



ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΩΝ ΚΑΙ ΒΙΩΣΙΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Βιώσιμος Σχεδιασμός Εσωτερικού Περιβάλλοντος Κτιρίων

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**«Συλλογή δεδομένων και ανάλυση καταναλώσεων ενέργειας σε
κτίριο γραφείων με σκοπό την βελτιστοποίηση των στρατηγικών
ελέγχου και εξοικονόμησης ενέργειας»**

Βασίλειος Σ. Ζαχόπουλος

Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Πανάρας

Αθήνα, Ιούνιος 2026

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

Συλλογή δεδομένων και ανάλυση καταναλώσεων ενέργειας σε κτίριο γραφείων με σκοπό την βελτιστοποίηση των στρατηγικών ελέγχου και εξοικονόμησης ενέργειας

Βασίλειος Σ. Ζαχόπουλος

Επιτροπή Επίβλεψης Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής :

Γεώργιος Πανάρας

Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός,

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο

Θεσσαλονίκης

Συν-Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Βασιλική Κυριάκου

Δρ. Αρχιτέκτων Μηχανικός,

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο

Θεσσαλονίκης

Αθήνα, Ιούνιος 2026

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου **κ. Γεώργιο Πανάρα** για την επιστημονική καθοδήγηση, τις χρήσιμες παρατηρήσεις και την υποστήριξη που μου παρείχε σε όλα τα στάδια της εργασίας. Οι συμβουλές και οι υποδείξεις του συνέβαλαν ουσιαστικά στη διαμόρφωση της μεθοδολογίας και στην ολοκλήρωση της έρευνας.

Ευχαριστώ ακόμη τον Διευθυντή του προγράμματος **κ. Λάμπρο Δούλο** καθώς και όλους τους διδάσκοντες για το πολύ ευχάριστο ταξίδι γνώσεων που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου.

Τέλος, εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια και στους ανθρώπους που βρίσκονταν δίπλα μου. Η υπομονή, η κατανόηση και η στήριξή τους ήταν ιδιαίτερα σημαντικές.

Σας ευχαριστώ όλους από καρδιάς!

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την ενεργειακή συμπεριφορά και τις συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος σε πολυώροφο κτίριο γραφείων. Βασικός σκοπός είναι η αξιοποίηση πραγματικών δεδομένων για τον εντοπισμό περιόδων αυξημένης κατανάλωσης, χώρων με ανεπαρκή αερισμό και δυνατοτήτων βελτίωσης των στρατηγικών ελέγχου.

Η ανάλυση βασίστηκε σε ωριαίες καταγραφές ηλεκτρικής ενέργειας από επιμέρους μετρητές ορόφων, για την περίοδο από τον Ιούνιο του 2025 έως τον Απρίλιο του 2026. Παράλληλα, εξετάστηκαν μετρήσεις CO₂, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας από δεκατρείς χώρους. Τα δεδομένα καθαρίστηκαν, οργανώθηκαν σε κοινή χρονική βάση και αναλύθηκαν με ημερήσιους, μηνιαίους, χωρικούς και ωριαίους δείκτες.

Η συνολική καταγεγραμμένη κατανάλωση ανήλθε σε 55.263,83 kWh. Οι υψηλότερες μηνιαίες τιμές εμφανίστηκαν από τον Ιανουάριο έως τον Μάρτιο, ενώ σημαντικό μέρος της κατανάλωσης καταγράφηκε εκτός του προτεινόμενου ωραρίου. Το ισόγειο παρουσίασε τη μεγαλύτερη συμμετοχή. Η ανάλυση του CO₂ έδειξε ότι πέντε από τους δεκατρείς χώρους είχαν 95ο εκατοστημόριο πάνω από 1.000 ppm. Ο Χώρος 10 παρουσίασε τη μεγαλύτερη ανάγκη ενίσχυσης του αερισμού.

Συγκρίθηκαν τρεις στρατηγικές και ήταν η σταθερή λειτουργία, ο έλεγχος βάσει CO₂ και συνδυασμός CO₂ με ωράριο. Η δεύτερη μείωσε τον συνολική παροχή αέρα κατά 34,47%, διατηρώντας απόκριση σε όλες τις ώρες. Η τρίτη πέτυχε μείωση 79,89%, αλλά δεν ανταποκρινόταν στις αυξημένες συγκεντρώσεις εκτός ωραρίου. Ως καταλληλότερη πρακτική λύση προτείνεται συνδυασμένη στρατηγική, στην οποία το ωράριο συμπληρώνεται από δυνατότητα ενεργοποίησης βάσει CO₂ και εκτός προγράμματος.

ABSTRACT

This thesis investigates the energy performance and indoor environmental conditions of a multi-storey office building. Its main objective is to use real operational data to identify periods of increased energy consumption, spaces with insufficient ventilation, and opportunities for improving ventilation control strategies.

The analysis was based on hourly electricity records collected from separate floor meters between June 2025 and April 2026. In parallel, carbon dioxide, temperature, and relative humidity measurements were examined for thirteen office spaces. The datasets were cleaned, organised, and converted into a common time structure. Daily, monthly, spatial, and hourly indicators were then used to describe the building's actual operation.

The total recorded electricity consumption was 55,263.83 kWh. The highest monthly values occurred between January and March. A considerable share of electricity use was also recorded outside the proposed operating schedule. The ground floor had the largest contribution to total consumption. The indoor environmental analysis showed that five of the thirteen spaces had a 95th percentile CO₂ concentration above 1,000 ppm. Space 10 presented the most critical conditions and the highest estimated need for additional ventilation.

Three control strategies were compared: constant ventilation, CO₂-based control, and combined CO₂ and schedule-based control. The CO₂-based strategy reduced the modelled ventilation air volume by 34.47% while maintaining a response throughout the monitoring period. The combined strategy achieved a reduction of 79.89%. However, it did not respond to elevated CO₂ concentrations outside the predefined schedule.

The results show that the largest reduction in ventilation operation does not automatically represent the most suitable solution. A modified combined strategy is therefore proposed. The schedule should define normal operation, while CO₂ measurements should be allowed to override it when increased concentrations are detected outside regular working hours.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1.1 Ενεργειακή κατανάλωση και ποιότητα εσωτερικού αέρα σε κτίρια γραφείων.....	9
1.2 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας.....	12
1.3 Ερευνητικοί στόχοι και ερευνητικά ερωτήματα	13
1.4 Μεθοδολογική προσέγγιση	15
1.5 Πεδίο εφαρμογής και περιορισμοί	17
1.6 Δομή της εργασίας	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	21
2.1 Ενεργειακή συμπεριφορά κτιρίων γραφείων	21
2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή κατανάλωση	23
2.3 Ποιότητα εσωτερικού αέρα και συγκέντρωση CO ₂	26
2.4 Απαιτούμενη παροχή αέρα και ρυθμός ανανέωσης ACH	28
2.5 Συστήματα παρακολούθησης ενέργειας και εσωτερικού περιβάλλοντος.....	31
2.6 Στρατηγικές ελέγχου αερισμού και εξοικονόμησης ενέργειας	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	38
3.1 Περιγραφή του κτιρίου	38
3.1.1 Μελέτη περίπτωσης.....	38
3.1.2 Κλιματισμός – Θέρμανση – Αερισμός.....	38
3.2 Διάρθρωση ορόφων και χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων χώρων.....	40
3.3 Σύστημα μέτρησης ηλεκτρικής ενέργειας.....	41
3.4 Μετρήσεις CO ₂ , θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας	43
3.5 Περίοδος και διαδικασία συλλογής δεδομένων.....	46
3.6 Πληρότητα, κενά και ποιότητα των δεδομένων	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	50
4.1 Καθαρισμός και επεξεργασία των δεδομένων	50
4.2 Χρονική ομαδοποίηση και σύζευξη ενεργειακών και περιβαλλοντικών δεδομένων	52
4.3 Δείκτες ενεργειακής ανάλυσης	54

4.4 Δείκτες ποιότητας εσωτερικού αέρα και αερισμού	56
4.5 Σενάρια χώρου και πληρότητας.....	58
4.6 Μοντελοποίηση και κριτήρια σύγκρισης των στρατηγικών ελέγχου	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	66
5.1 Συνολική και μηνιαία κατανάλωση ενέργειας.....	66
5.2 Κατανομή της κατανάλωσης ανά όροφο	68
5.3 Ημερήσια και ωριαία προφίλ κατανάλωσης	71
5.4 Εργάσιμες και μη εργάσιμες περίοδοι.....	72
5.5 Φορτίο βάσης, αιχμές και μη αναμενόμενες καταναλώσεις	74
5.6 Βασικά ευρήματα της ενεργειακής ανάλυσης.....	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΑΕΡΙΣΜΟΥ	78
6.1 Συνολική εικόνα του εσωτερικού περιβάλλοντος	78
6.2 Μέση, μέγιστη συγκέντρωση και 95ο εκατοστημόριο CO ₂	79
6.3 Διάρκεια υπέρβασης των επιπέδων αναφοράς	81
6.4 Αποτελέσματα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας.....	83
6.5 Απαιτούμενη παροχή αέρα και ρυθμός ανανέωσης	85
6.6 Χώροι με ανάγκη ενισχυμένου αερισμού	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ	89
7.1 Κατάσταση αναφοράς και πλαίσιο σύγκρισης	89
7.2 Στρατηγική Ε0: σταθερή λειτουργία	89
7.3 Στρατηγική Ε1: έλεγχος βάσει CO ₂	90
7.4 Στρατηγική Ε2: συνδυασμός CO ₂ και ωραρίου	92
7.5 Συγκριτική αξιολόγηση παροχής αέρα, χρόνου λειτουργίας και απόκρισης	93
7.6 Επιλογή της καταλληλότερης στρατηγικής	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΖΗΤΗΣΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	100
8.1 Ερμηνεία των βασικών αποτελεσμάτων.....	100
8.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία	103
8.3 Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα	105
8.4 Προτεινόμενη στρατηγική και λειτουργικές παρεμβάσεις.....	106
8.5 Περιορισμοί και αβεβαιότητες	108
8.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	110
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	113

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ενεργειακή κατανάλωση και ποιότητα εσωτερικού αέρα σε κτίρια γραφείων

Τα κτίρια γραφείων αποτελούν σημαντικό τμήμα του κτιριακού αποθέματος του τριτογενούς τομέα και χαρακτηρίζονται από σύνθετες ενεργειακές ανάγκες. Η καθημερινή λειτουργία τους προϋποθέτει την ταυτόχρονη χρήση συστημάτων θέρμανσης, ψύξης, αερισμού, φωτισμού, ηλεκτρονικού εξοπλισμού και βοηθητικών εγκαταστάσεων. Η συνολική κατανάλωση δεν εξαρτάται μόνο από την ενεργειακή απόδοση του εξοπλισμού, αλλά και από το ωράριο λειτουργίας, την πραγματική χρήση των χώρων, τον αριθμό των εργαζομένων και τον τρόπο ελέγχου των εγκαταστάσεων. Ως αποτέλεσμα, η ενεργειακή εικόνα ενός κτιρίου γραφείων παρουσιάζει μεταβολές κατά τη διάρκεια της ημέρας, της εβδομάδας και του έτους [1], [2].

Η προσπάθεια μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια έχει ενταθεί λόγω της ανάγκης περιορισμού του λειτουργικού κόστους και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Οι παρεμβάσεις δεν αφορούν μόνο την αντικατάσταση παλαιού εξοπλισμού ή τη βελτίωση του κελύφους. Μεγάλο μέρος της εξοικονόμησης μπορεί να προκύψει από την ορθότερη λειτουργία των ήδη εγκατεστημένων συστημάτων. Η προσαρμογή του ωραρίου, η κατάλληλη ρύθμιση των σημείων ελέγχου και ο περιορισμός της λειτουργίας σε περιόδους μειωμένης χρήσης μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση χωρίς να απαιτούν εκτεταμένες τεχνικές μετατροπές.

Η ενεργειακή απόδοση, ωστόσο, δεν μπορεί να αξιολογείται ανεξάρτητα από τις συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό του κτιρίου. Ένας χώρος μπορεί να παρουσιάζει περιορισμένη κατανάλωση επειδή τα συστήματα αερισμού ή κλιματισμού λειτουργούν λιγότερο από όσο απαιτείται. Σε μια τέτοια περίπτωση, η χαμηλότερη ενεργειακή χρήση μπορεί να συνοδεύεται από αυξημένες συγκεντρώσεις ρύπων, ανεπαρκή ανανέωση αέρα ή μη αποδεκτές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Η εξοικονόμηση ενέργειας αποκτά επομένως ουσιαστικό νόημα μόνο όταν δεν επιτυγχάνεται εις βάρος της άνεσης και της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος.

Η ποιότητα του εσωτερικού αέρα αποτελεί βασική παράμετρο της λειτουργίας των χώρων γραφείων, καθώς οι εργαζόμενοι παραμένουν σε αυτούς για μεγάλο μέρος της ημέρας. Η κατάστασή της επηρεάζεται από τον αερισμό, την πυκνότητα χρήσης, τη διάρκεια παραμονής των ατόμων και τις πηγές ρύπων που υπάρχουν στον χώρο. Η ανεπαρκής ανανέωση του αέρα μπορεί να οδηγήσει σε συσσώρευση ουσιών που παράγονται στο εσωτερικό, ενώ η υπερβολική εισαγωγή εξωτερικού αέρα μπορεί να αυξήσει τις απαιτήσεις θέρμανσης ή ψύξης.

Η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα χρησιμοποιείται συχνά ως λειτουργικός δείκτης της σχέσης μεταξύ ανθρώπινης παρουσίας και αερισμού. Το CO₂ παράγεται κατά την αναπνοή και η συγκέντρωσή του αυξάνεται όταν περισσότερα άτομα παραμένουν σε έναν κλειστό χώρο χωρίς αντίστοιχη ανανέωση του αέρα. Η μέτρησή του δεν αποτυπώνει όλους τους πιθανούς ρύπους και δεν αποτελεί από μόνη της πλήρη αξιολόγηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα. Παρέχει όμως, χρήσιμη ένδειξη για το κατά πόσο η παροχή αέρα ανταποκρίνεται στην πραγματική χρήση του χώρου [21], [23].

Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία συμπληρώνουν την εικόνα του εσωτερικού περιβάλλοντος. Οι δύο αυτές παράμετροι επηρεάζουν την αίσθηση άνεσης και συνδέονται άμεσα με τη λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και αερισμού. Η διατήρησή τους σε κατάλληλα επίπεδα απαιτεί ενέργεια, ιδιαίτερα όταν οι εξωτερικές συνθήκες αποκλίνουν σημαντικά από τις επιθυμητές εσωτερικές τιμές. Για τον λόγο αυτό, η ενεργειακή λειτουργία και η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος αποτελούν αλληλένδετες πλευρές του ίδιου λειτουργικού προβλήματος.

Η σχέση αυτή γίνεται ιδιαίτερα εμφανής στον αερισμό. Η συνεχής λειτουργία με σταθερή παροχή μπορεί να διατηρεί την ποιότητα του αέρα σε ικανοποιητικά επίπεδα, αλλά ενδέχεται να οδηγεί σε περιττή κατανάλωση όταν οι χώροι είναι κενοί ή χρησιμοποιούνται από περιορισμένο αριθμό ατόμων. Αντίθετα, η υπερβολική μείωση της παροχής μπορεί να περιορίζει την ενεργειακή κατανάλωση, αλλά να μην καλύπτει τις ανάγκες κατά τις περιόδους αυξημένης πληρότητας. Η αποτελεσματική διαχείριση απαιτεί επομένως ισορροπία ανάμεσα στην ενεργειακή εξοικονόμηση και στην επάρκεια του αερισμού [26], [31].

Τα σταθερά προγράμματα λειτουργίας έχουν το πλεονέκτημα της απλότητας, αλλά δεν ανταποκρίνονται πάντοτε στις πραγματικές ανάγκες. Η χρήση των χώρων μπορεί να διαφέρει σημαντικά από ημέρα σε ημέρα, ακόμη και όταν το επίσημο ωράριο παραμένει το ίδιο. Η τηλεργασία, οι συναντήσεις, οι άδειες και οι μετακινήσεις του προσωπικού δημιουργούν μεταβολές στην πληρότητα, οι οποίες επηρεάζουν τις απαιτήσεις φωτισμού, κλιματισμού και αερισμού. Όταν τα συστήματα λειτουργούν με αμετάβλητες ρυθμίσεις, υπάρχει κίνδυνος να καταναλώνεται ενέργεια χωρίς αντίστοιχη ανάγκη.

Η διαθεσιμότητα δεδομένων από ενεργειακούς μετρητές και αισθητήρες εσωτερικού περιβάλλοντος προσφέρει τη δυνατότητα καλύτερης κατανόησης της πραγματικής λειτουργίας. Οι χρονοσειρές κατανάλωσης μπορούν να δείξουν ημερήσια και εβδομαδιαία πρότυπα, περιόδους αιχμής και φορτία που παραμένουν ενεργά εκτός του κανονικού ωραρίου. Αντίστοιχα, οι καταγραφές CO₂, θερμοκρασίας και υγρασίας μπορούν να δείξουν πώς μεταβάλλονται οι εσωτερικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της χρήσης των χώρων.

Η κοινή αξιοποίηση των δύο κατηγοριών δεδομένων είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η ενεργειακή μέτρηση δείχνει πόση ενέργεια καταναλώνεται, αλλά δεν εξηγεί από μόνη της αν η κατανάλωση ήταν αναγκαία. Η περιβαλλοντική μέτρηση αποτυπώνει τις συνθήκες του χώρου, αλλά δεν δείχνει το ενεργειακό κόστος της διατήρησής τους. Η συνδυασμένη εξέταση μπορεί να αναδείξει χρονικά διαστήματα κατά τα οποία τα συστήματα λειτουργούν χωρίς αντίστοιχη χρήση, καθώς και περιόδους κατά τις οποίες οι εσωτερικές συνθήκες υποδεικνύουν ανεπαρκή λειτουργία.

Η μετάβαση προς πιο ευέλικτες και ανθρωποκεντρικές μορφές ελέγχου βασίζεται ακριβώς στην αξιοποίηση αυτών των πληροφοριών. Τα συστήματα μπορούν να προσαρμόζουν τη λειτουργία τους σύμφωνα με την παρουσία, το ωράριο ή τις μετρούμενες συνθήκες, αντί να ακολουθούν ένα ενιαίο πρόγραμμα για όλες τις περιπτώσεις. Η προσέγγιση αυτή δημιουργεί περιθώρια περιορισμού της κατανάλωσης, διατηρώντας παράλληλα τις απαιτούμενες συνθήκες στους χώρους [32], [50].

Η ενεργειακή διαχείριση των κτιρίων γραφείων δεν αφορά συνεπώς μόνο την επίτευξη της χαμηλότερης δυνατής κατανάλωσης. Αφορά τη χρήση της απαραίτητης ενέργειας στον

κατάλληλο χρόνο και στον χώρο όπου υπάρχει πραγματική ανάγκη. Η σύνδεση ενεργειακών και περιβαλλοντικών δεδομένων μπορεί να υποστηρίξει αυτή τη μετάβαση και να προσφέρει τεκμηριωμένη βάση για τη βελτίωση των στρατηγικών ελέγχου.

1.2 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση δεδομένων ενεργειακής κατανάλωσης και εσωτερικού περιβάλλοντος από ένα σε συγκεκριμένο κτίριο γραφείων, του οποίου διατηρείται η ανωνυμία. Η μελέτη επικεντρώνεται στη λειτουργική εικόνα του κτιρίου, όπως αυτή αποτυπώνεται μέσα από πραγματικές καταγραφές ηλεκτρικής ενέργειας, συγκέντρωσης CO₂, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας.

Η ενεργειακή διάσταση της έρευνας αφορά την αποτύπωση της συνολικής κατανάλωσης, της χρονικής της μεταβολής και της κατανομής της στα επιμέρους διαθέσιμα τμήματα του κτιρίου. Η περιβαλλοντική διάσταση αφορά την αξιολόγηση των συνθηκών στους εξεταζόμενους χώρους και ιδιαίτερα τη διερεύνηση της επάρκειας του αερισμού σε σχέση με τη συγκέντρωση CO₂.

Κεντρικό στοιχείο του αντικειμένου αποτελεί η σύνδεση των δύο διαστάσεων. Η ενεργειακή κατανάλωση και η ποιότητα του εσωτερικού αέρα δεν εξετάζονται ως ανεξάρτητα ζητήματα, αλλά ως παράμετροι που επηρεάζονται από την ίδια λειτουργία. Η κοινή τους αξιολόγηση αποσκοπεί στην αναγνώριση περιόδων κατά τις οποίες η κατανάλωση ανταποκρίνεται στις πραγματικές ανάγκες, καθώς και περιπτώσεων στις οποίες υπάρχει δυνατότητα καλύτερης προσαρμογής.

Ο βασικός σκοπός της εργασίας είναι η διαμόρφωση τεκμηριωμένης πρότασης για τη βελτιστοποίηση των στρατηγικών ελέγχου και την εξοικονόμηση ενέργειας. Η έννοια της βελτιστοποίησης δεν περιορίζεται στη μέγιστη δυνατή μείωση της κατανάλωσης. Περιλαμβάνει την επιλογή της λειτουργίας που επιτυγχάνει ικανοποιητική ενεργειακή απόδοση, χωρίς να υποβαθμίζει τις συνθήκες αερισμού.

Στο πλαίσιο αυτό εξετάζονται τρεις διαφορετικές στρατηγικές:

- η πρώτη αντιστοιχεί σε σταθερή λειτουργία (E0),

- η δεύτερη σε έλεγχο βάσει της συγκέντρωσης CO₂ (E1)
- η τρίτη σε συνδυασμένο έλεγχο βάσει CO₂ και ωραρίου (E2).

Η μεταξύ τους σύγκριση έχει ως σκοπό να δείξει ποια προσέγγιση προσφέρει την καταλληλότερη ισορροπία μεταξύ χρόνου λειτουργίας, κατανάλωσης ενέργειας και ποιότητας του εσωτερικού αέρα.

Η εργασία επιδιώκει επίσης να αναδείξει την αξία των πραγματικών δεδομένων στη λήψη λειτουργικών αποφάσεων. Η χρήση μετρήσεων επιτρέπει οι προτάσεις να στηρίζονται στην καταγεγραμμένη συμπεριφορά του κτιρίου και όχι μόνο σε γενικές παραδοχές. Με τον τρόπο αυτό, η ανάλυση αποκτά πρακτικό χαρακτήρα και μπορεί να υποστηρίξει στοχευμένες παρεμβάσεις στη λειτουργία των υφιστάμενων συστημάτων.

1.3 Ερευνητικοί στόχοι και ερευνητικά ερωτήματα

Ο γενικός ερευνητικός στόχος είναι η αξιολόγηση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής λειτουργίας του εξεταζόμενου κτιρίου και η επιλογή της καταλληλότερης στρατηγικής ελέγχου από τις διαθέσιμες εναλλακτικές. Για την επίτευξή του απαιτείται η εξέταση επιμέρους ζητημάτων, τα οποία καλύπτουν την ενεργειακή συμπεριφορά, τις συνθήκες εσωτερικού αέρα και τη συγκριτική απόδοση των στρατηγικών.

Πρώτος στόχος είναι η αποτύπωση της χρονικής εξέλιξης της ηλεκτρικής κατανάλωσης. Η ανάλυση επιδιώκει να προσδιορίσει τις μεταβολές σε μηνιαία, ημερήσια και ωριαία βάση, καθώς και τις διαφορές μεταξύ των επιμέρους διαθέσιμων μετρήσεων. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να αναγνωριστούν τα χρονικά διαστήματα και τα τμήματα του κτιρίου που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ενεργειακή επιβάρυνση.

Δεύτερος στόχος είναι ο εντοπισμός επαναλαμβανόμενων προτύπων και αποκλίσεων στη λειτουργία. Ιδιαίτερη σημασία έχει η διάκριση μεταξύ της κατανάλωσης κατά τις εργάσιμες και τις μη εργάσιμες περιόδους, καθώς και η αναγνώριση φορτίων που παραμένουν ενεργά όταν η χρήση του κτιρίου αναμένεται να είναι περιορισμένη. Η εξέταση αυτή μπορεί να αναδείξει περιθώρια εξοικονόμησης που σχετίζονται με το ωράριο και τις ρυθμίσεις.

Επιπλέον στόχος, είναι η αξιολόγηση των συνθηκών του εσωτερικού περιβάλλοντος στους εξεταζόμενους χώρους. Η έμφαση δίνεται στη συγκέντρωση CO₂, στη διάρκεια των υπερβάσεων και στις διαφορές που εμφανίζονται μεταξύ των χώρων. Οι μετρήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά για την περιγραφή των συνθηκών κατά τις αντίστοιχες περιόδους.

Ακόμη ένας στόχος είναι η εκτίμηση των απαιτήσεων αερισμού για διαφορετικά σενάρια χώρου και πληρότητας. Η εξέταση αυτή αποσκοπεί στην κατανόηση της επίδρασης που έχουν το μέγεθος του χώρου και ο αριθμός των χρηστών στην απαιτούμενη παροχή αέρα και στον ρυθμό ανανέωσης.

Πέμπτος στόχος είναι η σύνδεση της ενεργειακής κατανάλωσης με τις μετρήσεις του εσωτερικού περιβάλλοντος. Η χρονική αντιστοίχιση των δεδομένων επιτρέπει να διερευνηθεί αν η λειτουργία των συστημάτων ακολουθεί τις ενδείξεις χρήσης και τις ανάγκες αερισμού ή αν εμφανίζονται χρονικές αποκλίσεις.

Επιπρόσθετα, είναι η αριθμητική σύγκριση των στρατηγικών σταθερής λειτουργίας, ελέγχου βάσει CO₂ και συνδυασμένου ελέγχου βάσει CO₂ και ωραρίου. Η σύγκριση αφορά την ενεργειακή κατανάλωση, τον χρόνο λειτουργίας και τη διατήρηση αποδεκτών επιπέδων ποιότητας αέρα.

Τέλος, είναι επιλογή της στρατηγικής που προσφέρει την καταλληλότερη ισορροπία μεταξύ των ενεργειακών και περιβαλλοντικών κριτηρίων. Η επιλογή δεν θεωρείται προκαθορισμένη, αλλά προκύπτει από τα αποτελέσματα της συγκριτικής αξιολόγησης.

Ποια λοιπόν, είναι τα βασικά χρονικά και χωρικά χαρακτηριστικά της ενεργειακής κατανάλωσης του εξεταζόμενου κτιρίου γραφείων;

Σε ποιον βαθμό η κατανάλωση μεταβάλλεται μεταξύ εργάσιμων και μη εργάσιμων περιόδων και ποια φορτία ή αποκλίσεις μπορούν να αναγνωριστούν;

Ποιες συνθήκες CO₂, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας καταγράφονται στους εξεταζόμενους χώρους και ποιοι χώροι παρουσιάζουν αυξημένη ανάγκη αερισμού;

Πώς μεταβάλλονται η απαιτούμενη παροχή αέρα και ο ρυθμός ανανέωσης ανάλογα με το μέγεθος του χώρου και την πληρότητα;

Ποια λειτουργικά πρότυπα προκύπτουν από τη χρονική αντιστοίχιση της ενεργειακής κατανάλωσης με τις μετρήσεις CO₂;

Πώς διαφοροποιούνται οι εξεταζόμενες στρατηγικές ως προς την κατανάλωση, τον χρόνο λειτουργίας και την ποιότητα του εσωτερικού αέρα;

Ποια στρατηγική ελέγχου προσφέρει την καταλληλότερη συνολική απόδοση για τα δεδομένα και τις συνθήκες της συγκεκριμένης μελέτης περίπτωσης;

Τα ερευνητικά ερωτήματα καθορίζουν την πορεία της ανάλυσης και λειτουργούν ως βάση για την οργάνωση των αποτελεσμάτων. Κάθε επόμενο κεφάλαιο συνδέεται με ένα συγκεκριμένο μέρος τους, ώστε τα τελικά συμπεράσματα να προκύπτουν από διαδοχικά στάδια.

1.4 Μεθοδολογική προσέγγιση

Η εργασία ακολουθεί ποσοτική προσέγγιση μελέτης περίπτωσης και βασίζεται στην επεξεργασία πραγματικών δεδομένων από κτίριο γραφείων. Η επιλογή αυτή επιτρέπει να εξεταστεί η λειτουργία όπως καταγράφηκε κατά τις διαθέσιμες περιόδους, χωρίς να χρησιμοποιείται πλήρες θεωρητικό μοντέλο του κτιρίου.

Η έρευνα στηρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες δεδομένων. Η πρώτη περιλαμβάνει μετρήσεις ηλεκτρικής κατανάλωσης από τους διαθέσιμους μετρητές του κτιρίου. Η δεύτερη περιλαμβάνει καταγραφές CO₂, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας από τους εξεταζόμενους χώρους. Τα δύο σύνολα έχουν διαφορετική χρονική δομή και επεξεργάζονται αρχικά χωριστά.

Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τον έλεγχο και την προετοιμασία των αρχείων. Εξετάζονται η μορφή των ημερομηνιών και των ωρών, η συνέχεια των χρονοσειρών, η ύπαρξη κενών ή διπλών εγγραφών και η λογική συνέπεια των τιμών. Οι καταγραφές οργανώνονται σε ενιαία μορφή, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους επόμενους

υπολογισμούς. Η προεπεξεργασία αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αξιόπιστη εξαγωγή συμπερασμάτων από λειτουργικά δεδομένα [46].

Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται η ενεργειακή ανάλυση. Οι καταναλώσεις ομαδοποιούνται σε κατάλληλες χρονικές κλίμακες και υπολογίζονται οι βασικοί δείκτες που απαιτούνται για την αποτύπωση της λειτουργίας. Εξετάζονται η συνολική κατανάλωση, η κατανομή της ανά διαθέσιμη μετρητική μονάδα και οι μεταβολές κατά τη διάρκεια της ημέρας και της περιόδου παρακολούθησης.

Το τρίτο στάδιο αφορά τις μετρήσεις του εσωτερικού περιβάλλοντος. Για κάθε εξεταζόμενο χώρο υπολογίζονται αντιπροσωπευτικά στατιστικά μεγέθη και χρονικά ποσοστά υπέρβασης επιλεγμένων επιπέδων CO₂. Παράλληλα παρουσιάζονται οι τιμές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Τα κριτήρια και οι ακριβείς δείκτες αναπτύσσονται αναλυτικά στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας.

Στο τέταρτο στάδιο διαμορφώνονται τα σενάρια χώρου και πληρότητας και εκτιμώνται οι αντίστοιχες απαιτήσεις αερισμού. Οι υπολογισμοί χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση των αναγκών μεταξύ διαφορετικών συνθηκών χρήσης. Η απαιτούμενη παροχή και ο ρυθμός ανανέωσης υπολογίζονται με κοινές παραδοχές, ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα.

Στο πέμπτο στάδιο πραγματοποιείται η χρονική σύζευξη των ενεργειακών και περιβαλλοντικών δεδομένων. Οι καταγραφές μετατρέπονται σε κοινό χρονικό βήμα, ώστε οι τιμές κατανάλωσης να αντιστοιχούν στις αντίστοιχες μετρήσεις CO₂. Η σύζευξη χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό λειτουργικών προτύπων και όχι για την αυτόματη απόδοση σχέσης αιτίου και αποτελέσματος.

Το τελικό στάδιο περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση και τη σύγκριση των στρατηγικών E0, E1 και E2. Οι στρατηγικές εφαρμόζονται στην ίδια βάση δεδομένων και αξιολογούνται με κοινά κριτήρια. Ως βασικά μεγέθη χρησιμοποιούνται η κατανάλωση, ο χρόνος λειτουργίας, η σχετική εξοικονόμηση και οι επιπτώσεις στην ποιότητα του εσωτερικού αέρα.

Η κατάσταση σταθερής λειτουργίας χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για την εκτίμηση των διαφορών. Οι εναλλακτικές στρατηγικές συγκρίνονται με αυτήν με σταθερές παραδοχές, ώστε οι μεταβολές να αποδίδονται στη διαφορετική λογική ελέγχου. Η χρήση κοινής γραμμής βάσης αποτελεί βασική αρχή για την αξιόπιστη αξιολόγηση των ενεργειακών οφελών [17], [18].

Η τελική επιλογή βασίζεται σε συνδυασμό ενεργειακών και περιβαλλοντικών κριτηρίων. Δεν εφαρμόζεται αποκλειστική ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης, καθώς μια στρατηγική πρέπει παράλληλα να διατηρεί αποδεκτές συνθήκες αερισμού. Η βελτιστοποίηση αντιμετωπίζεται ως συγκριτική διαδικασία επιλογής της καταλληλότερης λύσης μέσα στο συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων.

1.5 Πεδίο εφαρμογής και περιορισμοί

Η εργασία αφορά συγκεκριμένο ανώνυμο κτίριο γραφείων και βασίζεται αποκλειστικά στις διαθέσιμες μετρήσεις. Τα αποτελέσματα περιγράφουν τη συμπεριφορά του κτιρίου κατά τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους και δεν θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν αυτομάτως κάθε πιθανή συνθήκη λειτουργίας.

Η ενεργειακή ανάλυση περιορίζεται στην ηλεκτρική κατανάλωση που περιλαμβάνεται στα αρχεία. Δεν υπάρχουν δεδομένα για άλλες μορφές ενέργειας και συνεπώς δεν επιχειρείται πλήρης αποτύπωση του συνολικού ενεργειακού ισοζυγίου. Επιπλέον, οι διαθέσιμες μετρήσεις δεν επιτρέπουν πάντοτε τον διαχωρισμό κάθε τελικής χρήσης. Η κατανάλωση μπορεί να περιλαμβάνει διαφορετικά φορτία, χωρίς να είναι δυνατή η ακριβής απόδοση κάθε μεταβολής σε συγκεκριμένο σύστημα.

Δεν διατίθενται πλήρη στοιχεία για το κέλυφος, τα δομικά χαρακτηριστικά, το έτος κατασκευής, τον εγκατεστημένο εξοπλισμό και τις τεχνικές προδιαγραφές των συστημάτων HVAC. Για τον λόγο αυτό, δεν πραγματοποιείται δυναμική ενεργειακή προσομοίωση ούτε υπολογισμός των θερμικών φορτίων του κτιρίου. Οι πληροφορίες αυτές δεν αντικαθίστανται από υποθετικές παραδοχές.

Η αξιολόγηση του εσωτερικού αέρα περιορίζεται στις μετρήσεις CO₂, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Δεν εξετάζονται άλλοι ρύποι, όπως τα αιωρούμενα σωματίδια και οι πτητικές οργανικές ενώσεις. Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα δεν αποτελούν πλήρη αξιολόγηση όλων των παραμέτρων της ποιότητας του αέρα.

Η συγκέντρωση CO₂ χρησιμοποιείται ως δείκτης της σχέσης μεταξύ ανθρώπινης παρουσίας και αερισμού. Η ερμηνεία της συνοδεύεται από αβεβαιότητες, καθώς επηρεάζεται από την εξωτερική συγκέντρωση, τον αριθμό των ατόμων, τη δραστηριότητά τους, τη θέση του αισθητήρα και την ανάμειξη του αέρα. Οι εκτιμήσεις της παροχής και του ACH δεν αποτελούν άμεσες μετρήσεις του συστήματος αερισμού [21], [24].

Δεν υπάρχουν συνεχείς και ανεξάρτητες μετρήσεις της πραγματικής πληρότητας. Ο αριθμός των χρηστών προσεγγίζεται μέσω των εξεταζόμενων σεναρίων και των διαθέσιμων περιβαλλοντικών ενδείξεων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει συγκριτικούς υπολογισμούς, αλλά δεν ισοδυναμεί με καταγραφή παρουσίας σε πραγματικό χρόνο.

Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των βασικών συνθηκών. Δεν πραγματοποιείται πλήρης αξιολόγηση θερμικής άνεσης, καθώς δεν υπάρχουν πληροφορίες για την ταχύτητα του αέρα, τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας, την ένδυση και το επίπεδο δραστηριότητας των χρηστών [9].

Οι διαθέσιμες καταγραφές παρουσιάζουν διαφορές ως προς τη χρονική κάλυψη και την πληρότητα. Δεν υπάρχουν ισοδύναμες χρονοσειρές για όλους τους ορόφους και όλους τους χώρους.

Οι περιβαλλοντικές μετρήσεις στους χώρους δεν πραγματοποιήθηκαν όλες ταυτόχρονα. Η διαδοχική παρακολούθηση σημαίνει ότι οι χώροι εξετάστηκαν σε διαφορετικές χρονικές και πιθανώς λειτουργικές συνθήκες. Οι μεταξύ τους συγκρίσεις πρέπει επομένως να ερμηνεύονται ως συγκρίσεις των καταγεγραμμένων περιόδων και όχι ως απόλυτη αξιολόγηση υπό κοινές συνθήκες.

Η ανάλυση στηρίζεται στην καταγεγραμμένη ακρίβεια των συσκευών. Δεν πραγματοποιήθηκε ανεξάρτητη εργαστηριακή βαθμονόμηση των μετρητών και των

αισθητήρων. Πιθανές αποκλίσεις περιορίζονται μόνο μέσω του ελέγχου της λογικής συνέπειας και της χρονικής συμπεριφοράς των τιμών.

Η χρονική ομαδοποίηση που απαιτείται για τη σύζευξη των αρχείων περιορίζει μέρος της αρχικής λεπτομέρειας των συχνότερων καταγραφών. Σύντομες αιχμές μπορεί να εξομαλύνονται όταν πολλές μετρήσεις συνοψίζονται σε κοινό χρονικό διάστημα. Η επιλογή αυτή είναι αναγκαία για τη συγκριτική ανάλυση, αλλά λαμβάνεται υπόψιν κατά την ερμηνεία.

Η σύγκριση των στρατηγικών E0, E1 και E2 βασίζεται στο υπολογιστικό μοντέλο του τελικού αρχείου. Οι στρατηγικές δεν εφαρμόστηκαν επιτόπου στο πραγματικό σύστημα ελέγχου. Οι υπολογιζόμενες εξοικονομήσεις αποτελούν εκτιμήσεις της αναμενόμενης συμπεριφοράς και όχι αποτελέσματα επαλήθευσης μετά από πραγματική παρέμβαση.

