

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ



ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ

ΤΟΜΕΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ
ΓΡΑΦΕΙΩΝ ΒΑΣΕΙ ΚΑΜΠΑΝΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΕΝΟΣ ΕΤΟΥΣ**

ASSESSMENT OF IEQ ON AN OFFICE BUILDING BASED ON ONE YEAR
EXPERIMENTAL MEASUREMENTS

ΚΑΠΕΛΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΠΑΝΑΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΚΟΖΑΝΗ (ΙΟΥΛΙΟΣ 2024)

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας τα έτη 2023-2024 με επιβλέπων τον αναπληρωτή Καθηγητή κ. Γεώργιο Πανάρα, τον οποίο θα ήθελα και να ευχαριστήσω θερμά για την εμπιστοσύνη, τη συνεργασία και την καθοδήγηση κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά και κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου στη σχολή.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Ιωάννη Παπαδόπουλο, υποψήφιο διδάκτορα του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας για την συνεργασία, την καθοδήγηση και τις συμβουλές του κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας, καθώς η αρωγή του ήταν καθοριστική για να επιτευχθεί αυτό το αποτέλεσμα. Επιπλέον, θα ήθελα να του ευχηθώ καλή επιτυχία στην ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής του.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου για τις συμβουλές, την καθοδήγηση και τις γνώσεις που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου στο τμήμα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους φίλους και τους συμφοιτητές μου για τη συμπαράσταση και τη στήριξη που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στην Κοζάνη.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος κτιρίου γραφείων. Στα πλαίσια ερευνών που γίνονται τα τελευταία χρόνια από το Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας (ΠΔΜ) για την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος ενός χώρου, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε χώρους του κτιρίου ΕΚΕΤΑ/ΙΔΕΠ που βρίσκεται στην Πτολεμαΐδα του νομού Κοζάνης και είχαν διάρκεια μεγαλύτερη του ενός έτους. Πιο συγκεκριμένα μετρήθηκαν και καταγράφηκαν με χρήση κατάλληλων οργάνων οι τιμές της θερμοκρασίας του αέρα, της σχετικής υγρασίας και της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) για 3 γραφεία στο ισόγειο και 3 γραφεία στον 1^ο όροφο του κτιρίου αυτού. Ακόμη, για ένα εκ των γραφείων του 1^{ου} ορόφου, μετρήθηκαν και καταγράφηκαν επιπλέον η ταχύτητα του ανέμου και η επιφανειακή θερμοκρασία της κάθε επιφάνειας που περικλείει το γραφείο. Βάσει των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν και με την αξιοποίηση του μοντέλου του Fanger για 2 σενάρια, υπολογίστηκαν οι δείκτες θερμικής άνεσης Predicted Mean Vote (PMV) και Predicted Percent of Dissatisfied (PPD) στο κάθε γραφείο. Με χρήση αυτών των δεικτών εκτιμήθηκε η άνεση του κάθε γραφείου. Επιπλέον βάσει των μετρήσεων CO₂ εκτιμήθηκε ο αερισμός που πραγματοποιήθηκε σε ορισμένα γραφεία για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Τέλος για το ίδιο κτίριο και τα ίδια γραφεία με χρήση του λογισμικού CONTAM έγινε υπολογιστική διερεύνηση των συνθηκών αερισμού. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με αυτά των πειραματικών μετρήσεων.

Λέξεις Κλειδιά

Ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος, Αερισμός, Θερμική άνεση, CO₂, Μετρήσεις 1 έτους, Μοντέλο Fanger, CONTAM

Abstract

This thesis aims at the experimental and computational investigation of the quality of the internal environment of an office building. In the context of research carried out in recent years at the University of Western Macedonia (UOWM) on the quality of the indoor environment, measurements were conducted in the premises of the National Center for Research and Technology Development/Chemical Processes and Energy Resources Institute building located in Ptolemaida, Kozani prefecture, and they lasted more than one year. More specifically, the values of air temperature, relative humidity and carbon dioxide (CO₂) concentration were measured and recorded using appropriate instruments for 3 offices on the ground floor and 3 offices on the 1st floor of this building. Furthermore, for one of the offices on the 1st floor, the wind speed and the surface temperature of each surface that encloses the office were additionally measured and recorded. Based on the measurements carried out and using the Fanger model through a script in Matlab for 2 scenarios, the thermal comfort indices Predicted Mean Vote (PMV) and Predicted Percent of Dissatisfied (PPD) were calculated in each office. Using these indicators, the comfort of each office was assessed. In addition, based on the CO₂ measurements, the ventilation rate in certain offices for specific periods of time was estimated. Finally, for the same building and the same offices, a computational investigation of the ventilation conditions was carried out using the CONTAM software. The obtained results were compared with those of the experimental measurements.

Key Words

Indoor environment quality (IEQ), Ventilation, Thermal comfort, CO₂, 1 year measurements, Fanger model, CONTAM

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	2
Λέξεις Κλειδιά	2
Abstract	3
Key Words.....	3
1. Εισαγωγή	6
2. Βιβλιογραφική διερεύνηση	7
2.1 Θερμική άνεση.....	7
2.2 Το μοντέλο του Fanger	15
2.3 Δείκτες TSV/TPV/TA.....	19
2.4 Αερισμός και ποιότητα αέρα	21
2.5 Μέθοδοι υπολογισμού εναλλαγών αέρα (ACH).....	25
2.5.1 Μέθοδος Σταθερής Κατάστασης (Steady – State).....	25
2.5.2 Μέθοδος Απομείωσης (Decay)	26
2.5.3 Μέθοδος Συσσώρευσης (Build-Up)	26
3. Μεθοδολογία μετρήσεων.....	28
3.1 Περιγραφή κτιρίου μελέτης.....	28
3.1.1 Το αρχικό κτίριο	30
3.1.2 Το κτίριο μετά το 2022	33
3.2 Μετρήσεις στο εσωτερικό περιβάλλον	37
3.3 Όργανα μετρήσεων.....	40
3.3.1 Μετεωρολογικός σταθμός	40
3.3.2 Όργανα μέτρησης εσωτερικών συνθηκών	42
3.3.3 Βαθμονόμηση μετρητικών οργάνων	45
4. Πειραματικές μετρήσεις.....	49
4.1 Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων.....	50
4.2 Εφαρμογή του μοντέλου του Fanger	65
4.3 Αποτελέσματα δεικτών PMV από το μοντέλο του Fanger	66
4.4 Πειραματικός υπολογισμός του αερισμού με βάση το CO ₂	76
4.5 Αποτελέσματα πειραματικού υπολογισμού του αερισμού με βάση το CO ₂	80
4.6 Ερωτηματολόγια	73

5. Προσομοιώσεις στο λογισμικό CONTAM	83
6. Συμπεράσματα	111
7. Μελλοντική έρευνα.....	112
Παράρτημα I	113
Παράρτημα II	119
Παράρτημα III	121
Παράρτημα IV	133
Βιβλιογραφία	137

1. Εισαγωγή

Οι συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό περιβάλλον ενός χώρου έχουν αρχίσει να αποτελούν αντικείμενο έρευνας και μελέτης το τελευταίο χρονικό διάστημα, ιδιαίτερα την εποχή μετά την καραντίνα, εξαιτίας της πανδημίας του COVID-19, αφού οι άνθρωποι βρίσκονται όλο και περισσότερο χρόνο σε εσωτερικούς χώρους. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι κοινόχρηστοι χώροι, όπου η πρόσβαση είναι εύκολη. Ένας τέτοιος χώρος είναι και τα κτίρια που χρησιμοποιούνται ως γραφεία. Οι χώροι αυτοί αποτελούν συνήθως το χώρο εργασίας του ανθρώπου, όπου και βρίσκονται για αρκετές ώρες την ημέρα. Οι συνθήκες που επικρατούν σε ένα χώρο εργασίας μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά τόσο την παραγωγικότητα, όσο και την αποδοτικότητα του εργαζομένου. Συνεπώς είναι σημαντικό σε τέτοιου είδους χώρους να υπάρχει ένα κατάλληλο αλλά και ευχάριστο περιβάλλον.

Οι συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό ενός χώρου επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, όπως οι άνθρωποι που βρίσκονται μέσα στο χώρο, τα συστήματα θέρμανσης-ψύξης-κλιματισμού, ο προσανατολισμός και η γεωγραφική θέση του κτιρίου, το άνοιγμα των παραθύρων και άλλα. Οι συνθήκες που χαρακτηρίζονται ως κατάλληλες ή ως ευχάριστες περιγράφονται σε πρότυπα τα οποία προκύπτουν μέσα από μελέτες. Τα πρότυπα αυτά αναθεωρούνται συχνά, καθώς αλλάζουν τα δεδομένα της εποχής, όπως κατά την περίοδο έξαρσης του COVID-19. Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων το επίπεδο θορύβου (ακουστική άνεση), τη θερμοκρασία του αέρα (θερμική άνεση), το φωτισμό και τη φωτεινότητα (οπτική άνεση) και την ποιότητα (καθαρότητα) του αέρα.

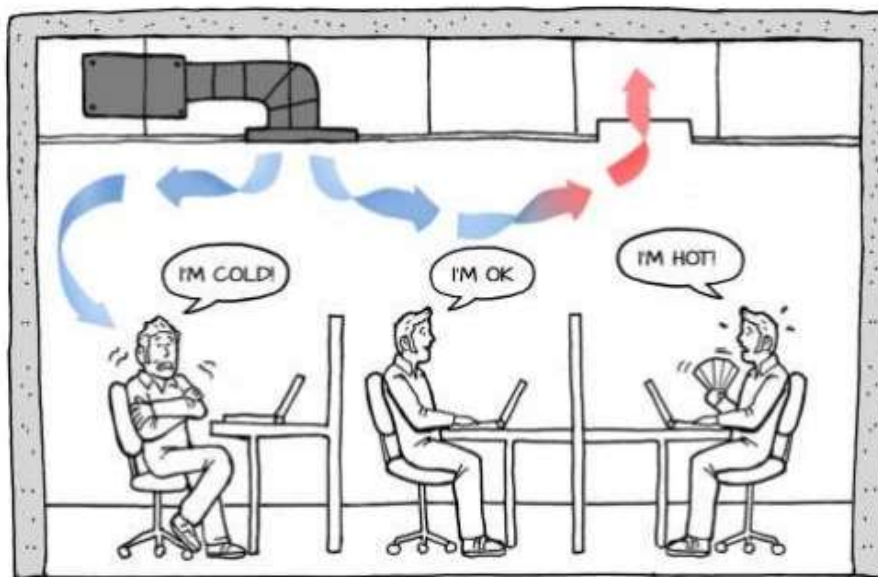
Πιο συγκεκριμένα, για τον σχεδιασμό κτιρίων και την ορθή διαστασιολόγηση συστημάτων θέρμανσης-ψύξης-κλιματισμού δωματίων, χρησιμοποιούνται τα κριτήρια θερμικής άνεσης (ελάχιστη λειτουργική θερμοκρασία δωματίου το χειμώνα, μέγιστη θερμοκρασία δωματίου το καλοκαίρι) ως δεδομένα προκειμένου να βρεθούν τα θερμικά και ψυκτικά φορτία. Τις θερμοκρασίες αυτές επηρεάζουν οι ανάγκες για αερισμό του χώρου στην εκάστοτε εποχή, καθώς ο νωπός αέρας βρίσκεται συνήθως σε διαφορετική θερμοκρασία από την επιθυμητή.

Τα κτίρια είναι ένας κλάδος της επιστήμης του μηχανικού, που ίσως να μην αναπτύσσεται με την ίδια ταχύτητα όσο άλλοι, ωστόσο αποτελεί αντικείμενο ενασχόλησης και μελέτης πολλών μηχανικών ανά τον κόσμο. Στην εποχή αυτή έχουν αναπτυχθεί διάφορα λογισμικά που διευκολύνουν τις μελέτες και ιδιαίτερα σε κτίρια. Λαμβάνοντας ως ορίσματα συγκεκριμένα δεδομένα, έχουν την ικανότητα να προσομοιάσουν τις συνθήκες που επικρατούν σε έναν χώρο σε πολύ ικανοποιητικό επίπεδο. Έτσι δίνεται η δυνατότητα να υπάρχει μία σαφής εικόνα για το κτίριο, χωρίς την ανάγκη για μετρήσεις και πειράματα, ή με την ανάγκη περιορισμένων μετρήσεων. Τα λογισμικά αυτά καθιστούν το έργο του μηχανικού πιο αποδοτικό και αποτελούν λυδία λίθο για ερευνητικά προγράμματα. Ενδεικτικά, λογισμικά για αυτή τη χρήση είναι το DesignBuilder, το EnergyPlus και το CONTAM. Τα παραπάνω μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο μεμονωμένα σε μία μελέτη, όσο και συνδυαστικά παρέχοντας μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία στη μελέτη. Στη συγκεκριμένη μελέτη που αφορά το κτίριο του ΕΚΕΤΑ/ΙΔΕΠ χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CONTAM για τη σύγκριση των πραγματικών μετρήσεων με αυτές που απέδωσε το παραπάνω μέσω της προσομοίωσης.

2. Βιβλιογραφική διερεύνηση

2.1 Θερμική άνεση

Η θερμική άνεση ορίζεται ως η επιθυμητή κατάσταση του νου που βιώνει ένα άτομο σε σχέση με το πόσο ζεστό ή κρύο και υγρό ή ξηρό αισθάνεται αυτό άτομο (ANSI/ASHRAE, 2023). Η θερμική άνεση, δηλαδή, εκφράζει σύμφωνα με την Αμερικανική Επιστημονική Ένωση Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning - ASHRAE), την ψυχολογική κατάσταση κατά την οποία το άτομο δεν επιθυμεί καμία θερμική μεταβολή στο εσωτερικό περιβάλλον. Η κατάσταση αυτή φυσικά μπορεί να διαφέρει από άνθρωπο σε άνθρωπο. Έτσι λοιπόν για ένα σύνολο ατόμων που βρίσκεται ταυτόχρονα στον ίδιο χώρο και στις ίδιες συνθήκες, είναι σχεδόν απίθανο η κάθε μονάδα αυτού του συνόλου να έχει την ίδια ικανοποίηση για το εσωτερικό περιβάλλον.



Εικόνα 1: Παράδειγμα διαφορετικής επιθυμητής θερμοκρασίας για κάθε άτομο (Πηγή: <https://www.autodesk.com/>)

Μελέτες σε κτίρια γραφείων έχουν δείξει ότι οι προσδοκίες των ανθρώπων σχετικά με το θερμικό περιβάλλον μπορεί να διαφέρουν για κτίρια με εγκατεστημένη μηχανική ψύξη και κτίρια όπου ο ένοικος έχει μόνο τη δυνατότητα να ανοίξει παράθυρα για να επηρεάσει το θερμικό περιβάλλον (Brager & de Dear, 1998). Επομένως, τα κριτήρια σχεδιασμού είναι διαφορετικά για τους δύο τύπους κτιρίων γραφείων

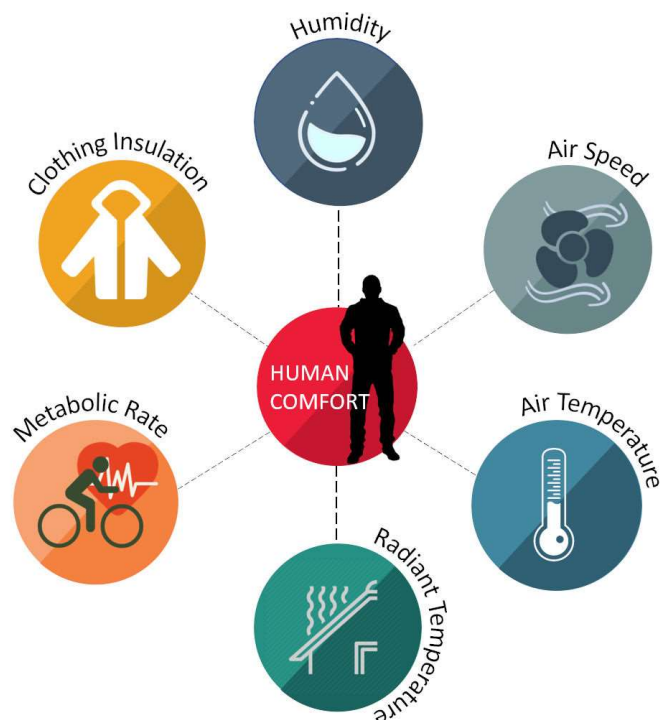
Αν και είναι δύσκολο να επιτευχθεί καθολική ικανοποίηση θερμικής άνεσης σε έναν συγκεκριμένο χώρο, είτε λόγω προσωπικών, είτε λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων, έχουν οριστεί συνθήκες ικανοποιητικές για ένα μεγάλο ποσοστό ανθρώπων. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική άνεση είναι οι εξής:

1) Περιβαλλοντικοί (Φυσικοί)

- ❖ Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα
- ❖ Ταχύτητα εσωτερικού αέρα
- ❖ Θερμοκρασία ακτινοβολίας
- ❖ Σχετική υγρασία

2) Προσωπικοί

- ❖ Ρυθμός μεταβολισμού
- ❖ Ενδυμασία



Εικόνα 2: Παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική άνεση (Hanwate Ankit, 2021)

- ❖ Θερμοκρασία αέρα

Ως θερμοκρασία αέρα ορίζεται «η θερμοκρασία ξηρού βολβού του αέρα που περιβάλλει τους χρήστες ενός χώρου» (ASHRAE 55, 2023).

- ❖ Ταχύτητα εσωτερικού αέρα

Είναι η μέση στιγμιαία ταχύτητα αέρα που περιβάλλει ένα άτομο σε σχέση με την τοποθεσία και το χρόνο (ANSI/ASHRAE 55, 2023)

- ❖ Θερμοκρασία ακτινοβολίας

Η μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία «Ορίζεται ως η ομοιόμορφη επιφανειακή θερμοκρασία ενός φανταστικού μαύρου κελύφους που θα προκαλέσει την ίδια ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ ατόμου και αυτού με αυτήν που λαμβάνει χώρα στις εξεταζόμενες συνθήκες» (ANSI/ASHRAE 55, 2023).

- ❖ Σχετική υγρασία

Σχετική υγρασία (Relative Humidity - RH) ορίζουμε την αναλογία της ποσότητας υδρατμών στον αέρα προς την ποσότητα υδρατμών που θα περιείχε αν ήταν κορεσμένος στις ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία ξηρού βολβού για να περιγράψει μια συγκεκριμένη κατάσταση αέρα.

- ❖ Ρυθμός μεταβολισμού

Ο ρυθμός μετατροπής της χημικής ενέργειας σε θερμότητα και μηχανικό έργο ενός ατόμου, εξαιτίας των χημικών αντιδράσεων από τις μεταβολικές δραστηριότητες (ANSI/ASHRAE 55, 2023). Επειδή συνήθως

η θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος είναι υψηλότερη από αυτή του περιβάλλοντα χώρου, οι αντιδράσεις αυτές πραγματοποιούνται με στόχο την αντιστάθμιση των απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον.

❖ Ενδυμασία

Η ενδυμασία είναι ένας τρόπος να περιοριστούν οι θερμικές απώλειες από το σώμα προς το περιβάλλον. Ο ρουχισμός δηλαδή αποτελεί ένα είδος θερμικής αντίστασης στην ροή θερμότητας από το σώμα προς το περιβάλλον. Η θερμική αντίσταση αυτή εξαρτάται τόσο από το υλικό του ενδύματος όσο και το πάχος του και μετριέται σε clo. Χρησιμοποιείται για να εκφράσει τη θερμική μόνωση που παρέχει το επίπεδο ρουχισμού, ενώ 1 clo ισοδυναμεί με 0,155 m²K/W (ANSI/ASHRAE 55, 2023). Η παράμετρος αυτή είναι εύκολο να τροποποιηθεί χωρίς να υπάρχει ενεργειακό κόστος, δηλαδή να μεταβληθεί ο ρουχισμός αντί για τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Η μέτρηση και η αξιολόγηση της θερμικής άνεσης του εσωτερικού περιβάλλοντος παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των επιπτώσεών της στην ευημερία των ενοίκων και στην κατανάλωση ενέργειας των κτιρίων. Συσχετίζεται αυστηρά με περιβαλλοντικούς και προσωπικούς παράγοντες και για την διαχείρισή της, τα κτίρια είναι εξοπλισμένα με συστήματα θέρμανσης-ψύξης ή και κάποια από αυτά με HVAC που δρουν σε μία ή περισσότερες περιβαλλοντικές παραμέτρους. Κατά συνέπεια, ο αντίκτυπος για τη διατήρηση της θερμικής άνεσης στο δομημένο περιβάλλον αντανακλάται στην ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Πιο συγκεκριμένα να αναφερθεί πως τα κτίρια ευθύνονται για το 40% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας και περίπου το ήμισυ οφείλεται στην ενεργοποίηση των συστημάτων HVAC, συμβάλλοντας σε μεγάλο βαθμό σε μεγαλύτερες εκπομπές αερίου CO₂ (European Commission, 2023, Ben-David & Waring, 2016).

Η θερμική άνεση αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο σχεδιασμό και τη λειτουργία των κτιρίων. Τα αποτελέσματα μελετών δείχνουν ότι ένας συνδυασμός παθητικών και ενεργητικών στρατηγικών θέρμανσης και ψύξης μπορεί να επιτύχει τη βέλτιστη θερμική άνεση.

Οι μεταβολικές δραστηριότητες του ανθρώπινου σώματος έχουν ως αποτέλεσμα κυρίως παραγωγή θερμότητας, η οποία πρέπει να διαχέεται και να ρυθμίζεται προκειμένου να διατηρείται φυσιολογική η θερμοκρασία του. Ανεπαρκής απώλεια θερμότητας οδηγεί σε υπερθερμία, ενώ υπερβολική απώλεια θερμότητας οδηγεί σε υποθερμία (ANSI/ASHRAE Handbook Fundamentals, 2021).

Η ανταλλαγή θερμότητας ανάμεσα στο ανθρώπινο σώμα και το περιβάλλον του γίνεται με πολλούς τρόπους (Κοτσίρης, 2007):

- 1) Με μεταφορά ή συναγωγή από το ανθρώπινο σώμα στον αέρα, με τον οποίο βρίσκεται σε επαφή το δέρμα
- 2) Με ακτινοβολία από το ανθρώπινο σώμα προς τις επιφάνειες που το περιβάλλουν και αντίστροφα
- 3) Με αγωγή όπου θερμότητα χάνεται από τα ρούχα, όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντα αέρα είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του σώματος
- 4) Με εξάτμιση, η οποία πραγματοποιείται μέσω της αναπνοή ή από την επιδερμίδα και μέσω του ιδρώτα

Η εξίσωση που εκφράζει το θερμικό ισοζύγιο στον ανθρώπινο οργανισμό είναι η παρακάτω (Κοτσίρης, 2007):

$$H_M - W = H_r + H_c + H_e + (H_{lr} + H_{ld}) \quad [2.1], \text{ όπου}$$

- H_M : Ρυθμός παραγωγής θερμότητας από μεταβολισμό (W)
- W : Εξωτερικό μηχανικό έργο (W)
- H_r : Ανταλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία (W)
- H_c : Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή (W)
- H_e : Απώλεια θερμότητας εξαιτίας της εξάτμισης του ιδρώτα από την επιφάνεια του δέρματος (W)
- H_{lr} : Απώλεια λαανθάνουσας θερμότητας, διαμέσου της αναπνοής (W)
- H_{ld} : Απώλεια αισθητής θερμότητας, διαμέσου της αναπνοής (W)

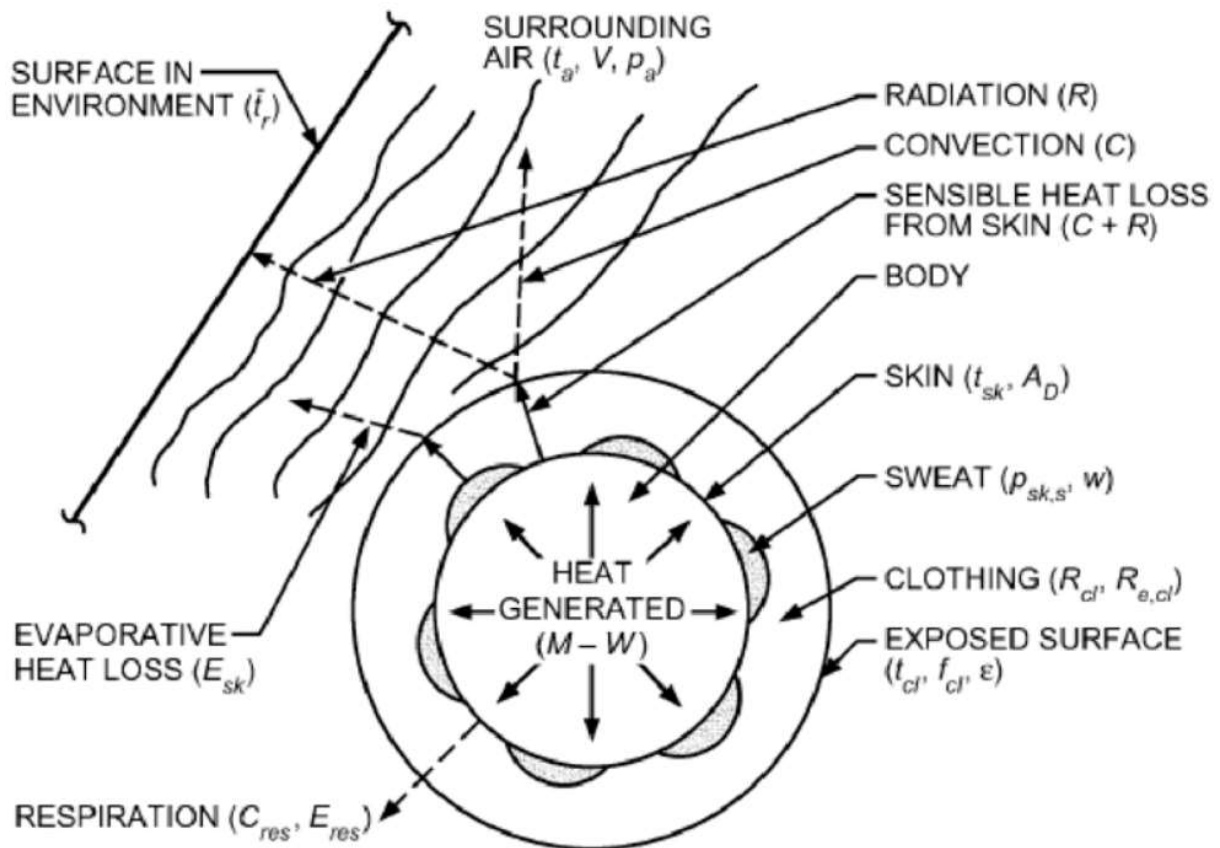
Η ANSI/ASHRAE περιγράφει στο βιβλίο Handbook Fundamentals (2021) το θερμικό ισοζύγιο στον ανθρώπινο οργανισμό που βασίζεται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας με λίγο διαφορετικούς όρους.

Η καθαρή παραγωγή θερμότητας από τον άνθρωπο υπολογίζεται από τη σχέση (ANSI/ASHRAE, 2021):

$$M - W = q_{sk} + q_{res} + S = (C + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + (S_{sk} + S_{cr}) \quad [2.2], \text{ όπου}$$

- M : Ρυθμός παραγωγής θερμότητας από μεταβολισμό
- W : Μηχανικό έργο που πραγματοποιήθηκε
- q_{sk} : Συνολικός ρυθμός απώλειας θερμότητας από το δέρμα
- q_{res} : Συνολικός ρυθμός απώλειας θερμότητας μέσω της αναπνοής
- S : Πλεόνασμα ή έλλειμμα ενέργειας που προκαλεί άνοδο ή πτώση της θερμοκρασίας του σώματος
- $C + R$: Αισθητή απώλεια θερμότητας μέσω του δέρματος
- E_{sk} : Συνολικός ρυθμός απώλειας θερμότητας λόγω εξάτμισης μέσω του δέρματος
- C_{res} : Ρυθμός απώλειας θερμότητας λόγω συναγωγής από την αναπνοή
- E_{res} : Ρυθμός απώλειας θερμότητας λόγω εξάτμισης από την αναπνοή
- S_{sk} : Ρυθμός αποθήκευσης θερμότητας στο δέρμα
- S_{cr} : Ρυθμός αποθήκευσης θερμότητας στον πυρήνα

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι όλα τα παραπάνω μεγέθη μετρούνται σε μονάδες ενέργειας. Οι μονάδες μέτρησης δεν αναγράφονται, καθώς αρκεί όλα τα μεγέθη στην εξίσωση να βρίσκονται στην ίδια μονάδα, όποια και αν είναι αυτή.



Εικόνα 3: Θερμική αλληλεπίδραση ανθρώπινου σώματος και περιβάλλοντος (Πηγή: ANSI/ASHRAE Handbook Fundamentals, 2021)

Ο ρυθμός παραγωγής και απώλειας θερμότητας μπορεί να διαφέρει από άνθρωπο σε άνθρωπο.

Για μεγαλύτερη διευκόλυνση δημιουργήθηκαν οι παράμετροι της επιφάνειας του σώματος αλλά και ο ρυθμός μεταβολισμού του κάθε ανθρώπου. Το εμβαδόν της επιφάνειας του σώματος μπορεί να εκτιμηθεί από τον παρακάτω τύπο (Κοτσίρης, 2007):

$$A_N = 0.202 W_b^{0.425} B_h^{0.725} \quad [2.3], \text{ όπου:}$$

- W_b : Βάρος του σώματος
- B_h : Ύψος του ανθρώπου

Η A_N ονομάζεται Du Bois area και για τις γυναίκες είναι επιφάνεια $1,6 \text{ m}^2$, ενώ για τους άνδρες $1,8 \text{ m}^2$ (Κοτσίρης, 2007).

Ο ρυθμός μεταβολισμού εκφράζεται σε W/m^2 εμβαδόν επιφάνεια σώματος ή σε met ($1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2$). Στα πρότυπα υπάρχουν διαθέσιμοι πίνακες με τυποποιημένες δραστηριότητες και το ρυθμό μεταβολισμού που αντιστοιχεί σε κάθε μία από αυτές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας στις μελέτες. Παρακάτω στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται αυτές οι τιμές.

Πίνακας 1: Απόσπασμα του πίνακα τιμών ρυθμού μεταβολισμού κατά τη διάρκεια διαφόρων δραστηριοτήτων (ANSI/ASHRAE, 2023)

Δραστηριότητα	Μεταβολικός ρυθμός	
Ύπνος	0,7 met	40 W/m ²
Καθήμενος	1 met	60 W/m ²
Στάση, ξεκούραση	1,2 met	70 W/m ²
Διάβασμα, καθιστός	1 met	55 W/m ²
Γράψιμο	1 met	60 W/m ²
Πληκτρολόγηση	1,1 met	65 W/m ²
Αρχειοθέτηση, καθιστός	1,2 met	70 W/m ²
Αρχειοθέτηση, όρθιος	1,4 met	80 W/m ²
Περπάτημα	1,7 met	120 W/m ²
Καθαρισμός σπιτιού	2,0-3,4 met	115-200 W/m ²
Σκάψιμο και φτυάρισμα	4,0-4,8 met	235-280 W/m ²

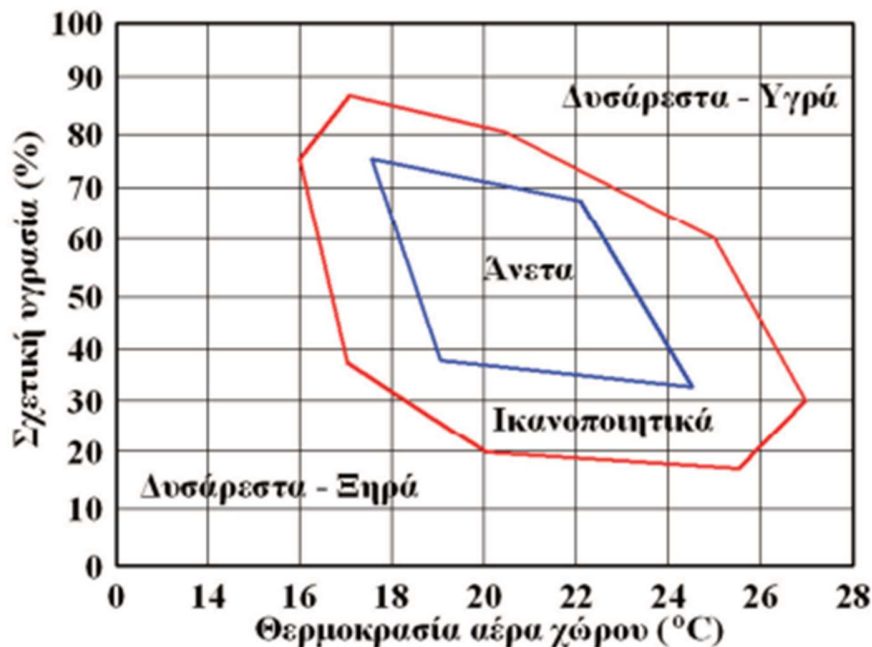
Επίσης το επίπεδο ρουχισμού, δηλαδή το ντύσιμο του κάθε ανθρώπου, παίζει σημαντικό ρόλο στην διεργασία μεταφοράς θερμότητας από τον άνθρωπο προς το περιβάλλον και αντίστροφα. Μπορεί να ερμηνευτεί με την έννοια της θερμικής αντίστασης, ενώ εκφράζεται με τη μονάδα clo, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ($1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$) (Κοτσίρης, 2007). Στα πρότυπα υπάρχουν διαθέσιμοι πίνακες με τυποποιημένες τις τιμές για τη θερμική μόνωση που αντιστοιχούν σε κάθε ρούχο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας στις μελέτες. Ο υπολογισμός της συνολικής θερμικής αντίστασης που προέρχεται από την ένδυση, είναι το άθροισμα της θερμικής αντίστασης ΣI_{clu} των επιμέρους ρούχων (I_{clu}) του συνόλου σε clo. Στον πίνακα 2, παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές για βασικά είδη ένδυσης.

Πίνακας 2: Απόσπασμα του πίνακα τιμών θερμικής μόνωσης για διάφορα είδη ρούχων (ANSI/ASHRAE, 2023)

Περιγραφή ένδυσης	I_{clu} , (clo)
Παπούτσια	0,02
Αθλητικές κάλτσες ως τον αστράγαλο	0,02
Κάλτσες ως την κνήμη	0,03
Μπότες	0,10
Πουλόβερ μακρυμάνικο (λεπτό)	0,25
Πουλόβερ μακρυμάνικο (χοντρό)	0,36
Αμάνικη, ανοιχτή στο λαιμό μπλούζα	0,13
Κοντομάνικο, επίσημο πουκάμισο	0,19

Μακρυμάνικο, επίσημο πουκάμισο	0,25
Μακρυμάνικη αθλητική μπλούζα	0,34
Shorts	0,06
Βερμούδα	0,08
Ίσιο παντελόνι (λεπτό)	0,15
Ίσιο παντελόνι (χοντρό)	0,24
Φόρμα γυμναστικής	0,28
Παντελόνι εργασίας	0,30

Ποιοτικά η θερμική άνεση μπορεί να προσδιορισθεί με το παρακάτω διάγραμμα θερμοκρασίας του αέρα - σχετικής υγρασίας (Παπαδόπουλος, 2006)



Διάγραμμα 1: Περιοχές θερμικής άνεσης βάσει θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας (Παπαδόπουλος, 2006)

Ο αέρας είναι το μέσο με το οποίο ανταλλάσσεται θερμότητα μεταξύ των ανθρώπων και του περιβάλλοντος και ως συνέπεια, η ταχύτητα του ορίζει τον ρυθμό της ανταλλαγής αυτής. Η ταχύτητα του αέρα σε εσωτερικούς χώρους επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως οι κίνηση στον χώρο, τα συστήματα αερισμού και άλλα. Η κίνηση του αέρα, είναι επιθυμητή σε ένα χώρο, καθώς προξενεί μία αίσθηση δροσιάς (TOTEE 2423/86, 2002). Όμως η κίνηση ψυχρών μαζών αέρα πάνω από ορισμένα όρια, που μπορεί να οφείλεται σε ρεύματα, δημιουργεί ανομοιόμορφα επίπεδα θερμοκρασίας και επιδρά αρνητικά στην υγεία και προκαλεί αίσθηση δυσφορίας. Γενικά εύκολα συμπεραίνεται ότι ρεύματα αέρα επιδρούν θετικά στην αίσθηση θερμικής άνεσης κατά την θερινή περίοδο σε αντίθεση με την χειμερινή όπου αυξάνουν τα ποσοστά δυσαρέσκειας στους εσωτερικούς χώρους (Κυριαζής, 2022). Στον παρακάτω πίνακα 3 φαίνονται τα επιτρεπόμενα όρια ταχύτητας αέρα σε εσωτερικούς χώρους, βάσει της τεχνικής οδηγίας.

Πίνακας 3: Ενδεικνυόμενες τιμές για την ταχύτητα του αέρα (TOTEE 2423/86, 2002)

Ταχύτητα αέρα (m/s)	Επίδραση
0 – 0,08	Παράπονα για έλλειψη κίνησης του αέρα
0,125	Ιδανική κατάσταση
0,125 – 0,25	Πολύ ικανοποιητική κατάσταση, αλλά η ταχύτητα των 0,25m/s πλησιάζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη
0,325	Όχι ικανοποιητική για χώρους γραφείων. Ο αέρας παρασύρει ελαφριά χαρτιά από τα γραφεία
0,375	Μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα για άτομα που κινούνται (Συνιστάται για εμπορικά καταστήματα)
0,375 – 1,5	Επιτρεπόμενη μόνο για βιομηχανικές εφαρμογές

*Οι παραπάνω ταχύτητες αναφέρονται στη ζώνη διαμονής ατόμων κάθε χώρου, από το δάπεδο μέχρι 2m ύψους περίπου

2.2 Το μοντέλο του Fanger

Ο Ole Fanger δημοσίευσε την μέση προβλεπόμενη τιμή ψηφοφορίας - PMV (Predicted Mean Vote) και το προβλεπόμενο ποσοστό δυσαρεστημένων ανθρώπων - PPD (Predicted Percent of Dissatisfied) για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης στη δεκαετία του '70 μέσω μελετών σε 1296 άτομα. Δεν υπέθεσε σημαντικές διαφορές ως προς το φύλο και την ηλικία. Για το λόγο αυτό συχνά θεωρήθηκε για τον μεταβολικό ρυθμό ένα τυποποιημένο άτομο με μεταβολικό ρυθμό ηρεμίας 58,15 W/m². (Schaudienst & Vogdt, 2017).

Οι υπολογισμοί της θερμικής άνεσης γίνονται με την βοήθεια δύο δεικτών, του δείκτη PMV (Predicted Mean Vote) και του δείκτη PPD (Predicted Percent of Dissatisfied). Ο προβλεπόμενος μέσος όρος ψήφου (PMV) είναι ένας αριθμητικός δείκτης που προβλέπει τη μέση θερμική αίσθηση μιας μεγάλης ομάδας ανθρώπων σε έναν χώρο. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται το μοντέλο Fanger, το οποίο ενσωματώνει τις τέσσερις περιβαλλοντικές μεταβλητές της θερμοκρασίας του αέρα, της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας, της ταχύτητας του αέρα και της υγρασίας.

Οι δύο αυτοί δείκτες, σύμφωνα με τη θεωρία του Fanger, κάνουν εύκολη την εξαγωγή συμπερασμάτων για την αίσθηση του θερμικού περιβάλλοντος που επικρατεί σε έναν χώρο, ενώ προκύπτουν από σύνθετες μαθηματικές σχέσεις που λαμβάνουν υπόψη πλήθος παραμέτρων.

Ο δείκτης PMV παρουσιάζει την μέση τιμή της θερμικής άνεσης μιας ομάδας ανθρώπων στο χώρο μελέτης σε μια κλίμακα 7 βαθμών όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Η κλίμακα 7 βαθμών του δείκτη PMV απεικονισμένη με χρώματα

+3	Καυτό
+2	Ζεστό
+1	Ελαφρώς Ζεστό
0	Ουδέτερο
-1	Ελαφρώς Δροσερό
-2	Δροσερό
-3	Ψυχρό

Ο δείκτης PMV κυμαίνεται από -3 (ψυχρό) έως +3 (καυτό) με το 0 να αντιπροσωπεύει τη θερμική ουδετερότητα. Θετικές τιμές του δείκτη PMV υποδεικνύουν ότι οι χρήστες νιώθουν το εσωτερικό περιβάλλον πιο θερμό, σε αντίθεση με τις αρνητικές τιμές που δείχνουν πιο ψυχρό. Ο δείκτης PMV βασίζεται στην εξίσωση του θερμικού ισοζυγίου, η οποία υπολογίζει την ισορροπία μεταξύ της θερμότητας που παράγεται από το ανθρώπινο σώμα και της θερμότητας που ανταλλάσσεται με το περιβάλλον.

Ο δείκτης PMV είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τη σχεδίαση κτιρίων και κατά συνέπεια συστημάτων θέρμανσης-ψύξης-κλιματισμού. Όταν ο σχεδιασμός ενός κτιρίου γίνεται με γνώμονα εργαλεία όπως ο δείκτης PMV, μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη ικανοποίηση από το εσωτερικό περιβάλλον του χώρου και μάλιστα δαπανώντας λιγότερη ενέργεια. Γι' αυτό το λόγο είναι σημαντικό πριν γίνει παρέμβαση σε ένα κτίριο ή πριν εκδοθεί άδεια οικοδόμησης, να έχουν γίνει οι απαραίτητες μελέτες που αφορούν το εσωτερικό κλίμα του κτιρίου.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο τύπος έκφρασης του δείκτη PMV (ISO 7730, 2005):

$$PMV = (0,303 * e^{-0,036 * M} + 0,028) * \{(M - W) - 3,05 + 10^3 * [5773 - 6,99 * (M - W) - p_a] - 0,42 * [(M = W) - 58,15] - 1,7 * 10^{-5} * M * (5867 - p_a) - 1,4 * 10^{-3} * M * (34 - t_a) - 3,96 * 10^{-8} * f_{cl} * [(t_{cl} + 237)^4 - (t_r + 273)^4 - f_{cl} * h_c * (t_{cl} - t_a)]\} \quad [2.4], \text{ όπου:}$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 * (M - W) - I_{cl} \{3,96 * 10^{-8} * f_{cl} * [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} * h_c * (t_{cl} - t_a)\} \quad [2.5]$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 * (t_{cl} - t_a)^{0,25} & \text{όταν } 2,38 * |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 * \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 * \sqrt{v_{ar}} & \text{όταν } 2,38 * |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 * \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad [2.6]$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 * I_{cl} & \text{όταν } I_{cl} \leq 0,078 \\ 1,05 + 0,645 * I_{cl} & \text{όταν } I_{cl} > 0,078 \end{cases} \quad [2.7]$$

όπου:

- M: Ρυθμός μεταβολισμού (W/m²)
- W: Το ωφέλιμο έργο (W/m²)
- I_{cl}: Θερμική αντίσταση ρούχων (m² * K / W)
- f_{cl}: Λόγος επιφάνειας ντυμένου ανθρώπου προς την επιφάνεια όταν είναι γυμνός
- t_a: Θερμοκρασία του αέρα (°C)
- t_r: Μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας (°C)
- v_{ar}: Ταχύτητα του αέρα (m/s)
- p_a: Μερική πίεση υδρατμών στο χώρο (Pa)
- h_c: Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (W / m² * K)
- t_{cl}: Επιφανειακή θερμοκρασία των ρούχων (°C)

Η μερική πίεση των υδρατμών στο χώρο υπολογίζεται από την σχέση (ANSI/ASHRAE, 2023):

$$P_a = P_s * RH / 100 \quad [2.8], \text{ όπου}$$

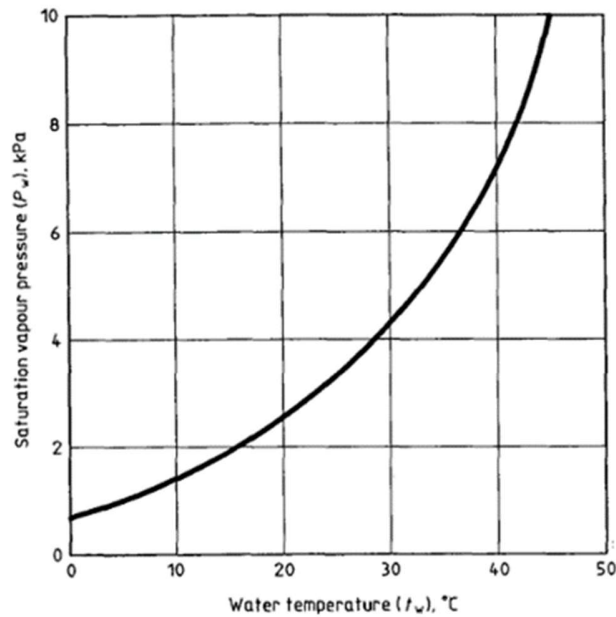
- P_s: Πίεση κορεσμένων υδρατμών (kPa) για θερμοκρασία αέρα t_a
- RH: Σχετική υγρασία (%)

Η P_s υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_w = 0,004516 + 0,00007178 * t_w - (2,649 * 10^{-6}) * t_w^2 + (6,944 * 10^{-7}) * t_w^3 \quad [2.9], \text{ όπου:}$$

- P_s = P_w όπου P_w πίεση του κορεσμένου νερού
- t_a = t_w όπου t_w η θερμοκρασία του νερού

ή από το Διάγραμμα 2:



Διάγραμμα 2: Μεταβολή κορεσμένης πίεσης υδρατμού συναρτήσει της θερμοκρασίας του νερού (Πηγή: BS EN 15251:2012)

Η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας $t_r = T_{mrt}$ ορίζεται ως η ομοιόμορφη επιφανειακή θερμοκρασία ενός φανταστικού μαύρου κελύφους, που θα προκαλέσει την ίδια ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ ατόμου και αυτού, με αυτή που λαμβάνει χώρα στις εξεταζόμενες συνθήκες (ANSI/ASHRAE 55, 2023). Υπολογίζεται από τον απλοποιημένο τύπο: (Κοτσίρης, 2007):

$$T_{mrt} = (T_1 * A_1 + T_2 * A_2 + \dots + T_n * A_n) / (A_1 + A_2 + \dots + A_n) \quad [2.10], \text{ όπου}$$

- T_1, T_2, \dots, T_n επιφανειακή θερμοκρασία (°C) κάθε δομικού στοιχείου του κελύφους
- A_1, A_2, \dots, A_n εμβαδόν (m²) του δομικού στοιχείου

Παράλληλα ο υπολογισμός της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας μπορεί να γίνει και με την χρήση της θερμοκρασίας μαύρης σφαίρας (ISO 7730, 2005).

Οι παραπάνω μαθηματικές σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο όταν ο PMV βρίσκεται μεταξύ των τιμών -2 (Δροσερό) και +2 (Καυτό), και οι έξι βασικοί παράμετροι της εξίσωσης [2.4] βρίσκονται μεταξύ των παρακάτω τιμών (ISO 7730, 2005):

1. $46 \text{ W/m}^2 \leq M \leq 232 \text{ W/m}^2$
2. $0 \text{ (m}^2 * \text{K)/W} \leq I_{cl} \leq 0,310 \text{ (m}^2 * \text{K)/W}$
3. $10 \text{ }^\circ\text{C} \leq t_a \leq 30 \text{ }^\circ\text{C}$
4. $10 \text{ }^\circ\text{C} \leq \bar{t}_r \leq 40 \text{ }^\circ\text{C}$
5. $0 \text{ m/s} \leq v_{ar} \leq 1 \text{ m/s}$
6. $0 \text{ Pa} \leq P_a \leq 2700 \text{ Pa}$

Συνολικά, ο δείκτης PMV είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την πρόβλεψη της θερμικής αίσθησης μιας μεγάλης ομάδας ανθρώπων σε έναν χώρο και μπορεί να ενημερώσει για αποφάσεις σχετικά με τις

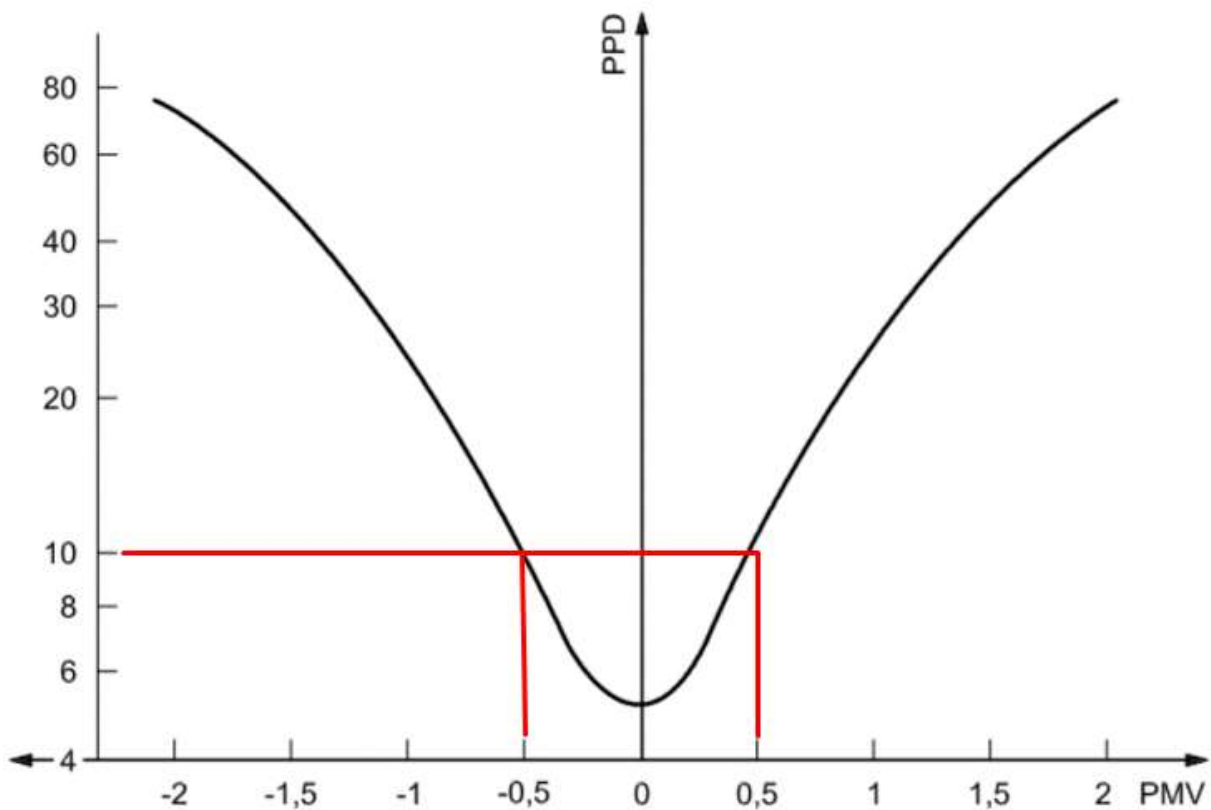
εσωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες για τη βελτιστοποίηση της θερμικής άνεσης και της ενεργειακής απόδοσης (ISO 7730:2005).

Ο δείκτης PPD προβλέπει το ποσοστό των ατόμων από το σύνολο, που εκφράζουν θερμική δυσαρέσκεια στο χώρο. Η δυσαρέσκεια αυτή μπορεί να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, όπως ανομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας στο χώρο, ψυχρά ρεύματα αέρα, συγκεντρωμένη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας, επαφή με θερμές ή ψυχρές επιφάνειες και άλλα.

Το προβλεπόμενο ποσοστό δυσαρεστημένων (PPD), εκφράζεται ως συνάρτηση της PMV μέσω της εξίσωσης [2.11] της οποίας η κατανομή είναι συμμετρική γύρω από την ουδέτερη ψήφο στο $PMV = 0$

$$PPD = 100 - 95 * e^{(-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2)} \quad [2.11]$$

Στο διάγραμμα 3 παρουσιάζεται η συναρτησιακή σχέση του PMV-PPD. Γενικά, επικρατεί η εκδοχή ότι ο δείκτης PPD πρέπει να είναι μικρότερος του 10% και επομένως ο δείκτης PMV να κυμαίνεται μεταξύ -0,5 και 0,5 (ANSI/ASHRAE 55, 2023).



Διάγραμμα 3: Γραφική παράσταση του δείκτη PPD (%) συναρτήσεως του δείκτη PMV (Πηγή: ISO 7730, 2005)

Από το διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι ακόμα και για την τιμή $PMV=0$ (θερμική ουδετερότητα) υπάρχει ένα ποσοστό ανθρώπων περίπου 5% που είναι δυσαρεστημένοι με τις συνθήκες που επικρατούν στον χώρο. Αντίστοιχα για μεγάλες ή μικρές τιμές του PMV, δηλαδή $PMV > 2$ και $PMV < -2$ υπάρχει ένα ποσοστό ατόμων που δηλώνουν ικανοποιημένοι με τις συνθήκες που επικρατούν.

Τα κριτήρια για το θερμικό περιβάλλον σε θερμαινόμενα ή/και ψυχόμενα κτίρια βρίσκονται και στο Ευρωπαϊκό πρότυπο EN16798-2 (2014) με βάση τους δείκτες θερμικής άνεσης PMV – PPD όπως περιγράφεται λεπτομερώς στο πρότυπο EN ISO 7730. Με βάση τα διαφορετικά κριτήρια για το PPD-PMV καθορίζονται διαφορετικές κατηγορίες του εσωτερικού περιβάλλοντος. Οι συνιστώμενες περιοχές PPD δίνονται στον πίνακα 5 παρακάτω. Ο δείκτης PMV-PPD λαμβάνει υπόψη την επίδραση και των έξι θερμικών παραμέτρων (ένδυση, δραστηριότητα, θερμοκρασία αέρα και μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας, ταχύτητα αέρα και υγρασία) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ως κριτήριο.

Πίνακας 5: Προτεινόμενες κατηγορίες για σχεδιασμό κτιρίων με μηχανική θέρμανση και ψύξη (ISO 7730–2005, EN 15251–2012, EN16798-2, 2014)

Κατηγορία κατά ISO 7730–2005	Κατηγορία κατά EN 15251–2012	Περιγραφή	Όρια PMV	Όρια PPD
A	I	Συνιστάται για χώρους που φιλοξενούν πολύ ευαίσθητα άτομα με ειδικές απαιτήσεις (πολύ μικρά παιδιά, ηλικιωμένοι, άρρωστοι)	$-0,2 < PMV < 0,2$	$< 6\%$
B	II	Κατάλληλο για τα περισσότερα νέα κτίρια και ανακαινίσεις	$-0,5 < PMV < 0,5$	$< 10\%$
C	III	Κατάλληλο για υπάρχοντα κτίρια	$-0,7 < PMV < 0,7$	$< 15\%$
	IV	Τιμές διαφορετικές από τις παραπάνω, αποδεκτές μόνο για ένα μέρος του έτους	$PMV < -0,7$ ή $PMV > 0,7$	$> 15\%$

2.3 Δείκτες TSV/TPV/TA

Κάποιοι άλλοι, επιπλέον δείκτες για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης είναι και οι παρακάτω (ANSI/ASHRAE 55, 2023, Teli et al., 2012):

- ❖ Δείκτης μεμονωμένων ψήφων θερμικής αίσθησης (TSV ή AMV)
- ❖ Δείκτης ψήφων θερμικής προτίμησης (TPV)
- ❖ Δείκτης ψήφων θερμικής αποδοχής (TA)

Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης ανά χρήστη ενός χώρου με τη χρήση του κατάλληλου ερωτηματολογίου. Συνήθως αποτελούν έναν ακόμη τρόπο εκτίμησης του εσωτερικού περιβάλλοντος σε έρευνες που γίνονται με βάση μετρήσεις, όπως και η συγκεκριμένη, και αξιολόγηση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων από προσομοιώσεις. Οι θερμικές συνθήκες που βιώνουν οι χρήστες αλλά και αυτές που θα ήθελαν ιδανικά αποτυπώνονται σε ερωτηματολόγιο. Αντίστοιχο ερωτηματολόγιο μοιράστηκε και στην τρέχουσα έρευνα για την περίοδο 11/7/2022 έως 15/7/2022 και υπάρχει στο παράρτημα IV.

Η αξιολόγηση ανά δείκτη γίνεται με βάση την εξής κλίμακα στους παρακάτω πίνακες (ANSI/ASHRAE 55, 2023, Teli et al., 2012):

Πίνακας 6: Κλίμακα δείκτη TSV

Δείκτης TSV	
+3	Ζεστό
+2	Αρκετά ζεστό
+1	Ελαφρώς ζεστό
0	Ουδέτερο
-1	Ελαφρώς δροσερό
-2	Ψυχρό
-3	Κρύο

Πίνακας 7: Κλίμακα δείκτη TPV

Δείκτης TPV	
+3	Ζεστό
+2	Θερμότερο
+1	Ελαφρώς θερμότερο
0	Καμία μεταβολή
-1	Ελαφρώς πιο δροσερό
-2	Πιο δροσερό
-3	Πιο ψυχρό

Πίνακας 8: Κλίμακα δείκτη TPV

Δείκτης TA	
0	Μη Αποδεκτό
1	Αποδεκτό

Πιθανές διαφορές και αποκλίσεις αποτελεσμάτων ερευνών και προσομοιώσεων σε σύγκριση με τους δείκτες αυτούς μπορεί να οφείλονται σε μη ορθή αποτύπωση ή αστοχίες των συνθηκών του προβλήματος, όπως μετρήσεις με μη προβλεπόμενο τρόπο ή προσεγγίσεις και παραδοχές ή ακόμα και σε εξωτερικούς παράγοντες όπως τα δημογραφικά χαρακτηριστικά (Huading Lou & Dayi Ou (2018).

2.4 Αερισμός και ποιότητα αέρα

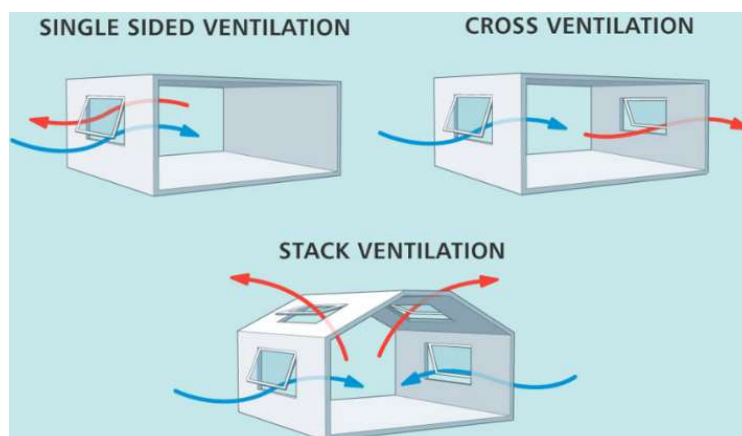
Η καλή ποιότητα του αέρα οφείλεται στην καθαρότητα και την κατάλληλη σύνθεση του, τόσο σε εξωτερικούς όσο και σε εσωτερικούς (κλειστούς) χώρους, όπως σπίτια, γραφεία, και άλλα κτίρια. Ένας παράγοντας που συμβάλει στον καθορισμό ενός ευχάριστου εσωτερικού περιβάλλοντος είναι και η συγκέντρωση των ρύπων. Ρύποις μπορούν να αποτελούν διάφορα χημικά στοιχεία, ενώσεις ή ουσίες σε αέρια μορφή στις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης που επικρατούν στον εκάστοτε χώρο. Τέτοιες ουσίες είναι για παράδειγμα το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), το διοξείδιο του αζώτου (NO_2), το όζον (O_3) και άλλα (Baeza Romero et al., 2022). Εκτός από τους ρύπους ο αέρας μπορεί να φέρει και διάφορα σωματίδια σε ποικίλες διαστάσεις ή μικροοργανισμούς οι οποίοι μπορεί να είναι και παθογόνοι. Η αποφυγή συσσώρευσης ρύπων και άλλων ανεπιθύμητων ουσιών σε ένα εσωτερικό περιβάλλον συνήθως είναι εφικτή με τον κατάλληλο αερισμό στον χώρο (Paradopoulos et al., 2023).

Συνήθως, η συσσώρευση ρύπων σε ένα εσωτερικό περιβάλλον αποδίδεται στους ανεπαρκώς χαμηλούς ρυθμούς αερισμού για εξοικονόμηση κόστους ενέργειας. Η ύπαρξη ισχυρών πηγών εκπομπών σε εσωτερικούς χώρους υποβαθμίζει περαιτέρω την ποιότητα του αέρα. Άλλοι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το IAQ (Indoor Air Quality) περιλαμβάνουν την πυκνότητα των ενοίκων και την ποιότητα του εξωτερικού αέρα (Parhizkar et al. 2019) που ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο του κτιρίου, τις δραστηριότητες που διεξάγονται εντός του κτιρίου και τις δημογραφικές ιδιότητες (Kang et al. 2017). Η υπέρβαση των ρύπων σε εσωτερικούς χώρους πέρα από τα όρια επηρεάζει σημαντικά την άνεση, την απόδοση εργασίας και την παραγωγικότητα των ενοίκων και μπορεί να προκαλέσει χρόνια προβλήματα υγείας (Parhizkar et al. 2019, Huading Lou & Dayi Ou 2018).

Για την αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, όπως η μέτρηση των επιπέδων διαφόρων ρύπων στον αέρα, η μέτρηση της θερμοκρασία και της υγρασίας του αέρα, το επίπεδο διοξειδίου του άνθρακα, καθώς επίσης και η αξιολόγηση της κυκλοφορίας του αέρα μέσα στον χώρο. Με βάση αυτές τις μετρήσεις, μπορούν να προταθούν διάφορα μέτρα βελτίωσης της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος.

