



Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας

Διαχείριση Τεχνικών Έργων

Διπλωματική Εργασία

«Βιοκλιματικός σχεδιασμός, ενεργειακό αποτύπωμα - ισοζύγιο  
μεγάλων κτιριακών έργων»

ΡΟΠΑΚΑ ΣΤΥΛΙΑΝΗ

Επιβλέπων καθηγητής: ΣΚΑΛΩΜΕΝΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Πάτρα, 2026

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

«Βιοκλιματικός σχεδιασμός, ενεργειακό αποτύπωμα - ισοζύγιο  
μεγάλων κτιριακών έργων»

ΡΟΠΑΚΑ ΣΤΥΛΙΑΝΗ

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:  
«ΣΚΑΛΩΜΕΝΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ»  
Μέλος Σ.Ε.Π. Ε.Α.Π.»

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:  
«ΜΠΙΣΚΙΝΗΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ»  
Μέλος Σ.Ε.Π. Ε.Α.Π.»

Πάτρα, 2026

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν, με άμεσο ή έμμεσο τρόπο, στην εκπόνησή της.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κωνσταντίνο Σκαλωμένο, για την υποστήριξή του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους διδάσκοντες του προγράμματος σπουδών, των οποίων η επιστημονική κατάρτιση και η εκπαιδευτική συμβολή αποτέλεσαν σημαντική βάση για την ανάπτυξη των γνώσεων και των δεξιοτήτων που αξιοποιήθηκαν στην εργασία.

Ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου και τους ανθρώπους του κοντινού μου περιβάλλοντος για την κατανόηση, την υπομονή και την ηθική υποστήριξη που μου προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η παρουσία και η ενθάρρυνσή τους αποτέλεσαν σημαντικό στήριγμα για την ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους όσους συνέβαλαν με πληροφορίες, τεχνικά στοιχεία, συζητήσεις ή πρακτική βοήθεια στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την ενεργειακή, βιοκλιματική, οικονομική και περιβαλλοντική αναβάθμιση υφιστάμενης πολυκατοικίας, με στόχο τη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων παρέμβασης. Το κτίριο μελέτης είναι πολυκατοικία κατασκευής του 1987, με ισόγειο και πέντε υπερκείμενους ορόφους κατοικιών, η οποία παρουσιάζει χαρακτηριστικά παλαιότερου ελληνικού αστικού κτιριακού αποθέματος, όπως ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία, παλαιά κουφώματα αλουμινίου με μονό υαλοπίνακα, απουσία οργανωμένης εξωτερικής σκίασης και παλαιές ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις.

Η μεθοδολογία της εργασίας βασίστηκε στην αρχιτεκτονική αποτύπωση του κτιρίου, στην αξιοποίηση σχεδίων CAD, στην αναλυτική επιμέτρηση επιφανειών, όγκων και τεχνικών στοιχείων και στη δημιουργία υπολογιστικών φύλλων Excel. Μέσω των υπολογιστικών φύλλων οργανώθηκαν οι ποσότητες του κτιρίου, οι παραδοχές κόστους, οι ενεργειακοί δείκτες, οι συντελεστές λειτουργικών εκπομπών και οι περιβαλλοντικοί συντελεστές των παρεμβάσεων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη διαφανή και ελέγξιμη σύγκριση των σεναρίων ως προς το αρχικό κόστος, την εξοικονόμηση ενέργειας, την οικονομική απόδοση, τις λειτουργικές εκπομπές και το ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα.

Αρχικά αποτιμήθηκε η υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου ως Σενάριο 0. Στη συνέχεια εξετάστηκαν τρία σενάρια αναβάθμισης. Το Σενάριο 1 αφορά την παθητική και βιοκλιματική αναβάθμιση του κελύφους, με παρεμβάσεις σε τοιχοποιίες, δώμα, κουφώματα και σκίαση. Το Σενάριο 2 αφορά την αναβάθμιση των τεχνικών συστημάτων και της παραγωγής ζεστού νερού χρήσης. Το Σενάριο 3 αποτελεί συνδυαστική προσέγγιση, στην οποία συνεξετάζονται οι παρεμβάσεις στο κέλυφος και στα τεχνικά συστήματα.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το Σενάριο 2 παρουσιάζει την καλύτερη οικονομική αποδοτικότητα, με τη μικρότερη απλή περίοδο αποπληρωμής, ενώ το Σενάριο 3 επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη συνολική ενεργειακή και περιβαλλοντική βελτίωση. Το Σενάριο 1, αν και εμφανίζει μικρότερη αριθμητική εξοικονόμηση, αναδεικνύει τη σημασία του βιοκλιματικού σχεδιασμού, καθώς μειώνει την ενεργειακή ζήτηση και βελτιώνει τη φυσική συμπεριφορά του κτιρίου. Συνολικά, η εργασία καταλήγει ότι η βέλτιστη στρατηγική ενεργειακής αναβάθμισης υφιστάμενων πολυκατοικιών δεν πρέπει

να βασίζεται σε έναν μόνο δείκτη, αλλά σε πολυκριτηριακή αξιολόγηση που συνδυάζει κόστος, ενέργεια, ανθρακικό αποτύπωμα, θερμική άνεση και μακροπρόθεσμη λειτουργική ποιότητα.

### **Λέξεις – Κλειδιά**

Ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων, βιοκλιματικός σχεδιασμός, ενεργειακή εξοικονόμηση, ανθρακικό αποτύπωμα, ενσωματωμένο GWP, τεχνικοοικονομική αξιολόγηση, σενάρια αναβάθμισης, κύκλος ζωής κτιρίου.

## « Bioclimatic design, energy footprint - balance of large building projects»

«Ropaka Styliani»

### **Abstract**

This diploma thesis examines the energy, bioclimatic, economic and environmental upgrading of an existing apartment building through the comparative assessment of alternative intervention scenarios. The case-study building is a residential apartment block constructed in 1987, consisting of a ground floor and five residential floors. It presents typical characteristics of older Greek urban residential buildings, such as insufficient thermal insulation, old sliding aluminium frames with single glazing, absence of organized external shading, and outdated electromechanical systems.

The methodology was based on the architectural documentation of the building, the use of CAD drawings, the detailed quantity take-off of surfaces, volumes and technical elements, and the development of Excel-based calculation models. Through these calculation sheets, the building quantities, cost assumptions, energy indicators, operational emission factors and environmental coefficients of the proposed interventions were organized in a transparent and traceable way. This approach enabled the comparative assessment of the scenarios in terms of initial investment cost, energy savings, economic performance, operational emissions and embodied carbon footprint.

Initially, the existing condition of the building was assessed as Scenario 0, which served as the reference case. Three upgrading scenarios were then examined. Scenario 1 concerns the passive and bioclimatic upgrading of the building envelope, including interventions on external walls, roof, openings and solar shading. Scenario 2 concerns the upgrading of technical systems and domestic hot water production. Scenario 3 represents a combined upgrading strategy, integrating both envelope-related and technical system interventions.

The results showed that Scenario 2 presents the best economic performance, as it achieves the shortest simple payback period. Scenario 3 achieves the highest overall energy and environmental improvement, as it results in the greatest reduction in annual energy

consumption and operational CO<sub>2</sub>eq emissions. Scenario 1, although showing lower numerical energy savings compared with the other two upgrading scenarios, highlights the importance of bioclimatic design, since it reduces energy demand and improves the passive thermal behaviour of the building.

Overall, the thesis concludes that the optimal strategy for upgrading existing apartment buildings should not be based on a single criterion. Instead, it should rely on a multi-criteria assessment that combines cost, energy savings, carbon footprint, thermal comfort, bioclimatic performance and long-term operational quality. The combined approach is considered the most comprehensive strategy when the objective is not only rapid economic return, but also the long-term improvement of the building's energy, environmental and functional performance.

## **Keywords**

Energy upgrading of buildings, bioclimatic design, energy savings, carbon footprint, embodied GWP, techno-economic assessment, upgrading scenarios, building life cycle.

## Περιεχόμενα

|                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ευχαριστίες .....                                                                                                             | iv  |
| Περίληψη.....                                                                                                                 | v   |
| Abstract .....                                                                                                                | vii |
| Περιεχόμενα .....                                                                                                             | ix  |
| Κατάλογος Σχημάτων .....                                                                                                      | xi  |
| Κατάλογος Πινάκων .....                                                                                                       | xii |
| Συνομογραφίες & Ακρωνύμια.....                                                                                                | xiv |
| 1. Εισαγωγή.....                                                                                                              | 1   |
| 1.1 Εισαγωγή και γενικό πλαίσιο της εργασίας .....                                                                            | 1   |
| 1.2 Σκοπός, αντικείμενο και στόχοι της εργασίας .....                                                                         | 4   |
| 1.3 Δομή της εργασίας .....                                                                                                   | 7   |
| 2. Θεωρητικό υπόβαθρο.....                                                                                                    | 10  |
| 2.1 Βιοκλιματικός σχεδιασμός και παθητικές στρατηγικές σε αστικό περιβάλλον.....                                              | 10  |
| 2.2 Ενεργειακό αποτύπωμα και ενεργειακό ισοζύγιο κτιρίων, λειτουργική ενέργεια και<br>ενσωματωμένη ενέργεια.....              | 14  |
| 2.3 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα και αξιολόγηση κύκλου ζωής κτιρίων, βασικοί δείκτες<br>και έννοιες.....                          | 21  |
| 2.4 EPD και δεδομένα περιβαλλοντικών επιδόσεων υλικών, ποιότητα δεδομένων και<br>αβεβαιότητες .....                           | 28  |
| 3. Κανονιστικό και θεσμικό πλαίσιο.....                                                                                       | 36  |
| 3.1 Διεθνές πλαίσιο για LCA και περιβαλλοντική διαχείριση.....                                                                | 36  |
| 3.2 Ευρωπαϊκό πλαίσιο για ενεργειακή απόδοση κτιρίων και απαίτηση αποτίμησης<br>εκπομπών .....                                | 41  |
| 3.3 Ελληνικό πλαίσιο για ενεργειακή απόδοση, εθνικές απαιτήσεις και εφαρμογές σε<br>μελέτες κτιρίων .....                     | 48  |
| 3.4 Πρότυπα και τεχνικοί κανόνες για αποτίμηση κύκλου ζωής κτιρίων και υλικών,<br>αρχές οριοθέτησης και μονάδα αναφοράς ..... | 54  |
| 4. Αποτελέσματα.....                                                                                                          | 61  |
| 4.1 Αρχιτεκτονική αποτύπωση και CAD σχεδίαση .....                                                                            | 61  |
| 4.2 Επιμετρητική ανάλυση γεωμετρικών και δομικών στοιχείων .....                                                              | 68  |
| 4.3 Οργάνωση υπολογιστικού μοντέλου επιμετρήσεων σε Excel .....                                                               | 73  |
| 4.4 Παραδοχές κόστους υλικών, εργασιών και τεχνικών επιλογών βιοκλιματικής<br>αναβάθμισης.....                                | 79  |
| 4.5 Ενεργειακοί δείκτες, βιοκλιματικές παράμετροι και εκτίμηση εξοικονόμησης .....                                            | 86  |
| 4.6 Περιβαλλοντικοί δείκτες υλικών και λειτουργικών εκπομπών.....                                                             | 93  |
| 4.7 Δομή σεναρίων και συγκριτική αξιολόγηση.....                                                                              | 104 |
| 5. Εφαρμογή σεναρίων και παρουσίαση αποτελεσμάτων .....                                                                       | 114 |
| 5.1 Υφιστάμενη κατάσταση κτιρίου, Σενάριο 0 .....                                                                             | 114 |
| 5.2 Σενάριο 1: Παθητική και βιοκλιματική αναβάθμιση κελύφους.....                                                             | 119 |
| 5.3 Σενάριο 2: Αναβάθμιση τεχνικών συστημάτων και ZNX .....                                                                   | 126 |
| 5.4 Σενάριο 3: Συνδυαστικό σενάριο βέλτιστης αναβάθμισης .....                                                                | 132 |
| 5.5 Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων σεναρίων .....                                                                     | 139 |
| 6.....                                                                                                                        | 148 |

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1 Συγκριτική αξιολόγηση κόστους .....                         | 148 |
| 6.2 Συγκριτική αξιολόγηση ενεργειακής εξοικονόμησης .....       | 153 |
| 6.3 Συγκριτική αξιολόγηση ανθρακικού αποτυπώματος .....         | 158 |
| 6.4 Ρόλος του βιοκλιματικού σχεδιασμού .....                    | 164 |
| 6.5 Τεχνικοοικονομική και περιβαλλοντική κατάταξη σεναρίων..... | 170 |
| 6.6 Περιορισμοί της μεθοδολογίας .....                          | 176 |
| 6.7 Συμπεράσματα και προτάσεις .....                            | 182 |
| Βιβλιογραφία.....                                               | 188 |

## Κατάλογος Σχημάτων

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| Σχήμα 4.0.1 Κάτοψη ισογείου του κτιρίου μελέτης. ....              | 62  |
| Σχήμα 4.0.2 Κάτοψη τυπικού ορόφου Α, Β, Γ, Δ και Ε. ....           | 63  |
| Σχήμα 4.0.3 Ξυλότυπος τυπικού επιπέδου. ....                       | 64  |
| Σχήμα 4.0.4 Κάτοψη δώματος. ....                                   | 65  |
| Σχήμα 5.0.1 Συνολικό αρχικό κόστος ανά σενάριο. ....               | 140 |
| Σχήμα 5.0.2 Ετήσια τελική κατανάλωση ενέργειας ανά σενάριο. ....   | 141 |
| Σχήμα 5.0.3 Ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας ανά σενάριο. ....      | 142 |
| Σχήμα 5.0.4 Ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας ανά σενάριο. .... | 143 |
| Σχήμα 5.0.5 Απλή περίοδος αποπληρωμής Σεναρίων 1, 2 και 3. ....    | 143 |
| Σχήμα 5.0.6 Ετήσιες λειτουργικές εκπομπές ανά σενάριο. ....        | 144 |
| Σχήμα 5.0.7 Ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών ανά σενάριο. ....  | 144 |
| Σχήμα 5.0.8 Αρχικό ενσωματωμένο GWP παρεμβάσεων ανά σενάριο. ....  | 145 |
| Σχήμα 5.9 Περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης ανά σενάριο. ....       | 146 |
| Σχήμα 5.10 Καθαρή μείωση εκπομπών 50ετίας ανά σενάριο. ....        | 146 |

## Κατάλογος Πινάκων

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 1.0.1 Στόχοι εργασίας .....                                                                  | 5   |
| Πίνακας 1.0.2 Ερευνητικά ερωτήματα εργασίας. ....                                                    | 6   |
| Πίνακας 4.0.1 Βασικά γεωμετρικά μεγέθη κτιρίου μελέτης .....                                         | 69  |
| Πίνακας 4.0.2 Κύριες επιφάνειες κελύφους και ανοιγμάτων .....                                        | 70  |
| Πίνακας 4.0.3 Επιμέτρηση σκυροδέματος φέροντος οργανισμού και θεμελίωσης.....                        | 71  |
| Πίνακας 4.0.4 Δομή υπολογιστικού αρχείου επιμετρήσεων .....                                          | 74  |
| Πίνακας 4.0.5 Βασικές ποσότητες εξόδου από το υπολογιστικό αρχείο .....                              | 77  |
| Πίνακας 4.0.6 Ενδεικτικές κατηγορίες τεχνικών επιλογών για κοστολόγηση και<br>αξιολόγηση.....        | 82  |
| Πίνακας 4.0.7 Βασικοί ενεργειακοί δείκτες της ανάλυσης .....                                         | 87  |
| Πίνακας 0.8 Βιοκλιματικές παράμετροι και επίδραση στο ενεργειακό ισοζύγιο .....                      | 89  |
| Πίνακας 0.9 Ενδεικτική δομή ενεργειακών υπολογισμών στο υπολογιστικό μοντέλο .....                   | 92  |
| Πίνακας 4.0.10 Ιεράρχηση πηγών περιβαλλοντικών συντελεστών .....                                     | 96  |
| Πίνακας 4.0.11 Ενδεικτική δομή περιβαλλοντικών δεδομένων υλικών .....                                | 97  |
| Πίνακας 4.0.12 Περιβαλλοντικοί δείκτες αξιολόγησης .....                                             | 100 |
| Πίνακας 4.0.13 Δομή υπολογισμού περιβαλλοντικού αποτυπώματος στο Excel .....                         | 101 |
| Πίνακας 4.0.14 Δομή σεναρίων αξιολόγησης .....                                                       | 105 |
| Πίνακας 4.0.15 Ενδεικτική λογική αξιολόγησης ανά σενάριο .....                                       | 107 |
| Πίνακας 4.0.16 Δείκτες συγκριτικής αξιολόγησης σεναρίων .....                                        | 108 |
| Πίνακας 4.0.17 Ενδεικτική δομή υπολογιστικής καρτέλας σεναρίου .....                                 | 111 |
| Πίνακας 5.0.1 Βασικά γεωμετρικά στοιχεία Σεναρίου 0 .....                                            | 114 |
| Πίνακας 5.0.2 Βασικά στοιχεία κελύφους και κουφωμάτων Σεναρίου 0 .....                               | 115 |
| Πίνακας 5.0.3 Υφιστάμενες εγκαταστάσεις Σεναρίου 0 .....                                             | 116 |
| Πίνακας 5.0.4 Κατανάλωση νερού και ΖΝΧ Σεναρίου 0 .....                                              | 117 |
| Πίνακας 0.5 Ενεργειακοί δείκτες Σεναρίου 0 .....                                                     | 118 |
| Πίνακας 5.0.6 Οικονομικοί και περιβαλλοντικοί δείκτες Σεναρίου 0 .....                               | 118 |
| Πίνακας 0.7 Βασικές παρεμβάσεις Σεναρίου 1 .....                                                     | 120 |
| Πίνακας 5.0.8 Βασικές ποσότητες Σεναρίου 1 .....                                                     | 122 |
| Πίνακας 5.0.9 Ενεργειακά αποτελέσματα Σεναρίου 1 .....                                               | 122 |
| Πίνακας 5.0.10 Οικονομικά αποτελέσματα Σεναρίου 1 .....                                              | 123 |
| Πίνακας 5.0.11 Περιβαλλοντικά αποτελέσματα Σεναρίου 1 .....                                          | 124 |
| Πίνακας 5.0.12 Ανάλυση ευαισθησίας Σεναρίου 1 .....                                                  | 125 |
| Πίνακας 5.0.13 Βασικές παρεμβάσεις Σεναρίου 2 .....                                                  | 127 |
| Πίνακας 5.0.14 Βασικά δεδομένα υφιστάμενων εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούνται<br>στο Σενάριο 2 ..... | 128 |
| Πίνακας 5.0.15 Ενεργειακά αποτελέσματα Σεναρίου 2 .....                                              | 129 |
| Πίνακας 5.0.16 Οικονομικά αποτελέσματα Σεναρίου 2 .....                                              | 129 |
| Πίνακας 5.0.17 Περιβαλλοντικά αποτελέσματα Σεναρίου 2 .....                                          | 130 |
| Πίνακας 5.0.18 Ανάλυση ευαισθησίας Σεναρίου 2 .....                                                  | 132 |
| Πίνακας 5.0.19 Βασική λογική Σεναρίου 3 .....                                                        | 133 |
| Πίνακας 5.0.20 Ενεργειακά αποτελέσματα Σεναρίου 3 .....                                              | 134 |
| Πίνακας 5.0.21 Οικονομικά αποτελέσματα Σεναρίου 3 .....                                              | 135 |
| Πίνακας 5.0.22 Περιβαλλοντικά αποτελέσματα Σεναρίου 3 .....                                          | 136 |

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 5.0.23 Συνοπτική σύγκριση Σεναρίου 3 με τα προηγούμενα σενάρια .....                   | 138 |
| Πίνακας 5.0.24 Ανάλυση ευαισθησίας Σεναρίου 3 .....                                            | 138 |
| Πίνακας 5.0.25 Συνοπτική περιγραφή εξεταζόμενων σεναρίων .....                                 | 140 |
| Πίνακας 5.0.26 Συνολικό αρχικό κόστος ανά σενάριο .....                                        | 140 |
| Πίνακας 5.0.27 Ετήσια τελική κατανάλωση ενέργειας ανά σενάριο .....                            | 141 |
| Πίνακας 5.0.28 Εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με το Σενάριο 0 .....                           | 141 |
| Πίνακας 5.0.29 Οικονομικά αποτελέσματα σεναρίων .....                                          | 142 |
| Πίνακας 5.0.30 Λειτουργικές εκπομπές και ετήσια μείωση εκπομπών.....                           | 143 |
| Πίνακας 5.0.31 Ενσωματωμένο GWP παρεμβάσεων.....                                               | 145 |
| Πίνακας 5.0.32 Περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης και καθαρή μείωση εκπομπών ...                 | 145 |
| Πίνακας 5.0.33 Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών αποτελεσμάτων .....                              | 147 |
| Πίνακας 6.0.1 Συγκριτική παρουσίαση αρχικού κόστους και λειτουργικού κόστους<br>ενέργειας..... | 148 |
| Πίνακας 6.0.2 Απλή περίοδος αποπληρωμής σεναρίων αναβάθμισης.....                              | 150 |
| Πίνακας 5.0.3 Κόστος ανά σωρευτική εξοικονομούμενη kWh στην περίοδο 50 ετών ...                | 150 |
| Πίνακας 0.4 Κόστος ανά καθαρό kg CO <sub>2</sub> eq που αποφεύγεται στην περίοδο 50 ετών ...   | 151 |
| Πίνακας 6.0.5 Συγκριτική παρουσίαση ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης.....                       | 153 |
| Πίνακας 6.0.6 Ποσοστά ενεργειακής εξοικονόμησης έναντι υφιστάμενης κατάστασης                  | 155 |
| Πίνακας 6.0.7 Ενεργειακή διαφοροποίηση μεταξύ των σεναρίων αναβάθμισης.....                    | 156 |
| Πίνακας 6.0.8 Συγκριτική παρουσίαση λειτουργικών εκπομπών .....                                | 159 |
| Πίνακας 6.0.9 Ενσωματωμένο GWP και περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης.....                       | 161 |
| Πίνακας 6.0.10 Καθαρή μείωση εκπομπών στην περίοδο αναφοράς.....                               | 162 |
| Πίνακας 6.0.11 Περιβαλλοντική ερμηνεία σεναρίων.....                                           | 163 |
| Πίνακας 6.0.12 Βιοκλιματική ερμηνεία βασικών χαρακτηριστικών του κτιρίου .....                 | 166 |
| Πίνακας 6.0.13 Διαφοροποίηση Σεναρίων 1 και 2 ως προς τη βιοκλιματική λειτουργία               | 167 |
| Πίνακας 6.0.14 Επιπτώσεις απουσίας βιοκλιματικού σχεδιασμού στην υφιστάμενη<br>κατάσταση.....  | 169 |
| Πίνακας 6.0.15 Συνολικοί δείκτες κατάταξης σεναρίων αναβάθμισης .....                          | 171 |
| Πίνακας 6.0.16 Κατάταξη σεναρίων με βάση οικονομικά κριτήρια .....                             | 171 |
| Πίνακας 6.0.17 Κατάταξη σεναρίων με βάση ενεργειακά κριτήρια .....                             | 172 |
| Πίνακας 6.0.18 Κατάταξη σεναρίων με βάση περιβαλλοντικά κριτήρια .....                         | 173 |
| Πίνακας 6.0.19 Ποιοτική κατάταξη σεναρίων με βάση τη βιοκλιματική συμβολή .....                | 174 |
| Πίνακας 6.0.20 Συνολική ποιοτική αξιολόγηση σεναρίων .....                                     | 174 |
| Πίνακας 6.21 Κύριοι περιορισμοί της μεθοδολογίας και επίδραση στα αποτελέσματα                 | 181 |

## Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

|                   |                                               |
|-------------------|-----------------------------------------------|
| ΔΕ                | Διπλωματική Εργασία                           |
| ΠΣ                | Πρόγραμμα Σπουδών                             |
| ΘΕ                | Θεματική Ενότητα                              |
| ΣΥΝ               | Συντονιστής                                   |
| ΕΑΠ               | Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο                 |
| ΑΠΕ               | Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας                   |
| ΖΝΧ               | Ζεστό Νερό Χρήσης                             |
| ΕΕ                | Ευρωπαϊκή Ένωση                               |
| ΕΣΕΚ              | Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα   |
| Η/Μ               | Ηλεκτρομηχανολογικά                           |
| ΚΕΝΑΚ             | Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων       |
| ΚΣΜΚΕ             | Κτίριο Σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης Ενέργειας |
| ΠΕΑ               | Πιστοποιητικό Ενεργειακής Απόδοσης            |
| ΤΕΕ               | Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας                  |
| ΤΟΤΕΕ             | Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας |
| ΥΠΕΝ              | Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας         |
| CAD               | Computer-Aided Design                         |
| BIM               | Building Information Modelling                |
| BACS              | Building Automation and Control Systems       |
| BMS               | Building Management System                    |
| CEN               | European Committee for Standardization        |
| CO <sub>2</sub>   | Διοξείδιο του άνθρακα                         |
| CO <sub>2eq</sub> | Ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα              |
| EPD               | Environmental Product Declaration             |

|      |                                                |
|------|------------------------------------------------|
| EPBD | Energy Performance of Buildings Directive      |
| EU   | European Union                                 |
| GHG  | Greenhouse Gases                               |
| GWP  | Global Warming Potential                       |
| HVAC | Heating, Ventilation and Air Conditioning      |
| ISO  | International Organization for Standardization |
| LCA  | Life Cycle Assessment                          |
| LCC  | Life Cycle Costing                             |
| LCI  | Life Cycle Inventory                           |
| LCIA | Life Cycle Impact Assessment                   |
| nZEB | nearly Zero-Energy Building                    |
| NZEB | Net Zero Energy Building                       |
| PCR  | Product Category Rules                         |
| PV   | Photovoltaic                                   |
| UHI  | Urban Heat Island                              |
| WLC  | Whole Life Carbon                              |

## 1. Εισαγωγή

### 1.1 Εισαγωγή και γενικό πλαίσιο της εργασίας

Ο κτιριακός τομέας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τομείς κατανάλωσης ενέργειας και παραγωγής εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, τα κτίρια συνδέονται με περίπου το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, ενώ σημαντικό μέρος των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου προέρχεται από την κατασκευή, τη χρήση, την ανακαίνιση και την κατεδάφιση των κτιρίων (European Commission, 2020). Η υψηλή συμμετοχή των κτιρίων στην ενεργειακή κατανάλωση αναδεικνύει την ανάγκη για συστηματική ενεργειακή αναβάθμιση του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος, ιδίως σε κτίρια κατοικίας παλαιότερων δεκαετιών, τα οποία συχνά έχουν ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία, παλαιά κουφώματα και μη αποδοτικά τεχνικά συστήματα.

Η σημασία της ενεργειακής αναβάθμισης των κτιρίων ενισχύεται από το ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο για την ενεργειακή απόδοση. Η αναδιατυπωμένη Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων, Directive (EU) 2024/1275, θέτει το πλαίσιο για τη σταδιακή βελτίωση του κτιριακού αποθέματος, την προώθηση κτιρίων υψηλής ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση των εκπομπών που συνδέονται με τη λειτουργία των κτιρίων (European Parliament & Council, 2024). Η πολιτική αυτή δεν αφορά μόνο τα νέα κτίρια, αλλά και τα υφιστάμενα, καθώς μεγάλο μέρος της μελλοντικής κατανάλωσης ενέργειας θα συνεχίσει να προέρχεται από κτίρια που έχουν ήδη κατασκευαστεί.

Στο πλαίσιο αυτό, η αναβάθμιση των υφιστάμενων πολυκατοικιών αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Τα κτίρια κατοικίας που κατασκευάστηκαν πριν από την αυστηροποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων συχνά παρουσιάζουν αυξημένες ανάγκες θέρμανσης και ψύξης, περιορισμένη αξιοποίηση παθητικών στρατηγικών, χαμηλή αεροστεγανότητα, παλαιά ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα και αυξημένη εξάρτηση από συμβατικές μορφές ενέργειας. Η ενεργειακή τους αναβάθμιση μπορεί να συμβάλει στη μείωση της κατανάλωσης, στη μείωση του λειτουργικού κόστους, στη βελτίωση της θερμικής άνεσης και στον περιορισμό του ανθρακικού αποτυπώματος.

Η ενεργειακή αξιολόγηση ενός κτιρίου δεν πρέπει να περιορίζεται αποκλειστικά στη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας. Αν και η ενέργεια που καταναλώνεται για θέρμανση, ψύξη, ζεστό νερό χρήσης, φωτισμό και λοιπές χρήσεις αποτελεί κρίσιμο δείκτη, η συνολική περιβαλλοντική επίδοση ενός κτιρίου επηρεάζεται και από τα υλικά

και τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ή την αναβάθμισή του. Για τον λόγο αυτό, η σύγχρονη προσέγγιση στρέφεται σταδιακά προς την αξιολόγηση κύκλου ζωής, στην οποία συνεξετάζονται οι λειτουργικές εκπομπές και οι ενσωματωμένες εκπομπές των υλικών. Το ευρωπαϊκό πλαίσιο Level(s) εισάγει τον δείκτη life-cycle Global Warming Potential, με σκοπό την αποτίμηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε διαφορετικά στάδια του κύκλου ζωής του κτιρίου (Dodd et al., 2021).

Η διάκριση μεταξύ λειτουργικού και ενσωματωμένου ανθρακικού αποτυπώματος είναι κρίσιμη για τη μελέτη παρεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης. Μια παρέμβαση μπορεί να μειώνει τη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας, αλλά ταυτόχρονα να απαιτεί νέα υλικά, εξοπλισμό και εργασίες, τα οποία έχουν δικό τους αρχικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Επομένως, η αξιολόγηση πρέπει να εξετάζει αν η μείωση των λειτουργικών εκπομπών σε βάθος χρόνου αντισταθμίζει την πρόσθετη περιβαλλοντική επιβάρυνση των παρεμβάσεων. Με αυτόν τον τρόπο, η επιλογή των λύσεων δεν βασίζεται μόνο στην ενεργειακή εξοικονόμηση, αλλά και στο καθαρό περιβαλλοντικό όφελος.

Παράλληλα, ο βιοκλιματικός σχεδιασμός αποτελεί βασικό εργαλείο για τη μείωση της ενεργειακής ζήτησης των κτιρίων. Η λογική του δεν περιορίζεται στην επιλογή αποδοτικότερων τεχνικών συστημάτων, αλλά εστιάζει στον τρόπο με τον οποίο το ίδιο το κτίριο ανταποκρίνεται στις κλιματικές συνθήκες. Ο προσανατολισμός, η θερμική προστασία του κελύφους, η σκίαση, ο φυσικός αερισμός, ο φυσικός φωτισμός, η θερμική μάζα και ο έλεγχος των ηλιακών κερδών αποτελούν παραμέτρους που μπορούν να μειώσουν τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης. Η βιοκλιματική προσέγγιση έχει ιδιαίτερη αξία στα υφιστάμενα κτίρια, καθώς μπορεί να βελτιώσει τη φυσική λειτουργία του κελύφους και να περιορίσει την εξάρτηση από μηχανολογικά συστήματα (Givoni, 1998; Olgyay, 1963; Szokolay, 2014).

Η παρούσα εργασία εστιάζει σε υφιστάμενη πολυκατοικία κατασκευής του 1987, με στόχο τη διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων ενεργειακής, βιοκλιματικής και περιβαλλοντικής αναβάθμισης. Το κτίριο εξετάζεται ως αντιπροσωπευτική περίπτωση παλαιότερου αστικού κτιρίου κατοικίας, στο οποίο συνυπάρχουν ανεπαρκές κέλυφος, παλαιά κουφώματα, απουσία οργανωμένης σκίασης, παλαιές ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις και αυξημένες λειτουργικές απαιτήσεις. Η επιλογή της περίπτωσης αυτής επιτρέπει την ανάλυση ενός πραγματικού προβλήματος που συναντάται σε μεγάλο μέρος του ελληνικού κτιριακού αποθέματος.

Η μεθοδολογία της εργασίας στηρίζεται στην αρχιτεκτονική αποτύπωση του κτιρίου, στην επιμετρητική ανάλυση των βασικών δομικών και τεχνικών στοιχείων και στη δημιουργία υπολογιστικών φύλλων Excel για την αξιολόγηση των σεναρίων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη σύνδεση των πραγματικών γεωμετρικών δεδομένων με τις ποσότητες υλικών, το κόστος παρεμβάσεων, την ενεργειακή εξοικονόμηση και το ανθρακικό αποτύπωμα. Το πλεονέκτημα της μεθοδολογίας είναι η διαφάνεια, καθώς κάθε αποτέλεσμα μπορεί να συνδεθεί με συγκεκριμένη παραδοχή, ποσότητα ή συντελεστή.

Στην εργασία εξετάζεται αρχικά η υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου ως σενάριο αναφοράς. Στη συνέχεια αναπτύσσονται τρία σενάρια αναβάθμισης: σενάριο παθητικής και βιοκλιματικής αναβάθμισης του κελύφους, σενάριο αναβάθμισης τεχνικών συστημάτων και παραγωγής ζεστού νερού χρήσης και συνδυαστικό σενάριο ολοκληρωμένης αναβάθμισης. Η διάρθρωση αυτή επιτρέπει τη διακριτή αξιολόγηση της συμβολής του κελύφους, των τεχνικών συστημάτων και της συνδυαστικής προσέγγισης.

Η σύγκριση των σεναρίων γίνεται με βάση οικονομικούς, ενεργειακούς και περιβαλλοντικούς δείκτες. Εξετάζονται το αρχικό κόστος, η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας, το ετήσιο οικονομικό όφελος, η απλή περίοδος αποπληρωμής, οι λειτουργικές εκπομπές, το ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα των παρεμβάσεων, ο περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης και η καθαρή μείωση εκπομπών σε περίοδο αναφοράς. Με τον τρόπο αυτό, η αξιολόγηση δεν περιορίζεται σε έναν μόνο δείκτη, αλλά αποκτά πολυκριτηριακό χαρακτήρα.

Η συμβολή της εργασίας έγκειται στη διαμόρφωση μιας πρακτικής, ελέγξιμης και επαναλήψιμης μεθοδολογίας για την αξιολόγηση παρεμβάσεων σε υφιστάμενα κτίρια κατοικίας. Η χρήση επιμετρήσεων και υπολογιστικών φύλλων καθιστά τη διαδικασία προσαρμόσιμη, ενώ η ενσωμάτωση βιοκλιματικών, ενεργειακών, οικονομικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων επιτρέπει πιο ολοκληρωμένη αξιολόγηση των πιθανών επιλογών. Η εργασία δεν αντιμετωπίζει την ενεργειακή αναβάθμιση ως απλή αντικατάσταση εξοπλισμού, αλλά ως συνδυασμό παθητικών μέτρων, τεχνικών συστημάτων και περιβαλλοντικής αποτίμησης.

Συνολικά, η παρούσα εργασία εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης και της ανάγκης μείωσης των εκπομπών του κτιριακού τομέα. Η ανάλυση αναδεικνύει ότι η αναβάθμιση υφιστάμενων πολυκατοικιών απαιτεί συνδυασμό τεχνικής

τεκμηρίωσης, οικονομικής αξιολόγησης και περιβαλλοντικής σκέψης. Η τελική επιλογή παρεμβάσεων δεν πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στο αρχικό κόστος ή στην εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά στη συνολική ισορροπία μεταξύ ενεργειακής απόδοσης, βιοκλιματικής λειτουργίας, ανθρακικού αποτυπώματος, οικονομικής βιωσιμότητας και ποιότητας κατοίκησης.

## **1.2 Σκοπός, αντικείμενο και στόχοι της εργασίας**

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για την τεχνικοοικονομική, ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων αναβάθμισης υφιστάμενης πολυκατοικίας. Η εργασία εστιάζει σε κτίριο κατοικίας παλαιότερης κατασκευής, με χαρακτηριστικά που συναντώνται συχνά στο ελληνικό αστικό κτιριακό απόθεμα, όπως ανεπαρκής θερμομονωτική προστασία, παλαιά κουφώματα, απουσία οργανωμένου βιοκλιματικού σχεδιασμού και τεχνικά συστήματα μειωμένης ενεργειακής απόδοσης.

Το αντικείμενο της εργασίας δεν περιορίζεται στην απλή ενεργειακή αναβάθμιση του κτιρίου, αλλά επεκτείνεται στη συνολική αξιολόγηση των παρεμβάσεων με βάση τρεις βασικές διαστάσεις: το κόστος εφαρμογής, την εξοικονόμηση ενέργειας και το ανθρακικό αποτύπωμα. Με τον τρόπο αυτό, η αξιολόγηση των σεναρίων δεν βασίζεται μόνο στην οικονομική απόδοση ή μόνο στη μείωση της κατανάλωσης, αλλά επιχειρεί να αποτυπώσει τη συνολική επίδραση κάθε επιλογής στη λειτουργία και στην περιβαλλοντική συμπεριφορά του κτιρίου.

Κεντρική θέση στην εργασία έχει η έννοια του βιοκλιματικού σχεδιασμού. Η ενεργειακή αναβάθμιση ενός υφιστάμενου κτιρίου δεν μπορεί να αντιμετωπίζεται αποκλειστικά ως αντικατάσταση τεχνικών συστημάτων. Η βελτίωση του κελύφους, ο έλεγχος των ηλιακών κερδών, η θερμική προστασία του δώματος, η αναβάθμιση των κουφωμάτων και η αξιοποίηση παθητικών στρατηγικών αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για τη μείωση της ενεργειακής ζήτησης. Για τον λόγο αυτό, η εργασία εξετάζει διακριτά τη συμβολή των παθητικών και βιοκλιματικών παρεμβάσεων, τη συμβολή των τεχνικών συστημάτων και τη συνδυαστική τους επίδραση.

Η μεθοδολογική προσέγγιση στηρίζεται στην αρχιτεκτονική αποτύπωση του κτιρίου, στην επιμετρητική ανάλυση των βασικών δομικών και τεχνικών στοιχείων και

στη δημιουργία υπολογιστικών φύλλων Excel. Μέσα από τα υπολογιστικά φύλλα οργανώνονται οι ποσότητες του κτιρίου, οι τιμές κόστους, οι παραδοχές ενεργειακής κατανάλωσης, οι συντελεστές εκπομπών και οι περιβαλλοντικοί δείκτες. Η επιλογή αυτής της προσέγγισης επιτρέπει τη διαφάνεια των υπολογισμών και τη δυνατότητα ελέγχου κάθε αποτελέσματος, καθώς κάθε τελικός δείκτης συνδέεται με συγκεκριμένη ποσότητα, τιμή ή παραδοχή.

Βασικός στόχος της εργασίας είναι η διαμόρφωση μιας συγκριτικής βάσης αξιολόγησης, η οποία θα επιτρέπει την κατάταξη των σεναρίων όχι μόνο ως προς την ενεργειακή τους απόδοση, αλλά και ως προς την οικονομική και περιβαλλοντική τους σκοπιμότητα. Για τον σκοπό αυτό, εξετάζεται αρχικά η υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου ως Σενάριο 0. Στη συνέχεια αξιολογούνται τρία σενάρια αναβάθμισης: το πρώτο αφορά την παθητική και βιοκλιματική αναβάθμιση του κελύφους, το δεύτερο την αναβάθμιση των τεχνικών συστημάτων και της παραγωγής ζεστού νερού χρήσης και το τρίτο τον συνδυασμό των δύο προηγούμενων προσεγγίσεων.

Ειδικότεροι στόχοι της εργασίας είναι οι εξής:

**Πίνακας 1.0.1 Στόχοι εργασίας**

| Στόχος                           | Περιγραφή                                                                                                                             |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Αποτύπωση υφιστάμενης κατάστασης | Καταγραφή της γεωμετρίας, των υλικών, των κουφωμάτων, των τεχνικών συστημάτων και των βασικών ενεργειακών χαρακτηριστικών του κτιρίου |
| Επιμετρητική ανάλυση             | Υπολογισμός επιφανειών, όγκων και ποσοτήτων που απαιτούνται για την αξιολόγηση των παρεμβάσεων                                        |
| Διαμόρφωση σεναρίων              | Ανάπτυξη εναλλακτικών σεναρίων παθητικής, τεχνικής και συνδυαστικής αναβάθμισης                                                       |
| Οικονομική αξιολόγηση            | Υπολογισμός αρχικού κόστους, ετήσιας οικονομικής εξοικονόμησης και περιόδου αποπληρωμής                                               |
| Ενεργειακή αξιολόγηση            | Εκτίμηση ετήσιας κατανάλωσης, εξοικονόμησης ενέργειας και ειδικής κατανάλωσης ανά μονάδα επιφάνειας                                   |
| Περιβαλλοντική αξιολόγηση        | Υπολογισμός λειτουργικών εκπομπών, ενσωματωμένου GWP και καθαρής μείωσης εκπομπών                                                     |
| Συγκριτική κατάταξη              | Ιεράρχηση των σεναρίων με πολυκριτηριακή προσέγγιση                                                                                   |

Η εργασία επιδιώκει επίσης να αναδείξει τη διαφορά μεταξύ της ενεργειακής εξοικονόμησης που προκύπτει από τη μείωση της ζήτησης και της εξοικονόμησης που προκύπτει από την αποδοτικότερη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Η πρώτη περίπτωση συνδέεται κυρίως με τις παθητικές και βιοκλιματικές παρεμβάσεις, ενώ η δεύτερη με την αναβάθμιση των τεχνικών συστημάτων. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, διότι δύο σενάρια μπορεί να οδηγούν σε μείωση της κατανάλωσης, αλλά με διαφορετικό τεχνικό μηχανισμό και διαφορετικές επιπτώσεις στην ποιότητα λειτουργίας του κτιρίου.

Ένας ακόμη στόχος είναι η αξιολόγηση της σχέσης μεταξύ ενσωματωμένου και λειτουργικού ανθρακικού αποτυπώματος. Οι παρεμβάσεις αναβάθμισης συνεπάγονται την εισαγωγή νέων υλικών και εξοπλισμού, τα οποία έχουν αρχικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Παράλληλα, όμως, μειώνουν τις λειτουργικές εκπομπές μέσω της εξοικονόμησης ενέργειας. Η εργασία εξετάζει αν και σε ποιο χρονικό διάστημα η μείωση των λειτουργικών εκπομπών αντισταθμίζει το ενσωματωμένο αποτύπωμα των παρεμβάσεων, μέσω του δείκτη περιβαλλοντικού χρόνου απόσβεσης.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται και στη δυνατότητα πρακτικής εφαρμογής της μεθοδολογίας. Η χρήση Excel ως βασικού υπολογιστικού εργαλείου επιτρέπει την ανάπτυξη ενός εύελικτου και επαναλήψιμου πλαισίου, το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί σε άλλα υφιστάμενα κτίρια κατοικίας. Η μεθοδολογία μπορεί να εμπλουτιστεί με ακριβέστερα δεδομένα, όπως πραγματικές καταναλώσεις, προσφορές υλικών και εργασιών, Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντων ή αναλυτικά δεδομένα ενεργειακής επιθεώρησης. Έτσι, η εργασία δεν περιορίζεται στη συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης, αλλά μπορεί να αποτελέσει βάση για αντίστοιχες εφαρμογές προκαταρκτικής αξιολόγησης.

Τα κύρια ερευνητικά ερωτήματα που διατρέχουν την εργασία είναι τα ακόλουθα:

**Πίνακας 1.0.2 Ερευνητικά ερωτήματα εργασίας.**

| Ερευνητικό ερώτημα                                                        | Περιεχόμενο                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Ποια είναι η υφιστάμενη ενεργειακή και περιβαλλοντική εικόνα του κτιρίου; | Αφορά την αποτύπωση της αρχικής κατάστασης και τη διαμόρφωση του Σεναρίου 0            |
| Ποια είναι η συμβολή των παθητικών και βιοκλιματικών παρεμβάσεων;         | Αφορά τη μείωση της ενεργειακής ζήτησης μέσω κελύφους, κουφωμάτων, δώματος και σκίασης |
| Ποια είναι η συμβολή των τεχνικών                                         | Αφορά τη μείωση της κατανάλωσης μέσω αποδοτικότερων                                    |

| Ερευνητικό ερώτημα                                                 | Περιεχόμενο                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| συστημάτων;                                                        | συστημάτων θέρμανσης, ψύξης, ZNX και φωτισμού                                                   |
| Ποιο σενάριο είναι οικονομικά αποδοτικότερο;                       | Αφορά το κόστος, την ετήσια οικονομική εξοικονόμηση και την περίοδο αποπληρωμής                 |
| Ποιο σενάριο οδηγεί στη μεγαλύτερη μείωση ανθρακικού αποτυπώματος; | Αφορά τις λειτουργικές εκπομπές, το ενσωματωμένο GWP και την καθαρή μείωση εκπομπών             |
| Ποιο σενάριο είναι συνολικά πληρέστερο;                            | Αφορά τη συνδυαστική αξιολόγηση κόστους, ενέργειας, περιβάλλοντος και βιοκλιματικής λειτουργίας |

Η σημασία της εργασίας έγκειται στο ότι προσεγγίζει την ενεργειακή αναβάθμιση όχι ως μονοδιάστατο τεχνικό πρόβλημα, αλλά ως σύνθετη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Στην πράξη, η επιλογή παρεμβάσεων σε υφιστάμενα κτίρια επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως το διαθέσιμο κεφάλαιο, η αναμενόμενη εξοικονόμηση, η διάρκεια ζωής των παρεμβάσεων, η περιβαλλοντική επίπτωση, η θερμική άνεση και η δυνατότητα εφαρμογής. Η εργασία επιχειρεί να ενσωματώσει αυτούς τους παράγοντες σε ένα ενιαίο πλαίσιο αξιολόγησης.

Συνοπτικά, ο σκοπός της εργασίας είναι να διερευνήσει ποια στρατηγική αναβάθμισης μπορεί να προσφέρει την καλύτερη ισορροπία μεταξύ ενεργειακής απόδοσης, οικονομικής βιωσιμότητας, βιοκλιματικής βελτίωσης και μείωσης ανθρακικού αποτυπώματος. Μέσα από τη σύγκριση των σεναρίων, η εργασία επιδιώκει να καταλήξει σε τεκμηριωμένα συμπεράσματα σχετικά με το αν προτεραιότητα πρέπει να δοθεί στο κέλυφος, στα τεχνικά συστήματα ή σε έναν συνδυασμό παρεμβάσεων.

### 1.3 Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε έξι κεφάλαια, τα οποία ακολουθούν τη λογική πορεία από τη θεωρητική τεκμηρίωση και το κανονιστικό πλαίσιο έως την εφαρμογή στο κτίριο μελέτης, την ανάπτυξη σεναρίων και τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Η δομή της εργασίας έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε να παρουσιάζεται με σαφήνεια η σχέση μεταξύ βιοκλιματικού σχεδιασμού, ενεργειακής αναβάθμισης, τεχνικοοικονομικής αξιολόγησης και ανθρακικού αποτυπώματος.

Το **Κεφάλαιο 1** αποτελεί την εισαγωγή της εργασίας. Παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο του προβλήματος, δηλαδή η ανάγκη ενεργειακής και περιβαλλοντικής αναβάθμισης του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος. Αναλύεται η σημασία του κτιριακού τομέα στην κατανάλωση ενέργειας και στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ενώ αναδεικνύεται ο ρόλος του βιοκλιματικού σχεδιασμού ως βασικού εργαλείου μείωσης της ενεργειακής ζήτησης. Στο ίδιο κεφάλαιο καθορίζονται ο σκοπός, το αντικείμενο, οι επιμέρους στόχοι και τα ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας.

Το **Κεφάλαιο 2** περιλαμβάνει το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας. Παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες που σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, τη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας, τις εκπομπές CO<sub>2</sub>eq, το ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα και την αξιολόγηση κύκλου ζωής. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού, στη θερμική συμπεριφορά του κελύφους, στη σημασία του προσανατολισμού, της σκίασης, του φυσικού αερισμού, της θερμικής προστασίας και της ποιότητας των κουφωμάτων. Το κεφάλαιο αυτό λειτουργεί ως θεωρητική βάση για την κατανόηση των παρεμβάσεων που εξετάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

Το **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζει το θεσμικό, τεχνικό και μεθοδολογικό πλαίσιο που διέπει την ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση κτιρίων. Αναφέρονται οι βασικές ευρωπαϊκές και εθνικές κατευθύνσεις για την ενεργειακή απόδοση, οι έννοιες που σχετίζονται με τα κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας, οι απαιτήσεις ενεργειακής αναβάθμισης και οι τεχνικοί κανόνες που υποστηρίζουν την αποτίμηση του κύκλου ζωής. Στο ίδιο κεφάλαιο εξετάζεται η σημασία προτύπων και μεθοδολογικών πλαισίων, όπως η LCA, οι Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντων και η οριοθέτηση των σταδίων κύκλου ζωής των υλικών και των κτιρίων.

Το **Κεφάλαιο 4** αναπτύσσει τη μεθοδολογία της εργασίας. Αρχικά παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική αποτύπωση και η CAD σχεδίαση του κτιρίου μελέτης. Στη συνέχεια αναλύεται η επιμετρητική διαδικασία, μέσα από την οποία οι γεωμετρικές και κατασκευαστικές πληροφορίες μετατρέπονται σε επιφάνειες, όγκους και ποσότητες. Περιγράφεται η οργάνωση του υπολογιστικού μοντέλου σε Excel, οι παραδοχές κόστους υλικών και εργασιών, οι ενεργειακοί δείκτες, οι περιβαλλοντικοί συντελεστές και η δομή των σεναρίων αξιολόγησης. Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί τη γέφυρα μεταξύ της θεωρητικής τεκμηρίωσης και της εφαρμογής στο πραγματικό κτίριο.

