



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΑ  
ΒΑΣΕΙ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ  
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Σιμινής Ιγνάτιος**

**Επιβλέπων: Ευάγγελος Σπηλιώτης**

**Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, Ιούλιος 2025





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΑ  
ΒΑΣΕΙ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ  
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Σιμινής Ιγνάτιος**

**Επιβλέπων: Ευάγγελος Σπηλιώτης**

**Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 8<sup>η</sup> Ιουλίου 2025

.....  
**Δημήτριος Ασκούνης**

Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
**Ευάγγελος Μαρινάκης**

Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
**Ευάγγελος Σπηλιώτης**

Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2025

.....

Σιμινής Ιγνάτιος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Σιμινής Ιγνάτιος 2025

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Τα κτίρια είναι υπεύθυνα για την κατανάλωση μεγάλου ποσοστού της συνολικής ενέργειας που χρησιμοποιείται κάθε χρόνο, γεγονός που τα καθιστά βασικό πεδίο παρέμβασης για την επίτευξη ενεργειακής βιωσιμότητας. Στην Ελλάδα, η ενεργειακή αξιολόγηση των κτιρίων βασίζεται στον KENAK, έναν κανονισμό που χρησιμοποιεί προκαθορισμένες τιμές και στατικές μεθόδους υπολογισμού, συχνά με σημαντικές αποκλίσεις από τις πραγματικές ενεργειακές ανάγκες ενός κτιρίου. Στο ευρωπαϊκό πλαίσιο, αντίθετα, έχουν αρχίσει να υιοθετούνται πιο εξελιγμένες προσεγγίσεις, όπως αυτή του προτύπου ISO 52016-1:2017, που βασίζεται σε δυναμική προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς.

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να φέρει αυτούς τους δύο τρόπους αξιολόγησης πιο κοντά, συνδυάζοντας την ακρίβεια και επιστημονική τεκμηρίωση του ISO με τη γνώση και τις ανάγκες που εκφράζει ο KENAK. Για τον σκοπό αυτό, αξιοποιήθηκε και επεκτάθηκε το λογισμικό ανοιχτού κώδικα pyBuildingEnergy, το οποίο βασίζεται στο πρότυπο ISO, ώστε να μπορεί να αναγνωρίζει και να χρησιμοποιεί δεδομένα και παραμέτρους που προβλέπονται από τον KENAK. Παράλληλα, σχεδιάστηκε ένα πλαίσιο όπου ο χρήστης μπορεί να εισάγει εύκολα δικά του δεδομένα ή να τροποποιεί παραμέτρους για να μελετήσει διαφορετικά σενάρια.

Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας, επιλέχθηκαν δύο αντιπροσωπευτικά ελληνικά κτίρια από τη βάση TABULA, και εξετάστηκαν διαφορετικές εκδοχές τους, μία με τα δεδομένα του TABULA και μία με τις παραδοχές του KENAK. Η προσομοίωση έγινε με ωριαία βάση, όπως προβλέπει το ISO, και αναδείχθηκε ότι η δυναμική προσέγγιση μπορεί να φέρει πιο κοντά τα αποτελέσματα στην πραγματική ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου. Η μελέτη δείχνει, με απλό αλλά τεκμηριωμένο τρόπο, ότι υπάρχει χώρος για βελτίωση και επικαιροποίηση της εθνικής μεθοδολογίας, έτσι ώστε να γίνει πιο ακριβής, πιο ευέλικτη και τελικά πιο ρεαλιστική.

Η εργασία καταλήγει στο ότι ένας δυναμικός υπολογιστικός τρόπος, που αξιοποιεί τα ευρωπαϊκά πρότυπα και διατηρεί ευκολία στη χρήση, μπορεί να αποτελέσει μια αξιόπιστη και αποτελεσματική βάση για μελλοντικές αξιολογήσεις της ενεργειακής συμπεριφοράς των ελληνικών κτιρίων.

**Λέξεις κλειδιά:** Ενεργειακή απόδοση, KENAK, ISO 52016-1, δυναμική προσομοίωση, pyBuildingEnergy, ΠΕΑ



## Abstract

Buildings are responsible for a large share of total energy consumption worldwide, making them a key focus area in the effort to improve energy efficiency and reduce environmental impact. In Greece, the current assessment framework is defined by KENAK, a national regulation that relies primarily on fixed values and simplified, static calculations. While this approach facilitates standardization, it often falls short in capturing the actual energy behavior of buildings. In contrast, at the European level, more sophisticated methods are being adopted, such as the ISO 52016-1:2017 standard, which introduces a dynamic simulation framework for estimating energy demand and indoor conditions.

This thesis attempts to bring these two approaches into closer alignment. It combines the technical precision of the ISO standard with the practical structure and datasets provided by KENAK, creating a more balanced and adaptable modeling framework. To support this integration, the open-source software pyBuildingEnergy, based on the ISO standard, was extended, enabling it to interpret and work with KENAK-compatible data structures and assumptions. At the same time, care was taken to design a user-friendly input system, allowing users to test different parameter sets and perform customized simulations without requiring complex inputs or configurations.

To evaluate the performance of the proposed methodology, two case studies were conducted on typical Greek residential buildings selected from the TABULA database. Two simulation scenarios were developed for each, one based on KENAK reference values and another using data directly from TABULA. The simulations followed the ISO's hourly-step method, and the results illustrated how dynamic modeling can yield outcomes closely aligned with real energy consumption patterns. The observed differences between the two approaches highlight the limitations of static modeling and point toward the value of transitioning to more flexible, data-driven tools.

Overall, this work shows that it is both feasible and beneficial to combine national regulatory information with dynamic, ISO-based simulation techniques. The resulting tool provides a practical and reliable platform for assessing building energy performance in a way that is closer to real-world behavior offering a step forward in both methodology and usability.

**Keywords:** Building energy performance, KENAK, ISO 52016-1, dynamic simulation, pyBuildingEnergy, EPC



## Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο ολοκλήρωσης του προπτυχιακού κύκλου σπουδών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ανατέθηκε από το Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης και έχει ως αντικείμενο την τυποποίηση των Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ) βάσει Ευρωπαϊκών Προτύπων, με αξιοποίηση λογισμικού προσομοίωσης κτιριακής ενεργειακής συμπεριφοράς.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Ευάγγελο Σπηλιώτη για την ανάθεση της εργασίας και τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα επίκαιρο και ενδιαφέρον θέμα.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην επιβλέπουσα της διπλωματικής μου, υποψήφια διδάκτορα του ΕΜΠ, Ντανιέλα Στογιάν, για την πολύτιμη καθοδήγηση, τη διαρκή υποστήριξη και τις ουσιαστικές της παρατηρήσεις καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης.

Με βαθιά ευγνωμοσύνη αφιερώνω την εργασία αυτή στην οικογένεια μου και ιδιαίτερα στους γονείς μου, Νίκο και Αφροδίτη. Η αδιάκοπη στήριξη, η αγάπη και η πίστη τους αποτέλεσαν για μένα σημείο αναφοράς σε κάθε μου βήμα. Χωρίς την παρουσία και την ενθάρρυνσή τους, δεν θα είχα φτάσει έως εδώ. Τους ευχαριστώ από καρδιάς.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τους φίλους μου, που με στήριξαν με κατανόηση και ενθάρρυνση σε όλη αυτή τη διαδρομή. Η παρουσία τους και η βοήθειά τους μου έδωσαν κουράγιο στις δύσκολες στιγμές και χαρά στις καλές.

# Πίνακας Περιεχομένων

|                                                                                                                                          |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Παράρτημα Πινάκων .....</i>                                                                                                           | <i>12</i> |
| <i>Πίνακας Εκθεμάτων.....</i>                                                                                                            | <i>13</i> |
| <i>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....</i>                                                                                                         | <i>15</i> |
| 1.1 Πιστοποιητικά Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ) στην Ευρώπη .....                                                                           | 15        |
| 1.2 Η σημασία της ακρίβειας στα Πιστοποιητικά Ενεργειακής Απόδοσης .....                                                                 | 17        |
| 1.3 Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις και Εθνικές Ιδιαιτερότητες στην Εφαρμογή των ΠΕΑ στην Ευρώπη .....                                        | 19        |
| 1.3.1 Τύποι αξιολόγησης: Υπολογιστικά μοντέλα (asset rating) vs. πραγματικά δεδομένα (operational rating).....                           | 19        |
| 1.3.2 Σύγκριση μέσω πρότυπου κτιρίου ή απόλυτων τιμών.....                                                                               | 20        |
| 1.3.3 Εθνικά παραδείγματα μεθοδολογικής εφαρμογής.....                                                                                   | 20        |
| 1.3.4 Επιπτώσεις της μεθοδολογικής ασυμβατότητας.....                                                                                    | 21        |
| 1.3.5 Εξελίξεις και εναρμονιστικές πρωτοβουλίες .....                                                                                    | 21        |
| 1.4 Πρωτοβουλίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Ενίσχυση της Ακρίβειας και της Δυναμικότητας των Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης..... | 22        |
| 1.5 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας.....                                                                                       | 24        |
| <i>Κεφάλαιο 2: KENAK και ISO – Ελληνικό και Διεθνές Πλαίσιο Ενεργειακής Αποδοτικότητας .....</i>                                         | <i>27</i> |
| 2.1 Ο KENAK: Σύντομη Περιγραφή και Μεθοδολογική Προσέγγιση.....                                                                          | 27        |
| 2.1.1. Εισαγωγή και Ιστορικό Πλαίσιο .....                                                                                               | 27        |
| 2.1.2. Θεσμική και Μεθοδολογική Βάση του KENAK.....                                                                                      | 28        |
| 2.2 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί της Μεθοδολογίας KENAK.....                                                                            | 30        |
| 2.2.1 Πλεονεκτήματα της Μεθοδολογίας .....                                                                                               | 30        |
| 2.2.2 Περιορισμοί της μεθοδολογίας .....                                                                                                 | 32        |
| 2.3 Το Πρότυπο ISO 52016-1:2017.....                                                                                                     | 34        |
| 2.4 Βασικές διαφορές μεταξύ ISO 52016-1 και KENAK: Από τον υπολογισμό στη διαχείριση .....                                               | 37        |
| 2.5 Εφαρμογές και Προοπτικές Ενσωμάτωσης του ISO 52016-1 στην Ελληνική Πραγματικότητα .....                                              | 38        |
| <i>Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία Παραμετροποίησης του Κτιρίου Αναφοράς και του Πραγματικού Κτιρίου στο Υπολογιστικό Μοντέλο .....</i>          | <i>40</i> |

|                                                                                                |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.1 Εισαγωγή στη Μεθοδολογία.....                                                              | 40         |
| 3.2 Ανάλυση KENAK και Τυπικές Τιμές Κτιρίου Αναφοράς .....                                     | 42         |
| 3.2.1 Θερμικά χαρακτηριστικά κελύφους και συντελεστές ακτινοβολίας .....                       | 43         |
| 3.2.2 Σκίαση και Χαρακτηριστικά Υαλοπινάκων .....                                              | 45         |
| 3.2.4 Αερισμός.....                                                                            | 46         |
| 3.2.5 Θερμική Μάζα .....                                                                       | 47         |
| 3.2.6 Κεντρική Θέρμανση.....                                                                   | 48         |
| 3.2.7 Ψύξη / Κλιματισμός.....                                                                  | 49         |
| 3.2.8 Τερματικές Μονάδες και Σωληνώσεις .....                                                  | 50         |
| 3.2.9 Σύστημα Εξαερισμού ή Μηχανικού Αερισμού .....                                            | 50         |
| 3.2.10 Σύστημα Ζεστού Νερού Χρήσης (ZNX) .....                                                 | 51         |
| 3.3 Ανάλυση Παραμέτρων Πραγματικού Κτιρίου .....                                               | 52         |
| 3.3.1 Προφίλ Λειτουργίας, Θερμικές Παραδοχές και Εσωτερικά Φορτία Πραγματικού Κτιρίου.....     | 53         |
| 3.3.2 Αερισμός και Φωτισμός.....                                                               | 56         |
| 3.3.3 Ζεστό Νερό Χρήσης (ZNX) .....                                                            | 57         |
| 3.3.4 Δομικά Στοιχεία – Θερμομονωτικές Ιδιότητες (U-values).....                               | 59         |
| 3.3.5 Υαλοπίνακες - Τύποι και Θερμική Συμπεριφορά.....                                         | 69         |
| 3.3.6 Οπτικές και Θερμικές Ιδιότητες Επιφανειών Κελύφους .....                                 | 71         |
| 3.3.7 Συντελεστής Σκίασης.....                                                                 | 74         |
| 3.3.8 Απόδοση Συστήματος Θέρμανσης - Λέβητες και Καυστήρες .....                               | 75         |
| 3.4 Αναλυτική μεθοδολογία υπολογισμού ενεργειακών αναγκών σύμφωνα με το ISO 52016-1:2017 ..... | 77         |
| 3.5 Επέκταση του λογισμικού pyBuildingEnergy για υποστήριξη δεδομένων KENAK.....               | 84         |
| <b>Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή Μεθοδολογίας και Αποτελέσματα .....</b>                                | <b>88</b>  |
| 4.1 Επιλογή και Περιγραφή Παραδειγματικών Κτιρίων .....                                        | 88         |
| 4.2 Διαδικασία Εφαρμογής της Μεθοδολογίας .....                                                | 90         |
| 4.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων και Παρατηρήσεις.....                                             | 100        |
| <b>Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα, Δυσκολίες και Προοπτικές.....</b>                                 | <b>113</b> |
| <b>Βιβλιογραφία .....</b>                                                                      | <b>116</b> |

## Παράρτημα Πινάκων

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Πίνακας 3.1:</b> Συντελεστές θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων Κτιρίου Αναφοράς (KENAK) .....                                                                 | 44 |
| <b>Πίνακας 3.2:</b> Εποχιακός βαθμός απόδοσης λεβήτων Κτιρίου Αναφοράς (KENAK) .....                                                                              | 48 |
| <b>Πίνακας 3.3:</b> Περίοδοι λειτουργίας θέρμανσης και ψύξης Κτιρίου Αναφοράς ανά Κλιματική Ζώνη (KENAK) .....                                                    | 54 |
| <b>Πίνακας 3.4:</b> Τιμές εσωτερικής θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας Κτιρίου Αναφοράς (KENAK) .....                                                            | 55 |
| <b>Πίνακας 3.5:</b> Μηνιαίες θερμοκρασίες παροχής δικτύου κρύου νερού ανά Κλιματική Ζώνη [°C] (KENAK) .....                                                       | 58 |
| <b>Πίνακας 3.6:</b> Συντελεστές θερμοπερατότητας τοιχοποιιών από μπετόν σε κτίρια χωρίς θερμομόνωση (πριν το 1980) .....                                          | 59 |
| <b>Πίνακας 3.7:</b> Συντελεστές θερμοπερατότητας τοιχοποιιών από διπλή στρώση τούβλων σε κτίρια χωρίς θερμομόνωση (πριν το 1980) .....                            | 60 |
| <b>Πίνακας 3.8:</b> Συντελεστές θερμοπερατότητας τοιχοποιιών από μονή στρώση τούβλων σε κτίρια χωρίς θερμομόνωση (πριν το 1980) .....                             | 60 |
| <b>Πίνακας 3.9:</b> Συντελεστές θερμοπερατότητας πέτρινων τοιχοποιιών σε κτίρια χωρίς θερμομόνωση (πριν το 1980) .....                                            | 61 |
| <b>Πίνακας 3.10:</b> Συντελεστές θερμοπερατότητας στεγών σε κτίρια χωρίς θερμομόνωση (πριν το 1980) .....                                                         | 62 |
| <b>Πίνακας 3.11:</b> Συντελεστές θερμοπερατότητας δαπέδων σε κτίρια χωρίς θερμομόνωση (πριν το 1980) .....                                                        | 62 |
| <b>Πίνακας 3.12:</b> Συντελεστές θερμοπερατότητας τοιχοποιιών από μπετόν με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία σε κτίρια περιόδου 1980–2010 .....                   | 63 |
| <b>Πίνακας 3.13:</b> Συντελεστές θερμοπερατότητας τοιχοποιιών από διπλή στρώση τούβλων με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία σε κτίρια περιόδου 1980–2010 .....     | 63 |
| <b>Πίνακας 3.14:</b> Συντελεστές θερμοπερατότητας τοιχοποιιών από μονή στρώση τούβλων με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία σε κτίρια περιόδου 1980–2010 .....      | 64 |
| <b>Πίνακας 3.15:</b> Συντελεστές θερμοπερατότητας πέτρινων τοιχοποιιών με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία σε κτίρια περιόδου 1980–2010 .....                     | 64 |
| <b>Πίνακας 3.16:</b> Συντελεστές θερμοπερατότητας οροφών και στεγών με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία σε κτίρια περιόδου 1980–2010 .....                        | 65 |
| <b>Πίνακας 3.17:</b> Συντελεστές θερμοπερατότητας δαπέδων με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία σε κτίρια περιόδου 1980–2010 .....                                  | 65 |
| <b>Πίνακας 3.18:</b> Μέγιστοι επιτρεπόμενοι συντελεστές θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων με αυξημένη θερμομονωτική προστασία σε κτίρια περιόδου 2010–2017 ..... | 66 |

|                                                                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Πίνακας 3.19:</b> Μέγιστοι επιτρεπόμενοι συντελεστές θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων με ενισχυμένη θερμομονωτική προστασία σε κτίρια περιόδου μετά το 2017.....                       | 68  |
| <b>Πίνακας 3.20:</b> Συντελεστές θερμοπερατότητας υαλοπινάκων (Ug) ανάλογα με τον τύπο και το επίπεδο θερμομονωτικής προστασίας.....                                                        | 69  |
| <b>Πίνακας 3.21:</b> Ανακλαστικότητα και απορροφητικότητα κατακόρυφων δομικών επιφανειών του κελύφους.....                                                                                  | 72  |
| <b>Πίνακας 3.22:</b> Ανακλαστικότητα και απορροφητικότητα οριζόντιων δομικών επιφανειών του κελύφους.....                                                                                   | 72  |
| <b>Πίνακας 3.23:</b> Συντελεστές θερμικής εκπομπής επιφανειών του κτιριακού κελύφους (emissivity) .....                                                                                     | 73  |
| <b>Πίνακας 3.24:</b> Συνολική ηλιακή διαπερατότητα υαλοπινάκων (g-value) ανάλογα με το ποσοστό κάλυψης από πλαίσιο.....                                                                     | 74  |
| <b>Πίνακας 3.25:</b> Τυπικές τιμές συντελεστή σκίασης εξωτερικών επιφανειών του κτιριακού κελύφους ανά βαθμό έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία .....                                          | 74  |
| <b>Πίνακας 3.26:</b> Εποχιακός βαθμός απόδοσης λεβήτων - καυστήρων σε σχέση με την ονομαστική ισχύ.....                                                                                     | 76  |
| <b>Πίνακας 3.27:</b> Συντελεστές προσαρμογής εποχιακής απόδοσης ανά τύπο καυσίμου.....                                                                                                      | 76  |
| <b>Πίνακας 3.28:</b> Χαρακτηριστικοί βαθμοί απόδοσης ανά τύπο λέβητα.....                                                                                                                   | 77  |
| <b>Πίνακας 4.1:</b> Είσοδοι Χρήστη και Επιλογές Παραμετροποίησης Κατά KENAK .....                                                                                                           | 93  |
| <b>Πίνακας 4.2:</b> Τεχνικές Παράμετροι Κτιρίου Ζώνης Β (TABULA) .....                                                                                                                      | 97  |
| <b>Πίνακας 4.3:</b> Τεχνικές Παράμετροι Κτιρίου Ζώνης Γ (TABULA).....                                                                                                                       | 98  |
| <b>Πίνακας 4.4:</b> Τυπικές Τιμές Προσομοιώσεων KENAK ανά Κτίριο .....                                                                                                                      | 99  |
| <b>Πίνακας 4.5:</b> Αναλυτικά αποτελέσματα τελικής και πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης για μονοκατοικία Ζώνης Β βάσει προσομοίωσης με τιμές TABULA (GR.ZoneB.SFH.03.Gen.ReEx.001) ..... | 101 |
| <b>Πίνακας 4.6:</b> Αναλυτικά αποτελέσματα τελικής και πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης για μονοκατοικία Ζώνης Γ βάσει προσομοίωσης με τιμές TABULA (GR.ZoneC.SFH.01.Gen.ReEx.001) ..... | 103 |
| <b>Πίνακας 4.7:</b> Αναλυτικά αποτελέσματα τελικής και πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης για τη μονοκατοικία της Ζώνης Β βάσει παραδοχών KENAK.....                                       | 106 |
| <b>Πίνακας 4.8:</b> Αναλυτικά αποτελέσματα τελικής και πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης για τη μονοκατοικία της Ζώνης Γ βάσει παραδοχών KENAK .....                                      | 108 |
| <b>Πίνακας 4.9:</b> Ανάλυση Απόκλισης Αποτελεσμάτων για το Κτίριο Ζώνης Β σε σύγκριση με τις επίσημες τιμές του TABULA .....                                                                | 110 |
| <b>Πίνακας 4.10:</b> Ανάλυση Απόκλισης Αποτελεσμάτων για το Κτίριο Ζώνης Β σε σύγκριση με τις επίσημες τιμές του TABULA .....                                                               | 111 |

# Πίνακας Εκθεμάτων

|                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Εικόνα 1:</b> Παράδειγμα Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης με ενεργειακή κατάταξη και ένδειξη πρωτογενούς κατανάλωσης. ....                  | 16  |
| <b>Εικόνα 2:</b> Χάρτης της Ελλάδας με τις τέσσερις Κλιματικές Ζώνες (Α, Β, Γ, Δ) σύμφωνα με τον ΚΕΝΑΚ και την Τεχνική Οδηγία TOTEE 20701-1 ..... | 29  |
| <b>Εικόνα 3:</b> Κτίριο στη Ζώνη Β.....                                                                                                           | 89  |
| <b>Εικόνα 4:</b> Κτίριο στη Ζώνη Γ .....                                                                                                          | 89  |
| <b>Εικόνα 5:</b> Οπτική αναπαράσταση της διαδικασίας προσομοίωσης με χρήση τιμών TABULA και ΚΕΝΑΚ.....                                            | 91  |
| <b>Εικόνα 6:</b> Παράδειγμα εισαγωγής δεδομένων από χρήστη σε μορφή JSON .....                                                                    | 94  |
| <b>Εικόνα 7:</b> Υπολογισμός Τελικής και Πρωτογενούς Ενέργειας Θέρμανσης, Ψύξης και ΖΝΧ στο pyBuildingEnergy .....                                | 96  |
| <b>Εικόνα 8:</b> Συνάρτηση check_area για δομικά στοιχεία .....                                                                                   | 96  |
| <b>Εικόνα 9:</b> Παράμετροι Προσομοίωσης Κτιρίου Ζώνης Β με Τιμές ΚΕΝΑΚ στο pyBuildingEnergy .....                                                | 97  |
| <b>Εικόνα 10:</b> Σύγκριση ενεργειακής κατανάλωσης ανά χρήση μεταξύ προσομοιώσεων και επίσημων τιμών TABULA για τα δύο κτίρια. ....               | 104 |

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

## 1.1 Πιστοποιητικά Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ) στην Ευρώπη

Η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων αποτελεί έναν από τους βασικούς άξονες της ευρωπαϊκής πολιτικής για την ενέργεια και το περιβάλλον. Ο κτιριακός τομέας ευθύνεται για περίπου 40% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας και σχεδόν 36% των εκπομπών CO<sub>2</sub> στην Ευρωπαϊκή Ένωση, γεγονός που καταδεικνύει τη σημασία της ενεργειακής αναβάθμισης του κτιριακού αποθέματος για την επίτευξη των στόχων που απορρέουν από την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και τον Ευρωπαϊκό Κλιματικό Νόμο [1]. Ειδικότερα, η ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτίρια αναγνωρίζεται ως στρατηγικός τομέας για τη μείωση των εκπομπών, τη μείωση του κόστους για τα νοικοκυριά και τις επιχειρήσεις, την ενίσχυση της απασχόλησης στην αγορά ανακαινίσεων και την ενδυνάμωση της ασφάλειας εφοδιασμού [1].

Στο πλαίσιο αυτό, τα Πιστοποιητικά Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ), γνωστά και ως Energy Performance Certificates (EPCs), εισήχθησαν με την Οδηγία 2002/91/EK και θεσμοθετήθηκαν πλήρως με την Οδηγία 2010/31/ΕΕ. Στη συνέχεια ενισχύθηκαν μέσω της Οδηγίας 2018/844/ΕΕ, ως μέρος του συνολικού πλαισίου της Οδηγίας για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (EPBD) [2]. Σκοπός τους είναι η αποτύπωση και επικοινωνία της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, τόσο προς τους τελικούς χρήστες και ιδιοκτήτες όσο και προς τις δημόσιες αρχές.

Το ΠΕΑ παρέχει μια συγκρίσιμη εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου, βασισμένη είτε σε τυποποιημένες υπολογιστικές μεθόδους (asset rating), είτε, σε ορισμένες χώρες, σε πραγματικά δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας (operational rating), αναλόγως του ρυθμιστικού πλαισίου [3]. Το περιεχόμενο του ΠΕΑ περιλαμβάνει την ενεργειακή κατάταξη του κτιρίου σε προκαθορισμένες κατηγορίες (π.χ. από A+ έως H ή G), βάσει της υπολογισμένης πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο ετησίως (kWh/m<sup>2</sup>/έτος). Επιπλέον, περιλαμβάνει ποσοτικές εκτιμήσεις για τις εκπομπές CO<sub>2</sub>, καθώς και τεχνικά στοιχεία για το θερμομονωτικό κέλυφος, τα συστήματα θέρμανσης, ψύξης, ζεστού νερού χρήσης, φωτισμού και την ενδεχόμενη ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας [4].

Ένα κρίσιμο στοιχείο των ΠΕΑ είναι οι συστάσεις για ενεργειακές αναβαθμίσεις, οι οποίες πρέπει να είναι τεχνικά εφαρμόσιμες και οικονομικά αποδοτικές, με σκοπό τη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου [4]. Η έκδοση ΠΕΑ είναι νομικά υποχρεωτική σε πλήθος περιπτώσεων: κατά την πώληση, την ενοικίαση ή την ανέγερση νέων κτιρίων, καθώς και για υφιστάμενα κτίρια που υπόκεινται σε ριζική ανακαίνιση ή αλλαγή χρήσης. Επιπλέον, είναι υποχρεωτική για δημόσια κτίρια με επιφάνεια άνω των 250 τετραγωνικών μέτρων που χρησιμοποιούνται τακτικά από το κοινό [2].

Το ΠΕΑ πρέπει να επιδεικνύεται στον ενδιαφερόμενο ενοικιαστή ή αγοραστή ήδη από τη φάση της αγγελίας και παραμένει σε ισχύ για δέκα έτη, εκτός αν μεσολαβήσει σημαντική τεχνική τροποποίηση στο κτίριο που απαιτεί νέα αξιολόγηση [2].

Η σύνταξη και έκδοση του ΠΕΑ γίνεται αποκλειστικά από πιστοποιημένους ενεργειακούς επιθεωρητές, οι οποίοι είναι εγγεγραμμένοι σε εθνικά μητρώα και διαθέτουν την απαιτούμενη τεχνική επάρκεια. Ο επιθεωρητής οφείλει να καταγράψει επιτόπια τα φυσικά, γεωμετρικά και τεχνικά χαρακτηριστικά του κτιρίου, να τεκμηριώσει τη θερμική προστασία και τη λειτουργία των Η/Μ συστημάτων, και να χρησιμοποιήσει τα κατάλληλα λογισμικά ή μεθοδολογίες για την επεξεργασία των δεδομένων. Στην Ελλάδα, η μεθοδολογία υπολογισμού ορίζεται από τον KENAK και τις Τεχνικές Οδηγίες του TEE, με χρήση λογισμικού όπως το TEE-KENAK [5].

Η αξία των ΠΕΑ ξεπερνά τη λειτουργία τους ως απλών ενημερωτικών εγγράφων. Αποτελούν βασικά εργαλεία ενεργειακής πολιτικής, καθώς χρησιμοποιούνται από τις αρμόδιες αρχές για τη χαρτογράφηση της απόδοσης του κτιριακού αποθέματος, τη στοχοθέτηση επιδοτήσεων και τη διαμόρφωση στρατηγικών ανακαίνισης [6]. Επιπλέον, λειτουργούν ως έντυπα τεκμηρίωσης συμμόρφωσης προς τις ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης και ως προϋπόθεση ένταξης σε προγράμματα χρηματοδότησης.

| Α.Π.: ..... Α.Α.: .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                              |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------------|---|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------|--|--|--|--|--|
| <b>ΧΡΗΣΗ:</b> .....<br>Κτίριο <input type="checkbox"/> Τμήμα κτιρίου <input type="checkbox"/><br>Αριθμός ιδιοκτησίας: .....<br>Κλιματική Ζώνη: .....<br>Διεύθυνση: ..... Τ.Κ.: .....<br>Πόλη: .....<br>Έτος κατασκευής: .....<br>Συνολική επιφάνεια [m <sup>2</sup> ]: .....<br>Θερμαινόμενη επιφάνεια [m <sup>2</sup> ]: .....<br>Ονομα ιδιοκτήτη: .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                              |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
| (Φωτογραφία κτιρίου)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                              |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
| <b>ΒΑΘΜΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                              |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
| <b>ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ</b><br>EP ≤ 0,33 kWh/m <sup>2</sup> <b>A+</b><br>0,33 kWh/m <sup>2</sup> < EP ≤ 0,5 kWh/m <sup>2</sup> <b>A</b><br>0,5 kWh/m <sup>2</sup> < EP ≤ 0,75 kWh/m <sup>2</sup> <b>B+</b><br>0,75 kWh/m <sup>2</sup> < EP ≤ 1,0 kWh/m <sup>2</sup> <b>B</b><br>1,0 kWh/m <sup>2</sup> < EP ≤ 1,41 kWh/m <sup>2</sup> <b>B-</b><br>1,41 kWh/m <sup>2</sup> < EP ≤ 1,82 kWh/m <sup>2</sup> <b>A</b><br>1,82 kWh/m <sup>2</sup> < EP ≤ 2,27 kWh/m <sup>2</sup> <b>E</b><br>2,27 kWh/m <sup>2</sup> < EP ≤ 2,73 kWh/m <sup>2</sup> <b>Z</b><br>2,73 kWh/m <sup>2</sup> < EP <b>H</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>B</b>                                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
| <b>ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ</b><br>ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΜΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟ<br>Υπολογιζόμενη ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας κτιρίου αναφοράς [kWh/m <sup>2</sup> ]: .....<br>Υπολογιζόμενη ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας [kWh/m <sup>2</sup> ]: .....<br>Υπολογιζόμενες ετήσιες εκπομπές CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]: .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                              |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
| <b>ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ</b><br>ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΤΗΣΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ & ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO <sub>2</sub><br>Ηλεκτρική ενέργεια [kWh/m <sup>2</sup> ]: ..... Καύσιμα [kWh/m <sup>2</sup> ]: .....<br>Συνολική ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας [kWh/m <sup>2</sup> ]: .....<br>Συνολικές ετήσιες εκπομπές CO <sub>2</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]: .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                              |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
| Θερμική άνεση <input type="checkbox"/><br>Οπτική άνεση <input type="checkbox"/><br>Ακουστική άνεση <input type="checkbox"/><br>Ποιότητα αέρα <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                              |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
| <b>ΕΤΗΣΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑ ΤΕΛΙΚΗ ΧΡΗΣΗ</b><br><table border="1"> <thead> <tr> <th>Πηγή ενέργειας</th> <th>Τελική χρήση</th> <th>Συνεισφορά στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Ηλεκτρική</td> <td>Θέρμανση <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Φωτισμός <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Ορυκτά καύσιμα</td> <td>Θέρμανση <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Φωτισμός <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">ΑΠΕ</td> <td>Θέρμανση <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Φωτισμός <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="3">Σύνολο</td> </tr> </tbody> </table> Ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά τελική χρήση [kWh/m <sup>2</sup> ]<br>Θέρμανση: ..... Ψύξη: .....<br>Ζεστό Νερό Χρήσης (ΖΗΧ): ..... Φωτισμός: .....<br>ΑΠΕ & ΣΗΘ: (-) ..... |                                                                                              | Πηγή ενέργειας                                                         | Τελική χρήση                                                        | Συνεισφορά στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου (%)                     | Ηλεκτρική                                                           | Θέρμανση <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/> |                                  | Φωτισμός <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/> |  | Ορυκτά καύσιμα | Θέρμανση <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/> |  | Φωτισμός <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/> |   | ΑΠΕ | Θέρμανση <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/> |  | Φωτισμός <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/> |  | Σύνολο |  |  |  |  |  |
| Πηγή ενέργειας                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Τελική χρήση                                                                                 | Συνεισφορά στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου (%)                     |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
| Ηλεκτρική                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Θέρμανση <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/> |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Φωτισμός <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/> |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
| Ορυκτά καύσιμα                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Θέρμανση <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/> |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Φωτισμός <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/> |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
| ΑΠΕ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Θέρμανση <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/> |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Φωτισμός <input type="checkbox"/> Ψύξη <input type="checkbox"/> ΖΗΧ <input type="checkbox"/> |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
| Σύνολο                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                              |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
| <b>ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ</b><br>1. ....<br>2. ....<br>3. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                              |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>Αριθμός σύστασης</th> <th>Εκτιμώμενο αρχικό κόστος επένδυσης [€]</th> <th>Εκτιμώμενη ετήσια εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας και τιμή μονάδας*</th> <th>Εκτιμώμενη ετήσια εξοικονόμηση CO<sub>2</sub> [kg/m<sup>2</sup>]</th> <th>Εκτιμώμενη ετήσια μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> [kg/m<sup>2</sup>]</th> <th>Εκτιμώμενη περίοδος αποπληρωμής*</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> * Η εξοικονόμηση ενέργειας και τιμή μονάδας αφορά την κάθε επί μέρους σύσταση και τα ποσά δεν αθροίζονται. Ορισμός για την ετήσια μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και την περίοδο αποπληρωμής:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                              | Αριθμός σύστασης                                                       | Εκτιμώμενο αρχικό κόστος επένδυσης [€]                              | Εκτιμώμενη ετήσια εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας και τιμή μονάδας* | Εκτιμώμενη ετήσια εξοικονόμηση CO <sub>2</sub> [kg/m <sup>2</sup> ] | Εκτιμώμενη ετήσια μείωση εκπομπών CO <sub>2</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]                       | Εκτιμώμενη περίοδος αποπληρωμής* | 1                                                                                            |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              | 2 |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  | 3      |  |  |  |  |  |
| Αριθμός σύστασης                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Εκτιμώμενο αρχικό κόστος επένδυσης [€]                                                       | Εκτιμώμενη ετήσια εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας και τιμή μονάδας* | Εκτιμώμενη ετήσια εξοικονόμηση CO <sub>2</sub> [kg/m <sup>2</sup> ] | Εκτιμώμενη ετήσια μείωση εκπομπών CO <sub>2</sub> [kg/m <sup>2</sup> ] | Εκτιμώμενη περίοδος αποπληρωμής*                                    |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                              |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                              |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
| 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                              |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |
| Ημερομηνία έκδοσης ΠΕΑ: ..... Σφραγίδα: .....<br>Ονοματεπώνυμο Επιθεωρητή: .....<br>Α.Μ. Επιθεωρητή: ..... Υπογραφή: .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                              |                                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                     |                                                                                              |                                  |                                                                                              |  |                |                                                                                              |  |                                                                                              |   |     |                                                                                              |  |                                                                                              |  |        |  |  |  |  |  |

**Εικόνα 1:** Παράδειγμα Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης με ενεργειακή κατάταξη και ένδειξη πρωτογενούς κατανάλωσης.

Στην αγορά ακινήτων, επιτρέπουν τη διαφανή σύγκριση μεταξύ διαφορετικών κτιρίων ή διαμερισμάτων, ενώ σε ευρωπαϊκό επίπεδο αποτελούν τη βάση για την ανάπτυξη εθνικών και ευρωπαϊκών βάσεων δεδομένων [6]. Στο πλαίσιο της τελευταίας πρότασης αναθεώρησης της EPBD (2023), δρομολογείται η μετατροπή των ΠΕΑ σε ψηφιακά έγγραφα, με στόχο τη διαλειτουργικότητα τους με άλλα εργαλεία όπως τα Building Renovation Passports [2].

Εξετάζεται επίσης η ενσωμάτωση δυναμικών δεδομένων (π.χ. πραγματικής κατανάλωσης ενέργειας), ώστε τα ΠΕΑ να αντανακλούν πληρέστερα τη συμπεριφορά του κτιρίου στον χρόνο. Η ψηφιοποίηση και η διασύνδεση των πιστοποιητικών με πανευρωπαϊκές πλατφόρμες, όπως το EU Building Stock Observatory, αναμένεται να ενισχύσει τη δυνατότητα συστηματικής παρακολούθησης της ενεργειακής απόδοσης του ευρωπαϊκού κτιριακού τομέα [2].

Ωστόσο, παρά τη θεσμική και τεχνική πρόοδο, παραμένουν σημαντικά ζητήματα που σχετίζονται με την ακρίβεια, την αξιοπιστία και τη συγκρισιμότητα των ΠΕΑ εντός και μεταξύ κρατών-μελών. Τα ζητήματα αυτά καθιστούν αναγκαία την εξέταση των αιτίων, των μεθοδολογικών περιορισμών και των πιθανών τεχνολογικών βελτιώσεων για την ενίσχυση της ποιότητάς τους, όπως θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα.

## 1.2 Η σημασία της ακρίβειας στα Πιστοποιητικά Ενεργειακής Απόδοσης

Η ακρίβεια των ΠΕΑ αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για την επιτυχία των πολιτικών που στοχεύουν στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών του κτιριακού τομέα. Ως κύριο εργαλείο της ευρωπαϊκής πολιτικής για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, τα ΠΕΑ καλούνται να παρέχουν μια αξιόπιστη, συγκρίσιμη και κατανοητή εικόνα της ενεργειακής συμπεριφοράς κάθε κτιρίου, τόσο για τους τελικούς χρήστες όσο και για τις δημόσιες αρχές.

Ωστόσο, πλήθος ερευνών καταδεικνύουν ότι η ακρίβεια των ΠΕΑ παρουσιάζει σημαντικές αδυναμίες, γεγονός που υπονομεύει την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητά τους. Μεγάλης κλίμακας μελέτες από το Ηνωμένο Βασίλειο και την Ιρλανδία έχουν δείξει ότι έως και το 27–62% των καταχωρημένων ΠΕΑ περιλαμβάνουν σφάλματα, τα οποία προέρχονται κυρίως από διαφωνίες μεταξύ επιθεωρητών, ελλιπή δεδομένα εισόδου, αλλά και χειροκίνητα λάθη κατά την καταγραφή σύνθετων ιδιοκτησιών, όπως διαμερίσματα και μεικτής χρήσης κτίρια [7], [8].

Ακόμη πιο ανησυχητική είναι η εύρεση ότι επανεκτιμήσεις του ίδιου ακινήτου οδηγούν συχνά σε διαφορετική ενεργειακή κατάταξη, με αποτέλεσμα να παρατηρείται λανθασμένη τοποθέτηση σε ενεργειακές κατηγορίες έως και στο 25% των περιπτώσεων [9]. Αυτό το φαινόμενο εγείρει σοβαρά ερωτήματα ως προς τη σταθερότητα και την αναπαραγωγικότητα των αποτελεσμάτων, καθώς και την εμπιστοσύνη του κοινού στο ίδιο το εργαλείο.

Ερευνητικά δεδομένα από το Climate Policy Initiative επιβεβαιώνουν την απώλεια εμπιστοσύνης: μόνο το 44% των καταναλωτών στη Γερμανία δήλωσαν ότι εμπιστεύονται τα ΠΕΑ, ενώ μόλις το 21% θυμούνται με ακρίβεια τις πληροφορίες που περιέχονται στο πιστοποιητικό [10]. Αυτά τα στοιχεία δείχνουν ότι τα ΠΕΑ αποτυγχάνουν όχι μόνο ως τεχνικά εργαλεία αξιολόγησης, αλλά και ως επικοινωνιακά εργαλεία πληροφόρησης.

Παρόλα αυτά, όταν τα ΠΕΑ γίνονται πιο ακριβή και αξιόπιστα, μπορούν να προσφέρουν πολύ μεγαλύτερη αξία, όχι μόνο ως πιστοποιητικά συμμόρφωσης, αλλά ως πραγματικά εργαλεία

υποστήριξης αποφάσεων. Ένα πιο ακριβές ΠΕΑ δίνει τη δυνατότητα σε ιδιοκτήτες, μελετητές και επενδυτές να κατανοήσουν καλύτερα τόσο την πραγματική κατάσταση του κτιρίου όσο και τον τρόπο που αυτό χρησιμοποιείται στην καθημερινότητα[11]. Με αυτόν τον τρόπο, οι προτεινόμενες παρεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης μπορούν να σχεδιαστούν με πολύ πιο στοχευμένο και ουσιαστικό τρόπο, προσαρμοσμένο στις ανάγκες και τις ιδιαιτερότητες κάθε χώρου, αντί να βασίζονται σε γενικές παραδοχές ή τυπικές λύσεις.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι σε μεγαλύτερα έργα ή επενδυτικά σχήματα, η ύπαρξη ενός σαφούς και τεκμηριωμένου ΠΕΑ μπορεί να κάνει τη διαφορά στην προσπάθεια προσέλκυσης χρηματοδότησης. Όταν τα δεδομένα ενεργειακής απόδοσης είναι ακριβή, τεκμηριωμένα και διαφανή, διευκολύνεται σημαντικά η αξιολόγηση των έργων από τράπεζες και επενδυτές[12]. Με άλλα λόγια, ένα αξιόπιστο ΠΕΑ αυξάνει την ορατότητα του έργου, ενισχύει την εμπιστοσύνη στις προβλεπόμενες ενεργειακές και οικονομικές αποδόσεις, και μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στο να κινητοποιηθούν περισσότερα κεφάλαια για έργα ενεργειακής αναβάθμισης[13]. Στο πλαίσιο των σύγχρονων πρακτικών πράσινης χρηματοδότησης, αυτός ο ρόλος των ΠΕΑ γίνεται όλο και πιο σημαντικός.

Η απόκλιση μεταξύ θεωρητικής και πραγματικής κατανάλωσης, γνωστή και ως “performance gap”, εντοπίζεται επανειλημμένα στη βιβλιογραφία. Αιτίες περιλαμβάνουν απλοποιημένες υποθέσεις χρήσης, σταθερές τιμές για εσωτερικά κέρδη, παραμέτρους αερισμού και ελλιπή δεδομένα για τα συστήματα HVAC. Η μελέτη *Energy Performance Certificate Calculation Methodologies Across Europe* ανέλυσε 10 ευρωπαϊκά συστήματα ΠΕΑ και διαπίστωσε ότι οι εθνικές διαφορές στις μεθοδολογίες, στα U-values και στα πρότυπα κατανάλωσης οδηγούν σε ουσιαστικά μη συγκρίσιμα αποτελέσματα [14].

Επιπλέον, η εκπαίδευση των επιθεωρητών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα. Χώρες όπως η Κροατία και η Βουλγαρία, με πιο αυστηρά προγράμματα εκπαίδευσης και πιστοποίησης, παρουσιάζουν μικρότερες αποκλίσεις από χώρες με πιο ελαστικό ρυθμιστικό πλαίσιο, όπως το Ηνωμένο Βασίλειο [15].

Στην προσπάθεια βελτίωσης της ακρίβειας, σύγχρονες τεχνολογικές προσεγγίσεις έχουν αρχίσει να ενσωματώνονται στα συστήματα αποτίμησης. Η μελέτη *Benchmarking Building Energy Performance* κατέδειξε ότι η εφαρμογή μεθόδων ανάλυσης δεδομένων και ανίχνευσης σφαλμάτων μέσω αλγορίθμων machine learning οδήγησε σε βελτίωση της ακρίβειας των ΠΕΑ κατά 35%, σε σύγκριση με παραδοσιακές μεθόδους εκτίμησης [16].