Η βελτιστοποίηση περιορίζεται στις τρεις εξεταζόμενες στρατηγικές. Δεν αξιολογούνται όλες οι δυνατές μέθοδοι προηγμένου ελέγχου και δεν αναπτύσσεται μοντέλο πρόβλεψης ή τεχνητής νοημοσύνης. Η επιλογή αυτή διατηρεί την ανάλυση προσαρμοσμένη στα διαθέσιμα δεδομένα και στο αντικείμενο της εργασίας.

Τα αποτελέσματα δεν μπορούν να γενικευτούν χωρίς προσαρμογή σε άλλα κτίρια. Η μεθοδολογική λογική μπορεί να αξιοποιηθεί σε αντίστοιχες περιπτώσεις, αλλά οι αριθμητικές τιμές και η προτεινόμενη στρατηγική εξαρτώνται από τα ιδιαίτερα δεδομένα κάθε εφαρμογής.

Οι περιορισμοί αυτοί δεν αναιρούν τη χρησιμότητα της μελέτης. Καθορίζουν τα όρια μέσα στα οποία πρέπει να ερμηνεύονται τα ευρήματα και διασφαλίζουν ότι τα συμπεράσματα δεν επεκτείνονται πέρα από όσα υποστηρίζονται από τις διαθέσιμες πληροφορίες.

1.6 Δομή της εργασίας

Η εργασία οργανώνεται σε οκτώ κεφάλαια, τα οποία ακολουθούν τη διαδοχική πορεία από τη θεωρητική θεμελίωση έως την εφαρμογή, την αξιολόγηση και τη διατύπωση των τελικών προτάσεων.

Το πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζει το γενικό πλαίσιο της έρευνας. Περιλαμβάνει το ζήτημα της ενεργειακής κατανάλωσης και της ποιότητας του εσωτερικού αέρα, το αντικείμενο, τον σκοπό, τους ερευνητικούς στόχους, τη συνολική μεθοδολογική προσέγγιση και τα όρια της μελέτης.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσει το θεωρητικό και βιβλιογραφικό πλαίσιο. Εξετάζονται η ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων γραφείων, οι παράγοντες που διαμορφώνουν την κατανάλωση, ο ρόλος του CO₂, οι απαιτήσεις αερισμού, τα συστήματα παρακολούθησης και οι στρατηγικές ελέγχου.

Το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζει τη μελέτη περίπτωσης και τα διαθέσιμα δεδομένα. Περιγράφονται το εξεταζόμενο κτίριο, οι μετρήσεις ηλεκτρικής κατανάλωσης, οι περιβαλλοντικές καταγραφές, οι χρονικές περίοδοι και οι ελλείψεις των αρχείων.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την αναλυτική μεθοδολογία. Παρουσιάζονται η προεπεξεργασία, η χρονική ομαδοποίηση, οι δείκτες, οι υπολογισμοί αερισμού, τα σενάρια χώρου και πληρότητας και οι κανόνες των στρατηγικών E0, E1 και E2.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης. Εξετάζονται η συνολική κατανάλωση, η χρονική εξέλιξη, η κατανομή ανά όροφο και τα βασικά πρότυπα λειτουργίας.

Το έκτο κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων CO₂, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Περιλαμβάνει επίσης τους υπολογισμούς της απαιτούμενης παροχής αέρα και του ACH και τον προσδιορισμό των χώρων με αυξημένη ανάγκη αερισμού.

Το έβδομο κεφάλαιο αφορά τη σύγκριση και τη βελτιστοποίηση των στρατηγικών ελέγχου. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κάθε στρατηγικής και αξιολογούνται οι διαφορές ως προς την κατανάλωση, τον χρόνο λειτουργίας και την ποιότητα του εσωτερικού αέρα.

Το όγδοο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη συζήτηση, τις απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα, τα τελικά συμπεράσματα και τις προτάσεις. Τα αποτελέσματα συνδέονται με τη βιβλιογραφία και διατυπώνονται οι προτεινόμενες λειτουργικές παρεμβάσεις και οι κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

2.1 Ενεργειακή συμπεριφορά κτιρίων γραφείων

Η ενεργειακή συμπεριφορά ενός κτιρίου γραφείων αποτυπώνει τον τρόπο με τον οποίο διαμορφώνεται και μεταβάλλεται η κατανάλωση κατά τη λειτουργία του. Δεν περιορίζεται στη συνολική ενέργεια που καταγράφεται σε μηνιαία ή ετήσια βάση, αλλά περιλαμβάνει τη χρονική κατανομή της ζήτησης, τη συμμετοχή των επιμέρους τελικών χρήσεων και τις διαφοροποιήσεις μεταξύ χώρων ή λειτουργικών ζωνών. Η εξέταση αυτών των χαρακτηριστικών επιτρέπει την κατανόηση της πραγματικής λειτουργίας, η οποία μπορεί να αποκλίνει σημαντικά από τις αρχικές παραδοχές σχεδιασμού [1], [2].

Οι βασικές τελικές χρήσεις στα κτίρια γραφείων περιλαμβάνουν τη θέρμανση, την ψύξη, τον αερισμό, τον φωτισμό, τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό και τις βοηθητικές εγκαταστάσεις. Η σχετική συμμετοχή τους δεν είναι ίδια σε όλα τα κτίρια. Επηρεάζεται από την τεχνολογία των συστημάτων, την πηγή ενέργειας, το ωράριο και τον τρόπο χρήσης. Στα σύγχρονα γραφεία, η ηλεκτρική ενέργεια καλύπτει συχνά μεγάλο μέρος των αναγκών, καθώς χρησιμοποιείται τόσο στον εξοπλισμό και στον φωτισμό όσο και σε συστήματα ψύξης, θέρμανσης και αερισμού [2], [7].

Το τυπικό ημερήσιο ενεργειακό προφίλ ενός γραφείου παρουσιάζει αύξηση κατά την έναρξη του εργασιακού ωραρίου, διατήρηση υψηλότερων φορτίων κατά τις ώρες χρήσης και μείωση μετά την αποχώρηση των εργαζομένων. Η μορφή αυτή δεν είναι πάντοτε ομαλή. Η ταυτόχρονη ενεργοποίηση πολλών εγκαταστάσεων μπορεί να προκαλεί απότομες αυξήσεις, ενώ διαφορετικά τμήματα ενδέχεται να ακολουθούν διαφορετικό πρόγραμμα. Για τον λόγο αυτό, η συνολική χρονοσειρά αποτελεί το αποτέλεσμα της συνδυασμένης λειτουργίας πολλών φορτίων και όχι μιας μοναδικής διαδικασίας.

Η ωριαία ανάλυση αναδεικνύει την ώρα έναρξης, τις περιόδους αιχμής και τη μείωση της κατανάλωσης μετά το τέλος της ημέρας. Η ημερήσια και εβδομαδιαία ομαδοποίηση επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ εργάσιμων ημερών, Σαββατοκύριακων και αργιών. Οι μηνιαίες τιμές παρουσιάζουν ευρύτερες εποχικές ή λειτουργικές μεταβολές, αλλά δεν επαρκούν για τον εντοπισμό συγκεκριμένων περιόδων μη αποδοτικής λειτουργίας [3], [4].

Η ολοκληρωμένη εικόνα προκύπτει επομένως από τη συνδυασμένη εξέταση περισσότερων χρονικών κλιμάκων.

Ιδιαίτερη σημασία έχει το φορτίο βάσης, δηλαδή το επίπεδο κατανάλωσης που παραμένει όταν η κύρια δραστηριότητα του κτιρίου έχει περιοριστεί. Μέρος του φορτίου μπορεί να είναι αναγκαίο, καθώς συστήματα ασφαλείας, εξυπηρετητές, δίκτυα επικοινωνίας και άλλος κρίσιμος εξοπλισμός λειτουργούν συνεχώς. Όταν όμως η κατανάλωση εκτός ωραρίου παραμένει κοντά στα επίπεδα των εργάσιμων περιόδων, προκύπτει ένδειξη ότι φορτία εξακολουθούν να λειτουργούν χωρίς αντίστοιχη ανάγκη. Το ύψος και η χρονική σταθερότητα του φορτίου βάσης αποτελούν συνεπώς χρήσιμα στοιχεία λειτουργικής αξιολόγησης.

Οι αιχμές ζήτησης αποτελούν δεύτερο βασικό χαρακτηριστικό. Μπορεί να εμφανίζονται κατά την ταυτόχρονη εκκίνηση του φωτισμού, του εξοπλισμού και των συστημάτων κλιματισμού ή κατά τις ώρες έντονων θερμικών αναγκών. Οι αιχμές επηρεάζουν τη μέγιστη απαιτούμενη ισχύ και, ανάλογα με το τιμολογιακό πλαίσιο, ενδέχεται να αυξάνουν το λειτουργικό κόστος. Η χρονική μετατόπιση ή η σταδιακή εκκίνηση ορισμένων φορτίων μπορεί να περιορίζει την έντασή τους χωρίς να μειώνει τις υπηρεσίες που παρέχονται στους χρήστες [5].

Η ενεργειακή συμπεριφορά διαθέτει και χωρική διάσταση. Σε ένα πολύωρο κτίριο, οι όροφοι ή οι επιμέρους ζώνες μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετική κατανάλωση λόγω διαφορετικής επιφάνειας, χρήσης, εξοπλισμού ή διάρκειας λειτουργίας. Η συνολική μέτρηση στην κεντρική παροχή δεν επιτρέπει τον άμεσο εντοπισμό της περιοχής από την οποία προέρχεται μια μεταβολή.

Η σύγκριση απόλυτων καταναλώσεων χρειάζεται να γίνεται με προσοχή. Ένας μεγαλύτερος ή περισσότερο χρησιμοποιούμενος όροφος αναμένεται να καταναλώνει περισσότερη ενέργεια χωρίς αυτό να σημαίνει υποχρεωτικά χαμηλότερη απόδοση. Η κατανάλωση ανά μονάδα επιφάνειας αποτελεί ευρέως χρησιμοποιούμενο δείκτη, όμως δεν αποτυπώνει πάντα τις διαφορές στην πληρότητα, στο ωράριο ή στη λειτουργία του εξοπλισμού [2]. Όπου υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες, οι κανονικοποιημένοι δείκτες πρέπει να συνοδεύονται από το αντίστοιχο λειτουργικό πλαίσιο.

Η πραγματική ενεργειακή συμπεριφορά δεν ταυτίζεται με τη θεωρητική ενεργειακή απόδοση. Ένα κτίριο μπορεί να διαθέτει σύγχρονα συστήματα, αλλά να καταναλώνει περισσότερο από το αναμενόμενο λόγω παρατεταμένης λειτουργίας ή ακατάλληλων ρυθμίσεων. Αντίστροφα, η προσεκτική λειτουργική διαχείριση μπορεί να περιορίζει μέρος της κατανάλωσης ακόμη και σε εγκαταστάσεις με τεχνικούς περιορισμούς. Η διάκριση αυτή αναδεικνύει τη σημασία των πραγματικών δεδομένων, τα οποία αποτυπώνουν τι συμβαίνει κατά τη χρήση και όχι μόνο τι προβλεπόταν κατά τον σχεδιασμό [6], [10].

Η ενεργειακή ανάλυση έχει επομένως διαγνωστικό χαρακτήρα. Οι χρονοσειρές επιτρέπουν να αναγνωριστούν επαναλαμβανόμενα πρότυπα, αποκλίσεις, ασυνήθιστες αιχμές και περίοδοι μη αναμενόμενης κατανάλωσης. Η παρουσία μιας απόκλισης δεν προσδιορίζει από μόνη της την αιτία της, αλλά κατευθύνει τη διερεύνηση προς συγκεκριμένο χρόνο, χώρο ή φορτίο. Η κατανόηση αυτής της λειτουργικής εικόνας αποτελεί το απαραίτητο υπόβαθρο για τη διερεύνηση των παραγόντων που τη διαμορφώνουν.

2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή κατανάλωση

Η ενεργειακή κατανάλωση ενός κτιρίου γραφείων προκύπτει από την αλληλεπίδραση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών, των εξωτερικών συνθηκών, του τεχνικού εξοπλισμού και της πραγματικής χρήσης. Οι παράγοντες αυτοί δεν δρουν ανεξάρτητα. Μια μεταβολή στην πληρότητα, για παράδειγμα, επηρεάζει ταυτόχρονα τα εσωτερικά θερμικά κέρδη, τη χρήση του ηλεκτρονικού εξοπλισμού και τις ανάγκες των εγκαταστάσεων. Η ερμηνεία της κατανάλωσης πρέπει συνεπώς να λαμβάνει υπόψιν το συνολικό λειτουργικό πλαίσιο [2].

Το κέλυφος καθορίζει σε σημαντικό βαθμό τις θερμικές ανταλλαγές με το εξωτερικό περιβάλλον. Η θερμομόνωση των τοίχων, της οροφής και των δαπέδων περιορίζει τις θερμικές απώλειες κατά την ψυχρή περίοδο και τα ανεπιθύμητα κέρδη κατά τη θερμή. Οι θερμογέφυρες και οι ασυνέχειες της μόνωσης μπορούν να μειώσουν τη συνολική αποτελεσματικότητα, ακόμη και όταν τα κύρια δομικά στοιχεία διαθέτουν κατάλληλα υλικά [10]. Στο ελληνικό κανονιστικό πλαίσιο, οι σχετικές απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης καθορίζονται από τον KENAK και τις αντίστοιχες TOTEE [14], [15].

Τα ανοίγματα επηρεάζουν τη θερμική μετάδοση, την είσοδο ηλιακής ακτινοβολίας και τη διαθεσιμότητα φυσικού φωτισμού. Μεγάλες γυάλινες επιφάνειες μπορεί να περιορίζουν την ανάγκη τεχνητού φωτισμού, αλλά ταυτόχρονα να αυξάνουν τις απαιτήσεις ψύξης. Ο προσανατολισμός, οι ιδιότητες των υαλοπινάκων και τα μέσα σκίασης καθορίζουν το τελικό αποτέλεσμα.

Οι εξωτερικές κλιματικές συνθήκες μεταβάλλουν τα φορτία του κτιρίου. Η διαφορά μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας επηρεάζει τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης, ενώ η υγρασία καθορίζει μέρος των λανθανόντων φορτίων. Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να περιορίζει τη θέρμανση τον χειμώνα, αλλά να αυξάνει σημαντικά την ψύξη κατά τη θερμή περίοδο. Ο άνεμος επηρεάζει τις διηθήσεις και τον φυσικό αερισμό. Η τελική επίδραση των κλιματικών παραμέτρων εξαρτάται από το κέλυφος και την απόκριση των εγκαταστάσεων [10].

Η πληρότητα είναι ένας από τους κυριότερους λειτουργικούς παράγοντες. Η παρουσία ανθρώπων αυξάνει τα εσωτερικά θερμικά κέρδη ή θερμικά φορτία και συνδέεται με τη χρήση υπολογιστών, φωτισμού και άλλου εξοπλισμού. Η θεωρητική χωρητικότητα δεν ταυτίζεται πάντοτε με την πραγματική παρουσία. Η τηλεργασία, οι άδειες, οι συναντήσεις και οι μετακινήσεις του προσωπικού δημιουργούν σημαντικές ημερήσιες διακυμάνσεις, οι οποίες δεν αποτυπώνονται από ένα σταθερό πρόγραμμα [32], [35].

Το ωράριο επηρεάζει άμεσα τη διάρκεια λειτουργίας. Η ενεργοποίηση των εγκαταστάσεων πριν από την προσέλευση μπορεί να είναι αναγκαία για την προετοιμασία των χώρων, αλλά ένα σταθερό και υπερβολικά μεγάλο διάστημα προθέρμανσης ή πρόψυξης αυξάνει την κατανάλωση. Παρόμοια επίδραση έχει η διατήρηση της λειτουργίας μετά την αποχώρηση των εργαζομένων. Μικρές καθημερινές αποκλίσεις μπορούν να δημιουργήσουν σημαντική ετήσια επιβάρυνση.

Ο φωτισμός επηρεάζεται από την εγκατεστημένη ισχύ, το ωράριο, τον φυσικό φωτισμό και τον τρόπο ελέγχου. Η λειτουργία του σε κενούς χώρους προκαλεί άμεση περιττή κατανάλωση, ενώ η θερμότητα που αποδίδεται αυξάνει τα ψυκτικά φορτία. Η χρήση αποδοτικότερων φωτιστικών περιορίζει και τις δύο επιδράσεις. Παράλληλα, οι αισθητήρες

παρουσίας και φωτεινότητας μπορούν να προσαρμόζουν τη λειτουργία, εφόσον η θέση και οι ρυθμίσεις τους είναι κατάλληλες.

Ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός αποτελεί σημαντική πηγή κατανάλωσης στα γραφεία. Υπολογιστές, οθόνες, εκτυπωτές, συσκευές δικτύου και εξυπηρετητές λειτουργούν για διαφορετικές χρονικές περιόδους και μπορεί να παραμένουν σε κατάσταση αναμονής εκτός ωραρίου. Η επιβάρυνση κάθε συσκευής είναι ενδεχομένως μικρή, αλλά η συνεχής λειτουργία μεγάλου αριθμού μονάδων δημιουργεί σημαντικό συνολικό φορτίο.

Επιπλέον, συντήρηση είναι αναγκαία για τη διατήρηση της απόδοσης. Ρυπασμένα φίλτρα και διαρροές, κακή εξισορρόπηση και προβλήματα στους ανεμιστήρες αυξάνουν την απαιτούμενη ενέργεια. Ορισμένες αστοχίες δεν προκαλούν πλήρη διακοπή, αλλά σταδιακή επιδείνωση που μπορεί να παραμείνει απαρατήρητη χωρίς συστηματική παρακολούθηση [48], [49].

Οι ρυθμίσεις ελέγχου μπορούν να επιβαρύνουν ακόμη και αποδοτικό εξοπλισμό. Πολύ χαμηλά σημεία ψύξης, πολύ υψηλά σημεία θέρμανσης ή στενά όρια λειτουργίας αυξάνουν τη ζήτηση. Η ταυτόχρονη θέρμανση και ψύξη διαφορετικών ζωνών ή του ίδιου ρεύματος αέρα αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα μη αποδοτικής λειτουργίας. Οι τυποποιημένες ακολουθίες ελέγχου επιδιώκουν να περιορίσουν τέτοιες αντικρουόμενες εντολές [16].

Η συμπεριφορά των χρηστών επηρεάζει τον φωτισμό, τον εξοπλισμό, τα σημεία ρύθμισης και τη χρήση των παραθύρων. Οι ενέργειες αυτές συνδέονται συχνά με πραγματικές ανάγκες άνεσης και όχι μόνο με έλλειψη ενημέρωσης. Για παράδειγμα, το άνοιγμα ενός παραθύρου ενώ λειτουργεί η ψύξη μπορεί να υποδηλώνει ότι ο χρήστης δεν θεωρεί ικανοποιητική την εσωτερική κατάσταση. Η ανθρωποκεντρική προσέγγιση επιδιώκει να λαμβάνει υπόψιν αυτές τις ανάγκες χωρίς να οδηγεί σε ανεξέλεγκτη ενεργειακή χρήση [34], [36], [50].

Οι παράγοντες μπορούν να διακριθούν σε σχετικά σταθερούς και λειτουργικά μεταβαλλόμενους. Το κέλυφος, ο προσανατολισμός και η βασική τεχνολογία αλλάζουν μόνο μέσω τεχνικών παρεμβάσεων. Αντίθετα, το ωράριο, οι ρυθμίσεις και η λειτουργία των συστημάτων μπορούν να προσαρμοστούν συχνότερα. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, επειδή η λειτουργική βελτίωση μπορεί να προσφέρει εξοικονόμηση με

μικρότερη αρχική παρέμβαση, χωρίς να αντικαθιστά την ανάγκη για μακροχρόνιες τεχνικές αναβαθμίσεις.

2.3 Ποιότητα εσωτερικού αέρα και συγκέντρωση CO₂

Η ποιότητα του εσωτερικού αέρα αφορά την κατάσταση του αέρα σε σχέση με την παρουσία ρύπων και τις πιθανές επιδράσεις τους στους χρήστες. Στους χώρους γραφείων επηρεάζεται από τα δομικά υλικά, τα έπιπλα, τα προϊόντα καθαρισμού, τον εξοπλισμό, τις δραστηριότητες των εργαζομένων και τον εξωτερικό αέρα. Οι βασικές κατηγορίες περιλαμβάνουν αιωρούμενα σωματίδια, πτητικές οργανικές ενώσεις, βιολογικούς παράγοντες και αέρια που παράγονται στο εσωτερικό [11], [12], [31].

Η συγκέντρωση κάθε ρύπου εξαρτάται από τον ρυθμό εκπομπής, τον όγκο του χώρου και την απομάκρυνσή του. Για τον λόγο αυτό, η ποιότητα του αέρα δεν μπορεί να αποτιμηθεί πλήρως με μία μόνο μεταβλητή. Διαφορετικοί ρύποι έχουν διαφορετικές πηγές και δεν ακολουθούν απαραίτητα την ίδια χρονική συμπεριφορά. Η επιλογή των παραμέτρων παρακολούθησης πρέπει να συνδέεται με το είδος του χώρου και τον σκοπό της αξιολόγησης [21], [31].

Το διοξείδιο του άνθρακα χρησιμοποιείται ευρέως στα γραφεία ως ένδειξη της σχέσης ανάμεσα στην ανθρώπινη παρουσία και στην ανανέωση του αέρα. Παράγεται κατά την αναπνοή και τείνει να συσσωρεύεται όταν η παραγωγή του είναι μεγαλύτερη από την ποσότητα που απομακρύνεται. Η αύξησή του κατά τις ώρες χρήσης μπορεί συνεπώς να υποδεικνύει ότι ο αερισμός δεν ανταποκρίνεται επαρκώς στην πληρότητα [21], [23].

Το CO₂ δεν αποτελεί συνολικό δείκτη της ποιότητας του αέρα. Χαμηλή συγκέντρωση δεν εγγυάται ότι απουσιάζουν ρύποι από υλικά, εξοπλισμό ή εξωτερικές πηγές. Αντίστοιχα, μια αυξημένη τιμή δεν σημαίνει ότι όλοι οι υπόλοιποι ρύποι βρίσκονται σε υψηλά επίπεδα. Η χρήση του είναι περισσότερο αξιόπιστη όταν η κύρια μεταβαλλόμενη πηγή στον χώρο είναι η ανθρώπινη παρουσία [21], [31].

Η εσωτερική συγκέντρωση εξαρτάται από την εξωτερική τιμή, τον αριθμό και τη δραστηριότητα των χρηστών, τον όγκο και την ανανέωση του αέρα. Η παραγωγή ανά

άτομο δεν είναι απολύτως σταθερή, ενώ η εξωτερική συγκέντρωση μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με την τοποθεσία και τις συνθήκες. Η ίδια εσωτερική τιμή μπορεί επομένως να προκύψει από διαφορετικούς συνδυασμούς πληρότητας και αερισμού [23], [24].

Η χρονική εξέλιξη παρέχει περισσότερη πληροφορία από μια μεμονωμένη μέτρηση. Η συγκέντρωση αυξάνεται σταδιακά μετά την είσοδο των χρηστών και μειώνεται μετά την αποχώρησή τους. Η ταχύτητα της μεταβολής εξαρτάται από τον όγκο και την ανανέωση. Μια χαμηλή τιμή λίγο μετά την έναρξη της χρήσης δεν αποδεικνύει ότι ο αερισμός επαρκεί, καθώς μπορεί να μην έχει περάσει αρκετός χρόνος για τη συσσώρευση.

Η κατανομή του CO₂ δεν είναι πάντοτε ομοιόμορφη. Η γεωμετρία, η θέση των ατόμων, τα ανοίγματα και η κίνηση του αέρα μπορούν να δημιουργούν τοπικές διαφορές. Μια μέτρηση αντιπροσωπεύει κυρίως το σημείο εγκατάστασης και πρέπει να ερμηνεύεται με βάση αυτή τη συνθήκη. Η άμεση έκθεση του αισθητήρα σε εκπνεόμενο αέρα μπορεί να προκαλεί υψηλές αιχμές, ενώ η τοποθέτηση κοντά σε άνοιγμα ή στόμιο προσαγωγής μπορεί να οδηγεί σε χαμηλότερες ενδείξεις [24].

Η αξιολόγηση των δεδομένων CO₂ δεν πρέπει να βασίζεται σε έναν μόνο στατιστικό δείκτη. Η μέγιστη τιμή εντοπίζει το εντονότερο επεισόδιο, αλλά μπορεί να επηρεάζεται από μια σύντομη και μη αντιπροσωπευτική αιχμή. Η μέση τιμή περιγράφει τη συνολική περίοδο, όμως μπορεί να μειώνεται σημαντικά από τις ώρες κατά τις οποίες ο χώρος είναι κενός.

Το 95ο εκατοστημόριο αποτυπώνει το ανώτερο επίπεδο στο οποίο βρίσκεται το μεγαλύτερο μέρος των μετρήσεων, περιορίζοντας την επίδραση μεμονωμένων ακραίων τιμών [22]. Τα χρονικά ποσοστά υπέρβασης δείχνουν για πόσο διάστημα η συγκέντρωση βρίσκεται πάνω από ένα επιλεγμένο επίπεδο. Δύο χώροι μπορεί να έχουν την ίδια μέγιστη τιμή, αλλά διαφορετική διάρκεια υπέρβασης, γεγονός που οδηγεί σε διαφορετική αξιολόγηση.

Στην πρακτική χρησιμοποιούνται συχνά επίπεδα αναφοράς όπως τα 800, 1.000, 1.200 ή 1.500 ppm. Οι τιμές αυτές διευκολύνουν τη σύγκριση, αλλά δεν αποτελούν όλες απόλυτα κανονιστικά όρια ούτε διαχωρίζουν με βεβαιότητα έναν αποδεκτό από έναν επιβαρυσμένο

χώρο [21], [31]. Η σημασία τους εξαρτάται από τη διάρκεια, την εξωτερική συγκέντρωση, την πληρότητα και τον σκοπό της αξιολόγησης.

Η τιμή των 1.000 ppm χρησιμοποιείται συχνά ως πρακτικό σημείο αναφοράς. Η παρατεταμένη υπέρβασή της μπορεί να υποδεικνύει ότι η ανανέωση δεν ακολουθεί επαρκώς την ανθρώπινη παρουσία. Δεν αποτελεί όμως αυτόνομη απόδειξη κινδύνου ούτε εγγύηση συνολικής ποιότητας όταν δεν ξεπερνιέται [21], [23].

Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία συμπληρώνουν την εικόνα του εσωτερικού περιβάλλοντος, χωρίς να αποτελούν δείκτες αερισμού με τον ίδιο τρόπο. Η θερμοκρασία επηρεάζει άμεσα την αίσθηση άνεσης, ενώ πολύ χαμηλή ή υψηλή υγρασία μπορεί να συνδέεται με δυσφορία και αναφερόμενα συμπτώματα [9], [29]. Οι παράμετροι αυτές χρειάζεται να εξετάζονται χωριστά από το CO₂, ώστε να μην αποδίδονται όλες οι συνθήκες δυσφορίας σε μία μεταβλητή.

Η σχέση μεταξύ αυξημένου CO₂, υγείας και απόδοσης χρειάζεται προσεκτική ερμηνεία. Σε αρκετές περιπτώσεις, οι υψηλές συγκεντρώσεις συνυπάρχουν με ανεπαρκή ανανέωση και συσσώρευση άλλων ρύπων. Δεν είναι επομένως πάντοτε δυνατό να αποδοθούν οι παρατηρούμενες επιδράσεις αποκλειστικά στο ίδιο το αέριο. Η συνολική κατάσταση επηρεάζεται από περισσότερες παραμέτρους του εσωτερικού περιβάλλοντος [28], [30], [31].

Η συγκέντρωση CO₂ αποτελεί τελικά χρήσιμο αλλά περιορισμένο δείκτη. Η αξία της βρίσκεται στη συνεχή χρονική παρακολούθηση, στη σύγκριση διαφορετικών χώρων ή περιόδων και στον εντοπισμό συστηματικών αυξήσεων.

2.4 Απαιτούμενη παροχή αέρα και ρυθμός ανανέωσης ACH

Η απαιτούμενη παροχή εξωτερικού αέρα εκφράζει την ποσότητα που πρέπει να εισάγεται σε έναν χώρο για την απομάκρυνση των εσωτερικών ρύπων και τη διατήρηση αποδεκτών συνθηκών. Εκφράζεται συνήθως σε λίτρα ανά δευτερόλεπτο ή σε κυβικά μέτρα ανά ώρα. Η κατάλληλη τιμή εξαρτάται από την κατηγορία χρήσης, τον αριθμό των ατόμων, την επιφάνεια και τις πηγές ρύπανσης [8], [11], [12].

Στους χώρους γραφείων, ένα μέρος της απαίτησης συνδέεται με τους χρήστες. Η ανθρώπινη παρουσία δημιουργεί CO₂, οσμές, υδρατμούς και άλλες εκπομπές, επομένως η απαιτούμενη ποσότητα αυξάνεται συνήθως μαζί με την πληρότητα. Η συνιστώσα αυτή εκφράζεται συχνά ως παροχή ανά άτομο [8].

Ένα δεύτερο μέρος αφορά τις εκπομπές που σχετίζονται με τον ίδιο τον χώρο. Τα οικοδομικά υλικά, τα έπιπλα, ο λοιπός εξοπλισμός, τα υλικά καθαρισμού και οι επιφάνειες μπορεί να εκπέμπουν ουσίες ανεξάρτητα από την παρουσία ατόμων. Για τον λόγο αυτό, οι μέθοδοι σχεδιασμού συνδυάζουν συχνά μία παροχή ανά χρήστη με μία παροχή ανά μονάδα επιφάνειας [8], [11]. Ο συνδυασμός αποτρέπει την πλήρη μηδενική απαίτηση σε έναν κενό αλλά επιβαρυνόμενο χώρο.

Η παροχή ανά άτομο επιτρέπει τη σύνδεση του αερισμού με την πληρότητα, αλλά δεν λαμβάνει από μόνη της υπόψη το μέγεθος του χώρου. Αντίστοιχα, η παροχή ανά επιφάνεια δεν αποτυπώνει πλήρως τη μεταβολή που προκαλεί ο αριθμός των χρηστών. Η κοινή χρήση των δύο κριτηρίων παρέχει πιο ολοκληρωμένη βάση για τον υπολογισμό.

Ο ρυθμός ανανέωσης αέρα, ή ACH, εκφράζει πόσες φορές ανά ώρα μια ποσότητα αέρα ίση με τον συνολικό όγκο του χώρου εισέρχεται ή απομακρύνεται. Ορίζεται ως ο λόγος της ωριαίας παροχής προς τον όγκο του χώρου. Με τη σχέση αυτή, η ίδια παροχή αντιστοιχεί σε διαφορετικό ACH όταν μεταβάλλεται το μέγεθος του χώρου.

Ο δείκτης ACH διευκολύνει τη σύγκριση χώρων διαφορετικού όγκου, αλλά δεν αποτυπώνει άμεσα την ποσότητα αέρα που αντιστοιχεί σε κάθε χρήστη. Δύο χώροι με ίδιο ACH μπορεί να έχουν πολύ διαφορετική πληρότητα και συνεπώς διαφορετικές πραγματικές ανάγκες. Για τον λόγο αυτό, ο ACH και η παροχή ανά άτομο πρέπει να θεωρούνται συμπληρωματικοί δείκτες και όχι εναλλακτικές εκφράσεις της ίδιας πληροφορίας.

Η διάκριση μεταξύ απαιτούμενης, σχεδιαστικής και πραγματικής παροχής είναι ουσιώδης. Η απαιτούμενη προκύπτει από τις συνθήκες χρήσης και τα κριτήρια ποιότητας. Η σχεδιαστική αντιστοιχεί στην τιμή για την οποία επιλέχθηκε και διαστασιολογήθηκε το σύστημα. Η πραγματική είναι η ποσότητα που φτάνει στον χώρο κατά τη λειτουργία. Οι

τρεις τιμές μπορεί να διαφέρουν λόγω αλλαγών στην πληρότητα, ρυθμίσεων, προβλημάτων συντήρησης ή ανισορροπίας του δικτύου.

Η αποτελεσματικότητα του αερισμού επηρεάζεται επίσης από την κατανομή. Η υπολογισμένη συνολική ποσότητα δεν εγγυάται ότι φτάνει ομοιόμορφα σε όλες τις περιοχές. Η θέση των στομιών, η γεωμετρία και τα εμπόδια όπως ελαφρά χωρίσματα ή έπιπλα κάποιου ύψους, που μπορεί να προστέθηκαν μετά τον αρχικό σχεδιασμό του χώρου, μπορούν να δημιουργήσουν ζώνες με περιορισμένη κυκλοφορία. Η αριθμητική παροχή και η πραγματική αποτελεσματικότητα της διανομής αποτελούν συνεπώς διαφορετικές πλευρές της λειτουργίας [8], [11].

Το CO₂ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έμμεση εκτίμηση του αερισμού μέσω ισοζυγίου μάζας. Η προσέγγιση συνδέει την παραγωγή μέσα στον χώρο με τη μεταβολή της συγκέντρωσης και την απομάκρυνσή της. Η εφαρμογή απαιτεί πληροφορίες για την εξωτερική συγκέντρωση, τον αριθμό των χρηστών, την παραγωγή ανά άτομο και την ανάμειξη του αέρα [22]–[25].

Η προσέγγιση σταθερής κατάστασης θεωρεί ότι η παραγωγή και η απομάκρυνση έχουν φτάσει σε ισορροπία. Η παραδοχή δεν ισχύει πάντοτε στα γραφεία, επειδή η πληρότητα και η λειτουργία μεταβάλλονται πριν σταθεροποιηθεί η συγκέντρωση. Η μεταβατική προσέγγιση εξετάζει την αύξηση ή τη μείωση στον χρόνο, αλλά απαιτεί επαρκώς συχνές μετρήσεις και γνώση των μεταβολών στη χρήση [24], [25].

Η εκτίμηση μέσω CO₂ δεν ισοδυναμεί με άμεση μέτρηση παροχής. Η αβεβαιότητα στην παραγωγή, στην πληρότητα ή στην ανάμειξη μεταφέρεται στο αποτέλεσμα. Η άμεση μέτρηση στα στόμια ή στους αεραγωγούς παρέχει πιο συγκεκριμένη πληροφορία, αλλά απαιτεί επιτόπιο εξοπλισμό και πρόσβαση στις εγκαταστάσεις.

Ο φυσικός αερισμός παρουσιάζει μεγαλύτερη μεταβλητότητα από τον μηχανικό, επειδή επηρεάζεται από τον άνεμο, τη διαφορά θερμοκρασίας, το μέγεθος και τη θέση των ανοιγμάτων. Ο ACH μπορεί να αλλάζει σημαντικά χωρίς μεταβολή του αριθμού των χρηστών. Σε χώρους όπου συνδυάζονται παράθυρα, μηχανικός αερισμός και διηθήσεις από χαραμάδες, η συνολική ανανέωση προκύπτει από περισσότερους μηχανισμούς και δεν είναι πάντοτε δυνατή η απομόνωση της συμβολής τους [25].

Η παροχή συνδέεται με την ενεργειακή κατανάλωση, επειδή ο εξωτερικός αέρας συχνά χρειάζεται θερμική επεξεργασία. Ωστόσο, η συγκεκριμένη ενεργειακή επίδραση εξαρτάται από τις εξωτερικές συνθήκες, την ανάκτηση θερμότητας και τον εξοπλισμό. Στην παρούσα θεωρητική ενότητα το ενδιαφέρον περιορίζεται στον καθορισμό και στην ερμηνεία της απαιτούμενης ποσότητας. Οι ειδικοί υπολογισμοί των σεναρίων και των πρόσθετων αναγκών ανήκουν στη μεθοδολογία της έρευνας.

2.5 Συστήματα παρακολούθησης ενέργειας και εσωτερικού περιβάλλοντος

Τα συστήματα παρακολούθησης συλλέγουν και οργανώνουν τις πληροφορίες που απαιτούνται για την αξιολόγηση της πραγματικής λειτουργίας. Αποτελούνται από τους μετρητές ή αισθητήρες, την υποδομή επικοινωνίας, το μέσο αποθήκευσης και το λογισμικό απεικόνισης ή επεξεργασίας. Η αξιοπιστία της τελικής πληροφορίας εξαρτάται από όλα τα επιμέρους στάδια και όχι μόνο από την ονομαστική ακρίβεια της συσκευής [19], [20].

Οι ενεργειακοί μετρητές μπορεί να καταγράφουν σωρευτική ενέργεια, μέση ισχύ και πρόσθετα ηλεκτρικά μεγέθη. Η κεντρική μέτρηση παρέχει τη συνολική εικόνα, ενώ η μέτρηση ανά όροφο, ζώνη ή σύστημα διευκολύνει τον εντοπισμό της προέλευσης μιας μεταβολής.

Η σωστή αντιστοίχιση του μετρητή με τα φορτία που καταγράφει είναι απαραίτητη. Όταν μία γραμμή τροφοδοτεί διαφορετικές τελικές χρήσεις, η κατανάλωση δεν μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά σε μία από αυτές. Η τεκμηρίωση της ηλεκτρικής διάταξης και των ονομασιών περιορίζει τον κίνδυνο λανθασμένης ερμηνείας.

Η χρονική ανάλυση καθορίζει πόσο λεπτομερώς αποτυπώνονται οι μεταβολές. Οι μηνιαίες καταγραφές είναι κατάλληλες για γενικές συγκρίσεις, ενώ οι ωριαίες ή συχνότερες τιμές επιτρέπουν την αναγνώριση ημερήσιων προτύπων και αιχμών. Η υψηλότερη συχνότητα δημιουργεί μεγαλύτερο όγκο δεδομένων και απαιτεί πιο συστηματική αποθήκευση και επεξεργασία.

Η χρονική σήμανση πρέπει να είναι ακριβής και κοινή μεταξύ των συσκευών. Λανθασμένη ρύθμιση ώρας, διαφορετικές ζώνες ώρας και αλλαγές θερινής ώρας μπορούν να μετατοπίσουν τις χρονοσειρές. Το πρόβλημα γίνεται ιδιαίτερα σημαντικό όταν επιχειρείται συνδυασμός ενεργειακών και περιβαλλοντικών δεδομένων, καθώς η σύγκριση διαφορετικών χρονικών στιγμών μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα.