Το **Κεφάλαιο 5** περιλαμβάνει την εφαρμογή των σεναρίων και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Αρχικά παρουσιάζεται το Σενάριο 0, δηλαδή η υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου, η οποία χρησιμοποιείται ως βάση σύγκρισης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το Σενάριο 1, που αφορά την παθητική και βιοκλιματική αναβάθμιση του κελύφους, το Σενάριο 2, που αφορά την αναβάθμιση των τεχνικών συστημάτων και της παραγωγής ζεστού νερού χρήσης, και το Σενάριο 3, που αποτελεί τη συνδυαστική προσέγγιση βέλτιστης αναβάθμισης. Για κάθε σενάριο παρουσιάζονται τα βασικά αποτελέσματα κόστους, ενεργειακής κατανάλωσης, εξοικονόμησης, λειτουργικών εκπομπών, ενσωματωμένου GWP και περιβαλλοντικού χρόνου απόσβεσης.

Το **Κεφάλαιο 6** περιλαμβάνει τη συγκριτική αξιολόγηση, τη συζήτηση και τα συμπεράσματα. Τα σενάρια συγκρίνονται ως προς το αρχικό κόστος, την οικονομική αποδοτικότητα, την ενεργειακή εξοικονόμηση, τη μείωση λειτουργικών εκπομπών, το ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα και τη συνολική βιοκλιματική συμβολή. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται ποιο σενάριο είναι οικονομικά αποδοτικότερο, ποιο οδηγεί στη μεγαλύτερη ενεργειακή και περιβαλλοντική βελτίωση και ποιο παρουσιάζει την πληρέστερη τεχνική προσέγγιση. Παρουσιάζονται επίσης οι περιορισμοί της μεθοδολογίας και οι τελικές προτάσεις για μελλοντική εφαρμογή ή περαιτέρω διερεύνηση.

Η παραπάνω δομή επιτρέπει την ανάπτυξη της εργασίας με λογική αλληλουχία. Αρχικά τεκμηριώνεται το επιστημονικό και κανονιστικό πλαίσιο, στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία και ακολουθεί η εφαρμογή της στο κτίριο μελέτης. Τέλος, τα αποτελέσματα αξιολογούνται συγκριτικά, ώστε να εξαχθούν τεκμηριωμένα συμπεράσματα για τη σκοπιμότητα των διαφορετικών στρατηγικών αναβάθμισης.

Με τον τρόπο αυτό, η εργασία επιχειρεί να συνδέσει την τεχνική ανάλυση με την πρακτική λήψη αποφάσεων. Η σύγκριση των σεναρίων δεν περιορίζεται στο ποια λύση εξοικονομεί περισσότερη ενέργεια, αλλά εξετάζει ποια λύση είναι οικονομικά βιώσιμη, ποια μειώνει περισσότερο το ανθρακικό αποτύπωμα, ποια ενισχύει τη βιοκλιματική συμπεριφορά του κτιρίου και ποια προσφέρει την πληρέστερη συνολική αναβάθμιση.

## 2. Θεωρητικό υπόβαθρο

### 2.1 Βιοκλιματικός σχεδιασμός και παθητικές στρατηγικές σε αστικό περιβάλλον

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός αποτελεί θεμελιώδη προσέγγιση του αειφόρου κτιριακού σχεδιασμού, καθώς επιδιώκει την προσαρμογή του κτιρίου στις τοπικές κλιματικές συνθήκες και τη μέγιστη αξιοποίηση των φυσικών ροών ενέργειας. Η βασική του λογική δεν περιορίζεται στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μέσω τεχνικών συστημάτων, αλλά εστιάζει πρωτίστως στον ίδιο τον αρχιτεκτονικό και κατασκευαστικό σχεδιασμό. Ο προσανατολισμός, η μορφή του κτιρίου, η σχέση πλήρων και διαφανών επιφανειών, η ποιότητα του κελύφους, η σκίαση, ο φυσικός αερισμός, η θερμική μάζα και ο φυσικός φωτισμός επηρεάζουν άμεσα τη θερμική και οπτική άνεση, καθώς και τις ανάγκες για θέρμανση, ψύξη και τεχνητό φωτισμό. Με την έννοια αυτή, ο βιοκλιματικός σχεδιασμός λειτουργεί ως πρώτο επίπεδο ενεργειακής στρατηγικής, πριν από την επιλογή μηχανολογικών συστημάτων υψηλής απόδοσης ή την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Olgyay, 1963/2015; Elaouzy & El Fadar, 2022). Η σημασία των παθητικών στρατηγικών στον μεσογειακό χώρο τεκμηριώνεται και σε πρόσφατες μελέτες, στις οποίες η θερμομόνωση, ο φυσικός αερισμός, η ηλιακή προστασία και η διαμόρφωση των ανοιγμάτων αναδεικνύονται ως κρίσιμες παράμετροι για τη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων και των εκπομπών CO<sub>2</sub> των κτιρίων.

Σε μεσογειακά και θερμά αστικά κλίματα, όπως αυτό της Αθήνας, ο βιοκλιματικός σχεδιασμός πρέπει να επιτυγχάνει ισορροπία ανάμεσα στις χειμερινές και στις θερινές απαιτήσεις. Κατά τη χειμερινή περίοδο, είναι επιθυμητή η ελεγχόμενη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας, ιδίως μέσω νότιων ανοιγμάτων, ώστε να περιορίζονται οι ανάγκες θέρμανσης. Αντίθετα, κατά τη θερινή περίοδο, η ανεξέλεγκτη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στις όψεις και στα υαλοστάσια μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση των εσωτερικών χώρων και σε αυξημένη ανάγκη μηχανικής ψύξης. Συνεπώς, ο σχεδιασμός των ανοιγμάτων δεν μπορεί να βασίζεται μόνο στην επιδίωξη φυσικού φωτισμού ή θέας, αλλά πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό, τον λόγο υαλοστασίων προς αδιαφανείς επιφάνειες, τα θερμοοπτικά χαρακτηριστικά των υαλοπινάκων και την ύπαρξη κατάλληλων συστημάτων σκίασης. Η έρευνα των Méndez Echenagucia et al. (2023) δείχνει ότι τα χαρακτηριστικά του κελύφους, όπως οι τοιχοποιίες, τα υαλοστάσια, η

σκίαση και ο λόγος ανοιγμάτων προς συμπαγείς επιφάνειες, επηρεάζουν τόσο τις λειτουργικές εκπομπές όσο και το ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα του κτιρίου. Επομένως, οι παρεμβάσεις στο κέλυφος πρέπει να αξιολογούνται όχι μόνο ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας στη φάση λειτουργίας, αλλά και ως προς τις συνολικές επιπτώσεις τους στον κύκλο ζωής του κτιρίου.

Η σκίαση αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παθητικές στρατηγικές σε αστικά κτίρια κατοικίας, ιδιαίτερα σε όψεις με νότιο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό. Τα οριζόντια σκίαστρα είναι συνήθως αποτελεσματικότερα σε νότιες όψεις, όπου η ηλιακή τροχιά είναι υψηλότερη κατά τη θερινή περίοδο, ενώ τα κατακόρυφα ή κινητά συστήματα σκίασης είναι περισσότερο κατάλληλα για ανατολικές και δυτικές όψεις, όπου η χαμηλή γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας καθιστά δυσκολότερο τον έλεγχό της. Παράλληλα, στοιχεία όπως εξώστες, πέργκολες, προβόλοι, φυτεύσεις και κινητά σκίαστρα μπορούν να λειτουργήσουν συνδυαστικά, περιορίζοντας τα θερινά θερμικά κέρδη χωρίς να αποκλείουν πλήρως τον φυσικό φωτισμό. Η αποτελεσματικότητα της σκίασης δεν εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία της, αλλά και από τη θέση του κτιρίου μέσα στον αστικό ιστό, την απόσταση από γειτονικά κτίρια, το πλάτος της οδού και το ύψος των απέναντι όγκων. Για τον λόγο αυτό, σε πυκνοδομημένες περιοχές η αξιολόγηση της σκίασης πρέπει να γίνεται σε επίπεδο πραγματικού αστικού περιβάλλοντος και όχι μόνο σε επίπεδο μεμονωμένης όψης.

Ο φυσικός αερισμός είναι επίσης κρίσιμη παράμετρος του βιοκλιματικού σχεδιασμού, καθώς μπορεί να συμβάλει στη μείωση της θερμοκρασίας των εσωτερικών χώρων, στην απομάκρυνση της αποθηκευμένης θερμότητας και στη βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα. Η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται από τη δυνατότητα διαμπερούς ροής, τη θέση και το μέγεθος των ανοιγμάτων, τη διαφορά πίεσης μεταξύ προσήνεμης και υπήνεμης πλευράς, καθώς και από τη δυνατότητα νυχτερινού αερισμού. Ο νυχτερινός αερισμός είναι ιδιαίτερα σημαντικός σε κτίρια με επαρκή θερμική μάζα, επειδή επιτρέπει την αποφόρτιση των δομικών στοιχείων από τη θερμότητα που συσσωρεύεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ωστόσο, στο αστικό περιβάλλον η εφαρμογή του φυσικού αερισμού παρουσιάζει περιορισμούς, όπως η ηχορύπανση, η ατμοσφαιρική ρύπανση, τα ζητήματα ασφάλειας και η μειωμένη ταχύτητα ανέμου σε στενούς αστικούς δρόμους. Επομένως, ο φυσικός αερισμός πρέπει να σχεδιάζεται με ρεαλιστικές παραδοχές

και να συνδυάζεται με κατάλληλη διάταξη κατόψεων, ανοιγμάτων και ενδιάμεσων χώρων.

Η θερμική μάζα των δομικών στοιχείων αποτελεί ακόμη μία βασική παράμετρο παθητικής λειτουργίας, καθώς επηρεάζει τη χρονική υστέρηση και την εξομάλυνση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων. Υλικά με υψηλή θερμοχωρητικότητα, όπως το σκυρόδεμα, η λιθοδομή ή ορισμένες βαριές τοιχοποιίες, μπορούν να αποθηκεύουν θερμότητα και να την αποδίδουν με χρονική καθυστέρηση, συμβάλλοντας στη σταθεροποίηση του εσωτερικού θερμικού περιβάλλοντος. Η θερμική μάζα, όμως, δεν λειτουργεί αυτόνομα. Για να είναι ευεργετική σε θερμά κλίματα, πρέπει να συνδυάζεται με σκίαση, φυσικό ή νυχτερινό αερισμό και περιορισμό των ανεπιθύμητων ηλιακών κερδών. Διαφορετικά, υπάρχει κίνδυνος συσσώρευσης θερμότητας και επιδείνωσης της θερινής δυσφορίας. Έτσι, η θερμική μάζα δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται απλώς ως ιδιότητα των υλικών, αλλά ως τμήμα μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής κελύφους και αερισμού.

Στο αστικό περιβάλλον, η απόδοση των παθητικών στρατηγικών επηρεάζεται σημαντικά από το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας. Η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα στις πυκνοδομημένες περιοχές συνδέεται με την απορρόφηση και επανεκπομπή θερμότητας από σκληρές επιφάνειες, τη μειωμένη παρουσία πρασίνου, τη γεωμετρία των αστικών χαραδρών και τις ανθρωπογενείς θερμικές εκπομπές. Η αστική υπερθέρμανση αυξάνει τις ανάγκες ψύξης και μπορεί να επιβαρύνει σημαντικά την αιχμή της ηλεκτρικής ζήτησης, ιδίως σε περιόδους καύσωνα (Santamouris, 2015). Σε μεσογειακές πόλεις, η ένταση της αστικής θερμικής νησίδας αποτελεί κρίσιμη μεταβλητή για την εκτίμηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων, καθώς επηρεάζει τόσο τη διάρκεια όσο και την ένταση των περιόδων ψύξης (Salvati et al., 2017). Για την Αθήνα, όπου συνυπάρχουν υψηλές θερινές θερμοκρασίες, πυκνή δόμηση και αυξημένη χρήση συστημάτων κλιματισμού, η ένταξη στρατηγικών περιορισμού της υπερθέρμανσης αποκτά ιδιαίτερη σημασία.

Σε επίπεδο οριζόντιων επιφανειών, τα ψυχρά και τα φυτεμένα δώματα μπορούν να συμβάλουν στη μείωση των θερμικών φορτίων και στη βελτίωση του μικροκλίματος. Τα ψυχρά υλικά περιορίζουν την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω υψηλής ανακλαστικότητας και αυξημένης ικανότητας εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας, ενώ τα φυτεμένα δώματα προσφέρουν πρόσθετη θερμική προστασία μέσω του υποστρώματος,

της βλάστησης και της εξατμισοδιαπνοής. Η επιλογή μεταξύ των δύο λύσεων δεν είναι μονοσήμαντη, διότι εξαρτάται από το στατικό υπόβαθρο, το κόστος κατασκευής και συντήρησης, τη διαθεσιμότητα νερού, τις απαιτήσεις χρήσης του δώματος και τη συνολική ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου. Σε κατοικίες μεσογειακών περιοχών, οι λύσεις αυτές μπορούν να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση κατά την περίοδο ψύξης, εφόσον ενταχθούν σε συνολικό σχεδιασμό κελύφους και όχι ως απομονωμένες παρεμβάσεις (Zinzi & Agnoli, 2012).

Ο φυσικός φωτισμός συνδέεται άμεσα με τη μείωση της ηλεκτρικής κατανάλωσης, αλλά και με την ποιότητα των εσωτερικών χώρων. Η επιδίωξη υψηλών επιπέδων φυσικού φωτισμού πρέπει να συνδυάζεται με έλεγχο της θάμβωσης και των θερμικών κερδών, ώστε να μην οδηγεί σε αυξημένη ανάγκη ψύξης. Σε πολώροφα αστικά κτίρια, η διαθεσιμότητα φυσικού φωτισμού επηρεάζεται από τον προσανατολισμό, το βάθος των χώρων, τη γεωμετρία των ανοιγμάτων, τα υλικά των εσωτερικών επιφανειών και τη σκίαση από γειτονικά κτίρια. Συνεπώς, ο φυσικός φωτισμός δεν πρέπει να εξετάζεται ανεξάρτητα από τη θερμική συμπεριφορά του κελύφους, αλλά ως μέρος μιας ενιαίας περιβαλλοντικής στρατηγικής.

Συνολικά, ο βιοκλιματικός σχεδιασμός σε αστικό περιβάλλον απαιτεί σύνθεση πολλών παραμέτρων και όχι εφαρμογή γενικών κανόνων. Η ίδια στρατηγική μπορεί να έχει διαφορετικό αποτέλεσμα ανάλογα με τον προσανατολισμό, τη γεωμετρία, τη χρήση, το μικροκλίμα και τα υλικά του κτιρίου. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση των παθητικών μέτρων πρέπει να συνδέεται με ποσοτικά εργαλεία ενεργειακής και περιβαλλοντικής αποτίμησης. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στην παρούσα διπλωματική εργασία, όπου η μελέτη περίπτωσης εξάωροφης πολυκατοικίας στην Αθήνα δεν εξετάζεται μόνο ως αρχιτεκτονικό αντικείμενο, αλλά ως σύστημα με ενεργειακές απαιτήσεις και περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε όλο τον κύκλο ζωής του. Με αυτόν τον τρόπο, το υποκεφάλαιο του βιοκλιματικού σχεδιασμού λειτουργεί ως θεωρητική βάση για τη μετέπειτα ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου, της λειτουργικής ενέργειας, της ενσωματωμένης ενέργειας και της αξιολόγησης κύκλου ζωής.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, οι αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού δεν αντιμετωπίζονται μόνο ως γενικές κατευθύνσεις αρχιτεκτονικής σύνθεσης, αλλά μετατρέπονται σε συγκεκριμένες παραμέτρους αξιολόγησης σεναρίων. Ειδικότερα, η θερμομονωτική αναβάθμιση του κελύφους, η βελτίωση των κουφωμάτων, η εφαρμογή

συστημάτων σκίασης, η αξιοποίηση του φυσικού αερισμού και η διαχείριση των ηλιακών κερδών θα εξεταστούν ως εναλλακτικές ή συνδυαστικές παρεμβάσεις, με σκοπό την εκτίμηση της επίδρασής τους στο ενεργειακό ισοζύγιο, στο κόστος εφαρμογής και στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα του κτιρίου. Με τον τρόπο αυτό, ο βιοκλιματικός σχεδιασμός συνδέεται άμεσα με την ποσοτική αξιολόγηση των σεναρίων και δεν περιορίζεται σε περιγραφικό ή θεωρητικό επίπεδο.

## **2.2 Ενεργειακό αποτύπωμα και ενεργειακό ισοζύγιο κτιρίων, λειτουργική ενέργεια και ενσωματωμένη ενέργεια**

Το ενεργειακό αποτύπωμα ενός κτιρίου εκφράζει το σύνολο των ενεργειακών απαιτήσεων που συνδέονται με την κατασκευή, τη λειτουργία, τη συντήρηση, τις αντικαταστάσεις και το τέλος ζωής του. Η έννοια αυτή είναι ευρύτερη από την απλή κατανάλωση ηλεκτρικής ή θερμικής ενέργειας κατά τη χρήση του κτιρίου, διότι περιλαμβάνει τόσο τη λειτουργική ενέργεια όσο και την ενσωματωμένη ενέργεια των υλικών και των τεχνικών συστημάτων. Με τον τρόπο αυτό, το κτίριο αντιμετωπίζεται όχι μόνο ως καταναλωτής ενέργειας κατά τη φάση λειτουργίας του, αλλά ως τεχνικό σύστημα με ενεργειακές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε όλο τον κύκλο ζωής του. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τα σύγχρονα κτίρια υψηλής ενεργειακής απόδοσης, επειδή όσο μειώνεται η λειτουργική κατανάλωση μέσω βελτιωμένου κελύφους, αποδοτικών συστημάτων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τόσο αυξάνεται η σχετική σημασία των επιπτώσεων που συνδέονται με τα υλικά, την κατασκευή και τις αντικαταστάσεις (Huang et al., 2024; Myint et al., 2025). Η διεθνής βιβλιογραφία δείχνει ότι η μετάβαση προς κτίρια σχεδόν μηδενικής ή μηδενικής ανθρακικής επίδοσης δεν μπορεί να αξιολογηθεί μόνο με βάση τη λειτουργική κατανάλωση, αλλά απαιτεί παράλληλη εξέταση του λειτουργικού και του ενσωματωμένου άνθρακα (Myint et al., 2025).

Η σημασία του κτιριακού τομέα είναι ιδιαίτερα μεγάλη σε παγκόσμιο επίπεδο. Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία του Global Alliance for Buildings and Construction και του UNEP, ο τομέας των κτιρίων και των κατασκευών παραμένει ένας από τους βασικούς παράγοντες κατανάλωσης ενέργειας και εκπομπών CO<sub>2</sub>, καθώς συνδέεται με σημαντικό ποσοστό της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης και των εκπομπών που σχετίζονται με την ενέργεια και τις κατασκευαστικές διεργασίες. Η IEA διακρίνει

ειδικότερα τη λειτουργία των κτιρίων, η οποία αντιστοιχεί σε περίπου 30% της παγκόσμιας τελικής κατανάλωσης ενέργειας και περίπου 26% των παγκόσμιων ενεργειακών εκπομπών, ενώ οι ευρύτερες εκτιμήσεις που περιλαμβάνουν και την κατασκευή ανεβάζουν τη συνολική συνεισφορά του τομέα. Η διαφοροποίηση των ποσοστών οφείλεται κυρίως στα διαφορετικά όρια συστήματος, δηλαδή στο αν λαμβάνεται υπόψη μόνο η λειτουργία των κτιρίων ή και η παραγωγή υλικών, η κατασκευή και οι συναφείς διεργασίες (International Energy Agency [IEA], 2024; United Nations Environment Programme [UNEP], 2025).

Το ενεργειακό ισοζύγιο ενός κτιρίου περιγράφει τη σχέση μεταξύ των ενεργειακών εισροών, των ενεργειακών απωλειών, των εσωτερικών και ηλιακών κερδών, καθώς και της ενέργειας που ενδεχομένως παράγεται επιτόπου από ανανεώσιμες πηγές. Σε επίπεδο λειτουργίας, το ισοζύγιο επηρεάζεται από τις ανάγκες θέρμανσης, ψύξης, αερισμού, παραγωγής ζεστού νερού χρήσης, φωτισμού και βοηθητικών καταναλώσεων. Σε ορισμένες αναλύσεις περιλαμβάνονται και οι μη ρυθμιζόμενες καταναλώσεις, όπως οι ηλεκτρικές συσκευές και ο εξοπλισμός των χρηστών, ενώ σε άλλες λαμβάνονται υπόψη μόνο οι ρυθμιζόμενες ενεργειακές χρήσεις που σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Η διάκριση αυτή είναι κρίσιμη, διότι επηρεάζει άμεσα τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων. Για παράδειγμα, δύο κτίρια με παρόμοιο κέλυφος και παρόμοια συστήματα μπορεί να εμφανίζουν διαφορετική πραγματική κατανάλωση εξαιτίας διαφορετικής συμπεριφοράς χρηστών, διαφορετικών ωραρίων λειτουργίας ή διαφορετικής έντασης χρήσης των εσωτερικών χώρων.

Η λειτουργική ενέργεια αφορά την ενέργεια που απαιτείται κατά τη φάση χρήσης του κτιρίου. Περιλαμβάνει την ενέργεια για θέρμανση, ψύξη, αερισμό, φωτισμό, ζεστό νερό χρήσης και λειτουργία τεχνικών εγκαταστάσεων. Η λειτουργική κατανάλωση εκφράζεται συνήθως σε kWh ανά τετραγωνικό μέτρο και έτος, ώστε να μπορεί να συγκριθεί μεταξύ διαφορετικών κτιρίων ή σεναρίων σχεδιασμού. Ωστόσο, η αξιολόγηση δεν πρέπει να περιορίζεται στην τελική ενέργεια που καταναλώνεται στο κτίριο, επειδή η τελική ενέργεια δεν αποτυπώνει πάντοτε το πραγματικό ενεργειακό και περιβαλλοντικό βάρος της κατανάλωσης. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται συχνά η πρωτογενής ενέργεια, η οποία λαμβάνει υπόψη τις απώλειες και τις μετατροπές που προηγούνται της τελικής χρήσης, όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η μεταφορά και η διανομή. Η πρωτογενής ενέργεια επιτρέπει πιο ολοκληρωμένη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών

ενεργειακών φορέων, όπως ηλεκτρική ενέργεια, φυσικό αέριο, πετρέλαιο, τηλεθέρμανση ή ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές.

Η λειτουργική ενεργειακή επίδοση επηρεάζεται κυρίως από το κέλυφος, τα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα, τις κλιματικές συνθήκες και τη χρήση του κτιρίου. Το κέλυφος καθορίζει τις θερμικές απώλειες και τα ηλιακά κέρδη μέσω των τοίχων, των δωματίων, των δαπέδων, των κουφωμάτων και των θερμογεφυρών. Τα συστήματα θέρμανσης, ψύξης και αερισμού καθορίζουν την απόδοση με την οποία καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες. Οι κλιματικές συνθήκες επηρεάζουν τη διάρκεια και την ένταση των περιόδων θέρμανσης και ψύξης, ενώ η συμπεριφορά των χρηστών επηρεάζει τον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων, τη χρήση σκιάσεων, το άνοιγμα των παραθύρων, τις εσωτερικές θερμοκρασίες άνεσης και τη χρήση φωτισμού. Στην περίπτωση μιας πολυκατοικίας στην Αθήνα, η θερινή περίοδος ψύξης και ο έλεγχος της υπερθέρμανσης αποκτούν ιδιαίτερη σημασία, διότι το μεσογειακό κλίμα, η πυκνή δόμηση και η αστική θερμική νησίδα μπορούν να αυξήσουν τις ανάγκες μηχανικής ψύξης.

Η ενσωματωμένη ενέργεια αφορά την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή των δομικών υλικών, την εξόρυξη και επεξεργασία πρώτων υλών, τη μεταφορά τους, την κατασκευή, τη συντήρηση, τις αντικαταστάσεις και τη διαχείριση στο τέλος ζωής. Συνδέεται άμεσα με το ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα, αν και οι δύο έννοιες δεν είναι ταυτόσημες. Η ενσωματωμένη ενέργεια εκφράζει την ενεργειακή απαίτηση, ενώ το ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα εκφράζει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που συνδέονται με την παραγωγή, μεταφορά, κατασκευή, χρήση, αντικατάσταση και τελική διαχείριση των υλικών. Ένα υλικό μπορεί να έχει υψηλή ενσωματωμένη ενέργεια αλλά διαφορετικό ανθρακικό αποτύπωμα ανάλογα με το ενεργειακό μείγμα παραγωγής, την τεχνολογία παραγωγής, το ποσοστό ανακυκλωμένου περιεχομένου και τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης ή ανακύκλωσης στο τέλος ζωής.

Η ενσωματωμένη ενέργεια αποκτά αυξημένη σημασία στα σύγχρονα κτίρια, επειδή οι βελτιώσεις στη λειτουργική ενεργειακή απόδοση μετατοπίζουν το σχετικό βάρος προς τα υλικά και τις κατασκευαστικές επιλογές. Σε παλαιότερα ή χαμηλής ενεργειακής απόδοσης κτίρια, η φάση λειτουργίας συνήθως κυριαρχεί στο συνολικό ενεργειακό και ανθρακικό ισοζύγιο. Αντίθετα, σε νέα ή ανακαινισμένα κτίρια με χαμηλές ανάγκες θέρμανσης και ψύξης, το ποσοστό της ενσωματωμένης ενέργειας και των ενσωματωμένων εκπομπών μπορεί να γίνει πολύ σημαντικό. Αυτό έχει άμεση επίδραση

στον τρόπο με τον οποίο αξιολογούνται οι επιλογές σχεδιασμού. Για παράδειγμα, η αύξηση του πάχους της θερμομόνωσης μπορεί να μειώνει τη λειτουργική κατανάλωση, αλλά ταυτόχρονα αυξάνει την ενσωματωμένη ενέργεια και τις ενσωματωμένες εκπομπές του κελύφους. Επομένως, η βέλτιστη λύση δεν είναι αναγκαστικά εκείνη που ελαχιστοποιεί μόνο τη λειτουργική ενέργεια, αλλά εκείνη που επιτυγχάνει τη χαμηλότερη συνολική επιβάρυνση σε όλο τον κύκλο ζωής (Méndez Echenagucia et al., 2023).

Η παραπάνω παρατήρηση είναι κρίσιμη για τη σύνδεση του βιοκλιματικού σχεδιασμού με την αξιολόγηση κύκλου ζωής. Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός μειώνει τις ενεργειακές ανάγκες μέσω παθητικών μέτρων, όπως προσανατολισμός, σκίαση, φυσικός αερισμός, θερμομόνωση, θερμική μάζα και φυσικός φωτισμός. Ωστόσο, κάθε παθητική στρατηγική υλοποιείται με συγκεκριμένα υλικά και κατασκευαστικά συστήματα, τα οποία έχουν δικό τους ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Έτσι, η αξιολόγηση ενός βιοκλιματικού μέτρου πρέπει να απαντά σε δύο ερωτήματα. Πρώτον, πόσο μειώνει τη λειτουργική ενεργειακή ζήτηση του κτιρίου. Δεύτερον, πόση πρόσθετη ενσωματωμένη ενέργεια και πόσες πρόσθετες εκπομπές απαιτούνται για την εφαρμογή του. Η σύγκριση αυτών των δύο παραμέτρων οδηγεί σε πιο τεκμηριωμένες επιλογές, ιδίως όταν εξετάζονται εναλλακτικά υλικά κελύφους, υαλοστάσια, συστήματα σκίασης ή λύσεις θερμομόνωσης.

Στο πλαίσιο του ενεργειακού ισοζυγίου πρέπει να διακρίνονται επίσης οι έννοιες της παραδιδόμενης, της παραγόμενης και της εξαγόμενης ενέργειας. Η παραδιδόμενη ενέργεια είναι η ενέργεια που εισέρχεται στο κτίριο από εξωτερικούς ενεργειακούς φορείς, όπως το ηλεκτρικό δίκτυο ή καύσιμα. Η παραγόμενη ενέργεια αφορά την ενέργεια που παράγεται εντός ή πλησίον του κτιρίου, για παράδειγμα από φωτοβολταϊκά συστήματα, ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες ή άλλες ανανεώσιμες πηγές. Η εξαγόμενη ενέργεια είναι η ενέργεια που δεν καταναλώνεται επιτόπου και διοχετεύεται στο δίκτυο. Η καθαρή ενεργειακή επίδοση εξαρτάται από τη σχέση αυτών των μεγεθών, αλλά και από το αν η αξιολόγηση γίνεται σε επίπεδο τελικής ενέργειας, πρωτογενούς ενέργειας ή εκπομπών CO<sub>2</sub>. Ένα κτίριο μπορεί να εμφανίζει χαμηλή καθαρή κατανάλωση τελικής ενέργειας λόγω παραγωγής από φωτοβολταϊκά, αλλά να εξακολουθεί να έχει σημαντικές ενσωματωμένες επιπτώσεις λόγω των υλικών και των τεχνικών συστημάτων που απαιτήθηκαν για την κατασκευή του.

Η έννοια του κτιρίου μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης ή μηδενικών εκπομπών πρέπει να ερμηνεύεται με προσοχή. Ένα κτίριο μπορεί να χαρακτηρίζεται ως σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης όταν παρουσιάζει πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση και καλύπτει σημαντικό μέρος των χαμηλών ενεργειακών αναγκών του από ανανεώσιμες πηγές. Ωστόσο, αυτός ο χαρακτηρισμός αφορά κυρίως τη λειτουργική φάση. Αντίθετα, η έννοια του μηδενικού ανθρακικού ισοζυγίου σε όλο τον κύκλο ζωής απαιτεί συνυπολογισμό τόσο των λειτουργικών όσο και των ενσωματωμένων εκπομπών. Η αναδιατυπωμένη Οδηγία (ΕΕ) 2024/1275 για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων ενισχύει αυτή τη λογική, καθώς εισάγει σταδιακά την ανάγκη υπολογισμού του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη σε όλο τον κύκλο ζωής των νέων κτιρίων, με σκοπό τη σύνδεση της ενεργειακής πολιτικής με την αποτίμηση των εκπομπών κύκλου ζωής (European Parliament & Council of the European Union, 2024).

Ιδιαίτερη σημασία έχει και ο χρονικός παράγοντας. Η λειτουργική ενέργεια καταναλώνεται σταδιακά κατά τη διάρκεια της ζωής του κτιρίου, ενώ μεγάλο μέρος της ενσωματωμένης ενέργειας και των ενσωματωμένων εκπομπών πραγματοποιείται πριν ακόμη το κτίριο αρχίσει να λειτουργεί. Οι εκπομπές αυτές συχνά αναφέρονται ως αρχικές ή *upfront* επιπτώσεις, επειδή συνδέονται με τα στάδια παραγωγής υλικών, μεταφοράς και κατασκευής. Η διάκριση αυτή είναι ουσιαστική για την κλιματική αξιολόγηση, διότι οι εκπομπές που πραγματοποιούνται σήμερα έχουν άμεση επίδραση στον περιορισμένο διαθέσιμο ανθρακικό προϋπολογισμό. Με άλλα λόγια, ακόμη και αν ένα υλικό ή ένα τεχνικό σύστημα οδηγεί σε μελλοντική εξοικονόμηση ενέργειας, πρέπει να εξετάζεται αν η αρχική περιβαλλοντική επιβάρυνση αντισταθμίζεται επαρκώς μέσα στη διάρκεια ζωής του κτιρίου. Η δυναμική αυτή έχει αναδειχθεί στη βιβλιογραφία, όπου τονίζεται ότι η χρονική κατανομή των εκπομπών και η αβεβαιότητα των μελλοντικών ενεργειακών μειγμάτων επηρεάζουν ουσιαστικά την αποτίμηση των κτιριακών επιλογών (Resch et al., 2021).

Η μείωση της λειτουργικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με παρεμβάσεις στο κέλυφος και στα συστήματα. Στο κέλυφος περιλαμβάνονται η βελτίωση της θερμομόνωσης, η μείωση θερμογεφυρών, η επιλογή αποδοτικών κουφωμάτων, η ορθολογική διαστασιολόγηση υαλοστασίων, η χρήση κατάλληλων σκιάστρων και η βελτίωση της αεροστεγανότητας. Στα συστήματα περιλαμβάνονται οι αντλίες θερμότητας, οι αποδοτικοί λέβητες ή συστήματα τηλεθέρμανσης όπου υπάρχουν, ο μηχανικός

αερισμός με ανάκτηση θερμότητας, ο φωτισμός υψηλής απόδοσης, οι αυτοματισμοί και η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Ωστόσο, η επιλογή κάθε μέτρου πρέπει να εξετάζεται σε συνδυασμό με το κλίμα, τη χρήση και τη διάρκεια ζωής του κτιρίου. Για παράδειγμα, σε ένα θερμό αστικό κλίμα, η υπερβολική αύξηση της θερμομόνωσης χωρίς επαρκή σκίαση και αερισμό μπορεί να μειώνει τις χειμερινές απώλειες, αλλά να μην αντιμετωπίζει επαρκώς τα θερινά φορτία. Αντίστοιχα, ένα μεγάλο ποσοστό υαλοστασίων μπορεί να βελτιώνει τον φυσικό φωτισμό, αλλά να αυξάνει τα ηλιακά κέρδη και τις ανάγκες ψύξης, αν δεν συνοδεύεται από κατάλληλη ηλιακή προστασία.

Η μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας προϋποθέτει διαφορετικού τύπου στρατηγικές. Βασικές κατευθύνσεις είναι η αποδοτική χρήση υλικών, η αποφυγή υπερδιαστασιολόγησης, η επιλογή υλικών με χαμηλότερο ενεργειακό και ανθρακικό αποτύπωμα, η αύξηση της διάρκειας ζωής των δομικών στοιχείων, η δυνατότητα επισκευής και αντικατάστασης επιμέρους στρώσεων, η χρήση ανακυκλωμένων ή επαναχρησιμοποιούμενων υλικών και ο σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση στο τέλος ζωής. Στα πολυώροφα κτίρια, ο φέρων οργανισμός, τα δάπεδα, οι όψεις και τα υλικά κελύφους μπορεί να έχουν ιδιαίτερα υψηλή συνεισφορά στο ενσωματωμένο αποτύπωμα, λόγω της μεγάλης ποσότητας σκυροδέματος, χάλυβα, μονωτικών υλικών, υαλοστασίων και τελικών επιστρώσεων. Η βιβλιογραφία για τα πολυώροφα κτίρια δείχνει ότι οι επιλογές φέροντος οργανισμού και υλικών μπορούν να διαφοροποιήσουν σημαντικά τις ενσωματωμένες εκπομπές, ακόμη και όταν η γεωμετρία και η λειτουργία του κτιρίου παραμένουν συγκρίσιμες (Hart et al., 2021).

Η σχέση λειτουργικής και ενσωματωμένης ενέργειας δεν είναι στατική. Επηρεάζεται από την εξέλιξη του ενεργειακού μείγματος, την απανθρακοποίηση του ηλεκτρικού δικτύου, τη βελτίωση των βιομηχανικών διεργασιών, τη διαθεσιμότητα περιβαλλοντικών δηλώσεων προϊόντων και την ανάπτυξη τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών για υλικά όπως το τσιμέντο, ο χάλυβας, το αλουμίνιο και το γυαλί. Όσο το ηλεκτρικό δίκτυο γίνεται καθαρότερο, οι λειτουργικές εκπομπές ενός ηλεκτροδοτούμενου κτιρίου μπορεί να μειώνονται με την πάροδο του χρόνου. Αντίθετα, οι ενσωματωμένες εκπομπές των υλικών που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί παραμένουν ουσιαστικά δεσμευμένες στο αρχικό στάδιο κατασκευής. Για τον λόγο αυτό, ο σχεδιασμός χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος πρέπει να δίνει ιδιαίτερη βαρύτητα στις αρχικές αποφάσεις επιλογής υλικών και συστημάτων. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι η μείωση των

ενσωματωμένων εκπομπών απαιτεί συνδυασμό τεχνολογικών και σχεδιαστικών λύσεων, όπως καθαρότερη ενέργεια στη βιομηχανία, χαμηλού άνθρακα σκυρόδεμα και χάλυβα, αυξημένη χρήση ξυλείας όπου είναι τεχνικά εφικτό, βελτιστοποίηση σχεδιασμού και παράταση της διάρκειας ζωής των κτιρίων (Watari et al., 2024).

Η αξιολόγηση του ενεργειακού ισοζυγίου πρέπει να γίνεται με σαφείς δείκτες. Οι συνηθέστεροι δείκτες είναι η ετήσια τελική κατανάλωση ενέργειας, η ετήσια πρωτογενής ενέργεια, οι λειτουργικές εκπομπές CO<sub>2</sub> ή CO<sub>2</sub>eq, η παραγόμενη και εξαγόμενη ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές και η συνολική ενέργεια κύκλου ζωής. Για λόγους συγκρισιμότητας, οι δείκτες εκφράζονται συχνά ανά μονάδα επιφάνειας, όπως kWh/m<sup>2</sup>·έτος ή kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>·έτος. Στις μελέτες κύκλου ζωής χρησιμοποιείται συνήθως και περίοδος αναφοράς, για παράδειγμα 50 έτη, ώστε να ενσωματώνονται οι αντικαταστάσεις, η συντήρηση και η λειτουργία μέσα σε κοινό χρονικό πλαίσιο. Το ευρωπαϊκό πλαίσιο Level(s) προτείνει δείκτες που συνδέουν την ενεργειακή χρήση του σταδίου λειτουργίας με το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη σε όλο τον κύκλο ζωής, στηριζόμενο στη λογική των ευρωπαϊκών προτύπων EN 15978 και EN 15804 (Dodd et al., 2021).

Για την παρούσα διπλωματική εργασία, η διάκριση μεταξύ λειτουργικής και ενσωματωμένης ενέργειας είναι καθοριστική, επειδή η μελέτη περίπτωσης αφορά εξαώροφη πολυκατοικία σε αστικό περιβάλλον της Αθήνας. Ένα τέτοιο κτίριο έχει σημαντικές λειτουργικές ανάγκες, κυρίως για ψύξη, θέρμανση, φωτισμό και ζεστό νερό χρήσης, αλλά ταυτόχρονα ενσωματώνει μεγάλες ποσότητες δομικών υλικών, όπως σκυρόδεμα, χάλυβα, τοιχοποιίες, μονώσεις, επιχρίσματα, κουφώματα, υαλοπίνακες και επιστρώσεις. Επομένως, η αξιολόγηση της επίδοσής του δεν μπορεί να βασιστεί μόνο στη μείωση της κατανάλωσης κατά τη χρήση. Χρειάζεται παράλληλη διερεύνηση των υλικών και των κατασκευαστικών επιλογών που διαμορφώνουν το ενσωματωμένο αποτύπωμα. Η λογική αυτή συνδέει το παρόν υποκεφάλαιο με τα επόμενα υποκεφάλαια του θεωρητικού υποβάθρου, όπου αναλύονται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, η αξιολόγηση κύκλου ζωής, οι περιβαλλοντικές δηλώσεις προϊόντων και η ποιότητα των δεδομένων.

Συμπερασματικά, το ενεργειακό αποτύπωμα και το ενεργειακό ισοζύγιο των κτιρίων πρέπει να προσεγγίζονται ολιστικά. Η λειτουργική ενέργεια παραμένει κρίσιμη, επειδή καθορίζει τη μακροχρόνια κατανάλωση και το κόστος λειτουργίας, ιδίως σε κτίρια με υψηλές απαιτήσεις θέρμανσης ή ψύξης. Η ενσωματωμένη ενέργεια, όμως, είναι εξίσου

σημαντική, επειδή συνδέεται με αποφάσεις που λαμβάνονται ήδη από το στάδιο του σχεδιασμού και της κατασκευής. Η ουσιαστική βελτίωση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής επίδοσης ενός κτιρίου επιτυγχάνεται όταν οι δύο αυτές διαστάσεις εξετάζονται ταυτόχρονα. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται λύσεις που εμφανίζονται αποδοτικές μόνο στη φάση χρήσης, αλλά μεταφέρουν σημαντικές επιβαρύνσεις στη φάση παραγωγής των υλικών, της κατασκευής ή των αντικαταστάσεων. Για τον λόγο αυτό, η ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου αποτελεί αναγκαία βάση για τη μετέπειτα αξιολόγηση κύκλου ζωής και για τη διαμόρφωση τεκμηριωμένων σεναρίων βιοκλιματικής και περιβαλλοντικής βελτιστοποίησης.

Οι βιοκλιματικές παρεμβάσεις επηρεάζουν άμεσα το λειτουργικό σκέλος του ενεργειακού ισοζυγίου, καθώς μπορούν να μειώσουν τις ανάγκες θέρμανσης, ψύξης και τεχνητού φωτισμού. Ωστόσο, κάθε παρέμβαση υλοποιείται με συγκεκριμένα υλικά, τεχνικές λύσεις και εργασίες, οι οποίες έχουν δικό τους κόστος και ενσωματωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Επομένως, η αξιολόγηση μιας βιοκλιματικής λύσης πρέπει να εξετάζει ταυτόχρονα τη μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης και την πρόσθετη επιβάρυνση που προκύπτει από τα υλικά και την κατασκευή της παρέμβασης.

### **2.3 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα και αξιολόγηση κύκλου ζωής κτιρίων, βασικοί δείκτες και έννοιες**

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα ενός κτιρίου εκφράζει το σύνολο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με την ύπαρξη, τη λειτουργία και την τελική διαχείρισή του. Σε αντίθεση με το ενεργειακό αποτύπωμα, το οποίο επικεντρώνεται κυρίως στις ενεργειακές απαιτήσεις, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα περιλαμβάνει ένα ευρύτερο σύνολο επιπτώσεων, όπως οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η κατανάλωση πρωτογενών πόρων, η χρήση νερού, η παραγωγή αποβλήτων, η οξίνιση, ο ευτροφισμός, η δημιουργία φωτοχημικού νέφους και η εξάντληση αβιοτικών πόρων. Επομένως, η περιβαλλοντική αξιολόγηση ενός κτιρίου δεν μπορεί να περιορίζεται μόνο στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη φάση λειτουργίας, αλλά πρέπει να εξετάζει όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής, από την εξόρυξη πρώτων υλών και την παραγωγή δομικών προϊόντων μέχρι τη χρήση, τη συντήρηση, την αντικατάσταση υλικών και τη διαχείριση των αποβλήτων μετά την αποδόμηση.

Η αξιολόγηση κύκλου ζωής, Life Cycle Assessment ή LCA, αποτελεί τη βασική μεθοδολογική προσέγγιση για την ποσοτική αποτίμηση αυτών των επιπτώσεων. Σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044, η LCA περιλαμβάνει τέσσερα βασικά στάδια: τον καθορισμό του σκοπού και του πεδίου εφαρμογής, την απογραφή κύκλου ζωής, την εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Το ISO 14044 καθορίζει ειδικότερα τις απαιτήσεις και τις κατευθυντήριες οδηγίες για τον ορισμό σκοπού και πεδίου, την απογραφή, την εκτίμηση επιπτώσεων, την ερμηνεία, την αναφορά και την κριτική επισκόπηση μιας μελέτης LCA. Η τυποποιημένη αυτή δομή είναι κρίσιμη, επειδή διασφαλίζει ότι η περιβαλλοντική αποτίμηση δεν βασίζεται σε μεμονωμένες εκτιμήσεις, αλλά σε σαφή όρια συστήματος, τεκμηριωμένα δεδομένα και επαναλήψιμη διαδικασία.

Στον κτιριακό τομέα, η LCA παρουσιάζει ιδιαίτερες απαιτήσεις σε σχέση με άλλα προϊόντα, επειδή το κτίριο δεν αποτελεί ένα απλό βιομηχανικό προϊόν με ενιαία σύνθεση και τυποποιημένη διάρκεια ζωής. Αντίθετα, είναι ένα σύνθετο τεχνικό σύστημα που περιλαμβάνει φέροντα οργανισμό, κέλυφος, διαχωριστικά στοιχεία, κουφώματα, μονώσεις, τελειώματα, ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις και διαφορετικές κατηγορίες υλικών, με διαφορετική διάρκεια ζωής και διαφορετικές ανάγκες συντήρησης ή αντικατάστασης. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση κύκλου ζωής ενός κτιρίου απαιτεί σαφή καθορισμό της λειτουργικής ισοδυναμίας, της περιόδου αναφοράς, των ορίων του συστήματος, των σταδίων κύκλου ζωής που θα συμπεριληφθούν, των βάσεων δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν και των σεναρίων που θα υιοθετηθούν για τη χρήση, τη συντήρηση και το τέλος ζωής.

Κεντρική έννοια στην LCA κτιρίων είναι η λειτουργική ισοδυναμία. Η λειτουργική ισοδυναμία περιγράφει το αντικείμενο της αξιολόγησης με τέτοιο τρόπο ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα. Στην περίπτωση ενός κτιρίου, δεν αρκεί να αναφερθεί η επιφάνεια ή ο όγκος του. Πρέπει να περιγράφεται η χρήση, η διάρκεια ζωής αναφοράς, το επίπεδο λειτουργικότητας, οι συνθήκες εσωτερικής άνεσης, η γεωμετρία, το είδος του φέροντος οργανισμού, η ποιότητα του κελύφους και οι βασικές τεχνικές προδιαγραφές. Για παράδειγμα, η σύγκριση δύο πολυκατοικιών έχει νόημα μόνο όταν αυτές παρέχουν ανάλογη λειτουργία, παρόμοια ωφέλιμη επιφάνεια, συγκρίσιμες συνθήκες χρήσης και κοινή περίοδο αξιολόγησης. Διαφορετικά, υπάρχει κίνδυνος τα αποτελέσματα

να αποτυπώνουν όχι μόνο τη διαφορά των υλικών ή των συστημάτων, αλλά και διαφορές στη λειτουργία και στο επίπεδο εξυπηρέτησης.

Η περίοδος αναφοράς είναι εξίσου σημαντική. Στις κτιριακές μελέτες χρησιμοποιείται συχνά περίοδος 50 ή 60 ετών, αν και η επιλογή της πρέπει να αιτιολογείται ανάλογα με το είδος του κτιρίου, το κανονιστικό πλαίσιο και τον σκοπό της αξιολόγησης. Η περίοδος αναφοράς επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, επειδή καθορίζει πόσες φορές θα αντικατασταθούν επιμέρους στοιχεία όπως κουφώματα, μονώσεις, βαφές, δάπεδα, στεγανώσεις, μηχανολογικός εξοπλισμός και τελικές επιστρώσεις. Ένα υλικό με χαμηλό αρχικό αποτύπωμα αλλά μικρή διάρκεια ζωής μπορεί τελικά να έχει μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση από ένα υλικό με υψηλότερο αρχικό αποτύπωμα αλλά μεγαλύτερη ανθεκτικότητα και λιγότερες ανάγκες αντικατάστασης. Επομένως, η LCA δεν αξιολογεί μόνο την αρχική κατασκευή, αλλά και τη χρονική συμπεριφορά των υλικών και των συστημάτων.

Η ευρωπαϊκή μεθοδολογία για την περιβαλλοντική αποτίμηση κτιρίων στηρίζεται στη λογική των σταδίων κύκλου ζωής. Το EN 15978 καθορίζει εναρμονισμένη μεθοδολογία για την αξιολόγηση και την αναφορά της περιβαλλοντικής επίδοσης κτιρίων σε όλο τον κύκλο ζωής, με εφαρμογή σε νέα κτίρια, υφιστάμενα κτίρια και έργα ανακαίνισης. Η έκδοση EN 15978:2026 ενισχύει αυτή τη λογική, καθώς παρέχει ενιαία προσέγγιση για την αποτίμηση της περιβαλλοντικής επίδοσης σε όλα τα στάδια ζωής του κτιρίου και ενσωματώνει απαιτήσεις πληροφόρησης που σχετίζονται και με τον σχεδιασμό για κυκλικότητα. Η μεθοδολογική σημασία του προτύπου είναι ότι μεταφέρει την LCA από το επίπεδο του μεμονωμένου προϊόντος στο επίπεδο του συνολικού κτιρίου, όπου οι ποσότητες, τα σενάρια χρήσης και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ στοιχείων αποκτούν καθοριστικό ρόλο.

Τα στάδια κύκλου ζωής των κτιρίων οργανώνονται συνήθως σε ενότητες. Οι ενότητες A1 έως A3 αφορούν το στάδιο παραγωγής των προϊόντων, δηλαδή την εξόρυξη και επεξεργασία πρώτων υλών, τη μεταφορά προς τη μονάδα παραγωγής και τη βιομηχανική παραγωγή του δομικού προϊόντος. Οι ενότητες A4 και A5 αφορούν τη μεταφορά των προϊόντων στο εργοτάξιο και τη διαδικασία κατασκευής ή εγκατάστασης. Οι ενότητες B1 έως B7 αφορούν τη φάση χρήσης, η οποία περιλαμβάνει τη χρήση του προϊόντος, τη συντήρηση, την επισκευή, την αντικατάσταση, την ανακαίνιση, τη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας και τη λειτουργική κατανάλωση νερού. Οι ενότητες

C1 έως C4 αφορούν το τέλος ζωής, δηλαδή την αποδόμηση ή κατεδάφιση, τη μεταφορά αποβλήτων, την επεξεργασία αποβλήτων και την τελική διάθεση. Τέλος, η ενότητα D παρουσιάζει τα πιθανά οφέλη και φορτία πέραν των ορίων του συστήματος, όπως τα οφέλη από ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση ή ανάκτηση ενέργειας, χωρίς όμως να πρέπει να συγκρίνεται με τα αποτελέσματα των βασικών σταδίων A έως C.

Η διάκριση αυτή είναι ουσιαστική για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Για παράδειγμα, ένα κτίριο μπορεί να εμφανίζει υψηλό αποτύπωμα στις ενότητες A1 έως A3 λόγω μεγάλων ποσοτήτων σκυροδέματος, χάλυβα, αλουμινίου ή υαλοπινάκων. Ένα άλλο κτίριο μπορεί να έχει χαμηλότερες αρχικές επιπτώσεις, αλλά αυξημένες επιπτώσεις στη φάση B λόγω υψηλής κατανάλωσης ενέργειας ή συχνών αντικαταστάσεων υλικών. Επίσης, η ενότητα D μπορεί να παρουσιάζει δυνητικά οφέλη, εφόσον υλικά ή προϊόντα μπορούν να ανακυκλωθούν ή να επαναχρησιμοποιηθούν. Ωστόσο, τα οφέλη αυτά εξαρτώνται από μελλοντικές συνθήκες, όπως οι τεχνολογίες ανακύκλωσης, η διαθεσιμότητα αγορών δευτερογενών υλικών και η πραγματική δυνατότητα αποσυναρμολόγησης. Για τον λόγο αυτό, η ενότητα D πρέπει να αναφέρεται χωριστά και να ερμηνεύεται με προσοχή.