Επίσης, τεχνικές όπως τα explainable AI, τα συστήματα διασταύρωσης δεδομένων και τα feedback loops έχουν προταθεί ως βασικά εργαλεία για τη βελτίωση της αξιοπιστίας [17]. Η πλατφόρμα EU BUILD UP προωθεί τη χρήση τέτοιων εργαλείων μέσα από τις κατευθυντήριες γραμμές της για την ποιότητα και διαλειτουργικότητα των ΠΕΑ στην ΕΕ [18].

Παράλληλα, η συμμετοχή των ενοίκων στη συλλογή δεδομένων, μέσω εφαρμογών, crowdsourcing ή καταγραφής χρήσης, έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική. Σε ορισμένα

δοκιμαστικά έργα, η αξιοποίηση αυτής της προσέγγισης ξεπέρασε σε ακρίβεια ακόμα και την παραδοσιακή μηχανολογική εκτίμηση, προσφέροντας ποσοστά βελτίωσης της τάξης του 30–35% [19].

Τέλος, η δημιουργία δυναμικών ΠΕΑ (dynamic EPCs), δηλαδή πιστοποιητικών που ενημερώνονται περιοδικά με βάση πραγματικά δεδομένα κατανάλωσης ή τεχνικές αλλαγές στο κτίριο, αποτελεί βασική πρόταση της νέας ευρωπαϊκής στρατηγικής. Η έκθεση του Joint Research Centre (JRC) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής επισημαίνει ότι η μετάβαση σε ένα τέτοιο σύστημα απαιτεί την ενσωμάτωση πληροφοριών από «έξυπνα» συστήματα διαχείρισης, τακτική επανεξέταση του πιστοποιητικού και διαλειτουργικότητα με άλλες βάσεις δεδομένων [20].

Συνοψίζοντας, η ακρίβεια των ΠΕΑ αποτελεί θεμέλιο για την αποτελεσματικότητα της ενεργειακής πολιτικής και την ενίσχυση της εμπιστοσύνης των πολιτών στους μηχανισμούς πιστοποίησης. Η ενσωμάτωση δυναμικών δεδομένων, σύγχρονων τεχνολογιών και συστημάτων αξιολόγησης βασισμένων στη χρήση πραγματικών στοιχείων αναμένεται να αλλάξει ριζικά το τοπίο. Ωστόσο, η επιτυχής εφαρμογή αυτών των μεταρρυθμίσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις μεθοδολογικές προσεγγίσεις και τις εθνικές ιδιαιτερότητες κάθε κράτους-μέλους. Στην επόμενη ενότητα, εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο υλοποιούνται τα ΠΕΑ στην πράξη σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες, αναδεικνύοντας κρίσιμες διαφορές, προκλήσεις και βέλτιστες πρακτικές.

### 1.3 Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις και Εθνικές Ιδιαιτερότητες στην Εφαρμογή των ΠΕΑ στην Ευρώπη

Τα ΠΕΑ αποτελούν θεμελιώδες εργαλείο της ενεργειακής πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στοχεύοντας στη χαρτογράφηση, την αξιολόγηση και, τελικά, τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας του κτιριακού αποθέματος. Ωστόσο, η εφαρμογή τους διαφέρει σημαντικά μεταξύ των κρατών-μελών, όχι μόνο ως προς την τεχνική μεθοδολογία, αλλά και ως προς το περιεχόμενο, τον τρόπο παρουσίασης και τη φιλοσοφία υπολογισμού. Αυτή η μεθοδολογική ετερογένεια επηρεάζει αρνητικά τη συγκρισιμότητα, τη διαλειτουργικότητα και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, περιορίζοντας την πολιτική τους αξία.

#### 1.3.1 Τύποι αξιολόγησης: Υπολογιστικά μοντέλα (asset rating) vs. πραγματικά δεδομένα (operational rating)

Στην πλειονότητα των κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, τα ΠΕΑ βασίζονται σε υπολογιστικές μεθόδους (asset-based rating), οι οποίες στηρίζονται στα φυσικά χαρακτηριστικά του κτιρίου και σε τυποποιημένες συνθήκες χρήσης. Αυτή η προσέγγιση προωθεί την εναρμόνιση των διαδικασιών και διευκολύνει την εφαρμογή του συστήματος αξιολόγησης. Ωστόσο, έχει διαπιστωθεί ότι η μέθοδος αυτή συχνά δεν αντανακλά με ακρίβεια την πραγματική ενεργειακή

κατανάλωση, καθώς αγνοεί τις πραγματικές συνθήκες χρήσης και συμπεριφοράς των ενοίκων [21]. Εναλλακτικά, προτείνεται η χρήση μεθόδων βασισμένων σε λειτουργικά δεδομένα (operational rating), οι οποίες ενσωματώνουν μετρημένη κατανάλωση ενέργειας, διορθωμένη για εξωτερικές συνθήκες και κανονικοποιημένη χρήση, προσφέροντας υψηλότερη αξιοπιστία όσον αφορά την πραγματική ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων. Η εφαρμογή αυτών των μεθόδων, ωστόσο, προϋποθέτει την ύπαρξη συστημάτων καταγραφής και παρακολούθησης, όπως οι έξυπνοι μετρητές, και επαρκή ποιότητα και διαθεσιμότητα δεδομένων.

### 1.3.2 Σύγκριση μέσω πρότυπου κτιρίου ή απόλυτων τιμών

Μια δεύτερη σημαντική διαφοροποίηση αφορά τον τρόπο αποτίμησης της ενεργειακής απόδοσης:

- Σε χώρες όπως η Ιταλία, η Ελλάδα και η Κύπρος, η ενεργειακή απόδοση του κτιρίου συγκρίνεται με ένα θεωρητικό «πρότυπο» κτίριο (reference building) με όμοια γεωμετρικά και κλιματικά χαρακτηριστικά αλλά καθορισμένα ενεργειακά πρότυπα.[22][23][24]
- Αντίθετα, σε χώρες όπως η Αυστρία, η Ισπανία και το Βέλγιο, χρησιμοποιείται η μέθοδος των απολύτων τιμών, δηλαδή η κατανάλωση εκφράζεται άμεσα σε kWh/m<sup>2</sup>/έτος, χωρίς συγκριτικό υπόβαθρο.[25][26][27]

Η πρώτη μέθοδος επιτρέπει σχετική αξιολόγηση και λαμβάνει υπόψη το τοπικό πλαίσιο, όμως μπορεί να οδηγήσει σε τεχνητά θετικά αποτελέσματα, ιδίως αν το πρότυπο κτίριο δεν είναι επαρκώς βελτιστοποιημένο. Η δεύτερη μέθοδος, αν και λιγότερο ευέλικτη, προάγει την αντικειμενικότητα και επιτρέπει τη διακρατική συγκρισιμότητα των δεδομένων [28].

### 1.3.3 Εθνικά παραδείγματα μεθοδολογικής εφαρμογής

- Ιταλία: Ακολουθεί asset-based προσέγγιση βάσει του προτύπου UNI/TS 11300. Η χρήση εθνικού reference building είναι διαδεδομένη, όμως έχει ασκηθεί κριτική ότι το θεωρητικό κτίριο είναι ενεργοβόρο, γεγονός που οδηγεί σε υποτίμηση της πραγματικής κατανάλωσης [22].
- Κύπρος: Το Εθνικό Λογισμικό Ενεργειακής Απόδοσης (Cyprus EE Software) στηρίζεται στην ευρωπαϊκή οδηγία και εφαρμόζει asset-based προσέγγιση με αναφορά σε Κτίριο Αναφοράς. Παράλληλα, σε νέα έργα A+ κατηγορίας, ενσωματώνει απαιτήσεις που ενθαρρύνεται η χρήση προχωρημένων δυναμικών προσεγγίσεων (π.χ. ISO 52016-1), ιδιαίτερα για έργα Nearly Zero Energy Buildings (NZEB) [24].
- Ισπανία: Το λογισμικό CALENER επιτρέπει τόσο asset όσο και operational υπολογισμούς. Σε δημόσια κτίρια εφαρμόζεται υποχρεωτικά η μέτρηση πραγματικής κατανάλωσης. Το CE3X, νεότερο εργαλείο, ενσωματώνει δυναμικά δεδομένα και θεωρείται πιο αξιόπιστο [26].

- Αυστρία: Προβλέπεται συνδυασμός μεθόδων για δημόσια ή μεγάλα κτίρια, με έμφαση στην αποτύπωση απολύτων τιμών και την ευθυγράμμιση με το EN ISO 52000-1 [25].
- Σουηδία: Η μεθοδολογία βασίζεται σε μετρημένη κατανάλωση, διορθωμένη για εξωτερικές θερμοκρασίες και τύπο χρήσης. Αν και προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια, η συγκρισιμότητα μεταξύ χρήσεων παραμένει πρόκληση [29].
- Ολλανδία: Το ΠΕΑ είναι πλήρως ψηφιακό μέσω της πλατφόρμας EP-online. Υποχρεωτικά βασίζεται σε πραγματικά δεδομένα για νέα και ανακαινισμένα κτίρια, ενώ ενσωματώνει εργαλεία τεχνητής νοημοσύνης (AI) και μηχανισμούς αυτόματου ελέγχου ποιότητας [30].
- Βέλγιο: Ακολουθεί διαφοροποιημένη προσέγγιση ανά Περιφέρεια (Φλάνδρα, Βρυξέλλες, Βαλλωνία), με κοινό πλαίσιο βασισμένο στο EPB (Energy Performance of Buildings) framework. Το EPB-Software υποστηρίζει asset-based υπολογισμούς, με αυστηρές απαιτήσεις για την ακρίβεια των δεδομένων εισόδου. Σε έργα υψηλής κατηγορίας επιτρέπεται επίσης η χρήση δυναμικών εργαλείων (π.χ. TRNSYS, DesignBuilder), ειδικά όταν απαιτούνται λεπτομερείς αναλύσεις συμπεριφοράς [27].

#### 1.3.4 Επιπτώσεις της μεθοδολογικής ασυμβατότητας

Η έλλειψη εναρμονισμένων μεθοδολογιών στην έκδοση ΠΕΑ μεταξύ των κρατών-μελών της ΕΕ δημιουργεί σημαντικά εμπόδια τόσο σε επίπεδο πολιτικής όσο και αγοράς. Η απουσία κοινών προτύπων καθιστά δύσκολη τη σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων μεταξύ διαφορετικών χωρών, υπονομεύοντας τη διαφάνεια στην αγορά ακινήτων και περιορίζοντας τη δυνατότητα συγκέντρωσης συνεκτικών στατιστικών για τη χάραξη ενιαίας στρατηγικής από την ΕΕ.

Μια συγκριτική μελέτη ανέδειξε ότι η εφαρμογή διαφορετικών εθνικών συστημάτων ΠΕΑ σε ίδια κτίρια μπορεί να οδηγήσει σε αποκλίσεις έως και 40% στην τελική ενεργειακή κατάταξη. Η μελέτη αυτή υπογραμμίζει την ανάγκη για αυστηρότερες αξιολογήσεις και εναρμονισμένες μεθοδολογίες ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των ΠΕΑ [13].

Συνολικά, η μεθοδολογική ασυμβατότητα στα ΠΕΑ περιορίζει την αποτελεσματικότητα των πολιτικών ενεργειακής απόδοσης και αναδεικνύει την ανάγκη για εναρμονισμένες και διαφανείς προσεγγίσεις σε ευρωπαϊκό επίπεδο.

#### 1.3.5 Εξελίξεις και εναρμονιστικές πρωτοβουλίες

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, αναγνωρίζοντας τις προκλήσεις που προκύπτουν από την ασυμβατότητα των μεθοδολογιών ΠΕΑ μεταξύ των κρατών-μελών, έχει δρομολογήσει σειρά πρωτοβουλιών για την ενίσχυση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας τους. Η αναθεωρημένη Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (EPBD) του 2024 θέτει το πλαίσιο για την ψηφιοποίηση και την εναρμόνιση των ΠΕΑ, ενσωματώνοντας τεχνολογίες όπως οι Δείκτες Έξυπνης Ετοιμότητας (SRI)

και τα Ψηφιακά Ημερολόγια Κτιρίων, καθώς και την ευθυγράμμιση με τα πρότυπα EN ISO 52000-1 και EN ISO 52016-1. Παράλληλα, έργα όπως το X-tendo, χρηματοδοτούμενο από το πρόγραμμα Horizon 2020, έχουν αναπτύξει καινοτόμα χαρακτηριστικά για τα ΠΕΑ, προωθώντας την αξιοπιστία και τη χρηστικότητα τους [31].

Οι πρωτοβουλίες αυτές σηματοδοτούν τη μετάβαση προς μια νέα εποχή στην ενεργειακή πιστοποίηση των κτιρίων, με στόχο την επίτευξη ενός πλήρως απανθρακοποιημένου κτιριακού αποθέματος έως το 2050. Στο επόμενο μέρος της ανάλυσης, εξετάζονται οι τρόποι με τους οποίους η Ευρωπαϊκή Ένωση επιχειρεί να ενισχύσει την αξιοπιστία και τη λειτουργικότητα των ΠΕΑ, μέσα από στοχευμένες παρεμβάσεις και καινοτόμες πολιτικές.

## 1.4 Πρωτοβουλίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Ενίσχυση της Ακρίβειας και της Δυναμικότητας των Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει αναγνωρίσει ότι τα ΠΕΑ αποτελούν ένα θεμελιώδες εργαλείο ενεργειακής πολιτικής, ικανό να υποστηρίξει την αναβάθμιση του κτιριακού αποθέματος και να επιταχύνει την επίτευξη των στόχων που απορρέουν από την Πράσινη Συμφωνία και τον Ευρωπαϊκό Κλιματικό Νόμο. Παρά τη μέχρι σήμερα συμβολή τους, οι περιορισμοί των υφιστάμενων ΠΕΑ ως προς την ακρίβεια, την αξιοπιστία και τη λειτουργικότητά τους, καθιστούν επιτακτική την αναμόρφωση τόσο των μεθόδων υπολογισμού όσο και του θεσμικού πλαισίου που τα διέπει.

Η πλέον πρόσφατη θεσμική τομή είναι η αναθεωρημένη Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (EPBD – EU/2024/1275), η οποία τέθηκε σε ισχύ τον Μάιο του 2024 και προβλέπει ένα εκτεταμένο φάσμα μεταρρυθμίσεων. Οι μεταρρυθμίσεις αυτές επικεντρώνονται στην αύξηση του ρυθμού των ανακαινίσεων, στη βελτίωση της ποιότητας των ενεργειακών πιστοποιητικών μέσω αυστηρότερων επιθεωρήσεων και ελέγχων, και τέλος, στην ψηφιοποίηση των δεδομένων ενεργειακής απόδοσης [32]. Σημαντική καινοτομία αποτελεί η πρόβλεψη για την υιοθέτηση ενιαίας ενεργειακής κλίμακας (A–G) σε όλα τα κράτη-μέλη, καθώς και η σύσταση εθνικών μητρώων ψηφιακών ΠΕΑ που θα τροφοδοτούν κοινές ευρωπαϊκές βάσεις δεδομένων και θα ενισχύουν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των εθνικών συστημάτων [11].

Ένα από τα βασικά σημεία παρέμβασης της νέας Οδηγίας είναι η εισαγωγή των δυναμικών ΠΕΑ, τα οποία διαφέρουν ριζικά από τα στατικά πιστοποιητικά του παρελθόντος. Ενώ τα παραδοσιακά ΠΕΑ βασίζονταν σε προσομοιωτικά μοντέλα και τυπικές παραδοχές λειτουργίας, τα δυναμικά ΠΕΑ αξιοποιούν πραγματικά δεδομένα λειτουργίας που συλλέγονται από έξυπνα συστήματα μέτρησης, αισθητήρες, καθώς και συσκευές Internet of Things (IoT). Επιπλέον, υποστηρίζονται από τεχνολογίες όπως η ανάλυση Big Data και οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης, προκειμένου να παράγουν μια ακριβέστερη, συνεχώς ενημερωμένη εικόνα της πραγματικής ενεργειακής

συμπεριφοράς του κτιρίου. Έτσι, το ΠΕΑ μετατρέπεται από στατική τεχνική δήλωση σε ένα δυναμικό εργαλείο διαχείρισης και πρόβλεψης κατανάλωσης, ενισχύοντας τη δυνατότητα λήψης τεκμηριωμένων αποφάσεων.

Παράλληλα, η ΕΕ αναγνωρίζει ότι η ακρίβεια των ΠΕΑ δεν μπορεί να βελτιωθεί μόνο με τεχνολογικά μέσα, αλλά απαιτεί και ενίσχυση των επιθεωρήσεων, των ελέγχων και της κατάρτισης των ενεργειακών επιθεωρητών. Οι εθνικές αρχές καλούνται να θεσμοθετήσουν συστηματικούς μηχανισμούς auditing, οι οποίοι θα αξιολογούν δειγματοληπτικά την ακρίβεια και τη συνέπεια των εκδοθέντων ΠΕΑ, καθώς και την αξιοπιστία των δεδομένων που περιλαμβάνονται σε αυτά [33]. Η ενσωμάτωση ψηφιακών εργαλείων επαλήθευσης, όπως αυτοματοποιημένες τεχνικές εντοπισμού λαθών (e.g. anomaly detection algorithms), επιτρέπει την εγκαθίδρυση ενός ψηφιακού πλαισίου διασφάλισης ποιότητας, που μπορεί να λειτουργήσει προληπτικά και διορθωτικά [34].

Η μετάβαση προς ακριβέστερα, διαλειτουργικά και δυναμικά ΠΕΑ απαιτεί όχι μόνο θεσμικές αλλαγές, αλλά και εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογικών λύσεων σε πραγματικές συνθήκες. Στο πλαίσιο λοιπόν αυτό, η Ευρωπαϊκή Ένωση χρηματοδοτεί σειρά ερευνητικών και πιλοτικών έργων που στοχεύουν στην πρακτική δοκιμή και εφαρμογή νέων εργαλείων, διαδικασιών και προτύπων. Ενδεικτικά, τα έργα LIFE22-CET-iEPB και TIMEPAC αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα ευρωπαϊκής πρωτοβουλίας για την αναβάθμιση του συστήματος ενεργειακής πιστοποίησης των κτιρίων, μέσα από τη βελτίωση της τεχνικής υποδομής, της ακρίβειας και της διασύνδεσης με άλλα συστήματα πληροφόρησης.

Πιο συγκεκριμένα, το έργο LIFE22-CET-iEPB στοχεύει στην ενίσχυση της εναρμονισμένης εφαρμογής της EPBD μέσω της ολοκλήρωσης διαφορετικών αξιολογήσεων ενεργειακής απόδοσης, όπως τα ΠΕΑ και οι Δείκτες Έξυπνης Ετοιμότητας (SRI). Αναπτύσσει ένα κοινό και διαλειτουργικό μοντέλο δεδομένων για τις αξιολογήσεις EPB, το οποίο ενσωματώνεται σε ενοποιημένα εργαλεία επαλήθευσης, επιτρέποντας τον έλεγχο της συμμόρφωσης με τεχνικά πρότυπα όπως το EN ISO 52000 και το ISO 50001. Οι πιλοτικές εφαρμογές του έργου υλοποιούνται σε κράτη-μέλη όπως η Ισπανία, η Πορτογαλία και η Γερμανία [35].

Έπειτα, χρηματοδοτούμενο από το Horizon 2020, το έργο TIMEPAC προτείνει τη μετάβαση από στατικά προς δυναμικά ΠΕΑ, προσαρμοσμένα στην πραγματική χρήση των κτιρίων. Εστιάζει στην ανάπτυξη ψηφιακών μεθόδων συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, με στόχο τη σύνδεση των ΠΕΑ με συστήματα Building Information Modeling (BIM) και άλλες βάσεις δεδομένων. Πραγματοποιεί πιλοτικές εφαρμογές σε πέντε ευρωπαϊκές χώρες, προωθώντας βελτιωμένα σχήματα πιστοποίησης με μεγαλύτερη ακρίβεια και λειτουργική αξία [36].

Η ψηφιακή μετάβαση των ΠΕΑ συνοδεύεται από τη δημιουργία εθνικών και πανευρωπαϊκών μητρώων ενεργειακής απόδοσης, τα οποία συλλέγουν, διαχειρίζονται και διασυνδέουν δεδομένα με άλλες πλατφόρμες. Οι πλατφόρμες αυτές περιλαμβάνουν δείκτες «έξυπνης» ετοιμότητας (Smart Readiness Indicators), ψηφιακά ημερολόγια κτιρίων (Digital Building Logbooks), καθώς

και το EU Building Stock Observatory. Η διαλειτουργικότητα αυτών των συστημάτων διευκολύνει την ανάλυση της ενεργειακής κατανάλωσης σε εθνική και ευρωπαϊκή κλίμακα και ενισχύει τη λογοδοσία και τη διαφάνεια της ενεργειακής πολιτικής [37][38][39].

Η BUILD UP Platform τονίζει ιδιαίτερα τη σημασία της ενοποιημένης παρουσίας δεδομένων και της ανοιχτής προσβασιμότητας, ώστε να ενισχυθεί η ενεργειακή συνείδηση του καταναλωτή, να διευκολυνθεί η σύγκριση ανάμεσα σε διαφορετικά ακίνητα και να ενισχυθούν τα εργαλεία πολιτικής παρέμβασης [40]. Η ίδια η Επιτροπή, με τη στρατηγική Repower EU, θέτει ως ρητό στόχο την ανακαίνιση τουλάχιστον 35 εκατομμυρίων κτιρίων έως το 2050, επισημαίνοντας ότι η επιτυχής εφαρμογή του σχεδίου προϋποθέτει αξιόπιστα, επικαιροποιημένα και διαλειτουργικά ΠΕΑ [41].

Η προσέγγιση της ΕΕ δεν περιορίζεται, τέλος, μόνο στην τεχνική βελτίωση. Υπάρχει πλέον σαφής πολιτική σύνδεση των ΠΕΑ με τους δείκτες ESG (Environmental, Social, Governance), οι οποίοι υιοθετούνται στην πράσινη χρηματοδότηση και την ευρωπαϊκή ταξινόμια βιωσιμότητας (EU Taxonomy). Έτσι, η ακρίβεια των ΠΕΑ αποκτά πλέον χρηματοπιστωτική διάσταση, επηρεάζοντας άμεσα την αξία, την επιλεξιμότητα και την πρόσβαση των ακινήτων σε κεφάλαια και επενδύσεις [12].

Συνολικά, οι πρόσφατες πρωτοβουλίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ενίσχυση της ακρίβειας και της δυναμικότητας των ΠΕΑ αντανakλούν μια μετατόπιση από μια προσέγγιση απλής τεχνικής συμμόρφωσης προς ένα ψηφιακό, συμμετοχικό και διαλειτουργικό σύστημα παρακολούθησης και παρέμβασης, ικανό να στηρίζει την πράσινη μετάβαση του κτιριακού αποθέματος με αποδεικτικά, ποσοτικά και επαληθεύσιμα μέσα.

## 1.5 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στο ευρύτερο επιστημονικό και τεχνοπολιτικό πλαίσιο που διαμορφώνεται γύρω από την ανάγκη για ακριβή, τεκμηριωμένα και διαλειτουργικά ΠΕΑ. Όπως καταδείχθηκε στις προηγούμενες ενότητες, η ενεργειακή αποδοτικότητα αποτελεί βασικό πυλώνα της Πράσινης Συμφωνίας και των ευρωπαϊκών πολιτικών βιωσιμότητας, ενώ τα ΠΕΑ εξελίσσονται σε κρίσιμα εργαλεία τόσο για τη χάραξη πολιτικής όσο και για τις αγορές ενέργειας και ακινήτων.

Ωστόσο, οι σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικής και πραγματικής κατανάλωσης, η ανομοιογένεια των εθνικών μεθοδολογιών και η περιορισμένη δυνατότητα διαλειτουργικότητας υπονομεύουν την αξιοπιστία των σημερινών ΠΕΑ, περιορίζοντας τη χρησιμότητά τους για τελικούς χρήστες και ρυθμιστικές αρχές. Οι πρόσφατες ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες, όπως η αναθεωρημένη EPBD (2024), δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στην εναρμόνιση των προτύπων, την ψηφιοποίηση των δεδομένων, και την ενσωμάτωση πραγματικών μετρήσεων για τη δημιουργία δυναμικών, ακριβέστερων και επικαιροποιημένων ΠΕΑ.

Ανταποκρινόμενη σε αυτό το τεχνο-θεσμικό περιβάλλον, η παρούσα εργασία θέτει ως κεντρικό της στόχο τη μελέτη της εφαρμοσιμότητας του διεθνούς προτύπου ISO 52016-1:2017 στην Ελλάδα, με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας και της τυποποίησης των ΠΕΑ[42].

Πιο συγκεκριμένα, η εργασία επιδιώκει να:

- Εφαρμόσει το πρότυπο ISO 52016-1:2017 σε επιλεγμένα κτίρια κατοικιών, με στόχο να υπολογίσει την ετήσια και μηνιαία ενεργειακή τους κατανάλωση και να συγκρίνει τα αποτελέσματα αυτά με εκείνα που προκύπτουν από την τρέχουσα ελληνική μεθοδολογία (KENAK).
- Αναλύσει τις αποκλίσεις στις υπολογιζόμενες τιμές κατανάλωσης, εντοπίζοντας ποσοτικά σε ποια σημεία «χάνει» ή υποεκτιμά η μία προσέγγιση έναντι της άλλης, τόσο ως προς τη συνολική κατανάλωση όσο και ως προς τις επιμέρους χρήσεις (θέρμανση, ψύξη, ZNX, φωτισμός).
- Εκτιμήσει την ακρίβεια και τη ρεαλιστικότητα των υπολογισμών με βάση τις παραδοχές χρήσης, τα χαρακτηριστικά των θερμικών ζωνών και τα πραγματικά προγράμματα κατοίκησης, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες του ISO για μια πιο λεπτομερή προσομοίωση.
- Αναδείξει πώς η χρήση του ISO 52016-1 μπορεί να διευκολύνει τις ενεργειακές επιθεωρήσεις και την καθημερινή μελετητική πρακτική, μέσω της αξιοποίησης κατάλληλων λογισμικών εφαρμογών που επιτρέπουν ευέλικτη χρήση του προτύπου με περιορισμένο αριθμό απαιτούμενων δεδομένων εισόδου, καθιστώντας το ένα πρακτικά εφαρμόσιμο εργαλείο.
- Τέλος, να εξετάσει τη δυνητική προσαρμογή του ISO 52016-1 στο ελληνικό θεσμικό και τεχνικό πλαίσιο, διατυπώνοντας προτάσεις για την ενίσχυση και τη βελτίωση της εθνικής μεθοδολογίας προς μία πιο δυναμική και ρεαλιστική προσέγγιση της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων.

Για τη μεθοδολογική υλοποίηση του στόχου, αξιοποιείται το εξειδικευμένο λογισμικό pyBuildingenergy, μια πλατφόρμα ανοικτού κώδικα σε περιβάλλον Python, η οποία υλοποιεί τους υπολογισμούς του ISO 52016[43]. Το λογισμικό επιτρέπει την παραμετρική ανάλυση μεταβλητών όπως το κτιριακό κέλυφος, οι θερμικές απώλειες, οι ώρες χρήσης και τα συστήματα HVAC, με υψηλό βαθμό λεπτομέρειας.

Η εργασία θα αξιοποιήσει το εργαλείο αυτό όχι μόνο ως πλατφόρμα τεχνικής σύγκρισης, αλλά και ως υπόδειγμα για ένα μελλοντικό, φιλικό προς τον χρήστη λογισμικό, το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρύτερα, για παράδειγμα, από μελετητές, επιθεωρητές ή και πολίτες που

επιθυμούν μια πιο ρεαλιστική και τεκμηριωμένη εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης της κατοικίας τους, πριν την έκδοση ενός επίσημου ΠΕΑ.

Μακροπρόθεσμα, η διερεύνηση της ενσωμάτωσης του ISO 52016 σε μια λειτουργική εφαρμογή για το ελληνικό πλαίσιο θα μπορούσε να ενισχύσει τη διαφάνεια, την εμπιστοσύνη και την ακρίβεια του συστήματος ΠΕΑ, με χαμηλό κόστος και ευρεία εφαρμοσιμότητα.

Τελικός στόχος της εργασίας είναι να προσφέρει επιστημονικά τεκμηριωμένες προτάσεις για την εναρμόνιση του ελληνικού συστήματος ενεργειακής αποτίμησης με τα διεθνή πρότυπα, και να συμβάλει στον μετασχηματισμό των ΠΕΑ από στατικά ρυθμιστικά έγγραφα σε δυναμικά, αξιόπιστα και διαδραστικά εργαλεία ενεργειακής στρατηγικής.

## Κεφάλαιο 2: KENAK και ISO – Ελληνικό και Διεθνές Πλαίσιο Ενεργειακής Αποδοτικότητας

### 2.1 Ο KENAK: Σύντομη Περιγραφή και Μεθοδολογική Προσέγγιση

#### 2.1.1. Εισαγωγή και Ιστορικό Πλαίσιο

Ο Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK) αποτελεί το βασικό θεσμικό εργαλείο της χώρας για την ενίσχυση της ενεργειακής αποδοτικότητας στον κτιριακό τομέα. Εισήχθη για πρώτη φορά το 2010 (ΦΕΚ 407/Β/2010) και σηματοδότησε μια σημαντική στροφή στην εγχώρια πολεοδομική και τεχνική νομοθεσία, εναρμονίζοντας την Ελλάδα με τις απαιτήσεις του ευρωπαϊκού πλαισίου. Πιο συγκεκριμένα, ο KENAK τέθηκε σε εφαρμογή στο πλαίσιο συμμόρφωσης με την Οδηγία 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και Συμβουλίου, η οποία προώθησε μια νέα αντίληψη για τον ρόλο των κτιρίων στην ενεργειακή μετάβαση[1][23][44]. Η οδηγία αυτή, που ήρθε να αναθεωρήσει την αρχική 2002/91/ΕΚ, έθεσε πιο φιλόδοξους στόχους για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, εισάγοντας την έννοια των σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας κτιρίων (Nearly Zero Energy Buildings – NZEB) και υποχρεώνοντας τα κράτη-μέλη να θεσπίσουν συγκεκριμένα μέτρα και στρατηγικές, όχι μόνο για τα νέα, αλλά και για τα ήδη υπάρχοντα κτίρια.

Στην Ελλάδα, ο KENAK αποτέλεσε τη βασική απάντηση σε αυτήν την ευρωπαϊκή πρόκληση. Για πρώτη φορά, εισήχθησαν υποχρεωτικά πρότυπα ενεργειακής απόδοσης για κάθε νέο ή ριζικά ανακαινισμένο κτίριο. Ο Κανονισμός καθιέρωσε τον θεσμό του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ), εισήγαγε την απαίτηση εκπόνησης ενεργειακής μελέτης κατά την έκδοση οικοδομικής άδειας, και καθόρισε ελάχιστα επίπεδα απόδοσης τόσο για τα τεχνικά συστήματα (όπως η θέρμανση, η ψύξη και το ζεστό νερό χρήσης), όσο και για τα χαρακτηριστικά του κελύφους των κτιρίων[5][23]. Για τον κατασκευαστικό και τεχνικό κόσμο, η εφαρμογή του KENAK αποτέλεσε σημείο καμπής: η ενεργειακή αποδοτικότητα απέκτησε πλέον μετρήσιμη και συγκρίσιμη αξία, μετατρέποντας τον σχεδιασμό και τη μελέτη των κτιρίων σε μια περισσότερο ολιστική και ποσοτικά τεκμηριωμένη διαδικασία.

Η σημαντικότερη καμπή στην εξέλιξη του Κανονισμού ήρθε το 2017, όταν και πραγματοποιήθηκε η πρώτη ουσιαστική αναθεώρησή του. Αυτή βασίστηκε σε σχετική μελέτη κόστους-αποτελεσματικότητας (cost-optimal study), όπως προβλέπεται στο άρθρο 5 της Οδηγίας 2010/31/ΕΕ. Η μελέτη αυτή αποσκοπούσε στον καθορισμό του επιπέδου ενεργειακής απόδοσης που θα ήταν τεχνικά εφικτό αλλά και οικονομικά συμφέρον για το ελληνικό κλίμα και τις συνθήκες της εγχώριας αγοράς. Τα αποτελέσματά της οδήγησαν στην έκδοση νέας Υπουργικής Απόφασης (ΔΕΠΕΑ/οικ. 178581 – ΦΕΚ Β' 2367/12.07.2017), η οποία τροποποίησε ουσιαστικά το κανονιστικό πλαίσιο, αυξάνοντας τις απαιτήσεις και ενισχύοντας τον ρόλο του KENAK ως εργαλείου διαχείρισης της ενεργειακής απόδοσης[20]. Παράλληλα, το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας επικαιροποίησε τις σχετικές τεχνικές οδηγίες (TOTEE 20701-1/2017), ώστε να

συμβαδίζουν με τη νέα πραγματικότητα, και ενσωματώθηκαν στο λογισμικό TEE-KENAK που χρησιμοποιείται ευρέως στην πράξη[5][44].

Στο πλαίσιο αυτό, ο επικαιροποιημένος Κανονισμός έφερε μια σειρά από ουσιαστικές αλλαγές. Θεσμοθετήθηκαν αυστηρότερα όρια θερμοπερατότητας (U-values) για όλα τα στοιχεία του κελύφους, καθιερώθηκε η υποχρεωτική εκπόνηση μελέτης σκοπιμότητας για χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενώ τέθηκε ως προϋπόθεση η κάλυψη τουλάχιστον 60% των αναγκών σε ζεστό νερό χρήσης μέσω ηλιακών ή άλλων ισοδύναμων συστημάτων ΑΠΕ. Πολύ σημαντική ήταν επίσης η τυπική ενσωμάτωση της έννοιας του NZEB, με ρητό χρονοδιάγραμμα: από την 1η Ιανουαρίου 2019 όλα τα νέα δημόσια κτίρια, και από την 1η Ιανουαρίου 2021 όλα τα νέα κτίρια ανεξαρτήτως χρήσης, θα πρέπει να πληρούν τα ελάχιστα χαρακτηριστικά ενεργειακής απόδοσης για να χαρακτηριστούν ως σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας. Για τα ελληνικά δεδομένα, αυτό μεταφράζεται στην υποχρέωση κατάταξης στην ενεργειακή κατηγορία τουλάχιστον Α για τα νέα κτίρια και B+ για τα υφιστάμενα, σύμφωνα με την Υπουργική Απόφαση ΥΠΕΝ/ΔΕΠΕΑ/85251/242 (ΦΕΚ Β' 5447/5.12.2018)[45].

Ο KENAK, ωστόσο, δεν αποτελεί ένα απομονωμένο θεσμικό εργαλείο, αλλά μέρος μιας ευρύτερης στρατηγικής που αποτυπώνεται στο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ). Στο πλαίσιο αυτής της στρατηγικής, έχουν τεθεί στόχοι όπως η ανακαίνιση του 12%–15% του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος έως το 2030, αλλά και η σταδιακή μείωση της εξάρτησης του κτιριακού τομέα από τα ορυκτά καύσιμα. Για την επίτευξη αυτών των στόχων, έχουν διαμορφωθεί και υποστηρικτικά εργαλεία πολιτικής, όπως τα χρηματοδοτούμενα προγράμματα «Εξοικονομώ» και «ΗΛΕΚΤΡΑ», τα οποία συνδυάζουν οικονομικά κίνητρα με την απαίτηση συμμόρφωσης στις προδιαγραφές του KENAK.

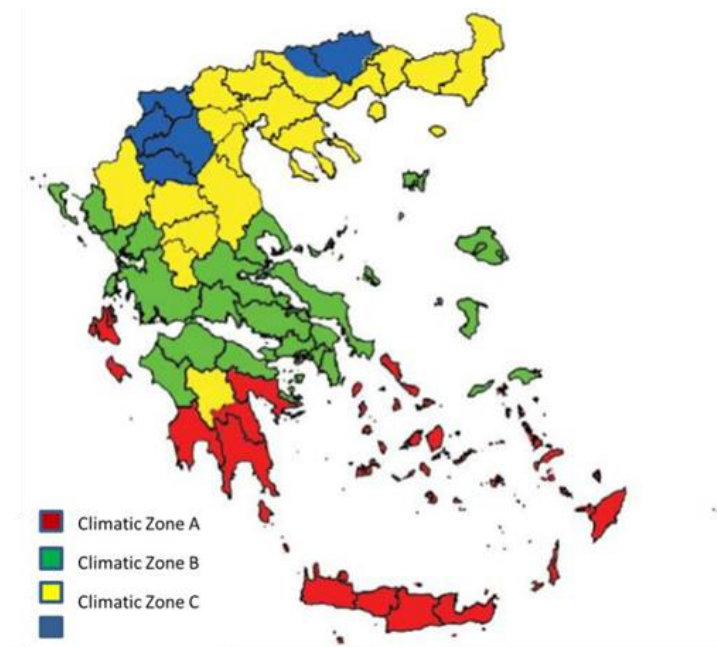
Συνολικά, ο KENAK δεν είναι απλώς ένα τεχνικό κείμενο ή ένα εργαλείο συμμόρφωσης με ευρωπαϊκές οδηγίες. Αντιθέτως, λειτουργεί ως βασικός άξονας της ενεργειακής πολιτικής της χώρας για τον κτιριακό τομέα. Η θεσμική του εξέλιξη και η ενσωμάτωση απαιτήσεων όπως τα NZEB και οι ΑΠΕ αντανακλούν την πρόθεση της Ελλάδας να προσεγγίσει τους στόχους της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας[1][46]. Παρ' όλα αυτά, για να διασφαλιστεί η αποτελεσματικότητα του Κανονισμού, είναι αναγκαίο να συνεχιστεί η τακτική επικαιροποίησή του, να ενσωματωθούν πιο εξελιγμένες τεχνικές προσεγγίσεις και να ενισχυθεί η εφαρμογή του στην πράξη, όχι μόνο μέσω υποχρεώσεων, αλλά και μέσα από κατάλληλη υποστήριξη, κατάρτιση και τεχνική καθοδήγηση.

### 2.1.2. Θεσμική και Μεθοδολογική Βάση του KENAK

Η βασική μεθοδολογική αρχή στην οποία στηρίζεται ο Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK) είναι η σύγκριση της ενεργειακής συμπεριφοράς του εκάστοτε κτιρίου με εκείνη ενός Κτιρίου Αναφοράς (Reference Building). Το Κτίριο Αναφοράς είναι ένα θεωρητικό μοντέλο, σχεδιασμένο έτσι ώστε να έχει ακριβώς τα ίδια γεωμετρικά, χωροταξικά και λειτουργικά

χαρακτηριστικά με το υπό εξέταση κτίριο (δηλαδή ίδια χρήση, κάτοψη, προσανατολισμό και ωράρια λειτουργίας). Ωστόσο, διαφοροποιείται ως προς τις τεχνικές του προδιαγραφές, οι οποίες καθορίζονται από τα ελάχιστα αποδεκτά επίπεδα ενεργειακής απόδοσης που ορίζει ο ΚΕΝΑΚ[5][44]. Με αυτή τη λογική, διασφαλίζεται ότι η αξιολόγηση κάθε κτιρίου πραγματοποιείται με βάση ενιαία και αντικειμενικά κριτήρια, ανεξάρτητα από τις σχεδιαστικές επιλογές ή τεχνολογικές λύσεις που μπορεί να εφαρμόζονται στην πράξη.

Η σύγκριση αυτή στηρίζεται σε τρεις κύριους δείκτες: την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), και την ενεργειακή κατάταξη του κτιρίου, όπως αυτή αποτυπώνεται στο ΠΕΑ. Ο υπολογισμός των δεικτών αυτών γίνεται μέσω μιας μηνιαίας, στατικής μεθοδολογίας που εφαρμόζεται σε όλα τα κτίρια, ώστε να διασφαλίζεται η συμβατότητα με το εθνικό νομικό και το τεχνικό πλαίσιο. Στο πλαίσιο αυτής της προσέγγισης, υιοθετούνται συγκεκριμένες σταθερές παραδοχές για τις εσωτερικές θερμοκρασίες (20°C για τη χειμερινή περίοδο και 26°C για το καλοκαίρι), καθώς και προκαθορισμένα ωράρια λειτουργίας ανάλογα με τον τύπο χρήσης του κτιρίου (π.χ. κατοικία, γραφείο, σχολείο κ.λπ.)[5].



**Εικόνα 2:** Χάρτης της Ελλάδας με τις τέσσερις Κλιματικές Ζώνες (Α, Β, Γ, Δ) σύμφωνα με τον ΚΕΝΑΚ και την Τεχνική Οδηγία TOTEE 20701-1

Επιπλέον, οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται βάσει τυποποιημένων κλιματικών δεδομένων, σύμφωνα με τη γεωγραφική κατάταξη της Ελλάδας σε τέσσερις Κλιματικές Ζώνες (Α, Β, Γ και Δ), όπως καθορίζονται στον ΚΕΝΑΚ και στην Τεχνική Οδηγία TOTEE 20701-1. Για κάθε κλιματική ζώνη ισχύουν διαφορετικά ανώτατα όρια θερμικής διαπερατότητας (U-values) για τα διάφορα στοιχεία του κελύφους, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η προσαρμογή των απαιτήσεων στις εκάστοτε κλιματικές συνθήκες. Τα συστήματα του κτιρίου που αφορούν τη θέρμανση, την ψύξη και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης προσεγγίζονται μέσω απλουστευμένων υπολογιστικών

μοντέλων, τα οποία βασίζονται σε προκαθορισμένους βαθμούς απόδοσης, όπως αυτοί περιγράφονται στις σχετικές Τεχνικές Οδηγίες[5].

Η υλοποίηση αυτής της μεθοδολογίας στην πράξη πραγματοποιείται μέσω του επίσημου λογισμικού TEE-KENAK, το οποίο ενσωματώνει πλήρως τις προδιαγραφές της ισχύουσας νομοθεσίας, καθώς και τις τεχνικές παραμέτρους που ορίζονται από τις Τεχνικές Οδηγίες του TEE (και ειδικότερα τις TOTEE 20701-1 έως 20701-4). Το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής όλων των γεωμετρικών, θερμικών και λειτουργικών δεδομένων του κτιρίου που αξιολογείται, και προσομοιώνει την ενεργειακή του συμπεριφορά σε μηνιαία βάση, προσφέροντας ως τελικό αποτέλεσμα τις ετήσιες και ειδικές ενεργειακές καταναλώσεις για κάθε επιμέρους χρήση ενέργειας.

Παρόλο που η παραπάνω μεθοδολογία έχει το πλεονέκτημα ότι επιτρέπει την ευρεία και συνεπή εφαρμογή του Κανονισμού σε διαφορετικούς τύπους κτιρίων, ενσωματώνει ορισμένους εγγενείς περιορισμούς. Ειδικότερα, δεν αξιοποιεί δυναμικές μεθόδους προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου και δεν παρέχει τη δυνατότητα λεπτομερούς μοντελοποίησης προηγμένων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας και αυτοματισμών. Ωστόσο, τα παραπάνω θέματα, όπως επίσης και οι παραδοχές, τα εισερχόμενα και εξερχόμενα δεδομένα του υπολογιστικού μοντέλου, καθώς και η ακριβής λειτουργία του Κτιρίου Αναφοράς, θα αναλυθούν εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο, με στόχο την πληρέστερη κατανόηση της υπολογιστικής διαδικασίας και των παραμέτρων που επηρεάζουν το τελικό ενεργειακό αποτέλεσμα.

## 2.2 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί της Μεθοδολογίας KENAK

Η μεθοδολογία του KENAK, όπως εφαρμόζεται σήμερα στην Ελλάδα, έχει διαμορφώσει ένα σταθερό και αναγνωρίσιμο πλαίσιο για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Βασισμένη σε στατικές, μηνιαίες προσεγγίσεις, παρέχει μια εργαλειοθήκη που έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα πρακτική και λειτουργική για τις ανάγκες του κανονιστικού ελέγχου και της ευρείας εφαρμογής.

Η μεθοδολογία αυτή έχει ορισμένα χαρακτηριστικά που συνέβαλαν καθοριστικά στην αποδοχή και τη χρήση της από τον τεχνικό κόσμο της χώρας.