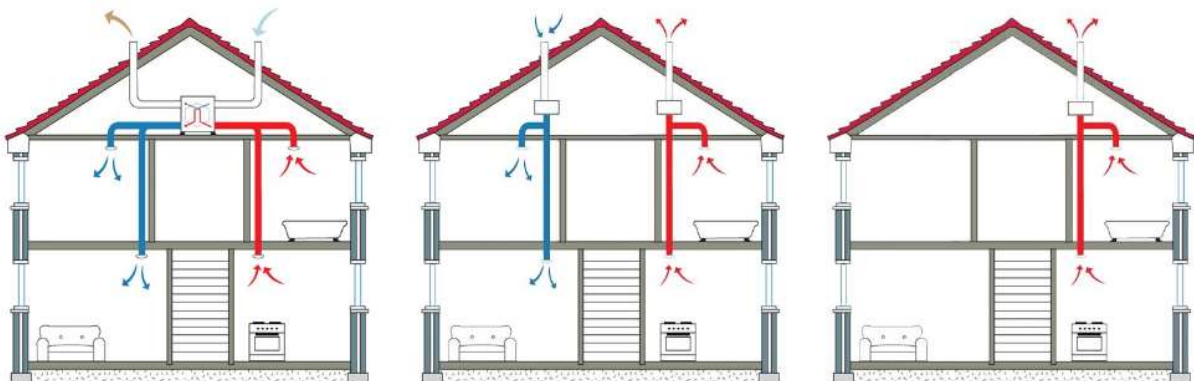
Η διαδικασία της σκόπιμης ανταλλαγής του ατμοσφαιρικού αέρα με τον αέρα του εσωτερικού χώρου, είναι ο αερισμός. Ο αερισμός είναι μία από τις βασικές αρχές για την ομαλή λειτουργία ενός κτιρίου. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι αερισμού ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου. Ορισμένοι από αυτούς είναι:

- 1) Φυσικός αερισμός: Ο αέρας κυκλοφορεί μέσω ανοιγμάτων του χώρου, όπως παράθυρα, πόρτες και αεραγωγούς. Αποτελεί τον πιο οικονομικό τρόπο αερισμού και βασίζεται στη διαφορά πίεσης εσωτερικού και εξωτερικού αέρα με σκοπό τη ροή αέρα σε εσωτερικούς χώρους.



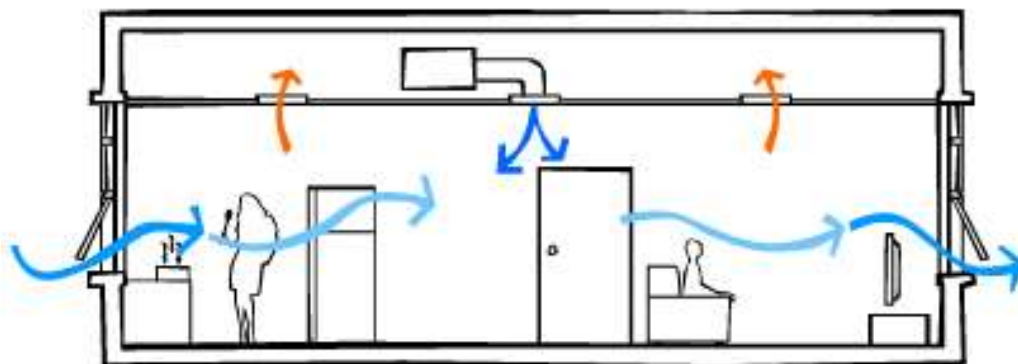
Εικόνα 4: Παραδείγματα περιπτώσεων φυσικού αερισμού (Πηγή: <https://tealproducts.com/resource/ventilation-options-for-high-rise-commercial-residential-buildings>)

- 2) Μηχανικός αερισμός: Ο μηχανικός αερισμός αποτελεί μία εξαναγκασμένη ροή αέρα. Αναπτύχθηκε με σκοπό τον έλεγχο και τη βελτίωση των συνθηκών που επικρατούν σε έναν εσωτερικό χώρο. Στον μηχανικό αερισμό χρησιμοποιούνται συσκευές όπως ανεμιστήρες ή διατάξεις που περιλαμβάνουν έναν ή πολλούς ανεμιστήρες, που κατευθύνουν τη ροή αέρα σε συγκεκριμένους χώρους. Οι ανεμιστήρες μπορούν να τοποθετηθούν σε διατάξεις push, pull, ή συνδυασμό αυτών. Στην διάταξη push ο ανεμιστήρας τροφοδοτεί με εξωτερικό αέρα το εσωτερικό του κτιρίου, ενώ στην διάταξη pull ο ανεμιστήρας απάγει τον αέρα από το εσωτερικό του κτιρίου στο εξωτερικό περιβάλλον. Ο συνδυασμός αυτών των διατάξεων μπορεί να περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα ανοίγματα με ανεμιστήρα εισαγωγής αέρα και ένα ή περισσότερα ανοίγματα με ανεμιστήρα εξαγωγής αέρα.



Εικόνα 5: Παραδείγματα περιπτώσεων μηχανικού αερισμού (Πηγή: <https://www.poahbod.org/ventilation-index#ventilation>)

- 3) Τα μικτά ή υβριδικά συστήματα: Είναι ο συνδυασμός φυσικού και μηχανικού αερισμού. Μπορεί να εφαρμόζονται ταυτόχρονα ή εναλλάξ, αφού η φυσική ροή αέρα (φυσικός αερισμός) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από εξωτερικές συνθήκες (άνεμος, διαφορά θερμοκρασίας και πίεσης, μη επαρκή ανοίγματα στο χώρο κ.λπ.) και συνεπώς δεν είναι πάντοτε εφικτή. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα μηχανικά συστήματα μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες.



Εικόνα 6: Παράδειγμα περίπτωσης μικτού αερισμού (Πηγή: <https://www.linquip.com/blog/types-of-ventilation/>)

Κατά τον σχεδιασμό ενός κτιρίου, ζητήματα όπως ο τρόπος αερισμού προνοούνται. Ο σωστός σχεδιασμός, η εγκατάσταση και συντήρηση συστημάτων κλιματισμού είναι καίρια για τη βέλτιστη ποιότητα του αέρα στους εσωτερικούς χώρους, την άνεση των ενοίκων και την εξοικονόμηση ενέργειας.

Η βελτίωση της ποιότητας του αέρα σε ένα υποβαθμισμένο εσωτερικό περιβάλλον και η αραίωση των επιπέδων ρύπων που παράγονται μπορεί να επιτευχθεί μέσω του κατάλληλου αερισμού (C. Heracleous, A. Michael, 2019). Συμπτώματα του συνδρόμου άρρωστου κτιρίου (κόπωση, πονοκέφαλος, ερεθισμός των ματιών, της μύτης και του λαιμού, ξηροδερμία κ.λπ.) είναι πιο διαδεδομένα σε κτίρια με χαμηλούς ρυθμούς αερισμού (Sundell et al., 2011)

Ο όρος "Sick Building Syndrome" (συνδρόμου άρρωστου κτιρίου) χρησιμοποιείται για να περιγράψει καταστάσεις στις οποίες οι ένοικοι του κτιρίου αντιμετωπίζουν οξείες επιπτώσεις στην υγεία και την άνεση που φαίνεται να συνδέονται με το χρόνο που αφιερώνουν στο κτίριο, αλλά δεν μπορεί να εντοπιστεί συγκεκριμένη ασθένεια ή αιτία. Τα παράπονα μπορεί να εντοπίζονται σε ένα συγκεκριμένο δωμάτιο ή ζώνη ή μπορεί να είναι ευρέως διαδεδομένα σε όλο το κτίριο. Αντίθετα, ο όρος «Building Related Illness» (ασθένεια που σχετίζεται με το κτίριο) χρησιμοποιείται όταν εντοπίζονται συμπτώματα ασθένειας και μπορούν να αποδοθούν απευθείας σε ατμοσφαιρικούς ρύπους κτιρίων (U.S. Environmental Protection Agency, 1991)

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα όξινο, άχρωμο και μη εύφλεκτο αέριο σε κανονική θερμοκρασία και πίεση, με πυκνότητα 53% μεγαλύτερη από αυτή του ξηρού αέρα. Αν και πολύ λιγότερο άφθονο από το άζωτο και το οξυγόνο στην ατμόσφαιρα της Γης, είναι ένα σημαντικό συστατικό του αέρα του πλανήτη μας. Το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί ένα αέριο του θερμοκηπίου, που βοηθά στην παγίδευση θερμότητας στην ατμόσφαιρά μας. Χωρίς αυτό, ο πλανήτης θα ήταν αφιλόξενα κρύος. Ωστόσο, η αύξηση των συγκεντρώσεων CO₂ στην ατμόσφαιρά, προκαλεί αύξηση των μέσων παγκόσμιων θερμοκρασιών, διαταράσσοντας το κλίμα της Γης. Σήμερα έχει συγκεντρωθεί περίπου 426 ppm στην ατμόσφαιρα, ενώ η συγκέντρωση του αυξάνεται περίπου κατά 2,5 ppm το χρόνο και πριν από τη βιομηχανική δραστηριότητα, η συγκέντρωσή του ήταν περίπου 270 ppm στην ατμόσφαιρα (NOAA GML, 2024). Αν και δεν ταξινομείται ως ρύπος σύμφωνα με τον ΠΟΥ, μπορεί να θεωρηθεί ως καλός δείκτης ποιότητας αέρα εσωτερικών χώρων καθώς σχετίζεται άμεσα και με τον αερισμό. Σε εσωτερικό περιβάλλον πηγή σχηματισμού CO₂ αποτελεί κυρίως η μεταβολική δραστηριότητα και η διαδικασία της αναπνοής των έμβιων οργανισμών, αλλά και η διαδικασία της καύσης ενώσεων άνθρακα, όταν αυτή παρά τους κανονισμούς συμβαίνει.

Η ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα που παράγεται από τον άνθρωπο υπολογίζεται με βάση τα σωματικά χαρακτηριστικά του, όπως το ύψος και το βάρος, αλλά και από τις δραστηριότητες που εκτελεί με εφαρμογή του παρακάτω τύπου (G. Panaras et al., 2018)

$$G = V_{O_2} * RQ \quad [2.12], \text{ όπου}$$

$$V_{O_2} = \frac{0.0027 * A_D * M}{(0.23 * RQ + 0.77)}$$

- V_{O_2} : ρυθμός κατανάλωσης O₂ ενός ατόμου [L/s]
- RQ : Αναπνευστικό πηλίκιο

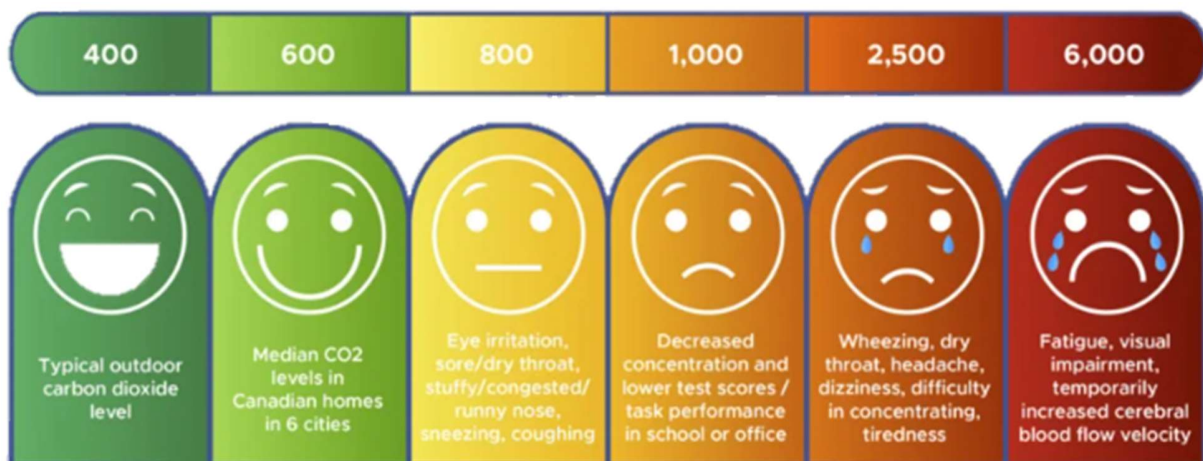
Η τιμή του αναπνευστικού πηλίκου RQ εξαρτάται από τη διατροφή, το επίπεδο φυσικής δραστηριότητας και τη φυσική κατάσταση του ατόμου. Το RQ ισούται με 0,83 για έναν μέσο ενήλικα που ασχολείται με ελαφριές ή καθιστικές δραστηριότητες. Το RQ αυξάνεται σε μια τιμή περίπου 1 για έντονη σωματική

δραστηριότητα (περίπου 5 met). Η αναμενόμενη διακύμανση του RQ δείχνει ότι έχει μόνο δευτερεύουσα επίδραση στη συγκέντρωση CO₂ (G. Panaras et al., 2018).

- M: μεταβολική μονάδα ανά μονάδα εμβαδού επιφάνειας, met (1 met = 58,2 W/m²)
- A_D: Επιφάνεια Du Bois, m² → $A_D = 0,202H^{0,725} * W^{0,425}$ [2.13]
- H: Ύψος ατόμου [m]
- W: Βάρος ατόμου [kg]

Για ενήλικες η A_D ισούται με περίπου 1,8 m² (G. Panaras et al., 2018).

Τα επίπεδα CO₂ σε εσωτερικούς χώρους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των βέλτιστων σημείων ρύθμισης αερισμού (Parhizkar et al. 2019). Επιπλέον, όταν υπερβαίνουν ορισμένα επιτρεπτά όρια, μπορεί να προκαλέσουν πονοκέφαλο, απώλεια των αισθήσεων, κόπωση, προβλήματα αναπνοής κ.λπ. στους ενοίκους (Parhizkar et al. 2019). Διάφορες κατευθυντήριες γραμμές έχουν δημοσιευτεί και έχουν γίνει αποδεκτές για τον προσδιορισμό των επιτρεπόμενων επιπέδων CO₂ σε εσωτερικούς χώρους. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ), η μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση CO₂ σε εσωτερικούς (κλειστούς) χώρους είναι 1000 ppm [WHO, 2000]. Αυτό το όριο CO₂ σε εσωτερικούς χώρους έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε πολλές ερευνητικές μελέτες εδώ και δεκαετίες λόγω της συσχέτισής του με τα ανθρώπινα βιοεκροή και τα αποδεκτά επίπεδα οσμής (A. Persily, 2022). Ομοίως, σύμφωνα με την ASHRAE, τα επίπεδα CO₂ εσωτερικών χώρων δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 700 ppm πάνω από τα επίπεδα εξωτερικού χώρου (ANSI/ASHRAE, 2022), γεγονός που ανταποκρίνεται και πάλι στις οδηγίες του ΠΟΥ. Συγκεντρώσεις υψηλότερες των 1000 ppm συνδέονται με την εμφάνιση συμπτωμάτων όπως πονοκέφαλος, εξάντληση, αδυναμία συγκέντρωσης κ.λπ.. Επίπεδα CO₂ των 2000-3000 ppm προκαλούν αύξηση των καρδιακών παλμών και διπλασιασμό του ρυθμού αναπνοής. Συγκεντρώσεις που υπερβαίνουν τα 5000 ppm είναι άμεσα τοξικές και μπορούν να επιφέρουν τον θάνατο (Παπαδόπουλος, 2019).



Εικόνα 7: Επιπτώσεις αυξημένης συγκέντρωσης CO₂ στην υγεία και την παραγωγικότητα (Πηγή: <https://smartairfilters.com/en/blog/dangers-high-carbon-dioxide-co2-levels/>)

2.5 Μέθοδοι υπολογισμού εναλλαγών αέρα (ACH)

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό του ρυθμού εναλλαγής αέρα. Οι πιο συνηθισμένες από αυτές είναι η μέθοδος θύρας υποπίεσης (Blower-Door Test) και η μέθοδος αέριου ιχνηθέτη (Tracer Gas) (Νικολέντζος, 2022).

Μέθοδος αέριου ιχνηθέτη

Για την εφαρμογή της μεθόδου του αέριου ιχνηθέτη υπάρχουν ορισμένες χημικές ενώσεις (σε αέρια μορφή) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ιχνηθέτες (αέριο αντίχνευσης) για την εκτίμηση του ρυθμού αερισμού κάποιου χώρου. Σημαντικότερες από αυτές είναι το εξαφθοριο θείο (SF₆) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Ειδικά η ένωση CO₂ είναι ιδιαίτερα κοινή, τόσο ως προς την ύπαρξη της στο περιβάλλον, όσο και στη χρήση της στην παρούσα μέθοδο. Αυτό συμβαίνει καθώς το CO₂ είναι σχετικά εύκολο να μετρηθεί, βρίσκεται ήδη σχεδόν σε όλα τα κτίρια, καθώς βασική πηγή εκπομπής του είναι ο άνθρωπος και είναι συνήθως ομοιόμορφα κατανομημένο στο χώρο. Το βασικό μειονέκτημα υπολογισμού του αερισμού με βάση το CO₂ είναι ότι περιέχεται ήδη στην ατμόσφαιρα και η συγκέντρωσή του μπορεί να επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες όπως το μικροκλίμα της περιοχής. Εφόσον η ροή αέρα σε ένα κτίριο δεν είναι ελεγχόμενη, ενδεχόμενη εισροή CO₂ σε άγνωστη συγκέντρωση στον χώρο όπου γίνονται μετρήσεις μπορεί να επηρεάσει και να αλλάξει το αποτέλεσμα του πειράματος. Επιπλέον, ενώ έχουν προταθεί εξισώσεις υπολογισμού του CO₂ που παράγει ένας άνθρωπος (G. Panaras et al., 2018), κάθε οργανισμός είναι μοναδικός, με αποτέλεσμα να υπάρχει ένα μικρό σφάλμα στην ακρίβεια.

Οι 3 κυριότερες μέθοδοι υπολογισμού του αερισμού με βάση το CO₂ ως αέριο αντίχνευσης είναι οι εξής (ASTM International, 2019):

- 1) Σταθερής κατάστασης (Steady – State)
- 2) Απομείωσης (Decay)
- 3) Συσσώρευσης (Build-Up)

Η επιλογή της πιο κατάλληλης μεθόδου γίνεται πάντα κατά περίπτωση. Αυτό οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες που μπορεί να υπάρχουν κατά τις μετρήσεις, όπως ο χώρος, οι πόροι που είναι διαθέσιμοι, ο χρόνος παραμονής των ατόμων στο χώρο και σε τυχόν αστοχίες που παρατηρήθηκαν μετά τις μετρήσεις και είναι ικανές να αλλοιώσουν το αποτέλεσμα.

2.5.1 Μέθοδος Σταθερής Κατάστασης (Steady – State)

Η μέθοδος αυτή, μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα χρονικό διάστημα κατά το οποίο επιτυγχάνεται η “κατάσταση ισορροπίας”. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για την εκτίμηση του ρυθμού αερισμού σε ένα κτίριο με ομοιόμορφη συγκέντρωση CO₂. Υποθέτει ότι ο ρυθμός παραγωγής CO₂ από τους ενοίκους και η συγκέντρωση CO₂ στον εξωτερικό αέρα είναι γνωστά και θεωρούνται σταθερά κατά τη διάρκεια της περιόδου που ο χώρος έχει ενοίκους (Kabirikoraei & Lau, 2020). Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται ο ρυθμός παραγωγής CO₂ από τους ανθρώπους, καθώς και η συγκέντρωση του στον εξωτερικό αέρα να είναι γνωστά και να θεωρούνται σταθερά. Ο χρόνος που μεσολαβεί για την επίτευξη της κατάστασης ισορροπίας εξαρτάται από τις εναλλαγές αέρα του κτιρίου. Ο ρυθμός ανανέωσης αέρα προκύπτει από την εξίσωση [2.14] (Kabirikoraei & Lau, 2020):

$$Q_{Steady-State} = \frac{10^6 G}{C_{steady-state} - C_{outdoor}} \quad [2.14], \text{ όπου:}$$

- $Q_{Steady-Stat}$: Ρυθμός ανανέωσης αέρα [L/s]
- G : Ρυθμός παραγωγής CO₂ [L/s]
- $C_{Steady-state}$: Συγκέντρωση CO₂ σε σταθερή κατάσταση [ppm]
- $C_{outdoor}$: Συγκέντρωση CO₂ εκτός του κτιρίου [ppm]

2.5.2 Μέθοδος Απομείωσης (Decay)

Η μέθοδος αυτή, υπολογίζει τον ρυθμό αερισμού με την έγχυση ενός αερίου ανίχνευσης (στην περίπτωση αυτή το CO₂) σε ένα χώρο και την μέτρηση του ρυθμού μείωσης της συγκέντρωσής του σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο Δt . Ο ρυθμός ανανέωσης αέρα υπολογίζεται από την εξίσωση [2.15] (Kabirikoraei & Lau, 2020):

$$Q_{Decay} = \frac{V}{\Delta t} \ln \frac{(C_1 - C_{outdoor})}{(C_0 - C_{outdoor})} \quad [2.15], \text{ όπου:}$$

- Q_{Decay} : Ρυθμός ανανέωσης αέρα [L/s]
- V : Όγκος χώρου [m³]
- Δt : Χρονική περίοδος μελέτης [hours]
- C_1 : Μέγιστη συγκέντρωση CO₂ για Δt [ppm]
- C_0 : Ελάχιστη συγκέντρωση CO₂ για Δt [ppm]
- $C_{outdoor}$: Συγκέντρωση CO₂ εκτός κτιρίου [ppm]

2.5.3 Μέθοδος Συσώρευσης (Build-Up)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί διαφορετικές παρατηρήσεις CO₂ κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Προϋποθέτει ο ρυθμός αερισμού και το παραγόμενο CO₂ να είναι σταθερά κατά την διάρκεια της μελέτης (Kabirikoraei & Lau, 2020). Ο ρυθμός ανανέωσης αέρα υπολογίζεται από την εξίσωση [2.16] (Kabirikoraei & Lau, 2020):

$$Q_{Build-Up} = 6 \times 10^4 n G_p \frac{\sum_{t=1}^{12} \left(\frac{1}{C_t - C_{outdoor}} \right)}{12} - \frac{V}{\Delta t} \ln \frac{(C_1 - C_{outdoor})}{(C_0 - C_{outdoor})} \quad [2.16], \text{ όπου:}$$

- $Q_{Build-Up}$: Ρυθμός ανανέωσης αέρα [L/s]
- C_t : Συγκέντρωση CO₂ σε κάθε παρατήρηση [ppm]
- C_1 : Μέγιστη συγκέντρωση CO₂ σε Δt [ppm]
- C_0 : Ελάχιστη συγκέντρωση CO₂ σε Δt [ppm]
- $C_{outdoor}$: Συγκέντρωση CO₂ εκτός κτιρίου [ppm]

- Δt : Χρονική περίοδος μελέτης [hours]
- V : Όγκος κτιρίου [m^3]
- n : Αριθμός ατόμων
- G_p : Ρυθμός παραγωγής CO_2 [$L/(s \cdot person)$]

Ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα που υπολογίζεται σύμφωνα με την εκάστοτε μέθοδο μπορεί να διαφέρει σημαντικά, όπως στη μελέτη των Kabirikoraei & Lau το 2020. Αυτό αποκαλύπτει τη σημασία της επιλογής της καλύτερης μεθόδου για μετρήσεις και εκτιμήσεις. Η επιλογή μιας μεθόδου αερίου ιχνηθέτη χωρίς πρώτα να αξιολογηθεί ο τύπος του συστήματος εξαερισμού, τα δημογραφικά στοιχεία και οι δραστηριότητες των ενοίκων μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβείς εκτιμήσεις του ρυθμού αερισμού (Kabirikoraei & Lau, 2020). Το μεγαλύτερο επίπεδο εμπιστοσύνης στους υπολογισμένους ρυθμούς αερισμού οδηγεί σε καλύτερη κατανόηση και αξιολόγηση των πραγματικών συνθηκών ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων.

Ακολουθεί ο πίνακας 9, όπου παρουσιάζονται οι ρυθμοί αερισμού για κατηγορίες χώρων βάση των χαρακτηριστικών τους, σύμφωνα με πρότυπο της ASHRAE.

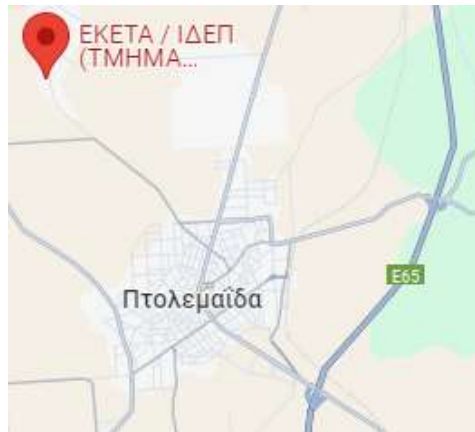
Πίνακας 9: Απόσπασμα πίνακα ενδεικνυόμενου ελάχιστου ρυθμού αερισμού ανά άτομο σε κατηγορίες χώρων (ANSI/ASHRAE 62.1, 2022)

Ρυθμός Αερισμού	Περιγραφή Χώρου	Παραδείγματα
2,5 L/s/person	Χώροι με χαμηλή ή καθιστική δραστηριότητα και χαμηλούς ρύπους Χώροι με μέτρια δραστηριότητα και χαμηλούς ρύπους	Δικαστήρια, Βιβλιοθήκες, Γραφεία
3,8 L/s/person	Χώροι με καθιστική ή μέτρια δραστηριότητα και υψηλότερους ρύπους	Αίθουσες διαλέξεων, Μπαρ, Καφετέριες, Κουρεία, Μουσεία
5 L/s/person	Χώροι με καθιστική ή μέτρια δραστηριότητα αλλά υψηλούς ρύπους Χώροι με υψηλή δραστηριότητα, αλλά χαμηλούς ρύπους	Αίθουσες διδασκαλίας, Εργαστήρια, Αποθήκες, Στούντιο, Χώροι κατασκευών
10 L/s/person	Χώροι με υψηλή δραστηριότητα και υψηλούς ρύπους	Αίθουσες αθλητικών δραστηριοτήτων, Αίθουσες ομορφιάς και νυχτιών

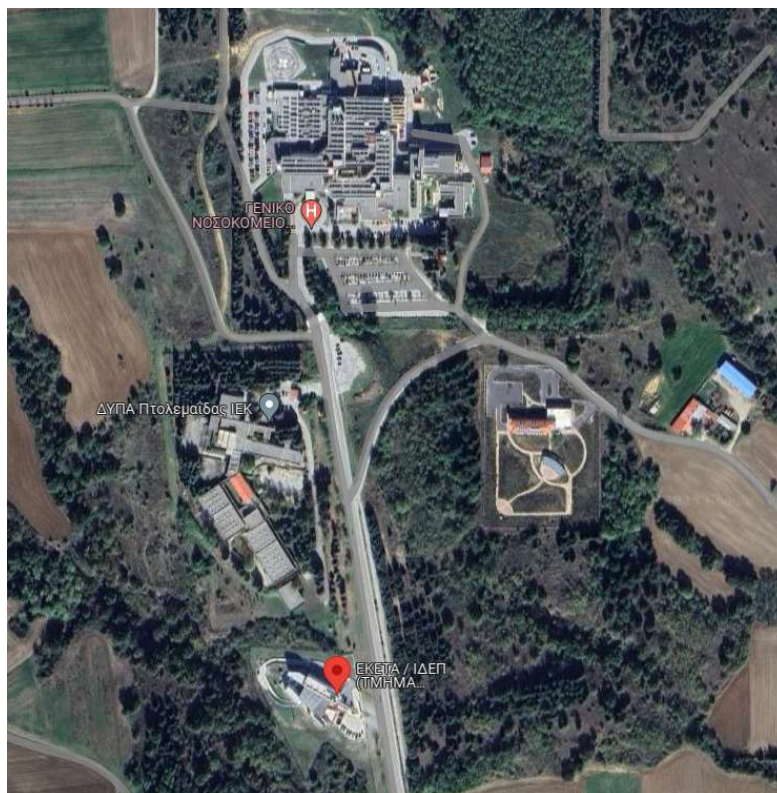
3. Μεθοδολογία μετρήσεων

3.1 Περιγραφή κτιρίου μελέτης

Το κτίριο δημόσιας χρήσης που παρουσιάζεται στην παρούσα μελέτη είναι το κτίριο του παραρτήματος του Εθνικού Κέντρου Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης / Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών Και Ενεργειακών Πόρων (ΕΚΕΤΑ/ΙΔΕΠ) το οποίο βρίσκεται στην πόλη της Πτολεμαΐδας. Η ακριβής του τοποθεσία είναι το 4ο χλμ. Πτολεμαΐδας - Γενικού Νοσοκομείου «Μποδοσάκειο», Πτολεμαΐδα 50200 όπως και φαίνεται στην εικόνα 7.



Εικόνα 8: Τοποθεσία κτιρίου ΕΚΕΤΑ Πτολεμαΐδας στο Google Maps



Εικόνα 9: Φωτογραφία από δορυφόρο της ευρύτερης περιοχής του κτιρίου ΕΚΕΤΑ Πτολεμαΐδας



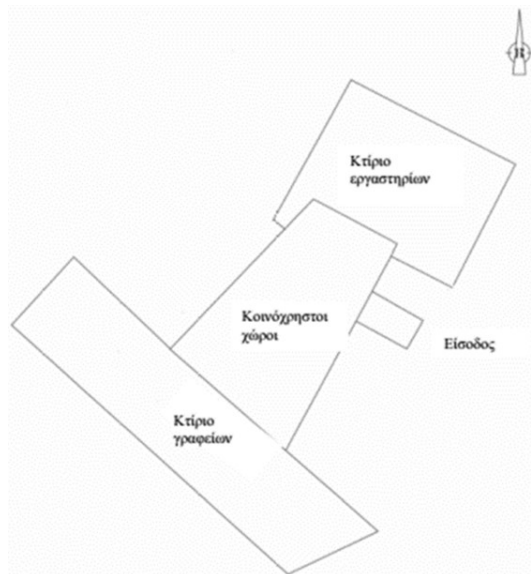
Εικόνα 10: Φωτογραφία από δορυφόρο του κτιρίου ΕΚΕΤΑ Πτολεμαΐδας

Πρόκειται για ένα κτίριο με υπόγειο, ισόγειο και όροφο στο οποίο στεγάζονται χώροι γραφείων και εργαστηρίων. Ο περιβάλλοντας χώρος, τοποθετείται σε επικλινές έδαφος και είναι διαμορφωμένος με ένα μεγάλο χώρο στάθμευσης οχημάτων ο οποίος διαχωρίζεται με τοιχία αντιστήριξης. Στο υπόλοιπο οικόπεδο παρατηρείται σύνηθες φύτευση. Το κτίσμα αυτό αποτελεί χώρο εργασίας για πολλούς επιστήμονες και ερευνητές. Πιο συγκεκριμένα, την περίοδο που έγιναν οι μετρήσεις στο κτίριο εργάζονταν καθημερινά περίπου 36 άτομα. Στο εσωτερικό του υπάρχουν επί το πλείστο γραφεία, ωστόσο υπάρχουν και άλλοι χώροι όπως βιβλιοθήκη, αμφιθέατρο, WC και εργαστήρια. Τα γραφεία βρίσκονται στη νοτιοδυτική όψη του κτιρίου, ενώ στα βορειοανατολικά βρίσκονται τα εργαστήρια. Η ίδια διαμόρφωση ισχύει τόσο για το ισόγειο, όσο και για το πρώτο πάτωμα. Η κεντρική είσοδος βρίσκεται στο ισόγειο σε νοτιοανατολικό προσανατολισμό, αποτελείται από ναλόπορτες και περιλαμβάνει και προθάλαμο. Τόσο η όψη της κεντρικής εισόδου όσο και η απέναντί της καλύπτονται σε μεγάλο μέρος τους από υαλοπίνακες.

3.1.1 Το αρχικό κτίριο

Το κτίριο αυτό κατασκευάστηκε σε δύο φάσεις. Το ΕΚΕΤΑ στην πόλη της Πτολεμαΐδας ήταν αρχικά ένα πολύ μικρότερο κτίριο, που η ανέγερσή του πραγματοποιήθηκε το 2003 ενώ ξεκίνησε να χρησιμοποιείται το 2009 με 18 εργαζόμενους, περίπου τους μισούς δηλαδή, σε σχέση με σήμερα. Στη γειτνιάζουσα περιοχή παρατηρείται αραιή δόμηση καθώς βρίσκεται σε εκτός σχεδίου πόλης περιοχή.

Βάσει του έτους κατασκευής, για το κτίριο αυτό έχει εκδοθεί άδεια οικοδόμησης μεταξύ των ετών 1979 και 2010, πράγμα που συνεπάγεται ότι χτίστηκε σύμφωνα με τον Κανονισμό Θερμομόνωσης Κτιρίων (Κ.Θ.Κ.), οπότε περιλαμβάνει θερμομονωτικό υλικό. Το αρχικό κτίριο αποτελούταν στο μεγαλύτερο μέρος του από μπετό (σκυρόδεμα) και στοιχεία πλήρωσης από διάτρητες οπτόπλινθους. Με βάση την ενεργειακή επιθεώρηση που είχε γίνει το κτίριο κατατάχθηκε στην κατηγορία Δ, ενώ βρίσκεται επίσης και στη Δ κλιματική ζώνη κατά ΚΕΝΑΚ.



Εικόνα 11: Σκαρίφημα ΕΚΕΤΑ πριν την επέκταση όπου φαίνεται ο προσανατολισμός του κτιρίου



Εικόνα 12: Αεροφωτογραφία του αρχικού κτιρίου ΕΚΕΤΑ πριν την επέκταση



Εικόνα 13: Φωτογραφία του αρχικού κτιρίου ΕΚΕΤΑ από την Νοτιοανατολική όψη



Εικόνα 14: Φωτογραφία του αρχικού κτιρίου ΕΚΕΤΑ από την Βορειοδυτική όψη



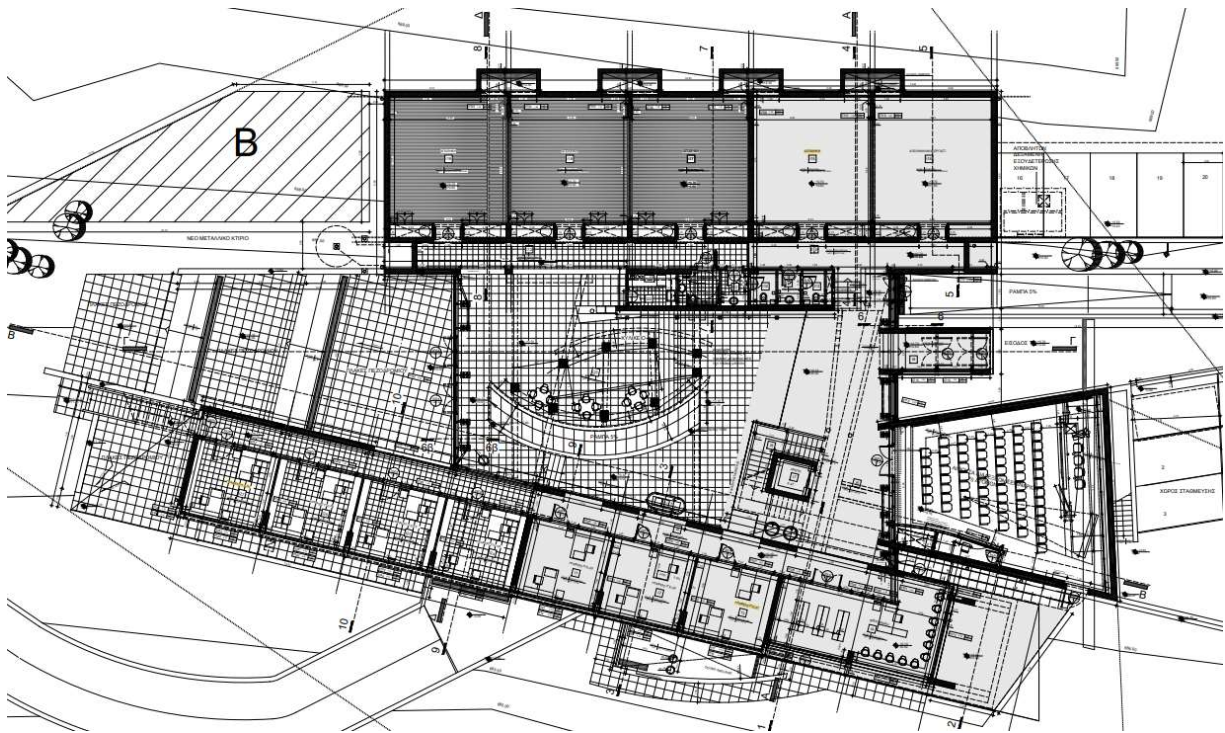
Εικόνα 15: Φωτογραφία του αρχικού κτιρίου ΕΚΕΤΑ από την Βορειοανατολική όψη



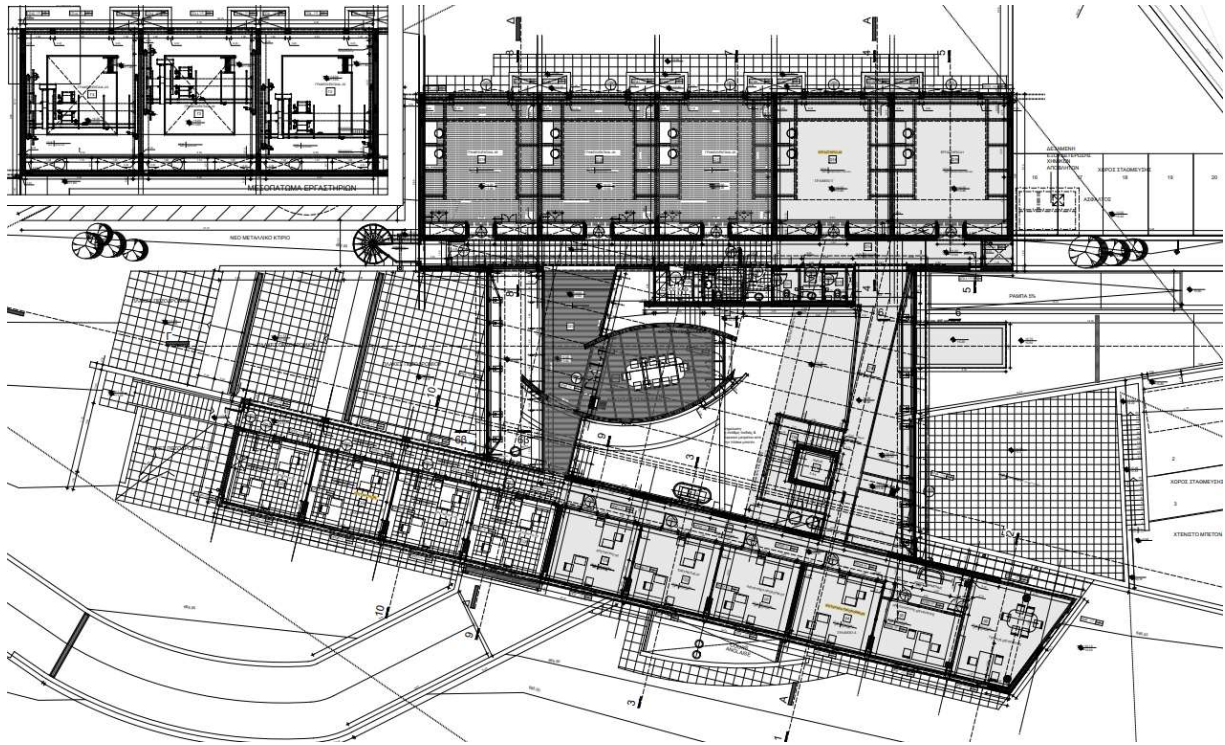
Εικόνα 16: Φωτογραφία του αρχικού κτιρίου ΕΚΕΤΑ από την Νοτιοδυτική όψη

3.1.2 Το κτίριο μετά το 2022

Το έτος 2022 εκκίνησε η λειτουργία του κτιρίου, με προσθήκες σε γραφεία, εργαστήρια και κοινόχρηστους χώρους. Πρόκειται για την 2^η φάση των κατασκευών που ολοκληρώθηκε με επιτυχία. Την περίοδο που έλαβαν χώρα οι μετρήσεις (11/7/2022 – 17/8/2023), οι εργασίες στο κτίριο είχαν ολοκληρωθεί. Το συνολικό πλέον κτίριο, αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος του από μπετό, μεταλλική κατασκευή και γυάλινες όψεις. Σύμφωνα με την ενεργειακή επιθεώρηση και το πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης (ΠΕΑ) που εξασφαλίστηκε στις 23/7/2019, δηλαδή πριν την ολοκλήρωση των έργων, το κτίριο είχε συνολική δομημένη επιφάνεια 998,7 m² και κατατάχθηκε στην ενεργειακή κατηγορία Δ, ενώ σημειώθηκε ότι η δυναμική ενεργειακή κατηγορία του είναι η Β. Στην επόμενη ενεργειακή επιθεώρηση και το νέο ΠΕΑ που εξασφαλίστηκε στις 9/11/2021 και έχει ισχύ για 10 έτη, η συνολική δομημένη επιφάνεια του κτιρίου αυξήθηκε στα 2218 m² και το κτίριο κατατάχθηκε πράγματι στην ενεργειακή κατηγορία Β.



Εικόνα 17: Κάτοψη σχεδίου ισογείου κτιρίου ΕΚΕΤΑ Πτολεμαΐδας



Εικόνα 18: Κάτοψη σχεδίου 1^{ου} ορόφου κτιρίου ΕΚΕΤΑ Πτολεμαΐδας



Εικόνα 19: Πρόσοψη κτιρίου ΕΚΕΤΑ στην Πτολεμαΐδα από την πλευρά του κεντρικού δρόμου (ΝΑ προσανατολισμός)



Εικόνα 20: Όψη κτιρίου ΕΚΕΤΑ Πτολεμαΐδα όπου φαίνονται τα εργαστήρια (ΒΑ προσανατολισμός)



Εικόνα 21: Πρόσοψη κτιρίου ΕΚΕΤΑ Πτολεμαΐδα όπου φαίνεται η κεντρική είσοδος και ο προθάλαμος (ΝΑ προσανατολισμός)



Εικόνα 22: Εσωτερικός κοινόχρηστος χώρος ισογείου κτιρίου ΕΚΕΤΑ Πτολεμαΐδα



Εικόνα 23: Εσωτερικός χώρος 1^{ου} ορόφου κτιρίου ΕΚΕΤΑ Πτολεμαΐδα (δεν υπάρχει δάπεδο στο μεγαλύτερο τμήμα)

3.2 Μετρήσεις στο εσωτερικό περιβάλλον

Οι μετρήσεις στο εσωτερικό του κτιρίου έλαβαν χώρα σε συγκεκριμένους χώρους. Οι χώροι αυτοί ήταν οι εξής:

Γραφείο Α → 1^{ος} όροφος Διεύθυνση Οικονομικών

Γραφείο Β → 1^{ος} όροφος Ερευνητής-05

Γραφείο Γ (Εργαστήριο) → 1^{ος} όροφος Εργαστήριο-02

Γραφείο Δ → Ισόγειο Γραφείο Π.Ε-01

Γραφείο Ε → Ισόγειο Γραφείο Π.Ε-07

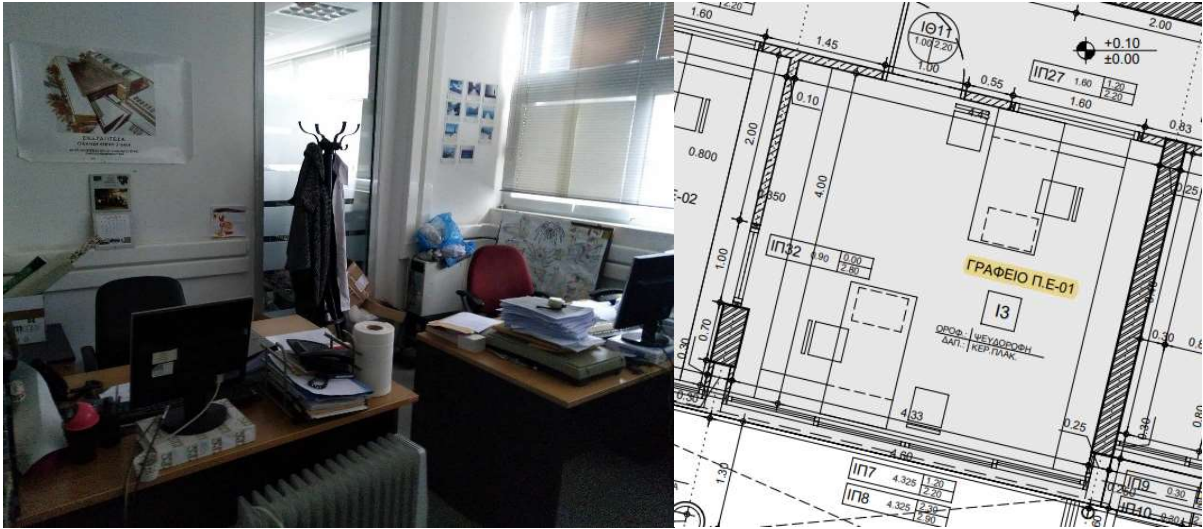
Γραφείο Ζ (Εργαστήριο) → Ισόγειο Αποθήκη Ι15

Σε όλα τα γραφεία έγιναν μετρήσεις θερμοκρασίας (T , °C), σχετικής υγρασίας (RH, %) και διοξειδίου του άνθρακα (CO_2 , ppm), ενώ στο γραφείο Α που ήταν και το κεντρικό γραφείο των μετρήσεων, μετρήθηκε επιπλέον η ταχύτητα του ανέμου (V_{air} , m/s) και οι επιφανειακές θερμοκρασίες (T_{mrt} , °C) σε τοίχους, οροφή, δάπεδο και παράθυρο.

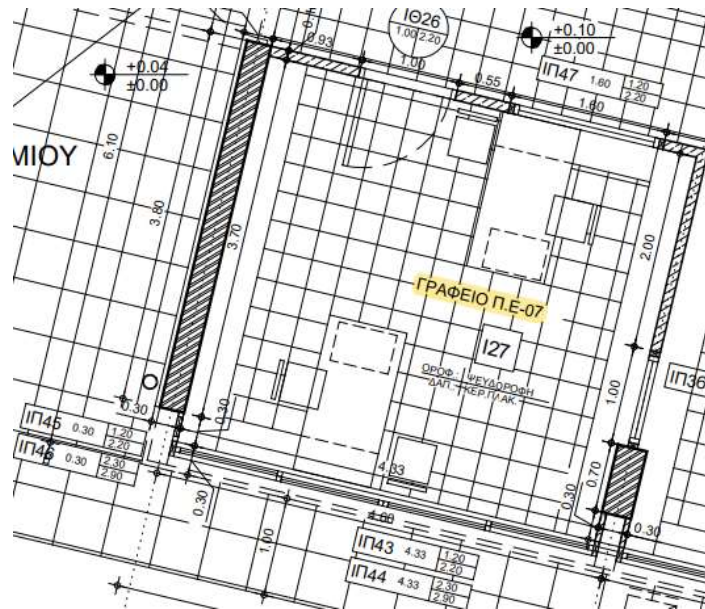
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται σε μεγέθυνση τα σχέδια των γραφείων που σημειώθηκαν μετρήσεις:



Εικόνα 24: Φωτογραφία και σχέδιο CAD γραφείου Διεύθυνση Οικονομικών, 1^{ος} όροφος (Γραφείο Α)



Εικόνα 27: Φωτογραφία και σχέδιο CAD Γραφείο Π.Ε-01, Ισόγειο (Γραφείο Δ)



Εικόνα 28: Σχέδιο CAD Γραφείο Π.Ε-07, Ισόγειο (Γραφείο Ε)

3.3 Όργανα μετρήσεων

3.3.1 Μετεωρολογικός σταθμός

Ο μετεωρολογικός σταθμός στήθηκε στην οροφή του ΕΚΕΤΑ στην Πτολεμαΐδα την περίοδο 11/7/2022 – 9/9/2022 για την καταγραφή των εξωτερικών συνθηκών. Περιλαμβάνει αισθητήρια όργανα που κατέγραψαν την εξωτερική θερμοκρασία (T_{out}), την σχετική υγρασία (RH), την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου ($v_{ar_{out}}$) και την ατμοσφαιρική πίεση (P).



Εικόνα 29: Ο μετεωρολογικός σταθμός τοποθετημένος στην οροφή του κτιρίου του ΕΚΕΤΑ στην Πτολεμαΐδα

Τα επιμέρους μετρητικά όργανα του μετρητικού σταθμού φαίνονται στις παρακάτω εικόνες 29α-29δ και τα χαρακτηριστικά τους αναλύονται στον παρακάτω πίνακα.



Εικόνα 29α: Όργανο μέτρησης ατμοσφαιρικής πίεσης



Εικόνα 29β: Όργανο μέτρησης διεύθυνσης αέρα



Εικόνα 29γ: Όργανο μέτρησης θερμοκρασίας-υγρασίας



Εικόνα 29δ: Όργανο μέτρησης ταχύτητας αέρα

Πίνακας 10: Τα όργανα του μετεωρολογικού σταθμού και τα χαρακτηριστικά του

Όνομα Οργάνου	Χαρακτηριστικά οργάνων
Αισθητήρας ατμοσφαιρικής πίεσης SKPS 820	Ακρίβεια: ± 3 mBar Εύρος: 0-1100 mBar
Διεύθυνση αέρα Thies CLIMA 4.3127.40.000	Ακρίβεια: $\pm 4^\circ$ Εύρος: 0-360 $^\circ$
Αισθητήρας θερμοκρασίας - υγρασίας Delta Ohm Hygrotransmitter HD9009TR	Ακρίβεια: $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (T), $\pm 5\%$ (RH) Εύρος: -40 to 80 $^\circ\text{C}$ (T), 0-100% (RH)
Ταχύτητα αέρα Thies CLIMA 4.3515.30.000	Ακρίβεια: ± 0.5 m/s Εύρος: 0.5-40 m/s

3.3.2 Όργανα μέτρησης εσωτερικών συνθηκών

Παρακάτω παρουσιάζονται τα όργανα με τα οποία σημειώθηκαν οι μετρήσεις στο εσωτερικό του κτιρίου.

- HOBO onset U12-012 Temp/RH/Light External Data Logger



- Telaire 7001 onset Carbon Dioxide/Temp Monitor



- HOBO onset UX100-003 USB Temp/RH Data Logger



- Hobo onset UX100-014M Type J thermocouple Data Logger



- HOBO onset MX1102 Carbon Dioxide/Temp/RH Data Logger



- Ανεμόμετρο – Gill Instruments 3D Anemometer



- Θερμοκάμερα FLIR E8-XT



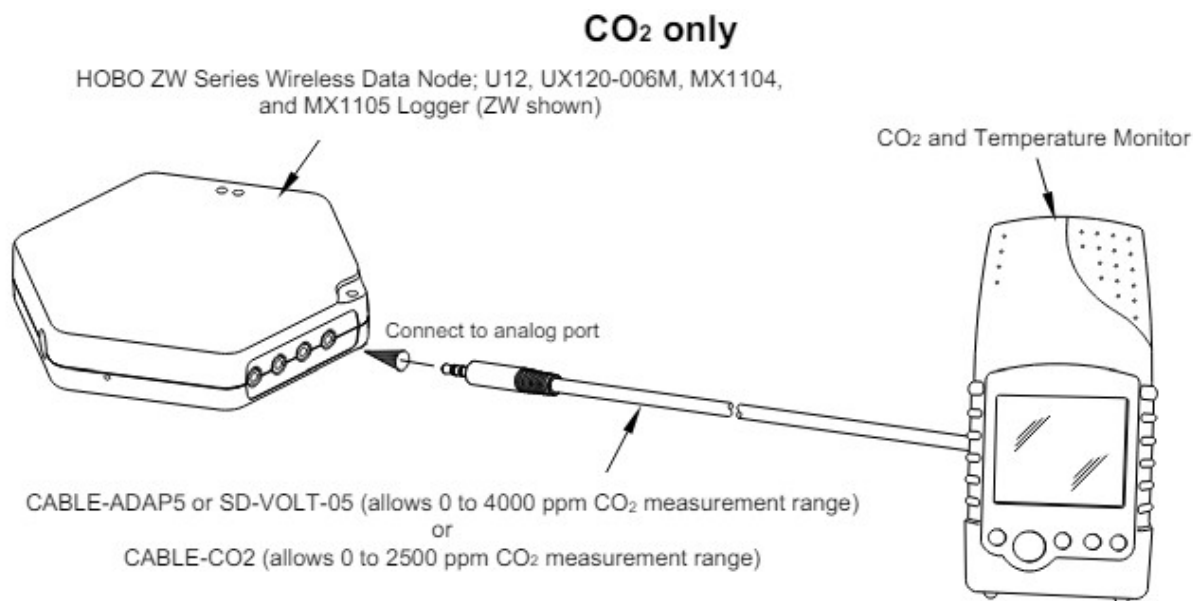
- Επιφανειακός αισθητήρας Pt100



- STYLITIS-10 symmetron Data Logger



Επειδή το όργανο HOBO onset U12-012 δεν ήταν ικανό από μόνο του να μετρήσει τη συγκέντρωση του CO₂ στα γραφεία όπου τοποθετήθηκε, που ήταν και αντικείμενο της συγκεκριμένης μελέτης, ήταν απαραίτητο να τοποθετηθεί σε συνδυασμό με ένα άλλο όργανο της ίδιας εταιρίας, το Telaire 7001. Συνδεόντας αυτά τα όργανα μεταξύ τους με ένα καλώδιο (Ethernet to analog), ήταν εφικτό να γίνει ταυτόχρονη μέτρηση του CO₂, καθώς και της θερμοκρασίας και της υγρασίας που μετράει το HOBO U12-012. Στην εικόνα φαίνεται ο τρόπος σύνδεσης του οργάνου Telaire 7001 με άλλα όργανα της onset με σκοπό της μέτρηση CO₂.



Εικόνα 30: Τρόπος σύνδεσης Telaire με άλλα όργανα της onset για την μέτρηση CO₂ (Πηγή : <https://www.onsetcomp.com/>)

Επιπλέον οι επιφανειακοί αισθητήρες και το ανεμόμετρο δεν καταγράφουν μετρήσεις αυτόνομα. Γι' αυτό το λόγο χρειάζεται ένα επιπλέον εργαλείο που θα συνδεθούν πάνω σε εκείνο προκειμένου να καταγραφούν οι μετρήσεις (datalogger). Το εργαλείο αυτό σε αυτήν την περίπτωση είναι το STYLITIS-10 Data Logger που μπορεί να πραγματοποιήσει δειγματοληψία ανά δευτερόλεπτο. Κάθε επιφανειακός αισθητήρας Pt100 συνδέεται με ένα απλό 2κλωνο καλώδιο στο STYLITIS-10. Το ανεμόμετρο συνδέεται επίσης πάνω στο καταγραφικό με ένα απλό 5κλωνο καλώδιο. Έτσι τα δεδομένα αποθηκεύονται στη ενσωματωμένη μνήμη του STYLITIS-10 και στην κάρτα MicroSD που υποστηρίζει.

Ακολουθεί ένας πίνακας που συγκεντρώνει τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη και τα οργανώνει με βάση τις μετρήσεις που πραγματοποίησαν και το χώρο που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ παράλληλα φαίνονται και τα χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 11: Τα όργανα των μετρήσεων, τα χαρακτηριστικά τους και χώρος που τοποθετήθηκαν

Είδος μέτρησης / Τύπος οργάνου	Θέση οργάνων	Χαρακτηριστικά μετρήσεων
T-RH / Hobo onset UX100-003	Γραφείο Β	Ακρίβεια: $\pm 0.21^{\circ}\text{C}$ (T), $\pm 3.5\%$ (RH) Εύρος: $-20 - 70^{\circ}\text{C}$ (T), 15-95% (RH)
Επιφανειακή Θερμοκρασία T_{mrt} / Hobo UX100-014M thermocouple	Γραφείο Α	Ακρίβεια: $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ (T) Εύρος: -260° to 400°C (T)
T-RH- C_{CO_2} /Telaire 7001 + Hobo onset U12-012	Γραφείο Α Γραφείο Γ Γραφείο Δ	Ακρίβεια: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (T), $\pm 5\%$ (RH), $\pm 5\%$ ή ± 50 ppm (C_{CO_2}) Εύρος: $-20 - 70^{\circ}\text{C}$ (T), 5-95% (RH), 0-10000 ppm (C_{CO_2})
T-RH- C_{CO_2} / Hobo onset MX1102	Γραφείο Ε	Ακρίβεια: $\pm 0.21^{\circ}\text{C}$ (T), $\pm 2\%$ (RH), $\pm 5\%$ ή ± 50 ppm (C_{CO_2}) Εύρος: $0 - 50^{\circ}\text{C}$ (T), 1-95% (RH), 0-5000 ppm (C_{CO_2})
3D Ανεμόμετρο (Gill Instruments 3D anemometer)	Γραφείο Α	Ακρίβεια: $\pm 1.5\%$ RMS , 2° σε 12 m/s Εύρος: 0-50 m/s , 0° - 360°
Επιφανειακή Θερμοκρασία / PT100 συνδεδεμένα σε data logger	Γραφείο Α	Ακρίβεια: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (T), $\pm 5\%$ (RH) Εύρος: $-20 - 70^{\circ}\text{C}$ (T), 25-95% (RH)
Επιφανειακή Θερμοκρασία / Θερμοκάμερα FLIR E8-XT	Όλα τα Γραφεία	Ακρίβεια: $-20^{\circ}\text{C} - 550^{\circ}\text{C}$ Εύρος: $\pm 2\%$ ή $\pm 2^{\circ}\text{C}$

*Ο πίνακας που παρουσιάζεται περιέχει την τοποθέτηση των οργάνων μετά την αλλαγή θέσεων στις 9/9/2022 που φαίνεται στον πίνακα 13

3.3.3 Βαθμονόμηση μετρητικών οργάνων

Τα μετρητικά όργανα πριν τοποθετηθούν στα γραφεία προς μελέτη, βαθμονομήθηκαν με σκοπό την εξακρίβωση της εγκυρότητας των συλλεγόμενων δεδομένων. Η διαδικασία της βαθμονόμησης έγινε σε προηγούμενη διπλωματική εργασία (Πειραματική διερεύνηση συνθηκών εσωτερικής περιβαλλοντικής ποιότητας κτιρίου γραφείων στη Δυτική Μακεδονία, Κυριαζής Εμμανουήλ, ΠΔΜ) και τα αποτελέσματα που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα διπλωματική για την διόρθωση των σφαλμάτων που παρουσιάζουν τα μετρητικά όργανα. Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά κάποιες διαδικασίες που ακολουθήθηκαν και τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

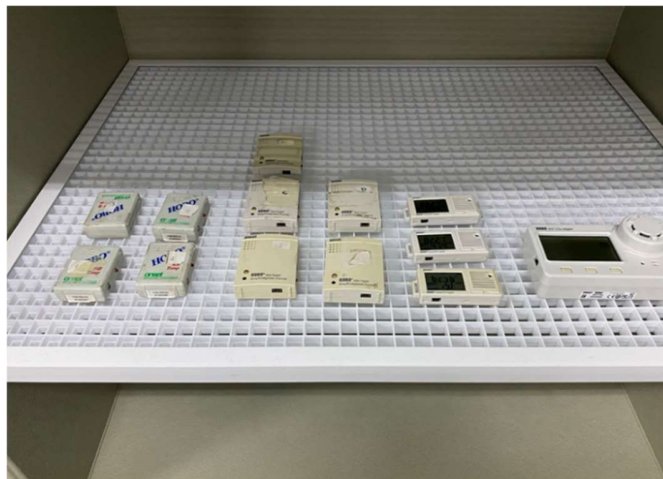
Για την βαθμονόμηση των οργάνων μέτρησης της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας, χρησιμοποιήθηκε η εργαστηριακή διάταξη στα εργαστήρια της σχολής Air Conditioning Laboratory Unit A660 η οποία έχει την δυνατότητα να θερμάνει, ψύξει, υγράνει και αφυγράνει τον αέρα μέσα της.



Εικόνα 31: Εργαστηριακή διάταξη Air Conditioning Laboratory Unit A660 (Πηγή: Κυριαζής, 2022)

Πριν την διεξαγωγή της βαθμονόμησης των HOBO τα θερμομέτρα της διάταξης τοποθετήθηκαν σε πάγο όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.5 για την επιβεβαίωση ότι τα θερμομέτρα της διάταξη δείχνουν αληθές τιμές. Τα HOBO τοποθετήθηκαν στον μονωμένο θάλαμο της διάταξης και εξετάστηκαν πέντε (5) διαφορετικά σενάρια συνδυασμών θερμοκρασίας-υγρασίας με το κάθε σενάριο να διαρκεί περίπου τριάντα λεπτά (30min). Παρακάτω φαίνονται οι τιμές που δόθηκαν στην θερμοκρασία (T_{lab}) και υγρασία (HR_{lab}) για κάθε διαφορετικό σενάριο:

1. $T_{lab1} = 20^{\circ}\text{C}$ και $HR_{lab} = 70\%$.
2. $T_{lab2} = 24^{\circ}\text{C}$ και $HR_{lab2} = 60\%$.
3. $T_{lab3} = 26^{\circ}\text{C}$ και $HR_{lab3} = 45\%$.
4. $T_{lab4} = 30^{\circ}\text{C}$ και $HR_{lab4} = 40\%$.
5. $T_{lab5} = 34^{\circ}\text{C}$ και $HR_{lab5} = 40\%$.