Οι περιβαλλοντικοί αισθητήρες καταγράφουν μεταβλητές όπως CO₂, θερμοκρασία και σχετική υγρασία. Η θέση τους πρέπει να αντιπροσωπεύει τη βασική ζώνη χρήσης και να αποφεύγει άμεση ηλιακή ακτινοβολία, πηγές θερμότητας, ανοίγματα και στόμια αέρα. Η τοπική επίδραση μπορεί να δημιουργεί τιμές που δεν αντιστοιχούν στη γενική κατάσταση του χώρου [21], [22].

Η φορητή παρακολούθηση επιτρέπει τη χρήση της ίδιας συσκευής σε πολλούς χώρους, περιορίζοντας τις διαφορές μεταξύ αισθητήρων. Οι χώροι όμως, καταγράφονται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και επομένως οι συγκρίσεις δεν πραγματοποιούνται υπό ταυτόσημες συνθήκες. Η σταθερή εγκατάσταση πολλών αισθητήρων επιτρέπει ταυτόχρονη μέτρηση, αλλά απαιτεί έλεγχο της μεταξύ τους συμφωνίας.

Η επικοινωνία μπορεί να πραγματοποιείται ενσύρματα ή ασύρματα. Οι ασύρματες λύσεις είναι ευκολότερες σε υφιστάμενα κτίρια, αλλά επηρεάζονται από την κάλυψη δικτύου WiFi, τις μπαταρίες και τις διακοπές μετάδοσης. Η ύπαρξη τοπικής μνήμης περιορίζει την απώλεια δεδομένων, εφόσον οι τιμές αποθηκεύονται μέχρι να αποκατασταθεί η σύνδεση.

Η αποθήκευση μπορεί να γίνεται σε τοπικά αρχεία, κεντρικές βάσεις ή υπηρεσίες νέφους. Ανεξάρτητα από τη μορφή, κάθε μεταβλητή πρέπει να συνοδεύεται από ξεκάθαρη ονομασία, μονάδα, χρονική σήμανση και πληροφορία για την πηγή. Η διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συσκευών είναι σημαντική, επειδή οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν συχνά διαφορετικές μορφές και πρωτόκολλα [19], [20].

Τα συστήματα διαχείρισης κτιρίου συγκεντρώνουν τις μετρήσεις και μπορούν να παρουσιάζουν την κατάσταση του εξοπλισμού, τις εντολές και τα ιστορικά δεδομένα. Η ύπαρξή τους δεν εξασφαλίζει από μόνη της αποτελεσματική λειτουργία. Απαιτούνται κατανοητές ονομασίες, σωστά διαμορφωμένα σημεία και τακτική αξιοποίηση των πληροφοριών [13], [20].

Η ποιότητα των δεδομένων πρέπει να ελέγχεται πριν από την ανάλυση. Κενές ή διπλές εγγραφές, μη ρεαλιστικές τιμές, αλλαγές μονάδων και χρονικές ασυνέχειες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα [46]. Τα κενά δεν πρέπει να συμπληρώνονται εξωσυστημικά, καθώς η αξιοπιστία της εκτίμησης εξαρτάται από τη διάρκειά τους και από τη συμπεριφορά της μεταβλητής.

Οι ακραίες τιμές χρειάζονται επίσης διερεύνηση. Μια ασυνήθιστη παρατήρηση μπορεί να αποτελεί σφάλμα, αλλά μπορεί να καταγράφει πραγματική αιχμή ή έκτακτο γεγονός. Η αυτόματη διαγραφή όλων των ακραίων τιμών μπορεί να αφαιρέσει χρήσιμη πληροφορία. Ο έλεγχος πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη συνέχεια της χρονοσειράς, τα φυσικά όρια και τις ταυτόχρονες μεταβολές άλλων παραμέτρων.

Η διατήρηση των δεδομένων εξασφαλίζει τη δυνατότητα επανελέγχου. Οι καθαρισμένες και επεξεργασμένες εκδοχές πρέπει να αποθηκεύονται χωριστά και να συνοδεύονται από τεκμηρίωση των μετατροπών. Η ιχνηλασιμότητα αυτή είναι απαραίτητη ώστε κάθε αποτέλεσμα να μπορεί να συνδεθεί με την αρχική του πηγή.

Η παρακολούθηση μπορεί να υποστηρίξει την ανίχνευση λειτουργικών αποκλίσεων, αλλά δεν αντικαθιστά την τεχνική διάγνωση. Μια αύξηση της κατανάλωσης μπορεί να οφείλεται σε βλάβη ή σε πραγματική αλλαγή της χρήσης. Παρόμοια, μια σταθερή ένδειξη μπορεί να σημαίνει σταθερές συνθήκες ή αισθητήρα που έχει πάψει να αποκρίνεται. Η επιβεβαίωση απαιτεί συνδυασμό δεδομένων και, όπου χρειάζεται, επιτόπιο έλεγχο [48], [49].

Η αξία των συστημάτων παρακολούθησης δεν καθορίζεται από τον όγκο των δεδομένων, αλλά από την αξιοπιστία και τη δυνατότητα αξιοποίησής τους. Η κατάλληλη χωρική κάλυψη, η συχνότητα καταγραφής, ο συγχρονισμός και η τεκμηρίωση αποτελούν τις βασικές προϋποθέσεις για τη μετατροπή των μετρήσεων σε λειτουργική πληροφορία.

2.6 Στρατηγικές ελέγχου αερισμού και εξοικονόμησης ενέργειας

Οι στρατηγικές ελέγχου του αερισμού καθορίζουν πότε και με ποια ένταση λειτουργεί το σύστημα. Ο στόχος είναι η προσαρμογή της παροχής στις πραγματικές ανάγκες, ώστε να αποφεύγονται τόσο η ανεπαρκής ανανέωση όσο και η περιττή ενεργειακή επιβάρυνση. Οι βασικές προσεγγίσεις διαφέρουν ως προς την πληροφορία που χρησιμοποιούν και τον βαθμό προσαρμογής τους [26], [27].

Η απλούστερη μορφή είναι η σταθερή λειτουργία. Το σύστημα παρέχει προκαθορισμένη ποσότητα αέρα χωρίς να λαμβάνει υπόψιν τις μεταβολές της πληρότητας ή των εσωτερικών συνθηκών. Η προσέγγιση είναι εύκολη στην εφαρμογή και δεν εξαρτάται από αισθητήρες. Όταν έχει σχεδιαστεί για τη μέγιστη αναμενόμενη χρήση, μπορεί να παρέχει επαρκές περιθώριο αερισμού.

Το βασικό μειονέκτημα είναι ότι η πραγματική χρήση σπάνια παραμένει συνεχώς στη μέγιστη τιμή. Η πλήρης παροχή σε χώρο με λίγους χρήστες ή σε κενό χώρο προκαλεί περιττή λειτουργία. Το ενεργειακό μειονέκτημα γίνεται μεγαλύτερο όταν ο εξωτερικός αέρας χρειάζεται έντονη θέρμανση, ψύξη ή αφύγρανση [26].

Ο έλεγχος βάσει ωραρίου περιορίζει τη λειτουργία σε προκαθορισμένες εργάσιμες περιόδους. Μπορεί να διαφοροποιείται ανά ημέρα και να λαμβάνει υπόψιν Σαββατοκύριακα και αργίες. Η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται από την αντιστοιχία του προγράμματος με την πραγματική χρήση. Ένα υπερβολικά διευρυμένο ωράριο δημιουργεί περιττή λειτουργία, ενώ ένα περιορισμένο πρόγραμμα μπορεί να μην καλύπτει πρόωρη προσέλευση ή έκτακτη παραμονή.

Ο χρονικός έλεγχος δεν διαθέτει άμεση ανατροφοδότηση από τον χώρο. Εκτελεί το πρόγραμμα ακόμη και όταν η πληρότητα διαφέρει από την αναμενόμενη. Παρ' όλα αυτά, αποτελεί σημαντική βελτίωση σε σχέση με τη συνεχή λειτουργία, ιδίως όταν η χρήση είναι σταθερή και προβλέψιμη.

Ο αερισμός βάσει ζήτησης χρησιμοποιεί μια μετρούμενη μεταβλητή για να προσαρμόζει τη λειτουργία. Στα γραφεία, το CO₂ αποτελεί το συνηθέστερο μέσο, επειδή σχετίζεται με την ανθρώπινη παρουσία. Η παροχή ή η κατάσταση λειτουργίας μεταβάλλεται όταν η συγκέντρωση πλησιάζει ή υπερβαίνει ένα επιλεγμένο επίπεδο [26], [27].

Στον απλό έλεγχο δύο καταστάσεων, το σύστημα ενεργοποιείται πάνω από ένα όριο και περιορίζεται ή διακόπτεται όταν η συγκέντρωση μειωθεί. Η χρήση διαφορετικού ορίου ενεργοποίησης και απενεργοποίησης δημιουργεί υστέρηση και αποτρέπει τις συχνές εναλλαγές όταν η τιμή κινείται κοντά στο σημείο ελέγχου.

Στον αναλογικό έλεγχο, η παροχή μεταβάλλεται σταδιακά μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής. Η προσέγγιση απαιτεί εξοπλισμό που υποστηρίζει μεταβλητή λειτουργία, όπως ανεμιστήρες μεταβλητών στροφών ή ρυθμιζόμενα διαφράγματα. Μπορεί να προσφέρει πιο ομαλή απόκριση και μεγαλύτερη εξοικονόμηση σε σύγκριση με τη συνεχή πλήρη παροχή.

Η χρονική καθυστέρηση του CO₂ αποτελεί σημαντικό περιορισμό. Η συγκέντρωση δεν αυξάνεται ακαριαία κατά την είσοδο των χρηστών, ενώ η επίδραση της αυξημένης παροχής χρειάζεται χρόνο για να γίνει εμφανής. Ένας έλεγχος που αντιδρά μόνο όταν έχει ήδη εμφανιστεί μεγάλη αύξηση μπορεί να καθυστερεί να καλύψει την ανάγκη. Τα όρια και οι χρονικές καθυστερήσεις πρέπει επομένως να επιλέγονται με βάση τη δυναμική του χώρου [21], [26].

Η στρατηγική βάσει CO₂ εξαρτάται από την αξιοπιστία της μέτρησης. Σφάλματα βαθμονόμησης ή μη αντιπροσωπευτική θέση μπορούν να προκαλέσουν υπερβολική ή ανεπαρκή λειτουργία. Επιπλέον, το CO₂ δεν αντιπροσωπεύει όλους τους ρύπους. Για τον λόγο αυτό, ο έλεγχος δεν πρέπει να καταργεί τις ελάχιστες απαιτήσεις που σχετίζονται με τις χρήσεις και τις εκπομπές του κτιρίου [8], [11].

Ο συνδυασμός ωραρίου και CO₂ χρησιμοποιεί δύο επίπεδα πληροφορίας. Το ωράριο καθορίζει τις περιόδους κατά τις οποίες αναμένεται χρήση και το CO₂ προσαρμόζει τη λειτουργία στις πραγματικές συνθήκες. Έτσι αποφεύγεται η πλήρης λειτουργία σε όλη τη διάρκεια του προγράμματος, ενώ παράλληλα περιορίζεται η ενεργοποίηση εκτός των κανονικών περιόδων.

Η συνδυασμένη στρατηγική χρειάζεται πρόβλεψη για τις έκτακτες χρήσεις. Η παρουσία εκτός ωραρίου μπορεί να καλύπτεται μέσω χειροκίνητης παράτασης ή αισθητήρα παρουσίας ή ειδικής εντολής υπερίσχυσης. Η χειροκίνητη εντολή πρέπει να έχει περιορισμένη διάρκεια, ώστε το σύστημα να επιστρέφει αυτόματα στην κανονική λειτουργία [16].

Οι στρατηγικές που χρησιμοποιούν άμεση πληροφορία πληρότητας μπορούν να προσαρμόζουν τη λειτουργία ανάλογα με το αν και πόσα άτομα βρίσκονται στον χώρο. Η πληροφορία μπορεί να προέρχεται από αισθητήρες παρουσίας, μετρητές εισόδου,

κρατήσεις ή έμμεσες εκτιμήσεις που βασίζονται στο CO₂ και σε άλλα δεδομένα αισθητήρων [34], [35], [38], [39]. Οι λύσεις αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε αίθουσες συσκέψεων και χώρους με ακανόνιστη χρήση.

Η ανθρωποκεντρική λειτουργία επεκτείνει την προσαρμογή σε επίπεδο ζώνης και πραγματικών αναγκών [32], [33]. Προϋποθέτει ότι το σύστημα διαθέτει την τεχνική δυνατότητα να διαφοροποιεί την παροχή ή τις ρυθμίσεις ανά χώρο [36], [50]. Η εφαρμογή περιορίζεται όταν όλος ο όροφος εξυπηρετείται από κοινό σύστημα [32], [36], [50].

Πιο προηγμένες προσεγγίσεις χρησιμοποιούν προβλέψεις πληρότητας, εξωτερικών συνθηκών ή συγκεντρώσεων, ώστε να προσαρμόζουν τη λειτουργία πριν από την εμφάνιση της ανάγκης. Ο προγνωστικός έλεγχος μπορεί να συνδυάζει ενεργειακούς στόχους με περιορισμούς ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος [37], [40]–[42]. Οι μέθοδοι αυτές απαιτούν περισσότερα δεδομένα, κατάλληλα μοντέλα και αυξημένη υπολογιστική υποδομή.

Οι τεχνικές μηχανικής ή ενισχυτικής μάθησης προσφέρουν πρόσθετες δυνατότητες, αλλά η εφαρμογή τους συνοδεύεται από ανάγκη εκπαίδευσης, επανελέγχου και μηχανισμών ασφαλείας [43], [45]. Για ένα υφιστάμενο κτίριο, η πολυπλοκότητα της στρατηγικής πρέπει να είναι ανάλογη των διαθέσιμων αισθητήρων, των δυνατοτήτων του εξοπλισμού και του αναμενόμενου οφέλους.

Η απόδοση μιας στρατηγικής δεν αξιολογείται μόνο από τη συνολική εξοικονόμηση. Πρέπει να εξετάζονται ο χρόνος λειτουργίας, η κατανάλωση, οι συγκεντρώσεις CO₂ και η διάρκεια των υπερβάσεων. Μια λύση που μειώνει σημαντικά την κατανάλωση αλλά προκαλεί παρατεταμένα αυξημένα επίπεδα δεν θεωρείται κατάλληλη. Αντίστοιχα, μια στρατηγική που διατηρεί συνεχώς πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις μπορεί να χρησιμοποιεί περισσότερο αέρα και αντίστοιχα λειτουργία εξοπλισμού και κατανάλωσης ενέργειας από όσο πραγματικά απαιτείται.

Η σύγκριση διαφορετικών στρατηγικών προϋποθέτει κοινή γραμμή βάσης, ίδιες χρονικές περιόδους και σταθερές παραδοχές [17], [18]. Με αυτόν τον τρόπο, οι διαφορές μπορούν να αποδοθούν στη λογική ελέγχου και όχι σε αλλαγές των αρχικών δεδομένων. Οι ακριβείς

κανόνες, τα όρια και οι υπολογισμοί αποτελούν μέρος της μεθοδολογικής εφαρμογής και όχι του γενικού θεωρητικού πλαισίου.

Οι βασικές στρατηγικές σχηματίζουν τελικά μια διαδοχή από την απλή προς την περισσότερο προσαρμοζόμενη λειτουργία. Η σταθερή παροχή δεν χρησιμοποιεί πληροφορία από τον χώρο, το ωράριο βασίζεται στην αναμενόμενη χρήση, ο έλεγχος CO₂ ανταποκρίνεται στις μετρούμενες συνθήκες και ο συνδυασμός τους αξιοποιεί τόσο το πρόγραμμα όσο και την πραγματική ανάγκη. Η επιλογή της καταλληλότερης προσέγγισης εξαρτάται από τη μεταβλητότητα της χρήσης, τις τεχνικές δυνατότητες και την ισορροπία μεταξύ ενεργειακής απόδοσης και ποιότητας του εσωτερικού αέρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

3.1 Περιγραφή του κτιρίου

3.1.1 Μελέτη περίπτωσης

Η μελέτη περίπτωσης αφορά ένα πολυώροφο κτίριο γραφείων. Η ονομασία, η τοποθεσία και τα στοιχεία του φορέα διαχείρισης δεν αναφέρονται, ώστε να διατηρηθεί η ανωνυμία του κτιρίου. Η έρευνα εστιάζει στη λειτουργία του και όχι στην ταυτοποίηση της εγκατάστασης.

Το κτίριο χρησιμοποιείται για δραστηριότητες γραφείου και περιλαμβάνει περισσότερα επίπεδα με ξεχωριστές ηλεκτρικές καταγραφές. Η διαθέσιμη πληροφορία προέρχεται από τα συστήματα μέτρησης και από μετρητή εσωτερικού περιβάλλοντος. Τα λειτουργικά δεδομένα μπορούν να δώσουν ξεκάθαρη εικόνα της πραγματικής χρήσης από μια αξιολόγηση που βασίζεται μόνο σε θεωρητικές παραδοχές [19]. Η συνεχής παρακολούθηση είναι επίσης σημαντική για τον εντοπισμό διαφορών μεταξύ περιόδων και επιμέρους περιοχών [20].

Το κτίριο εξετάζεται ως λειτουργική μονάδα μέσα από τις καταγεγραμμένες καταναλώσεις και τις μετρήσεις του εσωτερικού περιβάλλοντος. Η προσέγγιση αυτή είναι συμβατή με τον σκοπό της εργασίας, ο οποίος αφορά την ανάλυση της πραγματικής λειτουργίας και τη σύγκριση στρατηγικών ελέγχου.

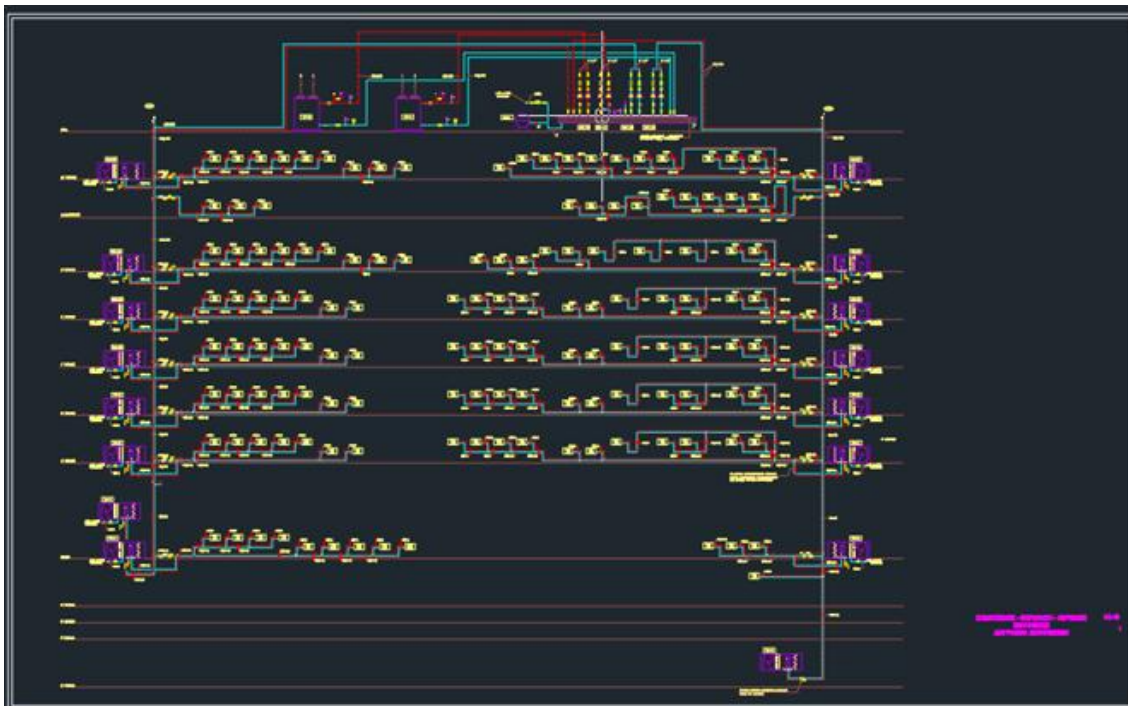
Η μελέτη δεν επιχειρεί να αποδώσει κάθε μεταβολή σε συγκεκριμένο τεχνικό σύστημα. Μια μέτρηση ανά όροφο μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερες τελικές χρήσεις. Επομένως, η ερμηνεία στηρίζεται στα πρότυπα των καταγραφών και όχι σε μη τεκμηριωμένη κατανομή της ενέργειας σε φωτισμό, εξοπλισμό ή κλιματισμό.

3.1.2 Κλιματισμός – Θέρμανση – Αερισμός

Ο κλιματισμός και η θέρμανση του κτιρίου επιτυγχάνεται μέσω δύο αντλιών θερμότητας τοποθετημένες στο μηχανοστάσιο του δώματος του κτιρίου. Οι αντλίες θερμότητας καλύπτουν τις ανάγκες κλιματισμού του κτιρίου με 30% εφεδρεία και παράγουν ψυχρό νερό 7-12 °C το καλοκαίρι και θερμό νερό 40-45 °C το χειμώνα. Οι Α/Θ τροφοδοτούν με

θερμό και ψυχρό νερό τις Κεντρικές Κλιματιστικές Μονάδες που βρίσκονται στον κάθε όροφο και προσάγουν προκλιματισμένο νωπό αέρα στους χώρους μέσω αεραγωγών και στομιών που βρίσκονται στο ψευδοδάπεδο του κτιρίου, καθώς και τις μονάδες ανεμιστήρα – στοιχείου (Fan Coil Units) που βρίσκονται στους χώρους των γραφείων και ελέγχονται χειροκίνητα με ρύθμιση τοπικού θερμοστάστη του FCU από τους χρήστες του κτιρίου. Η έναυση λειτουργίας των κεντρικών κλιματιστικών μονάδων, καθώς και των FCU, έχει σχεδιαστεί να γίνεται στην αρχή και τέλος του ωραρίου εργασίας μέσω κεντρικού περιστροφικού διακόπτη στον υποπίνακα του κάθε ορόφου. Επιπλέον, υπάρχουν και αυτόνομα κλιματιστικά διαιρούμενου τύπου (Split Units) για συγκεκριμένους μηχανολογικούς χώρους.

Για τον εξαερισμό του κτιρίου, υπάρχουν φυγοκεντρικοί και αξονικοί ανεμιστήρες απαγωγής σε κάθε όροφο και στα WC που απάγουν τον αέρα και τον απορρίπτουν στο περιβάλλον χώρο του δώματος μέσω δικτύου αεραγωγών. Η έναυση λειτουργίας των ανεμιστήρων απαγωγής γίνεται στην αρχή και τέλος του ωραρίου εργασίας μέσω του κεντρικού περιστροφικού διακόπτη στον υποπίνακα του κάθε ορόφου που ελέγχει και τα συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού.



Εικόνα 1. Διάγραμμα σωληνώσεων κλιματισμού κτιρίου.

3.2 Διάρθρωση ορόφων και χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων χώρων

Τα αρχεία ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν ξεχωριστές καταγραφές για το ισόγειο, τον ημιόροφο, τον πρώτο, τον δεύτερο, τον τρίτο, τον τέταρτο, τον πέμπτο και τον έβδομο όροφο. Για τον έκτο όροφο δεν εμφανίζεται μετρητής και έτσι επομένως, δεν εντάσσεται στην κύρια ανάλυση.

Οι καταγραφές του πέμπτου ορόφου είναι επίσης περιορισμένες και δεν καλύπτουν συνεχόμενα το συνολικό διάστημα. Ο όροφος διατηρείται στο σύνολο δεδομένων, αλλά η διαθεσιμότητά του διακρίνεται από εκείνη των υπόλοιπων επιπέδων. Η ειδική αυτή περίπτωση λαμβάνεται υπόψιν κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, ώστε να μην πραγματοποιούνται άμεσες συγκρίσεις μη ισοδύναμων περιόδων.

Η διάκριση της κατανάλωσης ανά επίπεδο επιτρέπει τη χωρική εξέταση του κτιρίου. Η μέτρηση μπορεί να δείξει ποιο τμήμα συμμετέχει περισσότερο στη συνολική χρήση [19], χωρίς όμως να εξηγεί από μόνη της την αιτία μιας διαφοράς. Η επιφάνεια, το ωράριο, η πληρότητα και ο εξοπλισμός κάθε ορόφου δεν είναι πλήρως διαθέσιμα. Για τον λόγο αυτό, οι όροφοι συγκρίνονται αρχικά ως ξεχωριστές μετρητικές μονάδες και όχι ως πλήρως όμοιοι χώροι [20].

Η παρακολούθηση του εσωτερικού περιβάλλοντος πραγματοποιήθηκε σε δεκατρείς χώρους. Για λόγους ανωνυμίας και επειδή δεν παρέχονται αναλυτικές ονομασίες, οι χώροι συμβολίζονται ως Χώρος 1 έως Χώρος 13. Κάθε χώρος αντιστοιχεί σε ξεχωριστή περίοδο καταγραφής.

Τα διαθέσιμα αρχεία δεν περιλαμβάνουν ασφαλή αντιστοίχιση κάθε εξεταζόμενου χώρου με συγκεκριμένο όροφο. Δεν παρέχουν επίσης τις πραγματικές διαστάσεις, τον ακριβή όγκο ή συνεχή καταγραφή του αριθμού των χρηστών. Επομένως, δεν πραγματοποιείται αυθαίρετη σύνδεση των δεκατριών χώρων με τις ενεργειακές μετρήσεις συγκεκριμένων ορόφων.

Η πραγματική πληρότητα έχει ιδιαίτερη σημασία για τη λειτουργία ενός γραφείου [32], αλλά δεν πρέπει να αντικαθίσταται από μη τεκμηριωμένες εκτιμήσεις. Για τον λόγο αυτό, τα μεγέθη των χώρων και ο αριθμός των ατόμων θα εξεταστούν αργότερα μέσα από σενάρια.

3.3 Σύστημα μέτρησης ηλεκτρικής ενέργειας

Η ηλεκτρική κατανάλωση καταγράφηκε από ανεξάρτητους μετρητές που αντιστοιχούν στα διαθέσιμα επίπεδα του κτιρίου. Κάθε μετρητής αναγνωρίζεται από μοναδικό σειριακό αριθμό. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τον διαχωρισμό της κατανάλωσης ανά όροφο, χωρίς όμως περαιτέρω διάκριση ανά τελική χρήση

Οι καταγραφές διατίθενται ως ωριαία ενέργεια σε kWh. Κάθε ημερήσια γραμμή περιλαμβάνει μία τιμή για καθεμία από τις 24 ώρες, από τις 00:00 έως τις 23:00. Στο τέλος της γραμμής υπάρχει το ημερήσιο άθροισμα. Η μορφή αυτή διατηρεί τόσο την ημερήσια συνολική εικόνα όσο και τη δυνατότητα εξέτασης των ωριαίων μεταβολών.

Η μονάδα των αρχείων είναι η kWh και εκφράζει την ενέργεια που καταναλώθηκε μέσα σε κάθε ώρα. Δεν πρόκειται για στιγμιαία μέτρηση ισχύος. Η διάκριση αυτή διατηρείται σε ολόκληρη την εργασία, ώστε οι τιμές να μην παρουσιάζονται λανθασμένα ως kW.

Οι μετρήσεις ανά επίπεδο είναι συγκεντρωτικές. Δεν υπάρχουν ξεχωριστοί μετρητές για τον φωτισμό, τον εξοπλισμό, την ψύξη ή τον αερισμό. Η υπομέτρηση ανά όροφο προσφέρει χρήσιμη χωρική πληροφορία [19], αλλά η απόδοση μιας μεταβολής σε συγκεκριμένη τελική χρήση θα απαιτούσε πρόσθετα σημεία μέτρησης [20].

Τα δεδομένα ήταν σε δύο διαδοχικά αρχεία. Το πρώτο καλύπτει την περίοδο μέχρι το τέλος Φεβρουαρίου 2026 και το δεύτερο τους μήνες Μάρτιο και Απρίλιο 2026. Η ίδια ονομασία και ο ίδιος σειριακός αριθμός χρησιμοποιούνται για κάθε κύριο μετρητή και στα δύο αρχεία. Αυτό επιτρέπει τη χρονική συνέχεια των αντίστοιχων σειρών.

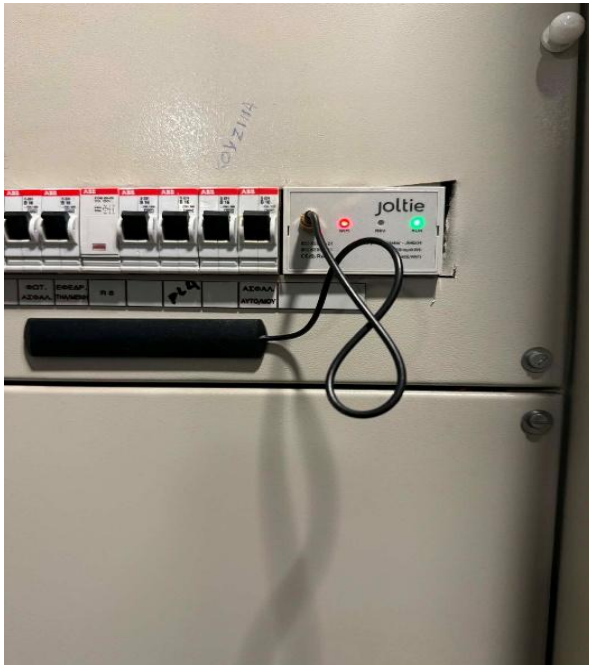
Η χρήση σταθερών σημείων μέτρησης είναι βασική για τη σύγκριση διαφορετικών περιόδων [17]. Παράλληλα, η επαλήθευση της ταυτότητας κάθε μετρητή περιορίζει τον κίνδυνο να ενωθούν δεδομένα από διαφορετικές ηλεκτρικές γραμμές. Η αρχή αυτή είναι απαραίτητη όταν τα δεδομένα χρησιμοποιούνται αργότερα για την αξιολόγηση πιθανών εξοικονομήσεων [18].



Εικόνα 2. Πλατφόρμα καταγραφής κατανάλωσης ενέργειας (kWh).



Εικόνα 3. Πλατφόρμα καταγραφής κατανάλωσης ενέργειας (kWh).



Εικόνα 4. Διάταξη μετρητή σε υποπίνακα 3ου ορόφου.

3.4 Μετρήσεις CO₂, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας

Οι συνθήκες του εσωτερικού περιβάλλοντος καταγράφηκαν με φορητή συσκευή Aranet4. Το αρχείο περιλαμβάνει τη χρονική σήμανση, τη συγκέντρωση CO₂ σε ppm, τη θερμοκρασία σε °C, τη σχετική υγρασία σε ποσοστό και την ατμοσφαιρική πίεση.

Η παρούσα εργασία χρησιμοποιεί τις μετρήσεις CO₂, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Η ατμοσφαιρική πίεση διατηρείται στο αρχείο, αλλά δεν αποτελεί βασική μεταβλητή των ερευνητικών ερωτημάτων. Για τον λόγο αυτό, δεν εντάσσεται στην κύρια ανάλυση.

Το αρχείο περιλαμβάνει συνολικά 25.246 εγγραφές. Η ονομαστική απόσταση μεταξύ των περισσότερων διαδοχικών μετρήσεων είναι πέντε λεπτά. Η συχνότητα αυτή προσφέρει αρκετή λεπτομέρεια για την παρακολούθηση της μεταβολής του CO₂ μέσα στην ημέρα [21]. Επιτρέπει επίσης την καταγραφή βραχύτερων μεταβολών που θα χάνονταν σε ένα ωριαίο αρχείο [22].

Η ίδια φορητή συσκευή χρησιμοποιήθηκε διαδοχικά στους δεκατρείς χώρους. Η παρακολούθηση κάθε χώρου είχε διάρκεια περίπου μία εβδομάδα. Μετά το τέλος κάθε περιόδου, η συσκευή μεταφερόταν στον επόμενο χώρο. Η διαδικασία αυτή εξασφαλίζει ότι οι χώροι καταγράφηκαν με τον ίδιο εξοπλισμό.

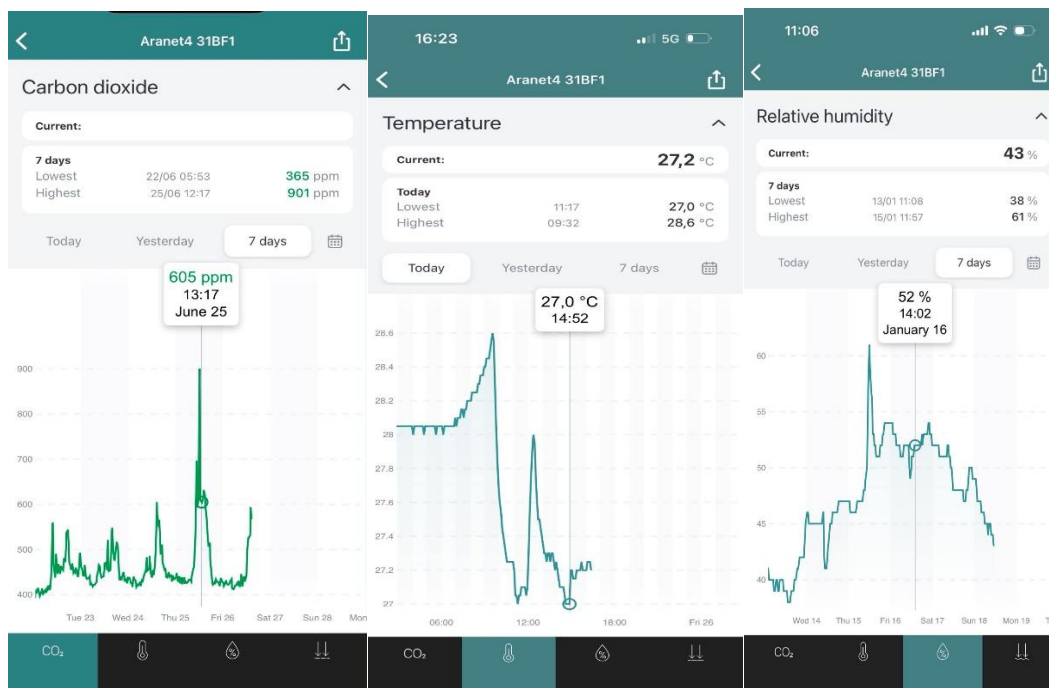
Η χρήση μίας συσκευής μειώνει τις αποκλίσεις που θα μπορούσαν να προκύψουν από διαφορετικούς αισθητήρες. Ωστόσο, οι χώροι δεν παρακολουθήθηκαν ταυτόχρονα. Οι εξωτερικές συνθήκες, η χρήση και η πληρότητα μπορεί να διέφεραν μεταξύ των εβδομάδων. Επομένως, οι συγκρίσεις αφορούν τις συγκεκριμένες περιόδους και δεν θεωρούνται ταυτόχρονες μετρήσεις υπό ίδιες συνθήκες.

Δεν υπήρχε ανεξάρτητο αρχείο καταμέτρησης των χρηστών. Το CO₂ δεν χρησιμοποιείται ως άμεση μέτρηση του αριθμού των ατόμων, καθώς η τιμή του εξαρτάται και από τον αερισμό και την προηγούμενη κατάσταση του χώρου [21], [23]. Η απουσία πραγματικών δεδομένων πληρότητας λαμβάνεται υπόψιν στον τρόπο με τον οποίο διαμορφώνονται τα μεταγενέστερα σενάρια.

Οι μετρήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας προέρχονται από την ίδια χρονική στιγμή με τις τιμές CO₂. Αυτό επιτρέπει την κοινή περιγραφή των βασικών συνθηκών σε κάθε χώρο. Η θερμοκρασία αποτελεί βασική παράμετρο του εσωτερικού περιβάλλοντος [9], ενώ η σχετική υγρασία παρέχει συμπληρωματική πληροφορία για τη λειτουργική κατάσταση των χώρων [29].



Εικόνα 5. Όργανο μέτρησης ποιότητας αέρα Aranet4.



Εικόνα 6. Καταγραφή ποιότητας αέρα με Aranet4.

3.5 Περίοδος και διαδικασία συλλογής δεδομένων

Η καταγραφή ηλεκτρικής ενέργειας, αρχίζει στις 17 Ιουνίου 2025. Το πρώτο ενεργειακό αρχείο ολοκληρώνεται στις 28 Φεβρουαρίου 2026. Το δεύτερο συνεχίζει από την 1η Μαρτίου έως τις 30 Απριλίου 2026. Η συνολική ημερολογιακή περίοδος είναι επομένως από τις 17 Ιουνίου 2025 έως τις 30 Απριλίου 2026.

Για το ισόγειο, τον ημιώροφο, τον πρώτο, τον δεύτερο, τον τρίτο, τον τέταρτο και τον έβδομο όροφο υπάρχουν ημερήσιες γραμμές για ολόκληρο το διάστημα. Η περίοδος περιλαμβάνει 318 συνεχόμενες ημερομηνίες. Για κάθε ημερομηνία διατίθενται 24 ωριαία πεδία.

Η καταγραφή του πέμπτου ορόφου δεν ακολουθεί την ίδια συνέχεια. Στο πρώτο αρχείο υπάρχουν δεκατρείς ημερομηνίες, οι περισσότερες από τις οποίες βρίσκονται στον Οκτώβριο 2025. Στο δεύτερο αρχείο υπάρχει μία ακόμη ημερομηνία, στις 31 Μαρτίου 2026. Επομένως, ο πέμπτος όροφος διαθέτει συνολικά δεκατέσσερις ημερήσιες καταγραφές και δεν καλύπτει την πλήρη περίοδο.

Η παρακολούθηση του εσωτερικού περιβάλλοντος ξεκινά στις 9 Ιανουαρίου 2026 στις 12:59:08 και ολοκληρώνεται στις 9 Απριλίου 2026 στις 13:53:56. Η συνολική διάρκειά της είναι περίπου ενενήντα ημέρες. Το διάστημα χωρίστηκε σε δεκατρείς διαδοχικές περιόδους, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε έναν χώρο.