### 2.2.1 Πλεονεκτήματα της Μεθοδολογίας

#### Απλότητα και ταχύτητα εφαρμογής

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της προσέγγισης του KENAK είναι η απλότητα και η ταχύτητα με την οποία μπορεί να εφαρμοστεί. Η στατική, μηνιαία μέθοδος υπολογισμού που υιοθετείται αποφεύγει την πολυπλοκότητα των δυναμικών, ωριαίων μοντέλων. Οι υπολογισμοί βασίζονται σε μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας, προκαθορισμένα ωράρια λειτουργίας και τυποποιημένες

συνθήκες, χωρίς την ανάγκη για πολύπλοκη παραμετροποίηση ή εισαγωγή λεπτομερών χρονικών δεδομένων[5][44].

Αυτό καθιστά τη διαδικασία πιο εύκολη και άμεση για τους μηχανικούς και τους μελετητές, ακόμη και για εκείνους που δεν έχουν εξειδίκευση στη δυναμική προσομοίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων. Η δυνατότητα γρήγορης εκπόνησης μελετών αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμη για πρακτικές ανάγκες, όπως η έκδοση Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ), η προετοιμασία φακέλων για προγράμματα χρηματοδότησης όπως το «Εξοικονομώ – Αυτονομώ», ή η αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων κατά τη φάση σχεδιασμού ή ανακαίνισης[44][45].

Επιπλέον, η απουσία απαίτησης για εξειδικευμένα λογισμικά δυναμικής προσομοίωσης ή πολύπλοκη ανάλυση χρονικών δεδομένων καθιστά τον KENAK ένα προσβάσιμο εργαλείο σε ένα ευρύ φάσμα επαγγελματιών του χώρου, προωθώντας έτσι τη μαζικότερη εφαρμογή της ενεργειακής αξιολόγησης στο ελληνικό κτιριακό απόθεμα.

#### Συγκρισιμότητα αποτελεσμάτων και θεσμική ενσωμάτωση

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα του KENAK είναι η δυνατότητα σύγκρισης αποτελεσμάτων ανάμεσα σε διαφορετικά κτίρια ή ανάμεσα σε εναλλακτικά σενάρια επεμβάσεων στο ίδιο κτίριο. Το μοντέλο του Κτιρίου Αναφοράς, με τις αυστηρά καθορισμένες παραμέτρους του (όσον αφορά τα θερμικά χαρακτηριστικά, τα συστήματα HVAC και τις συνθήκες λειτουργίας), παρέχει ένα ενιαίο σημείο αναφοράς για όλες τις αξιολογήσεις.

Αυτό επιτρέπει την αντικειμενική σύγκριση των εξεταζόμενων λύσεων σε σχέση με έναν κοινά αποδεκτό μέσο όρο, αποφεύγοντας έτσι την αυθαιρεσία και την έλλειψη διαφάνειας. Μέσω της συγκριτικής αυτής προσέγγισης, η ταξινόμηση των κτιρίων σε ενεργειακές κατηγορίες γίνεται με σαφή και ποσοτικά προσδιορισμένα κριτήρια, βασιζόμενη στον λόγο της πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης του κτιρίου προς εκείνη του Κτιρίου Αναφοράς.

Παράλληλα, η μεθοδολογία του KENAK είναι πλήρως εναρμονισμένη με το ευρωπαϊκό και εθνικό θεσμικό πλαίσιο. Συμμορφώνεται με τις επιταγές της Οδηγίας 2010/31/ΕΕ, που προωθεί τη μετάβαση σε κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας (NZEB), και υποστηρίζει τους στόχους του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), ιδίως στον τομέα της μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στον κτιριακό τομέα[45][46].

Αυτή η θεσμική ενσωμάτωση ενισχύει τη χρηστικότητα του KENAK. Δεν αποτελεί απλώς ένα τεχνικό εργαλείο μελέτης, αλλά και ένα επίσημο μέσο συμμόρφωσης σε πληθώρα ρυθμιστικών και χρηματοδοτικών πλαισίων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η χρήση της ενεργειακής κατηγορίας ενός κτιρίου, όπως αυτή προκύπτει από τους υπολογισμούς του KENAK και αποτυπώνεται στο ΠΕΑ, ως βασικό κριτήριο επιλεξιμότητας για ένταξη σε προγράμματα όπως το «Εξοικονομώ» ή για την έκδοση οικοδομικών αδειών σε περιοχές με αυξημένες περιβαλλοντικές απαιτήσεις.

Συνολικά, ο KENAK δεν είναι απλώς ένα τεχνικό σύστημα αποτίμησης της ενεργειακής απόδοσης, αλλά έχει εδραιωθεί ως βασικό εργαλείο της εθνικής πολιτικής για την ενεργειακή αναβάθμιση του κτιριακού τομέα. Η θεσμική του ενσωμάτωση και η πρακτική του απλότητα καθιστούν το σύστημα ευρέως εφαρμόσιμο και ιδιαίτερα χρήσιμο για σκοπούς κανονιστικής συμμόρφωσης, επιδοτούμενων παρεμβάσεων και στρατηγικού ενεργειακού σχεδιασμού.

Ωστόσο, καθώς οι απαιτήσεις για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων αυξάνονται και οι τεχνολογικές λύσεις γίνονται πιο σύνθετες και εξελιγμένες, αναδεικνύονται ολοένα και περισσότερο τα όρια αυτής της μεθοδολογίας. Παρά τα θετικά της στοιχεία, η στατική και απλουστευμένη φύση του KENAK περιορίζει την ακρίβεια και τη χρηστικότητα των αποτελεσμάτων, ιδίως όταν οι ανάγκες της αγοράς και των μελετητών ξεπερνούν τη βασική κανονιστική συμμόρφωση και στρέφονται προς την ουσιαστική βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης.

Η αναγνώριση αυτών των περιορισμών είναι κομβική για την κατανόηση του πλαισίου μέσα στο οποίο κινείται η παρούσα εργασία. Η ανάγκη για πιο ακριβείς, πιο ρεαλιστικές και τεχνολογικά συμβατές προσεγγίσεις αξιολόγησης της ενεργειακής απόδοσης αποτελεί έναν από τους βασικούς λόγους που η διερεύνηση εναλλακτικών μεθοδολογιών, όπως το δυναμικό πρότυπο ISO 52016-1:2017, αποκτά ιδιαίτερη σημασία[42]. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά οι βασικοί περιορισμοί του KENAK, οι οποίοι δικαιολογούν και ενισχύουν την ανάγκη για μεθοδολογικές βελτιώσεις στο εθνικό σύστημα αποτίμησης.

## 2.2.2 Περιορισμοί της μεθοδολογίας

1. Έλλειψη δυναμικής προσομοίωσης  
Η υπολογιστική προσέγγιση του KENAK βασίζεται σε στατικά μοντέλα, τα οποία στηρίζονται σε μέσες μηνιαίες τιμές για την εξωτερική θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία και τις θερμικές απαιτήσεις του κτιρίου[5]. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή αγνοεί πλήρως τις χρονικές διακυμάνσεις. Δεν πραγματοποιείται καμία ωριαία ή ημερήσια ανάλυση, ούτε λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η θερμική αδράνεια των υλικών, η αποθήκευση θερμότητας ή η διαλείπουσα λειτουργία των συστημάτων. Έτσι, χαρακτηριστικά όπως η επίδραση της θερμικής μάζας ή τα οφέλη του νυχτερινού αερισμού δεν αποτυπώνονται στο τελικό αποτέλεσμα. Αυτό περιορίζει σημαντικά τη δυνατότητα αξιολόγησης τεχνικών λύσεων που στηρίζονται σε σύνθετες χρονικές αλληλεπιδράσεις όπως εξελιγμένα συστήματα HVAC με έξυπνους ελέγχους ή στρατηγικές βιοκλιματικού σχεδιασμού[21][28]. Σε κτίρια με έντονα μεταβαλλόμενα φορτία (π.χ. σχολεία, νοσοκομεία), η χρήση της μεθοδολογίας του KENAK οδηγεί αναπόφευκτα σε υπεραπλουστευμένα και ενίοτε παραπλανητικά αποτελέσματα.

2. Απλουστευμένη αποτύπωση τεχνικών συστημάτων  
Ο τρόπος με τον οποίο ο KENAK αποτυπώνει τις Η/Μ εγκαταστάσεις (λέβητες, αντλίες θερμότητας, ψύκτες κ.ά.) είναι ιδιαίτερα περιοριστικός[5]. Οι βαθμοί απόδοσης των συστημάτων αυτών θεωρούνται σταθεροί και προκαθορισμένοι, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η πραγματική δυναμική τους λειτουργία. Παράγοντες όπως η λειτουργία σε μερικό φορτίο, οι μεταβολές απόδοσης λόγω των εξωτερικών συνθηκών ή οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών εγκαταστάσεων απουσιάζουν από τη μοντελοποίηση. Ως αποτέλεσμα, προηγμένες τεχνολογίες όπως αντιστρεπτές αντλίες θερμότητας inverter, πολυζωνικά συστήματα ή αυτοματισμοί τύπου BMS υποεκτιμώνται ή αγνοούνται εντελώς[21][28]. Το ίδιο ισχύει και για τεχνολογίες όπως η θερμική ανάκτηση, ο νυχτερινός δροσισμός, οι δυναμικές σκιάσεις ή η ενσωμάτωση ΑΠΕ με αποθήκευση ενέργειας. Όλες αυτές οι λύσεις δεν μπορούν να αποτυπωθούν με ρεαλισμό μέσω του KENAK, στερώντας από τον μελετητή τη δυνατότητα αξιολόγησης του πραγματικού τους δυναμικού.
3. Περιορισμένη προσαρμοστικότητα σε πραγματικές συνθήκες χρήσης  
Ένα ακόμη σημαντικό μειονέκτημα του KENAK είναι η αδυναμία προσαρμογής στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του κάθε κτιρίου. Οι βασικές παράμετροι, όπως οι εσωτερικές θερμοκρασίες, τα ωράρια λειτουργίας, τα εσωτερικά κέρδη θερμότητας και οι ρυθμοί αερισμού, καθορίζονται από γενικές τυπολογίες («γραφείο», «κατοικία» κ.λπ.) χωρίς δυνατότητα ευέλικτης προσαρμογής στο προφίλ χρήσης του συγκεκριμένου κτιρίου. Αυτό οδηγεί σε σημαντική απόκλιση από την πραγματική λειτουργία, ιδίως σε κτίρια μεικτής χρήσης (π.χ. καταστήματα με κατοικίες) ή σε χώρους με έντονα μεταβαλλόμενο προφίλ (όπως πολιτιστικά κέντρα, εκθεσιακοί χώροι κ.λπ.). Η χρήση μέσων ή τυποποιημένων παραμέτρων υποβαθμίζει την αξιοπιστία της προσομοίωσης και ενδέχεται να οδηγήσει σε λανθασμένες εκτιμήσεις των ενεργειακών αναγκών[19].
4. Υποεκτίμηση σημαντικών παραμέτρων ενεργειακής συμπεριφοράς  
Η μέθοδος του KENAK αποτυγχάνει να ενσωματώσει επαρκώς την επίδραση κρίσιμων παραμέτρων που επηρεάζουν την ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων. Ειδικότερα, ο φυσικός φωτισμός, τα παθητικά συστήματα και οι δυναμικοί αυτοματισμοί είτε αγνοούνται είτε προσεγγίζονται με πολύ απλοποιημένο τρόπο[28]. Για παράδειγμα, στις κατοικίες δεν υπολογίζεται καθόλου η συμβολή του φυσικού φωτισμού στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης για τεχνητό φωτισμό, ενώ στα κτίρια του τριτογενούς τομέα χρησιμοποιούνται γενικές τιμές που δεν λαμβάνουν υπόψη την ύπαρξη αυτοματισμών ή την εκμετάλλευση του ημερήσιου φωτισμού. Το ίδιο ισχύει για ενεργά σκίαστρα, προγραμματιζόμενα συστήματα ηλιοπροστασίας ή συνδυασμούς φυσικού και μηχανικού αερισμού, η επίδρασή τους στην ενεργειακή απόδοση δεν αποτυπώνεται επαρκώς.

5. Ανεπαρκής για μελέτες υψηλής ακρίβειας ή ερευνητικές εφαρμογές Τέλος, η μεθοδολογία του KENAK δεν μπορεί να καλύψει απαιτήσεις ανάλυσης υψηλής ακρίβειας. Εξειδικευμένα εργαλεία όπως τα EnergyPlus, TRNSYS, IDA ICE ή Modelica προσφέρουν δυνατότητες λεπτομερούς ωριαίας προσομοίωσης, ενσωμάτωσης δυναμικών φορτίων, συστημάτων αποθήκευσης και πολύπλοκων αυτοματισμών, δυνατότητες που το λογισμικό του KENAK δεν διαθέτει [28]. Σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή πιστότητα και ρεαλιστική προσομοίωση (π.χ. ερευνητικά έργα, έργα σχεδιασμού καινοτόμων κτιρίων ή χρηματοδότηση βάσει πραγματικών επιδόσεων), η χρήση του KENAK όχι μόνο δεν επαρκεί, αλλά ενδέχεται να δώσει παραπλανητικά αποτελέσματα.

Οι παραπάνω αδυναμίες καθιστούν σαφές ότι, παρότι ο KENAK είναι ένα αξιόπιστο και θεσμικά εδραιωμένο εργαλείο για σκοπούς πιστοποίησης, δεν αρκεί για τον ολιστικό σχεδιασμό και την τεχνική αξιολόγηση σύνθετων ενεργειακών παρεμβάσεων ή προηγμένων αρχιτεκτονικών λύσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, προκύπτει επιτακτικά η ανάγκη αναφοράς σε πιο εξελιγμένες και δυναμικές μεθοδολογίες που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της σύγχρονης πράσινης μηχανικής και του κτιριακού σχεδιασμού.

Η ανάγκη αυτή έρχεται να καλυφθεί από προσεγγίσεις όπως το πρότυπο ISO 52016-1:2017, το οποίο θα παρουσιαστεί αναλυτικά στην επόμενη ενότητα. Το πρότυπο αυτό εισάγει μια ολοκληρωμένη, δυναμική και ωριαία μεθοδολογία για την αποτίμηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων, αντιμετωπίζοντας άμεσα τα κενά που αφήνει η στατική προσέγγιση του KENAK.

## 2.3 Το Πρότυπο ISO 52016-1:2017

Όπως αναδείχθηκε στην προηγούμενη ανάλυση, παρότι ο KENAK αποτελεί ένα σταθερό και ευέλικτο θεσμικό εργαλείο, η μεθοδολογία του ενσωματώνει σημαντικούς περιορισμούς. Η στατική του φύση, η χρήση μέσων μηνιαίων τιμών και η αδυναμία αποτύπωσης κρίσιμων παραμέτρων, όπως η θερμική αδράνεια και η δυναμική συμπεριφορά των συστημάτων, οδηγούν αναπόφευκτα σε μεθοδολογικά κενά. Σε ένα περιβάλλον όπου οι απαιτήσεις ακρίβειας, παραμετροποίησης και ευελιξίας αυξάνονται συνεχώς, λόγω των εξελίξεων στην τεχνολογία και της ανάγκης για ενεργειακή βελτιστοποίηση, η αναζήτηση για πιο σύγχρονες προσεγγίσεις καθίσταται αναγκαία[13][21].

Ακριβώς αυτό το κενό επιχειρεί να καλύψει το διεθνές πρότυπο ISO 52016-1:2017, το οποίο έχει σχεδιαστεί για να προσφέρει μια ολοκληρωμένη, δυναμική και λεπτομερή μεθοδολογία υπολογισμού των ενεργειακών απαιτήσεων και καταναλώσεων των κτιρίων[42]. Εντασσόμενο στη σειρά προτύπων ISO 52000, το ISO 52016 διαμορφώνει το πλαίσιο για μια νέα γενιά εργαλείων ενεργειακής διαχείρισης, που δίνουν έμφαση στην ακρίβεια, τη συγκρισιμότητα, την

προσαρμοστικότητα και κυρίως στην όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική αποτύπωση της πραγματικής συμπεριφοράς των κτιρίων.

Το ISO 52016-1:2017 αποτελεί προϊόν της προσπάθειας της Διεθνούς Οργάνωσης Τυποποίησης (ISO) για τη δημιουργία μιας επιστημονικά τεκμηριωμένης, ενιαίας μεθοδολογίας αξιολόγησης της ενεργειακής συμπεριφοράς κτιρίων. Σε αντίθεση με στατικές προσεγγίσεις όπως αυτή του KENAK, το ISO 52016-1 στηρίζεται σε δυναμική, ωριαία ανάλυση, επιτρέποντας την αναλυτική καταγραφή της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στο κτίριο, τα ενεργειακά του συστήματα και το εξωτερικό περιβάλλον. Η ανάλυση αυτή παρέχει στους μελετητές μια σαφή εικόνα για το πώς το κτίριο «λειτουργεί» σε πραγματικές συνθήκες, και όχι ως ένα στατικό, θεωρητικό μοντέλο.

Συγκεκριμένα, το πρότυπο βασίζεται σε υπολογιστική ανάλυση 8760 χρονικών βημάτων ανά έτος δηλαδή σε ένα ωριαίο βήμα για κάθε ώρα του χρόνου[42]. Με αυτή τη λεπτομέρεια, οι θερμικές και ενεργειακές ροές στο κτίριο αποτυπώνονται δυναμικά, αποδίδοντας ένα ακριβές προφίλ της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου. Με άλλα λόγια, το κτίριο αντιμετωπίζεται ως ένα ζωντανό, εξελισσόμενο σύστημα, το οποίο αντιδρά στις συνεχείς μεταβολές των εξωτερικών και εσωτερικών συνθηκών.

Στην «καρδιά» του προτύπου βρίσκεται η ωριαία εξίσωση ενεργειακής ισορροπίας για κάθε θερμική ζώνη του κτιρίου. Για κάθε ώρα του χρόνου και για κάθε ζώνη, υπολογίζονται όλες οι θερμικές ροές εισερχόμενες και εξερχόμενες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία και τις ενεργειακές ανάγκες του χώρου:

- Η αγωγιμότητα μέσω του κελύφους του κτιρίου (τοίχοι, οροφές, δάπεδα, ανοίγματα),
- Τα θερμικά φορτία από ηλιακή ακτινοβολία (άμεση και διάχυτη),
- Τα εσωτερικά κέρδη από ανθρώπους, φωτισμό και ηλεκτρικές συσκευές,
- Οι θερμικές απώλειες ή κέρδη από αερισμό ή ακούσια διείσδυση αέρα, με ή χωρίς ανάκτηση θερμότητας,
- Η αποθήκευση ή εκπομπή ενέργειας μέσω της θερμικής μάζας των δομικών στοιχείων.

Μια από τις μεγαλύτερες καινοτομίες του προτύπου είναι η ευελιξία που προσφέρει στη μοντελοποίηση των συστημάτων HVAC. Το ISO 52016-1 επιτρέπει στον μελετητή να προσομοιώσει τη λειτουργία αυτών των συστημάτων με βάση πραγματικά ωράρια λειτουργίας, δυναμικές συνθήκες φόρτισης και αποδόσεις που μεταβάλλονται σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, προσφέρει δυνατότητες για την προσομοίωση στρατηγικών ελέγχου όπως έξυπνοι θερμοστάτες, ελεύθερη ψύξη ή προηγμένα συστήματα αντιστάθμισης[42]. Με τον τρόπο αυτό, το πρότυπο είναι απόλυτα κατάλληλο για τον σύγχρονο σχεδιασμό και αξιολόγηση υψηλής τεχνολογίας συστημάτων, όπως αντλίες θερμότητας inverter, γεωθερμικά συστήματα ή BMS.

Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα λειτουργίας σε «free-floating mode» δηλαδή η προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς ενός χώρου χωρίς την παρέμβαση

συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης[42]. Έτσι, οι μελετητές μπορούν να αποτιμήσουν την αποτελεσματικότητα παθητικών τεχνικών (π.χ. φυσικός δροσισμός, φυσικός αερισμός), καθώς και να εξετάσουν το επίπεδο θερμικής άνεσης υπό διαφορετικά σενάρια λειτουργίας.

Επιπλέον, το ISO 52016-1 δίνει έμφαση στη λεπτομερή ανάλυση αιχμών φορτίου (peak loads) κάτι που απουσιάζει πλήρως από τον KENAK. Η παρακολούθηση αυτών των αιχμών επιτρέπει στους σχεδιαστές να διαστασιολογήσουν καλύτερα τα μηχανολογικά συστήματα, να βελτιστοποιήσουν τα ωράρια λειτουργίας και να εξετάσουν την ενσωμάτωση λύσεων όπως η αποθήκευση θερμικής ενέργειας.

Πέρα από τις θερμικές απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη, το πρότυπο υπολογίζει επίσης:

- Τη ζήτηση για Ζεστό Νερό Χρήσης (ZNX), συμπεριλαμβανομένων δυνατοτήτων ενσωμάτωσης ηλιακής συνεισφοράς,
- Την κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό, ιδίως σε συνδυασμό με τα δεδομένα του προτύπου ISO 52022-1 (φωτισμός και σκίαση),
- Την επίδραση των εσωτερικών και εξωτερικών σκιάσεων, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η γεωμετρία και ο προσανατολισμός του κτιρίου.

Ένα ακόμα βασικό πλεονέκτημα του ISO 52016-1 είναι η παραμετροποίηση που προσφέρει στον μελετητή: δεν επιβάλλει προκαθορισμένες θερμοκρασίες ή ωράρια, αλλά επιτρέπει την πλήρη παραμετροποίηση:

- Στο προφίλ λειτουργίας κάθε χρήσης και κάθε χώρου (ωράρια, εσωτερικά φορτία, επιθυμητές θερμοκρασίες),
- Στις ιδιότητες των συστημάτων και των δομικών στοιχείων (π.χ. απόδοση εξοπλισμού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, θερμική μάζα υλικών, συντελεστές ηλιακής μετάδοσης).

Αυτή η παραμετροποίηση καθιστά το ISO 52016-1 εξαιρετικά προσαρμοστικό τόσο για εφαρμογές ενεργειακής αποτίμησης, όσο και για τη μελέτη σύνθετων σεναρίων βελτιστοποίησης, τόσο σε νέα όσο και σε υφιστάμενα κτίρια.

Συμπερασματικά, η λειτουργική φιλοσοφία του ISO 52016-1 ενσωματώνει όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά που απαιτεί ο ενεργειακός σχεδιασμός του 21ου αιώνα: χρονολογική ακρίβεια, τεχνική ευελιξία, υποστήριξη παραμετρικών μελετών και αξιοπιστία αποτελεσμάτων. Μέσω της ωριαίας ανάλυσης και της συνολικής θεώρησης του κτιρίου ως δυναμικού συστήματος, το πρότυπο δεν αποτελεί απλώς ένα ακόμα εργαλείο αποτίμησης, αλλά ένα ολοκληρωμένο εργαλείο ενεργειακής ανάλυσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για τον συνολικό σχεδιασμό ενός κτιρίου όσο και για την πρακτική διαχείριση της ενεργειακής του απόδοσης στην καθημερινή χρήση[13][28].

## 2.4 Βασικές διαφορές μεταξύ ISO 52016-1 και KENAK: Από τον υπολογισμό στη διαχείριση

Αφού είδαμε αναλυτικά τα χαρακτηριστικά και τα όρια του KENAK, αλλά και τα κύρια στοιχεία της προσέγγισης του ISO 52016-1, είναι τώρα χρήσιμο να εξετάσουμε πιο ξεκάθαρα τις βασικές διαφορές που χωρίζουν τα δύο πρότυπα. Η σύγκριση αυτή δεν περιορίζεται απλώς στο αν το ένα μοντέλο είναι πιο «ακριβές» ή πιο «εύκολο στη χρήση», αλλά αφορά συνολικά το πώς αντιλαμβανόμαστε σήμερα την ενεργειακή απόδοση: όχι ως μια στατική τυπική απαίτηση, αλλά ως μια ζωντανή, εξελισσόμενη διαδικασία που απαιτεί συνεχή πληροφόρηση και ευελιξία στις προσεγγίσεις[13][28].

Ο KENAK έχει σχεδιαστεί για να εξυπηρετεί βασικά τις ανάγκες της ελληνικής νομοθεσίας, προσφέροντας ένα τυποποιημένο και εύχρηστο πλαίσιο αποτίμησης. Είναι ένα εργαλείο που λειτουργεί καλά για ενεργειακές επιθεωρήσεις ή για την ένταξη κτιρίων σε προγράμματα επιδοτήσεων. Η μεθοδολογία του όμως είναι δομημένη γύρω από στατικές, μηνιαίες προσεγγίσεις υπολογισμού, που βασίζονται σε μέσες τιμές για θερμοκρασίες, ωράρια, φορτία και αποδόσεις συστημάτων. Αυτό σημαίνει ότι ο KENAK μάς δίνει μια εικόνα ενεργειακής επίδοσης περισσότερο «μέσου όρου», παρά μια πιστή αποτύπωση του πώς πραγματικά λειτουργεί ένα κτίριο καθημερινά.

Αντίθετα, το ISO 52016-1 φέρνει μια εντελώς διαφορετική φιλοσοφία. Δεν αντιμετωπίζει το κτίριο ως ένα στατικό «κουτί» με προεπιλεγμένες συνθήκες λειτουργίας, αλλά επιχειρεί να αναδείξει τη δυναμική του δηλαδή το πώς αλλάζει η θερμική και ενεργειακή του συμπεριφορά ώρα με την ώρα, μέρα με τη μέρα, κάτω από μεταβαλλόμενες εξωτερικές και εσωτερικές συνθήκες. Το ISO χρησιμοποιεί ωριαία δεδομένα για ολόκληρο το έτος και επιτρέπει την ακριβή μοντελοποίηση του τρόπου με τον οποίο τα συστήματα (θέρμανσης, ψύξης, φωτισμού κ.λπ.) ανταποκρίνονται στις πραγματικές ανάγκες και προγράμματα χρήσης.

Ένα ακόμη σημαντικό σημείο διαφοροποίησης είναι η προσαρμοστικότητα του μοντέλου. Ο KENAK βασίζεται σε προκαθορισμένες Κλιματικές Ζώνες και σε τυπικά προφίλ χρήσης, τα οποία μπορεί να μη συμβαδίζουν πάντα με τις πραγματικές ανάγκες ενός κτιρίου ιδίως όταν πρόκειται για κτίρια με ειδική ή άτυπη χρήση. Το ISO, από την άλλη πλευρά, προσφέρει πολύ μεγαλύτερη ευελιξία: μπορεί να ενσωματώσει τοπικά μετεωρολογικά δεδομένα, ειδικά ωράρια χρήσης, μοναδικά προφίλ θερμικών απαιτήσεων, καθώς και την επίδραση προηγμένων τεχνολογιών ή αυτοματισμών. Με αυτό τον τρόπο προσαρμόζεται εύκολα σε κάθε μελέτη, χωρίς τους περιορισμούς ενός «προκαθορισμένου καλουπιού».

Επιπλέον, το ISO 52016-1 δεν περιορίζεται απλώς στο να «μετράει» την παρούσα κατάσταση ενός κτιρίου. Λειτουργεί και ως εργαλείο ενεργειακού σχεδιασμού και διαχείρισης: βοηθάει να αξιολογήσουμε πώς θα ανταποκριθεί το κτίριο αν αλλάξουν οι συνθήκες ή τα συστήματά του. Για παράδειγμα, επιτρέπει την ανάλυση του τι θα συμβεί αν εγκατασταθούν φωτοβολταϊκά, αν προστεθούν νέα αυτοματοποιημένα συστήματα σκίασης ή αν αλλάξει ο τρόπος χρήσης των

χώρων. Έτσι, από ένα εργαλείο αποτίμησης περνάμε σε ένα εργαλείο που υποστηρίζει την ουσιαστική λήψη αποφάσεων για τη διαχείριση της ενέργειας.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα του ISO 52016-1 είναι ότι «συνεργάζεται» εύκολα με άλλα διεθνή πρότυπα και τεχνολογικές πλατφόρμες. Μπορεί να ενσωματωθεί σε συστήματα διαχείρισης ενέργειας όπως το ISO 50001, σε εργαλεία BIM (Building Information Modeling), ή να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με προσομοιωτικά λογισμικά όπως το EnergyPlus ή το IDA ICE. Αυτό καθιστά το ISO ένα πρότυπο που κοιτάει στο μέλλον: είναι φτιαγμένο για να υποστηρίξει τις ανάγκες της σύγχρονης, ψηφιακά διασυνδεδεμένης και τεχνολογικά εξελιγμένης αγοράς ακινήτων και ενεργειακών συστημάτων κάτι που η φιλοσοφία του KENAK δεν είχε ως στόχο να καλύψει.

Συνοψίζοντας, ενώ ο KENAK εξακολουθεί να αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για τη συμμόρφωση με τη νομοθεσία και για πιο «τυπικές» ενεργειακές εφαρμογές, το ISO 52016-1 έρχεται να καλύψει ουσιαστικά τα τεχνικά και λειτουργικά κενά που το ελληνικό πρότυπο δεν μπορεί να διαχειριστεί. Δεν είναι απλώς ένα πιο λεπτομερές εργαλείο είναι μια ολόκληρη φιλοσοφία που βλέπει την ενεργειακή απόδοση όχι ως υποχρέωση «στο χαρτί», αλλά ως μια συνεχή, έξυπνη και δυναμικά εξελισσόμενη διαδικασία, συμβαδίζοντας με τις σημερινές ανάγκες για ενεργειακά αποδοτικά και τεχνολογικά προηγμένα κτίρια[21][28].

## 2.5 Εφαρμογές και Προοπτικές Ενσωμάτωσης του ISO 52016-1 στην Ελληνική Πραγματικότητα

Το ISO 52016-1 δεν αποτελεί απλώς μια εναλλακτική μεθοδολογία για την αποτίμηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων αλλά προσφέρει ένα ισχυρό εργαλείο δυναμικού υπολογισμού, με δυνατότητες που καλύπτουν όλο τον κύκλο ζωής ενός κτιρίου, από τον αρχικό σχεδιασμό έως τη λειτουργία και τη μελλοντική ενεργειακή αναβάθμιση [42]. Το πρότυπο αυτό, με βάση την ωριαία ανάλυση, επιτρέπει στον μελετητή να διερευνά και να συγκρίνει σενάρια σχεδιασμού (π.χ. εναλλακτικούς τύπους υλικών ή συστημάτων HVAC), να αναλύει τη δυναμική συμπεριφορά του κτιρίου μέσα στο 24ωρο, καθώς και να ενσωματώνει τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) με υψηλή ακρίβεια υπολογισμών [28], [42].

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η δυνατότητα του ISO να υποστηρίζει τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης φορτίου και των ενεργειακών αιχμών. Μέσω της ωριαίας προσομοίωσης, ο μελετητής μπορεί να εντοπίζει χρονικές περιόδους αυξημένης ζήτησης και να εφαρμόζει στρατηγικές load shifting ή τεχνολογίες αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, συμβάλλοντας στη μείωση αιχμών και του σχετικού ενεργειακού κόστους [28]. Παράλληλα, το πρότυπο καλύπτει με ιδιαίτερη πληρότητα τις απαιτήσεις διεθνών συστημάτων πιστοποίησης βιωσιμότητας (LEED, BREEAM, DGNB) που προϋποθέτουν λεπτομερείς ενεργειακές προσομοιώσεις, στοιχείο κρίσιμο για όσους στοχεύουν σε τέτοιου είδους διακρίσεις [13], [28].

Όσον αφορά την ελληνική πραγματικότητα, η σταδιακή ενσωμάτωση του ISO 52016-1 αποτελεί μια πρόκληση αλλά και ευκαιρία για αναβάθμιση της ποιότητας των ενεργειακών μελετών. Παρότι ο KENAK παραμένει ένα θεσμικά αποδεκτό εργαλείο, οι αυξανόμενες απαιτήσεις για ακρίβεια και τεχνολογική προσαρμογή καθιστούν τη χρήση μιας πιο προηγμένης μεθοδολογίας αναγκαία [42]. Σημαντικό εμπόδιο αποτελεί το γεγονός ότι η ωριαία ανάλυση απαιτεί τη χρήση πιο εξελιγμένων υπολογιστικών εργαλείων (π.χ. EnergyPlus, DesignBuilder), καθώς και βαθύτερη τεχνική εξοικείωση των μελετητών [42], [23]. Επιπλέον, η διαθεσιμότητα ωριαίων κλιματικών δεδομένων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ακριβή εφαρμογή του προτύπου. Σήμερα, οι επίσημες ελληνικές βάσεις δεδομένων βασίζονται κυρίως σε μέσες τιμές ανά Κλιματική Ζώνη, κάτι που περιορίζει την πλήρη αξιοποίηση του δυναμικού υπολογιστικού πλαισίου του ISO [23].

Παρά τα παραπάνω, το ελληνικό τεχνικό δυναμικό διαθέτει τις προϋποθέσεις για την υποστήριξη αυτής της μετάβασης. Κρίσιμη προϋπόθεση είναι η επικαιροποίηση των Τεχνικών Οδηγιών (TOTEE) ώστε να επιτρέπουν, σε προχωρημένες μελέτες, τη χρήση του ISO 52016-1 παράλληλα ή συμπληρωματικά προς τον KENAK [42]. Ταυτόχρονα, απαιτείται θεσμική στήριξη μέσω στοχευμένων εφαρμογών, για παράδειγμα σε δημόσια κτίρια ή έργα που επιδιώκουν διεθνείς πιστοποιήσεις βιωσιμότητας. Επιπρόσθετα, η επένδυση στην εκπαίδευση νέων μηχανικών και ενεργειακών επιθεωρητών γύρω από τις αρχές της δυναμικής προσομοίωσης και του ISO αποτελεί στρατηγικό βήμα για την καθιέρωση αυτής της προσέγγισης στον ελληνικό κτιριακό τομέα [23].

Σε κάθε περίπτωση, η προοπτική ενσωμάτωσης του ISO 52016-1 συνδέεται άμεσα με τους εθνικούς στόχους για την ενεργειακή αναβάθμιση του κτιριακού αποθέματος, όπως αυτοί αποτυπώνονται στον Εθνικό Κλιματικό Νόμο και στο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) [32], [46]. Η υιοθέτηση του προτύπου μπορεί να αποτελέσει τον καταλύτη για την αναβάθμιση της ελληνικής πρακτικής ενεργειακής αποτίμησης, υποστηρίζοντας ταυτόχρονα την επίτευξη αυτών των φιλόδοξων στόχων.

Για να περάσουμε όμως από τις στρατηγικές προοπτικές και τις θεωρητικές δυνατότητες του ISO 52016-1 στην πράξη, απαιτείται πρώτα να σχεδιαστεί και να εφαρμοστεί μια κατάλληλη μεθοδολογία υπολογισμού, προσαρμοσμένη τόσο στις απαιτήσεις του προτύπου όσο και στις ιδιαιτερότητες της ελληνικής πραγματικότητας. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά πώς αναπτύχθηκε αυτή η μεθοδολογική προσέγγιση στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας — από τον σχεδιασμό των μοντέλων και την ανάλυση των συστημάτων, μέχρι την προσαρμογή του διαθέσιμου υπολογιστικού εργαλείου για την ακριβή ενεργειακή αποτίμηση των κτιρίων που εξετάστηκαν.

# Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία Παραμετροποίησης του Κτιρίου Αναφοράς και του Πραγματικού Κτιρίου στο Υπολογιστικό Μοντέλο

## 3.1 Εισαγωγή στη Μεθοδολογία

Η παρούσα εργασία επιδιώκει να εξετάσει την εφαρμογή του προτύπου ISO 52016-1:2017 για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων στο ελληνικό περιβάλλον, εστιάζοντας στην πρακτική αξιοποίησή του σε σύγκριση με τη μεθοδολογία του KENAK. Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το ISO 52016-1 προσφέρει ένα πιο δυναμικό και αναλυτικό πλαίσιο υπολογισμών, ικανό να απεικονίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη θερμική και ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων. Στόχος αυτής της ενότητας είναι να περιγράψει τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας για την αξιοποίηση του ISO 52016-1, σε συνδυασμό με το ελληνικό θεσμικό πλαίσιο.

Η pyBuildingEnergy (ή pyBuildings) είναι μία βιβλιοθήκη ανοικτού κώδικα, ανεπτυγμένη από την ομάδα EEB του EURAC Research, η οποία στοχεύει στην υλοποίηση σε γλώσσα Python των υπολογιστικών διαδικασιών που προβλέπει το πρότυπο ISO 52016-1:2017 [43]. Η βιβλιοθήκη οργανώνεται σε θεματικές ενότητες που αναπαριστούν τα βασικά ενεργειακά φαινόμενα του κτιρίου (θερμικές απώλειες και κέρδη, δυναμική θερμική απόκριση, αερισμός κ.ά.) και περιλαμβάνει συναρτήσεις για την επίλυση του ωριαίου ενεργειακού ισοζυγίου σε κάθε χρονικό βήμα. Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις του ISO, η pyBuildings επιτρέπει τον υπολογισμό ωριαίων ενεργειακών αναγκών για θέρμανση και ψύξη, των αντίστοιχων φορτίων στα συστήματα HVAC, καθώς και την ανάλυση εσωτερικών θερμοκρασιών και φορτίων υγρασίας. Χάρη στην ανοικτή δομή της, η βιβλιοθήκη προσφέρει μεγάλη ευελιξία παραμετροποίησης και επέκτασης, επιτρέποντας στον μελετητή να ενσωματώσει εθνικές παραμέτρους ή ιδιαιτερότητες του εκάστοτε κτιρίου. Επιπλέον, το γεγονός ότι είναι γραμμένη σε Python διευκολύνει την ενσωμάτωσή της σε μεγαλύτερα υπολογιστικά pipelines και τη διασύνδεσή της με άλλα εργαλεία ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων.

Με βάση τις δυνατότητες αυτές, η βιβλιοθήκη επεκτάθηκε και προσαρμόστηκε σημαντικά στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Η επέκταση περιλάμβανε αφενός την ενσωμάτωση των τυπικών ελληνικών παραδοχών και τιμών που χρησιμοποιούνται στον KENAK και αφετέρου τη δημιουργία μίας ευέλικτης υποδομής εισαγωγής παραμέτρων, ώστε να καταστεί εφικτός ο υπολογισμός της ενεργειακής απόδοσης τόσο για το Κτίριο Αναφοράς όσο και για το πραγματικό κτίριο. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται πλήρης συμβατότητα με το εθνικό θεσμικό πλαίσιο, ενώ ταυτόχρονα διατηρείται η τεχνική ακρίβεια και η δυναμική ανάλυση που προσφέρει το ISO 52016-1.

Παράλληλα, διαμορφώθηκε και αναπτύχθηκε μια διαδικασία υπολογισμού που επιτρέπει τον παράλληλο υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης τόσο για το πραγματικό κτίριο (με βάση τα χαρακτηριστικά που ορίζει ο μελετητής), όσο και για το Κτίριο Αναφοράς (με βάση τις τυπικές τιμές του KENAK). Η διαδικασία αυτή επιτρέπει τη διενέργεια συγκριτικής ανάλυσης ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις, προσφέροντας έτσι ένα ισχυρό εργαλείο για την αποτίμηση της επίδοσης των υφιστάμενων ή νέων κτιρίων σε σχέση με τα ελάχιστα πρότυπα.

Η επιλογή αυτής της προσέγγισης δεν είναι τυχαία. Η δυνατότητα σύγκρισης του πραγματικού κτιρίου με το θεσμικά ορισμένο Κτίριο Αναφοράς αποτελεί τον πυρήνα της μεθοδολογίας του KENAK. Ωστόσο, η εφαρμογή του ISO 52016-1 επιτρέπει να γίνει αυτή η σύγκριση με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια και τεχνική ευελιξία. Ειδικότερα, η υιοθέτηση ωριαίας ανάλυσης, η παραμετροποίηση των συστημάτων, και η δυνατότητα λήψης υπόψη δυναμικών φαινομένων (όπως θερμική αδράνεια, διακυμάνσεις φορτίου κ.ά.), καθιστούν το ISO ένα πολύτιμο εργαλείο για μελέτες που στοχεύουν πέρα από την τυπική πιστοποίηση.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής βασίζεται επομένως στα εξής θεμελιώδη βήματα. Σε πρώτο στάδιο, πραγματοποιήθηκε αναλυτική καταγραφή των τυπικών τιμών του KENAK, με στόχο τον ορισμό των παραμέτρων του Κτιρίου Αναφοράς και του πραγματικού κτιρίου. Εν συνεχεία, εξετάστηκαν αναλυτικά τα κύρια συστήματα και χαρακτηριστικά που απαιτείται να μοντελοποιηθούν δηλαδή το κτιριακό κέλυφος (τοίχοι, ανοίγματα, οροφές, δάπεδα), καθώς και οι μηχανολογικές εγκαταστάσεις (θέρμανση, ψύξη, ZNX).

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε αντιστοίχιση και ανάλυση των ίδιων συστημάτων στο πλαίσιο του ISO 52016-1, με αξιοποίηση των υφιστάμενων συναρτήσεων της pyBuildings αλλά και με ενσωμάτωση πρόσθετων συναρτήσεων και παραμέτρων, όπου αυτό κρίθηκε αναγκαίο. Σημαντική εργασία αφιερώθηκε στη βελτίωση της παραμετροποίησης της βιβλιοθήκης, προκειμένου να διευκολυνθεί η εισαγωγή δεδομένων από τον χρήστη, ιδίως για την περίπτωση του πραγματικού κτιρίου.

Τέλος, διαμορφώθηκε μια ολοκληρωμένη υπολογιστική διαδικασία που επιτρέπει:

- την εισαγωγή παραμετροποιημένων σταθερών τιμών για το Κτίριο Αναφοράς,
- την ευέλικτη εισαγωγή δεδομένων για το πραγματικό κτίριο, μέσω κατάλληλων συναρτήσεων εισόδου,
- την παραγωγή αποτελεσμάτων που επιτρέπουν την άμεση σύγκριση ανάμεσα στα δύο.

Με αυτό τον τρόπο, η εργασία δεν αποσκοπεί απλώς στην ακαδημαϊκή μελέτη του ISO 52016-1, αλλά επιχειρεί να φέρει το πρότυπο πιο κοντά στην ελληνική πρακτική, ανοίγοντας τον δρόμο για την μελλοντική του αξιοποίηση σε πραγματικά έργα.

Στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου, παρουσιάζεται αναλυτικά κάθε στάδιο αυτής της μεθοδολογίας: αρχικά η ανάλυση του KENAK και οι τυπικές τιμές, στη συνέχεια η ανάλυση και

παραμετροποίηση με βάση το ISO και, τέλος, η επέκταση και η διαμόρφωση της βιβλιοθήκης pyBuildings, η οποία αποτέλεσε το κεντρικό εργαλείο της υπολογιστικής διαδικασίας.

### 3.2 Ανάλυση KENAK και Τυπικές Τιμές Κτιρίου Αναφοράς

Η πρώτη κρίσιμη φάση στη διαμόρφωση της υπολογιστικής μεθοδολογίας της παρούσας μελέτης αφορά την ανάλυση των προδιαγραφών του Κτιρίου Αναφοράς, όπως αυτές καθορίζονται από το ισχύον θεσμικό πλαίσιο του KENAK και τις σχετικές Τεχνικές Οδηγίες (TOTEE). Η προσεκτική καταγραφή και αποτύπωση των τυπικών τιμών που διέπουν το Κτίριο Αναφοράς αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση ώστε η υπολογιστική σύγκριση με το «πραγματικό» κτίριο να είναι τεκμηριωμένη, αντικειμενική και αναπαραγώγιμη.

Για τον σκοπό αυτό, αξιοποιείται μια συστηματική προσέγγιση. Σε πρώτο στάδιο, πραγματοποιήθηκε αναλυτική καταγραφή των στοιχείων του KENAK που αφορούν:

- το Κτιριακό Κέλυφος (θερμικές ιδιότητες δομικών στοιχείων),
- τα Ηλεκτρομηχανολογικά Συστήματα (Συστήματα Θέρμανσης, Ψύξης, ZNX, Φωτισμού),
- τα Προφίλ Χρήσης και τις παραδοχές εσωτερικών θερμοκρασιών, ωραρίων και λοιπών παραμέτρων.