Εικόνα 32: Τα όργανα μέτρησης στον μονωμένο θάλαμο της διάταξης (Πηγή: Κυριαζής, 2022)



Εικόνα 33: Θερμόμετρο διάταξης σε πάγο (Πηγή: Κυριαζής, 2022)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων θερμοκρασίας:

Πίνακας 12: Θερμοκρασίες που σημείωσαν τα όργανα κατά την βαθμονόμηση

	Σενάριο 1°	Σενάριο 2°	Σενάριο 3°	Σενάριο 4°	Σενάριο 5°
$T_{lab}(^{\circ}\text{C})$	20	24	26	30	34
HB_TL A	19,55	23,86	26,15	30,41	34,75
HB_TL B	19,41	23,75	25,99	30,18	34,52
HB_TL C	19,67	24	26,24	30,41	34,75
HB_TL D	19,45	23,79	26,05	30,28	24,62
HB_TL E	19,61	23,97	26,2	30,41	34,76
HB K	19,4	23,71	26,03	30,47	34,85
HB MX	19,41	23,79	25,8	30,3	34,43

Πίνακας 13: Σχετικές υγρασίες που σημείωσαν τα όργανα κατά την βαθμονόμηση.

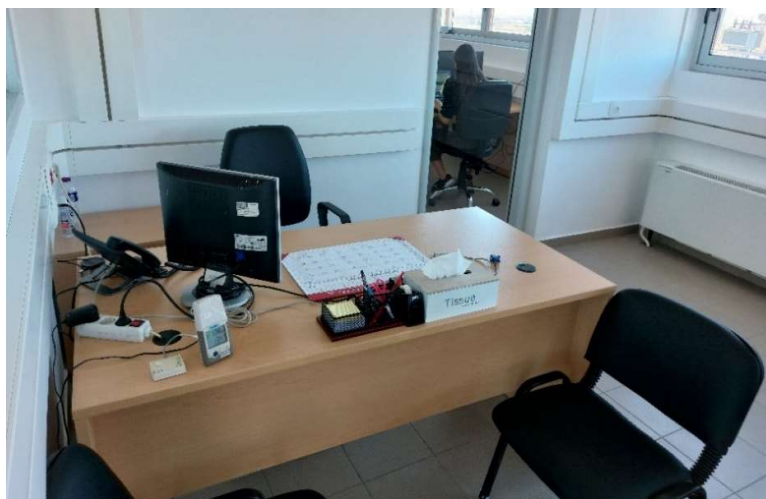
	Σενάριο 1°	Σενάριο 2°	Σενάριο 3°	Σενάριο 4°	Σενάριο 5°
$HR_{lab}(\%)$	60	70	45	40	40
HB_TL A	60,02	71,38	44,27	40,27	29,78
HB_TL B	59,63	70,86	44,44	40,69	40,26
HB_TL C	60,14	72,89	43,18	39,02	38,52
HB_TL D	59,39	70,69	44,26	40,55	40,12
HB_TL E	60,03	74,66	38,92	33,63	32,93
HB K	60,03	74,66	38,92	33,63	32,93
HB MX	59,63	71,38	44,27	40,55	40,13

Με βάση λοιπόν τις μετρήσεις που σημείωσαν τα όργανα σε θερμοκρασία και σχετική υγρασία και την θερμοκρασία και σχετική υγρασία αναφοράς (αυτή που ορίστηκε στην διάταξη), δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα για το κάθε ένα από τα όργανα, όπου στον άξονα X τοποθετήθηκαν οι τιμές θερμοκρασίας που ορίστηκαν στη διάταξη ενώ στον άξονα Y τοποθετήθηκαν οι τιμές της θερμοκρασίας που μετρήθηκαν από τα όργανα (Παράρτημα). Αντίστοιχα δημιουργήθηκε διάγραμμα για το κάθε όργανο με βάση τις μετρήσεις σχετικής υγρασίας (Παράρτημα). Τοποθετώντας λοιπόν πάνω στα γραφήματα τις τιμές σαν σημεία (T_{actual}, T_{ref}) σε μορφή (X,Y) και συνδέοντας τα σημεία προέκυψε η καμπύλη διακρίβωσης θερμοκρασίας για το κάθε όργανο που είναι της μορφής $y = a * x + b$. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις μετρήσεις σχετικής υγρασίας. Από την εξίσωση αυτή για κάθε τιμή θερμοκρασίας ή σχετικής υγρασίας (x) που μετρήθηκε ανά γραφείο με κάποιο συγκεκριμένο όργανο, παράχθηκε μία νέα τιμή (y) που είναι πλέον η διορθωμένη (ή καλιμπραρισμένη). Χρησιμοποιώντας λοιπόν τις νέες αυτές διορθωμένες τιμές συνεχίστηκε η εκπόνηση της μελέτης με μεγαλύτερη ακρίβεια.

4. Πειραματικές μετρήσεις

4.1 Περιγραφή διαδικασίας μετρήσεων

Οι μετρήσεις στο κτίριο ξεκίνησαν στις 11/7/2022 για έξι γραφεία και ολοκληρώθηκαν για τα δύο από αυτά στις 9/9/2022, ενώ για τα υπόλοιπα τέσσερα στις 17/8/2023. Περιλάμβαναν μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα του χώρου (T), της σχετικής του υγρασίας (RH) και της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), ενώ για ένα γραφείο μετρήθηκε επιπλέον η ταχύτητα του αέρα (V_{air}) και η επιφανειακή θερμοκρασία (T_{mrt}) της κάθε πλευράς του δωματίου. Η συλλογή των δεδομένων δεν έγινε εξ ολοκλήρου με μία επίσκεψη στο κτίριο. Τα όργανα με τα οποία έγιναν οι καταγραφές έχουν περιορισμένη μνήμη, η οποία ήταν πλήρης ανά περίοδο περίπου 10 ημερών. Μετά την πλήρωση της μνήμης των οργάνων έπρεπε να ακολουθηθεί διαδικασία αποθήκευσης των μετρήσεων και άδειασμα της μνήμης τους προκειμένου να είναι σε θέση να σημειώσουν μετρήσεις εκ νέου. Για τη συγκεκριμένη διαδικασία απαιτούνταν κάποιος χρόνος, στον οποίο τα όργανα δεν ήταν εφικτό να σημειώσουν μετρήσεις. Γι' αυτό καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων παρατηρήθηκαν κάποια κενά, τα οποία κάποιες φορές διαρκούσαν λίγα λεπτά και άλλες φορές περισσότερο χρόνο. Η τοποθέτηση των οργάνων έγινε με βάση τα πρότυπα ANSI/ASHRAE 55 (2023) και στο ISO 7726-2001. Ουσιαστικά τα όργανα τοποθετήθηκαν σε ύψος περίπου 1,1m (πάνω σε γραφείο όπως φαίνεται στην εικόνα) που αντιστοιχεί σε καθήμενους ανθρώπους και μακριά από σημεία έντονης ακτινοβολίας.

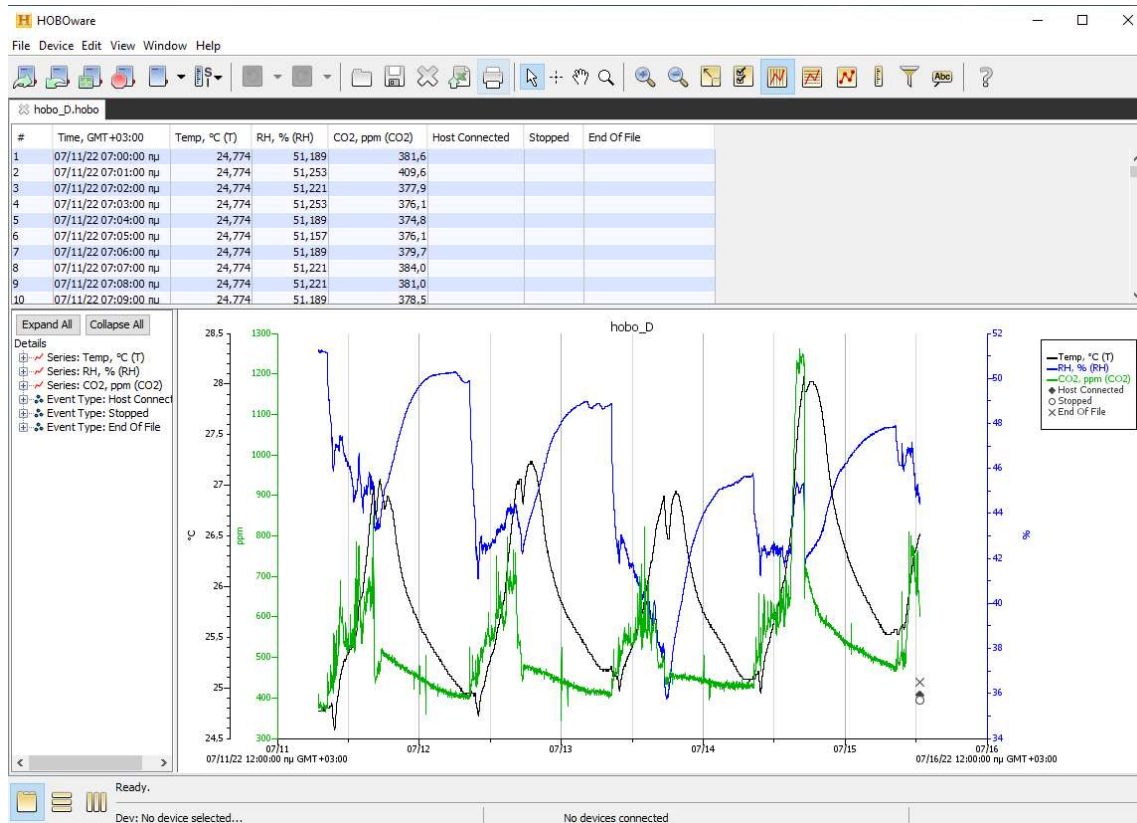


Εικόνα 34: Η τοποθέτηση των οργάνων Hobo και Telaire πάνω στο γραφείο

Πίνακας 14: Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν ανά περίοδο στο κάθε γραφείο

Γραφείο	Περίοδος 11/7/2022 - 9/9/2022	Περίοδος 9/9/2022 - 17/8/2023
Γραφείο Α	Hobo D	Hobo D
Γραφείο Β	Hobo B	Hobo K
Γραφείο Γ	Hobo E	Hobo B
Γραφείο Δ	Hobo A	Hobo E
Γραφείο Ε	Hobo C	-
Γραφείο Ζ	Hobo Mx-CO ₂	-

Τα αρχεία που εξήχθησαν από τα όργανα μετρήσεων ήταν σε μορφή Onset HOBO Datafile και ήταν δυνατό να ανοιχθούν με το λογισμικό HOBOWare που υπάρχει για το συγκεκριμένο σκοπό. Ακολουθεί ενδεικτική εικόνα που φαίνεται η μορφή ενός αρχείου που ανοίχθηκε με το HOBOWare.



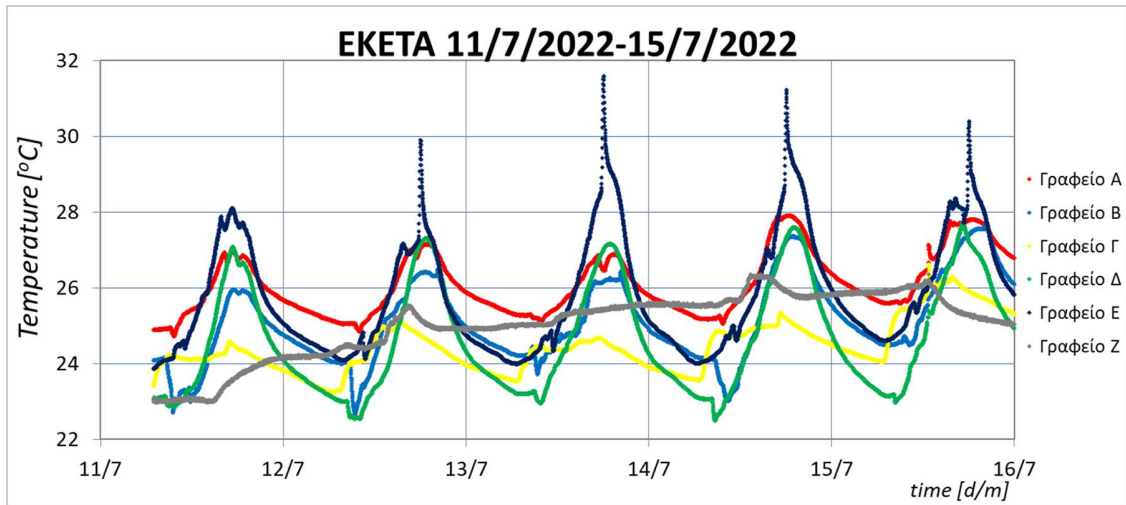
Εικόνα 35: Ενδεικτικό αρχείο καταγραφής σε μορφή HOBOWare datafile (αρχική) από το όργανο hobo D

Αφού συλλέχθηκαν οι μετρήσεις ξεκίνησε η διαδικασία της επεξεργασίας. Όλα τα αρχεία καταγραφών ανοίχτηκαν ένα προς ένα και τα αποτελέσματα τους εξήχθησαν σε υπολογιστικά φύλλα του Microsoft Excel. Στη συνέχεια αφού όλα τα δεδομένα των μετρήσεων περάστηκαν στο Excel, ακολούθησε η διαδικασία διόρθωσης των τιμών (βαθμονόμηση) της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας όπως αυτή αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι νέες τιμές συγκεντρώθηκαν σε ένα αρχείο και στη συνέχεια σε νέο φύλλο, βάσει των τιμών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, υπολογίστηκε η μερική πίεση υδρατμών (Pa) από την εξίσωση [2.8] που παρατέθηκε στο κεφάλαιο 2.2. Η μερική πίεση υδρατμών είναι αναγκαία για τον υπολογισμό των δεικτών PMV-PPD βάσει του μοντέλου του Fanger.

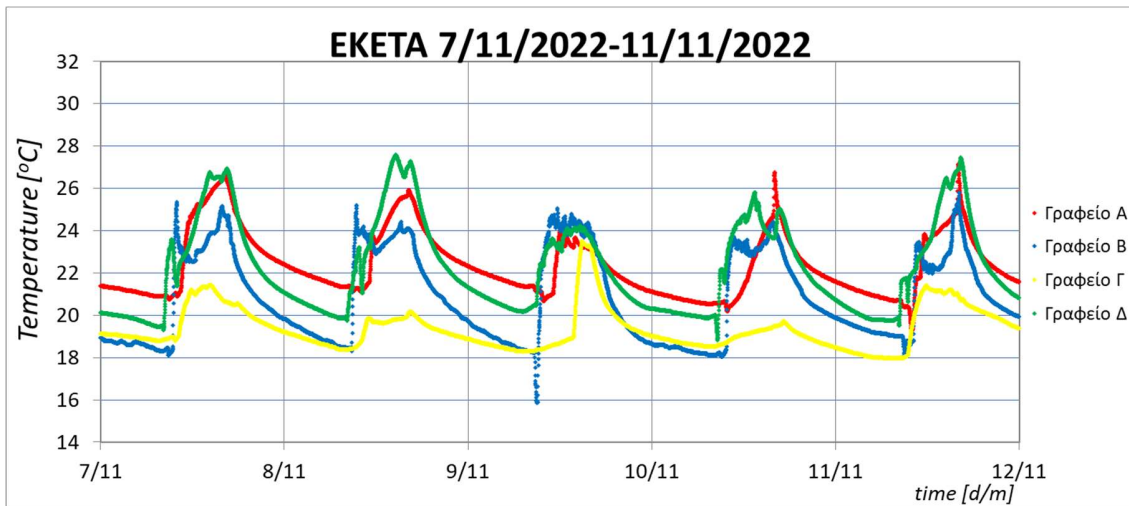
4.2 Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων

Παρακάτω επιλέχθηκε να παρουσιαστούν 5 ενδεικτικά διαγράμματα των μετρήσεων της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και της συγκέντρωσης CO₂ που αντιπροσωπεύουν τις εποχιακές συνθήκες και συνθήκες λειτουργίας σε διαφορετικές περιόδους του έτους. Πιο συγκεκριμένα, τα διαγράμματα αυτά απεικονίζουν μετρήσεις διάρκειας μίας εργάσιμης εβδομάδας (Δευτέρα-Παρασκευή) και αντιπροσωπεύουν την κάθε εποχή που έλαβαν χώρα μετρήσεις. Οι μηνιαίες περιόδους των αντίστοιχων μετρήσεων βρίσκονται στο Παράρτημα III. Στα γραφεία E και Z οι μετρήσεις τερματίστηκαν στις 9/9/2022 οπότε εικονίζονται μόνο στην θερινή περίοδο του 2022.

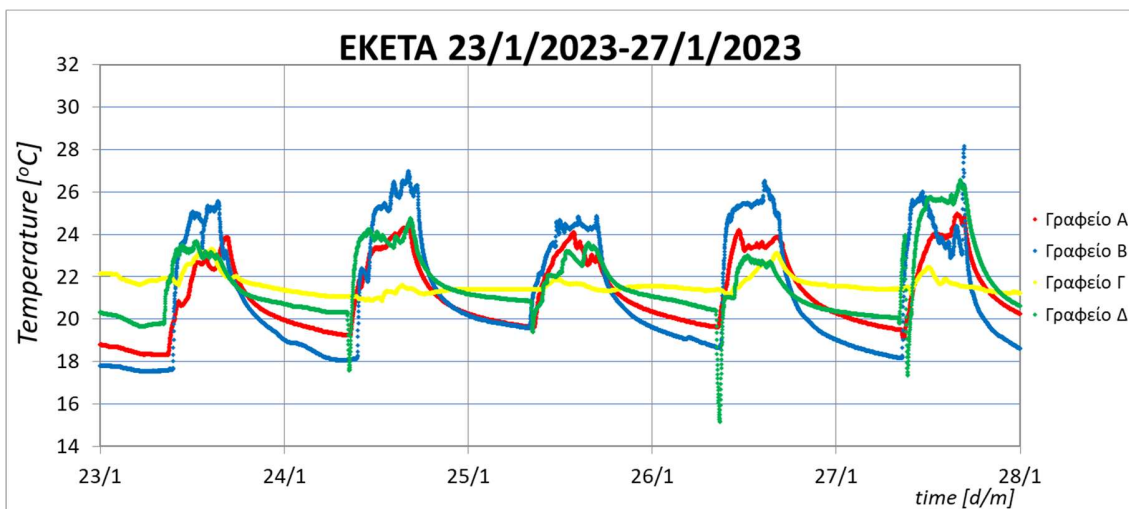
Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα της θερμοκρασίας του αέρα:



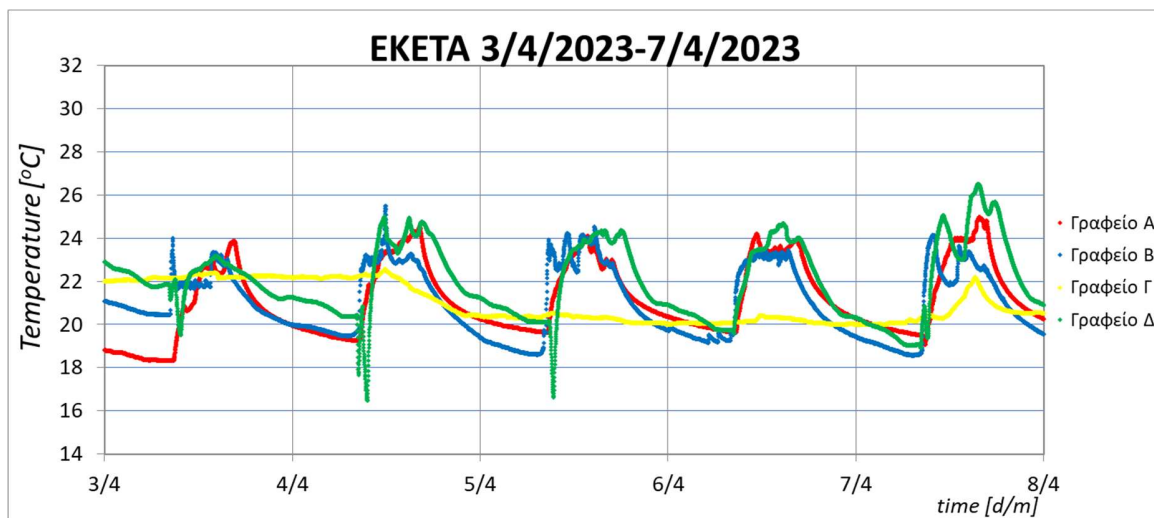
Διάγραμμα 4: Θερμοκρασία αέρα κάθε γραφείου για ενδεικτική θερινή περίοδο του 2022



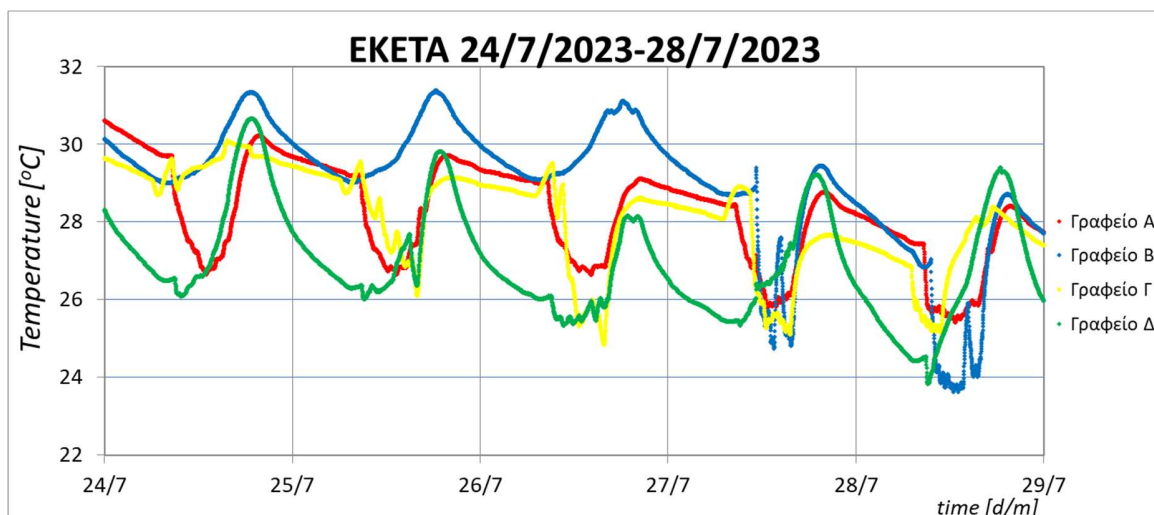
Διάγραμμα 5: Θερμοκρασία αέρα κάθε γραφείου για ενδεικτική φθινοπωρινή περίοδο του 2022



Διάγραμμα 6: Θερμοκρασία αέρα κάθε γραφείου για ενδεικτική χειμερινή περίοδο του 2023



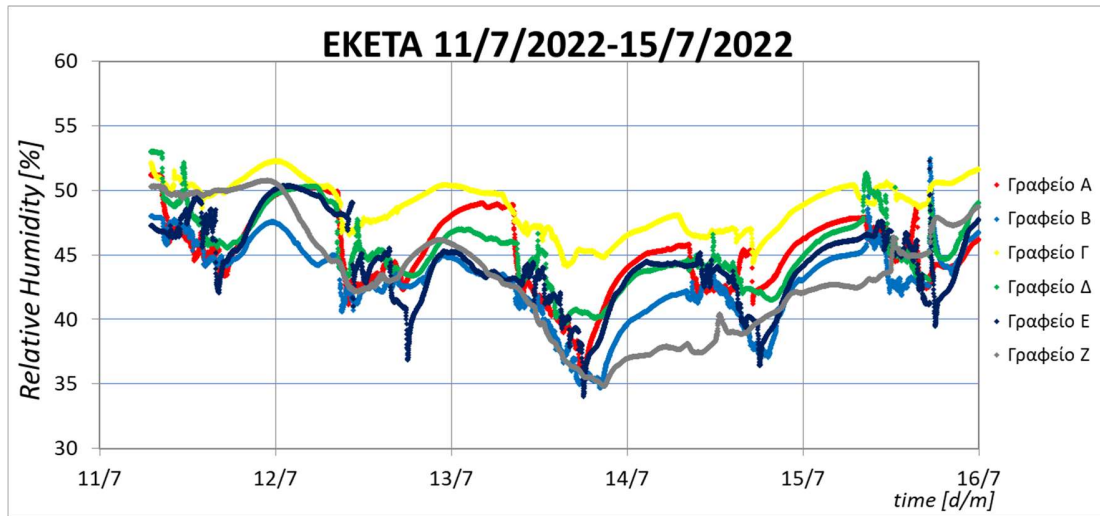
Διάγραμμα 7: Θερμοκρασία αέρα κάθε γραφείου για ενδεικτική εαρινή περίοδο του 2023



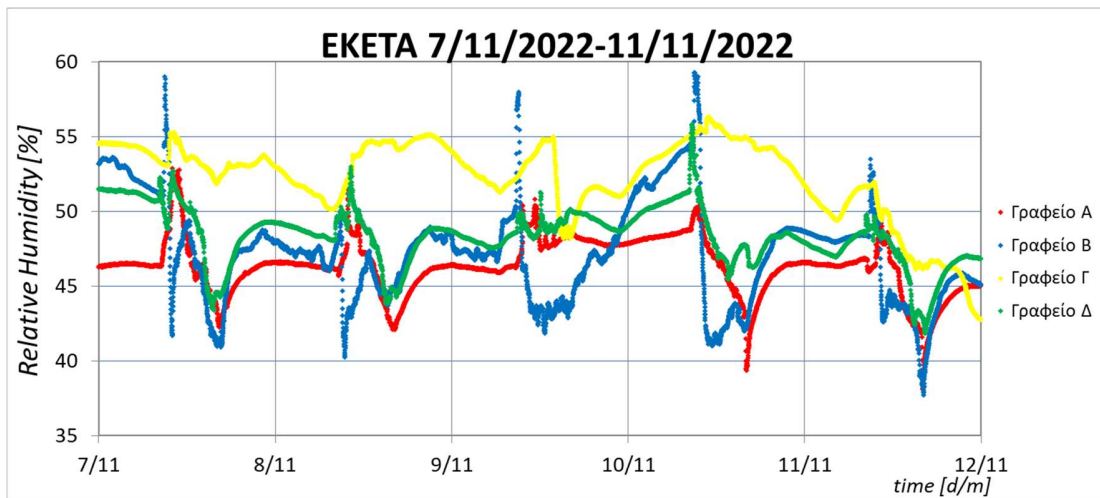
Διάγραμμα 8: Θερμοκρασία αέρα κάθε γραφείου για ενδεικτική θερινή περίοδο του 2023

Αρχικά σε όλες τις περιόδους μετρήσεων παρατηρούνται «spikes» στην θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια του μεσημεριού και πιο συγκεκριμένα μεταξύ των ωρών 10:00 και 18:00. Αυτό είναι λογικό αν υποθέσουμε ότι η άνοδος της εξωτερικής θερμοκρασίας αρχίζει περίπου αυτές τις ώρες ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες. Τα γραφεία Α, Β, Δ παρατηρείται να έχουν όμοια συμπεριφορά στη διακύμανση της θερμοκρασίας τους που πιθανόν να οφείλεται στον κοινό προσανατολισμό τους. Τα γραφεία Γ και Ζ έχουν αντίθετο προσανατολισμό από τα υπόλοιπα και σημειώνουν διαφορετικές διακυμάνσεις στην θερμοκρασία. Ωστόσο ο χώρος τους είναι πολύ μεγαλύτερος από τα υπόλοιπα και πιθανώς επηρεάζει την κατανομή της θερμοκρασίας. Τα γραφεία που παρουσιάζουν την χαμηλότερη θερμοκρασία, καθώς και τις λιγότερες διακυμάνσεις της είναι τα Γ και Ζ. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι αυτοί οι χώροι είναι εργαστήρια και απαιτούν διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας από τα γραφεία. Η συμπεριφορά της θερμοκρασίας στο κάθε γραφείο με βάση τα παραπάνω διαγράμματα αλλάζει κάθε εποχή και δεν είναι δυνατόν να υπάρχει σαφής εικόνα με μόνο αυτά τα στοιχεία. Ωστόσο οι μέσες θερμοκρασίες του καλοκαιριού αναμένεται να είναι σημαντικά υψηλότερες από αυτές των υπόλοιπων μηνών.

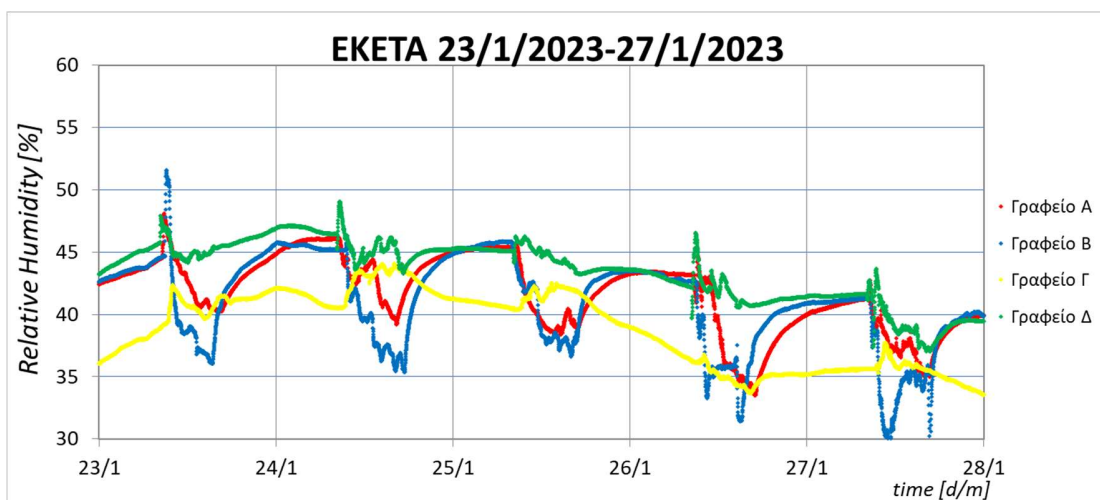
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα σχετικής υγρασίας:



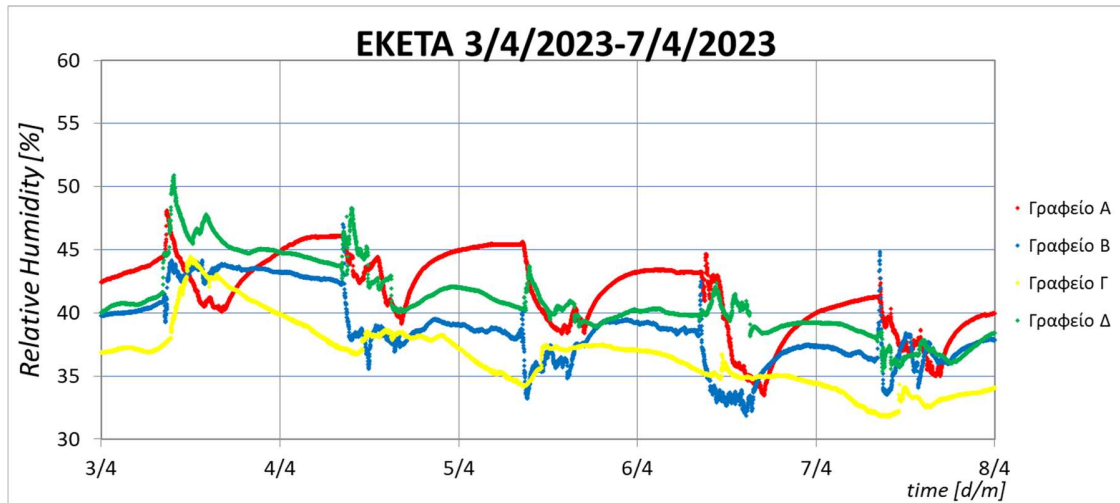
Διάγραμμα 9: Σχετική υγρασία κάθε γραφείου για ενδεικτική θερινή περίοδο του 2022



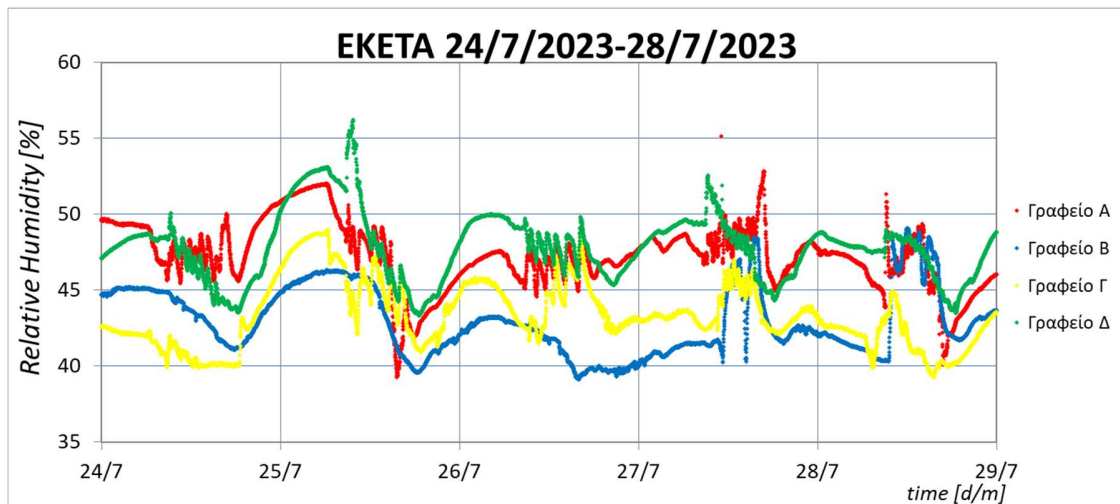
Διάγραμμα 10: Σχετική υγρασία κάθε γραφείου για ενδεικτική φθινοπωρινή περίοδο του 2022



Διάγραμμα 11: Σχετική υγρασία κάθε γραφείου για ενδεικτική χειμερινή περίοδο του 2023



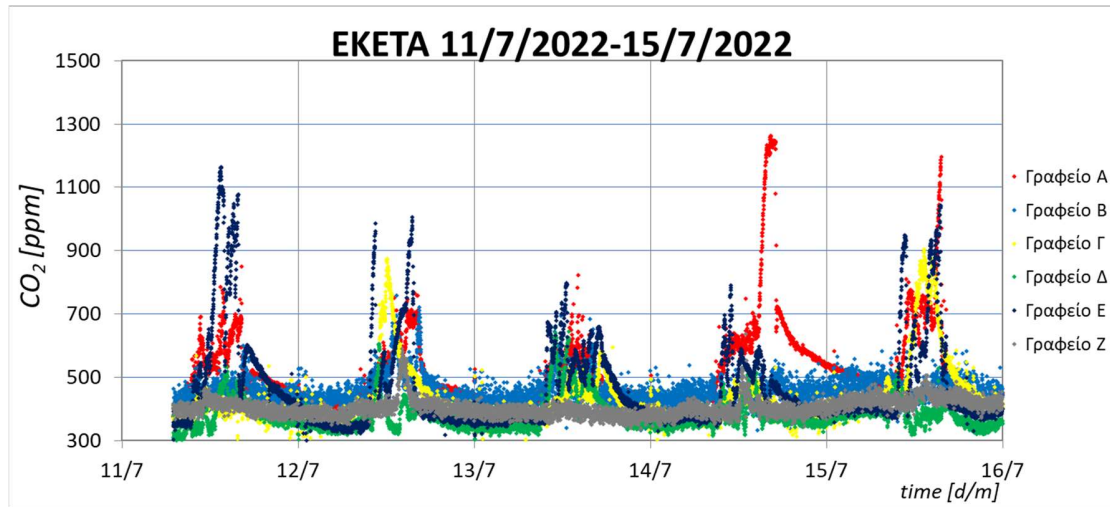
Διάγραμμα 12: Σχετική υγρασία κάθε γραφείου για ενδεικτική εαρινή περίοδο του 2023



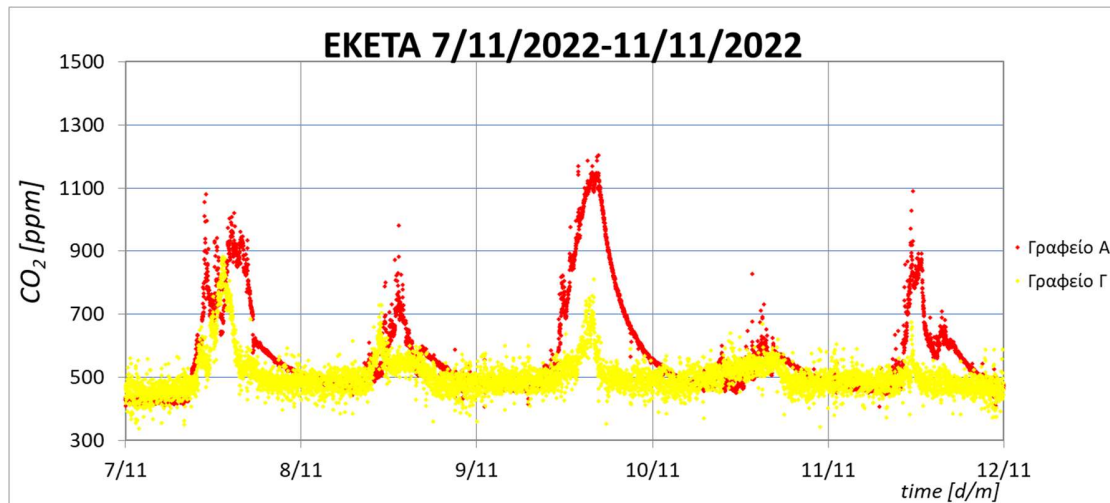
Διάγραμμα 13: Σχετική υγρασία κάθε γραφείου για ενδεικτική θερινή περίοδο του 2023

Από τα παραπάνω διαγράμματα σχετικής υγρασίας, παρατηρείται ότι όλα τα γραφεία είναι μέσα στα επιθυμητά όρια του 30%-70% για όλες τις τυπικές περιόδους (ISO 7730,2008). Το καλοκαίρι παρατηρούνται υψηλότερες τιμές σε σχέση με το χειμώνα. Η σχετική υγρασία σχετίζεται επίσης και με τα άτομα που βρίσκονται στο χώρο. Όσο περισσότερα άτομα βρίσκονται στο χώρο, τόσο περισσότερο αυξάνεται η σχετική υγρασία λόγω της αναπνοής και του ιδρώτα. Το γραφείο Β παρατηρείται να έχει χαμηλότερη υγρασία σε σύγκριση με τα υπόλοιπα, που πιθανώς να οφείλεται στην απουσία του 2^{ου} εργαζόμενου αρκετές φορές. Η συμπεριφορά της υγρασίας στο γραφείο Γ πιθανώς να σχετίζεται επίσης με τα άτομα στο χώρο (περισσότερα άτομα αυξάνουν την σχετική υγρασία), καθώς τον Ιούλιο και Νοέμβριο του 2022 παρατηρείται υψηλή υγρασία και υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης CO₂.

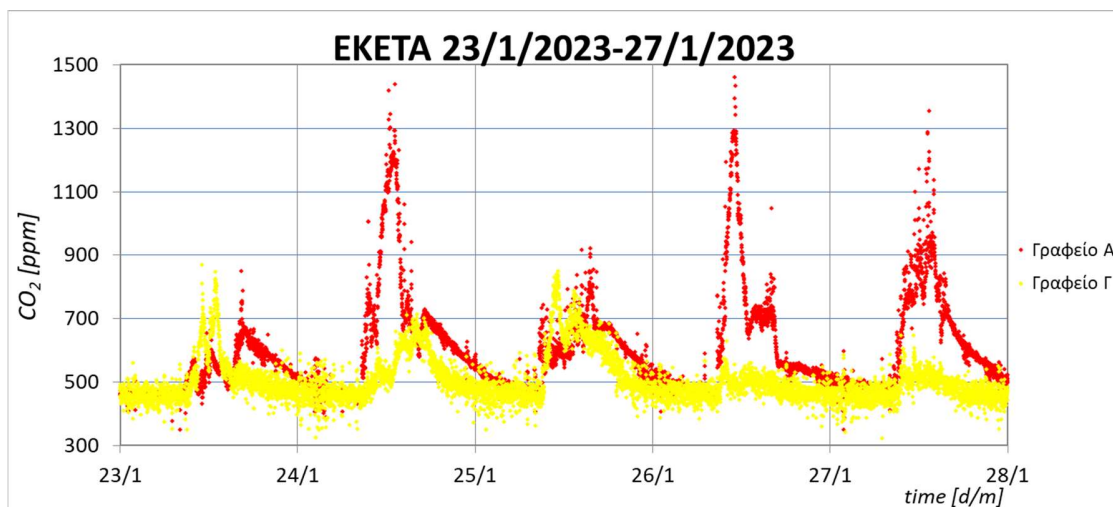
Και τέλος παρουσιάζονται τα διαγράμματα συγκέντρωσης CO₂:



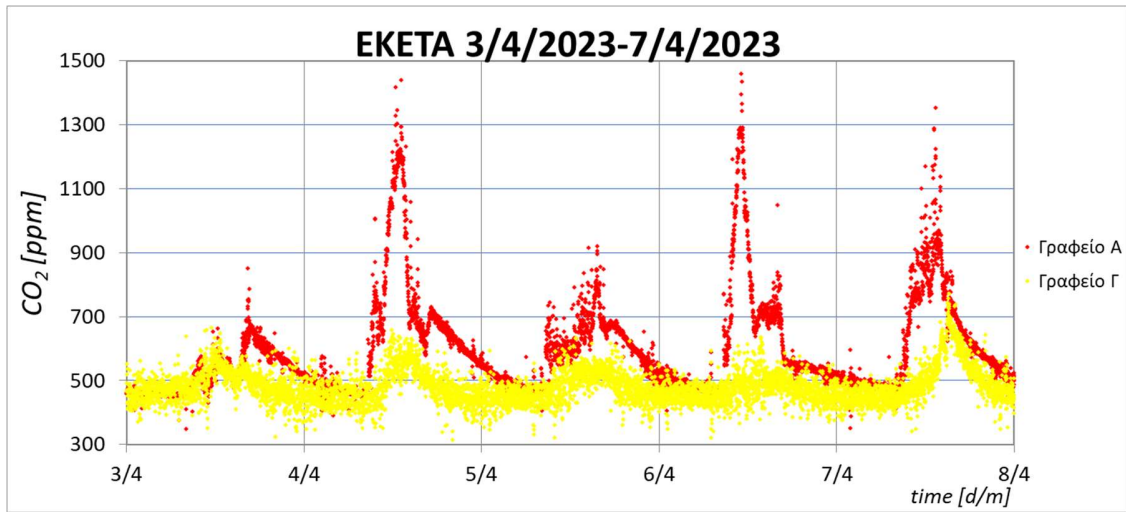
Διάγραμμα 14: Συγκέντρωση CO₂ κάθε γραφείου για ενδεικτική θερινή περίοδο του 2022



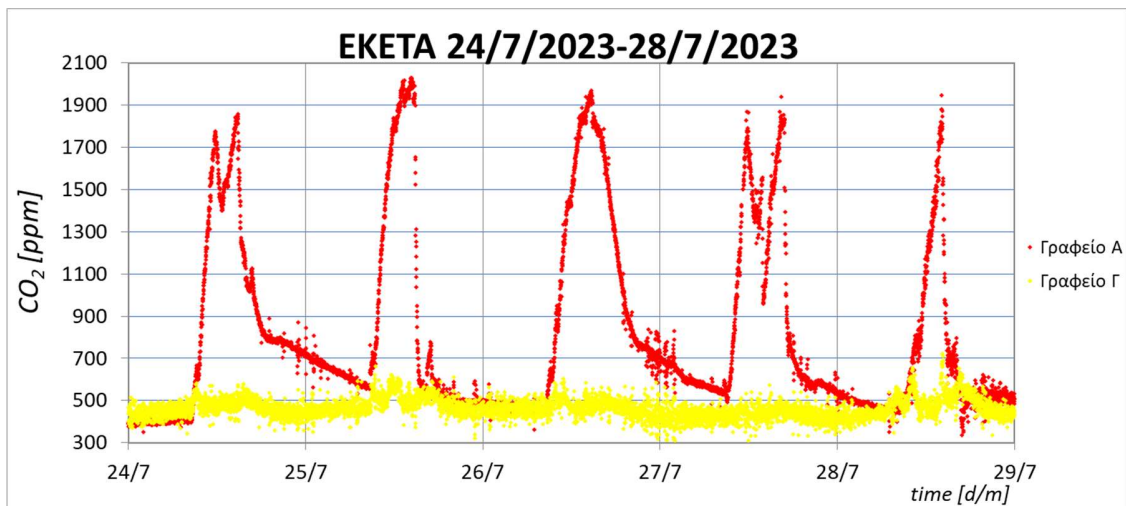
Διάγραμμα 15: Συγκέντρωση CO₂ κάθε γραφείου για ενδεικτική φθινοπωρινή περίοδο του 2022



Διάγραμμα 16: Συγκέντρωση CO₂ κάθε γραφείου για ενδεικτική χειμερινή περίοδο του 2023



Διάγραμμα 17: Συγκέντρωση CO₂ κάθε γραφείου για ενδεικτική εαρινή περίοδο του 2023



Διάγραμμα 18: Συγκέντρωση CO₂ κάθε γραφείου για ενδεικτική θερινή περίοδο του 2023

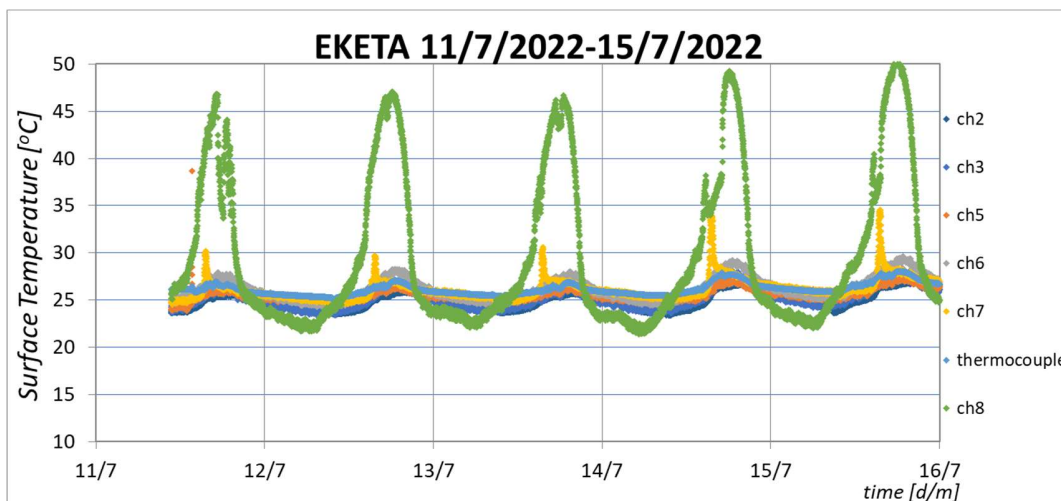
Οι μετρήσεις CO₂ είχαν μικρότερη διάρκεια από τις υπόλοιπες για τα περισσότερα γραφεία. Μόνο για τα γραφεία Α και Γ συλλέχθηκαν δεδομένα για όλη την περίοδο της έρευνας. Έτσι έχουμε δεδομένα μόνο για την χαρακτηριστική εβδομάδα του καλοκαιριού του 2022 για όλα τα γραφεία. Με βάση τις μετρήσεις παρατηρείται κορύφωση της συγκέντρωσης CO₂ το μεσημέρι και πιο συγκεκριμένα μεταξύ 12:00 και 16:00. Η συγκέντρωση αρχίζει να αραιώνει συνήθως το απόγευμα μετά τις 16:00, που αποτελεί την ώρα που οι εργαζόμενοι του κτιρίου αποχωρούν, όπως είναι αναμενόμενο. Τυχόν παρατηρήσεις αραιώσης του CO₂ για χρόνο πριν τις 16:00 πιθανώς να οφείλονται σε άνοιγμα του παραθύρου. Το γραφείο Α εμφανίζει τη μεγαλύτερη κορύφωση με βάση τα παραπάνω διαγράμματα από όλες τις περιόδους. Η κορύφωση αυτή εμφανίζεται σε θερινή περίοδο και πιθανώς να οφείλεται σε ανεπαρκή αερισμό του χώρου εξαιτίας των υψηλών εξωτερικών θερμοκρασιών της εποχής, που έχει ως συνέπεια τα παράθυρα να παραμένουν κλειστά. Τα αποτελέσματα του CO₂ σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία αποδεικνύουν ότι λειτουργούσε κλιματισμός, ο οποίος σταμάτησε, άνοιξε το παράθυρο, και ξεκίνησε απότομη πτώση του CO₂ και λίγο πιο αργή άνοδος της θερμοκρασίας. Οι μετρήσεις δείχνουν ότι για σημαντικό χρόνο εντός του δωφου εργασίας η συγκέντρωση του CO₂ υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο των 1000ppm του ΠΟΥ (ΠΟΥ, 2010).

Όσον αφορά τις επιπλέον καταγραφές που έγιναν στο γραφείο Α, οι επιφανειακοί αισθητήρες Pt100 τοποθετήθηκαν περιμετρικά στους 4 τοίχους του γραφείου, στο δάπεδο και στο παράθυρο, ενώ στην οροφή τοποθετήθηκε το όργανο Hobo UX100-014M thermocouple. Οι καταγραφές που έγιναν μέσω του εργαλείου STYLITIS-10 για το δάπεδο, του τοίχους περιμετρικά και το παράθυρο εμφανίζουν τις μετρήσεις σε channels. Κάθε channel αντιστοιχεί σε 1 δομικό στοιχείο για το οποίο μετρήθηκε η επιφανειακή θερμοκρασία. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας 15 με τα channels και την επιφάνεια που πήραν μετρήσεις μαζί με το όργανο thermocouple.

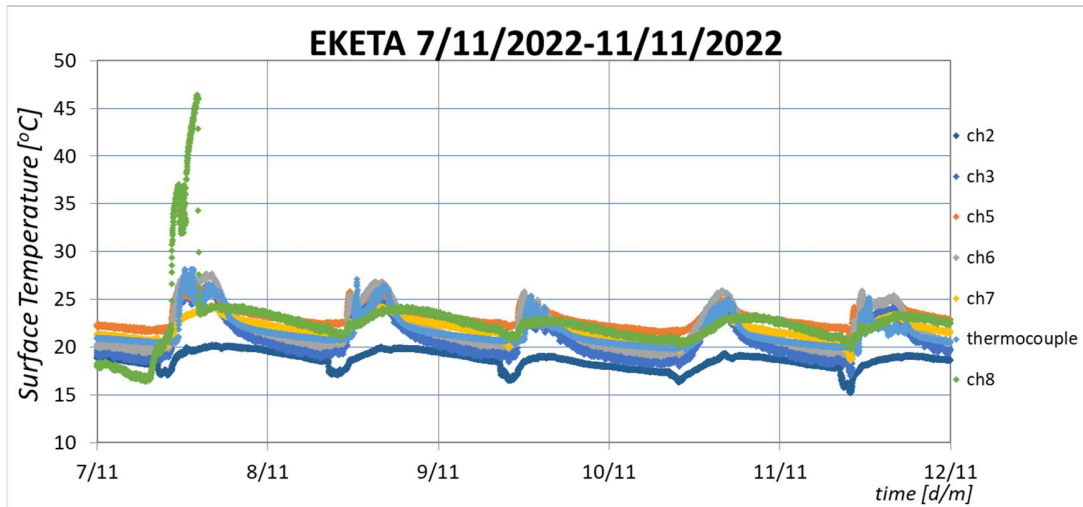
Πίνακας 15: Κατηγοριοποίηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων του κάθε οργάνου βάσει χρώματος στα διαγράμματα και επιφάνειας που αντιστοιχεί

Κωδικός αναφοράς	Επιφάνεια
Channel2 (ch2)	Εξωτερικός τοίχος (Δυτικός)
Channel3 (ch3)	Εσωτερικός τοίχος διαδρόμου (Ανατολικός)
Channel5 (ch5)	Εσωτερικός τοίχος χώρισμα γραφείων (Βόρειος)
Channel6 (ch6)	Εσωτερικός τοίχος χώρισμα γραφείων (Νότιος)
Channel7 (ch7)	Δάπεδο
Thermocouple	Οροφή
Channel8 (ch8)	Παράθυρο (Δυτικά)

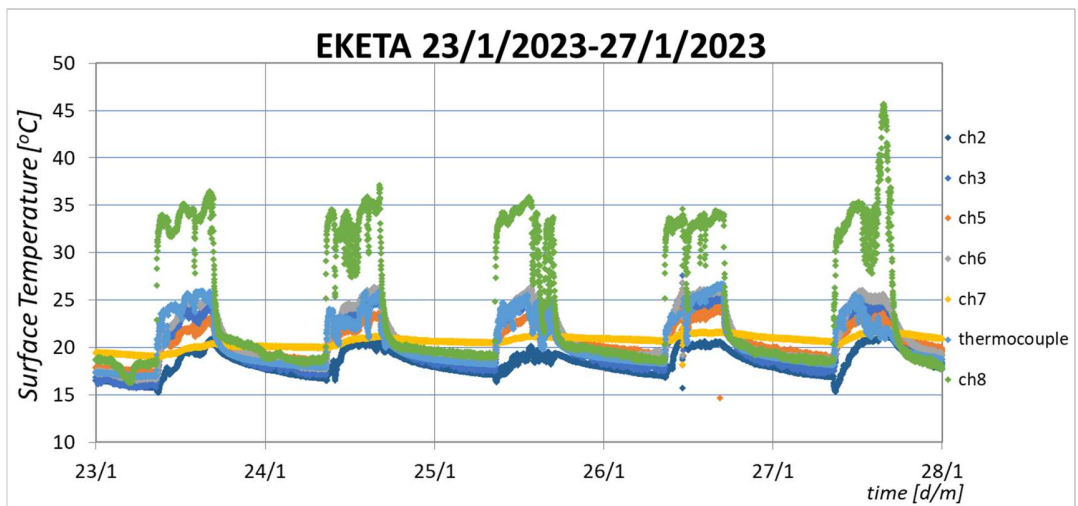
Η θερμοκρασία κάθε επιφάνειας που καταγράφηκε μαζί με το αντίστοιχο εμβαδό της, χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας T_{mT} με βάση την εξίσωση [2.10]. Διαγράμματα που απεικονίζουν τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας φαίνονται ενδεικτικά στο παράρτημα ΙΙΙ.



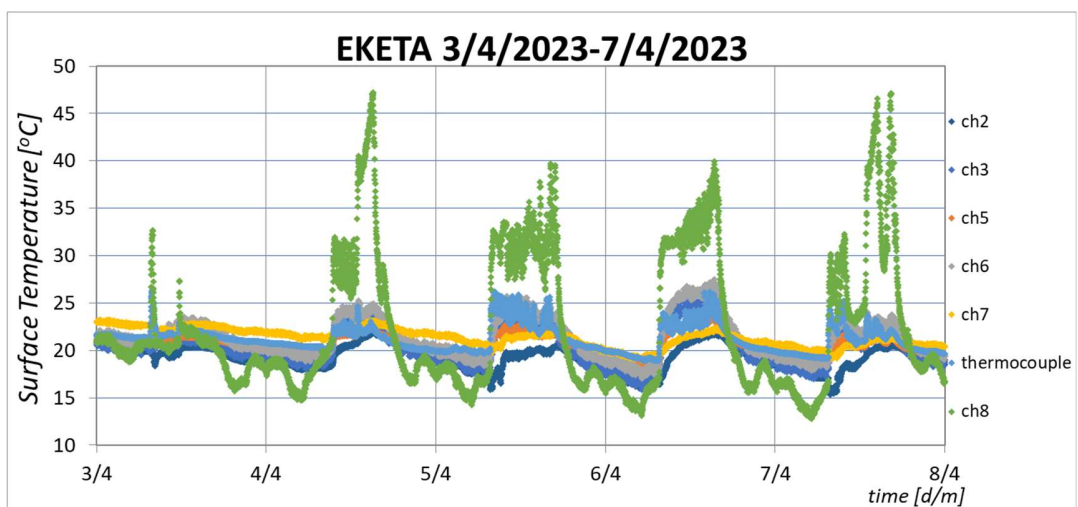
Διάγραμμα 19: Επιφανειακές θερμοκρασίες γραφείου Α για ενδεικτική θερινή περίοδο του 2022



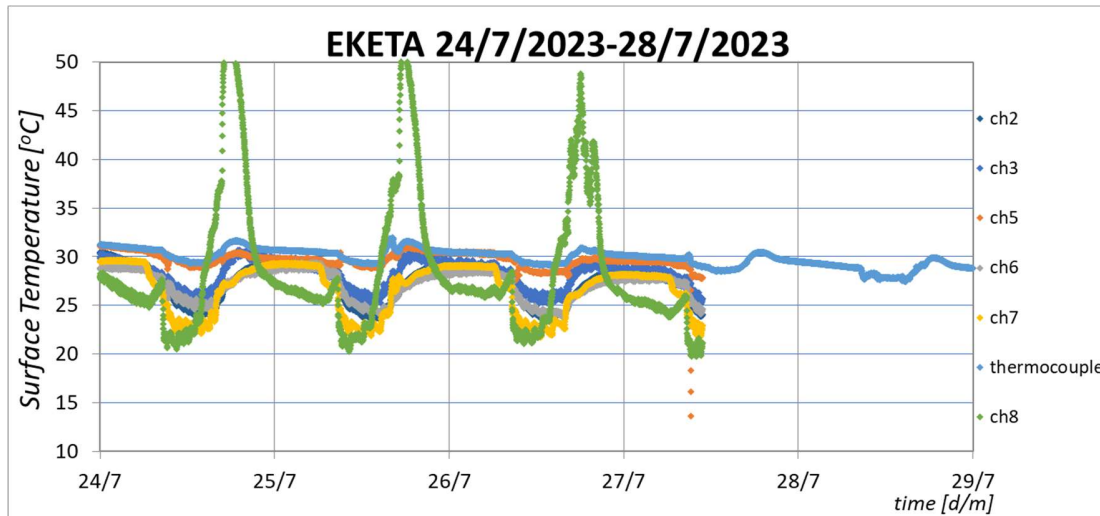
Διάγραμμα 20: Επιφανειακές θερμοκρασία γραφείου Α για ενδεικτική φθινοπωρινή περίοδο του 2022



Διάγραμμα 21: Επιφανειακές θερμοκρασία γραφείου Α για ενδεικτική χειμερινή περίοδο του 2023



Διάγραμμα 22: Επιφανειακές θερμοκρασία γραφείου Α για ενδεικτική εαρινή περίοδο του 2023

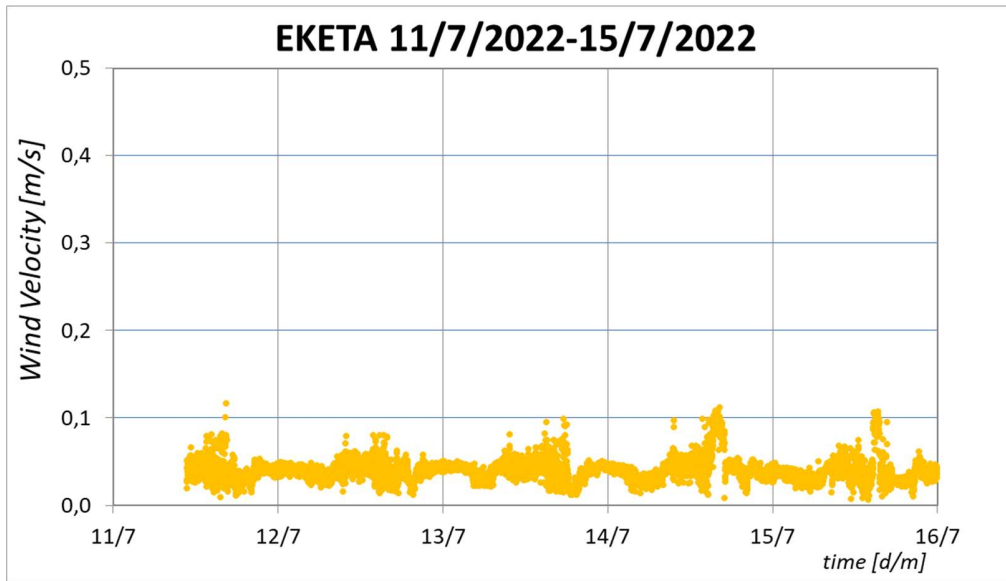


Διάγραμμα 23: Επιφανειακές θερμοκρασία γραφείου Α για ενδεικτική θερινή περίοδο του 2023

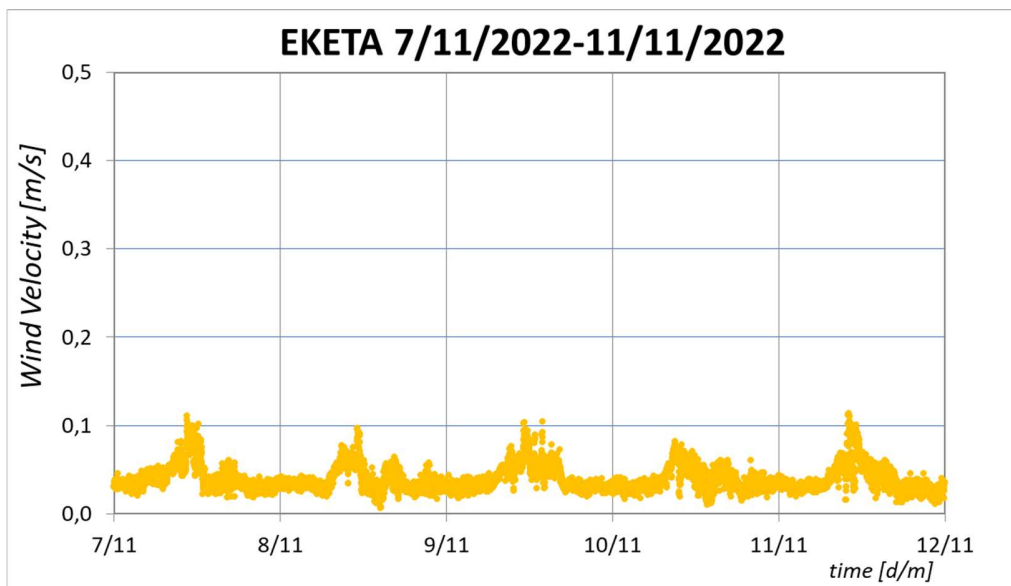
Από τα παραπάνω διαγράμματα επιφανειακής θερμοκρασίας εύκολα παρατηρούμε την «εκτόξευση» της θερμοκρασίας στο παράθυρο, συνήθως τις ώρες που πέφτει πάνω του ηλιακή ακτινοβολία. Οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στον αισθητήρα του παραθύρου στα στάδια κορύφωσης της θερμοκρασίας οφείλονται προφανώς στο μετεωρολογικό φαινόμενο της συννεφιάς. Οι υπόλοιποι αισθητήρες φαίνεται να καταγράφουν σχεδόν ίδιες μετρήσεις, με εξαίρεση τον δυτικό τοίχο που παρουσιάζεται ελαφρώς πιο ψυχρός την χειμερινή περίοδο, μέτρηση φυσιολογική, καθώς ως εξωτερικός τοίχος είναι εκτεθειμένος στις καιρικές συνθήκες

Παρομοίως για το γραφείο Α το ανεμόμετρο μέσω του STYLITIS-10 κατέγραψε την ταχύτητα του ανέμου σε τρία κανάλια. Ωστόσο στην παρούσα μελέτη δεν υπάρχει εφαρμογή για να αξιοποιηθούν τα δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου στον κάθε άξονα (X,Y,Z). Οπότε υπολογίστηκε μία συνισταμένη ταχύτητα του ανέμου στο χώρο με βάση το πυθαγόρειο θεώρημα από τις ταχύτητες που καταγράφηκαν στην κάθε κατεύθυνση.