Ο πιο διαδεδομένος δείκτης περιβαλλοντικής επίδοσης είναι το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη, Global Warming Potential ή GWP, το οποίο εκφράζεται σε kg CO<sub>2</sub>eq. Ο δείκτης αυτός συγκεντρώνει τις εκπομπές διαφορετικών αερίων του θερμοκηπίου σε ισοδύναμη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα, με βάση τη σχετική συμβολή τους στην κλιματική αλλαγή. Στο ευρωπαϊκό πλαίσιο Level(s), ο δείκτης 1.2 αφορά το GWP κύκλου ζωής των κτιρίων και εκφράζεται σε kg CO<sub>2</sub>eq ανά τετραγωνικό μέτρο και έτος, συνδέοντας την αξιολόγηση του κτιρίου με τη διάρκεια ζωής αναφοράς και την επιφάνειά του. Η χρήση του GWP είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή επιτρέπει την άμεση σύνδεση της κτιριακής μελέτης με τους στόχους μείωσης εκπομπών και απανθρακοποίησης. Ωστόσο, δεν πρέπει να αποτελεί τον μοναδικό δείκτη αξιολόγησης, διότι μια λύση που μειώνει τις εκπομπές CO<sub>2</sub>eq μπορεί να αυξάνει άλλες επιπτώσεις, όπως την κατανάλωση νερού, την εξάντληση πόρων ή την παραγωγή αποβλήτων.

Για τον λόγο αυτό, η LCA πρέπει να αντιμετωπίζεται ως πολυκριτηριακή μεθοδολογία. Εκτός από το GWP, μπορούν να εξετάζονται δείκτες όπως το δυναμικό οξίνισης, το δυναμικό ευτροφισμού, το δυναμικό σχηματισμού φωτοχημικού όζοντος, η εξάντληση της στιβάδας του όζοντος, η εξάντληση αβιοτικών πόρων, η χρήση

πρωτογενούς ενέργειας από ανανεώσιμες και μη ανανεώσιμες πηγές, η χρήση νερού και η παραγωγή αποβλήτων. Οι δείκτες αυτοί βοηθούν στον εντοπισμό πιθανών μετατοπίσεων επιβάρυνσης. Για παράδειγμα, η αντικατάσταση ενός υλικού με άλλο χαμηλότερου ανθρακικού αποτυπώματος μπορεί να μειώνει το GWP, αλλά να αυξάνει την κατανάλωση νερού ή την απαίτηση σπάνιων πρώτων υλών. Επομένως, η περιβαλλοντική βελτιστοποίηση δεν πρέπει να βασίζεται σε έναν μόνο δείκτη, αλλά σε συνεκτική αξιολόγηση των βασικών κατηγοριών επιπτώσεων που είναι σχετικές με το αντικείμενο της μελέτης.

Στα κτίρια, ιδιαίτερη σημασία έχει η διάκριση μεταξύ ενσωματωμένων και λειτουργικών επιπτώσεων. Οι ενσωματωμένες επιπτώσεις αφορούν κυρίως τα υλικά, την παραγωγή, τη μεταφορά, την κατασκευή, τη συντήρηση, τις αντικαταστάσεις και το τέλος ζωής. Οι λειτουργικές επιπτώσεις αφορούν την ενέργεια και το νερό που καταναλώνονται κατά τη χρήση του κτιρίου. Η σχέση μεταξύ αυτών των δύο κατηγοριών μεταβάλλεται ανάλογα με το επίπεδο ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου, το κλίμα, τη χρήση, το ενεργειακό μείγμα και τη διάρκεια ζωής. Σε κτίρια χαμηλής ενεργειακής απόδοσης, οι λειτουργικές επιπτώσεις μπορεί να κυριαρχούν. Σε κτίρια υψηλής ενεργειακής απόδοσης, όμως, η σχετική συμμετοχή των ενσωματωμένων επιπτώσεων αυξάνεται. Πρόσφατες μελέτες για ολόκληρο τον κύκλο ζωής κτιρίων επιβεβαιώνουν ότι η αξιολόγηση μόνο της λειτουργικής κατανάλωσης δεν επαρκεί για την εκτίμηση της συνολικής περιβαλλοντικής επίδοσης, ειδικά όταν εξετάζονται σύγχρονες στρατηγικές χαμηλών εκπομπών και επιλογές υλικών (Keyhani et al., 2023; Huang et al., 2024).

Η απογραφή κύκλου ζωής, Life Cycle Inventory ή LCI, αποτελεί το στάδιο στο οποίο συλλέγονται και ποσοτικοποιούνται οι εισροές και οι εκροές του συστήματος. Στην περίπτωση ενός κτιρίου, οι εισροές περιλαμβάνουν ποσότητες υλικών, ενέργεια, νερό και μεταφορές, ενώ οι εκροές περιλαμβάνουν εκπομπές, απόβλητα και προϊόντα προς ανακύκλωση ή διάθεση. Η ακρίβεια της απογραφής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια των ποσοτήτων. Για τον λόγο αυτό, η σύνδεση της LCA με μοντέλα BIM είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, επειδή επιτρέπει τη συστηματική εξαγωγή ποσοτήτων δομικών στοιχείων και υλικών. Ωστόσο, η αξιοπιστία του αποτελέσματος δεν εξασφαλίζεται αυτόματα από τη χρήση BIM. Απαιτείται ορθή μοντελοποίηση των στοιχείων, σωστή αντιστοίχιση υλικών, έλεγχος των μονάδων μέτρησης, αποφυγή διπλομετρήσεων και τεκμηρίωση των παραδοχών. Η βιβλιογραφία για την ενσωμάτωση BIM και LCA

επισημαίνει ότι η διαδικασία μπορεί να βελτιώσει τη διαφάνεια και την αποτελεσματικότητα της περιβαλλοντικής αξιολόγησης, αλλά παραμένουν προκλήσεις που σχετίζονται με τη συμβατότητα δεδομένων, το επίπεδο λεπτομέρειας του μοντέλου και την ποιότητα των βάσεων περιβαλλοντικών δεδομένων (Lima et al., 2024).

Η επιλογή της μονάδας αναφοράς είναι ακόμη μία κρίσιμη παράμετρος. Τα αποτελέσματα της LCA μπορούν να εκφράζονται ως συνολικές επιπτώσεις για ολόκληρο το κτίριο, ως επιπτώσεις ανά τετραγωνικό μέτρο ή ως ετήσιες επιπτώσεις ανά τετραγωνικό μέτρο για την περίοδο αναφοράς. Η έκφραση ανά  $m^2$  διευκολύνει τη σύγκριση μεταξύ κτιρίων διαφορετικού μεγέθους, ενώ η ετήσια έκφραση ανά  $m^2$  επιτρέπει να ενσωματωθεί η διάρκεια ζωής αναφοράς. Ωστόσο, η σύγκριση πρέπει να γίνεται με προσοχή, επειδή η επιφάνεια από μόνη της δεν περιγράφει πλήρως τη λειτουργικότητα του κτιρίου. Για παράδειγμα, ένα κτίριο με υψηλές απαιτήσεις χρήσης, αυξημένο αριθμό χρηστών ή διαφορετικό επίπεδο εξοπλισμού μπορεί να εμφανίζει μεγαλύτερο αποτύπωμα ανά  $m^2$ , χωρίς αυτό να σημαίνει αναγκαστικά χαμηλότερη αποδοτικότητα. Επομένως, η μονάδα αναφοράς πρέπει να συνοδεύεται από σαφή περιγραφή του τύπου κτιρίου, της χρήσης, της διάρκειας αξιολόγησης και των ορίων του συστήματος.

Η ποιότητα των δεδομένων επηρεάζει αποφασιστικά την αξιοπιστία της LCA. Τα δεδομένα μπορεί να προέρχονται από Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντων, από γενικές βάσεις δεδομένων, από βιβλιογραφικές πηγές ή από εργαλεία υπολογισμού. Οι Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντων είναι ιδιαίτερα χρήσιμες επειδή παρέχουν τυποποιημένες πληροφορίες για συγκεκριμένα προϊόντα, με βάση κανόνες κατηγορίας προϊόντων. Το EN 15804+A2 καθορίζει τους βασικούς κανόνες για τις περιβαλλοντικές δηλώσεις προϊόντων κατασκευαστικών προϊόντων και υπηρεσιών, παρέχοντας κοινή δομή και μεθοδολογική βάση για τη δήλωση περιβαλλοντικών πληροφοριών. Ωστόσο, η χρήση EPD δεν εξαλείφει την ανάγκη ελέγχου. Πρέπει να εξετάζεται αν η EPD αφορά το ίδιο ή συγκρίσιμο προϊόν, αν καλύπτει τις ίδιες ενότητες κύκλου ζωής, αν η γεωγραφική και τεχνολογική αντιπροσωπευτικότητα είναι επαρκής και αν η μονάδα δήλωσης μπορεί να μετατραπεί σωστά στη μονάδα που χρησιμοποιείται στο κτιριακό μοντέλο.

Ένα συχνό σφάλμα στις μελέτες LCA κτιρίων είναι η άμεση σύγκριση αποτελεσμάτων χωρίς έλεγχο των ορίων συστήματος. Για παράδειγμα, μία μελέτη μπορεί να περιλαμβάνει μόνο τις ενότητες A1 έως A3, ενώ μια άλλη μπορεί να περιλαμβάνει A1 έως C4 και χωριστή αναφορά στην D. Αν τα αποτελέσματα συγκριθούν χωρίς αυτή τη

διάκριση, μπορεί να προκύψουν λανθασμένα συμπεράσματα για την περιβαλλοντική υπεροχή μιας λύσης. Αντίστοιχα, διαφορετικές παραδοχές για μεταφορές, διάρκεια ζωής υλικών, σενάρια αντικατάστασης ή ποσοστά ανακύκλωσης μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές αποκλίσεις. Για τον λόγο αυτό, κάθε αποτέλεσμα LCA πρέπει να συνοδεύεται από σαφή τεκμηρίωση των ενοτήτων που περιλαμβάνονται, των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν και των σεναρίων που υιοθετήθηκαν.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η LCA αποκτά πρακτική σημασία επειδή επιτρέπει τη συστηματική αξιολόγηση μιας εξάωροφης πολυκατοικίας στην Αθήνα με βάση ποσοτικούς περιβαλλοντικούς δείκτες. Το κτίριο δεν αξιολογείται μόνο ως προς την ενεργειακή του συμπεριφορά, αλλά και ως προς τις επιπτώσεις που συνδέονται με τα υλικά του φέροντος οργανισμού, του κελύφους, των κουφωμάτων, των μονώσεων, των επιστρώσεων και των λοιπών δομικών στοιχείων. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να διερευνηθεί ποια στοιχεία συμβάλλουν περισσότερο στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και ποιες παρεμβάσεις έχουν τη μεγαλύτερη δυνατότητα μείωσης. Για παράδειγμα, η βελτίωση της θερμομόνωσης μπορεί να μειώσει τις λειτουργικές επιπτώσεις, αλλά πρέπει να αξιολογηθεί και ως προς τις πρόσθετες ενσωματωμένες επιπτώσεις του μονωτικού υλικού. Αντίστοιχα, η αντικατάσταση κουφωμάτων με υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης λύσεις μπορεί να περιορίσει τις ανάγκες θέρμανσης ή ψύξης, αλλά ενσωματώνει περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις από αλουμίνιο, υαλοπίνακες, παρεμβύσματα και διαδικασίες παραγωγής.

Η αξιολόγηση κύκλου ζωής συνδέεται επίσης με τη λήψη αποφάσεων σε επίπεδο σχεδιασμού. Κατά τα πρώτα στάδια μιας μελέτης, οι επιλογές μορφής, φέροντος οργανισμού, κελύφους και υλικών καθορίζουν μεγάλο μέρος των μελλοντικών επιπτώσεων. Επομένως, η LCA δεν πρέπει να εφαρμόζεται μόνο εκ των υστέρων, ως εργαλείο απολογισμού, αλλά και κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, ως εργαλείο σύγκρισης εναλλακτικών λύσεων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε μια εργασία που εξετάζει βιοκλιματικές στρατηγικές, ενεργειακό ισοζύγιο και περιβαλλοντικό αποτύπωμα, καθώς οι επιλογές που βελτιώνουν τη λειτουργική επίδοση δεν είναι πάντοτε οι ίδιες με εκείνες που ελαχιστοποιούν το συνολικό αποτύπωμα κύκλου ζωής.

Συνολικά, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και η αξιολόγηση κύκλου ζωής παρέχουν το μεθοδολογικό πλαίσιο για μια ολιστική αποτίμηση των κτιρίων. Η LCA επιτρέπει τη μετάβαση από τη μονοδιάστατη αξιολόγηση της ενεργειακής κατανάλωσης

σε μια ολοκληρωμένη περιβαλλοντική θεώρηση, όπου συνυπολογίζονται υλικά, ενέργεια, νερό, απόβλητα, εκπομπές και σενάρια τέλους ζωής. Η αξία της μεθόδου έγκειται όχι μόνο στον υπολογισμό ενός αριθμητικού αποτελέσματος, αλλά κυρίως στην ανάδειξη των κρίσιμων σημείων επιβάρυνσης και στη δυνατότητα τεκμηριωμένης σύγκρισης εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων. Για την παρούσα εργασία, η LCA αποτελεί το αναγκαίο εργαλείο σύνδεσης του βιοκλιματικού σχεδιασμού με το πραγματικό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα, επιτρέποντας να αξιολογηθεί αν μια λύση είναι πράγματι αποδοτική και βιώσιμη σε όλο τον κύκλο ζωής του κτιρίου.

Η αξιολόγηση κύκλου ζωής μπορεί να υποστηριχθεί είτε από εξειδικευμένα λογισμικά είτε από οργανωμένα υπολογιστικά φύλλα, υπό την προϋπόθεση ότι τηρούνται οι βασικές μεθοδολογικές αρχές της LCA. Στην περίπτωση υπολογιστικής εφαρμογής σε περιβάλλον Excel, η αξιοπιστία της διαδικασίας εξαρτάται από την ακρίβεια των επιμετρήσεων, τη σαφή δήλωση των ορίων του συστήματος, την επιλογή κατάλληλων περιβαλλοντικών συντελεστών και την τεκμηρίωση των παραδοχών.

## **2.4 EPD και δεδομένα περιβαλλοντικών επιδόσεων υλικών, ποιότητα δεδομένων και αβεβαιότητες**

Οι Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντων, Environmental Product Declarations ή EPD, αποτελούν βασικό εργαλείο τεκμηρίωσης των περιβαλλοντικών επιδόσεων των δομικών προϊόντων και των κατασκευαστικών υλικών. Η σημασία τους έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, καθώς η αξιολόγηση της βιωσιμότητας των κτιρίων δεν περιορίζεται πλέον στη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας, αλλά επεκτείνεται στις ενσωματωμένες επιπτώσεις των υλικών, των κατασκευαστικών διεργασιών, των αντικαταστάσεων και της τελικής διαχείρισης. Στο πλαίσιο αυτό, οι EPD παρέχουν ποσοτικοποιημένες περιβαλλοντικές πληροφορίες, οι οποίες βασίζονται στη μεθοδολογία της αξιολόγησης κύκλου ζωής και μπορούν να αξιοποιηθούν είτε σε εξειδικευμένα λογισμικά LCA είτε σε οργανωμένα υπολογιστικά φύλλα, όπως ένα αναλυτικό μοντέλο Excel. Σύμφωνα με το ISO 14025, οι δηλώσεις τύπου III βασίζονται στη σειρά ISO 14040 και παρέχουν περιβαλλοντική πληροφορία κύκλου ζωής με δομημένο και ελεγχόμενο τρόπο.

Η βασική λειτουργία μιας EPD δεν είναι να χαρακτηρίσει ένα προϊόν ως περιβαλλοντικά καλό ή κακό, αλλά να παρουσιάσει με διαφανή τρόπο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του σε συγκεκριμένα στάδια κύκλου ζωής και για συγκεκριμένη δηλωμένη ή λειτουργική μονάδα. Αυτό σημαίνει ότι μια EPD δεν αποτελεί από μόνη της απόδειξη περιβαλλοντικής υπεροχής ενός προϊόντος. Αποτελεί όμως τεκμηριωμένη πηγή δεδομένων, η οποία επιτρέπει στον μελετητή να υπολογίσει και να συγκρίνει τις επιπτώσεις διαφορετικών υλικών, εφόσον οι συγκρίσεις γίνονται με κοινά όρια, κοινή μονάδα αναφοράς και κοινή λειτουργική απαίτηση. Για παράδειγμα, δύο θερμομονωτικά υλικά δεν πρέπει να συγκρίνονται μόνο ως kg CO<sub>2</sub>eq ανά kg υλικού, αλλά ως ποσότητα υλικού που απαιτείται για να επιτευχθεί η ίδια θερμική αντίσταση, στην ίδια θέση του κελύφους και για αντίστοιχη διάρκεια ζωής.

Στον κατασκευαστικό τομέα, το βασικό ευρωπαϊκό πρότυπο για τις Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντων είναι το EN 15804+A2:2019, το οποίο καθορίζει τους βασικούς κανόνες κατηγορίας προϊόντων για τις EPD δομικών προϊόντων και υπηρεσιών. Το πρότυπο οργανώνει τη μεθοδολογική βάση, τους δείκτες και τη δομή παρουσίασης των περιβαλλοντικών πληροφοριών, ώστε οι δηλώσεις διαφορετικών προϊόντων να είναι περισσότερο συνεπείς και συγκρίσιμες. Η ύπαρξη αυτών των κανόνων είναι κρίσιμη, επειδή χωρίς κοινή μεθοδολογία οι τιμές περιβαλλοντικού αποτυπώματος μπορεί να είναι παραπλανητικές. Διαφορετικά όρια συστήματος, διαφορετικά σενάρια μεταφοράς, διαφορετικές παραδοχές ανακύκλωσης ή διαφορετικές μονάδες δήλωσης μπορούν να μεταβάλουν σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα.

Οι EPD παρουσιάζουν συνήθως αποτελέσματα ανά δηλωμένη μονάδα, όπως 1 kg προϊόντος, 1 m<sup>2</sup> στοιχείου, 1 m<sup>3</sup> υλικού ή άλλη μονάδα κατάλληλη για το συγκεκριμένο προϊόν. Σε επίπεδο κτιρίου, όμως, ο μελετητής πρέπει να μετατρέψει τη δηλωμένη μονάδα σε πραγματικές ποσότητες που προκύπτουν από την επιμέτρηση. Στην παρούσα εργασία, αυτή η διαδικασία μπορεί να γίνει μέσα από οργανωμένο αρχείο Excel, στο οποίο κάθε υλικό ή παρέμβαση θα αντιστοιχίζεται με επιμετρημένη ποσότητα, μονάδα μέτρησης, κόστος υλικού, κόστος εργασίας και περιβαλλοντικό συντελεστή, όπως kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup> ή kg CO<sub>2</sub>eq/kg. Η αξιοπιστία της διαδικασίας εξαρτάται από την ορθή σύνδεση της ποσότητας του σχεδίου με τη μονάδα του περιβαλλοντικού συντελεστή. Για παράδειγμα, αν μια θερμομόνωση δηλώνεται σε kg CO<sub>2</sub>eq/kg, αλλά η επιμέτρηση γίνεται

σε  $m^2$ , πρέπει να είναι γνωστά το πάχος και η πυκνότητα του υλικού, ώστε να γίνει σωστή μετατροπή.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στα στάδια κύκλου ζωής που καλύπτει κάθε EPD ή κάθε βιβλιογραφικός περιβαλλοντικός δείκτης. Ορισμένα δεδομένα αφορούν μόνο τα στάδια A1–A3, δηλαδή την παραγωγή του προϊόντος από την εξόρυξη και επεξεργασία πρώτων υλών μέχρι την παραγωγή στο εργοστάσιο. Άλλα δεδομένα μπορεί να περιλαμβάνουν τη μεταφορά στο εργοτάξιο, την εγκατάσταση, τη χρήση, τη συντήρηση, τις αντικαταστάσεις ή το τέλος ζωής. Επομένως, όταν στο Excel εισάγεται ένας συντελεστής περιβαλλοντικού αποτυπώματος, πρέπει να δηλώνεται σαφώς ποια στάδια καλύπτει. Δεν είναι ορθό να συγκρίνεται ένα υλικό με δεδομένα A1–A3 με ένα άλλο υλικό για το οποίο έχουν υπολογιστεί A1–C4, χωρίς να διαχωρίζονται τα αντίστοιχα στάδια. Η σαφής διάκριση των ορίων συστήματος αποτελεί βασική προϋπόθεση για να είναι τα αποτελέσματα αξιόπιστα.

Η προσαρμογή της μεθοδολογίας σε υπολογιστικό φύλλο δεν μειώνει την επιστημονική αξία της εργασίας, εφόσον οι παραδοχές είναι σαφείς και τα δεδομένα ελέγχονται. Αντίθετα, σε μια διπλωματική εργασία με συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, το Excel μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη διαφάνεια, επειδή κάθε επιμέτρηση, τιμή μονάδας, κόστος και περιβαλλοντικός συντελεστής είναι ορατός και ελέγξιμος. Η προσέγγιση αυτή δεν πρέπει να παρουσιαστεί ως πλήρης πιστοποιημένη LCA, αλλά ως τεκμηριωμένη συγκριτική αποτίμηση σεναρίων με λογική κύκλου ζωής. Με άλλα λόγια, η εργασία μπορεί να υπολογίζει τις ενσωματωμένες επιπτώσεις των βασικών υλικών και των παρεμβάσεων, τις λειτουργικές εκπομπές από την κατανάλωση ενέργειας και την πιθανή εξοικονόμηση εκπομπών ανά σενάριο, χωρίς να ισχυρίζεται ότι αντικαθιστά μια πλήρη επαγγελματική μελέτη LCA με εξειδικευμένο λογισμικό.

Η ποιότητα των δεδομένων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες αξιοπιστίας μιας τέτοιας προσέγγισης. Το EN 15941:2024 αφορά την επιλογή και αξιολόγηση δεδομένων για την περιβαλλοντική αποτίμηση προϊόντων και κατασκευαστικών έργων, με εφαρμογή τόσο σε EPD σύμφωνα με το EN 15804 όσο και σε περιβαλλοντική αξιολόγηση κτιρίων σύμφωνα με το EN 15978. Η ποιότητα δεδομένων δεν αφορά μόνο το αν μια τιμή προέρχεται από επίσημη πηγή. Αφορά επίσης τη χρονική, γεωγραφική και τεχνολογική αντιπροσωπευτικότητα. Ένα δεδομένο για σκυρόδεμα,

χάλυβα, αλουμίνιο ή θερμομονωτικό υλικό μπορεί να είναι λιγότερο κατάλληλο αν προέρχεται από διαφορετική χώρα, παλαιότερη παραγωγική τεχνολογία ή διαφορετικό ενεργειακό μείγμα από αυτό που αντιστοιχεί στην πραγματική αγορά εφαρμογής.

Στην παρούσα εργασία, η επιλογή των περιβαλλοντικών δεδομένων πρέπει να ακολουθεί ιεράρχηση. Προτεραιότητα πρέπει να δίνεται σε EPD συγκεκριμένων προϊόντων, όταν αυτές είναι διαθέσιμες και αντιστοιχούν στα υλικά που εξετάζονται. Όταν δεν υπάρχουν ειδικές EPD, μπορούν να χρησιμοποιούνται μέσες EPD, γενικές βάσεις δεδομένων ή βιβλιογραφικές τιμές, με σαφή αναφορά στην πηγή και στην αβεβαιότητα. Η χρήση γενικών συντελεστών είναι αποδεκτή για συγκριτική αξιολόγηση σεναρίων, αρκεί να δηλώνεται ότι οι τιμές είναι ενδεικτικές και ότι τα αποτελέσματα εκφράζουν τάσεις και συγκριτικές διαφορές, όχι απόλυτη πιστοποιημένη περιβαλλοντική επίδοση συγκεκριμένων προϊόντων.

Οι βασικές κατηγορίες υλικών που αναμένεται να επηρεάσουν το περιβαλλοντικό αποτέλεσμα της μελέτης είναι ο φέρων οργανισμός, τα υλικά πλήρωσης, οι θερμομονώσεις, τα κουφώματα, οι υαλοπίνακες, τα συστήματα σκίασης, τα επιχρίσματα, τα δάπεδα, οι στεγανώσεις και οι τελικές επιστρώσεις. Ειδικά για τα σενάρια βιοκλιματικής αναβάθμισης, κρίσιμη σημασία έχουν τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση του κελύφους, όπως θερμομονωτικές στρώσεις, συστήματα εξωτερικής θερμομόνωσης, κουφώματα υψηλής ενεργειακής απόδοσης, υαλοπίνακες με βελτιωμένα θερμοοπτικά χαρακτηριστικά και στοιχεία σκίασης. Κάθε τέτοια παρέμβαση έχει διπλή επίδραση. Από τη μία πλευρά, μπορεί να μειώσει τις λειτουργικές ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου. Από την άλλη, εισάγει πρόσθετο κόστος και πρόσθετο ενσωματωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα λόγω των υλικών και των εργασιών εφαρμογής.

Ακριβώς για αυτόν τον λόγο, η αξιολόγηση των βιοκλιματικών παρεμβάσεων πρέπει να γίνεται με ισορροπημένο τρόπο. Μια θερμομόνωση μπορεί να μειώσει τη ζήτηση θέρμανσης και ψύξης, αλλά έχει δικό της αποτύπωμα παραγωγής. Ένα νέο κούφωμα μπορεί να περιορίσει τις θερμικές απώλειες και να βελτιώσει την αεροστεγανότητα, αλλά περιλαμβάνει αλουμίνιο, υαλοπίνακες, παρεμβύσματα και μηχανισμούς. Ένα σύστημα σκίασης μπορεί να μειώσει τα θερινά ψυκτικά φορτία, αλλά απαιτεί υλικά, κατασκευή και συντήρηση. Συνεπώς, η αξιολόγηση δεν πρέπει να βασίζεται μόνο στο αρχικό κόστος ή μόνο στην εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά να εξετάζει

συνδυαστικά το κόστος εφαρμογής, το ενσωματωμένο GWP της παρέμβασης, τη μείωση λειτουργικών εκπομπών και τον χρόνο στον οποίο η περιβαλλοντική επιβάρυνση της παρέμβασης αντισταθμίζεται από την εξοικονόμηση λειτουργικών εκπομπών.

Σε αυτή τη λογική, το Excel μπορεί να οργανωθεί ώστε να υπολογίζει για κάθε παρέμβαση τρία βασικά μεγέθη. Πρώτον, το οικονομικό κόστος, δηλαδή κόστος υλικών, εργασίας και πιθανών πρόσθετων δαπανών. Δεύτερον, το ενσωματωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, με βάση την ποσότητα κάθε υλικού και τον αντίστοιχο συντελεστή  $\text{kg CO}_2\text{eq}$  ανά μονάδα. Τρίτον, τη λειτουργική επίδραση, δηλαδή την εκτιμώμενη μείωση κατανάλωσης ενέργειας και την αντίστοιχη μείωση εκπομπών κατά τη διάρκεια της περιόδου αναφοράς. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε σενάριο μπορεί να συγκριθεί όχι μόνο ως προς το πόσο κοστίζει, αλλά και ως προς το αν οδηγεί σε ουσιαστική μείωση του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος.

Η αντιστοίχιση υλικών με περιβαλλοντικούς δείκτες αποτελεί κρίσιμο στάδιο. Για παράδειγμα, στο σκυρόδεμα πρέπει να εξετάζεται αν ο συντελεστής αφορά συγκεκριμένη κατηγορία αντοχής, ποσοστό τσιμέντου ή μέση τιμή αγοράς. Στον χάλυβα πρέπει να ελέγχεται αν λαμβάνεται υπόψη πρωτογενής ή ανακυκλωμένη παραγωγή. Στο αλουμίνιο των κουφωμάτων πρέπει να εξετάζεται αν ο συντελεστής περιλαμβάνει μόνο το προφίλ ή και τους υαλοπίνακες, τα εξαρτήματα και τη θερμοδιακοπή. Στα θερμομονωτικά υλικά πρέπει να συνδέεται ο περιβαλλοντικός συντελεστής με την πυκνότητα, το πάχος, τη θερμική αγωγιμότητα και τη διάρκεια ζωής. Η μη ορθή αντιστοίχιση μπορεί να δημιουργήσει αριθμητικά αποτελέσματα που φαίνονται ακριβή, αλλά δεν αντιστοιχούν στην πραγματική τεχνική λύση.

Η βιβλιογραφία έχει δείξει ότι η επιλογή διαφορετικών πηγών δεδομένων για τον ενσωματωμένο άνθρακα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις στα αποτελέσματα αποτίμησης ολόκληρου κύκλου ζωής. Οι Keyhani et al. (2023) εξέτασαν την επίδραση διαφορετικών πηγών δεδομένων ενσωματωμένου άνθρακα σε κτίριο κατοικίας και ανέδειξαν ότι η επιλογή βάσης δεδομένων μπορεί να επηρεάσει ουσιαστικά το τελικό αποτέλεσμα. Αντίστοιχα, οι Waldman et al. (2020) επισημαίνουν ότι οι EPD διαφοροποιούνται ως προς την ποιότητα και την εξειδίκευση των δεδομένων τους, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικές συγκρίσεις όταν δεν αξιολογείται η αβεβαιότητα. Επομένως, στην παρούσα εργασία, οι περιβαλλοντικοί δείκτες πρέπει να

χρησιμοποιούνται με σαφή αναφορά στην πηγή και με τεκμηρίωση του επιπέδου αξιοπιστίας τους.

Η ενσωμάτωση της LCA σε ψηφιακά περιβάλλοντα, όπως BIM ή υπολογιστικά φύλλα, έχει σημαντικά πλεονεκτήματα αλλά και περιορισμούς. Οι Lima et al. (2024) αναδεικνύουν ότι η σύνδεση BIM-LCA μπορεί να υποστηρίξει τη βιώσιμη αξιολόγηση κατασκευών, αλλά ταυτόχρονα απαιτεί προσοχή στη δομή των δεδομένων, στο επίπεδο λεπτομέρειας και στην αντιστοίχιση των υλικών. Στην παρούσα εργασία, όπου επιλέγεται πιο ελεγχόμενη διαδικασία μέσω CAD επιμετρήσεων και Excel, ο βασικός στόχος είναι η διαφάνεια και η δυνατότητα ελέγχου. Το Excel δεν αυτοματοποιεί τη διαδικασία όπως ένα λογισμικό BIM-LCA, αλλά επιτρέπει στον μελετητή να γνωρίζει ακριβώς από πού προέρχεται κάθε ποσότητα, ποια τιμή χρησιμοποιείται και πώς υπολογίζεται κάθε δείκτης.

Η αβεβαιότητα στα δεδομένα μπορεί να προκύψει από πολλές πηγές. Μπορεί να οφείλεται σε αβεβαιότητα των επιμετρήσεων, σε χρήση μέσων τιμών αγοράς, σε διαφορετικές τεχνολογίες παραγωγής, σε ελλιπή στοιχεία για τη διάρκεια ζωής των υλικών, σε αβέβαια σενάρια συντήρησης και αντικατάστασης ή σε υποθέσεις για το τέλος ζωής. Για παράδειγμα, η διάρκεια ζωής ενός κουφώματος, μιας στεγάνωσης ή μιας θερμομονωτικής στρώσης μπορεί να εξαρτάται από την ποιότητα εγκατάστασης, την έκθεση στις καιρικές συνθήκες, τη συντήρηση και τη χρήση. Εάν η διάρκεια ζωής υποεκτιμηθεί ή υπερεκτιμηθεί, μεταβάλλεται ο αριθμός αντικαταστάσεων στην περίοδο αναφοράς και κατά συνέπεια το συνολικό αποτύπωμα.

Τα σενάρια τέλους ζωής αποτελούν επίσης σημαντική πηγή αβεβαιότητας. Τα ποσοστά ανακύκλωσης, επαναχρησιμοποίησης, ανάκτησης ή τελικής διάθεσης εξαρτώνται από τις μελλοντικές συνθήκες διαχείρισης αποβλήτων, τις τεχνολογικές δυνατότητες και την αγορά δευτερογενών υλικών. Η ενότητα D, όπου αποτυπώνονται πιθανά οφέλη ή φορτία πέραν των ορίων του συστήματος, πρέπει να αντιμετωπίζεται με προσοχή. Τα δυνητικά οφέλη από την ανακύκλωση αλουμινίου, χάλυβα ή γυαλιού δεν πρέπει να ενσωματώνονται αδιακρίτως στα βασικά αποτελέσματα, αλλά να παρουσιάζονται χωριστά, ώστε να είναι σαφές ότι βασίζονται σε μελλοντικά σενάρια και όχι σε βέβαιες πραγματικές συνθήκες.

Για τη συγκεκριμένη διπλωματική, η αβεβαιότητα αντιμετωπίστηκε με τρεις τρόπους. Πρώτον, με σαφή τεκμηρίωση όλων των παραδοχών, ώστε ο αναγνώστης να γνωρίζει ποια δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν. Δεύτερον, με διάκριση των αποτελεσμάτων σε επιμέρους κατηγορίες, όπως κόστος, ενσωματωμένο αποτύπωμα, λειτουργική εξοικονόμηση και συνολική μείωση εκπομπών. Τρίτον, με απλή ανάλυση ευαισθησίας για κρίσιμες παραμέτρους, όπως ο συντελεστής εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας, το κόστος ενέργειας, η διάρκεια ζωής κουφωμάτων ή θερμομονώσεων και η τιμή περιβαλλοντικού συντελεστή των βασικών υλικών. Με αυτόν τον τρόπο, η εργασία δεν παρουσιάζει τα αποτελέσματα ως απόλυτες τιμές, αλλά ως τεκμηριωμένη συγκριτική αξιολόγηση με σαφή όρια αξιοπιστίας.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η σχέση μεταξύ περιβαλλοντικών δεδομένων και κόστους. Επειδή η εργασία εξετάζει και το κόστος των παρεμβάσεων, το Excel μπορεί να συνδυάσει περιβαλλοντικούς και οικονομικούς δείκτες. Για κάθε υλικό ή παρέμβαση θα μπορεί να υπολογίζεται το κόστος εφαρμογής, το ενσωματωμένο GWP, η αναμενόμενη εξοικονόμηση ενέργειας, η ετήσια οικονομική εξοικονόμηση και η μείωση λειτουργικών εκπομπών. Έτσι, είναι δυνατός ο υπολογισμός δεικτών όπως κόστος ανά m<sup>2</sup> παρέμβασης, κόστος ανά kWh εξοικονόμησης, κόστος ανά kg CO<sub>2</sub>eq που αποφεύγεται και απλή περίοδος αποπληρωμής. Οι δείκτες αυτοί είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι, διότι συνδέουν τη βιοκλιματική και ενεργειακή αναβάθμιση με πρακτικά κριτήρια λήψης αποφάσεων.

Η χρήση EPD, γενικών βάσεων δεδομένων και βιβλιογραφικών συντελεστών σε περιβάλλον Excel πρέπει να συνοδεύεται από σαφή καταγραφή της προέλευσης κάθε τιμής. Για κάθε υλικό είναι σκόπιμο να καταγράφονται η ονομασία του υλικού, η μονάδα μέτρησης, η ποσότητα, ο περιβαλλοντικός συντελεστής, η πηγή του συντελεστή, τα στάδια κύκλου ζωής που καλύπτονται, η ημερομηνία ή έκδοση της πηγής και τυχόν σχόλια για την αντιπροσωπευτικότητα. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί ίχνος ελέγχου και ενισχύει την αξιοπιστία της μελέτης. Παράλληλα, επιτρέπει την εύκολη αντικατάσταση μιας γενικής τιμής με πιο ακριβή EPD, αν αυτή βρεθεί σε επόμενο στάδιο.

Η ψηφιακή επικοινωνία των περιβαλλοντικών δεδομένων αποκτά αυξανόμενη σημασία, διότι τα δεδομένα των EPD πρέπει να μπορούν να μεταφέρονται αξιόπιστα σε εργαλεία υπολογισμού και βάσεις δεδομένων. Το EN 15942:2021 καθορίζει μορφή επικοινωνίας των πληροφοριών EPD μεταξύ επιχειρήσεων, με στόχο την κοινή

κατανόηση και τη συνέπεια στη διαχείριση των δεδομένων. Παρότι η παρούσα εργασία δεν βασίζεται αποκλειστικά σε αυτοματοποιημένη ψηφιακή εισαγωγή EPD, η ίδια λογική διαφάνειας πρέπει να εφαρμοστεί και στο Excel. Δηλαδή, τα δεδομένα δεν πρέπει να καταχωρίζονται ως ανώνυμοι αριθμοί, αλλά ως τεκμηριωμένες τιμές με μονάδα, πηγή και όρια εφαρμογής.

Συνολικά, οι EPD και τα δεδομένα περιβαλλοντικής επίδοσης υλικών αποτελούν τον σύνδεσμο μεταξύ των επιμετρήσεων του κτιρίου και της περιβαλλοντικής αποτίμησης των σεναρίων. Στην παρούσα εργασία, ο σύνδεσμος αυτός θα υλοποιηθεί μέσα από αναλυτικό υπολογιστικό φύλλο, στο οποίο οι ποσότητες που προκύπτουν από τα σχέδια θα συνδυαστούν με κόστη, περιβαλλοντικούς συντελεστές και δείκτες λειτουργικής εξοικονόμησης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών βιοκλιματικών και ενεργειακών παρεμβάσεων με κοινά κριτήρια, όπως αρχικό κόστος, ενσωματωμένες εκπομπές, μείωση λειτουργικής κατανάλωσης, μείωση λειτουργικών εκπομπών και συνολικό όφελος σε περίοδο αναφοράς.

Συμπερασματικά, η αξιοποίηση των EPD και των περιβαλλοντικών δεδομένων υλικών δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως μηχανική εισαγωγή τιμών σε ένα λογισμικό, αλλά ως τεχνικά τεκμηριωμένη διαδικασία επιλογής, ελέγχου και εφαρμογής δεδομένων. Η ποιότητα της τελικής αποτίμησης εξαρτάται από την ακρίβεια των επιμετρήσεων, την καταλληλότητα των περιβαλλοντικών συντελεστών, τη σαφήνεια των ορίων συστήματος και τη διαφάνεια των παραδοχών. Για την παρούσα διπλωματική εργασία, η προσαρμοσμένη μεθοδολογία μέσω Excel μπορεί να υποστηρίξει αξιόπιστα τη συγκριτική αξιολόγηση σεναρίων βιοκλιματικής βελτίωσης, υπό την προϋπόθεση ότι τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν ως τεκμηριωμένη συγκριτική εκτίμηση και όχι ως πλήρης πιστοποιημένη LCA.

### 3. Κανονιστικό και θεσμικό πλαίσιο

#### 3.1 Διεθνές πλαίσιο για LCA και περιβαλλοντική διαχείριση

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση των κτιρίων εντάσσεται σε ένα ευρύτερο διεθνές πλαίσιο που έχει διαμορφωθεί σταδιακά από την ανάγκη συστηματικής αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων προϊόντων, υπηρεσιών, οργανισμών και τεχνικών έργων. Στον κτιριακό τομέα, το πλαίσιο αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία, επειδή τα κτίρια δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον μόνο κατά τη φάση λειτουργίας τους, αλλά και κατά την παραγωγή των δομικών υλικών, τη μεταφορά, την κατασκευή, τη συντήρηση, τις αντικαταστάσεις, την αποδόμηση και τη διαχείριση των αποβλήτων. Επομένως, η αξιολόγηση της βιωσιμότητας ενός κτιρίου απαιτεί μεθοδολογία που να καλύπτει ολόκληρο τον κύκλο ζωής και να επιτρέπει τη σύνδεση των σχεδιαστικών επιλογών με ποσοτικούς δείκτες περιβαλλοντικής επίδοσης.

Σε διεθνές επίπεδο, η Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής, Life Cycle Assessment ή LCA, αποτελεί τη βασική μεθοδολογική προσέγγιση για την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η ανάπτυξή της συνδέεται με την ανάγκη μετάβασης από την αποσπασματική περιβαλλοντική θεώρηση, η οποία επικεντρώνεται σε ένα μόνο στάδιο ή σε έναν μόνο ρύπο, προς μια ολοκληρωμένη προσέγγιση συστήματος. Με την LCA εξετάζεται το σύνολο των εισροών και εκροών ενός προϊόντος ή συστήματος, από την εξόρυξη πρώτων υλών έως το τέλος ζωής. Αυτή η λογική είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στα κτίρια, επειδή μια επιλογή που μειώνει τη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας μπορεί ταυτόχρονα να αυξάνει τις ενσωματωμένες επιπτώσεις μέσω πρόσθετων υλικών, σύνθετων συστημάτων ή αυξημένων αναγκών αντικατάστασης.

Ο βασικός διεθνής κορμός της LCA διαμορφώνεται από τα πρότυπα **ISO 14040** και **ISO 14044**. Το ISO 14040 καθορίζει τις αρχές και το γενικό πλαίσιο της αξιολόγησης κύκλου ζωής, περιλαμβάνοντας τον καθορισμό σκοπού και πεδίου εφαρμογής, την απογραφή κύκλου ζωής, την εκτίμηση επιπτώσεων, την ερμηνεία, την αναφορά και την κριτική επισκόπηση. Το ISO 14044 συμπληρώνει το πλαίσιο αυτό, καθώς εξειδικεύει τις απαιτήσεις και τις κατευθυντήριες οδηγίες για την εφαρμογή της LCA, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να ορίζεται το σύστημα, να συλλέγονται τα δεδομένα, να υπολογίζονται οι επιπτώσεις και να τεκμηριώνονται τα αποτελέσματα (International Organization for Standardization [ISO], 2006a, 2006b).

Η συμβολή των ISO 14040 και ISO 14044 είναι καθοριστική, επειδή παρέχουν κοινή επιστημονική και τεχνική γλώσσα για την αξιολόγηση προϊόντων και συστημάτων. Η LCA δεν βασίζεται απλώς στη συλλογή αριθμητικών δεδομένων, αλλά σε αυστηρή μεθοδολογική αλληλουχία. Αρχικά καθορίζεται ο σκοπός της μελέτης, δηλαδή αν η αξιολόγηση γίνεται για σύγκριση υλικών, για υποστήριξη σχεδιαστικών αποφάσεων, για περιβαλλοντική δήλωση, για εσωτερική βελτιστοποίηση ή για δημοσιοποίηση αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια ορίζεται το πεδίο εφαρμογής, τα όρια του συστήματος, η λειτουργική ή δηλωμένη μονάδα, η περίοδος αναφοράς, οι κατηγορίες επιπτώσεων και οι κανόνες κατανομής. Χωρίς αυτά τα στοιχεία, τα αποτελέσματα μιας LCA δεν είναι επαρκώς ερμηνεύσιμα ούτε συγκρίσιμα.

Η απογραφή κύκλου ζωής αποτελεί το στάδιο στο οποίο καταγράφονται οι εισροές και εκροές του συστήματος. Στην περίπτωση των κτιρίων, οι εισροές περιλαμβάνουν ποσότητες υλικών, κατανάλωση ενέργειας, νερού και καυσίμων, μεταφορές και βοηθητικά υλικά, ενώ οι εκροές περιλαμβάνουν εκπομπές, απόβλητα, ανακυκλώσιμα υλικά και πιθανές απορρίψεις. Η ακρίβεια της απογραφής εξαρτάται από την ποιότητα των ποσοτήτων και των περιβαλλοντικών δεδομένων. Για τον λόγο αυτό, η σύνδεση της LCA με BIM εργαλεία και βάσεις δεδομένων προϊόντων έχει ιδιαίτερη πρακτική σημασία, αλλά δεν καταργεί την ανάγκη ελέγχου των δεδομένων, των μονάδων και των παραδοχών. Η απογραφή αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία στηρίζονται οι επόμενοι υπολογισμοί και συνεπώς κάθε σφάλμα σε αυτό το στάδιο μεταφέρεται στο τελικό αποτέλεσμα.

Η εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής μετατρέπει τα δεδομένα απογραφής σε περιβαλλοντικούς δείκτες. Οι δείκτες αυτοί μπορεί να αφορούν την κλιματική αλλαγή, την οξίνιση, τον ευτροφισμό, τη φωτοχημική οξείδωση, την εξάντληση αβιοτικών πόρων, τη χρήση νερού και την παραγωγή αποβλήτων. Στον κτιριακό τομέα, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη, Global Warming Potential ή GWP, επειδή συνδέεται άμεσα με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και τους στόχους απανθρακοποίησης. Ωστόσο, η LCA δεν πρέπει να περιορίζεται αποκλειστικά στο GWP, διότι η περιβαλλοντική επίδοση ενός κτιρίου είναι πολυδιάστατη. Μια επιλογή χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος μπορεί να δημιουργεί αυξημένες επιπτώσεις σε άλλες κατηγορίες, όπως η εξάντληση πόρων ή η κατανάλωση νερού. Η αξία της LCA βρίσκεται ακριβώς στη δυνατότητα να εντοπίζει αυτές τις μετατοπίσεις επιπτώσεων.

Παράλληλα με τα πρότυπα LCA, το διεθνές πλαίσιο περιβαλλοντικής διαχείρισης περιλαμβάνει και τα πρότυπα συστημάτων διαχείρισης. Το σημαντικότερο από αυτά είναι το **ISO 14001**, το οποίο αφορά τα Συστήματα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης. Το ISO 14001 παρέχει πλαίσιο για τον σχεδιασμό, την εφαρμογή, τη διατήρηση και τη συνεχή βελτίωση ενός συστήματος περιβαλλοντικής διαχείρισης σε οργανισμούς κάθε μεγέθους και τομέα. Η νεότερη έκδοση ISO 14001:2026 έχει πλέον αντικαταστήσει την έκδοση ISO 14001:2015 και ενισχύει την εστίαση στη συστηματική διαχείριση περιβαλλοντικών ευθυνών, στη βελτίωση της περιβαλλοντικής επίδοσης, στη συμμόρφωση με απαιτήσεις και στη σύνδεση με σύγχρονες περιβαλλοντικές προτεραιότητες (ISO, 2026).

Η σχέση μεταξύ ISO 14001 και LCA είναι συμπληρωματική. Το ISO 14001 δεν παρέχει από μόνο του μέθοδο υπολογισμού περιβαλλοντικών επιπτώσεων προϊόντων ή κτιρίων, αλλά διαμορφώνει το οργανωτικό πλαίσιο μέσα στο οποίο ένας φορέας μπορεί να διαχειρίζεται τις περιβαλλοντικές του πλευρές, να παρακολουθεί δείκτες, να θέτει στόχους και να εφαρμόζει διαδικασίες συνεχούς βελτίωσης. Αντίθετα, η LCA παρέχει την ποσοτική μεθοδολογία για την εκτίμηση των επιπτώσεων ενός προϊόντος, υλικού, κτιρίου ή συστήματος. Στον κατασκευαστικό τομέα, ένας οργανισμός μπορεί να εφαρμόζει ISO 14001 για τη συνολική περιβαλλοντική διαχείριση των δραστηριοτήτων του και ταυτόχρονα να χρησιμοποιεί LCA για την αξιολόγηση συγκεκριμένων προϊόντων, μελετών ή έργων.

Σημαντικό τμήμα του διεθνούς πλαισίου αποτελεί και το **ISO 14025**, το οποίο καθορίζει τις αρχές και τις διαδικασίες για τις Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Τύπου III. Οι δηλώσεις αυτές είναι η βάση για τις Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντων, Environmental Product Declarations ή EPD. Το ISO 14025 προβλέπει ότι οι δηλώσεις τύπου III πρέπει να βασίζονται στη σειρά προτύπων ISO 14040, ώστε τα περιβαλλοντικά δεδομένα να παράγονται με μεθοδολογία κύκλου ζωής και να παρουσιάζονται με διαφανή και ελεγχόμενο τρόπο (ISO, 2006c). Η σημασία του ISO 14025 για τα κτίρια είναι μεγάλη, επειδή τα EPD αποτελούν βασική πηγή δεδομένων για την περιβαλλοντική αποτίμηση υλικών, δομικών στοιχείων και τεχνικών συστημάτων.

Για τον κατασκευαστικό τομέα ειδικότερα, το διεθνές πρότυπο **ISO 21930** εξειδικεύει τις απαιτήσεις για τις EPD κατασκευαστικών προϊόντων και υπηρεσιών. Το ISO 21930:2017 παρέχει αρχές, προδιαγραφές και απαιτήσεις για την ανάπτυξη EPD που αφορούν κατασκευαστικά προϊόντα, υπηρεσίες, δομικά στοιχεία και ενσωματωμένα

τεχνικά συστήματα. Συμπληρώνει το ISO 14025, καθώς παρέχει ειδικές απαιτήσεις για προϊόντα του κατασκευαστικού τομέα, περιλαμβάνοντας κανόνες για την απογραφή κύκλου ζωής, τα προκαθορισμένα περιβαλλοντικά μεγέθη, τα στάδια κύκλου ζωής, τη διαμόρφωση σεναρίων και τις προϋποθέσεις σύγκρισης προϊόντων βάσει EPD (ISO, 2017).