Η πληροφορία αυτή οργανώθηκε σε συγκεντρωτικούς πίνακες, με στόχο να εισαχθεί άμεσα ως παραμετρικά δεδομένα στη βιβλιοθήκη pyBuildings, μέσω της οποίας θα πραγματοποιηθεί η τελική υπολογιστική ανάλυση.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το Κτίριο Αναφοράς, σύμφωνα με τον KENAK, θεωρείται ως ίδιο ως προς τη γεωμετρία και τον προσανατολισμό με το εξεταζόμενο κτίριο. Δηλαδή, χρησιμοποιείται η ίδια αρχιτεκτονική διάταξη (τοίχοι, ανοίγματα, πόρτες, προσανατολισμός), καθώς και ίδια διάταξη των συστημάτων (HVAC κ.λπ.). Η διαφοροποίηση εντοπίζεται αποκλειστικά στις θερμικές και ενεργειακές παραμέτρους, οι οποίες αντιστοιχούν στις ελάχιστες αποδεκτές απαιτήσεις του Κανονισμού.

Στην παρούσα μελέτη, για λόγους απλοποίησης και εστίασης στη βασική ενεργειακή ανάλυση, επιλέχθηκε να παραλειφθούν τα στάδια πλήρους αρχιτεκτονικού σχεδιασμού (π.χ. αναλυτικός τρισδιάστατος σχεδιασμός, λεπτομερής γεωμετρία του κτιρίου). Αντί αυτών, χρησιμοποιείται ένα τυποποιημένο ορθογωνικό κτίριο (π.χ. κύβος ή παραλληλεπίπεδο), προσέγγιση που είναι συμβατή με την λογική του KENAK για το Κτίριο Αναφοράς και επιτρέπει την επικέντρωση στη σύγκριση ενεργειακής απόδοσης.

Ειδικότερα, καλύπτονται τα εξής βασικά επίπεδα παραμετροποίησης:

- Κτιριακό Κέλυφος: Τοίχοι, οροφές, δάπεδα, ανοίγματα με τις U-values ανά Κλιματική Ζώνη, όπως προβλέπει ο KENAK.

- Ηλεκτρομηχανολογικά Συστήματα (H/M): Βαθμοί απόδοσης, παραδοχές χρήσης, αποδόσεις μονάδων θέρμανσης/ψύξης/ZNX/φωτισμού.
- Λοιπές Παράμετροι: Συντελεστές ακτινοβολίας, ωράρια λειτουργίας, προφίλ εσωτερικών θερμοκρασιών, λοιπές παραδοχές.

Τα παραπάνω στοιχεία συγκεντρώθηκαν σε ένα δομημένο αρχείο, με στόχο να τροφοδοτήσουν τη βιβλιοθήκη pyBuildings, αφού προσαρμοστούν στις απαιτήσεις εισαγωγής του εργαλείου.

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει σταδιακά τις βασικές παραμέτρους του Κτιρίου Αναφοράς, ξεκινώντας από το Κτιριακό Κέλυφος και συνεχίζοντας με τα H/M συστήματα και τα λοιπά στοιχεία. Η αναλυτική αυτή προσέγγιση αποσκοπεί στο να τεκμηριώσει επαρκώς τον τρόπο με τον οποίο διαμορφώθηκε το κτίριο αναφοράς, το οποίο θα αποτελέσει το σημείο αναφοράς στη σύγκριση με το πραγματικό κτίριο στο επόμενο στάδιο της μεθοδολογίας.

### 3.2.1 Θερμικά χαρακτηριστικά κελύφους και συντελεστές ακτινοβολίας

Όπως αναφέρθηκε, ένα από τα βασικά βήματα για τη σωστή αποτύπωση του Κτιρίου Αναφοράς ήταν η συγκέντρωση των τυπικών τιμών που προβλέπονται από τον KENAK για τα δομικά στοιχεία του κελύφους. Οι τιμές αυτές αφορούν κυρίως τους συντελεστές θερμοπερατότητας (U-values), οι οποίοι καθορίζουν το θερμικό ισοζύγιο του κτιρίου και έχουν άμεση επίδραση στις ενεργειακές του απαιτήσεις.

Για τον σκοπό αυτό αξιοποιήθηκε ένας συγκεντρωτικός πίνακας που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, με αναφορά στις τιμές που παρέχονται στη σχετική τεκμηρίωση του KENAK και των TOTEE. Ο πίνακας αυτός παρουσιάζει τις U-values ανά τύπο δομικού στοιχείου (τοιχοί, οροφές, δάπεδα, ανοίγματα) και ανά Κλιματική Ζώνη (Α, Β, Γ, Δ), ώστε να λαμβάνεται υπόψη η γεωγραφική διαφοροποίηση του ελληνικού κλίματος.

Η θεμελιώδης παραδοχή που διέπει αυτήν την κατηγοριοποίηση είναι ότι το Κτίριο Αναφοράς μοντελοποιείται ως κτίριο με ίδιο σχεδιασμό και γεωμετρία (τοιχοί, παράθυρα, πόρτες, προσανατολισμός), αλλά με προκαθορισμένα θερμικά χαρακτηριστικά που ανταποκρίνονται στις ελάχιστες αποδεκτές απαιτήσεις του Κανονισμού.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρατίθενται ενδεικτικά οι U-values για τα βασικά δομικά στοιχεία, όπως χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση στο υπολογιστικό εργαλείο:

**Πίνακας 3.1:** Συντελεστές θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων Κτιρίου Αναφοράς (KENAK)

| ΔΟΜΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ                                                       | ΣΥΜΒΟΛΟ | Συντελεστής θερμοπερατότητας<br>[W/m <sup>2</sup> .K] |     |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------------|-----|------|------|
|                                                                       |         | ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ                                        |     |      |      |
|                                                                       |         | A                                                     | B   | Γ    | Δ    |
| Εξωτερική οριζόντια επιφάνεια σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα (οροφές) | kD      | 0,5                                                   | 0,4 | 0,38 | 0,35 |
| Εξωτερικοί τοίχοι σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα                      | kW      | 0,6                                                   | 0,5 | 0,44 | 0,33 |
| Δάπεδα χώρων διαμονής σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα (pilotis)        | kDL     | 0,5                                                   | 0,4 | 0,4  | 0,3  |
| Δάπεδα σε επαφή με το έδαφος ή με κλειστούς μη θερμαινόμενους χώρους  | kG      | 1,5                                                   | 1   | 0,38 | 0,35 |
| Διαχωριστικοί τοίχοι σε επαφή με μη θερμαινόμενους χώρους             | kWE     | 1,5                                                   | 1   | 0,7  | 0,5  |
| Ανοίγματα (παράθυρα, πόρτες μπαλκονιών κα)                            | kF      | 3,2                                                   | 3   | 2,8  | 2,6  |
| Γυάλινες προσόψεις κτιρίων μη ανοιγόμενες και μερικώς ανοιγόμενες     | kGF     | 1,8                                                   | 1,8 | 1,8  | 1,8  |

Επιπλέον, στο πλαίσιο της παραμετροποίησης του Κτιρίου Αναφοράς για τις ανάγκες της προσομοίωσης, λαμβάνονται υπόψη και βασικοί συντελεστές ακτινοβολίας, όπως προδιαγράφονται από τις TOTEE. Οι συντελεστές αυτοί επηρεάζουν την ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου, ιδίως σε ό,τι αφορά τις ανταλλαγές θερμότητας μέσω ακτινοβολίας με το περιβάλλον. Ειδικότερα:

- Συντελεστής ανάκλασης ηλιακής ακτινοβολίας (solar reflectance): 0.6  
Ο συντελεστής αυτός εκφράζει το ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από μια επιφάνεια (π.χ. εξωτερικοί τοίχοι, οροφές), χωρίς να απορροφάται. Τιμή 0.6 σημαίνει ότι το 60% της ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται, ενώ το υπόλοιπο 40% απορροφάται από το υλικό και ενδέχεται να συμβάλει στη θέρμανση του κτιρίου μέσω μετατροπής σε θερμική ενέργεια.

- Συντελεστής εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας (thermal emissivity): 0.8  
Ο συντελεστής αυτός περιγράφει την ικανότητα μιας επιφάνειας να εκπέμπει θερμική ακτινοβολία. Τιμή 0.8 σημαίνει ότι η επιφάνεια εκπέμπει το 80% της μέγιστης θεωρητικά δυνατής εκπομπής (όπως αυτή ορίζεται για έναν ιδανικό μέλαν σώμα). Ο συντελεστής αυτός είναι σημαντικός για τον υπολογισμό των θερμικών ανταλλαγών μέσω ακτινοβολίας, τόσο προς τον ουράνιο θόλο (νυχτερινή ψύξη), όσο και προς άλλες επιφάνειες.

Η χρήση των ανωτέρω τυπικών τιμών για τους συντελεστές ακτινοβολίας συνάδει με τις οδηγίες της TOTEE και διασφαλίζει ότι η προσομοίωση του Κτιρίου Αναφοράς πραγματοποιείται με βάση θεσμικά τεκμηριωμένες παραμέτρους, διατηρώντας τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων με την εγχώρια πρακτική ενεργειακών μελετών.

### 3.2.2 Σκίαση και Χαρακτηριστικά Υαλοπινάκων

Στο πλαίσιο της προδιαγραφής του Κτιρίου Αναφοράς και της παραμετροποίησης της προσομοίωσης, ιδιαίτερη σημασία έχει η ορθή αποτύπωση των παραμέτρων που σχετίζονται τόσο με τη σκίαση όσο και με τα οπτικά χαρακτηριστικά των υαλοπινάκων. Οι παράμετροι αυτοί επηρεάζουν άμεσα τη θερμική και οπτική συμπεριφορά του κτιρίου, καθώς ρυθμίζουν την ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας και φυσικού φωτός που εισέρχεται στους εσωτερικούς χώρους. Ως εκ τούτου, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον υπολογισμό των ψυκτικών και θερμικών φορτίων, αλλά και στη διαμόρφωση των συνθηκών οπτικής άνεσης.

Όσον αφορά τις αδιαφανείς επιφάνειες του κτιρίου (όπως οι εξωτερικοί τοίχοι), η προσέγγιση που υιοθετείται στην παρούσα ανάλυση συνίσταται στη χρήση ενός σταθερού συντελεστή σκίασης ίσου με 0.9 για όλες τις εποχές του έτους. Ο συγκεκριμένος συντελεστής λαμβάνει υπόψη την επίδραση γενικών εξωτερικών σκιάσεων, όπως γειτονικά κτίρια, σταθερά σκίαστρα και λοιπά αρχιτεκτονικά ή περιβαλλοντικά εμπόδια, τα οποία μειώνουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο κτιριακό κέλυφος.

Για τα διαφανή στοιχεία του κελύφους (παράθυρα και λοιπά υαλοστάσια), εφαρμόζεται πρόσθετη εξωτερική σκίαση, ιδίως κατά τη θερινή περίοδο, προκειμένου να περιοριστούν τα ψυκτικά φορτία που απορρέουν από την είσοδο υπερβολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Οι αντίστοιχες τιμές που προδιαγράφονται από τον KENAK και υιοθετούνται στη μοντελοποίηση είναι οι εξής:

- 0.5 για παράθυρα με νότιο προσανατολισμό,
- 0.6 για παράθυρα με δυτικό ή ανατολικό προσανατολισμό.

Οι παραπάνω τιμές για τον συντελεστή σκίασης συμβαδίζουν με την πρακτική αρχιτεκτονικού σχεδιασμού στην Ελλάδα, όπου η χρήση σταθερών σκιάστρων ιδιαίτερα σε νότια και

ανατολικά/δυτικά ανοίγματα είναι ευρέως διαδεδομένα, τόσο για λόγους ενεργειακής απόδοσης όσο και για τη βελτίωση της θερμικής άνεσης κατά τους θερινούς μήνες.

Τώρα όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των υαλοπινάκων, η επιλογή των κατάλληλων υαλοπινάκων αποτελεί βασικό παράγοντα στη συνολική ενεργειακή απόδοση του κτιρίου, επηρεάζοντας σημαντικά τόσο τη θερμική όσο και την οπτική του συμπεριφορά. Από τη μία πλευρά, τα χαρακτηριστικά των υαλοπινάκων καθορίζουν το ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο και συμβάλλει στη θέρμανση ή την ψύξη του κτιρίου. Από την άλλη, καθορίζουν την ποσότητα φυσικού φωτός που διατίθεται στους χρήστες του χώρου, επηρεάζοντας την ποιότητα και το επίπεδο οπτικής άνεσης.

Για το Κτίριο Αναφοράς, οι τιμές που υιοθετούνται στη μοντελοποίηση, σύμφωνα με τις προβλέψεις του KENAK και των σχετικών Τεχνικών Οδηγιών (TOTEE), είναι οι εξής:

- Συντελεστής διαπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία (GT ή g-value): 0.76  
Ο GT αντιπροσωπεύει το ποσοστό της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας (άμεσης και διάχυτης) που διαπερνά τον υαλοπίνακα και εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο υπό τη μορφή θερμικού φορτίου.
- Συντελεστής διαπερατότητας στο ορατό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας (GV ή light transmittance): 0.65  
Ο GV εκφράζει το ποσοστό του ορατού φωτός που διαπερνά τον υαλοπίνακα, επηρεάζοντας την ποιότητα του φυσικού φωτισμού εντός του κτιρίου και κατ' επέκταση τη συνολική οπτική άνεση των χρηστών.

### 3.2.4 Αερισμός

Ένα ακόμη ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο στη διαμόρφωση του ενεργειακού προφίλ του Κτιρίου Αναφοράς αποτελεί ο φυσικός αερισμός, καθώς και η διεύθυνση αέρα μέσω των αρμών και των κουφωμάτων του κελύφους. Οι σχετικές παράμετροι επηρεάζουν άμεσα τόσο τις θερμικές απώλειες όσο και τη διατήρηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα, ενώ συνδέονται άμεσα με τα συνολικά ψυκτικά και θερμικά φορτία του κτιρίου.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του KENAK και τις αντίστοιχες Τεχνικές Οδηγίες (TOTEE), για τυπικό κτίριο κατοικίας προβλέπονται τα εξής:

- Πυκνότητα πληθυσμού:  $5 \text{ άτομα} / 100 \text{ m}^2 \text{ επιφάνειας δαπέδου}$ .  
Αυτό σημαίνει ότι για κάθε  $100 \text{ m}^2$  επιφανείας δαπέδου θεωρείται πως αντιστοιχούν κατά μέσο όρο 5 άτομα, παραδοχή που χρησιμοποιείται στη διαστασιολόγηση των απαιτούμενων παροχών νωπού αέρα.
- Νωπός αέρας ανά άτομο:  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  ανά άτομο.  
Ο εν λόγω ρυθμός αερισμού προσδιορίζει την απαιτούμενη παροχή νωπού αέρα ανά

άτομο, ώστε να διασφαλίζεται ικανοποιητική ποιότητα εσωτερικού αέρα, σύμφωνα με τις ισχύουσες υγειονομικές απαιτήσεις και τις σχετικές κατευθύνσεις των TOTEE.

- Νωπός αέρας ανά μονάδα επιφάνειας δαπέδου:  $0.75 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ . Η τιμή αυτή υπολογίζεται στη βάση του πληθυσμιακού συντελεστή που περιγράφηκε ανωτέρω και χρησιμοποιείται συνήθως σε επίπεδο συνολικής προσομοίωσης, επιτρέποντας την κατανομή του αερισμού ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας.

Επιπλέον, ιδιαίτερη σημασία για τον προσδιορισμό των θερμικών απωλειών παρουσιάζει η διείσδυση αέρα (air infiltration), η οποία λαμβάνει χώρα κυρίως μέσω των αρμών και των κουφωμάτων του κελύφους. Για το Κτίριο Αναφοράς, λαμβάνεται υπόψη η εξής τυπική τιμή:

- $5.5 \text{ m}^3/\text{h}$  ανά  $\text{m}^2$  επιφάνειας κουφώματος (π.χ. παράθυρα, πόρτες). Πρόκειται για μία τιμή που αντικατοπτρίζει τη μέση πραγματική αεροστεγανότητα των κουφωμάτων στην ελληνική πρακτική, αντιστοιχώντας σε παραδοχές για κτίρια χωρίς την εφαρμογή εξειδικευμένων τεχνικών αεροστεγάνωσης ή προηγμένων κουφωμάτων υψηλής ενεργειακής απόδοσης.

Η ενσωμάτωση αυτών των παραμέτρων στο ενεργειακό μοντέλο του Κτιρίου Αναφοράς εξασφαλίζει τη συμμόρφωση με τα ελάχιστα αποδεκτά πρότυπα για τον αερισμό, ενώ παράλληλα επιτρέπει μια ρεαλιστική αποτύπωση της δυναμικής συμπεριφοράς του κελύφους σε σχέση με τις ανεξέλεγκτες απώλειες. Είναι αξιοσημείωτο ότι η διείσδυση αέρα από τα κουφώματα και τους αρμούς αποτελεί συχνά έναν από τους κυριότερους παράγοντες πρόσθετων θερμικών φορτίων, ιδίως σε παλαιότερα ή μη ενεργειακά αναβαθμισμένα κτίρια.

### 3.2.5 Θερμική Μάζα

Η θερμική μάζα του κτιρίου συνιστά μία ακόμη καθοριστική παράμετρο για την ολοκληρωμένη αποτύπωση της ενεργειακής του συμπεριφοράς. Η θερμική μάζα εκφράζει την ικανότητα των δομικών στοιχείων του κτιρίου να αποθηκεύουν και να αποδίδουν θερμική ενέργεια, επηρεάζοντας σημαντικά τόσο τη θερμική αδράνεια όσο και τη συνολική δυναμική απόκριση του κελύφους στις μεταβολές των εξωτερικών και εσωτερικών θερμοκρασιακών συνθηκών.

Στο πλαίσιο του Κτιρίου Αναφοράς, σύμφωνα με τις καθορισμένες προδιαγραφές του KENAK και των Τεχνικών Οδηγιών (TOTEE), η θερμική μάζα λαμβάνεται ως εξής:

- 250  $\text{kJ}/\text{K}\cdot\text{m}^2$ . Η συγκεκριμένη τιμή εκφράζει την ικανότητα του κτιρίου, ανά τετραγωνικό μέτρο επιφανείας δαπέδου, να αποθηκεύει ή να αποδίδει 250 kJ θερμικής ενέργειας για κάθε μονάδα (1 Kelvin) διαφοράς θερμοκρασίας.

Η παράμετρος αυτή ενσωματώνεται στον υπολογισμό της θερμικής αδράνειας του κτιρίου και διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στη μοντελοποίηση της χρονικής απόκρισης των θερμικών

φορτίων. Ειδικότερα, επηρεάζει τον ρυθμό με τον οποίο το κέλυφος απορροφά, αποθηκεύει ή αποδίδει θερμότητα, συμβάλλοντας στην εξομάλυνση των θερμικών διακυμάνσεων κατά τη διάρκεια του 24ώρου. Επομένως, η θερμική μάζα συνεισφέρει τόσο στη θερμική άνεση των εσωτερικών χώρων όσο και στη μείωση των αιχμών φορτίου για τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης.

### 3.2.6 Κεντρική Θέρμανση

Ένα από τα σημαντικότερα ενεργειακά συστήματα που επηρεάζουν καθοριστικά την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του κτιρίου είναι το σύστημα κεντρικής θέρμανσης. Στο Κτίριο Αναφοράς, το ισχύον πλαίσιο του ΚΕΝΑΚ ορίζει συγκεκριμένες παραμέτρους για την εποχιακή απόδοση των λεβήτων/καυστήρων, σε συνάρτηση με την ονομαστική τους ισχύ. Η τυποποίηση αυτή επιτρέπει την επίτευξη συγκρισιμότητας μεταξύ διαφορετικών μελετών και διασφαλίζει ότι η αποτίμηση της ενεργειακής συμπεριφοράς βασίζεται σε αποδεκτές και ενιαίες προδιαγραφές.

Συγκεκριμένα, οι προδιαγεγραμμένες τιμές εποχιακής απόδοσης (seasonal generation efficiency) ανά κατηγορία ισχύος είναι οι εξής:

*Πίνακας 3.2: Εποχιακός βαθμός απόδοσης λεβήτων Κτιρίου Αναφοράς (ΚΕΝΑΚ)*

| Ονομαστική ισχύς λέβητα (kW) | Εποχιακός βαθμός απόδοσης (%) |
|------------------------------|-------------------------------|
| 4 έως 25                     | 78,1                          |
| >25 έως 50                   | 81,4                          |
| >50 έως 100                  | 81,8                          |
| >100 έως 200                 | 85,0                          |
| >200 έως 300                 | 85,35                         |
| >300 έως 400                 | 85,6                          |
| >400                         | 86,8                          |

Ο εποχιακός βαθμός απόδοσης εκφράζει τη μέση απόδοση του συστήματος θέρμανσης κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις μεταβολές του θερμικού φορτίου όσο και τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του εξοπλισμού. Με απλά λόγια, όσο υψηλότερη είναι η απόδοση αυτή, τόσο μικρότερη είναι η απαιτούμενη κατανάλωση καυσίμου για την παραγωγή της αναγκαίας θερμικής ενέργειας που καλύπτει τις ανάγκες θέρμανσης του κτιρίου.

Επιπρόσθετα, για την περίπτωση όπου στο Κτίριο Αναφοράς χρησιμοποιούνται αντλίες θερμότητας, ο KENAK καθορίζει την παρακάτω τυπική τιμή εποχιακής απόδοσης:

- SCOP = 3,2

Ο SCOP (*Seasonal Coefficient of Performance*) είναι ο εποχιακός συντελεστής απόδοσης μιας αντλίας θερμότητας και ορίζεται ως το πηλίκο της συνολικά παραγόμενης θερμικής ενέργειας προς τη συνολικά καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια, κατά τη διάρκεια μιας ολόκληρης χειμερινής περιόδου.

Η ενσωμάτωση αυτών των προκαθορισμένων τιμών στο υπολογιστικό μοντέλο του Κτιρίου Αναφοράς διασφαλίζει την εφαρμογή μιας ομοιογενούς βάσης υπολογισμού, επιτρέποντας τη συστηματική αξιολόγηση τόσο παραδοσιακών τεχνολογιών (λέβητες-καυστήρες) όσο και σύγχρονων τεχνολογιών θέρμανσης (αντλίες θερμότητας). Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται εφικτή η ακριβής και δίκαιη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τεχνολογικών λύσεων στο πλαίσιο της συνολικής ενεργειακής αποτίμησης του κτιρίου.

### 3.2.7 Ψύξη / Κλιματισμός

Ένα ακόμη κρίσιμο ενεργειακό σύστημα στο πλαίσιο της αποτίμησης του Κτιρίου Αναφοράς αφορά την ψύξη και τον κλιματισμό των εσωτερικών χώρων. Στο KENAK, η προδιαγραφή για τα συστήματα ψύξης ακολουθεί επίσης μία τυποποιημένη προσέγγιση, ώστε να επιτυγχάνεται συγκρισιμότητα μεταξύ διαφορετικών μελετών.

Συγκεκριμένα, στο Κτίριο Αναφοράς υιοθετείται η εξής βασική παραδοχή:

- SEER = 3,0

Ο SEER (*Seasonal Energy Efficiency Ratio*) αποτελεί τον εποχιακό συντελεστή απόδοσης των συστημάτων ψύξης (π.χ. split units, κεντρικά συστήματα κλιματισμού κ.λπ.). Ο SEER εκφράζει τον λόγο της συνολικά παραγόμενης ψυκτικής ενέργειας προς τη συνολικά καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια καθ' όλη τη διάρκεια της θερινής περιόδου.

Η χρήση του SEER ως δείκτης επιτρέπει την ρεαλιστική αποτίμηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος ψύξης, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο τις συνθήκες ονομαστικής λειτουργίας αλλά και τις διακυμάνσεις φορτίου που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της χρήσης του.

Επιπλέον, για τον βαθμό κάλυψης των χώρων με ψύξη, το Κτίριο Αναφοράς ακολουθεί την παρακάτω τυποποιημένη παραδοχή:

- Η ψυχόμενη επιφάνεια θεωρείται ίση με το 50% της συνολικής επιφάνειας του κτιρίου.

Η παραδοχή αυτή αντανακλά την πραγματική συνήθη πρακτική στα κτίρια κατοικιών στην Ελλάδα, όπου δεν ψύχεται το σύνολο των εσωτερικών χώρων, αλλά μόνο επιλεγμένες ζώνες (π.χ.

καθιστικό, υπνοδωμάτια κ.ά.). Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγεται η υπερεκτίμηση των ψυκτικών φορτίων και επιτυγχάνεται μία ρεαλιστικότερη εικόνα της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου.

Η ενσωμάτωση αυτών των παραμέτρων στο υπολογιστικό μοντέλο του Κτιρίου Αναφοράς εξασφαλίζει ότι η προσομοίωση της ψύξης ανταποκρίνεται στις πρακτικές προδιαγραφές του KENAK, ενισχύοντας τη συγκρισιμότητα με πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

### 3.2.8 Τερματικές Μονάδες και Σωληνώσεις

Εκτός από την απόδοση των κύριων συστημάτων θέρμανσης και ψύξης, η προσομοίωση του Κτιρίου Αναφοράς απαιτεί την παράλληλη αποτύπωση και των χαρακτηριστικών που αφορούν τα τερματικά σώματα και το δίκτυο διανομής θερμικής ή ψυκτικής ενέργειας.

Σε αυτό το πεδίο, ο KENAK προβλέπει ότι τα τερματικά σώματα (π.χ. fan coil units, θερμαντικά σώματα καλοριφέρ, ΚΚΜ – Κεντρικές Κλιματιστικές Μονάδες), καθώς και οι σωληνώσεις του δικτύου διανομής, θεωρούνται όμοια ως προς τις αποδόσεις και τις απώλειες με εκείνα του πραγματικού εξεταζόμενου κτιρίου. Με άλλα λόγια, δεν υιοθετούνται τυπικές ή ενιαίες τιμές για τα συγκεκριμένα στοιχεία στο Κτίριο Αναφοράς· αντιθέτως, η προσομοίωση λαμβάνει υπόψη την ίδια απόδοση και συμπεριφορά του δικτύου διανομής και των τερματικών μονάδων όπως αυτή ισχύει στο πραγματικό κτίριο.

Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται η ουδετερότητα του Κτιρίου Αναφοράς ως προς την επίδραση του δικτύου διανομής και των τερματικών μονάδων στη συνολική ενεργειακή απόδοση, αποτρέποντας την εισαγωγή τεχνητών διαφοροποιήσεων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την αντικειμενική σύγκριση μεταξύ των δύο μοντέλων.

### 3.2.9 Σύστημα Εξαερισμού ή Μηχανικού Αερισμού

Ένα ακόμη στοιχείο της προδιαγραφής του Κτιρίου Αναφοράς αφορά τη μέθοδο αερισμού των εσωτερικών χώρων. Σύμφωνα με το ισχύον πλαίσιο του KENAK και τις Τεχνικές Οδηγίες (TOTEE), για τα κτίρια κατοικιών ισχύει η ακόλουθη βασική παραδοχή:

- Θεωρείται ότι εφαρμόζεται φυσικός αερισμός και όχι μηχανικός εξαερισμός.

Αυτό σημαίνει ότι στο ενεργειακό μοντέλο του Κτιρίου Αναφοράς δεν λαμβάνονται υπόψη πρόσθετα ενεργειακά φορτία ή καταναλώσεις από ενδεχόμενα συστήματα μηχανικού αερισμού, όπως μονάδες με ανάκτηση θερμότητας ή άλλες εξειδικευμένες διατάξεις.

Η επιλογή αυτή αποσκοπεί στη διατήρηση ενός τυποποιημένου και συγκρίσιμου πλαισίου προσομοίωσης, δεδομένου ότι στις κατοικίες το ποσοστό διεύθυνσης μηχανικών συστημάτων αερισμού παραμένει ακόμη χαμηλό στην ελληνική πρακτική.

Κατά συνέπεια, η προσομοίωση στηρίζεται αποκλειστικά στις προδιαγεγραμμένες τιμές φυσικού αερισμού, οι οποίες έχουν ήδη παρουσιαστεί στην ενότητα που αφορά τον αερισμό. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται ότι οι απώλειες και τα φορτία αερισμού υπολογίζονται βάσει ρεαλιστικών και θεσμικά τεκμηριωμένων παραδοχών.

### 3.2.10 Σύστημα Ζεστού Νερού Χρήσης (ZNX)

Η προσομοίωση του συστήματος Ζεστού Νερού Χρήσης (ZNX) στο Κτίριο Αναφοράς συνιστά μία ακόμη κρίσιμη παράμετρο για τον συνολικό ενεργειακό ισολογισμό του κτιρίου, καθώς το ZNX αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης, ιδιαίτερα σε σύγχρονες κατοικίες.

Στο πλαίσιο του KENAK, οι θερμικές απώλειες του συστήματος παραγωγής και διανομής ZNX προδιαγράφονται με τις ακόλουθες τυπικές τιμές:

- Μέσος συντελεστής θερμικών απωλειών: 20%.

Αυτό σημαίνει ότι, κατά μέσο όρο, το 20% της παραγόμενης θερμικής ενέργειας για ZNX χάνεται κατά τη διαδρομή από την πηγή θέρμανσης (λέβητας, αντλία θερμότητας κ.λπ.) έως τα σημεία κατανάλωσης (π.χ. νιπτήρες, ντους). Οι απώλειες αυτές οφείλονται κυρίως σε απώλειες μέσω σωληνώσεων και ενδεχομένως μέσω των δεξαμενών αποθήκευσης.

- Σε περίπτωση χρήσης συστήματος επανακυκλοφορίας ZNX, ο αντίστοιχος συντελεστής θερμικών απωλειών αυξάνεται στο 35%.

Η σημαντική αυτή αύξηση αποδίδεται στο γεγονός ότι στα συστήματα επανακυκλοφορίας το ζεστό νερό διατηρείται σε διαρκή κυκλοφορία μέσω των σωληνώσεων, προκειμένου να εξασφαλίζεται άμεση διαθεσιμότητα ZNX στα τελικά σημεία χρήσης. Ωστόσο, αυτή η πρακτική συνεπάγεται συνεχείς θερμικές απώλειες από τις σωληνώσεις προς το περιβάλλον, ακόμη και όταν δεν υπάρχει ζήτηση νερού. Η λύση της επανακυκλοφορίας είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε μεγάλα κτίρια κατοικιών ή σε κτίρια με μεγάλες αποστάσεις μεταξύ της μονάδας παραγωγής και των σημείων κατανάλωσης ZNX, καθώς επιτρέπει την άμεση και συνεχή διαθεσιμότητα ζεστού νερού, ανεξαρτήτως απόστασης.

Η ενσωμάτωση αυτών των τυπικών τιμών στο ενεργειακό μοντέλο του Κτιρίου Αναφοράς διασφαλίζει ότι λαμβάνονται υπόψη οι πραγματικές επιβαρύνσεις που συνεπάγονται οι διαφορετικές επιλογές σχεδιασμού του συστήματος ZNX.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διαφοροποίηση μεταξύ απλών συστημάτων και συστημάτων με επανακυκλοφορία, καθώς η τελευταία μπορεί να οδηγήσει σε αισθητά υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας, στοιχείο που έχει ουσιαστική σημασία για την αξιολόγηση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου.

Συνοψίζοντας, η διαμόρφωση του ενεργειακού μοντέλου του Κτιρίου Αναφοράς βασίστηκε σε μία συνεκτική και τεκμηριωμένη παραμετροποίηση, σύμφωνα με τις απαιτήσεις που θέτουν ο KENAK και οι αντίστοιχες Τεχνικές Οδηγίες (TOTEE). Οι παράμετροι που παρουσιάστηκαν από τα χαρακτηριστικά του κελύφους και των υαλοπινάκων, έως τις αποδόσεις των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και ZNX και τη θερμική μάζα του κτιρίου, ενσωματώθηκαν με ακρίβεια στη βιβλιοθήκη pyBuildings.

Με αυτόν τον τρόπο διαμορφώθηκε ένα σταθερό και αναπαραγώγιμο σημείο αναφοράς, που θα επιτρέψει μία ουσιαστική και αξιόπιστη σύγκριση με το πραγματικό κτίριο. Στην επόμενη ενότητα, θα περάσουμε πλέον στην ανάλυση του πραγματικού κτιρίου, παρουσιάζοντας τις βασικές του ιδιαιτερότητες και τις διαφοροποιήσεις που εφαρμόστηκαν στο υπολογιστικό μοντέλο, ώστε να κατανοηθεί πλήρως το πλαίσιο και οι συνθήκες της σύγκρισης που ακολουθεί.

### 3.3 Ανάλυση Παραμέτρων Πραγματικού Κτιρίου

Αφού παρουσιάστηκαν αναλυτικά οι τυπικές προδιαγραφές και παραδοχές του Κτιρίου Αναφοράς, όπως αυτές καθορίζονται από τον KENAK και τις TOTEE, το επόμενο στάδιο της μεθοδολογίας εστιάζει στο πώς παραμετροποιείται το *πραγματικό κτίριο* μέσα στο υπολογιστικό μοντέλο. Το βήμα αυτό είναι κρίσιμο για τη συνολική προσέγγιση της παρούσας εργασίας, καθώς από τη μία πλευρά το Κτίριο Αναφοράς ορίζει το σημείο αναφοράς για την ενεργειακή σύγκριση, αλλά από την άλλη, το τελικό ζητούμενο είναι να αποτυπωθεί με ακρίβεια η πραγματική ενεργειακή συμπεριφορά του εξεταζόμενου κτιρίου είτε πρόκειται για υφιστάμενο, είτε για νέο κτίριο.

Σε αντίθεση με το Κτίριο Αναφοράς, το οποίο βασίζεται σε σταθερές θεσμικές παραδοχές και ελάχιστες απαιτήσεις, το πραγματικό κτίριο φέρει ιδιομορφίες και διαφοροποιήσεις που σχετίζονται με πλήθος παραγόντων: από τα υλικά κατασκευής και τις τεχνολογικές επιλογές, έως τον εξοπλισμό, τα συστήματα HVAC και, βεβαίως, τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται από τους ενοίκους ή τους χρήστες του. Η ακριβής αποτύπωση αυτών των παραμέτρων είναι θεμελιώδης για την αξιόπιστη προσομοίωση του κτιρίου, αλλά και για τη δυνατότητα σύγκρισης με το πρότυπο Κτίριο Αναφοράς με συνεπή και αντικειμενικό τρόπο.

Η συλλογή και οργάνωση των δεδομένων για το πραγματικό κτίριο πραγματοποιήθηκε μέσα από μία συνδυαστική προσέγγιση. Αρχικά, συγκεντρώθηκαν τεχνικά στοιχεία από διαθέσιμα αρχιτεκτονικά σχέδια και τεχνικές περιγραφές του κτιρίου. Παράλληλα, αξιοποιήθηκαν στοιχεία από μελέτες εφαρμογής, δελτία προϊόντων, και όπου απαιτούνταν εύλογες παραδοχές βασισμένες σε εγχειρίδια τεκμηρίωσης (όπως οι TOTEE) και σε τυπικές πρακτικές του κλάδου. Συμπληρωματικά, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην παράμετρο *χρήσης του κτιρίου*, καθώς παράγοντες όπως το προφίλ λειτουργίας, τα εσωτερικά θερμικά φορτία και οι απαιτήσεις αερισμού έχουν άμεσο και συχνά καθοριστικό ρόλο στην ενεργειακή του απόδοση.

Όλες οι σχετικές παράμετροι οργανώθηκαν σε ένα αναλυτικό αρχείο, το οποίο διαμορφώθηκε κατάλληλα ώστε να «διασυνδεθεί» με τις απαιτήσεις εισαγωγής δεδομένων στη βιβλιοθήκη pyBuildings. Η διαδικασία αυτή διασφάλισε την ομαλή και ακριβή ενσωμάτωση του πραγματικού κτιρίου στο υπολογιστικό pipeline της μελέτης.

Η παραμετροποίηση που πραγματοποιήθηκε για το πραγματικό κτίριο καλύπτει ένα ευρύ φάσμα μεταβλητών που επηρεάζουν την ενεργειακή του συμπεριφορά. Ειδικότερα, λαμβάνονται υπόψη:

- το ωράριο λειτουργίας και οι περίοδοι θέρμανσης και ψύξης, ανά κλιματική ζώνη,
- οι επιθυμητές εσωτερικές θερμοκρασίες και σχετική υγρασία κατά τη χειμερινή και θερινή περίοδο,
- οι εσωτερικές θερμικές εκπομπές από χρήστες, εξοπλισμό και φωτισμό,
- οι απαιτήσεις και στρατηγικές αερισμού,
- η κατανάλωση Ζεστού Νερού Χρήσης (ZNX) και οι σχετικές θερμοκρασίες νερού,
- τα θερμικά χαρακτηριστικά των επιμέρους δομικών στοιχείων (τοιχών, οροφών, δαπέδων, ανοιγμάτων),
- οι συντελεστές ακτινοβολίας και σκίασης των επιφανειών,
- τα βασικά χαρακτηριστικά του εγκατεστημένου συστήματος θέρμανσης.

Η αναλυτική τεκμηρίωση των παραμέτρων αυτών διαμορφώνει το υπόβαθρο για την επακριβή αναπαράσταση της ενεργειακής λειτουργίας του κτιρίου εντός του υπολογιστικού μοντέλου. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται ότι η σύγκριση με το Κτίριο Αναφοράς είναι ουσιαστική και αποτυπώνει τις πραγματικές αποδόσεις του εξεταζόμενου κτιρίου.

Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές και παραδοχές που υιοθετήθηκαν για το συγκεκριμένο πραγματικό κτίριο στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης.

### 3.3.1 Προφίλ Λειτουργίας, Θερμικές Παραδοχές και Εσωτερικά Φορτία Πραγματικού Κτιρίου

Η πρώτη βασική κατηγορία παραμέτρων που απαιτείται για τη μοντελοποίηση του πραγματικού κτιρίου αφορά στο προφίλ λειτουργίας και στις συναφείς εσωτερικές παραμέτρους άνεσης και θερμικών φορτίων. Οι παράμετροι αυτοί είναι καθοριστικοί, καθώς επηρεάζουν άμεσα τόσο τα λειτουργικά θερμικά φορτία του κτιρίου (λόγω της ανθρώπινης παρουσίας και των εσωτερικών κερδών), όσο και τις στόχες θερμικής άνεσης που το σύστημα θέρμανσης και ψύξης καλείται να διατηρήσει.

Σε αντίθεση με το Κτίριο Αναφοράς, όπου οι σχετικές παραδοχές ορίζονται με τυποποιημένο τρόπο από τον KENAK, στην περίπτωση του πραγματικού κτιρίου οι τιμές αυτές προσαρμόστηκαν με βάση:

- τον τύπο του εξεταζόμενου κτιρίου (κατοικία),
- την εμπειρική καταγραφή τυπικών ελληνικών πρακτικών,
- τεκμηρίωση από τις TOTEE,
- τις βέλτιστες πρακτικές προσομοίωσης.

Η συλλογή και οργάνωση αυτών των δεδομένων πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης και οι τελικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στη συνέχεια.

### Ωράριο Λειτουργίας

Για το εξεταζόμενο πραγματικό κτίριο (κατοικία), θεωρήθηκε ότι οι χώροι κατοικίας βρίσκονται σε λειτουργία για 18 ώρες ημερησίως, όλες τις ημέρες της εβδομάδας και σε όλη τη διάρκεια του έτους. Το σενάριο αυτό αντανακλά την τυπική χρήση κατοικιών, όπου οι χώροι είναι θερμαινόμενοι ή ψυχόμενοι ανάλογα με τις απαιτήσεις των ενοίκων καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, με εξαίρεση ώρες νυχτερινής αδράνειας.

### Περίοδοι Θέρμανσης και Ψύξης

Οι περίοδοι λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης προσαρμόστηκαν ανά κλιματική ζώνη, σύμφωνα με τις παρακάτω παραδοχές:

*Πίνακας 3.3: Περίοδοι λειτουργίας θέρμανσης και ψύξης Κτιρίου Αναφοράς ανά Κλιματική Ζώνη (KENAK)*

| Κλιματική Ζώνη | Θέρμανση                   | Ψύξη                      |
|----------------|----------------------------|---------------------------|
| A              | 1 Νοεμβρίου – 1 Απριλίου   | 15 Μαΐου – 15 Σεπτεμβρίου |
| B              | 1 Νοεμβρίου – 1 Απριλίου   | 15 Μαΐου – 15 Σεπτεμβρίου |
| Γ              | 15 Οκτωβρίου – 30 Απριλίου | 1 Ιουνίου – 31 Αυγούστου  |
| Δ              | 15 Οκτωβρίου – 30 Απριλίου | 1 Ιουνίου – 31 Αυγούστου  |

Αυτά τα χρονικά διαστήματα αντιστοιχούν σε τυπικές πρακτικές χρήσης συστημάτων HVAC στον ελληνικό κτιριακό τομέα για κατοικίες και προσαρμόστηκαν ώστε να αντικατοπτρίζουν ρεαλιστικά τις ανάγκες άνεσης των χρηστών.

### Τιμές Εσωτερικής Θερμοκρασίας και Υγρασίας

Οι στόχες θερμικής άνεσης, τους οποίους επιδιώκουν να διατηρήσουν τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης, καθορίστηκαν ως εξής:

**Πίνακας 3.4:** Τιμές εσωτερικής θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας Κτιρίου Αναφοράς (KENAK)

| Περίοδος  | Θερμοκρασία [°C] | Σχετική Υγρασία [%] |
|-----------|------------------|---------------------|
| Χειμερινή | 20               | 40                  |
| Θερινή    | 26               | 45                  |

Οι τιμές αυτές αντανakλούν συνθήκες θερμικής άνεσης αποδεκτές για κατοικίες, σύμφωνα με διεθνή πρότυπα και τις TOTEE, και χρησιμοποιήθηκαν ως στόχοι ελέγχου στα συστήματα θέρμανσης και ψύξης στο μοντέλο.

### Εκλυόμενη Θερμότητα Χρηστών

Η εκλυόμενη θερμότητα από τους χρήστες υπολογίστηκε με βάση τους παρακάτω συντελεστές:

- Θερμική ισχύς ανά άτομο: 80 W/άτομο
- Θερμική ισχύς ανά μονάδα δομημένης επιφάνειας: 4 W/m<sup>2</sup>
- Μέσος συντελεστής παρουσίας: 0,75

Ο τελευταίος παράγοντας (συντελεστής παρουσίας) χρησιμοποιείται για την προσαρμογή της ωριαίας κατανομής των θερμικών κερδών από τους ενοίκους, ώστε να αντικατοπτρίζει τον πραγματικό ρυθμό παρουσίας εντός των χώρων κατά τη διάρκεια της ημέρας.

### Εκλυόμενη Θερμική Ισχύς Ηλεκτρικών Συσκευών

Αντίστοιχα, για τα εσωτερικά θερμικά φορτία από ηλεκτρικές συσκευές υιοθετήθηκαν οι εξής τιμές:

- Ισχύς εξοπλισμού: 4 W/m<sup>2</sup>

- Μέσος συντελεστής ετεροχρονισμού: 0,5
- Ετεροχρονισμένη ισχύς εξοπλισμού: 2 W/m<sup>2</sup>
- Μέσος συντελεστής λειτουργίας: 0,75

Οι παράμετροι αυτοί λαμβάνουν υπόψη τόσο την ονομαστική ισχύ του εγκατεστημένου εξοπλισμού (μαγειρικές συσκευές, φωτιστικά, ψυγεία, κ.ά.), όσο και τον τυπικό τρόπο και συχνότητα χρήσης τους από τους ενοίκους.

### 3.3.2 Αερισμός και Φωτισμός

Μετά τον ορισμό του προφίλ λειτουργίας και των εσωτερικών φορτίων, μία εξίσου κρίσιμη κατηγορία παραμέτρων που απαιτείται για τη μοντελοποίηση του πραγματικού κτιρίου αφορά στον αερισμό και στον φωτισμό των εσωτερικών χώρων.

Οι δύο αυτοί παράγοντες επηρεάζουν άμεσα:

- την ενεργειακή ισορροπία του κτιρίου (μέσω εισροής/απώλειας θερμότητας από τον αερισμό),
- τη ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος (επαρκής αερισμός για ποιότητα αέρα),
- την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (για φωτισμό),
- τα εσωτερικά θερμικά φορτία (λόγω θερμότητας από τα φωτιστικά σώματα).