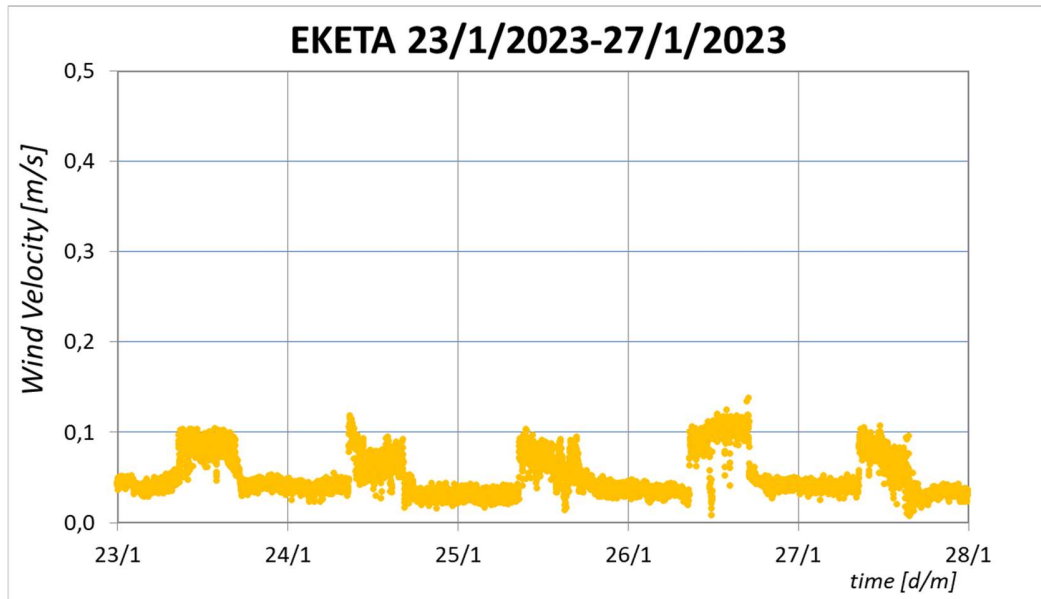
Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά διαγράμματα συνισταμένης ταχύτητας ανέμου στο γραφείο Α για κάθε εποχή που έλαβαν χώρα μετρήσεις. Τα διαγράμματα αυτά απεικονίζουν χρονική περίοδο που διαρκεί 5 ημέρες (Δευτέρα-Παρασκευή) και αποτελούν μία εργάσιμη εβδομάδα. Σημειώνεται ότι υπάρχει έλλειψη μετρήσεων από το ανεμόμετρο για την καλοκαιρινή περίοδο του 2023, καθώς το όργανο είχε τοποθετηθεί σε άλλο χώρο.



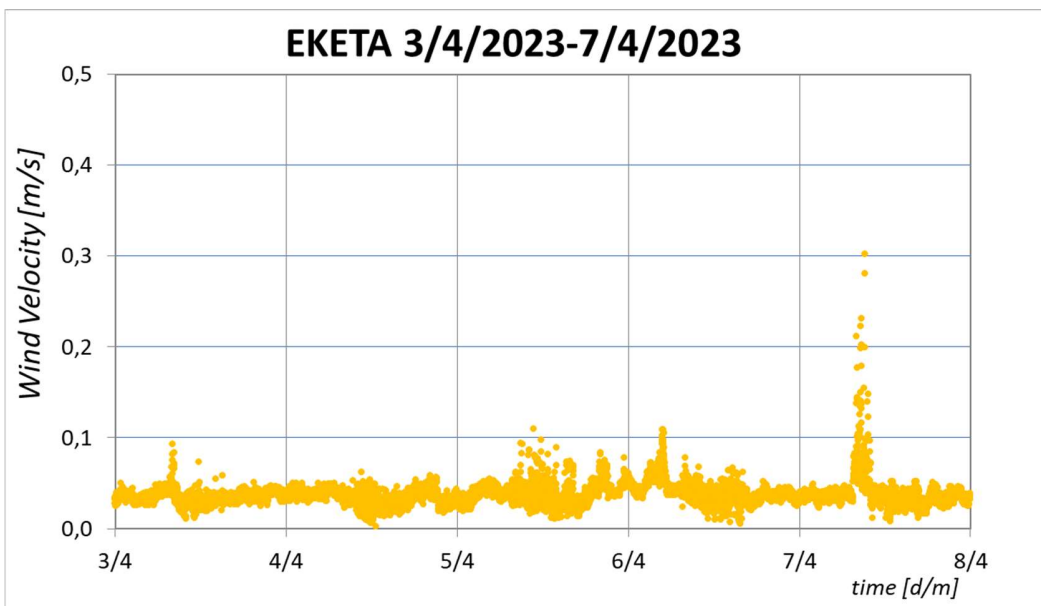
Διάγραμμα 24: Συνισταμένη ταχύτητα ανέμου για ενδεικτική θερινή περίοδο του 2022



Διάγραμμα 25: Συνισταμένη ταχύτητα ανέμου για ενδεικτική φθινοπωρινή περίοδο του 2022



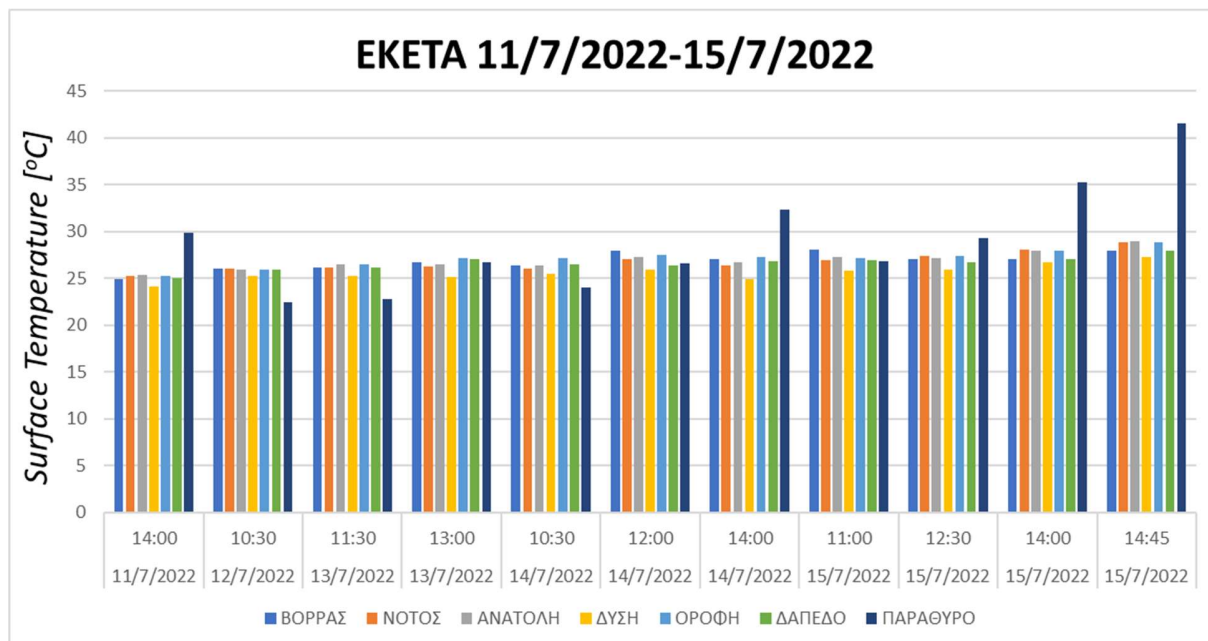
Διάγραμμα 26: Συνισταμένη ταχύτητα ανέμου για ενδεικτική χειμερινή περίοδο του 2023



Διάγραμμα 27: Συνισταμένη ταχύτητα ανέμου για ενδεικτική εαρινή περίοδο του 2023

Παρατηρείται ότι η ταχύτητα του ανέμου για τις εικονιζόμενες περιόδους είναι συνήθως χαμηλή (<0,08 m/s) και βάσει της TOTEE 2423/86 (2002) θα υπάρχουν παράπονα για έλλειψη κίνησης του ανέμου. Επίσης παρατηρείται ότι δεν ξεπερνά τα 0,125 m/s (με μία εξαίρεση 7/4/2023) που βάσει της TOTEE 2423/86, 2002 είναι η ιδανική για χώρους γραφείων. Οι διακυμάνσεις στα διαγράμματα αρχίζουν να συμβαίνουν πρωινές ώρες κοντά στις 10:00 και διαρκούν περίπου μέχρι τις 16:00. Οι μετρήσεις αυτές είναι λογικές, διότι οι εικονιζόμενες περιόδους είναι εργάσιμες μέρες (Δευτέρα-Παρασκευή) και πιθανώς εκείνες τις ώρες να ανοίγουν τα παράθυρα ή το καλοκαίρι να ανοίγει ο κλιματισμός. Το μεγάλο “peak” στις 7/4/2023 συμβαίνει περίπου στις 10:00, διαρκεί κάποια λεπτά, οπότε πιθανώς να οφείλεται σε συνδυασμό ανοίγματος εξωτερικού παραθύρου και πόρτας γραφείου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρεύματος αέρα (Cross ventilation). Επίσης είναι πιθανό να υπάρχει ταυτόχρονα και εξωτερική ανεμόπτωση.

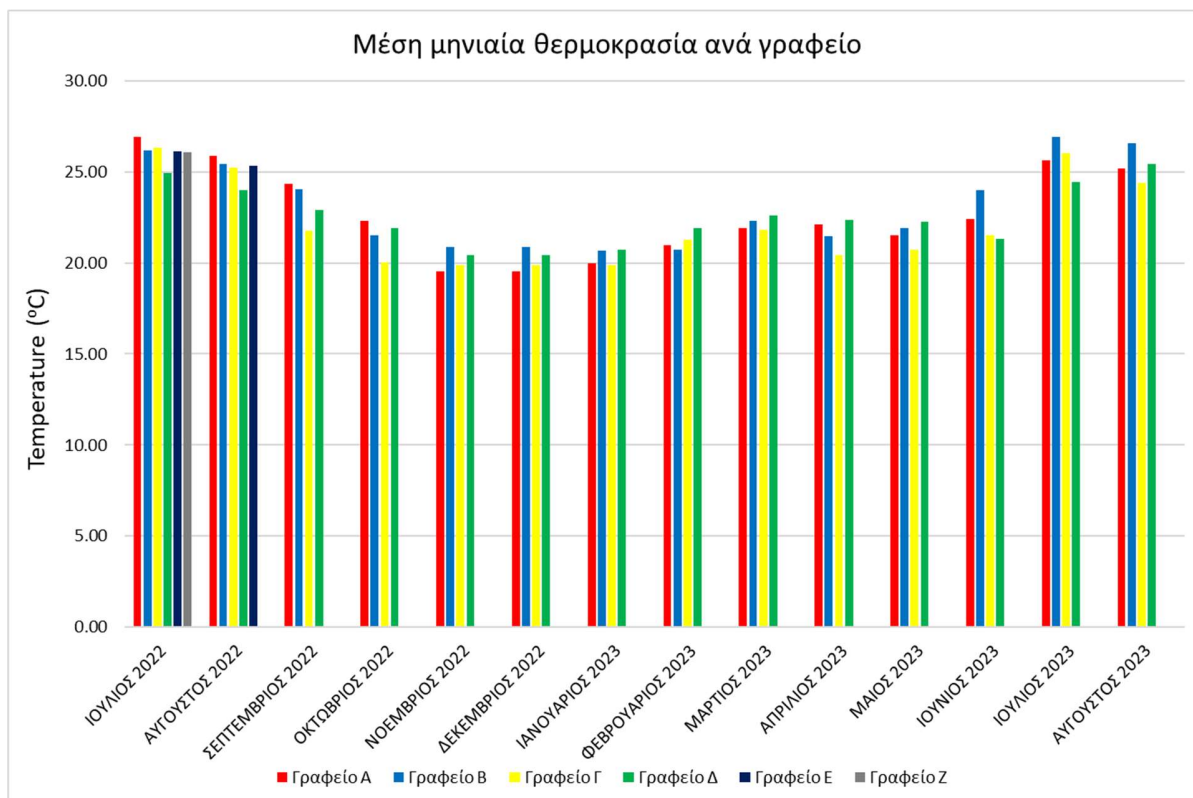
Τέλος ακολουθεί ένα διάγραμμα με στιγμιαίες μετρήσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας στο γραφείο Α με τη χρήση της θερμοκάμερας FLIR E8-XT.



Διάγραμμα 28: Μετρήσεις επιφανειακής θερμοκρασίας μέσω θερμοκάμερας γραφείου Α για ενδεικτική θερινή περίοδο του 2022

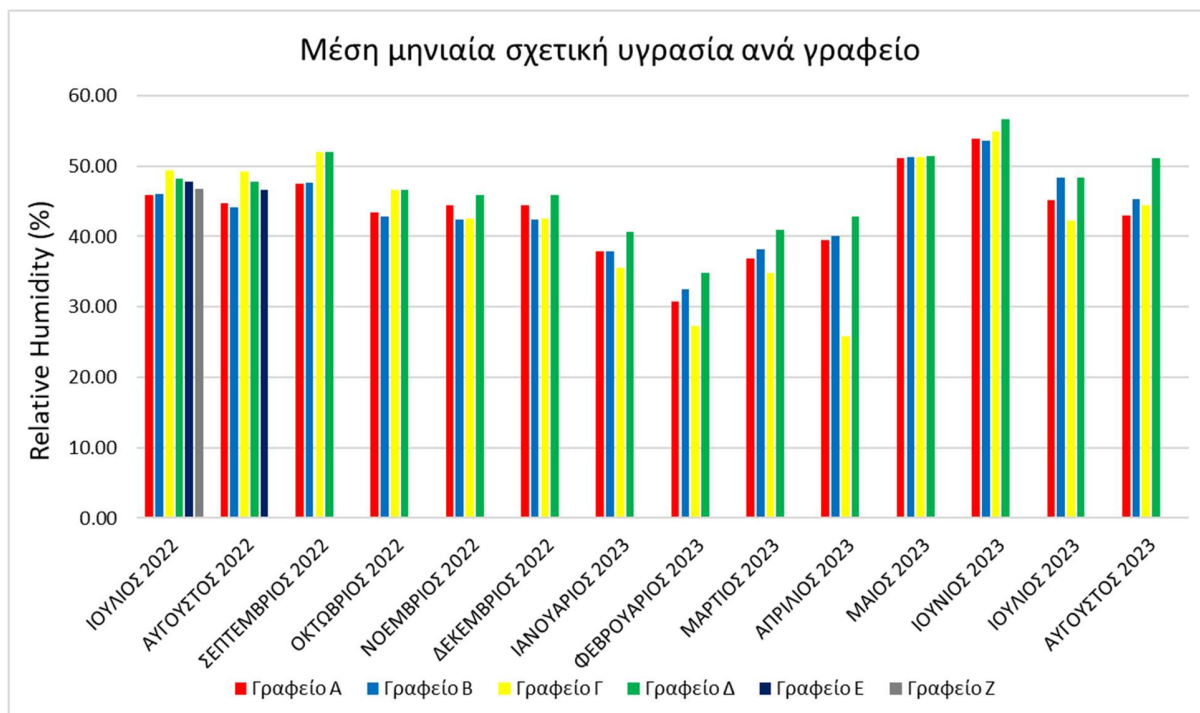
Οι μετρήσεις από τη θερμοκάμερα διήρκησαν για μικρό χρονικό διάστημα, οπότε δεν υπάρχει σαφής εικόνα για τις περισσότερες επιφάνειες. Ωστόσο, εύκολα παρατηρείται η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει στο παράθυρο τις ώρες που ξεκινάει η δύση του ηλίου. Επίσης παρατηρείται η υψηλή αγωγιμότητα του παραθύρου σε σύγκριση με τα αδιαφανή δομικά στοιχεία, από τις χαμηλές θερμοκρασίες το πρωί και τις υψηλές το μεσημέρι. Έτσι αυτό το διαφανές δομικό στοιχείο μπορεί να προκαλέσει εύκολα ανομοιομορφία στην κατανομή της θερμοκρασίας μέσα στο χώρο και να επηρεάσει σημαντικά τη θερμική άνεση. Προς αποφυγή του φαινομένου αυτού συνιστάται να χρησιμοποιούνται σκίαστρα και να εγκατασταθούν, όπου δεν υπάρχουν. Το μεγαλύτερο μέρος της ανάλυσης των επιφανειακών θερμοκρασιών γίνεται μέσω των μετρήσεων από τα αισθητήρια επιφανειακής θερμοκρασίας που παρουσιάζονται παρακάτω.

Παρακάτω παρουσιάζονται η μέσες μηνιαίες τιμές που προέκυψαν από τις μετρήσεις για θερμοκρασία, σχετική υγρασία και συγκέντρωση CO₂. Οι μέσες μηνιαίες τιμές αντλήθηκαν από μέσες ημερήσιες τιμές, οι οποίες προέκυψαν μόνο από τα δωρα που θεωρήθηκε ότι υπήρχαν εργαζόμενοι στο χώρο. Δηλαδή οι τιμές αντλήθηκαν για ημέρες Δευτέρα – Παρασκευή και ώρες 8:00 – 16:00 προκειμένου να υπολογιστεί ο μέσος όρος.



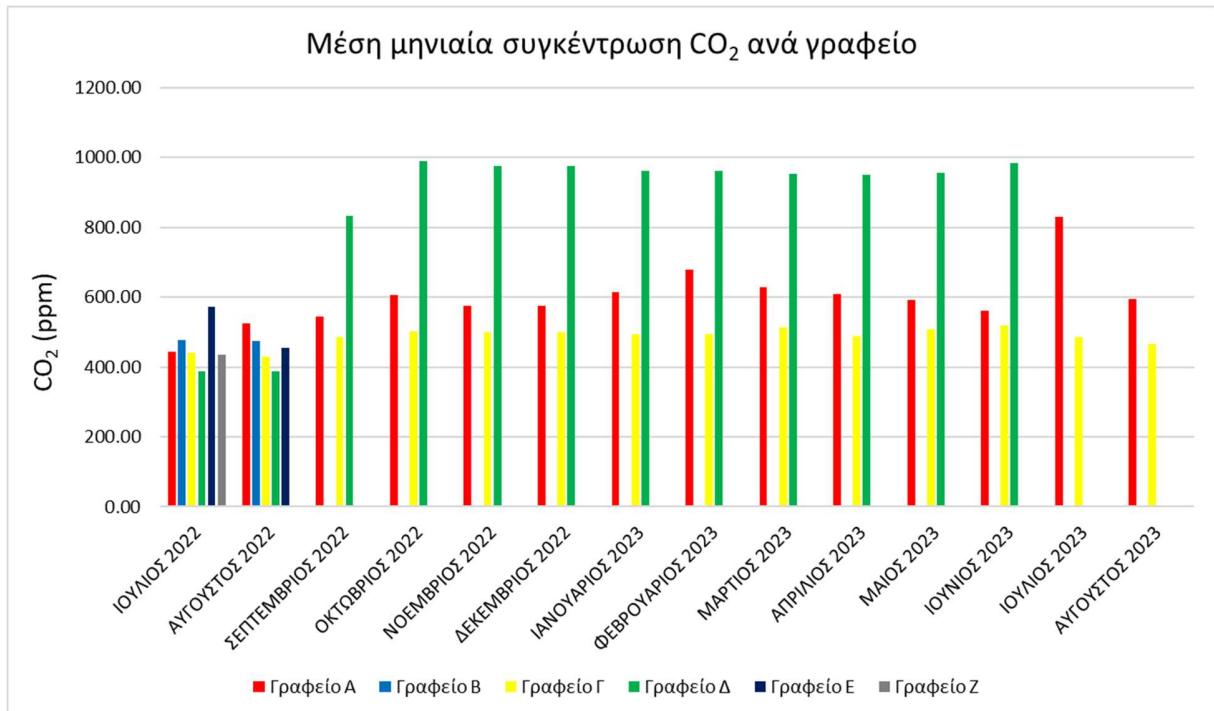
Διάγραμμα 29: Μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C) τις ώρες 8:00-16:00 για κάθε γραφείο

Αρχικά παρατηρούνται υψηλότερες θερμοκρασίες το χειμώνα και χαμηλότερες το καλοκαίρι, όπως είναι αναμενόμενο. Επειδή οι μέσες θερμοκρασίες προκύπτουν από τα δωρά που το κτίριο λειτουργεί, δηλαδή έχει προσωπικό και διαθέσιμο σύστημα θέρμανσης-ψύξης, παρατηρούμε να είναι σχετικά κοντά από μήνα σε μήνα για τα δεδομένα της κάθε εποχής. Η μέση θερμοκρασία του κάθε μήνα είναι σε αποδεκτά πλαίσια, ωστόσο πρέπει να ληφθεί υπόψη μαζί με τις τιμές της σχετικής υγρασίας για να υπάρξει σαφής εικόνα για τις συνθήκες άνεσης μέσα στο χώρο.



Διάγραμμα 30: Μέση μηνιαία σχετική υγρασία (%) τις ώρες 8:00-16:00 για κάθε γραφείο

Γενικά παρατηρούμε χαμηλότερη σχετική υγρασία το χειμώνα και υψηλότερη το καλοκαίρι. Αυτό οφείλεται εν μέρη και στις εξωτερικές συνθήκες που επικρατούν καθώς ο εξωτερικός αέρας έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία. Η μέση μηνιαία σχετική υγρασία που παρατηρείται μεταξύ των γραφείων είναι όμοια (διαφορά 5%-10%), ενώ πιο σημαντική διαφορά παρουσιάζει το γραφείο Γ σε σύγκριση με υπόλοιπα (περίπου 15%) τον Απρίλιο του 2023 που πιθανώς να οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες που επικρατούν λόγω του εργαστηρίου, ή στην απουσία ατόμων από αυτό. Γενικώς η σχετική υγρασία κυμαίνεται εντός των επιθυμητών ορίων 30%-70%.



Διάγραμμα 31: Μέση μηνιαία συγκέντρωση CO₂ (ppm) τις ώρες 8:00-16:00 για κάθε γραφείο

Αρχικά παρατηρούμε ένα σφάλμα του μετρητικού οργάνου στο γραφείο Δ, μετά την αλλαγή των οργάνων στις 9/9/2022, καθώς οι συγκεντρώσεις που σημειώθηκαν την μεταξύ Σεπτεμβρίου 2022 – Ιουνίου 2023 είναι αδικαιολόγητα υψηλές, τόσο σε σύγκριση με τα υπόλοιπα γραφεία, όσο και σε σύγκριση με την προηγούμενη περίοδο Ιουλίου 2022 – Αυγούστου 2022. Οι τιμές που καταγράφηκαν με το αρχικό όργανο έως τις 9/9/2022 παρασύρουν το μήνα Σεπτέμβρη ελαφρώς προς τα κάτω, γεγονός που αποδεικνύει τον ισχυρισμό. Τα γραφεία Α και Γ παρουσιάζουν χαμηλές μέσες τιμές, που σημαίνει ότι η ποιότητα του αέρα στο εσωτερικό τους περιβάλλον ήταν ικανοποιητική. Τα υψηλότερα επίπεδα στο γραφείο Α παρατηρούνται τον Ιούλιο του 2023 και πιθανώς να οφείλονται στην έλλειψη αερισμού (κλειστά παράθυρα) λόγω της λειτουργίας του συστήματος κλιματισμού.

4.3 Εφαρμογή του μοντέλου του Fanger

Για τον υπολογισμό των δεικτών PMV-PPD του μοντέλου του Fanger αξιοποιήθηκε το πρόγραμμα Matlab. Εκεί χρησιμοποιήθηκε ένα script (Παράρτημα II), το οποίο «διαβάζει» τις τιμές ανά λεπτό της θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, μερικής πίεσης υδρατμών και μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας από τα αρχεία excel που δημιουργήθηκαν και επιπλέον ορίζοντας τιμές για τον ρουχισμό (clo) και τον ρυθμό μεταβολισμού, υπολογίζονται οι δείκτες PMV-PPD ανά γραφείο κάθε φορά. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι για κάθε προσομοίωση στο Matlab όταν αλλάζει ο ρουχισμός ή/και ο ρυθμός μεταβολισμού, τα αποτελέσματα διαφέρουν. Οπότε για κάθε διαφορετική τιμή, δημιουργείται στην πραγματικότητα ένα διαφορετικό σενάριο για το πείραμα.

Στην περίπτωση μας δοκιμάστηκαν πολλά σενάρια, ωστόσο παρέμειναν τα επικρατέστερα που ήταν για μεταβολικό ρυθμό 70 W/m² ή 1,2 met και τιμές ρουχισμού:

- 1 clo για χειμώνα και 0,5 clo για καλοκαίρι στο 1^ο σενάριο
- 0,75 clo για χειμώνα και 0,5 clo για καλοκαίρι στο 2^ο σενάριο

Για το γραφείο Ε που οι μετρήσεις διήρκησαν μόνο για το καλοκαίρι, χρησιμοποιήθηκε ένα σενάριο για τιμή ρουχισμού 0,5 clo.

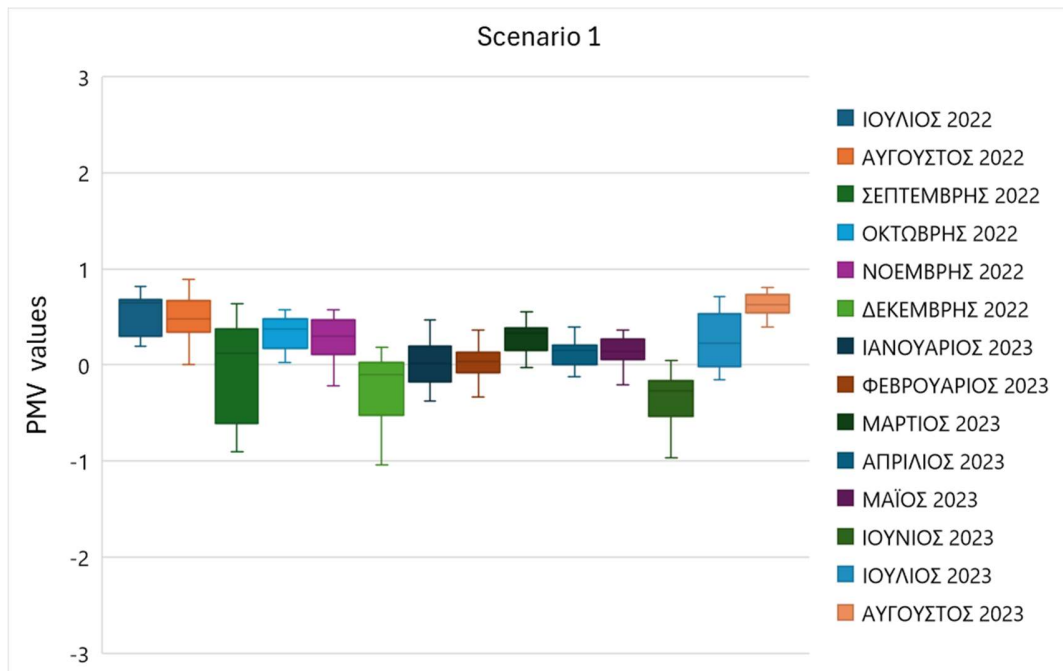
4.4 Αποτελέσματα δεικτών PMV από το μοντέλο του Fanger

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα διακύμανσης του δείκτη PMV ανά μήνα από τα γραφεία που υπάρχουν δεδομένα για τα δύο σενάρια που αναφέρθηκαν πριν. Οι τιμές που είναι τοποθετημένες στα γραφήματα προκύπτουν από τη μέση τιμή του δωρου εργασίας 8:00 – 16:00 και δεν συμπεριλαμβάνουν τις ημέρες Σάββατο και Κυριακή, καθώς δεν είναι εργάσιμες. Η οριζόντια γραμμή που φαίνεται μέσα στα πλαίσια του κάθε μήνα αποτελεί τη διάμεσο με βάση τις τιμές του δείκτη για κάθε μήνα.

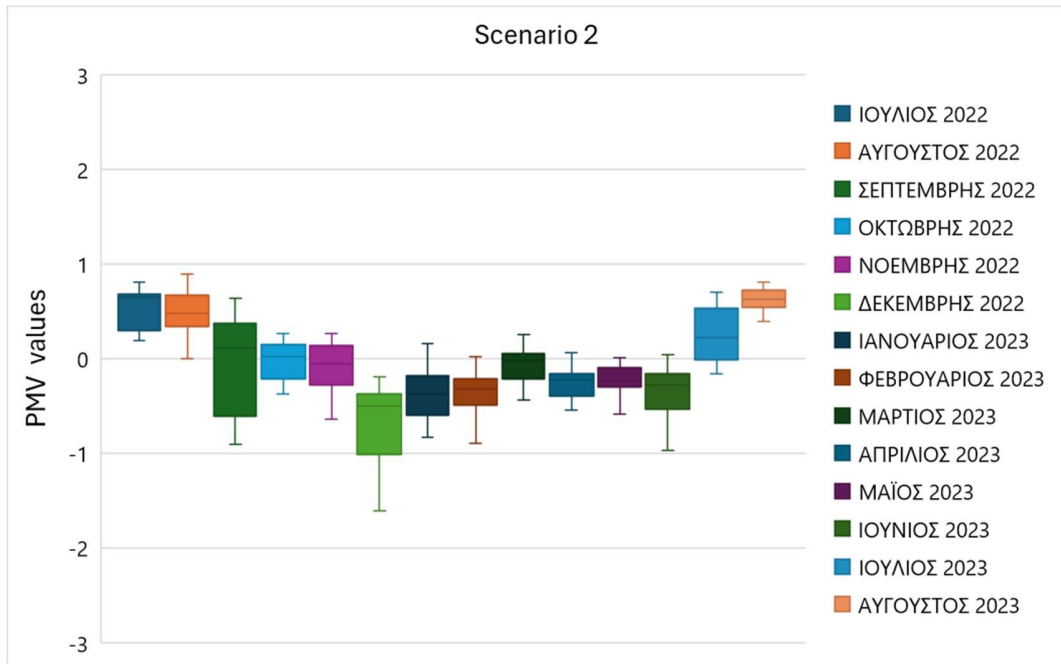
Οι διαφορές των γραφημάτων για κάθε γραφείο ανάμεσα στα σενάρια 1 και 2, εντοπίζονται τους μήνες Οκτώβρη – Μάιο (Χειμώνας), όπου θεωρήθηκε ότι οι χρήστες του χώρου φορούν λιγότερα ρούχα στο σενάριο 2. Παρατηρείται μείωση του PMV στο σενάριο 2 για τον κάθε μήνα στην προαναφερθείσα περίοδο. Το αποτέλεσμα είναι εύλογο, καθώς με λιγότερη μόνωση από τα ρούχα το ανθρώπινο σώμα ανταλλάσσει γρηγορότερα θερμότητα με το περιβάλλον, με συνέπεια να νιώθει τον χώρο πιο δροσερό.

Οι δείκτες που υπολογίστηκαν δεν ξεπέρασαν ποτέ ακόμα και συμπεριλαμβανομένων των ακραίων τιμών, την τιμή |2|, γεγονός πολύ θετικό για την άνεση των χώρων. Επιπλέον με μία γρήγορη ματιά οι δείκτες βρίσκονται εντός ορίου κατηγορίας II ευρωπαϊκού προτύπου και προτύπου ASHRAE 55 ($-0,5 < PMV < 0,5$) σε μεγάλο ποσοστό και σε ακόμα μεγαλύτερο εντός ορίου κατηγορίας III ευρωπαϊκού προτύπου ($-0,7 < PMV < 0,7$). Η εικόνα αυτή για τα γραφεία που αναλύθηκαν δίνει μία συνολική θετική εντύπωση για την άνεση ολόκληρου του κτιρίου, θεωρώντας τα γραφεία που έγιναν μετρήσεις αντιπροσωπευτικά για το κτίριο.

Αποτελέσματα PMV: Γραφείο Α



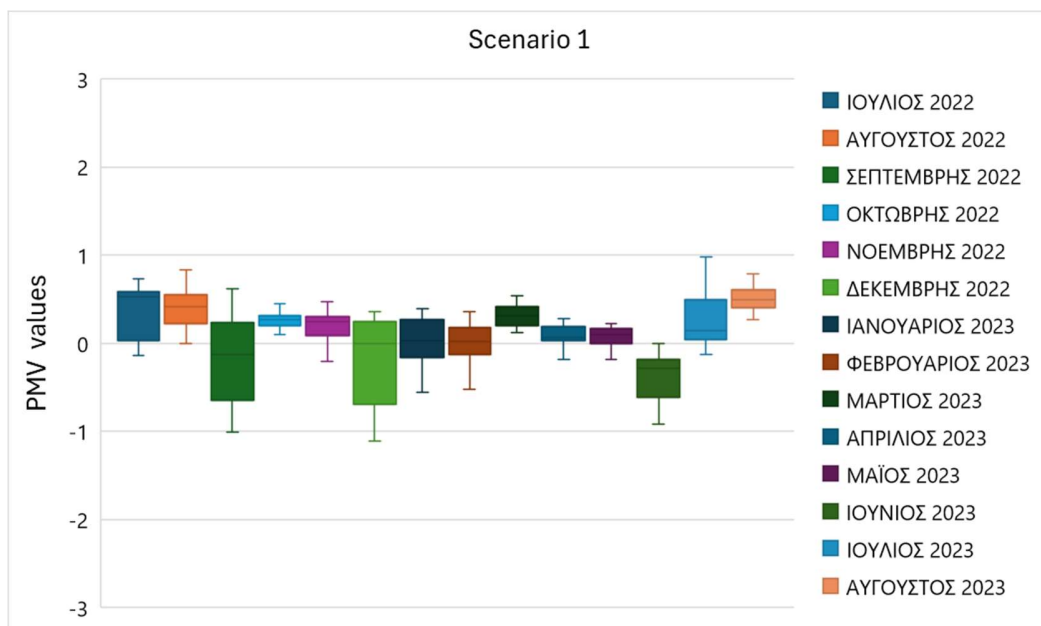
Διάγραμμα 32: Διακύμανση και διάμεσος του δείκτη PMV ανά μήνα στο σενάριο 1 για το γραφείο Α



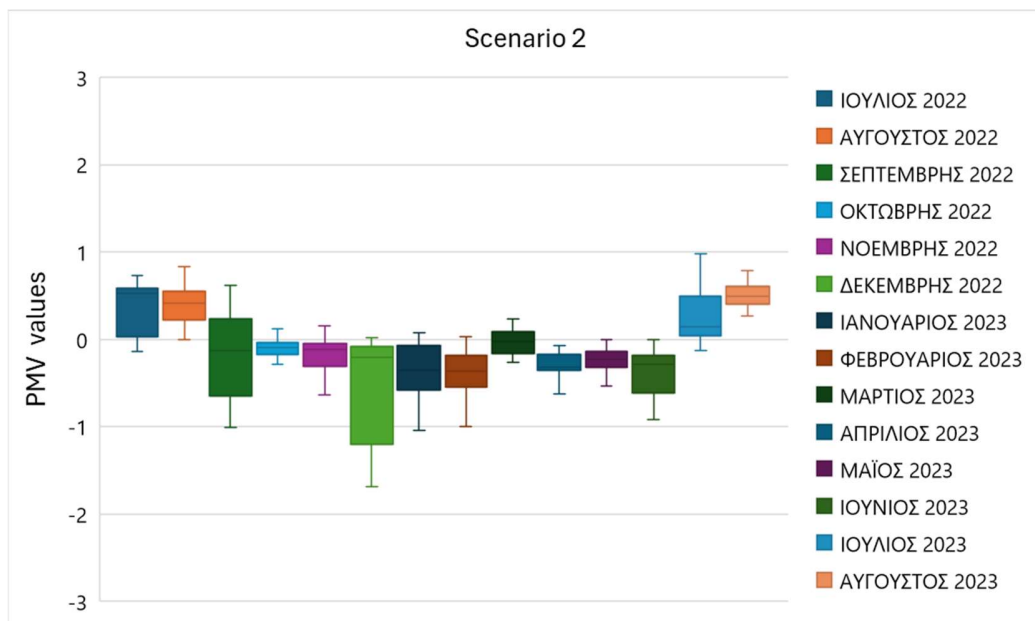
Διάγραμμα 33: Διακύμανση και διάμεσος του δείκτη PMV ανά μήνα στο σενάριο 2 για το γραφείο Α

Για το γραφείο Α παρατηρούμε ότι ο δείκτης PMV εμφανίζει μεγάλη διακύμανση τους μήνες Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο, παρόλα αυτά η διάμεσος του δείκτη βρίσκεται εντός των ορίων θερμικής άνεσης ($-0,5 < PMV < 0,5$) για όλους τους μήνες. Μόνο τα αποτελέσματα PMV του Δεκεμβρίου στο σενάριο 2 (δηλαδή με λιγότερα ρούχα) είναι εκτός αποδεκτών ορίων για ένα ποσοστό των τιμών, τόσο σύμφωνα με το πρότυπο της ASHRAE, όσο και σύμφωνα με το ευρωπαϊκό.

Αποτελέσματα PMV: Γραφείο Β



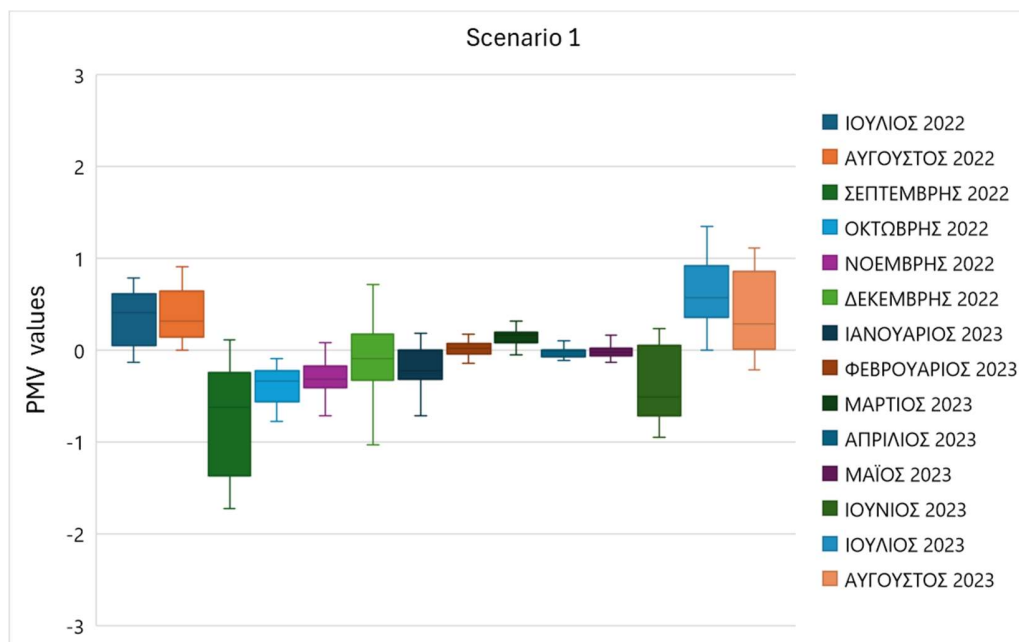
Διάγραμμα 34: Διακύμανση και διάμεσος του δείκτη PMV ανά μήνα στο σενάριο 1 για το γραφείο Β



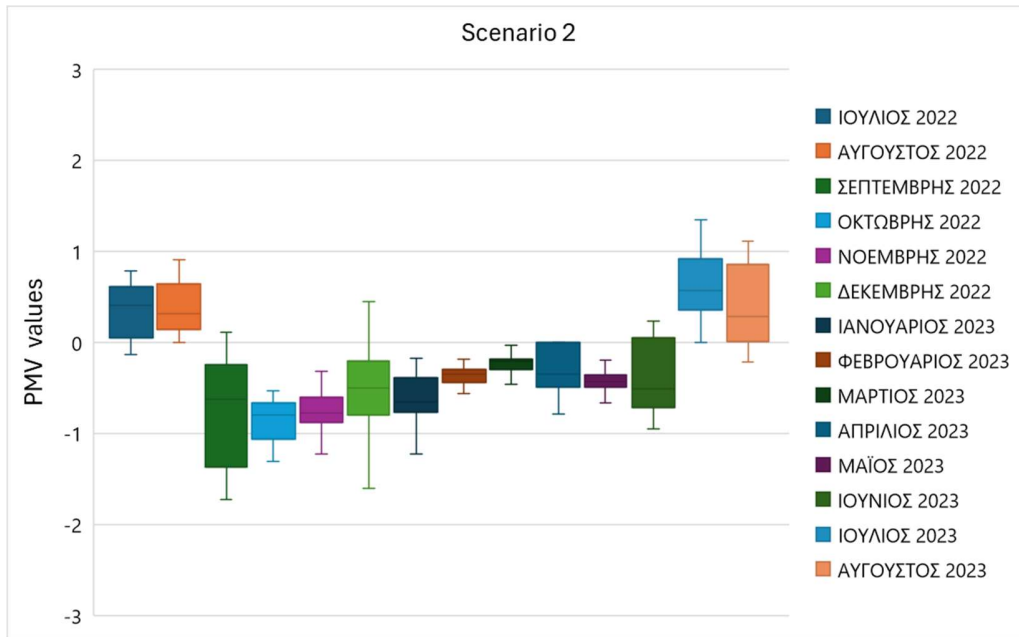
Διάγραμμα 35: Διακύμανση και διάμεσος του δείκτη PMV ανά μήνα στο σενάριο 2 για το γραφείο Β

Για το γραφείο Β παρατηρούμε ότι η διάμεσος του δείκτη PMV είναι και πάλι εντός αποδεκτών ορίων βάσει προτύπων. Μεγάλη διακύμανση παρατηρείται τους μήνες Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο. Μάλιστα η διακύμανση αυτή είναι αρκετά μεγάλη, ώστε στο 2^ο σενάριο ορισμένες τιμές του δείκτη να βρίσκονται εκτός αποδεκτών ορίων βάσει προτύπων.

Αποτελέσματα PMV: Γραφείο Γ



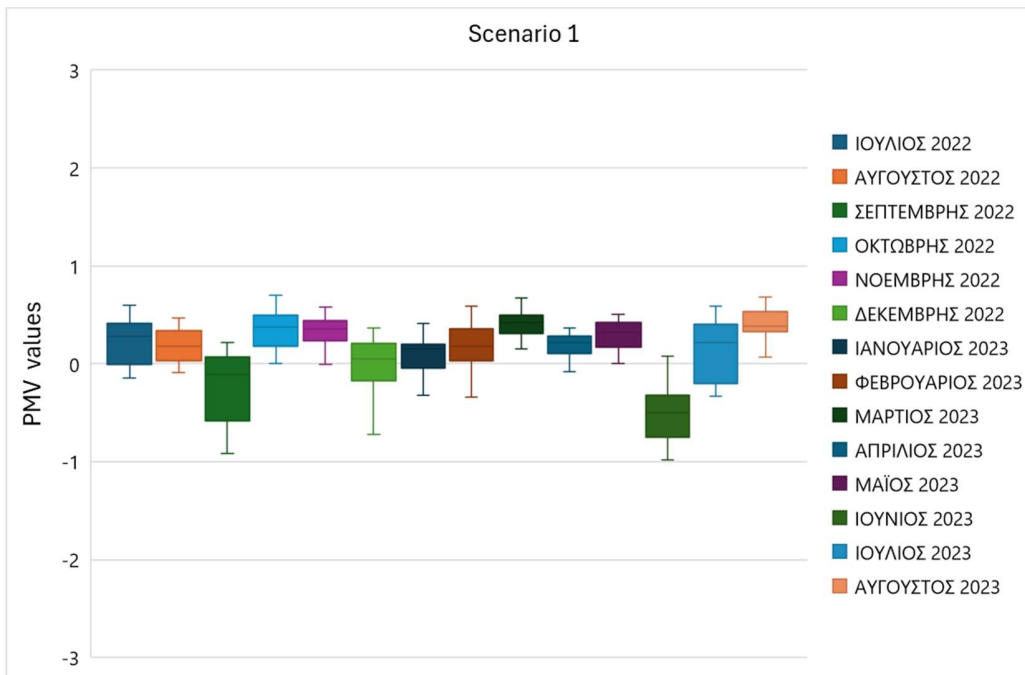
Διάγραμμα 36: Διακύμανση και διάμεσος του δείκτη PMV ανά μήνα στο σενάριο 1 για το γραφείο Γ



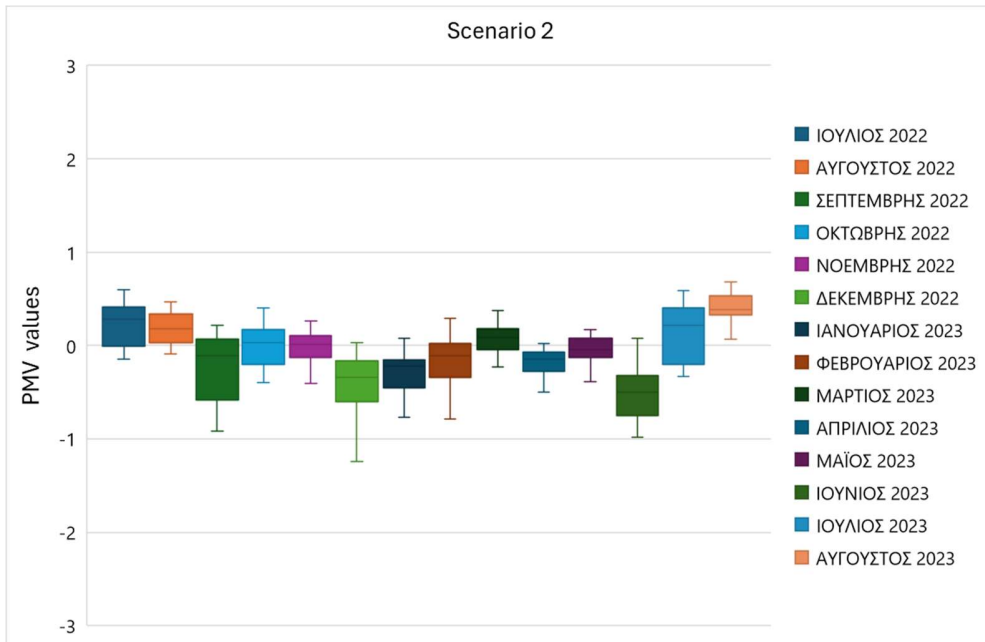
Διάγραμμα 37: Διακύμανση και διάμεσος του δείκτη PMV ανά μήνα στο σενάριο 2 για το γραφείο Γ

Για το γραφείο Γ η διάμεσος του δείκτη PMV είναι στις περισσότερες περιπτώσεις εντός του αποδεκτού ορίου της ASHRAE, ωστόσο τους μήνες Οκτώβρη, Νοέμβρη, Μάιο και Ιούνιο είναι ελάχιστα εκτός ορίου στο 2^ο σενάριο και τον Ιούνιο στο 1^ο σενάριο. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η διακύμανση του μήνα Δεκεμβρίου, που στο σενάριο 2 είναι σχεδόν 2 μονάδες της κλίμακας. Έτσι επιβεβαιώνουμε ότι και οι τιμές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο ήταν φυσιολογικές.

Αποτελέσματα PMV: Γραφείο Δ



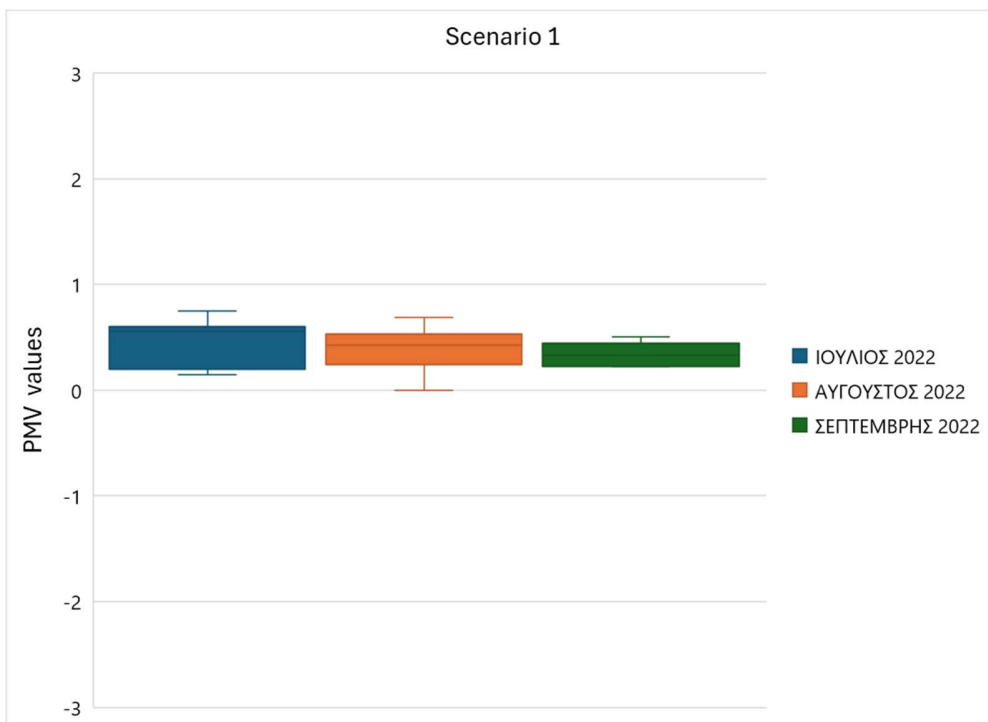
Διάγραμμα 38: Διακύμανση και διάμεσος του δείκτη PMV ανά μήνα στο σενάριο 1 για το γραφείο Δ



Διάγραμμα 39: Διακύμανση και διάμεσος του δείκτη PMV ανά μήνα στο σενάριο 2 για το γραφείο Δ

Τα αποτελέσματα των δεικτών PMV δείχνουν ότι το γραφείο αυτό είναι το πιο άνετο σε σύγκριση με τα υπόλοιπα και για τα 2 σενάρια. Τόσο η διακύμανση του δείκτη, όσο και η διάμεσος του είναι εντός αποδεκτών ορίων ευρωπαϊκού προτύπου και προτύπου ASHRAE.

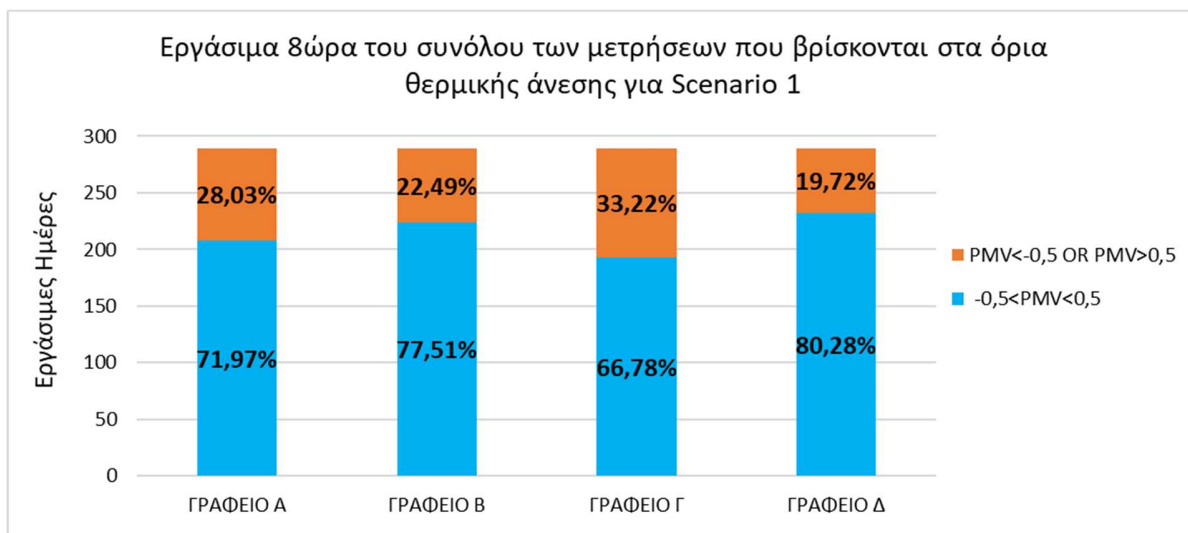
Αποτελέσματα PMV: Γραφείο Ε



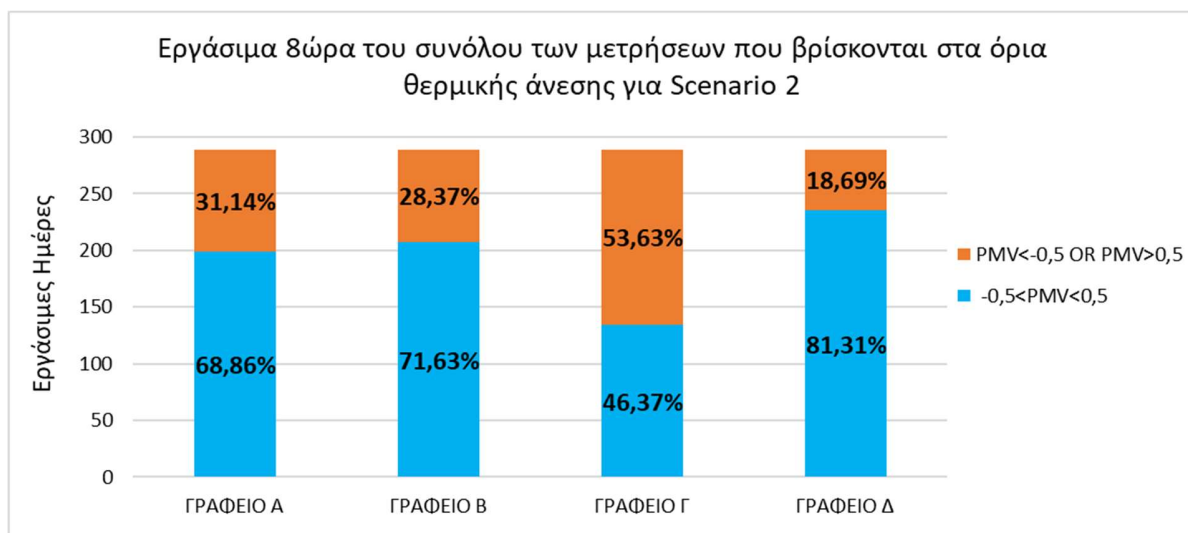
Διάγραμμα 40: Διακύμανση και διάμεσος του δείκτη PMV ανά μήνα στο σενάριο 1 για το γραφείο Ε

Παρατηρείται ότι ο δείκτης PMV για όλη τη διάρκεια των μετρήσεων στο γραφείο E βρίσκεται πολύ κοντά στα όρια θερμικής άνεσης σύμφωνα με την ASHRAE, που συνεπάγεται ότι για το μεγαλύτερο μέρος της περιόδου των μετρήσεων το γραφείο ήταν άνετο για το 90% των ανθρώπων που θα βρίσκονταν εκεί.

Ακολουθούν διαγράμματα σύγκρισης της άνεσης των γραφείων Α,Β,Γ,Δ με βάση το αποδεκτό όριο της ASHRAE για τον δείκτη PMV



Διάγραμμα 41: Σύγκριση θερμικής άνεσης μεταξύ των γραφείων την περίοδο εργασίας βάσει των μετρήσεων με χρήση του δείκτη PMV για σενάριο 1 και βάσει του προτύπου ASHRAE 55 (2023)



Διάγραμμα 42: Σύγκριση θερμικής άνεσης μεταξύ των γραφείων την περίοδο εργασίας βάσει των μετρήσεων με χρήση του δείκτη PMV για σενάριο 2 και βάσει του προτύπου ASHRAE 55 (2023)

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να αποφανθούμε εύκολα για τη θερμική άνεση που επικρατεί σε κάθε γραφείο κατά την περίοδο μετρήσεων. Το γραφείο Δ φαίνεται να είναι το πιο «άνετο» από τα 4 για τα οποία υπήρχαν στοιχεία για όλο το έτος και μάλιστα αυτό φαίνεται να μην διαφοροποιείται σε μεγάλο βαθμό από τα 2 διαφορετικά σενάρια. Το γραφείο Γ παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς η μοναδική αλλαγή μεταξύ των σεναρίων 1 και 2 ήταν ο ρουχισμός την περίοδο Νοεμβρίου-Μαΐου, που στο σενάριο

2 θεωρήθηκε ότι οι ένοικοι ήταν ντυμένοι πιο ελαφριά. Η διαφορά στο ρουχισμό ανάμεσα στα 2 σενάρια αντιστοιχεί περίπου σε μία μπλούζα παραπάνω. Όπως προκύπτει η αύξηση του ρουχισμού έχει μεγάλη επίπτωση στην άνεση του γραφείου. Στα διαγράμματα παρατηρούμε συνολική διαφορά άνεσης μεταξύ των 2 σεναρίων για το γραφείο Γ περίπου 20%. Οι μέρες που είναι όμως λιγότερο άνετες το γραφείο αυτό σε σύγκριση των δύο σεναρίων εντοπίζονται τη χειμερινή περίοδο, οπότε αν απεικονίζαμε 2 περιόδους μελέτης (Χειμώνα-Καλοκαίρι) η διαφορά άνεσης θα παρουσιαζόταν σημαντικά υψηλότερη για το χειμώνα. Το γραφείο Γ αποτελεί χώρο εργαστηρίου, οπότε ίσως να υπάρχουν διαφορετικές και περιορισμένες συνθήκες λειτουργίας σε σύγκριση με τα υπόλοιπα. Τα χαμηλότερα ποσοστά άνεσης πιθανώς να οφείλονται σε οφείλονται σε αυτές τις συνθήκες.

Τα γραφεία Α,Β,Γ εμφανίζουν λιγότερη άνεση με την αύξηση του ρουχισμού τη χειμερινή περίοδο που σημαίνει ότι είναι πιο θερμά εκείνη την περίοδο σε σύγκριση με το Δ. Το γραφείο Δ είναι το μοναδικό που για αύξηση ρουχισμού το χειμώνα επιτυγχάνεται μεγαλύτερη άνεση. Συνεπώς είναι ασφαλές να υποθέσουμε ότι το γραφείο αυτό είναι πιο κρύο το χειμώνα σε σχέση με τα υπόλοιπα τρία.

4.5 Ερωτηματολόγια

Κατά την περίοδο των μετρήσεων, μοιράστηκαν κάποια ερωτηματολόγια (Παράρτημα IV) που αφορούσαν το ρουχισμό και το θερμικό περιβάλλον στο γραφείο του κάθε εργαζομένου, για τα γραφεία που συλλέχθηκαν δεδομένα. Η πρώτη ερώτηση αφορούσε το πως νιώθει ο χρήστης το περιβάλλον του, η δεύτερη αν θα το ήθελε διαφορετικό, η τρίτη αν το θεωρεί αποδεκτό, ενώ η τέταρτη τι ρούχα φορούσε εκείνη τη στιγμή.

Τα αποτελέσματα του ερωτηματολογίου θερμικής άνεσης και ρουχισμού ανά γραφείο φαίνονται στους παρακάτω πίνακες. Η στήλη TSV αφορά την 1^η ερώτηση, η TP την 2^η, η Y/N την 3^η και η clo την 4^η.