Η εξειδίκευση αυτή είναι απαραίτητη, διότι τα δομικά προϊόντα δεν μπορούν να αξιολογούνται αποκομμένα από τη λειτουργία που επιτελούν στο κτίριο. Ένα υλικό μπορεί να έχει χαμηλή περιβαλλοντική επιβάρυνση ανά μονάδα μάζας, αλλά να απαιτεί μεγαλύτερη ποσότητα για να επιτύχει την ίδια τεχνική επίδοση. Αντίστοιχα, ένα προϊόν μπορεί να έχει υψηλότερο αρχικό αποτύπωμα, αλλά μεγαλύτερη διάρκεια ζωής ή μικρότερες ανάγκες συντήρησης. Για τον λόγο αυτό, οι περιβαλλοντικές δηλώσεις των κατασκευαστικών προϊόντων πρέπει να συνδέονται με τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως αντοχή, θερμική αγωγιμότητα, πυκνότητα, διάρκεια ζωής, ανάγκες συντήρησης και δυνατότητα ανακύκλωσης ή επαναχρησιμοποίησης. Το ISO 21930 υποστηρίζει ακριβώς αυτή την ανάγκη συστηματικής και συγκρίσιμης τεκμηρίωσης.

Ιδιαίτερη θέση στο διεθνές πλαίσιο έχει και το **ISO 14067**, το οποίο αφορά το ανθρακικό αποτύπωμα προϊόντων. Το πρότυπο αυτό καθορίζει αρχές, απαιτήσεις και κατευθυντήριες οδηγίες για την ποσοτικοποίηση και αναφορά του ανθρακικού αποτυπώματος προϊόντος, σε συμφωνία με τη μεθοδολογική βάση των ISO 14040 και ISO 14044. Η σημασία του ISO 14067 είναι ότι εστιάζει ειδικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε επίπεδο προϊόντος, παρέχοντας κοινή βάση για τη μέτρηση και αναφορά του carbon footprint (ISO, 2018). Στα δομικά υλικά, η λογική αυτή είναι χρήσιμη για την αξιολόγηση προϊόντων όπως σκυρόδεμα, χάλυβας, αλουμίνιο, υαλοπίνακες, μονώσεις και επιστρώσεις, τα οποία μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στο ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα ενός κτιρίου.

Στο πεδίο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, σημαντικό διεθνές εργαλείο αποτελεί και το **GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard**. Το πρότυπο αυτό παρέχει απαιτήσεις και οδηγίες για την ποσοτικοποίηση και δημόσια αναφορά απογραφών εκπομπών και απορροφήσεων αερίων του θερμοκηπίου που συνδέονται με συγκεκριμένα προϊόντα. Η χρησιμότητά του είναι ιδιαίτερα εμφανής σε εταιρικό και παραγωγικό επίπεδο, όπου οι επιχειρήσεις επιδιώκουν να κατανοήσουν τις εκπομπές σε ολόκληρη την αλυσίδα αξίας ενός προϊόντος και να εντοπίσουν σημεία

μείωσης των εκπομπών (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2011). Αν και δεν αντικαθιστά τα ISO πρότυπα LCA, λειτουργεί συμπληρωματικά για την αποτίμηση και διαχείριση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Σε επίπεδο διεθνούς πολιτικής, οι παραπάνω τεχνικές μεθοδολογίες συνδέονται με ευρύτερες στρατηγικές βιώσιμης ανάπτυξης και υπεύθυνης παραγωγής. Ο Στόχος Βιώσιμης Ανάπτυξης 12 των Ηνωμένων Εθνών αφορά τη διασφάλιση βιώσιμων προτύπων κατανάλωσης και παραγωγής, τονίζοντας την ανάγκη αποδοτικής χρήσης πόρων, μείωσης αποβλήτων και βελτίωσης της περιβαλλοντικής επίδοσης προϊόντων και συστημάτων. Η λογική αυτή συνδέεται άμεσα με την LCA, διότι η αξιολόγηση κύκλου ζωής επιτρέπει να εντοπίζονται οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις κατά μήκος της αλυσίδας αξίας και όχι μόνο στο τελικό στάδιο χρήσης (United Nations, 2015).

Για τον κτιριακό τομέα, το διεθνές πλαίσιο LCA και περιβαλλοντικής διαχείρισης έχει πρακτική σημασία σε τρία επίπεδα. Πρώτον, παρέχει τη μεθοδολογική βάση για την περιβαλλοντική αποτίμηση του κτιρίου ως συνολικού συστήματος. Δεύτερον, παρέχει κανόνες για την παραγωγή και χρήση δεδομένων προϊόντων μέσω EPD και δηλώσεων τύπου III. Τρίτον, υποστηρίζει τη συστηματική περιβαλλοντική διαχείριση οργανισμών, φορέων και επιχειρήσεων που εμπλέκονται στον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία κτιρίων. Έτσι, η LCA δεν αποτελεί μια απομονωμένη υπολογιστική διαδικασία, αλλά εντάσσεται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο τεκμηρίωσης, λογοδοσίας και βελτίωσης περιβαλλοντικής επίδοσης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το διεθνές πλαίσιο έχει ιδιαίτερη σημασία, επειδή η αξιολόγηση της εξάρωσης πολυκατοικίας στην Αθήνα θα βασιστεί σε λογική κύκλου ζωής και σε περιβαλλοντικά δεδομένα υλικών. Τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044 θεμελιώνουν τη μεθοδολογία της LCA, ενώ τα ISO 14025 και ISO 21930 υποστηρίζουν τη χρήση EPD για τα δομικά προϊόντα. Το ISO 14067 ενισχύει την κατανόηση του ανθρακικού αποτυπώματος προϊόντων, ενώ το ISO 14001 τοποθετεί τη διαδικασία μέσα σε ένα ευρύτερο σύστημα περιβαλλοντικής διαχείρισης. Με αυτόν τον τρόπο, το διεθνές πλαίσιο παρέχει την αναγκαία τεχνική και μεθοδολογική βάση για τα επόμενα υποκεφάλαια, όπου θα εξεταστούν το ευρωπαϊκό πλαίσιο ενεργειακής απόδοσης και αποτίμησης εκπομπών, το ελληνικό πλαίσιο εφαρμογής και τα ειδικότερα πρότυπα για την περιβαλλοντική αποτίμηση κτιρίων και υλικών.

Συμπερασματικά, το διεθνές πλαίσιο για LCA και περιβαλλοντική διαχείριση διαμορφώνει τη βάση πάνω στην οποία στηρίζεται η σύγχρονη περιβαλλοντική αξιολόγηση των κτιρίων. Η αξία του βρίσκεται στη δυνατότητα να μετατρέπει σύνθετες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε δομημένα, τεκμηριωμένα και συγκρίσιμα αποτελέσματα. Για μια μελέτη που εξετάζει τον βιοκλιματικό σχεδιασμό, το ενεργειακό αποτύπωμα και το ισοζύγιο μεγάλων κτιριακών έργων, η γνώση και ορθή εφαρμογή αυτού του πλαισίου είναι απαραίτητη. Χωρίς σαφή μεθοδολογικά όρια, κατάλληλα δεδομένα και τεκμηριωμένες παραδοχές, η περιβαλλοντική αξιολόγηση κινδυνεύει να περιοριστεί σε γενικές διαπιστώσεις. Αντίθετα, με την αξιοποίηση των διεθνών προτύπων, η εργασία μπορεί να υποστηρίξει ποσοτική, διαφανή και επιστημονικά ελέγξιμη αποτίμηση των εναλλακτικών σχεδιαστικών και κατασκευαστικών επιλογών.

### **3.2 Ευρωπαϊκό πλαίσιο για ενεργειακή απόδοση κτιρίων και απαίτηση αποτίμησης εκπομπών**

Το ευρωπαϊκό πλαίσιο για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων έχει εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, καθώς η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης δεν περιορίζεται πλέον στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη φάση λειτουργίας, αλλά συνδέεται όλο και περισσότερο με τη συνολική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, την αποτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των υλικών και τη μετάβαση σε κτίρια μηδενικών εκπομπών. Η εξέλιξη αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την παρούσα εργασία, επειδή ο βιοκλιματικός σχεδιασμός δεν εξετάζεται μόνο ως αρχιτεκτονική ή τεχνική αρχή, αλλά ως σύνολο παρεμβάσεων που μπορούν να μειώσουν τη λειτουργική ενεργειακή ζήτηση και να αξιολογηθούν συγκριτικά ως προς το κόστος, την εξοικονόμηση ενέργειας και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Η γενική κατεύθυνση της Ευρωπαϊκής Ένωσης αποτυπώνεται στην Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και στον Ευρωπαϊκό Κλιματικό Νόμο, με στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050. Ο Ευρωπαϊκός Κλιματικός Νόμος καθιστά νομικά δεσμευτικό τον στόχο της κλιματικής ουδετερότητας και προβλέπει ενδιάμεσους στόχους μείωσης των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Η πολιτική αυτή επηρεάζει άμεσα τον κτιριακό τομέα, καθώς τα κτίρια αποτελούν πεδίο υψηλής κατανάλωσης ενέργειας, σημαντικών λειτουργικών εκπομπών και μεγάλης κατανάλωσης υλικών κατά την κατασκευή, ανακαίνιση και συντήρησή τους.

Κεντρικό νομοθετικό εργαλείο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα κτίρια αποτελεί η Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων, Energy Performance of Buildings Directive ή EPBD. Η αναδιατυπωμένη Οδηγία (ΕΕ) 2024/1275 τέθηκε σε ισχύ στις 28 Μαΐου 2024 και προβλέπεται να μεταφερθεί στο εθνικό δίκαιο των κρατών μελών έως τις 29 Μαΐου 2026. Ο βασικός της στόχος είναι η επιτάχυνση της ανακαίνισης του κτιριακού αποθέματος, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, η ενίσχυση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η σταδιακή μετάβαση σε κτιριακό απόθεμα μηδενικών εκπομπών έως το 2050.

Η αναδιατυπωμένη EPBD μετατοπίζει το ενδιαφέρον από την απλή ενεργειακή συμμόρφωση προς μια πιο ολοκληρωμένη θεώρηση της κτιριακής επίδοσης. Στο παλαιότερο πλαίσιο, το κύριο βάρος δινόταν στην ετήσια πρωτογενή ενέργεια, στη θερμική προστασία του κελύφους, στην απόδοση των τεχνικών συστημάτων και στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στο νέο πλαίσιο, η ενεργειακή απόδοση παραμένει βασική απαίτηση, αλλά συνδέεται πλέον με τις λειτουργικές εκπομπές και με την αποτίμηση του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη σε όλο τον κύκλο ζωής των νέων κτιρίων. Η αλλαγή αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για μελέτες όπως η παρούσα, επειδή απαιτεί να εξετάζονται ταυτόχρονα η λειτουργική κατανάλωση, τα υλικά, οι παρεμβάσεις στο κέλυφος και οι συνολικές εκπομπές.

Η Οδηγία (ΕΕ) 2024/1275 εισάγει την έννοια του κτιρίου μηδενικών εκπομπών ως βασικό στόχο για τα νέα κτίρια. Σύμφωνα με το νέο πλαίσιο, όλα τα νέα κτίρια που ανήκουν σε δημόσιους φορείς πρέπει να είναι κτίρια μηδενικών εκπομπών από την 1η Ιανουαρίου 2028, ενώ όλα τα νέα κτίρια πρέπει να πληρούν την απαίτηση αυτή από την 1η Ιανουαρίου 2030. Η απαίτηση αυτή δεν αφορά μόνο την προσθήκη τεχνικών συστημάτων υψηλής απόδοσης, αλλά προϋποθέτει πρώτα τη μείωση της ενεργειακής ζήτησης του κτιρίου. Επομένως, στρατηγικές όπως η θερμομόνωση του κελύφους, η ορθολογική διαμόρφωση ανοιγμάτων, η σκίαση, ο φυσικός αερισμός, ο έλεγχος της υπερθέρμανσης και η αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού αποκτούν κεντρική σημασία.

Η σχέση αυτή είναι καθοριστική για τη μεθοδολογία της παρούσας εργασίας. Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός δεν αντιμετωπίζεται ως θεωρητικό συμπλήρωμα, αλλά ως το πρώτο επίπεδο ενεργειακής στρατηγικής. Πριν εξεταστεί η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μέσω αποδοτικών μηχανολογικών συστημάτων ή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, πρέπει να μειωθεί η ίδια η ζήτηση του κτιρίου. Αυτό επιτυγχάνεται με

παθητικές παρεμβάσεις που επηρεάζουν το θερμικό ισοζύγιο, όπως η θερμομονωτική προστασία, η ηλιακή προστασία, ο φυσικός αερισμός, η μείωση θερμογεφυρών και ο έλεγχος των ηλιακών κερδών. Επομένως, τα σενάρια που θα εξεταστούν στην εργασία συνδέονται άμεσα με τη λογική της ευρωπαϊκής πολιτικής για κτίρια υψηλής ενεργειακής απόδοσης και χαμηλών εκπομπών.

Συμπληρωματικά προς την EPBD, η Οδηγία (ΕΕ) 2023/1791 για την ενεργειακή απόδοση ενισχύει την αρχή της προτεραιότητας στην ενεργειακή απόδοση, δηλαδή την αρχή energy efficiency first. Η αναθεωρημένη Οδηγία καθιστά δεσμευτικό τον στόχο της πρόσθετης μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης κατά 11,7% έως το 2030, σε σχέση με τις προβολές του σεναρίου αναφοράς του 2020. Παράλληλα, η αρχή energy efficiency first απαιτεί η ενεργειακή απόδοση να λαμβάνεται υπόψη σε σημαντικές πολιτικές και επενδυτικές αποφάσεις.

Η αρχή αυτή έχει άμεση εφαρμογή στα κτίρια. Στην πράξη σημαίνει ότι η πρώτη επιλογή δεν πρέπει να είναι η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος ή η απλή αντιστάθμιση της κατανάλωσης με ανανεώσιμες πηγές, αλλά η μείωση των ίδιων των φορτίων του κτιρίου. Για την παρούσα εργασία, αυτό μεταφράζεται σε σενάρια βιοκλιματικών και ενεργειακών παρεμβάσεων, όπως θερμομόνωση εξωτερικών τοίχων και δώματος, αντικατάσταση κουφωμάτων, βελτίωση υαλοπινάκων, σκίαση ανοιγμάτων, μείωση θερινών ηλιακών κερδών και ενίσχυση του φυσικού αερισμού όπου αυτό είναι εφικτό. Η αξιολόγηση αυτών των παρεμβάσεων μέσω επιμετρήσεων και υπολογιστικού φύλλου Excel είναι συμβατή με τη λογική της προτεραιότητας στην ενεργειακή απόδοση, εφόσον οι παραδοχές είναι σαφείς και οι δείκτες αξιολόγησης τεκμηριωμένοι.

Η Οδηγία για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, όπως τροποποιήθηκε με την Οδηγία (ΕΕ) 2023/2413, συμπληρώνει το ευρωπαϊκό πλαίσιο, καθώς επιδιώκει την επιτάχυνση της καθαρής ενεργειακής μετάβασης και την αύξηση της χρήσης ανανεώσιμης ενέργειας. Η τροποποιητική Οδηγία τέθηκε σε ισχύ στις 20 Νοεμβρίου 2023 και προβλέπει μεταφορά των περισσότερων διατάξεων στο εθνικό δίκαιο εντός 18 μηνών, με συντομότερες προθεσμίες για ορισμένα θέματα αδειοδότησης έργων ανανεώσιμων πηγών. Στον κτιριακό τομέα, η σημασία της έγκειται στη δυνατότητα κάλυψης των μειωμένων πλέον ενεργειακών αναγκών από φωτοβολταϊκά, ηλιακά θερμικά συστήματα, αντλίες θερμότητας και λοιπές τεχνολογίες χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών.

Ωστόσο, η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών δεν πρέπει να υποκαθιστά τον ορθό βιοκλιματικό σχεδιασμό. Η μεθοδολογικά ορθή σειρά είναι πρώτα η μείωση των ενεργειακών αναγκών, στη συνέχεια η επιλογή αποδοτικών τεχνικών συστημάτων και τελικά η κάλυψη του υπολειπόμενου φορτίου από ανανεώσιμες πηγές. Αυτή η ιεράρχηση είναι κρίσιμη για τη διπλωματική εργασία, επειδή τα σενάρια δεν θα αξιολογηθούν μόνο με βάση το αν μειώνουν την κατανάλωση, αλλά και με βάση το πόσο κοστίζουν, πόσο υλικό απαιτούν, ποιο είναι το ενσωματωμένο περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα και σε ποιο βαθμό μειώνουν τις λειτουργικές εκπομπές σε βάθος χρόνου.

Η σημαντικότερη εξέλιξη του ευρωπαϊκού πλαισίου για το αντικείμενο της εργασίας είναι η απαίτηση υπολογισμού του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη σε όλο τον κύκλο ζωής των νέων κτιρίων, δηλαδή του life-cycle Global Warming Potential ή life-cycle GWP. Η αναδιατυπωμένη EPBD προβλέπει ότι το life-cycle GWP πρέπει να υπολογίζεται και να γνωστοποιείται στο Πιστοποιητικό Ενεργειακής Απόδοσης για όλα τα νέα κτίρια με επιφάνεια μεγαλύτερη από 1.000 m<sup>2</sup> από το 2028 και για όλα τα νέα κτίρια από το 2030. Η απαίτηση αυτή δείχνει ότι η ευρωπαϊκή πολιτική περνά σταδιακά από την αποτίμηση της λειτουργικής ενέργειας στην αποτίμηση των εκπομπών κύκλου ζωής.

Το life-cycle GWP περιλαμβάνει τις εκπομπές που σχετίζονται με τα υλικά, την παραγωγή των δομικών προϊόντων, τη μεταφορά, την κατασκευή, τη χρήση ενέργειας στο κτίριο, τις αντικαταστάσεις, την αποδόμηση και τη διαχείριση των αποβλήτων. Επομένως, ένα μέτρο ενεργειακής βελτίωσης δεν πρέπει να αξιολογείται μόνο ως προς τη μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης, αλλά και ως προς το πρόσθετο ενσωματωμένο αποτύπωμα που δημιουργεί. Για παράδειγμα, η προσθήκη θερμομόνωσης, η αντικατάσταση κουφωμάτων ή η εγκατάσταση σκιάστρων μπορεί να μειώνει τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης, αλλά ταυτόχρονα ενσωματώνει υλικά με συγκεκριμένο GWP. Η ουσιαστική αξιολόγηση προκύπτει από τη σύγκριση της πρόσθετης ενσωματωμένης επιβάρυνσης με τη μείωση των λειτουργικών εκπομπών κατά την περίοδο αναφοράς.

Το ευρωπαϊκό πλαίσιο Level(s) παρέχει κοινή μεθοδολογική βάση για την αποτίμηση της βιωσιμότητας των κτιρίων. Ο δείκτης 1.2 του Level(s) αφορά το life-cycle GWP και εκφράζεται σε kg CO<sub>2</sub>eq ανά m<sup>2</sup> ωφέλιμης εσωτερικής επιφάνειας για περίοδο αναφοράς 50 ετών. Τα αποτελέσματα αναφέρονται ανά στάδιο κύκλου ζωής, δηλαδή παραγωγή, χρήση, τέλος ζωής και πρόσθετα οφέλη ή φορτία πέραν των ορίων του συστήματος. Η συγκεκριμένη λογική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την παρούσα εργασία,

επειδή επιτρέπει τη χρήση κοινών δεικτών σύγκρισης, ακόμη και όταν η υπολογιστική εφαρμογή γίνεται σε περιβάλλον Excel και όχι σε εξειδικευμένο λογισμικό BIM-LCA.

Η χρήση υπολογιστικού φύλλου δεν αναιρεί τη σύνδεση με το ευρωπαϊκό πλαίσιο, εφόσον ακολουθούνται οι βασικές αρχές της μεθοδολογίας. Η EPBD και το Level(s) δεν επιβάλλουν συγκεκριμένο εμπορικό λογισμικό για την κατανόηση της λογικής των δεικτών, αλλά απαιτούν σαφή μεθοδολογία, κοινά όρια, κατάλληλη μονάδα αναφοράς και τεκμηριωμένα δεδομένα. Στο πλαίσιο της διπλωματικής, η εφαρμογή σε Excel μπορεί να οργανωθεί έτσι ώστε να καταγράφονται οι επιμετρημένες ποσότητες υλικών, οι τιμές κόστους, οι περιβαλλοντικοί συντελεστές, οι εκτιμήσεις εξοικονόμησης ενέργειας και οι αντίστοιχες εκπομπές. Με αυτόν τον τρόπο, η εργασία δεν υποκαθιστά μια επίσημη πιστοποιημένη LCA, αλλά εφαρμόζει μια διαφανή συγκριτική αποτίμηση σεναρίων με λογική κύκλου ζωής.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει επίσης δημοσιεύσει ενωσιακό πλαίσιο για τον υπολογισμό του life-cycle GWP των νέων κτιρίων, με στόχο τη διαμόρφωση συγκρίσιμων μεθοδολογιών μεταξύ των κρατών μελών, επιτρέποντας παράλληλα την προσαρμογή σε εθνικές ιδιαιτερότητες. Η εξέλιξη αυτή ενισχύει την ανάγκη οι μελέτες κτιρίων να στηρίζονται σε σαφείς επιμετρήσεις, διακριτά στάδια κύκλου ζωής και τεκμηριωμένους περιβαλλοντικούς συντελεστές. Για τη συγκεκριμένη διπλωματική, αυτό σημαίνει ότι το Excel πρέπει να σχεδιαστεί όχι απλώς ως πίνακας κόστους, αλλά ως οργανωμένο υπολογιστικό μοντέλο που θα συνδέει ποσότητες, κόστος, ενέργεια και εκπομπές.

Η ευρωπαϊκή πολιτική συνδέει επίσης την περιβαλλοντική επίδοση των κτιρίων με τα δομικά προϊόντα. Ο νέος Κανονισμός (ΕΕ) 2024/3110 για τα δομικά προϊόντα θεσπίζει εναρμονισμένους κανόνες για την εμπορία δομικών προϊόντων στην Ευρωπαϊκή Ένωση, παρέχοντας κοινή τεχνική γλώσσα για την αξιολόγηση της επίδοσής τους. Το πλαίσιο αυτό είναι σημαντικό, επειδή αξιόπιστες και συγκρίσιμες πληροφορίες για τα υλικά είναι απαραίτητες για την αποτίμηση του ενσωματωμένου περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κτιρίων. Στην παρούσα εργασία, η ανάγκη αυτή μεταφράζεται σε προσεκτική επιλογή περιβαλλοντικών συντελεστών για υλικά όπως θερμομονώσεις, κουφώματα, υαλοπίνακες, σκίαστρα και στοιχεία κελύφους.

Σημαντικό ρόλο έχει και η Ταξινόμηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη βιώσιμη χρηματοδότηση, η οποία επιδιώκει να διαμορφώσει κοινό σύστημα ταξινόμησης

οικονομικών δραστηριοτήτων που μπορούν να θεωρηθούν περιβαλλοντικά βιώσιμες. Για τα νέα κτίρια, η Ταξινομία συνδέει την περιβαλλοντική επίδοση με τεχνικά κριτήρια, γεγονός που ενισχύει τη σημασία της τεκμηρίωσης των ενεργειακών και περιβαλλοντικών επιδόσεων. Αν και η παρούσα διπλωματική δεν αποτελεί μελέτη ταξινομίας ή χρηματοοικονομικής συμμόρφωσης, η λογική της συγκριτικής αξιολόγησης σεναρίων κόστους, ενέργειας και εκπομπών είναι συμβατή με τη γενικότερη ευρωπαϊκή κατεύθυνση για τεκμηριωμένη και μετρήσιμη βιωσιμότητα.

Η μετάβαση αυτή έχει άμεσες επιπτώσεις στον τρόπο με τον οποίο πρέπει να οργανώνονται οι μελέτες κτιρίων. Η ενεργειακή αξιολόγηση δεν μπορεί πλέον να περιορίζεται σε μία τελική ενεργειακή κατάταξη, αλλά πρέπει να συνδέεται με τις αποφάσεις σχεδιασμού και τις ποσότητες υλικών. Για παράδειγμα, η θερμομονωτική αναβάθμιση ενός κελύφους πρέπει να αξιολογείται ως προς το κόστος εφαρμογής, την αναμενόμενη εξοικονόμηση ενέργειας, τη μείωση λειτουργικών εκπομπών και το πρόσθετο ενσωματωμένο GWP της θερμομόνωσης. Αντίστοιχα, η αντικατάσταση κουφωμάτων πρέπει να εξετάζεται ως προς τη θερμομονωτική απόδοση, την επίδραση στα ψυκτικά και θερμικά φορτία, το κόστος, τη διάρκεια ζωής και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των υλικών.

Στην περίπτωση βιοκλιματικών παρεμβάσεων, η ευρωπαϊκή λογική οδηγεί σε πολυκριτηριακή αξιολόγηση. Η σκίαση, για παράδειγμα, δεν είναι απλώς αρχιτεκτονικό στοιχείο, αλλά παρέμβαση με επίδραση στα θερινά ηλιακά κέρδη, στα ψυκτικά φορτία, στην οπτική άνεση και στο κόστος κατασκευής. Ο φυσικός αερισμός δεν είναι μόνο ποιοτικό χαρακτηριστικό, αλλά στρατηγική που μπορεί να μειώσει τις ανάγκες μηχανικής ψύξης, εφόσον οι συνθήκες θορύβου, ασφάλειας, ρύπανσης και μικροκλίματος το επιτρέπουν. Η θερμική μάζα και η νυχτερινή αποφόρτιση μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της υπερθέρμανσης, αλλά απαιτούν κατάλληλη γεωμετρία, υλικά και συνθήκες αερισμού. Επομένως, κάθε βιοκλιματικό μέτρο πρέπει να μεταφράζεται σε μετρήσιμες παραμέτρους, ώστε να μπορεί να συγκριθεί με εναλλακτικές επιλογές.

Για την παρούσα διπλωματική, η ευρωπαϊκή κατεύθυνση μπορεί να μεταφραστεί σε συγκεκριμένη μεθοδολογική δομή. Αρχικά, θα αποτυπωθεί το κτίριο και θα επιμετρηθούν τα βασικά στοιχεία του κελύφους, όπως εξωτερικοί τοίχοι, δώμα, δάπεδα, ανοίγματα, κουφώματα και πιθανά στοιχεία σκίασης. Στη συνέχεια, θα διαμορφωθούν σενάρια βιοκλιματικής και ενεργειακής βελτίωσης. Για κάθε σενάριο θα υπολογίζεται το

κόστος υλικών και εργασιών, η πρόσθετη ενσωματωμένη περιβαλλοντική επιβάρυνση, η εκτιμώμενη εξοικονόμηση ενέργειας και η αντίστοιχη μείωση λειτουργικών εκπομπών. Τέλος, τα σενάρια θα συγκρίνονται με δείκτες όπως €/m<sup>2</sup> παρέμβασης, kWh εξοικονόμησης, kg CO<sub>2</sub>eq ενσωματωμένων εκπομπών, kg CO<sub>2</sub>eq λειτουργικής μείωσης και χρόνος οικονομικής ή περιβαλλοντικής απόσβεσης.

Η παραπάνω προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για πολυώροφο κτίριο κατοικίας στην Αθήνα, όπου οι θερινές συνθήκες, η ηλιακή ακτινοβολία, η ανάγκη ψύξης, η σκίαση από γειτονικά κτίρια και η αστική θερμική νησίδα επηρεάζουν ουσιαστικά την ενεργειακή συμπεριφορά. Το ευρωπαϊκό πλαίσιο υποστηρίζει ακριβώς αυτή τη μετάβαση από τη γενική κανονιστική συμμόρφωση προς μια πιο ολοκληρωμένη και ποσοτικοποιημένη αξιολόγηση. Συνεπώς, η εργασία μπορεί να τεκμηριώσει ότι τα σενάρια βιοκλιματικού σχεδιασμού δεν αποτελούν απλές προτάσεις βελτίωσης, αλλά παρεμβάσεις που εντάσσονται στη σύγχρονη ευρωπαϊκή πολιτική για μείωση ζήτησης, μείωση εκπομπών και αποτίμηση κύκλου ζωής.

Συμπερασματικά, το ευρωπαϊκό πλαίσιο για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων οδηγεί σταδιακά σε μια ολιστική θεώρηση της κτιριακής επίδοσης. Η EPBD, η Οδηγία για την ενεργειακή απόδοση, η Οδηγία για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, το Level(s), ο Κανονισμός για τα δομικά προϊόντα και η Ταξινόμια διαμορφώνουν ένα περιβάλλον στο οποίο τα κτίρια αξιολογούνται όχι μόνο ως καταναλωτές ενέργειας, αλλά ως συστήματα με λειτουργικές και ενσωματωμένες εκπομπές. Για την παρούσα εργασία, αυτό σημαίνει ότι η μελέτη των σεναρίων πρέπει να συνδέει τον βιοκλιματικό σχεδιασμό με την ενεργειακή εξοικονόμηση, το κόστος εφαρμογής και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε Excel, με βάση επιμετρήσεις, τεκμηριωμένους δείκτες και σαφείς παραδοχές, μπορεί να υποστηρίξει αυτή τη συγκριτική αξιολόγηση, αρκεί να παρουσιάζεται ως διαφανής υπολογιστική προσέγγιση και όχι ως πλήρης πιστοποιημένη LCA.

### **3.3 Ελληνικό πλαίσιο για ενεργειακή απόδοση, εθνικές απαιτήσεις και εφαρμογές σε μελέτες κτιρίων**

Το Ελληνικό θεσμικό πλαίσιο για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων έχει διαμορφωθεί μέσα από τη σταδιακή ενσωμάτωση των ευρωπαϊκών οδηγιών στην εθνική νομοθεσία και την ανάπτυξη τεχνικών κανονισμών, οδηγιών και εργαλείων εφαρμογής. Η βασική του κατεύθυνση είναι η μείωση της λειτουργικής ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων, η βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς του κελύφους, η αύξηση της απόδοσης των τεχνικών συστημάτων και η προώθηση των κτιρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το ελληνικό πλαίσιο έχει ιδιαίτερη σημασία, διότι παρέχει το κανονιστικό υπόβαθρο για την αξιολόγηση των βιοκλιματικών και ενεργειακών παρεμβάσεων που θα εξεταστούν στη μελέτη περίπτωσης.

Κεντρικό νομοθέτημα αποτελεί ο Ν. 4122/2013, με τον οποίο ενσωματώθηκε στην ελληνική έννομη τάξη η Οδηγία 2010/31/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Ο νόμος καθορίζει τις βασικές απαιτήσεις για τη μεθοδολογία υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης, τον καθορισμό ελάχιστων απαιτήσεων, την ενεργειακή πιστοποίηση, την επιθεώρηση τεχνικών συστημάτων και την προώθηση των κτιρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας. Σύμφωνα με το άρθρο 4 του νόμου, οι ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης ορίζονται λαμβάνοντας υπόψη τα βέλτιστα από πλευράς κόστους επίπεδα, ενώ θεσπίζονται απαιτήσεις για τα δομικά στοιχεία του κελύφους και τα τεχνικά συστήματα που επηρεάζουν σημαντικά την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου.

Η αναφορά στα βέλτιστα από πλευράς κόστους επίπεδα είναι ιδιαίτερα σημαντική για την παρούσα εργασία, επειδή συνδέει άμεσα την ενεργειακή απόδοση με την οικονομική αξιολόγηση των παρεμβάσεων. Η βελτίωση ενός κτιρίου δεν εξετάζεται μόνο ως τεχνικό ζήτημα, αλλά και ως επιλογή που πρέπει να αξιολογείται ως προς το κόστος εφαρμογής, την αναμενόμενη εξοικονόμηση ενέργειας και το όφελος που προκύπτει στη διάρκεια ζωής του κτιρίου. Επομένως, η μεθοδολογία που θα εφαρμοστεί σε περιβάλλον Excel, με υπολογισμό επιφανειών, ποσοτήτων, κόστους υλικών και εργασιών, ενεργειακών δεικτών και περιβαλλοντικών συντελεστών, είναι συμβατή με τη λογική της τεχνικοοικονομικής τεκμηρίωσης που διατρέχει το ελληνικό πλαίσιο ενεργειακής απόδοσης.

Η εφαρμογή του Ν. 4122/2013 εξειδικεύεται μέσω του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων, δηλαδή του KENAK. Ο ισχύων KENAK εγκρίθηκε με την Υ.Α.

ΔΕΠΕΑ/οικ.178581/2017 και δημοσιεύθηκε στο ΦΕΚ Β 2367/12.07.2017. Ο κανονισμός καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης για τα κτίρια και τα δομικά στοιχεία τους, καθώς και τις βασικές παραμέτρους υπολογισμού της ενεργειακής συμπεριφοράς. Η τεχνική σημασία του KENAK είναι ότι μετατρέπει τη γενική νομοθετική απαίτηση σε εφαρμόσιμη μεθοδολογία, η οποία λαμβάνει υπόψη το κέλυφος, τα ανοίγματα, τις θερμογέφυρες, τα συστήματα θέρμανσης, ψύξης, αερισμού, ζεστού νερού χρήσης, φωτισμού και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Στην πράξη, ο KENAK δεν αντιμετωπίζει το κτίριο ως άθροισμα ανεξάρτητων δομικών στοιχείων, αλλά ως ενεργειακό σύστημα. Η τελική ενεργειακή συμπεριφορά εξαρτάται από τη γεωμετρία, τον προσανατολισμό, τις θερμοφυσικές ιδιότητες του κελύφους, τα κουφώματα, τη σκίαση, τον αερισμό, τα τεχνικά συστήματα και τις συνθήκες χρήσης. Η προσέγγιση αυτή συνδέεται άμεσα με τον βιοκλιματικό σχεδιασμό, καθώς οι παθητικές στρατηγικές επηρεάζουν τις υπολογιζόμενες ανάγκες θέρμανσης και ψύξης πριν ακόμη εξεταστεί η επιλογή μηχανολογικού εξοπλισμού. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία οι βιοκλιματικές παρεμβάσεις, όπως η θερμομονωτική αναβάθμιση, η σκίαση, η βελτίωση κουφωμάτων και η αξιοποίηση φυσικού αερισμού, θα εξεταστούν ως τεχνικά μέτρα που επηρεάζουν το λειτουργικό ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου.

Η τεχνική εφαρμογή του KENAK υποστηρίζεται από τις Τεχνικές Οδηγίες του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, δηλαδή τις TOTEE. Το TEE αναφέρει ότι η TOTEE 20701-1/2017 αφορά τις αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και την έκδοση του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης, ενώ η TOTEE 20701-2/2017 αφορά τις θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και τον έλεγχο της θερμομονωτικής επάρκειας των κτιρίων. Οι οδηγίες αυτές είναι κρίσιμες, επειδή παρέχουν τα δεδομένα και τις παραδοχές που απαιτούνται για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης σε ελληνικές κλιματικές συνθήκες.

Οι TOTEE έχουν άμεση σχέση με τη μεθοδολογία της παρούσας εργασίας. Ακόμη και αν δεν εφαρμοστεί πλήρης ενεργειακή προσομοίωση ή επίσημη διαδικασία έκδοσης ΠΕΑ, οι αρχές τους μπορούν να αξιοποιηθούν για τη διαμόρφωση τεκμηριωμένων παραδοχών. Για παράδειγμα, οι θερμοφυσικές ιδιότητες υλικών, οι συντελεστές θερμοπερατότητας, οι κλιματικές ζώνες, οι συνθήκες εσωτερικής άνεσης, οι σκιάσεις και οι συντελεστές μετατροπής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για την

εκτίμηση της επίδρασης των παρεμβάσεων. Έτσι, το Excel της εργασίας δεν θα αποτελεί απλή επιμετρητική εφαρμογή, αλλά υπολογιστικό μοντέλο που θα συνδέει τις γεωμετρικές ποσότητες με τεχνικές παραμέτρους ενεργειακής συμπεριφοράς.

Το Πιστοποιητικό Ενεργειακής Απόδοσης, ΠΕΑ, αποτελεί το βασικό εργαλείο αποτύπωσης της ενεργειακής κατάταξης ενός κτιρίου ή μιας κτιριακής μονάδας. Το ΠΕΑ περιλαμβάνει την ενεργειακή κατηγορία, δείκτες κατανάλωσης και συστάσεις βελτίωσης, ενώ χρησιμοποιείται σε μεταβιβάσεις, μισθώσεις και άλλες διαδικασίες που προβλέπονται από τη νομοθεσία. Από την 1η Ιανουαρίου 2021, το ΥΠΕΝ έχει επισημάνει ότι κάθε κτίριο που πωλείται ή μισθώνεται απαιτείται να έχει ΠΕΑ και ότι η ενεργειακή κατηγορία πρέπει να δηλώνεται στις σχετικές εμπορικές καταχωρήσεις. Το ΠΕΑ, όμως, αφορά κυρίως τη λειτουργική ενεργειακή επίδοση και δεν αποτελεί από μόνο του πλήρη περιβαλλοντική αξιολόγηση κύκλου ζωής.

Η διάκριση αυτή είναι καθοριστική για τη διπλωματική εργασία. Το ελληνικό πλαίσιο, όπως εφαρμόζεται μέσω ΚΕΝΑΚ, ΤΟΤΕΕ και ΠΕΑ, παρέχει ισχυρή βάση για την εκτίμηση της λειτουργικής ενεργειακής συμπεριφοράς. Ωστόσο, δεν καλύπτει στον ίδιο βαθμό την ενσωματωμένη περιβαλλοντική επιβάρυνση των υλικών, δηλαδή τις εκπομπές που συνδέονται με την παραγωγή, μεταφορά, κατασκευή, αντικατάσταση και τελική διαχείριση των υλικών. Επομένως, στην παρούσα εργασία το ελληνικό πλαίσιο θα χρησιμοποιηθεί κυρίως για τη σύνδεση των βιοκλιματικών παρεμβάσεων με την ενεργειακή απόδοση, ενώ η περιβαλλοντική αποτίμηση των υλικών θα στηριχθεί σε δείκτες κύκλου ζωής, EPD, βιβλιογραφικές τιμές ή άλλες τεκμηριωμένες πηγές.

Ιδιαίτερη θέση στο Ελληνικό πλαίσιο κατέχουν τα κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας, γνωστά ως ΚΣΜΚΕ. Σύμφωνα με το ΥΠΕΝ, βάσει του άρθρου 9 του Ν. 4122/2013, από την 1η Ιανουαρίου 2021 όλα τα νέα κτίρια πρέπει να είναι κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας, ενώ για τα νέα κτίρια που στεγάζουν υπηρεσίες του δημόσιου και ευρύτερου δημόσιου τομέα η υποχρέωση ισχύει από την 1η Ιανουαρίου 2019. Η απαίτηση αυτή εκφράζει τη μετάβαση από την απλή συμμόρφωση με ελάχιστες απαιτήσεις προς κτίρια υψηλής ενεργειακής επίδοσης.

Η έννοια του ΚΣΜΚΕ συνδέεται άμεσα με τον βιοκλιματικό σχεδιασμό. Ένα κτίριο σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στην εγκατάσταση αποδοτικών τεχνικών συστημάτων ή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Πρέπει

πρωτίστως να μειώνει τη ζήτηση ενέργειας μέσω της μορφής, του κελύφους και των παθητικών στρατηγικών. Η θερμομόνωση, η αεροστεγανότητα, η ορθολογική διαστασιολόγηση ανοιγμάτων, η σκίαση, ο φυσικός φωτισμός, ο φυσικός και νυχτερινός αερισμός και ο περιορισμός της θερινής υπερθέρμανσης αποτελούν βασικά μέτρα για τη μείωση των ενεργειακών αναγκών. Για τον λόγο αυτό, τα σενάρια της παρούσας εργασίας θα πρέπει να δομηθούν έτσι ώστε να εξετάζουν την επίδραση κάθε βιοκλιματικής παρέμβασης όχι μόνο στο κόστος, αλλά και στην αναμενόμενη μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης.

Η σημασία του κτιριακού τομέα στην Ελλάδα είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Το ΥΠΕΝ αναφέρει ότι τα κτίρια ευθύνονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση για το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, ενώ στην Ελλάδα για το 43%, καταναλώνοντας το μεγαλύτερο μερίδιο ενέργειας και παρουσιάζοντας ταυτόχρονα μεγάλο δυναμικό εξοικονόμησης. Το στοιχείο αυτό τεκμηριώνει τη σημασία των ενεργειακών παρεμβάσεων στα κτίρια κατοικίας και ειδικά στις πολυκατοικίες, οι οποίες αποτελούν σημαντικό μέρος του αστικού κτιριακού αποθέματος. Για μια εξάωρο πολυκατοικία στην Αθήνα, η ενεργειακή συμπεριφορά επηρεάζεται τόσο από τα χαρακτηριστικά του κελύφους όσο και από τις αστικές συνθήκες, όπως η πυκνή δόμηση, η περιορισμένη διαμπερής ροή αέρα, η σκίαση από γειτονικά κτίρια και η αστική θερμική νησίδα.

Η Ελληνική στρατηγική για τα κτίρια δεν περιορίζεται στα νέα κτίρια. Η Μακροπρόθεσμη Στρατηγική Ανακαίνισης του Κτιριακού Αποθέματος αποτελεί συνέχεια προηγούμενων στρατηγικών για την κινητοποίηση επενδύσεων στην ανακαίνιση κατοικιών και εμπορικών κτιρίων, δημόσιων και ιδιωτικών, στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής πολιτικής για την ενεργειακή απόδοση. Η στρατηγική αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διπλωματική, επειδή τα σενάρια παρεμβάσεων που θα εξεταστούν σε επίπεδο κτιρίου συνδέονται με την ευρύτερη ανάγκη ενεργειακής αναβάθμισης του ελληνικού κτιριακού αποθέματος.

Παράλληλα, το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα, ΕΣΕΚ, αποτελεί τον βασικό οδικό χάρτη της χώρας για την ενεργειακή μετάβαση. Το ΥΠΕΝ αναφέρει ότι το ΕΣΕΚ κυρώθηκε με την υπ' αριθμ. 3/18.12.2024 Απόφαση του Κυβερνητικού Συμβουλίου Οικονομικής Πολιτικής, η οποία δημοσιεύθηκε στο ΦΕΚ Β 4893. Το ΕΣΕΚ εντάσσει την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων στη συνολικότερη εθνική στρατηγική για

την ενέργεια και το κλίμα, ενισχύοντας τη σημασία των παρεμβάσεων εξοικονόμησης και της μείωσης εκπομπών στον κτιριακό τομέα.

Σημαντικό γενικό πλαίσιο παρέχει και ο Εθνικός Κλιματικός Νόμος, Ν. 4936/2022. Σύμφωνα με το ΥΠΕΝ, σκοπός του είναι η δημιουργία πλαισίου για τη βελτίωση της προσαρμοστικής ικανότητας και της κλιματικής ανθεκτικότητας της χώρας, καθώς και η σταδιακή μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα έως το 2050. Ο νόμος θέτει επίσης ενδιάμεσους στόχους μείωσης των καθαρών ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% το 2030 και κατά 80% το 2040, σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Η ύπαρξη αυτών των στόχων ενισχύει την ανάγκη οι μελέτες κτιρίων να εξετάζουν όχι μόνο την κατανάλωση ενέργειας, αλλά και τις εκπομπές που σχετίζονται με τη λειτουργία και τις παρεμβάσεις.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το Ελληνικό πλαίσιο οδηγεί σε μια πρακτική μεθοδολογική κατεύθυνση. Η αρχιτεκτονική αποτύπωση του κτιρίου και οι επιμετρήσεις των βασικών δομικών στοιχείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστούν οι επιφάνειες εξωτερικών τοίχων, δωματίων, δαπέδων, ανοιγμάτων, κουφωμάτων και σκιάστρων. Στη συνέχεια, οι επιφάνειες αυτές μπορούν να συνδεθούν με σενάρια ενεργειακής και βιοκλιματικής βελτίωσης, όπως θερμοπρόσοψη, θερμομόνωση δώματος, αντικατάσταση κουφωμάτων, προσθήκη εξωτερικών σκιάστρων ή βελτίωση αερισμού. Για κάθε σενάριο μπορούν να υπολογιστούν οι ποσότητες υλικών, το κόστος υλικών και εργασιών, η πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας και η μείωση λειτουργικών εκπομπών.

Η επιλογή Excel ως βασικού υπολογιστικού εργαλείου μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλη για τη συγκεκριμένη εργασία, εφόσον η διαδικασία οργανωθεί με σαφή και ελέγξιμο τρόπο. Το αρχείο μπορεί να περιλαμβάνει φύλλα για γενικά στοιχεία κτιρίου, γεωμετρικές επιμετρήσεις, τιμές μονάδας, κόστος εργασιών, ενεργειακούς δείκτες, περιβαλλοντικούς συντελεστές, σενάρια παρεμβάσεων και συγκριτικά αποτελέσματα. Με αυτόν τον τρόπο, η μελέτη θα μπορεί να παρουσιάσει τη σχέση μεταξύ ελληνικών απαιτήσεων ενεργειακής απόδοσης, βιοκλιματικών επιλογών και τεχνικοοικονομικής αξιολόγησης. Η διαδικασία δεν αντικαθιστά μια επίσημη ενεργειακή επιθεώρηση ή ένα ΠΕΑ, αλλά μπορεί να λειτουργήσει ως τεκμηριωμένη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων.

Η σχέση του ελληνικού πλαισίου με τον βιοκλιματικό σχεδιασμό είναι ουσιαστική. Αν και ο KENAK και οι TOTEE δεν χρησιμοποιούν πάντοτε τον όρο βιοκλιματικός σχεδιασμός ως κεντρικό θεσμικό όρο, οι παράμετροι που λαμβάνουν υπόψη συνδέονται άμεσα με αυτόν. Η θερμομονωτική επάρκεια, οι θερμογέφυρες, τα ανοίγματα, ο προσανατολισμός, οι σκιάσεις, ο αερισμός και τα ηλιακά κέρδη είναι στοιχεία που επηρεάζουν τη λειτουργική ενεργειακή συμπεριφορά και αποτελούν ταυτόχρονα βασικά εργαλεία βιοκλιματικού σχεδιασμού. Επομένως, τα σενάρια της εργασίας μπορούν να ερμηνευθούν ως τεχνική εφαρμογή των αρχών αυτών σε ένα συγκεκριμένο αστικό κτίριο κατοικίας.

Για την εξαώροφη πολυκατοικία της Αθήνας, η εφαρμογή του ελληνικού πλαισίου πρέπει να λάβει υπόψη το τοπικό κλιματικό και αστικό περιβάλλον. Η Αθήνα παρουσιάζει σημαντικές απαιτήσεις ψύξης κατά τη θερινή περίοδο, ενώ η πυκνή δόμηση επηρεάζει τον φυσικό αερισμό, τον φυσικό φωτισμό και τη σκίαση των όψεων. Συνεπώς, τα σενάρια που θα εξεταστούν δεν πρέπει να περιοριστούν στη θερμομόνωση, αλλά να περιλαμβάνουν και παθητικές στρατηγικές περιορισμού της υπερθέρμανσης. Η σκίαση ανοιγμάτων, η επιλογή κατάλληλων υαλοπινάκων, η μείωση της ανεπιθύμητης ηλιακής ακτινοβολίας και η δυνατότητα νυχτερινού αερισμού αποτελούν παρεμβάσεις με ιδιαίτερη σημασία για το ελληνικό αστικό κλίμα.

Ένα κρίσιμο σημείο είναι ότι το ελληνικό πλαίσιο εστιάζει κυρίως στη λειτουργική ενέργεια και όχι πλήρως στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα κύκλου ζωής. Η εξέλιξη του ευρωπαϊκού πλαισίου, ιδίως μέσω της αναδιατυπωμένης EPBD, οδηγεί σταδιακά προς υπολογισμό του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη σε όλο τον κύκλο ζωής των νέων κτιρίων. Το ελληνικό πλαίσιο αναμένεται να προσαρμοστεί σε αυτή την κατεύθυνση μέσω της μεταφοράς και εφαρμογής των ευρωπαϊκών απαιτήσεων. Μέχρι τότε, η παρούσα εργασία μπορεί να λειτουργήσει ως ενδιάμεση μεθοδολογική προσέγγιση, συνδυάζοντας την ελληνική λογική ενεργειακής αξιολόγησης με περιβαλλοντικούς δείκτες υλικών και σεναρίων.

Η ενσωμάτωση κόστους στην αξιολόγηση είναι επίσης σημαντική. Το ελληνικό θεσμικό πλαίσιο αναφέρεται σε απαιτήσεις που λαμβάνουν υπόψη τα βέλτιστα από πλευράς κόστους επίπεδα, ενώ στην πράξη κάθε ενεργειακή παρέμβαση αξιολογείται από τον ιδιοκτήτη ή τον μελετητή και ως οικονομική επιλογή. Για τον λόγο αυτό, η εργασία θα πρέπει να υπολογίσει όχι μόνο την ενεργειακή επίδραση των παρεμβάσεων, αλλά και το

αρχικό κόστος εφαρμογής, την ετήσια εξοικονόμηση, την απλή περίοδο αποπληρωμής και το κόστος ανά μονάδα εξοικονομούμενης ενέργειας ή αποφευγόμενων εκπομπών. Η σύνδεση αυτή καθιστά τη μεθοδολογία περισσότερο ρεαλιστική και χρήσιμη για εφαρμογή σε πραγματικές μελέτες.

Συνολικά, το ελληνικό πλαίσιο για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων παρέχει τη θεσμική και τεχνική βάση πάνω στην οποία μπορεί να στηριχθεί η μελέτη των βιοκλιματικών και ενεργειακών παρεμβάσεων. Ο Ν. 4122/2013, ο ΚΕΝΑΚ, οι ΤΟΤΕΕ, το ΠΕΑ, οι απαιτήσεις για ΚΣΜΚΕ, η Μακροπρόθεσμη Στρατηγική Ανακαίνισης, το ΕΣΕΚ και ο Εθνικός Κλιματικός Νόμος διαμορφώνουν ένα πλαίσιο που δίνει προτεραιότητα στη μείωση της λειτουργικής ενεργειακής κατανάλωσης και στη σταδιακή απανθρακοποίηση του κτιριακού αποθέματος. Η παρούσα εργασία αξιοποιεί αυτό το πλαίσιο, αλλά το επεκτείνει σε επίπεδο συγκριτικής αξιολόγησης σεναρίων, συνδυάζοντας επιμετρήσεις, κόστος, ενεργειακούς δείκτες και περιβαλλοντικούς συντελεστές.