Οι σχετικές παραδοχές για την παρούσα μελέτη προσαρμόστηκαν με βάση την τεκμηρίωση του KENAK και των TOTEE, αλλά και τυπικές τιμές χρήσης σε κατοικίες, όπως αυτές αποτυπώθηκαν στο πλαίσιο της συλλογής δεδομένων.

#### Αερισμός

Ο αερισμός του πραγματικού κτιρίου προσομοιώθηκε σύμφωνα με τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Πλήθος ατόμων / 100 m<sup>2</sup> δομημένης επιφάνειας: 5 άτομα
- Απαιτούμενος νωπός αέρας ανά άτομο: 15 m<sup>3</sup>/h/άτομο
- Απαιτούμενος νωπός αέρας ανά μονάδα επιφάνειας: 0,75 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup>

Οι τιμές αυτές διαμορφώθηκαν έτσι ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής ανανέωση του αέρα στους εσωτερικούς χώρους, σύμφωνα με τις απαιτήσεις για ποιότητα εσωτερικού αέρα (Indoor Air Quality – IAQ). Το σενάριο αυτό αντανακλά τυπικά επίπεδα αερισμού σε σύγχρονες κατοικίες και λαμβάνει υπόψη τόσο τις υποχρεωτικές απαιτήσεις αερισμού, όσο και την πρακτική συμπεριφορά των χρηστών (π.χ. φυσικός ή μηχανικός αερισμός).

Η ενσωμάτωση των ανωτέρω παραμέτρων στο υπολογιστικό μοντέλο επηρεάζει άμεσα:

- τις θερμικές απώλειες κατά τους χειμερινούς μήνες (εισαγωγή ψυχρού αέρα),
- τα θερμικά κέρδη κατά τους θερινούς μήνες (εισαγωγή θερμού αέρα),
- τη συνολική απαίτηση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη.

## Φωτισμός

Η προσομοίωση του φωτισμού του πραγματικού κτιρίου βασίστηκε στις εξής παραδοχές:

- Στάθμη φωτισμού (illuminance): 200 lux
- Επίπεδο αναφοράς μέτρησης: 0,8 m (δηλαδή στο ύψος τυπικής επιφάνειας εργασίας/χρήσης)
- Ισχύς για ελάχιστες απαιτήσεις φωτισμού: 5,6 W/m<sup>2</sup>

Η επιλεγμένη στάθμη φωτισμού (200 lux) είναι κατάλληλη για γενικούς χώρους κατοικίας, όπου δεν απαιτείται υψηλός εξειδικευμένος φωτισμός (π.χ. γραφειακός χώρος). Η ισχύς φωτισμού επιλέχθηκε ώστε να αντανakλά τη σύγχρονη πρακτική σε κατοικίες, όπου χρησιμοποιούνται ενεργειακά αποδοτικά φωτιστικά σώματα (π.χ. LED).

Η παράμετρος αυτή επηρεάζει:

- την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για φωτισμό,
- και, έμμεσα, τα εσωτερικά θερμικά κέρδη (καθώς μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα).

### 3.3.3 Ζεστό Νερό Χρήσης (ZNX)

Η επαρκής κάλυψη των αναγκών για Ζεστό Νερό Χρήσης (ZNX) αποτελεί βασικό ενεργειακό φορτίο σε κατοικίες και, κατά συνέπεια, κρίσιμη παράμετρο στην ενεργειακή μοντελοποίηση του πραγματικού κτιρίου. Στο πλαίσιο αυτής της μελέτης, οι σχετικές παραδοχές τεκμηριώθηκαν τόσο με βάση τα οριζόμενα από τις TOTEΕ του KENAK, όσο και από την τυπική εμπειρική χρήση σε οικιακό περιβάλλον.

Η τελική διαμόρφωση των τιμών που ενσωματώθηκαν στο μοντέλο pyBuildings περιλαμβάνει δύο βασικά επίπεδα παραμετροποίησης:

## Ημερήσια και Ετήσια Κατανάλωση ZNX

Για την εκτίμηση των απαιτήσεων σε ZNX χρησιμοποιούνται οι εξής τιμές:

- Ημερήσια κατανάλωση ZNX: 50 λίτρα/άτομο/ημέρα
- Ετήσια κατανάλωση ZNX: 27,38 m<sup>3</sup>/υπονοδωμάτιο/έτος

Οι παραπάνω τιμές είναι σύμφωνες με το πρότυπο υπολογισμού του KENAK για κατοικίες και ενσωματώνονται στην προσομοίωση με τρόπο που επιτρέπει την εκτίμηση της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας για την κάλυψη των φορτίων ZNX, λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των ενοίκων και των υπονοδωμάτων του εξεταζόμενου κτιρίου.

### Θερμοκρασία Δικτύου Παροχής Κρύου Νερού

Η ενεργειακή απαίτηση για ZNX εξαρτάται άμεσα από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιθυμητής θερμοκρασίας του νερού (συνήθως ~55 °C) και της εκάστοτε μηνιαίας θερμοκρασίας του νερού του δικτύου, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με τη κλιματική ζώνη και τον μήνα του έτους.

Για την προσομοίωση χρησιμοποιούνται οι τιμές θερμοκρασίας παροχής όπως καθορίζονται για κάθε κλιματική ζώνη (Α, Β, Γ, Δ) και για κάθε μήνα. Ενδεικτικά παρατίθενται οι μηνιαίες μέσες θερμοκρασίες δικτύου:

**Πίνακας 3.5:** Μηνιαίες θερμοκρασίες παροχής δικτύου κρύου νερού ανά Κλιματική Ζώνη [°C] (KENAK)

| Μήνας       | Ζώνη Α | Ζώνη Β | Ζώνη Γ | Ζώνη Δ |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| Ιανουάριος  | 13,0   | 10,4   | 6,5    | 4,2    |
| Φεβρουάριος | 12,8   | 10,1   | 7,3    | 5,0    |
| Μάρτιος     | 13,8   | 11,7   | 9,4    | 7,5    |
| Απρίλιος    | 16,3   | 14,8   | 13,2   | 11,5   |
| Μάιος       | 19,9   | 18,9   | 17,6   | 15,7   |
| Ιούνιος     | 23,8   | 23,1   | 21,9   | 19,8   |
| Ιούλιος     | 26,2   | 25,6   | 24,3   | 22,2   |
| Αύγουστος   | 26,6   | 25,8   | 24,6   | 22,7   |
| Σεπτέμβριος | 24,9   | 23,5   | 22,0   | 20,2   |
| Οκτώβριος   | 21,7   | 19,7   | 17,7   | 15,9   |
| Νοέμβριος   | 18,1   | 15,5   | 12,7   | 10,8   |

| Μήνας      | Ζώνη Α | Ζώνη Β | Ζώνη Γ | Ζώνη Δ |
|------------|--------|--------|--------|--------|
| Δεκέμβριος | 14,8   | 12,2   | 8,6    | 6,6    |

### 3.3.4 Δομικά Στοιχεία – Θερμομονωτικές Ιδιότητες (U-values)

Ένα από τα βασικά κριτήρια που καθορίζουν την ενεργειακή συμπεριφορά ενός κτιρίου είναι οι θερμικές ιδιότητες των δομικών του στοιχείων. Οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας  $U$  [ $W/(m^2 \cdot K)$ ] αντικατοπτρίζουν τον ρυθμό απώλειας θερμότητας διαμέσου κάθε στοιχείου του κελύφους – τοίχων, δαπέδων, οροφών, κουφωμάτων και επομένως έχουν καθοριστικό ρόλο στον υπολογισμό των ενεργειακών απαιτήσεων.

Ο ΚΕΝΑΚ παρέχει συγκεκριμένους Πίνακες στους οποίους αποτυπώνονται οι τιμές  $U$  ανάλογα με την περίοδο κατασκευής ή ανακαίνισης του κτιρίου, καθώς και την ποιότητα της θερμομονωτικής του προστασίας. Οι σχετικές παραδοχές διαχωρίζονται ως εξής:

#### ❖ Κτίρια που κατασκευάστηκαν ή ανακαινίστηκαν πριν το 1980

Ο πίνακας αυτός αφορά δομικά στοιχεία χωρίς καμία θερμομονωτική παρέμβαση, όπως συναντώνται σε παλαιές κατοικίες πριν την καθιέρωση του Κανονισμού Θερμομόνωσης Κτιρίων (Κ.Θ.Κ.). Οι τιμές  $U$  είναι υψηλές, γεγονός που υποδεικνύει σημαντικές θερμικές απώλειες από όλες τις επιφάνειες (τοίχοι, οροφές, δάπεδα).

#### 1. Τοιχοποιίες από μπετόν

*Πίνακας 3.6: Συντελεστές θερμοπερατότητας τοιχοποιιών από μπετόν σε κτίρια χωρίς θερμομόνωση (πριν το 1980)*

| Κατασκευή              | Επαφή με αέρα        | Επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο | Επαφή με έδαφος      |
|------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|
| Χωρίς σοβά (γυμνό)     | 3,65 $W/m^2 \cdot K$ | 2,75 $W/m^2 \cdot K$          | 4,30 $W/m^2 \cdot K$ |
| Με σοβά                | 3,40                 | 2,60                          | —                    |
| Με επένδυση από τούβλα | 2,45                 | 2,00                          | 2,90                 |
| Με επένδυση από πέτρα  | 2,90                 | 2,30                          | 3,25                 |
| Με επένδυση από πλάκα  | 3,50                 | 2,05                          | 4,00                 |

| Κατασκευή                       | Επαφή με αέρα | Επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο | Επαφή με έδαφος |
|---------------------------------|---------------|-------------------------------|-----------------|
| Με επένδυση από γυψοσανίδα/ξύλο | 2,05          | 1,75                          | 2,25            |

Παρατήρηση: Το μπετόν χωρίς μόνωση εμφανίζει από τις υψηλότερες τιμές θερμοπερατότητας. Οι διακοσμητικές επενδύσεις (π.χ. πέτρα, πλάκα) προσφέρουν κάποια επιπλέον αντίσταση, αλλά η συνολική θερμική συμπεριφορά παραμένει φτωχή.

## 2. Τοιχοποιίες από τούβλα (διπλής στρώσης)

*Πίνακας 3.7: Συντελεστές θερμοπερατότητας τοιχοποιιών από διπλή στρώση τούβλων σε κτίρια χωρίς θερμομόνωση (πριν το 1980)*

| Κατασκευή                       | Επαφή με αέρα | Επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο | Επαφή με έδαφος |
|---------------------------------|---------------|-------------------------------|-----------------|
| Χωρίς σοβά (γυμνό)              | 2,30          | 1,90                          | 2,55            |
| Με σοβά                         | 2,20          | 1,85                          | —               |
| Με επένδυση από τούβλα          | 1,90          | 1,60                          | 2,05            |
| Με επένδυση από πέτρα           | 2,10          | 1,75                          | 2,25            |
| Με επένδυση από πλάκα           | 2,25          | 1,85                          | 2,45            |
| Με επένδυση από γυψοσανίδα/ξύλο | 1,55          | 1,35                          | 1,65            |

Παρατήρηση: Τα διπλά τούβλα προσφέρουν βελτιωμένη θερμομόνωση σε σχέση με το μπετόν, με U-values σημαντικά χαμηλότερες. Παρ' όλα αυτά, οι τιμές παραμένουν πάνω από τα σημερινά πρότυπα.

## 3. Τοιχοποιίες από τούβλα (μονής στρώσης)

*Πίνακας 3.8: Συντελεστές θερμοπερατότητας τοιχοποιιών από μονή στρώση τούβλων σε κτίρια χωρίς θερμομόνωση (πριν το 1980)*

| Κατασκευή  | Επαφή με αέρα | Επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο | Επαφή με έδαφος |
|------------|---------------|-------------------------------|-----------------|
| Χωρίς σοβά | 3,25          | 2,50                          | 3,75            |

| <b>Κατασκευή</b>                   | <b>Επαφή με<br/>αέρα</b> | <b>Επαφή με μη θερμαινόμενο<br/>χώρο</b> | <b>Επαφή με<br/>έδαφος</b> |
|------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|----------------------------|
| Με σοβά                            | 3,05                     | 2,40                                     | —                          |
| Με επένδυση από τούβλα             | 2,50                     | 2,00                                     | 2,75                       |
| Με επένδυση από πέτρα              | 2,80                     | 2,25                                     | 3,20                       |
| Με επένδυση από πλάκα              | 3,10                     | 2,40                                     | 3,55                       |
| Με επένδυση από<br>γυψοσανίδα/ξύλο | 1,90                     | 1,65                                     | 2,05                       |

Παρατήρηση: Η μονή τοιχοποιία χωρίς μόνωση είναι σημαντικά λιγότερο αποτελεσματική ενεργειακά. Η χρήση διακοσμητικών υλικών βελτιώνει ελαφρώς τις τιμές.

#### 4. Πέτρινοι τοίχοι

*Πίνακας 3.9: Συντελεστές θερμοπερατότητας πέτρινων τοιχοποιιών σε κτίρια χωρίς θερμομόνωση (πριν το 1980)*

| <b>Κατασκευή</b>                   | <b>Επαφή με<br/>αέρα</b> | <b>Επαφή με μη θερμαινόμενο<br/>χώρο</b> | <b>Επαφή με<br/>έδαφος</b> |
|------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|----------------------------|
| Χωρίς σοβά                         | 4,25                     | 3,10                                     | 5,00                       |
| Με σοβά                            | 3,85                     | 2,85                                     | —                          |
| Με επένδυση από τούβλα             | 2,85                     | 2,30                                     | 3,25                       |
| Με επένδυση από πλάκα              | 4,10                     | 3,00                                     | 4,95                       |
| Με επένδυση από<br>γυψοσανίδα/ξύλο | 2,30                     | 1,95                                     | 2,60                       |

Παρατήρηση: Οι πέτρινοι τοίχοι χωρίς θερμομόνωση παρουσιάζουν τις χειρότερες θερμικές επιδόσεις, με εξαιρετικά υψηλές τιμές U.

## 5. Στέγες

*Πίνακας 3.10: Συντελεστές θερμοπερατότητας στεγών σε κτίρια χωρίς θερμομόνωση (πριν το 1980)*

| Τύπος στέγης                           | Επαφή με<br>αέρα | Επαφή με μη θερμαινόμενο<br>χώρο | Επαφή με<br>έδαφος |
|----------------------------------------|------------------|----------------------------------|--------------------|
| Συμβατικού τύπου δώμα                  | 3,05             | —                                | —                  |
| Αεριζόμενο δώμα                        | —                | 3,70                             | —                  |
| Φυτεμένο δώμα                          | 1,20             | —                                | —                  |
| Οριζόντια οροφή κάτω από στέγη         | 3,70             | —                                | —                  |
| Οροφή κάτω από μη<br>θερμαινόμενο χώρο | —                | 2,90                             | —                  |
| Κεραμοσκεπή σε πλάκα                   | 4,70             | —                                | —                  |
| Κεραμοσκεπή σε ξύλινη στέγη            | 4,25             | —                                | —                  |

Παρατήρηση: Η ανεπαρκής θερμομόνωση των παλαιών στεγών οδηγεί σε σοβαρές θερμικές απώλειες από την οροφή, ειδικά το καλοκαίρι (υπερθέρμανση) και τον χειμώνα (απώλεια θέρμανσης).

## 6. Δάπεδα

*Πίνακας 3.11: Συντελεστές θερμοπερατότητας δαπέδων σε κτίρια χωρίς θερμομόνωση (πριν το 1980)*

| Θέση                          | U-value [W/m <sup>2</sup> ·K] |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Πάνω από πιλοτή               | 2,75                          |
| Επί εδάφους                   | 3,10                          |
| Πάνω από μη θερμαινόμενο χώρο | 2,00                          |

Παρατήρηση: Τα δάπεδα, ιδίως όταν βρίσκονται πάνω από μη θερμαινόμενο χώρο ή το έδαφος, παρουσιάζουν επίσης σημαντική θερμική διαρροή, ειδικά αν είναι κατασκευασμένα από σκυρόδεμα χωρίς θερμική διακοπή.

### ❖ Κτίρια που κατασκευάστηκαν ή ανακαινίστηκαν την περίοδο 1980 - 2010

Για τα κτίρια κατοικίας που κατασκευάστηκαν μεταξύ των ετών 1980 και 2010, εφαρμόστηκε σε μεγάλο βαθμό ο Κ.Θ.Κ. ο οποίος θεσμοθετήθηκε στην Ελλάδα το 1979. Ωστόσο, η εφαρμογή του δεν ήταν πάντα ολοκληρωμένη ή ενιαία, γεγονός που οδήγησε στη χρήση κατασκευαστικών λύσεων με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία σε σχέση με τα σύγχρονα πρότυπα.

Για τον λόγο αυτό, η περίοδος αυτή περιγράφεται με ειδικό πίνακα, ο οποίος περιλαμβάνει τιμές συντελεστών θερμοπερατότητας (U-values) για διάφορους τύπους δομικών στοιχείων, υλικών και επενδύσεων. Οι τιμές U που παρουσιάζονται είναι σαφώς βελτιωμένες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες της περιόδου πριν το 1980, αλλά δεν ανταποκρίνονται ακόμη στις απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης που τέθηκαν μετά την εφαρμογή του ΚΕΝΑΚ (2010).

Ακολουθεί ο πλήρης πίνακας των τιμών U για τα δομικά στοιχεία της περιόδου 1980–2010:

#### 1. Τοιχοποιίες από μπετόν

*Πίνακας 3.12: Συντελεστές θερμοπερατότητας τοιχοποιιών από μπετόν με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία σε κτίρια περιόδου 1980-2010*

| Κατασκευή                     | Επαφή με αέρα            | Επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο | Επαφή με έδαφος          |
|-------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Χωρίς σοβά (γυμνό)            | 1,00 W/m <sup>2</sup> ·K | 0,90 W/m <sup>2</sup> ·K      | 1,05 W/m <sup>2</sup> ·K |
| Με σοβά                       | 1,00                     | 0,90                          | —                        |
| Επένδυση με τούβλα            | 0,90                     | 0,85                          | 0,95                     |
| Επένδυση με πέτρα             | 0,90                     | 0,85                          | 0,95                     |
| Επένδυση με πλάκα             | 1,00                     | 0,90                          | 1,05                     |
| Επένδυση με γυψοσανίδα ή ξύλο | 0,80                     | 0,75                          | 0,85                     |

#### 2. Τοιχοποιίες από τούβλα (διπλής στρώσης)

*Πίνακας 3.13: Συντελεστές θερμοπερατότητας τοιχοποιιών από διπλή στρώση τούβλων με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία σε κτίρια περιόδου 1980-2010*

| Κατασκευή  | Επαφή με αέρα | Επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο | Επαφή με έδαφος |
|------------|---------------|-------------------------------|-----------------|
| Χωρίς σοβά | 0,85          | 0,80                          | 0,90            |

| Κατασκευή                   | Επαφή με αέρα | Επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο | Επαφή με έδαφος |
|-----------------------------|---------------|-------------------------------|-----------------|
| Με σοβά                     | 0,85          | 0,80                          | —               |
| Επένδυση με τούβλα          | 0,80          | 0,75                          | 0,85            |
| Επένδυση με πέτρα           | 0,80          | 0,75                          | 0,85            |
| Επένδυση με πλάκα           | 0,85          | 0,80                          | 0,85            |
| Επένδυση με γυψοσανίδα/ξύλο | 0,70          | 0,70                          | 0,75            |

### 3. Τοιχοποιίες από τούβλα (μονής στρώσης)

*Πίνακας 3.14: Συντελεστές θερμοπερατότητας τοιχοποιιών από μονή στρώση τούβλων με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία σε κτίρια περιόδου 1980-2010*

| Κατασκευή                   | Επαφή με αέρα | Επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο | Επαφή με έδαφος |
|-----------------------------|---------------|-------------------------------|-----------------|
| Χωρίς σοβά                  | 0,95          | 0,90                          | 1,00            |
| Με σοβά                     | 0,95          | 0,85                          | —               |
| Επένδυση με τούβλα          | 0,85          | 0,80                          | 0,90            |
| Επένδυση με πέτρα           | 0,90          | 0,85                          | 0,95            |
| Επένδυση με πλάκα           | 0,95          | 0,85                          | 1,00            |
| Επένδυση με γυψοσανίδα/ξύλο | 0,80          | 0,75                          | 0,85            |

### 4. Πέτρινοι τοίχοι

*Πίνακας 3.15: Συντελεστές θερμοπερατότητας πέτρινων τοιχοποιιών με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία σε κτίρια περιόδου 1980-2010*

| Κατασκευή  | Επαφή με αέρα | Επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο | Επαφή με έδαφος |
|------------|---------------|-------------------------------|-----------------|
| Χωρίς σοβά | 1,05          | 0,95                          | 1,10            |

| Κατασκευή                   | Επαφή με αέρα | Επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο | Επαφή με έδαφος |
|-----------------------------|---------------|-------------------------------|-----------------|
| Με σοβά                     | 1,00          | 0,95                          | —               |
| Επένδυση με τούβλα          | 0,90          | 0,85                          | 0,95            |
| Επένδυση με πλάκα           | 1,00          | 0,95                          | 1,05            |
| Επένδυση με γυψοσανίδα/ξύλο | 0,85          | 0,80                          | 0,90            |

## 5. Στέγες

*Πίνακας 3.16: Συντελεστές θερμοπερατότητας οροφών και στεγών με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία σε κτίρια περιόδου 1980-2010*

| Τύπος                               | Επαφή με αέρα | Επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο | Επαφή με έδαφος |
|-------------------------------------|---------------|-------------------------------|-----------------|
| Συμβατικού τύπου δώμα               | 0,95          | —                             | —               |
| Αναστραμμένου τύπου δώμα            | 0,95          | —                             | —               |
| Αεριζόμενο δώμα                     | 1,00          | —                             | —               |
| Φυτεμένο δώμα                       | 0,70          | —                             | —               |
| Οριζόντια οροφή κάτω από στέγη      | 1,00          | —                             | —               |
| Οροφή κάτω από μη θερμαινόμενο χώρο | —             | 0,90                          | —               |
| Κεραμοσκεπή σε πλάκα                | 1,05          | —                             | —               |
| Κεραμοσκεπή σε ξύλινη στέγη         | 1,00          | —                             | —               |

## 6. Δάπεδα

*Πίνακας 3.17: Συντελεστές θερμοπερατότητας δαπέδων με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία σε κτίρια περιόδου 1980-2010*

| Θέση            | U-value |
|-----------------|---------|
| Πάνω από πιλοτή | 0,90    |

| Θέση                          | U-value |
|-------------------------------|---------|
| Επί εδάφους                   | 0,95    |
| Πάνω από μη θερμαινόμενο χώρο | 0,80    |

Η περίοδος 1980–2010 χαρακτηρίζεται από μία μεταβατική φάση στην ενεργειακή συμπεριφορά των κατοικιών. Αν και είχε εισαχθεί ο Κ.Θ.Κ., στην πράξη δεν επιβλήθηκε ποτέ με αυστηρότητα ή δεν εφαρμόστηκε ομοιόμορφα. Αυτό αντικατοπτρίζεται στα U-values του Πίνακα 5.2, οι οποίες αν και χαμηλότερες από εκείνες της προηγούμενης περιόδου, παραμένουν αρκετά υψηλές με βάση τα σύγχρονα πρότυπα.

Στην ουσία, τα δομικά στοιχεία των κτιρίων αυτής της περιόδου επιτρέπουν σημαντικές θερμικές απώλειες, παρά τις μικρές βελτιώσεις που προσέφεραν το σοβάτισμα ή οι επενδύσεις. Ο βαθμός θερμικής προστασίας χαρακτηρίζεται ως ανεπαρκής και αποτελεί βασικό λόγο για τον οποίο πολλές κατοικίες αυτής της περιόδου αποτελούν σήμερα στόχο για παρεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης μέσω των προγραμμάτων «Εξοικονομώ».

#### ❖ Κτίρια που κατασκευάστηκαν ή ανακαινίστηκαν την περίοδο 2010 - 2017

Για τα κτίρια που ανεγέρθηκαν ή ανακαινίστηκαν κατά την περίοδο 2010–2017 εφαρμόζεται ένα νέο πλαίσιο ενεργειακών απαιτήσεων, το οποίο συνοψίζεται στον Πίνακα 5.3. Ο πίνακας αυτός καθορίζει τις ανώτατες επιτρεπόμενες τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας (U-value) για κάθε κατηγορία δομικού στοιχείου, λαμβάνοντας υπόψη και τη γεωγραφική θέση του κτιρίου μέσω της ένταξής του σε μία από τις τέσσερις κλιματικές ζώνες της Ελλάδας (Α, Β, Γ, Δ).

Η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται από ενίσχυση των απαιτήσεων θερμομονωτικής προστασίας σε σχέση με τις προηγούμενες δεκαετίες. Οι τιμές U που προβλέπονται είναι σαφώς χαμηλότερες, γεγονός που σημαίνει μικρότερες θερμικές απώλειες και καλύτερη ενεργειακή συμπεριφορά του κελύφους.

Παρακάτω παρατίθεται ο πλήρης πίνακας:

*Πίνακας 3.18: Μέγιστοι επιτρεπόμενοι συντελεστές θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων με αυξημένη θερμομονωτική προστασία σε κτίρια περιόδου 2010-2017*

| Δομικό στοιχείο                                | Ζώνη Α | Ζώνη Β | Ζώνη Γ | Ζώνη Δ |
|------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Εξωτερική οροφή (σε επαφή με εξωτερικό αέρα)   | 0,50   | 0,45   | 0,40   | 0,35   |
| Εξωτερικός τοίχος (σε επαφή με εξωτερικό αέρα) | 0,60   | 0,50   | 0,45   | 0,40   |

| Δομικό στοιχείο                                   | Ζώνη Α | Ζώνη Β | Ζώνη Γ | Ζώνη Δ |
|---------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Δάπεδο σε επαφή με εξωτερικό αέρα (πilotή)        | 0,50   | 0,45   | 0,40   | 0,35   |
| Οροφή σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο            | 1,20   | 0,90   | 0,75   | 0,70   |
| Τοίχος σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο           | 1,50   | 1,00   | 0,80   | 0,70   |
| Δάπεδο σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο           | 1,20   | 0,90   | 0,75   | 0,70   |
| Οροφή σε επαφή με το έδαφος                       | 1,20   | 0,90   | 0,75   | 0,70   |
| Τοίχος σε επαφή με το έδαφος                      | 1,50   | 1,00   | 0,80   | 0,70   |
| Δάπεδο σε επαφή με το έδαφος                      | 1,20   | 0,90   | 0,75   | 0,70   |
| Κούφωμα με υαλοπίνακα (εξωτερικός αέρας)          | 3,20   | 3,00   | 2,80   | 2,60   |
| Κούφωμα χωρίς υαλοπίνακα (εξωτερικός αέρας)       | 3,20   | 3,00   | 2,80   | 2,60   |
| Γυάλινη πρόσοψη (εξωτερικός αέρας)                | 2,20   | 2,00   | 1,80   | 1,80   |
| Κούφωμα σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο          | 5,70   | 5,20   | 4,80   | 4,40   |
| Κούφωμα χωρίς υαλοπίνακα (μη θερμαινόμενος χώρος) | 5,70   | 5,20   | 4,80   | 4,40   |
| Γυάλινη πρόσοψη (μη θερμαινόμενος χώρος)          | 4,00   | 3,60   | 3,10   | 2,90   |

Οι τιμές του πίνακα αντανακλούν ένα πιο σύγχρονο πρότυπο θερμικής προστασίας, με κύριο στόχο τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης στα νέα ή ανακαινισμένα κτίρια. Οι απαιτήσεις είναι αυστηρότερες στη Ζώνη Δ (π.χ. Φλώρινα, Γρεβενά), λόγω των πιο έντονων χειμερινών συνθηκών, και χαλαρότερες στη Ζώνη Α (π.χ. Κρήτη, Δωδεκάνησα), όπου η θερμαντική επιβάρυνση είναι μικρότερη.

Αξιοσημείωτο είναι ότι για τα κουφώματα, παρά τη σημαντική πρόοδο στον τομέα των υαλοπινάκων και των πλαισίων, επιτρέπονται ακόμη σχετικά υψηλές τιμές θερμοπερατότητας, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στην ανάγκη ισορροπίας μεταξύ απόδοσης και κόστους.

#### ❖ Κτίρια που κατασκευάστηκαν ή ανακαινίστηκαν μετά το 2017

Για τα κτίρια που ανεγέρθηκαν ή υπέστησαν ριζική ενεργειακή αναβάθμιση από το 2017 και μετά, ισχύει ένα πιο αυστηρό κανονιστικό πλαίσιο όσον αφορά τη θερμομονωτική επάρκεια των δομικών στοιχείων. Οι μέγιστοι επιτρεπόμενοι συντελεστές θερμοπερατότητας (U-values) που επιβάλλονται είναι σημαντικά χαμηλότεροι σε σχέση με τις προηγούμενες περιόδους,

αποτυπώνοντας την προοδευτική σύγκλιση της ελληνικής νομοθεσίας με τις ευρωπαϊκές απαιτήσεις για σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας (NZEB).

Οι τιμές αυτές αφορούν όλα τα βασικά δομικά στοιχεία του κελύφους όπως οροφές, τοίχους, δάπεδα, κουφώματα και διαφοροποιούνται ανάλογα με την κλιματική ζώνη (Α έως Δ), ώστε να προσαρμόζονται στις τοπικές θερμοκρασιακές συνθήκες. Ειδικότερα, οι πιο αυστηρές απαιτήσεις εντοπίζονται στη Ζώνη Δ, ενώ η Ζώνη Α (νοτιότερα νησιά) παραμένει πιο «ελαστική» λόγω ηπιότερου κλίματος.

Ακολουθεί ο πλήρης πίνακας θερμοπερατότητας για την εν λόγω περίοδο:

**Πίνακας 3.19:** Μέγιστοι επιτρεπόμενοι συντελεστές θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων με ενισχυμένη θερμομονωτική προστασία σε κτίρια περιόδου μετά το 2017

| Δομικό στοιχείο                                   | Ζώνη Α | Ζώνη Β | Ζώνη Γ | Ζώνη Δ |
|---------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Εξωτερική οροφή σε επαφή με εξωτερικό αέρα        | 0,45   | 0,40   | 0,35   | 0,30   |
| Εξωτερικός τοίχος σε επαφή με εξωτερικό αέρα      | 0,55   | 0,45   | 0,40   | 0,35   |
| Δάπεδο σε επαφή με εξωτερικό αέρα (πilotή)        | 0,45   | 0,40   | 0,35   | 0,30   |
| Οροφή σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο            | 1,10   | 0,80   | 0,65   | 0,60   |
| Τοίχος σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο           | 1,30   | 0,90   | 0,70   | 0,65   |
| Δάπεδο σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο           | 1,10   | 0,80   | 0,65   | 0,60   |
| Οροφή σε επαφή με το έδαφος                       | 1,10   | 0,80   | 0,65   | 0,60   |
| Τοίχος σε επαφή με το έδαφος                      | 1,30   | 0,90   | 0,70   | 0,65   |
| Δάπεδο σε επαφή με το έδαφος                      | 1,10   | 0,80   | 0,65   | 0,60   |
| Κούφωμα με υαλοπίνακα (εξωτερικός αέρας)          | 2,80   | 2,60   | 2,40   | 2,20   |
| Κούφωμα χωρίς υαλοπίνακα (εξωτερικός αέρας)       | 2,80   | 2,60   | 2,40   | 2,20   |
| Γυάλινη πρόσοψη (εξωτερικός αέρας)                | 2,10   | 1,90   | 1,75   | 1,70   |
| Κούφωμα σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο          | 5,00   | 4,60   | 4,30   | 4,00   |
| Κούφωμα χωρίς υαλοπίνακα (μη θερμαινόμενος χώρος) | 5,00   | 4,60   | 4,30   | 4,00   |
| Γυάλινη πρόσοψη (μη θερμαινόμενος χώρος)          | 3,80   | 3,40   | 3,00   | 2,80   |

Η περίοδος μετά το 2017 αντιπροσωπεύει μια σαφή ποιοτική αναβάθμιση στα πρότυπα θερμικής προστασίας. Οι συντελεστές  $U$  έχουν υποχωρήσει αισθητά σε όλες τις ζώνες και σε όλα τα είδη δομικών στοιχείων:

- Για τις οροφές και τα εξωτερικά τοιχώματα, οι νέες απαιτήσεις κινούνται σε επίπεδα πολύ πιο κοντά σε παθητικές προσεγγίσεις.
- Οι τιμές για κουφώματα έχουν μειωθεί ελαφρώς σε σχέση με την προηγούμενη περίοδο, ενθαρρύνοντας τη χρήση ενεργειακών υαλοπινάκων.
- Παρατηρείται επίσης αυστηρότερη προσέγγιση για τοίχους και δάπεδα σε επαφή με έδαφος ή μη θερμαινόμενους χώρους, περιορίζοντας έτσι περαιτέρω τις θερμικές απώλειες από έμμεσες επιφάνειες.

Η συγκεκριμένη κανονιστική προσέγγιση αποτελεί ένα ενδιάμεσο βήμα προς την εναρμόνιση με τα πρότυπα NZEB, προωθώντας ενεργειακά αποδοτικότερα κελύφη, χωρίς να απαιτείται ακόμα πλήρης παθητική σχεδίαση. Οι τιμές αυτές λειτουργούν ως κατώτατο όριο σχεδιασμού για μηχανολόγους και αρχιτέκτονες που επιδιώκουν τη συμμόρφωση με το ισχύον ρυθμιστικό πλαίσιο.

### 3.3.5 Υαλοπίνακες - Τύποι και Θερμική Συμπεριφορά

Τα ανοίγματα των κτιρίων, και ειδικότερα οι υαλοπίνακες, αποτελούν έναν από τους πλέον ευάλωτους τομείς ως προς τις θερμικές απώλειες. Ο δείκτης  $U_g$  (U-value of glazing) εκφράζει τη θερμοπερατότητα του υαλοστασίου και χρησιμοποιείται ευρέως σε μελέτες ενεργειακής απόδοσης για να προσδιορίσει την απώλεια θερμότητας μέσω της γυάλινης επιφάνειας ενός κουφώματος. Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή του  $U_g$ , τόσο καλύτερη είναι η θερμομονωτική συμπεριφορά του υαλοπίνακα.

Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει τις βασικές τιμές του συντελεστή  $U_g$  για διαφορετικούς τύπους υαλοπινάκων, όπως χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις ενεργειακής απόδοσης και ορίζονται από τα εθνικά πρότυπα και την τεχνική τεκμηρίωση του KENAK και της TOTEE:

**Πίνακας 3.20:** Συντελεστές θερμοπερατότητας υαλοπινάκων ( $U_g$ ) ανάλογα με τον τύπο και το επίπεδο θερμομονωτικής προστασίας

| Τύπος Υαλοπίνακα                         | $U_g$<br>[W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
|------------------------------------------|----------------------------------|
| Μονός υαλοπίνακας                        | 5,7                              |
| Δίδυμος υαλοπίνακας με διάκενο αέρα 6 mm | 3,3                              |

| Τύπος Υαλοπίνακα                                                                                                 | $U_g$<br>[W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Δίδυμος υαλοπίνακας με διάκενο αέρα 12 mm                                                                        | 2,8                              |
| Δίδυμος υαλοπίνακας με διάκενο 6 mm και με επίστρωση μεμβράνης χαμηλής εκπεμπτικότητας ( $\varepsilon = 0,10$ )  | 2,6                              |
| Δίδυμος υαλοπίνακας με διάκενο 12 mm και με επίστρωση μεμβράνης χαμηλής εκπεμπτικότητας ( $\varepsilon = 0,10$ ) | 1,8                              |
| Υαλότουβλα (glass blocks)                                                                                        | 3,5                              |

Οι παραπάνω τιμές αντανakλούν διαφορετικά επίπεδα θερμομονωτικής επίδοσης ανάλογα με τη δομή και την τεχνολογία του υαλοπίνακα:

- Μονός υαλοπίνακας ( $U_g = 5,7$ ):  
Αποτελεί τη βασική και πλέον απαρχειωμένη μορφή υάλωσης. Συναντάται συνήθως σε κτίρια παλαιότερων δεκαετιών, χωρίς θερμομονωτικές επεμβάσεις. Η θερμική του απόδοση είναι εξαιρετικά χαμηλή και δεν ανταποκρίνεται στις σύγχρονες ενεργειακές απαιτήσεις.
- Δίδυμοι υαλοπίνακες με διάκενο ( $U_g = 3,3$  έως  $2,8$ ):  
Πρόκειται για την πλέον διαδεδομένη λύση στα περισσότερα κτίρια μέσης ηλικίας. Το διάκενο αέρα μεταξύ των δύο φύλλων υάλου περιορίζει σημαντικά τις απώλειες, με καλύτερη απόδοση όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του διακένου. Είναι κατάλληλοι για κτίρια μερικώς ενεργειακά αναβαθμισμένα.
- Δίδυμοι υαλοπίνακες με επίστρωση χαμηλής εκπομπής – Low-E ( $U_g = 2,6$  έως  $1,8$ ):  
Η τεχνολογία χαμηλής εκπεμπτικότητας εφαρμόζεται σε συνδυασμό με το διάκενο αέρα, επιτρέποντας την ανάκλαση της θερμικής ακτινοβολίας πίσω στον εσωτερικό χώρο. Οι υαλοπίνακες αυτοί εξασφαλίζουν υψηλή θερμική απόδοση και χρησιμοποιούνται ευρέως σε νέα κτίρια ή σε κτίρια που στοχεύουν σε σχεδόν μηδενική ενεργειακή κατανάλωση (NZEB).
- Υαλότουβλα ( $U_g = 3,5$ ):  
Χρησιμοποιούνται κυρίως για αρχιτεκτονικές εφαρμογές σε εσωτερικούς διαχωρισμούς ή φωταγωγούς. Δεν συνιστώνται για κύρια ανοίγματα, καθώς παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές θερμοπερατότητας σε σχέση με τους σύγχρονους υαλοπίνακες.

Η θερμική απόδοση των υαλοπινάκων είναι καθοριστική για τη συνολική ενεργειακή συμπεριφορά ενός κτιρίου. Οι μονές υαλώσεις αντιστοιχούν σε τεχνολογίες παρωχημένες και δεν πληρούν τα ελάχιστα πρότυπα. Από την άλλη πλευρά, οι δίδυμοι υαλοπίνακες με Low-E επικάλυψη και αυξημένο διάκενο παρέχουν ουσιαστική θερμική θωράκιση και εξασφαλίζουν αισθητά μειωμένες θερμικές απώλειες, καθιστώντας τους την προτιμώμενη επιλογή στις νέες κατασκευές και στις επεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης.

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου υαλοπίνακα, σε συνδυασμό με το κατάλληλο πλαίσιο, συμβάλλει αποφασιστικά στη μείωση του φορτίου ψύξης και θέρμανσης, και άρα στην επίτευξη υψηλής ενεργειακής απόδοσης.

### **3.3.6 Οπτικές και Θερμικές Ιδιότητες Επιφανειών Κελύφους**

Για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς του κτιριακού κελύφους, είναι απαραίτητο να συνεκτιμηθούν όχι μόνο οι συντελεστές θερμοπερατότητας (U-values), αλλά και άλλες φυσικές ιδιότητες των δομικών υλικών και επιφανειών. Οι ιδιότητες αυτές σχετίζονται με τη συμπεριφορά των επιφανειών στην ηλιακή και θερμική ακτινοβολία και περιλαμβάνουν:

- Ανακλαστικότητα (albedo): ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από την επιφάνεια.
- Απορροφητικότητα: ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται.
- Συντελεστής εκπομπής (emissivity): ικανότητα μιας επιφάνειας να αποβάλλει θερμική ακτινοβολία.
- Ηλιακή διαπερατότητα (g-value): ποσοστό της συνολικής ηλιακής ενέργειας που εισέρχεται μέσω διαφανών στοιχείων.

Οι τιμές αυτές παίζουν κρίσιμο ρόλο σε δυναμικές ενεργειακές προσομοιώσεις και είναι καθοριστικές για τη σωστή επιλογή υλικών σε περιοχές με υψηλό ηλιακό φορτίο ή για εφαρμογές παθητικού σχεδιασμού.

#### **3.3.6.1 Ανακλαστικότητα και Απορροφητικότητα Δομικών Επιφανειών**

Οι τιμές που ακολουθούν διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος της επιφάνειας, κατακόρυφη ή οριζόντια, και επηρεάζουν την ηλιακή φόρτιση του κελύφους.

Κατακόρυφα Δομικά Στοιχεία (Τοίχοι, Όψεις):

**Πίνακας 3.21:** Ανακλαστικότητα και απορροφητικότητα κατακόρυφων δομικών επιφανειών του κελύφους

| Περιγραφή Επιφάνειας                                        | Ανακλαστικότητα | Απορροφητικότητα |
|-------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|
| Επίχρυσμα λευκό, λεία επιφάνεια (σπατουλαριστό)             | 0,70            | 0,30             |
| Ανοιχτόχρωμο επίχρυσμα (γκρι, μπεζ, κίτρινο, γαλάζιο κ.λπ.) | 0,60            | 0,40             |
| Μέτριας απόχρωσης επίχρυσμα (γκρι, όχρα, σομόν)             | 0,40            | 0,60             |
| Σκουρόχρωμο επίχρυσμα (λαδί, καφέ, σκούρο γκρι)             | 0,20            | 0,80             |
| Εμφανής λιθοδομή ή οπτοπλινθοδομή                           | 0,20            | 0,80             |
| Ανοιχτόχρωμη λιθοδομή ή οπτοπλινθοδομή                      | 0,40            | 0,60             |
| Στιλπνές μεταλλικές επιφάνειες (φύλλα αλουμινίου)           | 0,80            | 0,20             |
| Αδιαφανές τμήμα γυάλινης πρόσοψης (opaque panel)            | 0,40            | 0,60             |
| Φυτεμένη όψη με αειθαλή φυτά                                | 0,30            | 0,70             |

Οριζόντια Δομικά Στοιχεία (Οροφές, Δώματα):

**Πίνακας 3.22:** Ανακλαστικότητα και απορροφητικότητα οριζόντιων δομικών επιφανειών του κελύφους

| Περιγραφή Επιφάνειας                                    | Ανακλαστικότητα | Απορροφητικότητα |
|---------------------------------------------------------|-----------------|------------------|
| Κόκκινο κεραμίδι                                        | 0,40            | 0,60             |
| Πολύ σκούρες επιστρώσεις (ασφαλτόπανα)                  | 0,10            | 0,90             |
| Σκούρες επιστρώσεις (σχιστόπλακες, ασφατικά κεραμίδια)  | 0,20            | 0,80             |
| Ανοιχτόχρωμες επιστρώσεις (πλάκες, ασφαλτόπανα)         | 0,35            | 0,65             |
| Στιλπνές μεταλλικές επιφάνειες ή ανακλαστικές μεμβράνες | 0,80            | 0,20             |
| Γαρμπίλι                                                | 0,70            | 0,30             |
| Φυτεμένο δώμα (με πράσινη κάλυψη)                       | 0,30            | 0,70             |

Παρατήρηση: Η χρήση υλικών υψηλής ανακλαστικότητας συμβάλλει καθοριστικά στον περιορισμό των ηλιακών θερμικών κερδών κατά τη θερινή περίοδο. Ιδιαίτερα σε κλιματικές ζώνες με υψηλές ψυκτικές απαιτήσεις (Β, Γ, Δ), τα λευκά επιχρίσματα ή οι μεταλλικές ανακλαστικές επενδύσεις αποτελούν ενδεδειγμένες λύσεις.

### 3.3.6.2 Θερμική Εκπομπή Επιφανειών (Emissivity)

Η εκπομπή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας καθορίζεται από τον συντελεστή εκπομπής ( $\epsilon$ ). Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του, τόσο πιο αποδοτικά η επιφάνεια αποβάλλει θερμότητα προς το περιβάλλον, διευκολύνοντας τη νυχτερινή ψύξη.