➤ Γραφείο Α

Ημερομηνία	Ωρα	Χρήστης	TSV	TP	Y/N	clo
12/7/2022	08:45	Άνδρας 1	0	-1	1	0,49
12/7/2022	16:45	Άνδρας 1	2	-2	0	0,49
13/7/2022	08:45	Άνδρας 1	0	0	1	0,49
13/7/2022	16:15	Άνδρας 1	2	-2	0	0,49
14/7/2022	08:45	Άνδρας 1	0	0	1	0,49
14/7/2022	16:15	Άνδρας 1	2	-2	0	0,49
15/7/2022	08:45	Άνδρας 1	0	0	1	0,49
15/7/2022	16:15	Άνδρας 1	2	-2	0	0,49

➤ Γραφείο Β

Ημερομηνία	Ωρα	Χρήστης	TSV	TP	Y/N	clo
12/7/2022	11:30	Γυναίκα 1	-3	1	1	0,49
12/7/2022	11:30	Άνδρας 2	-1	1	1	0,49
12/7/2022	17:00	Γυναίκα 1	0	0	1	0,49
12/7/2022	17:00	Άνδρας 2	2	0	1	0,49
13/7/2022	08:10	Γυναίκα 1	-1	0	1	0,49
13/7/2022	09:20	Άνδρας 2	-2	1	1	0,49
13/7/2022	17:10	Άνδρας 2	2	0	1	0,49
13/7/2022	18:30	Γυναίκα 1	0	0	1	0,49
14/7/2022	08:15	Γυναίκα 1	-1	0	1	0,49
14/7/2022	9:00	Γυναίκα 1	0	0	1	0,49
14/7/2022	10:15	Άνδρας 2	-2	1	1	0,49

14/7/2022	17:30	Άνδρας 2	1	1	1	0,49
15/7/2022	9:15	Γυναίκα 1	0	0	1	0,49
15/7/2022	16:00	Γυναίκα 1	1	0	1	0,49
15/7/2022		Άνδρας 2				0,49
15/7/2022		Άνδρας 2				0,49

➤ Γραφείο Δ

Ημερομηνία	Ωρα	Χρήστης	TSV	TP	Y/N	clo
12/7/2022	9:00	Άνδρας 3	-1	0	1	0,49
12/7/2022	15:00	Άνδρας 3	0	0	1	0,49
13/7/2022	9:00	Άνδρας 3	-1	0	1	0,49
13/7/2022	15:00	Άνδρας 3	0	0	1	0,49
14/7/2022	9:00	Άνδρας 3	0	0	1	0,49
14/7/2022	15:00	Άνδρας 3	0	0	1	0,49
15/7/2022	9:00	Άνδρας 3	0	0	1	0,49
15/7/2022	15:00	Άνδρας 3	1	0	1	0,49

➤ Γραφείο Ε

Ημερομηνία	Ωρα	Χρήστης	TSV	TP	Y/N	clo
12/7/2022	9:00	Άνδρας 4	0	0	1	0,39
12/7/2022	15:00	Άνδρας 4	0	0	1	0,39
13/7/2022	9:00	Άνδρας 4	0	0	1	0,39
13/7/2022	15:00	Άνδρας 4	0	0	1	0,39
14/7/2022	9:00	Άνδρας 4	0	0	1	0,39
14/7/2022	15:00	Άνδρας 4	0	0	1	0,39
15/7/2022	9:00	Άνδρας 4	0	0	1	0,39
15/7/2022	15:00	Άνδρας 4	0	0	1	0,39

Τα ερωτηματολόγια απαντήθηκαν μόνο μία συγκεκριμένη περίοδο του καλοκαιριού, οπότε η αξιολόγηση τους δεν μπορεί να αποφέρει μια συνολική εικόνα για την έρευνα. Ωστόσο μπορούν να εξαχθούν κάποια μεμονωμένα συμπεράσματα για κάθε γραφείο:

➤ Γραφείο Α

Στο γραφείο αυτό παρατηρούμε έντονη δυσαρέσκεια τις ώρες του μεσημεριού. Ο χρήστης θεωρεί το περιβάλλον ζεστό, ωστόσο όχι αρκετά για να είναι μη αποδεκτό. Η αίσθηση ζέστης της μεσημβρινές ώρες μπορεί να οφείλεται στην διακοπή λειτουργίας του συστήματος κλιματισμού ή σε φαινόμενα ασύμμετρης κατανομής της θερμοκρασίας όπως η ηλιακή ακτινοβολία μέσω του παράθυρου, αφού το γραφείο είναι σε δυτικό προσανατολισμό.

➤ Γραφείο Β

Αρχικά παρατηρείται εύκολα ότι η θερμική άνεση σε ένα χώρο εξαρτάται από τον ένοικο και το φύλο του. Στο γραφείο Β, όπου υπάρχουν 2 ένοικοι παρατηρείται σημαντική διαφορά και στην αίσθηση θερμοκρασίας του χώρου, αλλά και στην επιθυμητή κατάσταση στο χώρο. Η δυσαρέσκεια σε σχέση με το περιβάλλον παρατηρείται πρωινές ώρες που οι χρήστες αισθάνονται τον χώρο κρύο και μεσημβρινές ώρες που τον αισθάνονται ζεστό. Παρόλα αυτά φαίνεται ότι η δυσαρέσκεια δεν είναι τόσο έντονη, καθώς και οι 2 θεωρούν το θερμικό περιβάλλον αποδεκτό και επιθυμούν μικρές ή καθόλου αλλαγές.

➤ Γραφείο Δ

Με βάση τις απαντήσεις των χρηστών, και το κοινό επίπεδο ρουχισμού το μεταξύ τους, το γραφείο Δ είναι πιο άνετο από τα Α και Β. Αυτό προκύπτει από την επιθυμία του χρήστη οι συνθήκες να παραμείνουν ίδιες σε όλες τις περιόδους. Η αίσθηση του περιβάλλοντος είναι ουδέτερη ή κοντά σε αυτήν, καθ' όλη την περίοδο της εβδομάδας.

➤ Γραφείο Ε

Το γραφείο Ε με βάση μόνο τα ερωτηματολόγια φαίνεται να είναι το πιο άνετο από τα 4, καθώς ο χρήστης θεωρεί την θερμοκρασία ιδανική. Αυτό μπορεί να οφείλεται και στον ρουχισμό που παρατηρούμε ότι είναι λίγο πιο ελαφρύς σε σχέση με τους χρήστες στα υπόλοιπα γραφεία.

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να καταλήξουμε ότι δεν υπάρχουν ακραίες καταστάσεις δυσφορίας στις περισσότερες περιπτώσεις για το θερμικό περιβάλλον σε αυτά τα γραφεία, που συνεπάγεται ότι ο κλιματισμός του κτιρίου είναι κατάλληλα σχεδιασμένος. Για να θεωρείται ένα περιβάλλον θερμικά αποδεκτό βάσει ερωτηματολογίων θα πρέπει να ισχύει ότι $-1,5 \leq TSV \leq 1,5$ με τον δείκτη TSV να αντιστοιχεί με αυτόν του PMV των υπολογιστικών μοντέλων (ANSI/ASHARE, 2023). Τα γραφεία του ισογείου (Δ και Ε) φαίνεται να έχουν καλύτερες συνθήκες που πιθανώς να οφείλεται στην μικρότερη έκθεση τους στον ήλιο (μόνο στη Δύση). Επιπλέον, το φύλο και ο ρουχισμός φαίνεται πως επηρεάζει το αποτέλεσμα της άνεσης εντός του χώρου.

Η έλλειψη στοιχείων για εξωγενείς παράγοντες, όπως η χρήση του κλιματιστικού, ή το άνοιγμα των παραθύρων σε συνδυασμό με τη μικρή διάρκεια της έρευνας με ερωτηματολόγια, καθιστούν τα συμπεράσματα με βάση αυτήν και μόνο σημαντικά αβέβαια. Σε συνδυασμό όμως με τα υπόλοιπα δεδομένα των μετρήσεων είναι δυνατό να υπάρχει μία πιο σαφής εικόνα για τις συνθήκες της εν λόγω περιόδου. Τα γραφεία Α και Δ που υπήρχαν πριν την επέκταση του κτιρίου συμμετείχαν σε ένα πιο παλιό ερωτηματολόγιο που υπάρχει στο παράρτημα. Σε εκείνο το ερωτηματολόγιο παρατηρήθηκε επίσης άνεση στους χώρους για την πλειοψηφία κατά τη θερινή περίοδο, γεγονός που επιβεβαιώνει ως ένα βαθμό τον σωστό σχεδιασμό και την καταλληλότητα του κτιρίου.

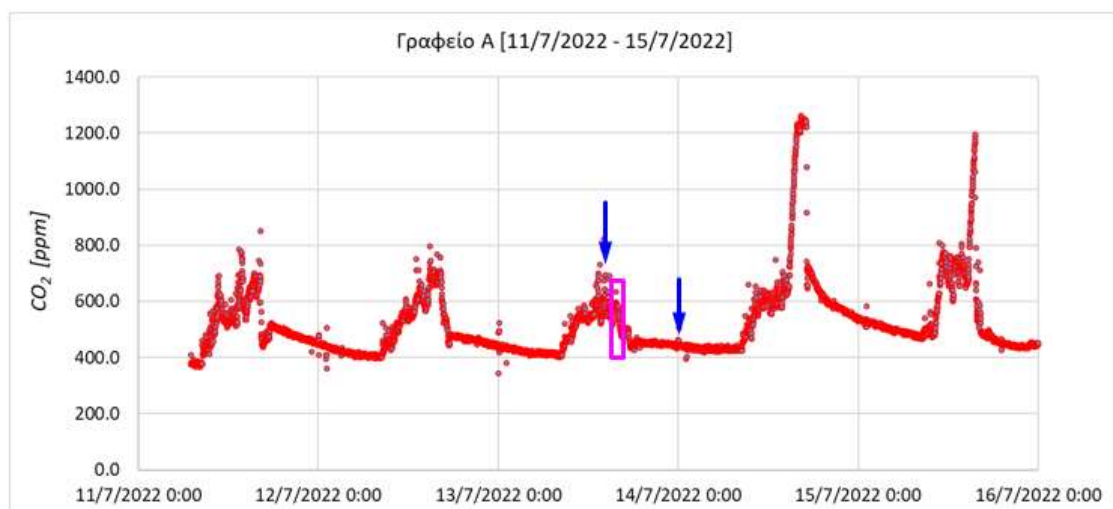
4.6 Πειραματικός υπολογισμός του αερισμού με βάση το CO₂

Χρησιμοποιώντας τις μεθόδους απομείωσης (Decay) και σταθερής κατάστασης (Steady-State) και τις εξισώσεις [2.15] και [2.14] αντίστοιχα, υπολογίστηκε πειραματικά ο αερισμός των γραφείων Α και Γ, για τα οποία συλλέχθηκαν έγκυρα δεδομένα. Από την απεικόνιση της συγκέντρωσης του CO₂ τις τυπικές εβδομάδες που παρουσιάστηκε σε προηγούμενα γραφήματα, επιλέγοντας συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα εφαρμόστηκε άλλοτε η μέθοδος απομείωσης (decay method) και άλλοτε η μέθοδος σταθερής κατάστασης (steady state method). Αυτό συμβαίνει καθώς η κάθε μέθοδος, βρίσκει καλύτερη εφαρμογή σε διαφορετικές συνθήκες. Οι δύο αυτές μέθοδοι εφαρμόστηκαν σε κάθε μία από τις τυπικές εβδομάδες τουλάχιστον μία φορά, με εξαίρεση την θερινή εβδομάδα του 2023 όπου η εφαρμογή της Steady-State δεν ενδείκνυται εξαιτίας της απότομης αλλαγής της συγκέντρωσης του CO₂.

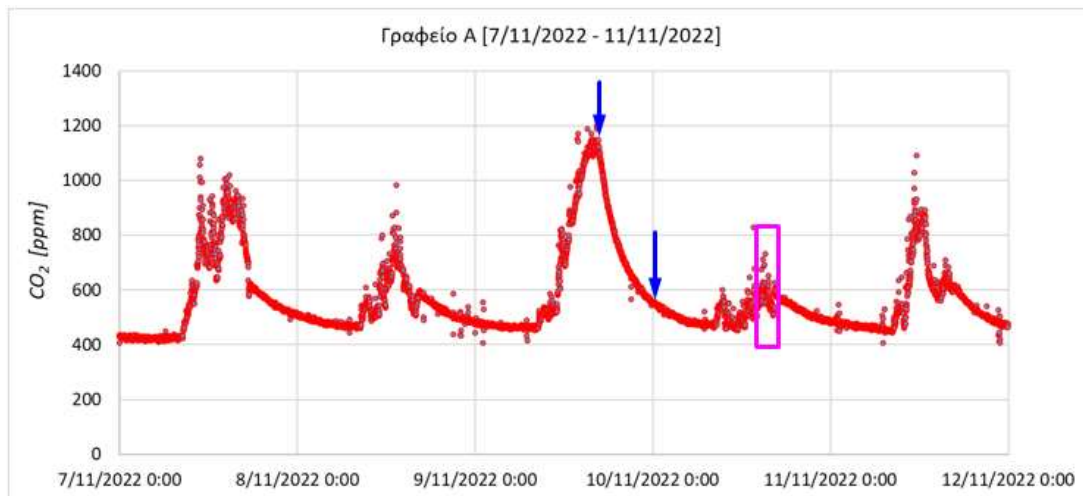
Η μέθοδος Decay εφαρμόστηκε σε διαστήματα χρόνου που το προσωπικό του κτιρίου έχει αποχωρήσει (συνήθως 16:00-24:00) για να εμφανιστεί ο αερισμός του χώρου με την υπόθεση ότι δεν παράγεται CO₂ και τα παράθυρα είναι κλειστά. Επίσης εφαρμόστηκε σε μικρότερα χρονικά διαστήματα εντός του ωρου εργασίας, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η συμπεριφορά της συγκέντρωσης του CO₂ με το άνοιγμα παραθύρων.

Η μέθοδος Steady-State εφαρμόστηκε σε διαστήματα χρόνου που το προσωπικό του κτιρίου βρίσκεται στο χώρο. Τα χρονικά διαστήματα αυτά είναι μικρότερα (1-3 ώρες) και επιλέχθηκαν με στόχο να προσδιορίσουν τον αερισμό του χώρου με την υπόθεση ότι υπάρχουν άτομα στο χώρο και τα παράθυρα είναι ανοιχτά. Τέλος θεωρήθηκε ότι το γραφείο Α έχει 2 άτομα, ενώ το γραφείο Γ 1, που βάσει αυτοψίας στους χώρους είναι το κοντινότερο σενάριο στην πραγματικότητα.

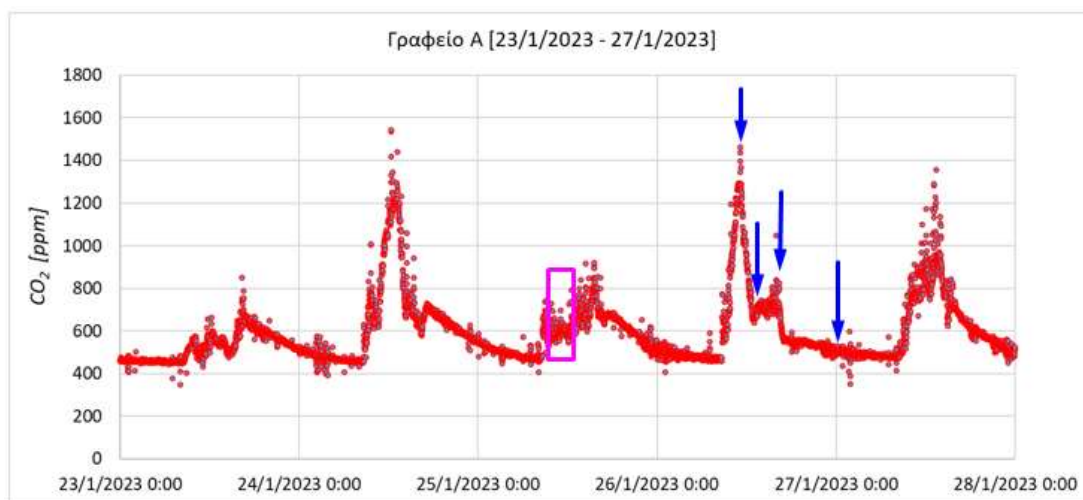
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα πειραματικών μετρήσεων συγκέντρωσης CO₂ του κάθε γραφείου με τα διαστήματα στα οποία εφαρμόστηκε η κάθε μέθοδος υπολογισμού εναλλαγών αέρα. Τα μπλε βέλη υποδεικνύουν το διάστημα που ξεκίνησε και ολοκληρώθηκε η εφαρμογή της μεθόδου Decay, ενώ τα μωβ πλαίσια υποδεικνύουν το διάστημα στο οποίο εφαρμόστηκε η μέθοδος Steady-State.



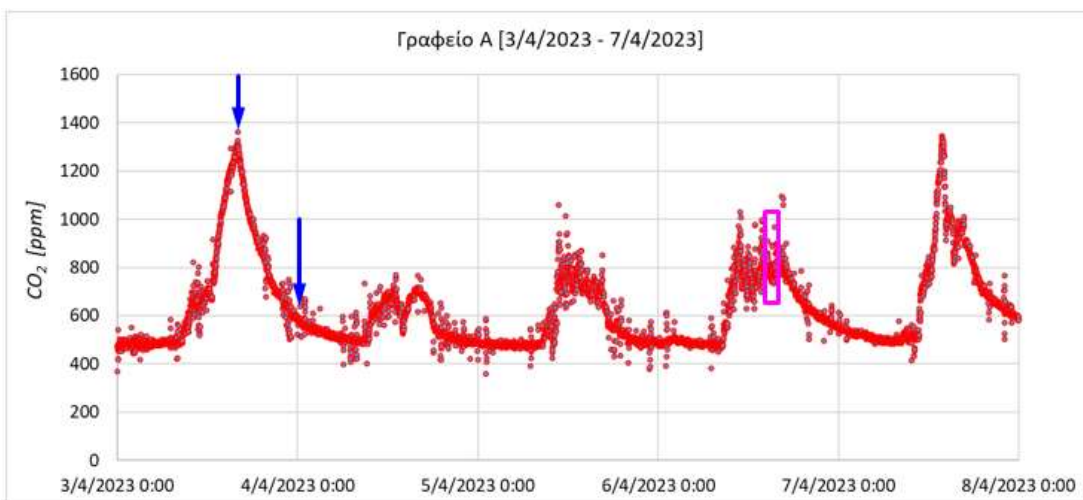
Διάγραμμα 43: Απεικόνιση των περιόδων εφαρμογής των μεθόδων Decay και Steady-State



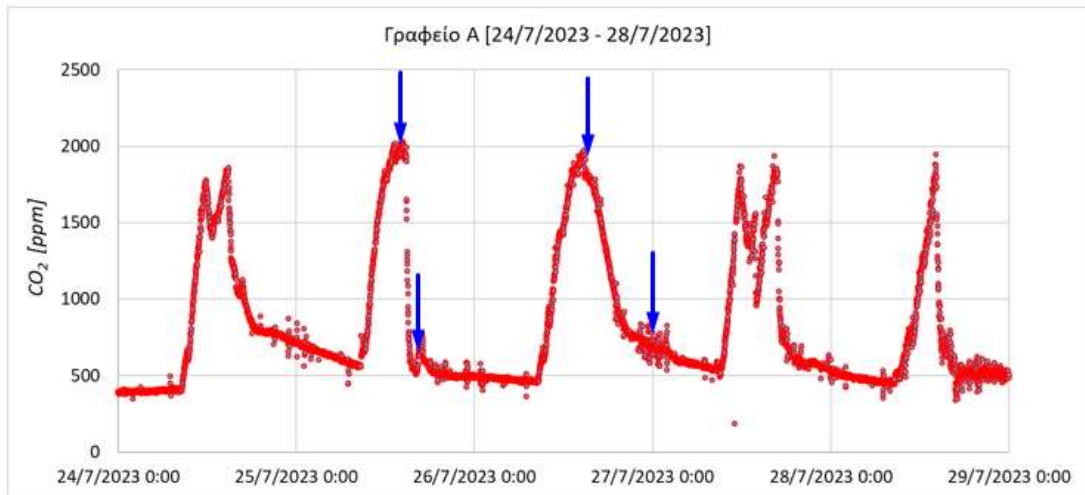
Διάγραμμα 44: Απεικόνιση των περιόδων εφαρμογής των μεθόδων Decay και Steady-State



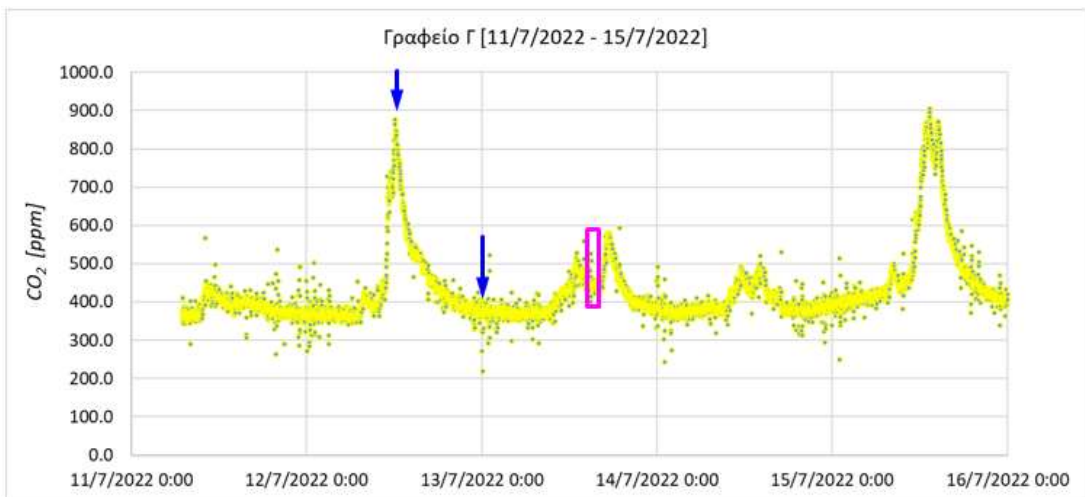
Διάγραμμα 45: Απεικόνιση των περιόδων εφαρμογής των μεθόδων Decay και Steady-State



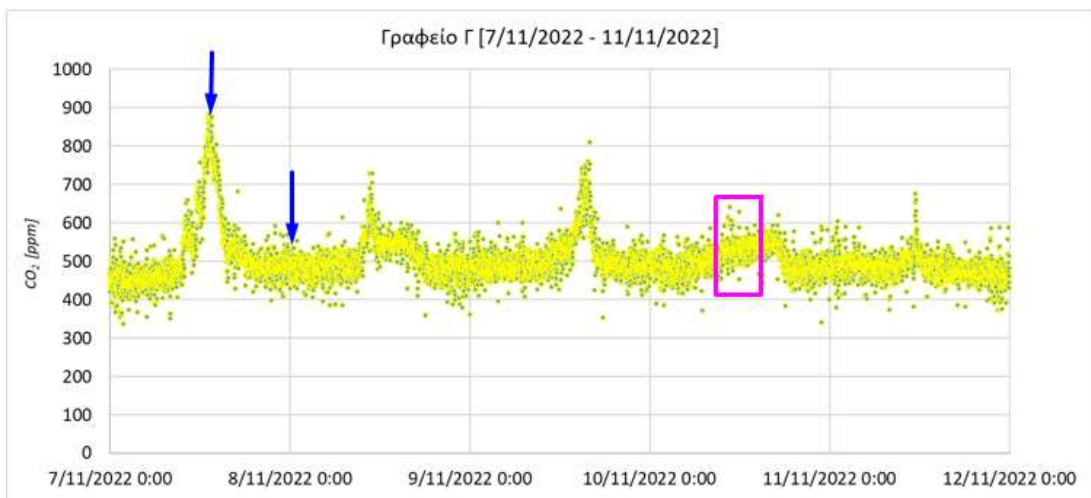
Διάγραμμα 46: Απεικόνιση των περιόδων εφαρμογής των μεθόδων Decay και Steady-State



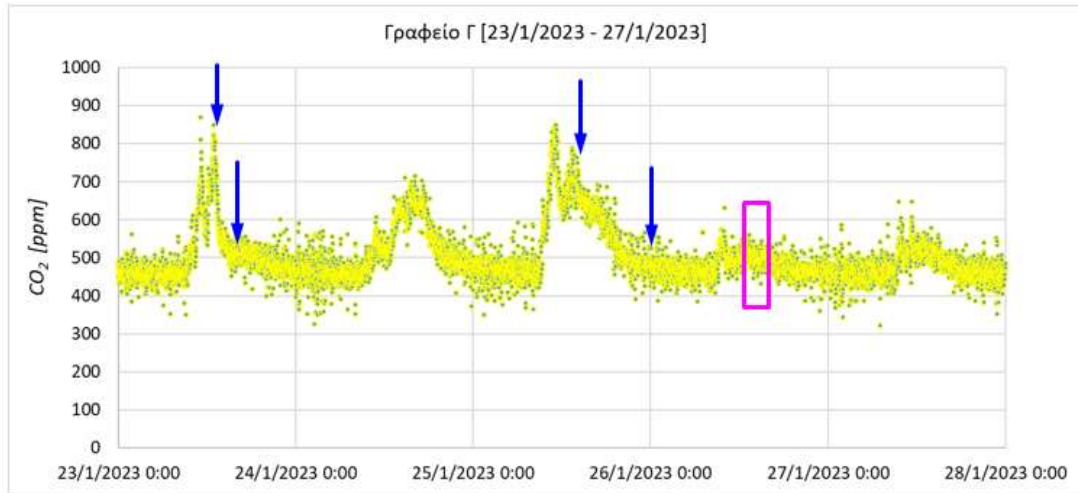
Διάγραμμα 47: Απεικόνιση των περιόδων εφαρμογής των μεθόδων Decay και Steady-State



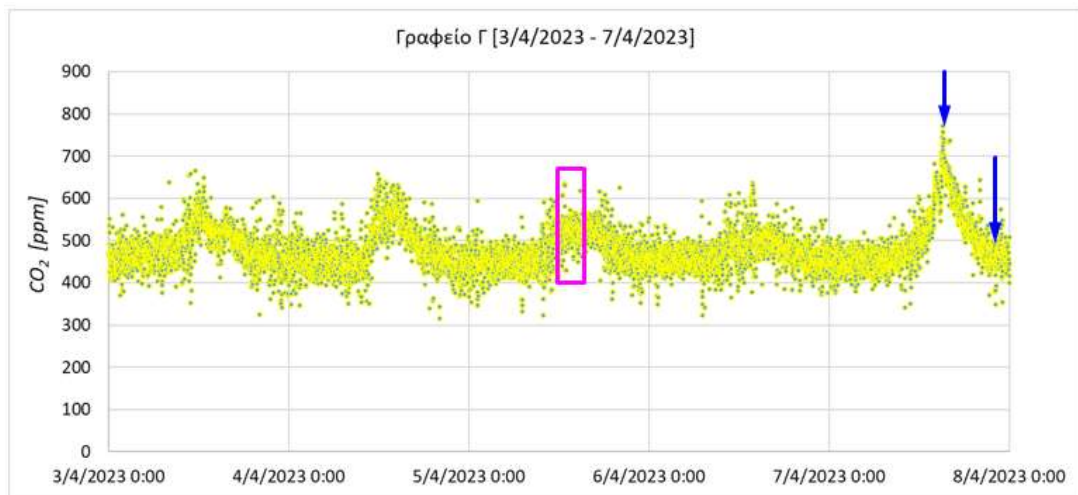
Διάγραμμα 48: Απεικόνιση των περιόδων εφαρμογής των μεθόδων Decay και Steady-State



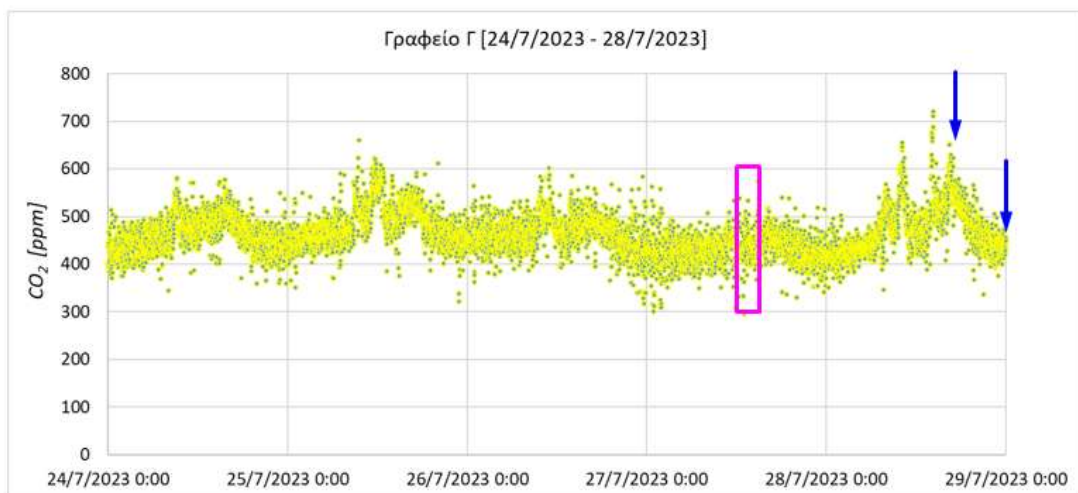
Διάγραμμα 49: Απεικόνιση των περιόδων εφαρμογής των μεθόδων Decay και Steady-State



Διάγραμμα 50: Απεικόνιση των περιόδων εφαρμογής των μεθόδων Decay και Steady-State



Διάγραμμα 51: Απεικόνιση των περιόδων εφαρμογής των μεθόδων Decay και Steady-State



Διάγραμμα 52: Απεικόνιση των περιόδων εφαρμογής των μεθόδων Decay και Steady-State

4.7 Αποτελέσματα πειραματικού υπολογισμού του αερισμού με βάση το CO₂

Οι δύο αυτές μέθοδοι κατέληξαν σε διαφορετικά αποτελέσματα για διαφορετικές χρονικές περιόδους, που όμως αντιπροσωπεύουν την κάθε εβδομάδα. Από το σύνολο των αποτελεσμάτων αντλήθηκε μία μέση τιμή για τον αερισμό του κάθε γραφείου. Ωστόσο τιμή αυτή δεν είναι αντιπροσωπευτική για τη συμπεριφορά του αερισμού καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου των μετρήσεων καθώς οι μέθοδοι εφαρμόζονται σε ελάχιστα διαστήματα σε σύγκριση με αυτά που σημειώθηκαν μετρήσεις (Μετρήσεις περίπου 400 ημέρες-δηλαδή περίπου 400 διαστήματα, εφαρμογή της μεθόδου σε περίπου 15). Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εναλλαγών αέρα για τον κάθε χώρο με βάση την κάθε μέθοδο.

Πίνακας 16: Εναλλαγές αέρα στα γραφεία Α και Γ βάσει της μεθόδου Decay

Χρόνος εφαρμογής	Εναλλαγές αέρα ανά ώρα (ACH)
Γραφείο Α	
13/7/2022 14:00-24:00	1,01
9/11/2022 17:00-24:00	0,88
26/1/2022 11:00-13:00	2,61
26/1/2022 16:00-24:00	0,99
3/4/2023 16:00-24:00	1,01
25/7/2023 14:00-16:00	4,49
27/7/2023 16:00-24:00	1,32
Μέσος όρος	1,76
Γραφείο Γ	
12/7/2022 12:00-24:00	1,85
7/11/2022 13:00-24:00	2,02
23/1/2023 13:00-16:00	2,49
25/1/2023 16:00-24:00	1,52
7/4/2023 15:00-22:00	1,91
28/7/2023 16:00-24:00	2,49
Μέσος όρος	2,05

Παρατηρείται ότι οι εναλλαγές αέρα στο γραφείο Α ποικίλουν ανάλογα με την περίοδο και τον χρόνο. Γενικώς παρατηρήθηκε μία συστηματική απότομη αλλαγή της συγκέντρωσης του CO₂ στον εν λόγω γραφείο. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο άνοιγμα των παραθύρων για ένα χρονικό διάστημα. Έτσι εφαρμόστηκε η μέθοδος απομείωσης μεταξύ άλλων και σε κάποια μικρά χρονικά διαστήματα προκειμένου να επιβεβαιώσουμε αν η απότομη αλλαγή οφείλεται στο άνοιγμα παραθύρου. Με την εφαρμογή της μεθόδου σε δύο είδη περιοχών προσπαθούμε να δημιουργήσουμε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα

αποτελεσμάτων για το γραφείο Α που τελικά συνιστούν τον μέσο όρο αλλαγών αέρα σε αυτό. Με την εφαρμογή της μεθόδου Decay σε αυτά τα μικρά διαστήματα (κατά τη διάρκεια λειτουργίας του χώρου) μπορούμε να ισχυριστούμε ότι εκείνη την χρονική περίοδο οι εργαζόμενοι άνοιξαν παράθυρα στο χώρο και γι' αυτό σημειώθηκαν υψηλές εναλλαγές αέρα, σε σχέση με τις ώρες που εφαρμόζεται συνήθως το μοντέλο.

Το γραφείο Γ διαθέτει μεγαλύτερο όγκο χώρου από το Α, οπότε περιμένουμε μειωμένες εναλλαγές αέρα. Εν αντιθέσει παρατηρούμε ελαφρώς υψηλότερες. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η εσωτερική πόρτα του γραφείου ήταν συνήθως ανοιχτή, ενώ στο Α κλειστή. Παρατηρείται ότι οι εναλλαγές αέρα ανά περίοδο είναι αρκετά κοντά με τη μέθοδο Decay. Αυτό συμβαίνει πιθανώς επειδή το γραφείο Γ αποτελεί εργαστήριο και πολλές φορές μπορεί να μην υπάρχουν άτομα στο χώρο. Η ίδια στρατηγική που εφαρμόστηκε στο γραφείο Α εφαρμόζεται και εδώ και παράγει παρόμοια αποτελέσματα.

Πίνακας 17: Εναλλαγές αέρα στα γραφεία Α και Γ βάσει της μεθόδου Steady-State

Χρόνος εφαρμογής	Εναλλαγές αέρα ανά ώρα (ACH)
Γραφείο Α	
13/7/2022 15:00-16:00	3,32
10/11/2022 14:00-16:00	3,13
25/1/2023 10:00-12:00	2,89
6/4/2023 15:00-16:00	1,38
Μέσος όρος	2,68
Γραφείο Γ	
13/7/2022 15:00-16:00	2,21
10/11/2022 10:00-14:00	0,73
26/1/2023 12:00-16:00	0,94
5/4/2023 12:00-16:00	0,79
27/7/2023 12:00-16:00	2,36
Μέσος όρος	1,41

Η εφαρμογή της μεθόδου Steady-State δεν ενδείκνυται για το γραφείο Α, καθώς σπάνια παρουσιάζει σταθερότητα ως προς τη συγκέντρωση CO₂. Στα διαστήματα που τελικά εφαρμόστηκε μετά από προσεκτική επιλογή, εμφανίστηκαν κυρίως υψηλές εναλλαγές αέρα. Αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η μέθοδος εφαρμόστηκε σε χρονικό διάστημα εντός του δωρου εργασίας, επιβεβαιώνει τον αρχικό ισχυρισμό για ανοιχτά παράθυρα στα μικρά χρονικά διαστήματα της μεθόδου Decay και δικαιολογεί τις υψηλές τιμές σε αυτά (26/1/2022 11:00-13:00, 25/7/2023 14:00-16:00). Οι τιμές δηλαδή των εναλλαγών αέρα με αυτή τη μέθοδο, είναι υψηλές και άμεσα συγκρίσιμες με εκείνες της μεθόδου Decay στα χρονικά διαστήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Η εφαρμογή της μεθόδου Steady-State ενδείκνυται περισσότερο για το γραφείο Γ, καθώς παρατηρήθηκαν αρκετά χρονικά διαστήματα που η συγκέντρωση του CO₂ παραμένει σε σταθερά επίπεδα για μη αμελητέο χρόνο. Τα αποτελέσματα εκδηλώνουν ότι σίγουρα υπήρχε κάποιο άνοιγμα παραθύρου στο χώρο, καθώς

για παρόμοια χρονικά διαστήματα βρέθηκε σημαντική διαφορά στις αλλαγές αέρα ανά περιόδους. Οι πολλές εναλλαγές αέρα που προέκυψαν με αυτή τη μέθοδο είναι όμοιες με αυτές της μεθόδου Decay στο χρονικό διάστημα 23/1/2023 13:00-16:00. Αυτό επιβεβαιώνει σε ένα βαθμό τη συμπεριφορά του αερισμού με το άνοιγμα των παραθύρων. Τέλος παρατηρείται σημαντική διαφορά σε μικρές εναλλαγές αέρα στο γραφείο Γ με την εφαρμογή των 2 μεθόδων.

5. Προσομοιώσεις στο λογισμικό CONTAM

Το CONTAM είναι ένα λογισμικό που αναπτύχθηκε από το National Institute of Standards and Technology (NIST) στις Ηνωμένες Πολιτείες και χρησιμοποιείται για την ανάλυση της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους και της δυναμικής ροής αέρα μέσα σε κτίρια (Dols, W.S., Polidoro, B.J., 2020. CONTAM User Guide and Program Documentation Version 3.4. National Institute of Standards and Technology). Σε αυτήν την ενότητα θα περιγράψουμε τις δυνατότητες του λογισμικού, τον τρόπο με τον οποίο στήθηκε το μοντέλο (κτίριο και συνθήκες), τυχόν παραδοχές που έγιναν και τον τρόπο που θα εξαχθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Συνοπτικά στο λογισμικό ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα για να διεξαχθούν οι προσομοιώσεις:

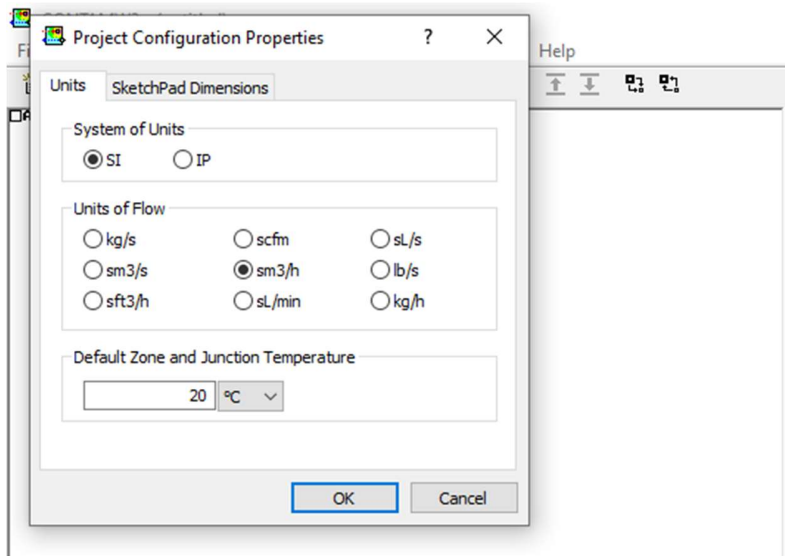
- 1) Επιλογή μονάδων μέτρησης (Units)
- 2) Επιλογή παραμέτρων πλαισίου σχεδιασμού (SketchPad Dimensions)
- 3) Παραδοχές για τη γεωμετρία του κτιρίου
- 4) Δημιουργία ψευδογεωμετρίας
- 5) Εισαγωγή Flow Paths
- 6) Εισαγωγή Zones
- 7) Εισαγωγή Wind Pressure στα εξωτερικά ανοίγματα
- 8) Εισαγωγή ρύπων (contaminants)
- 9) Εισαγωγή ατόμων (persons) μέσω Exposure στον κάθε χώρο
- 10) Εισαγωγή Schedule στους ρύπους στον κάθε χώρο
- 11) Εισαγωγή Schedule στα άτομα στον κάθε χώρο
- 12) Δημιουργία σεναρίων: 1^ο σενάριο χωρίς ανοιχτά παράθυρα, 2^ο σενάριο με ανοίγματα παραθύρων
- 13) Δημιουργία επιπλέον νέων custom Element ανοιγμάτων
- 14) Εισαγωγή Wind Pressure στα νέα custom Element ανοιγμάτων
- 15) Εισαγωγή Schedule στα νέα custom Element ανοιγμάτων
- 16) Προσδιορισμός time steps, χρόνου και μεθόδου προσομοίωσης
- 17) Επιλογή αρχείου μετεωρολογικών συνθηκών
- 18) Προσομοίωση
- 19) Εξαγωγή αποτελεσμάτων εναλλαγών αέρα και ρύπων

Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση του μοντέλου που στήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις στην παρούσα διπλωματική εργασία.

5.1 Εισαγωγή του κτιρίου στο λογισμικό

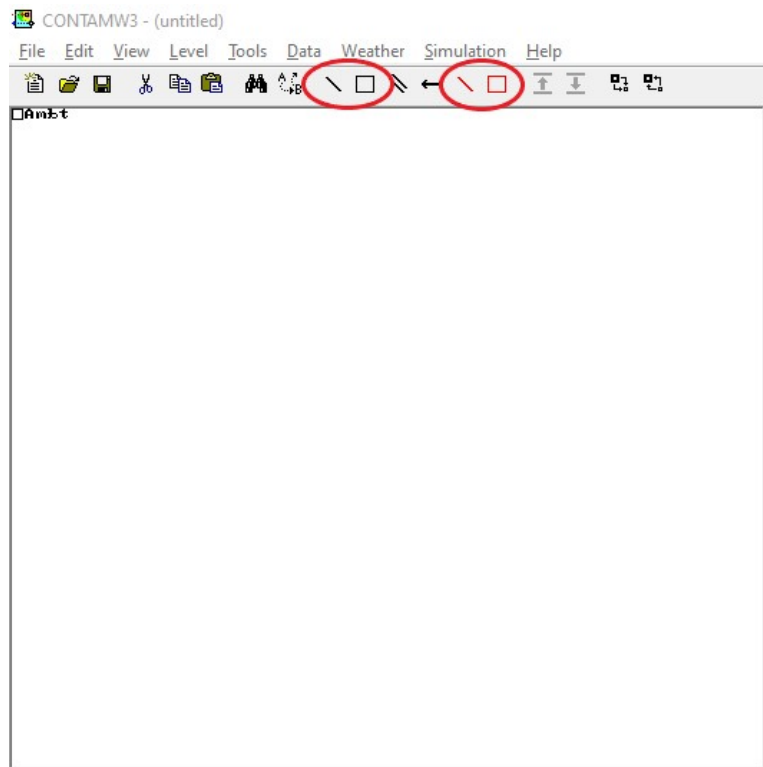
Επιλογή μονάδων μέτρησης

Αρχικά ορίστηκε το σύστημα μονάδων S.I. (International System of Units) με μονάδα μέτρησης για την προσομοίωση των ροών τα sm^3/h (cubic meters per hour) και η μέση θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος (20 °C).



Εικόνα 36: Επιλογή μονάδων μέτρησης και θερμοκρασίας εσωτερικού περιβάλλοντος στο CONTAM

Ο σχεδιασμός της ψευδογεωμετρίας έγινε βάσει της κάτοψης του κτιρίου που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3. Το CONTAM διαθέτει δύο εργαλεία για τη σχεδίαση της ψευδογεωμετρίας, τις γραμμές (Draw walls) και τα παραλληλόγραμμα (Draw boxes) και δύο εργαλεία για την απαλοιφή στοιχείων αντίστοιχα με μορφή γραμμής (Area delete) και παραλληλογράμμου (Box delete) που φαίνονται στην εικόνα

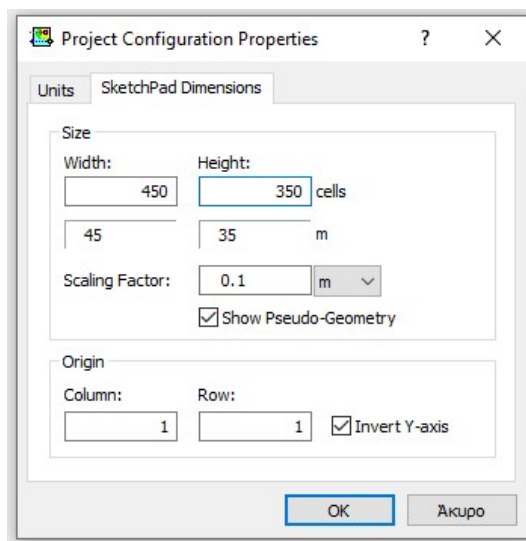


Εικόνα 37: Τα εργαλεία για τη σχεδίαση και την απαλοιφή στο CONTAM

Επιλογή παραμέτρων πλαισίου σχεδιασμού, παραδοχές και δημιουργία της ψευδογεωμετρίας

Αρχικά δημιουργήθηκε μία γεωμετρία όσο το δυνατόν πλησιέστερη στην πραγματική. Αυτό συνέβη καθώς το λογισμικό CONTAM δεν επιτρέπει τον σχεδιασμό γραμμών σε γωνία διαφορετική από 90°. Η φιλοσοφία του προγράμματος βασίζεται στην δημιουργία μίας «ψευδογεωμετρίας» για τον υπολογισμό των εσωτερικών συνθηκών του κτιρίου.

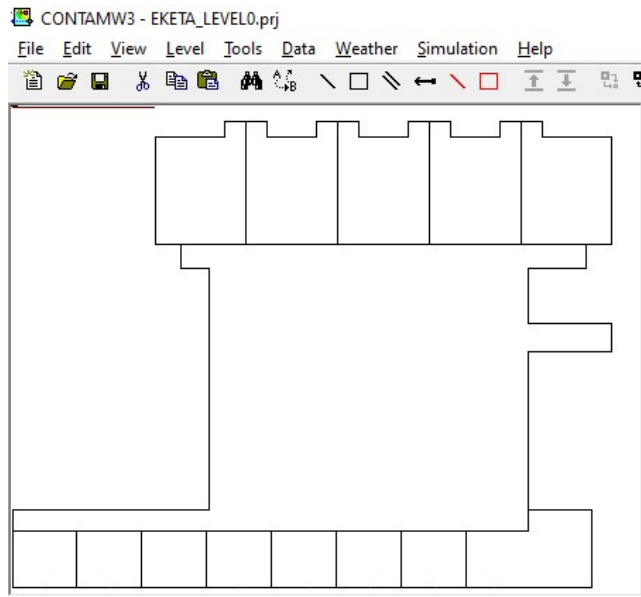
Προκειμένου να εκκινήσει η διαδικασία σχεδίασης της ψευδογεωμετρίας, έγινε ένα πρόχειρο σκαρίφημα του περιβλήματος του κτιρίου, ώστε να είναι γνωστό πόσο χώρο καταλαμβάνουν οι διαστάσεις του συνολικού μήκους και πλάτους του. Οι διαστάσεις υπολογίστηκαν από τα εσωτερικά όρια της εξωτερικής τοιχοποιίας ή των υαλοπινάκων. Επειδή όμως το κτίριο δεν είναι ίδιο και στους δύο ορόφους του, χρειάστηκε να γίνουν κάποιες αλλαγές στη συνέχεια. Αφού λοιπόν έγινε γνωστό το συνολικό μέγεθος του κτιρίου, έπρεπε να επιλεγθεί ένας αριθμός (Scaling Factor) από τον οποίο θα προκύψουν οι στρογγυλοποιήσεις και η ακρίβεια των διαστάσεων του σχεδίου. Για το τρέχων κτίριο επιλέχθηκε 0,1m. Υπολογίστηκε προηγουμένως ότι για το κτίριο απαιτούνται περίπου 45m πλάτος (Width) και 35m μήκος (Height) στο περιβάλλον σχεδιασμού του CONTAM, οπότε δόθηκε εντολή για την διάσταση του καμβά (SketchPad Dimensions) να είναι 450*350 cells που το κάθε ένα αντιστοιχεί σε 0,1m. Στη συνέχεια ενεργοποιήθηκε η επιλογή Show Pseudo-Geometry και ορίστηκε ως αρχή των αξόνων το σημείο (1,1) και ανεστραμμένος άξονας Y (Invert Y-axis) ώστε το πρόγραμμα να έχει ως σημείο αρχής (0,0) την πάνω αριστερή γωνία του καμβά και σημείο τέλους (450,350) την κάτω δεξιά γωνία του καμβά.



Εικόνα 38: Επιλογή διαστάσεων και μονάδων μέτρησης για τη σχεδίαση της ψευδογεωμετρίας

Επειδή το κτίριο μελέτης δεν είναι ορθογώνιο σε ένα σημαντικό μέρος του έγιναν κάποιες παραδοχές. Αρχικά οι αίθουσα-αμφιθέατρο στο ισόγειο θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχει καθώς το λογισμικό δεν έχει τη δυνατότητα να παράξει γεωμετρία σε σχήμα τραπέζιου και για να γίνει παραλληλόγραμμο θα υπήρχαν μεγάλες μεταβολές στις πραγματικές διαστάσεις. Έπειτα και σε άλλα σημεία που αντιμετωπίστηκε παρόμοιο πρόβλημα, θεωρήθηκε ορθογώνια παραλληλόγραμμη γεωμετρία με διαστάσεις τέτοιες ώστε η επιφάνεια του χώρου να είναι μεγαλύτερη από την αρχική και να διατηρείται η μία μεγαλύτερη διάσταση.

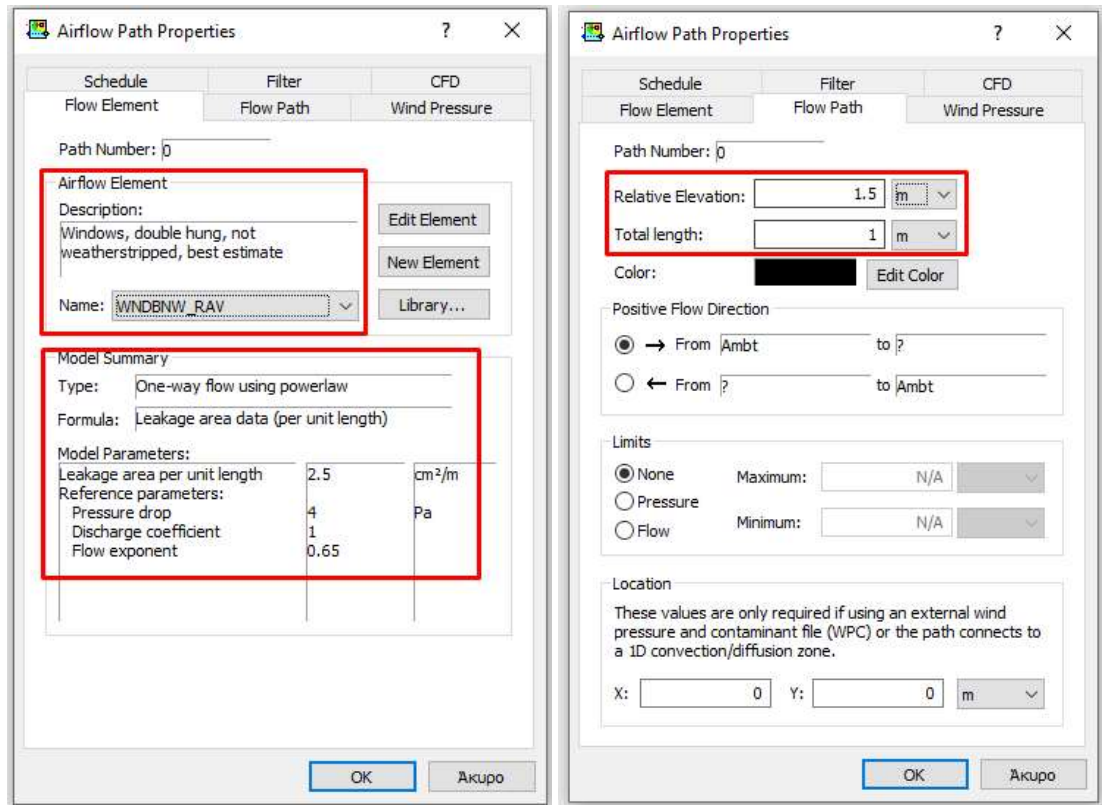
Έτσι αρχικά σχεδιάστηκε το ισόγειο του κτιρίου όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, σύμφωνα με το σχέδιο CAD της επέκτασης του κτιρίου.



Εικόνα 39: Πρώτη μορφή κάτοψης του ισογείου του ΕΚΕΤΑ στο CONTAM

Εισαγωγή διαδρομών ροής αέρα (flow paths) και ζωνών (zones)

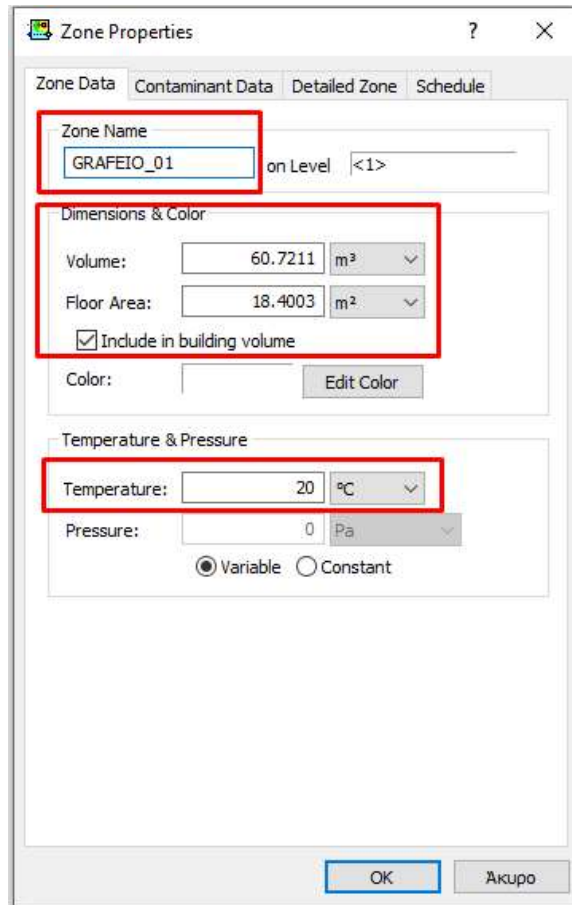
Εκτός από τα δομικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται το κτίριο, υπάρχουν και ανοίγματα που συμβάλουν στη ροή αέρα. Τα ανοίγματα αυτά μπορεί να είναι πόρτες, παράθυρα ή κενά στα δομικά υλικά των τοίχων. Η ροή αέρα μέσα από αυτά τα ανοίγματα στο CONTAM λέγεται flow path. Το επόμενο βήμα στη σχεδίαση του ισογείου στο λογισμικό είναι ο σχεδιασμός των ανοιγμάτων. Για να προστεθεί ένα flow path στην ψευδογεωμετρία πρέπει να γίνει δεξί κλικ πάνω στο δομικό στοιχείο στο οποίο θέλουμε να τοποθετηθεί και επιλέγουμε flow path. Κάθε flow path χαρακτηρίζεται από 2 βασικές ιδιότητες, τις διαστάσεις του ανοίγματος (element) και τις παραμέτρους που παραπέμπουν στην απώλεια αέρα από το άνοιγμα, όπως φαίνεται και στην εικόνα. Τις παραμέτρους αυτές μπορεί είτε να τις ορίσει ο χρήστης (custom), είτε να χρησιμοποιηθούν προτεινόμενες από τη βιβλιοθήκη του CONTAM, ανάλογα με το είδος του ανοίγματος, ενώ οι διαστάσεις τοποθετούνται για κάθε άνοιγμα βάσει του σχεδίου. Για αυτό το κτίριο χρησιμοποιήθηκαν airflow elements από τη βιβλιοθήκη αλλά και κάποια που φτιάχτηκαν με εμπειρικά στοιχεία.



Εικόνα 40: Προσδιορισμός των βασικών ιδιοτήτων ενός flow path στο CONTAM

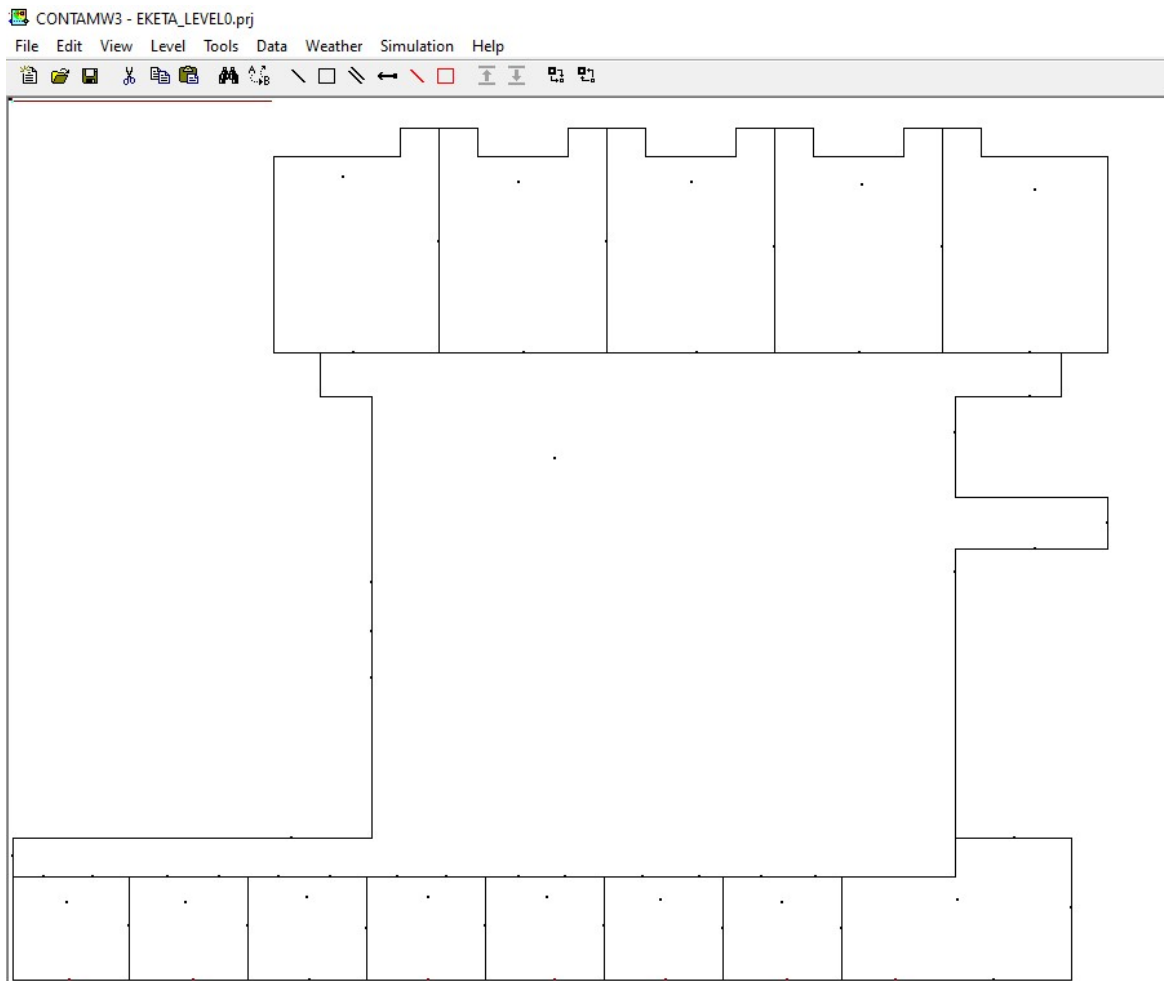
Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα να αντιγραφεί ένα flow path και να τοποθετηθεί και σε κάποιο άλλο σημείο χωρίς να πρέπει να καταχωρηθούν εκ νέου τα στοιχεία του. Αυτή η λειτουργία εξοικονομεί χρόνο από στη σχεδίαση, στην περίπτωση που ένα κτίριο έχει πολλά ίδια ανοίγματα.

Εκτός από τα flow path, η ψευδογεωμετρία στο CONTAM χαρακτηρίζεται και από ζώνες (zones). Κάθε ξεχωριστός χώρος στην ψευδογεωμετρία αποτελεί και μία ζώνη, η οποία θα πρέπει να τοποθετηθεί με διπλό αριστερό κλικ σε κάποιο σημείο του χώρου. Οι βασικές ιδιότητες που ορίζουμε για κάθε ζώνη είναι το όνομα, η θερμοκρασία του χώρου και το εμβαδό του δαπέδου του χώρου, από το οποίο προκύπτει ο όγκος του χώρου.



Εικόνα 41: Προσδιορισμός των βασικών ιδιοτήτων μίας ζώνης στο CONTAM

Αφού έχουν ολοκληρωθεί τα παραπάνω βήματα, έχει δημιουργηθεί η κάτοψη του ισόγειου στο πρόγραμμα με τα ανοίγματα και τις ζώνες στον κάθε χώρο. Οπότε τελικά η κάτοψη έχει τη μορφή που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Το επόμενο βήμα είναι να οριστεί ένα ύψος για τον χώρο του ισόγειου. Από την γραμμή εργαλείων πηγαίνοντας στην καρτέλα Level και μετά επιλέγοντας Edit Level Data ... ορίστηκε Distance to level above 3,30 m, που είναι στην πραγματικότητα το ύψος του ορόφου και Elevation 0, αφού το συγκεκριμένο επίπεδο είναι το ισόγειο.



