *Frontiers in Built Environment*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1095443>

Zhang, W., Wu, Y., & Calautit, J. K. (2022). A review on occupancy prediction through machine learning for enhancing energy efficiency, air quality and thermal comfort in the built environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112704. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112704>

Zhang, X., Liang, J., Wang, B., Lv, Y., & Xie, J. (2020). Indoor Air Design Parameters of Air Conditioners for Mold-Prevention and Antibacterial in Island Residential Buildings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(19), 7316. <https://doi.org/10.3390/ijerph17197316>

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.