Συμπερασματικά, το ελληνικό πλαίσιο δεν πρέπει να αντιμετωπιστεί μόνο ως υποχρέωση συμμόρφωσης, αλλά ως βάση για τεχνικά τεκμηριωμένο σχεδιασμό. Οι απαιτήσεις του ΚΕΝΑΚ και των ΤΟΤΕΕ αναδεικνύουν τη σημασία του κελύφους, των τεχνικών συστημάτων και των παθητικών στρατηγικών, ενώ οι εθνικοί κλιματικοί και ενεργειακοί στόχοι ενισχύουν την ανάγκη για μείωση κατανάλωσης και εκπομπών. Για τη διπλωματική εργασία, αυτό σημαίνει ότι τα σενάρια βιοκλιματικής βελτίωσης της εξάωροφης πολυκατοικίας στην Αθήνα μπορούν να αξιολογηθούν μέσα από ένα διαφανές υπολογιστικό μοντέλο Excel, το οποίο θα συνδέει τις γεωμετρικές επιμετρήσεις με το κόστος, την ενεργειακή

### **3.4 Πρότυπα και τεχνικοί κανόνες για αποτίμηση κύκλου ζωής κτιρίων και υλικών, αρχές οριοθέτησης και μονάδα αναφοράς**

Η αποτίμηση του ενεργειακού και περιβαλλοντικού αποτυπώματος ενός κτιρίου απαιτεί σαφή μεθοδολογική βάση, ώστε τα αποτελέσματα να είναι τεκμηριωμένα, συγκρίσιμα και ελέγξιμα. Η ανάγκη αυτή γίνεται ακόμη πιο σημαντική όταν η αξιολόγηση δεν περιορίζεται σε μία γενική περιγραφή παρεμβάσεων, αλλά επιχειρεί να συγκρίνει εναλλακτικά σενάρια βιοκλιματικής και ενεργειακής βελτίωσης ως προς το κόστος, την εξοικονόμηση ενέργειας, τις λειτουργικές εκπομπές και το ενσωματωμένο περιβαλλοντικό

αποτύπωμα των υλικών. Στο πλαίσιο αυτό, τα διεθνή και ευρωπαϊκά πρότυπα δεν λειτουργούν μόνο ως τυπικές κανονιστικές αναφορές, αλλά ως οδηγός για τον τρόπο με τον οποίο οργανώνονται τα δεδομένα, ορίζονται τα όρια του συστήματος και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Η γενική μεθοδολογική βάση της αξιολόγησης κύκλου ζωής καθορίζεται από τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044. Το ISO 14040 περιγράφει τις αρχές και το πλαίσιο της LCA, περιλαμβάνοντας τον καθορισμό σκοπού και πεδίου εφαρμογής, την απογραφή κύκλου ζωής, την εκτίμηση επιπτώσεων, την ερμηνεία, την αναφορά και την κριτική επισκόπηση της μελέτης. Το ISO 14044 εξειδικεύει τις απαιτήσεις και παρέχει κατευθυντήριες οδηγίες για την εφαρμογή της LCA, συμπεριλαμβανομένων των σταδίων απογραφής, εκτίμησης επιπτώσεων και ερμηνείας, ενώ η έκδοση ISO 14044:2006 έχει επιβεβαιωθεί ως ισχύουσα από τον ISO.

Η σημασία των ISO 14040 και ISO 14044 για την παρούσα εργασία είναι ότι θεμελιώνουν τη λογική της συστηματικής αξιολόγησης, ακόμη και όταν η εφαρμογή δεν γίνεται με πλήρες εμπορικό λογισμικό LCA. Η χρήση ενός οργανωμένου υπολογιστικού φύλλου Excel μπορεί να θεωρηθεί μεθοδολογικά αποδεκτή για συγκριτική αξιολόγηση σεναρίων, εφόσον τηρούνται οι βασικές αρχές της LCA: σαφής σκοπός, καθορισμένα όρια συστήματος, κοινή μονάδα αναφοράς, τεκμηριωμένες ποσότητες, γνωστές πηγές δεδομένων και διαφανείς παραδοχές. Επομένως, το κρίσιμο στοιχείο δεν είναι το λογισμικό καθαυτό, αλλά η συνέπεια της μεθόδου και η δυνατότητα ελέγχου κάθε υπολογισμού.

Σε επίπεδο κτιρίων, το βασικό ευρωπαϊκό πρότυπο είναι το EN 15978. Η νεότερη έκδοση EN 15978:2026 παρέχει εναρμονισμένη μέθοδο για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδοσης κτιρίων με χρήση LCA και άλλων ποσοτικοποιημένων περιβαλλοντικών δεδομένων. Εφαρμόζεται σε νέα και υφιστάμενα κτίρια, καθώς και σε έργα ανακαίνισης, και καθορίζει τον τρόπο υπολογισμού, αναφοράς και επικοινωνίας των αποτελεσμάτων περιβαλλοντικής επίδοσης σε επίπεδο κτιρίου και οικοπέδου.

Η σημασία του EN 15978 για τη διπλωματική εργασία είναι ότι μεταφέρει την περιβαλλοντική αποτίμηση από το επίπεδο του μεμονωμένου υλικού στο επίπεδο του συνολικού κτιρίου. Στο επίπεδο αυτό, δεν αρκεί να γνωρίζουμε το περιβαλλοντικό αποτύπωμα ενός προϊόντος ανά kg ή ανά m<sup>2</sup>. Πρέπει να γνωρίζουμε σε ποιες ποσότητες

χρησιμοποιείται στο κτίριο, σε ποια δομικά στοιχεία ενσωματώνεται, ποια διάρκεια ζωής έχει, αν αντικαθίσταται κατά την περίοδο αναφοράς και πώς επηρεάζει τη λειτουργική ενεργειακή συμπεριφορά. Αυτή η λογική είναι απόλυτα συμβατή με τη μεθοδολογία που θα εφαρμοστεί στην εργασία, όπου οι ποσότητες θα προκύπτουν από σχέδια CAD και θα οργανώνονται σε Excel ανά δομικό στοιχείο και ανά σενάριο παρέμβασης.

Σε επίπεδο δομικών προϊόντων, το EN 15804+A2:2019 αποτελεί το βασικό πρότυπο για τις Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντων. Το πρότυπο καθορίζει τους βασικούς κανόνες κατηγορίας προϊόντων για δηλώσεις τύπου III σε κατασκευαστικά προϊόντα και υπηρεσίες, με στόχο την παροχή διαφανούς και συγκρίσιμης πληροφορίας κύκλου ζωής. Στην πράξη, οι EPD που συντάσσονται με βάση το EN 15804 παρέχουν περιβαλλοντικούς δείκτες για υλικά όπως σκυρόδεμα, χάλυβας, αλουμίνιο, υαλοπίνακες, θερμομονωτικά προϊόντα, επιχρίσματα, στεγανώσεις και λοιπά δομικά προϊόντα. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν είτε σε εξειδικευμένο λογισμικό είτε σε οργανωμένο υπολογιστικό φύλλο.

Η σχέση μεταξύ EN 15804 και EN 15978 είναι καθοριστική. Το EN 15804 οργανώνει την περιβαλλοντική πληροφορία σε επίπεδο προϊόντος, ενώ το EN 15978 αξιοποιεί αυτή την πληροφορία σε επίπεδο κτιρίου. Για παράδειγμα, μια EPD θερμομονωτικού υλικού μπορεί να δίνει αποτελέσματα σε kg CO<sub>2</sub>eq ανά kg ή ανά m<sup>3</sup> προϊόντος. Στην παρούσα εργασία, όμως, το υλικό αυτό πρέπει να αντιστοιχιστεί στην πραγματική επιφάνεια θερμομόνωσης, στο πάχος εφαρμογής, στην πυκνότητα και στη θέση του στο κέλυφος. Αντίστοιχα, ένα κούφωμα δεν πρέπει να αξιολογείται μόνο ως επιφάνεια υαλοστασίου, αλλά ως σύνθετο στοιχείο που περιλαμβάνει πλαίσιο, υαλοπίνακα, εξαρτήματα, θερμοδιακοπή και διάρκεια ζωής. Επομένως, η αξιολόγηση απαιτεί τεχνική αντιστοίχιση και όχι απλή εισαγωγή ενός αριθμητικού συντελεστή.

Η οριοθέτηση του συστήματος αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα σημεία της μεθοδολογίας. Τα όρια συστήματος καθορίζουν ποια υλικά, εργασίες, μεταφορές, ενεργειακές καταναλώσεις, αντικαταστάσεις και διαδικασίες τέλους ζωής περιλαμβάνονται στον υπολογισμό. Στα κτίρια, τα στάδια κύκλου ζωής οργανώνονται συνήθως σε ενότητες A, B, C και D. Οι ενότητες A1 έως A3 αφορούν την παραγωγή των υλικών, οι A4 και A5 τη μεταφορά στο εργοτάξιο και την κατασκευή, οι B1 έως B7 τη χρήση, τη συντήρηση, την επισκευή, την αντικατάσταση, την ανακαίνιση, τη λειτουργική ενέργεια και το λειτουργικό νερό, ενώ οι C1 έως C4 αφορούν την αποδόμηση, τη

μεταφορά αποβλήτων, την επεξεργασία και την τελική διάθεση. Η ενότητα D παρουσιάζει δυνητικά οφέλη ή φορτία πέραν των ορίων του συστήματος, όπως ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση ή ανάκτηση ενέργειας.

Στην παρούσα εργασία, επειδή η μεθοδολογία εφαρμόζεται με επιμετρήσεις και Excel, τα όρια συστήματος πρέπει να δηλωθούν με ιδιαίτερη σαφήνεια. Μια πρακτική και μεθοδολογικά ασφαλής προσέγγιση είναι να υπολογιστούν οι ενσωματωμένες επιπτώσεις των βασικών υλικών των παρεμβάσεων, κυρίως για τα στάδια παραγωγής A1–A3, και να συνδυαστούν με την εκτιμώμενη μείωση λειτουργικών εκπομπών κατά την περίοδο αναφοράς. Εφόσον υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα, μπορούν να προστεθούν ενδεικτικά και στάδια μεταφοράς ή τέλους ζωής. Ωστόσο, πρέπει να αποφεύγεται η σύγκριση δεδομένων διαφορετικής έκτασης χωρίς επεξήγηση. Ένας συντελεστής A1–A3 δεν πρέπει να συγκρίνεται απευθείας με έναν συντελεστή A1–C4 χωρίς να αναφέρεται η διαφορά στα όρια.

Η μονάδα αναφοράς αποτελεί δεύτερο βασικό στοιχείο της αξιολόγησης. Σε επίπεδο προϊόντος χρησιμοποιείται συνήθως δηλωμένη μονάδα, όπως 1 kg, 1 m<sup>2</sup> ή 1 m<sup>3</sup> υλικού. Σε επίπεδο κτιρίου, όμως, απαιτείται μονάδα που να συνδέει τα αποτελέσματα με τη λειτουργία και το μέγεθος του κτιρίου. Στο ευρωπαϊκό πλαίσιο Level(s), ο δείκτης 1.2 για το life-cycle GWP εκφράζεται σε kg CO<sub>2</sub>eq ανά m<sup>2</sup> ωφέλιμης εσωτερικής επιφάνειας για περίοδο αναφοράς 50 ετών. Η επιλογή αυτή επιτρέπει τη συγκρισιμότητα μεταξύ κτιρίων και σεναρίων, υπό την προϋπόθεση ότι η ωφέλιμη επιφάνεια, η περίοδος αναφοράς και τα όρια συστήματος είναι κοινά και σαφώς δηλωμένα.

Για τη συγκεκριμένη διπλωματική, προτείνεται ως βασική μονάδα αναφοράς η ωφέλιμη επιφάνεια του κτιρίου σε m<sup>2</sup> και ως περίοδος αξιολόγησης τα 50 έτη. Παράλληλα, για τις επιμέρους παρεμβάσεις θα χρησιμοποιούνται μονάδες εφαρμογής, όπως €/m<sup>2</sup> θερμομόνωσης, kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> θερμομόνωσης, €/m<sup>2</sup> κουφώματος, kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> κουφώματος, €/m<sup>2</sup> σκίασης και kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> σκίασης. Έτσι, τα αποτελέσματα θα μπορούν να παρουσιαστούν σε δύο επίπεδα: αφενός ανά παρέμβαση, για να φαίνεται η τεχνικοοικονομική επίδραση κάθε λύσης, και αφετέρου ανά συνολικό σενάριο, για να προκύπτει η συνολική αξιολόγηση του κτιρίου.

Η λειτουργική ισοδυναμία είναι απαραίτητη για την ορθή σύγκριση σεναρίων. Δύο σενάρια δεν είναι συγκρίσιμα μόνο επειδή εφαρμόζονται στο ίδιο κτίριο. Πρέπει να

αξιολογούνται με την ίδια περίοδο αναφοράς, την ίδια ωφέλιμη επιφάνεια, τις ίδιες βασικές συνθήκες χρήσης και κοινά όρια συστήματος. Για παράδειγμα, ένα σενάριο θερμομόνωσης, ένα σενάριο αντικατάστασης κουφωμάτων και ένα σενάριο σκίασης μπορούν να συγκριθούν μόνο εφόσον η εξοικονόμηση ενέργειας, το κόστος και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα υπολογίζονται με την ίδια λογική. Διαφορετικά, η σύγκριση μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά συμπεράσματα.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η σχέση μεταξύ βιοκλιματικών παρεμβάσεων και κύκλου ζωής. Οι παρεμβάσεις βιοκλιματικού σχεδιασμού έχουν στόχο τη μείωση της λειτουργικής ζήτησης ενέργειας, ιδίως για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό. Ωστόσο, κάθε παρέμβαση απαιτεί υλικά και εργασίες. Η θερμομόνωση έχει ενσωματωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα λόγω παραγωγής του μονωτικού υλικού και των συνοδευτικών στρώσεων. Η αντικατάσταση κουφωμάτων περιλαμβάνει αλουμίνιο, υαλοπίνακες, εξαρτήματα και εργασίες εγκατάστασης. Τα σκίαστρα μειώνουν τα θερινά ηλιακά κέρδη, αλλά έχουν επίσης κόστος και ενσωματωμένες επιπτώσεις. Συνεπώς, η αξιολόγηση πρέπει να εξετάζει αν η μείωση λειτουργικών εκπομπών κατά τη διάρκεια ζωής της παρέμβασης αντισταθμίζει την αρχική περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Το σημείο αυτό είναι κρίσιμο για τη λογική των σεναρίων. Η εργασία δεν πρέπει να καταλήγει απλώς στο ποια παρέμβαση εξοικονομεί περισσότερη ενέργεια, αλλά στο ποια παρέμβαση παρουσιάζει την καλύτερη συνολική σχέση μεταξύ κόστους, εξοικονόμησης και περιβαλλοντικού αποτελέσματος. Ένα ακριβό σενάριο μπορεί να έχει μεγάλη ενεργειακή εξοικονόμηση αλλά μεγάλο χρόνο απόσβεσης. Ένα σενάριο με χαμηλό κόστος μπορεί να έχει μικρότερη εξοικονόμηση αλλά καλύτερη σχέση κόστους-οφέλους. Ένα σενάριο με υψηλό ενσωματωμένο αποτύπωμα μπορεί να απαιτεί αρκετά χρόνια λειτουργικής εξοικονόμησης μέχρι να εμφανίσει καθαρό περιβαλλοντικό όφελος. Αυτές οι σχέσεις πρέπει να αποτυπωθούν σε δείκτες που μπορούν να υπολογιστούν στο Excel.

Για την περιβαλλοντική αποτίμηση προϊόντων, το EN 15941:2024 είναι ιδιαίτερα σημαντικό, επειδή αφορά την αξιολόγηση και επιλογή δεδομένων για EPD σύμφωνα με το EN 15804 και για την περιβαλλοντική αξιολόγηση κτιρίων σύμφωνα με το EN 15978. Το πρότυπο υποστηρίζει τη συνεπή επιλογή δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η γεωγραφική, χρονική και τεχνολογική αντιπροσωπευτικότητα. Στην παρούσα εργασία, αυτό σημαίνει ότι οι περιβαλλοντικοί συντελεστές που θα εισαχθούν

στο Excel πρέπει να συνοδεύονται από σαφή πηγή, μονάδα μέτρησης, στάδια κύκλου ζωής που καλύπτουν και σχόλιο για την καταλληλότητά τους.

Η ποιότητα δεδομένων είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν χρησιμοποιούνται βιβλιογραφικοί ή γενικοί συντελεστές αντί για EPD συγκεκριμένων προϊόντων. Για παράδειγμα, ένας γενικός συντελεστής για αλουμίνιο μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το ποσοστό ανακυκλωμένου περιεχομένου και το ενεργειακό μείγμα παραγωγής. Αντίστοιχα, ένας συντελεστής για θερμομονωτικό υλικό μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την πυκνότητα, το πάχος, την τεχνολογία παραγωγής και τη διάρκεια ζωής. Για τον λόγο αυτό, το Excel πρέπει να περιλαμβάνει πεδίο πηγής και παρατηρήσεων για κάθε συντελεστή, ώστε να είναι σαφές αν πρόκειται για ειδική EPD, μέση EPD, γενική βάση δεδομένων ή βιβλιογραφική τιμή.

Η χρήση δεδομένων EPD σε ψηφιακά περιβάλλοντα συνδέεται με το EN ISO 22057:2022. Το πρότυπο δίνει απαιτήσεις για τη δόμηση πληροφοριών EPD μέσω προτύπων δεδομένων, ώστε οι πληροφορίες αυτές να είναι μηχανικά ερμηνεύσιμες και να μπορούν να ενσωματώνονται σε διαδικασίες σχεδιασμού, κατασκευής, χρήσης και τέλους ζωής. Παρότι η παρούσα εργασία δεν θα βασιστεί αποκλειστικά σε BIM, η λογική του EN ISO 22057 είναι χρήσιμη: τα περιβαλλοντικά δεδομένα πρέπει να έχουν σταθερή δομή, σαφή μονάδα, τεχνική περιγραφή και δυνατότητα αντιστοίχισης με πραγματικές ποσότητες. Το ίδιο ακριβώς μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα καλά οργανωμένο αρχείο Excel.

Το ISO 14067:2018 μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί ως συμπληρωματικό πρότυπο, επειδή αφορά την ποσοτικοποίηση και αναφορά του ανθρακικού αποτυπώματος προϊόντων, σε συμφωνία με τη λογική των ISO 14040 και ISO 14044. Στο πλαίσιο της εργασίας, η λογική του ISO 14067 είναι χρήσιμη κυρίως για την κατανόηση των συντελεστών  $\text{kg CO}_2\text{eq}$  που θα χρησιμοποιηθούν στα υλικά και στις παρεμβάσεις. Ωστόσο, για την αποτίμηση σε επίπεδο συνολικού κτιρίου, το EN 15978 και το Level(s) παραμένουν καταλληλότερα, επειδή οργανώνουν την αξιολόγηση με βάση τη λειτουργία, την περίοδο αναφοράς και τα στάδια κύκλου ζωής του κτιρίου.

Η εφαρμογή των παραπάνω αρχών στο Excel πρέπει να γίνει με συγκεκριμένη δομή. Για κάθε υλικό ή παρέμβαση πρέπει να καταγράφονται η περιγραφή, η μονάδα μέτρησης, η ποσότητα, η τιμή μονάδας, το κόστος υλικού, το κόστος εργασίας, ο περιβαλλοντικός συντελεστής, τα στάδια κύκλου ζωής που καλύπτει ο συντελεστής και η

πηγή του. Για κάθε σενάριο πρέπει να υπολογίζονται το συνολικό κόστος, το πρόσθετο ενσωματωμένο GWP, η εκτιμώμενη ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας, η ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών και το συνολικό περιβαλλοντικό όφελος σε περίοδο αναφοράς. Με αυτόν τον τρόπο, το Excel θα λειτουργεί ως διαφανές υπολογιστικό μοντέλο και όχι ως απλός πίνακας τιμών.

Οι βασικοί δείκτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση των σεναρίων είναι το συνολικό κόστος παρέμβασης, το κόστος ανά m<sup>2</sup> εφαρμογής, η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας, η ετήσια εξοικονόμηση κόστους, το ενσωματωμένο GWP της παρέμβασης, η μείωση λειτουργικών εκπομπών, η καθαρή μείωση εκπομπών σε περίοδο 50 ετών, η απλή οικονομική περίοδος αποπληρωμής και ο χρόνος περιβαλλοντικής απόσβεσης. Ο τελευταίος δείκτης είναι ιδιαίτερα χρήσιμος, επειδή δείχνει πόσα έτη απαιτούνται ώστε η μείωση των λειτουργικών εκπομπών να αντισταθμίσει τις ενσωματωμένες εκπομπές της παρέμβασης.

Η ανάλυση ευαισθησίας είναι επίσης απαραίτητη, ακόμη και σε απλοποιημένη μορφή. Τα αποτελέσματα μπορούν να μεταβληθούν αν αλλάξει η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, ο συντελεστής εκπομπών του ενεργειακού μείγματος, το κόστος υλικών, η διάρκεια ζωής των παρεμβάσεων ή ο περιβαλλοντικός συντελεστής ενός βασικού υλικού. Για τον λόγο αυτό, είναι σκόπιμο να εξεταστούν τουλάχιστον δύο ή τρεις κρίσιμες μεταβλητές, ώστε να φανεί αν η κατάταξη των σεναρίων παραμένει σταθερή ή αλλάζει. Με αυτόν τον τρόπο ενισχύεται η αξιοπιστία της συγκριτικής αξιολόγησης και αποφεύγεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων ως απόλυτων τιμών χωρίς αβεβαιότητα.

Για την εξάωρο πολυκατοικία στην Αθήνα, η τεχνική οριοθέτηση της ανάλυσης μπορεί να επικεντρωθεί στα στοιχεία που επηρεάζουν περισσότερο τη βιοκλιματική και ενεργειακή συμπεριφορά: εξωτερικοί τοίχοι, δώμα, δάπεδα σε επαφή με εξωτερικό περιβάλλον ή μη θερμαινόμενους χώρους, κουφώματα, υαλοπίνακες, σκίαση, θερμομόνωση και πιθανές επεμβάσεις φυσικού αερισμού. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να επιμετρηθούν από τις κατόψεις και τις όψεις, να οργανωθούν σε πίνακες και να συνδεθούν με αντίστοιχες τιμές κόστους και περιβαλλοντικούς δείκτες. Έτσι, η μεθοδολογία παραμένει πρακτική, ελεγχόμενη και εφαρμόσιμη.

Συμπερασματικά, τα πρότυπα και οι τεχνικοί κανόνες για την αποτίμηση κύκλου ζωής παρέχουν το απαραίτητο πλαίσιο για να μετατραπούν οι βιοκλιματικές και

ενεργειακές παρεμβάσεις σε μετρήσιμα και συγκρίσιμα μεγέθη. Τα ISO 14040 και ISO 14044 θεμελιώνουν τη γενική μεθοδολογία LCA, το EN 15978 οργανώνει την αξιολόγηση σε επίπεδο κτιρίου, το EN 15804 παρέχει τη βάση για τα δεδομένα προϊόντων και τις EPD, το EN 15941 καθοδηγεί την επιλογή και αξιολόγηση της ποιότητας δεδομένων, το EN ISO 22057 υποστηρίζει τη δομημένη χρήση περιβαλλοντικών δεδομένων και το ISO 14067 εξειδικεύει το ανθρακικό αποτύπωμα προϊόντων. Με την αξιοποίηση αυτών των αρχών, η παρούσα εργασία μπορεί να εφαρμόσει ένα διαφανές υπολογιστικό μοντέλο Excel για τη σύγκριση σεναρίων βιοκλιματικής βελτίωσης, συνδέοντας τις επιμετρήσεις, το κόστος, την ενεργειακή εξοικονόμηση και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

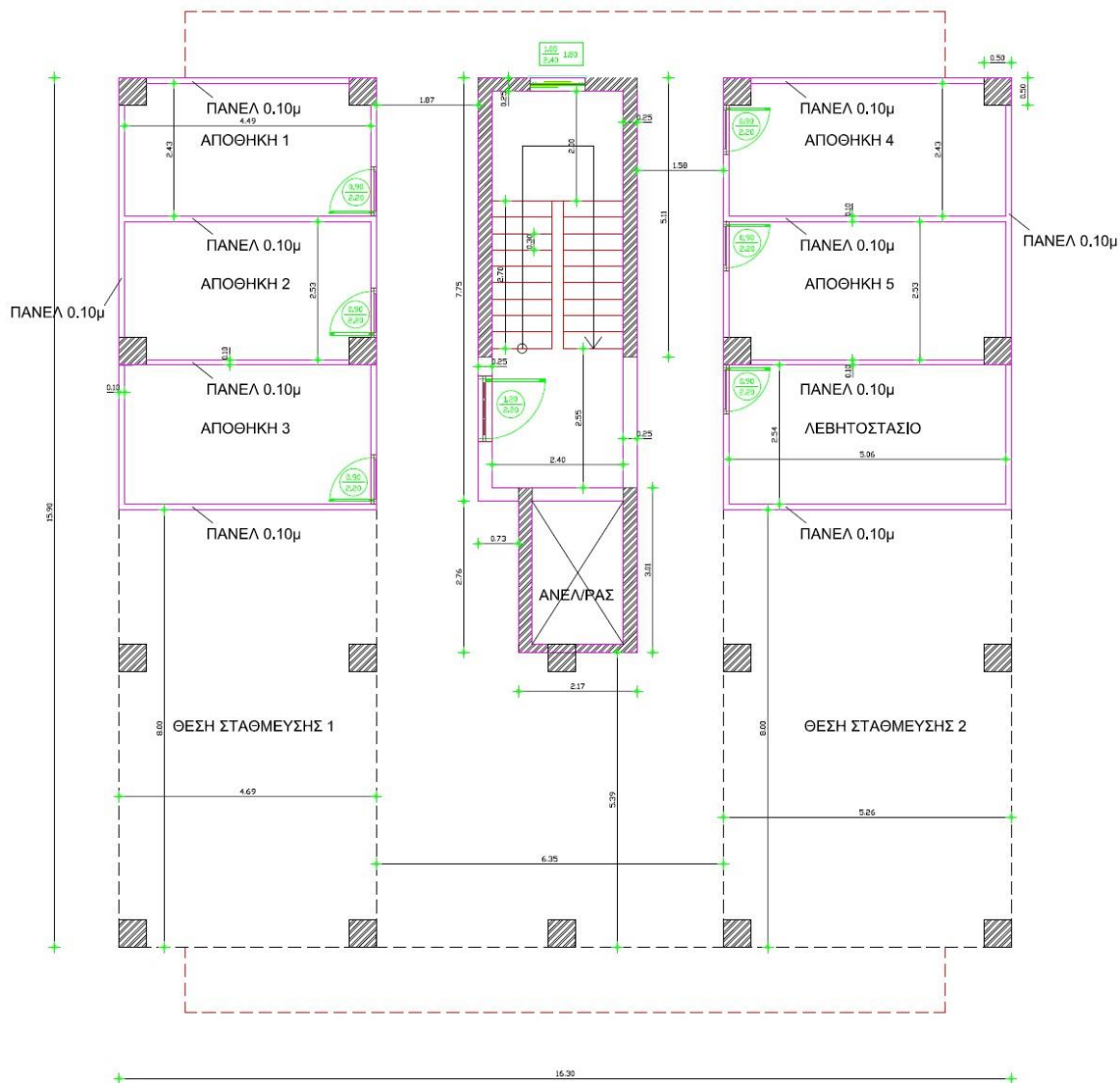
## **4. Αποτελέσματα**

### **4.1 Αρχιτεκτονική αποτύπωση και CAD σχεδίαση**

Η μεθοδολογία της παρούσας εργασίας ξεκινά από την αρχιτεκτονική αποτύπωση και την οργάνωση της γεωμετρίας του κτιρίου μελέτης σε περιβάλλον CAD. Η διαδικασία αυτή αποτελεί το πρώτο και αναγκαίο στάδιο της ανάλυσης, καθώς από την ορθότητα των σχεδίων και των γεωμετρικών δεδομένων εξαρτώνται όλες οι επόμενες επιμετρήσεις, οι υπολογισμοί ποσοτήτων, η κοστολόγηση των παρεμβάσεων και η αποτίμηση του ενεργειακού και περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Το κτίριο εξετάζεται ως υφιστάμενη εξάωροφη πολυκατοικία, με ισόγειο και πέντε υπερκείμενους τυπικούς ορόφους κατοικιών, ενώ στο δώμα υπάρχει μόνο η απόληξη του κλιμακοστασίου. Η αρχιτεκτονική αποτύπωση βασίστηκε στις κατόψεις ισόγειου, τυπικού ορόφου και δώματος, καθώς και στον ξυλότυπο, στον οποίο αποτυπώνονται τα βασικά φέροντα στοιχεία του κτιρίου, δηλαδή τα υποστυλώματα, τα τοιχεία και οι δοκοί.

Η χρήση CAD επιτρέπει τη συστηματική ανάγνωση της γεωμετρίας και τη μετατροπή των σχεδιαστικών δεδομένων σε επιμετρήσιμα μεγέθη. Στο πλαίσιο της εργασίας, τα σχέδια αξιοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των συνολικών διαστάσεων του κτιρίου, των επιφανειών ανά στάθμη, των περιμετρικών όψεων, των ανοιγμάτων, των προβόλων, των εσωτερικών διαρρυθμίσεων, των κοινόχρηστων χώρων και των στοιχείων του φέροντος οργανισμού. Η ανάλυση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι η εργασία δεν περιορίζεται στην περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης, αλλά επιδιώκει να

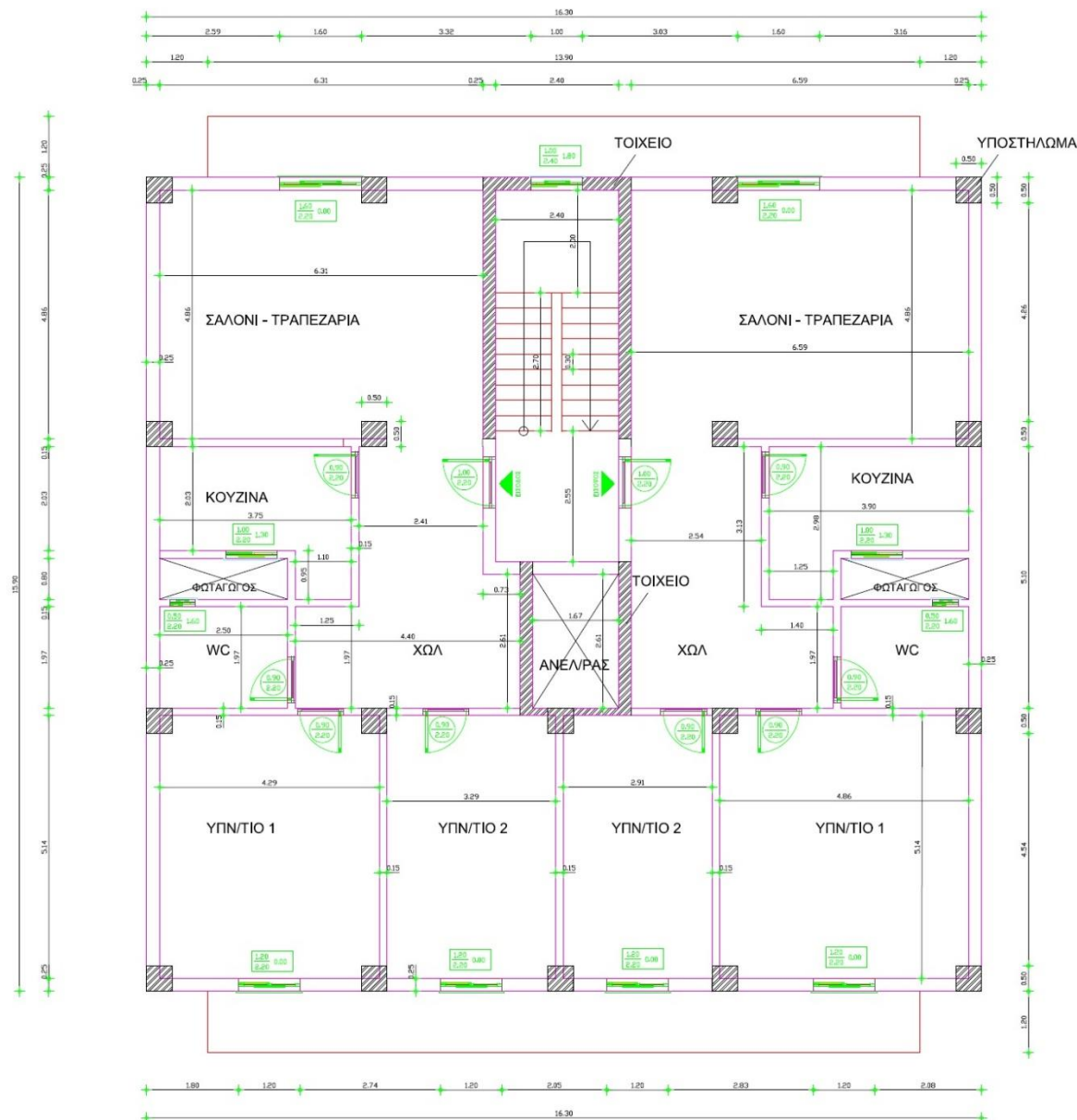
συνδέσει τη γεωμετρία του κτιρίου με συγκεκριμένα σενάρια βιοκλιματικής και ενεργειακής βελτίωσης.



**Σχήμα 4.0.1 Κάτοψη ισογείου του κτιρίου μελέτης.**

Το ισόγειο οργανώνεται με κύριες χρήσεις βοηθητικού χαρακτήρα. Περιλαμβάνει αποθήκες, ανοικτές θέσεις στάθμευσης, λεβητοστάσιο, κλιμακοστάσιο και ανελκυστήρα. Οι τοίχοι των αποθηκών και του λεβητοστασίου λαμβάνονται ως τοιχώματα από πάνελ, σύμφωνα με την περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική για τις επόμενες επιμετρήσεις, επειδή τα πάνελ έχουν διαφορετική κατασκευαστική, θερμική και περιβαλλοντική συμπεριφορά από τις μπατικές ή δρομικές

τοιχοποιίες. Στο ισόγειο αποτυπώνονται επίσης οι θέσεις των υποστυλωμάτων και των τοιχείων, τα οποία συνδέονται με τη συνολική επιμέτρηση του φέροντος οργανισμού.

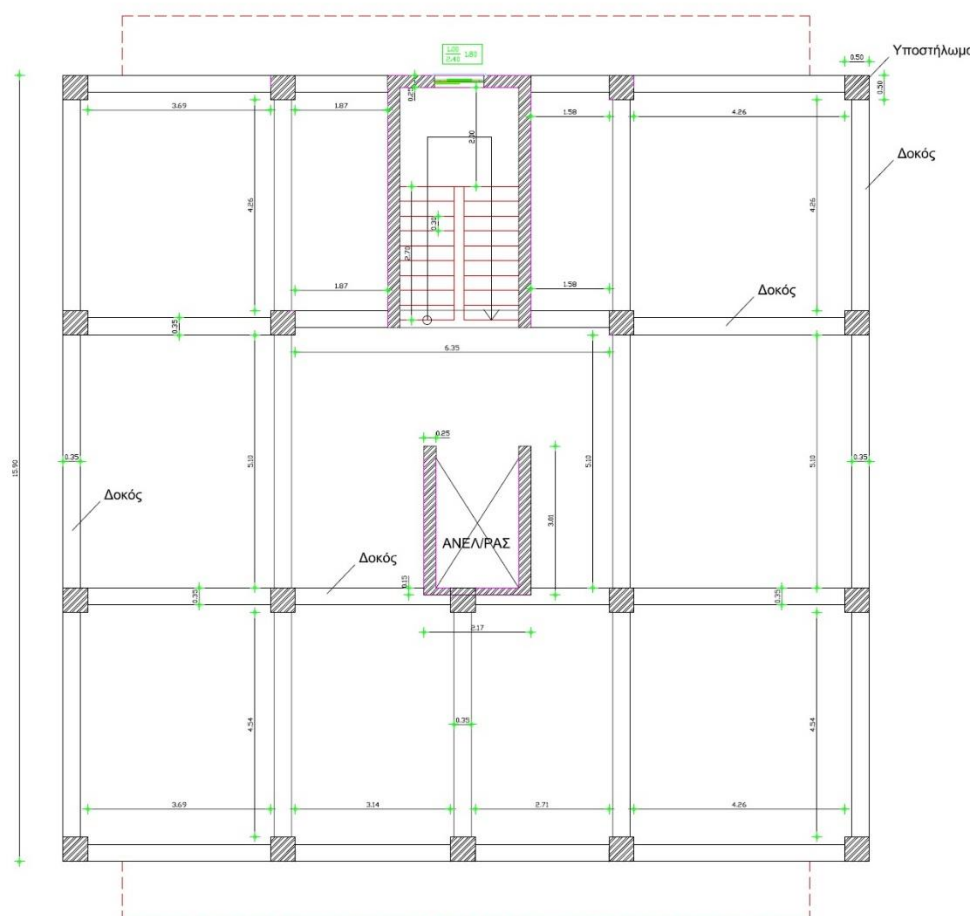


**Σχήμα 4.0.2 Κάτοψη τυπικού ορόφου Α, Β, Γ, Δ και Ε.**

Οι υπερκείμενοι όροφοι Α, Β, Γ, Δ και Ε έχουν τυπική επανάληψη. Κάθε όροφος περιλαμβάνει δύο διαμερίσματα, κοινόχρηστο χώρο πρόσβασης, ανελκυστήρα και κλιμακοστάσιο. Η επαναληψιμότητα της κάτοψης επιτρέπει την αξιόπιστη οργάνωση των επιμετρήσεων, καθώς οι ποσότητες ενός τυπικού ορόφου μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά και στη συνέχεια να πολλαπλασιαστούν για το σύνολο των πέντε ορόφων κατοικιών. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται ο κίνδυνος διπλομετρήσεων και

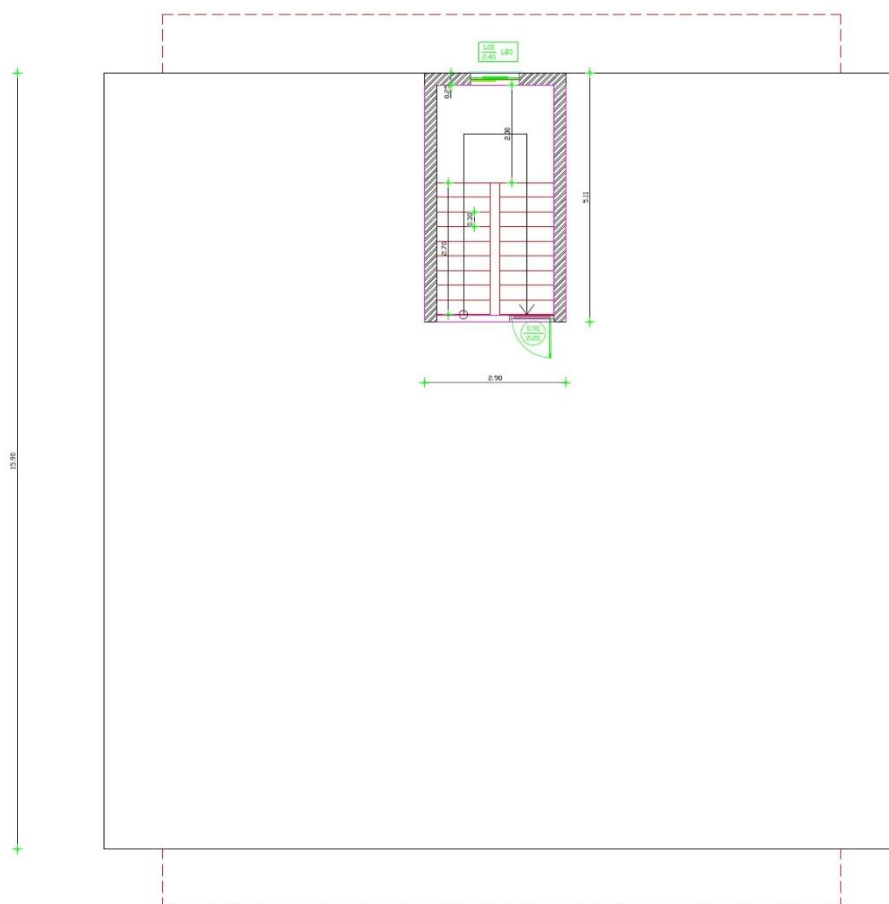
εξασφαλίζεται ενιαία βάση υπολογισμού για επιφάνειες δαπέδων, εσωτερικών τοίχων, εξωτερικών τοιχοποιιών, κουφωμάτων, προβόλων και τελειωμάτων.

Το κτίριο έχει νότιο προσανατολισμό στην κύρια πρόσοψη, η οποία αντιστοιχεί στην κάτω πλευρά του σχεδίου. Δεξιά και αριστερά υπάρχουν όμορες ιδιοκτησίες, ενώ στη βόρεια πλευρά, δηλαδή στην άνω πλευρά του σχεδίου, η όμορη ιδιοκτησία απέχει περίπου 10 m. Η πληροφορία αυτή είναι ουσιαστική για την ερμηνεία των βιοκλιματικών δυνατοτήτων του κτιρίου. Η νότια πρόσοψη μπορεί να δεχθεί σημαντικά ηλιακά κέρδη, τα οποία είναι ευνοϊκά κατά τη χειμερινή περίοδο, αλλά πρέπει να ελέγχονται κατά τη θερινή περίοδο. Αντίθετα, οι πλευρικές όψεις επηρεάζονται από τις όμορες ιδιοκτησίες και επομένως έχουν περιορισμένη δυνατότητα αξιοποίησης ως πλήρως ελεύθερες θερμικές και φωτιστικές επιφάνειες. Η βόρεια πλευρά, λόγω της απόστασης από την όμορη ιδιοκτησία, εξετάζεται ως εκτεθειμένη όψη με διαφορετική ενεργειακή συμπεριφορά από τις πλευρικές μεσοτοιχίες.



Σχήμα 4.0.3 Ξυλότυπος τυπικού επιπέδου.

Ο ξυλότυπος χρησιμοποιείται για τη γεωμετρική αναγνώριση και επιμέτρηση του φέροντος οργανισμού. Τα υποστυλώματα λαμβάνονται με τυπική διατομή  $0,50 \times 0,50$  m, ενώ οι δοκοί λαμβάνονται με διατομή  $0,35 \times 0,60$  m. Το πάχος των πλακών λαμβάνεται ίσο με  $0,18$  m. Η σαφής αποτύπωση των στοιχείων αυτών είναι απαραίτητη, επειδή το σκυρόδεμα και ο χάλυβας οπλισμού αποτελούν υλικά με σημαντική συμμετοχή στο ενσωματωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα του κτιρίου. Παρότι στην παρούσα φάση η έμφαση δίνεται στις επιμετρήσεις σκυροδέματος, η γεωμετρική καταγραφή του φέροντος οργανισμού δημιουργεί τη βάση για τη μελλοντική εισαγωγή συντελεστών περιβαλλοντικού αποτυπώματος και κόστους.



**Σχήμα 4.0.4 Κάτοψη δώματος.**

Στο δώμα δεν υπάρχουν κύριοι χώροι κατοικίας, αλλά μόνο η απόληξη του κλιμακοστασίου. Η επιφάνεια του δώματος αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για τη μεθοδολογία της εργασίας, διότι μπορεί να συνδεθεί με σενάρια θερμομονωτικής αναβάθμισης, στεγάνωσης, εφαρμογής ψυχρών υλικών, ενδεχόμενης φύτευσης ή εγκατάστασης ηλιακών

συστημάτων. Ειδικά σε κτίρια της εξεταζόμενης περιόδου κατασκευής, το δώμα συχνά αποτελεί σημαντική επιφάνεια θερμικών απωλειών τον χειμώνα και θερμικών κερδών το καλοκαίρι. Για τον λόγο αυτό, η ακριβής επιμέτρησή του είναι απαραίτητη για τη διαμόρφωση σεναρίων ενεργειακής και βιοκλιματικής βελτίωσης.

Η αρχιτεκτονική και κατασκευαστική τεκμηρίωση συμπληρώνεται από τις βασικές πληροφορίες της υφιστάμενης κατάστασης. Το κτίριο είναι κατασκευής του 1987, γεγονός που επηρεάζει τις παραδοχές για τα υλικά, τις τεχνικές εγκαταστάσεις και την ενεργειακή συμπεριφορά του. Οι εξωτερικοί τοίχοι είναι μπατικοί, πάχους 0,25 m, με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία, σύμφωνα με τις συνήθεις πρακτικές της εποχής. Οι εσωτερικοί τοίχοι είναι δρομικοί, πάχους 0,15 m. Το καθαρό ύψος από πλάκα σε πλάκα λαμβάνεται ίσο με 3,00 m, στοιχείο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό επιφανειών τοιχοποιίας, όγκου εσωτερικών χώρων και επιφανειών τελειωμάτων.

Τα δάπεδα είναι επιστρωμένα με παλαιά κεραμικά πλακίδια, ενώ τα εσωτερικά κουφώματα είναι ξύλινα χωρίς υαλοπίνακες. Τα εξωτερικά κουφώματα είναι παλαιά συρόμενα αλουμινίου με μονό υαλοπίνακα και πλαστικά ρολά. Για τις ανάγκες της επιμετρητικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης λαμβάνεται ότι το αλουμίνιο αντιστοιχεί στο 10% της επιφάνειας του εξωτερικού κουφώματος, ενώ το υπόλοιπο 90% αντιστοιχεί σε υαλοπίνακα. Η παραδοχή αυτή είναι αναγκαία, ώστε στα επόμενα στάδια να μπορεί να γίνει διάκριση μεταξύ υλικών με διαφορετικό κόστος και διαφορετικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η απουσία τεντών ή άλλων εξωτερικών συστημάτων σκίασης καταγράφεται επίσης, διότι επηρεάζει τα σενάρια βιοκλιματικής αναβάθμισης.

Οι πρόβολοι φέρουν απλά σιδερένια κιγκλιδώματα, ύψους 1,10 m, χωρίς διακοσμητικά στοιχεία. Κιγκλίδωμα υπάρχει και στην εσωτερική πλευρά της σκάλας του κλιμακοστασίου, ενώ η σκάλα είναι επενδεδυμένη με λευκό μάρμαρο. Τα στοιχεία αυτά καταγράφονται για την πληρότητα της επιμέτρησης και για τη μελλοντική δυνατότητα κοστολόγησης ή αποτίμησης πιθανών παρεμβάσεων συντήρησης και αναβάθμισης. Αν και τα κιγκλιδώματα και οι μαρμάρινες επενδύσεις δεν αποτελούν τον κύριο παράγοντα ενεργειακής συμπεριφοράς, συμβάλλουν στην αποτύπωση της υφιστάμενης κατασκευαστικής κατάστασης.

Ιδιαίτερη σημασία έχει και η καταγραφή των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων. Όλες οι βασικές εγκαταστάσεις, δηλαδή υδραυλικά, ηλεκτρολογικά,

αποχέτευση και κεντρική θέρμανση, θεωρούνται αρχικής κατασκευής, δηλαδή του 1987. Η θέρμανση γίνεται με κεντρικό σύστημα και σε κάθε διαμέρισμα υπάρχουν επτά σώματα καλοριφέρ, μήκους 1,20 m. Δεδομένου ότι υπάρχουν δύο διαμερίσματα ανά όροφο και πέντε όροφοι κατοικιών, το σύνολο των διαμερισμάτων ανέρχεται σε δέκα και το σύνολο των σωμάτων καλοριφέρ σε εβδομήντα. Για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης δεν υπάρχουν ηλιακοί θερμοσίφωνες. Κάθε διαμέρισμα διαθέτει έναν ηλεκτρικό θερμοσίφωνα 120 L. Τα στοιχεία αυτά είναι απαραίτητα για τη διαμόρφωση σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης, ιδίως σε σχέση με τη θέρμανση, το ζεστό νερό χρήσης και τη δυνατότητα ένταξης ηλιακών ή άλλων αποδοτικότερων συστημάτων.

Η αποτύπωση σε CAD δεν αντιμετωπίζεται ως απλή σχεδιαστική απεικόνιση, αλλά ως εργαλείο παραγωγής μετρήσιμων δεδομένων. Από τα σχέδια προκύπτουν οι βασικές γεωμετρικές ποσότητες που θα χρησιμοποιηθούν στο υπολογιστικό αρχείο επιμετρήσεων. Οι ποσότητες αυτές περιλαμβάνουν επιφάνειες πλακών, δαπέδων, δωματίων, εξωτερικών τοίχων, εσωτερικών χωρισμάτων, κουφωμάτων, προβόλων, πάνελ ισογείου, σκάλας, κιγκλιδωμάτων και φέροντος οργανισμού. Οι επιμέρους τιμές οργανώνονται ανά στάθμη και ανά κατηγορία δομικού στοιχείου, ώστε να μπορούν στη συνέχεια να εισαχθούν σε συγκεντρωτικό φύλλο ποσοτήτων.

Η διαδικασία αυτή υποστηρίζει την επόμενη φάση της εργασίας, όπου οι επιμετρήσεις θα χρησιμοποιηθούν για τη διαμόρφωση σεναρίων βελτίωσης. Ενδεικτικά, οι επιφάνειες εξωτερικών τοίχων θα συνδεθούν με σενάρια εξωτερικής θερμομόνωσης, οι επιφάνειες δωματίων με σενάρια θερμομόνωσης και στεγάνωσης, τα εξωτερικά κουφώματα με σενάρια αντικατάστασης υαλοστασίων και πλαισίων, ενώ οι νότιες όψεις και οι πρόβολοι με σενάρια ηλιακής προστασίας. Με αυτόν τον τρόπο, η CAD αποτύπωση δεν αποτελεί αυτοτελές στάδιο, αλλά τη βάση πάνω στην οποία αναπτύσσεται η τεχνικοοικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση.