Εικόνα 42: Κάτοψη ισόγειου ΕΚΕΤΑ στο CONTAM

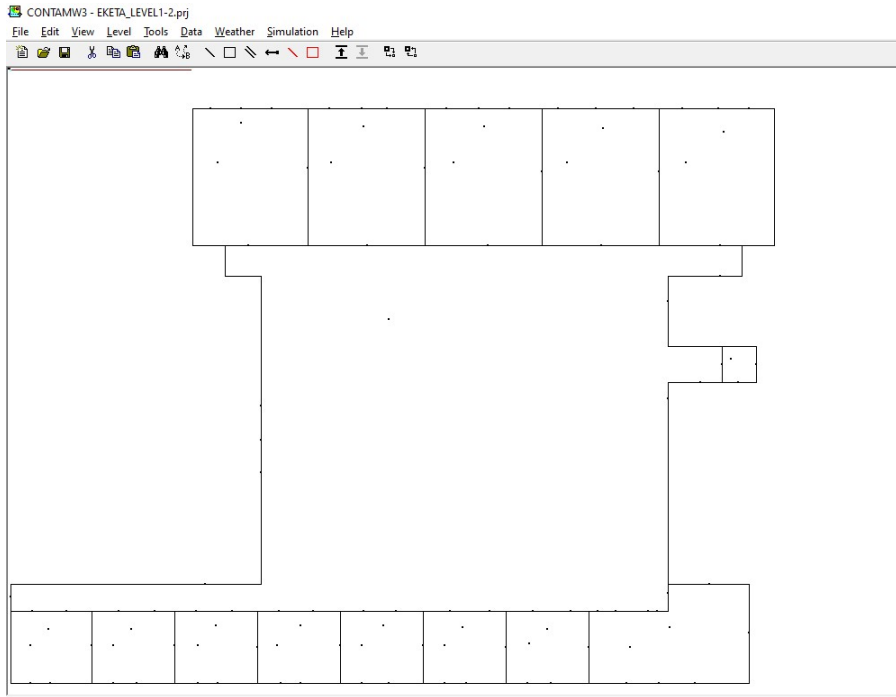
Δημιουργία κάτοψης του 1^{ου} ορόφου

Η ίδια διαδικασία θα ήταν εφικτό να γίνει και για να σχεδιαστεί η κάτοψη του 1^{ου} ορόφου, ωστόσο επειδή το συγκεκριμένο κτίριο είναι κατά βάση συμμετρικό ως προς το επίπεδο του, επιλέχθηκε να αναπαραχθεί το τρέχων σχέδιο από το ισόγειο. Αυτό γίνεται με την εξής σειρά εντολών:

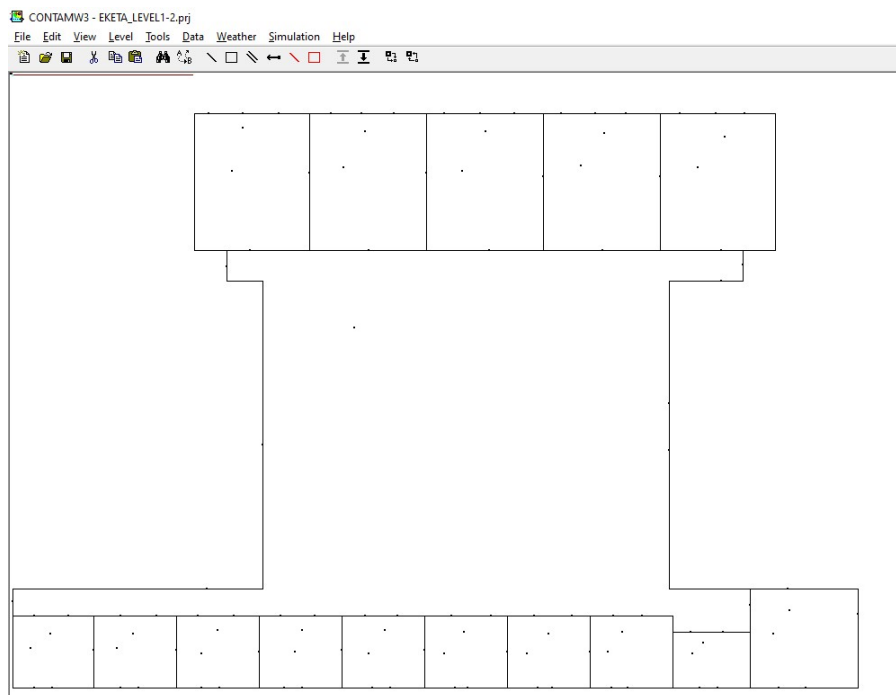
Level → Copy Level → Level → Paste Level → Above current level

Έτσι εξοικονομείται χρόνος στο σχεδιασμό. Επειδή όμως το κτίριο δεν είναι συμμετρικό σε όλο τον όγκο του, στο Level 2 (1^{ος} όροφος) πρέπει να γίνουν κάποιες τροποποιήσεις στη γεωμετρία. Στη δεξιά πλευρά δεν υπάρχει θάλαμος εισόδου, οπότε και αφαιρέθηκε, ενώ κάτω δεξιά υπάρχει χώρος που εδράζεται ένα επιπλέον γραφείο. Έτσι ολοκληρώνεται ο σχεδιασμός του σκελετού του κτιρίου και έπειτα τοποθετούνται νέα ονόματα στις ζώνες που δημιουργήθηκαν. Επειδή στον 1^ο όροφο ο κοινόχρηστος χώρος δεν έχει πάτωμα στο μεγαλύτερο μέρος του, όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες στην ενότητα παρουσίασης του κτιρίου, η ζώνη που είναι ο αντίστοιχος κοινόχρηστος χώρος στον 1^ο όροφο ορίστηκε σαν phantom zone και το εμβαδόν της προστέθηκε στο κάτω επίπεδο, σύμφωνα με τις οδηγίες του CONTAM. Τέλος διορθώθηκαν οι διαστάσεις σε κάθε flow path που αναπαράχθηκε, ή/και αλλάχθηκε το element όπου αυτό ήταν απαραίτητο.

Επιπλέον σε αυτό το σημείο παρατηρήθηκε ότι ένα μέρος της γεωμετρίας στην πλευρά των εργαστηρίων, ενώ υπήρχε στα σχέδια, δεν κατασκευάστηκε ποτέ. Οπότε οι προεκτάσεις προς την έξω πλευρά στα εργαστήρια, αντικαταστάθηκαν από μία ευθεία. Μετά από κάποιες ακόμη μικρές μετατροπές προέκυψαν οι τελικές κατόψεις των επιπέδων 1 και 2.



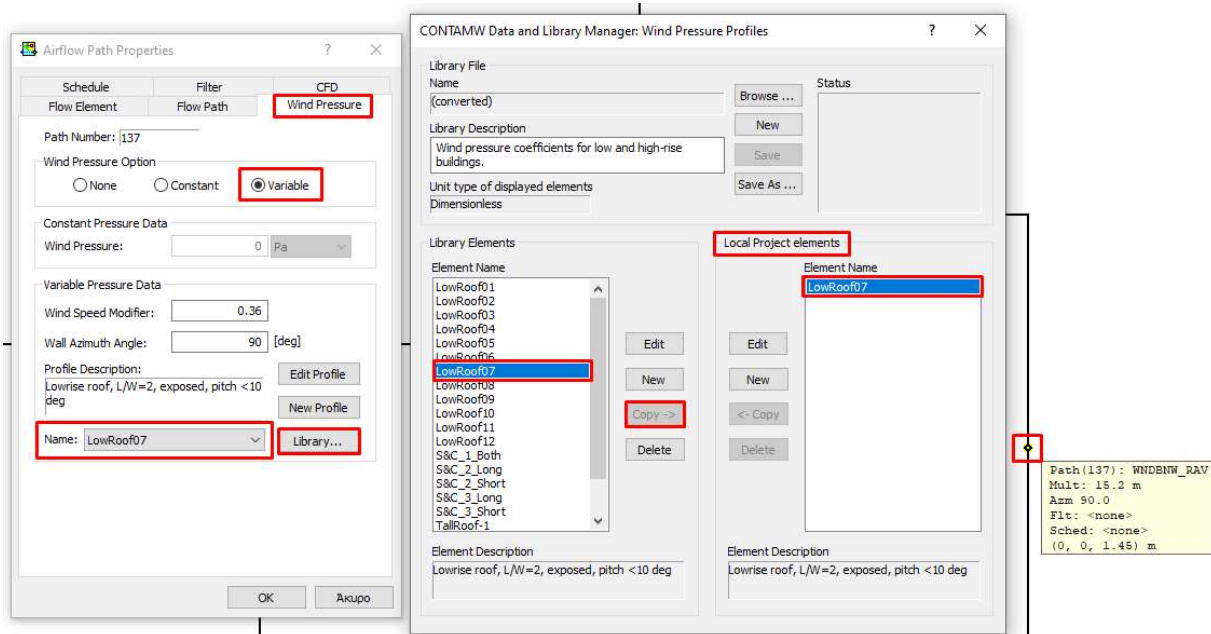
Εικόνα 43: Τελική κάτοψη ισογείου (Level 1) EKETA στο CONTAM



Εικόνα 44: Τελική κάτοψη 1^{ου} ορόφου (Level 2) EKETA στο CONTAM

Εισαγωγή Wind Pressure στα εξωτερικά ανοίγματα

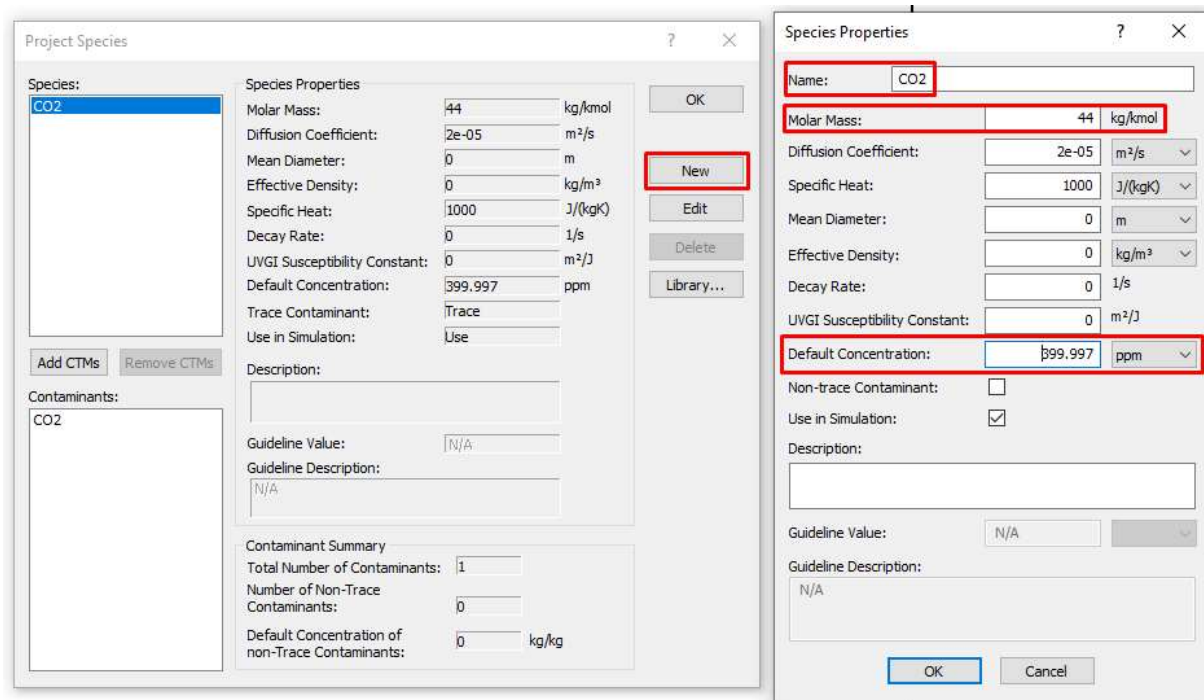
Αφού έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία της σχεδίασης είναι σημαντικό να τοποθετηθεί σε όλα τα εξωτερικά ανοίγματα προφίλ πίεσης ανέμου. Αυτό γίνεται στο κάθε άνοιγμα ξεχωριστά, ανοίγοντας την καρτέλα του και πηγαίνοντας στο μενού Wind Pressure. Από εκεί επιλέγεται η επιλογή Variable και στο πεδίο Variable Pressure Data επιλέγεται Element από τη βιβλιοθήκη του CONTAM το LowRoof07. Η βιβλιοθήκη που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από δεδομένα της AIVC (AIVC, 1998). Η επιλογή έγινε σύμφωνα με το πρότυπο και επίσης η περιγραφή του είναι η πιο κοντινή στη γεωμετρία του κτιρίου. Επιλέγοντας Copy εισάγεται στο Local Project elements. Μόλις εισαχθεί, αν κλείσει η καρτέλα της βιβλιοθήκης, μπορεί να επιλεγεί στην καρτέλα Wind Pressure. Οι καρτέλες που χρησιμοποιήθηκαν για τη διαδικασία αυτή φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 45: Εισαγωγή Wind Pressure στα εξωτερικά ανοίγματα του κτιρίου

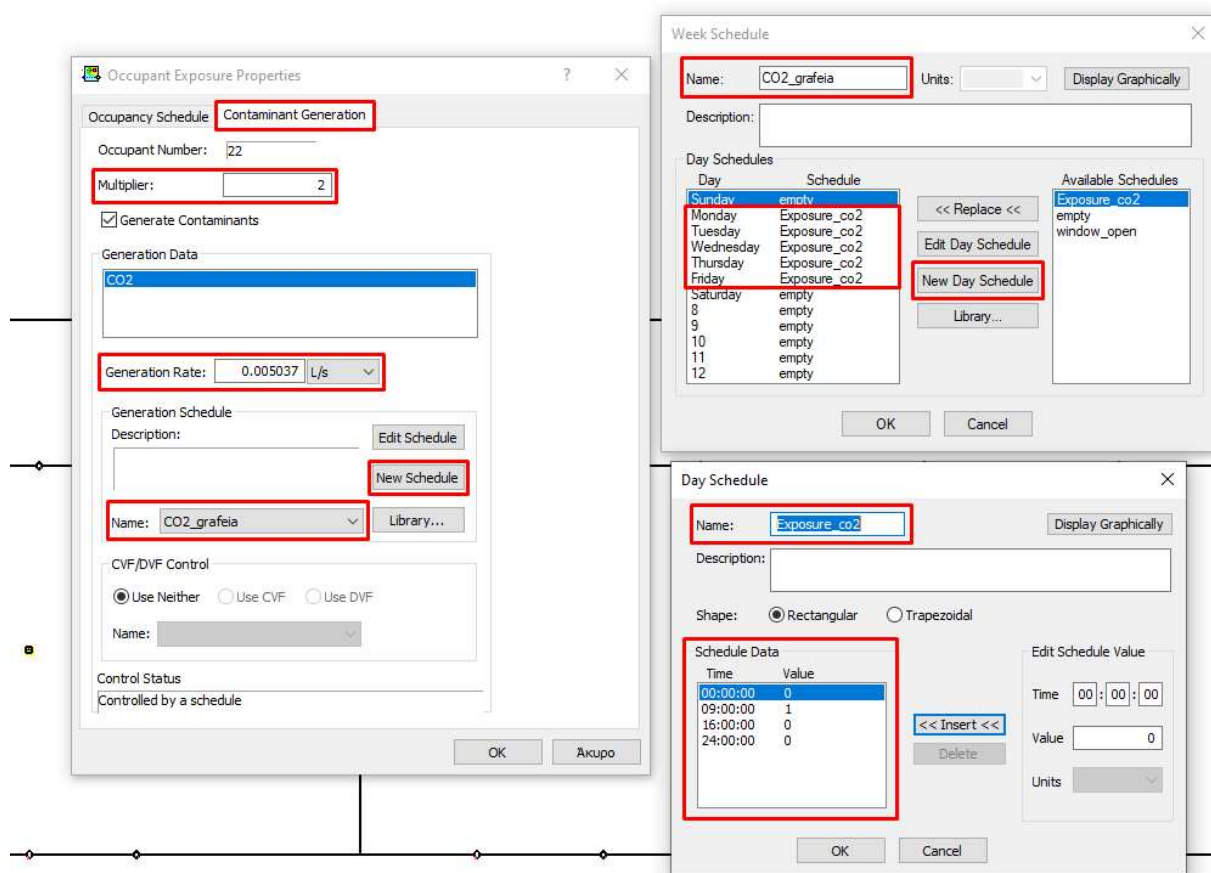
Εισαγωγή ρύπων (contaminants), ατόμων (persons) και προγραμμάτων (Schedules)

Στη συνέχεια της προσομοίωσης πρέπει να εισαχθούν οι ρύποι. Αρχικά πρέπει να προσδιοριστεί το είδος και τα χαρακτηριστικά του ρύπου που θέλουμε να συμπεριληφθεί στο μοντέλο μας. Αυτό γίνεται επιλέγοντας Data από τη γραμμή εργαλείων και στη συνέχεια New. Στην καρτέλα που ανοίγει ονομάζεται ο ρύπος που δημιουργούμε ως CO₂, δίνεται τιμή στο μοριακό του βάρος (Molar Mass) 44 και στη συγκέντρωσή του (Default Concentration) 400 σε ppm που αντιστοιχεί στη συγκέντρωση του στο εξωτερικό περιβάλλον. Επιλέγοντας OK, εισάγεται ο ρύπος με τα χαρακτηριστικά που ορίστηκαν. Οι καρτέλες που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στην παρακάτω εικόνα 45:



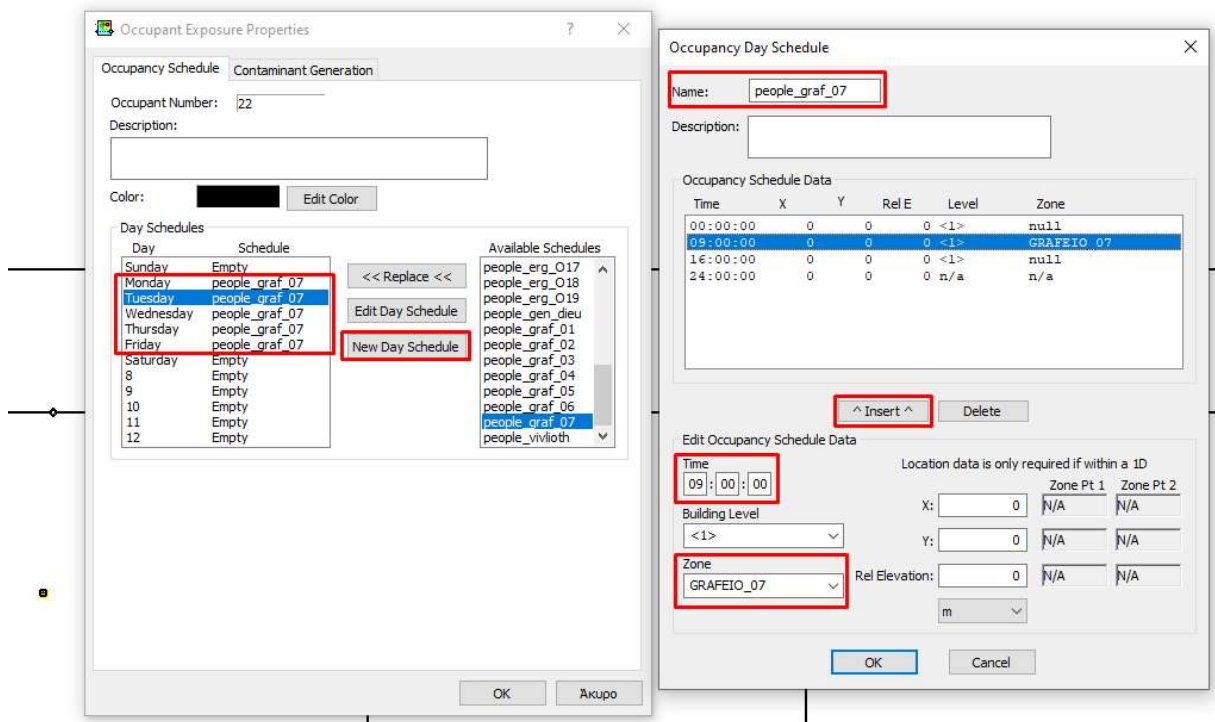
Εικόνα 46: Εισαγωγή ρύπου (CO₂) και στοιχείων του

Επιπλέον για τους ρύπους, και πιο συγκεκριμένα για το CO₂, πρέπει να γίνει προσθήκη των ατόμων που υπάρχουν και συνεπώς παράγουν στον κάθε χώρο. Αυτό γίνεται στον κάθε χώρο ξεχωριστά με δεξί κλικ και επιλέγοντας Exposure. Έτσι δημιουργείται ένα εικονίδιο σε σχήμα προσώπου. Κάνοντας διπλό κλικ στο εικονίδιο μπορούν να οριστούν οι παράμετροι για τους ρύπους. Οι παράμετροι αυτοί χωρίζονται σε 2 κατηγορίες, το Occupancy Schedule (πρόγραμμα ενοίκων) και το Contaminant Generation (παραγωγή ρύπων). Αρχικά στην καρτέλα Contaminant Generation θέτουμε στο Multiplier τιμή 2 για τα γραφεία, τιμή 4 για τη βιβλιοθήκη και τιμή 1 για τα εργαστήρια και τις αποθήκες. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στα άτομα στο χώρο. Θεωρούμε ότι οι υπόλοιποι χώροι δεν έχουν ενοίκους. Επιλέγουμε το Generate Contaminants και στο Generation Rate εισάγουμε τιμή 0,005037 L/s που αντιστοιχεί σε ρυθμό παραγωγής CO₂ για καθιστική εργασία. Στο πεδίο Generation Schedule που βρίσκεται από κάτω επιλέγουμε New Schedule για να δημιουργήσουμε ένα πρόγραμμα. Έτσι ανοίγει ένα νέο παράθυρο με τίτλο Week Schedule. Ονομάζουμε το πρόγραμμα αυτό CO₂_grafeia, και θα το χρησιμοποιήσουμε σε όλους τους χώρους που θεωρήσαμε ότι υπάρχουν άτομα. Στη συνέχεια στο ίδιο παράθυρο επιλέγουμε New Day Schedule και ανοίγει και πάλι ένα νέο παράθυρο με τίτλο Day Schedule. Ονομάζουμε το Day Schedule που θα δημιουργήσουμε Exposure_co2 και στο πεδίο Schedule Data εισάγουμε για χρόνο 09:00 τιμή (Value) 1, που σημαίνει ότι προσήλθαν άτομα στο χώρο (άρα ξεκίνησα να παράγουν ρύπους) και για χρόνο 16:00 τιμή 0, που σημαίνει ότι αποχώρησαν. Αφήνουμε τις ώρες 00:00 και 24:00 με τιμή 0 καθώς τα γραφεία δεν έχουν άτομα εκείνες τις ώρες. Επιλέγοντας OK δημιουργήθηκε το ημερήσιο πρόγραμμα CO₂. Στη συνέχεια στο παράθυρο Week Schedule στις εργάσιμες ημέρες (Δευτέρα-Παρασκευή) επιλέγοντας την κάθε μία και ταυτόχρονα επιλέγοντας στο δεξιά πεδίο (Available Schedules) το καθημερινό πρόγραμμα που μόλις δημιουργήθηκε (Exposure_co2) επιλέγουμε Replace. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία δημιουργούμε ένα πρόγραμμα που δεν υπάρχουν εργαζόμενοι και το ονομάζουμε empty, το οποίο και εισάγουμε στις υπόλοιπες μέρες του εβδομαδιαίου προγράμματος. Έτσι ολοκληρώνεται η διαδικασία δημιουργίας εβδομαδιαίου προγράμματος παραγωγής CO₂ και επιλέγοντας OK το επιλέγουμε και στο αρχικό παράθυρο Exposure.



Εικόνα 47: Εισαγωγή παραγωγή ρύπων βάσει εβδομαδιαίου και ημερήσιου προγράμματος

Στην καρτέλα Occupancy Schedule πρέπει πάλι να δημιουργήσουμε εβδομαδιαίο και ημερήσιο πρόγραμμα, αλλά για τους εργαζομένους αυτή τη φορά. Αρχικά επιλέγουμε New Day Schedule και στο νέο παράθυρο που άνοιξε το ονομάζουμε people_graf_07. Αυτά τα προγράμματα δημιουργήθηκαν μοναδικά για το κάθε γραφείο, παρόλα αυτά έχουν το ίδιο ωράριο. Στο πεδίο Edit Occupancy Schedule Data για χρόνο 09:00, Building Level 1, Zone GRAFEIO_07 και επιλέγοντας insert, δημιουργούμε ώρα προσέλευσης των ενοίκων. Με την ίδια διαδικασία, αλλά αυτή τη φορά επιλέγοντας χρόνο 16:00, στο πεδίο Zone null και insert, δημιουργούμε ώρα αποχώρησης των χρηστών. Επιλέγοντας OK επιστρέφουμε στο αρχικό παράθυρο και μπορούμε να επιλέξουμε το πρόγραμμα που θέλουμε από τα διαθέσιμα στο εκάστοτε γραφείο και να γίνει Replace. Οι εργάσιμες μέρες είναι και πάλι οι ίδιες, οπότε το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιείται για Δευτέρα-Παρασκευή, ενώ για τις υπόλοιπες μέρες δημιουργείται και πάλι ένα πρόγραμμα που ονομάζεται Empty και είναι όλα τα στοιχεία του null.



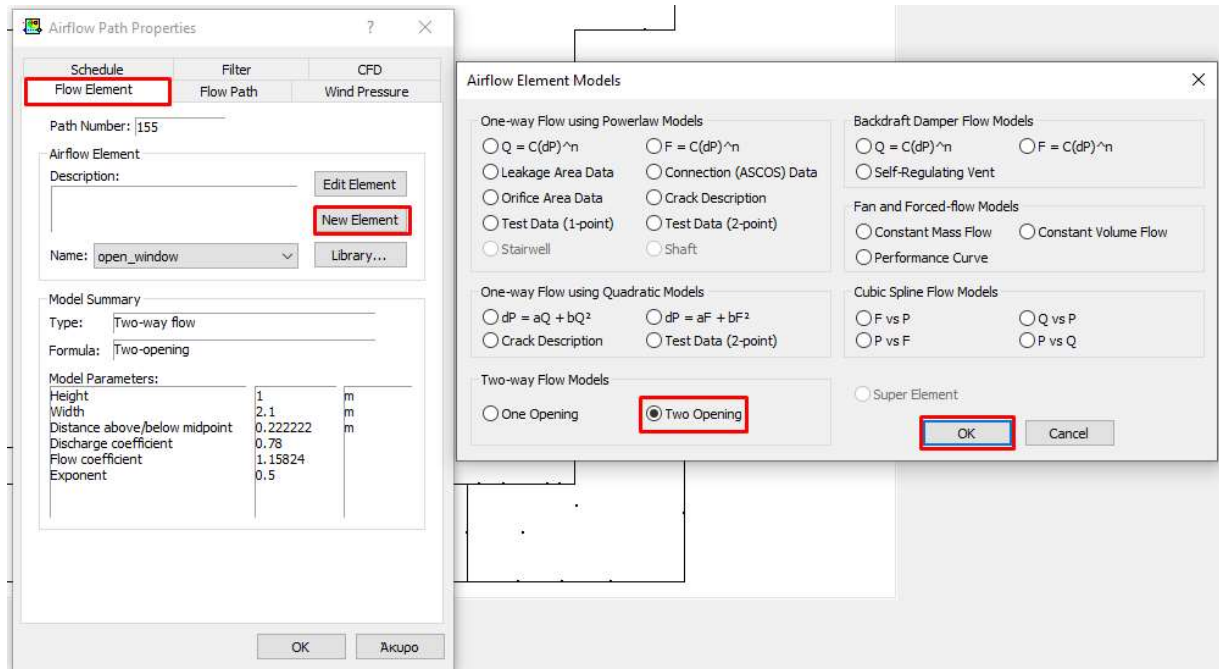
Εικόνα 48: Εισαγωγή ημερήσιου και εβδομαδιαίου προγράμματος προσέλευσης και αποχώρησης ατόμων

Δημιουργία δύο σεναρίων

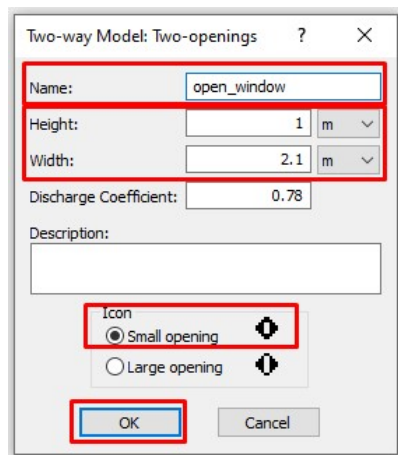
Στη συνέχεια θεωρήθηκαν 2 σενάρια. Το 1^ο περιλαμβάνει το κτίριο με την τρέχουσα διάταξη, ενώ το 2^ο περιλαμβάνει άνοιγμα των παραθύρων στα γραφεία (όχι εργαστήρια) 3 φορές τη μέρα για 15 λεπτά την κάθε φορά. Ο σχεδιασμός στο CONTAM για το 1^ο σενάριο ολοκληρώνεται εδώ. Για το 2^ο σενάριο δημιουργήθηκε ένα νέο αρχείο, αντίγραφο του σχεδίου μέχρι αυτό το βήμα, όπου θα προστεθούν κάποια επιμέρους στοιχεία.

Δημιουργία μοντέλου προσομοίωσης για το 2^ο σενάριο (άνοιγμα παραθύρων)

Η διαφορά σε σχέση με τον μέχρι τώρα σχεδιασμό βρίσκεται στη δημιουργία νέων Flow path. Στη γεωμετρία εισήχθησαν νέα Flow paths (1 για κάθε γραφείο στο δυτικό προσανατολισμό) που αναπαριστούν το περιοδικό άνοιγμα των παραθύρων. Αυτό γίνεται με τη δημιουργία Flow path όπως περιεγράφηκε σε προηγούμενο βήμα, αλλά αυτή την φορά δεν επιλέχθηκε element από τη βιβλιοθήκη, αλλά δημιουργήθηκε custom. Το νέο element δημιουργήθηκε από την καρτέρα Airflow path properties επιλέγοντας New element και στην συνέχεια στο παράθυρο που εμφανίζεται Two Opening και OK. Έπειτα στο νέο παράθυρο που εμφανίζεται, ορίζεται το όνομα του νέου element (open_window) και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στις εικόνες 49 και 50. Αφού ολοκληρωθεί αυτό το βήμα και επιλεγθεί OK, το νέο element με όνομα open_window μπορεί να επιλεγθεί απευθείας στην καρτέρα Airflow path properties για όλα τα ανοίγματα.



Εικόνα 49: Δημιουργία νέου custom element που αναπαριστά το άνοιγμα των παραθύρων

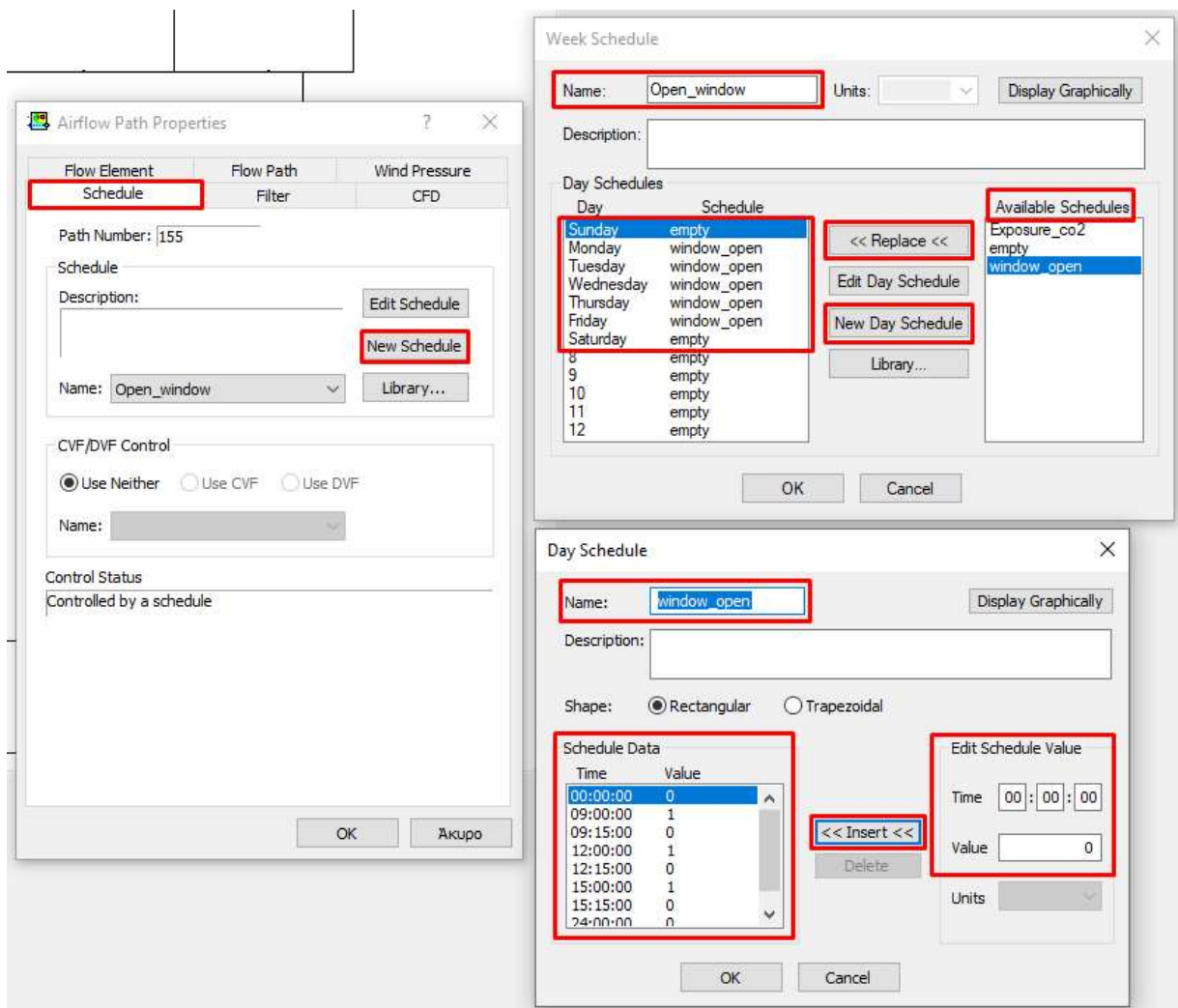


Εικόνα 50: Εισαγωγή χαρακτηριστικών νέου element κατηγορίας Two Opening

Τα νέα Flow paths που δημιουργήθηκαν και αναπαριστούν ανοιχτά παράθυρα, βρίσκονται επίσης στο περιβάλλον του κτιρίου και συνεπώς έρχονται σε επαφή με τα καιρικά φαινόμενα. Γι' αυτό το λόγω πρέπει να εισαχθεί και σε αυτά προφίλ πίεσης ανέμου. Η διαδικασία εισαγωγής προφίλ πίεσης ανέμου γίνεται με τον ίδιο τρόπο που περιεγράφηκε σε προηγούμενο βήμα στο κάθε άνοιγμα που προστέθηκε.

Το περιοδικό άνοιγμα των παραθύρων που θέλουμε να εξετάσουμε στην προσομοίωση στο CONTAM, επιτυγχάνεται τελικά με την εισαγωγή Schedule στα ανοίγματα με όνομα open_window που δημιουργήθηκαν και προστέθηκαν στη γεωμετρία στο προηγούμενο βήμα. Η διαδικασία προγράμματος γίνεται μέσα από το μενού Airflow path properties και την καρτέλα Schedule. Επιλέγοντας New Schedule εμφανίζεται νέο παράθυρο για τον ορισμό εβδομαδιαίου προγράμματος. Ονομάζουμε το νέο εβδομαδιαίο πρόγραμμα Open_window και επιλέγουμε New Day Schedule. Στο νέο παράθυρο για το ημερήσιο

πρόγραμμα ορίζονται οι χρόνοι που ανοίγουν τα παράθυρα από το πεδίο Edit Schedule Value εισάγοντας την επιθυμητή ώρα ανοίγματος παραθύρου, Value τιμή 1 και επιλέγοντας Insert. Με τον ίδιο τρόπο για Value τιμή 0 ορίζεται ο χρόνος που τα παράθυρα κλείνουν. Έτσι τελικά το ημερήσιο πρόγραμμα φαίνεται όπως στην εικόνα στο πεδίο Schedule Data. Ονομάζουμε το ημερήσιο πρόγραμμα που μόλις δημιουργήθηκε window_open, και στη συνέχεια το προσθέτουμε στο εβδομαδιαίο πρόγραμμα για μέρες Δευτέρα-Παρασκευή. Για τις υπόλοιπες μέρες δημιουργείται και εισάγεται νέο ημερήσιο πρόγραμμα με τον ίδιο τρόπο που δεν περιλαμβάνει άνοιγμα παραθύρων. Η διαδικασία που μόλις περιεγράφηκε απεικονίζεται στην εικόνα 51. Μόλις ολοκληρωθεί το νέο εβδομαδιαίο πρόγραμμα (Open_window) είναι διαθέσιμο στο αρχικό παράθυρο για επιλογή.

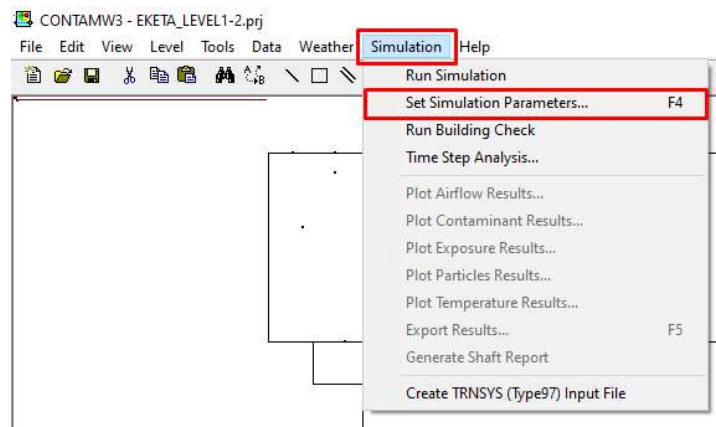


Εικόνα 51: Εισαγωγή Week και Day Schedule στο custom element open_window

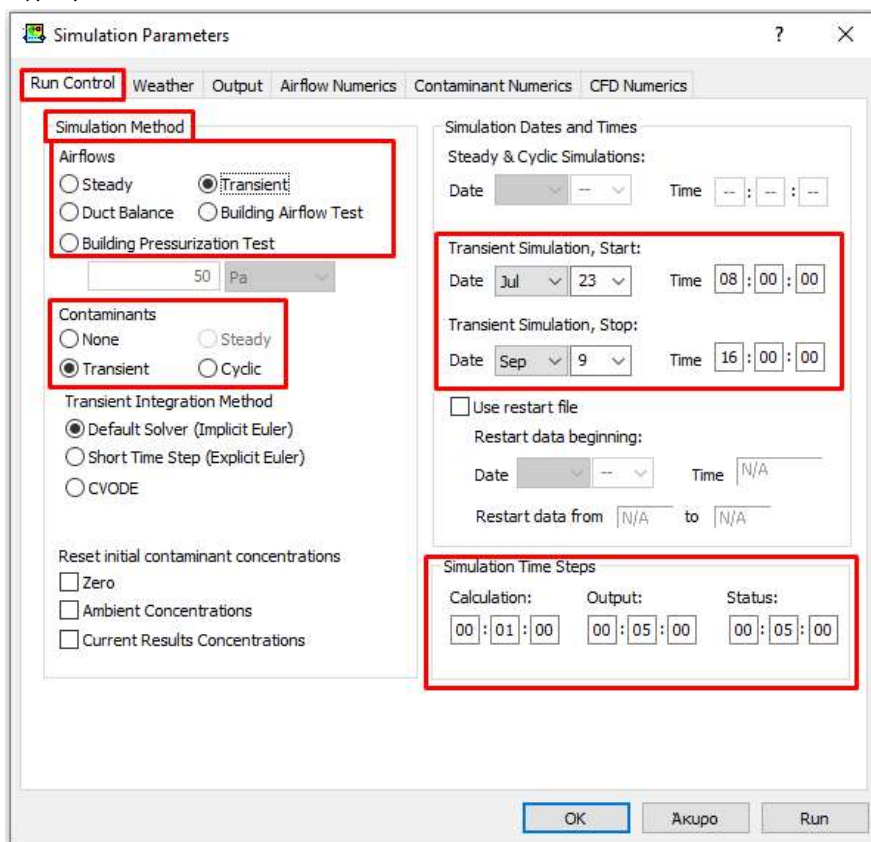
Έτσι ολοκληρώνεται η σχεδίαση της ψευδογεωμετρίας μαζί με τα χαρακτηριστικά της στο CONTAM και μπορεί να ακολουθήσει η προσομοίωση συνθηκών που φαίνεται παρακάτω

Εισαγωγή παραμέτρων time steps, χρόνου και μεθόδου προσομοίωσης

Για να εξαχθούν αποτελέσματα για τον αερισμό και τη συγκέντρωση του CO₂ μέσω της προσομοίωσης στο CONTAM πρέπει πρώτα να ρυθμιστούν: η μέθοδος προσομοίωσης ροής αέρα (Airflow Simulation Method) και προσομοίωσης ρύπων (Contaminants Simulation), ο χρόνος που θα έχει διάρκεια η προσομοίωση και τα χρονικά βήματα (Time Steps) που θα εκτελείται. Η ρύθμιση αυτών των παραμέτρων γίνεται από τη γραμμή εργαλείων επιλέγοντας Simulation και στη συνέχεια Set Simulation Parameters. Στο νέο παράθυρο στην καρτέλα Run Control ρυθμίζουμε αυτές τις παραμέτρους. Η διαδικασία φαίνεται στις εικόνες 52 και 53.



Εικόνα 52: Άνοιγμα μενού Simulation Parameters

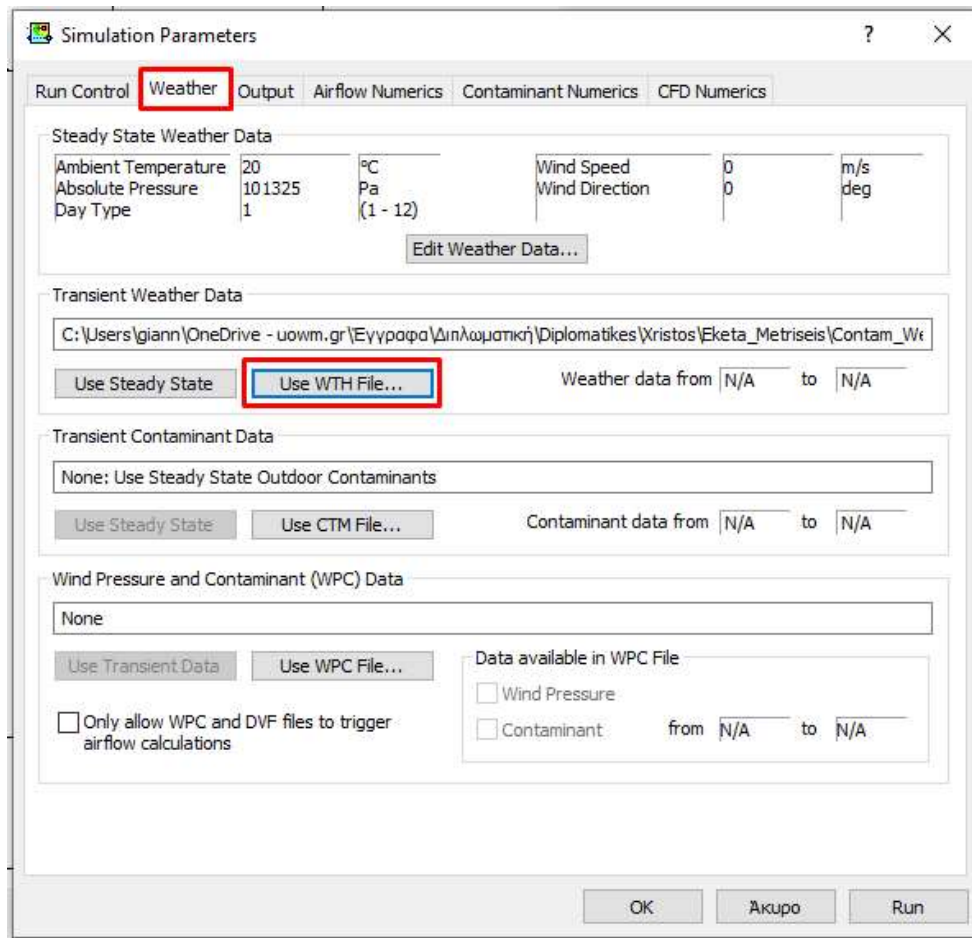


Εικόνα 53: Παράθυρο ρύθμισης παραμέτρων time steps, χρόνου και μεθόδου προσομοίωσης

Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης προσομοίωσης από το Simulation Method Airflows και Contaminants επιλέχθηκε η Transient (Μεταβατική Προσομοίωση), γιατί απαιτούνται αποτελέσματα για χρονικό διάστημα και όχι στιγμή. Ορίστηκε λοιπόν χρονικό διάστημα για ένα έτος (1 Ιανουαρίου 00:00:00 – 31 Δεκεμβρίου 24:00:00), και βήμα (Time Step) 00:01:00.

Εισαγωγή αρχείου μετεωρολογικών συνθηκών

Η εισαγωγή αρχείου μετεωρολογικών συνθηκών γίνεται από το ίδιο παράθυρο και την καρτέλα Weather. Έπειτα επιλέγοντας Use WTH File και με πλοήγηση στα αρχεία ορίζεται το κατάλληλο. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στην εικόνα 54.



Εικόνα 54: Καρτέλα επιλογής αρχείου μετεωρολογικών συνθηκών

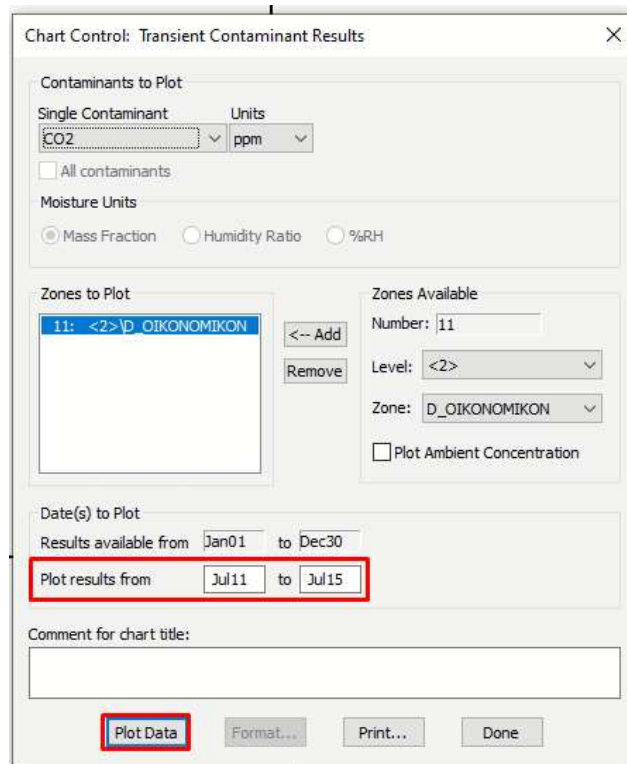
Ακολουθεί στην εικόνα ένα δείγμα αρχείου μετεωρολογικών δεδομένων σε μορφή txt.

!Date [K]	Time Rn[-]	Ta[K]	Pb[Pa]	Ws[m / s]	Wd[deg]	Hr[g / kg]	Ith[kJ / m ^ 2]	Idn[kJ / m ^ 2]	Ts
12/25	2	2	0	283.15					
12/26	3	3	0	283.15					
12/27	4	4	0	283.15					
12/28	5	5	0	283.15					
12/29	6	6	0	283.15					
12/30	7	7	0	283.15					
12/31	1	1	0	283.15					
1/1	00:00:00		281.45	94048	0.7	173	5.72744	0	266.182
1/1	01:00:00		281.45	94048	0.7	173	5.72744	0	266.182
1/1	02:00:00		281.35	94048	0.3	162	4.86266	0	265.558
1/1	03:00:00		281.15	94048	0.2	204	4.6909	0	265.253
1/1	04:00:00		281.05	94048	0.5	220	4.62373	0	265.112
1/1	05:00:00		280.95	94048	0.5	218	4.52458	0	264.948
1/1	06:00:00		280.85	94048	1	207	4.62373	0	264.923
1/1	07:00:00		280.75	94048	0.5	186	4.52458	0	264.759
1/1	08:00:00		280.75	94048	1.6	192	4.39535	0	264.666
1/1	09:00:00		280.85	94048	0.9	169	4.49196	21.6	264.83
1/1	10:00:00		281.05	94048	3.9	208	4.55742	64.8	265.065
1/1	11:00:00		282.85	94048	2.2	95	4.26942	838.8	266.551
1/1	12:00:00		284.15	94048	1.8	226	4.33198	1054.8	267.824
1/1	13:00:00		284.95	94048	2.2	190	4.39535	1130.4	268.625
1/1	14:00:00		285.15	94040	2.7	148	4.33235	738	268.766
1/1	15:00:00		285.35	94033	1.6	145	4.4221	720	269.023

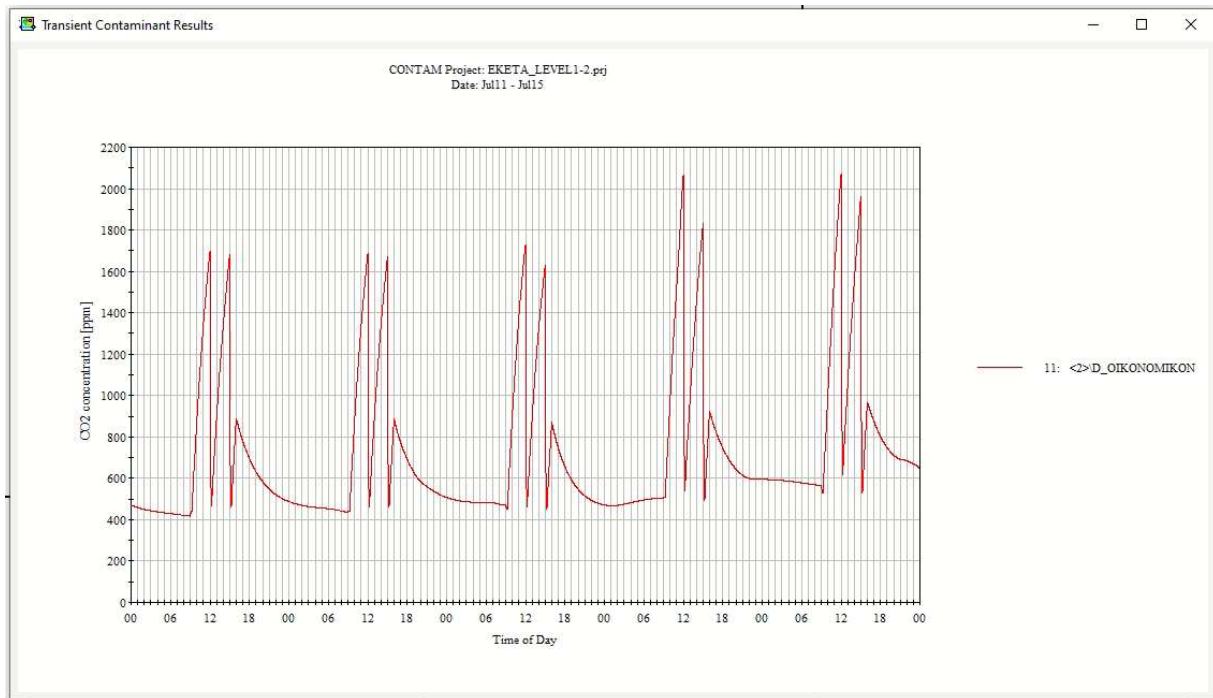
Εικόνα 55: Δείγμα αρχείου μετεωρολογικών δεδομένων για 1 έτος από την πόλη της Κοζάνης

Εξαγωγή αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Εφόσον, εκτελέστηκε η προσομοίωση των κτιρίων για το χρονικό διάστημα που μας ενδιαφέρει, μπορούμε να παρακολουθήσουμε τα διαγράμματα συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα CO₂, κάνοντας δεξί κλικ μέσα στη ζώνη που μας ενδιαφέρει και επιλέγοντας Plot Contaminants, και στη συνέχεια ορίζοντας το χρονικό διάστημα που θέλουμε και επιλέγοντας Plot Data, όπως φαίνεται στην εικόνα 56



Εικόνα 56: Άνοιγμα διαγράμματος συγκέντρωσης CO₂ για συγκεκριμένη χρονική περίοδο



Εικόνα 57: Διάγραμμα συγκέντρωσης CO₂ για συγκεκριμένη χρονική περίοδο στο σενάριο με άνοιγμα παραθύρων

Εξαγωγή αποτελεσμάτων ροής αέρα και ρύπων

Τέλος τα αποτελέσματα εναλλαγών αέρα και συγκέντρωσης CO₂ μπορούν να εξαχθούν από το CONTAM σε μορφή αρχείου txt και στη συνέχεια να μεταφερθούν σε κάποιο άλλο πρόγραμμα, όπως στην περίπτωση αυτή που ήταν το Microsoft Excel. Η διαδικασία εξαγωγής των αποτελεσμάτων γίνεται από τη γραμμή εργαλείων του CONTAM επιλέγοντας Simulation και στη συνέχεια Export Results.... Εκεί ορίζεται το χρονικό διάστημα για το οποίο απαιτείται να εξαχθούν αποτελέσματα και μετά εξάγονται ξεχωριστά τα αποτελέσματα εναλλαγών αέρα και συγκέντρωσης CO₂ με τον ακόλουθο τρόπο:

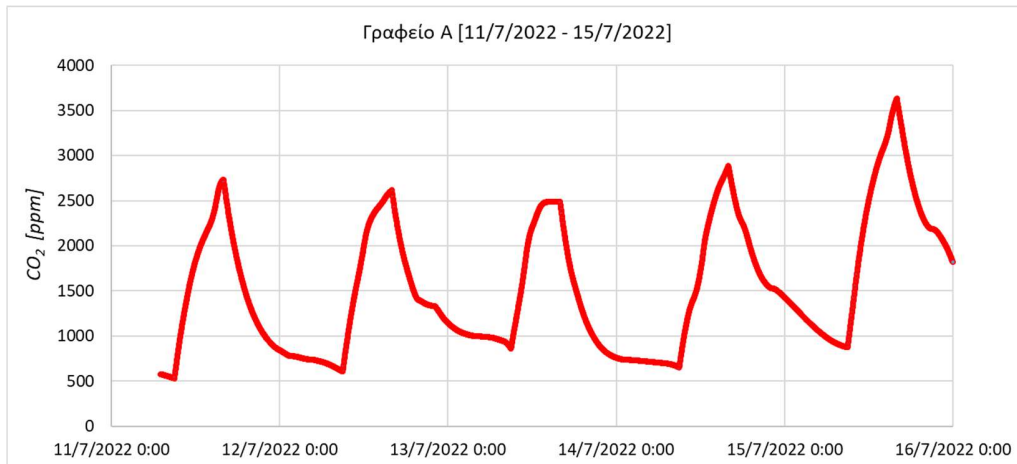
- Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων εναλλαγών αέρα από το πεδίο Airflow Data επιλέγεται Export average transient flows for each zone between export result times
- Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων συγκέντρωσης CO₂ από το πεδίο Contaminant and Concentration Data επιλέγεται Export transient concentration for zone, ενώ πρέπει να γίνει ξεχωριστά για τον κάθε χώρο που μας ενδιαφέρει επιλέγοντάς τον

Τα πεδία που χρησιμοποιούνται φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:

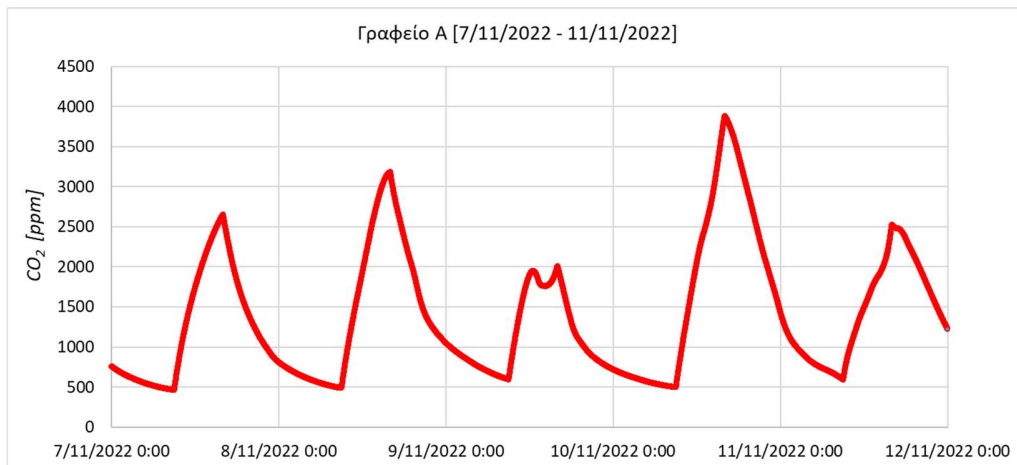
Εικόνα 58: Μέθοδος εξαγωγής αποτελεσμάτων σε αρχείο txt

5.2 Αποτελέσματα συγκέντρωσης CO₂ μέσω προσομοίωσης

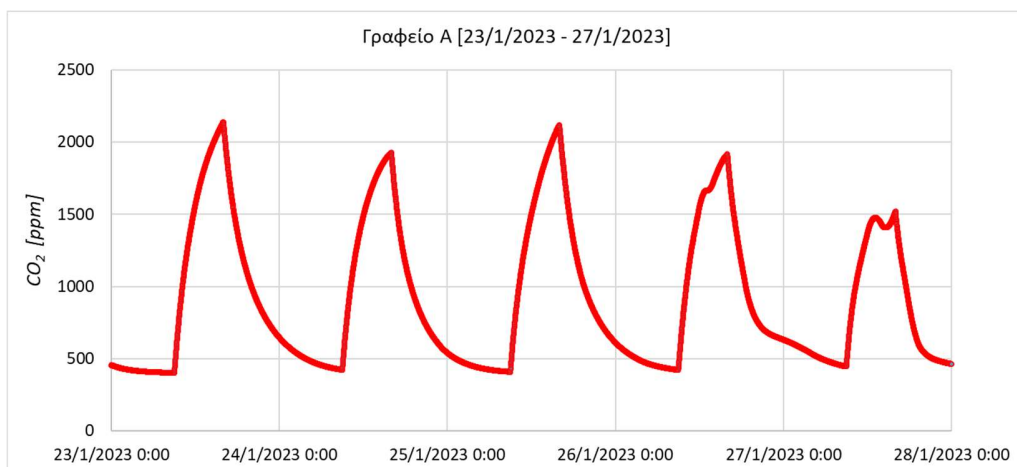
Τα αποτελέσματα για τις συγκεκριμένες προσομοιώσεις από τα 2 σενάρια εξήχθησαν σε Excel για τις τυπικές εβδομάδες που μελετήθηκαν με τις πειραματικές μετρήσεις. Από εκεί δημιουργήθηκαν διαγράμματα για την συγκέντρωση του CO₂ στο χρόνο και ένας πίνακας με τις εναλλαγές αέρα ανά γραφείο. Οι εναλλαγές αέρα υπολογίστηκαν μόνο για τα γραφεία που υπήρχαν έγκυρες πειραματικές μετρήσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα συγκέντρωσης του CO₂ σε σενάριο με κλειστά παράθυρα.