Οι πρώτες δέκα περίοδοι έχουν διάρκεια κοντά στις επτά ημέρες και περιλαμβάνουν περίπου 2.015 έως 2.017 εγγραφές η καθεμία. Η ενδέκατη περίοδος διαθέτει μικρότερο αριθμό μετρήσεων λόγω σημαντικού κενού στη χρονοσειρά. Η δωδέκατη περίοδος είναι σχεδόν πλήρης, ενώ η δέκατη τρίτη είναι μικρότερη από επτά ημέρες, επειδή η συνολική καταγραφή ολοκληρώθηκε πριν συμπληρωθεί ολόκληρη εβδομάδα.

Η κοινή χρονική περίοδος των ενεργειακών και περιβαλλοντικών αρχείων εκτείνεται από τις 9 Ιανουαρίου έως τις 9 Απριλίου 2026. Μόνο αυτό το κοινό διάστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άμεση χρονική αντιστοίχιση των δύο κατηγοριών δεδομένων. Η σύγκριση χρονικών σειρών απαιτεί κοινή χρονική βάση [46], ώστε μια ενεργειακή τιμή να μην συνδέεται με περιβαλλοντική μέτρηση άλλης ώρας.

Η περιβαλλοντική καταγραφή έχει συχνότητα περίπου πέντε λεπτών, ενώ η ενεργειακή καταγραφή είναι ωριαία. Η συλλογή καλύπτει διαφορετικές εποχικές και λειτουργικές περιόδους. Το ενεργειακό αρχείο περιλαμβάνει μέρος του καλοκαιριού, το φθινόπωρο, τον χειμώνα και την αρχή της άνοιξης. Το αρχείο εσωτερικού περιβάλλοντος καλύπτει κυρίως τη χειμερινή και την πρώτη ανοιξιάτικη περίοδο. Η χρονική διαφορά πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν όταν συγκρίνονται γενικά ενεργειακά αποτελέσματα με τις εβδομάδες των περιβαλλοντικών μετρήσεων.

3.6 Πληρότητα, κενά και ποιότητα των δεδομένων

Ο έλεγχος της πληρότητας πραγματοποιήθηκε χωριστά για τα ενεργειακά και τα περιβαλλοντικά αρχεία. Η ποιότητα των λειτουργικών δεδομένων είναι κρίσιμη, καθώς κενά, διπλές εγγραφές και λανθασμένες χρονικές σημάνσεις μπορούν να αλλάξουν τα αποτελέσματα [46]. Η παρουσία μιας τιμής στο αρχείο δεν αρκεί από μόνη της. Πρέπει να είναι γνωστή η θέση της στη χρονοσειρά και η σχέση της με τις υπόλοιπες καταγραφές.

Για τα επτά κύρια ενεργειακά επίπεδα, δηλαδή το ισόγειο, τον ημιώροφο, τον πρώτο, τον δεύτερο, τον τρίτο, τον τέταρτο και τον έβδομο όροφο, οι ημερομηνίες είναι συνεχόμενες. Δεν εντοπίζονται κενά πεδία στα 24 ωριαία κελιά των διαθέσιμων ημερών. Τα δύο αρχεία ενώνονται χρονικά χωρίς κενή ημερομηνία μεταξύ της 28ης Φεβρουαρίου και της 1ης Μαρτίου 2026.

Στα ενεργειακά αρχεία υπάρχουν και μηδενικές ωριαίες τιμές. Η μηδενική τιμή δεν χαρακτηρίζεται αυτόματα ως έλλειψη δεδομένων. Μπορεί να εκφράζει πραγματική διακοπή ή πολύ χαμηλή λειτουργία. Μπορεί όμως και να σχετίζεται με τον τρόπο καταγραφής. Για τον λόγο αυτό, οι μηδενικές τιμές διατηρούνται στο σύνολο και εξετάζονται στο πλαίσιο της αντίστοιχης χρονοσειράς.

Η κύρια ασυνέχεια των ενεργειακών δεδομένων αφορά τον πέμπτο όροφο. Οι δεκατέσσερις διαθέσιμες ημέρες δεν σχηματίζουν ενιαία περίοδο. Οι τιμές του δεν μπορούν επομένως να χρησιμοποιηθούν με τον ίδιο τρόπο για μηνιαίες και μακροχρόνιες συγκρίσεις. Ο έκτος όροφος δεν διαθέτει χρήσιμη χρονοσειρά και αποκλείεται από τους αντίστοιχους υπολογισμούς.

Στο περιβαλλοντικό αρχείο, οι περισσότερες διαδοχικές εγγραφές απέχουν ακριβώς πέντε λεπτά. Εμφανίζονται μικρές αποκλίσεις ενός ή λίγων δευτερολέπτων, οι οποίες δεν αλλάζουν ουσιαστικά τη συχνότητα της καταγραφής. Οι αποκλίσεις αυτές διατηρούνται στο αρχείο και αντιμετωπίζονται κατά τη χρονική ομαδοποίηση.

Το σημαντικότερο κενό ξεκινά στις 20 Μαρτίου 2026 στις 16:40:51 και ολοκληρώνεται στις 23 Μαρτίου 2026 στις 00:58:56. Η διάρκειά του είναι μεγαλύτερη από δύο ημέρες. Το κενό βρίσκεται μέσα στην περίοδο του Χώρου 11 και εξηγεί τον αισθητά μικρότερο αριθμό εγγραφών της συγκεκριμένης εβδομάδας.

Μία ακόμη χρονική ασυνέχεια εμφανίζεται στις 29 Μαρτίου 2026, ανάμεσα στις 02:58:56 και στις 04:03:56. Η διαφορά είναι περίπου 65 λεπτά. Το διάστημα καταγράφεται ως ασυνέχεια της χρονικής σήμανσης και λαμβάνεται υπόψιν κατά την επεξεργασία της δωδέκατης περιόδου.

Η τελευταία περίοδος περιλαμβάνει 1.739 εγγραφές, επειδή η καταγραφή ολοκληρώνεται στις 9 Απριλίου και όχι μετά από πλήρη εβδομάδα. Ο μικρότερος αριθμός μετρήσεων δεν οφείλεται σε ένα ενιαίο μεγάλο εσωτερικό κενό, αλλά στη μικρότερη συνολική διάρκεια του Χώρου 13.

Δεν εντοπίστηκαν κενά στα βασικά πεδία CO₂, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας των 25.246 διαθέσιμων εγγραφών. Οι τιμές είναι αριθμητικές και βρίσκονται μέσα σε εύρη που μπορούν να προκύψουν σε εσωτερικούς χώρους γραφείων. Η παρατήρηση αυτή αποτελεί αρχικό έλεγχο λογικής συνέπειας και όχι ανεξάρτητη επιβεβαίωση της απόλυτης ακρίβειας του αισθητήρα.

Δεν διατίθεται πιστοποιητικό πρόσφατης ανεξάρτητης βαθμονόμησης της συσκευής. Η αβεβαιότητα των αισθητήρων πρέπει επομένως να λαμβάνεται υπόψιν, ιδιαίτερα όταν μια μέτρηση βρίσκεται πολύ κοντά σε επιλεγμένο επίπεδο αναφοράς [21], [22]. Μεγαλύτερη αξιοπιστία αποδίδεται στα επαναλαμβανόμενα χρονικά πρότυπα και όχι σε μια μεμονωμένη οριακή τιμή.

Η απουσία πραγματικών δεδομένων πληρότητας αποτελεί ακόμη ένα κενό του συνόλου. Δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με βεβαιότητα αν μια αύξηση CO₂ προήλθε από

περισσότερα άτομα, από μικρότερη ανανέωση ή από συνδυασμό των δύο. Επίσης, επειδή δεν υπάρχει ασφαλής αντιστοίχιση των δεκατριών χώρων με τους ενεργειακούς μετρητές των ορόφων, δεν μπορεί να αποδοθεί μια τοπική μεταβολή CO₂ σε συγκεκριμένο μέρος της κατανάλωσης.

Παρά τις παραπάνω ελλείψεις, το σύνολο δεδομένων είναι κατάλληλο για τους βασικούς στόχους της εργασίας. Οι κύριες ενεργειακές σειρές διαθέτουν μεγάλη και συνεχή χρονική κάλυψη. Οι περιβαλλοντικές μετρήσεις παρέχουν υψηλή χρονική ανάλυση σε δεκατρείς διαφορετικούς χώρους.

Η ακριβής διαδικασία καθαρισμού, η διαχείριση των κενών και η δημιουργία της κοινής ωριαίας βάσης παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο. Με αυτόν τον τρόπο, η περιγραφή της ποιότητας των αρχείων παραμένει χωριστή από τις μεθόδους επεξεργασίας τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

4.1 Καθαρισμός και επεξεργασία των δεδομένων

Η επεξεργασία ξεκίνησε από τα αρχεία ηλεκτρικής ενέργειας και εσωτερικού περιβάλλοντος που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Τα αρχικά αρχεία διατηρήθηκαν χωρίς αλλαγές. Όλες οι διορθώσεις και οι υπολογισμοί έγιναν σε χωριστό αρχείο ανάλυσης. Με αυτόν τον τρόπο διατηρήθηκε η δυνατότητα ελέγχου κάθε τελικού αποτελέσματος ως προς την αρχική του πηγή. Η διατήρηση των δεδομένων και η καταγραφή των μετατροπών αποτελούν βασικές αρχές κατά την επεξεργασία λειτουργικών δεδομένων κτιρίων [46].

Τα ενεργειακά αρχεία είχαν ευρεία μορφή. Κάθε γραμμή αντιστοιχούσε σε μία ημερομηνία και περιείχε 24 ωριαίες τιμές, μία για κάθε ώρα της ημέρας. Για την ανάλυση, η μορφή αυτή μετατράπηκε σε ωριαία χρονοσειρά. Κάθε νέα εγγραφή περιλάμβανε την ημερομηνία, την ώρα, τον όροφο, τον σειριακό αριθμό του μετρητή και την κατανάλωση σε kWh.

Οι γραμμές τίτλων, τα κενά πεδία και οι συγκεντρωτικές γραμμές δεν χρησιμοποιήθηκαν ως ωριαίες παρατηρήσεις. Το ημερήσιο άθροισμα διατηρήθηκε μόνο για έλεγχο. Για κάθε ημερομηνία συγκρίθηκε με το άθροισμα των 24 ωριαίων τιμών. Οι πολύ μικρές αριθμητικές διαφορές που προέκυψαν οφείλονταν στη στρογγυλοποίηση των δεκαδικών ψηφίων και όχι σε απώλεια ενέργειας.

Τα δύο ενεργειακά αρχεία ενώθηκαν με βάση τον σειριακό αριθμό του μετρητή, την ημερομηνία και την ώρα. Η αντιστοίχιση μέσω του σειριακού αριθμού περιόρισε τον κίνδυνο να συνδεθούν δεδομένα διαφορετικών ηλεκτρικών γραμμών. Η περίοδος Μαρτίου–Απριλίου τοποθετήθηκε μετά την περίοδο που ολοκληρωνόταν τον Φεβρουάριο.

Οι μηδενικές ενεργειακές τιμές δεν διαγράφηκαν. Μια μηδενική τιμή μπορεί να αντιστοιχεί σε πραγματική διακοπή λειτουργίας, αλλά μπορεί επίσης να συνδέεται με τη διαδικασία καταγραφής. Η αυτόματη αντικατάστασή της θα εισήγαγε πληροφορία που δεν υπήρχε στο αρχείο. Για τον λόγο αυτό, οι μηδενικές τιμές διατηρήθηκαν και εξετάστηκαν μαζί με τις γειτονικές ώρες και το αντίστοιχο ημερήσιο προφίλ [46].

Ο πέμπτος όροφος αντιμετωπίστηκε χωριστά, επειδή διαθέτει μόνο περιορισμένες ημερήσιες καταγραφές. Οι διαθέσιμες τιμές του διατηρήθηκαν, αλλά δεν χρησιμοποιήθηκαν σαν να αποτελούσαν πλήρη χρονοσειρά. Στις ώρες χωρίς καταγραφή δεν προστέθηκε κατανάλωση από τον συγκεκριμένο όροφο. Η απουσία αυτή δεν ερμηνεύτηκε ως αποδεδειγμένη μηδενική λειτουργία. Ο έκτος όροφος δεν εντάχθηκε στους υπολογισμούς, καθώς δεν υπήρχε χρήσιμη ενεργειακή σειρά.

Στο αρχείο εσωτερικού περιβάλλοντος, οι ημερομηνίες μετατράπηκαν από τη μορφή ημέρα/μήνας/έτος σε κοινή μορφή ημερομηνίας και ώρας. Τα δεκαδικά κόμματα της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και της πίεσης μετατράπηκαν σε αριθμητικές τιμές. Οι εγγραφές ταξινομήθηκαν με αύξουσα χρονική σειρά.

Οι βασικές μεταβλητές ελέγχθηκαν ως προς την ύπαρξη κενών και μη αριθμητικών τιμών. Οι διαθέσιμες εγγραφές CO₂, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας ήταν πλήρεις. Οι ακραίες τιμές δεν διαγράφηκαν μόνο επειδή διέφεραν από τον μέσο όρο. Μια υψηλή συγκέντρωση CO₂ μπορεί να αποτελεί πραγματικό συμβάν και όχι σφάλμα αισθητήρα. Η διαγραφή πραγματοποιείται μόνο όταν υπάρχει ένδειξη λανθασμένης καταγραφής, καθώς η μηχανική αφαίρεση ακραίων τιμών μπορεί να αποκρύψει σημαντικά λειτουργικά γεγονότα [46], [48].

Η χρονοσειρά χωρίστηκε στις δεκατρείς διαδοχικές περιόδους παρακολούθησης. Κάθε πλήρης περίοδος είχε διάρκεια περίπου επτά ημερών και αντιστοιχούσε σε έναν εξεταζόμενο χώρο. Η ονομασία Χώρος 1 έως Χώρος 13 χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα επόμενα φύλλα, ώστε να διατηρείται σταθερή αντιστοίχιση.

Η δημιουργία τεχνητών τιμών CO₂ για διάστημα πολλών ωρών ή ημερών θα μπορούσε να αλλάξει τα ποσοστά υπέρβασης και τα εκατοστημόρια. Η παρεμβολή είναι περισσότερο κατάλληλη για μικρά κενά και για μεταβλητές με σχετικά ομαλή συμπεριφορά [46]. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι πραγματικά διαθέσιμες μετρήσεις.

Μετά τον καθαρισμό δημιουργήθηκαν δύο κύριοι πίνακες. Ο πρώτος περιείχε μία ωριαία ενεργειακή εγγραφή ανά όροφο. Ο δεύτερος περιείχε τις περιβαλλοντικές μετρήσεις στη συχνότητα των περίπου πέντε λεπτών. Οι δύο πίνακες διατηρήθηκαν χωριστοί έως το στάδιο της χρονικής ομαδοποίησης.

4.2 Χρονική ομαδοποίηση και σύζευξη ενεργειακών και περιβαλλοντικών δεδομένων

Η σύνδεση των δύο κατηγοριών δεδομένων απαιτούσε κοινό χρονικό βήμα. Οι ενεργειακές τιμές ήταν ήδη ωριαίες, ενώ οι περιβαλλοντικές μετρήσεις πραγματοποιούνταν περίπου ανά πέντε λεπτά. Η μετατροπή έγινε προς την ωριαία κλίμακα, ώστε να μη δημιουργηθούν τεχνητές ενδιάμεσες ενεργειακές τιμές.

Κάθε περιβαλλοντική εγγραφή αντιστοιχίστηκε στην ώρα μέσα στην οποία καταγράφηκε. Για παράδειγμα, οι μετρήσεις από τις 10:00:00 έως τις 10:59:59 εντάχθηκαν στην ώρα 10:00. Η χρήση της αρχής της ώρας ως κοινής χρονικής σήμανσης διευκόλυνε την ακριβή ένωση με τα ενεργειακά δεδομένα.

Για κάθε ώρα h υπολογίστηκε πρώτα ο αριθμός των διαθέσιμων μετρήσεων, n_h . Ο αριθμός αυτός διατηρήθηκε ως ξεχωριστή μεταβλητή. Έτσι μπορούσε να διακριθεί μια πλήρης ώρα με περίπου δώδεκα καταγραφές από μια μερική ώρα με λίγες διαθέσιμες τιμές.

Ο ωριαίος μέσος όρος του CO_2 υπολογίστηκε ως:

$$\bar{C}_h = \frac{1}{n_h} \sum C_{i,h} \quad (4.1)$$

όπου $C_{i,h}$ είναι οι έγκυρες μετρήσεις CO_2 μέσα στην ώρα h . Ο ωριαίος μέσος χρησιμοποιήθηκε στη χρονική σύζευξη και στις στρατηγικές ελέγχου, επειδή αντιστοιχεί στην ίδια διάρκεια με την ενεργειακή τιμή.

Παράλληλα υπολογίστηκε η μέγιστη συγκέντρωση κάθε ώρας:

$$C_{\max,h} = \max(C_{i,h}) \quad (4.2)$$

Η μέγιστη τιμή διατηρήθηκε για να μην αποκρύπτονται σύντομες αυξήσεις από τον ωριαίο μέσο όρο. Για τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία υπολογίστηκε ο αντίστοιχος ωριαίος μέσος όρος.

Μια ώρα διατηρήθηκε στο κοινό αρχείο όταν υπήρχε τουλάχιστον μία έγκυρη μέτρηση CO₂ και διαθέσιμη ενεργειακή τιμή για την ίδια χρονική σήμανση [43], [44]. Οι ώρες χωρίς περιβαλλοντική καταγραφή δεν συμπληρώθηκαν. Μετά την αντιστοίχιση δημιουργήθηκε κοινός πίνακας 2.106 ωρών. Η χρήση μόνο κοινών χρονικών στιγμών αποτρέπει τη σύνδεση μη σύγχρονων τιμών και αποτελεί βασική απαίτηση σε αναλύσεις πολλαπλών χρονοσειρών [46].

Για κάθε κοινή ώρα υπολογίστηκε η συνολική κατανάλωση του κτιρίου ως άθροισμα των διαθέσιμων επιμέρους μετρήσεων:

$$E_{h,tot} = \sum E_{h,f} \quad (4.3)$$

όπου $E_{h,f}$ είναι η κατανάλωση του ορόφου f κατά την ώρα h . Στο άθροισμα περιλήφθηκαν το ισόγειο, ο ημιώροφος, ο πρώτος, ο δεύτερος, ο τρίτος, ο τέταρτος, ο πέμπτος και ο έβδομος όροφος. Η συνεισφορά του πέμπτου ορόφου προστέθηκε μόνο στις ώρες για τις οποίες υπήρχε καταγραφή.

Σε κάθε ωριαία γραμμή διατηρήθηκαν επίσης οι επιμέρους τιμές των ορόφων. Η επιλογή αυτή επέτρεψε να χρησιμοποιείται ο ίδιος πίνακας τόσο για τη συνολική ενεργειακή εικόνα όσο και για την εξέταση κάθε μετρητικής μονάδας.

Κάθε ώρα συνδέθηκε με την αντίστοιχη εβδομάδα και τον αντίστοιχο χώρο. Η εβδομαδιαία ομαδοποίηση ακολούθησε τις δεκατρείς περιόδους της περιβαλλοντικής καταγραφής. Με αυτόν τον τρόπο, οι ενεργειακές τιμές κάθε περιόδου μπορούσαν να συγκριθούν με τις μετρήσεις του χώρου που παρακολουθούνταν τότε.

Η σύζευξη χρησιμοποιήθηκε για να εντοπιστούν χρονικές συνυπάρξεις μεταξύ κατανάλωσης και συνθηκών εσωτερικού αέρα. Δεν θεωρήθηκε ότι μια ταυτόχρονη

μεταβολή αποδεικνύει από μόνη της σχέση αιτίου και αποτελέσματος. Για παράδειγμα, μια αύξηση του CO₂ και της συνολικής κατανάλωσης μπορεί να συνδέεται με αυξημένη παρουσία, χωρίς να είναι γνωστό ποιο επιμέρους φορτίο προκάλεσε την ενεργειακή μεταβολή.

4.3 Δείκτες ενεργειακής ανάλυσης

Η ενεργειακή ανάλυση οργανώθηκε σε ωριαία, ημερήσια, μηνιαία και συνολική βάση. Η χρήση περισσότερων χρονικών κλιμάκων επιτρέπει τη διάκριση της γενικής τάσης από τις σύντομες μεταβολές [3], [4]. Όλοι οι δείκτες υπολογίστηκαν τόσο για το σύνολο του κτιρίου όσο και για κάθε διαθέσιμο όροφο, όπου η χρονική κάλυψη ήταν επαρκής.

Η ημερήσια κατανάλωση προέκυψε από το άθροισμα των 24 ωριαίων τιμών:

$$E_{d,f} = \sum_{h=1}^{24} E_{h,f} \quad (4.4)$$

Η μηνιαία κατανάλωση υπολογίστηκε από το άθροισμα των ημερήσιων τιμών του αντίστοιχου μήνα. Για τον πρώτο και τον τελευταίο μήνα χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι ημέρες που καλύπτονταν από τα αρχεία. Οι μερικοί μήνες δεν συγκρίθηκαν χωρίς αναφορά στη διαφορετική διάρκειά τους.

Για κάθε όροφο υπολογίστηκε η συνολική κατανάλωση της διαθέσιμης περιόδου. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η συμμετοχή του στη συνολική καταγεγραμμένη ενέργεια:

$$S_f = \frac{E_f}{\sum E_f} \times 100\% \quad (4.5)$$

Ο δείκτης S_f εκφράζει ποιο ποσοστό του διαθέσιμου συνόλου αντιστοιχεί στον όροφο f . Δεν αποτελεί δείκτη ενεργειακής απόδοσης. Ένας όροφος μπορεί να εμφανίζει υψηλή

συμμετοχή επειδή έχει μεγαλύτερη επιφάνεια, περισσότερους χρήστες ή διαφορετικό εξοπλισμό.

Η μέση ημερήσια κατανάλωση υπολογίστηκε χωριστά για κάθε όροφο:

$$\bar{E}_{day,f} = \frac{E_f}{D_f} \quad (4.6)$$

όπου D_f είναι ο αριθμός των ημερών με διαθέσιμη καταγραφή. Η χρήση του πραγματικού αριθμού ημερών είναι σημαντική για τον πέμπτο όροφο, επειδή η χρονοσειρά του είναι πολύ μικρότερη. Η μέση ημερήσια τιμή του δεν συγκρίθηκε σαν να είχε προκύψει από ολόκληρη την περίοδο.

Για την εξέταση του ημερήσιου προφίλ, οι τιμές ομαδοποιήθηκαν ανά ώρα της ημέρας. Ο μέσος όρος της ώρας 08:00, για παράδειγμα, προέκυψε από όλες τις διαθέσιμες τιμές που καταγράφηκαν μεταξύ 08:00 και 08:59. Η διαδικασία εφαρμόστηκε χωριστά στις εργάσιμες και στις μη εργάσιμες ημέρες.

Ως εργάσιμες θεωρήθηκαν οι ημέρες από Δευτέρα έως Παρασκευή. Τα Σάββατα και οι Κυριακές εντάχθηκαν στις μη εργάσιμες ημέρες. Δεν υπήρχε πλήρες ημερολόγιο πραγματικής λειτουργίας ή αδειών του προσωπικού. Για τον λόγο αυτό, οι επίσημες αργίες δεν χαρακτηρίστηκαν αυτόματα ως ημέρες πλήρους απουσίας. Η διάκριση χρησιμοποιήθηκε ως σταθερό ημερολογιακό κριτήριο και όχι ως άμεση μέτρηση της παρουσίας.

Για την ανάλυση του ωραρίου χρησιμοποιήθηκε το διάστημα από τις 08:00 έως πριν από τις 19:00, από Δευτέρα έως Παρασκευή. Το ίδιο χρονικό πλαίσιο χρησιμοποιήθηκε και στη στρατηγική E2, ώστε τα επιμέρους μέρη της ανάλυσης να παραμένουν συγκρίσιμα. Οι υπόλοιπες ώρες χαρακτηρίστηκαν ως ώρες εκτός προτεινόμενου ωραρίου.

Το μέσο φορτίο εκτός ωραρίου υπολογίστηκε από τις ωριαίες τιμές που δεν ανήκαν στο παραπάνω διάστημα. Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιήθηκε αντί ενός υποθετικού μηδενικού

φορτίου. Στα γραφεία υπάρχουν συσκευές και βοηθητικές λειτουργίες που μπορεί να παραμένουν ενεργές ακόμη και όταν δεν υπάρχει προσωπικό.

Η ωριαία αιχμή ορίστηκε ως η μεγαλύτερη καταγεγραμμένη κατανάλωση μέσα στην εξεταζόμενη περίοδο. Υπολογίστηκε επίσης το 95ο εκατοστημόριο της ενεργειακής χρονοσειράς. Ο δεύτερος δείκτης παρουσιάζει το επίπεδο των υψηλών αλλά συχνότερων φορτίων και επηρεάζεται λιγότερο από μία μεμονωμένη ακραία τιμή.

Για τον εντοπισμό μη αναμενόμενης κατανάλωσης εξετάστηκαν οι υψηλές τιμές εκτός ωραρίου. Μια ώρα χαρακτηρίστηκε ως υποψήφια απόκλιση όταν βρισκόταν εκτός του προτεινόμενου ωραρίου και ξεπερνούσε το 95ο εκατοστημόριο των αντίστοιχων εκτός ωραρίου τιμών. Ο χαρακτηρισμός αυτός λειτουργεί ως ένδειξη για περαιτέρω έλεγχο και όχι ως αυτόματη διάγνωση βλάβης [48], [49].

Οι δείκτες χρησιμοποιήθηκαν περιγραφικά. Δεν εφαρμόστηκε κανονικοποίηση ως προς την επιφάνεια ή τον αριθμό εργαζομένων, επειδή οι σχετικές πραγματικές τιμές δεν ήταν διαθέσιμες για όλους τους ορόφους. Η χρήση υποθετικών δεδομένων σε αυτό το στάδιο θα δημιουργούσε δείκτες που θα φαίνονταν ακριβείς χωρίς να είναι τεκμηριωμένοι.

4.4 Δείκτες ποιότητας εσωτερικού αέρα και αερισμού

Η αξιολόγηση του εσωτερικού περιβάλλοντος έγινε χωριστά για καθεμία από τις δεκατρείς περιόδους. Οι υπολογισμοί βασίστηκαν στις αρχικές μετρήσεις των περίπου πέντε λεπτών και όχι στις ωριαίες τιμές. Με αυτόν τον τρόπο διατηρήθηκε η μεγαλύτερη διαθέσιμη χρονική λεπτομέρεια.

Για κάθε χώρο υπολογίστηκαν ο αριθμός των έγκυρων εγγραφών, η ημερομηνία έναρξης και η ημερομηνία λήξης. Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιήθηκαν για να ελέγχεται αν οι συγκριτικοί δείκτες προέρχονταν από πλήρη ή μικρότερη περίοδο.

Για το CO₂ υπολογίστηκαν η μέση, η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή. Η μέση συγκέντρωση περιγράφει τη συνολική περίοδο, ενώ η μέγιστη εντοπίζει το εντονότερο επεισόδιο. Επειδή οι δύο δείκτες δεν αρκούν για να αποδώσουν τη χρονική κατανομή [21], [22], υπολογίστηκε επίσης το 95ο εκατοστημόριο.

Το 95ο εκατοστημόριο, P95, ορίστηκε ως η τιμή κάτω από την οποία βρίσκεται το 95% των έγκυρων μετρήσεων του χώρου. Χρησιμοποιήθηκε ως βασικό κριτήριο της συνήθους υψηλής συγκέντρωσης. Η επιλογή του περιορίζει την επίδραση μιας μεμονωμένης κορυφής, χωρίς να αποκρύπτει τις συχνές αυξημένες τιμές [22], [23].

Υπολογίστηκε ακόμη το ποσοστό των μετρήσεων πάνω από τα 800, 1.000, 1.200 και 1.500 ppm. Για ένα όριο L, το ποσοστό δόθηκε από τη σχέση:

$$PL = \frac{n(CO_2 > L)}{n_{valid}} \times 100\% \quad (4.7)$$

όπου n_{valid} είναι το πλήθος των έγκυρων μετρήσεων της περιόδου. Τα κενά δεν προστέθηκαν στον παρονομαστή. Έτσι, ένα διάστημα χωρίς καταγραφή δεν θεωρήθηκε ούτε υπέρβαση ούτε αποδεκτή τιμή.

Τα επίπεδα χρησιμοποιήθηκαν για συγκριτική κατηγοριοποίηση. Το όριο των 1.000 ppm είχε κεντρικό ρόλο, επειδή αποτελεί το σημείο αναφοράς του υπολογιστικού μοντέλου. Οι τιμές δεν αντιμετωπίστηκαν ως απόλυτος διαχωρισμός μεταξύ ασφαλούς και μη ασφαλούς αέρα [21], [31]. Η διάρκεια και η συχνότητα των υπερβάσεων εξετάστηκαν μαζί με το P95 και τη μέγιστη τιμή.

Ως εβδομαδιαίο κριτήριο επίτευξης του στόχου χρησιμοποιήθηκε η συνθήκη:

$$P95 \leq 1.000 \text{ ppm} \quad (4.8)$$

Όταν η συνθήκη ικανοποιούνταν, ο χώρος χαρακτηριζόταν επαρκής ως προς τον στόχο του υπολογιστικού μοντέλου. Όταν το P95 ξεπερνούσε τα 1.000 ppm, η περίοδος εντασσόταν στις περιπτώσεις που χρειάζονται πρόσθετη εξέταση του αερισμού. Ο χαρακτηρισμός δεν αποτελούσε πλήρη αξιολόγηση όλων των ρύπων [21], [31].

Για τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία υπολογίστηκαν η μέση, η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή. Οι μεταβλητές χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή της περιόδου και όχι για πλήρη υπολογισμό θερμικής άνεσης. Μια πλήρης αξιολόγηση θα απαιτούσε πρόσθετες παραμέτρους, όπως ταχύτητα αέρα, ένδυση και δραστηριότητα [9].

Οι τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας δεν συνδυάστηκαν σε έναν ενιαίο βαθμό μαζί με το CO₂. Κάθε μεταβλητή διατήρησε τον δικό της ρόλο. Η προσέγγιση αυτή αποφεύγει να αποδίδεται μια πιθανή δυσφορία αποκλειστικά στον αερισμό, ενώ μπορεί να σχετίζεται με τη θερμική κατάσταση του χώρου [28]–[30].

4.5 Σενάρια χώρου και πληρότητας

Οι πραγματικές διαστάσεις και η συνεχής πληρότητα των δεκατριών χώρων δεν ήταν διαθέσιμες. Για τον λόγο αυτό, δεν αποδόθηκε αυθαίρετο εμβαδόν ή συγκεκριμένος αριθμός χρηστών σε κάθε χώρο. Αντίθετα, δημιουργήθηκαν τρία κοινά σενάρια. Τα σενάρια χρησιμοποιήθηκαν ως ανάλυση ευαισθησίας και όχι ως περιγραφή των πραγματικών δωματίων.

Σενάριο	Περιγραφή	Εμβαδόν	Ύψος	Άτομα	Όγκος
A	Μικρό γραφείο	10 m ²	2,8 m	1	28 m ³
B	Βασικό γραφείο	15 m ²	2,8 m	2	42 m ³
Γ	Μεγάλο γραφείο	20 m ²	2,8 m	3	56 m ³

Πίνακας 4.1: Σενάρια χώρου και πληρότητας

Το ύψος διατηρήθηκε σταθερό στα 2,8 m. Ο όγκος V υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$V = A * H \quad (4.9)$$

όπου A είναι το εμβαδόν και H το ύψος. Η χρήση κοινής τιμής ύψους επιτρέπει να εξεταστεί καθαρά η επίδραση του εμβαδού και του αριθμού των ατόμων.

Για το ισοζύγιο CO₂ χρησιμοποιήθηκε παραγωγή 0,0052 l/s ανά άτομο. Η εξωτερική συγκέντρωση ορίστηκε στα 400 ppm και ο στόχος εσωτερικής συγκέντρωσης στα 1.000 ppm. Οι τιμές αυτές αποτελούν παραδοχές του υπολογιστικού μοντέλου. Η χρήση ισοζυγίου μάζας για την εκτίμηση παροχής απαιτεί δήλωση της παραγωγής, της εξωτερικής συγκέντρωσης και του στόχου [22]–[24].

Η συνολική παραγωγή CO₂ για κάθε σενάριο υπολογίστηκε ως:

$$G = N * g \quad (4.10)$$

όπου N είναι ο αριθμός των ατόμων και g η παραγωγή ανά άτομο.

Η απαιτούμενη παροχή για τον στόχο των 1.000 ppm υπολογίστηκε με τη σχέση σταθερής κατάστασης:

$$Q_{target} = \frac{G}{(C_{in} - C_{out}) \times 10^{-6}} \quad (4.11)$$

όπου Q_{target} εκφράζεται σε l/s, C_{in} είναι η εσωτερική συγκέντρωση στόχου και C_{out} η εξωτερική συγκέντρωση. Η παροχή μετατράπηκε σε m³/h με πολλαπλασιασμό επί 3,6. Η χρήση της διαφοράς εσωτερικής και εξωτερικής συγκέντρωσης ακολουθεί τη βασική λογική του ισοζυγίου CO₂ [22]–[24].

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, οι παροχές στόχου ήταν 31,2 m³/h για το σενάριο Α, 62,4 m³/h για το σενάριο Β και 93,6 m³/h για το σενάριο Γ. Οι τιμές αυξάνονται ανάλογα με τον αριθμό των ατόμων. Δεν θεωρήθηκε ότι αποτελούν την πραγματική παροχή των χώρων.

Ο απαιτούμενος ρυθμός ανανέωσης υπολογίστηκε ως:

$$ACH_{target} = \frac{Q_{target}}{V} \quad (4.12)$$

όπου η παροχή εκφράζεται σε m³/h και ο όγκος σε m³. Οι τιμές στόχου ήταν περίπου 1,11 h⁻¹, 1,49 h⁻¹ και 1,67 h⁻¹ για τα σενάρια Α, Β και Γ αντίστοιχα. Η παροχή ανά άτομο και ο ACH εξετάστηκαν μαζί, επειδή εκφράζουν διαφορετικές πλευρές της ίδιας απαίτησης [8], [11], [12].

Για κάθε χώρο εκτιμήθηκε ακόμη η παροχή που αντιστοιχεί στο καταγεγραμμένο P95. Στη σχέση (4.11), η τιμή C_{in} αντικαταστάθηκε από το P95 της συγκεκριμένης εβδομάδας. Ο υπολογισμός εφαρμόστηκε όταν το P95 ήταν μεγαλύτερο από την εξωτερική συγκέντρωση.

Η πρόσθετη απαιτούμενη παροχή υπολογίστηκε ως:

$$Q_{add} = \max(Q_{target} - Q_{P95}, 0) \quad (4.13)$$

Όταν το Q_{P95} ήταν ίσο ή μεγαλύτερο από το Q_{target}, η πρόσθετη παροχή ορίστηκε σε μηδέν. Όταν ήταν μικρότερο, η διαφορά έδειχνε την πρόσθετη θεωρητική ποσότητα που απαιτείται για την επίτευξη του στόχου. Το πρόσθετο ACH υπολογίστηκε από τη διαίρεση του Q_{add} με τον όγκο του αντίστοιχου σεναρίου.

Η μέθοδος δεν αποτελεί άμεση μέτρηση της πραγματικής παροχής. Βασίζεται στην παραδοχή σταθερής κατάστασης, γνωστής πληρότητας και πλήρους ανάμειξης. Οι παραδοχές αυτές εισάγουν αβεβαιότητα [24], [25]. Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν συγκριτικά και όχι ως πιστοποιημένες τιμές του εγκατεστημένου συστήματος.

4.6 Μοντελοποίηση και κριτήρια σύγκρισης των στρατηγικών ελέγχου

Η σύγκριση των στρατηγικών πραγματοποιήθηκε στο κοινό ωριαίο αρχείο. Ως μεταβλητή ελέγχου χρησιμοποιήθηκε ο ωριαίος μέσος όρος του CO₂. Οι τρεις στρατηγικές εφαρμόστηκαν στις ίδιες ώρες και στις ίδιες μετρήσεις, ώστε οι διαφορές να προκύπτουν μόνο από τον κανόνα λειτουργίας. Η χρήση κοινής βάσης αποτελεί βασική προϋπόθεση για αξιόπιστη σύγκριση [17], [18].

Οι παροχές των τριών επιπέδων προήλθαν από τα σενάρια Α, Β και Γ. Η χαμηλή παροχή ορίστηκε στα 31,2 m³/h, η βασική στα 62,4 m³/h και η υψηλή στα 93,6 m³/h. Τα επίπεδα χρησιμοποιήθηκαν ως κοινές καταστάσεις λειτουργίας και όχι ως πραγματικές ταχύτητες συγκεκριμένου ανεμιστήρα.

Η στρατηγική Ε0 αποτέλεσε την κατάσταση αναφοράς. Θεωρήθηκε σταθερή παροχή 62,4 m³/h σε κάθε διαθέσιμη ώρα της κοινής περιόδου. Ο συνολικός όγκος αέρα υπολογίστηκε ως:

$$V_{E0} = H_{total} \times 62,4 \quad (4.14)$$

όπου H_{total} είναι το πλήθος των διαθέσιμων ωρών. Η Ε0 αντιπροσωπεύει λειτουργία χωρίς προσαρμογή στο CO₂ ή στο ωράριο.

Η στρατηγική Ε1 βασίστηκε αποκλειστικά στον ωριαίο μέσο όρο του CO₂. Εφαρμόστηκαν τρεις βαθμίδες:

Ωριαίος μέσος CO ₂	Παροχή
CO ₂ ≤ 800 ppm	31,2 m ³ /h
800 ppm < CO ₂ ≤ 1.000 ppm	62,4 m ³ /h
CO ₂ > 1.000 ppm	93,6 m ³ /h

Πίνακας 4.2: Κανόνες λειτουργίας της στρατηγικής E1

Ο συνολικός όγκος της E1 υπολογίστηκε από τις ώρες κάθε κατηγορίας:

$$VE_1 = H_{\leq 800} \times 31,2 + H_{800-1000} \times 62,4 + H_{>1000} \times 93,6 \quad (4.15)$$

Η λογική αυτή αποτελεί απλή τριβάθμια μορφή αερισμού βάσει ζήτησης. Η χρήση CO₂ για την προσαρμογή της παροχής είναι κατάλληλη όταν η πληρότητα μεταβάλλεται [26], [27]. Το μοντέλο δεν περιλαμβάνει συνεχή αναλογική ρύθμιση μεταξύ των βαθμίδων.