**Πίνακας 3.23:** Συντελεστές θερμικής εκπομπής επιφανειών του κτιριακού κελύφους (emissivity)

| Τύπος Επιφάνειας                                    | Συντελεστής Εκπομπής |
|-----------------------------------------------------|----------------------|
| Σύνηθες δομικό υλικό (σοβάς, σκυρόδεμα, τοιχοποιία) | 0,80                 |
| Γυαλί                                               | 0,90                 |
| Στιλπνές μεταλλικές επιφάνειες                      | 0,20                 |
| Γαρμπίλι                                            | 0,30                 |
| Φυτεμένο δώμα ή φυτεμένη όψη με αειθαλή φυτά        | 0,80                 |

Παρατήρηση: Υλικά με υψηλή εκπομπή ευνοούν την αποβολή θερμότητας, κυρίως τη νύχτα. Αντίθετα, μεταλλικές επιφάνειες με χαμηλή εκπομπή διατηρούν τη θερμότητα, καθιστώντας τις λιγότερο αποδοτικές για παθητικές στρατηγικές δροσισμού.

### 3.3.6.3 Ηλιακή Διαπερατότητα Υαλοπινάκων (g-value) – Συνολική Συμπεριφορά

Η ηλιακή διαπερατότητα (g-value) εκφράζει το ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας που περνά μέσα από ένα υαλοστάσιο και συμβάλλει στη θέρμανση του εσωτερικού χώρου. Παράλληλα, η μέση διαπερατότητα στο ορατό φάσμα σχετίζεται με την είσοδο φυσικού φωτισμού και επηρεάζει την οπτική άνεση. Στην πράξη, ωστόσο, η συνολική απόδοση ενός κουφώματος εξαρτάται όχι μόνο από τον υαλοπίνακα αλλά και από τη συμμετοχή του πλαισίου (το οποίο δεν επιτρέπει ηλιακή διείσδυση).

Για τον λόγο αυτό, ο KENAK παρέχει τυπικές τιμές συνολικής ηλιακής διαπερατότητας, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά ποσοστά κάλυψης της επιφάνειας από πλαίσιο. Αυτό το μέγεθος είναι πιο ρεαλιστικό για χρήση σε ενεργειακές προσομοιώσεις και αξιολογήσεις.

**Πίνακας 3.24:** Συνολική ηλιακή διαπερατότητα υαλοπινάκων (g-value) ανάλογα με το ποσοστό κάλυψης από πλαίσιο

| Τύπος Υαλοπίνακα                                                        | 10%<br>Πλαίσιο | 20%<br>Πλαίσιο | 30%<br>Πλαίσιο | 40%<br>Πλαίσιο | 50%<br>Πλαίσιο |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Μονός υαλοπίνακας                                                       | 0,69           | 0,62           | 0,54           | 0,46           | 0,39           |
| Διπλός υαλοπίνακας                                                      | 0,61           | 0,54           | 0,48           | 0,41           | 0,34           |
| Διπλός υαλοπίνακας με Low-E<br>επίστρωση                                | 0,54           | 0,48           | 0,42           | 0,36           | 0,30           |
| Διπλό παράθυρο (διπλό κούφωμα)                                          | 0,61           | 0,54           | 0,48           | 0,41           | 0,34           |
| Έγχρωμος ή ανακλαστικός<br>υαλοπίνακας (χωρίς γνωστά<br>χαρακτηριστικά) | 0,41           | 0,36           | 0,32           | 0,27           | 0,23           |

Για σκοπούς συγκρισιμότητας, το κτίριο αναφοράς θεωρείται ότι διαθέτει  $g = 0,76$ ,  $g_{gl} = 0,68$ , και συνολική ηλιακή διαπερατότητα  $= 0,55$ , για λόγους εξισορρόπησης μεταξύ ηλιακών κερδών και θερμικών απωλειών.

### 3.3.7 Συντελεστής Σκίασης

Η παράμετρος του συντελεστή σκίασης αποτελεί βασικό στοιχείο για την αξιολόγηση της επίδρασης της σκίασης των δομικών στοιχείων στο θερμικό ισοζύγιο του κτιρίου. Χρησιμοποιείται για την προσαρμογή της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε εξωτερικές επιφάνειες κυρίως σε τοίχους και οροφές ανάλογα με το βαθμό έκθεσής τους στον ήλιο.

**Πίνακας 3.25:** Τυπικές τιμές συντελεστή σκίασης εξωτερικών επιφανειών του κτιριακού κελύφους ανά βαθμό έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία

| Περιγραφή έκθεσης εξωτερικής επιφάνειας | Συντελεστής σκίασης |
|-----------------------------------------|---------------------|
| Εκτεθειμένοι τοίχοι και στέγες          | 0,90                |
| Μερικώς σκιασμένες επιφάνειες           | 0,60                |
| Πλήρως σκιασμένες επιφάνειες            | 0,30                |

Οι τιμές του συντελεστή σκίασης αποτυπώνουν τον βαθμό έκθεσης μιας εξωτερικής επιφάνειας στην ηλιακή ακτινοβολία και καθορίζουν τη σχετική ένταση των ηλιακών κερδών:

- Εκτεθειμένες επιφάνειες (συντελεστής σκίασης = 0,90): Αντιστοιχούν σε επιφάνειες που δέχονται πλήρη ηλιακή ακτινοβολία καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και του έτους. Η τιμή 0,90 δηλώνει ουσιαστικά μηδενική σκίαση, με αποτέλεσμα την αύξηση των ηλιακών κερδών και κατ' επέκταση των ψυκτικών φορτίων, ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο. Για λόγους ομοιομορφίας και σύγκρισης, το κτίριο αναφοράς θεωρείται πλήρως εκτεθειμένο και επομένως λαμβάνεται αυτή η τιμή ως προεπιλεγμένη.
- Μερικώς σκιασμένες επιφάνειες (συντελεστής σκίασης = 0,60): Χαρακτηρίζονται από διαλείπουσα ή περιοδική σκίαση, λόγω παρουσίας γειτονικών κτισμάτων, φυτεμένων στοιχείων, ημιμόνιμων σκιάστρων ή γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κτιρίου. Η μέση τιμή 0,60 λαμβάνει υπόψη την εν μέρει παρεμπόδιση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας ή ορισμένων εποχών.
- Πλήρως σκιασμένες επιφάνειες (συντελεστής σκίασης = 0,30): Αναφέρονται σε περιπτώσεις όπου η επιφάνεια παραμένει κατά μεγάλο ποσοστό ή πλήρως σκιασμένη, είτε εξαιτίας της χωρικής διάταξης του οικοδομικού ιστού (π.χ. στενά αστικά δρομάκια), είτε λόγω της ύπαρξης μόνιμων σκιάστρων όπως πρόβολοι, μπαλκόνια ή παρεμβαλλόμενες κατασκευές. Οι επιφάνειες αυτές δέχονται ελάχιστη ηλιακή ακτινοβολία, μειώνοντας τα ηλιακά θερμικά κέρδη και τα ψυκτικά φορτία, κάτι που είναι επιθυμητό σε θερμά κλίματα.

Η τιμή του συντελεστή σκίασης ασκεί καθοριστική επίδραση στον υπολογισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις εξωτερικές επιφάνειες του κτιρίου, επηρεάζοντας άμεσα τη συνολική ενεργειακή του συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, καθορίζει την ένταση των ηλιακών θερμικών κερδών κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, στοιχείο κρίσιμο για τον σχεδιασμό παθητικών μέτρων δροσισμού. Επιπλέον, επηρεάζει την εποχιακή στρατηγική θέρμανσης, ιδιαίτερα σε νότια ανοίγματα, όπου η ενίσχυση της ηλιακής πρόσδοσης κατά τους χειμερινούς μήνες μπορεί να αξιοποιηθεί για τη μείωση των θερμικών απωλειών.

Ο συντελεστής σκίασης δεν λειτουργεί μεμονωμένα, αλλά σε συνδυασμό με άλλες παραμέτρους όπως η ανακλαστικότητα και η ηλιακή διαπερατότητα των επιφανειών και των υαλοστασίων. Μαζί, αυτοί οι συντελεστές προσδιορίζουν την ηλιακή συμπεριφορά του κελύφους, προσφέροντας μία ολοκληρωμένη εικόνα των θερμικών ροών που αναπτύσσονται λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας και επομένως, αποτελούν θεμελιώδες εργαλείο για τον ακριβή σχεδιασμό ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων.

### 3.3.8 Απόδοση Συστήματος Θέρμανσης - Λέβητες και Καυστήρες

Στην αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου, ιδιαίτερη σημασία έχει ο εποχιακός βαθμός απόδοσης του συστήματος θέρμανσης, δηλαδή η συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα του λέβητα – καυστήρα καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου λειτουργίας του. Ο KENAK και οι τεχνικές

του οδηγίες παρέχουν συγκεκριμένες τιμές και συντελεστές που χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση της απόδοσης του κτιρίου.

### 3.3.8.1 Εποχιακός βαθμός απόδοσης λέβητα - καυστήρα ( $nsK\theta$ )

Ο εποχιακός βαθμός απόδοσης ενός συστήματος καύσης εξαρτάται πρωτίτως από την ονομαστική του ισχύ ( $P_n$ ) και τη θερμοκρασία λειτουργίας του νερού (συνήθως στους 70 °C). Όσο μεγαλύτερη η ισχύς, τόσο υψηλότερη είναι η ενεργειακή του απόδοση. Στον παρακάτω πίνακα αποτυπώνονται οι τιμές απόδοσης που λαμβάνονται υπόψη για ένα πραγματικό κτίριο:

**Πίνακας 3.26:** Εποχιακός βαθμός απόδοσης λεβήτων - καυστήρων σε σχέση με την ονομαστική ισχύ

| Ονομαστική ισχύς (kW) | 4–25 | >25–50 | >50–100 | >100–200 | >200–300 | >300–400 | >400 |
|-----------------------|------|--------|---------|----------|----------|----------|------|
| Απόδοση (%)           | 78,1 | 81,4   | 81,8    | 85       | 85,35    | 85,6     | 86,8 |

Αυτές οι τιμές θεωρούνται τυπικές για συμβατικούς λέβητες και αποτελούν τη βάση συγκρίσεων για εναλλακτικά ή προηγμένα συστήματα θέρμανσης.

### 3.3.8.2 Συντελεστής μετατροπής εποχιακής απόδοσης ανά τύπο καυσίμου

Εκτός από την ισχύ, ο τύπος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου επηρεάζει τη συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Για κάθε καύσιμο, εφαρμόζεται ένας συντελεστής προσαρμογής της απόδοσης, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η πραγματική συμπεριφορά κατά τη λειτουργία:

**Πίνακας 3.27:** Συντελεστές προσαρμογής εποχιακής απόδοσης ανά τύπο καυσίμου

| Τύπος καυσίμου                                       | Συντελεστής |
|------------------------------------------------------|-------------|
| Πετρέλαιο                                            | 1,07        |
| Φυσικό αέριο                                         | 1,11        |
| Υγραέριο                                             | 1,09        |
| Πέλετς (A1, A2, B – Υγρασία M10) / Μπrikέτα A1 (M12) | 1,09        |
| Μπrikέτα A2 ή B (M15)                                | 1,10        |
| Καυσόξυλο A1 (M20)                                   | 1,11        |
| Καυσόξυλο A1 (M25)                                   | 1,12        |
| Ελαιοπυρηνόξυλο (M10)                                | 1,08        |

| Τύπος καυσίμου        | Συντελεστής |
|-----------------------|-------------|
| Ελαιοπυρηνόξυλο (M15) | 1,09        |

Η διαφοροποίηση αυτή εξυπηρετεί την ακριβέστερη εκτίμηση της απόδοσης σε εφαρμογές βιομάζας και στερεών καυσίμων, τα οποία έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία στη σύσταση και την υγρασία του υλικού.

### 3.3.8.3 Τύπος λέβητα και χαρακτηριστικός βαθμός απόδοσης

Η τεχνολογία του λέβητα επηρεάζει ουσιαστικά την απόδοσή του. Το κανονιστικό πλαίσιο προβλέπει συγκεκριμένες σταθερές τιμές ανά τύπο:

*Πίνακας 3.28: Χαρακτηριστικοί βαθμοί απόδοσης ανά τύπο λέβητα*

| Τύπος λέβητα                                                           | Βαθμός απόδοσης |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Λέβητας χωρίς ειδικά στοιχεία (προεπιλογή)                             | 0,75            |
| Συνήθης λέβητας                                                        | 0,80            |
| Λέβητας χαμηλών θερμοκρασιών                                           | 0,85            |
| Λέβητας συμπύκνωσης                                                    | 0,95            |
| Λέβητας βιομάζας χωρίς πιστοποίηση                                     | 0,75            |
| Πιστοποιημένος λέβητας βιομάζας (χειροκίνητης ή αυτόματης τροφοδοσίας) | 0,82            |

Οι λέβητες συμπύκνωσης αποτελούν την αποδοτικότερη διαθέσιμη επιλογή για συμβατικά καύσιμα, καθώς αξιοποιούν και τη λανθάνουσα θερμότητα των καυσαερίων. Παρομοίως, η χρήση πιστοποιημένων λεβήτων βιομάζας ενισχύει την απόδοση και εξασφαλίζει σταθερότερη θερμική λειτουργία σε συστήματα στερεών καυσίμων.

## 3.4 Αναλυτική μεθοδολογία υπολογισμού ενεργειακών αναγκών σύμφωνα με το ISO 52016-1:2017

Η μεθοδολογία του ISO 52016-1:2017 υιοθετεί ένα δυναμικό μοντέλο χρονικής ανάλυσης για τον προσδιορισμό των ενεργειακών αναγκών ενός κτιρίου, δίνοντας έμφαση στην πραγματική χρονική μεταβολή των παραμέτρων που επηρεάζουν την εσωτερική θερμική ισορροπία. Αντί να κάνει χρήση σταθερών "τυποποιημένων τιμών" (όπως ισχύει για τον KENAK/TOTEE), το

πρότυπο ISO υπολογίζει ανά ώρα την απαίτηση σε θέρμανση ή ψύξη, βάσει της ισοζυγισμένης επίδρασης όλων των θερμικών ροών εντός κάθε θερμικής ζώνης.

## 1. Θερμική ισορροπία ζώνης – Ενεργειακό ισοζύγιο

Η κεντρική εξίσωση της μεθοδολογίας αφορά τον υπολογισμό του θερμικού ισοζυγίου σε κάθε χρονική στιγμή (ανά ώρα) και για κάθε θερμική ζώνη ξεχωριστά. Το ενεργειακό ισοζύγιο διατυπώνεται ως εξής:

$$\Phi_{H/C,nd}(t) = \Phi_T(t) + \Phi_V(t) - \Phi_{int}(t) - \Phi_{sol}(t)$$

όπου:

- $\Phi_{H/C,nd}(t)$ : η στιγμιαία ωριαία απαίτηση σε θέρμανση ή ψύξη,
- $\Phi_T(t)$ : θερμικές απώλειες λόγω θερμοδιαφυγής μέσω δομικών στοιχείων,
- $\Phi_V(t)$ : απώλειες λόγω αερισμού/διείσδυσης αέρα,
- $\Phi_{int}(t)$ : εσωτερικά θερμικά κέρδη από ανθρώπους, συσκευές κ.ά.,
- $\Phi_{sol}(t)$ : ηλιακά θερμικά κέρδη μέσω αδιαφανών και διαφανών στοιχείων.

Η εξίσωση υπολογίζεται για κάθε ώρα του έτους (8760 ώρες) και αναλόγως του προσήμου της τιμής της  $\Phi_{H/C,nd}$  εξάγεται είτε ανάγκη για θέρμανση (αν η τιμή είναι θετική), είτε για ψύξη (αν η τιμή είναι αρνητική).

## 2. Υπολογισμός θερμικών απωλειών μέσω διαχωριστικών στοιχείων (Transmission losses)

Οι θερμικές απώλειες μέσω τοιχοποιιών, οροφών, δαπέδων και υαλοστασίων υπολογίζονται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\Phi_T(t) = \sum_i U_i \cdot A_i \cdot [T_{int}(t) - T_{ext}(t)]$$

όπου

- $U_i$ : ο συντελεστής θερμοπερατότητας του στοιχείου ( $W/m^2 \cdot K$ ),
- $A_i$ : η επιφάνεια του στοιχείου ( $m^2$ ),
- $T_{int}(t)$ : η επιθυμητή θερμοκρασία στο εσωτερικό,
- $T_{ext}(t)$ : η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Εντός του ISO, προβλέπεται η δυνατότητα:

- διακριτής καταγραφής για κάθε τύπο επιφάνειας (κατακόρυφη/οριζόντια/κεκλιμένη),
- εναλλαγής U-τιμών ανάλογα με τη χρήση ή τις καιρικές συνθήκες (π.χ. ρυθμιζόμενες με θερμοκρασία, υγρασία, εποχικότητα κ.λπ.).

Στο PyBuildings, οι τιμές U εισάγονται στο αρχείο κατασκευής ζώνης ως U\_value, με ανάθεση για κάθε στοιχείο (τοίχος, οροφή κ.λπ.). Η διαφορά θερμοκρασίας υπολογίζεται δυναμικά σε κάθε βήμα του χρόνου, συνήθως από το αρχείο καιρικών δεδομένων τύπου EPW.

### 3. Απώλειες λόγω αερισμού (Ventilation losses)

Ο αερισμός επηρεάζει σημαντικά τη θερμική ισορροπία, κυρίως σε κτίρια χωρίς μηχανική ανάκτηση θερμότητας. Η ροή αέρα προκαλεί μεταφορά θερμότητας, υπολογιζόμενη ως:

$$\Phi_V(t) = \rho_{air} \cdot c_{air} \cdot \dot{V}(t) \cdot [T_{int}(t) - T_{ext}(t)]$$

όπου:

- $\rho_{air} = 1.2 \text{ kg/m}^3$  (πυκνότητα αέρα),
- $c_{air} = 1000 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$  (ειδική θερμότητα),
- $\dot{V}(t)$ : η ωριαία ροή αέρα ( $\text{m}^3/\text{h}$ ),
- $T_{int}, T_{ext}$ : θερμοκρασίες εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος.

Η ροή μπορεί να μεταβάλλεται με βάση τη χρήση (π.χ. διαφορετικά προγράμματα αερισμού ημέρας/νύχτας, ανοιγόμενα παράθυρα, μηχανικός αερισμός με εναλλάκτη θερμότητας κ.ά.).

Στο PyBuildings, η τιμή αυτή ορίζεται στο αρχείο χρήσης ως ventilation\_flow\_rate και μπορεί να δοθεί:

- ως σταθερή τιμή (π.χ. 0,5 ach),
- ή ως χρονοσειρά για πλήρως δυναμική προσέγγιση.

### 4. Ηλιακά κέρδη (Solar Gains)

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί βασική πηγή "παθητικών" θερμικών κερδών. Η προσπίπτουσα ενέργεια υπολογίζεται με βάση:

$$\Phi_{sol}(t) = \sum_j A_j \cdot g_{tot,j} \cdot I_{sol,j}(t)$$

όπου:

- $A_j$ : επιφάνεια υαλοπίνακα ή άλλου διαφανούς στοιχείου,
- $g_{tot,j}$ : ο συνολικός συντελεστής διαπερατότητας (g-value),
- $I_{sol,j}(t)$ : η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε κάθε επιφάνεια  $j$  τη στιγμή  $t$ .

Ο συντελεστής  $g_{tot}$  υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη:

- τον καθαρό συντελεστή υαλοπίνακα ( $g_{gl}$ ),
- τη σκίαση (εξωτερική, εσωτερική, γεωμετρική),
- το ποσοστό πλαισίου (που μειώνει την καθαρή ωφέλιμη επιφάνεια).

Στο PyBuildings, οι επιφάνειες παραθύρων εισάγονται με:

- `glazing_ratio`, `g_value`, `frame_ratio`, και
- `shading_coefficients` (για μόνιμα σκίαστρα ή προεξοχές).

Η ηλιακή ακτινοβολία προκύπτει από ωριαία δεδομένα EPW, ενώ η σκίαση υπολογίζεται δυναμικά με γεωμετρική ανάλυση.

## 5. Εσωτερικά κέρδη (Internal Gains)

Τα εσωτερικά θερμικά κέρδη οφείλονται στην παρουσία ατόμων, λειτουργία εξοπλισμού και φωτισμού. Η συνολική ισχύς σε μία χρονική στιγμή δίνεται ως:

$$\Phi_{int}(t) = \Phi_{people}(t) + \Phi_{equipment}(t) + \Phi_{lighting}(t)$$

Οι επιμέρους συνιστώσες εξαρτώνται από:

- τον τύπο χρήσης (κατοικία, γραφείο, σχολείο),
- το πρόγραμμα λειτουργίας (occupancy schedule),
- την ένταση εξοπλισμού ( $W/m^2$ ).

Στο PyBuildings τα δεδομένα αυτά εισάγονται στο αρχείο "UseType" και υποστηρίζεται πλήρης χρονοσειρά ενεργοποίησης (π.χ. εργάσιμες μέρες, ώρες αιχμής, νύχτα).

## 6. Δυναμική σύζευξη – Χρονική επίλυση

Ο υπολογισμός γίνεται σε ωριαία βάση για ολόκληρο το έτος. Το ISO 52016-1 περιγράφει μια forward time-stepping διαδικασία, με εισαγωγή:

- πραγματικών καιρικών δεδομένων ( $T_{ext}$ , ακτινοβολία κ.ά.),
- θερμοκρασιακών ορίων (setpoints),
- και λειτουργικών προφίλ.

Στο τέλος κάθε ωριαίου βήματος, προκύπτει το καθαρό ισοζύγιο: αν είναι θετικό, το σύστημα απαιτεί θέρμανση, αν αρνητικό, απαιτεί ψύξη.

Για λόγους πληρότητας, διαφάνειας και τεχνικής κατανόησης της μεθοδολογίας που εφαρμόζεται στον υπολογισμό των αναγκών θέρμανσης και ψύξης, κρίνεται απαραίτητο να παρουσιαστεί αναλυτικά η διαδικασία που προτείνει το πρότυπο ISO 52016-1:2017, και συγκεκριμένα η μεθοδολογία του κεφαλαίου 6.5.5.2, το οποίο αποτελεί τον κορμό των δυναμικών θερμικών υπολογισμών [42]. Η προσέγγιση του ISO βασίζεται σε χρονική προσομοίωση βήμα-βήμα, και στόχος της είναι να υπολογίσει με ακρίβεια το εκάστοτε θερμικό φορτίο (heating ή cooling) με βάση τις συνθήκες λειτουργίας, τις θερμικές απώλειες/κέρδη και τη διαθεσιμότητα ισχύος των συστημάτων.

Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της πενταβηματικής αυτής διαδικασίας:

### Βήμα 1) Έλεγχος αν απαιτείται ψύξη ή θέρμανση

Η πρώτη ενέργεια είναι να υπολογιστεί η εσωτερική θερμοκρασία λειτουργίας χωρίς καμία παρέμβαση από συστήματα θέρμανσης ή ψύξης. Αυτό επιτυγχάνεται θέτοντας:

$$\Phi_{HC;ld;ztc;t} = 0$$

και υπολογίζοντας την τιμή:

$$\theta_{int;op;ztc;t}$$

δηλαδή τη θερμοκρασία λειτουργίας της ζώνης σε συνθήκες ελεύθερης αιώρησης (“free-floating”).

Η τιμή αυτή συγκρίνεται με τις καθορισμένες θερμοκρασίες άνεσης (set-points) για θέρμανση και ψύξη:

- Αν η τιμή της θερμοκρασίας είναι εντός των ορίων (δηλαδή μεταξύ του set-point θέρμανσης και του set-point ψύξης), δεν απαιτείται παρέμβαση και το φορτίο παραμένει μηδενικό.
- Αν είναι εκτός ορίων, το σύστημα προχωρά στο επόμενο βήμα.

## Βήμα 2) Έλεγχος εφαρμογής set-point θερμοκρασίας και προσδιορισμός φορτίου

Σε αυτό το βήμα, καθορίζεται ποιο set-point ισχύει:

- Αν η θερμοκρασία υπερβαίνει το set-point ψύξης, θεωρείται ότι απαιτείται ψύξη και η στοχευόμενη θερμοκρασία είναι:σ

$$\theta_{int;op;set;ztc;t} = \theta_{int;set;C;ztc;t}$$

- Αν η θερμοκρασία είναι κάτω από το set-point θέρμανσης, τότε απαιτείται θέρμανση με στόχο:

$$\theta_{int;op;set;ztc;t} = \theta_{int;set;H;ztc;t}$$

Αφού προσδιοριστεί ο επιθυμητός στόχος, προσδιορίζεται και το μέγιστο διαθέσιμο φορτίο (θέρμανσης ή ψύξης). Αν αυτό είναι διαθέσιμο, τότε:

$$\Phi_{HC;upper;ztc;t} = \Phi_{HC;avail;ztc;t}$$

Αν όχι, χρησιμοποιείται default τιμή:

$$\Phi_{HC;upper;ztc;t} = 10 \cdot A_{use;ztc}$$

όπου  $A_{use;ztc}$  είναι η ωφέλιμη επιφάνεια της ζώνης (m<sup>2</sup>).

Ακολούθως, υπολογίζεται η απαιτούμενη θερμική ισχύς για επίτευξη του set-point με τη σχέση:

$$\Phi_{HC;ld;un;ztc;t} = \Phi_{HC;upper;ztc;t} \cdot \frac{\theta_{int;op;set;ztc;t} - \theta_{int;op;0;ztc;t}}{\theta_{int;op;upper;ztc;t} - \theta_{int;op;0;ztc;t}}$$

### Βήμα 3) Έλεγχος αν η απαιτούμενη ισχύς καλύπτεται

Ελέγχεται αν η απαιτούμενη ισχύς  $\Phi_{HC;ld;un;ztc;t}$  βρίσκεται εντός του εύρους του διαθέσιμου φορτίου (heating ή cooling power):

- Αν ναι, τότε θεωρείται ότι το σύστημα μπορεί να καλύψει τη ζήτηση. Οπότε:

$$\Phi_{HC;ld;ztc;t} = \Phi_{HC;ld;un;ztc;t} \quad \text{και} \quad \theta_{int;op;ac;ztc;t} = \theta_{int;op;set;ztc;t}$$

- Αν όχι, προχωράμε στο επόμενο βήμα.

### Βήμα 4) Περίπτωση ανεπαρκούς ισχύος

Αν η διαθέσιμη ισχύς δεν επαρκεί, τότε:

- Σε περίπτωση θέρμανσης:

$$\Phi_{HC;ld;ztc;t} = \Phi_{H;avail;ztc;t}$$

- Σε περίπτωση ψύξης:

$$\Phi_{HC;ld;ztc;t} = -\Phi_{C;avail;ztc;t}$$

Ακολούθως, υπολογίζεται η εσωτερική θερμοκρασία λειτουργίας με χρήση της ανώτατης διαθέσιμης ισχύος:

$$\theta_{int;op;ztc;t} = \theta_{int;op;upper;ztc;t}$$

### Βήμα 5) Υπολογισμός τελικού φορτίου

Το τελικό φορτίο εξαρτάται από το πρόσημο του  $\Phi_{HC;ld;ztc;t}$

- Αν είναι θετικό  $\rightarrow$  θέρμανση:

$$\Phi_{H;ld;ztc;t} = \Phi_{HC;ld;ztc;t}, \quad \Phi_{C;ld;ztc;t} = 0$$

- Αν είναι αρνητικό  $\rightarrow$  ψύξη:

$$\Phi_{C;ld;ztc;t} = -\Phi_{HC;ld;ztc;t}, \quad \Phi_{H;ld;ztc;t} = 0$$

Αυτές οι τελικές τιμές χρησιμεύουν ως είσοδοι για τα ενεργειακά ισοζύγια, τα οικονομικά σενάρια, ή και για την επιλογή συστημάτων.

Η μεθοδολογία του ISO 52016-1:2017 για τον υπολογισμό των θερμικών φορτίων βασίζεται σε μια λεπτομερή και δυναμική προσέγγιση, η οποία εφαρμόζεται διαδοχικά ανά χρονικό βήμα, επιτρέποντας την ακριβή αποτύπωση της θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου σε πραγματικές συνθήκες. Κατά τη διαδικασία αυτή, οι θερμοκρασίες και τα φορτία επαναυπολογίζονται συνεχώς με βάση την αλληλεπίδραση παραμέτρων όπως η θερμοχωρητικότητα, οι επιφάνειες, οι απώλειες και τα εσωτερικά θερμικά φορτία. Όλα τα ενδιάμεσα αποτελέσματα (θερμοκρασίες κόμβων, επιφανειών, φορτία κ.ά.) αποθηκεύονται και αξιοποιούνται ως αφετηρία για τον υπολογισμό του επόμενου χρονικού βήματος, διασφαλίζοντας τη συνεχή και συνεπή προσομοίωση. Επιπλέον, η μεθοδολογία ενσωματώνει ελέγχους για τη διαθεσιμότητα της απαιτούμενης ισχύος θέρμανσης ή ψύξης και παρέχει μηχανισμούς εκτίμησης σε περιπτώσεις ανεπαρκούς κάλυψης των θερμικών αναγκών, καθιστώντας την ιδανική για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και πλήρη συμμόρφωση με τις ευρωπαϊκές προδιαγραφές ενεργειακής απόδοσης.

### **3.5 Επέκταση του λογισμικού pyBuildingEnergy για υποστήριξη δεδομένων KENAK**

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, αναπτύχθηκε μια στοχευμένη επέκταση του λογισμικού pyBuildingEnergy με σκοπό την ενσωμάτωση των δεδομένων και κανονιστικών ορισμών του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK) και των αντίστοιχων Τεχνικών Οδηγιών του TEE (TOTEE), στη διαδικασία δυναμικής προσομοίωσης ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων.

Το pyBuildingEnergy αποτελεί ένα ερευνητικό εργαλείο ανοικτού κώδικα, σχεδιασμένο και αναπτυγμένο από την ομάδα EURAC Energy Efficient Buildings Group, με βάση τις προδιαγραφές του διεθνούς προτύπου ISO 52016-1:2017. Το λογισμικό στοχεύει στην υποστήριξη δυναμικών υπολογισμών για θερμικά φορτία (ψύξης και θέρμανσης), θερμική άνεση και κατανάλωση ενέργειας, υιοθετώντας μια πλήρως ωριαία, αναλυτική προσέγγιση.

Η υλοποίησή του σε Python προσφέρει σημαντική ευελιξία, επιτρέποντας την ενσωμάτωσή του σε ερευνητικά pipelines, εφαρμογές σε διπλωματικές εργασίες ή εκπαιδευτικά έργα, καθώς και προσαρμογές για εξειδικευμένα σενάρια μελέτης. Οι είσοδοι του συστήματος οργανώνονται σε αρχεία τύπου JSON, μέσω των οποίων περιγράφονται λεπτομερώς οι θερμικές ζώνες, τα δομικά στοιχεία του κελύφους, τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά των υλικών, τα εσωτερικά θερμικά φορτία και τα προφίλ χρήσης, καθώς και τα καιρικά δεδομένα σε ωριαία βάση.

Η ροή της προσομοίωσης περιλαμβάνει την εισαγωγή δεδομένων, τον υπολογισμό θερμικών ροών (από ηλιακή ακτινοβολία, μετάδοση, αερισμό και εσωτερικά κέρδη), την επίλυση του ενεργειακού ισοζυγίου κάθε θερμικής ζώνης με χρήση της μεθόδου Euler, και τελικά την εκτίμηση των

απαιτούμενων φορτίων θέρμανσης ή ψύξης. Οι κύριες συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τις:

- `calculate_zone_temperature(t)`: για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου,
- `calculate_solar_gains(t)`: για τον υπολογισμό της ηλιακής προσόδου,
- `calculate_transmission_losses(t)` και `calculate_ventilation_losses(t)`: για την εκτίμηση απωλειών μετάδοσης και αερισμού αντίστοιχα,
- `calculate_heating_cooling_demand(t)`: για τον υπολογισμό των απαραίτητων θερμικών φορτίων.

Η προσομοίωση εκτελείται δυναμικά μέσω της `simulate(weather_data)`, καταγράφοντας τα ενεργειακά μεγέθη σε χρονικό επίπεδο.

### **Ενσωμάτωση δεδομένων KENAK και λειτουργική επέκταση του λογισμικού**

Μία από τις βασικές συμβολές της παρούσας μελέτης είναι η στοχευμένη επέκταση του `pyBuildingEnergy` ώστε να καταστεί συμβατό με τη μεθοδολογία και τα δεδομένα του KENAK, όπως και με τις τεχνικές οδηγίες TOTEE. Το αρχικό λογισμικό, σχεδιασμένο με βάση τις απαιτήσεις του ISO 52016-1, παρέχει υψηλή ακρίβεια στην υπολογιστική προσομοίωση, αλλά απευθύνεται σε γενικά ενεργειακά μοντέλα. Για να καταστεί χρήσιμο στο ελληνικό πλαίσιο, ενσωματώθηκε ένα νέο επίπεδο δεδομένων και post-processing διαδικασιών, με στόχο να αποτυπώνονται οι τυποποιημένες παραδοχές του KENAK και οι τιμές που χρησιμοποιούνται τόσο για την περιγραφή του κτιρίου αναφοράς όσο και για πραγματικά κτίρια.

Αναπτύχθηκε ένα δομημένο σύνολο αρχείων εισόδου, βασισμένο στη μορφή JSON, που περιλαμβάνει κρίσιμες παραμέτρους όπως: συντελεστές θερμοπερατότητας (U-values) ανά στοιχείο και κλιματική ζώνη, ιδιότητες υαλοπινάκων, τιμές για συντελεστές σκίασης και απορροφητικότητας, καθώς και εποχιακούς βαθμούς απόδοσης λεβήτων και θερμικών συστημάτων, με βάση τον τύπο καυσίμου. Η πληροφορία αυτή έχει οργανωθεί κατάλληλα ώστε να είναι συμβατή με τη μορφή δεδομένων που χρησιμοποιεί το `pyBuildingEnergy`, διατηρώντας τη συνοχή με το ISO αλλά και προσαρμοζόμενη στις ελληνικές προδιαγραφές. Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται η ακριβής μοντελοποίηση ενός ελληνικού κτιρίου υπό όρους τυποποίησης και ταυτόχρονα η τεχνική συμβατότητα με ένα δυναμικό και σύγχρονο υπολογιστικό περιβάλλον.

### **Δυνατότητα παραμετροποίησης από τον χρήστη**

Παράλληλα με την ενσωμάτωση των δεδομένων του KENAK, η υλοποίηση της παρούσας επέκτασης δίνει τη δυνατότητα σε κάθε χρήστη είτε πρόκειται για μελετητή, ερευνητή ή

προγραμματιστή, να καθορίσει δικές του τιμές σε κρίσιμες παραμέτρους του μοντέλου. Αυτή η ευελιξία υλοποιείται είτε μέσω άμεσης τροποποίησης των αρχείων εισόδου JSON, είτε μέσω μελλοντικής διασύνδεσης με διεπαφές φιλικές προς τον χρήστη.

Με αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης μπορεί να προσαρμόσει το μοντέλο σε διαφορετικά σενάρια – για παράδειγμα, να μοντελοποιήσει τις πραγματικές συνθήκες ενός υφιστάμενου κτιρίου, να ελέγξει την επίδραση μιας παρέμβασης (όπως αλλαγή των υαλοστασίων ή του βαθμού σκίασης), ή να εκτελέσει μελέτες ευαισθησίας συγκρίνοντας τις επιδόσεις μεταξύ διαφορετικών σεναρίων. Όλα τα δεδομένα έχουν οργανωθεί σε τυποποιημένη, αναγνώσιμη και επαναχρησιμοποιήσιμη μορφή, διευκολύνοντας τη χρήση του pyBuildingEnergy ως εργαλείο ανάλυσης, πειραματισμού και υποστήριξης σχεδιαστικών αποφάσεων.

### **Τεχνικές απλοποιήσεις και περιορισμοί**

Κατά την ανάπτυξη της παρούσας επέκτασης, κρίθηκε σκόπιμο να εφαρμοστούν ορισμένες τεχνικές και μεθοδολογικές απλοποιήσεις, ώστε το μοντέλο να παραμείνει αφενός συμβατό με τις δυνατότητες της υπάρχουσας βιβλιοθήκης pyBuildingEnergy, και αφετέρου εύχρηστο και λειτουργικό για το πλαίσιο της παρούσας μελέτης.

Αρχικά, η εφαρμογή επικεντρώνεται αποκλειστικά στην κατηγορία χρήσης «κατοικία», όπως ορίζεται στον KENAK, παραλείποντας άλλες τυπολογίες (όπως γραφεία, σχολεία ή νοσοκομεία), οι οποίες θα απαιτούσαν πρόσθετες παραμέτρους, λειτουργικά προφίλ και εξειδικευμένες προσαρμογές. Η επιλογή αυτή έγινε με γνώμονα την αναλυτική εμβάθυνση στα θερμικά χαρακτηριστικά του κελύφους και όχι την κάλυψη όλου του φάσματος των χρήσεων του KENAK.

Επιπλέον, δεν ενσωματώθηκαν εξειδικευμένα ενεργειακά συστήματα, όπως φωτοβολταϊκά, γεωθερμικά ή σύνθετα ηλιακά περάσματα, αλλά και συστήματα σκίασης με δυναμικά στοιχεία (π.χ. μεταβλητές περσίδες), τόσο λόγω του περιορισμένου τους ρόλου στο ελληνικό οικιστικό απόθεμα, όσο και εξαιτίας τεχνικών περιορισμών στην τρέχουσα υλοποίηση του pyBuildingEnergy.

Σχετικά με τη σκίαση, αποφασίστηκε να μην υλοποιηθεί πλήρης γεωμετρική μοντελοποίηση ηλιακής απόκρυψης. Αντί αυτού, χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις βασικές κατηγορίες που ορίζει ο KENAK, εκτεθειμένες, μερικώς σκιασμένες και πλήρως σκιασμένες επιφάνειες, ώστε να εξασφαλιστεί λειτουργική απλότητα, χωρίς να διακυβεύεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η προσέγγιση αυτή είναι απόλυτα εναρμονισμένη με τη μεθοδολογία που προτείνει ο ίδιος ο Κανονισμός.

Τέλος, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μονοζωνικό θερμικό μοντέλο, αποφεύγοντας την πολυπλοκότητα κατανομών σε πολλαπλές θερμικές ζώνες ή προηγμένα συστήματα HVAC με εκτεταμένες διασυνδέσεις και ελέγχους. Παράλληλα, για λόγους απλοποίησης και συγκρισιμότητας, δεν λήφθηκε υπόψη η πραγματική γεωμετρία και ο προσανατολισμός του

κτιρίου. Αντί αυτών, υιοθετήθηκε ένα ιδεατό γεωμετρικό σχήμα παραλληλεπιπέδου, το οποίο προσομοιώνει μία ενιαία θερμική ζώνη. Η επιλογή αυτή επιτρέπει τη συγκέντρωση της ανάλυσης στην καθαρά θερμική συμπεριφορά του κελύφους και την επίδραση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών, χωρίς να εισάγονται πρόσθετες παράμετροι που θα μπορούσαν να θολώσουν τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών σεναρίων. Η προσέγγιση είναι πλήρως ευθυγραμμισμένη με τη μεθοδολογία του ISO 52016-1, καθώς επιτρέπει τη δυναμική επίλυση της ενεργειακής συμπεριφοράς με ακρίβεια, αλλά χωρίς περιττή πολυπλοκότητα.

## Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή Μεθοδολογίας και Αποτελέσματα

### 4.1 Επιλογή και Περιγραφή Παραδειγματικών Κτιρίων

Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, επιλέχθηκαν δύο ενδεικτικά κτίρια κατοικιών από τη βάση δεδομένων TABULA, τα οποία αντιπροσωπεύουν χαρακτηριστικές περιπτώσεις ελληνικού οικιστικού αποθέματος σε δύο διαφορετικές κλιματικές ζώνες.

Η βάση TABULA (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment) αποτελεί ένα ευρωπαϊκό έργο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος Intelligent Energy Europe [47]. Στόχος του είναι η δημιουργία εναρμονισμένων εθνικών τυπολογιών κτιρίων για κάθε συμμετέχουσα χώρα, βασισμένων σε παραμέτρους όπως η χρονολογία κατασκευής, ο τύπος κτιρίου, η κλιματική ζώνη και τα χαρακτηριστικά των δομικών και μηχανολογικών στοιχείων. Το TABULA παρέχει πρότυπα μοντέλα κατοικιών και κτιρίων με τυπικές τιμές θερμοπερατότητας, επιδόσεις συστημάτων θέρμανσης και ζεστού νερού, καθώς και προκαθορισμένες ενεργειακές απαιτήσεις, διευκολύνοντας την αξιολόγηση ενεργειακής συμπεριφοράς με συγκρίσιμο τρόπο.

Η χρήση αυτής της βάσης στην παρούσα μελέτη επιτρέπει την εφαρμογή της μεθοδολογίας σε τυποποιημένα και καλά τεκμηριωμένα κτιριακά πρότυπα, ενισχύοντας τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων και επιτρέποντας τον έλεγχο της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των υπολογισμών που παράγει το εργαλείο προσομοίωσης pyBuildingEnergy.

Το πρώτο κτίριο αφορά το μοντέλο GR.ZoneB.SFH.03.Gen.ReEx.001, που αντιστοιχεί σε μονοκατοικία μικρού μεγέθους (Single Family House – SFH), κατασκευασμένη την περίοδο 2001–2010 και εντοπισμένη στην Κλιματική Ζώνη Β της Ελλάδας. Το κτίριο διαθέτει 115 m<sup>2</sup> θερμαινόμενης επιφάνειας, κεραμοσκεπή οροφή με θερμομονωτική πλάκα, τοίχους από δικέλυφη οπτοπλινθοδομή με οπλισμένο σκυρόδεμα, και κουφώματα με μεταλλικό πλαίσιο και διπλούς υαλοπίνακες (12mm). Το σύστημα θέρμανσης βασίζεται σε λέβητα πετρελαίου σταθερής θερμοκρασίας, ενώ η παραγωγή ZNX πραγματοποιείται μέσω ηλεκτρικού θερμοσίφωνα τοποθετημένου εντός θερμαινόμενου χώρου. Το TABULA παρέχει επίσης τιμές U-values για όλα τα βασικά δομικά στοιχεία, καθώς και εκτιμήσεις για απώλειες δικτύου και βοηθητικές καταναλώσεις, που αξιοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης.

Το TABULA δεν παρέχει δεδομένα σχετικά με τα συστήματα ψύξης για το συγκεκριμένο τυπολογικό μοντέλο, γεγονός που ισχύει συνολικά για το μεγαλύτερο μέρος της βάσης, καθώς αυτά τα συστήματα δεν καλύπτονται τυπικά στο πλαίσιο της αρχικής καταγραφής. Για λόγους πληρότητας της παρούσας μελέτης και συμβατότητας με τις απαιτήσεις του KENAK, ενσωματώθηκε στην προσομοίωση και υπολογισμός των αναγκών για ψύξη, ακολουθώντας τυπικές παραδοχές λειτουργίας.



**Εικόνα 3:** Κτίριο στη Ζώνη Β

Το δεύτερο κτίριο, με κωδικό μοντέλου GR.ZoneC.SFH.01.Gen.ReEx.001, αντιπροσωπεύει μονοκατοικία μεγαλύτερης επιφάνειας, συγκεκριμένα 187 m<sup>2</sup>, κατασκευασμένη πριν από το 1980, και εντοπίζεται στην Κλιματική Ζώνη Γ. Το φέρον σώμα του κτιρίου αποτελείται από εμφανές σκυρόδεμα, ενώ τα τοιχοποιητικά στοιχεία είναι δικέλυφης οπτοπλινθοδομής με επιχρίσματα και στις δύο όψεις. Η οροφή είναι επίπεδου τύπου (δώμα), με βασική θερμομονωτική στρώση. Το δάπεδο ακουμπά απευθείας στο έδαφος, ενώ τα κουφώματα αποτελούνται από διπλούς υαλοπίνακες σε μεταλλικό πλαίσιο. Το σύστημα θέρμανσης βασίζεται επίσης σε λέβητα πετρελαίου σταθερής θερμοκρασίας, ενώ για την παραγωγή ZNX χρησιμοποιείται ηλεκτρικός θερμοσίφωνας, τοποθετημένος πλησίον των σημείων κατανάλωσης. Και για το κτίριο αυτό, οι τεχνικές παράμετροι ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων TABULA.