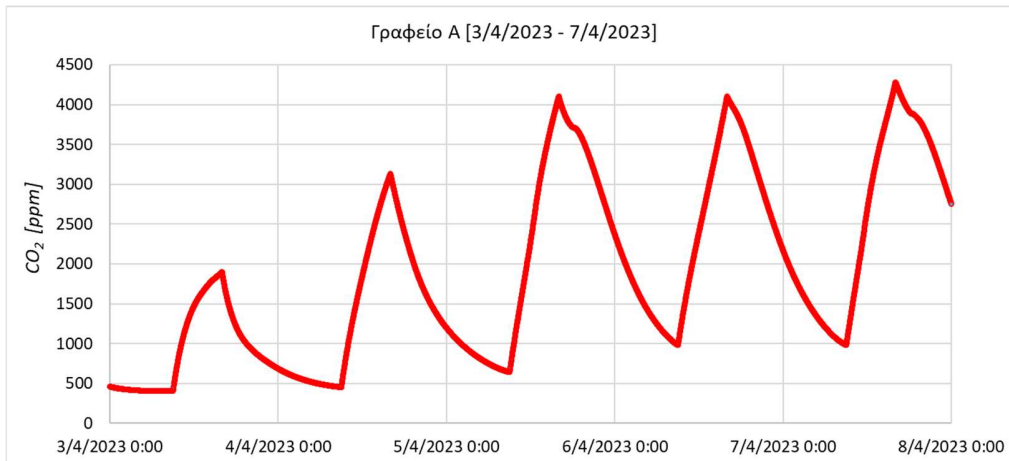
Διάγραμμα 53: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική θερινή εβδομάδα σε σενάριο με κλειστά παράθυρα στο γραφείο A



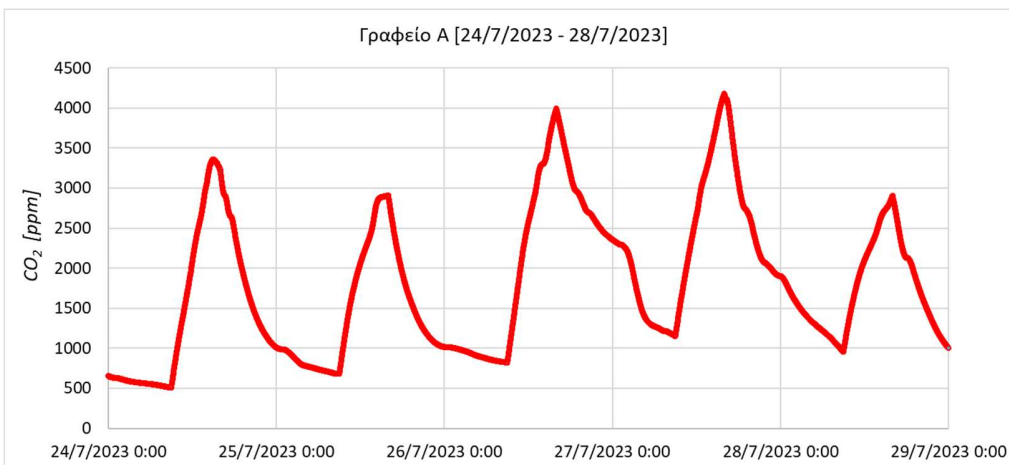
Διάγραμμα 54: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική φθινοπωρινή εβδομάδα σε σενάριο με κλειστά παράθυρα στο γραφείο A



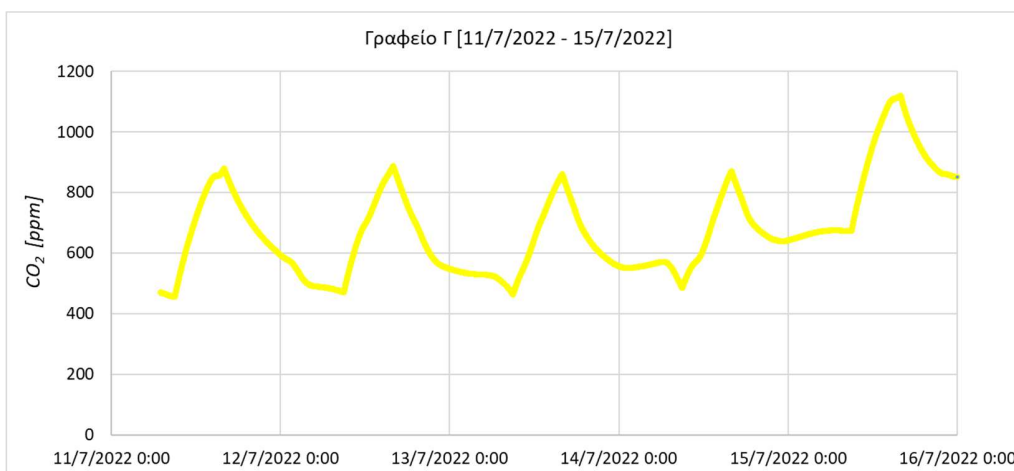
Διάγραμμα 55: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική χειμερινή εβδομάδα σε σενάριο με κλειστά παράθυρα στο γραφείο A



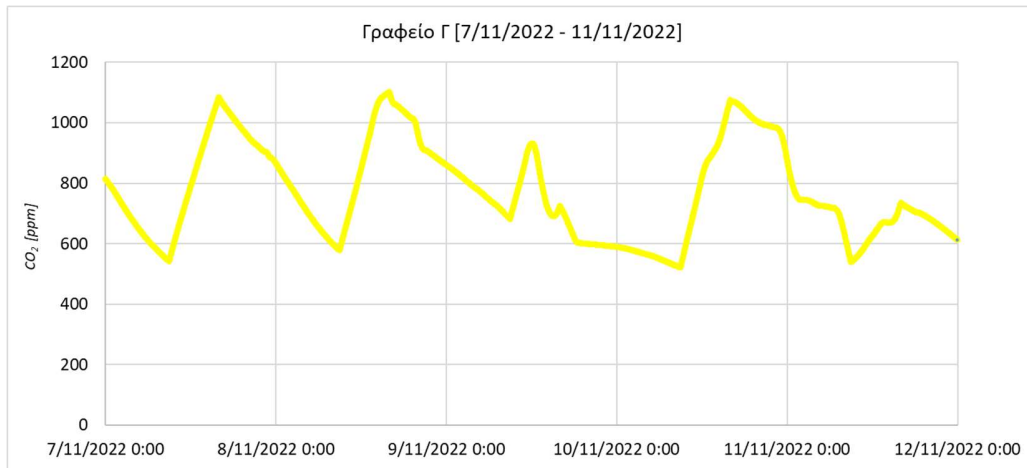
Διάγραμμα 56: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική εαρινή εβδομάδα σε σενάριο με κλειστά παράθυρα στο γραφείο A



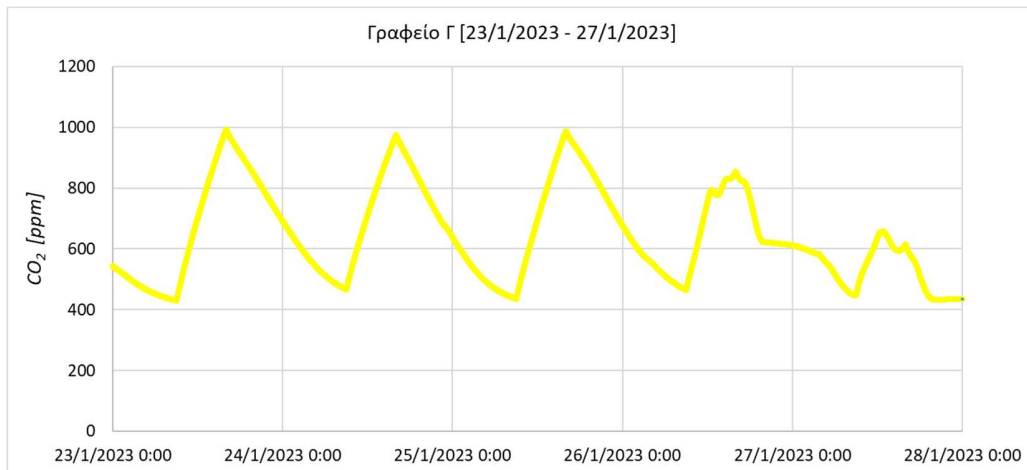
Διάγραμμα 57: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική θερινή εβδομάδα σε σενάριο με κλειστά παράθυρα στο γραφείο A



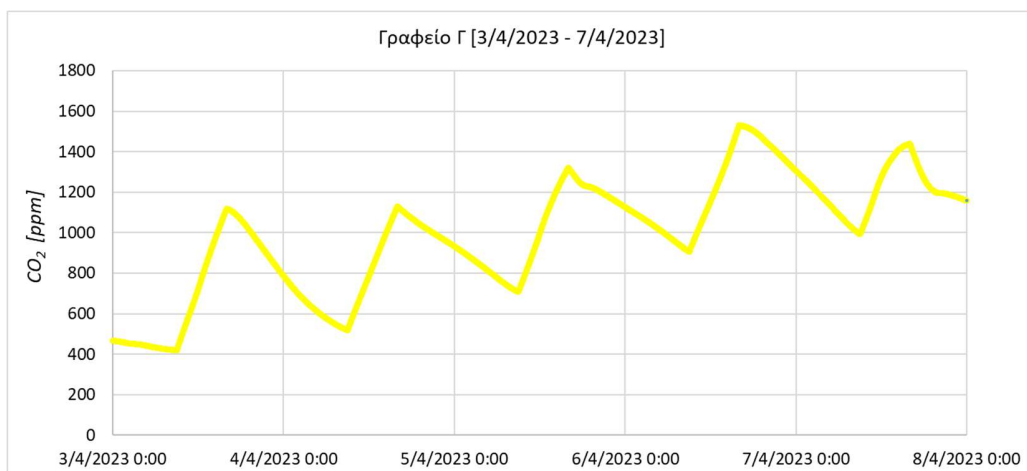
Διάγραμμα 58: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική θερινή εβδομάδα σε σενάριο με κλειστά παράθυρα στο γραφείο Γ



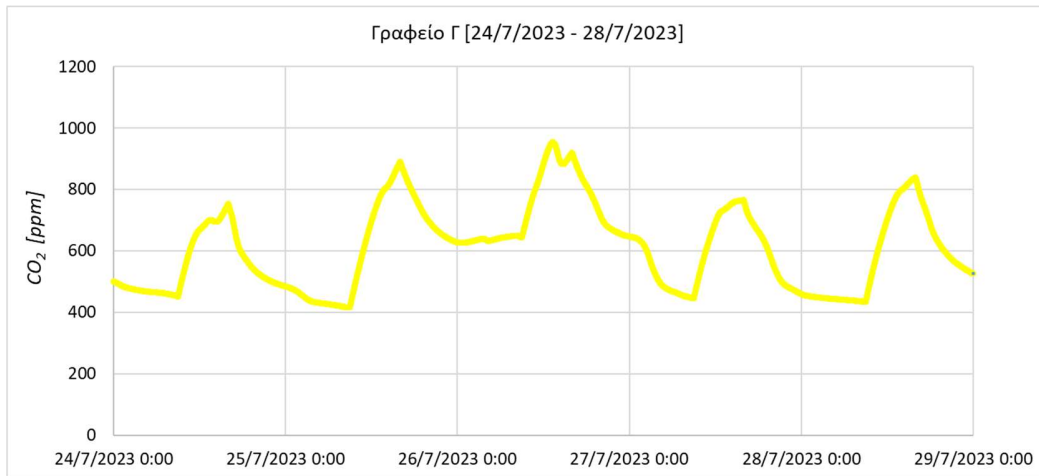
Διάγραμμα 59: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική φθινοπωρινή εβδομάδα σε σενάριο με κλειστά παράθυρα στο γραφείο Γ



Διάγραμμα 60: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική χειμερινή εβδομάδα σε σενάριο με κλειστά παράθυρα στο γραφείο Γ



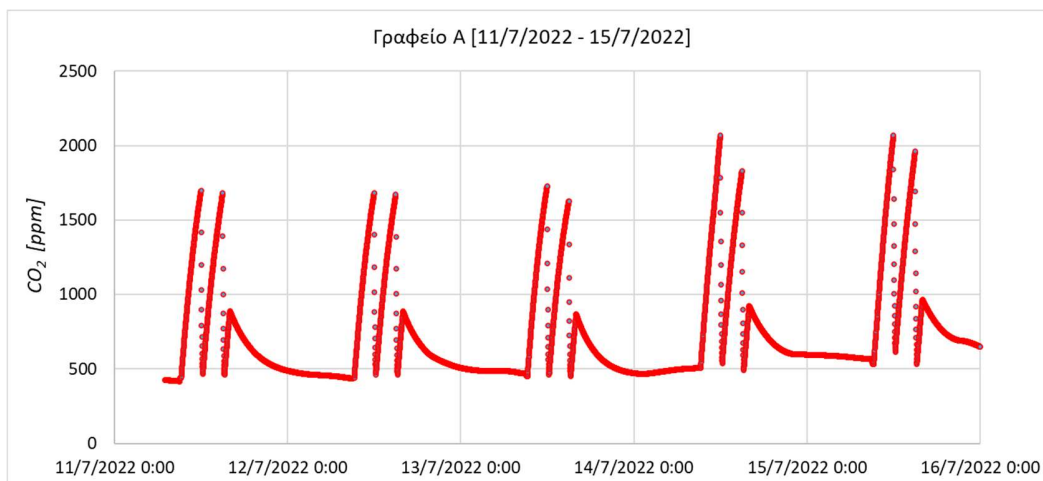
Διάγραμμα 61: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική εαρινή εβδομάδα σε σενάριο με κλειστά παράθυρα στο γραφείο Γ



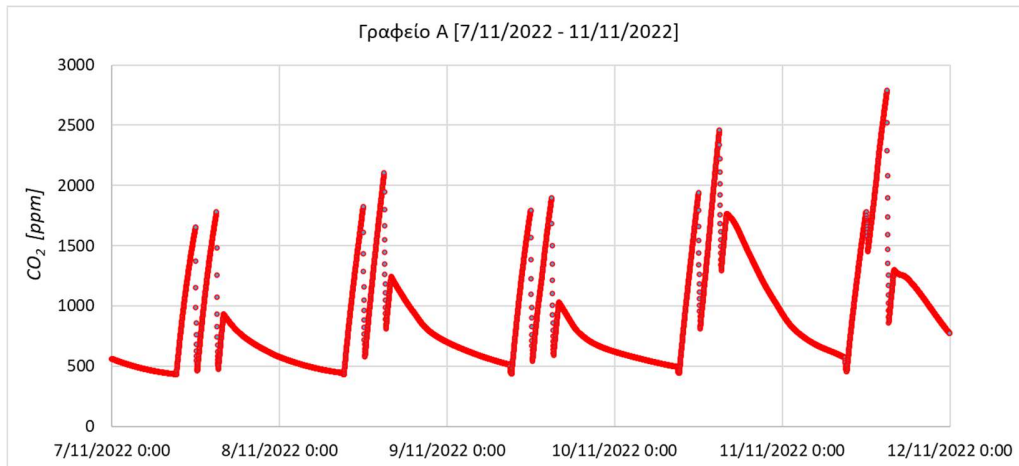
Διάγραμμα 62: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική θερινή εβδομάδα σε σενάριο με κλειστά παράθυρα στο γραφείο Γ

Οι συγκεντρώσεις CO₂ που παρατηρούνται στα γραφεία είναι σε φυσιολογικά επίπεδα, δεδομένου ότι ο αερισμός σε αυτό το μοντέλο γίνεται μόνο μέσω των χαραμάδων από τα κουφώματα και τις πόρτες. Σημειώνεται συνήθως μόνο ένα «peak» σε κάθε μέρα με τυχόν αποκλίσεις από αυτόν τον κανόνα να οφείλονται στα μετεωρολογικά δεδομένα. Οι συγκεντρώσεις CO₂ που παρατηρείται στο γραφείο Γ είναι γενικά χαμηλότερη από αυτή στο γραφείο Α και οφείλεται στο γεγονός ότι η προσομοίωση διεξάγεται με 2 άτομα στο γραφείο Α και 1 στο γραφείο Γ.

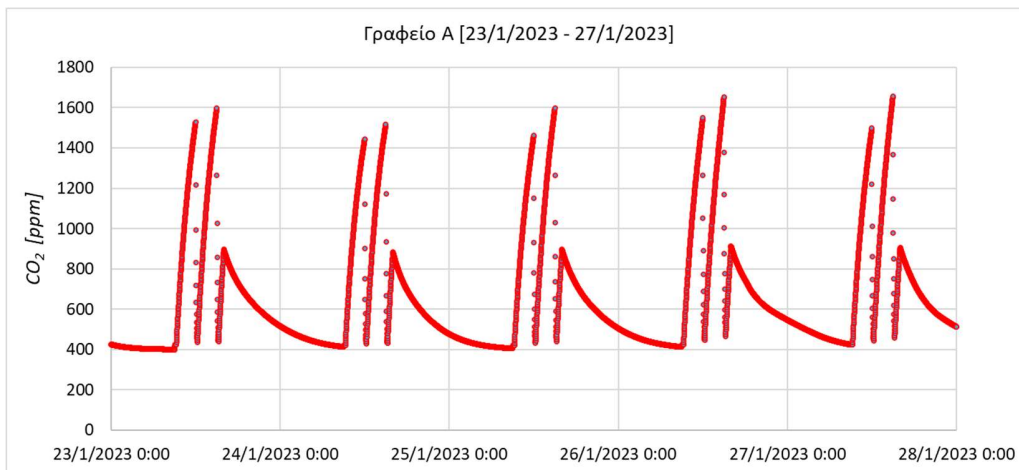
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα συγκέντρωσης του CO₂ σε σενάριο με άνοιγμα των παραθύρων 3 φορές για 15 λεπτά στα γραφεία (όχι εργαστήρια):



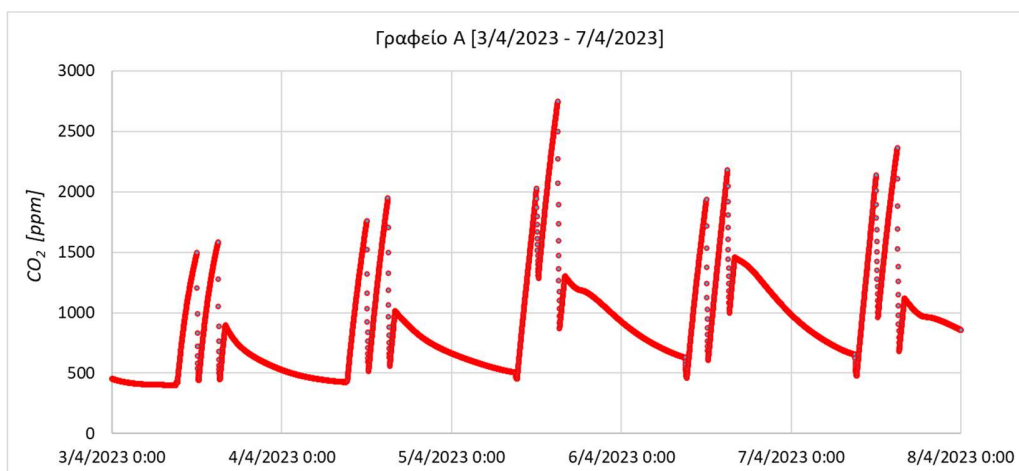
Διάγραμμα 63: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική θερινή εβδομάδα σε σενάριο με άνοιγμα παραθύρων στο γραφείο Α



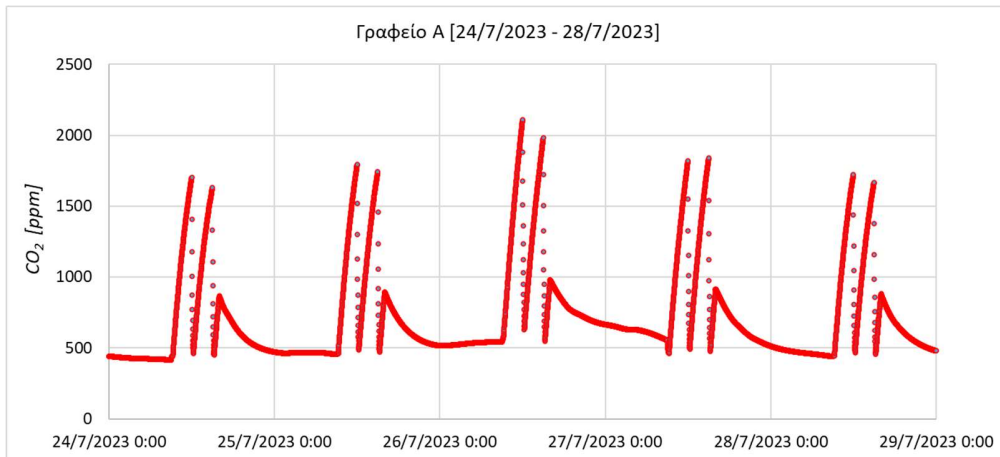
Διάγραμμα 64: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική φθινοπωρινή εβδομάδα σε σενάριο με άνοιγμα παραθύρων στο γραφείο A



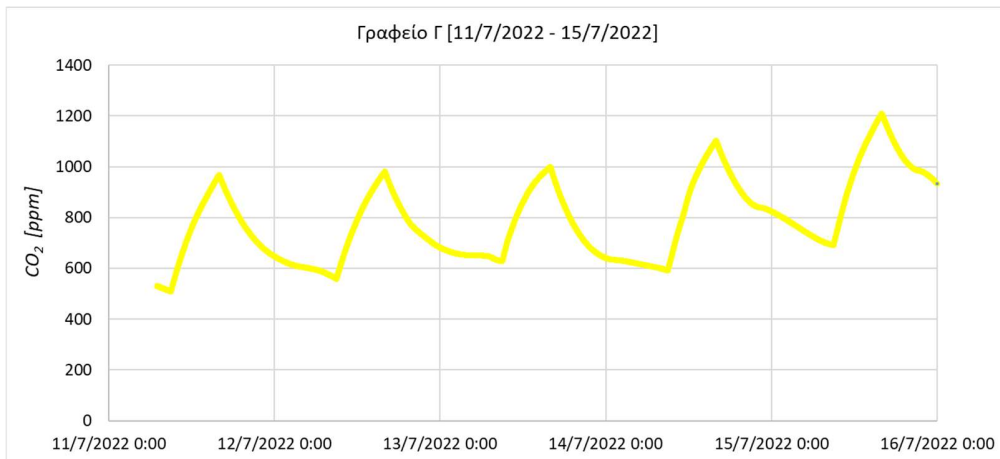
Διάγραμμα 65: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική χειμερινή εβδομάδα σε σενάριο με άνοιγμα παραθύρων στο γραφείο A



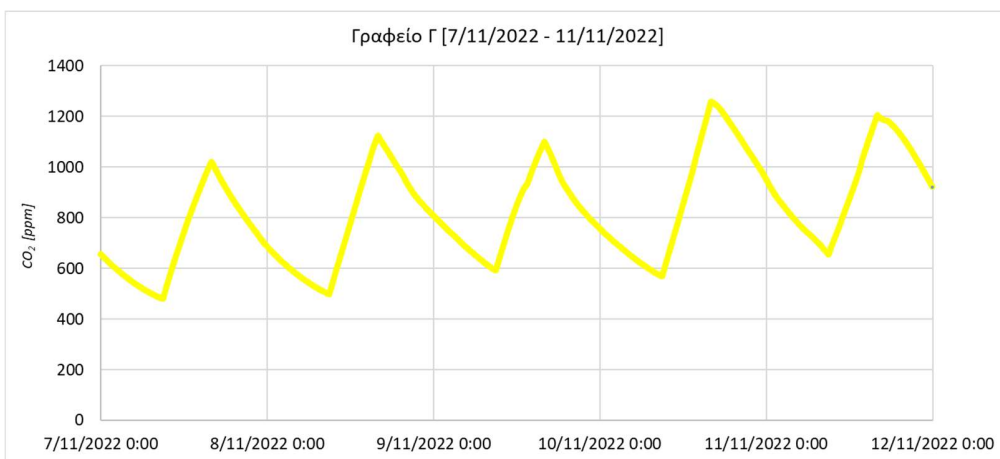
Διάγραμμα 66: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική εαρινή εβδομάδα σε σενάριο με άνοιγμα παραθύρων στο γραφείο A



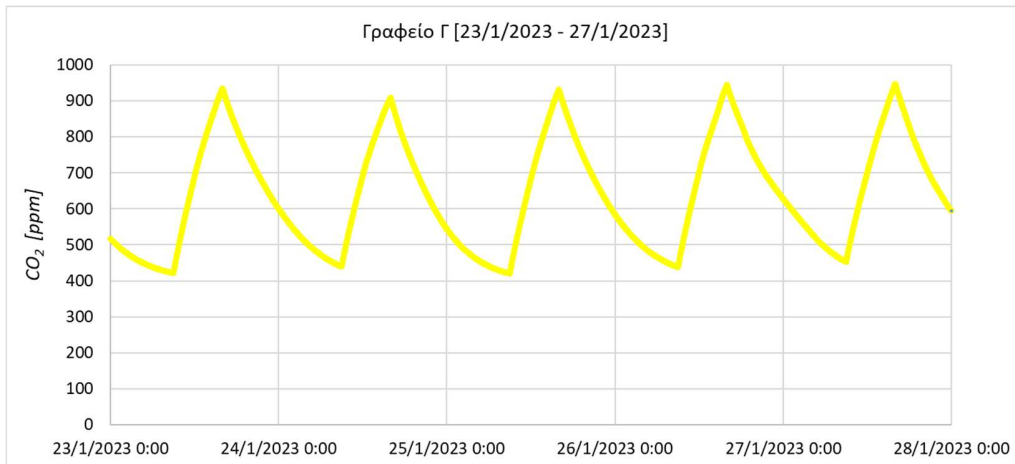
Διάγραμμα 67: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική θερινή εβδομάδα σε σενάριο με άνοιγμα παραθύρων στο γραφείο Α



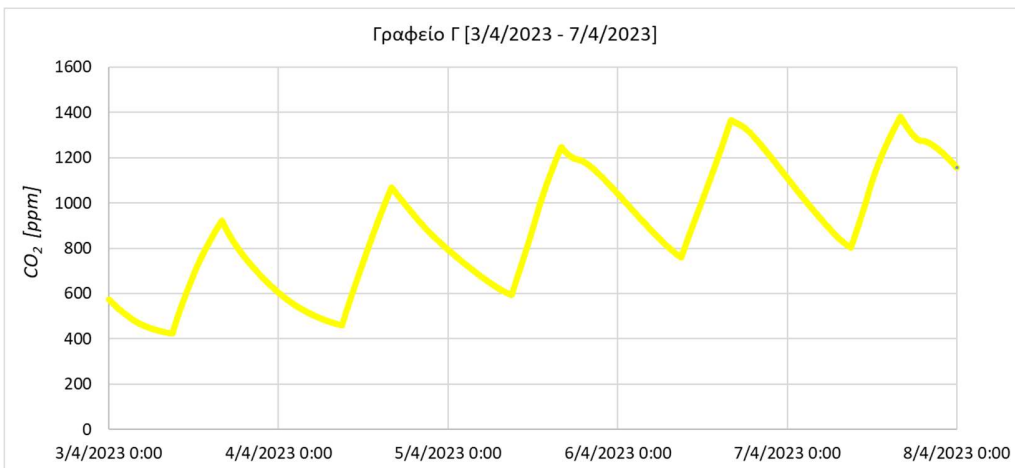
Διάγραμμα 68: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική θερινή εβδομάδα σε σενάριο με άνοιγμα παραθύρων στο γραφείο Γ



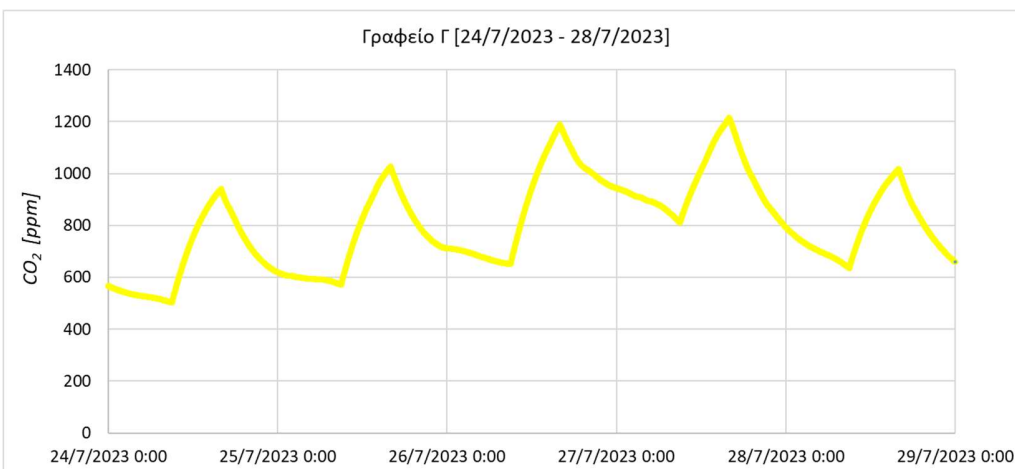
Διάγραμμα 69: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική φθινοπωρινή εβδομάδα σε σενάριο με άνοιγμα παραθύρων στο γραφείο Γ



Διάγραμμα 70: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική χειμερινή εβδομάδα σε σενάριο με άνοιγμα παραθύρων στο γραφείο Γ



Διάγραμμα 71: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική εαρινή εβδομάδα σε σενάριο με άνοιγμα παραθύρων στο γραφείο Γ



Διάγραμμα 72: Προσομοίωση συγκέντρωσης CO₂ για τυπική θερινή εβδομάδα σε σενάριο με άνοιγμα παραθύρων στο γραφείο Α

Στο σενάριο με το άνοιγμα παραθύρων παρατηρείται κορύφωση της συγκέντρωσης του CO₂ σε χαμηλότερα επίπεδα στα γραφεία Α και Γ σε σύγκριση με το σενάριο που τα παράθυρα παραμένουν κλειστά, όπως και ήταν αναμενόμενο. Τη σημαντικότερη διαφορά παρουσιάζει το γραφείο Α όπου ορίστηκε ότι ανοίγει το παράθυρο. Τα διαγράμματα του γραφείου Α παρουσιάζουν 3 «spikes» που αναπαριστούν το άνοιγμα του παραθύρου. Επίσης παρατηρείται η πολύ απότομη πτώση του CO₂ όταν ανοίγει το παράθυρο.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης του CO₂ μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και αυτών που υπολογίστηκαν από το λογισμικό CONTAM παρατηρήθηκε πως γενικότερα τα επίπεδα ήταν χαμηλότερα στην διάρκεια των μετρήσεων κάτι που αποδεικνύει άνοιγμα των παραθύρων σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, ή/και διαφορετικός αριθμός ατόμων μέσα στο χώρο. Επιπλέον αυτή η διαφορά μπορεί να οφειλόταν και σε φαινόμενα «cross ventilation» με ταυτόχρονο άνοιγμα παραθύρου και εσωτερικής πόρτας, ωστόσο αυτό δεν μπορεί να αποδειχθεί με τα συγκεκριμένα σενάρια.

5.3 Αποτελέσματα εναλλαγών αέρα ανά ώρα (ACH) μέσω προσομοίωσης

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τις εναλλαγές αέρα σε τυπικά δωρα εργασίας και δωρα μετά την αποχώρηση των εργαζομένων

Πίνακας 18: Εναλλαγές αέρα με βάση το CONTAM για τα γραφεία Α και Γ στα σενάρια που προαναφέρθηκαν

Χρόνος εφαρμογής	Εναλλαγές αέρα ανά ώρα (ACH) (Κλειστά Παράθυρα)	Εναλλαγές αέρα ανά ώρα (ACH) (Άνοιγμα Παραθύρων)
Γραφείο Α		
13/7/2022 08:00-16:00	0,15	1,64
13/7/2022 16:00-24:00	0,21	0,22
9/11/2022 08:00-16:00	0,35	1,35
9/11/2022 16:00-24:00	0,31	0,23
23/1/2022 08:00-16:00	0,38	2,42
23/1/2022 16:00-24:00	0,27	0,38
3/4/2023 08:00-16:00	0,45	2,39
3/4/2023 16:00-24:00	0,40	0,38
28/7/2023 08:00-16:00	0,19	1,62
28/7/2023 16:00-24:00	0,17	0,21
Μέσος Όρος	0,29	1,08
Γραφείο Γ		
13/7/2022 08:00-16:00	0,25	0,10
13/7/2022 16:00-24:00	0,13	0,11
9/11/2022 08:00-16:00	0,21	0,11

9/11/2022 16:00-24:00	0,06	0,11
23/1/2023 08:00-16:00	0,17	0,18
23/1/2023 16:00-24:00	0,11	0,19
3/4/2023 08:00-16:00	0,06	0,19
3/4/2023 16:00-24:00	0,15	0,19
28/7/2023 08:00-16:00	0,14	0,11
28/7/2023 16:00-24:00	0,15	0,10
Μέσος Όρος	0,14	0,14

Γενικότερα παρατηρούνται τιμές στα φυσιολογικά επίπεδα τόσο για ανοικτά, όσο και για κλειστά παράθυρα. Όπως είναι αναμενόμενο χαμηλότερες τιμές αποδίδονται όταν τα παράθυρα είναι κλειστά και έχουμε την διείσδυση αέρα (Infiltration rate) από τα ανοίγματα του κτιρίου. Το γραφείο Γ παρουσιάζει χαμηλότερα ποσοστά, λόγω του μικρότερου ποσοστού ανοιγμάτων σε σχέση με τον όγκο του. Η κορύφωση των εναλλαγών αέρα παρατηρείται στα δωρα εργασίας, όπου και ορίστηκε να ανοίγουν τα παράθυρα. Ο μέσος όρος των εναλλαγών αέρα ανά ώρα με ανοιχτά παράθυρα στο δωρο εργασίας για το γραφείο Α βάσει CONTAM είναι 1,88, σαφώς σημαντικά υψηλότερος από το σενάριο με τα κλειστά παράθυρα.

6. Συμπεράσματα

Γενικότερα, ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η επεξεργασία μίας μεθοδολογίας που θα συνδυάζει τεχνικές πειραματικής και θεωρητικής διερεύνησης με σκοπό την αποτίμηση της ποιότητας και της άνεσης του εσωτερικού περιβάλλοντος διάφορων κτιρίων. Ουσιαστικά, η προτεινόμενη μεθοδολογία θα προκύψει από την αξιολόγηση πειραματικών και υπολογιστικών εργαλείων και την ενσωμάτωση των προκρινόμενων λύσεων σε μια ενιαία προσέγγιση, ώστε να ξεπεραστούν οι όποιες αβεβαιότητες που προκύπτουν από κάθε μέθοδο ξεχωριστά. Στην συγκεκριμένη έρευνα δόθηκε κυρίως βάση στη θερμική άνεση και στον αερισμό, ενώ μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να ασχοληθεί με τον υπολογισμό των ενεργειακών καταναλώσεων.

Οι πειραματικές μετρήσεις τόσο μεγάλου βεληνεκούς είναι κοστοβόρες και απαιτούν πολύ χρόνο, τόσο για τη διεξαγωγή τους, όσο και για την ανάλυση των αποτελεσμάτων τους. Δεν συνιστάται να γίνονται αν δεν απαιτείται αναλυτική εικόνα για τη λειτουργία του κτιρίου και η ακρίβεια τους μειώνεται για κάθε παράγοντα που δεν συνυπολογίζεται κατά τη διάρκειά τους.

Από την παρούσα πειραματική έρευνα έγινε αποτίμηση της θερμικής άνεσης και της ποιότητας του εσωτερικού αέρα με την χρήση κατάλληλων μοντέλων αξιοποιώντας πειραματικά δεδομένα μεγάλης χρονικής διάρκειας. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

- Δόθηκε μία πλήρης και σαφής εικόνα για τον τρόπο λειτουργίας του κτιρίου
- Τα γραφεία που μελετήθηκαν στο κτίριο εκτιμήθηκαν θερμικά άνετα σε μεγάλο ποσοστό με βάση τις μετρήσεις και τα σενάρια που εξετάστηκαν
- Παράγοντες όπως η συχνότητα του ανοίγματος των παραθύρων ή ο αριθμός ατόμων στο χώρο επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα
- Στο κτίριο δεν υπήρχαν ομοιόμορφες συνθήκες σε όλους τους χώρους. Διαφορετικές συνθήκες επικρατούσαν στα εργαστήρια και διαφορετικές στα γραφεία
- Τα επίπεδα CO₂ κυμαίνονταν τις περισσότερες φορές σε φυσιολογικά επίπεδα για τα γραφεία που διερευνήθηκαν

Σε μεθοδολογικό επίπεδο, η διενέργεια μετρήσεων σε τόσο μεγάλη έκταση όσον αφορά το χρόνο αλλά και τους χώρους που επιλέχθηκαν, έδωσε χρήσιμα συμπεράσματα, ανέδειξε όμως και περιορισμούς ή αβεβαιότητες στην εκτίμηση των μεγεθών. Ειδικότερα, ο ρυθμός αερισμού αποτέλεσε μεγάλη πρόκληση για το συγκεκριμένο κτίριο, καθώς υπήρχαν ελάχιστα δεδομένα σχετικά με την πραγματική συμπεριφορά και τις συνθήκες των εργαζόμενων σε αυτό. Η «απόδοση» του φυσικού αερισμού είναι δύσκολο να εκτιμηθεί, καθώς εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το άνοιγμα των παραθύρων, ο αριθμός των ατόμων στο χώρο και οι εξωτερικές συνθήκες. Η εύκολη πρόσβαση στο κτίριο αποτελεί ένα βασικό πλύνα για την παραγωγή έγκυρων αποτελεσμάτων. Το συγκεκριμένο κτίριο δεν ήταν εύκολα προσβάσιμο, οπότε ήταν αναμενόμενο να προκύψουν προβλήματα. Επιπλέον τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την μελέτη ήταν περιορισμένα και κάποια από αυτά και παλαιού τύπου με αποτέλεσμα να σημειώνουν διακυμάνσεις σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες και να προκαλούν σύγχυση σχετικά με την εγκυρότητα των μετρήσεων.

7. Μελλοντική έρευνα

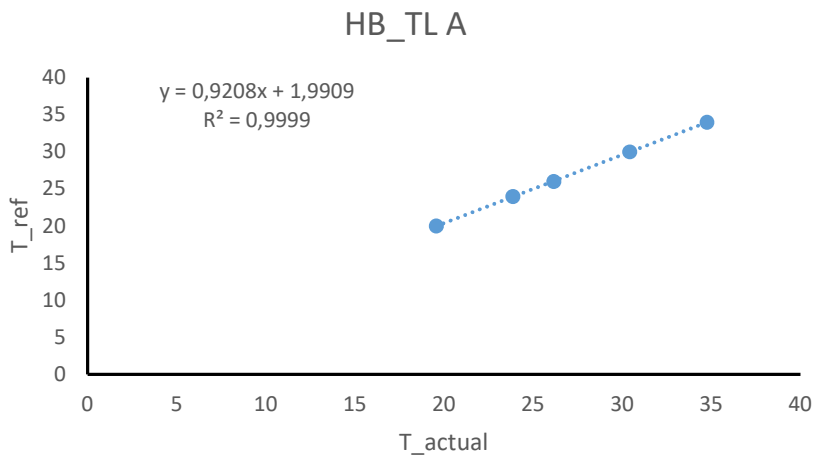
Όπως αναφέρθηκε, η διπλωματική είχε διπλό στόχο, ήτοι την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών συνθηκών ενός συγκεκριμένου κτιρίου βάσει εκτεταμένων μετρήσεων, αλλά και την εμβάθυνση στην κατεύθυνση διατύπωσης μιας μεθοδολογίας που θα συνδυάζει πειραματικά και υπολογιστικά εργαλεία. Στο πλαίσιο της εργασίας εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα στο μεθοδολογικό επίπεδο, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω, τονίζοντας τη σημασία των εκτεταμένων πειραματικών μετρήσεων, με την παράλληλη δυνατότητα μείωσης τους μέσω αξιοποίησης κατάλληλων υπολογιστικών εργαλείων. Σε κάθε περίπτωση, για να διατυπωθεί και επικυρωθεί μια ολοκληρωμένη μεθοδολογική προσέγγιση, θα πρέπει να γίνουν περαιτέρω διερευνήσεις σε κτίρια διαφορετικών χαρακτηριστικών/χρήσεων/κλιματικής ζώνης, αλλά και να εξεταστούν και εναλλακτικά υπολογιστικά εργαλεία. Ειδικότερα, διατυπώνονται οι ακόλουθες προτάσεις:

- Μελέτη της επίπτωσης μετεωρολογικών συνθηκών στις εσωτερικές συνθήκες ενός χώρου
- Δημιουργία εξατομικευμένων μοντέλων μέσω της καταγραφής προσωπικών παραμέτρων
- Αξιοποίηση έξυπνων συσκευών για την καταγραφή και εξακρίβωση των ατόμων που βρίσκονται στο χώρο και του αερισμού (φυσικού ή μηχανικού)
- Μελέτη σε κτίριο που χρησιμοποιεί έξυπνα συστήματα διαχείρισης HVAC με σκοπό τη σύγκριση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος
- Μελέτη σε περιοχή που βρίσκεται σε διαφορετική κλιματική ζώνη της TOTEE και μακριά από μεγάλες πηγές παραγωγής CO₂
- Μελέτη ενεργειών καταναλώσεων του κτιρίου και εκτίμηση των επιπτώσεων μη ορθής λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης-ψύξης-κλιματισμού
- Υπολογιστική μελέτη αερισμού σε άλλα σενάρια (cross ventilation, ταυτόχρονη χρήση κλιματισμού και άνοιγμα παραθύρων κ.λπ.)

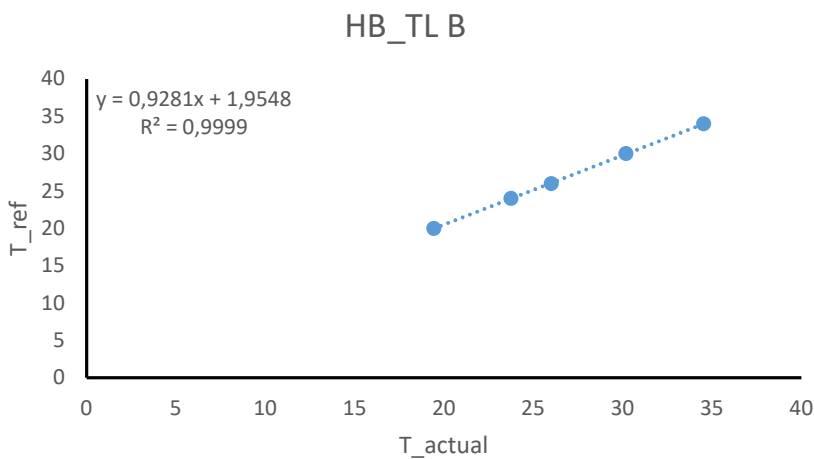
Παράρτημα Ι

Διαγράμματα βαθμονόμησης θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας μετρητικών οργάνων

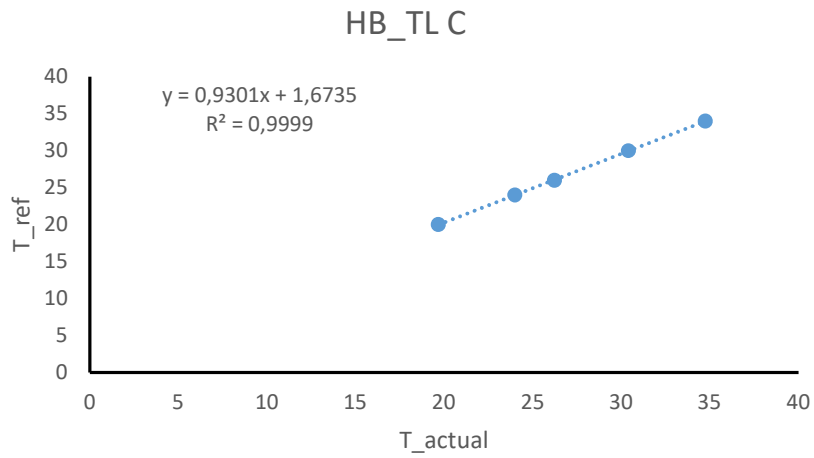
Διαγράμματα βαθμονόμησης θερμοκρασίας:



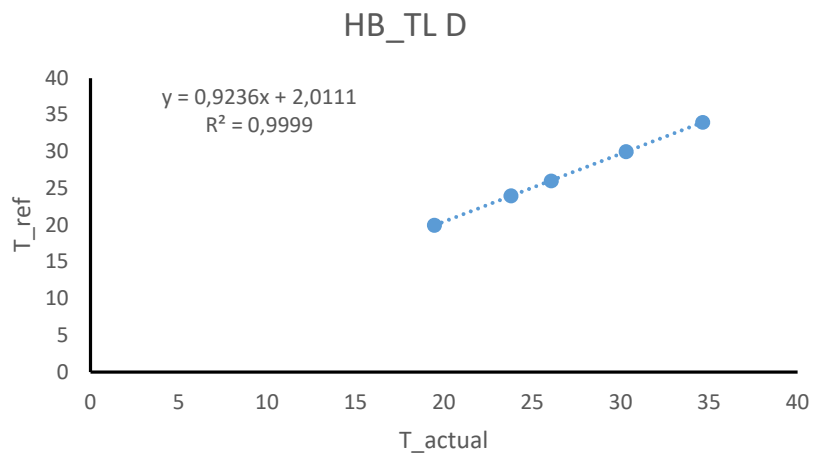
Διάγραμμα Ι.1: Καμπύλη διακρίβωσης θερμοκρασίας HB_TL A.



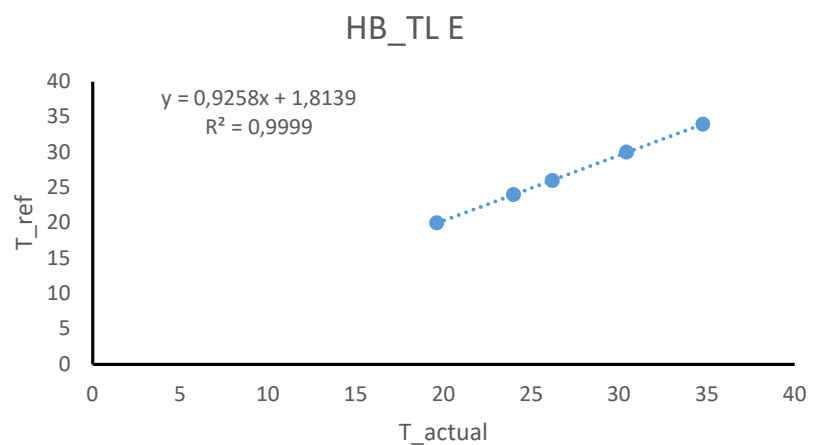
Διάγραμμα Ι.2: Καμπύλη διακρίβωσης θερμοκρασίας HB_TL B.



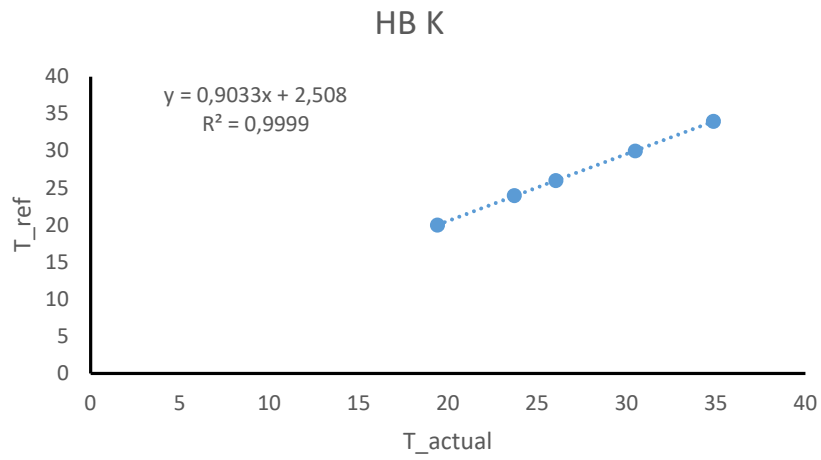
Διάγραμμα I.3: Καμπύλη διακρίβωσης θερμοκρασίας HB_TL C.



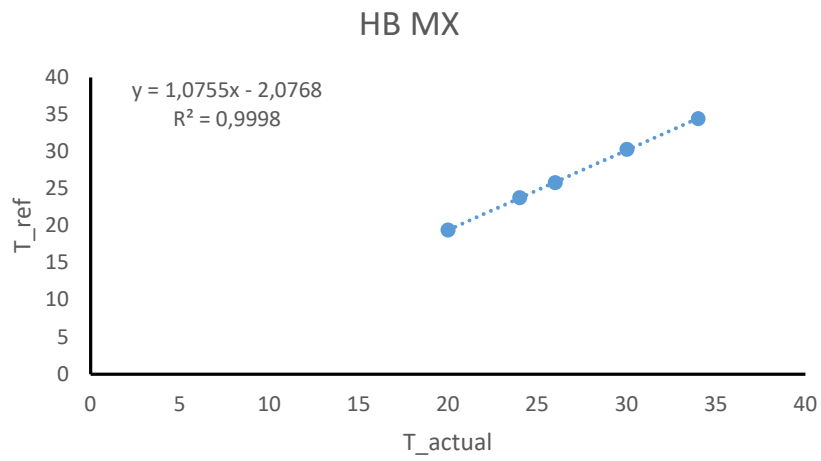
Διάγραμμα I.4: Καμπύλη διακρίβωσης θερμοκρασίας HB_TL D.



Διάγραμμα I.5: Καμπύλη διακρίβωσης θερμοκρασίας HB_TL E.

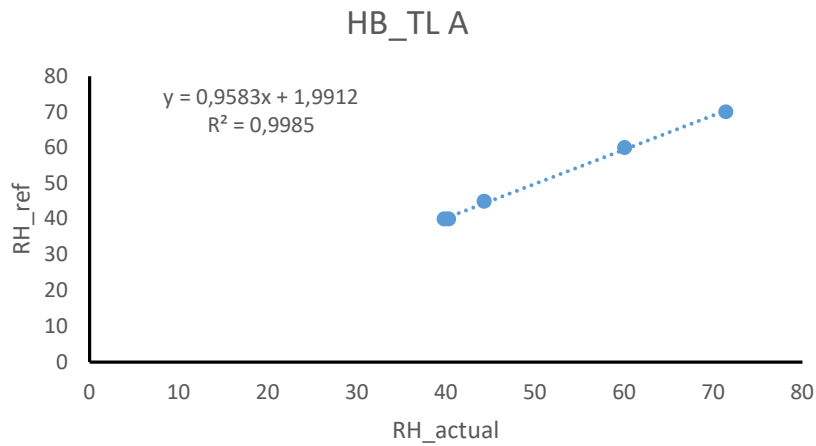


Διάγραμμα I.6: Καμπύλη διακρίβωσης θερμοκρασίας HB K.

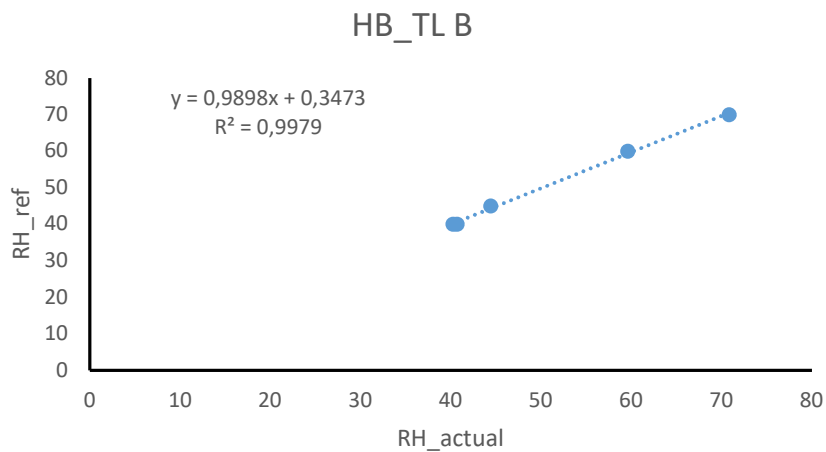


Διάγραμμα I.7: Καμπύλη διακρίβωσης θερμοκρασίας HB MX.

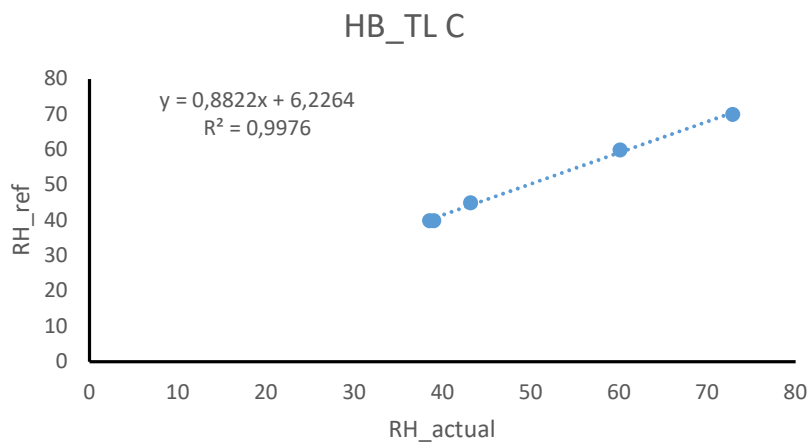
Διαγράμματα βαθμονόμησης σχετικής υγρασίας:



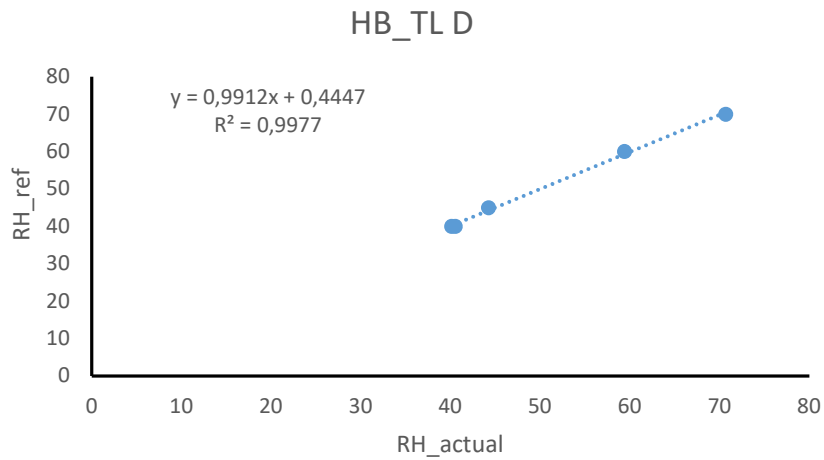
Διάγραμμα I.8: Καμπύλη διακρίβωσης σχετικής υγρασίας HB_TL A.



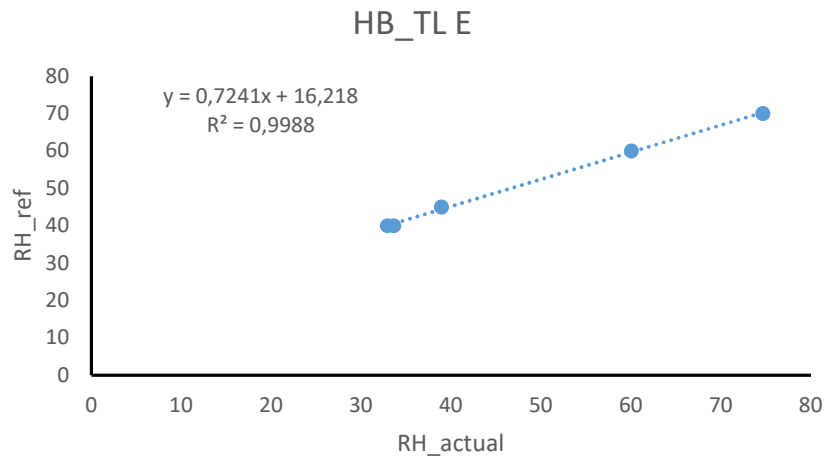
Διάγραμμα I.9: Καμπύλη διακρίβωσης σχετικής υγρασίας HB_TL B.



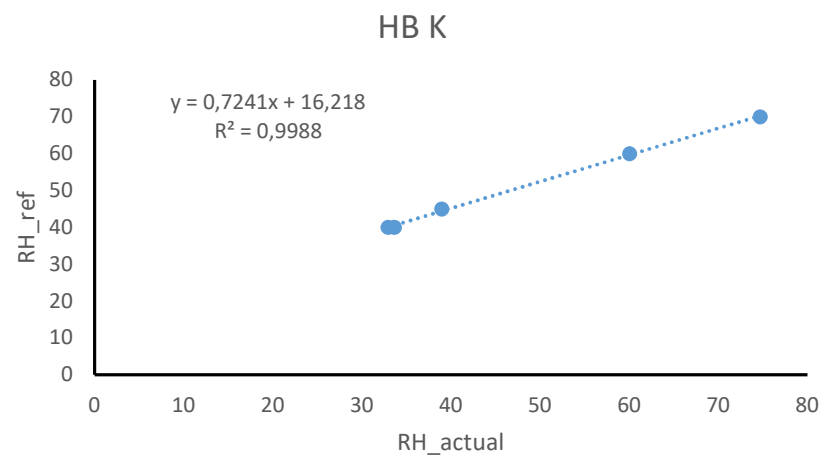
Διάγραμμα I.10: Καμπύλη διακρίβωσης σχετικής υγρασίας HB_TL C.



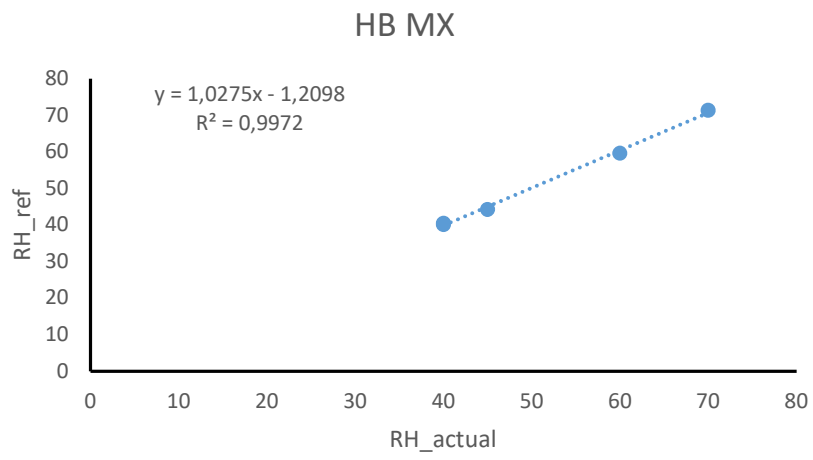
Διάγραμμα I.11: Καμπύλη διακρίβωσης σχετικής υγρασίας HB_TL D.



Διάγραμμα I.12: Καμπύλη διακρίβωσης σχετικής υγρασίας HB_TL E.



Διάγραμμα I.13: Καμπύλη διακρίβωσης σχετικής υγρασίας HB K.



Διάγραμμα I.14: Καμπύλη διακρίβωσης σχετικής υγρασίας HB MX.