Συνολικά, η αρχιτεκτονική αποτύπωση και η CAD σχεδίαση εξασφαλίζουν ότι η ανάλυση της εργασίας στηρίζεται σε πραγματική γεωμετρία και όχι σε γενικές ή αφηρημένες παραδοχές. Η οργάνωση του κτιρίου σε ισόγειο, τυπικούς ορόφους και δώμα, η καταγραφή του φέροντος οργανισμού και η αναγνώριση των υλικών της υφιστάμενης κατάστασης επιτρέπουν την αξιόπιστη παραγωγή επιμετρήσεων. Οι επιμετρήσεις αυτές αποτελούν το υπόβαθρο για τους υπολογισμούς κόστους, ενεργειακής εξοικονόμησης και περιβαλλοντικού αποτυπώματος που θα αναπτυχθούν στα επόμενα υποκεφάλαια.

## 4.2 Επιμετρητική ανάλυση γεωμετρικών και δομικών στοιχείων

Η επιμετρητική ανάλυση αποτελεί το δεύτερο βασικό στάδιο της μεθοδολογίας και έχει ως σκοπό τη μετατροπή της αρχιτεκτονικής και στατικής πληροφορίας των σχεδίων σε ποσοτικά μεγέθη. Τα μεγέθη αυτά χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό των υλικών, της επιφάνειας εφαρμογής των παρεμβάσεων, του κόστους, της ενεργειακής επίδρασης και του ενσωματωμένου περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Η διαδικασία βασίστηκε στην κάτοψη ισογείου, στην κάτοψη τυπικού ορόφου, στον ξυλότυπο και στην κάτοψη δώματος, από τα οποία αντλήθηκαν οι διαστάσεις, οι επιφάνειες, τα μήκη και οι βασικές γεωμετρικές σχέσεις του κτιρίου.

Η επιμέτρηση οργανώθηκε ανά στάθμη και ανά κατηγορία δομικού στοιχείου, ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύνδεση των ποσοτήτων με τα επόμενα στάδια της ανάλυσης. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, διότι κάθε κατηγορία στοιχείου συνδέεται με διαφορετικό είδος παρέμβασης, διαφορετικό κόστος και διαφορετικό περιβαλλοντικό συντελεστή. Για παράδειγμα, οι εξωτερικοί τοίχοι συνδέονται κυρίως με σενάρια θερμομόνωσης, τα κουφώματα με σενάρια αντικατάστασης ή αναβάθμισης υαλοστασίων, το δώμα με σενάρια θερμομονωτικής και στεγανωτικής αναβάθμισης, ενώ ο φέρων οργανισμός με την αποτύπωση του ενσωματωμένου αποτυπώματος της υφιστάμενης κατασκευής.

Η συνολική γεωμετρία του κτιρίου προκύπτει από την ορθογωνική κάτοψη με κύριες διαστάσεις περίπου  $15,90 \text{ m} \times 16,30 \text{ m}$ . Η μικτή επιφάνεια ανά στάθμη υπολογίζεται σε  $259,17 \text{ m}^2$ . Το κτίριο αποτελείται από ισόγειο και πέντε τυπικούς ορόφους κατοικιών, δηλαδή Α, Β, Γ, Δ και Ε όροφο. Με βάση αυτή τη διάρθρωση, η συνολική μικτή επιφάνεια του ισογείου και των πέντε υπερκείμενων ορόφων ανέρχεται σε  $1.555,02 \text{ m}^2$ . Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται ως βασικό γεωμετρικό μέγεθος αναφοράς για τις συνολικές επιμετρήσεις, χωρίς όμως να ταυτίζεται με την ωφέλιμη κατοικήσιμη επιφάνεια, καθώς περιλαμβάνει κοινόχρηστους χώρους, φέροντα στοιχεία και βοηθητικούς χώρους.

**Πίνακας 4.0.1 Βασικά γεωμετρικά μεγέθη κτιρίου μελέτης**

| Μέγεθος                                          | Τιμή                    |
|--------------------------------------------------|-------------------------|
| Κύρια διάσταση κτιρίου κατά τον άξονα Χ          | 15,90 m                 |
| Κύρια διάσταση κτιρίου κατά τον άξονα Υ          | 16,30 m                 |
| Μικτή επιφάνεια ανά στάθμη                       | 259,17 m <sup>2</sup>   |
| Αριθμός επιπέδων κύριου όγκου                    | 6                       |
| Συνολική μικτή επιφάνεια ισόγειου και Α–Ε ορόφων | 1.555,02 m <sup>2</sup> |
| Καθαρό ύψος από πλάκα σε πλάκα                   | 3,00 m                  |
| Πάχος πλάκας                                     | 0,18 m                  |

Η επιφάνεια του δώματος εξετάζεται χωριστά, επειδή αποτελεί ιδιαίτερα κρίσιμο στοιχείο για την ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου. Το κύριο δώμα αντιστοιχεί στην οριζόντια οροφή του Ε ορόφου, ενώ σε αυτό υπάρχει μόνο η απόληξη του κλιμακοστασίου. Η επιφάνεια του κύριου δώματος, αφαιρουμένης της απόληξης, υπολογίζεται σε 246,40 m<sup>2</sup>, ενώ η απόληξη του κλιμακοστασίου έχει επιφάνεια περίπου 12,78 m<sup>2</sup>. Οι επιφάνειες αυτές θα αξιοποιηθούν σε επόμενο στάδιο για σενάρια θερμομόνωσης δώματος, στεγάνωσης, εφαρμογής ψυχρών υλικών ή άλλων παρεμβάσεων που επηρεάζουν τα θερινά και χειμερινά φορτία.

Η επιμέτρηση των όψεων έγινε με βάση τον προσανατολισμό και τις συνθήκες γειτνίασης. Η κύρια πρόσοψη βρίσκεται στη νότια πλευρά του σχεδίου, ενώ η βόρεια πλευρά έχει ελεύθερη απόσταση περίπου 10 m από την όμορη ιδιοκτησία. Αντίθετα, η ανατολική και η δυτική πλευρά συνορεύουν με όμορες ιδιοκτησίες και δεν αντιμετωπίζονται ως πλήρως εκτεθειμένες όψεις. Για τον λόγο αυτό, οι θερμικά και βιοκλιματικά κρίσιμες εξωτερικές επιφάνειες αφορούν κυρίως τη νότια και τη βόρεια όψη. Η νότια όψη παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της ηλιακής πρόσπτωσης και της δυνατότητας εφαρμογής συστημάτων σκίασης, ενώ η βόρεια όψη συνδέεται κυρίως με θερμικές απώλειες και ανάγκες θερμομονωτικής προστασίας.

Οι εξωτερικοί τοίχοι των ορόφων κατοικίας λαμβάνονται ως μπατικοί τοίχοι πάχους 0,25 m, με ανεπαρκή θερμομόνωση, σύμφωνα με τις κατασκευαστικές πρακτικές της περιόδου ανέγερσης του κτιρίου. Οι εσωτερικοί διαχωριστικοί τοίχοι λαμβάνονται ως δρομικοί τοίχοι πάχους 0,15 m. Στο ισόγειο, οι τοίχοι των αποθηκών και του

λεβητοστασίου διαφοροποιούνται από την υπόλοιπη τοιχοποιία και λαμβάνονται ως πάνελ. Η διάκριση αυτή καταγράφεται στην επιμέτρηση, επειδή τα πάνελ έχουν διαφορετική υλική σύσταση, διαφορετικό τρόπο κοστολόγησης και διαφορετική περιβαλλοντική συμπεριφορά σε σχέση με τις συμβατικές τοιχοποιίες.

Ιδιαίτερη κατηγορία αποτελούν τα εξωτερικά κουφώματα. Τα κουφώματα είναι παλαιά συρόμενα αλουμινίου με μονό υαλοπίνακα και πλαστικά ρολά. Για τις ανάγκες της επιμετρητικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης, η συνολική επιφάνεια των εξωτερικών και κοινόχρηστων κουφωμάτων υπολογίζεται σε 117,38 m<sup>2</sup>. Η επιφάνεια αυτή διαχωρίζεται υλικά σε 10% αλουμίνιο και 90% υαλοπίνακα, ώστε να είναι δυνατή η σύνδεση με διαφορετικούς περιβαλλοντικούς και οικονομικούς συντελεστές. Η διάκριση αυτή θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στο σενάριο αντικατάστασης κουφωμάτων, όπου θα εξεταστούν πιθανές λύσεις με θερμοδιακοπτόμενα πλαίσια, διπλούς υαλοπίνακες ή υαλοπίνακες βελτιωμένων θερμοοπτικών χαρακτηριστικών.

**Πίνακας 4.0.2 Κύριες επιφάνειες κελύφους και ανοιγμάτων**

| Κατηγορία                                                 | Ποσότητα              |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------|
| Κύριο δώμα χωρίς απόληξη κλιμακοστασίου                   | 246,40 m <sup>2</sup> |
| Απόληξη κλιμακοστασίου                                    | 12,78 m <sup>2</sup>  |
| Καθαρή επιφάνεια εκτεθειμένων όψεων Βορρά και Νότου       | 383,10 m <sup>2</sup> |
| Συνολική επιφάνεια εξωτερικών και κοινόχρηστων κουφωμάτων | 117,38 m <sup>2</sup> |
| Εκτιμώμενη επιφάνεια αλουμινίου κουφωμάτων                | 11,74 m <sup>2</sup>  |
| Εκτιμώμενη επιφάνεια υαλοπινάκων                          | 105,64 m <sup>2</sup> |

Η επιμέτρηση του φέροντος οργανισμού βασίστηκε στον ξυλότυπο, στον οποίο αποτυπώνονται τα υποστυλώματα, τα τοιχεία, οι δοκοί, ο πυρήνας του κλιμακοστασίου και ο ανελκυστήρας. Τα υποστυλώματα λαμβάνονται με τυπική διατομή 0,50 m × 0,50 m, ενώ οι δοκοί με διατομή 0,35 m × 0,60 m. Το πάχος των πλακών λαμβάνεται ίσο με 0,18 m. Η επιμέτρηση του σκυροδέματος περιλαμβάνει πλάκες, δοκούς, υποστυλώματα, τοιχεία και στοιχεία πυρήνα. Με βάση τις γεωμετρικές παραδοχές και τα σχέδια, το σκυρόδεμα ανωδομής και ισογείου υπολογίζεται σε 718,74 m<sup>3</sup>.

Για τη θεμελίωση υιοθετείται τυπική τεχνική παραδοχή με κωνικά πέδιλα και συνδετήριους δοκούς. Η παραδοχή αυτή περιλαμβάνει κωνικά πέδιλα κάτω από τα υποστυλώματα, λαιμούς ή βάσεις υποστυλωμάτων, γραμμικά πέδιλα κάτω από τα τοιχεία

του πυρήνα, συνδετήριους δοκούς θεμελίωσης και σκυρόδεμα καθαριότητας. Το σύνολο του οπλισμένου σκυροδέματος θεμελίωσης υπολογίζεται σε 60,98 m<sup>3</sup>, ενώ το σκυρόδεμα καθαριότητας σε 14,58 m<sup>3</sup>. Συνεπώς, η συνολική ποσότητα θεμελίωσης μαζί με το σκυρόδεμα καθαριότητας ανέρχεται σε 75,57 m<sup>3</sup>. Το συνολικό σκυρόδεμα του κτιρίου, περιλαμβανομένης της ανωδομής, της θεμελίωσης και του σκυροδέματος καθαριότητας, υπολογίζεται σε 794,30 m<sup>3</sup>.

**Πίνακας 4.0.3 Επιμέτρηση σκυροδέματος φέροντος οργανισμού και θεμελίωσης**

| Κατηγορία σκυροδέματος                                 | Ποσότητα              |
|--------------------------------------------------------|-----------------------|
| Σκυρόδεμα ανωδομής και ισογείου                        | 718,74 m <sup>3</sup> |
| Κωνικά πέλδια                                          | 21,93 m <sup>3</sup>  |
| Λαμμοί/βάσεις υποστυλωμάτων                            | 2,88 m <sup>3</sup>   |
| Γραμμικά πέλδια τοιχείων πυρήνα                        | 12,15 m <sup>3</sup>  |
| Συνδετήριοι δοκοί θεμελίωσης                           | 24,02 m <sup>3</sup>  |
| Σύνολο οπλισμένου σκυροδέματος θεμελίωσης              | 60,98 m <sup>3</sup>  |
| Σκυρόδεμα καθαριότητας                                 | 14,58 m <sup>3</sup>  |
| Σύνολο θεμελίωσης με καθαριότητα                       | 75,57 m <sup>3</sup>  |
| Σύνολο οπλισμένου σκυροδέματος ανωδομής και θεμελίωσης | 779,72 m <sup>3</sup> |
| Σύνολο σκυροδέματος με καθαριότητα                     | 794,30 m <sup>3</sup> |

Η επιμέτρηση των τελειωμάτων περιλαμβάνει τα υλικά που χαρακτηρίζουν την υφιστάμενη κατάσταση και τα οποία μπορούν να επηρεάσουν είτε το κόστος ανακαίνισης είτε τις ποσότητες των μελλοντικών παρεμβάσεων. Τα δάπεδα των χώρων κατοικίας θεωρούνται επιστρωμένα με παλαιά κεραμικά πλακίδια. Τα μπάνια λαμβάνονται επενδεδυμένα με πλακίδια περιμετρικά μέχρι ύψος 2,40 m. Η σκάλα του κλιμακοστασίου είναι επενδεδυμένη με λευκό μάρμαρο. Τα εξωτερικά κιγκλιδώματα των προβόλων είναι απλά σιδερένια, ύψους 1,10 m, ενώ κιγκλίδωμα υπάρχει και στην εσωτερική πλευρά της σκάλας. Οι ποσότητες αυτές οργανώνονται στο υπολογιστικό αρχείο, ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν σε σενάρια συντήρησης, αντικατάστασης ή ανακαίνισης, εφόσον κριθεί αναγκαίο.

Οι ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις καταγράφονται σε επίπεδο βασικών ποσοτικών χαρακτηριστικών. Το κτίριο περιλαμβάνει δέκα διαμερίσματα, δύο ανά τυπικό όροφο. Σε κάθε διαμέρισμα υπάρχουν επτά σώματα καλοριφέρ μήκους 1,20 m, επομένως το σύνολο των σωμάτων ανέρχεται σε εβδομήντα. Για το ζεστό νερό χρήσης υπάρχει ένας ηλεκτρικός θερμοσίφωνας 120 L ανά διαμέρισμα, δηλαδή συνολικά δέκα θερμοσίφωνες.

Δεν υπάρχουν ηλιακοί θερμοσίφωνες. Οι υδραυλικές, ηλεκτρολογικές, αποχετευτικές εγκαταστάσεις, η κεντρική θέρμανση και ο ανελκυστήρας θεωρούνται αρχικής περιόδου κατασκευής, με τυπικές μόνο εργασίες συντήρησης. Τα δεδομένα αυτά θα αξιοποιηθούν στη διαμόρφωση σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης και αντικατάστασης εξοπλισμού.

Η οργάνωση των επιμετρήσεων έγινε σε υπολογιστικό φύλλο, με διακριτές καρτέλες ανά κατηγορία στοιχείων. Η δομή αυτή επιτρέπει τον έλεγχο των επιμέρους ποσοτήτων και τη μεταφορά τους σε συγκεντρωτικό πίνακα. Οι βασικές καρτέλες περιλαμβάνουν τις γενικές παραδοχές, τη γεωμετρία του κτιρίου, τις τοιχοποιίες, τα κουφώματα, τον φέροντα οργανισμό, τη θεμελίωση, τα τελειώματα, τις ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις και τη σύνοψη ποσοτήτων. Η σύνοψη ποσοτήτων αποτελεί το βασικό σημείο εξόδου της επιμετρητικής διαδικασίας, καθώς από αυτή θα τροφοδοτηθεί το επόμενο υπολογιστικό στάδιο που αφορά την αξιολόγηση σεναρίων.

Η επιμετρητική διαδικασία περιλαμβάνει και ελέγχους συνέπειας. Οι έλεγχοι αυτοί αφορούν τη συμφωνία των επιφανειών με τις συνολικές διαστάσεις του κτιρίου, την αποφυγή διπλομετρήσεων, τη διάκριση μεταξύ εκτεθειμένων και μη εκτεθειμένων όψεων, τη συνέπεια μεταξύ αριθμού ορόφων και επαναλαμβανόμενων ποσοτήτων, καθώς και τη διάκριση μεταξύ δομικών στοιχείων και τελειωμάτων. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη διάκριση των επιφανειών που μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο βιοκλιματικής παρέμβασης, όπως δώμα, εξωτερικοί τοίχοι, κουφώματα και σκίαστρα, από τις ποσότητες που χρησιμοποιούνται κυρίως για την αποτύπωση της υφιστάμενης κατασκευής, όπως το σκυρόδεμα του φέροντος οργανισμού.

Η επιμέτρηση δεν αποτελεί αυτοσκοπό, αλλά ενδιάμεσο στάδιο που επιτρέπει την ποσοτικοποίηση των σεναρίων. Για παράδειγμα, η επιφάνεια του δώματος θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό κόστους και περιβαλλοντικού αποτυπώματος θερμομόνωσης ή στεγάνωσης. Η επιφάνεια των εξωτερικών κουφωμάτων θα χρησιμοποιηθεί για την κοστολόγηση αντικατάστασης και για τον υπολογισμό του ενσωματωμένου αποτυπώματος νέων πλαισίων και υαλοπινάκων. Η επιφάνεια των εκτεθειμένων όψεων θα χρησιμοποιηθεί για την εξέταση εξωτερικής θερμομόνωσης, ενώ ο νότιος προσανατολισμός της πρόσοψης θα ληφθεί υπόψη στα σεναρία σκίασης και ελέγχου θερινών ηλιακών κερδών.

Συνολικά, η επιμετρητική ανάλυση διαμορφώνει τη βάση για την τεχνικοοικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση της εργασίας. Η σύνδεση των σχεδίων με τις ποσότητες εξασφαλίζει ότι οι επόμενοι υπολογισμοί δεν βασίζονται σε γενικές υποθέσεις, αλλά σε συγκεκριμένα γεωμετρικά και κατασκευαστικά δεδομένα του κτιρίου μελέτης. Με τον τρόπο αυτό, η αξιολόγηση των βιοκλιματικών και ενεργειακών παρεμβάσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί με σαφήνεια, διαφάνεια και δυνατότητα ελέγχου.

### **4.3 Οργάνωση υπολογιστικού μοντέλου επιμετρήσεων σε Excel**

Η επιμετρητική πληροφορία που προέκυψε από τα σχέδια οργανώθηκε σε υπολογιστικό μοντέλο σε περιβάλλον Excel, με σκοπό τη συστηματική καταγραφή, επεξεργασία και συγκέντρωση των ποσοτήτων του κτιρίου μελέτης. Η επιλογή υπολογιστικού φύλλου επιτρέπει τη διαφανή παρακολούθηση των επιμέρους παραδοχών, των γεωμετρικών δεδομένων, των υπολογισμών και των τελικών ποσοτήτων, ενώ παράλληλα διευκολύνει τη μελλοντική σύνδεση των επιμετρήσεων με σενάρια κόστους, ενεργειακής εξοικονόμησης και περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Η δομή του αρχείου διαμορφώθηκε έτσι ώστε κάθε κατηγορία στοιχείων να υπολογίζεται σε διακριτή καρτέλα και να τροφοδοτεί συγκεντρωτικό φύλλο ποσοτήτων.

Το υπολογιστικό μοντέλο βασίζεται στις γεωμετρικές και κατασκευαστικές πληροφορίες της κάτοψης ισογείου, της κάτοψης τυπικού ορόφου, του ξυλοτύπου και της κάτοψης δώματος. Από τα σχέδια αυτά προκύπτουν οι βασικές διαστάσεις του κτιρίου, οι επιφάνειες ανά στάθμη, η διάταξη των χώρων, τα ανοίγματα, τα στοιχεία του φέροντος οργανισμού και η επιφάνεια του δώματος. Τα δεδομένα αυτά μεταφέρθηκαν στο Excel με ενιαία λογική μονάδων, ώστε να περιορίζεται ο κίνδυνος σφαλμάτων κατά τη μετατροπή από μήκη και επιφάνειες σε όγκους, ποσότητες υλικών και τελικά συγκεντρωτικά μεγέθη.

Η οργάνωση του αρχείου ακολουθεί ιεραρχική δομή. Αρχικά καταγράφονται οι γενικές παραδοχές του κτιρίου, όπως οι διαστάσεις, ο αριθμός στάθμεων, το ύψος ορόφου, το πάχος πλακών, οι διατομές υποστυλωμάτων και δοκών, τα πάχη τοιχοποιιών και τα βασικά χαρακτηριστικά των κουφωμάτων. Στη συνέχεια αναπτύσσονται οι επιμέρους επιμετρήσεις για τη γεωμετρία, τις τοιχοποιίες, τα κουφώματα, τον φέροντα οργανισμό, τη θεμελίωση, τα τελειώματα και τις ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις. Τέλος, όλες οι

κρίσιμες ποσότητες συγκεντρώνονται σε ειδική καρτέλα σύνοψης, η οποία αποτελεί τη βασική έξοδο του υπολογιστικού αρχείου.

**Πίνακας 4.0.4 Δομή υπολογιστικού αρχείου επιμετρήσεων**

| Καρτέλα               | Περιεχόμενο                                              | Ρόλος στην ανάλυση                                                  |
|-----------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Γενικές παραδοχές     | Βασικά γεωμετρικά και κατασκευαστικά δεδομένα            | Καθορίζει τις αρχικές τιμές που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς |
| Γεωμετρία κτιρίου     | Επιφάνειες ανά στάθμη, δώμα, απόληξη κλιμακοστασίου      | Παρέχει τα κύρια γεωμετρικά μεγέθη αναφοράς                         |
| Τοιχοποιίες και πάνελ | Εξωτερικοί τοίχοι, εσωτερικοί τοίχοι, πάνελ ισογείου     | Υπολογίζει επιφάνειες και όγκους στοιχείων πλήρωσης                 |
| Κουφώματα             | Εξωτερικά κουφώματα, υαλοπίνακες, πλαίσια αλουμινίου     | Υποστηρίζει σενάρια αντικατάστασης κουφωμάτων                       |
| Φέρων οργανισμός      | Πλάκες, δοκοί, υποστυλώματα, τοιχεία                     | Υπολογίζει ποσότητες σκυροδέματος ανωδομής                          |
| Θεμελίωση             | Κωνικά πέδιλα, συνδετήριοι δοκοί, σκυρόδεμα καθαριότητας | Παρέχει τυπική επιμέτρηση θεμελίωσης                                |
| Τελειώματα            | Δάπεδα, πλακίδια, μάρμαρα, κιγκλιδώματα                  | Καταγράφει υφιστάμενες επενδύσεις και στοιχεία τελειωμάτων          |
| H/M στοιχεία          | Θερμαντικά σώματα, θερμοσίφωνες, βασικός εξοπλισμός      | Υποστηρίζει μελλοντική αξιολόγηση H/M παρεμβάσεων                   |
| Σύνοψη ποσοτήτων      | Συγκεντρωτικός πίνακας τελικών ποσοτήτων                 | Τροφοδοτεί το αρχείο σεναρίων κόστους και αποτυπώματος              |
| Έλεγχοι               | Σημεία επαλήθευσης και παραδοχές                         | Τεκμηριώνει την αξιοπιστία και τα όρια των υπολογισμών              |

Η καρτέλα των γενικών παραδοχών έχει κεντρικό ρόλο, επειδή περιλαμβάνει τις τιμές που χρησιμοποιούνται επαναλαμβανόμενα σε όλο το αρχείο. Σε αυτήν καταγράφονται το καθαρό ύψος ορόφου, το πάχος πλακών, οι διατομές των φερόντων στοιχείων, τα πάχη των εξωτερικών και εσωτερικών τοίχων, η σύνθεση των υφιστάμενων κουφωμάτων και οι βασικές πληροφορίες για τον αριθμό των διαμερισμάτων και των εγκαταστάσεων. Η συγκέντρωση των παραδοχών σε μία καρτέλα εξασφαλίζει ότι κάθε μελλοντική διόρθωση ή εναλλακτική υπόθεση μπορεί να γίνει με ελεγχόμενο τρόπο και να ενημερώσει τους σχετικούς υπολογισμούς.

Η καρτέλα γεωμετρίας λειτουργεί ως βάση για τις επιμέρους επιμετρήσεις. Σε αυτήν καταγράφονται η μικτή επιφάνεια ανά στάθμη, η συνολική μικτή επιφάνεια του κτιρίου, η επιφάνεια του δώματος και η επιφάνεια της απόληξης του κλιμακοστασίου. Οι ποσότητες αυτές χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της συνολικής κλίμακας του κτιρίου και για τη σύνδεση των αποτελεσμάτων με μονάδες αναφοράς, όπως  $m^2$  επιφάνειας κτιρίου ή  $m^2$  επιφάνειας παρέμβασης. Ιδιαίτερη σημασία έχει η επιφάνεια του δώματος, επειδή αποτελεί βασική επιφάνεια για σενάρια θερμομόνωσης, στεγάνωσης και πιθανής εφαρμογής ψυχρών υλικών.

Η καρτέλα τοιχοποιιών και πάνελ περιλαμβάνει τη διάκριση μεταξύ των μπατικών εξωτερικών τοίχων, των δρομικών εσωτερικών τοίχων και των πάνελ του ισογείου. Η διάκριση αυτή είναι απαραίτητη, επειδή τα στοιχεία αυτά διαφέρουν ως προς το πάχος, τη λειτουργία, το υλικό και τη δυνατότητα ενεργειακής αναβάθμισης. Οι εξωτερικοί τοίχοι αποτελούν επιφάνεια πιθανής θερμομονωτικής παρέμβασης, οι εσωτερικοί τοίχοι συνδέονται κυρίως με επιμετρήσεις τελειωμάτων και εσωτερικών εργασιών, ενώ τα πάνελ του ισογείου αφορούν ειδική κατασκευαστική κατηγορία βοηθητικών χώρων.

Η καρτέλα κουφωμάτων οργανώνει τις ποσότητες των εξωτερικών και κοινόχρηστων κουφωμάτων. Η συνολική επιφάνεια διαχωρίζεται σε επιφάνεια πλαισίων αλουμινίου και επιφάνεια υαλοπινάκων, με βάση την παραδοχή ότι το αλουμίνιο αντιστοιχεί στο 10% της επιφάνειας του κουφώματος και ο υαλοπίνακας στο 90%. Η παραδοχή αυτή επιτρέπει πιο αναλυτική αποτίμηση των υλικών, καθώς το αλουμίνιο και το γυαλί έχουν διαφορετικό κόστος, διαφορετικό περιβαλλοντικό συντελεστή και διαφορετική συμμετοχή στο συνολικό αποτύπωμα. Παράλληλα, η επιμέτρηση των κουφωμάτων θα χρησιμοποιηθεί στα σενάρια αντικατάστασης με νέα κουφώματα υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης.

Η καρτέλα φέροντος οργανισμού περιλαμβάνει την επιμέτρηση των στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Υπολογίζονται οι πλάκες, οι δοκοί, τα υποστυλώματα, τα τοιχεία και τα στοιχεία του πυρήνα. Η επιμέτρηση αυτή είναι σημαντική για δύο λόγους. Πρώτον, αποτυπώνει την υφιστάμενη κατασκευαστική μάζα του κτιρίου. Δεύτερον, δημιουργεί βάση για την εκτίμηση του ενσωματωμένου περιβαλλοντικού αποτυπώματος της υφιστάμενης κατασκευής, εφόσον σε επόμενο στάδιο εφαρμοστούν κατάλληλοι συντελεστές για το σκυρόδεμα και τον οπλισμό. Αν και οι κύριες παρεμβάσεις της εργασίας εστιάζουν κυρίως στο κέλυφος και στα τεχνικά συστήματα, η καταγραφή του φέροντος οργανισμού είναι απαραίτητη για την πλήρη εικόνα του κτιρίου.

Η θεμελίωση καταγράφεται σε ξεχωριστή καρτέλα, με τυπική επιμέτρηση κωνικών πεδίων, λαιμών υποστυλωμάτων, γραμμικών πεδίων κάτω από τοίχια, συνδετήριων δοκών και σκυροδέματος καθαριότητας. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται για την αποτύπωση μιας τεχνικά ρεαλιστικής θεμελίωσης, συμβατής με τη γενική διάταξη του φέροντος οργανισμού. Η ποσότητα της θεμελίωσης ενσωματώνεται στη συνολική ποσότητα σκυροδέματος, αλλά παρουσιάζεται χωριστά, ώστε να είναι σαφές ποιο τμήμα αφορά ανωδομή και ποιο αφορά υποδομή.

Η καρτέλα τελειωμάτων περιλαμβάνει τις επιφάνειες ή ποσότητες που σχετίζονται με τα υφιστάμενα δάπεδα, τα πλακίδια των λουτρών, τη μαρμάρινη επένδυση της σκάλας και τα μεταλλικά κιγκλιδώματα. Τα στοιχεία αυτά δεν αποτελούν τον κύριο άξονα της ενεργειακής συμπεριφοράς, αλλά είναι χρήσιμα για την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης και για πιθανή κοστολόγηση εργασιών ανακαίνισης. Η διατήρηση των ποσοτήτων αυτών στο αρχείο επιτρέπει μελλοντική αξιοποίηση, χωρίς να χρειάζεται επανάληψη της επιμετρητικής διαδικασίας.

Η καρτέλα των ηλεκτρομηχανολογικών στοιχείων περιλαμβάνει βασικές ποσότητες εγκαταστάσεων, όπως τα σώματα καλοριφέρ και οι ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες. Για το κτίριο λαμβάνονται δέκα διαμερίσματα, επτά σώματα καλοριφέρ ανά διαμέρισμα και ένας ηλεκτρικός θερμοσίφωνας 120 L ανά διαμέρισμα. Οι ποσότητες αυτές θα χρησιμοποιηθούν κυρίως στα σενάρια ενεργειακής αναβάθμισης που αφορούν τη θέρμανση και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Η καταγραφή τους σε αυτό το στάδιο εξασφαλίζει ότι η υφιστάμενη κατάσταση των εγκαταστάσεων περιγράφεται με σαφήνεια.

Η καρτέλα σύνοψης ποσοτήτων είναι η πιο κρίσιμη έξοδος του αρχείου. Σε αυτήν συγκεντρώνονται οι τελικές ποσότητες ανά κατηγορία, όπως επιφάνεια δώματος, επιφάνεια όψεων, επιφάνεια κουφωμάτων, ποσότητες σκυροδέματος, αριθμός θερμαντικών σωμάτων και αριθμός θερμοσιφώνων. Η σύνοψη αυτή σχεδιάστηκε ώστε να μπορεί να μεταφερθεί απευθείας στο επόμενο υπολογιστικό αρχείο, στο οποίο θα αναπτυχθούν τα σενάρια βιοκλιματικής και ενεργειακής βελτίωσης. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η επανάληψη των επιμετρήσεων και διασφαλίζεται ότι όλα τα σενάρια στηρίζονται στην ίδια γεωμετρική βάση.

**Πίνακας 4.0.5 Βασικές ποσότητες εξόδου από το υπολογιστικό αρχείο**

| Κατηγορία                                                 | Ποσότητα                |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------|
| Μικτή επιφάνεια ανά επίπεδο                               | 259,17 m <sup>2</sup>   |
| Συνολική μικτή επιφάνεια ισογείου και Α–Ε ορόφων          | 1.555,02 m <sup>2</sup> |
| Κύριο δώμα                                                | 246,40 m <sup>2</sup>   |
| Απόληξη κλιμακοστασίου                                    | 12,78 m <sup>2</sup>    |
| Καθαρή επιφάνεια εκτεθειμένων όψεων Βορρά και Νότου       | 383,10 m <sup>2</sup>   |
| Συνολική επιφάνεια εξωτερικών και κοινόχρηστων κουφωμάτων | 117,38 m <sup>2</sup>   |
| Σκυρόδεμα ανωδομής και ισογείου                           | 718,74 m <sup>3</sup>   |
| Σύνολο οπλισμένου σκυροδέματος θεμελίωσης                 | 60,98 m <sup>3</sup>    |
| Σύνολο σκυροδέματος με καθαριότητα                        | 794,30 m <sup>3</sup>   |
| Διαμερίσματα                                              | 10                      |
| Σώματα καλοριφέρ                                          | 70                      |
| Ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες 120 L                             | 10                      |

Η χρήση συγκεντρωτικής καρτέλας επιτρέπει την καθαρή σύνδεση μεταξύ επιμετρήσεων και σεναρίων. Για παράδειγμα, η ποσότητα του δώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του κόστους και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος θερμομόνωσης δώματος. Η επιφάνεια των κουφωμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σενάριο αντικατάστασης κουφωμάτων. Η επιφάνεια των εκτεθειμένων όψεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θερμοπρόσοψη. Ο αριθμός των θερμοσιφώνων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σενάρια αντικατάστασης με ηλιακά συστήματα ή άλλο αποδοτικότερο σύστημα παραγωγής ζεστού νερού χρήσης.

Στο αρχείο περιλαμβάνεται επίσης καρτέλα ελέγχων, στην οποία καταγράφονται οι βασικές παραδοχές και τα σημεία που επηρεάζουν την ακρίβεια της επιμέτρησης. Η ύπαρξη αυτής της καρτέλας είναι σημαντική, διότι τεκμηριώνει τη διαδικασία και επιτρέπει την αναθεώρηση των ποσοτήτων σε περίπτωση που προκύψουν νεότερα στοιχεία. Για παράδειγμα, αν στο μέλλον διατεθεί αναλυτικός ξυλότυπος θεμελίωσης ή ακριβής πίνακας κουφωμάτων, οι αντίστοιχες παραδοχές μπορούν να αντικατασταθούν από ακριβέστερες τιμές, χωρίς να αλλάξει η συνολική δομή του υπολογιστικού μοντέλου.

Η οργάνωση του Excel με διακριτές καρτέλες, κοινές μονάδες και συγκεντρωτική καρτέλα εξόδου εξασφαλίζει τη διαφάνεια της διαδικασίας. Κάθε τελική ποσότητα μπορεί

να ανιχνευθεί προς τα πίσω, δηλαδή να συνδεθεί με την αντίστοιχη παραδοχή, γεωμετρικό μέγεθος ή επιμέρους υπολογισμό. Αυτή η δυνατότητα ελέγχου είναι κρίσιμη για την αξιοπιστία της εργασίας, επειδή οι ποσότητες αποτελούν τη βάση για όλους τους επόμενους υπολογισμούς κόστους, ενέργειας και περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Συνολικά, το υπολογιστικό μοντέλο επιμετρήσεων σε Excel λειτουργεί ως ενδιάμεσος κρίκος μεταξύ της αρχιτεκτονικής αποτύπωσης και της αξιολόγησης των σεναρίων. Μετατρέπει τα σχέδια του κτιρίου σε δομημένες ποσότητες, οργανώνει τις παραδοχές, ελέγχει τη συνέπεια των υπολογισμών και παρέχει τις τελικές τιμές που απαιτούνται για τη συνέχεια της ανάλυσης. Με τον τρόπο αυτό, η αξιολόγηση των βιοκλιματικών και ενεργειακών παρεμβάσεων στηρίζεται σε σαφή, ελέγξιμη και τεκμηριωμένη επιμετρητική βάση.

#### **4.4 Παραδοχές κόστους υλικών, εργασιών και τεχνικών επιλογών βιοκλιματικής αναβάθμισης**

Η οικονομική αποτίμηση των τεχνικών επιλογών αποτελεί βασικό τμήμα της μεθοδολογίας, καθώς επιτρέπει τη σύνδεση των επιμετρημένων ποσοτήτων με το κόστος εφαρμογής πιθανών παρεμβάσεων και με τη συνολική αξιολόγηση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής τους επίδρασης. Η ανάλυση δεν περιορίζεται στην απλή εκτίμηση του αρχικού κόστους, αλλά οργανώνεται με τρόπο που να μπορεί να υποστηρίξει συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών τεχνικών επιλογών, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτούμενες ποσότητες υλικών, τις εργασίες εφαρμογής, τη διάρκεια ζωής των λύσεων, τη συντήρηση και τη σχέση τους με τη λειτουργική απόδοση του κτιρίου. Με αυτόν τον τρόπο, το κόστος δεν αντιμετωπίζεται αποσπασματικά, αλλά ως παράμετρος που συνδέεται με τη συνολική τεχνική, ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση.

Η κοστολόγηση βασίζεται στις ποσότητες που προέκυψαν από το υπολογιστικό αρχείο επιμετρήσεων και οργανώνεται ανά κατηγορία δομικού στοιχείου ή τεχνικής επιλογής. Για κάθε πιθανή επέμβαση ή κατασκευαστική λύση καταγράφεται η αντίστοιχη μονάδα μέτρησης, η ποσότητα, η τιμή υλικού, η τιμή εργασίας και το συνολικό κόστος εφαρμογής. Οι τιμές μονάδας μπορεί να προέρχονται από τρέχουσες τιμές αγοράς, τεχνικά τιμολόγια, προσφορές συνεργείων, βιβλιογραφικές τιμές ή τεκμηριωμένες παραδοχές. Σε κάθε περίπτωση, η πηγή και η λογική επιλογής της τιμής πρέπει να καταγράφονται, ώστε η κοστολόγηση να είναι διαφανής και ελέγξιμη.

Η χρήση ενιαίας δομής κοστολόγησης είναι απαραίτητη για τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων. Για τον λόγο αυτό, οι τιμές διακρίνονται σε κόστος υλικών και κόστος εργασίας. Το κόστος υλικών αφορά την προμήθεια των προϊόντων, των δομικών στοιχείων ή του εξοπλισμού που απαιτούνται για κάθε τεχνική επιλογή. Το κόστος εργασίας αφορά την εφαρμογή, εγκατάσταση, αποξήλωση, προετοιμασία επιφανειών, μεταφορά εντός εργοταξίου και λοιπές εργασίες που είναι αναγκαίες για την υλοποίηση της λύσης. Όπου απαιτείται, μπορεί να προστεθεί χωριστή κατηγορία για βοηθητικά υλικά, μικροϋλικά, ικρίσματα, αποξηλώσεις, αποκομιδή αποβλήτων ή απρόβλεπτες δαπάνες.

Η κοστολόγηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη ότι το κτίριο είναι υφιστάμενο και κατασκευασμένο το 1987. Το στοιχείο αυτό επηρεάζει σημαντικά τη φύση των παρεμβάσεων, επειδή οι εργασίες σε υφιστάμενα κτίρια δεν περιορίζονται στην απλή

τοποθέτηση νέων υλικών. Συχνά απαιτούνται αποξηλώσεις, τοπικές επισκευές, προετοιμασία υποστρώματος, προσαρμογή σε υφιστάμενες γεωμετρίες, αντιμετώπιση αστοχιών ή παλαιότητας και συντονισμός με τις υφιστάμενες εγκαταστάσεις. Επομένως, η τιμή εφαρμογής μιας τεχνικής λύσης σε υφιστάμενο κτίριο μπορεί να διαφέρει από την αντίστοιχη τιμή σε νέα κατασκευή.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η ένταξη του βιοκλιματικού σχεδιασμού στην οικονομική και τεχνική αξιολόγηση. Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός δεν αποτελεί διακοσμητική ή συμπληρωματική προσέγγιση, αλλά βασικό εργαλείο μείωσης της ενεργειακής ζήτησης του κτιρίου. Μέσω της ορθής διαχείρισης του προσανατολισμού, των ηλιακών κερδών, της σκίασης, του φυσικού φωτισμού, του φυσικού αερισμού, της θερμικής προστασίας και της θερμικής μάζας, είναι δυνατόν να περιοριστούν οι ανάγκες για θέρμανση, ψύξη και τεχνητό φωτισμό. Στην παρούσα μεθοδολογία, οι βιοκλιματικές επιλογές αντιμετωπίζονται ως τεχνικές λύσεις με μετρήσιμη επιφάνεια εφαρμογής, κόστος, ενεργειακή επίδραση και περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Η συμβολή του βιοκλιματικού σχεδιασμού είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε αστικά κτίρια κατοικίας, όπου η ενεργειακή συμπεριφορά επηρεάζεται από τον προσανατολισμό, τη σχέση με όμορα κτίρια, τη σκίαση του αστικού ιστού, την έκθεση των όψεων, τη δυνατότητα φυσικού αερισμού και την ένταση της θερινής υπερθέρμανσης. Στην περίπτωση του κτιρίου μελέτης, η κύρια όψη έχει νότιο προσανατολισμό, ενώ οι πλευρικές όψεις συνορεύουν με όμορες ιδιοκτησίες. Η γεωμετρία αυτή δημιουργεί συγκεκριμένες δυνατότητες αλλά και περιορισμούς. Η νότια όψη μπορεί να αξιοποιήσει ηλιακά κέρδη κατά τη χειμερινή περίοδο, αλλά απαιτεί έλεγχο της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη θερινή περίοδο. Αντίστοιχα, οι όψεις που επηρεάζονται από όμορα κτίρια έχουν μικρότερη δυνατότητα άμεσης βιοκλιματικής αξιοποίησης, αλλά εξακολουθούν να συμμετέχουν στη συνολική θερμική συμπεριφορά του κελύφους.

Η απουσία βιοκλιματικού σχεδιασμού σε ένα κτίριο έχει πολλαπλές επιπτώσεις. Όταν το κέλυφος, τα ανοίγματα, η σκίαση και ο αερισμός δεν έχουν σχεδιαστεί με βάση τις τοπικές κλιματικές συνθήκες, αυξάνονται οι ανάγκες μηχανικής θέρμανσης και ψύξης. Η ανεπαρκής θερμομόνωση οδηγεί σε αυξημένες θερμικές απώλειες τον χειμώνα και σε ανεπιθύμητα θερμικά κέρδη το καλοκαίρι. Τα παλαιά κουφώματα με μονό υαλοπίνακα και χαμηλή αεροστεγανότητα επιβαρύνουν περαιτέρω τη λειτουργική ενεργειακή κατανάλωση. Η έλλειψη εξωτερικής σκίασης αυξάνει τα θερινά ηλιακά κέρδη, ιδίως σε νότιες, ανατολικές και δυτικές επιφάνειες. Η απουσία οργανωμένης στρατηγικής φυσικού

αερισμού περιορίζει τη δυνατότητα φυσικής αποφόρτισης του κτιρίου, ειδικά κατά τις νυχτερινές ώρες της θερινής περιόδου.

Οι επιπτώσεις αυτές δεν είναι μόνο ενεργειακές, αλλά και οικονομικές και περιβαλλοντικές. Η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας οδηγεί σε υψηλότερο λειτουργικό κόστος για τους χρήστες, μεγαλύτερη εξάρτηση από μηχανικά συστήματα και αυξημένες λειτουργικές εκπομπές CO<sub>2</sub>eq. Παράλληλα, η χαμηλή θερμική και οπτική άνεση μπορεί να οδηγήσει σε εντατικότερη χρήση συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και τεχνητού φωτισμού. Επομένως, η μη ύπαρξη βιοκλιματικής λογικής στον αρχικό σχεδιασμό δημιουργεί ένα σωρευτικό πρόβλημα, το οποίο εκδηλώνεται σε όλη τη διάρκεια ζωής του κτιρίου μέσω αυξημένης ενεργειακής ζήτησης, αυξημένων δαπανών και μεγαλύτερου περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Στο επίπεδο της κοστολόγησης, οι βιοκλιματικές επιλογές πρέπει να αξιολογούνται με τρόπο που να αποτυπώνει τόσο το αρχικό κόστος όσο και το αναμενόμενο όφελος. Μια τεχνική λύση μπορεί να έχει μεγαλύτερο αρχικό κόστος, αλλά να μειώνει σημαντικά τις ενεργειακές ανάγκες και τις λειτουργικές δαπάνες. Αντίθετα, μια λύση χαμηλού κόστους μπορεί να έχει μικρότερη διάρκεια ζωής ή περιορισμένη ενεργειακή επίδραση. Για τον λόγο αυτό, η απλή σύγκριση με βάση το αρχικό κόστος δεν επαρκεί. Απαιτείται συσχέτιση του κόστους με δείκτες όπως η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας, η μείωση λειτουργικών εκπομπών, η διάρκεια ζωής της παρέμβασης και η περίοδος οικονομικής απόσβεσης.

Η κοστολόγηση οργανώνεται με βάση βασικές κατηγορίες πιθανών τεχνικών επιλογών, χωρίς να προεξοφλείται σε αυτό το στάδιο ποια από αυτές θα επιλεγεί τελικά στα σενάρια. Οι κατηγορίες αυτές μπορεί να αφορούν το κέλυφος, τα ανοίγματα, τα οριζόντια δομικά στοιχεία, τα συστήματα ηλιακής προστασίας, τις επεμβάσεις που σχετίζονται με τον φυσικό αερισμό, τις εγκαταστάσεις θέρμανσης και ψύξης, την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, τον φωτισμό και πιθανές λύσεις αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η καταγραφή αυτών των κατηγοριών επιτρέπει την ευέλικτη διαμόρφωση σεναρίων, τα οποία θα μπορούν να περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες τεχνικές επιλογές ανάλογα με τον στόχο της αξιολόγησης.

**Πίνακας 4.0.6 Ενδεικτικές κατηγορίες τεχνικών επιλογών για κοστολόγηση και αξιολόγηση**

| Κατηγορία          | Ενδεικτικό αντικείμενο επιμέτρησης                                                   | Κύρια μονάδα              |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Κέλυφος            | Εξωτερικές τοιχοποιίες, θερμικά εκτεθειμένες επιφάνειες                              | m <sup>2</sup>            |
| Οριζόντια στοιχεία | Δώμα, πλάκες, επιφάνειες σε επαφή με εξωτερικό περιβάλλον ή μη θερμαινόμενους χώρους | m <sup>2</sup>            |
| Ανοίγματα          | Εξωτερικά κουφώματα, υαλοπίνακες, πλαίσια                                            | m <sup>2</sup>            |
| Ηλιακή προστασία   | Στοιχεία σκίασης, πρόβολοι, εξωτερικά συστήματα σκιασμού                             | m <sup>2</sup> ή m        |
| Φυσικός αερισμός   | Διατάξεις ή επιλογές που διευκολύνουν την ανανέωση αέρα και τη θερινή αποφόρτιση     | τεμ. ή m <sup>2</sup>     |
| Θέρμανση και ψύξη  | Υφιστάμενα ή εναλλακτικά τεχνικά συστήματα                                           | τεμ. ή σύστημα            |
| Ζεστό νερό χρήσης  | Συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ZNX                                              | τεμ. ή σύστημα            |
| Φωτισμός           | Φωτιστικά σώματα, λαμπτήρες, αυτοματισμοί                                            | τεμ.                      |
| Ανανεώσιμες πηγές  | Συστήματα παραγωγής ενέργειας ή υποβοήθησης ενεργειακών αναγκών                      | kW, m <sup>2</sup> ή τεμ. |

Για κάθε κατηγορία τεχνικής επιλογής, το υπολογιστικό αρχείο μπορεί να περιλαμβάνει πεδία για την ποσότητα, την τιμή υλικού, την τιμή εργασίας, το συνολικό κόστος, τη διάρκεια ζωής, τις ανάγκες συντήρησης και τον περιβαλλοντικό συντελεστή. Η ένταξη διάρκειας ζωής είναι σημαντική, διότι ορισμένες λύσεις έχουν μεγαλύτερο χρόνο λειτουργικής απόδοσης, ενώ άλλες ενδέχεται να απαιτήσουν αντικατάσταση μέσα στην περίοδο αναφοράς. Με αυτόν τον τρόπο, η αξιολόγηση δεν περιορίζεται στη φάση εγκατάστασης, αλλά μπορεί να συνδεθεί με τη λειτουργική περίοδο του κτιρίου.

Το κόστος κάθε τεχνικής επιλογής υπολογίζεται με βάση τη γενική σχέση:

**Συνολικό κόστος = ποσότητα × τιμή μονάδας υλικών + ποσότητα × τιμή μονάδας εργασίας + πρόσθετες δαπάνες**

Στις πρόσθετες δαπάνες μπορούν να περιληφθούν αποξηλώσεις, μεταφορές, ικριώματα, βοηθητικά υλικά, διαχείριση αποβλήτων, απρόβλεπτα και λοιπές απαιτήσεις εφαρμογής. Η ακριβής μορφή του υπολογισμού εξαρτάται από την κατηγορία της τεχνικής επιλογής. Για παράδειγμα, σε επιφανειακές εργασίες η κύρια μονάδα είναι συνήθως το m<sup>2</sup>, ενώ σε εξοπλισμό ή συστήματα η μονάδα μπορεί να είναι το τεμάχιο ή το

πλήρες σύστημα. Η διάκριση αυτή επιτρέπει στο Excel να λειτουργεί με ενιαία λογική αλλά και με ευελιξία ανά κατηγορία.

Η οικονομική αξιολόγηση πρέπει να συνδέεται με την ενεργειακή επίδραση. Για κάθε πιθανή τεχνική επιλογή μπορεί να εκτιμηθεί η επίδραση στη μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης, είτε μέσω τεχνικών υπολογισμών, είτε μέσω βιβλιογραφικών συντελεστών, είτε μέσω τεκμηριωμένων παραδοχών. Η εξοικονόμηση μπορεί να εκφραστεί σε kWh ανά έτος και να μετατραπεί σε οικονομικό όφελος μέσω της τιμής ενέργειας. Παράλληλα, μπορεί να μετατραπεί σε μείωση λειτουργικών εκπομπών μέσω κατάλληλου συντελεστή εκπομπών. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε τεχνική επιλογή μπορεί να αξιολογηθεί ως προς το κόστος της, αλλά και ως προς την ενεργειακή και περιβαλλοντική της απόδοση.

Η ύπαρξη βιοκλιματικής λογικής στην αξιολόγηση επιβάλλει να εξετάζονται και μη μηχανολογικές λύσεις. Σε πολλές περιπτώσεις, η βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς δεν προκύπτει μόνο από την αντικατάσταση συστημάτων, αλλά από τον περιορισμό των φορτίων που τα συστήματα καλούνται να καλύψουν. Η σκίαση μπορεί να περιορίσει την ανάγκη ψύξης. Ο φυσικός αερισμός μπορεί να συμβάλει στη θερινή αποφόρτιση. Η βελτίωση της θερμικής προστασίας μπορεί να μειώσει τις απώλειες τον χειμώνα και τα θερμικά κέρδη το καλοκαίρι. Ο φυσικός φωτισμός μπορεί να περιορίσει τη χρήση τεχνητού φωτισμού, υπό την προϋπόθεση ότι ελέγχεται η θάμβωση και η υπερθέρμανση. Αυτές οι επιλογές πρέπει να αξιολογούνται με την ίδια σοβαρότητα όπως και οι μηχανολογικές παρεμβάσεις, επειδή επηρεάζουν άμεσα το ενεργειακό ισοζύγιο.