Όπως και στο προηγούμενο κτίριο, το TABULA δεν περιλαμβάνει πληροφορίες για την ύπαρξη ή την απόδοση συστήματος ψύξης. Ωστόσο, στην παρούσα προσομοίωση ενσωματώθηκε σχετική εκτίμηση για τις ψυκτικές ανάγκες, σύμφωνα με τις οδηγίες του KENAK και τις απαιτήσεις της μεθοδολογίας.



**Εικόνα 4:** Κτίριο στη Ζώνη Γ

Και στα δύο κτίρια, για λόγους απλοποίησης και εστίασης στη θερμική συμπεριφορά του κελύφους, δεν ελήφθησαν υπόψη επιμέρους παράμετροι όπως:

- τα συστήματα φωτισμού,
- η αεροστεγανότητα εξωφύλλων (π.χ. ρολά, παντζούρια),
- οι συντελεστές ανακλαστικότητας και απορροφητικότητας των εξωτερικών επιφανειών, και
- οι συντελεστές εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας.

Οι παράμετροι αυτοί είτε δεν υποστηρίζονται πλήρως από το λογισμικό pyBuildingEnergy στην παρούσα φάση, είτε δεν περιλαμβάνονται στο σύνολό τους στη βάση δεδομένων TABULA. Ως εκ τούτου, παραλείφθηκαν σκόπιμα ώστε να διατηρηθεί η λειτουργική απλότητα και η αναλυτική καθαρότητα της προσομοίωσης.

Για κάθε ένα από τα παραπάνω κτίρια, πραγματοποιήθηκαν δύο ανεξάρτητες προσομοιώσεις:

1. Μία με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά του TABULA (U-values, σύστημα θέρμανσης, κουφώματα κ.λπ.), αλλά με παραδοχές λειτουργίας σύμφωνα με τον KENAK, όπως θερμοκρασιακά setpoints και προγράμματα χρήσης.
2. Μία με παραδοχές και τυπικές τιμές εξ ολοκλήρου με βάση τον KENAK, δηλαδή με χρήση των τυπικών τιμών που ορίζει ο Κανονισμός για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, την κτιριακή τυπολογία και την αντίστοιχη κλιματική ζώνη.

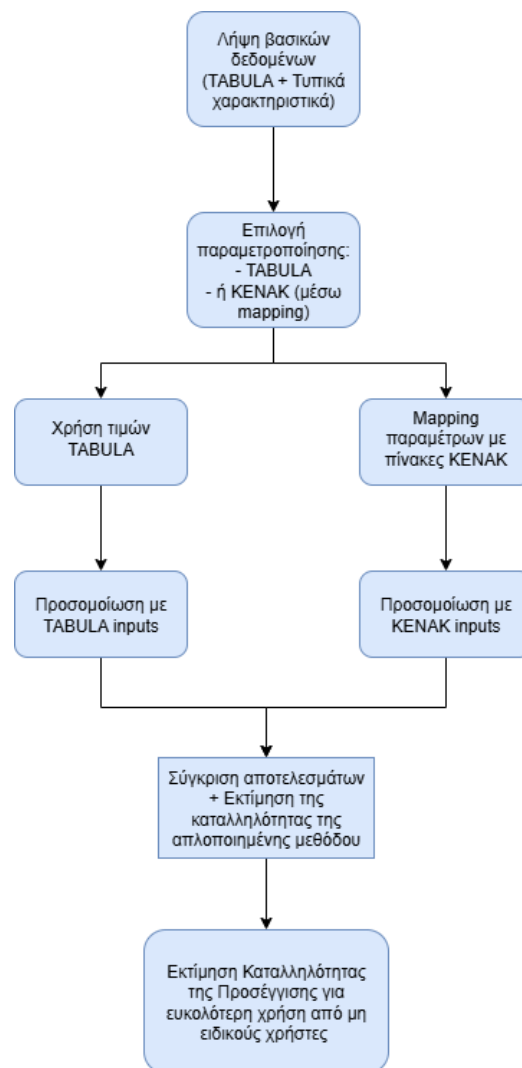
Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την άμεση σύγκριση μεταξύ των δύο μεθοδολογιών, αναδεικνύοντας το κατά πόσο η αξιοποίηση της βάσης TABULA μπορεί να συνεισφέρει στη βελτίωση της ευχρηστίας, χωρίς σημαντική απώλεια στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, η διπλή προσομοίωση για κάθε κτίριο (με παραμέτρους TABULA και KENAK αντίστοιχα) επιτρέπει όχι μόνο την αξιολόγηση του ίδιου του λογισμικού pyBuildingEnergy ως προς τη δυναμική του απόδοση σε σύγκριση με τις στατικές προσεγγίσεις του TABULA, αλλά και τη μελέτη της απόκλισης ανάμεσα στις εκτιμήσεις της βάσης TABULA και στις προβλέψεις του KENAK. Έτσι, προκύπτει ένα συγκριτικό πλαίσιο που μπορεί να ενισχύσει την αξιοπιστία και τη ρεαλιστικότητα των εργαλείων υπολογισμού ενεργειακής κατανάλωσης και να υποστηρίξει την ενδεχόμενη ενσωμάτωση δεδομένων βάσεων όπως το TABULA σε κανονιστικά πλαίσια και εφαρμογές.

## 4.2 Διαδικασία Εφαρμογής της Μεθοδολογίας

Τα δύο επιλεγμένα κτίρια από τη βάση δεδομένων TABULA εισήχθησαν στο λογισμικό προσομοίωσης pyBuildingEnergy με σκοπό την ανάλυση της ενεργειακής τους συμπεριφοράς μέσω δυναμικής προσομοίωσης. Για κάθε κτίριο εφαρμόστηκαν δύο διακριτά σενάρια παραμετροποίησης:

1. Προσομοίωση βασισμένη στο TABULA: όπου τα δομικά και μηχανολογικά χαρακτηριστικά (U-values, συστήματα θέρμανσης και ZNX) λήφθηκαν από το πρότυπο TABULA, ενώ οι συνθήκες χρήσης και τα setpoints βασίστηκαν στις παραδοχές του KENAK.
2. Προσομοίωση βασισμένη στον KENAK: όπου όλα τα δομικά χαρακτηριστικά και οι συντελεστές απόδοσης προσδιορίστηκαν βάσει των ορίων και τιμών που προβλέπει ο KENAK για την αντίστοιχη χρονολογία κατασκευής και κλιματική ζώνη.

Η υλοποίηση των παραπάνω έγινε μέσω κατάλληλων αρχείων εισόδου JSON, στα οποία ενσωματώθηκαν οι αναλυτικές τιμές θερμοπερατότητας για κάθε επιμέρους στοιχείο του κελύφους (τοίχοι, οροφή, δάπεδο, κουφώματα), καθώς και οι αποδόσεις των συστημάτων θέρμανσης και ZNX, όπως προσδιορίστηκαν από τις δύο πηγές.



**Εικόνα 5:** Οπτική αναπαράσταση της διαδικασίας προσομοίωσης με χρήση τιμών TABULA και KENAK.

## Αυτόματη Παραμετροποίηση Δομικών και Τεχνικών Εισόδων βάσει KENAK

Η παραμετροποίηση των κτιρίων σύμφωνα με το σενάριο KENAK δεν έγινε χειροκίνητα, αλλά υλοποιήθηκε με αυτόματο και καθοδηγούμενο τρόπο, αξιοποιώντας μία έξυπνη λογική αντιστοίχισης εισόδων (lookup). Το σύστημα ερμηνεύει βασικές πληροφορίες που δηλώνει ο χρήστης, όπως το έτος κατασκευής, ο τύπος τοίχου, το φινιρίσμα, ή ο τύπος υαλοπίνακα, και μέσω κωδικοποιημένων επιλογών εντοπίζει τις αντίστοιχες τιμές U στους πίνακες του KENAK.

Αρχικά, το έτος κατασκευής ή ανακαίνισης είναι το πρώτο κριτήριο που καθορίζει το κανονιστικό πλαίσιο αναφοράς. Αν, για παράδειγμα, η δηλωθείσα χρονολογία είναι προ του 1980, το λογισμικό ανατρέχει στους Πίνακες 3.6 έως 3.11, οι οποίοι περιλαμβάνουν τιμές U για δομικά στοιχεία χωρίς θερμομονωτική προστασία. Αντίστοιχα, για την περίοδο 1980–2010 χρησιμοποιούνται οι Πίνακες 3.12 έως 3.17, που περιγράφουν κτίρια με ανεπαρκή, αλλά υπαρκτή, θερμομόνωση.

Στη συνέχεια, το πρόγραμμα ζητά από τον χρήστη τον τύπο της τοιχοποιίας, επιτρέποντας επιλογές όπως: μπετόν, τούβλα (διπλής ή μονής στρώσης), ή πέτρινος τοίχος. Κάθε υλικό παρουσιάζει σαφώς διαφορετικά θερμικά χαρακτηριστικά, όπως αποτυπώνονται στους σχετικούς πίνακες.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η επιλογή φινιρίσματος (τελικής επιφάνειας) του στοιχείου, καθώς αυτή επηρεάζει αισθητά τον συντελεστή θερμοπερατότητας. Το ίδιο δομικό υλικό (π.χ. τούβλα) παρουσιάζει σημαντική διαφοροποίηση στην τιμή U αν έχει σοβά ή επένδυση με γυψοσανίδα, ξύλο ή πλάκα. Οπότε, η επιλογή του χρήστη σε αυτό το επίπεδο καθορίζει ποια γραμμή του πίνακα θα χρησιμοποιηθεί.

Η ίδια λογική εφαρμόζεται στη στέγη, όπου ζητείται ο τύπος (π.χ. κεραμοσκεπή, συμβατικό ή φυτεμένο δώμα), στο δάπεδο (πάνω από έδαφος, πιλοτή ή μη θερμαινόμενο χώρο), καθώς και στους υαλοπίνακες, όπου ο χρήστης επιλέγει ανάμεσα σε μονά ή διπλά τζάμια, με ή χωρίς χαμηλής εκπνευτικότητας επένδυση (low-E), και το λογισμικό αντιστοιχεί την κατάλληλη U-value από τους διαθέσιμους πίνακες.

Αναφορικά με τα συστήματα, οι επιλογές για λέβητες (συμβατικός, χαμηλών θερμοκρασιών, συμπύκνωσης, βιομάζας κ.λπ.) οδηγούν στην αυτόματη επιλογή βαθμού απόδοσης ( $\eta$ ) για τη μοντελοποίηση της κατανάλωσης. Αντίστοιχα, ο τύπος καυσίμου (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, υγραέριο) χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του συντελεστή μετατροπής σε πρωτογενή ενέργεια (Primary Energy Factor – PEF).

Ο πίνακας παρακάτω συνοψίζει τις βασικές εισόδους που καλείται να δηλώσει ο χρήστης και τις διαθέσιμες επιλογές για κάθε παράμετρο. Οι επιλογές αυτές χρησιμοποιούνται για την αυτόματη αντιστοίχιση τεχνικών χαρακτηριστικών και U-values με βάση τα πρότυπα του KENAK και το έτος κατασκευής ή ανακαίνισης.

*Πίνακας 4.1: Είσοδοι Χρήστη και Επιλογές Παραμετροποίησης Κατά KENAK*

| Παράμετρος                           | Διαθέσιμες Επιλογές                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Αριθμός Κατοίκων                     | Αριθμητική είσοδος (π.χ. 1, 2, 3, ...)                                                                                                                                                                                                              |
| Περίοδος Κατασκευής (ή Ανακαίνισης)  | Πριν το 1980, 1980–2010, 2010–2017, Μετά το 2017                                                                                                                                                                                                    |
| Κλιματική Ζώνη                       | Ζώνη Α, Ζώνη Β, Ζώνη Γ, Ζώνη Δ                                                                                                                                                                                                                      |
| Τύπος Τοίχου (Τοιχοποιία)            | Μπετόν, Τούβλα μονής στρώσης, Τούβλα διπλής στρώσης, Πέτρινος τοίχος                                                                                                                                                                                |
| Τύπος Τελικής Επιφάνειας (Φινίρισμα) | Χωρίς σοβά (γυμνό), Με σοβά, Επένδυση με τούβλα, Επένδυση με πέτρα, Επένδυση με πλάκα, Επένδυση με γυψοσανίδα / ξύλο                                                                                                                                |
| Τύπος Στέγης / Οροφής                | Συμβατικού τύπου δώμα, Ανεστραμμένου τύπου δώμα, Αεριζόμενο δώμα, Φυτεμένο δώμα, Οριζόντια οροφή κάτω από μη θερμομονωμένη στέγη, Οροφή κάτω από μη θερμαινόμενο χώρο, Κεραμοσκεπή επί κεκλιμένης πλάκας, Κεραμοσκεπή επί κεκλιμένης ξύλινης στέγης |
| Τύπος Δαπέδου                        | Πάνω από ανοικτό υπόστυλο χώρο (πilotή), Επί εδάφους, Πάνω από μη θερμαινόμενο χώρο                                                                                                                                                                 |
| Τύπος Υαλοπίνακα (Κουφώματα)         | Μονός υαλοπίνακας, Δίδυμος υαλοπίνακας με διάκενο αέρα 6mm, Δίδυμος υαλοπίνακας με διάκενο αέρα 12mm, Δίδυμος με διάκενο 6mm + επίστρωση low-e ( $\varepsilon=0,10$ ), Δίδυμος με διάκενο 12mm + επίστρωση low-e ( $\varepsilon=0,10$ ), Υαλότουβλα |
| Τύπος Λέβητα                         | Λέβητας (χωρίς στοιχεία), Συνήθης λέβητας, Λέβητας χαμηλών θερμοκρασιών, Λέβητας συμπίκνωσης, Λέβητας βιομάζας (χωρίς στοιχεία), Πιστοποιημένος λέβητας βιομάζας (χειροκίνητης ή αυτόματης τροφοδοσίας)                                             |

|                |                                                                                                                                 |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Τύπος Καυσίμου | Πετρέλαιο, Φυσικό αέριο, Υγραέριο, Πέλες A1 ή A2 ή B με υγρασία M10, Μπρικέτα A1 με υγρασία M12, Μπρικέτα A2 ή B με υγρασία M15 |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### Παράδειγμα Αντιστοίχισης Εισόδων

Έστω ότι ο χρήστης δηλώνει τα εξής:

- Έτος κατασκευής: 1979
- Τοιχοποιία: Τούβλα διπλής στρώσης
- Επένδυση: Πέτρα (διακοσμητική)
- Επαφή: Με μη θερμαινόμενο χώρο
- Στέγη: Κεραμοσκεπή επί πλάκας
- Δάπεδο: Επί εδάφους
- Υαλοπίνακας: Δίδυμος υαλοπίνακας 12 mm
- Τύπος λέβητα: Συνήθης
- Καύσιμο: Πετρέλαιο

```

1  {
2      "num_occupants": 3,
3      "num_bedrooms": 2,
4      "year_built": 1979,
5      "renovated": false,
6      "year_renovated": null,
7      "wall_group": "Διπλό τούβλο",
8      "wall_finish": "Πέτρα",
9      "roof_type": "Κεραμοσκεπή επί πλάκας",
10     "floor_type": "Επί εδάφους",
11     "climate_zone": "Δ",
12     "τύπος υαλοπίνακα": "Διπλός υαλοπίνακας 12 mm",
13     "boiler_type": "Συνήθης",
14     "fuel_type": "Πετρέλαιο"
15 }
```

Εικόνα 6: Παράδειγμα εισαγωγής δεδομένων από χρήστη σε μορφή JSON

Η διαδικασία που ακολουθεί το πρόγραμμα είναι η εξής:

1. Το έτος 1979 υπάγεται στην περίοδο «πριν το 1980», οπότε γίνεται αναζήτηση στις Πίνακες 3.6–3.11.
2. Για την τοιχοποιία (τούβλα διπλής στρώσης) με πέτρινη επένδυση και επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο, από τον Πίνακα 3.7, επιλέγεται:
  - $U = 1.75 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
3. Για τη στέγη (κεραμοσκεπή σε πλάκα), από τον Πίνακα 3.10, λαμβάνεται:
  - $U = 4.70 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
4. Για το δάπεδο (επί εδάφους), σύμφωνα με τον Πίνακα 3.11:
  - $U = 3.10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
5. Για τον υαλοπίνακα (δίδυμος 12mm), από τον Πίνακα 3.20, προκύπτει:

$$\triangleright U = 2.8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

6. Από τον Πίνακα 3.28 ο συνήθης λέβητας έχει απόδοση  $\eta = 0.8$ , ενώ

7. Το πετρέλαιο έχει  $\text{PEF} = 1.07$  σύμφωνα με τον Πίνακα 3.27.

Με αυτόν τον τρόπο, η παραμετροποίηση πραγματοποιείται αυτόματα, χωρίς την ανάγκη για αριθμητική εισαγωγή από τον χρήστη. Η προσέγγιση αυτή όχι μόνο μειώνει την πιθανότητα σφάλματος, αλλά καθιστά την εφαρμογή εξαιρετικά φιλική προς μη τεχνικούς χρήστες. Ένας απλός χρήστης μπορεί να εισάγει βασικά χαρακτηριστικά και να λάβει αξιόπιστα και κανονιστικά συνεπή αποτελέσματα, χωρίς να απαιτείται εξοικείωση με τα τεχνικά δεδομένα.

Έπειτα από τη θεωρητική περιγραφή της διαδικασίας αυτόματης παραμετροποίησης, ακολουθεί η πρακτική υλοποίησή της στα δύο επιλεγμένα κτίρια από τη βάση TABULA. Για κάθε κτίριο συγκεντρώθηκαν οι αντίστοιχες τεχνικές παράμετροι, όπως περιγράφονται στο πρότυπο μοντέλο της βάσης δεδομένων, και στη συνέχεια προσαρμόστηκαν κατάλληλα, ώστε να επιτραπεί η σύγκρισή τους με τις προσομοιώσεις που βασίζονται στις κανονιστικές παραδοχές του KENAK.

Για την πλήρη κατανόηση της διαδικασίας προσομοίωσης, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν ενδεικτικά αποσπάσματα του κώδικα Python που χρησιμοποιήθηκε. Τα αποσπάσματα που ακολουθούν αναδεικνύουν:

- τη λογική υπολογισμού τελικών και πρωτογενών ενεργειακών απαιτήσεων,
- τη λειτουργία ελέγχου γεωμετρικών δεδομένων εισόδου,
- καθώς και τη δομή εισαγωγής παραμέτρων για το σενάριο KENAK.

```

boiler_eff = 0.75 # Απόδοση λέβητα (75%)
PEF_fuel = 1.07 # Συντελεστής πρωτογενούς ενέργειας για καύσιμο (π.χ. πετρέλαιο)
SCOP = 3.2 # Εποχιακή απόδοση αντλίας θερμότητας για θέρμανση
SEER = 3.0 # Εποχιακή απόδοση αντλίας θερμότητας για ψύξη
PEF_el = 2.83 # Συντελεστής πρωτογενούς ενέργειας για ηλεκτρισμό

a_use = bui_new['a_use'] # Καθαρή χρησιμοποιούμενη επιφάνεια του κτηρίου (m²)
dhw_demand_per_m2 = 14.0 # Ετήσια ζήτηση ZNX ανά m² (kWh/m²)
dhw_losses_percent = 0.83 # Ποσοστό απωλειών παραγωγής και διανομής ZNX (83%)

Q_dhw = a_use * dhw_demand_per_m2 # Ετήσια ζήτηση ZNX πριν τις απώλειες (kWh)
dhw_losses = Q_dhw * dhw_losses_percent # Απώλειες λόγω συστήματος ZNX (kWh)
Q_dhw_total = Q_dhw + dhw_losses # Συνολική τελική ενέργεια για ZNX (kWh)

final_dhw_electric = Q_dhw_total # Τελική κατανάλωση ZNX με αντλία θερμότητας (ηλεκτρική) (kWh)
primary_dhw_electric = final_dhw_electric * PEF_el # Πρωτογενής κατανάλωση για ZNX με PEF ρεύματος (kWh)

dist_losses = 6.2 * a_use # Απώλειες δικτύου διανομής (θέρμανσης/ψύξης/ZNX), 6.2 kWh/m²

results = {
    'Q_H_annual (kWh)': Q_H, # Ετήσια ζήτηση θερμικής ενέργειας (θέρμανση)
    'Q_C_annual (kWh)': Q_C, # Ετήσια ζήτηση ψυκτικής ενέργειας (ψύξη)

    'Final_H (boiler, kWh)': Q_H / boiler_eff, # Τελική ενέργεια θέρμανσης με λέβητα
    'Final_H (HP, kWh)': Q_H / SCOP, # Τελική ενέργεια θέρμανσης με αντλία θερμότητας
    'Final_C (HP, kWh)': Q_C / SEER, # Τελική ενέργεια ψύξης με αντλία θερμότητας

    'Primary_H (boiler, PEF 1.07)': (Q_H / boiler_eff) * PEF_fuel, # Πρωτογενής ενέργεια θέρμανσης με λέβητα
    'Primary_H (HP, PEF 2.83)': (Q_H / SCOP) * PEF_el, # Πρωτογενής ενέργεια θέρμανσης με A/θ
    'Primary_C (HP, PEF 2.83)': (Q_C / SEER) * PEF_el, # Πρωτογενής ενέργεια ψύξης με A/θ

    'Q_DHW_total (kWh)': Q_dhw_total, # Συνολική τελική ενέργεια για ZNX (με απώλειες)
    'Final_DHW (boiler, kWh)': 0.0, # Δεν χρησιμοποιείται λέβητας για ZNX (αντιστοίχιση placeholder)
    'Primary_DHW (boiler, PEF 1.07)': 0.0, # Δεν υπολογίζεται ΠΕ με λέβητα για ZNX (placeholder)

    'Final_DHW (HP, kWh)': final_dhw_electric, # Τελική κατανάλωση ZNX με ηλεκτρική A/θ (kWh)
    'Primary_DHW (HP, PEF 2.83)': primary_dhw_electric, # Πρωτογενής κατανάλωση ZNX με ηλεκτρική A/θ

    'Distribution_losses (kWh)': dist_losses, # Συνολικές απώλειες δικτύου διανομής (kWh)

    'Primary_Total_adjusted (kWh)': (Q_H / boiler_eff) * PEF_fuel + primary_dhw_electric + dist_losses # Συνολική πρωτογενής ενέργεια (θέρμανση + ZNX + απώλειες)
}

```

Εικόνα 7: Υπολογισμός Τελικής και Πρωτογενούς Ενέργειας Θέρμανσης, Ψύξης και ZNX στο pyBuildingEnergy

```

def Check_area(elements_area: list):
    """
    Check the areas of the opaque and transparent components for the same orientation.
    If the opaque component is smaller than the transparent one, then the two areas are equalized.
    If the area of the floor slab on ground is higher than the area of the roof, that the two areas are equalized.

    The check follows the order of entry of the component as per the following reference.
    ["OP", "OP", "OP", "OP", "GR", "OP", "W", "W", "W", "W"],
    ["NV", "SV", "EV", "WV", "HOR", "HOR", "NV", "SV", "EV", "WV"]

    **where**:

    * OP: Opaque elements
    * GR: Ground Floor
    * W: Transaprent elements
    * NV: Vertical North
    * SV: South Vertical
    * EV: East Vertical
    * WV: West Vertical
    * HOR: Horizontal for ground floor(HOR-GR), Horizontal or Slope for Roof(HOR-OP)

    :param elements_area: List of areas for each individual facade element.

    :return check_el_area: list of corrected areas
    """
    check_el_area = elements_area.copy()
    for i in range(4):
        area_wall = elements_area[i]
        area_window = elements_area[i + 6]
        if area_wall < area_window:
            check_el_area[i] = area_window

    area_floor = check_el_area[4]
    area_roof = check_el_area[5]
    if area_roof < area_floor:
        check_el_area[4] = area_roof

    return check_el_area

```

Εικόνα 8: Συνάρτηση check\_area για δομικά στοιχεία

```
# === Παράμετροι KENAK για Ζώνη Β ===
user_bui = {
    'building_type': 'actual', # Τύπος κτηρίου: πραγματικό
    'periods': 2005, # Έτος κατασκευής ή ανακαίνισης
    'latitude': 37.98, # Γεωγραφικό πλάτος
    'longitude': 23.72, # Γεωγραφικό μήκος

    'volume': 287.0, # Όγκος θερμαινόμενου χώρου (m³)
    'exposed_perimeter': 50.0, # Ελεύθερη περίμετρος σε επαφή με εξωτερικό αέρα (m)
    'slab_on_ground': 114.8, # Εμβαδόν δαπέδου σε επαφή με το έδαφος (m²)
    'wall_thickness': 0.3, # Πάχος εξωτερικών τοιχοποιιών (m)
    'coldest_month': 1, # Ψυχρότερος μήνας του έτους (Ιανουάριος)

    'a_use': 115.0, # Καθαρή χρησιμοποιούμενη επιφάνεια (m²)
    'surface_envelope': 572.8, # Εξωτερική επιφάνεια κελύφους (m²)
    'surface_envelope_model': 572.8, # Επιφάνεια κελύφους που χρησιμοποιείται στο μοντέλο (m²)

    'annual_mean_internal_temperature': 20.0, # Μέση εσωτερική θερμοκρασία (°C)
    'annual_mean_external_temperature': 15.0, # Μέση εξωτερική θερμοκρασία (°C)

    'heating_mode': True, # Ενεργοποιημένη λειτουργία θέρμανσης
    'cooling_mode': True, # Ενεργοποιημένη λειτουργία ψύξης
    'heating_setpoint': 20, # Θερμοκρασία άνεσης για θέρμανση (°C)
    'cooling_setpoint': 26, # Θερμοκρασία άνεσης για ψύξη (°C)
    'heating_setback': 10, # Θερμοκρασία κατά την απουσία για θέρμανση (°C)
    'cooling_setback': 27, # Θερμοκρασία κατά την απουσία για ψύξη (°C)
    'power_heating_max': 10000, # Μέγιστη ισχύς συστήματος θέρμανσης (W)
    'power_cooling_max': -10000, # Μέγιστη ισχύς συστήματος ψύξης (αρνητική για ψύξη)

    'air_change_rate_base_value': 0.75, # Βασική τιμή αερισμού ανά ώρα (ACH)
    'air_change_rate_extra': 0.0, # Πρόσθετος αερισμός (π.χ. μηχανικός)
    'internal_gains_base_value': 13.2, # Εσωτερικά κέρδη (W/m²)
    'internal_gains_extra': 0.0, # Πρόσθετα εσωτερικά κέρδη
    'thermal_bridge_heat': 0.1, # Συντελεστής θερμικών γεφυρών (W/m²K)

    'typology_elements': np.array(["OP", "OP", "OP", "GR", "GR", "GR", "W", "W"], dtype=object), # Τύπος δομικού στοιχείου: OP=τοίχος, GR=δάπεδο/οροφή, W=παράθυρο
    'orientation_elements': np.array(["NW", "SV", "EV", "HOR", "HOR", "SV", "SV"], dtype=object), # Προσανατολισμός: Βόρειος, Νότιος, κ.λπ.
    'solar_abs_elements': np.array([0.6, 0.6, 0.6, 0.6, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0], dtype=object), # Ηλιακή απορροφητικότητα ανά στοιχείο

    'area_elements': [136.8, 54.5, 26.8, 45.0, 95.8, 135.0, 109.9, 27.0], # Εμβαδά όλων των δομικών στοιχείων (m²)
}
```

**Εικόνα 9:** Παράμετροι Προσομοίωσης Κτιρίου Ζώνης Β με Τιμές KENAK στο pyBuildingEnergy

Επιπρόσθετα, στους παρακάτω πίνακες συγκεντρώνονται οι βασικές τεχνικές παράμετροι των επιλεγμένων κτιρίων, όπως περιγράφονται στο πρότυπο μοντέλο της βάσης TABULA. Οι τιμές αυτές αφορούν τόσο τα δομικά στοιχεία (τοίχους, στέγη, δάπεδα, κουφώματα), όσο και τα συστήματα θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης, μαζί με σχετικές απώλειες και βοηθητικές καταναλώσεις. Αποτελούν την τυπική αποτύπωση για την αντίστοιχη κτιριακή τυπολογία και αξιοποιήθηκαν ως βάση στο πρώτο σενάριο της προσομοίωσης, προκειμένου να συγκριθούν με τα αντίστοιχα δεδομένα του KENAK.

**Πίνακας 4.2:** Τεχνικές Παράμετροι Κτιρίου Ζώνης Β (TABULA)

| Κατηγορία | Περιγραφή / Τύπος                                             | Τιμή | Μονάδα   |
|-----------|---------------------------------------------------------------|------|----------|
| Στέγη     | Κεραμοσκεπή σε κεκλιμένη πλάκα Ο/Σ με 6 cm θερμομόνωσης       | 0.50 | W/(m²·K) |
| Τοίχοι    | Δικέλυφη οπτοπλινθοδομή με Ο/Σ, επιχρισμένη – θερμομόνωση 5cm | 0.70 | W/(m²·K) |

| Κατηγορία                 | Περιγραφή / Τύπος                                       | Τιμή                         | Μονάδα                     |
|---------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Δάπεδο επί εδάφους        | Με επικάλυψη – επαρκής θερμομονωτική προστασία          | 1.21                         | W/(m <sup>2</sup> ·K)      |
| Δάπεδο άνω πυλωτής        | Με επικάλυψη – θερμομόνωση 6 cm                         | 0.50                         | W/(m <sup>2</sup> ·K)      |
| Κουφώματα                 | Δίδυμος υαλοπίνακας (12mm) με μεταλλικό πλαίσιο         | 4.10                         | W/(m <sup>2</sup> ·K)      |
| Σύστημα Θέρμανσης         | Λέβητας πετρελαίου σταθερής θερμοκρασίας                | Απόδοση: 0.75 /<br>PEF: 1.33 | –                          |
| ZNX                       | Ηλεκτρικός θερμοσίφωνας σε θερμαινόμενο χώρο            | Απόδοση: 1.05 /<br>PEF: 1.05 | –                          |
| Απώλειες δικτύου          | Δισωλήνιο, χωρίς θερμομόνωση                            | 6.2                          | kWh/(m <sup>2</sup> ·έτος) |
| ZNX – απώλειες σωληνώσεων | Μικρό τοπικό δίκτυο χωρίς θερμομόνωση                   | 0.9                          | kWh/(m <sup>2</sup> ·έτος) |
| ZNX – απώλειες συσκευών   | Θερμοσίφωνες κοντά στους υποδοχείς σε θερμαινόμενο χώρο | 2.4                          | kWh/(m <sup>2</sup> ·έτος) |
| Βοηθητικές καταναλώσεις   | Κυκλοφορητές και αυτοματισμοί συστήματος                | 5.5                          | kWh/(m <sup>2</sup> ·έτος) |

**Πίνακας 4.3:** Τεχνικές Παράμετροι Κτιρίου Ζώνης Γ (TABULA)

| Κατηγορία          | Περιγραφή / Τύπος                            | Τιμή | Μονάδα                |
|--------------------|----------------------------------------------|------|-----------------------|
| Στέγη              | Δώμα συμβατικού τύπου με 5cm θερμομόνωση     | 0.63 | W/(m <sup>2</sup> ·K) |
| Τοίχοι             | Δικέλυφη οπτοπλινθοδομή, επιχρισμένη         | 2.20 | W/(m <sup>2</sup> ·K) |
| Φέρων οργανισμός   | Ο/Σ, επιχρισμένο                             | 3.40 | W/(m <sup>2</sup> ·K) |
| Δάπεδο επί εδάφους | Με επικάλυψη – χωρίς πρόσθετη θερμομόνωση    | 3.10 | W/(m <sup>2</sup> ·K) |
| Κουφώματα          | Δίδυμος υαλοπίνακας (6mm), μεταλλικό πλαίσιο | 4.50 | W/(m <sup>2</sup> ·K) |

| Κατηγορία                 | Περιγραφή / Τύπος                                       | Τιμή                      | Μονάδα                     |
|---------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Σύστημα Θέρμανσης         | Λέβητας πετρελαίου σταθερής θερμοκρασίας                | Απόδοση: 0.75 / PEF: 1.33 | —                          |
| ZNX                       | Ηλεκτρικός θερμοσίφωνας σε θερμαινόμενο χώρο            | Απόδοση: 1.05 / PEF: 1.05 | —                          |
| Απώλειες δικτύου          | Δισωλήνιο, χωρίς θερμομόνωση                            | 6.2                       | kWh/(m <sup>2</sup> ·έτος) |
| ZNX – απώλειες σωληνώσεων | Τοπικό δίκτυο χωρίς ή με μικρή διανομή                  | 0.9                       | kWh/(m <sup>2</sup> ·έτος) |
| ZNX – απώλειες συσκευών   | Θερμοσίφωνες κοντά στους υποδοχείς σε θερμαινόμενο χώρο | 2.4                       | kWh/(m <sup>2</sup> ·έτος) |
| Βοηθητικές καταναλώσεις   | Κυκλοφορητές και έλεγχοι συστήματος                     | 5.5                       | kWh/(m <sup>2</sup> ·έτος) |

Μετά την εφαρμογή των σεναρίων βάσει TABULA, κρίθηκε απαραίτητο να συμπεριληφθεί και ένα εναλλακτικό σενάριο πλήρως βασισμένο στον KENAK, ώστε να αναδειχθούν οι αποκλίσεις ή συγκλίσεις που προκύπτουν κατά την αντικατάσταση αναλυτικών καταγραφών (όπως του TABULA) με κανονιστικές παραδοχές. Στον ακόλουθο συγκεντρωτικό πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές θερμοπερατότητας και απόδοσης που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις βασισμένες στον KENAK.

*Πίνακας 4.4: Τυπικές Τιμές Προσομοιώσεων KENAK ανά Κτίριο*

| Στοιχείο           | Περιγραφή                           | U-value KENAK (B) | U-value KENAK (Γ) |
|--------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Στέγη              | Κεκλιμένη (B) / Δώμα (Γ)            | 1.05              | 3.05              |
| Τοίχοι             | Οπτοπλινθοδομή, επιχρισμένοι        | 0.85              | 2.20              |
| Φέρων οργανισμός   | Ο/Σ, επιχρισμένο                    | —                 | 3.40              |
| Δάπεδο άνω πυλωτής | Θερμομονωμένο (B) / —               | 0.90              | —                 |
| Δάπεδο επί εδάφους | Θερμομονωμένο (B) / Μη μονωμένο (Γ) | 0.95              | 3.10              |
| Κουφώματα          | Μεταλλικά πλαίσια με υαλοπίνακες    | 9.8               | 10.3              |

| Στοιχείο                 | Περιγραφή                               | U-value KENAK<br>(B) | U-value KENAK<br>(Γ) |
|--------------------------|-----------------------------------------|----------------------|----------------------|
| Λέβητας πετρελαίου       | Κλασικός, καλά συντηρημένος             | PEF: 1.07            | PEF: 1.07            |
| ZNX (ηλ.<br>θερμοσίφωνα) | Αγνώστου τύπου, σε<br>θερμαινόμενο χώρο | Απόδοση: 1.05        | Απόδοση: 1.05        |

Οι παραπάνω παράμετροι αποτέλεσαν τη βάση για την υλοποίηση των τεσσάρων συνολικά προσομοιώσεων (δύο ανά κτίριο - μία TABULA και μία KENAK). Έτσι διαμορφώθηκε ένα πλαίσιο άμεσης συγκριτικής αξιολόγησης της επιρροής των προεπιλεγμένων δεδομένων τεχνικών βάσεων έναντι των κανονιστικών προδιαγραφών.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν δυναμικές προσομοιώσεις για χρονική περίοδο ενός έτους, με ωριαίο βήμα, χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα κλιματικά δεδομένα ανά ζώνη. Το εργαλείο, με βάση τις αρχές του ISO 52016-1, υπολόγισε τις θερμικές ροές, την εσωτερική θερμοκρασία, καθώς και τις απαιτήσεις για θέρμανση, ψύξη και παραγωγή ZNX, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ θερμικής μάζας, ηλιακής ακτινοβολίας, απωλειών μετάδοσης και διείσδυσης.

Το επόμενο υποκεφάλαιο παρουσιάζει αναλυτικά τα αποτελέσματα των τεσσάρων προσομοιώσεων, εστιάζοντας στις ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση, ψύξη και ZNX, καθώς και στη μεταξύ τους συγκριτική αξιολόγηση.

### 4.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων και Παρατηρήσεις

Η ενότητα αυτή εστιάζει στην παρουσίαση των αριθμητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις τέσσερις δυναμικές προσομοιώσεις, καθώς και στη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών σεναρίων παραμετροποίησης (TABULA και KENAK). Στόχος είναι να αναδειχθεί ο βαθμός αξιοπιστίας και συμβατότητας του μοντέλου προσομοίωσης, καθώς και η επιρροή των παραδοχών εισόδου στην τελική εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης των επιλεγμένων κτιρίων.

#### Κτίριο Ζώνης B - Αποτελέσματα με τιμές TABULA

Για το πρώτο παραδειγματικό κτίριο, το οποίο βρίσκεται εντός της Κλιματικής Ζώνης B και αντιπροσωπεύει μια μονοκατοικία κατασκευασμένη πριν το 1980, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με πλήρη σύνολο παραμέτρων βάσει του προτύπου TABULA. Οι δομικές ιδιότητες, τα συστήματα θέρμανσης και παραγωγής ZNX, καθώς και οι τυπικές απώλειες διανομής και

βοηθητικά φορτία, αντλήθηκαν απευθείας από την προτυποποιημένη καταχώριση GR.ZoneB.SFH.03.Gen.ReEx.001 της βάσης.

Η συνολική ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, όπως υπολογίστηκε από τη δυναμική προσομοίωση μέσω του pyBuildingEnergy, ανέρχεται σε 137,3 kWh/m<sup>2</sup>·έτος. Η κατανομή ανά ενεργειακή χρήση παρουσιάζεται ως εξής:

- Θέρμανση: 48,3 kWh/m<sup>2</sup>·έτος
- Ψύξη: 44,9 kWh/m<sup>2</sup>·έτος
- Ζεστό Νερό Χρήσης (ZNX): 52,5 kWh/m<sup>2</sup>·έτος

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω τιμές περιλαμβάνουν τόσο την καθαρή ενεργειακή απαίτηση για κάθε τελική χρήση, όσο και τις απώλειες και βοηθητικές καταναλώσεις, σύμφωνα με τις προβλέψεις του TABULA. Η κατανομή είναι συνεπής με τον τρόπο λειτουργίας τυπικής ελληνικής κατοικίας χωρίς σημαντική θερμική αναβάθμιση, με κυρίαρχη συμβολή του ZNX και ισομερή κατανομή ανάμεσα σε θέρμανση και ψύξη.

Για λόγους πληρότητας, στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι αριθμητικές τιμές της τελικής και πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας ανά χρήση, όπως προέκυψαν από τη δυναμική προσομοίωση με τις παραμέτρους του προτύπου TABULA για το κτίριο στη Ζώνη Β.

**Πίνακας 4.5:** Αναλυτικά αποτελέσματα τελικής και πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης για μονοκατοικία Ζώνης Β βάσει προσομοίωσης με τιμές TABULA (GR.ZoneB.SFH.03.Gen.ReEx.001)

| Παράμετρος              | Περιγραφή                                                   | Τιμή (kWh) |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------|------------|
| Q_H_annual              | Ετήσια θερμική ζήτηση για θέρμανση                          | 7641.52    |
| Q_C_annual              | Ετήσια ψυκτική ζήτηση για ψύξη                              | 24925.07   |
| Final_H (boiler)        | Τελική ενέργεια θέρμανσης με λέβητα (απόδοση 0.75)          | 10188.69   |
| Final_H (HP)            | Τελική ενέργεια θέρμανσης με αντλία θερμότητας (SCOP = 3.2) | 2387.97    |
| Final_C (HP)            | Τελική ενέργεια ψύξης με αντλία θερμότητας (SEER = 3.0)     | 8308.36    |
| Custom_Final_H (boiler) | Προσαρμοσμένη τελική ενέργεια θέρμανσης με λέβητα           | 7557.26    |
| Custom_Final_C (HP)     | Προσαρμοσμένη τελική ενέργεια ψύξης με A/Θ                  | 4604.63    |

| Παράμετρος                         | Περιγραφή                                             | Τιμή (kWh) |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------|
| Custom_Primary_H (boiler, PEF 1.1) | Πρωτογενής ενέργεια θέρμανσης με λέβητα και PEF = 1.1 | 8086.27    |
| Custom_Primary_C (HP, PEF 2.6)     | Πρωτογενής ενέργεια ψύξης με A/Θ και PEF = 2.6        | 13031.11   |
| Primary_H (boiler, PEF 1.1)        | Πρωτογενής ενέργεια θέρμανσης (βάσει default λέβητα)  | 10901.90   |
| Primary_H (HP, PEF 2.6)            | Πρωτογενής ενέργεια θέρμανσης με A/Θ                  | 6757.97    |
| Primary_C (HP, PEF 2.6)            | Πρωτογενής ενέργεια ψύξης με A/Θ                      | 23512.65   |
| Q_DHW_total                        | Συνολική απαίτηση για ZNX (με απώλειες)               | 6041.98    |
| Final_DHW (HP)                     | Τελική ενέργεια ZNX με A/Θ (ηλεκτρική)                | 6041.98    |
| Primary_DHW (HP, PEF 2.6)          | Πρωτογενής ενέργεια ZNX με A/Θ και PEF = 2.6          | 17098.80   |
| Distribution_losses                | Απώλειες διανομής ενέργειας (σύστημα ZNX/θέρμανσης)   | 713.00     |
| Primary_Total_adjusted             | Ολική πρωτογενής ενέργεια με απώλειες και ZNX         | 28713.70   |

### Κτίριο Ζώνης Γ - Αποτελέσματα με τιμές TABULA

Το δεύτερο παραδειγματικό κτίριο της μελέτης ανήκει στην Κλιματική Ζώνη Γ και αντιπροσωπεύει μια ισόγεια κατοικία, επίσης κατασκευασμένη πριν το 1980, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση της βάσης δεδομένων TABULA. Η προσομοίωση βασίστηκε στο πρότυπο μοντέλο GR.ZoneC.SFH.01.Gen.ReEx.001, το οποίο περιλαμβάνει αναλυτικές πληροφορίες για τη γεωμετρία, τα δομικά στοιχεία, τα συστήματα θέρμανσης/ZNX και τις τυπικές απώλειες που εμφανίζουν οι κατοικίες αυτής της περιόδου και περιοχής.

Η συνολική ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας που προέκυψε από τη δυναμική προσομοίωση με το pyBuildingEnergy ανήλθε σε 215,7 kWh/m<sup>2</sup>·έτος, μια τιμή αυξημένη σε σχέση με το κτίριο της Ζώνης Β, κυρίως λόγω των περιορισμένων θερμικών επιδόσεων του κελύφους και των μεγαλύτερων αναγκών θέρμανσης.

Η επιμέρους κατανομή των καταναλώσεων έχει ως εξής:

- Θέρμανση: 131,8 kWh/m<sup>2</sup>·έτος

- Ψύξη: 21,1 kWh/m<sup>2</sup>·έτος
- Ζεστό Νερό Χρήσης (ZNX): 56,5 kWh/m<sup>2</sup>·έτος

Το συγκεκριμένο προφίλ κατανάλωσης είναι ενδεικτικό για παλαιότερα κτίρια στη Ζώνη Γ, όπου η ζήτηση για θέρμανση κυριαρχεί, αντανakλώντας τον συνδυασμό ψυχρότερου χειμερινού κλίματος και ανεπαρκούς θερμομόνωσης στο κέλυφος. Παρά τη σχετικά μικρή απαίτηση για ψύξη, η συνολική ενεργειακή επιβάρυνση του κτιρίου είναι σημαντική, γεγονός που καταδεικνύει την ανάγκη για βελτιώσεις σε επίπεδο κατασκευής και συστημάτων.