Η στρατηγική E2 συνδύασε τις ίδιες βαθμίδες CO₂ με το προτεινόμενο ωράριο. Ως ώρες λειτουργίας θεωρήθηκαν οι εργάσιμες ημέρες από τις 08:00 έως πριν από τις 19:00. Στις ώρες αυτές εφαρμόστηκαν οι κανόνες της E1. Εκτός ωραρίου θεωρήθηκε μηδενική παροχή μηχανικού αερισμού:

$$VE_2 = H_{in,\leq 800} \times 31,2 + H_{in,800-1000} \times 62,4 + H_{in,>1000} \times 93,6 \quad (4.16)$$

Οι ώρες εντός και εκτός ωραρίου καταμετρήθηκαν χωριστά. Με τον τρόπο αυτό μπορούσε να ελεγχθεί αν η μεγάλη μείωση της E2 ήταν κυρίως από τον περιορισμό της λειτουργίας εκτός προγράμματος. Ο έλεγχος βάσει ωραρίου είναι αποτελεσματικός μόνο όταν το πρόγραμμα ανταποκρίνεται στην πραγματική χρήση [16], [26].

Για κάθε στρατηγική υπολογίστηκε ο συνολικός όγκος αέρα ανά εβδομάδα και για ολόκληρη την κοινή περίοδο. Η σχετική μείωση ως προς την E0 υπολογίστηκε ως:

$$R_s = 1 - \frac{VE_s}{VE_0} \quad (4.17)$$

όπου s είναι η E1 ή η E2. Το αποτέλεσμα εκφράστηκε ως ποσοστό.

Ο δείκτης R_s περιγράφει τη μείωση του μοντελοποιημένου όγκου αέρα. Δεν αποτελεί άμεση μέτρηση εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας. Δεν υπήρχε ξεχωριστός μετρητής για το σύστημα αερισμού ούτε καμπύλη ισχύος του ανεμιστήρα. Η καταγεγραμμένη συνολική κατανάλωση της αντίστοιχης εβδομάδας διατηρήθηκε ως λειτουργικό πλαίσιο, αλλά δεν κατανεμήθηκε τεχνητά στις τρεις στρατηγικές.

Η μείωση του όγκου χρησιμοποιήθηκε ως ένδειξη του σχετικού ενεργειακού δυναμικού. Η πραγματική σχέση μεταξύ παροχής και κατανάλωσης εξαρτάται από τον ανεμιστήρα, τις απώλειες πίεσης, τον τρόπο ρύθμισης και τη θερμική επεξεργασία του εξωτερικού αέρα [26], [27]. Επομένως, τα ποσοστά δεν παρουσιάζονται ως επαληθευμένη εξοικονόμηση kWh.

Η σύγκριση βασίστηκε σε τέσσερα κύρια κριτήρια. Το πρώτο ήταν ο συνολικός όγκος μηχανικού αερισμού. Το δεύτερο ήταν η κατανομή των ωρών στις τρεις ζώνες CO₂. Το τρίτο ήταν η διάρκεια λειτουργίας εντός και εκτός ωραρίου. Το τέταρτο ήταν η συμβατότητα της στρατηγικής με τις καταγεγραμμένες περιόδους αυξημένου CO₂.

Το μοντέλο χρησιμοποιεί τις καταγεγραμμένες συγκεντρώσεις για να επιλέξει την παροχή, αλλά δεν υπολογίζει εκ νέου τη μελλοντική συγκέντρωση μετά την αλλαγή της παροχής.

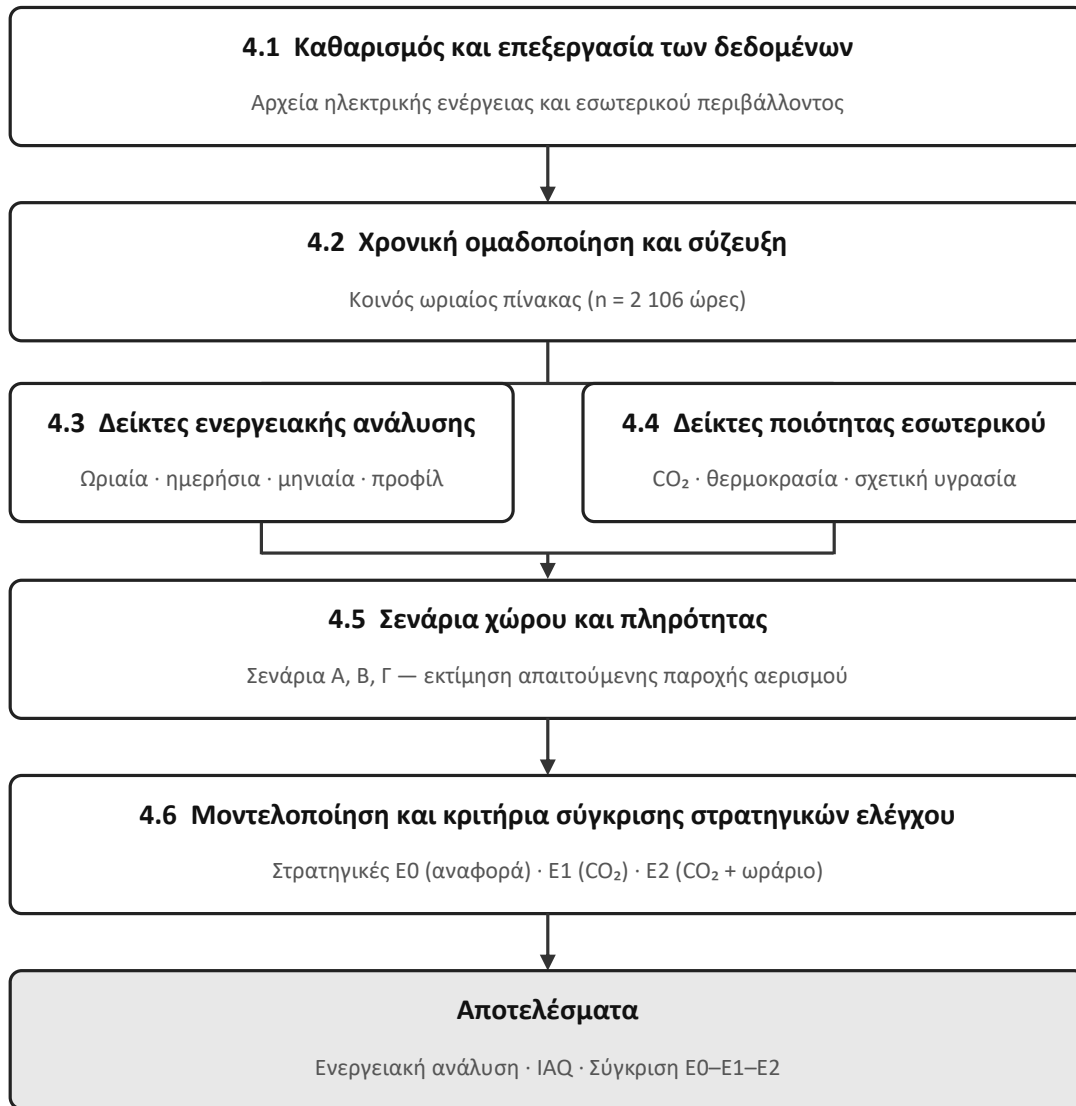
Επομένως, δεν αποτελεί δυναμική προσομοίωση της απόκρισης του χώρου. Η ποιότητα του αέρα αξιολογείται από τις πραγματικές μετρήσεις, ενώ οι όγκοι των στρατηγικών αποτελούν συγκριτικές εκτιμήσεις ελέγχου.

Η καλύτερη στρατηγική δεν επιλέγεται μόνο από το μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης. Εξετάζεται αν οι υψηλές συγκεντρώσεις αντιστοιχούν σε υψηλότερη παροχή και αν ο χρονικός περιορισμός μπορεί να αφήσει ακάλυπτη πιθανή χρήση εκτός ωραρίου. Η τελική κρίση βασίζεται επομένως σε ισορροπία μεταξύ περιορισμού της λειτουργίας και διατήρησης επαρκούς απόκρισης στις καταγεγραμμένες ανάγκες [26], [27], [31].

Οι εβδομαδιαίοι υπολογισμοί επιτρέπουν να φανεί αν μια στρατηγική λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο σε όλους τους χώρους ή αν το όφελος εξαρτάται από τη μορφή της χρονοσειράς CO₂. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα δίνουν τη συνολική εικόνα, ενώ η εβδομαδιαία παρουσίαση διατηρεί τις διαφορές μεταξύ των δεκατριών περιόδων.

Με τη διαδικασία αυτή ολοκληρώνεται το μεθοδολογικό πλαίσιο της εργασίας. Τα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζουν χωριστά τα ενεργειακά αποτελέσματα, τις συνθήκες του εσωτερικού περιβάλλοντος και τη συγκριτική απόδοση των τριών στρατηγικών.

Ακολουθεί συνοπτική παρουσίαση της μεθοδολογίας σε διάγραμμα ροής.



Εικόνα 7. Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

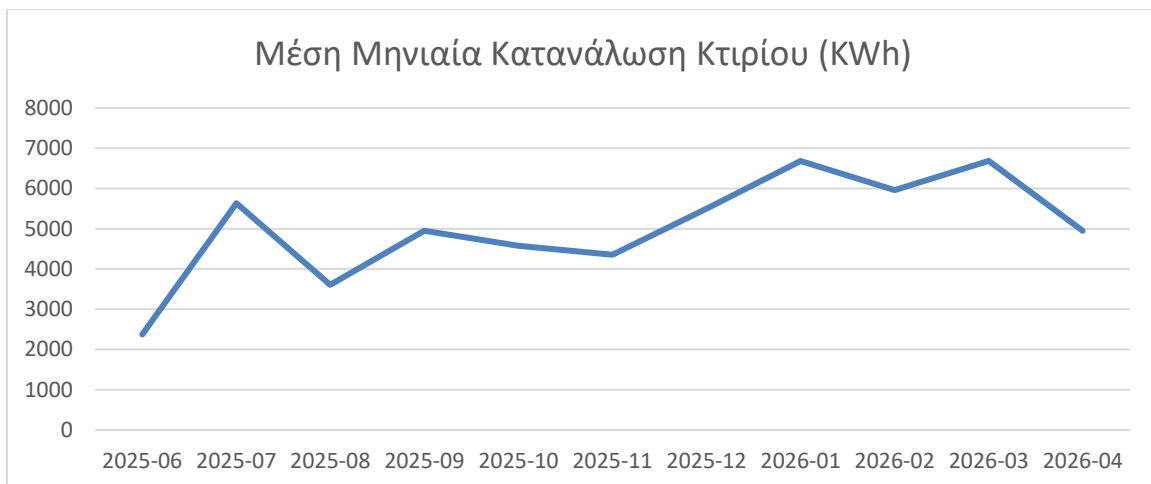
5.1 Συνολική και μηνιαία κατανάλωση ενέργειας

Η συνολική καταγεγραμμένη ηλεκτρική κατανάλωση του κτιρίου ανήλθε σε 55.263,83 kWh. Η περίοδος εκτείνεται από τις 17 Ιουνίου 2025 έως τις 30 Απριλίου 2026 και περιλαμβάνει 318 ημερολογιακές ημέρες. Ο Ιούνιος δεν αποτελεί πλήρη μήνα, καθώς η καταγραφή ξεκίνησε στις 17 Ιουνίου. Για τον λόγο αυτό, η συνολική τιμή του δεν συγκρίνεται άμεσα με τις τιμές των πλήρων μηνών.

Η εξέταση των μηνιαίων τιμών επιτρέπει να εντοπιστούν οι κύριες μεταβολές μέσα στην περίοδο. Η χρήση μηνιαίων και ημερήσιων δεικτών είναι αναγκαία [2], επειδή η συνολική κατανάλωση ενός μήνα επηρεάζεται και από τον αριθμό των ημερών που περιλαμβάνει. Για τον λόγο αυτό, μαζί με τη μηνιαία ενέργεια υπολογίστηκε και η μέση ημερήσια τιμή.

Μήνας	Συνολική κατανάλωση (kWh)	Ημέρες καταγραφής	Μέση ημερήσια κατανάλωση (kWh/ημέρα)
Ιούνιος 2025	2.374,18	14	169,58
Ιούλιος 2025	5.630,14	31	181,62
Αύγουστος 2025	3.609,92	31	116,45
Σεπτέμβριος 2025	4.947,60	30	164,92
Οκτώβριος 2025	4.571,99	31	147,48
Νοέμβριος 2025	4.350,17	30	145,01
Δεκέμβριος 2025	5.501,15	31	177,46
Ιανουάριος 2026	6.682,90	31	215,58
Φεβρουάριος 2026	5.959,25	28	212,83
Μάρτιος 2026	6.684,53	31	215,63
Απρίλιος 2026	4.952,00	30	165,07

Πίνακας 5.1: Μηνιαία κατανάλωση του κτιρίου



Γράφημα 1 (from Excel)

Η μεγαλύτερη μηνιαία κατανάλωση καταγράφηκε τον Μάρτιο 2026, με 6.684,53 kWh. Η τιμή ήταν σχεδόν ίδια με εκείνη του Ιανουαρίου, η οποία έφτασε τις 6.682,90 kWh. Η διαφορά των δύο μηνών ήταν μόλις 1,63 kWh. Υψηλή ήταν και η τιμή του Φεβρουαρίου, παρά το γεγονός ότι ο μήνας είχε λιγότερες ημέρες.

Η σύγκριση των μέσων ημερήσιων τιμών επιβεβαιώνει ότι ο Ιανουάριος, ο Φεβρουάριος και ο Μάρτιος αποτέλεσαν την περίοδο με την υψηλότερη ένταση κατανάλωσης. Η ημερήσια μέση τιμή κυμάνθηκε από 212,83 έως 215,63 kWh. Η μικρή διαφορά μεταξύ των τριών μηνών δείχνει μια σχετικά σταθερή περίοδο υψηλών φορτίων.

Η χαμηλότερη κατανάλωση μεταξύ των πλήρων μηνών εμφανίστηκε τον Αύγουστο 2025. Η συνολική τιμή ήταν 3.609,92 kWh και η μέση ημερήσια 116,45 kWh. Η κατανάλωση ήταν κατά 35,88% χαμηλότερη από εκείνη του Ιουλίου. Η διαφορά μπορεί να σχετίζεται με μειωμένη χρήση του κτιρίου, αλλαγή ωραρίου ή διαφορετικές ανάγκες των συστημάτων. Δεν υπάρχουν όμως δεδομένα πληρότητας και καιρού για να αποδοθεί με βεβαιότητα σε μία συγκεκριμένη αιτία.

Μετά τον Αύγουστο παρατηρήθηκε αύξηση τον Σεπτέμβριο και σταδιακή μείωση τον Οκτώβριο και τον Νοέμβριο. Από τον Νοέμβριο προς τον Δεκέμβριο η κατανάλωση αυξήθηκε κατά 26,46%. Ακολούθησε νέα αύξηση κατά 21,48% τον Ιανουάριο. Η μεταβολή αυτή συμπίπτει με την έναρξη της περιόδου των υψηλότερων καταναλώσεων.

Τον Απρίλιο η συνολική κατανάλωση μειώθηκε στις 4.952,00 kWh. Η μείωση σε σχέση με τον Μάρτιο ήταν 25,92%. Η ημερήσια μέση τιμή μειώθηκε επίσης από 215,63 σε 165,07 kWh. Η εξέλιξη δείχνει υποχώρηση μετά την περίοδο Ιανουαρίου–Μαρτίου.

Η πραγματική κατανάλωση ενός γραφείου επηρεάζεται από το κλίμα, την πληρότητα, τον εξοπλισμό και τις ρυθμίσεις [2]. Χωρίς ανεξάρτητα δεδομένα καιρού και πραγματικής χρήσης, τα αποτελέσματα περιγράφουν τις μεταβολές αλλά δεν τεκμηριώνουν πλήρως την αιτία τους.

5.2 Κατανομή της κατανάλωσης ανά όροφο

Η χωρική κατανομή παρουσίασε μεγάλες διαφορές μεταξύ των επιπέδων. Η μέτρηση επιτρέπει να εντοπιστούν τα τμήματα με τη μεγαλύτερη συμμετοχή [19], χωρίς όμως να αποδεικνύει από μόνη της χαμηλή ή υψηλή ενεργειακή απόδοση. Η σύγκριση επηρεάζεται από το μέγεθος, τη χρήση και τον εξοπλισμό κάθε ορόφου.

Όροφος	Συνολική κατανάλωση (kWh)	Συμμετοχή στο σύνολο	Μέση ημερήσια κατανάλωση (kWh/ημέρα)
Ισόγειο	14.497,02	26,23%	45,59
Ημιόροφος	2.042,45	3,70%	6,42
1ος όροφος	1.282,25	2,32%	4,03
2ος όροφος	10.008,02	18,11%	31,47
3ος όροφος	8.396,62	15,19%	26,40
4ος όροφος	9.499,66	17,19%	29,87
5ος όροφος	254,59	0,46%	18,19*
7ος όροφος	9.283,23	16,80%	29,19

*Η μέση ημερήσια τιμή του 5ου ορόφου βασίζεται μόνο στις 14 διαθέσιμες ημέρες και δεν είναι άμεσα συγκρίσιμη με τις υπόλοιπες.

Πίνακας 5.2: Κατανάλωση και συμμετοχή ανά όροφο



Γράφημα 2 (from Excel)

Το ισόγειο εμφάνισε τη μεγαλύτερη κατανάλωση, με 14.497,02 kWh. Αντιστοιχεί στο 26,23% του συνολικού καταγεγραμμένου μεγέθους. Η μέση ημερήσια κατανάλωσή του ήταν 45,59 kWh, αισθητά υψηλότερη από εκείνη των υπόλοιπων επιπέδων.

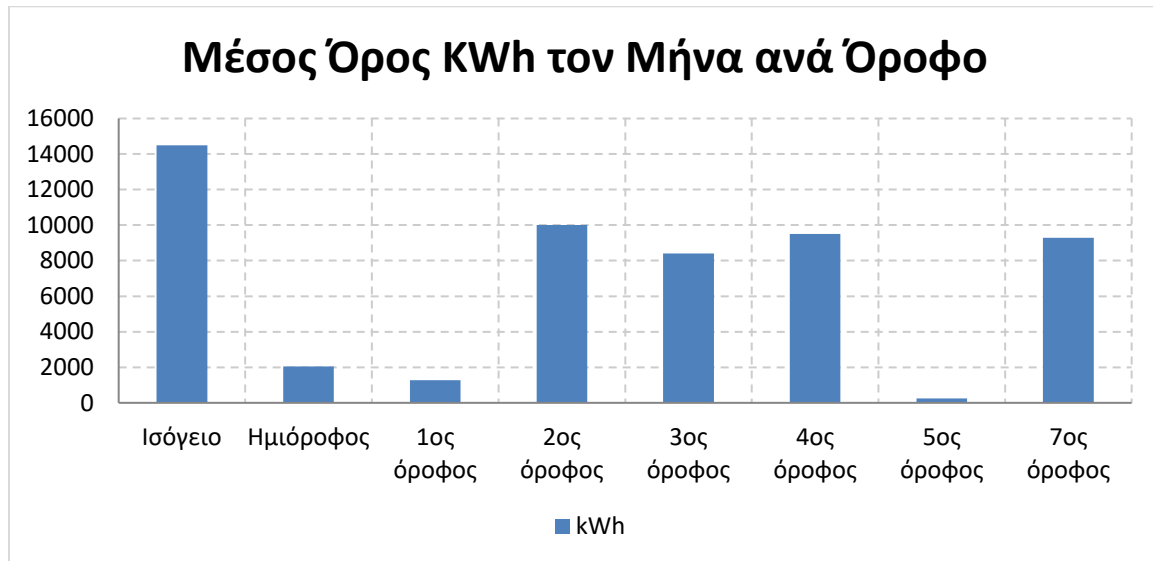
Ακολούθησε ο δεύτερος όροφος με 10.008,02 kWh και ποσοστό 18,11%. Ο τέταρτος όροφος συμμετείχε με 17,19% και ο έβδομος με 16,80%. Οι τρεις αυτοί όροφοι παρουσίασαν παρόμοιο συνολικό μέγεθος, από 9.283,23 έως 10.008,02 kWh.

Ο τρίτος όροφος κατανάλωσε 8.396,62 kWh και κάλυψε το 15,19% του συνόλου. Το ισόγειο, ο δεύτερος, ο τέταρτος και ο έβδομος όροφος συγκέντρωσαν συνολικά το 78,33% της καταγεγραμμένης ενέργειας. Η συγκέντρωση αυτή δείχνει ότι οι περισσότερες δυνατότητες ενεργειακής παρέμβασης είναι πιθανό να σχετίζονται με αυτά τα επίπεδα. Η τελική ιεράρχηση όμως, χρειάζεται να λάβει υπόψιν και τη λειτουργία τους.

Ο ημιόροφος και ο πρώτος όροφος παρουσίασαν μικρότερη συνολική συμμετοχή, 3,70% και 2,32% αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές δεν ήταν σταθερές σε όλη την περίοδο. Μέχρι τον Δεκέμβριο 2025 παρέμεναν πολύ χαμηλές, ενώ από τον Ιανουάριο 2026 αυξήθηκαν απότομα.

Στον ημιόροφο η κατανάλωση αυξήθηκε από 15,16 kWh τον Δεκέμβριο σε 489,46 kWh τον Ιανουάριο. Στον πρώτο όροφο αυξήθηκε από 30,06 σε 235,01 kWh. Η αλλαγή συνεχίστηκε και τους επόμενους μήνες. Πρόκειται για μεταβολή του λειτουργικού προτύπου, η οποία μπορεί να σχετίζεται με αλλαγή χρήσης, ενεργοποίηση φορτίων ή διαφοροποίηση της καταγραφής. Οι απότομες αλλαγές επιπέδου χρειάζονται τεχνική διερεύνηση [48], [49] και δεν πρέπει να αποδίδονται αυτόματα σε αυξημένη σπατάλη.

Ο πέμπτος όροφος δεν διαθέτει συνεχή χρονοσειρά. Η συνολική του τιμή είναι επομένως χαμηλή κυρίως λόγω της περιορισμένης κάλυψης. Το ποσοστό 0,46% δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένδειξη ότι ο όροφος καταναλώνει λιγότερο από όλους τους άλλους. Οι καταγραφές του εξετάζονται μόνο στις ημέρες όπου υπάρχουν πραγματικές τιμές.



Γράφημα 3 (from Excel)

Η μεγαλύτερη μηνιαία κατανάλωση του ισογείου εμφανίστηκε τον Ιανουάριο, με 1.963,14 kWh. Ο δεύτερος όροφος είχε τη μεγαλύτερη τιμή τον Ιούλιο, με 1.264,34 kWh. Ο τέταρτος έφτασε στο υψηλότερο επίπεδο τον Ιανουάριο, ενώ ο έβδομος τον Ιούλιο. Οι διαφορές δείχνουν ότι τα επίπεδα δεν ακολουθούν απόλυτα κοινό εποχικό πρότυπο.

5.3 Ημερήσια και ωριαία προφίλ κατανάλωσης

Οι ημερήσιες καταναλώσεις παρουσίασαν έντονη μεταβλητότητα. Η υψηλότερη ημερήσια τιμή καταγράφηκε στις 20 Ιανουαρίου 2026 και ήταν 388,54 kWh. Ακολούθησαν η 19η Ιανουαρίου με 370,69 kWh και η 26η Ιανουαρίου με 354,40 kWh. Οι τρεις υψηλότερες ημέρες εντοπίζονται στον ίδιο μήνα, γεγονός που συμφωνεί με την υψηλή μέση ημερήσια κατανάλωση του Ιανουαρίου.

Υψηλές ημερήσιες τιμές εμφανίστηκαν επίσης τον Φεβρουάριο και τον Μάρτιο. Στις 23 Μαρτίου καταγράφηκαν 343,50 kWh, ενώ αρκετές ημέρες των τριών πρώτων μηνών του 2026 ξεπέρασαν τις 300 kWh. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι η υψηλή μηνιαία κατανάλωση δεν προήλθε από ένα μόνο ακραίο συμβάν, αλλά από σειρά ημερών με αυξημένο φορτίο.

Οι χαμηλότερες ημερήσιες τιμές εμφανίστηκαν κυρίως τον Αύγουστο. Στις 24 Αυγούστου καταγράφηκαν 27,16 kWh και στις 23 Αυγούστου 29,21 kWh. Οι ημερομηνίες αυτές ήταν ημέρες Σαββατοκύριακου. Πολύ χαμηλές τιμές εμφανίστηκαν όμως και στις 14 και 15 Αυγούστου, οι οποίες ήταν εργάσιμες ημέρες σύμφωνα με το ημερολόγιο. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η ημερολογιακή κατηγοριοποίηση δεν περιγράφει πάντοτε την πραγματική χρήση.

Το μέσο ωριαίο προφίλ των εργάσιμων ημερών είχε ημερήσια μορφή. Από τα μεσάνυχτα έως τις 04:00 η κατανάλωση παρέμενε κοντά στις 2,4–2,6 kWh ανά ώρα. Η αύξηση ξεκινούσε μετά τις 05:00. Στις 06:00 ο μέσος όρος έφτανε τις 7,20 kWh και στις 07:00 τις 8,42 kWh.

Στις 08:00 η μέση εργάσιμη κατανάλωση ήταν 11,48 kWh. Αυξήθηκε στις 13,65 kWh στις 09:00 και στις 15,14 kWh στις 10:00. Η μέγιστη μέση ωριαία τιμή εμφανίστηκε στις 11:00 και ήταν 19,74 kWh. Η διαμόρφωση αυτή υποδηλώνει συντονισμένη αύξηση των φορτίων κατά τις πρωινές ώρες, όπως συναντάται συχνά στα κτίρια γραφείων [3], [4].

Μετά τις 11:00 το φορτίο μειωνόταν, αλλά παρέμενε αυξημένο μέχρι αργά το απόγευμα. Στις 14:00 η μέση τιμή ήταν 14,83 kWh, στις 16:00 ήταν 12,57 kWh και στις 18:00 10,51 kWh. Η κατανάλωση δεν επέστρεφε άμεσα στο νυχτερινό επίπεδο μετά το τέλος του βασικού ωραρίου.

Στις 19:00 η μέση εργάσιμη κατανάλωση παρέμενε στις 10,11 kWh και στις 20:00 στις 9,06 kWh. Η ουσιαστική υποχώρηση εμφανιζόταν μετά τις 21:00. Στις 22:00 η τιμή μειωνόταν στις 3,73 kWh και στις 23:00 στις 2,92 kWh.

Η συνέχιση υψηλών φορτίων κατά τις 19:00 και 20:00 μπορεί να συνδέεται με παράταση της εργασίας, καθυστερημένη απενεργοποίηση ή λειτουργία συστημάτων μετά την αποχώρηση των χρηστών. Η κατανάλωση μετά το τυπικό ωράριο αποτελεί συχνό πεδίο λειτουργικής βελτίωσης [6]. Δεν θεωρείται όμως εξ ολοκλήρου περιττή χωρίς στοιχεία για τις πραγματικές ανάγκες του κτιρίου.

Το προφίλ του Σαββατοκύριακου ήταν πολύ πιο επίπεδο. Οι ωριαίες μέσες τιμές κυμάνθηκαν κυρίως από 2,2 έως 2,9 kWh. Δεν εμφανίστηκε η έντονη πρωινή αύξηση των εργάσιμων ημερών. Η σχετική σταθερότητα δείχνει ότι μεγάλο μέρος της κατανάλωσης των ημερών αυτών αντιστοιχεί σε φορτία που παραμένουν ενεργά ανεξάρτητα από την κύρια δραστηριότητα.

Η σύγκριση των δύο προφίλ δείχνει σύνδεση της κύριας κατανάλωσης με το εργασιακό πρόγραμμα. Παράλληλα, αποκαλύπτει την ύπαρξη ενός συνεχούς φορτίου που δεν μηδενίζεται. Η διάκριση των δύο τμημάτων είναι σημαντική για την αναγνώριση του πραγματικού περιθωρίου εξοικονόμησης.

5.4 Εργάσιμες και μη εργάσιμες περίοδοι

Η περίοδος καταγραφής περιλάμβανε 228 εργάσιμες ημέρες και 90 ημέρες Σαββατοκύριακου. Οι εργάσιμες ημέρες συγκέντρωσαν 49.770,54 kWh, δηλαδή το 90,06% του συνολικού μεγέθους. Τα Σαββατοκύριακα αντιστοιχούσαν σε 5.493,29 kWh ή στο 9,94%.

Η μέση εργάσιμη ημέρα είχε κατανάλωση 218,29 kWh. Η αντίστοιχη τιμή του Σαββατοκύριακου ήταν 61,04 kWh. Επομένως, η μέση κατανάλωση του Σαββατοκύριακου ήταν κατά 72,04% χαμηλότερη. Αντίστροφα, μια μέση εργάσιμη ημέρα κατανάλωνε περίπου 3,58 φορές περισσότερη ενέργεια.

Η Δευτέρα παρουσίασε την υψηλότερη μέση ημερήσια τιμή, με 227,90 kWh. Η Τρίτη ακολούθησε με 219,96 kWh. Από την Τετάρτη έως την Παρασκευή οι μέσες τιμές ήταν παρόμοιες και κυμάνθηκαν από 214,23 έως 214,99 kWh. Η μικρή υπεροχή της Δευτέρας μπορεί να σχετίζεται με την επανεκκίνηση των συστημάτων μετά το Σαββατοκύριακο. Η ερμηνεία αυτή είναι πιθανή, αλλά δεν μπορεί να αποδειχθεί χωρίς δεδομένα κατάστασης των εγκαταστάσεων.

Το Σάββατο παρουσίασε μέση ημερήσια κατανάλωση 60,11 kWh και η Κυριακή 61,96 kWh. Η ομοιότητα των δύο τιμών ενισχύει την εικόνα ενός σχετικά σταθερού φορτίου κατά τις μη εργάσιμες ημέρες. Δεν εμφανίζεται ουσιαστική διαφορά που να δείχνει συστηματικά μεγαλύτερη χρήση σε μία από τις δύο ημέρες.

Με βάση το προτεινόμενο ωράριο 08:00–19:00 από Δευτέρα έως Παρασκευή, οι ώρες εντός ωραρίου κατανάλωσαν 35.084,82 kWh. Η ποσότητα αντιστοιχεί στο 63,49% της συνολικής κατανάλωσης. Οι ώρες εκτός ωραρίου συγκέντρωσαν 20.179,01 kWh ή το 36,51%.

Το ποσοστό εκτός ωραρίου φαίνεται υψηλό, αλλά πρέπει να εξεταστεί μαζί με τη διάρκεια. Οι ώρες εκτός ωραρίου ήταν 5.124, ενώ οι ώρες εντός προγράμματος 2.508. Η μέση κατανάλωση ανά ώρα ήταν 13,99 kWh εντός ωραρίου και 3,94 kWh εκτός. Η διαφορά δείχνει ότι το φορτίο περιορίζεται σημαντικά όταν το κτίριο δεν βρίσκεται σε κύρια χρήση, αλλά δεν μηδενίζεται.

Από την κατανάλωση εκτός ωραρίου, 14.685,72 kWh καταγράφηκαν σε εργάσιμες ημέρες πριν από τις 08:00 ή μετά τις 19:00. Οι υπόλοιπες 5.493,29 kWh αντιστοιχούσαν στα Σαββατοκύριακα. Η μέση ωριαία τιμή εκτός ωραρίου στις εργάσιμες ημέρες ήταν 4,95 kWh, ενώ στα Σαββατοκύριακα 2,54 kWh.

Η υψηλότερη τιμή των εργάσιμων ωρών εκτός προγράμματος δείχνει ότι ορισμένα φορτία ξεκινούν πριν από τις 08:00 ή παραμένουν ενεργά μετά τις 19:00. Μέρος της λειτουργίας μπορεί να είναι απαραίτητο για την προετοιμασία ή την ολοκλήρωση της ημέρας. Ωστόσο, η επαναλαμβανόμενη παράταση χρειάζεται έλεγχο, επειδή μικρές καθημερινές αποκλίσεις μπορούν να προκαλέσουν σημαντική ετήσια κατανάλωση.

Η ενεργειακή εξοικονόμηση δεν μπορεί να υπολογιστεί θεωρώντας ότι όλη η κατανάλωση εκτός ωραρίου μπορεί να αφαιρεθεί. Οι διαδικασίες μέτρησης και επαλήθευσης απαιτούν ξεκάθαρη γραμμή [17], [18] και τα αποτελέσματα δείχνουν το μέγεθος της περιοχής που χρειάζεται διερεύνηση και όχι το σύνολο της άμεσα διαθέσιμης εξοικονόμησης.

5.5 Φορτίο βάσης, αιχμές και μη αναμενόμενες καταναλώσεις

Κατά τις ώρες από τις 00:00 έως τις 04:59, η μέση συνολική κατανάλωση ήταν 2,46 kWh ανά ώρα. Η τιμή αυτή αποτελεί μια πρακτική ένδειξη του νυχτερινού φορτίου βάσης. Δεν σημαίνει ότι όλα τα φορτία είναι αναγκαία, αλλά δείχνει το επίπεδο κάτω από το οποίο το κτίριο σπάνια υποχωρεί.

Η μέση ωριαία τιμή όλων των περιόδων εκτός ωραρίου ήταν υψηλότερη, 3,94 kWh. Η διαφορά από το καθαρά νυχτερινό επίπεδο οφείλεται κυρίως στις ώρες πριν και μετά το εργασιακό πρόγραμμα. Ειδικά στις εργάσιμες ημέρες, οι ώρες 19:00–21:00 διατηρούσαν σημαντική κατανάλωση.

Το 95ο εκατοστημόριο της συνολικής ωριαίας χρονοσειράς ήταν 18,53 kWh. Αυτό σημαίνει ότι το 95% των ωρών είχε κατανάλωση ίση ή χαμηλότερη από αυτή την τιμή. Το 99ο εκατοστημόριο ήταν 27,24 kWh. Οι δύο δείκτες αποτυπώνουν καλύτερα το συνηθισμένο υψηλό φορτίο από ό,τι μία μοναδική μέγιστη τιμή.

Η απόλυτη μέγιστη ωριαία τιμή ήταν 69,82 kWh και καταγράφηκε στις 23 Οκτωβρίου 2025 στις 08:00. Από αυτή την ποσότητα, οι 60,90 kWh προήλθαν από τον πέμπτο όροφο. Την προηγούμενη ώρα η τιμή του ίδιου μετρητή ήταν μηδενική και την επόμενη 1,86 kWh.

Η απότομη και μεμονωμένη μορφή της μέτρησης διαφέρει έντονα από τη συνήθη συμπεριφορά του πέμπτου ορόφου. Δεν είναι δυνατόν να καθοριστεί μόνο από το αρχείο αν πρόκειται για πραγματικό φορτίο, συγκεντρωτική καταχώριση ή σφάλμα μέτρησης. Οι μεμονωμένες ακραίες τιμές δεν πρέπει να διαγράφονται χωρίς έλεγχο [46], αλλά πρέπει να επισημαίνονται για τεχνική επαλήθευση [48], [49].

Μια δεύτερη πολύ υψηλή τιμή εμφανίστηκε στον έβδομο όροφο στις 18 Φεβρουαρίου 2026 στις 16:00. Η καταγραφή ήταν 24,31 kWh, ενώ οι άμεσα προηγούμενες και επόμενες

ώρες είχαν μηδενική τιμή στον ίδιο μετρητή. Στις 19:00 καταγράφηκε νέα υψηλή τιμή 9,54 kWh. Η ασυνέχεια αυτή χρειάζεται επίσης διερεύνηση και δεν ερμηνεύεται ως τυπικό ωριαίο φορτίο του ορόφου.

Εάν δεν ληφθεί υπόψιν η μεμονωμένη αιχμή του πέμπτου ορόφου, οι υψηλότερες συνολικές ωριαίες τιμές εμφανίζονται κυρίως στις 11:00 κατά τη χειμερινή περίοδο. Στις 19 Ιανουαρίου 2026 καταγράφηκαν 41,84 kWh και στις 20 Ιανουαρίου 40,60 kWh. Οι τιμές αυτές προέκυψαν από ταυτόχρονα αυξημένη κατανάλωση σε περισσότερους ορόφους και επομένως αποτελούν πιο αντιπροσωπευτικές αιχμές του κτιρίου.

Το 95ο εκατοστημόριο των ωρών εκτός ωραρίου ήταν 10,27 kWh. Συνολικά, 257 ώρες ξεπέρασαν αυτό το επίπεδο. Ο αριθμός αντιστοιχεί περίπου στο 5% των εκτός ωραρίου παρατηρήσεων, όπως αναμένεται από τον ορισμό του δείκτη.

Η μεγαλύτερη τιμή εκτός ωραρίου ήταν 24,01 kWh και εμφανίστηκε στις 16 Φεβρουαρίου 2026 στις 19:00. Ακολούθησαν 20,08 kWh στις 18 Φεβρουαρίου στις 19:00 και 19,72 kWh στις 20 Ιανουαρίου στις 20:00. Πολλές από τις υψηλότερες τιμές εντοπίζονται αμέσως μετά το προτεινόμενο τέλος του ωραρίου και όχι κατά τη βαθιά νύχτα.

Το αποτέλεσμα δείχνει ότι οι σημαντικότερες αποκλίσεις εκτός ωραρίου συνδέονται κυρίως με καθυστερημένη μείωση των φορτίων. Δεν υποδηλώνει απαραίτητα βλάβη, καθώς μπορεί να υπήρχε πραγματική χρήση του κτιρίου. Ωστόσο, η επαναλαμβανόμενη εμφάνιση στις 19:00 και στις 20:00 αποτελεί ξεκάθαρο σημείο για έλεγχο των προγραμμάτων απενεργοποίησης.