Παράλληλα, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι κάθε επιλογή βιοκλιματικής αναβάθμισης έχει και ενσωματωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η παραγωγή υλικών, η μεταφορά, η τοποθέτηση και η πιθανή αντικατάσταση στο μέλλον δημιουργούν εκπομπές και περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Επομένως, η αξιολόγηση πρέπει να εξετάζει αν η μείωση των λειτουργικών εκπομπών αντισταθμίζει την αρχική περιβαλλοντική επιβάρυνση της παρέμβασης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για λύσεις που απαιτούν σημαντικές ποσότητες νέων υλικών. Η βέλτιστη επιλογή δεν είναι πάντα η λύση με τη μέγιστη τεχνική απόδοση, αλλά εκείνη που παρουσιάζει ικανοποιητική ενεργειακή βελτίωση με εύλογο κόστος και αποδεκτό ενσωματωμένο αποτύπωμα.

Η αξιολόγηση του κόστους πρέπει επίσης να λαμβάνει υπόψη το επίπεδο αβεβαιότητας. Οι τιμές υλικών και εργασιών μεταβάλλονται με τον χρόνο, την περιοχή, τη διαθεσιμότητα συνεργείων, την ποιότητα προϊόντων και τις συνθήκες εφαρμογής. Για

τον λόγο αυτό, οι τιμές που θα χρησιμοποιηθούν στο υπολογιστικό μοντέλο πρέπει να θεωρούνται τεκμηριωμένες εκτιμήσεις και όχι απόλυτες σταθερές. Είναι σκόπιμο να καταγράφεται η πηγή κάθε τιμής και, όπου απαιτείται, να προβλέπεται περιθώριο απροβλέπτων ή δυνατότητα ανάλυσης ευαισθησίας. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εξεταστεί πώς επηρεάζεται η οικονομική απόδοση μιας επιλογής όταν μεταβάλλεται το κόστος εφαρμογής ή η τιμή ενέργειας.

Η ανάλυση κόστους συνδέεται άμεσα με την περίοδο αναφοράς της αξιολόγησης. Μια τεχνική επιλογή μπορεί να έχει διάρκεια ζωής μικρότερη από την περίοδο αναφοράς του κτιρίου και να απαιτεί αντικατάσταση. Σε αυτή την περίπτωση, το αρχικό κόστος δεν είναι το μόνο κόστος που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Πρέπει να εξεταστούν η συντήρηση, οι πιθανές αντικαταστάσεις και το συνολικό κόστος μέσα στην περίοδο αξιολόγησης. Αντίστοιχα, η εξοικονόμηση ενέργειας συσσωρεύεται ετησίως και πρέπει να εξετάζεται σε βάθος χρόνου. Η σύνδεση αρχικού κόστους, ετήσιας εξοικονόμησης και διάρκειας ζωής επιτρέπει πιο ορθολογική αξιολόγηση από μια απλή σύγκριση τιμών εγκατάστασης.

Στο υπολογιστικό μοντέλο, η οικονομική αξιολόγηση μπορεί να αποτυπωθεί με βασικούς δείκτες, όπως το συνολικό κόστος, το κόστος ανά μονάδα εφαρμογής, η ετήσια εξοικονόμηση κόστους, η απλή περίοδος αποπληρωμής και το κόστος ανά μονάδα εξοικονομούμενης ενέργειας. Παράλληλα, η περιβαλλοντική αξιολόγηση μπορεί να αποτυπωθεί με δείκτες όπως το ενσωματωμένο GWP, η ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών, το καθαρό περιβαλλοντικό όφελος και ο περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης. Η παράλληλη χρήση οικονομικών και περιβαλλοντικών δεικτών επιτρέπει την πολυκριτηριακή θεώρηση των τεχνικών επιλογών.

Συνολικά, οι παραδοχές κόστους υλικών, εργασιών και τεχνικών επιλογών αποτελούν κρίσιμο στάδιο για τη συνέχεια της ανάλυσης. Η οικονομική αποτίμηση πρέπει να στηρίζεται σε σαφείς ποσότητες, τεκμηριωμένες τιμές και διαφανή διάκριση μεταξύ υλικών, εργασίας και πρόσθετων δαπανών. Παράλληλα, η ένταξη του βιοκλιματικού σχεδιασμού διασφαλίζει ότι η αξιολόγηση δεν περιορίζεται σε συμβατικές τεχνικές λύσεις, αλλά εξετάζει τη δυνατότητα μείωσης της ενεργειακής ζήτησης μέσω παθητικών και κλιματικά προσαρμοσμένων επιλογών. Η απουσία τέτοιας λογικής σε ένα υφιστάμενο κτίριο οδηγεί σε αυξημένες ενεργειακές ανάγκες, μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος και υψηλότερες εκπομπές. Για τον λόγο αυτό, η κοστολόγηση των πιθανών τεχνικών επιλογών πρέπει να συνδέεται με την ενεργειακή και περιβαλλοντική τους επίδραση, ώστε

τα επόμενα στάδια της εργασίας να στηρίζονται σε ολοκληρωμένη και τεχνικά τεκμηριωμένη βάση.

## **4.5 Ενεργειακοί δείκτες, βιοκλιματικές παράμετροι και εκτίμηση εξοικονόμησης**

Η ενεργειακή αξιολόγηση του κτιρίου μελέτης οργανώνεται με στόχο τη σύνδεση της γεωμετρίας, των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών και των πιθανών τεχνικών επιλογών με μετρήσιμους δείκτες ενεργειακής συμπεριφοράς. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στις επιμετρήσεις που προέκυψαν από τις κατόψεις, τον ξυλότυπο και την κάτοψη δώματος, καθώς και στις παραδοχές για την υφιστάμενη κατάσταση του κελύφους, των κουφωμάτων και των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων. Η ενεργειακή αποτίμηση δεν αντιμετωπίζεται ως αποκομμένη διαδικασία, αλλά ως συνέχεια της αρχιτεκτονικής και κατασκευαστικής ανάλυσης, ώστε κάθε γεωμετρικό μέγεθος να μπορεί να συνδεθεί με αντίστοιχη επίδραση στη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας.

Η ανάλυση εστιάζει στη λειτουργική ενέργεια του κτιρίου, δηλαδή στην ενέργεια που απαιτείται κατά τη φάση χρήσης του για τη θέρμανση, την ψύξη, την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, τον φωτισμό και τη λειτουργία των βασικών τεχνικών συστημάτων. Η λειτουργική ενέργεια αποτελεί κρίσιμο μέγεθος για ένα υφιστάμενο κτίριο κατοικίας, διότι επηρεάζει άμεσα το κόστος χρήσης, τη θερμική άνεση των ενοίκων και τις ετήσιες λειτουργικές εκπομπές. Στην παρούσα εργασία, η ενεργειακή αποτίμηση έχει συγκριτικό χαρακτήρα, καθώς αποσκοπεί στην εκτίμηση της σχετικής επίδρασης διαφορετικών τεχνικών και βιοκλιματικών επιλογών σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση.

Η υφιστάμενη ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου επηρεάζεται έντονα από την περίοδο κατασκευής του. Το κτίριο κατασκευάστηκε το 1987, εποχή κατά την οποία οι απαιτήσεις θερμομονωτικής προστασίας και ενεργειακής απόδοσης ήταν σημαντικά διαφορετικές από τις σημερινές. Οι εξωτερικοί τοίχοι είναι μπατικοί πάχους 0,25 m, με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία, ενώ τα εξωτερικά κουφώματα είναι παλαιά συρόμενα αλουμινίου με μονό υαλοπίνακα και πλαστικά ρολά. Επιπλέον, δεν υπάρχουν εξωτερικά συστήματα σκίασης, όπως τέντες ή σταθερά σκίαστρα, ενώ η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης γίνεται με ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες ανά διαμέρισμα. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνθέτουν ένα κτίριο με αυξημένες θερμικές απώλειες κατά τη χειμερινή περίοδο και αυξημένα θερμικά κέρδη κατά τη θερινή περίοδο.

Η εκτίμηση της ενεργειακής συμπεριφοράς γίνεται με βάση δείκτες που μπορούν να υπολογιστούν ή να προσεγγιστούν από τις διαθέσιμες επιμετρήσεις και παραδοχές. Οι βασικοί δείκτες περιλαμβάνουν την ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά χρήση, τη

συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας, την ειδική κατανάλωση ανά μονάδα επιφάνειας, την εκτιμώμενη εξοικονόμηση ενέργειας, το ετήσιο οικονομικό όφελος και τη μείωση λειτουργικών εκπομπών. Οι δείκτες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε επίπεδο μεμονωμένης τεχνικής επιλογής όσο και σε επίπεδο συνολικού σεναρίου.

**Πίνακας 4.0.7 Βασικοί ενεργειακοί δείκτες της ανάλυσης**

| Δείκτης                       | Μονάδα                        | Ρόλος στην αξιολόγηση                                                                 |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Ετήσια κατανάλωση ενέργειας   | kWh/έτος                      | Εκφράζει τη συνολική λειτουργική ενεργειακή απαίτηση                                  |
| Ειδική ετήσια κατανάλωση      | kWh/m <sup>2</sup> ·έτος      | Επιτρέπει σύγκριση με βάση την επιφάνεια του κτιρίου                                  |
| Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας | kWh/έτος                      | Εκφράζει τη μείωση κατανάλωσης από μια τεχνική επιλογή                                |
| Ποσοστό εξοικονόμησης         | %                             | Δείχνει τη σχετική βελτίωση έναντι της αρχικής κατάστασης                             |
| Ετήσια εξοικονόμηση κόστους   | €/έτος                        | Συνδέει την ενεργειακή εξοικονόμηση με οικονομικό όφελος                              |
| Ετήσιες λειτουργικές εκπομπές | kg<br>CO <sub>2</sub> eq/έτος | Εκφράζει τις εκπομπές από τη χρήση ενέργειας                                          |
| Μείωση λειτουργικών εκπομπών  | kg<br>CO <sub>2</sub> eq/έτος | Εκφράζει το ετήσιο περιβαλλοντικό όφελος λόγω εξοικονόμησης                           |
| Ενεργειακή απόσβεση           | έτη                           | Χρόνος στον οποίο η εξοικονόμηση αντισταθμίζει ενεργειακή ή περιβαλλοντική επιβάρυνση |

Η ειδική ετήσια κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται ως λόγος της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης προς την επιφάνεια αναφοράς του κτιρίου. Η επιφάνεια αναφοράς πρέπει να δηλώνεται με σαφήνεια, ώστε τα αποτελέσματα να είναι συνεπή. Στην παρούσα εργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συνολική μικτή επιφάνεια του κτιρίου ή, εφόσον προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια, η ωφέλιμη θερμαινόμενη επιφάνεια. Η χρήση κοινής επιφάνειας αναφοράς σε όλα τα σενάρια είναι απαραίτητη, ώστε οι συγκρίσεις να μην επηρεάζονται από διαφορετική βάση υπολογισμού.

Η γενική σχέση υπολογισμού της ειδικής κατανάλωσης είναι:

**Ειδική κατανάλωση ενέργειας = Ετήσια κατανάλωση ενέργειας / Επιφάνεια αναφοράς**

όπου η ετήσια κατανάλωση εκφράζεται σε kWh/έτος και η επιφάνεια αναφοράς σε m<sup>2</sup>. Ο δείκτης αυτός επιτρέπει την αξιολόγηση της ενεργειακής έντασης του κτιρίου και τη σύγκριση μεταξύ της υφιστάμενης κατάστασης και των εναλλακτικών τεχνικών επιλογών.

Η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας υπολογίζεται ως διαφορά μεταξύ της κατανάλωσης της αρχικής κατάστασης και της κατανάλωσης μετά την εφαρμογή μιας τεχνικής επιλογής ή ενός συνδυασμού επιλογών. Η σχέση αυτή εκφράζεται ως:

**Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας = Κατανάλωση αρχικής κατάστασης – Κατανάλωση μετά την παρέμβαση**

Η ποσοστιαία εξοικονόμηση εκφράζεται ως:

**Ποσοστό εξοικονόμησης = Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας / Κατανάλωση αρχικής κατάστασης × 100**

Οι παραπάνω σχέσεις επιτρέπουν την απλή και διαφανή αποτύπωση της ενεργειακής επίδρασης κάθε επιλογής. Η ακρίβεια του αποτελέσματος εξαρτάται από την ποιότητα των αρχικών δεδομένων, την τεκμηρίωση των παραδοχών και τον τρόπο εκτίμησης της επίδρασης κάθε τεχνικού μέτρου.

Κεντρική θέση στην ενεργειακή αξιολόγηση έχει ο βιοκλιματικός σχεδιασμός. Η συμβολή του έγκειται στο ότι μειώνει την ενεργειακή ζήτηση πριν αυτή καλυφθεί από μηχανολογικά συστήματα. Με άλλα λόγια, ο βιοκλιματικός σχεδιασμός λειτουργεί προληπτικά, περιορίζοντας τις ανάγκες θέρμανσης, ψύξης και φωτισμού μέσω της αξιοποίησης του κλίματος, του προσανατολισμού, της σκίασης, του φυσικού αερισμού, της θερμικής μάζας και της ποιότητας του κελύφους. Η ένταξη των βιοκλιματικών παραμέτρων στην ενεργειακή αποτίμηση επιτρέπει να αξιολογηθεί όχι μόνο η απόδοση μεμονωμένων τεχνικών λύσεων, αλλά και η συνολική αλληλεπίδραση του κτιρίου με το περιβάλλον του.

Στο κτίριο μελέτης, η κύρια όψη έχει νότιο προσανατολισμό. Η πληροφορία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι η νότια όψη μπορεί να δεχθεί ευνοϊκά ηλιακά κέρδη κατά τη χειμερινή περίοδο, αλλά μπορεί επίσης να επιβαρύνει το κτίριο με αυξημένα θερμικά φορτία κατά τη θερινή περίοδο, όταν δεν υπάρχει επαρκής σκίαση. Η απουσία εξωτερικών σκιάστρων ή τεντών οδηγεί σε περιορισμένο έλεγχο των θερινών ηλιακών κερδών,

γεγονός που μπορεί να αυξήσει την ανάγκη μηχανικής ψύξης. Αντίθετα, η δυνατότητα ελεγχόμενης σκίασης μπορεί να μειώσει την υπερθέρμανση, χωρίς να ακυρώνει πλήρως τα χειμερινά ηλιακά οφέλη.

Η βόρεια όψη έχει διαφορετικό ενεργειακό ρόλο. Δεδομένου ότι η όμορη ιδιοκτησία απέχει περίπου 10 m, η βόρεια πλευρά αντιμετωπίζεται ως εκτεθειμένη όψη. Στην περίπτωση αυτή, η κύρια ενεργειακή επιβάρυνση σχετίζεται περισσότερο με θερμικές απώλειες κατά τη χειμερινή περίοδο και λιγότερο με άμεσα ηλιακά κέρδη. Οι ανατολικές και δυτικές πλευρές επηρεάζονται από τις όμορες ιδιοκτησίες, γεγονός που περιορίζει τον βαθμό έκθεσής τους, αλλά δεν αναιρεί πλήρως τη συμμετοχή τους στη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου. Η διάκριση των όψεων ανά προσανατολισμό και συνθήκη έκθεσης είναι απαραίτητη για την ορθολογική αξιολόγηση των πιθανών βιοκλιματικών επιλογών.

Οι βασικές βιοκλιματικές παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην ενεργειακή αποτίμηση είναι η θερμική προστασία του κελύφους, η ηλιακή προστασία, ο φυσικός αερισμός, ο φυσικός φωτισμός, η θερμική μάζα και η σχέση του κτιρίου με τον αστικό ιστό. Οι παράμετροι αυτές δεν λειτουργούν ανεξάρτητα. Αντίθετα, αλληλεπιδρούν και μπορούν να δημιουργήσουν είτε θετικά είτε αρνητικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, η αύξηση της θερμομονωτικής προστασίας μπορεί να μειώσει τις χειμερινές απώλειες, αλλά αν δεν συνδυάζεται με κατάλληλο έλεγχο θερινών ηλιακών κερδών και αερισμό, μπορεί να μην αντιμετωπίζει επαρκώς την υπερθέρμανση. Αντίστοιχα, η αύξηση των γυάλινων επιφανειών μπορεί να βελτιώσει τον φυσικό φωτισμό, αλλά μπορεί να αυξήσει τα ψυκτικά φορτία αν δεν συνοδεύεται από κατάλληλη σκίαση.

**Πίνακας 0.8 Βιοκλιματικές παράμετροι και επίδραση στο ενεργειακό ισοζύγιο**

| Βιοκλιματική παράμετρος    | Ενεργειακή επίδραση                                      | Κύρια περίοδος επίδρασης              |
|----------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Θερμική προστασία κελύφους | Μείωση θερμικών απωλειών και περιορισμός θερμικών κερδών | Χειμώνας και θέρος                    |
| Ηλιακή προστασία           | Μείωση ανεπιθύμητων ηλιακών κερδών                       | Κυρίως θέρος                          |
| Φυσικός αερισμός           | Απομάκρυνση θερμικών φορτίων και βελτίωση ποιότητας αέρα | Κυρίως θέρος και μεταβατικές περίοδοι |
| Φυσικός φωτισμός           | Μείωση ανάγκης τεχνητού φωτισμού                         | Όλο το έτος                           |
| Θερμική μάζα               | Εξομάλυνση θερμοκρασιακών διακυμάνσεων                   | Θέρος και μεταβατικές περίοδοι        |
| Προσανατολισμός            | Ρύθμιση ηλιακών κερδών και φωτισμού                      | Όλο το έτος                           |
| Αστικό περιβάλλον          | Επίδραση σκίασης, αερισμού και θερμικής νησίδας          | Όλο το έτος                           |

Η μη ύπαρξη βιοκλιματικού σχεδιασμού έχει άμεσες συνέπειες στην ενεργειακή λειτουργία. Σε κτίρια όπου δεν έχει ληφθεί υπόψη ο προσανατολισμός, η σκίαση, η ποιότητα των κουφωμάτων και η θερμική προστασία, η λειτουργία βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη χρήση μηχανολογικών συστημάτων. Η θέρμανση καλύπτει αυξημένες απώλειες τον χειμώνα, ενώ η ψύξη καλείται να αντιμετωπίσει αυξημένα θερμικά κέρδη το καλοκαίρι. Η απουσία φυσικής στρατηγικής αερισμού περιορίζει τη δυνατότητα παθητικής αποφόρτισης, ενώ η απουσία ελέγχου ηλιακής ακτινοβολίας οδηγεί σε αυξημένες εσωτερικές θερμοκρασίες κατά τις ώρες αιχμής.

Οι επιπτώσεις αυτές μεταφράζονται σε αυξημένη ετήσια κατανάλωση ενέργειας, υψηλότερο κόστος λειτουργίας και αυξημένες λειτουργικές εκπομπές CO<sub>2</sub>eq. Επιπλέον, μπορεί να επηρεάζεται αρνητικά η θερμική άνεση των χρηστών, καθώς οι εσωτερικές συνθήκες εξαρτώνται περισσότερο από την ένταση χρήσης των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης δεν πρέπει να περιορίζεται στην καταγραφή των υλικών και των εγκαταστάσεων, αλλά πρέπει να αναγνωρίζει και τις ελλείψεις της αρχικής βιοκλιματικής λογικής.

Η εκτίμηση της ενεργειακής εξοικονόμησης μπορεί να γίνει με τρεις συμπληρωματικούς τρόπους. Ο πρώτος είναι η χρήση διαθέσιμων ενεργειακών δεδομένων, εφόσον υπάρχουν, όπως λογαριασμοί ενέργειας ή στοιχεία ενεργειακής επιθεώρησης. Ο δεύτερος είναι η χρήση τεκμηριωμένων συντελεστών εξοικονόμησης από τη βιβλιογραφία ή από τεχνικές οδηγίες, όταν δεν υπάρχουν πλήρη πραγματικά δεδομένα. Ο τρίτος είναι η εφαρμογή απλών υπολογιστικών σχέσεων που συνδέουν τη μείωση θερμικών απωλειών ή κερδών με επιμετρημένα γεωμετρικά μεγέθη, όπως επιφάνειες τοίχων, δωματίων και κουφωμάτων. Στην παρούσα εργασία, η μέθοδος μπορεί να συνδυάζει τα παραπάνω, με σαφή δήλωση των παραδοχών.

Για τη σύνδεση της ενεργειακής εξοικονόμησης με το οικονομικό όφελος χρησιμοποιείται η τιμή ενέργειας. Η γενική σχέση είναι:

**Ετήσια εξοικονόμηση κόστους = Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας × Τιμή ενέργειας**

Η σχέση αυτή επιτρέπει την εκτίμηση του ετήσιου οικονομικού οφέλους από τη μείωση της κατανάλωσης. Η τιμή ενέργειας πρέπει να δηλώνεται ως παραδοχή και μπορεί να διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος ενέργειας, όπως ηλεκτρική ενέργεια ή καύσιμο

θέρμανσης. Σε περίπτωση που εξετάζονται περισσότερες από μία μορφές ενέργειας, είναι σκόπιμο να χρησιμοποιούνται διαφορετικές τιμές και διαφορετικοί συντελεστές εκπομπών για κάθε ενεργειακό φορέα.

Η λειτουργική εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου υπολογίζεται με βάση την κατανάλωση ενέργειας και τον αντίστοιχο συντελεστή εκπομπών. Η γενική σχέση είναι:

$$\text{Λειτουργικές εκπομπές} = \text{Κατανάλωση ενέργειας} \times \text{Συντελεστής εκπομπών}$$

Αντίστοιχα, η μείωση λειτουργικών εκπομπών υπολογίζεται ως:

$$\text{Μείωση λειτουργικών εκπομπών} = \text{Εξοικονόμηση ενέργειας} \times \text{Συντελεστής εκπομπών}$$

Οι σχέσεις αυτές επιτρέπουν τη μετατροπή της ενεργειακής εξοικονόμησης σε περιβαλλοντικό όφελος. Η επιλογή του συντελεστή εκπομπών είναι κρίσιμη, διότι επηρεάζεται από το ενεργειακό μείγμα, το είδος καυσίμου και τη χρονική περίοδο αναφοράς. Για τον λόγο αυτό, οι συντελεστές εκπομπών πρέπει να τεκμηριώνονται και να παραμένουν σταθεροί κατά τη σύγκριση των εναλλακτικών επιλογών.

Η ενεργειακή αξιολόγηση συνδέεται επίσης με την έννοια της περιόδου αναφοράς. Η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας και εκπομπών αποκτά μεγαλύτερο νόημα όταν εξετάζεται σωρευτικά σε βάθος χρόνου. Για παράδειγμα, μια επιλογή με μέτρια ετήσια εξοικονόμηση μπορεί να έχει σημαντικό συνολικό όφελος σε περίοδο 30 ή 50 ετών. Αντίστοιχα, μια επιλογή με υψηλό αρχικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα πρέπει να αξιολογείται ως προς το αν και πότε η σωρευτική μείωση λειτουργικών εκπομπών αντισταθμίζει την αρχική επιβάρυνση. Έτσι, η ενεργειακή ανάλυση συνδέεται με την περιβαλλοντική αποτίμηση κύκλου ζωής.

Η μεθοδολογία πρέπει να λαμβάνει υπόψη και τον ρόλο της συμπεριφοράς των χρηστών. Η πραγματική κατανάλωση ενέργειας επηρεάζεται από τις θερμοκρασίες ρύθμισης, τη διάρκεια λειτουργίας των συστημάτων, τη χρήση ανοιγμάτων, τη χρήση σκιάσεων, τη συντήρηση των εγκαταστάσεων και τις συνήθειες των ενοίκων. Επειδή οι παράγοντες αυτοί δεν μπορούν να προσδιοριστούν με απόλυτη ακρίβεια σε επίπεδο μεθοδολογίας, πρέπει να υιοθετούνται τυπικές παραδοχές χρήσης και να εφαρμόζονται με

συνέπεια σε όλα τα σενάρια. Με αυτόν τον τρόπο η σύγκριση παραμένει δίκαιη, ακόμη και αν οι απόλυτες τιμές περιέχουν αβεβαιότητα.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην αποφυγή διπλομέτρησης της εξοικονόμησης. Όταν συνδυάζονται περισσότερες τεχνικές επιλογές, η συνολική εξοικονόμηση δεν ισούται πάντοτε με το απλό άθροισμα των επιμέρους εξοικονομήσεων. Για παράδειγμα, η βελτίωση του κελύφους μειώνει ήδη τη θερμική ζήτηση, επομένως μια επόμενη επιλογή που επηρεάζει το ίδιο ενεργειακό φορτίο μπορεί να έχει μικρότερη πρόσθετη επίδραση. Για τον λόγο αυτό, τα συνδυαστικά σενάρια πρέπει να υπολογίζονται με προσοχή και, όπου απαιτείται, να εφαρμόζεται συντελεστής προσαρμογής ώστε να αποφεύγεται η υπερεκτίμηση του οφέλους.

Η ενεργειακή αποτίμηση θα οργανωθεί στο υπολογιστικό μοντέλο με τρόπο που να επιτρέπει την εισαγωγή βασικών παραμέτρων και την αυτόματη παραγωγή δεικτών. Για κάθε τεχνική επιλογή θα μπορούν να εισάγονται η επιφάνεια ή ποσότητα εφαρμογής, η εκτιμώμενη εξοικονόμηση ενέργειας, η τιμή ενέργειας, ο συντελεστής εκπομπών και η διάρκεια ζωής. Το αρχείο θα υπολογίζει την ετήσια εξοικονόμηση, το οικονομικό όφελος, τη μείωση λειτουργικών εκπομπών και τη σωρευτική επίδραση στην περίοδο αναφοράς. Έτσι, η ενεργειακή ανάλυση θα συνδέεται άμεσα με την κοστολόγηση και με την περιβαλλοντική αξιολόγηση.

**Πίνακας 0.9 Ενδεικτική δομή ενεργειακών υπολογισμών στο υπολογιστικό μοντέλο**

| Παράμετρος                | Μονάδα                     | Χρήση στον υπολογισμό                                  |
|---------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------|
| Ποσότητα εφαρμογής        | m <sup>2</sup> , m, τεμ.   | Συνδέει την τεχνική επιλογή με τις επιμετρήσεις        |
| Αρχική κατανάλωση         | kWh/έτος                   | Βάση σύγκρισης της υφιστάμενης κατάστασης              |
| Εκτιμώμενη εξοικονόμηση   | kWh/έτος ή %               | Υπολογίζει τη μείωση κατανάλωσης                       |
| Τιμή ενέργειας            | €/kWh                      | Υπολογίζει το οικονομικό όφελος                        |
| Συντελεστής εκπομπών      | kg CO <sub>2</sub> eq/kWh  | Υπολογίζει τις λειτουργικές εκπομπές                   |
| Διάρκεια ζωής επιλογής    | έτη                        | Συνδέει την ετήσια επίδραση με την περίοδο αξιολόγησης |
| Ετήσιο οικονομικό όφελος  | €/έτος                     | Χρησιμοποιείται στην οικονομική αξιολόγηση             |
| Ετήσια μείωση εκπομπών    | kg CO <sub>2</sub> eq/έτος | Χρησιμοποιείται στην περιβαλλοντική αξιολόγηση         |
| Σωρευτική μείωση εκπομπών | kg CO <sub>2</sub> eq      | Υπολογίζεται για την περίοδο αναφοράς                  |

Η ενεργειακή αξιολόγηση πρέπει να παρουσιάζει με σαφήνεια τα όρια και τις παραδοχές της. Δεν αρκεί να αναφερθεί μια τελική τιμή εξοικονόμησης. Πρέπει να τεκμηριώνεται από ποια επιφάνεια, ποια τεχνική επιλογή, ποιον συντελεστή και ποια

περίοδο προκύπτει. Η διαφάνεια αυτή είναι απαραίτητη, επειδή οι ενεργειακές εκτιμήσεις σε υφιστάμενα κτίρια περιέχουν αβεβαιότητες που σχετίζονται με την πραγματική χρήση, την κατάσταση των υλικών, τη συντήρηση και τις κλιματικές συνθήκες. Η καταγραφή των παραδοχών επιτρέπει την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων και τη μελλοντική αναπροσαρμογή τους, εφόσον προκύψουν ακριβέστερα στοιχεία.

Συνολικά, οι ενεργειακοί δείκτες και οι βιοκλιματικές παράμετροι αποτελούν τον συνδυαστικό κρίκο μεταξύ της γεωμετρικής επιμέτρησης και της αξιολόγησης των τεχνικών επιλογών. Η γεωμετρία του κτιρίου καθορίζει τις επιφάνειες και τις ποσότητες. Οι βιοκλιματικές παράμετροι καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι επιφάνειες αυτές επηρεάζουν τη λειτουργική συμπεριφορά. Οι ενεργειακοί δείκτες μετατρέπουν την επίδραση αυτή σε μετρήσιμα μεγέθη, όπως kWh, ευρώ και kg CO<sub>2</sub>eq. Με αυτόν τον τρόπο, η ανάλυση μπορεί να αξιολογήσει τεχνικές επιλογές όχι μόνο ως κατασκευαστικές επεμβάσεις, αλλά ως παρεμβάσεις που επηρεάζουν τη συνολική ενεργειακή και περιβαλλοντική επίδοση του κτιρίου.

#### **4.6 Περιβαλλοντικοί δείκτες υλικών και λειτουργικών εκπομπών**

Η περιβαλλοντική αποτίμηση του κτιρίου μελέτης οργανώνεται με σκοπό τη σύνδεση των επιμετρημένων ποσοτήτων, της λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας και των τεχνικών επιλογών με μετρήσιμους δείκτες περιβαλλοντικής επίδοσης. Η ανάλυση δεν περιορίζεται στην εκτίμηση της ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη χρήση του κτιρίου, αλλά επεκτείνεται και στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα των υλικών που έχουν ενσωματωθεί ή ενδέχεται να ενσωματωθούν σε τεχνικές επιλογές βελτίωσης. Με τον τρόπο αυτό, η αξιολόγηση αποκτά λογική κύκλου ζωής και επιτρέπει τη συνεκτίμηση δύο κρίσιμων παραμέτρων: των λειτουργικών εκπομπών που προκύπτουν από τη χρήση ενέργειας και των ενσωματωμένων εκπομπών που σχετίζονται με την παραγωγή, μεταφορά, εφαρμογή, συντήρηση και αντικατάσταση υλικών.

Η μεθοδολογική βάση της περιβαλλοντικής αξιολόγησης στηρίζεται στις αρχές της Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής, Life Cycle Assessment, όπως αυτές περιγράφονται στα ISO 14040 και ISO 14044. Το ISO 14040 καθορίζει το γενικό πλαίσιο της LCA, το οποίο περιλαμβάνει τον καθορισμό σκοπού και πεδίου εφαρμογής, την απογραφή κύκλου ζωής,

την εκτίμηση επιπτώσεων και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Το ISO 14044 εξειδικεύει τις απαιτήσεις και τις κατευθυντήριες οδηγίες για την εφαρμογή της LCA, συμπεριλαμβανομένων των ορίων συστήματος, της απογραφής και της αξιολόγησης επιπτώσεων (International Organization for Standardization [ISO], 2006a, 2006b).

Στην περίπτωση των κτιρίων, η περιβαλλοντική αποτίμηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη ότι το κτίριο είναι ένα σύνθετο τεχνικό σύστημα, το οποίο αποτελείται από πολλά διαφορετικά υλικά και στοιχεία με διαφορετική διάρκεια ζωής. Το EN 15978 παρέχει μεθοδολογία υπολογισμού για την αποτίμηση της περιβαλλοντικής επίδοσης κτιρίων σε όλο τον κύκλο ζωής, με βάση LCA και ποσοτικοποιημένη περιβαλλοντική πληροφορία. Η σημασία του προτύπου είναι ότι μεταφέρει τη λογική της LCA από το επίπεδο του προϊόντος στο επίπεδο του συνολικού κτιρίου, όπου οι ποσότητες, τα σενάρια χρήσης, οι αντικαταστάσεις και τα όρια συστήματος επηρεάζουν καθοριστικά το αποτέλεσμα (European Committee for Standardization [CEN], 2026).

Ο βασικός δείκτης που χρησιμοποιείται στην παρούσα περιβαλλοντική αποτίμηση είναι το Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη, Global Warming Potential, GWP. Ο δείκτης αυτός εκφράζεται σε kg CO<sub>2</sub>eq και αποτυπώνει τη συμβολή των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην κλιματική αλλαγή. Η χρήση του CO<sub>2</sub>eq επιτρέπει τη μετατροπή διαφορετικών αερίων του θερμοκηπίου σε κοινή μονάδα, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση και άθροιση των επιπτώσεων. Το πλαίσιο Level(s) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής χρησιμοποιεί τον δείκτη 1.2 για το life-cycle GWP των κτιρίων, με έκφραση των αποτελεσμάτων σε kg CO<sub>2</sub>eq ανά m<sup>2</sup> επιφάνειας αναφοράς και με διάκριση των σταδίων κύκλου ζωής (Dodd et al., 2021).

Στην παρούσα εργασία, το GWP χρησιμοποιείται τόσο για τα υλικά όσο και για τη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας. Για τα υλικά, ο δείκτης εκφράζει τις ενσωματωμένες εκπομπές που συνδέονται με την παραγωγή και, όπου υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα, με τη μεταφορά, την εγκατάσταση, τη συντήρηση, την αντικατάσταση και το τέλος ζωής. Για τη λειτουργία του κτιρίου, ο δείκτης εκφράζει τις εκπομπές που προκύπτουν από την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό, ζεστό νερό χρήσης και λοιπές χρήσεις. Η παράλληλη αποτίμηση αυτών των δύο κατηγοριών είναι απαραίτητη, διότι ένα μέτρο βελτίωσης μπορεί να μειώνει τη λειτουργική κατανάλωση, αλλά ταυτόχρονα να αυξάνει τις ενσωματωμένες εκπομπές λόγω των νέων υλικών που απαιτούνται.

Η περιβαλλοντική ανάλυση οργανώνεται με βάση τη διάκριση μεταξύ ενσωματωμένου και λειτουργικού ανθρακικού αποτυπώματος. Το ενσωματωμένο αποτύπωμα αφορά τις εκπομπές που συνδέονται με τα υλικά και τις κατασκευαστικές διεργασίες. Περιλαμβάνει, κατά περίπτωση, την εξόρυξη και επεξεργασία πρώτων υλών, τη βιομηχανική παραγωγή, τη μεταφορά, την εφαρμογή στο έργο, τη συντήρηση, τις αντικαταστάσεις και το τέλος ζωής. Το λειτουργικό αποτύπωμα αφορά τις εκπομπές από την ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη χρήση του κτιρίου. Το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα προκύπτει από τη συνεκτίμηση των δύο αυτών συνιστωσών.

**Συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα = Ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα +  
Λειτουργικό ανθρακικό αποτύπωμα**

Η διάκριση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία σε υφιστάμενα κτίρια. Σε ένα κτίριο κατασκευής του 1987, όπως το κτίριο μελέτης, τα υλικά του αρχικού φέροντος οργανισμού και του κελύφους έχουν ήδη ενσωματωθεί στο κτίριο. Ωστόσο, η καταγραφή τους είναι χρήσιμη για την κατανόηση της κατασκευαστικής μάζας και της συνολικής περιβαλλοντικής ταυτότητας του κτιρίου. Αντίθετα, οι νέες τεχνικές επιλογές που μπορεί να εξεταστούν σε σενάρια βελτίωσης έχουν πρόσθετο ενσωματωμένο αποτύπωμα, το οποίο πρέπει να υπολογίζεται και να συγκρίνεται με τη μείωση των λειτουργικών εκπομπών που αυτές επιτυγχάνουν.

Οι Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντων, Environmental Product Declarations, αποτελούν βασική πηγή περιβαλλοντικών δεδομένων για τα δομικά προϊόντα. Το EN 15804+A2:2019 καθορίζει τους βασικούς κανόνες κατηγορίας προϊόντων για δηλώσεις τύπου III σε κατασκευαστικά προϊόντα και υπηρεσίες, παρέχοντας κοινή δομή και μεθοδολογική βάση για τη δήλωση περιβαλλοντικών επιπτώσεων (CEN, 2019). Οι EPD είναι ιδιαίτερα χρήσιμες επειδή παρέχουν συντελεστές περιβαλλοντικού αποτυπώματος ανά μονάδα προϊόντος, όπως kg CO<sub>2</sub>eq/kg, kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> ή kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup>, οι οποίοι μπορούν να συνδεθούν με τις επιμετρημένες ποσότητες του κτιρίου.

Η χρήση EPD δεν πρέπει να γίνεται μηχανικά. Κάθε συντελεστής πρέπει να ελέγχεται ως προς τη μονάδα μέτρησης, το προϊόν στο οποίο αντιστοιχεί, τα στάδια κύκλου ζωής που καλύπτει, τη γεωγραφική αντιπροσωπευτικότητα, τη χρονική ισχύ και την τεχνολογική συνάφεια. Το EN 15941:2024 υποστηρίζει την αξιολόγηση και επιλογή

δεδομένων για EPD προϊόντων σύμφωνα με το EN 15804 και για την περιβαλλοντική αξιολόγηση κτιρίων σύμφωνα με το EN 15978, με έμφαση στην ποιότητα και καταλληλότητα των δεδομένων (CEN, 2024).

Στην παρούσα εργασία, οι περιβαλλοντικοί συντελεστές μπορούν να προέρχονται από τέσσερις βασικές κατηγορίες πηγών. Η πρώτη και προτιμητέα κατηγορία είναι οι EPD συγκεκριμένων προϊόντων, όταν υπάρχει διαθέσιμη δήλωση για υλικό που αντιστοιχεί στην τεχνική επιλογή της μελέτης. Η δεύτερη είναι οι μέσες EPD ή οι αντιπροσωπευτικές δηλώσεις ομάδων προϊόντων. Η τρίτη είναι γενικές βάσεις δεδομένων LCA ή αναγνωρισμένες βιβλιογραφικές πηγές. Η τέταρτη είναι τεκμηριωμένες παραδοχές, όταν δεν υπάρχει διαθέσιμο προϊόν ή ακριβές δεδομένο. Η ιεράρχηση αυτή είναι απαραίτητη ώστε τα αποτελέσματα να έχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αξιοπιστία και διαφάνεια.

**Πίνακας 4.0.10 Ιεράρχηση πηγών περιβαλλοντικών συντελεστών**

| Βαθμίδα | Πηγή δεδομένων                             | Επίπεδο αξιοπιστίας | Εφαρμογή στην εργασία                                                            |
|---------|--------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | EPD συγκεκριμένου προϊόντος                | Υψηλό               | Όταν είναι γνωστό ή επιλέγεται συγκεκριμένο προϊόν                               |
| 2       | Μέση EPD ομάδας προϊόντων                  | Μέτριο έως υψηλό    | Όταν δεν υπάρχει ειδική EPD, αλλά υπάρχει αντιπροσωπευτική δήλωση                |
| 3       | Γενική βάση δεδομένων ή βιβλιογραφική τιμή | Μέτριο              | Για προκαταρκτική ή συγκριτική αξιολόγηση                                        |
| 4       | Τεκμηριωμένη παραδοχή                      | Χαμηλότερο          | Όταν δεν υπάρχει διαθέσιμο δεδομένο και απαιτείται σαφής επισήμανση αβεβαιότητας |

Η περιβαλλοντική επιβάρυνση των υλικών υπολογίζεται με βάση την ποσότητα κάθε υλικού και τον αντίστοιχο περιβαλλοντικό συντελεστή. Η γενική σχέση είναι:

$$\text{Ενσωματωμένο GWP υλικού} = \text{Ποσότητα υλικού} \times \text{Συντελεστής GWP υλικού}$$

όπου η ποσότητα μπορεί να εκφράζεται σε kg, m<sup>2</sup>, m<sup>3</sup> ή τεμάχια, ανάλογα με το είδος του υλικού και τη μονάδα του συντελεστή. Η ορθή αντιστοίχιση μονάδων είναι κρίσιμη. Για παράδειγμα, αν ένας συντελεστής θερμομονωτικού υλικού δίνεται σε kg CO<sub>2</sub>eq/kg και η επιμέτρηση έχει γίνει σε m<sup>2</sup>, πρέπει να χρησιμοποιηθούν το πάχος και η πυκνότητα του υλικού για να μετατραπεί η επιφάνεια σε μάζα. Αντίστοιχα, για υλικά που επιμετρώνται σε m<sup>3</sup>, όπως σκυρόδεμα ή τοιχοποιίες, ο συντελεστής πρέπει να είναι συμβατός με τη μονάδα όγκου ή να μετατρέπεται με βάση την πυκνότητα.

Οι βασικές κατηγορίες υλικών που συνδέονται με την περιβαλλοντική αποτίμηση του κτιρίου είναι ο φέρων οργανισμός από οπλισμένο σκυρόδεμα, οι τοιχοποιίες, τα πάνελ του ισογείου, τα εξωτερικά κουφώματα, οι υαλοπίνακες, τα υλικά δαπέδων, οι επενδύσεις λουτρών, οι στεγανώσεις, τα κιγκλιδώματα, τα στοιχεία κλιμακοστασίου και τα υλικά πιθανών μελλοντικών τεχνικών επιλογών. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στα στοιχεία που έχουν μεγάλη ποσότητα ή υψηλό συντελεστή GWP. Για παράδειγμα, το σκυρόδεμα έχει μεγάλη συμμετοχή λόγω όγκου, ενώ το αλουμίνιο μπορεί να έχει σημαντική συμμετοχή λόγω υψηλής ενεργειακής έντασης παραγωγής, ακόμη και όταν η ποσότητά του είναι μικρότερη.

**Πίνακας 4.0.11 Ενδεικτική δομή περιβαλλοντικών δεδομένων υλικών**

| Κατηγορία υλικού        | Μονάδα επιμέτρησης                          | Περιβαλλοντικός συντελεστής                                                 | Κύρια χρήση στον υπολογισμό                   |
|-------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Σκυρόδεμα               | m <sup>3</sup>                              | kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>                                        | Φέρων οργανισμός και θεμελίωση                |
| Χάλυβας οπλισμού        | kg                                          | kg CO <sub>2</sub> eq/kg                                                    | Οπλισμός σκυροδέματος                         |
| Τοιχοποιίες             | m <sup>2</sup> ή m <sup>3</sup>             | kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> ή kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> | Εξωτερικοί και εσωτερικοί τοίχοι              |
| Πάνελ ισογείου          | m <sup>2</sup>                              | kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>                                        | Βοηθητικοί χώροι ισογείου                     |
| Αλουμίνιο κουφωμάτων    | kg ή m <sup>2</sup>                         | kg CO <sub>2</sub> eq/kg ή kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>             | Πλαίσια κουφωμάτων                            |
| Υαλοπίνακες             | m <sup>2</sup>                              | kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>                                        | Εξωτερικά ανοίγματα                           |
| Κεραμικά πλακίδια       | m <sup>2</sup>                              | kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>                                        | Δάπεδα και επενδύσεις                         |
| Μάρμαρο                 | m <sup>2</sup> ή m <sup>3</sup>             | kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> ή kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> | Κλιμακοστάσιο                                 |
| Χάλυβας κιγκλιδωμάτων   | kg ή m                                      | kg CO <sub>2</sub> eq/kg ή kg CO <sub>2</sub> eq/m                          | Κιγκλιδώματα προβόλων και σκάλας              |
| Υλικά τεχνικών επιλογών | m <sup>2</sup> , m <sup>3</sup> , kg ή τεμ. | Ανάλογα με το προϊόν                                                        | Περιβαλλοντική αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων |

Η λειτουργική περιβαλλοντική επίδοση υπολογίζεται με βάση την ετήσια κατανάλωση ενέργειας και τον συντελεστή εκπομπών του αντίστοιχου ενεργειακού φορέα. Η γενική σχέση είναι:

$$\text{Λειτουργικές εκπομπές} = \text{Κατανάλωση ενέργειας} \times \text{Συντελεστής εκπομπών}$$

όπου η κατανάλωση ενέργειας εκφράζεται σε kWh/έτος και ο συντελεστής εκπομπών σε kg CO<sub>2</sub>eq/kWh. Η σχέση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί χωριστά για κάθε ενεργειακή χρήση, όπως θέρμανση, ψύξη, ζεστό νερό χρήσης, φωτισμός και λοιπές καταναλώσεις. Εάν χρησιμοποιούνται διαφορετικοί ενεργειακοί φορείς, όπως ηλεκτρική ενέργεια και καύσιμο

κεντρικής θέρμανσης, πρέπει να εφαρμόζεται διαφορετικός συντελεστής εκπομπών για κάθε φορέα.

Η επιλογή του συντελεστή εκπομπών είναι κρίσιμη παραδοχή. Για την ηλεκτρική ενέργεια, ο συντελεστής εκπομπών εξαρτάται από το ενεργειακό μείγμα παραγωγής και μπορεί να μεταβάλλεται με τον χρόνο, καθώς αυξάνεται η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών και μειώνεται η συμμετοχή ορυκτών καυσίμων. Για καύσιμα θέρμανσης, ο συντελεστής σχετίζεται με το είδος του καυσίμου και την απόδοση του συστήματος. Στο υπολογιστικό μοντέλο, οι συντελεστές αυτοί πρέπει να καταγράφονται ως ξεχωριστές παραδοχές, ώστε να μπορούν να ελεγχθούν και να τροποποιηθούν σε ανάλυση ευαισθησίας.

Η μείωση λειτουργικών εκπομπών υπολογίζεται από την εξοικονόμηση ενέργειας:

**Μείωση λειτουργικών εκπομπών = Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας × Συντελεστής εκπομπών**

Η σχέση αυτή είναι απαραίτητη για τη σύγκριση τεχνικών επιλογών, διότι μετατρέπει την ενεργειακή εξοικονόμηση σε περιβαλλοντικό όφελος. Για παράδειγμα, μία επιλογή που μειώνει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά συγκεκριμένες kWh/έτος μπορεί να μεταφραστεί σε ετήσια αποφυγή εκπομπών CO<sub>2</sub>eq. Το όφελος αυτό μπορεί στη συνέχεια να συγκριθεί με το ενσωματωμένο GWP των υλικών που απαιτούνται για την υλοποίηση της επιλογής.

Η έννοια του περιβαλλοντικού χρόνου απόσβεσης είναι ιδιαίτερα σημαντική. Ο δείκτης αυτός εκφράζει τον χρόνο που απαιτείται ώστε η ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών να αντισταθμίσει το πρόσθετο ενσωματωμένο αποτύπωμα μιας τεχνικής επιλογής. Η γενική σχέση είναι:

**Περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης = Ενσωματωμένο GWP επιλογής / Ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών**

Αν ο περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης είναι μικρός, η επιλογή αποδίδει γρήγορα καθαρό περιβαλλοντικό όφελος. Αν είναι μεγάλος, τότε πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά αν η επιλογή είναι πράγματι περιβαλλοντικά συμφέρουσα μέσα στην περίοδο αναφοράς. Ο δείκτης αυτός είναι πολύ χρήσιμος για την αξιολόγηση λύσεων που έχουν

υψηλό αρχικό ενσωματωμένο αποτύπωμα, αλλά υπόσχονται σημαντική λειτουργική εξοικονόμηση.

Η καθαρή μείωση εκπομπών σε περίοδο αναφοράς υπολογίζεται ως:

**Καθαρή μείωση εκπομπών = Σωρευτική μείωση λειτουργικών εκπομπών –  
Ενσωματωμένο GWP επιλογής**

όπου:

**Σωρευτική μείωση λειτουργικών εκπομπών = Ετήσια μείωση λειτουργικών  
εκπομπών × Διάρκεια αξιολόγησης**

Η σχέση αυτή επιτρέπει να αποτιμηθεί αν μια τεχνική επιλογή οδηγεί σε πραγματική μείωση συνολικών εκπομπών μέσα στην εξεταζόμενη περίοδο. Η χρήση περιόδου αναφοράς, όπως 50 έτη, είναι συμβατή με τη λογική του Level(s) για το life-cycle GWP των κτιρίων (Dodd et al., 2021). Σε περίπτωση που η διάρκεια ζωής μιας τεχνικής επιλογής είναι μικρότερη από την περίοδο αναφοράς, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πιθανές αντικαταστάσεις.

Η διάρκεια ζωής των υλικών και των τεχνικών στοιχείων επηρεάζει σημαντικά την περιβαλλοντική αποτίμηση. Ένα υλικό με χαμηλό αρχικό GWP αλλά μικρή διάρκεια ζωής μπορεί να χρειαστεί περισσότερες αντικαταστάσεις και να εμφανίσει τελικά μεγαλύτερο συνολικό αποτύπωμα. Αντίθετα, ένα υλικό με υψηλότερο αρχικό αποτύπωμα αλλά μεγάλη διάρκεια ζωής μπορεί να είναι περιβαλλοντικά ανταγωνιστικό όταν εξετάζεται σε βάθος χρόνου. Για τον λόγο αυτό, στο Excel πρέπει να υπάρχει πεδίο διάρκειας ζωής και αριθμού αντικαταστάσεων για κάθε υλικό ή τεχνική επιλογή.

Ο αριθμός αντικαταστάσεων μπορεί να υπολογιστεί με βάση την περίοδο αναφοράς και τη διάρκεια ζωής του στοιχείου. Η γενική λογική είναι ότι, εάν η διάρκεια ζωής ενός στοιχείου είναι μικρότερη από την περίοδο αξιολόγησης, το υλικό θα πρέπει να υπολογιστεί περισσότερες από μία φορές. Η ακριβής διατύπωση του υπολογισμού πρέπει να γίνεται προσεκτικά, ώστε να μη μετράται ως αντικατάσταση η αρχική τοποθέτηση. Στο υπολογιστικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί διακριτή στήλη για αρχική ποσότητα, αριθμό αντικαταστάσεων και συνολική ποσότητα κύκλου ζωής.