Παράρτημα II

Script Matlab για τον υπολογισμό των δεικτών PMV-PPD

```
clc;clear all;

%Met:      μεταβολικός ρυθμός
%W:        μηχανικό έργο
%pa:       σχετική πίεση ατμών
%FCL:      παράγοντας ένδυσης
%TCL:      θερμοκρασία επιφάνειας ρούχων
%Tr:       μέση θερμοκρασία ηλιακής ακτινοβολίας
%v:        ταχύτητα αέρα
%clo:      συντελεστής ένδυσης
%PMV:      δείκτης θερμικής άνεσης
%PPD:      ποσοστό δυσαρέσκειας
PIN1 = readtable('press.xlsx');
PIN = readmatrix('press.xlsx');
% ανάγνωση πίνακα excel
Met1 = PIN(2:49,8); Ta1=PIN(2:49,3); Tr1=PIN(2:49,4); v1=PIN(2:49,7);
pa1=PIN(2:49,6); W=0; Clo1=PIN(2:49,9);
% μετρητής επαναλήψεων για κάθε γραμμή του πίνακα
iter = 1;
% έναρξη επαναλήψεων για κάθε γραμμή του πίνακα
while iter < length(PIN)
Met=Met1(iter,8); Ta=Ta1(iter,3); Tr=Tr1(iter,4); v=v1(iter,7); pa=pa1(iter,6); W=0;
Clo=Clo1(iter,9);
% 1Met=58.15W/m2
RMW=Met-W;
Tolerance=0.00015;          % ακρίβεια
% Υπολογισμός δείκτη ένδυσης
FCL=1.05+0.1*Clo;          % Συντελεστής περιοχής ένδυσης
if(Clo<0.5)
    FCL=1.0+0.2*Clo;
end
% Υπολογισμός θερμοκρασίας στην επιφάνεια των ρούχων
%% εικασία για τη θερμοκρασία της επιφάνειας των ρούχων
TAA=Ta+273;
TRA=Tr+273;
TCLA=TAA+(35.3-Ta)/(3.5*(Clo+0.1));
XN=TCLA/100;                % TCLA=Tcl+273
XF=XN;
%% Υπολογισμός της θερμοκρασίας επιφάνειας των ρούχων με διαδοχικές επαναλήψεις
αντικατάστασης
FCIC=Clo*0.155*FCL;
P1=FCIC*TAA;
P2=FCIC*3.96;
P3=FCIC*100;
P4=308.7-0.028*RMW+P2*(TRA/100)^4;

nIterations=0;
XF=XN;

while((nIterations<150))
```

```

XF=(XF+XN)/2;

%% Υπολογισμός μεταφοράς θερμότητας
HCF=12.1*(v)^0.5;
HCN=2.38*abs(100*XF-TAA)^0.25;
if(HCF>HCN)
    HC=HCF;    % Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας Συναγωγής
else
    HC=HCN;
end

XN=(P4+P1*HC-P2*XF^4)/(100+P3*HC);
nIterations=nIterations+1;
if((nIterations>1) & (abs(XN-XF)<Tolerance))
    break;
end
end
if(nIterations<150)
    TCL=100*XN-273;    % Επιφανειακή θερμοκρασία ρούχων
    % Υπολογισμός δείκτη θερμικής άνεσης (PMV)
    PM1=3.96*FCL*(XN^4-(TRA/100)^4);
    PM2=FCL*HC*(TCL-Ta);
    PM3=0.303*exp(-0.036*Met)+0.028;
    PM4=0.0;

    if(RMW>58.15)
        PM4=0.42*(RMW-58.15);
    end

    BMV=RMW-3.05*0.001*(5733-6.99*RMW-pa);
    CMV=-PM4-1.7*0.00001*Met*(5867-pa)-0.0014*Met*(34-Ta)-PM1-PM2;
    PMV1(iter)=PM3*(BMV+CMV);

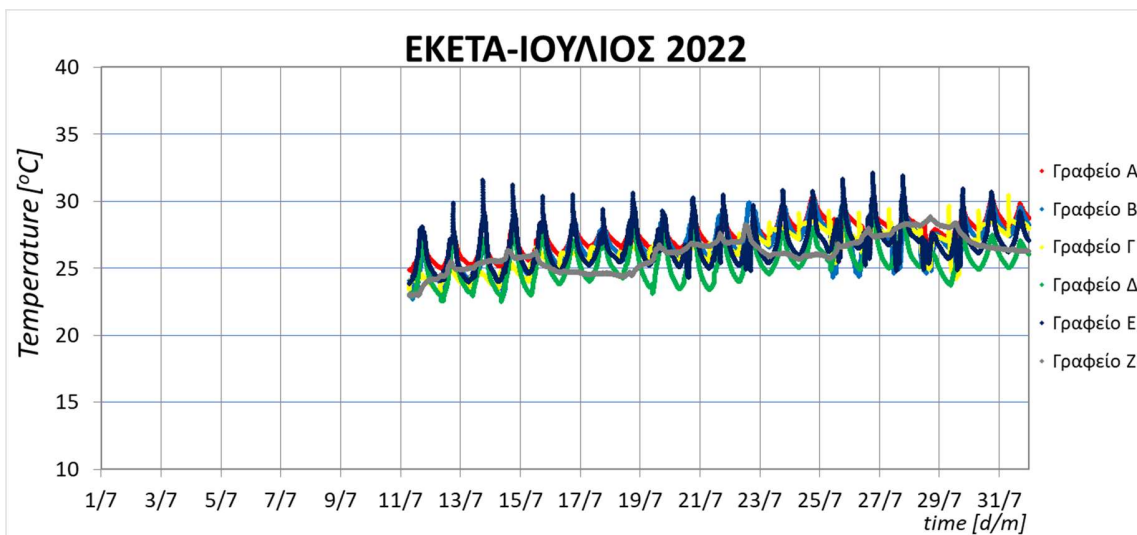
    % Υπολογισμός δείκτη δυσάρεσκειας
    PPD(iter)=100-95*exp(-0.03353*PMV1(iter)^4-0.2179*PMV1(iter)^2);
else
    % Σε περίπτωση ανεπαρκών στοιχείων στην γραμμή υπολογισμό του excel
    PMV1(iter)=999;
    PPD(iter)=100;
end
iter = iter + 1;
end
% μετατροπή γραμμής σε στήλη
PMV1 = PMV1';
PPD = PPD';
% εκτύπωση αποτελεσμάτων
disp(PMV1);
disp(PPD);

```

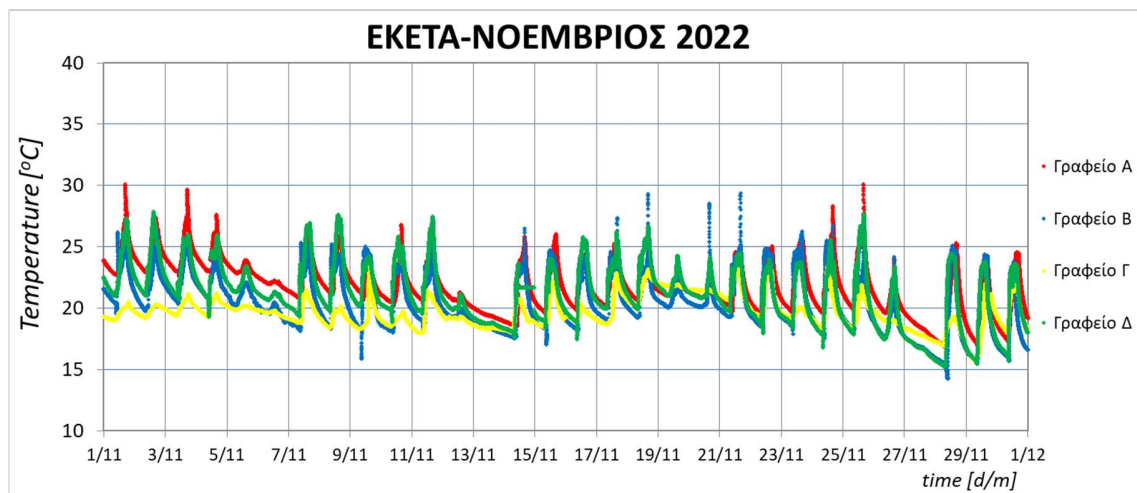
Παράρτημα III

Μηνιαία διαγράμματα μετρήσεων για τις αντίστοιχες τυπικές εβδομαδιαίες περιόδους που εξετάστηκαν

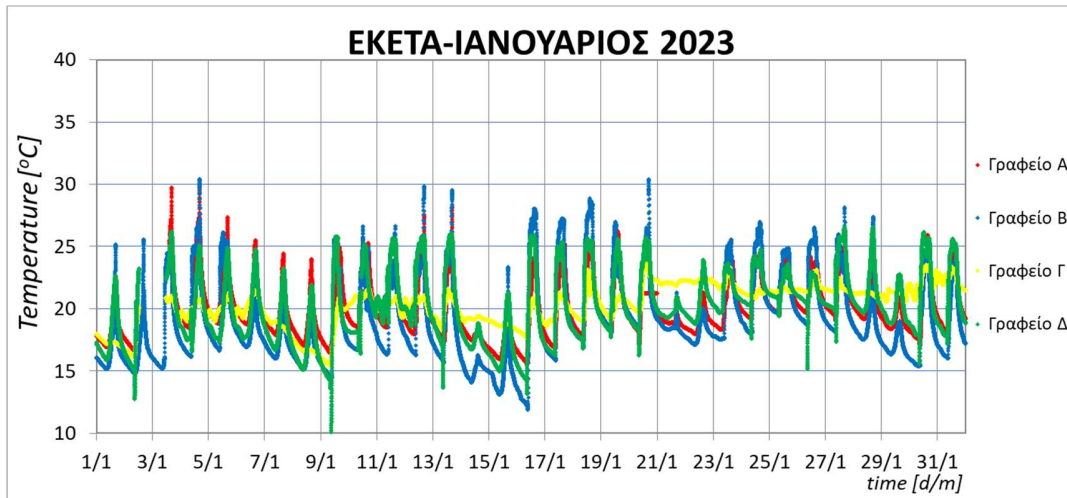
Διαγράμματα θερμοκρασίας του αέρα:



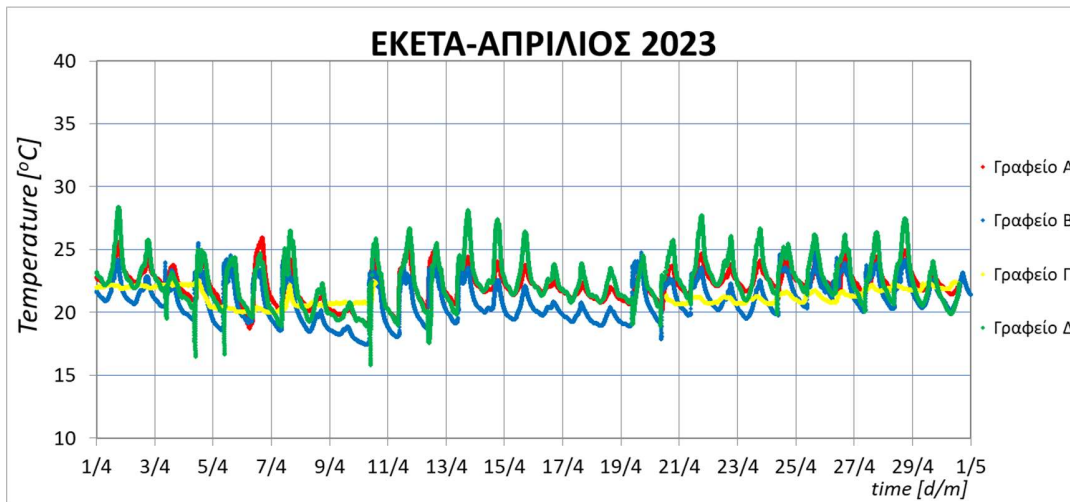
Διάγραμμα III.1: Καταγραφές θερμοκρασίας του αέρα των γραφείων για τον Ιούλιο του 2022



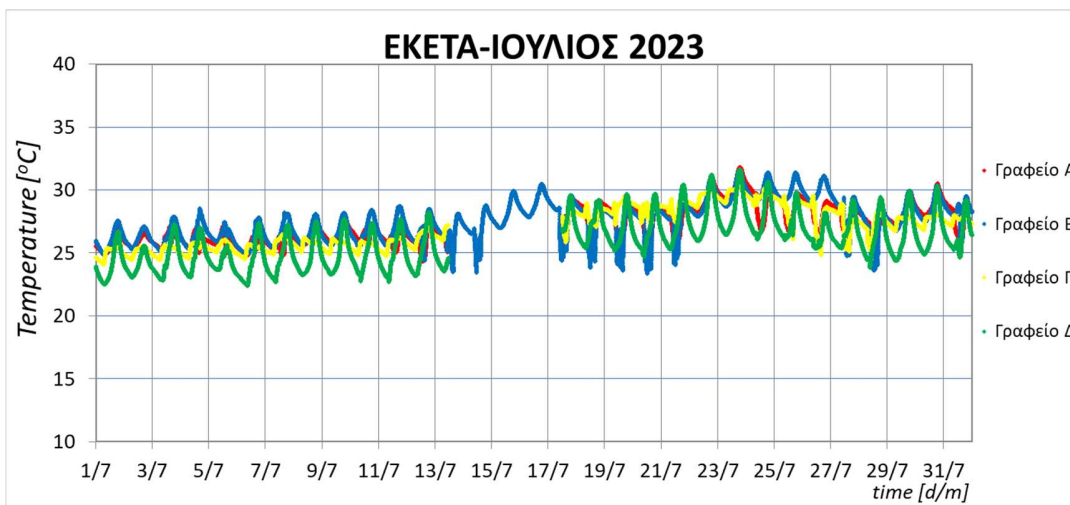
Διάγραμμα III.2: Καταγραφές θερμοκρασίας του αέρα των γραφείων για τον μήνα Νοέμβριο του 2022



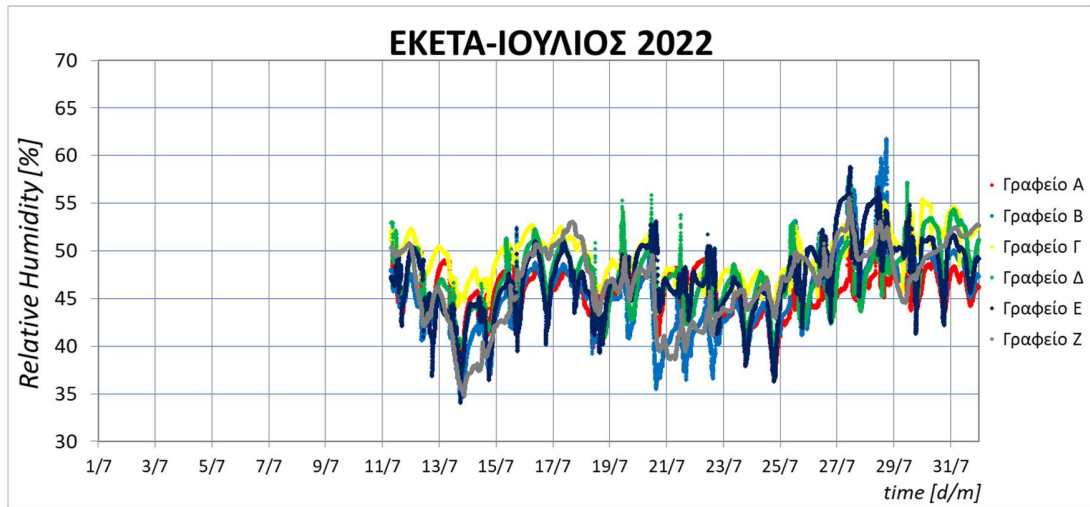
Διάγραμμα III.3: Καταγραφές θερμοκρασίας του αέρα των γραφείων για τον μήνα Ιανουάριο του 2023



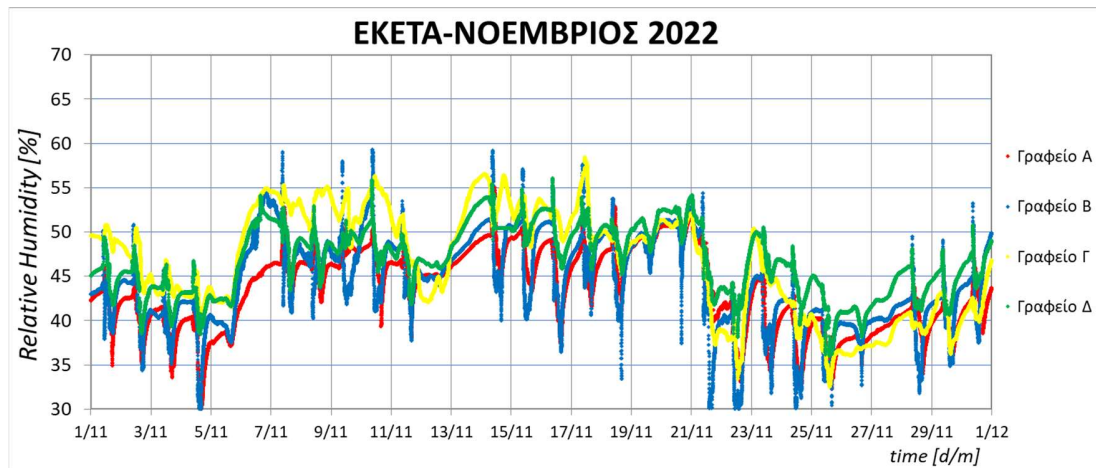
Διάγραμμα III.4: Καταγραφές θερμοκρασίας του αέρα των γραφείων για τον μήνα Απρίλιο του 2023



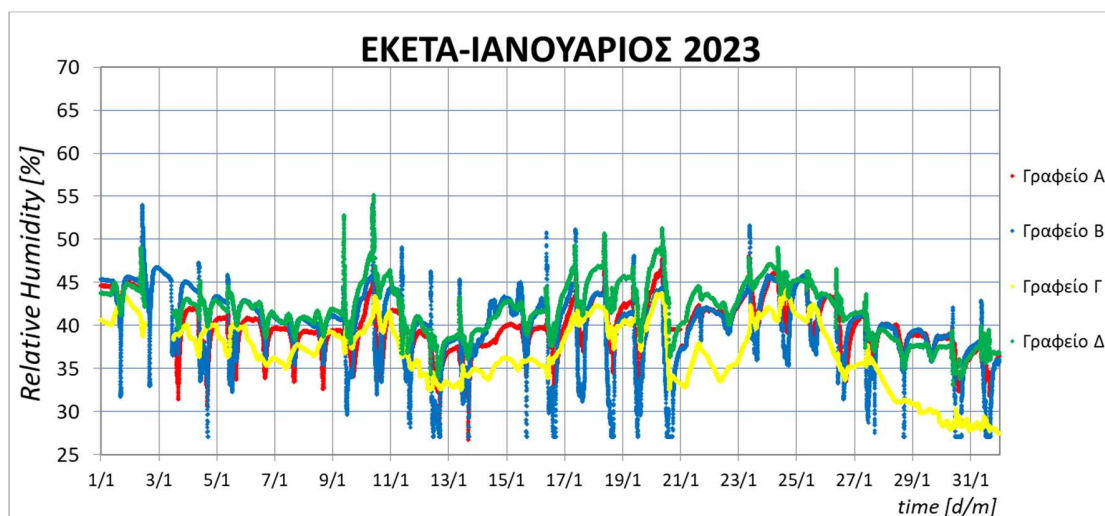
Διάγραμμα III.5: Καταγραφές θερμοκρασίας του αέρα των γραφείων για τον μήνα Ιούλιο του 2023



Διάγραμμα III.6: Καταγραφές σχετικής υγρασίας των γραφείων για τον μήνα Ιούλιο του 2022



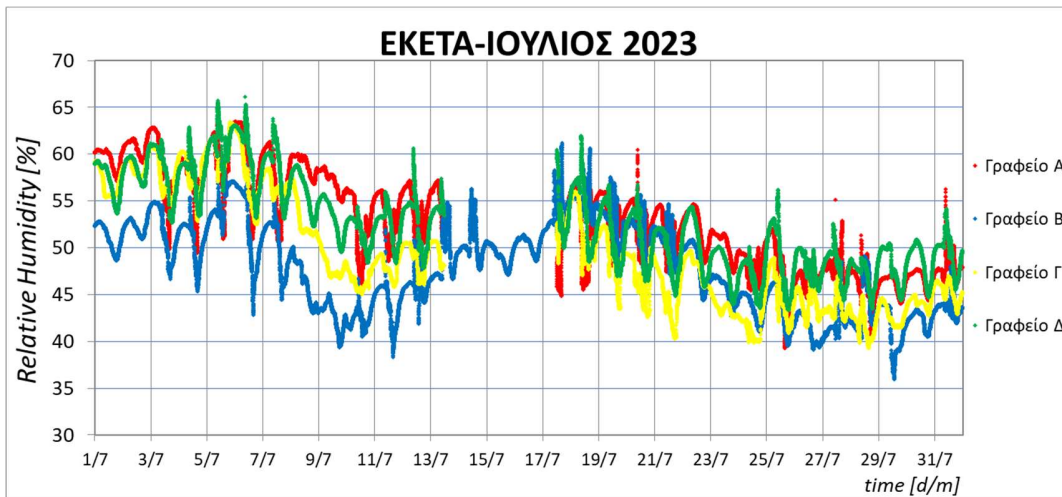
Διάγραμμα III.7: Καταγραφές σχετικής υγρασίας των γραφείων για τον μήνα Νοέμβριο του 2022



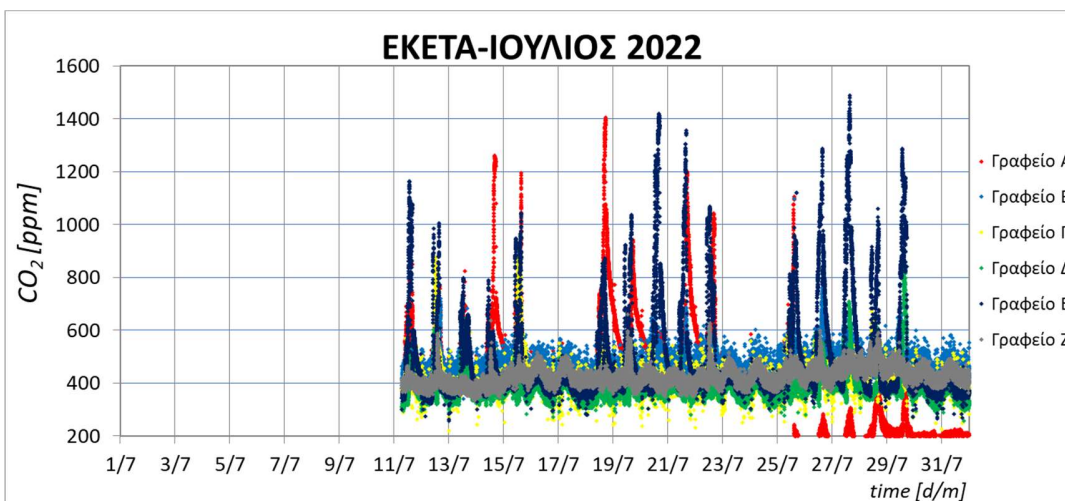
Διάγραμμα III.8: Καταγραφές σχετικής υγρασίας των γραφείων για τον μήνα Ιανουάριο του 2023



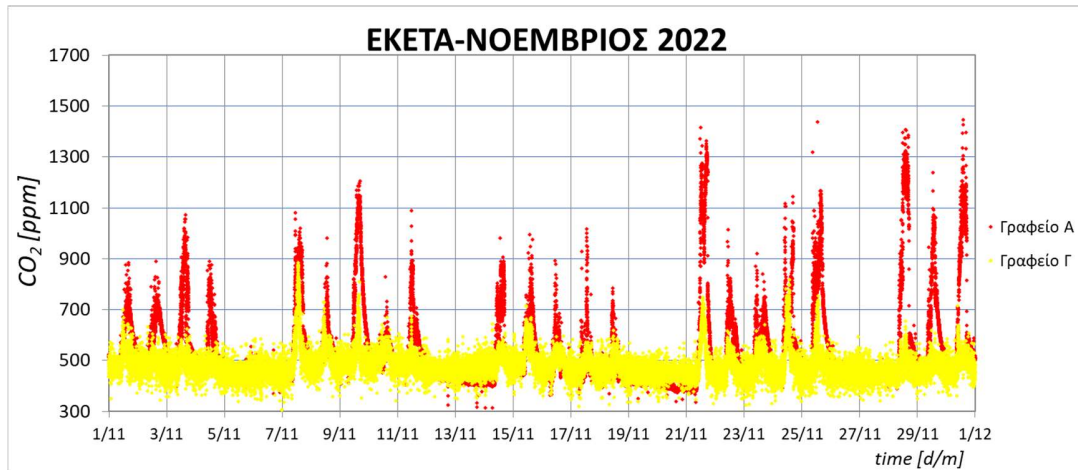
Διάγραμμα III.9: Καταγραφές σχετικής υγρασίας των γραφείων για τον μήνα Απρίλιο του 2022



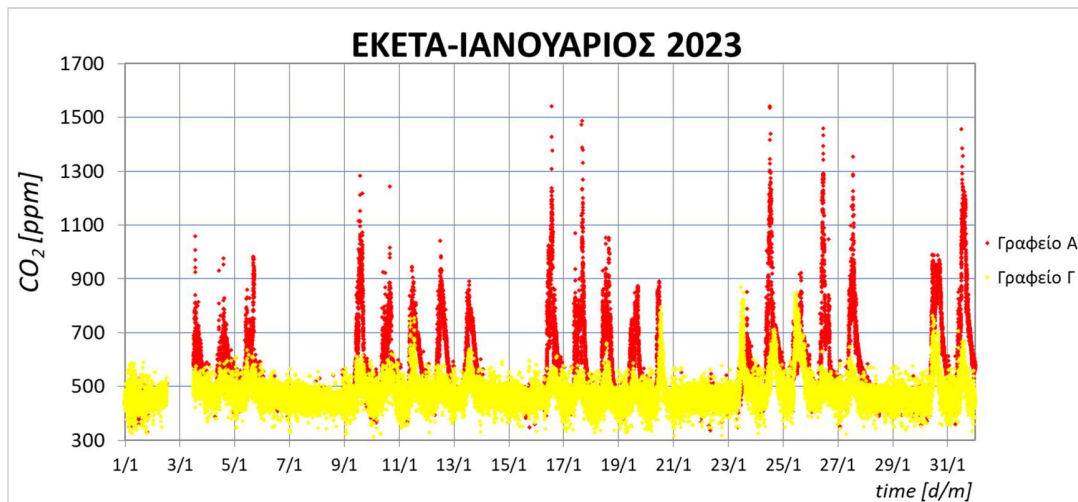
Διάγραμμα III.10: Καταγραφές σχετικής υγρασίας των γραφείων για τον μήνα Ιούλιο του 2022



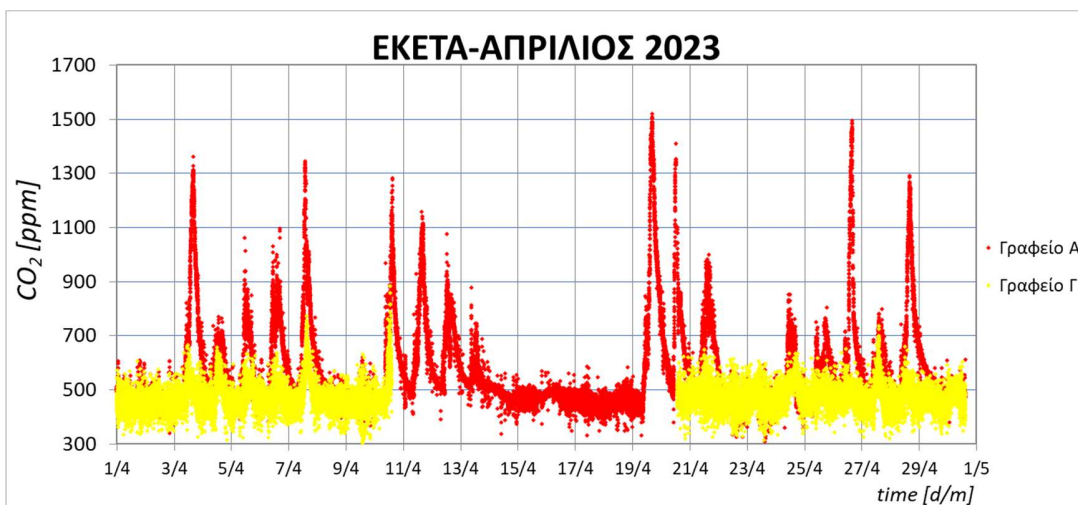
Διάγραμμα III.11: Καταγραφές συγκέντρωσης CO₂ των γραφείων για τον μήνα Ιούλιο του 2022



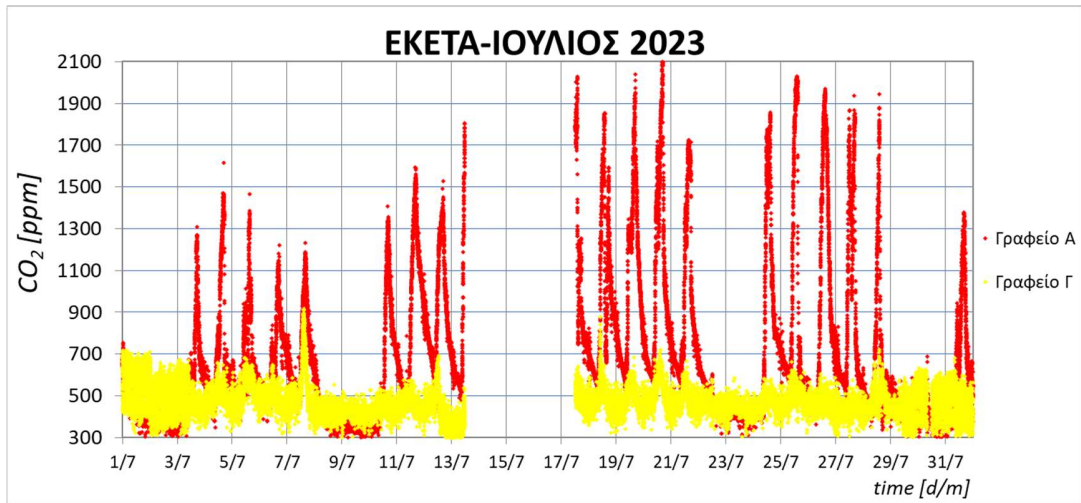
Διάγραμμα III.12: Καταγραφές συγκέντρωσης CO₂ των γραφείων για τον μήνα Νοέμβριο του 2022



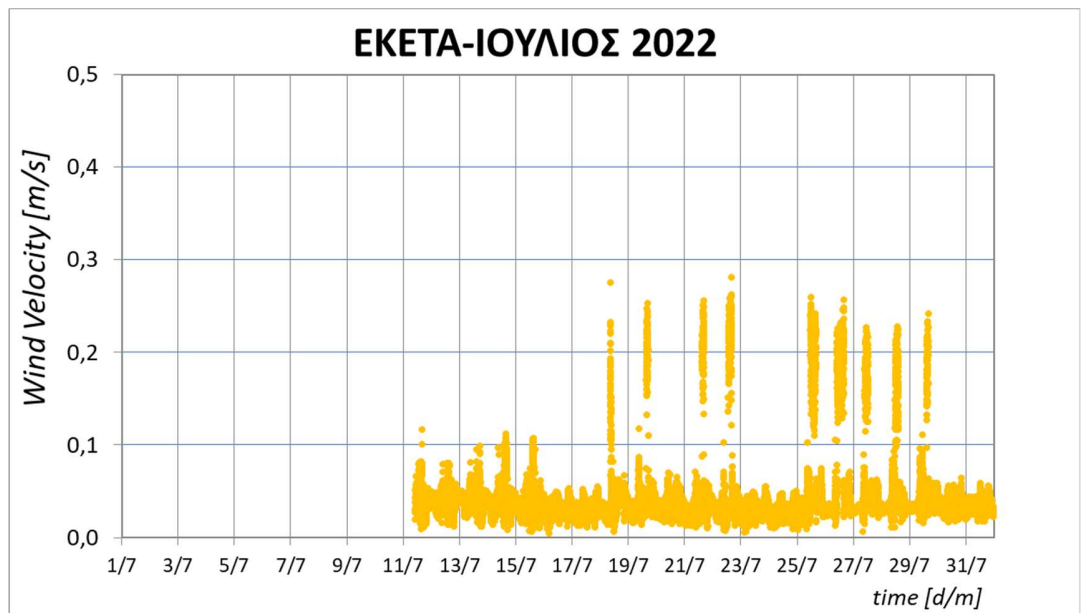
Διάγραμμα III.13: Καταγραφές συγκέντρωσης CO₂ των γραφείων για τον μήνα Ιανουάριο του 2023



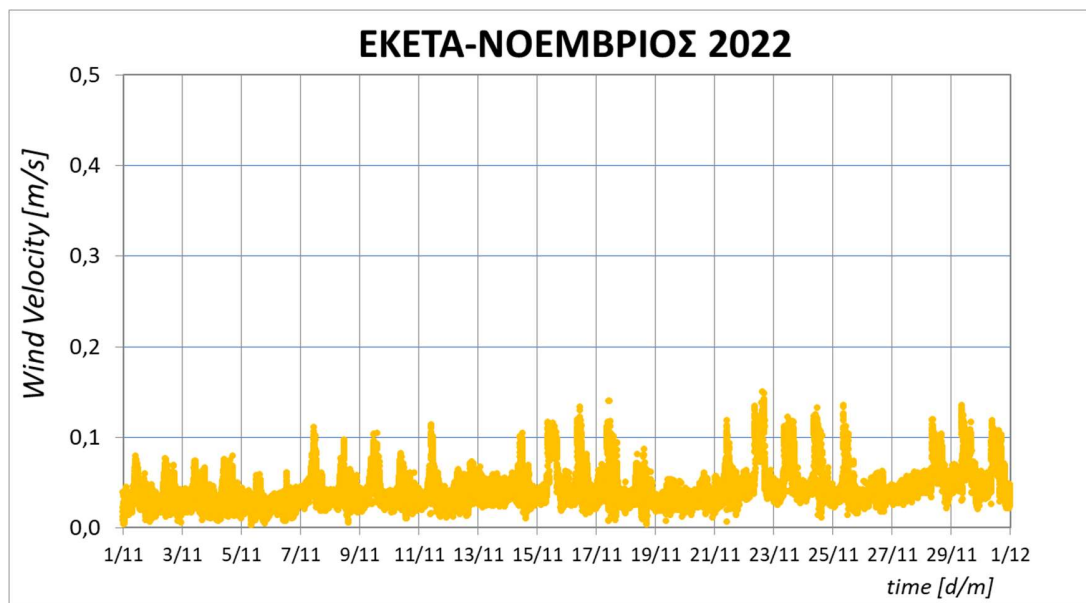
Διάγραμμα III.14: Καταγραφές συγκέντρωσης CO₂ των γραφείων για τον μήνα Απρίλιο του 2023



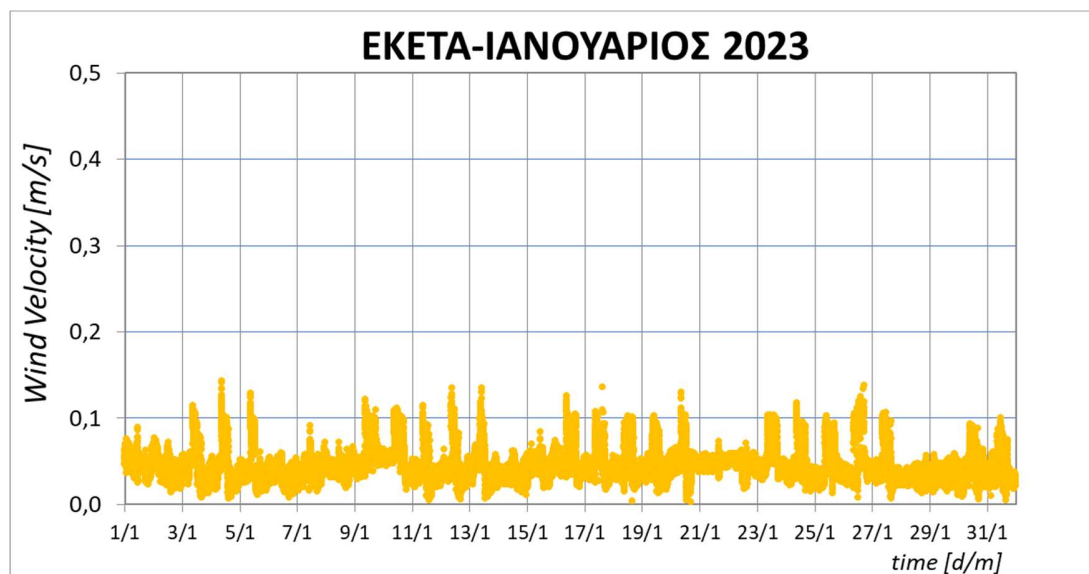
Διάγραμμα III.15: Καταγραφές συγκέντρωσης CO₂ των γραφείων για τον μήνα Ιούλιο του 2023



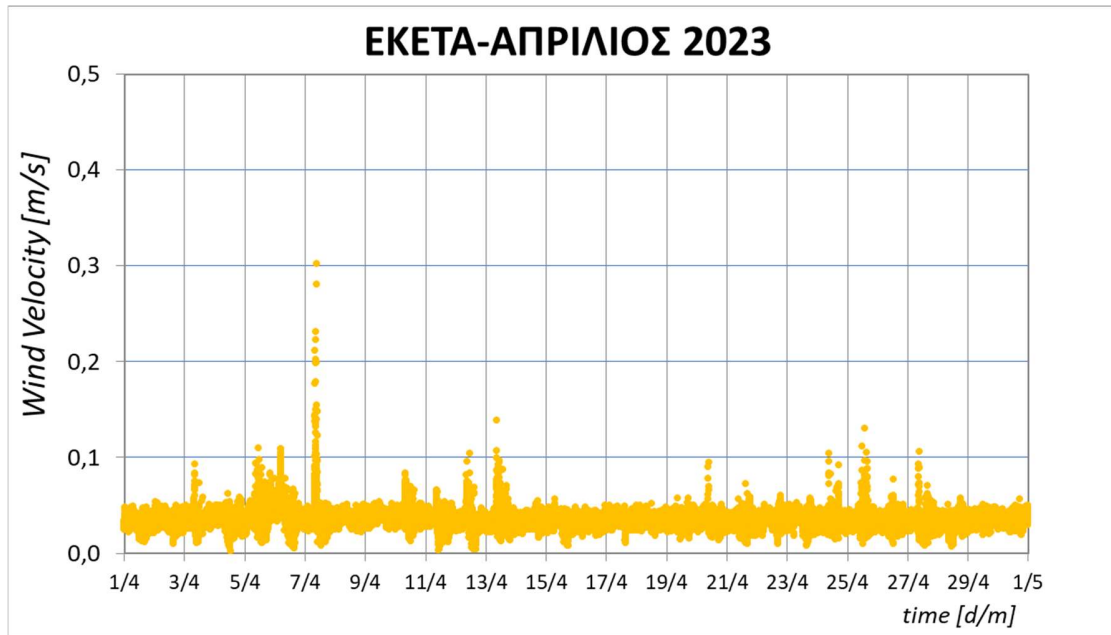
Διάγραμμα III.16: Καταγραφές συνισταμένης ταχύτητας ανέμου Γραφείου Α για τον μήνα Ιούλιο του 2022



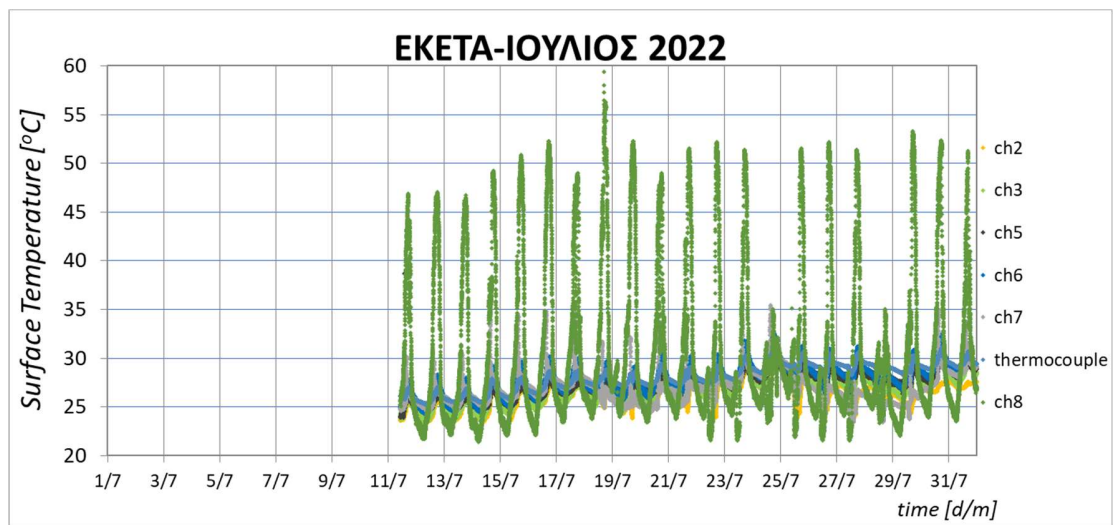
Διάγραμμα III.17: Καταγραφές συνισταμένης ταχύτητας ανέμου Γραφείου Α για τον μήνα Νοέμβριο του 2022



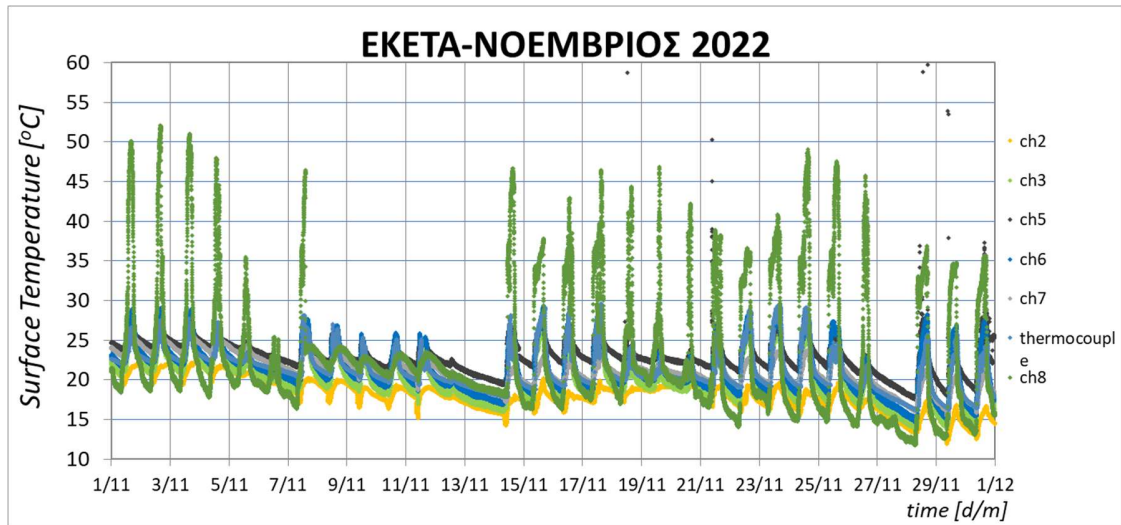
Διάγραμμα III.18: Καταγραφές συνισταμένης ταχύτητας ανέμου Γραφείου Α για τον μήνα Ιανουάριο του 2023



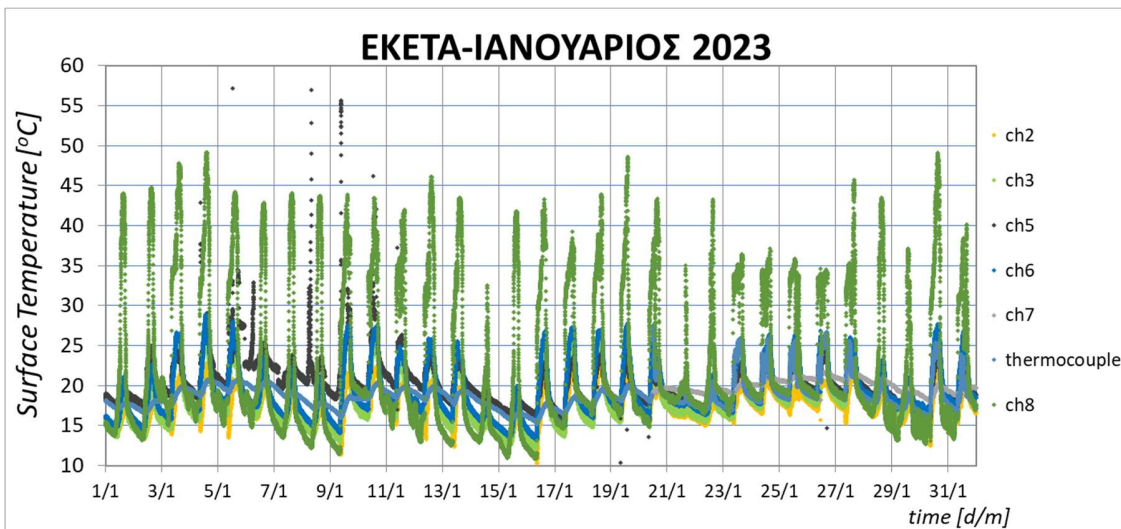
Διάγραμμα III.19: Καταγραφές συνισταμένης ταχύτητας ανέμου Γραφείου Α για τον μήνα Απρίλιο του 2023



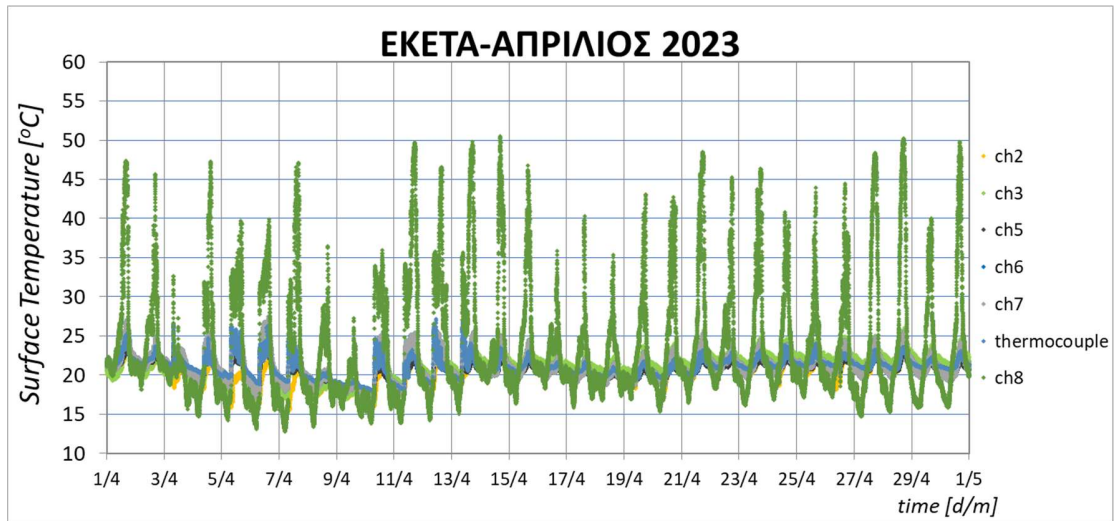
Διάγραμμα III.20: Καταγραφές επιφανειακής θερμοκρασίας Γραφείου Α για τον μήνα Ιούλιο του 2022



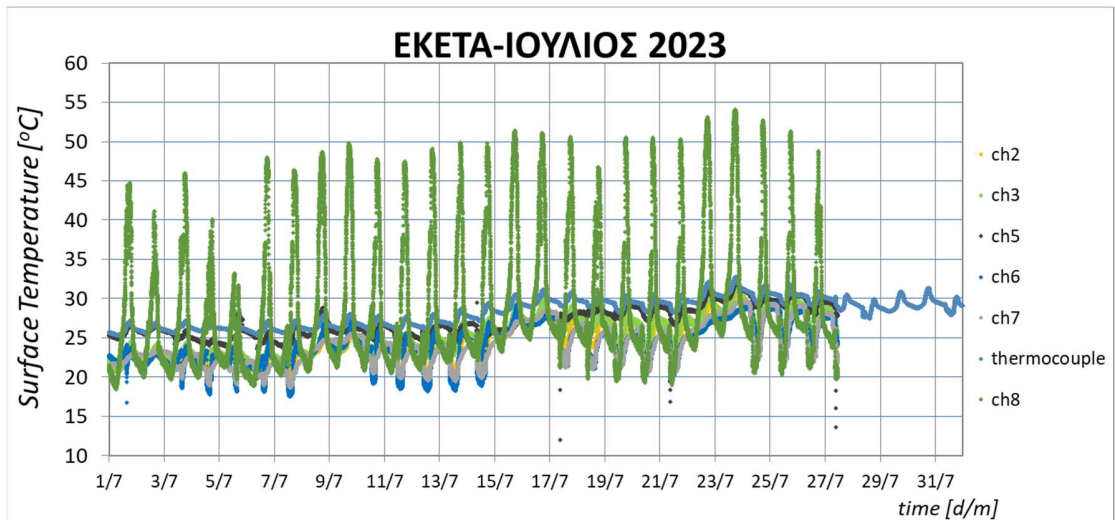
Διάγραμμα III.21: Καταγραφές επιφανειακής θερμοκρασίας Γραφείου Α για τον μήνα Νοέμβριο του 2022



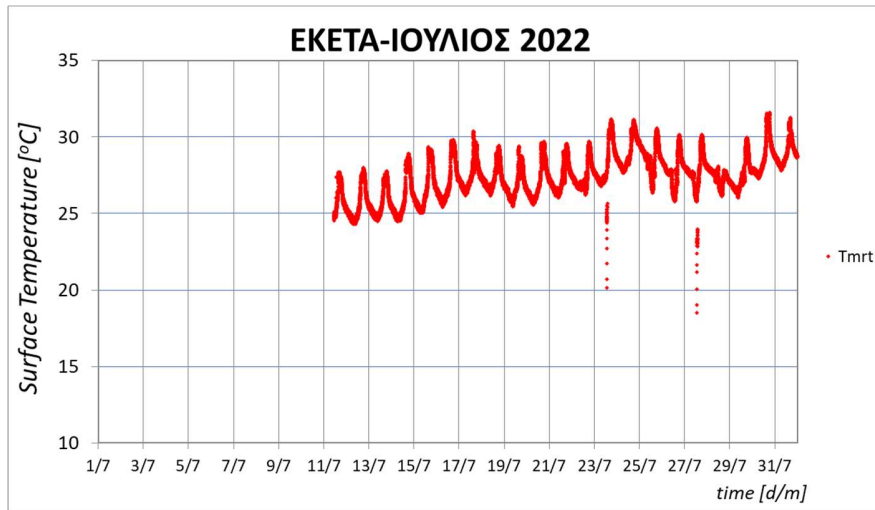
Διάγραμμα III.22: Καταγραφές επιφανειακής θερμοκρασίας Γραφείου Α για τον μήνα Ιανουάριο του 2023



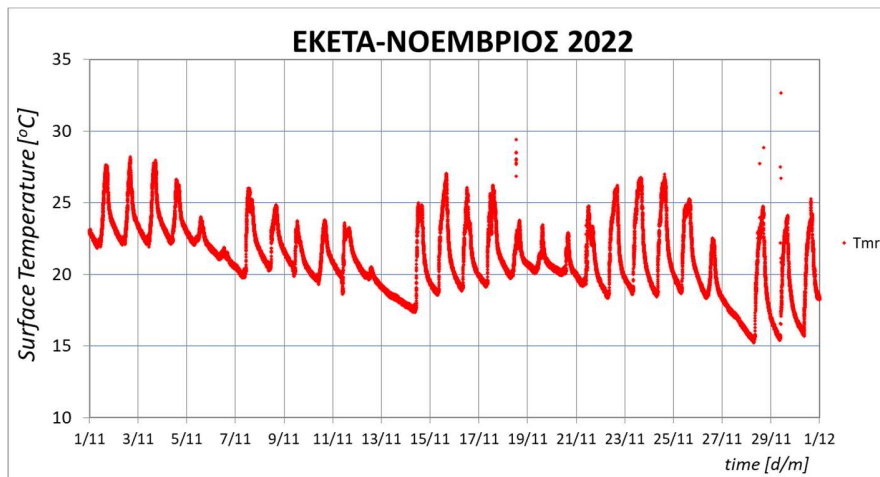
Διάγραμμα III.23: Καταγραφές επιφανειακής θερμοκρασίας Γραφείου Α για τον μήνα Απρίλιο του 2023



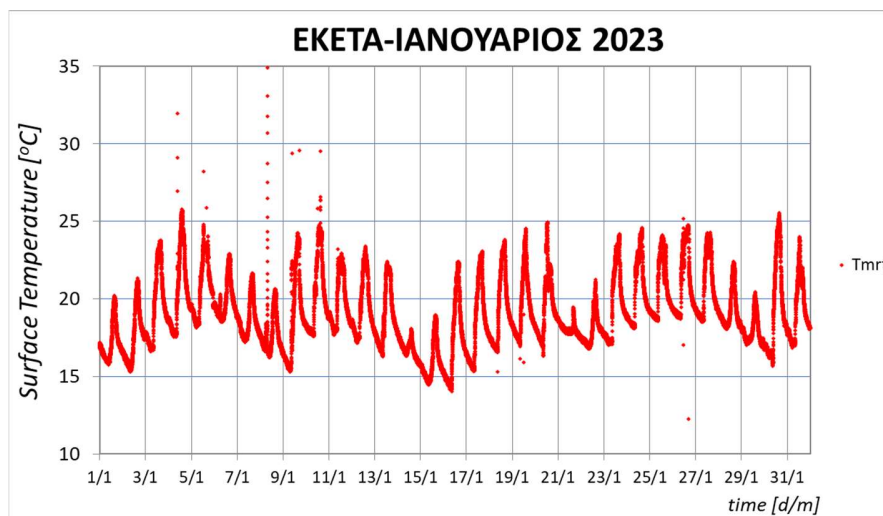
Διάγραμμα III.24: Καταγραφές επιφανειακής θερμοκρασίας Γραφείου Α για τον μήνα Ιούλιο του 2023



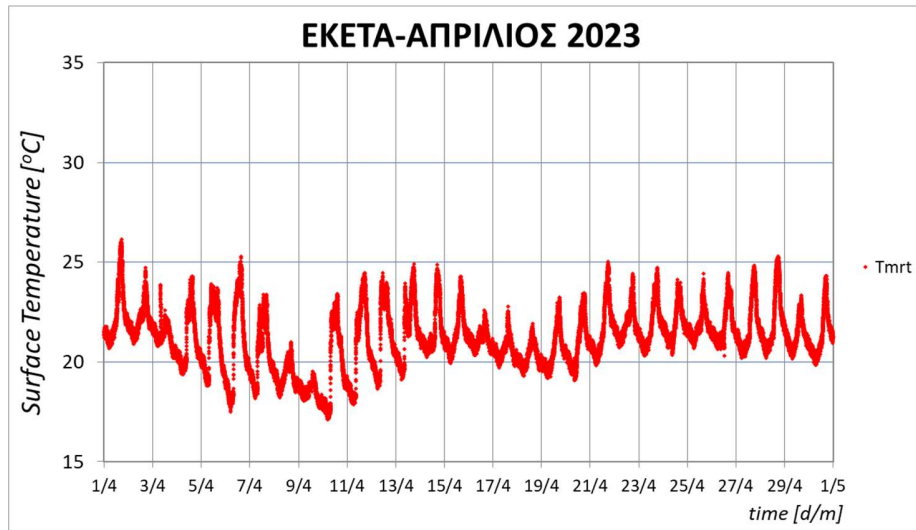
Διάγραμμα III.25: Μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας Γραφείου Α για τον μήνα Ιούλιο του 2022



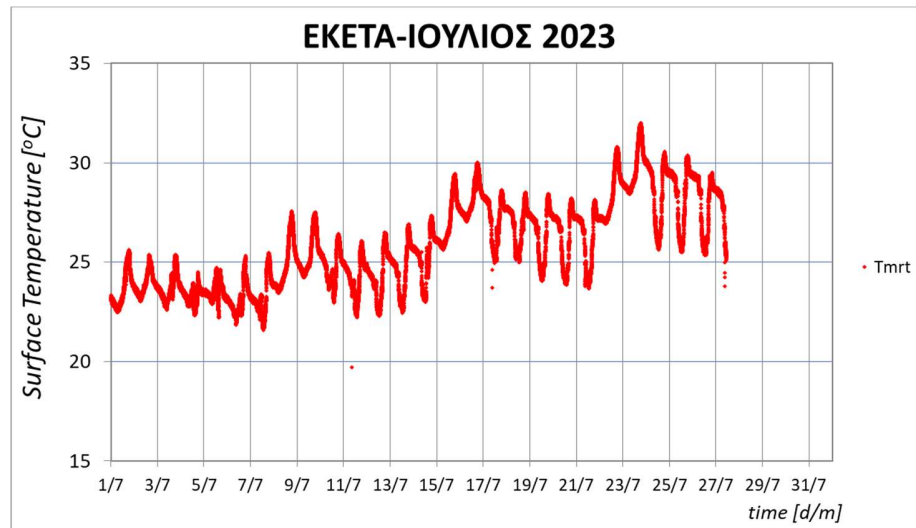
Διάγραμμα III.26: Μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας Γραφείου Α για τον μήνα Νοέμβριο του 2022



Διάγραμμα III.27: Μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας Γραφείου Α για τον μήνα Ιανουάριο του 2023



Διάγραμμα III.28: Μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας Γραφείου Α για τον μήνα Απρίλιο του 2023



Διάγραμμα III.29: Μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας Γραφείου Α για τον μήνα Ιούλιο του 2023

Παράρτημα IV

Ερωτηματολόγια

Ερωτηματολόγιο μελέτης 2022-2023

Καθημερινό Ερωτηματολόγιο Θερμικής Άνεσης

Ανώνυμος κωδικός συμμετοχής:..... Ημερομηνία:.....
Ώρα:.....

1. Πως νιώθετε το θερμικό περιβάλλον του γραφείου

Check all that apply.

- Ψυχρό (-3)
- Δροσερό (-2)
- Ελαφρώς Δροσερό (-1)
- Ουδέτερο (0)
- Ελαφρώς Ζεστό (+1)
- Ζεστό (+2)
- Καυτό (+3)

2. Θα προτιμούσατε το θερμικό περιβάλλον να ήταν διαφορετικό

Check all that apply.

- Πιο Ψυχρό
- Πιο Δροσερό
- Ελαφρώς πιο Δροσερό
- Καμία Αλλαγή
- Ελαφρώς Θερμότερο
- Θερμότερο
- Ζεστό

3. Είναι το θερμικό περιβάλλον αποδεκτό

Check all that apply.

- Αποδεκτό
- Μη αποδεκτό

4. Από ποια ρούχα αποτελείται η ενδυμασία σας αυτή τη στιγμή

Check all that apply.

- Μάσκα
- Κοντομάνικη μπλούζα
- Μακρυμάνικη μπλούζα
- Μάλλινη μπλούζα
- Πουκάμισο
- Πουλόβερ
- Ζακέτα
- Σακάκι
- Παντελόνι λεπτό
- Παντελόνι χοντρό
- Παντελόνι τζιν
- Παντελόνι φόρμα
- Φόρεμα
- Φούστα
- Παπούτσια (αθλητικά-καθημερινά)
- Μποτάκια-Παπουτσία εργασίας
- Κάλτσες κοντές
- Κάλτσες μακριές
- Καλσόν
- Φανελάκι
- Ισοθερμικό
- Αμάνικο
- Μπουφάν
- Άλλο,.....

Ερωτηματολόγιο θερμικής άνεσης και απαντήσεις πριν την επέκταση στο κτίριο ΕΚΕΤΑ που δόθηκε σε όλους τους εργαζόμενους (18)

Α/Α	Ερώτηση	Απαντήσεις				
		ΝΑΙ		ΟΧΙ		
1	Είστε ικανοποιημένος από τη θερμική άνεση που σας προσφέρει το γραφείο σας κατά τη χειμερινή περίοδο;	17		1		
2	Είστε ικανοποιημένος από τη θερμική άνεση που σας προσφέρει το γραφείο σας κατά τη θερινή περίοδο;	14		4		
3	Πραγματοποιείται φυσικός αερισμός των γραφείων για δροσισμό του χώρου;	17		1		
4	Κατά τη διάρκεια φυσικού αερισμού των γραφείων δροσίζεται ο χώρος;	16		2		
5	Με τον τρόπο που γίνεται ο φυσικός αερισμός πιστεύετε ότι είναι αποτελεσματικός;	15		3		
6	Έχετε παρατηρήσει αλλαγή της θερμοκρασίας όταν κινήστε σε διάφορους χώρους του κτιρίου;	18		0		
		Καθόλου	Λίγο	Μέτρια	Αρκετά	Πλήρως
7	Σε τι βαθμό θεωρείτε ότι επηρεάζει η υπερβολική ζέστη ή ψύχος εντός της αίθουσας αισθήματα όπως δυσφορία κ.α. κατά την χειμερινή περίοδο;	0	3	1	12	2
8	Σε τι βαθμό θεωρείτε ότι επηρεάζει η υπερβολική ζέστη ή ψύχος εντός της αίθουσας αισθήματα όπως δυσφορία κ.α. κατά τη θερινή περίοδο;	0	1	0	15	2

9	Πόσο πιστεύετε ότι επηρεάζεται η συγκέντρωση ή η υγεία σας από την υπερβολική ζέστη ή ψύχοςεντός του γραφείου κατά τις ώρες εργασίας σας;	0	1	6	10	1
10	Σε τι βαθμό χρησιμοποιείτε τεχνητά μέσα δροσισμού κατά τη θερινή περίοδο;	0	0	6	9	2

Βιβλιογραφία

ANSI/ASHRAE Handbook Fundamentals (2021) <https://www.slideshare.net/slideshow/2021-ashrae-handbook-fundamentals-i-pdf/259702490#4>

ANSI/ASHRAE Standard 55 (2023) – Thermal environmental conditions for human occupancy

ANSI/ASHRAE Standard 62.1 (2022) – Ventilation and acceptable indoor air quality

<https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/read-only-versions-of-ashrae-standards>

AIVC, 1998. Numerical data for air infiltration and natural ventilation calculations. AIC-TN-44-1994

Ayesha Asif, Muhammad Zeeshan (2023) - Comparative analysis of indoor air quality in offices with different ventilation mechanisms and simulation of ventilation process utilizing system dynamics tool <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106687>

ASTM International, 2019. Standard E741- 11: Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution. United States: ASTM International

Baeza_Romero, M.T., Dudzinska, M.R., Amouei Torkmahalleh, M., Barros, N., Coggins, A.M., 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. Indoor Air 32. <https://doi.org/10.1111/ina.13144>

Tom Ben-David, Michael S. Waring (2016) - Impact of natural versus mechanical ventilation on simulated indoor air quality and energy consumption in offices in fourteen U.S. cities <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.007>

Gail S. Brager, Richard J. de Dear, (1998) - Thermal adaptation in the built environment: a literature review [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00053-4)

CEN. 2012. EN15251. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings- addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustic. Brussels

CEN, 2014. EN 16798-2, Energy Performance of 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 —Module M1-6, European Standard

Dols, W.S., Polidoro, B.J., 2020. CONTAM User Guide and Program Documentation Version 3.4. National Institute of Standards and Technology

European Commission, Directorate-General for Energy. EU energy in figures-Statistical pocketbook 2023. Publications Office of the European Union. 2023. Available at: <https://data.europa.eu/doi/10.2833/502436>

Hanwate, Ankit. (2021). OPTIMISATION OF THERMAL CONTROL IN BUILDINGS (G-17) ([PDF](#))
[OPTIMISATION OF THERMAL CONTROL IN BUILDINGS \(G-17\) \(researchgate.net\)](#)

C. Heracleous, A. Michael (2019) - Experimental assessment of the impact of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort conditions of educational buildings in the Eastern Mediterranean region during the heating period <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100917>

ISO 7726. 2001. Ergonomics of the thermal environment—Instruments for measuring physical quantities, International Standardisation Organisation, Brussels

ISO 7730:2005, Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

Kabirikopaei, A., Lau, J. (2020) - Uncertainty analysis of various CO₂-Based tracer-gas methods for estimating seasonal ventilation rates in classrooms with different mechanical systems. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107003>

S. Kang, D. Ou, C.M. Mak (2017) - The impact of indoor environmental quality on work productivity in university open-plan research offices <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.003>

Huading Lou, Dayi Ou (2018) - A comparative field study of indoor environmental quality in two types of open-plan offices: Open-plan administrative offices and open-plan research offices <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.022>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Global Monitoring Laboratory (GML) <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html>

G. Panaras, M. Markogiannaki, E.I. Tolis, Y. Sakellaris, J.G. Bartzis (2018) - Experimental and theoretical investigation of air exchange rate of an indoor aquatic center <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.012>

Papadopoulos, G., Nikolentzos, A., Tolis, E.I., Panaras, G., 2023. Theoretical and experimental investigation of ventilation rates and their relation with IAQ and thermal comfort in university classrooms during SARS-COV-2 pandemic. SBE2023 Thessaloniki, Greece 22-24 March 2023.

H. Parhizkar, R. Afghani, M. Tahbaz (2019) - Double skin façade with Azolla ; ventilation , indoor air quality and thermal performance assessment <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119313>

A. Persily, (2022) - Development and Application of an Indoor Carbon Dioxide Metric <https://doi.org/10.1111/ina.13059>

Falk Schaudienst, Frank U. Vogdt (2017) - Fanger's model of thermal comfort: a model suitable just for men? <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.658>

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

Despoina Teli, Mark F. Jentsch, Patrick A.B. James (2012) Naturally ventilated classrooms: An assessment of existing comfort models for predicting the thermal sensation and preference of primary school children <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.022>

U.S. Environmental Protection Agency (1991) - Indoor Air Facts No. 4 (revised) Sick Building Syndrome

WHO (2000) - Air Quality Guidelines for Europe, second ed., WHO Regional Office for Europe Copenhagen

Κοτσίρης Γ. (2007) – Θερμική άνεση, Ορισμοί, Δείκτες και Μοντέλα Εκτίμησης, Διεθνή Πρότυπα, Μεθοδολογία – Μελέτη περίπτωσης. Εκδόσεις Ίων, Αθήνα

Κυριαζής Εμμανουήλ (2022) – Διπλωματική εργασία ΠΔΜ - Πειραματική διερεύνηση συνθηκών εσωτερικής περιβαλλοντικής ποιότητας κτιρίου γραφείων στη Δυτική Μακεδονία

Νικολέντζος Απόστολος (2022) – Διπλωματική εργασία ΠΔΜ - Πειραματική διερεύνηση συνθηκών αερισμού σε αίθουσες πανεπιστήμιου την περίοδο του covid-19 και της επίδρασης τους στη θερμική άνεση και στην ποιότητα αέρα

Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) (2010) – "Guidelines for indoor air quality: selected pollutants." World Health Organization

Παπαδόπουλος Α. (2006) – Θερμική άνεση στα κτίρια. Νέα πρότυπα και βελτίωση θερμικής άνεσης στα κτίρια. Ημερίδα: Η οδηγία 2009/91/EC για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, Ιωάννινα

Παπαδόπουλος Ιωάννης (2019) – Διπλωματική εργασία ΠΔΜ - Διερεύνηση συνθηκών θερμικής άνεσης και ποιότητας αέρα σε αίθουσες διδασκαλίας πανεπιστήμιου

ΤΟΤΕΕ 2423/86. (2002) – Τεχνική οδηγία τεχνικού επιμελητηρίου Ελλάδας Κλιματισμός Κτιριακών χώρων

Ιστοσελίδες:

<https://www.autodesk.com/>

<https://www.linquip.com/blog/types-of-ventilation/>

<https://www.onsetcomp.com/>

<https://www.poahbod.org/ventilation-index#ventilation>

<https://smartairfilters.com/en/blog/dangers-high-carbon-dioxide-co2-levels/>

<https://tealproducts.com/resource/ventilation-options-for-high-rise-commercial-residential-buildings>