Η απότομη αύξηση του ημιώροφου και του πρώτου ορόφου από τον Ιανουάριο αποτελεί διαφορετικό είδος απόκλισης. Δεν πρόκειται για μεμονωμένη αιχμή, αλλά για μόνιμη αλλαγή επιπέδου. Οι μόνιμες μεταβολές μπορεί να σχετίζονται με αλλαγή χρήσης, νέο εξοπλισμό ή διαφορετική ρύθμιση της μέτρησης. Η τεχνική διερεύνησή τους απαιτεί πληροφορίες που δεν περιλαμβάνονται στα αρχεία.

5.6 Βασικά ευρήματα της ενεργειακής ανάλυσης

Η ενεργειακή ανάλυση έδειξε ότι η κατανάλωση δεν κατανέμεται ομοιόμορφα στον χρόνο ή στον χώρο. Η συνολική τιμή έφτασε τις 55.263,83 kWh, αλλά οι υψηλότερες μηνιαίες καταναλώσεις συγκεντρώθηκαν από τον Ιανουάριο έως τον Μάρτιο. Ο Αύγουστος αποτέλεσε τον μήνα με τη χαμηλότερη ημερήσια ένταση μεταξύ των πλήρων μηνών.

Το ισόγειο είχε τη μεγαλύτερη συμμετοχή, με 26,23%. Ο δεύτερος, ο τέταρτος και ο έβδομος όροφος ακολούθησαν με παρόμοια μεγέθη. Οι τέσσερις αυτές μετρητικές μονάδες κάλυψαν περισσότερο από τα τρία τέταρτα της συνολικής ενέργειας. Η συγκέντρωση της κατανάλωσης δημιουργεί ξεκάθαρη προτεραιότητα για περαιτέρω λειτουργικό έλεγχο.

Το ημερήσιο προφίλ ακολουθούσε το εργασιακό πρόγραμμα. Η κατανάλωση αυξανόταν από νωρίς το πρωί και έφτανε στη μεγαλύτερη μέση τιμή στις 11:00. Η μείωση μετά το τέλος της ημέρας ήταν σταδιακή και αρκετές ώρες παρέμεναν αυξημένες μετά τις 19:00.

Οι εργάσιμες ημέρες κατανάλωναν κατά μέσο όρο 218,29 kWh, ενώ τα Σαββατοκύριακα 61,04 kWh. Η μεγάλη διαφορά επιβεβαιώνει ότι η κύρια κατανάλωση συνδέεται με τη χρήση του κτιρίου. Η παρουσία σταθερού φορτίου κατά τα Σαββατοκύριακα και τις νυχτερινές ώρες δείχνει όμως, ότι ένα μέρος της λειτουργίας παραμένει συνεχώς ενεργό.

Το 36,51% της συνολικής ενέργειας καταγράφηκε έξω από το προτεινόμενο ωράριο 08:00–19:00. Το ποσοστό δεν αποτελεί αυτούσιο δυναμικό εξοικονόμησης, επειδή περιλαμβάνει αναγκαία συνεχή φορτία και περισσότερες συνολικές ώρες. Δείχνει όμως ότι ο χρονικός προγραμματισμός είναι κρίσιμο πεδίο της επόμενης αξιολόγησης.

Οι περισσότερες υψηλές τιμές εκτός ωραρίου εμφανίστηκαν αμέσως μετά τις 19:00. Το εύρημα υποδεικνύει ότι η καθυστερημένη διακοπή μπορεί να έχει μεγαλύτερη σημασία από τη βαθιά νυχτερινή κατανάλωση. Παράλληλα, οι μεμονωμένες ακραίες τιμές του πέμπτου και του έβδομου ορόφου πρέπει να εξεταστούν τεχνικά πριν χρησιμοποιηθούν για τη λήψη αποφάσεων.

Συνολικά, τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τρεις κύριες περιοχές ενδιαφέροντος και είναι τα επίπεδα με τη μεγαλύτερη ενεργειακή συμμετοχή, τις ώρες πριν και μετά το βασικό πρόγραμμα και τις απότομες μεταβολές που δεν συμφωνούν με το σύνηθες προφίλ. Τα

ευρήματα αυτά αποτελούν το ενεργειακό υπόβαθρο για τη μεταγενέστερη σύγκριση των στρατηγικών ελέγχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΑΕΡΙΣΜΟΥ

6.1 Συνολική εικόνα του εσωτερικού περιβάλλοντος

Η ανάλυση των δεκατριών χώρων έδειξε σημαντικές διαφορές ως προς τη συγκέντρωση CO₂. Στο σύνολο των διαθέσιμων καταγραφών, η σταθμισμένη μέση τιμή ήταν 645,05 ppm. Η τιμή αυτή παρέχει μια γενική εικόνα, αλλά δεν περιγράφει με την ίδια ακρίβεια κάθε χώρο. Οι χαμηλές μετρήσεις κατά τις ώρες περιορισμένης χρήσης μειώνουν τον συνολικό μέσο όρο. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση στηρίχθηκε και στο 95ο εκατοστημόριο και στη διάρκεια των υπερβάσεων [21], [22].

Με βάση το κριτήριο $P95 \leq 1.000$ ppm, οκτώ από τους δεκατρείς χώρους πέτυχαν τον στόχο. Οι Χώροι 1, 2, 3, 9 και 10 παρουσίασαν P95 μεγαλύτερο από 1.000 ppm. Στους χώρους αυτούς, οι αυξημένες συγκεντρώσεις δεν περιορίστηκαν σε μία μόνο στιγμιαία μέτρηση. Αφορούσαν μεγαλύτερο μέρος της αντίστοιχης περιόδου παρακολούθησης.

Οι υπόλοιποι οκτώ χώροι παρουσίασαν αρκετά χαμηλότερο P95. Οι Χώροι 4, 5, 7, 8, 11 και 13 δεν κατέγραψαν καμία μέτρηση πάνω από τα 1.000 ppm. Στους Χώρους 6 και 12 εμφανίστηκαν μεμονωμένες υπερβάσεις, όμως η συνολική διάρκεια ήταν πολύ μικρή. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, επειδή μια σύντομη αιχμή δεν έχει την ίδια λειτουργική βαρύτητα με μια παρατεταμένη περίοδο υψηλών τιμών [22], [31].

Η μέγιστη συγκέντρωση ολόκληρου του συνόλου ήταν 2.669 ppm και καταγράφηκε στον Χώρο 10. Η ελάχιστη ήταν 397 ppm και εμφανίστηκε στον Χώρο 12. Η μεγάλη απόσταση μεταξύ των ακραίων τιμών δείχνει ότι οι χώροι δεν λειτούργησαν με κοινό πρότυπο αερισμού ή χρήσης.

Η σταθμισμένη μέση θερμοκρασία ήταν 21,12 °C και η αντίστοιχη σχετική υγρασία 44,16%. Οι μέσες τιμές παρουσίασαν μικρότερες διαφορές μεταξύ των χώρων από ό,τι το CO₂. Επομένως, οι κυριότερες αποκλίσεις του εσωτερικού περιβάλλοντος συνδέθηκαν με την ανανέωση του αέρα και όχι με μια γενικευμένη μεταβολή της θερμοκρασίας.

Η συνολική εικόνα διαμορφώνει τρεις βασικές ομάδες. Η πρώτη περιλαμβάνει τους χώρους με συστηματικά αυξημένο CO₂. Η δεύτερη περιλαμβάνει χώρους με σπάνιες και

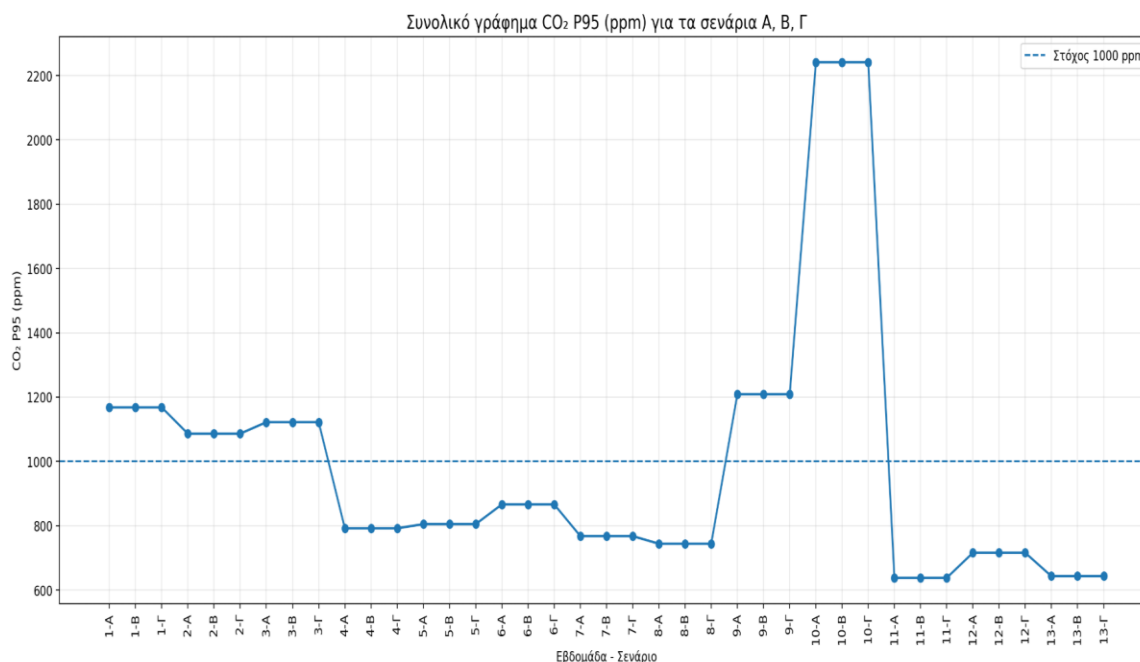
σύντομες υπερβάσεις. Η τρίτη περιλαμβάνει χώρους με σταθερά χαμηλές συγκεντρώσεις. Η ομαδοποίηση αυτή χρησιμοποιείται μόνο για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων και δεν υποκαθιστά την επιτόπια τεχνική αξιολόγηση.

6.2 Μέση, μέγιστη συγκέντρωση και 95ο εκατοστημόριο CO₂

Οι βασικοί δείκτες CO₂ παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1. Η μέση τιμή αποτυπώνει το γενικό επίπεδο κάθε περιόδου. Η μέγιστη τιμή δείχνει το εντονότερο επεισόδιο, ενώ το P95 παρουσιάζει το ανώτερο επίπεδο στο οποίο βρέθηκε το μεγαλύτερο μέρος των μετρήσεων [22], [23]. Η κοινή χρήση των τριών δεικτών περιορίζει τον κίνδυνο να βασιστεί η αξιολόγηση σε μία μόνο τιμή.

Χώρος	Μέση τιμή (ppm)	Ελάχιστη τιμή (ppm)	Μέγιστη τιμή (ppm)	P95 (ppm)	Αποτέλεσμα ως προς τον στόχο
Χώρος 1	893,60	562	1.321	1.168,00	Πάνω από τον στόχο
Χώρος 2	859,35	522	1.341	1.086,25	Πάνω από τον στόχο
Χώρος 3	776,56	452	1.243	1.122,00	Πάνω από τον στόχο
Χώρος 4	570,54	434	897	792,00	Εντός στόχου
Χώρος 5	561,71	429	896	805,00	Εντός στόχου
Χώρος 6	575,73	425	1.338	866,25	Εντός στόχου
Χώρος 7	518,10	430	945	767,75	Εντός στόχου
Χώρος 8	526,06	425	939	744,00	Εντός στόχου
Χώρος 9	720,12	414	1.429	1.209,00	Πάνω από τον στόχο
Χώρος 10	839,15	403	2.669	2.241,25	Πάνω από τον στόχο
Χώρος 11	482,07	398	745	637,95	Εντός στόχου
Χώρος 12	502,99	397	1.017	715,85	Εντός στόχου
Χώρος 13	481,61	398	965	643,10	Εντός στόχου

Πίνακας 6.1: Βασικοί δείκτες συγκέντρωσης CO₂ ανά χώρο



Γράφημα 4 (from Excel)

Ο Χώρος 1 παρουσίασε την υψηλότερη μέση συγκέντρωση, με 893,60 ppm. Ακολούθησαν ο Χώρος 2 με 859,35 ppm και ο Χώρος 10 με 839,15 ppm. Οι τιμές αυτές δείχνουν ότι μεγάλο μέρος των αντίστοιχων περιόδων βρισκόταν ήδη κοντά ή πάνω από το επίπεδο των 800 ppm.

Η μέση τιμή δεν αποκάλυψε πλήρως την κατάσταση στους Χώρους 3 και 9. Ο Χώρος 3 είχε μέσο όρο 776,56 ppm, αλλά το P95 έφτασε τα 1.122 ppm. Αντίστοιχα, ο Χώρος 9 είχε μέση τιμή 720,12 ppm και P95 ίσο με 1.209 ppm. Οι δύο περιπτώσεις δείχνουν ότι μια σχετικά μέτρια εβδομαδιαία μέση τιμή μπορεί να συνυπάρχει με αρκετές ώρες αυξημένου CO₂. Η χρήση μόνο του μέσου όρου θα υποτιμούσε αυτές τις περιόδους [22].

Ο Χώρος 10 παρουσίασε τη μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ της μέσης τιμής και του P95. Η μέση συγκέντρωση ήταν 839,15 ppm, αλλά το P95 έφτασε τα 2.241,25 ppm. Η μέγιστη τιμή ήταν 2.669 ppm. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι υπήρξε σημαντικό μέρος της περιόδου με πολύ υψηλές συγκεντρώσεις και όχι μόνο μία μεμονωμένη αιχμή.

Στον Χώρο 6 η μέγιστη τιμή έφτασε τα 1.338 ppm, όμως το P95 παρέμεινε στα 866,25 ppm. Η διαφορά δείχνει ότι οι υψηλές τιμές είχαν μικρή διάρκεια. Παρόμοια εικόνα

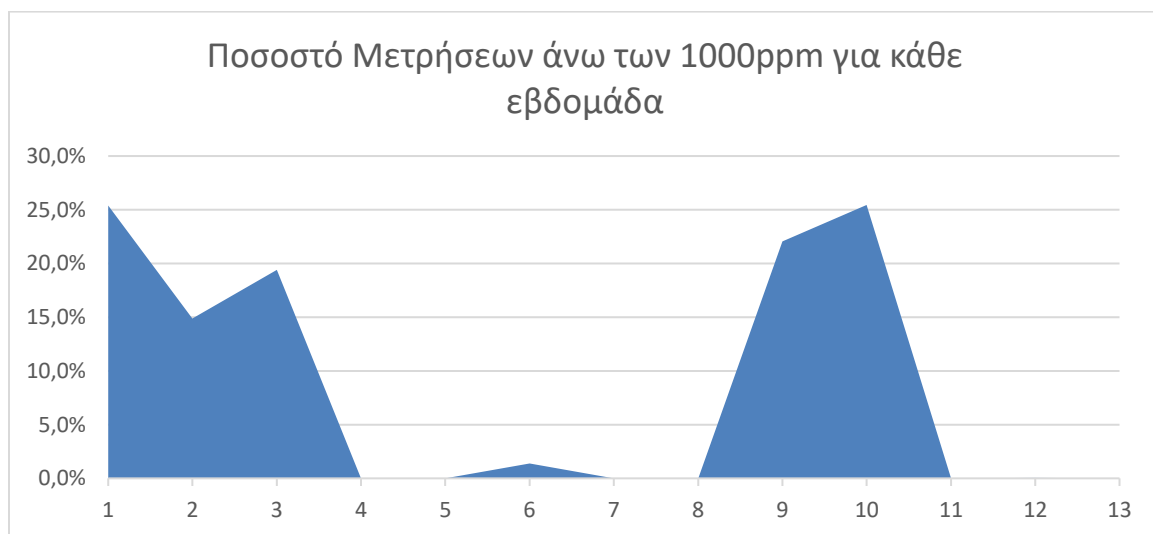
εμφανίστηκε στον Χώρο 12. Η μέγιστη τιμή του ήταν 1.017 ppm, αλλά το P95 παρέμεινε στα 715,85 ppm.

Οι Χώροι 11 και 13 είχαν τις χαμηλότερες μέσες συγκεντρώσεις. Ο Χώρος 13 είχε μέσο όρο 481,61 ppm, ενώ ο Χώρος 11 είχε 482,07 ppm. Ο Χώρος 11 εμφάνισε επίσης το χαμηλότερο P95, με 637,95 ppm, και τη χαμηλότερη μέγιστη τιμή, με 745 ppm.

Οι πολύ χαμηλές τιμές δεν σημαίνουν από μόνες τους ότι η συνολική ποιότητα του αέρα ήταν άριστη. Το CO₂ αφορά κυρίως τη σχέση ανθρώπινης παρουσίας και αερισμού [21]. Δεν αποτυπώνει όλους τους πιθανούς εσωτερικούς ρύπους. Στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης, οι χαμηλές και σταθερές συγκεντρώσεις αποτελούν θετική ένδειξη ως προς την ανανέωση του αέρα.

6.3 Διάρκεια υπέρβασης των επιπέδων αναφοράς

Η διάρκεια των αυξημένων συγκεντρώσεων εξετάστηκε με τα ποσοστά καταγραφών πάνω από τα 800, 1.000, 1.200 και 1.500 ppm. Επειδή το χρονικό βήμα ήταν σχεδόν σταθερό, τα ποσοστά των καταγραφών προσεγγίζουν το αντίστοιχο ποσοστό του χρόνου. Τα επίπεδα χρησιμοποιούνται ως συγκριτικά σημεία αναφοράς και όχι ως απόλυτα όρια ασφάλειας [21], [31].



Γράφημα 5 (from Excel)

Ο Χώρος 1 βρισκόταν πάνω από τα 800 ppm στο 69,21% της περιόδου. Πρόκειται για το μεγαλύτερο ποσοστό στη συγκεκριμένη κατηγορία. Πάνω από τα 1.000 ppm βρέθηκε το 25,38% των καταγραφών. Το αποτέλεσμα συμφωνεί με τον υψηλό μέσο όρο και το P95 των 1.168 ppm.

Ο Χώρος 2 παρουσίασε παρόμοια, αλλά ηπιότερη εικόνα. Το 63,79% των τιμών ήταν πάνω από τα 800 ppm και το 14,88% πάνω από τα 1.000 ppm. Η παραμονή πάνω από τα 1.200 ppm ήταν περιορισμένη στο 0,60%. Άρα, το κύριο πρόβλημα αφορούσε συχνές μέτριες αυξήσεις και όχι πολλές πολύ υψηλές τιμές.

Στον Χώρο 3, το ποσοστό πάνω από τα 1.000 ppm έφτασε το 19,39%, παρότι η μέση συγκέντρωση ήταν χαμηλότερη από εκείνη των Χώρων 1 και 2. Η διαφορά δείχνει ότι οι τιμές παρουσίαζαν μεγαλύτερη διακύμανση. Οι χαμηλές περίοδοι μείωσαν τον μέσο όρο, χωρίς να εξαλείψουν τις αρκετές ώρες υπέρβασης.

Ο Χώρος 9 παρουσίασε το δεύτερο υψηλότερο ποσοστό πάνω από τα 1.200 ppm, με 5,35%. Πάνω από τα 1.000 ppm βρέθηκε το 22,06% των καταγραφών. Το αποτέλεσμα δείχνει μεγαλύτερη ένταση από εκείνη των Χώρων 2 και 3, παρά τον χαμηλότερο μέσο όρο.

Η δυσμενέστερη κατάσταση εμφανίστηκε στον Χώρο 10. Το 25,45% των μετρήσεων ήταν πάνω από τα 1.000 ppm και το 15,28% πάνω από τα 1.200 ppm. Επιπλέον, το 11,95% ξεπέρασε τα 1.500 ppm. Ο Χώρος 10 ήταν ο μόνος στον οποίο εμφανίστηκαν καταγραφές πάνω από αυτό το επίπεδο.

Η διαφορά ανάμεσα στα ποσοστά των 1.200 και 1.500 ppm στον Χώρο 10 είναι σχετικά μικρή. Αυτό δείχνει ότι μεγάλο μέρος των υψηλών τιμών δεν παρέμεινε κοντά στα 1.200 ppm, αλλά προχώρησε σε ακόμη υψηλότερα επίπεδα. Η μορφή αυτή είναι πιο σοβαρή από μια σειρά σύντομων και οριακών υπερβάσεων.

Στους Χώρους 4, 5, 7, 8, 11 και 13 δεν εμφανίστηκε καμία τιμή πάνω από τα 1.000 ppm. Ο Χώρος 11 παρέμεινε κάτω και από τα 800 ppm σε ολόκληρη τη διαθέσιμη περίοδο. Στον Χώρο 13, μόνο το 0,81% των καταγραφών ξεπέρασε τα 800 ppm.

Ο Χώρος 6 παρουσίασε 1,39% των καταγραφών πάνω από τα 1.000 ppm. Μόνο μία μέτρηση ξεπέρασε τα 1.200 ppm. Στον Χώρο 12 καταγράφηκε μία μόνο τιμή πάνω από τα 1.000 ppm. Οι περιπτώσεις αυτές χρειάζονται παρακολούθηση, αλλά δεν δείχνουν συστηματική ανεπάρκεια με βάση το εβδομαδιαίο κριτήριο.

Στο σύνολο των διαθέσιμων μετρήσεων, το 8,67% ήταν πάνω από τα 1.000 ppm. Το αντίστοιχο ποσοστό πάνω από τα 1.500 ppm ήταν 0,95% και προήλθε αποκλειστικά από τον Χώρο 10.

6.4 Αποτελέσματα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας

Οι μετρήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας χρησιμοποιήθηκαν για τη συμπληρωματική περιγραφή του εσωτερικού περιβάλλοντος. Δεν πραγματοποιήθηκε πλήρης υπολογισμός θερμικής άνεσης, καθώς θα απαιτούνταν πρόσθετες μεταβλητές [9].

Χώρος	Μέση T (°C)	Εύρος T (°C)	Μέση RH	Εύρος RH
Χώρος 1	20,22	18,7–21,8	48,30%	38–61%
Χώρος 2	19,50	17,9–21,6	48,19%	39–57%
Χώρος 3	20,73	19,1–24,0	54,60%	45–66%
Χώρος 4	21,34	19,5–23,4	46,35%	45–52%
Χώρος 5	21,67	20,2–23,6	46,40%	45–48%
Χώρος 6	21,52	18,9–23,3	45,98%	27–58%
Χώρος 7	20,33	18,4–22,2	43,08%	40–44%
Χώρος 8	20,98	17,9–24,5	38,89%	29–45%
Χώρος 9	21,36	17,9–24,0	40,95%	32–51%
Χώρος 10	21,47	18,8–25,2	40,75%	29–54%
Χώρος 11	21,13	18,3–24,8	36,67%	30–42%
Χώρος 12	21,79	19,5–25,2	40,85%	33–49%
Χώρος 13	22,74	21,0–25,1	39,99%	31–46%

Πίνακας 6.2: Θερμοκρασία και σχετική υγρασία ανά χώρο

Οι μέσες θερμοκρασίες κυμάνθηκαν από 19,50 έως 22,74 °C. Η χαμηλότερη μέση τιμή εμφανίστηκε στον Χώρο 2 και η υψηλότερη στον Χώρο 13. Η περιορισμένη απόσταση μεταξύ των περισσότερων μέσων τιμών δείχνει ότι δεν υπήρχε μεγάλη διαφορά στη βασική θερμική κατάσταση των χώρων.

Η ελάχιστη θερμοκρασία ήταν 17,9 °C και εμφανίστηκε στους Χώρους 2, 8 και 9. Η μέγιστη έφτασε τους 25,2 °C στους Χώρους 10 και 12. Οι ακραίες τιμές δεν περιγράφουν τη διάρκεια των αντίστοιχων συνθηκών. Επομένως, δεν αρκούν από μόνες τους για να χαρακτηριστεί ένας χώρος θερμικά ανεπαρκής.

Ο Χώρος 13 παρουσίασε την υψηλότερη μέση θερμοκρασία, αλλά η ελάχιστη τιμή του ήταν επίσης η υψηλότερη, με 21,0 °C. Αυτό δείχνει μια γενικά θερμότερη περίοδο και όχι μόνο μια σύντομη κορυφή. Αντίθετα, στους Χώρους 8, 9 και 10 εμφανίστηκε μεγαλύτερο εύρος μεταβολής.

Η μέση σχετική υγρασία κυμάνθηκε από 36,67% έως 54,60%. Η υψηλότερη μέση τιμή εμφανίστηκε στον Χώρο 3. Η χαμηλότερη καταγράφηκε στον Χώρο 11. Οι Χώροι 8, 11 και 13 είχαν μέση υγρασία κάτω από 40%.

Η ελάχιστη σχετική υγρασία ήταν 27% στον Χώρο 6. Χαμηλές ελάχιστες τιμές εμφανίστηκαν επίσης στους Χώρους 8 και 10, με 29%. Η μέγιστη τιμή ήταν 66% στον Χώρο 3. Οι τιμές αυτές ήταν μεμονωμένα άκρα και δεν πρέπει να συγχέονται με τις αντίστοιχες μέσες συνθήκες.

Η υγρασία επηρεάζει την αίσθηση του εσωτερικού περιβάλλοντος [29], ενώ η θερμοκρασία μπορεί να ενισχύει ή να περιορίζει την αντίληψη αποπνικτικής ατμόσφαιρας [28], [30]. Ωστόσο, δεν εμφανίστηκε απλή σχέση ανάμεσα στις μέσες θερμοκρασίες και στο CO₂. Ο Χώρος 10 είχε πολύ υψηλό P95 CO₂, αλλά η μέση θερμοκρασία του ήταν κοντά σε εκείνη αρκετών χώρων με χαμηλές συγκεντρώσεις.

Η παρατήρηση αυτή δείχνει ότι το πρόβλημα του Χώρου 10 δεν μπορεί να εξηγηθεί μόνο από μια γενική θερμική απόκλιση. Αντίστοιχα, ο Χώρος 3 είχε την υψηλότερη μέση υγρασία, αλλά όχι τη δυσμενέστερη εικόνα CO₂. Κάθε μεταβλητή διατηρεί επομένως διαφορετικό ρόλο στην αξιολόγηση.

6.5 Απαιτούμενη παροχή αέρα και ρυθμός ανανέωσης

Οι υπολογισμοί εφαρμόστηκαν στα τρία σενάρια χώρου και πληρότητας που ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Οι απαιτήσεις στόχου αυξάνονται με τον αριθμό των χρηστών. Ο ACH επηρεάζεται και από τον όγκο του χώρου [8], [11]. Τα βασικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4.

Σενάριο	Εμβαδόν	Άτομα	Όγκος	Απαιτούμενη παροχή	Απαιτούμενος ACH
A – Μικρό γραφείο	10 m ²	1	28 m ³	31,20 m ³ /h	1,11 h ⁻¹
B – Βασικό γραφείο	15 m ²	2	42 m ³	62,40 m ³ /h	1,49 h ⁻¹
Γ – Μεγάλο γραφείο	20 m ²	3	56 m ³	93,60 m ³ /h	1,67 h ⁻¹

Πίνακας 6.3: Απαιτήσεις αερισμού των τριών σεναρίων

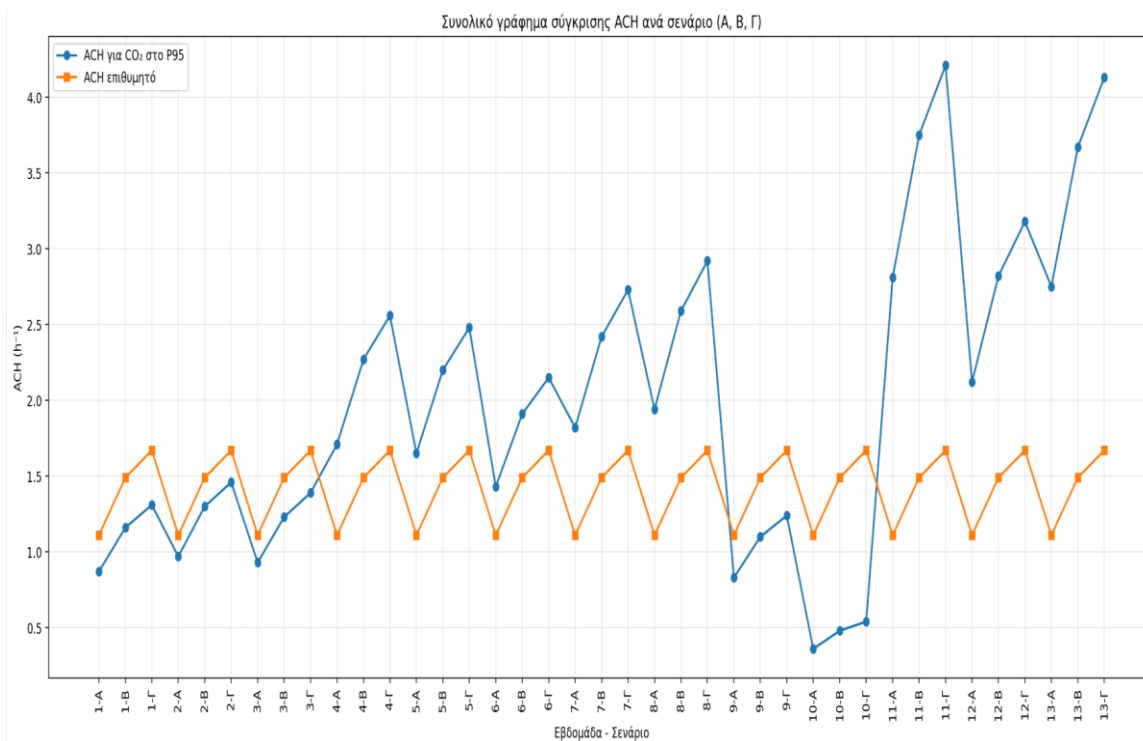
Η αύξηση της απαιτούμενης παροχής είναι ανάλογη με τον αριθμό των ατόμων. Η μεταβολή του ACH δεν είναι ανάλογη στον ίδιο βαθμό, επειδή αυξάνεται ταυτόχρονα και ο όγκος του χώρου. Το σενάριο Γ χρειάζεται τη μεγαλύτερη παροχή και τον υψηλότερο ρυθμό ανανέωσης.

Για τους οκτώ χώρους με P95 έως 1.000 ppm, η εκτιμώμενη παροχή που αντιστοιχεί στο P95 ήταν ίση ή μεγαλύτερη από την απαίτηση στόχου. Με βάση το κριτήριο του υπολογιστικού μοντέλου, η πρόσθετη παροχή ορίστηκε επομένως σε μηδέν. Το αποτέλεσμα δεν σημαίνει ότι η παροχή μετρήθηκε άμεσα. Δείχνει μόνο ότι οι καταγεγραμμένες συγκεντρώσεις δεν υποδεικνύουν έλλειμμα ως προς τον συγκεκριμένο στόχο.

Για τους υπόλοιπους πέντε χώρους προέκυψε πρόσθετη απαίτηση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5. Οι τιμές βασίζονται στο P95 και στις παραδοχές κάθε σεναρίου. Η εκτίμηση μέσω CO₂ περιλαμβάνει αβεβαιότητα, επειδή εξαρτάται από την πληρότητα, την παραγωγή ανά άτομο και την ανάμειξη του αέρα [24], [25].

Χώρος	P95 CO ₂	Πρόσθετη παροχή Α	Πρόσθετο ACH Α	Πρόσθετη παροχή Β	Πρόσθετο ACH Β	Πρόσθετη παροχή Γ	Πρόσθετο ACH Γ
Χώρος 1	1.168,00 ppm	6,83 m ³ /h	0,24 h ⁻¹	13,65 m ³ /h	0,33 h ⁻¹	20,48 m ³ /h	0,37 h ⁻¹
Χώρος 2	1.086,25 ppm	3,92 m ³ /h	0,14 h ⁻¹	7,84 m ³ /h	0,19 h ⁻¹	11,76 m ³ /h	0,21 h ⁻¹
Χώρος 3	1.122,00 ppm	5,27 m ³ /h	0,19 h ⁻¹	10,54 m ³ /h	0,25 h ⁻¹	15,82 m ³ /h	0,28 h ⁻¹
Χώρος 9	1.209,00 ppm	8,06 m ³ /h	0,29 h ⁻¹	16,12 m ³ /h	0,38 h ⁻¹	24,18 m ³ /h	0,43 h ⁻¹
Χώρος 10	2.241,25 ppm	21,03 m ³ /h	0,75 h ⁻¹	42,07 m ³ /h	1,00 h ⁻¹	63,10 m ³ /h	1,13 h ⁻¹

Πίνακας 6.4: Πρόσθετη παροχή και πρόσθετο ACH στους χώρους με P95 πάνω από 1.000 ppm



Γράφημα 6 (from Excel)

Ο Χώρος 2 είχε τη μικρότερη πρόσθετη απαίτηση. Στο βασικό σενάριο Β, η πρόσθετη παροχή ήταν 7,84 m³/h και το πρόσθετο ACH 0,19 h⁻¹. Η μικρή διαφορά από τον στόχο συμφωνεί με το P95 των 1.086,25 ppm.

Στους Χώρους 1 και 3, η πρόσθετη παροχή του βασικού σεναρίου ήταν 13,65 και 10,54 m³/h αντίστοιχα. Ο Χώρος 1 είχε υψηλότερη μέση συγκέντρωση και μεγαλύτερο ποσοστό πάνω από τα 800 ppm. Ο Χώρος 3 είχε χαμηλότερη μέση τιμή, αλλά αρκετές περιόδους πάνω από τα 1.000 ppm.

Ο Χώρος 9 χρειάστηκε 16,12 m³/h πρόσθετου αέρα στο βασικό σενάριο. Η τιμή ήταν μεγαλύτερη από εκείνη των Χώρων 1, 2 και 3, γεγονός που συμφωνεί με το υψηλότερο P95 των 1.209 ppm.

Η μεγαλύτερη απαίτηση προέκυψε στον Χώρο 10. Στο βασικό σενάριο, η πρόσθετη παροχή ήταν 42,07 m³/h και το πρόσθετο ACH 1,00 h⁻¹. Στο μεγάλο σενάριο, η πρόσθετη παροχή έφτασε τα 63,10 m³/h. Το αποτέλεσμα δείχνει σημαντική απόσταση από την απαίτηση στόχου.

Οι τιμές μεταβάλλονται με το σενάριο. Επομένως, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τελικές οδηγίες ρύθμισης χωρίς γνώση των πραγματικών διαστάσεων και της πληρότητας. Παρέχουν όμως κοινή βάση για τη σύγκριση της έντασης του προβλήματος μεταξύ των χώρων.

6.6 Χώροι με ανάγκη ενισχυμένου αερισμού

Η μεγαλύτερη ανάγκη ενίσχυσης εμφανίστηκε στον Χώρο 10. Το P95 ήταν 2.241,25 ppm και το 11,95% των καταγραφών ξεπέρασε τα 1.500 ppm. Παράλληλα, η πρόσθετη παροχή ήταν η μεγαλύτερη και στα τρία σενάρια. Ο χώρος αυτός αποτελεί την πρώτη προτεραιότητα για τεχνικό έλεγχο.

Ο έλεγχος του Χώρου 10 πρέπει να εξετάσει την πραγματική πληρότητα, τη λειτουργία του μηχανικού αερισμού και τη δυνατότητα φυσικής ανανέωσης. Πρέπει επίσης να ελεγχθεί η θέση του αισθητήρα. Η μέτρηση CO₂ επηρεάζεται από τοπικές συνθήκες [21], [24], όμως η μεγάλη διάρκεια των υψηλών τιμών δείχνει ότι το αποτέλεσμα δεν μπορεί να αποδοθεί εύκολα σε μία στιγμιαία τοπική αιχμή.

Ο Χώρος 9 αποτελεί τη δεύτερη βασική προτεραιότητα. Το P95 ήταν 1.209 ppm και το 22,06% των καταγραφών ξεπέρασε τα 1.000 ppm. Η πρόσθετη παροχή του βασικού

σεναρίου ήταν $16,12 \text{ m}^3/\text{h}$. Η κατάσταση ήταν ηπιότερη από εκείνη του Χώρου 10, αλλά πιο έντονη από εκείνη των Χώρων 2 και 3.

Ο Χώρος 1 χρειάζεται επίσης ενισχυμένο αερισμό. Παρουσίασε τη μεγαλύτερη μέση συγκέντρωση και το υψηλότερο ποσοστό πάνω από τα 800 ppm . Αν και το P95 ήταν χαμηλότερο από εκείνο του Χώρου 9, η συχνή παραμονή σε σχετικά αυξημένες τιμές δείχνει μια σταθερότερη επιβάρυνση.

Οι Χώροι 2 και 3 εμφάνισαν μικρότερο έλλειμμα. Ο Χώρος 2 είχε P95 κοντά στον στόχο και τη μικρότερη πρόσθετη απαίτηση. Ο Χώρος 3 είχε περισσότερες καταγραφές πάνω από τα 1.000 ppm , παρά τον χαμηλότερο μέσο όρο. Οι δύο χώροι μπορούν να ενταχθούν σε δεύτερο στάδιο παρέμβασης μετά τον Χώρο 10 και τους Χώρους 1 και 9.

Οι Χώροι 6 και 12 δεν χρειάζονται αύξηση σύμφωνα με το εβδομαδιαίο κριτήριο P95. Παρουσίασαν όμως σύντομες υπερβάσεις. Για τον λόγο αυτό, είναι σκόπιμο να παρακολουθούνται, ειδικά αν αλλάξει η πληρότητα ή η χρήση τους. Η διατήρηση χαμηλού P95 δεν αποκλείει ένα μεμονωμένο πρόβλημα σε συγκεκριμένη ώρα.

Οι Χώροι 4, 5, 7, 8, 11 και 13 παρουσίασαν επαρκή εικόνα ως προς τον στόχο των 1.000 ppm . Δεν προκύπτει ανάγκη αύξησης της παροχής από τα διαθέσιμα δεδομένα. Πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις μπορεί, ωστόσο, να συνδέονται και με μικρή πληρότητα. Χωρίς άμεσες μετρήσεις παρουσίας δεν μπορεί να εκτιμηθεί αν η παροχή ήταν μεγαλύτερη από την αναγκαία.