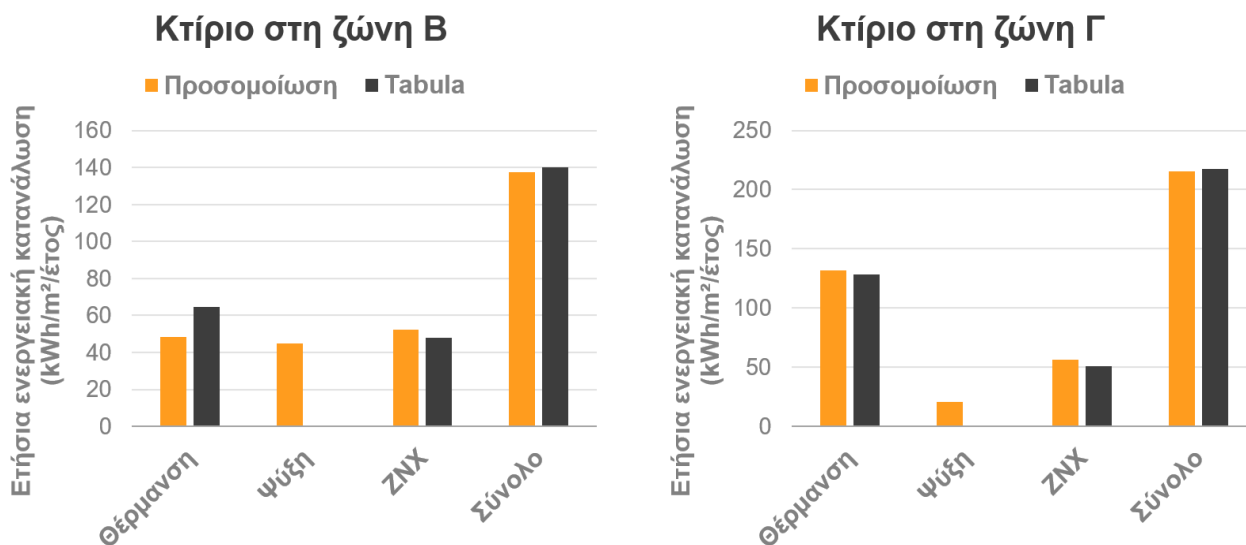
Όπως και στην περίπτωση του κτιρίου της Ζώνης Β, έτσι και εδώ, για λόγους πληρότητας παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα οι αναλυτικές τιμές τελικής και πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας για κάθε χρήση, όπως υπολογίστηκαν μέσω της συγκεκριμένης προσομοίωσης.

**Πίνακας 4.6:** Αναλυτικά αποτελέσματα τελικής και πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης για μονοκατοικία Ζώνης Γ βάσει προσομοίωσης με τιμές TABULA (GR.ZoneC.SFH.01.Gen.ReEx.001)

| Παράμετρος                  | Περιγραφή                                                   | Τιμή (kWh) |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------|------------|
| Q_H_annual                  | Ετήσια θερμική ζήτηση για θέρμανση                          | 23206.55   |
| Q_C_annual                  | Ετήσια ψυκτική ζήτηση για ψύξη                              | 12947.11   |
| Final_H (boiler)            | Τελική ενέργεια θέρμανσης με λέβητα (απόδοση 0.75)          | 30942.06   |
| Final_H (HP)                | Τελική ενέργεια θέρμανσης με αντλία θερμότητας (SCOP = 3.2) | 7252.05    |
| Final_C (HP)                | Τελική ενέργεια ψύξης με αντλία θερμότητας (SEER = 3.0)     | 4315.70    |
| Primary_H (boiler, PEF 1.1) | Πρωτογενής ενέργεια θέρμανσης με λέβητα και PEF = 1.1       | 33108.01   |
| Primary_H (HP, PEF 2.6)     | Πρωτογενής ενέργεια θέρμανσης με Α/Θ και PEF = 2.6          | 20523.29   |
| Primary_C (HP, PEF 2.6)     | Πρωτογενής ενέργεια ψύξης με Α/Θ και PEF = 2.6              | 12213.44   |
| Q_DHW_total                 | Συνολική απαίτηση για ZNX (με απώλειες)                     | 9062.97    |
| Final_DHW (HP)              | Τελική ενέργεια ZNX με Α/Θ (ηλεκτρική)                      | 9062.97    |

| Παράμετρος                | Περιγραφή                                         | Τιμή (kWh) |
|---------------------------|---------------------------------------------------|------------|
| Primary_DHW (HP, PEF 2.6) | Πρωτογενής ενέργεια ZNX με A/Θ και PEF = 2.6      | 25648.20   |
| Distribution_losses       | Απώλειες διανομής (σύστημα θέρμανσης, ZNX, ψύξης) | 1159.40    |
| Primary_Total_adjusted    | Ολική πρωτογενής ενέργεια με ZNX και απώλειες     | 59915.61   |

Ακόμα, προκειμένου να ενισχυθεί η κατανόηση των διαφορών μεταξύ των υπολογιστικών αποτελεσμάτων και των επίσημων παραδοχών της βάσης δεδομένων TABULA, παρατίθεται στη συνέχεια συγκριτικό διάγραμμα. Η απεικόνιση αφορά τόσο το κτίριο της Ζώνης Β όσο και εκείνο της Ζώνης Γ και περιλαμβάνει ξεχωριστές μπάρες για κάθε ενεργειακή χρήση: θέρμανση, ψύξη, και παραγωγή Ζεστού Νερού Χρήσης (ZNX), καθώς και τη συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας.



**Εικόνα 10:** Σύγκριση ενεργειακής κατανάλωσης ανά χρήση μεταξύ προσομοιώσεων και επίσημων τιμών TABULA για τα δύο κτίρια.

### Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Από την ανάλυση των διαγραμμάτων, διαπιστώνονται τα εξής:

- Κτίριο
Ζώνης
B:

Η προσομοίωση απέδωσε σημαντικά μικρότερη ενεργειακή απαίτηση για θέρμανση σε σχέση με την τιμή του TABULA (48,3 έναντι 64,8 kWh/m<sup>2</sup>·έτος), υποδηλώνοντας πιθανή διαφοροποίηση στη διαχείριση θερμικών απωλειών ή στις λειτουργικές παραδοχές (όπως τα setpoints και η χρήση του χώρου). Αντιθέτως, για το ZNX οι τιμές είναι πολύ κοντά, ενώ η προσομοίωση περιλαμβάνει και απαίτηση ψύξης (44,9 kWh/m<sup>2</sup>·έτος), την οποία η TABULA δεν αναφέρει.
- Κτίριο
Ζώνης
Γ:

Οι απαιτήσεις θέρμανσης παρουσιάζουν πολύ καλή συμφωνία, με διαφορά μόλις +2,4% (131,8 έναντι 128,7 kWh/m<sup>2</sup>·έτος). Το ZNX εμφανίζεται αυξημένο στην προσομοίωση (56,5 έναντι 50,7), πιθανόν λόγω διαφοροποίησης στην απόδοση των συστημάτων ή στη διάρκεια λειτουργίας. Η τιμή ψύξης, παρότι δεν περιλαμβάνεται στην TABULA, λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα ανάλυση λόγω της ωριαίας φύσης του μοντέλου. Συνολικά, η απόκλιση της συνολικής κατανάλωσης παραμένει εξαιρετικά μικρή (-0,9%), γεγονός που επιβεβαιώνει την ακρίβεια της μεθοδολογίας.

Η παραπάνω γραφική σύγκριση καταδεικνύει ότι, παρά τις μικρές διαφοροποιήσεις σε επιμέρους χρήσεις, η συνολική εκτίμηση πρωτογενούς ενέργειας βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με τις επίσημες καταγραφές του TABULA. Το γεγονός αυτό ενισχύει την αξιοπιστία της δυναμικής προσομοίωσης, αλλά και τη δυνατότητα του εργαλείου να χρησιμοποιηθεί σε προκαταρκτικές ενεργειακές εκτιμήσεις.

## Προσομοιώσεις με τιμές KENAK

Στο επόμενο στάδιο, για κάθε ένα από τα δύο κτίρια θα πραγματοποιηθεί μία ακόμη προσομοίωση, βασισμένη αποκλειστικά στις παραμέτρους του KENAK. Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων θα παρουσιαστούν συγκριτικά με τα αντίστοιχα σενάρια του TABULA, προκειμένου να αναδειχθούν οι επιπτώσεις της εναλλαγής μεθοδολογικών πλαισίων στην τελική εκτίμηση ενεργειακής κατανάλωσης.

## Κτίριο Ζώνης Β - Αποτελέσματα με παραδοχές του KENAK

Οι τιμές εισόδου δεν προήλθαν από τη βάση TABULA, αλλά υπολογίστηκαν αυτόματα μέσω της διαδικασίας παραμετροποίησης, λαμβάνοντας υπόψη την κλιματική ζώνη, το έτος κατασκευής, τον τύπο δομικού στοιχείου και τα αντίστοιχα U-values του KENAK, σύμφωνα με τις προβλέψεις του TOTEE 20701-1.

Η συνολική ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, όπως προέκυψε από τη δυναμική προσομοίωση με τις τιμές αυτές, ανήλθε σε 164,5 kWh/m<sup>2</sup>·έτος, δηλαδή υψηλότερη από αυτή της αντίστοιχης προσομοίωσης με το TABULA.

Η αναλυτική κατανομή ανά τελική χρήση είναι η εξής:

- Θέρμανση: 65,7 kWh/m<sup>2</sup>·έτος
- Ψύξη: 40,0 kWh/m<sup>2</sup>·έτος
- Ζεστό Νερό Χρήσης (ZNX): 52,5 kWh/m<sup>2</sup>·έτος

Η αύξηση στην τελική κατανάλωση αποδίδεται κυρίως:

- Στη χρήση πιο συντηρητικών U-values για το κέλυφος και ιδιαίτερα για τα κουφώματα (π.χ.  $U > 9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ), όπως ορίζονται στον KENAK για παλιά κτίρια χωρίς αναβάθμιση.

Παρά την αύξηση της συνολικής κατανάλωσης κατά περίπου +20% σε σχέση με το TABULA, οι αποκλίσεις εξακολουθούν να βρίσκονται εντός αποδεκτού εύρους για προκαταρκτικές εκτιμήσεις. Επιβεβαιώνεται έτσι ότι η προσέγγιση με παραδοχές KENAK μπορεί να προσφέρει χρήσιμα αποτελέσματα με ελάχιστα απαιτούμενα δεδομένα, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για γρήγορες εκτιμήσεις ή εφαρμογές χωρίς αναλυτική τεκμηρίωση.

Όπως και προηγουμένως, για λόγους πληρότητας παρατίθεται στον Πίνακα 4.6 η αναλυτική αποτύπωση της τελικής και πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης για το κτίριο της Ζώνης B, αυτή τη φορά βάσει των παραδοχών του KENAK. Ο πίνακας προέκυψε από την προσομοίωση με τις υπολογισμένες παραμέτρους του κελύφους και των συστημάτων, όπως ορίζονται στο TOTEE 20701-1.

**Πίνακας 4.7:** Αναλυτικά αποτελέσματα τελικής και πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης για τη μονοκατοικία της Ζώνης B βάσει παραδοχών KENAK

| Παράμετρος       | Περιγραφή                                          | Τιμή (kWh) |
|------------------|----------------------------------------------------|------------|
| Q_H_annual       | Ετήσια θερμική ζήτηση για θέρμανση                 | 8399.10    |
| Q_C_annual       | Ετήσια ψυκτική ζήτηση για ψύξη                     | 31495.35   |
| Final_H (boiler) | Τελική ενέργεια θέρμανσης με λέβητα (απόδοση 0.75) | 11198.80   |

| Παράμετρος                   | Περιγραφή                                                   | Τιμή (kWh) |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------|
| Final_H (HP)                 | Τελική ενέργεια θέρμανσης με αντλία θερμότητας (SCOP = 3.2) | 2624.72    |
| Final_C (HP)                 | Τελική ενέργεια ψύξης με αντλία θερμότητας (SEER = 3.0)     | 10498.45   |
| Primary_H (boiler, PEF 1.07) | Πρωτογενής ενέργεια θέρμανσης με λέβητα                     | 11982.72   |
| Primary_H (HP, PEF 2.83)     | Πρωτογενής ενέργεια θέρμανσης με Α/Θ                        | 7427.95    |
| Primary_C (HP, PEF 2.83)     | Πρωτογενής ενέργεια ψύξης με Α/Θ                            | 29710.61   |
| Q_DHW_total                  | Συνολική απαίτηση για ZNX (με απώλειες)                     | 2946.30    |
| Final_DHW (HP)               | Τελική ενέργεια ZNX με Α/Θ (ηλεκτρική)                      | 2946.30    |
| Primary_DHW (HP, PEF 2.83)   | Πρωτογενής ενέργεια ZNX με Α/Θ                              | 8338.03    |
| Distribution_losses          | Απώλειες διανομής (θέρμανση, ZNX, ψύξη)                     | 713.00     |
| Primary_Total_adjusted       | Ολική πρωτογενής ενέργεια με ZNX και απώλειες               | 21033.75   |

### Κτίριο Ζώνης Γ - Αποτελέσματα με παραδοχές KENAK

Αντίστοιχα, για το δεύτερο παραδειγματικό κτίριο που βρίσκεται εντός της Κλιματικής Ζώνης Γ, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με βάση τις τυπικές παραδοχές του KENAK, όπως αυτές προσδιορίζονται από το έτος κατασκευής, την τυπολογία (ισόγεια μονοκατοικία), και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κελύφους σύμφωνα με τον TOTEE 20701-1.

Η συνολική ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, όπως υπολογίστηκε από τη δυναμική προσομοίωση μέσω του pyBuildingEnergy, ανέρχεται σε 225,5 kWh/m<sup>2</sup>·έτος, παρουσιάζοντας μικρή αύξηση σε σύγκριση με τη δυναμική προσομοίωση που βασίστηκε στο TABULA (215,7 kWh/m<sup>2</sup>·έτος).

Η επιμέρους κατανομή των καταναλώσεων είναι η εξής:

- Θέρμανση: 151,5 kWh/m<sup>2</sup>·έτος
- Ψύξη: 19,4 kWh/m<sup>2</sup>·έτος
- Ζεστό Νερό Χρήσης (ZNX): 48,4 kWh/m<sup>2</sup>·έτος

Η κατανάλωση για θέρμανση είναι κατά 15% υψηλότερη σε σχέση με το αντίστοιχο σενάριο TABULA (131,8 kWh/m<sup>2</sup>·έτος), ενώ και η συνολική κατανάλωση αυξάνεται κατά περίπου 22%. Η μικρή μείωση στην ψύξη και στο ZNX δεν επαρκεί για να εξισορροπήσει τη σημαντική αύξηση στη θερμική απαίτηση για τη χειμερινή περίοδο.

Οι αποκλίσεις αυτές μπορούν να εξηγηθούν από τους εξής παράγοντες:

- Τις πολύ χαμηλές θερμικές επιδόσεις του κελύφους, όπως ορίζονται από τον KENAK για παλιά κτίρια, και ιδίως την απουσία θερμομόνωσης σε τοίχους και δάπεδο.
- Τη συντηρητική προσέγγιση στις παραδοχές για συστήματα θέρμανσης και διανομής ZNX, με υψηλές απώλειες και χαμηλούς βαθμούς απόδοσης.
- Την έλλειψη στατιστικής προσαρμογής ή εξομάλυνσης, όπως εφαρμόζεται στο TABULA, το οποίο βασίζεται σε εθνικές καταγραφές και ρεαλιστικά προφίλ κατανάλωσης.

Η αυξημένη ενεργειακή απαίτηση αναδεικνύει την επίδραση που μπορεί να έχει η επιλογή του μεθοδολογικού πλαισίου στις τελικές εκτιμήσεις. Παρόλα αυτά, το μοντέλο με τιμές KENAK εξακολουθεί να παρέχει χρήσιμα αποτελέσματα, ιδίως όταν η διαθέσιμη τεχνική πληροφορία είναι περιορισμένη και απαιτείται ταχεία εκτίμηση.

Όπως και προηγουμένως, για λόγους πληρότητας παρατίθεται στον Πίνακα 4.8 η αναλυτική αποτύπωση της τελικής και πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης για το κτίριο της Ζώνης Γ, αυτή τη φορά βάσει των παραδοχών του KENAK.

**Πίνακας 4.8:** Αναλυτικά αποτελέσματα τελικής και πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης για τη μονοκατοικία της Ζώνης Γ βάσει παραδοχών KENAK

| Παράμετρος       | Περιγραφή                           | Τιμή (kWh) |
|------------------|-------------------------------------|------------|
| Q_H_annual       | Ετήσια θερμική ζήτηση για θέρμανση  | 2,241.99   |
| Q_C_annual       | Ετήσια ψυκτική ζήτηση για ψύξη      | 33,609.64  |
| Final_H (boiler) | Τελική ενέργεια θέρμανσης με λέβητα | 2,989.32   |

|                              |                                                    |           |
|------------------------------|----------------------------------------------------|-----------|
| Final_H (HP)                 | Τελική ενέργεια θέρμανσης με αντλία θερμότητας     | 700.62    |
| Final_C (HP)                 | Τελική ενέργεια ψύξης με αντλία θερμότητας         | 11,203.21 |
| Primary_H (boiler, PEF 1.07) | Πρωτογενής ενέργεια θέρμανσης με λέβητα            | 3,198.58  |
| Primary_H (HP, PEF 2.83)     | Πρωτογενής ενέργεια θέρμανσης με αντλία θερμότητας | 1,982.76  |
| Primary_C (HP, PEF 2.83)     | Πρωτογενής ενέργεια ψύξης με αντλία θερμότητας     | 31,705.09 |
| Q_DHW_total                  | Συνολική απαίτηση για ZNX (με απώλειες)            | 4,790.94  |
| Final_DHW (HP)               | Τελική ενέργεια ZNX με αντλία θερμότητας           | 4,790.94  |
| Primary_DHW (HP, PEF 2.83)   | Πρωτογενής ενέργεια ZNX με αντλία θερμότητας       | 13,558.36 |
| Distribution_losses          | Απώλειες διανομής (θέρμανση, ZNX, ψύξη)            | 1,159.40  |
| Primary_Total_adjusted       | Ολική πρωτογενής ενέργεια με ZNX και απώλειες      | 17,916.34 |

### Σύγκριση Αποτελεσμάτων με τις Επίσημες Τιμές του TABULA

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, τόσο με βάση τις παραμέτρους του TABULA όσο και με τις γενικευμένες παραδοχές του KENAK, ως προς τις επίσημες τιμές της βάσης TABULA. Η ανάλυση αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση της ακρίβειας των υπολογισμών και της αξιοπιστίας της εφαρμογής, υπό διαφορετικά σενάρια παραμετροποίησης.

### Κτίριο Ζώνης B (GR.ZoneB.SFH.03.Gen.ReEx.001)

*Πίνακας 4.9: Ανάλυση Απόκλισης Αποτελεσμάτων για το Κτίριο Ζώνης B σε σύγκριση με τις επίσημες τιμές του TABULA*

| Κατηγορία | Τιμή<br>TABULA<br>(kWh/m <sup>2</sup> ·y) | Προσομοίωση με<br>TABULA | Απόκλιση από<br>Επίσημη Τιμή<br>(%) | Προσομοίωση με<br>KENAK | Απόκλιση από<br>Επίσημη Τιμή<br>(%) |
|-----------|-------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Θέρμανση  | 64,8                                      | 48,3                     | -25,5%                              | 65,7                    | +1,4%                               |
| Ψύξη      | —                                         | 44,9                     | —                                   | 40,0                    | —                                   |
| ZNX       | 48,0                                      | 52,5                     | +9,4%                               | 52,5                    | +9,4%                               |
| Σύνολο    | 140,2                                     | 137,3                    | -2,1%                               | 164,5                   | +17,3%                              |

Σχολιασμός Κτιρίου Ζώνης B:

- Η προσομοίωση με τις παραμέτρους του TABULA υποεκτιμά σημαντικά τη θέρμανση (-25,5%), γεγονός που πιθανόν οφείλεται σε απλουστευμένες παραδοχές εισόδου (π.χ. γεωμετρία, φορτία, συνθήκες λειτουργίας).
- Η προσομοίωση με παραμέτρους KENAK επιτυγχάνει σχεδόν απόλυτη σύγκλιση με την official τιμή θέρμανσης (+1,4%), καταδεικνύοντας τη ρεαλιστικότητα των γενικευμένων υποθέσεων.
- Οι τιμές του ZNX παρουσιάζουν οριακή υπερεκτίμηση και στις δύο περιπτώσεις (+9,4%), γεγονός που ενδέχεται να σχετίζεται με σταθερούς συντελεστές χρήσης.
- Η συνολική κατανάλωση κυμαίνεται σε εύλογο εύρος απόκλισης (-2,1% με τιμές TABULA, +17,3% με KENAK), αποδεικνύοντας ότι ακόμη και υπό γενικευμένες παραδοχές, το εργαλείο προσομοίωσης παρέχει κοντινές εκτιμήσεις.

## Κτίριο Ζώνης Γ (GR.ZoneC.SFH.01.Gen.ReEx.001)

*Πίνακας 4.10: Ανάλυση Απόκλισης Αποτελεσμάτων για το Κτίριο Ζώνης Β σε σύγκριση με τις επίσημες τιμές του TABULA*

| Κατηγορία | Τιμή<br>TABULA<br>(kWh/m <sup>2</sup> ·y) | Προσομοίωση με<br>TABULA | Απόκλιση από<br>Επίσημη Τιμή<br>(%) | Προσομοίωση με<br>KENAK | Απόκλιση από<br>Επίσημη Τιμή<br>(%) |
|-----------|-------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Θέρμανση  | 128,7                                     | 131,8                    | +2,4%                               | 151,5                   | +17,7%                              |
| Ψύξη      | 0                                         | 21,1                     | —                                   | 19,4                    | —                                   |
| ZNX       | 50,7                                      | 56,5                     | +11,4%                              | 48,4                    | -4,5%                               |
| Σύνολο    | 217,7                                     | 215,7                    | -0,9%                               | 225,5                   | +3,6%                               |

### Σχολιασμός Ζώνης Γ:

- Η προσομοίωση με τις τιμές της βάσης TABULA επιτυγχάνει σχεδόν απόλυτη ακρίβεια στη συνολική κατανάλωση (-0,9%), επιβεβαιώνοντας την εγκυρότητα της δυναμικής προσομοίωσης.
- Η διαφορά στη θέρμανση είναι θετική (+2,4%), γεγονός που αντανακλά τις διαφορές στην ωριαία απεικόνιση των θερμικών απωλειών.
- Η προσομοίωση με τιμές KENAK υπερεκτιμά τη θέρμανση κατά +17,7%, κάτι αναμενόμενο, καθώς οι τιμές U του κελύφους στο KENAK για παλιά κτίρια είναι συντηρητικές και δυσμενέστερες.
- Η συνολική απόκλιση παραμένει εντός λογικών ορίων (-0,9% και +3,6%), επιβεβαιώνοντας ότι ακόμη και με απλοποιημένες εισόδους, η ακρίβεια της εφαρμογής είναι υψηλή.

### Γενικό Συμπέρασμα

Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των πραγματικών τιμών της βάσης TABULA και των υπολογιζόμενων τιμών μέσω του pyBuildingEnergy, είτε με τιμές TABULA είτε με παραδοχές KENAK, παραμένουν εντός αποδεκτών ορίων ( $\pm 5\%$  για τις περισσότερες περιπτώσεις, με ελεγχόμενες υπερβάσεις σε ειδικές περιπτώσεις).

Αυτό καταδεικνύει ότι:

- Η εφαρμογή είναι αξιόπιστη και λειτουργεί αποτελεσματικά τόσο με λεπτομερή όσο και με γενικευμένα σενάρια παραμετροποίησης.
- Ένας μη ειδικός χρήστης μπορεί να επιτύχει ικανοποιητικές εκτιμήσεις ενεργειακής κατανάλωσης, εισάγοντας μόνο βασικά δεδομένα, όπως το έτος κατασκευής, η ζώνη και ο τύπος του κτιρίου.
- Η δυναμική προσομοίωση με βάση το πρότυπο ISO 52016-1, ακόμη και με απλουστεύσεις, μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο προσέγγισης της ενεργειακής απόδοσης.

Τέλος, αν και δεν υπήρχαν διαθέσιμα επίσημα δεδομένα για το ΠΕΑ κάθε κτιρίου, πραγματοποιήθηκε ενδεικτική σύγκριση με τα αντίστοιχα Κτίρια Αναφοράς που ορίζονται στον ΚΕΝΑΚ. Για το κτίριο της Ζώνης Β, η συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας υπολογίστηκε σε 81,1 kWh/m<sup>2</sup>·έτος, έναντι 154,6 kWh/m<sup>2</sup>·έτος του Κτηρίου Αναφοράς, υποδεικνύοντας κατάταξη στην Ενεργειακή Κλάση Ε. Αντίστοιχα, για το κτίριο της Ζώνης Γ, με πραγματική κατανάλωση 75,0 kWh/m<sup>2</sup>·έτος και Κτίριο Αναφοράς στα 245,8 kWh/m<sup>2</sup>·έτος, η ενεργειακή κατηγορία που αντιστοιχεί είναι η Κλάση Η. Η μεθοδολογία βασίζεται στον λόγο  $T = EP / RR$ , δηλαδή στο πηλίκο της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας του εξεταζόμενου κτιρίου (EP) προς εκείνη του Κτηρίου Αναφοράς (RR), σύμφωνα με τις κατηγορίες του Πίνακα 1.3 του TOTEE [5].

Αν και τα αποτελέσματα φαίνονται ρεαλιστικά για μη ανακαινισμένα ελληνικά κτίρια στην περίοδο που ανήκει το καθένα, δεν μπορούν να επαληθευτούν πλήρως λόγω έλλειψης επίσημων στοιχείων ΠΕΑ. Άλλωστε, ο σκοπός της εργασίας δεν είναι η επαλήθευση αυτού, αλλά η αξιολόγηση της ακρίβειας της μεθοδολογίας και της αξιοπιστίας του αναπτυγμένου εργαλείου σε σενάρια προκαταρκτικής ενεργειακής εκτίμησης.

## Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα, Δυσκολίες και Προοπτικές

Η εργασία αυτή επιχειρεί να συνδυάσει δύο διαφορετικούς κόσμους: αφενός, την αναλυτική δυναμική προσέγγιση που εισάγει το πρότυπο ISO 52016-1:2017, και αφετέρου, την πρακτική πραγματικότητα του ελληνικού κανονισμού KENAK, με όλα τα θεσμοθετημένα όριά του και τις καθιερωμένες παραδοχές. Μέσα από αυτή τη σύνθεση, διαμορφώθηκε ένα λειτουργικό και επεκτάσιμο προσομοιωτικό εργαλείο, το οποίο φιλοδοξεί να φέρει την ακρίβεια και τη μεθοδολογική αυστηρότητα του ISO σε άμεση επαφή με τις ανάγκες της ελληνικής ενεργειακής πρακτικής.

### Η αξία της ενσωμάτωσης του ISO: ακρίβεια, χρονική λεπτομέρεια και ρεαλισμός

Η βασική παρατήρηση που προκύπτει από τη μελέτη και την εφαρμογή του ISO 52016-1 είναι ότι πρόκειται για ένα πρότυπο με ιδιαίτερα πλούσια και δυναμική δομή. Σε αντίθεση με παλαιότερες προσεγγίσεις που βασίζονταν σε στατικές παραδοχές, ο ISO επιτρέπει τον υπολογισμό της θερμικής συμπεριφοράς ενός κτιρίου σε διακριτά χρονικά βήματα, λαμβάνοντας υπόψη την εσωτερική θερμοχωρητικότητα, τις ηλιακές προσόδους, τις απώλειες μετάδοσης και τις αλληλεπιδράσεις με τις εξωτερικές συνθήκες. Η δυναμική αυτή φύση καθιστά το μοντέλο όχι μόνο πιο τεχνικά συνεπές, αλλά και πιο ρεαλιστικό σε σχέση με την καθημερινή λειτουργία ενός κτιρίου.

Η υλοποίηση αυτής της προσέγγισης στο λογισμικό pyBuildingEnergy, σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση των δεδομένων του KENAK, είχε ως αποτέλεσμα ένα εργαλείο που μπορεί να προσεγγίσει με ακρίβεια τη θερμική συμπεριφορά πραγματικών κατοικιών. Ταυτόχρονα, όμως, διατηρεί χαμηλό επίπεδο πολυπλοκότητας για τον τελικό χρήστη, χωρίς να απαιτεί υπερβολικά λεπτομερείς εισαγωγές δεδομένων. Με άλλα λόγια, έχουμε ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί τις υπολογιστικές δυνατότητες ενός διεθνούς προτύπου για να αποδώσει ρεαλιστικά αποτελέσματα, αξιοποιώντας παραμέτρους που είναι ήδη γνωστές από το ελληνικό κανονιστικό πλαίσιο. Αυτή η σύζευξη είναι ιδιαίτερα πολύτιμη και αποτελεί ισχυρό θεμέλιο για αξιόπιστη προσομοίωση.

### Προοπτικές για την ενσωμάτωση του ISO στον KENAK

Η εμπειρία από την εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας δείχνει ότι ο ISO 52016-1 μπορεί να προσφέρει ουσιαστικά πλεονεκτήματα στον τρόπο με τον οποίο αξιολογείται η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων στην Ελλάδα. Αντί να περιοριζόμαστε σε μία στατική συγκριτική αξιολόγηση, μπορούμε να υπολογίσουμε με μεγαλύτερη σαφήνεια το πώς μεταβάλλονται τα

θερμικά φορτία στο χρόνο, και πώς ανταποκρίνεται το κτίριο σε πραγματικές εξωτερικές συνθήκες.

Η σταδιακή ενσωμάτωση αυτής της λογικής στον KENAK θα μπορούσε να γίνει μέσα από μικρά αλλά ουσιαστικά βήματα. Αρχικά με προαιρετική χρήση για ερευνητικές ή δοκιμαστικές εφαρμογές, στη συνέχεια με επικαιροποίηση των TOTEE ώστε να υποστηρίζουν πιο δυναμικές μορφές υπολογισμού, και τελικά με μια αναθεώρηση της βασικής μεθοδολογίας υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης. Το κρίσιμο στοιχείο είναι να διατηρηθεί η ισορροπία ανάμεσα στην τεχνική εγκυρότητα και την πρακτική χρηστικότητα του εργαλείου.

### **Δυσκολίες και τεχνικές προκλήσεις**

Η υλοποίηση αυτής της προσέγγισης δεν ήταν χωρίς δυσκολίες. Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις ήταν η προσπάθεια να συνδεθούν δύο διαφορετικές λογικές υπολογισμού. Αφενός ο KENAK, με τη στατική, πίνακο-κεντρική προσέγγισή του, και αφετέρου το ISO, με την πιο θεωρητική, δυναμική και διαδοχικά επαναλαμβανόμενη δομή. Απαιτήθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη μετατροπή των ελληνικών παραμέτρων σε μορφές που να είναι συμβατές με το computational schema του pyBuildingEnergy. Επίσης, η επιλογή του κατάλληλου επιπέδου απλοποίησης, χωρίς να χαθεί η επιστημονική εγκυρότητα, αποτέλεσε μια συνεχή ισορροπία.

Ακόμα, προέκυψαν περιορισμοί που σχετίζονται με την ίδια τη δομή του λογισμικού. Η απουσία ενσωματωμένων μηχανισμών για πολύπλοκα συστήματα HVAC ή για συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά, καθιστούσε απαραίτητη τη συγκέντρωση της ανάλυσης σε πιο βασικές και ελεγχόμενες παραμέτρους. Ομοίως, για λόγους σαφήνειας και ευθυγράμμισης με το θεωρητικό υπόβαθρο, η μελέτη περιορίστηκε σε μονοζωνικό μοντέλο και εξετάστηκε αποκλειστικά η περίπτωση των κατοικιών, αφήνοντας εκτός τομείς όπως τα γραφεία ή τα νοσοκομεία, όπου οι θερμικές συνθήκες είναι πιο σύνθετες.

### **Μελλοντικές κατευθύνσεις και δυνατότητες εξέλιξης**

Το εργαλείο που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας θέτει, κατά κάποιο τρόπο, τα θεμέλια για περαιτέρω εξελίξεις. Ένα επόμενο βήμα θα μπορούσε να είναι η υποστήριξη πολυζωνικών μοντέλων, ώστε να μπορεί να προσομοιωθεί η συμπεριφορά πιο σύνθετων κτιρίων, όπως πολυκατοικίες ή εκπαιδευτικά ιδρύματα. Επίσης, θα ήταν πολύ χρήσιμο να επεκταθεί το pyBuildingEnergy ώστε να υποστηρίζει και άλλα ενεργειακά συστήματα, όπως αντλίες θερμότητας, φωτοβολταϊκά ή μηχανισμούς φυσικού και τεχνητού δροσισμού, ώστε να προσεγγίσει πληρέστερα τη λειτουργία ενός σύγχρονου κτιρίου.

Παράλληλα, η ανάπτυξη ενός πιο φιλικού γραφικού περιβάλλοντος για τον χρήστη (GUI) θα μπορούσε να απλοποιήσει σημαντικά τη διαδικασία ορισμού των παραμέτρων, επιτρέποντας και

σε μη προγραμματιστές ή μηχανικούς χωρίς εμπειρία σε Python να αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητες του εργαλείου.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η δυνατότητα διασταύρωσης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με πραγματικά ενεργειακά δεδομένα για παράδειγμα από BEMS (Building Energy Management Systems), έξυπνους μετρητές ή ΠΕΑ. Η συστηματική επικύρωση με πραγματικά δεδομένα θα ενίσχυε την αξιοπιστία και την εγκυρότητα του μοντέλου.

Τέλος, μια σημαντική κατεύθυνση εξέλιξης αφορά τη διασύνδεση του εργαλείου με τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης και Βαθιάς Μάθησης (AI/DL), με στόχο την αυτόματη εξαγωγή γεωμετρικής πληροφορίας από κατόψεις, σχέδια CAD ή τρισδιάστατα μοντέλα. Ο συνδυασμός αυτός θα επιτρέψει τον περαιτέρω αυτοματισμό της παραμετροποίησης, ελαχιστοποιώντας τον χρόνο εισαγωγής δεδομένων και μειώνοντας τα πιθανά σφάλματα από τον χρήστη.

Σε κάθε περίπτωση, η εργασία αυτή προσφέρει μια πρώτη ολοκληρωμένη προσπάθεια προς την κατεύθυνση της συμβατότητας μεταξύ εθνικών κανονισμών και διεθνών προτύπων, και δημιουργεί τις συνθήκες για την ανάπτυξη πιο σύγχρονων και ευέλικτων εργαλείων ενεργειακής ανάλυσης κτιρίων στο ελληνικό πλαίσιο.

# Βιβλιογραφία

- [1] European Commission. (2021). Energy performance of buildings. European Commission. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en)
- [2] European Commission. (2021). Proposal for a directive of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast) (COM(2021) 802 final). European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0802>
- [3] Ma, Z., Cooper, P., Daly, D., & Ledo, L. (2012). Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings*, 55, 889–902. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.018>
- [4] Buildings Performance Institute Europe (BPIE). (2016). 9 ways to make the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) more effective. BPIE. [https://bpie.eu/wp-content/uploads/2016/08/EPBD-paper\\_Eng.pdf](https://bpie.eu/wp-content/uploads/2016/08/EPBD-paper_Eng.pdf)
- [5] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (TEE). (2017). TOTEE 20701-1/2017: Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και την έκδοση ΠΕΑ (ΦΕΚ Β' 4003/2017). Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. <https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2021/03/TOTEE-1.pdf>
- [6] Zangheri, P., Economidou, M., & Bertoldi, P. (2021). Progress of Member States in implementing the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD). *Energy Policy*, 148, 112013. <https://doi.org/10.2760/914310>
- [7] Kelly, S., Crawford-Brown, D., & Pollitt, M. G. (2012). Building performance evaluation and certification in the UK: Is SAP fit for purpose? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9), 6861–6878. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.018>
- [8] Armitage, P., & Gorse, C. (2016). Energy performance certificates: Assessing accuracy and evaluating the impact of improvements. *Energy and Buildings*, 130, 618–630.
- [9] Fylan, F., Glew, D., & Smith, M. (2016). The reality of reassessing EPC ratings: How repeat assessments produce variable results. *Energy Policy*, 88, 76–85.
- [10] Climate Policy Initiative. (2022). The Landscape of Climate Finance in Germany: Annexes. Climate Policy Initiative. <https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2012/11/The-Landscape-of-Climate-Finance-in-Germany-Annexes.pdf>
- [11] Buildings Performance Institute Europe. (2024). *Energy Performance Certificates: Policy needs and best practices*. <https://www.bpie.eu/publication/energy-performance-certificates-policy-needs-and-best-practices/>

- [12] European Commission. *EU taxonomy for sustainable activities*. from [https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities\\_en](https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_en)
- [13] Vardopoulos, I., Santamouris, M., Zorpas, A. A., Barone, G., Italos, C., & Vassiliades, C. (2024). A Comparative Study on Discrepancies in Residential Building Energy Performance Certification in a Mediterranean Context. *Buildings*, 14(4), 1009. <https://doi.org/10.3390/buildings14041009>
- [14] Sayfekar, M., & Jenkins, D. P. (2025). Energy performance certificate calculation methodologies across Europe and accommodating new performance indicators. *Building Services Engineering Research and Technology*, 46(1), 45–59. <https://doi.org/10.1177/01436244241282076>
- [15] SECCA. (2023). *Quality control of energy performance certificates*. Retrieved from [https://secca.eu/wp-content/uploads/2023/09/5\\_-Karolis -SECCA\\_KG\\_EPC\\_QC\\_elements\\_2023-09-28\\_final-ENG-1.pdf](https://secca.eu/wp-content/uploads/2023/09/5_-Karolis_SECCA_KG_EPC_QC_elements_2023-09-28_final-ENG-1.pdf)
- [16] Wederhake, L., Wenninger, S., Wiethe, C., Fridgen, G., & Stirnweiß, D. (2022). Benchmarking building energy performance: Accuracy by involving occupants in collecting data. *Journal of Cleaner Production*, 378, 134847. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134762>
- [17] Lee, K., & Chen, H. (2022). Explainable artificial intelligence for building energy performance certificate labelling classification. *Energy Informatics*, 5(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s42162-022-00214-1>
- [18] BUILD UP Platform. (2023). *Accuracy of EPCs: EU guidelines and tools*. Retrieved from <https://www.buildup.eu/en/news/accuracy-epcs-eu-guidelines-and-tools>
- [19] Gill, Z. M., Tierney, M. J., Pegg, I. M., & Allan, N. (2010). Low-energy dwellings: The contribution of behaviours to actual performance. *Building Research & Information*, 38(5), 491–508. <https://doi.org/10.1080/09613218.2010.505371>
- [20] European Commission, Joint Research Centre (JRC). (2020). *Energy Performance Certificates in the EU: Status and recommendations*. Retrieved from <https://dx.doi.org/10.2760/751957>
- [21] Buildings Performance Institute Europe. (2011). *Europe's buildings under the microscope: A country-by-country review of the energy performance of buildings*. BPIE. <https://www.bpie.eu/publication/europes-buildings-under-the-microscope>
- [22] Concerted Action EPBD. (2020). *Implementation of the EPBD in Italy*. <https://www.ca-epbd.eu/Media/638373598968137658/Implementation-of-the-EPBD-in-Italy-2020.pdf>
- [23] Concerted Action EPBD. (2020). *Implementation of the EPBD in Greece*.

<https://www.ca-epbd.eu/Media/638373599786588364/Implementation-of-the-EPBD-in-Greece-2020.pdf>

[24] Concerted Action EPBD. *Cyprus*. <https://www.ca-epbd.eu/countries/cyprus>

[25] Concerted Action EPBD. (2020). *Implementation of the EPBD in Austria*. <https://www.ca-epbd.eu/Media/638373591769297881/Implementation-of-the-EPBD-in-Austria--2020.pdf>

[26] Concerted Action EPBD. (2020). *Implementation of the EPBD in Spain*. <https://www.ca-epbd.eu/Media/638373595976427691/Implementation-of-the-EPBD-in-Spain-2020.pdf>

[27] Concerted Action EPBD. *Belgium*. <https://www.ca-epbd.eu/countries/belgium>

[28] Li, Y., Kubicki, S., Guerriero, A., & Rezgui, Y. (2019). *Review of building energy performance certification schemes towards future improvement*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 113, 109244. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109244>

[29] Concerted Action EPBD. (2020). *Implementation of the EPBD in Sweden*. <https://www.ca-epbd.eu/Media/638373595736227761/Implementation-of-the-EPBD-in-Sweden.pdf>

[30] Concerted Action EPBD. (2020). *Implementation of the EPBD in the Netherlands*. <https://www.ca-epbd.eu/Media/638373598968137658/Implementation-of-the-EPBD-in-the-Netherlands-2020.pdf>

[31] X-tendo Consortium. (2024). Periodic Reporting for period 2 - X-tendo. European Commission. <https://cordis.europa.eu/project/id/845958/reporting>

[32] European Commission. (2024). *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast)*. Official Journal of the European Union, L 275, 1–86. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024L1275>

[33] Sloan, B., Urquhart, I., Doherty, O., & Macleod, F. (2025). *Operational delivery of Energy Performance Certificates in Europe*. ClimateXChange. <https://www.climateexchange.org.uk/publications/operational-delivery-of-energy-performance-certificates-in-europe/>

[34] Klitou, T., Pavlou, N., Barrère, C., Dourlens–Quanranta, S., Momi, S., & Messerve, T. B. (2024). *Bridging the gap: A comprehensive review of EPC and SRI calculation tools in Europe* <https://doi.org/10.23919/SpliTech61897.2024.10612659>

[35] European Commission. (2023). *Integrated EPB Assessments: A pathway for effective EPBD implementation (LIFE22-CET-iEPB/101120690)*. LIFE Programme. <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE22-CET-iEPB-101120690/integrated-epb-assessments-a-pathway-for-effective-epbd-implementation>

- [36] TIMEPAC Consortium. (2023). *TIMEPAC – Towards Innovative Methods for Energy Performance Assessment and Certification*. Horizon 2020 Project. <https://timepac.eu/>
- [37] European Commission. *Smart readiness indicator*. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/smart-readiness-indicator\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/smart-readiness-indicator_en)
- [38] European Commission. (2020). *Definition of the digital building logbook: Report 1 of the study on the development of a European Union framework for buildings' digital logbook*. Publications Office of the European Union. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/cacf9ee6-06ba-11eb-a511-01aa75ed71a1/language-en>
- [39] European Commission. *EU Building Stock Observatory*. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/eu-building-stock-observatory\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/eu-building-stock-observatory_en)
- [40] BUILD UP. *Insights from the Digital Building Logbook (DBL) Study*. <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/publications/insights-digital-building-logbook-dbl-study>
- [41] European Commission. *Renovation wave*. From [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en)
- [42] International Organization for Standardization. (2017). *ISO 52016-1:2017. Energy performance of buildings — Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads — Calculation procedures*. ISO. <https://www.iso.org/standard/65696.html>
- [43] Antonucci, D., Oberegger, U. F., & Somova, O. (n.d.). *pyBuildingEnergy* [Source code]. EURAC EEB Group. <https://github.com/EURAC-EEBgroup/pyBuildingEnergy>
- [44] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). (n.d.). *Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK)*. Retrieved from <https://ypen.gov.gr/energeia/energeiaki-exoikonomisi/ktiria/kenak/>
- [45] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). (2018). *ΥΑ ΥΠΕΝ/ΔΕΠΕΑ/85251/242 – Καθορισμός ελάχιστων απαιτήσεων για τα κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας*. ΦΕΚ Β' 5447/2018. [https://www.et.gr/api/DownloadFeksApi/?fek\\_pdf=2018045475](https://www.et.gr/api/DownloadFeksApi/?fek_pdf=2018045475)
- [46] Hellenic Ministry of Environment and Energy. (2019). *National Energy and Climate Plan (NECP)*. [https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-03/el\\_final\\_necp\\_main\\_en\\_0.pdf](https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-03/el_final_necp_main_en_0.pdf)
- [47] TABULA. *TABULA WebTool – Typology approach for building stock energy performance analysis*. Institute of Housing and Environment (IWU). <https://webtool.building-typology.eu/>