Η αξιολόγηση βασίζεται κυρίως στο CO_2 . Το αέριο αποτελεί χρήσιμο δείκτη για την ανθρώπινη παρουσία και την ανανέωση [21], αλλά δεν καλύπτει όλους τους ρύπους [31]. Επομένως, ο χαρακτηρισμός ενός χώρου ως επαρκούς αφορά τον στόχο του παρόντος μοντέλου και όχι μια πλήρη πιστοποίηση της συνολικής ποιότητας του αέρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

7.1 Κατάσταση αναφοράς και πλαίσιο σύγκρισης

Η σύγκριση των τριών στρατηγικών πραγματοποιήθηκε στην κοινή χρονική βάση των ενεργειακών και περιβαλλοντικών δεδομένων. Η βάση περιλαμβάνει 2.106 ώρες. Κατά το ίδιο διάστημα καταγράφηκαν συνολικά 19.403,09 kWh. Η τιμή αυτή είναι κοινή για όλες τις στρατηγικές, επειδή προέρχεται από την πραγματική λειτουργία του κτιρίου και όχι από προσομοίωση της κατανάλωσης μετά την εφαρμογή κάθε ελέγχου.

Ως κατάσταση αναφοράς χρησιμοποιήθηκε η σταθερή λειτουργία E0. Η επιλογή κοινής αναφοράς είναι απαραίτητη για τη σύγκριση διαφορετικών λειτουργικών παρεμβάσεων [17]. Όλες οι στρατηγικές εφαρμόστηκαν στις ίδιες ώρες και στις ίδιες μετρήσεις CO₂. Επομένως, οι διαφορές που προέκυψαν οφείλονται μόνο στους κανόνες λειτουργίας που εξετάστηκαν.

Η αξιολόγηση δεν περιορίστηκε στη συνολική ποσότητα αέρα. Εξετάστηκαν επίσης οι ώρες λειτουργίας, η κατανομή της παροχής στις τρεις βαθμίδες και η απόκριση κατά τις ώρες αυξημένου CO₂. Ο έλεγχος βάσει ζήτησης πρέπει να περιορίζει την περιττή λειτουργία, χωρίς να αγνοεί τις περιόδους πραγματικής ανάγκης [26], [27].

Η σύγκριση αφορά τον όγκο μηχανικού αερισμού και όχι την άμεση κατανάλωση σε kWh. Δεν υπήρχε ανεξάρτητη μέτρηση του ανεμιστήρα ούτε γνωστή καμπύλη ισχύος. Η επαλήθευση πραγματικής εξοικονόμησης απαιτεί μέτρηση πριν και μετά την εφαρμογή μιας παρέμβασης [17], [18]. Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα εκφράζουν ενεργειακό δυναμικό.

7.2 Στρατηγική E0: σταθερή λειτουργία

Στη στρατηγική E0 εφαρμόστηκε σταθερή παροχή 62,4 m³/h σε όλες τις διαθέσιμες ώρες. Ο συνολικός όγκος αέρα ήταν 131.414,40 m³. Η μέση παροχή ανά διαθέσιμη ώρα ήταν ίση με 62,4 m³/h, καθώς η τιμή δεν μεταβαλλόταν.

Σε κάθε πλήρη εβδομάδα των 168 ωρών, ο όγκος έφτανε τα 10.483,20 m³. Οι μικρότερες τιμές των τελευταίων περιόδων οφείλονται στις λιγότερες διαθέσιμες ώρες και όχι σε διαφορετική λειτουργία. Η Ε0 παρέμενε ενεργή σε όλη την κοινή περίοδο.

Το βασικό πλεονέκτημα της Ε0 είναι η απλότητα. Η λειτουργία της δεν εξαρτάται από αισθητήρες, από χρονικά προγράμματα ή από την επεξεργασία δεδομένων. Η σταθερή παροχή μπορεί να είναι χρήσιμη σε χώρους με προβλέψιμη και σταθερή χρήση. Δεν αντιμετωπίζει όμως τις διακυμάνσεις της πραγματικής πληρότητας [26].

Από τις 2.106 ώρες της ανάλυσης, οι 1.630 ώρες είχαν μέσο CO₂ έως 800 ppm. Το ποσοστό αυτό αντιστοιχεί στο 77,40% της περιόδου. Η Ε0 παρείχε και σε αυτές τις ώρες τη βασική παροχή των 62,4 m³/h. Η λειτουργία δεν μειωνόταν, παρότι οι μετρήσεις έδειχναν σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις.

Παράλληλα, 178 ώρες είχαν μέσο CO₂ πάνω από 1.000 ppm. Η Ε0 δεν αύξανε την παροχή κατά τις συγκεκριμένες ώρες. Παρέμενε στην ίδια τιμή που εφαρμοζόταν και όταν το CO₂ ήταν χαμηλό. Συνεπώς, η στρατηγική δεν ανταποκρινόταν ούτε στις περιόδους περιορισμένης ανάγκης ούτε στις περιόδους μεγαλύτερης επιβάρυνσης.

Η σταθερή λειτουργία αποτελεί επομένως χρήσιμη γραμμή βάσης, αλλά όχι βελτιστοποιημένη λύση. Η απουσία προσαρμογής οδηγεί σε αυξημένο όγκο αέρα κατά τις περισσότερες ώρες. Ταυτόχρονα, δεν προσφέρει πρόσθετη απόκριση όταν η συγκέντρωση ξεπερνά τον επιλεγμένο στόχο.

7.3 Στρατηγική Ε1: έλεγχος βάσει CO₂

Η στρατηγική Ε1 προσαρμόζει την παροχή στον ωριαίο μέσο όρο του CO₂. Η χαμηλή βαθμίδα των 31,2 m³/h εφαρμόστηκε σε 1.630 ώρες. Η βασική βαθμίδα των 62,4 m³/h εφαρμόστηκε σε 298 ώρες και η υψηλή βαθμίδα των 93,6 m³/h σε 178 ώρες.

Η χαμηλή βαθμίδα κάλυψε το 77,40% της κοινής περιόδου. Η βασική βαθμίδα αντιστοιχούσε στο 14,15% και η υψηλή στο 8,45%. Η κατανομή δείχνει ότι η μέγιστη

παροχή δεν ήταν αναγκαία κατά το μεγαλύτερο μέρος της περιόδου. Αυτή είναι η κύρια αιτία της μείωσης που προέκυψε σε σχέση με την E0.

Ο συνολικός όγκος της E1 ήταν 86.112,00 m³. Η μείωση σε σχέση με τη σταθερή λειτουργία ήταν 34,47%. Η μέση παροχή ανά διαθέσιμη ώρα μειώθηκε από 62,4 σε 40,89 m³/h.

Η μείωση δεν ήταν ίδια σε όλες τις εβδομάδες. Στην περίοδο του Χώρου 1 περιορίστηκε στο 2,08%, επειδή μεγάλο μέρος των ωρών βρισκόταν στις δύο υψηλότερες βαθμίδες. Στην περίοδο του Χώρου 2 ήταν 10,42%. Στους Χώρους 3, 9 και 10 κυμάνθηκε από 18,45% έως 19,35%.

Αντίθετα, στις περιόδους με χαμηλότερες συγκεντρώσεις, η μείωση ήταν μεγαλύτερη. Στους Χώρους 4 έως 8 κυμάνθηκε από 43,75% έως 48,81%. Στους Χώρους 11 και 12 έφτασε το 50,00%, ενώ στον Χώρο 13 ήταν 49,32%. Η διαφορετική συμπεριφορά ανά περίοδο αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του ελέγχου βάσει ζήτησης [26], [27].

Η E1 παρέμενε διαθέσιμη και έξω από το προτεινόμενο ωράριο. Αυτό είχε ιδιαίτερη σημασία για τις ώρες αυξημένου CO₂. Από τις 178 ώρες πάνω από τα 1.000 ppm, μόνο οι 27 βρίσκονταν μέσα στο προτεινόμενο ωράριο. Οι υπόλοιπες 151 ώρες βρίσκονταν εκτός αυτού.

Η E1 θα εφαρμόζε υψηλή παροχή και στις 151 συγκεκριμένες ώρες. Η δυνατότητα αυτή προσφέρει προστασία σε περίπτωση πραγματικής παρουσίας μετά το τέλος του προγράμματος. Μπορεί επίσης να επιταχύνει την απομάκρυνση του CO₂ που παρέμεινε στον χώρο μετά την αποχώρηση των χρηστών.

Η αυξημένη συγκέντρωση εκτός ωραρίου δεν αποδεικνύει ότι ο χώρος ήταν κατειλημμένος. Το CO₂ μπορεί να παραμένει υψηλό για κάποιο διάστημα μετά την αποχώρηση [21], ενώ η ταχύτητα μείωσής του εξαρτάται από την ανανέωση [24]. Ωστόσο, χωρίς πραγματικά δεδομένα παρουσίας, δεν είναι ασφαλές να θεωρηθεί ότι όλες αυτές οι ώρες δεν χρειάζονται αερισμό.

Η E1 έχει επομένως δύο βασικά πλεονεκτήματα. Μειώνει την παροχή κατά τις ώρες χαμηλού CO₂ και την αυξάνει όταν εμφανίζεται μεγαλύτερη ανάγκη. Η προσαρμογή

συνεχίζεται σε ολόκληρο το εικοσιτετράωρο και δεν εξαρτάται από την ακρίβεια ενός σταθερού προγράμματος.

Η εφαρμογή της απαιτεί αξιόπιστο αισθητήρα και τακτικό έλεγχο των μετρήσεων. Μια λανθασμένη τιμή μπορεί να προκαλέσει αδικαιολόγητα υψηλή ή χαμηλή παροχή [21], [26]. Χρειάζεται επίσης να διατηρείται μια ελάχιστη παροχή, επειδή το CO₂ δεν αποτυπώνει όλους τους εσωτερικούς ρύπους [8], [31], [47].

7.4 Στρατηγική E2: συνδυασμός CO₂ και ωραρίου

Η στρατηγική E2 εφάρμοσε τις τρεις βαθμίδες CO₂ μόνο μέσα στο προτεινόμενο ωράριο. Από τις 2.106 διαθέσιμες ώρες, οι 704 χαρακτηρίστηκαν ως ώρες λειτουργίας. Οι υπόλοιπες 1.402 ώρες θεωρήθηκαν εκτός προγράμματος και έλαβαν μηδενική μηχανική παροχή.

Οι ώρες ενεργής λειτουργίας αντιστοιχούσαν στο 33,43% της κοινής περιόδου. Οι ώρες μηδενικής παροχής κάλυψαν το υπόλοιπο 66,57%. Η μεγάλη διαφορά δείχνει ότι το κύριο αποτέλεσμα της E2 προέρχεται από τον χρονικό περιορισμό και όχι μόνο από τη μεταβολή της παροχής βάσει CO₂.

Μέσα στο ωράριο, η χαμηλή βαθμίδα εφαρμόστηκε σε 588 ώρες. Η βασική βαθμίδα εφαρμόστηκε σε 89 ώρες και η υψηλή σε 27 ώρες. Ως ποσοστό των ενεργών ωρών, οι τρεις βαθμίδες αντιστοιχούσαν σε 83,52%, 12,64% και 3,84% αντίστοιχα.

Ο συνολικός όγκος της E2 ήταν 26.426,40 m³. Η μείωση σε σχέση με την E0 έφτασε το 79,89%. Σε σχέση με την E1, ο όγκος ήταν μικρότερος κατά 69,31%. Η μέση παροχή σε σχέση με όλες τις διαθέσιμες ώρες ήταν 12,55 m³/h.

Η μείωση της E2 παρέμεινε υψηλή σε όλες τις περιόδους. Η μικρότερη τιμή ήταν 73,51% στον Χώρο 2 και η μεγαλύτερη 83,56% στον Χώρο 13. Οι διαφορές μεταξύ των εβδομάδων ήταν μικρότερες από εκείνες της E1, επειδή ο σταθερός αποκλεισμός των ωρών εκτός προγράμματος κυριάρχησε στο τελικό αποτέλεσμα.

Η E2 είχε πλεονέκτημα ως προς τον περιορισμό της λειτουργίας. Ο χρονικός έλεγχος μπορεί να μειώσει σημαντικά την περιττή χρήση όταν το ωράριο ανταποκρίνεται στην πραγματική παρουσία [16]. Παράλληλα, η χρήση CO₂ μέσα στο πρόγραμμα αποτρέπει τη σταθερή λειτουργία στην ίδια παροχή κατά τη διάρκεια όλης της εργάσιμης ημέρας [26], [27], [43].

Το βασικό μειονέκτημα προκύπτει έξω από το ωράριο. Από τις 178 ώρες με CO₂ πάνω από 1.000 ppm, η E2 θα ανταποκρινόταν μόνο στις 27. Οι υπόλοιπες 151 ώρες θα είχαν μηδενική μηχανική παροχή. Πρόκειται για το 84,83% των ωρών αυξημένου CO₂.

Αντίστοιχα, από τις 298 ώρες στη μεσαία ζώνη των 800–1.000 ppm, οι 209 βρίσκονταν εκτός ωραρίου. Η E2 δεν θα αντιδρούσε ούτε σε αυτές. Η συμπεριφορά αυτή αυξάνει την εξοικονόμηση, αλλά περιορίζει την ικανότητα απόκρισης σε μη προγραμματισμένη παρουσία ή σε αργή απομάκρυνση του CO₂.

Η υπόθεση μηδενικής μηχανικής παροχής δεν σημαίνει ότι ο πραγματικός χώρος θα παρέμενε χωρίς καμία ανανέωση. Οι διηθήσεις, τα ανοίγματα και ο φυσικός αερισμός μπορεί να συνεχίζονται. Οι μηχανισμοί αυτοί όμως δεν καταγράφηκαν και δεν μπορούν να θεωρηθούν ελεγχόμενη παροχή.

Η E2 είναι επομένως ιδιαίτερα αποτελεσματική ως προς τον περιορισμό του όγκου. Η απόδοσή της εξαρτάται όμως από την ακρίβεια του ωραρίου. Οι χώροι με ακανόνιστη χρήση χρειάζονται δυνατότητα παράκαμψης ή άμεση πληροφορία παρουσίας [32], [35].

7.5 Συγκριτική αξιολόγηση παροχής αέρα, χρόνου λειτουργίας και απόκρισης

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των τριών στρατηγικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1. Η σύγκριση δείχνει σημαντική διαφορά τόσο στον συνολικό όγκο όσο και στον χρόνο ενεργής λειτουργίας.

Δείκτης	E0	E1	E2
Διαθέσιμες ώρες	2.106	2.106	2.106
Ώρες ενεργής μηχανικής λειτουργίας	2.106	2.106	704
Ώρες μηδενικής μηχανικής παροχής	0	0	1.402
Ώρες χαμηλής παροχής	0	1.630	588
Ώρες βασικής παροχής	2.106	298	89
Ώρες υψηλής παροχής	0	178	27
Συνολικός όγκος αέρα	131.414,40 m ³	86.112,00 m ³	26.426,40 m ³
Μέση παροχή ανά διαθέσιμη ώρα	62,40 m ³ /h	40,89 m ³ /h	12,55 m ³ /h
Μείωση ως προς την E0	0,00%	34,47%	79,89%

Πίνακας 7.1: Σύγκριση των στρατηγικών

Η E0 είχε τον μεγαλύτερο όγκο και δεν προσαρμοζόταν στις μετρήσεις. Η E1 μείωσε τον όγκο, χωρίς να διακόψει πλήρως τη λειτουργία. Η E2 παρουσίασε τη μεγαλύτερη μείωση, κυρίως επειδή παρέμενε ανενεργή στα δύο τρίτα της κοινής περιόδου.

Η σύγκριση ανά εβδομάδα παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.2. Οι τιμές της καταγεγραμμένης ενέργειας δίνονται μόνο για να περιγράψουν το πραγματικό λειτουργικό πλαίσιο κάθε περιόδου. Δεν αποτελούν υπολογισμένη κατανάλωση των E0, E1 ή E2.

Χώρος	Ωρες	Καταγεγραμμένη ενέργεια	Μείωση E1	Μείωση E2
Χώρος 1	168	1.666,19 kWh	2,08%	74,70%
Χώρος 2	168	1.773,75 kWh	10,42%	73,51%
Χώρος 3	168	1.590,52 kWh	19,35%	82,14%
Χώρος 4	168	1.550,22 kWh	48,51%	82,14%
Χώρος 5	168	1.523,33 kWh	47,32%	80,95%
Χώρος 6	168	1.462,47 kWh	43,75%	79,46%
Χώρος 7	168	1.390,89 kWh	47,92%	81,55%
Χώρος 8	168	1.558,41 kWh	48,81%	82,44%
Χώρος 9	168	1.503,07 kWh	19,35%	76,79%
Χώρος 10	168	1.611,38 kWh	18,45%	80,65%
Χώρος 11	113	1.217,49 kWh	50,00%	76,55%
Χώρος 12	167	1.530,66 kWh	50,00%	83,53%
Χώρος 13	146	1.024,72 kWh	49,32%	83,56%

Πίνακας 7.2: Εβδομαδιαία μείωση του όγκου αέρα

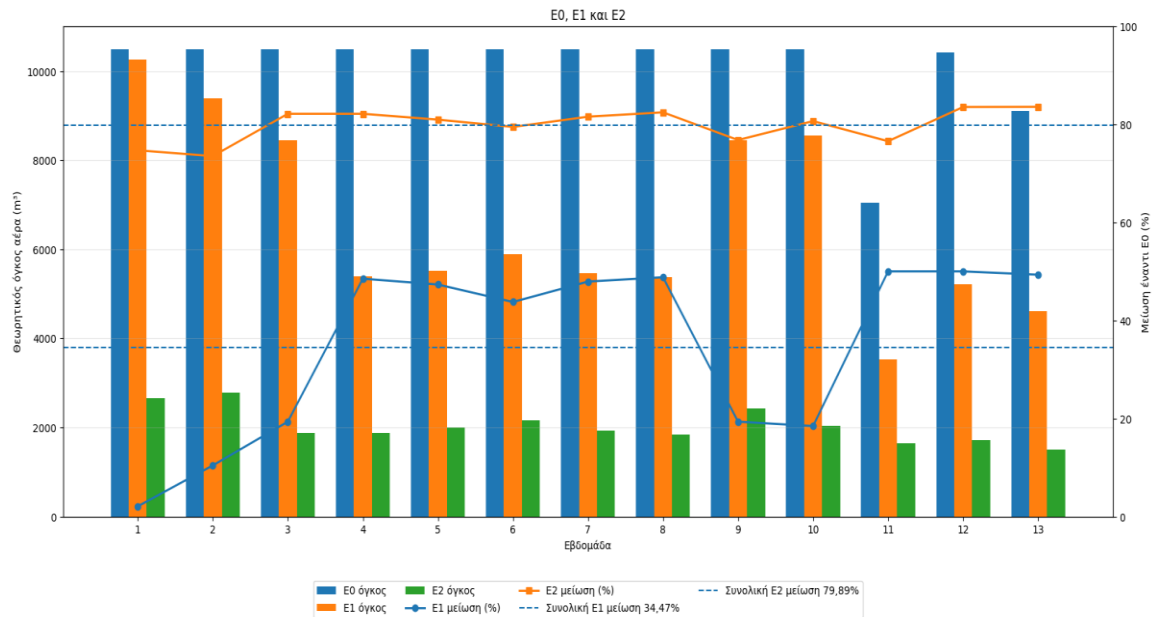
Οι εβδομαδιαίες τιμές της E1 ακολούθησαν τη συμπεριφορά του CO₂. Οι περίοδοι με συχνές υψηλές συγκεντρώσεις είχαν μικρότερη μείωση, επειδή το σύστημα παρέμενε περισσότερο στη βασική ή στην υψηλή βαθμίδα. Στις περιόδους με χαμηλές τιμές, η παροχή παρέμενε κυρίως στη χαμηλή βαθμίδα και η μείωση πλησίαζε το 50%.

Η Ε2 παρουσίασε μικρότερη διακύμανση μεταξύ των περιόδων. Ακόμη και στις εβδομάδες με αυξημένο CO₂, η μείωση παρέμενε υψηλή, επειδή οι ώρες εκτός προγράμματος μηδενίζονταν. Αυτό δείχνει ότι το αποτέλεσμα της Ε2 εξαρτάται περισσότερο από το ωράριο και λιγότερο από τη μορφή της χρονοσειράς.

Ως προς την απόκριση στο εσωτερικό περιβάλλον, η Ε1 είναι η μόνη στρατηγική που αντιδρά σε όλες τις ώρες αυξημένου CO₂. Η Ε0 δεν αυξάνει την παροχή, ενώ η Ε2 αντιδρά μόνο όταν η αύξηση εμφανίζεται μέσα στο πρόγραμμα. Η Ε1 έχει επομένως το μεγαλύτερο περιθώριο προστασίας απέναντι σε μη αναμενόμενη χρήση.

Η μείωση των ενεργών ωρών από 2.106 σε 704 περιορίζει τη λειτουργία κατά 66,57%. Η πραγματική ενεργειακή επίδραση θα εξαρτηθεί από τον τύπο του ανεμιστήρα και την επεξεργασία του εξωτερικού αέρα [26]. Δεν είναι επομένως ορθό να θεωρηθεί ότι η μείωση του όγκου κατά 79,89% οδηγεί αυτομάτως σε αντίστοιχη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας (kWh).

Ως προς την ποιότητα του αέρα, δεν υπολογίστηκαν νέες συγκεντρώσεις μετά την εφαρμογή των στρατηγικών. Όλες οι επιλογές χρησιμοποιούν τις ίδιες πραγματικές μετρήσεις ως σήμα εισόδου. Συνεπώς, δεν μπορεί να δηλωθεί ότι η Ε1 ή η Ε2 θα μείωνε το P95 κατά συγκεκριμένο ποσοστό. Για τέτοιο συμπέρασμα θα χρειαζόταν δυναμικό μοντέλο ή πιλοτική εφαρμογή και νέα μέτρηση [17], [18].



Γράφημα 7 (from Excel)

Η συνολική αξιολόγηση δείχνει ότι δεν υπάρχει στρατηγική που υπερέχει σε όλα τα κριτήρια. Η Ε0 είναι η απλούστερη αλλά έχει τον μεγαλύτερο όγκο και τη μικρότερη προσαρμοστικότητα. Η Ε1 προσφέρει ισορροπία μεταξύ μείωσης και συνεχούς απόκρισης. Η Ε2 εμφανίζει το μεγαλύτερο δυναμικό εξοικονόμησης, αλλά βασίζεται σε αυστηρή παραδοχή απουσίας ανάγκης εκτός ωραρίου.

7.6 Επιλογή της καταλληλότερης στρατηγικής

Η Ε0 δεν επιλέγεται ως βέλτιστη στρατηγική. Η σταθερή λειτουργία οδηγεί στον μεγαλύτερο συνολικό όγκο και δεν αντιδρά στις μεταβολές του CO₂. Η χρήση της είναι κατάλληλη κυρίως ως κατάσταση αναφοράς.

Η Ε1 μειώνει τον όγκο κατά 34,47% και ανταποκρίνεται σε όλες τις καταγεγραμμένες ώρες. Προσαρμόζει την παροχή τόσο μέσα όσο και έξω από το προτεινόμενο πρόγραμμα. Με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα, αποτελεί την πιο ασφαλή και ισορροπημένη από τις τρεις στρατηγικές ακριβώς όπως μοντελοποιήθηκαν.

Η Ε2 εμφανίζει μεγαλύτερη μείωση, η οποία φτάνει το 79,89%. Ωστόσο, η μηδενική μηχανική παροχή εκτός ωραρίου αγνοεί 151 ώρες στις οποίες ο ωριαίος μέσος όρος του

CO₂ ήταν πάνω από τα 1.000 ppm. Χωρίς δεδομένα πραγματικής παρουσίας, δεν μπορεί να αποδειχθεί ότι όλες αυτές οι ώρες ήταν κενές ή ότι δεν χρειάζονταν αερισμό.

Για τον λόγο αυτό, η E2 δεν πρέπει να εφαρμοστεί αυτούσια. Η καταλληλότερη πρακτική λύση είναι μια βελτιωμένη μορφή της. Το ωράριο μπορεί να χρησιμοποιείται ως βασικός κανόνας, αλλά πρέπει να επιτρέπεται υπερίσχυση από το CO₂ και έξω από το πρόγραμμα. Οι τυποποιημένες ακολουθίες ελέγχου προβλέπουν ασφαλείς καταστάσεις και δυνατότητα παράκαμψης όταν οι πραγματικές συνθήκες διαφέρουν από το πρόγραμμα [16].

Στη βελτιωμένη στρατηγική, το σύστημα θα λειτουργεί βάσει CO₂ μέσα στο ωράριο. Εκτός ωραρίου θα μπορεί να παραμένει ανενεργό μόνο όταν η συγκέντρωση είναι χαμηλή. Εάν το CO₂ υπερβεί το επιλεγμένο επίπεδο, θα ενεργοποιείται προσωρινά η κατάλληλη βαθμίδα. Μετά τη μείωση της συγκέντρωσης, το σύστημα θα επιστρέφει στην κατάσταση αναμονής.

Μπορεί επίσης να προβλεφθεί σύντομη λειτουργία πριν από την έναρξη της ημέρας. Η διαδικασία αυτή θα απομακρύνει τυχόν συσώρευση που παρέμεινε από την προηγούμενη περίοδο. Παρόμοια, μια μικρή παράταση μετά τη λήξη του ωραρίου θα επιτρέπει την ελεγχόμενη μείωση του CO₂ χωρίς συνεχή λειτουργία όλη τη νύχτα.

Η χρήση αισθητήρα παρουσίας θα ενίσχυε ακόμη περισσότερο τη στρατηγική. Οι πληροφορίες πληρότητας επιτρέπουν καλύτερη διάκριση μεταξύ πραγματικής χρήσης και αργής μείωσης της συγκέντρωσης [32], [35]. Έτσι, μια έκτακτη συνάντηση ή παραμονή προσωπικού δεν θα έμενε χωρίς μηχανικό αερισμό.

Με βάση τα αποτελέσματα, η τελική επιλογή διατυπώνεται σε δύο επίπεδα. Αν η σύγκριση περιοριστεί αυστηρά στις τρεις στρατηγικές όπως μοντελοποιήθηκαν, η E1 αποτελεί την πιο ισορροπημένη λύση. Προσφέρει σημαντική μείωση και διατηρεί απόκριση σε όλες τις ώρες.

Για την πραγματική εφαρμογή, προτείνεται η E2 με εξωτερική υπερίσχυση CO₂ και βασικούς μηχανισμούς ασφαλείας. Η προσαρμογή αυτή συνδυάζει το μεγάλο δυναμικό περιορισμού του ωραρίου με την προστασία που παρέχει ο έλεγχος βάσει ζήτησης. Η

τελική ρύθμιση πρέπει να επαληθευτεί πιλοτικά με νέα καταγραφή CO₂, χρόνου λειτουργίας και ηλεκτρικής κατανάλωσης [17], [18].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΖΗΤΗΣΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1 Ερμηνεία των βασικών αποτελεσμάτων

Η ανάλυση έδειξε ότι η ενεργειακή λειτουργία του κτιρίου μεταβάλλεται έντονα μέσα στον χρόνο και μεταξύ των ορόφων. Η συνολική κατανάλωση δεν αποτελεί από μόνη της επαρκή δείκτη. Η ωριαία και ημερήσια εξέταση αποκάλυψε πότε αυξάνονται τα φορτία, πόσο γρήγορα μειώνονται μετά το ωράριο και ποια τμήματα συμμετέχουν περισσότερο. Η προσέγγιση αυτή είναι σημαντική, καθώς η πραγματική ενεργειακή συμπεριφορά ενός κτιρίου διαμορφώνεται από τη χρήση και τις ρυθμίσεις του και όχι μόνο από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του [2], [4].

Οι μεγαλύτερες καταναλώσεις εμφανίστηκαν από τον Ιανουάριο έως τον Μάρτιο. Η σταθερά υψηλή ημερήσια τιμή κατά τους τρεις μήνες δείχνει ότι δεν επρόκειτο για ένα μεμονωμένο γεγονός. Η εξέλιξη είναι συμβατή με αυξημένες απαιτήσεις λειτουργίας κατά τη χειμερινή και την πρώτη ανοιξιάτικη περίοδο. Ωστόσο, χωρίς δεδομένα καιρού και αναλυτική μέτρηση των τελικών χρήσεων, δεν μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά στη θέρμανση. Η ενεργειακή ζήτηση των γραφείων επηρεάζεται ταυτόχρονα από το κλίμα, την πληρότητα, τον εξοπλισμό και το ωράριο [2].

Η χαμηλή κατανάλωση του Αυγούστου υποδηλώνει μειωμένη λειτουργία του κτιρίου. Το αποτέλεσμα μπορεί να σχετίζεται με άδειες προσωπικού ή περιορισμένη χρήση, αλλά αυτό δεν επιβεβαιώνεται από ανεξάρτητα δεδομένα παρουσίας. Παρ' όλα αυτά, η σημαντική διαφορά από τον Ιούλιο και τον Σεπτέμβριο δείχνει ότι οι λειτουργικές μεταβολές μπορούν να επηρεάσουν έντονα τη συνολική κατανάλωση.

Η κατανομή ανά όροφο έδειξε ότι η κατανάλωση συγκεντρώνεται σε λίγες κύριες μετρητικές μονάδες. Το ισόγειο είχε τη μεγαλύτερη συμμετοχή, ενώ ο δεύτερος, ο τέταρτος και ο έβδομος όροφος ακολούθησαν με παρόμοια μεγέθη. Οι τέσσερις αυτές μονάδες κάλυψαν περισσότερο από τα τρία τέταρτα της συνολικής ενέργειας. Το εύρημα δεν αποδεικνύει ότι οι συγκεκριμένοι όροφοι λειτουργούν μη αποδοτικά. Δείχνει όμως ότι οποιαδήποτε βελτίωση σε αυτούς μπορεί να έχει μεγαλύτερη επίδραση στο σύνολο.

Η σύγκριση των ορόφων περιορίζεται από την απουσία στοιχείων επιφάνειας, πληρότητας και εξοπλισμού. Η μεγαλύτερη απόλυτη κατανάλωση μπορεί να είναι αναμενόμενη σε έναν μεγαλύτερο ή περισσότερο χρησιμοποιούμενο όροφο. Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό προτεραιοτήτων και όχι για την κατάταξη της ενεργειακής απόδοσης ανά τετραγωνικό μέτρο.

Το ωριαίο προφίλ ακολούθησε σε μεγάλο βαθμό το εργασιακό πρόγραμμα. Η αύξηση ξεκινούσε πριν από την κύρια προσέλευση και η υψηλότερη μέση τιμή εμφανιζόταν τις πρωινές ώρες. Η μορφή αυτή είναι συμβατή με την έναρξη πολλών φορτίων κατά την προετοιμασία και την έναρξη της εργασιακής ημέρας [3], [4]. Μετά το απόγευμα η μείωση ήταν σταδιακή και όχι άμεση.

Η διατήρηση αυξημένων φορτίων μετά τις 19:00 αποτελεί σημαντικό λειτουργικό εύρημα. Οι υψηλότερες αποκλίσεις εκτός ωραρίου εμφανίστηκαν κυρίως αμέσως μετά το τέλος του προτεινόμενου προγράμματος. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι η καθυστερημένη απενεργοποίηση είναι πιθανό να έχει μεγαλύτερη σημασία από τη νυχτερινή κατανάλωση. Η λειτουργία πριν και μετά το ωράριο μπορεί να είναι εν μέρει αναγκαία, αλλά χρειάζεται να ελεγχθεί ως προς τη διάρκειά της [6].

Το ποσοστό της ενέργειας που καταγράφηκε έξω από το προτεινόμενο ωράριο ήταν σημαντικό. Στο διάστημα αυτό περιλαμβάνονται θόνοι, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, συστήματα ασφαλείας, συσκευές δικτύου και άλλος εξοπλισμός που μπορεί να χρειάζεται συνεχή λειτουργία. Η εξοικονόμηση πρέπει να βασίζεται σε τεκμηριωμένη γραμμή αναφοράς και σε έλεγχο των πραγματικών αναγκών [17], [18].

Οι απότομες μεταβολές σε συγκεκριμένα σημεία μέτρησης αποτελούν διαφορετικό είδος ευρήματος. Η πολύ υψηλή μεμονωμένη τιμή του πέμπτου ορόφου και η ασυνέχεια του έβδομου ορόφου δεν πρέπει να ερμηνευτούν αυτόματα ως πραγματικές αιχμές. Παρόμοια, η μόνιμη αύξηση στον ημιόροφο και στον πρώτο όροφο από τον Ιανουάριο χρειάζεται έλεγχο. Η ανίχνευση μιας απόκλισης μέσω δεδομένων αποτελεί το πρώτο στάδιο και όχι την τελική διάγνωση [48], [49].

Η ποιότητα του εσωτερικού αέρα παρουσίασε επίσης σημαντικές διαφορές μεταξύ των χώρων [44]. Ο συνολικός μέσος όρος του CO₂ ήταν σχετικά χαμηλός, όμως η

συγκεντρωτική τιμή απέκρυπτε τις δυσμενείς περιόδους ορισμένων χώρων. Η αξιολόγηση μέσω P95 και διάρκειας υπέρβασης έδωσε πιο καθαρή εικόνα. Η χρήση περισσότερων δεικτών είναι αναγκαία, επειδή ο μέσος όρος μπορεί να μειώνεται από τις ώρες περιορισμένης χρήσης [21], [22].

Πέντε από τους δεκατρείς χώρους είχαν P95 πάνω από τα 1.000 ppm. Οι Χώροι 1, 2, 3 και 9 εμφάνισαν μέτριες έως σημαντικές υπερβάσεις. Ο Χώρος 10 ξεχώρισε έντονα, καθώς είχε πολύ υψηλό P95 και σημαντικό ποσοστό μετρήσεων πάνω από τα 1.500 ppm. Η εικόνα του δεν μπορεί να αποδοθεί μόνο σε μία μεμονωμένη κορυφή.

Οι χώροι με υψηλή μέση συγκέντρωση δεν ήταν πάντα οι ίδιοι με εκείνους που είχαν τη μεγαλύτερη διάρκεια υψηλών τιμών. Ο Χώρος 3, για παράδειγμα, είχε μέσο όρο κάτω από τα 800 ppm, αλλά σχεδόν το ένα πέμπτο των καταγραφών του ήταν πάνω από τα 1.000 ppm. Το αποτέλεσμα επιβεβαιώνει ότι η χρήση ενός μόνο δείκτη μπορεί να οδηγήσει σε ελλιπή αξιολόγηση [22], [23].

Οι μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας παρουσίασαν ηπιότερες διαφορές. Δεν εμφανίστηκε απλή σχέση μεταξύ αυξημένου CO₂ και υψηλής θερμοκρασίας. Αυτό δείχνει ότι οι αυξημένες συγκεντρώσεις δεν αποτελούσαν απλή αντανάκλαση μιας γενικής θερμικής απόκλισης. Οι μεταβλητές πρέπει να ερμηνεύονται χωριστά, καθώς επηρεάζουν διαφορετικές πλευρές του εσωτερικού περιβάλλοντος [9], [28], [29].

Οι υπολογισμοί παροχής και ACH ανέδειξαν τη σημασία της πληρότητας και του όγκου. Όσο αυξανόταν ο αριθμός των ατόμων, αυξανόταν και η απαιτούμενη παροχή. Η εκτίμηση με βάση το P95 έδειξε ότι οι πέντε χώροι με αυξημένο CO₂ χρειάζονται διαφορετικό βαθμό ενίσχυσης. Ο Χώρος 10 παρουσίασε τη μεγαλύτερη θεωρητική απαίτηση και στα τρία σενάρια.

Οι τιμές αυτές δεν αποτελούν άμεση μέτρηση της πραγματικής παροχής. Βασίζονται σε παραδοχές για την πληρότητα, την παραγωγή CO₂ και την ανάμειξη του αέρα. Η αβεβαιότητα αυτή είναι γνωστή στις εκτιμήσεις αερισμού με ισοζύγιο CO₂ [23], [24]. Παρ' όλα αυτά, η κοινή εφαρμογή της ίδιας μεθόδου επιτρέπει αξιόπιστη σχετική σύγκριση μεταξύ των χώρων.

Η σύγκριση των στρατηγικών έδειξε ότι ο μεγαλύτερος περιορισμός του όγκου αέρα δεν συνεπάγεται αυτόματα και την καταλληλότερη λειτουργία. Η E2 παρείχε τη μεγαλύτερη θεωρητική μείωση, αλλά δεν ανταποκρινόταν στις περισσότερες ώρες αυξημένου CO₂ που βρίσκονταν έξω από το ωράριο. Η E1 είχε μικρότερη μείωση, αλλά διατηρούσε απόκριση σε όλες τις ώρες.

Η βασική διαφορά ανάμεσα στις δύο στρατηγικές είναι επομένως ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζουν την αβεβαιότητα της πραγματικής χρήσης. Η E1 εμπιστεύεται το σήμα του αισθητήρα σε όλο το εικοσιτετράωρο. Η E2 εμπιστεύεται πρώτα το πρόγραμμα και χρησιμοποιεί το CO₂ μόνο μέσα σε αυτό. Όταν δεν υπάρχουν πραγματικά δεδομένα παρουσίας, η αυστηρή διακοπή εκτός ωραρίου μπορεί να αφήσει ακάλυπτες έκτακτες χρήσεις.

8.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία

Τα αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης συμφωνούν με τη γενική εικόνα των κτιρίων γραφείων. Η κατανάλωση παρουσιάζει σύνδεση με τις ώρες εργασίας, αλλά δεν μηδενίζεται εκτός ωραρίου [2]. Η βιβλιογραφία αναγνωρίζει ότι οι τελικές χρήσεις, η πληρότητα και οι ρυθμίσεις δημιουργούν σύνθετα ημερήσια πρότυπα [3], [4]. Η παρουσία νυχτερινού φορτίου στο εξεταζόμενο κτίριο είναι επομένως αναμενόμενη, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι ολόκληρο το φορτίο είναι αναγκαίο.

Η μεγάλη διαφορά μεταξύ εργάσιμων ημερών και Σαββατοκύριακων είναι επίσης συμβατή με μελέτες πραγματικών κτιρίων. Η ανθρώπινη παρουσία ενεργοποιεί τον φωτισμό, τον εξοπλισμό και τις εγκαταστάσεις [32], ενώ η περιορισμένη χρήση μειώνει τη ζήτηση. Παρ' όλα αυτά, τα συστήματα που παραμένουν ενεργά μπορούν να διατηρούν σημαντικό φορτίο βάσης [6].

Η χωρική συγκέντρωση της κατανάλωσης σε λίγους ορόφους επιβεβαιώνει τη σημασία της μέτρησης. Τα κεντρικά ενεργειακά δεδομένα αποτυπώνουν τη συνολική τάση, αλλά δεν επιτρέπουν τον εντοπισμό της περιοχής που προκαλεί μια μεταβολή [19]. Η διάκριση ανά επίπεδο στην παρούσα εργασία κατέστησε δυνατή την αναγνώριση των τμημάτων με τη μεγαλύτερη συμμετοχή και των μετρητών με ασυνήθιστη συμπεριφορά.

Οι απότομες και μόνιμες μεταβολές που εντοπίστηκαν συμφωνούν με τη λογική των συστημάτων ανίχνευσης σφαλμάτων. Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι οι αποκλίσεις μπορεί να προέρχονται από βλάβες, αλλαγές ρυθμίσεων, διαφορετική χρήση ή προβλήματα αισθητήρων [48], [49]. Για τον λόγο αυτό, η αυτόματη ερμηνεία μιας απόκλισης ως σπατάλης δεν είναι επαρκής.

Τα αποτελέσματα του CO₂ επιβεβαιώνουν ότι η μέση συγκέντρωση δεν αρκεί για την αξιολόγηση. Η συνεχής παρακολούθηση και η χρήση εκατοστημορίων παρέχουν πιο αντιπροσωπευτική εικόνα [21], [22]. Στην παρούσα περίπτωση, ορισμένοι χώροι είχαν σχετικά χαμηλό μέσο όρο αλλά σημαντικό χρόνο πάνω από τα 1.000 ppm.

Η χρήση του CO₂ ως δείκτη ήταν κατάλληλη για τη σύγκριση των χώρων, αλλά διατηρεί τους γνωστούς περιορισμούς της. Η συγκέντρωση εξαρτάται από την παραγωγή, την πληρότητα, την εξωτερική τιμή και τον αερισμό [23], [24]. Επίσης, δεν καλύπτει ρύπους που προέρχονται από υλικά ή εξωτερικές πηγές [21], [31]. Τα συμπεράσματα της εργασίας περιορίζονται επομένως στη σχέση ανθρώπινης παρουσίας και ανανέωσης του αέρα.

Οι μεγάλες διαφορές μεταξύ των δεκατριών περιόδων συμφωνούν με τη βιβλιογραφία για τη μεταβλητή χρήση των γραφείων. Οι χώροι δεν έχουν σταθερή πληρότητα και τα προγράμματα δεν περιγράφουν πάντα την πραγματική παρουσία [32], [35]. Για τον λόγο αυτό, μια ενιαία σταθερή παροχή για όλους τους χώρους μπορεί να προκαλεί είτε υπεραερισμό είτε ανεπαρκή απόκριση.

Η μείωση του μοντελοποιημένου όγκου στη στρατηγική E1 είναι συμβατή με τα αναφερόμενα πλεονεκτήματα του ελέγχου βάσει ζήτησης. Οι στρατηγικές αυτές μειώνουν την παροχή όταν η πληρότητα είναι χαμηλή και την αυξάνουν όταν η συγκέντρωση ανεβαίνει [26], [27]. Η πραγματική εξοικονόμηση εξαρτάται όμως από τον ανεμιστήρα, τη θερμική επεξεργασία και τις εξωτερικές συνθήκες.

Η E2 συνδυάζει δύο γνωστές πρακτικές, όπως τον χρονικό προγραμματισμό και τον έλεγχο βάσει CO₂. Η προσέγγιση μπορεί να περιορίσει έντονα τις ώρες λειτουργίας, εφόσον το πρόγραμμα είναι σωστό. Η βιβλιογραφία για τον ανθρωποκεντρικό έλεγχο τονίζει όμως ότι τα σταθερά ωράρια πρέπει να συμπληρώνονται από πληροφορίες πραγματικής χρήσης [32], [34], [50].

Η πρόταση για υπερίσχυση από το CO₂ εκτός ωραρίου είναι σύμφωνη με τις αρχές ασφαλών ακολουθιών λειτουργίας. Οι κανόνες ελέγχου πρέπει να προβλέπουν έκτακτες συνθήκες, σφάλματα αισθητήρων και προσωρινή παράταση της χρήσης [16]. Η πλήρης εξάρτηση από ένα μόνο σήμα ή από ένα σταθερό πρόγραμμα αυξάνει τον κίνδυνο λανθασμένης λειτουργίας.

Η εργασία συμφωνεί επίσης με τη βιβλιογραφία ως προς την ανάγκη επαλήθευσης. Η θεωρητική μείωση του όγκου αέρα δεν αποτελεί αυτόματα αποδεδειγμένη ενεργειακή εξοικονόμηση. Η πραγματική επίδραση πρέπει να μετρηθεί μετά την εφαρμογή, με κοινή γραμμή βάσης και έλεγχο των συνθηκών [17], [18].

8.3 Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα

Το πρώτο ερευνητικό ερώτημα αφορούσε τα χρονικά και χωρικά χαρακτηριστικά της κατανάλωσης. Η ανάλυση έδειξε ότι η κατανάλωση ακολουθεί ημερήσιο και εβδομαδιαίο πρότυπο. Αυξάνεται κατά τις εργάσιμες ώρες και μειώνεται τα Σαββατοκύριακα. Παράλληλα, το ισόγειο και τρεις ακόμη όροφοι συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής ενέργειας.

Το δεύτερο ερώτημα αφορούσε τις διαφορές μεταξύ εργάσιμων και μη εργάσιμων περιόδων, καθώς και τα μη αναμενόμενα φορτία. Η μέση εργάσιμη ημέρα είχε πολύ μεγαλύτερη κατανάλωση από μια ημέρα Σαββατοκύριακου. Παράλληλα, σημαντικό μέρος της ενέργειας καταγράφηκε έξω από το προτεινόμενο ωράριο. Οι κυριότερες υψηλές τιμές εκτός προγράμματος εμφανίστηκαν μετά τις 19:00. Εντοπίστηκαν ακόμη μεμονωμένες αιχμές και μόνιμες αλλαγές επιπέδου που χρειάζονται τεχνικό έλεγχο.

Το τρίτο ερώτημα αφορούσε τις συνθήκες CO₂, θερμοκρασίας και υγρασίας. Οι μέσες θερμοκρασίες και υγρασίες ήταν σχετικά κοντά μεταξύ των περισσότερων χώρων. Αντίθετα, το CO₂ παρουσίασε μεγάλες διαφορές. Πέντε χώροι είχαν P95 πάνω από τα 1.000 ppm, ενώ ο Χώρος 10 παρουσίασε τη δυσμενέστερη εικόνα.

Το τέταρτο ερώτημα αφορούσε την απαιτούμενη παροχή και τον ACH. Οι υπολογισμοί έδειξαν ότι η απαίτηση αυξάνεται με την πληρότητα και μεταβάλλεται με τον όγκο. Οι

χώροι με αυξημένο P95 χρειάζονται διαφορετική πρόσθετη παροχή. Η μεγαλύτερη απαίτηση προέκυψε στον Χώρο 10 και η μικρότερη στον Χώρο 2.

Το πέμπτο ερώτημα αφορούσε τα πρότυπα που προκύπτουν από τη χρονική σύνδεση ενέργειας και CO₂. Οι δύο μεταβλητές παρουσιάζουν κοινή σχέση με τη χρήση, αλλά δεν μπορούν να συνδεθούν αιτιωδώς σε επίπεδο συγκεκριμένου χώρου. Η αύξηση της κατανάλωσης κατά τις εργάσιμες ώρες και οι αυξήσεις CO₂ σε ορισμένες περιόδους είναι συμβατές με ανθρώπινη παρουσία. Ωστόσο, η έλλειψη άμεσης αντιστοίχισης των δεκατριών χώρων με τους ενεργειακούς μετρητές δεν επιτρέπει ακριβή τοπική συσχέτιση.

Το έκτο ερώτημα αφορούσε τις διαφορές μεταξύ των στρατηγικών. Η E0 είχε τον μεγαλύτερο όγκο και καμία προσαρμογή. Η E1 περιόρισε τον όγκο κατά 34,47% και ανταποκρινόταν σε όλες τις ώρες αυξημένου CO₂. Η E2 περιόρισε τον όγκο κατά 79,89%, αλλά δεν αντιδρούσε στις αυξημένες συγκεντρώσεις έξω από το πρόγραμμα.

Το έβδομο ερώτημα αφορούσε την καταλληλότερη στρατηγική. Μεταξύ των τριών στρατηγικών όπως μοντελοποιήθηκαν, η E1 αποτελεί την πιο ισορροπημένη λύση. Προσφέρει σημαντική μείωση και συνεχή απόκριση. Για πραγματική εφαρμογή προτείνεται βελτιωμένη μορφή της E2, στην οποία το ωράριο περιορίζει τη βασική λειτουργία, αλλά το CO₂ μπορεί να ενεργοποιεί το σύστημα και εκτός προγράμματος.

8.4 Προτεινόμενη στρατηγική και λειτουργικές παρεμβάσεις

Η προτεινόμενη λύση βασίζεται σε συνδυασμό ωραρίου και πραγματικής ζήτησης. Το σύστημα θα ακολουθεί το προτεινόμενο πρόγραμμα κατά τις κανονικές εργάσιμες ημέρες. Μέσα στο ωράριο, η παροχή θα μεταβάλλεται ανάλογα με τη συγκέντρωση CO₂. Η λειτουργία αυτή διατηρεί την προσαρμογή στις πραγματικές ανάγκες [26], [27], χωρίς να επιβάλλει σταθερή παροχή σε όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Εκτός ωραρίου, το σύστημα δεν πρέπει να θεωρεί ότι ο χώρος είναι πάντοτε κενός. Όταν το CO₂ παραμένει χαμηλό, η μηχανική παροχή μπορεί να περιορίζεται ή να διακόπτεται. Εάν όμως η συγκέντρωση ξεπεράσει το επιλεγμένο επίπεδο, πρέπει να επιτρέπεται

προσωρινή ενεργοποίηση. Η υπερίσχυση αυτή καλύπτει μη προγραμματισμένη χρήση και καθυστερημένη απομάκρυνση του CO₂.

Για την αποφυγή συχνών ενεργοποιήσεων προτείνεται η χρήση υστέρησης. Το επίπεδο απενεργοποίησης πρέπει να είναι χαμηλότερο από το επίπεδο ενεργοποίησης. Μπορεί επίσης να εφαρμοστεί ελάχιστος χρόνος λειτουργίας, ώστε το σύστημα να προλαβαίνει να επηρεάσει τη συγκέντρωση πριν αλλάξει ξανά κατάσταση.

Η στρατηγική πρέπει να διατηρεί μια ασφαλή ελάχιστη παροχή όταν ο χώρος χρησιμοποιείται. Το CO₂ δεν αποτυπώνει όλους τους ρύπους [21], [31]. Επομένως, ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις, δεν είναι κατάλληλη η πλήρης κατάργηση του αερισμού κατά την παρουσία χρηστών.

Η δυνατότητα χειροκίνητης παράτασης είναι επίσης αναγκαία. Ένας χρήστης ή διαχειριστής πρέπει να μπορεί να δηλώσει έκτακτη χρήση εκτός προγράμματος. Η εντολή πρέπει να έχει καθορισμένη διάρκεια και να ακυρώνεται αυτόματα. Έτσι αποφεύγεται η μόνιμη παράκαμψη του ελέγχου [16].

Η εγκατάσταση αισθητήρων παρουσίας ή μετρητών εισόδου μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω τη λειτουργία. Ο συνδυασμός CO₂ και πληρότητας μειώνει την αβεβαιότητα για το αν μια αυξημένη τιμή οφείλεται σε συνεχιζόμενη παρουσία ή σε αργή απομάκρυνση [35], [38]. Η πληροφορία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη έξω από το κανονικό ωράριο.

Οι παρεμβάσεις πρέπει να εφαρμοστούν πρώτα στους χώρους με τη μεγαλύτερη ανάγκη. Ο Χώρος 10 αποτελεί την πρώτη προτεραιότητα. Πριν αυξηθεί η παροχή, πρέπει να ελεγχθούν η πραγματική χρήση, η θέση του αισθητήρα, τα στόμια και η λειτουργία του συστήματος. Ακολουθούν οι Χώροι 9 και 1. Οι Χώροι 2 και 3 μπορούν να εξεταστούν στο επόμενο στάδιο.

Δεν προτείνεται γενική αύξηση της παροχής σε όλους τους χώρους. Αρκετές περίοδοι είχαν σταθερά χαμηλό CO₂. Μια ενιαία αύξηση θα επιβάρυνε και χώρους χωρίς ένδειξη ανάγκης. Η παρέμβαση με χρονικές ζώνες είναι πιο κατάλληλη, εφόσον το σύστημα διαθέτει ανεξάρτητους ελεγκτές [32], [36].

Στην ενεργειακή λειτουργία, η πρώτη παρέμβαση πρέπει να αφορά τα ωράρια. Χρειάζεται να ελεγχθεί αν τα συστήματα μπορούν να μειώνουν τη λειτουργία τους νωρίτερα μετά τις 19:00. Η αλλαγή πρέπει να εφαρμοστεί σταδιακά, ώστε να μην επηρεαστούν πραγματικές ανάγκες προσωπικού ή εξοπλισμού.

Ιδιαίτερη προτεραιότητα πρέπει να δοθεί στο ισόγειο, στον δεύτερο, στον τέταρτο και στον έβδομο όροφο. Η υψηλή συμμετοχή τους σημαίνει ότι ακόμη και μικρή σχετική βελτίωση μπορεί να έχει αισθητό αποτέλεσμα. Πριν από κάθε αλλαγή χρειάζεται να προσδιοριστούν τα φορτία που εξυπηρετεί ο κάθε μετρητής.

Οι ασυνήθιστες τιμές πρέπει να ελεγχθούν πριν ενταχθούν σε σχέδιο εξοικονόμησης. Ο πέμπτος και ο έβδομος όροφος χρειάζονται έλεγχο του μετρητή και της διαδικασίας καταγραφής. Η απότομη μεταβολή του ημιώροφου και του πρώτου ορόφου χρειάζεται σύγκριση με πιθανές αλλαγές χρήσης ή ηλεκτρικής σύνδεσης.

Μετά την εφαρμογή των παρεμβάσεων πρέπει να δημιουργηθεί νέα περίοδος παρακολούθησης. Η κατανάλωση, ο χρόνος λειτουργίας και το CO₂ πρέπει να συγκριθούν με την αρχική κατάσταση. Η διαδικασία πρέπει να ακολουθεί σταθερή γραμμή αναφοράς και κοινές συνθήκες αξιολόγησης [17], [18].

8.5 Περιορισμοί και αβεβαιότητες

Ο πρώτος περιορισμός αφορά την περιγραφή του κτιρίου. Δεν ήταν διαθέσιμα πλήρη αρχιτεκτονικά σχέδια, στοιχεία κελύφους ή αναλυτική τεχνική περιγραφή των εγκαταστάσεων. Για τον λόγο αυτό, δεν ήταν δυνατόν να συνδεθούν οι μεταβολές με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά κατασκευής ή εξοπλισμού.

Δεν υπήρχαν αξιόπιστα δεδομένα επιφάνειας για όλους τους ορόφους. Επομένως, δεν υπολογίστηκαν δείκτες kWh/m². Η σύγκριση έγινε με απόλυτες τιμές, οι οποίες περιγράφουν τη συνολική συμμετοχή αλλά όχι την ενεργειακή ένταση ανά μονάδα επιφάνειας.

Οι ενεργειακοί μετρητές δεν διαχώριζαν τις τελικές χρήσεις. Η καταγεγραμμένη ενέργεια κάθε ορόφου μπορεί να περιλαμβάνει φωτισμό, εξοπλισμό, κλιματισμό και άλλες

εγκαταστάσεις. Δεν ήταν επομένως δυνατόν να προσδιοριστεί ποιο σύστημα προκάλεσε μια συγκεκριμένη αιχμή.

Η χρονοσειρά του πέμπτου ορόφου ήταν πολύ περιορισμένη, ενώ ο έκτος όροφος δεν είχε χρήσιμη καταγραφή. Η συνολική κατανάλωση δεν περιλαμβάνει πλήρη εικόνα αυτών των δύο επιπέδων. Η συμμετοχή του πέμπτου ορόφου δεν είναι συγκρίσιμη με τις υπόλοιπες μονάδες.

Η διάκριση εργάσιμων και μη εργάσιμων περιόδων βασίστηκε στο ημερολόγιο. Δεν υπήρχε πλήρες αρχείο αργιών, αδειών ή πραγματικής παρουσίας. Ορισμένες εργάσιμες ημέρες με πολύ χαμηλή κατανάλωση μπορεί στην πράξη να είχαν περιορισμένη χρήση.

Δεν υπήρχαν δεδομένα εξωτερικής θερμοκρασίας, υγρασίας ή ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως, δεν ήταν δυνατόν να γίνει κανονικοποίηση της κατανάλωσης ως προς τις καιρικές συνθήκες. Οι μηνιαίες μεταβολές περιγράφονται, αλλά δεν διαχωρίζεται η επίδραση του κλίματος από την επίδραση της χρήσης.

Οι μετρήσεις εσωτερικού περιβάλλοντος πραγματοποιήθηκαν με μία φορητή συσκευή. Η λύση αυτή περιόρισε τις διαφορές μεταξύ αισθητήρων, αλλά οι χώροι δεν μετρήθηκαν ταυτόχρονα. Οι εξωτερικές και λειτουργικές συνθήκες διέφεραν μεταξύ των εβδομάδων.

Δεν υπήρχε πλήρης τεκμηρίωση της θέσης του αισθητήρα μέσα σε κάθε χώρο. Οι μετρήσεις μπορεί να επηρεάστηκαν από την απόσταση από τους χρήστες, τα παράθυρα ή τα στόμια. Η συγκέντρωση CO₂ δεν είναι πάντοτε ομοιόμορφη και η τοποθέτηση αποτελεί πηγή αβεβαιότητας [21], [24].

Δεν υπήρχε συνεχής καταγραφή του αριθμού των χρηστών. Η πληρότητα επηρεάζει άμεσα την παραγωγή CO₂ και την απαιτούμενη παροχή [23]. Τα τρία σενάρια χρησιμοποιήθηκαν για να εξεταστεί η ευαισθησία των αποτελεσμάτων και δεν αποτελούν πραγματική περιγραφή των χώρων.

Η εξωτερική συγκέντρωση CO₂ θεωρήθηκε σταθερή στα 400 ppm. Στην πράξη μπορεί να μεταβάλλεται. Η χρήση μίας σταθερής τιμής επηρεάζει την εκτίμηση της παροχής, ιδιαίτερα όταν οι εσωτερικές συγκεντρώσεις είναι κοντά στο εξωτερικό επίπεδο.

Ο υπολογισμός παροχής βασίστηκε σε συνθήκες σταθερής κατάστασης και πλήρους ανάμειξης. Οι παραδοχές αυτές δεν ισχύουν πάντοτε σε πραγματικά γραφεία [24], [25]. Οι τιμές της πρόσθετης παροχής πρέπει επομένως να χρησιμοποιούνται ως ενδεικτικές και όχι ως τελικές ρυθμίσεις του συστήματος.

Το μοντέλο των στρατηγικών δεν υπολόγισε τη νέα συγκέντρωση CO₂ μετά την αλλαγή της παροχής. Χρησιμοποίησε τις πραγματικές μετρήσεις ως σήμα ελέγχου. Επομένως, δεν μπορεί να δείξει πόσο θα μειωνόταν το P95 μετά την εφαρμογή της E1 ή της E2.

Η μείωση του όγκου αέρα δεν μετατράπηκε σε εξοικονόμηση kWh. Δεν ήταν γνωστή η καμπύλη ισχύος του ανεμιστήρα, η απόδοση, η πτώση πίεσης ή η θερμική ενέργεια που απαιτείται για την επεξεργασία του αέρα. Η πραγματική εξοικονόμηση μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τη μείωση του όγκου.

Δεν υπήρχε άμεση αντιστοίχιση των δεκατριών χώρων με συγκεκριμένους ορόφους ή ενεργειακούς μετρητές. Για τον λόγο αυτό, η κοινή χρονική εξέταση δεν επιτρέπει να αποδοθεί η ενεργειακή κατανάλωση ενός ορόφου στον χώρο που μετρήθηκε την ίδια εβδομάδα.

Οι παραπάνω περιορισμοί δεν ακυρώνουν τα αποτελέσματα. Καθορίζουν το επίπεδο στο οποίο μπορούν να ερμηνευτούν. Η εργασία παρέχει αξιόπιστη περιγραφική και συγκριτική εικόνα, αλλά δεν αποτελεί πλήρη ενεργειακή προσομοίωση ή πιστοποίηση της εγκατάστασης.

8.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η πρώτη κατεύθυνση αφορά την πληρέστερη αποτύπωση του κτιρίου. Χρειάζονται οι πραγματικές επιφάνειες, οι όγκοι, οι χρήσεις και η αντιστοίχιση κάθε ενεργειακού μετρητή με τα φορτία που εξυπηρετεί. Η πληροφορία αυτή θα επιτρέψει τον υπολογισμό κανονικοποιημένων δεικτών και πιο δίκαιη σύγκριση των ορόφων.

Η εγκατάσταση μετρητών ανά τελική χρήση θα επέτρεπε να διαχωριστούν ο αερισμός, η ψύξη, η θέρμανση, ο φωτισμός και ο εξοπλισμός. Με αυτόν τον τρόπο, οι αλλαγές στις

στρατηγικές ελέγχου θα μπορούσαν να συνδεθούν με συγκεκριμένη ενεργειακή εξοικονόμηση.

Η πραγματική παροχή πρέπει να μετρηθεί στα στόμια ή στους αεραγωγούς. Οι μετρήσεις αυτές θα επέτρεπαν τη σύγκριση της σχεδιαστικής, της πραγματικής και της απαιτούμενης παροχής. Θα περιόριζαν επίσης την αβεβαιότητα των υπολογισμών που βασίζονται μόνο στο CO₂.

Η ταυτόχρονη εγκατάσταση αισθητήρων στους δεκατρείς χώρους θα βελτίωνε τη χωρική σύγκριση. Οι χώροι θα παρακολουθούνταν κάτω από τις ίδιες εξωτερικές συνθήκες. Παράλληλα, η χρήση περισσότερων σημείων σε μεγάλους χώρους θα έδειχνε αν υπάρχουν τοπικές ζώνες ανεπαρκούς ανανέωσης.

Η καταγραφή της πραγματικής πληρότητας αποτελεί βασική προτεραιότητα. Μπορεί να πραγματοποιηθεί με ανώνυμους αισθητήρες παρουσίας, μετρητές εισόδου ή συνδυασμό περισσότερων σημάτων. Η άμεση πληροφορία θα βελτίωνε τους υπολογισμούς παροχής και θα επέτρεπε ανθρωποκεντρικό έλεγχο [34], [35], [38].

Οι εξωτερικές συνθήκες πρέπει να καταγράφονται ταυτόχρονα με την κατανάλωση. Η θερμοκρασία, η υγρασία και η εξωτερική συγκέντρωση CO₂ θα επέτρεπαν καλύτερη ερμηνεία των εποχικών μεταβολών. Θα υποστήριζαν επίσης ακριβέστερο ισοζύγιο και διαχωρισμό της επίδρασης του καιρού από τη χρήση.

Η βελτιωμένη στρατηγική E2 πρέπει να εφαρμοστεί πιλοτικά σε περιορισμένο αριθμό χώρων. Ο Χώρος 10 αποτελεί κατάλληλη πρώτη περίπτωση λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων. Μπορεί να ακολουθήσει ένας χώρος με χαμηλό CO₂, ώστε να εξεταστεί αν ο έλεγχος μειώνει την παροχή χωρίς να δημιουργεί νέες υπερβάσεις.

Η πιλοτική εφαρμογή πρέπει να περιλαμβάνει περίοδο πριν και μετά την παρέμβαση. Πρέπει να γίνεται μέτρηση της κατανάλωσης του ανεμιστήρα, της παροχής και του CO₂. Η αξιολόγηση πρέπει να ακολουθεί διαδικασία μέτρησης και επαλήθευσης [17], [18].

Η χρήση προγνωστικού ελέγχου μπορεί να εξεταστεί όταν θα υπάρχουν περισσότερα δεδομένα. Ένα μοντέλο μπορεί να αξιοποιεί το αναμενόμενο ωράριο, την πληρότητα και τις εξωτερικές συνθήκες, ώστε να ενεργοποιεί το σύστημα πριν εμφανιστεί υψηλό CO₂.

[40], [41], [42]. Η προσέγγιση αυτή απαιτεί όμως αξιόπιστο ιστορικό και συνεχή επαλήθευση.

Τα υβριδικά μοντέλα μπορούν να συνδυάσουν τις φυσικές σχέσεις του αερισμού με τα πραγματικά δεδομένα του κτιρίου [45]. Η επιλογή αυτή είναι πιθανό να παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία, ιδιαίτερα όταν το ιστορικό σύνολο είναι περιορισμένο.

Μελλοντική έρευνα μπορεί επίσης να εξετάσει το οικονομικό και περιβαλλοντικό αποτέλεσμα. Η πραγματική εξοικονόμηση kWh μπορεί να μετατραπεί σε λειτουργικό κόστος και σε εκπομπές CO₂. Μπορούν ακόμη να υπολογιστούν το κόστος εγκατάστασης, η περίοδος αποπληρωμής και η ευαισθησία στις τιμές ενέργειας.

Τέλος, χρειάζεται μακροχρόνια παρακολούθηση μετά την εφαρμογή. Οι ρυθμίσεις μπορεί να χάσουν την αποτελεσματικότητά τους όταν αλλάξει η χρήση, ο αριθμός εργαζομένων ή ο εξοπλισμός. Η συνεχής αναθεώρηση αποτελεί βασικό μέρος της λειτουργικής ενεργειακής διαχείρισης και όχι μια εφάπαξ διαδικασία [19], [20].

Η εργασία έδειξε ότι η κοινή ανάλυση ενέργειας και CO₂ μπορεί να εντοπίσει τόσο περιττή λειτουργία όσο και χώρους με ανάγκη αυξημένου αερισμού. Η μεγαλύτερη εξοικονόμηση δεν επιτυγχάνεται με γενική μείωση της παροχής, αλλά με στοχευμένη προσαρμογή στον χρόνο, στον χώρο και στην πραγματική ζήτηση, ενώ τέλος, η εφαρμογή πρέπει να συνοδεύεται από συνεχή μέτρηση, έλεγχο και επαλήθευση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] International Energy Agency (IEA). (2023). *Energy efficiency 2023: Analysis*. IEA. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>
- [2] González-Torres, M., Pérez-Lombard, L., Coronel, J. F., Rodríguez Maestre, I., & Yan, D. (2022). A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. *Energy Reports*, 8, 626–637. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.280>
- [3] Lin, X., Yu, H., Wang, M., Li, C., Wang, Z., & Tang, Y. (2021). Electricity consumption forecast of high-rise office buildings based on the long short-term memory method. *Energies*, 14(16), 4785. <https://doi.org/10.3390/en14164785>
- [4] Ding, Y., Ding, Y., & Nord, N. (2021). Data-driven analysis of electricity use for office buildings: A Norwegian case study. *E3S Web of Conferences*, 246, 04005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124604005>
- [5] Patrício, J. T., Lopes, R. A., Majdalani, N., Aelenei, D., & Martins, J. (2023). Aggregated use of energy flexibility in office buildings. *Energies*, 16(2), 961. <https://doi.org/10.3390/en16020961>
- [6] Newsham, G. R. (2019). Measurement and verification of energy conservation measures using whole-building electricity data from four identical office towers. *Applied Energy*, 255, 113882. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113882>
- [7] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2022). *ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2022: Energy standard for sites and buildings except low-rise residential buildings*. ASHRAE. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-90-1>
- [8] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2025). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2025: Ventilation and acceptable indoor air quality*. ASHRAE. <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/read-only-versions-of-ashrae-standards>
- [9] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2023). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2023: Thermal environmental conditions for human occupancy*. ASHRAE. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>

- [10] European Committee for Standardization (CEN) & International Organization for Standardization (ISO). (2017). *EN ISO 52016-1:2017: Energy performance of buildings – Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads – Part 1: Calculation procedures*. CEN/ISO.
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/87f8de69-1cb6-4ee0-b2e7-b3d86f4fea41/en-iso-52016-1-2017>
- [11] European Committee for Standardization (CEN). (2019). *EN 16798-1:2019: Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. CEN.
<https://epb.center/document/en-16798-1/>
- [12] International Organization for Standardization (ISO). (2017). *ISO 17772-1:2017: Energy performance of buildings – Indoor environmental quality – Part 1: Indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings*. ISO. <https://www.iso.org/standard/60498.html>
- [13] Ali, D. M. T. E., Hussain, A., Shukla, S., Nwulu, N., & Bamisile, O. (2024). AI-driven innovations in building energy management systems for enhanced energy efficiency and sustainability: A review. *Energies*, 17(17), 4277.
<https://doi.org/10.3390/en17174277>
- [14] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (TEE). (2017). *Τεχνική Οδηγία Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017: Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και την έκδοση ΠΕΑ*. TEE.
https://www.kenak.gr/files/TOTEE_20701-1_2017.pdf
- [15] Ελληνική Δημοκρατία, Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2017). *Έγκριση Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK)* (ΦΕΚ Β΄ 2367/12.07.2017).
https://tdm.tee.gr/wp-content/uploads/2017/07/fek_12_7_2017_egrisi_kenak.pdf
- [16] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2024). *ASHRAE Guideline 36-2024: High-performance sequences of operation for HVAC systems*. ASHRAE. <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/titles-purposes-and-scopes>
- [17] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2023). *ASHRAE Guideline 14-2023: Measurement of energy, demand, and water savings*. ASHRAE. <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/titles-purposes-and-scopes>

- [18] Efficiency Valuation Organization (EVO). (2022). *International Performance Measurement and Verification Protocol: Core Concepts 2022*. EVO. <https://evo-world.org/en/news-media/evo-news/1280-release-of-the-new-ipmvp-core-concepts-2022>
- [19] IEA Energy in Buildings and Communities Programme, Annex 81. (2023). *Data-driven smart buildings: State-of-the-art review*. IEA EBC. <https://annex81.iea-ebc.org/Data/publications/Annex%2081%20State-of-the-Art%20Report%20%28final%29.pdf>
- [20] American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE). (2025). *Building energy management control systems for small and medium commercial buildings*. ACEEE. https://www.aceee.org/sites/default/files/pdfs/building_energy_management_control_systems_for_small_and_medium_commercial_buildings.pdf
- [21] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2025). *Indoor carbon dioxide* [Position Document]. ASHRAE. <https://www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/pd-on-indoor-carbon-dioxide-english.pdf>
- [22] Persily, A. K., & Polidoro, B. (2022). *Indoor carbon dioxide metric analysis tool* (NIST Technical Note 2213). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2213>
- [23] Persily, A. (2022). Development and application of an indoor carbon dioxide metric. *Indoor Air*, 32(7), e13059. <https://doi.org/10.1111/ina.13059>
- [24] Persily, A., Molina, C., & Benjamin, J. (2022, October). *Investigating uncertainty in the relationship between indoor steady-state CO₂ concentrations and ventilation rates*. Paper presented at the 41st AIVC–ASHRAE IAQ Joint Conference. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=930475
- [25] Seol, H., Arztmann, J., Hong, T., & Choi, J.-M. (2023). Estimation of natural ventilation rates in an office room with 145 mm-diameter circular openings using the occupant-generated tracer-gas method. *Sustainability*, 15(13), 9892. <https://doi.org/10.3390/su15139892>
- [26] Lu, X., Pang, Z., Fu, Y., & O'Neill, Z. (2022). Advances in research and applications of CO₂-based demand-controlled ventilation in commercial buildings: A critical review of control strategies and performance evaluation. *Building and Environment*, 223, 109455. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109455>
- [27] Li, B., & Cai, W. (2022). A novel CO₂-based demand-controlled ventilation strategy to limit the spread of COVID-19 in indoor environments. *Building and Environment*, 219, 109232. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109232>

- [28] Kapalo, P., Vilčeková, S., Domnita, F., Bacotiu, C., & Petráš, D. (2020). Influence of indoor climate on employees in office buildings: A case study. *Sustainability*, 12(14), 5569. <https://doi.org/10.3390/su12145569>
- [29] Jones, E. R., Webb, A., Bhatt, D. L., & Crump, D. (2022). Indoor humidity levels and associations with reported symptoms in office buildings. *Indoor Air*, 32(1), e12961. <https://doi.org/10.1111/ina.12961>
- [30] Wolkoff, P., Azuma, K., & Carrer, P. (2021). Health, work performance, and risk of infection in office-like environments: The role of indoor temperature, air humidity, and ventilation. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 233, 113709. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113709>
- [31] Dimitroulopoulou, S., Dudzińska, M. R., Gunnarsen, L., Hägerhed, L., Maula, H., Singh, R., Toyinbo, O., & Haverinen-Shaughnessy, U. (2023). Indoor air quality guidelines from across the world: An appraisal considering energy saving, health, productivity, and comfort. *Environment International*, 178, 108127. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108127>
- [32] Naylor, S., Gillott, M., & Lau, T. (2018). A review of occupant-centric building control strategies to reduce building energy use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.019>
- [33] Park, J. Y., Ouf, M. M., Gunay, B., Peng, Y., O'Brien, W., Kjærgaard, M. B., & Nagy, Z. (2019). A critical review of field implementations of occupant-centric building controls. *Building and Environment*, 165, 106351. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106351>
- [34] Yang, T., Bandyopadhyay, A., O'Neill, Z., Wen, J., & Dong, B. (2022). From occupants to occupants: A review of the occupant information understanding for building HVAC occupant-centric control. *Building Simulation*, 15(6), 913–932. <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0861-0>
- [35] Esrafilian-Najafabadi, M., & Haghighat, F. (2021). Occupancy-based HVAC control systems in buildings: A state-of-the-art review. *Building and Environment*, 197, 107810. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107810>
- [36] Huang, G., Ng, S. T., Li, D., & Zhang, Y. (2024). State of the art review on the HVAC occupant-centric control in different commercial buildings. *Journal of Building Engineering*, 96, 110445. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110445>
- [37] Peng, Y., Rysanek, A., Nagy, Z., & Schlüter, A. (2018). Using machine learning techniques for occupancy-prediction-based cooling control in office buildings. *Applied Energy*, 211, 1343–1358. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.002>

- [38] Wei, Y., Wang, S., Jin, L., Xu, Y., & Ding, T. (2022). Indoor occupancy estimation from carbon dioxide concentration using parameter estimation algorithms. *Building Services Engineering Research and Technology*, 43(4).
<https://doi.org/10.1177/01436244211060903>
- [39] Kim, J., Park, S., Kim, H., Lee, J., & Cho, H. (2023). Estimation of occupancy using IoT sensors and a carbon dioxide concentration-based machine learning model with ventilation system and differential pressure data. *Sensors*, 23(2), 585.
<https://doi.org/10.3390/s23020585>
- [40] Drgoňa, J., Arroyo, J., Cupeiro Figueroa, I., Blum, D., Arendt, K., Kim, D., Perarnau Ollé, E., Oravec, J., Wetter, M., Vrabie, D. L., & Helsen, L. (2020). All you need to know about model predictive control for buildings. *Annual Reviews in Control*, 50.
<https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.09.001>
- [41] Chinde, V., Lin, Y., & Ellis, M. J. (2022). Data-enabled predictive control for building HVAC systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 144(8), 081001. <https://doi.org/10.1115/1.4054314>
- [42] Huang, S., Huang, B., Ma, X., Bhattacharya, S., Bhattacharya, A., Vrabie, D., & Lian, J. (2024). Unveiling overlooked aspects of model predictive control for building air conditioning systems. *Journal of Building Performance Simulation*, 17(4), 510–525.
<https://doi.org/10.1080/19401493.2024.2346831>
- [43] Ajifowowe, I., Chang, H., Lee, C.-S., & Chang, S. (2024). Prospects and challenges of reinforcement learning-based HVAC control. *Journal of Building Engineering*, 98, 111080. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111080>
- [44] Jiang, Y., Zhu, S., Xu, Q., Yang, B., & Guan, X. (2023). Hybrid modeling-based temperature and humidity adaptive control for a multi-zone HVAC system. *Applied Energy*, 334, 120622. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120622>
- [45] Balali, Y., Chong, A., Busch, A., & O'Keefe, S. (2023). Energy modelling and control of building heating and cooling systems with data-driven and hybrid models—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183, 113496.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113496>
- [46] Fan, C., Chen, M., Wang, X., Wang, J., & Huang, B. (2021). A review on data preprocessing techniques toward efficient and reliable knowledge discovery from building operational data in sustainable energy systems. *Frontiers in Energy Research*, 9, 652801. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.652801>
- [47] Deb, C., & Schlueter, A. (2021). Review of data-driven energy modelling techniques for building retrofit. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110990.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110990>

- [48] Shi, Z., & O'Brien, W. (2019). Development and implementation of automated fault detection and diagnostics for building systems: A review. *Automation in Construction*, 104, 215–229. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.04.002>
- [49] Chen, Z., O'Neill, Z., Wen, J., Pradhan, O., Yang, T., Lu, X., Lin, G., Miyata, S., Lee, S., Shen, C., Chiosa, R., Piscitelli, M. S., Capozzoli, A., Hengel, F., Kühner, A., Pritoni, M., Liu, W., Clauß, J., Chen, Y., & Herr, T. (2023). A review of data-driven fault detection and diagnostics for building HVAC systems. *Applied Energy*, 339, 121030. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121030>
- [50] IEA Energy in Buildings and Communities Programme, Annex 79. (2024). *Occupant-centric building design and operation: Final report*. IEA EBC. https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_79_Final_Report_2024.pdf