**Πίνακας 4.0.12 Περιβαλλοντικοί δείκτες αξιολόγησης**

| Δείκτης                             | Μονάδα                                            | Ερμηνεία                                             |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Ενσωματωμένο GWP υλικού             | kg CO <sub>2</sub> eq                             | Εκπομπές που συνδέονται με υλικό ή προϊόν            |
| Ενσωματωμένο GWP ανά m <sup>2</sup> | kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>              | Εκπομπές ανά επιφάνεια εφαρμογής ή επιφάνεια κτιρίου |
| Ετήσιες λειτουργικές εκπομπές       | kg CO <sub>2</sub> eq/έτος                        | Εκπομπές από τη χρήση ενέργειας                      |
| Μείωση λειτουργικών εκπομπών        | kg CO <sub>2</sub> eq/έτος                        | Ετήσιο περιβαλλοντικό όφελος                         |
| Σωρευτική μείωση εκπομπών           | kg CO <sub>2</sub> eq                             | Όφελος στην περίοδο αναφοράς                         |
| Καθαρό περιβαλλοντικό όφελος        | kg CO <sub>2</sub> eq                             | Όφελος μετά την αφαίρεση του ενσωματωμένου GWP       |
| Περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης    | έτη                                               | Χρόνος αντιστάθμισης του ενσωματωμένου GWP           |
| GWP ανά μονάδα κόστους              | kg CO <sub>2</sub> eq/€ ή €/kg CO <sub>2</sub> eq | Σύνδεση περιβαλλοντικής και οικονομικής επίδοσης     |

Η σύνδεση περιβαλλοντικών και οικονομικών δεικτών είναι απαραίτητη, επειδή οι τεχνικές επιλογές αξιολογούνται όχι μόνο με βάση το περιβαλλοντικό τους αποτέλεσμα, αλλά και με βάση το κόστος εφαρμογής. Ένας χρήσιμος δείκτης είναι το κόστος ανά kg CO<sub>2</sub>eq που αποφεύγεται:

**Κόστος ανά kg CO<sub>2</sub>eq που αποφεύγεται = Συνολικό κόστος επιλογής / Καθαρή μείωση εκπομπών**

Ο δείκτης αυτός δείχνει πόσο κοστίζει η αποφυγή μιας μονάδας εκπομπών και μπορεί να υποστηρίξει τη συγκριτική αξιολόγηση τεχνικών επιλογών. Δεν αντικαθιστά την τεχνική κρίση, αλλά προσφέρει ένα πρόσθετο κριτήριο λήψης απόφασης. Μια επιλογή μπορεί να έχει υψηλή περιβαλλοντική απόδοση αλλά πολύ υψηλό κόστος, ενώ μια άλλη μπορεί να έχει μικρότερο απόλυτο όφελος αλλά καλύτερη σχέση κόστους προς περιβαλλοντική επίδοση.

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός επηρεάζει άμεσα τη σχέση ενσωματωμένων και λειτουργικών εκπομπών. Οι βιοκλιματικές αρχές επιδιώκουν τη μείωση της ζήτησης ενέργειας μέσω παθητικών μηχανισμών, όπως η θερμική προστασία, η σκίαση, ο φυσικός αερισμός, ο φυσικός φωτισμός, η αξιοποίηση ή ο έλεγχος των ηλιακών κερδών και η θερμική μάζα. Όταν αυτές οι αρχές εφαρμόζονται ορθά, μειώνεται η ανάγκη λειτουργίας μηχανολογικών συστημάτων και συνεπώς περιορίζονται οι λειτουργικές εκπομπές. Ωστόσο, η εφαρμογή ορισμένων βιοκλιματικών επιλογών απαιτεί υλικά και

κατασκευαστικές εργασίες, επομένως η τελική αξιολόγηση πρέπει να ελέγχει τη σχέση μεταξύ πρόσθετου ενσωματωμένου αποτυπώματος και λειτουργικής εξοικονόμησης.

Η απουσία βιοκλιματικού σχεδιασμού στο αρχικό κτίριο έχει περιβαλλοντική επίπτωση κυρίως μέσω της αυξημένης λειτουργικής ενέργειας. Ένα κέλυφος με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία, παλαιά κουφώματα, περιορισμένη αεροστεγανότητα και απουσία οργανωμένης ηλιακής προστασίας οδηγεί σε μεγαλύτερες ανάγκες θέρμανσης και ψύξης. Η αυξημένη χρήση συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και ηλεκτρικών συσκευών οδηγεί σε υψηλότερες λειτουργικές εκπομπές. Συνεπώς, η περιβαλλοντική αποτίμηση των τεχνικών επιλογών πρέπει να αναδεικνύει όχι μόνο το κόστος και τα υλικά της αναβάθμισης, αλλά και το περιβαλλοντικό κόστος της διατήρησης της υφιστάμενης κατάστασης.

Στο υπολογιστικό μοντέλο, η περιβαλλοντική ανάλυση πρέπει να οργανώνεται με τρόπο που να διατηρεί τη διακριτή παρουσίαση των ενσωματωμένων και λειτουργικών εκπομπών. Για κάθε τεχνική επιλογή ή σενάριο πρέπει να υπολογίζονται ξεχωριστά το ενσωματωμένο GWP των υλικών, οι ετήσιες λειτουργικές εκπομπές πριν και μετά, η ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών, η σωρευτική μείωση στην περίοδο αναφοράς και το καθαρό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα. Η διάκριση αυτή αποτρέπει τη σύγχυση μεταξύ αρχικής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και μακροχρόνιου λειτουργικού οφέλους.

**Πίνακας 4.0.13 Δομή υπολογισμού περιβαλλοντικού αποτυπώματος στο Excel**

| Πεδίο                        | Περιεχόμενο                                | Χρήση                                  |
|------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|
| Κατηγορία στοιχείου          | Υλικό, δομικό στοιχείο ή τεχνική επιλογή   | Οργάνωση δεδομένων                     |
| Ποσότητα                     | Επιμετρημένη ποσότητα                      | Βάση υπολογισμού                       |
| Μονάδα                       | m <sup>2</sup> , m <sup>3</sup> , kg, τεμ. | Έλεγχος συμβατότητας                   |
| Συντελεστής GWP              | kg CO <sub>2</sub> eq ανά μονάδα           | Υπολογισμός ενσωματωμένου αποτυπώματος |
| Πηγή συντελεστή              | EPD, βάση δεδομένων ή βιβλιογραφία         | Τεκμηρίωση                             |
| Στάδια κύκλου ζωής           | A1–A3, A1–A5, A–C ή άλλο                   | Οριοθέτηση                             |
| Διάρκεια ζωής                | έτη                                        | Έλεγχος αντικαταστάσεων                |
| Ενσωματωμένο GWP             | kg CO <sub>2</sub> eq                      | Περιβαλλοντική επιβάρυνση υλικών       |
| Εξοικονόμηση ενέργειας       | kWh/έτος                                   | Λειτουργικό όφελος                     |
| Μείωση λειτουργικών εκπομπών | kg CO <sub>2</sub> eq/έτος                 | Περιβαλλοντικό όφελος χρήσης           |
| Καθαρό όφελος                | kg CO <sub>2</sub> eq                      | Τελική συγκριτική αξιολόγηση           |

Η ποιότητα των αποτελεσμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια των επιμετρήσεων και την καταλληλότητα των συντελεστών. Για τον λόγο αυτό, κάθε τελική τιμή πρέπει να μπορεί να ανιχνευθεί προς την πηγή της. Το Excel πρέπει να λειτουργεί ως πίνακας ιχνηλασιμότητας, δηλαδή να δείχνει από ποια ποσότητα, ποια μονάδα, ποιον συντελεστή και ποια παραδοχή προκύπτει κάθε αποτέλεσμα. Η λογική αυτή είναι συμβατή με τις απαιτήσεις διαφάνειας της LCA, όπου η ερμηνεία των αποτελεσμάτων συνδέεται άμεσα με την ποιότητα των δεδομένων και των παραδοχών.

Η ανάλυση πρέπει επίσης να περιλαμβάνει έλεγχο αβεβαιότητας. Οι σημαντικότερες πηγές αβεβαιότητας είναι οι περιβαλλοντικοί συντελεστές υλικών, οι συντελεστές εκπομπών ενέργειας, οι εκτιμήσεις εξοικονόμησης, η διάρκεια ζωής των τεχνικών στοιχείων και οι τιμές κόστους. Για παράδειγμα, διαφορετικές EPD για παρόμοια προϊόντα μπορεί να δίνουν διαφορετικές τιμές GWP λόγω διαφορετικής παραγωγικής τεχνολογίας, διαφορετικού ενεργειακού μείγματος ή διαφορετικών ορίων συστήματος. Αντίστοιχα, η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου, τη συμπεριφορά των χρηστών και τις πραγματικές κλιματικές συνθήκες.

Για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας μπορεί να εφαρμοστεί ανάλυση ευαισθησίας. Η ανάλυση αυτή εξετάζει πώς μεταβάλλεται το αποτέλεσμα όταν αλλάζουν κρίσιμες παράμετροι, όπως ο συντελεστής εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας, η τιμή ενέργειας, ο συντελεστής GWP βασικών υλικών ή η διάρκεια ζωής μιας τεχνικής επιλογής. Η ανάλυση ευαισθησίας δεν απαιτεί απαραίτητα πολύπλοκο μοντέλο. Μπορεί να γίνει με εναλλακτικές τιμές χαμηλής, μέσης και υψηλής εκτίμησης, ώστε να διαπιστωθεί αν η κατάταξη των επιλογών παραμένει σταθερή.

Η αναφορά των αποτελεσμάτων πρέπει να γίνεται με σαφή διάκριση μεταξύ απόλυτων τιμών και συγκριτικών συμπερασμάτων. Οι απόλυτες τιμές, όπως συνολικά kg CO<sub>2</sub>eq, είναι χρήσιμες, αλλά περιέχουν αβεβαιότητα λόγω των παραδοχών. Τα συγκριτικά συμπεράσματα είναι συχνά πιο αξιόπιστα, εφόσον όλα τα σενάρια υπολογίζονται με την ίδια μεθοδολογία, την ίδια περίοδο αναφοράς και τους ίδιους συντελεστές. Για τον λόγο αυτό, η εργασία πρέπει να δίνει έμφαση στη σύγκριση των τεχνικών επιλογών με κοινά κριτήρια και όχι στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων ως απολύτως ακριβών τιμών.

Στο επίπεδο των σταδίων κύκλου ζωής, η ανάλυση μπορεί να ξεκινήσει από τα στάδια παραγωγής A1–A3 για τα βασικά υλικά, επειδή αυτά είναι συνήθως τα πιο διαθέσιμα στις EPD και στους περιβαλλοντικούς συντελεστές. Όπου υπάρχουν επαρκή δεδομένα, μπορούν να προστεθούν τα στάδια μεταφοράς και κατασκευής A4–A5, καθώς και στάδια αντικατάστασης ή τέλους ζωής. Η ενότητα D, η οποία αφορά δυνητικά οφέλη και φορτία πέραν των ορίων του συστήματος, όπως ανακύκλωση ή επαναχρησιμοποίηση, πρέπει να παρουσιάζεται χωριστά και να μην συμψηφίζεται αδιαφανώς με τις επιπτώσεις των σταδίων A–C. Η διάκριση αυτή είναι συμβατή με τη λογική των ευρωπαϊκών προτύπων για την περιβαλλοντική αξιολόγηση κτιρίων και δομικών προϊόντων (CEN, 2019, 2026).

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση των λειτουργικών εκπομπών πρέπει να συνδέεται με τα ενεργειακά αποτελέσματα του προηγούμενου υποκεφαλαίου. Οι ενεργειακοί δείκτες παρέχουν τις kWh εξοικονόμησης, ενώ οι περιβαλλοντικοί δείκτες μετατρέπουν τις kWh σε kg CO<sub>2</sub>eq. Έτσι, η ενεργειακή και η περιβαλλοντική ανάλυση λειτουργούν συμπληρωματικά. Η πρώτη δείχνει πόση ενέργεια εξοικονομείται και η δεύτερη δείχνει ποιο είναι το αντίστοιχο κλιματικό όφελος.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η αποφυγή διπλής καταμέτρησης. Όταν ένα σενάριο περιλαμβάνει περισσότερες από μία τεχνικές επιλογές, η συνολική μείωση λειτουργικών εκπομπών δεν πρέπει να υπολογίζεται απλώς ως άθροισμα όλων των επιμέρους μειώσεων, εάν οι επιλογές επηρεάζουν τα ίδια ενεργειακά φορτία. Για παράδειγμα, δύο διαφορετικές επιλογές που μειώνουν τη ζήτηση ψύξης ενδέχεται να έχουν αλληλοεπικάλυψη. Το υπολογιστικό μοντέλο πρέπει να επιτρέπει την εφαρμογή συντελεστή προσαρμογής ή τη διακριτή διαμόρφωση συνδυαστικού σεναρίου, ώστε να αποφεύγεται η υπερεκτίμηση του περιβαλλοντικού οφέλους.

Η τελική παρουσίαση των περιβαλλοντικών αποτελεσμάτων πρέπει να γίνεται σε περισσότερα από ένα επίπεδα. Σε επίπεδο υλικού, παρουσιάζεται το GWP ανά κατηγορία υλικού. Σε επίπεδο τεχνικής επιλογής, παρουσιάζεται το ενσωματωμένο GWP, η μείωση λειτουργικών εκπομπών και ο περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης. Σε επίπεδο συνολικού σεναρίου, παρουσιάζεται το καθαρό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα στην περίοδο αναφοράς. Σε επίπεδο κτιρίου, μπορεί να παρουσιαστεί το αποτέλεσμα ανά m<sup>2</sup>, ώστε να υπάρχει δυνατότητα σύγκρισης με άλλες μελέτες ή με βιβλιογραφικά εύρη.

Συνολικά, οι περιβαλλοντικοί δείκτες υλικών και λειτουργικών εκπομπών αποτελούν βασικό εργαλείο σύνδεσης των επιμετρήσεων, των ενεργειακών υπολογισμών και της αξιολόγησης των τεχνικών επιλογών. Η χρήση του GWP σε kg CO<sub>2</sub>eq επιτρέπει την ποσοτική αποτύπωση τόσο των ενσωματωμένων όσο και των λειτουργικών εκπομπών. Η ορθή επιλογή συντελεστών, η διαφάνεια των παραδοχών, η διάκριση των σταδίων κύκλου ζωής και η ανάλυση ευαισθησίας είναι απαραίτητες προϋποθέσεις για την αξιοπιστία της μελέτης. Με αυτή τη μεθοδολογία, η αξιολόγηση του κτιρίου μπορεί να δείξει όχι μόνο ποιες τεχνικές επιλογές μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας, αλλά και ποιες οδηγούν σε πραγματική μείωση του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος σε βάθος χρόνου.

#### **4.7 Δομή σεναρίων και συγκριτική αξιολόγηση**

Η διαμόρφωση σεναρίων αποτελεί το τελικό στάδιο της μεθοδολογικής οργάνωσης και συνδέει τις επιμετρήσεις, τις τεχνικές παραδοχές, την κοστολόγηση, τους ενεργειακούς δείκτες και τους περιβαλλοντικούς συντελεστές σε ένα ενιαίο πλαίσιο αξιολόγησης. Τα σενάρια δεν αντιμετωπίζονται ως ανεξάρτητες τεχνικές προτάσεις, αλλά ως οργανωμένες εναλλακτικές προσεγγίσεις βελτίωσης της ενεργειακής και περιβαλλοντικής συμπεριφοράς του κτιρίου. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η σύγκριση της υφιστάμενης κατάστασης με διαφορετικά επίπεδα αναβάθμισης, από την παθητική και βιοκλιματική βελτίωση του κελύφους μέχρι την αναβάθμιση των τεχνικών συστημάτων και την ολοκληρωμένη συνδυαστική προσέγγιση.

Η συγκριτική αξιολόγηση βασίζεται στην υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου ως σενάριο αναφοράς. Το κτίριο κατασκευάστηκε το 1987 και χαρακτηρίζεται από εξωτερικές τοιχοποιίες με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία, παλαιά συρόμενα κουφώματα αλουμινίου με μονό υαλοπίνακα, απουσία οργανωμένων συστημάτων εξωτερικής σκίασης, υφιστάμενη κεντρική θέρμανση, ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες ανά διαμέρισμα και παλαιές ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις. Η κατάσταση αυτή αποτυπώνει ένα τυπικό αστικό κτίριο κατοικίας της συγκεκριμένης περιόδου, στο οποίο η ενεργειακή λειτουργία βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στα μηχανολογικά συστήματα και λιγότερο σε παθητικές στρατηγικές περιορισμού των φορτίων.

Η διαμόρφωση των σεναρίων ακολουθεί κλιμακωτή λογική. Αρχικά εξετάζεται η υφιστάμενη κατάσταση, ώστε να καθοριστεί η βάση σύγκρισης. Στη συνέχεια εξετάζεται σενάριο παθητικής και βιοκλιματικής αναβάθμισης, το οποίο εστιάζει στη μείωση της ενεργειακής ζήτησης μέσω του κελύφους και της ηλιακής προστασίας. Ακολουθεί σενάριο αναβάθμισης τεχνικών συστημάτων και παραγωγής ζεστού νερού χρήσης, το οποίο εστιάζει στη βελτίωση της απόδοσης των εγκαταστάσεων. Τέλος, διαμορφώνεται συνδυαστικό σενάριο, στο οποίο συνεξετάζονται οι αποδοτικότερες επιλογές από τις προηγούμενες κατηγορίες. Η δομή αυτή επιτρέπει να διακριθεί η συμβολή κάθε ομάδας παρεμβάσεων και να αξιολογηθεί αν η συνδυαστική προσέγγιση οδηγεί σε ουσιαστικά καλύτερο αποτέλεσμα.

**Πίνακας 4.0.14 Δομή σεναρίων αξιολόγησης**

| Σενάριο   | Χαρακτήρας                                    | Βασικός στόχος                                                            |
|-----------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Σενάριο 0 | Υφιστάμενη κατάσταση αναφοράς                 | Καταγραφή αρχικής ενεργειακής και περιβαλλοντικής συμπεριφοράς            |
| Σενάριο 1 | Παθητική και βιοκλιματική αναβάθμιση κελύφους | Μείωση ενεργειακής ζήτησης μέσω κελύφους, κουφωμάτων και σκίασης          |
| Σενάριο 2 | Αναβάθμιση τεχνικών συστημάτων και ΖΝΧ        | Βελτίωση απόδοσης εγκαταστάσεων και μείωση λειτουργικής κατανάλωσης       |
| Σενάριο 3 | Συνδυαστικό σενάριο βέλτιστης αναβάθμισης     | Ολοκληρωμένη βελτίωση κελύφους, εγκαταστάσεων και ενεργειακής λειτουργίας |

Σενάριο 0 αποτελεί την υφιστάμενη κατάσταση αναφοράς. Σε αυτό περιλαμβάνονται τα κατασκευαστικά και ενεργειακά χαρακτηριστικά του κτιρίου όπως αποτυπώθηκαν από τα σχέδια και τις τεχνικές παραδοχές. Το σενάριο αυτό δεν περιλαμβάνει παρεμβάσεις, αλλά λειτουργεί ως βάση για τον υπολογισμό των διαφορών που προκύπτουν από τα υπόλοιπα σενάρια. Για τον λόγο αυτό, όλες οι συγκρίσεις κόστους, εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης εκπομπών γίνονται σε σχέση με το Σενάριο 0.

Η σημασία του Σεναρίου 0 είναι μεθοδολογικά κρίσιμη. Χωρίς σαφή περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης, δεν μπορεί να προσδιοριστεί με αξιοπιστία το όφελος οποιασδήποτε τεχνικής επιλογής. Στο σενάριο αυτό καταγράφονται οι επιφάνειες του κελύφους, οι επιφάνειες των κουφωμάτων, το δώμα, οι υφιστάμενες εγκαταστάσεις, τα θερμαντικά σώματα, οι θερμοσίφωνες και τα βασικά στοιχεία λειτουργίας. Παράλληλα, αποτυπώνεται η έλλειψη ουσιαστικής βιοκλιματικής λογικής, όπως η ανεπαρκής

θερμομονωτική προστασία, η απουσία οργανωμένης σκίασης και η περιορισμένη δυνατότητα παθητικού ελέγχου της θερινής υπερθέρμανσης.

Το Σενάριο 1 αφορά την παθητική και βιοκλιματική αναβάθμιση του κελύφους. Η λογική του σεναρίου είναι ότι η ενεργειακή βελτίωση πρέπει να ξεκινά από τη μείωση της ζήτησης και όχι μόνο από την αντικατάσταση συστημάτων. Στο σενάριο αυτό εξετάζονται τεχνικές επιλογές που σχετίζονται με τη θερμική προστασία των εκτεθειμένων επιφανειών, τη βελτίωση των ανοιγμάτων και τον έλεγχο των ηλιακών κερδών. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη νότια όψη, επειδή αποτελεί την κύρια πρόσοψη του κτιρίου και δέχεται σημαντική ηλιακή ακτινοβολία. Η βιοκλιματική λογική του σεναρίου συνίσταται στην αξιοποίηση των ευνοϊκών συνθηκών κατά τη χειμερινή περίοδο και στον περιορισμό της υπερθέρμανσης κατά τη θερινή περίοδο.

Το Σενάριο 1 συνδέεται άμεσα με τις επιμετρήσεις του κελύφους. Οι εκτεθειμένες επιφάνειες τοιχοποιίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση θερμομονωτικών επιλογών, η επιφάνεια του δώματος για την αξιολόγηση λύσεων θερμικής προστασίας και στεγάνωσης, ενώ η επιφάνεια των εξωτερικών κουφωμάτων για τη μελέτη αντικατάστασης ή αναβάθμισης των υαλοστασίων και των πλαισίων. Επίσης, η απουσία υφιστάμενων σκιάστρων επιτρέπει την εξέταση επιλογών ηλιακής προστασίας ως καθαρής πρόσθετης παρέμβασης. Το σενάριο αυτό αναμένεται να μειώσει κυρίως τα θερμικά και ψυκτικά φορτία, άρα και τη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας.

Το Σενάριο 2 αφορά την αναβάθμιση τεχνικών συστημάτων και της παραγωγής ζεστού νερού χρήσης. Η λογική του σεναρίου είναι ότι, μετά την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης των εγκαταστάσεων, μπορεί να αξιολογηθεί η επίδραση αποδοτικότερων τεχνικών λύσεων στη λειτουργική κατανάλωση. Το κτίριο διαθέτει κεντρική θέρμανση αρχικής περιόδου κατασκευής και ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες ανά διαμέρισμα, χωρίς ηλιακά συστήματα παραγωγής ζεστού νερού. Επομένως, υπάρχει δυνατότητα διερεύνησης επιλογών που αφορούν τη θέρμανση, την ψύξη, το ζεστό νερό χρήσης, τον φωτισμό κοινόχρηστων χώρων και πιθανές λύσεις αυτοματισμού.

Το Σενάριο 2 διαφοροποιείται από το Σενάριο 1 επειδή δεν εστιάζει πρωτίστως στη μείωση των θερμικών φορτίων μέσω παθητικών μέτρων, αλλά στη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων που καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες. Η διάκριση αυτή

είναι σημαντική, διότι επιτρέπει να φανεί αν η βελτίωση των εγκαταστάσεων είναι επαρκής από μόνη της ή αν απαιτείται πρώτα η μείωση της ζήτησης μέσω κελύφους. Σε παλαιά κτίρια, η αποκλειστική αναβάθμιση συστημάτων μπορεί να μειώσει την κατανάλωση, αλλά δεν αντιμετωπίζει πλήρως τα προβλήματα θερμικής άνεσης, θερμικών απωλειών, θερινής υπερθέρμανσης και χαμηλής ποιότητας κελύφους.

Το Σενάριο 3 αποτελεί το συνδυαστικό σενάριο βέλτιστης αναβάθμισης. Σε αυτό συνεξετάζονται οι αποδοτικότερες επιλογές από τις δύο προηγούμενες κατηγορίες, με στόχο την ολοκληρωμένη βελτίωση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής συμπεριφοράς του κτιρίου. Η λογική του σεναρίου είναι ότι η μεγαλύτερη μείωση λειτουργικής κατανάλωσης και εκπομπών επιτυγχάνεται όταν η μείωση της ενεργειακής ζήτησης συνδυάζεται με την αποδοτική κάλυψη των υπολειπόμενων φορτίων. Με άλλα λόγια, το κτίριο πρώτα βελτιώνεται παθητικά και στη συνέχεια υποστηρίζεται από αποδοτικότερα τεχνικά συστήματα.

Το συνδυαστικό σενάριο επιτρέπει την αξιολόγηση της συνολικής σχέσης κόστους και οφέλους. Είναι πιθανό να έχει μεγαλύτερο αρχικό κόστος, επειδή περιλαμβάνει περισσότερες κατηγορίες εργασιών και υλικών. Ωστόσο, μπορεί να εμφανίσει μεγαλύτερη ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας, σημαντικότερη μείωση λειτουργικών εκπομπών και καλύτερη συνολική ενεργειακή συμπεριφορά. Η αξιολόγηση του Σεναρίου 3 πρέπει να γίνει με προσοχή, ώστε να αποφεύγεται η απλή άθροιση επιμέρους εξοικονομήσεων όταν οι παρεμβάσεις επηρεάζουν τα ίδια ενεργειακά φορτία. Για τον λόγο αυτό, στο υπολογιστικό μοντέλο προβλέπεται δυνατότητα προσαρμογής της συνολικής εξοικονόμησης μέσω συντελεστή συνδυασμού.

**Πίνακας 4.0.15 Ενδεικτική λογική αξιολόγησης ανά σενάριο**

| Σενάριο   | Κόστος εφαρμογής                            | Ενεργειακή επίδραση                              | Περιβαλλοντική επίδραση                                                         | Κύρια ερμηνεία                        |
|-----------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Σενάριο 0 | Μηδενικό πρόσθετο κόστος                    | Υψηλή υφιστάμενη κατανάλωση                      | Υψηλές λειτουργικές εκπομπές                                                    | Βάση σύγκρισης                        |
| Σενάριο 1 | Κόστος παθητικών και βιοκλιματικών επιλογών | Μείωση ζήτησης θέρμανσης και ψύξης               | Μείωση λειτουργικών εκπομπών με πρόσθετο ενσωματωμένο αποτύπωμα υλικών          | Έλεγχος συμβολής κελύφους και σκίασης |
| Σενάριο 2 | Κόστος τεχνικών συστημάτων                  | Βελτίωση απόδοσης εγκαταστάσεων                  | Μείωση λειτουργικών εκπομπών μέσω αποδοτικότερων συστημάτων                     | Έλεγχος συμβολής Η/Μ αναβάθμισης      |
| Σενάριο 3 | Υψηλότερο συνολικό κόστος                   | Συνδυαστική μείωση ζήτησης και βελτίωση απόδοσης | Μέγιστη δυνατή μείωση λειτουργικών εκπομπών, με αυξημένο ενσωματωμένο αποτύπωμα | Ολοκληρωμένη αξιολόγηση               |

Η συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων βασίζεται σε κοινή επιφάνεια αναφοράς, κοινή περίοδο αξιολόγησης και κοινές παραδοχές για τις τιμές ενέργειας, τους συντελεστές εκπομπών και τους περιβαλλοντικούς δείκτες υλικών. Η χρήση κοινών παραδοχών είναι απαραίτητη ώστε οι διαφορές μεταξύ των σεναρίων να οφείλονται στις τεχνικές επιλογές και όχι σε διαφορετική μεθοδολογική βάση. Για τον ίδιο λόγο, όλες οι επιμετρήσεις προέρχονται από το ίδιο αρχείο ποσοτήτων, το οποίο λειτουργεί ως ενιαία βάση εισόδου για το υπολογιστικό μοντέλο αξιολόγησης.

Η αξιολόγηση οργανώνεται σε τέσσερις βασικές ομάδες δεικτών: οικονομικούς, ενεργειακούς, περιβαλλοντικούς και συνδυαστικούς δείκτες. Οι οικονομικοί δείκτες περιλαμβάνουν το συνολικό κόστος εφαρμογής, το κόστος ανά m<sup>2</sup> παρέμβασης, την ετήσια οικονομική εξοικονόμηση και την απλή περίοδο αποπληρωμής. Οι ενεργειακοί δείκτες περιλαμβάνουν την ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας, την ειδική εξοικονόμηση ανά m<sup>2</sup> και το ποσοστό μείωσης της κατανάλωσης σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Οι περιβαλλοντικοί δείκτες περιλαμβάνουν το ενσωματωμένο GWP των υλικών, τη μείωση λειτουργικών εκπομπών, το καθαρό περιβαλλοντικό όφελος και τον περιβαλλοντικό χρόνο απόσβεσης. Οι συνδυαστικοί δείκτες συνδέουν το κόστος με την ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση.

**Πίνακας 4.0.16 Δείκτες συγκριτικής αξιολόγησης σεναρίων**

| Κατηγορία δείκτη        | Δείκτης                                          | Μονάδα                     |
|-------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------|
| Οικονομικοί δείκτες     | Συνολικό κόστος εφαρμογής                        | €                          |
| Οικονομικοί δείκτες     | Κόστος ανά επιφάνεια εφαρμογής                   | €/m <sup>2</sup>           |
| Οικονομικοί δείκτες     | Ετήσια οικονομική εξοικονόμηση                   | €/έτος                     |
| Οικονομικοί δείκτες     | Απλή περίοδος αποπληρωμής                        | έτη                        |
| Ενεργειακοί δείκτες     | Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας                    | kWh/έτος                   |
| Ενεργειακοί δείκτες     | Ειδική εξοικονόμηση ενέργειας                    | kWh/m <sup>2</sup> ·έτος   |
| Ενεργειακοί δείκτες     | Ποσοστό μείωσης κατανάλωσης                      | %                          |
| Περιβαλλοντικοί δείκτες | Ενσωματωμένο GWP τεχνικών επιλογών               | kg CO <sub>2</sub> eq      |
| Περιβαλλοντικοί δείκτες | Ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών              | kg CO <sub>2</sub> eq/έτος |
| Περιβαλλοντικοί δείκτες | Καθαρή μείωση εκπομπών στην περίοδο αναφοράς     | kg CO <sub>2</sub> eq      |
| Περιβαλλοντικοί δείκτες | Περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης                 | έτη                        |
| Συνδυαστικοί δείκτες    | Κόστος ανά kWh εξοικονόμησης                     | €/kWh                      |
| Συνδυαστικοί δείκτες    | Κόστος ανά kg CO <sub>2</sub> eq που αποφεύγεται | €/kg CO <sub>2</sub> eq    |

Η οικονομική αξιολόγηση κάθε σεναρίου βασίζεται στο συνολικό κόστος των επιμέρους τεχνικών επιλογών. Για κάθε επιλογή υπολογίζονται το κόστος υλικών, το

κόστος εργασίας και οι πρόσθετες δαπάνες, όπως αποξηλώσεις, βοηθητικά υλικά, μεταφορές, ικριώματα ή απρόβλεπτα, εφόσον απαιτούνται. Το συνολικό κόστος του σεναρίου προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους επιλογών:

**Συνολικό κόστος σεναρίου = Άθροισμα κόστους επιμέρους τεχνικών επιλογών**

Η ετήσια οικονομική εξοικονόμηση προκύπτει από την ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας και την τιμή της ενέργειας:

**Ετήσια εξοικονόμηση κόστους = Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας × Τιμή ενέργειας**

Η απλή περίοδος αποπληρωμής υπολογίζεται ως:

**Απλή περίοδος αποπληρωμής = Συνολικό κόστος σεναρίου / Ετήσια εξοικονόμηση κόστους**

Ο δείκτης αυτός δεν λαμβάνει υπόψη προεξόφληση, μεταβολή τιμών ενέργειας ή κόστος συντήρησης, ωστόσο παρέχει μια απλή και κατανοητή πρώτη εικόνα της οικονομικής βιωσιμότητας κάθε σεναρίου. Σε επόμενο στάδιο, εφόσον απαιτηθεί, μπορεί να εμπλουτιστεί με πιο σύνθετους οικονομικούς δείκτες.

Η ενεργειακή αξιολόγηση βασίζεται στη μείωση της κατανάλωσης σε σχέση με το Σενάριο 0. Η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας υπολογίζεται ως:

**Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας = Κατανάλωση Σεναρίου 0 – Κατανάλωση εξεταζόμενου σεναρίου**

Το ποσοστό εξοικονόμησης υπολογίζεται ως:

**Ποσοστό εξοικονόμησης = Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας / Κατανάλωση Σεναρίου 0 × 100**

Με τον τρόπο αυτό, κάθε σενάριο αξιολογείται ως προς τη σχετική του βελτίωση σε σύγκριση με την υφιστάμενη κατάσταση. Ο δείκτης αυτός είναι ιδιαίτερα χρήσιμος, διότι δείχνει αν μια τεχνική επιλογή έχει ουσιαστική ενεργειακή επίδραση ή περιορισμένη συμβολή.

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση περιλαμβάνει τόσο το πρόσθετο ενσωματωμένο αποτύπωμα των υλικών όσο και τη μείωση λειτουργικών εκπομπών. Το ενσωματωμένο GWP κάθε σεναρίου υπολογίζεται από τις ποσότητες των υλικών και τους αντίστοιχους περιβαλλοντικούς συντελεστές:

**Ενσωματωμένο GWP σεναρίου = Άθροισμα ποσότητας υλικού × Συντελεστή GWP υλικού**

Η μείωση λειτουργικών εκπομπών υπολογίζεται από την εξοικονόμηση ενέργειας:

**Μείωση λειτουργικών εκπομπών = Εξοικονόμηση ενέργειας × Συντελεστής εκπομπών ενεργειακού φορέα**

Η καθαρή μείωση εκπομπών στην περίοδο αναφοράς υπολογίζεται ως:

**Καθαρή μείωση εκπομπών = Σωρευτική μείωση λειτουργικών εκπομπών – Ενσωματωμένο GWP σεναρίου**

Η σχέση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή δείχνει αν το περιβαλλοντικό όφελος από τη μειωμένη λειτουργική κατανάλωση είναι μεγαλύτερο από την αρχική περιβαλλοντική επιβάρυνση των υλικών που χρησιμοποιούνται για την αναβάθμιση. Έτσι, αποφεύγεται η μονοδιάστατη αξιολόγηση με βάση μόνο την εξοικονόμηση ενέργειας ή μόνο το κόστος.

Ο περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης υπολογίζεται ως:

**Περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης = Ενσωματωμένο GWP σεναρίου / Ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών**

Ο δείκτης αυτός δείχνει σε πόσα έτη η μείωση των λειτουργικών εκπομπών αντισταθμίζει τις εκπομπές που δημιουργούνται από τα νέα υλικά και τις εργασίες. Όσο μικρότερος είναι ο περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης, τόσο πιο γρήγορα το σενάριο αποκτά καθαρό περιβαλλοντικό όφελος. Αντίθετα, αν ο χρόνος απόσβεσης προσεγγίζει ή υπερβαίνει τη διάρκεια ζωής της τεχνικής επιλογής, τότε το περιβαλλοντικό όφελος πρέπει να ερμηνεύεται με προσοχή.

Η βιοκλιματική διάσταση της αξιολόγησης είναι ουσιαστική. Το Σενάριο 1 εξετάζει τη δυνατότητα μείωσης της ζήτησης μέσω παθητικών στρατηγικών. Το Σενάριο 2 εξετάζει την ενεργειακή αποδοτικότητα των εγκαταστάσεων. Το Σενάριο 3 ελέγχει την ολοκληρωμένη λογική, σύμφωνα με την οποία ένα κτίριο πρέπει πρώτα να περιορίζει τις ανάγκες του και στη συνέχεια να καλύπτει τα υπολειπόμενα φορτία με αποδοτικά συστήματα. Η προσέγγιση αυτή είναι σημαντική διότι αναγνωρίζει ότι η καλύτερη ενεργειακή συμπεριφορά δεν προκύπτει μόνο από τον εξοπλισμό, αλλά από τη συνολική σχέση κτιρίου, κελύφους, κλίματος και χρήσης.

Η απουσία βιοκλιματικού σχεδιασμού στην υφιστάμενη κατάσταση λειτουργεί ως βασική αιτία αυξημένης ενεργειακής ζήτησης. Το ανεπαρκώς θερμομονωμένο κέλυφος, τα παλαιά κουφώματα, η απουσία σκίασης και ο περιορισμένος παθητικός έλεγχος του εσωτερικού περιβάλλοντος οδηγούν σε μεγαλύτερη εξάρτηση από μηχανολογικά συστήματα. Επομένως, η αξιολόγηση των σεναρίων πρέπει να αναδεικνύει όχι μόνο τη βελτίωση που επιτυγχάνεται μετά τις παρεμβάσεις, αλλά και το κόστος διατήρησης της υφιστάμενης κατάστασης σε επίπεδο ενέργειας, χρημάτων και εκπομπών.

Στο υπολογιστικό μοντέλο, κάθε σενάριο θα οργανωθεί σε ξεχωριστή καρτέλα ή σε ξεχωριστή ενότητα του ίδιου φύλλου. Για κάθε σενάριο θα εισάγονται οι επιμετρημένες ποσότητες που απαιτούνται, οι τιμές μονάδας, οι περιβαλλοντικοί συντελεστές, οι εκτιμώμενες ενεργειακές εξοικονομήσεις και οι συντελεστές εκπομπών. Τα αποτελέσματα θα μεταφέρονται σε συγκεντρωτική καρτέλα, όπου θα γίνεται η τελική σύγκριση. Η χρήση κοινής δομής για όλα τα σενάρια εξασφαλίζει ότι η σύγκριση είναι διαφανής και ελέγξιμη.

**Πίνακας 4.0.17 Ενδεικτική δομή υπολογιστικής καρτέλας σεναρίου**

| Πεδίο            | Περιεχόμενο                                    | Ρόλος                            |
|------------------|------------------------------------------------|----------------------------------|
| Τεχνική επιλογή  | Περιγραφή επιμέρους εργασίας ή λύσης           | Οργάνωση σεναρίου                |
| Ποσότητα         | Επιμετρημένη ποσότητα από το αρχείο ποσοτήτων  | Βάση κόστους και GWP             |
| Μονάδα           | m <sup>2</sup> , m <sup>3</sup> , τεμ., m ή kg | Έλεγχος συμβατότητας             |
| Κόστος υλικών    | €/μονάδα                                       | Υπολογισμός προμήθειας           |
| Κόστος εργασίας  | €/μονάδα                                       | Υπολογισμός εφαρμογής            |
| Συνολικό κόστος  | €                                              | Οικονομική αξιολόγηση            |
| Συντελεστής GWP  | kg CO <sub>2</sub> eq/μονάδα                   | Περιβαλλοντική αξιολόγηση υλικών |
| Ενσωματωμένο GWP | kg CO <sub>2</sub> eq                          | Αρχική περιβαλλοντική            |

| Πεδίο                        | Περιεχόμενο                | Ρόλος                              |
|------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
|                              |                            | επιβάρυνση                         |
| Εξοικονόμηση ενέργειας       | kWh/έτος                   | Ενεργειακό όφελος                  |
| Μείωση λειτουργικών εκπομπών | kg CO <sub>2</sub> eq/έτος | Περιβαλλοντικό όφελος λειτουργίας  |
| Διάρκεια ζωής                | έτη                        | Έλεγχος κύκλου ζωής                |
| Καθαρό όφελος                | kg CO <sub>2</sub> eq      | Συνολικό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα |

Η συγκεντρωτική σύγκριση των σεναρίων θα παρουσιάζεται σε πίνακα και σε διαγράμματα. Οι πίνακες θα επιτρέπουν την ακριβή ανάγνωση των αριθμητικών αποτελεσμάτων, ενώ τα διαγράμματα θα διευκολύνουν την οπτική σύγκριση. Χρήσιμα διαγράμματα είναι το συνολικό κόστος ανά σενάριο, η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας, η μείωση λειτουργικών εκπομπών, το ενσωματωμένο GWP και το καθαρό περιβαλλοντικό όφελος στην περίοδο αναφοράς. Ιδιαίτερη σημασία έχει η παράλληλη παρουσίαση κόστους και περιβαλλοντικού αποτελέσματος, ώστε να μη θεωρείται αυτόματα καλύτερο το σενάριο με τη μεγαλύτερη τεχνική επέμβαση.

Η τελική κατάταξη των σεναρίων δεν θα βασιστεί σε έναν μόνο δείκτη. Αντίθετα, θα προκύψει από πολυκριτηριακή ερμηνεία. Ένα σενάριο μπορεί να είναι καλύτερο ως προς το κόστος, ένα άλλο ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας και ένα τρίτο ως προς τη μείωση εκπομπών. Για τον λόγο αυτό, η τελική αξιολόγηση πρέπει να παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς κάθε σεναρίου. Η επιλογή του καταλληλότερου σεναρίου εξαρτάται από τον στόχο που τίθεται κάθε φορά: ελαχιστοποίηση κόστους, μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας, μέγιστη μείωση εκπομπών ή ισορροπημένη σχέση κόστους και περιβαλλοντικού οφέλους.

Η ανάλυση ευαισθησίας θα χρησιμοποιηθεί για να ελεγχθεί η σταθερότητα των αποτελεσμάτων. Οι κρίσιμες παράμετροι που μπορούν να μεταβληθούν είναι η τιμή της ενέργειας, ο συντελεστής εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας, οι περιβαλλοντικοί συντελεστές βασικών υλικών, το κόστος εφαρμογής και η εκτιμώμενη εξοικονόμηση. Η εξέταση εναλλακτικών τιμών επιτρέπει να διαπιστωθεί αν ένα σενάριο παραμένει ευνοϊκό ακόμη και όταν μεταβάλλονται βασικές παραδοχές. Με αυτόν τον τρόπο ενισχύεται η αξιοπιστία της τελικής αξιολόγησης.

Συνολικά, η δομή των σεναρίων επιτρέπει την ολοκληρωμένη διερεύνηση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής αναβάθμισης του κτιρίου. Το Σενάριο 0 αποτυπώνει τη βάση σύγκρισης. Το Σενάριο 1 αναδεικνύει τη συμβολή του βιοκλιματικού σχεδιασμού και της βελτίωσης του κελύφους. Το Σενάριο 2 εξετάζει τη συμβολή των τεχνικών συστημάτων. Το Σενάριο 3 αποτιμά την ολοκληρωμένη προσέγγιση. Η συγκριτική αξιολόγηση των τεσσάρων αυτών καταστάσεων θα επιτρέψει να προσδιοριστεί ποια στρατηγική προσφέρει την καλύτερη ισορροπία μεταξύ κόστους, ενεργειακής εξοικονόμησης και μείωσης ανθρακικού αποτυπώματος.

## 5. Εφαρμογή σεναρίων και παρουσίαση αποτελεσμάτων

### 5.1 Υφιστάμενη κατάσταση κτιρίου, Σενάριο 0

Το Σενάριο 0 αποτελεί την υφιστάμενη κατάσταση αναφοράς του κτιρίου μελέτης και χρησιμοποιείται ως βάση σύγκρισης για όλα τα επόμενα σενάρια ενεργειακής, βιοκλιματικής και περιβαλλοντικής αναβάθμισης. Στο σενάριο αυτό δεν εφαρμόζεται καμία πρόσθετη παρέμβαση. Αντίθετα, καταγράφονται και ποσοτικοποιούνται τα γεωμετρικά, κατασκευαστικά, ενεργειακά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του κτιρίου, όπως αυτά προκύπτουν από τα σχέδια, τις επιμετρήσεις και τις τεκμηριωμένες παραδοχές της εργασίας.

Το κτίριο είναι υφιστάμενη πολυκατοικία κατασκευής του 1987, με ισόγειο και πέντε υπερκείμενους ορόφους κατοικιών. Στο ισόγειο υπάρχουν αποθήκες, ανοικτές θέσεις στάθμευσης, λεβητοστάσιο, κλιμακοστάσιο και ανελκυστήρας, ενώ οι πέντε υπερκείμενοι όροφοι περιλαμβάνουν δύο διαμερίσματα ανά όροφο. Συνολικά, το κτίριο διαθέτει δέκα διαμερίσματα. Στο δώμα υπάρχει μόνο η απόληξη του κλιμακοστασίου, χωρίς άλλους κύριους χώρους χρήσης.

Η μικτή επιφάνεια ανά στάθμη ανέρχεται σε 259,17 m<sup>2</sup>, ενώ η συνολική μικτή επιφάνεια του ισογείου και των πέντε ορόφων ανέρχεται σε 1.555,02 m<sup>2</sup>. Για τους ενεργειακούς υπολογισμούς χρησιμοποιείται θερμαινόμενη ή κατοικήσιμη επιφάνεια 1.062,60 m<sup>2</sup>, ώστε οι δείκτες κατανάλωσης να αποδίδουν καλύτερα τη λειτουργική συμπεριφορά των κατοικιών και όχι το σύνολο των βοηθητικών ή κοινόχρηστων επιφανειών.

**Πίνακας 5.0.1 Βασικά γεωμετρικά στοιχεία Σεναρίου 0**

| Παράμετρος                                       | Τιμή                    |
|--------------------------------------------------|-------------------------|
| Αριθμός υπέργειων επιπέδων κύριου όγκου          | 6                       |
| Αριθμός ορόφων κατοικίας                         | 5                       |
| Διαμερίσματα ανά όροφο κατοικίας                 | 2                       |
| Συνολικός αριθμός διαμερισμάτων                  | 10                      |
| Μικτή επιφάνεια ανά στάθμη                       | 259,17 m <sup>2</sup>   |
| Συνολική μικτή επιφάνεια ισογείου και Α-Ε ορόφων | 1.555,02 m <sup>2</sup> |
| Θερμαινόμενη/κατοικήσιμη επιφάνεια αναφοράς      | 1.062,60 m <sup>2</sup> |
| Κύριο δώμα                                       | 246,40 m <sup>2</sup>   |

| Παράμετρος                     | Τιμή                 |
|--------------------------------|----------------------|
| Απόληξη κλιμακοστασίου         | 12,78 m <sup>2</sup> |
| Καθαρό ύψος από πλάκα σε πλάκα | 3,00 m               |

Η υφιστάμενη κατασκευαστική κατάσταση είναι χαρακτηριστική κτιρίου της περιόδου κατασκευής του. Οι εξωτερικοί τοίχοι είναι μπατικοί, πάχους 0,25 m, με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία σε σχέση με τις σημερινές απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης. Οι εσωτερικοί διαχωριστικοί τοίχοι είναι δρομικοί, πάχους 0,15 m. Στο ισόγειο, οι τοίχοι των αποθηκών και του λεβητοστασίου λαμβάνονται ως πάνελ, σύμφωνα με την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης.

Τα εξωτερικά κουφώματα είναι παλαιά συρόμενα αλουμινίου με μονό υαλοπίνακα και πλαστικά ρολά. Η συνολική επιφάνεια των εξωτερικών και κοινόχρηστων κουφωμάτων ανέρχεται σε 117,38 m<sup>2</sup>. Για τις ανάγκες της περιβαλλοντικής και τεχνικής ανάλυσης, λαμβάνεται ότι το 10% της επιφάνειας των κουφωμάτων αντιστοιχεί σε αλουμίνιο και το 90% σε υαλοπίνακα. Επομένως, η επιφάνεια αλουμινίου εκτιμάται σε 11,74 m<sup>2</sup> και η επιφάνεια υαλοπινάκων σε 105,64 m<sup>2</sup>.

**Πίνακας 5.0.2 Βασικά στοιχεία κελύφους και κουφωμάτων Σεναρίου 0**

| Στοιχείο                                                  | Τιμή                  |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------|
| Καθαρή επιφάνεια εκτεθειμένων όψεων Βορρά και Νότου       | 383,10 m <sup>2</sup> |
| Συνολική επιφάνεια εξωτερικών και κοινόχρηστων κουφωμάτων | 117,38 m <sup>2</sup> |
| Εκτιμώμενη επιφάνεια αλουμινίου κουφωμάτων                | 11,74 m <sup>2</sup>  |
| Εκτιμώμενη επιφάνεια υαλοπινάκων                          | 105,64 m <sup>2</sup> |
| Πάχος εξωτερικών τοίχων                                   | 0,25 m                |
| Πάχος εσωτερικών τοίχων                                   | 0,15 m                |
| Πάχος πλακών                                              | 0,18 m                |

Η νότια όψη του κτιρίου αντιστοιχεί στην κύρια πρόσοψη. Η βόρεια όψη έχει απόσταση περίπου 10 m από την όμορη ιδιοκτησία, ενώ οι πλευρικές όψεις συνορεύουν με όμορες ιδιοκτησίες. Η γεωμετρία αυτή επηρεάζει τη βιοκλιματική συμπεριφορά του κτιρίου, καθώς η νότια πρόσοψη μπορεί να δέχεται σημαντική ηλιακή ακτινοβολία, ιδίως κατά τη χειμερινή περίοδο, αλλά και αυξημένα θερμικά κέρδη κατά τη θερινή περίοδο. Στην υφιστάμενη κατάσταση δεν υπάρχουν τέντες ή οργανωμένα εξωτερικά συστήματα

σκίασης, γεγονός που περιορίζει τον έλεγχο των θερινών ηλιακών κερδών και αυξάνει την πιθανότητα υπερθέρμανσης των εσωτερικών χώρων.

Η απουσία ουσιαστικού βιοκλιματικού σχεδιασμού αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του Σεναρίου 0. Το κτίριο δεν αξιοποιεί επαρκώς παθητικές στρατηγικές ενεργειακού ελέγχου, όπως οργανωμένη σκίαση, ελεγχόμενο φυσικό αερισμό, βελτιωμένη θερμική προστασία κελύφους και υψηλής απόδοσης κουφώματα. Ως αποτέλεσμα, η λειτουργική ενεργειακή συμπεριφορά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα μηχανολογικά συστήματα θέρμανσης, ψύξης και παραγωγής ζεστού νερού χρήσης. Η κατάσταση αυτή οδηγεί σε αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις, υψηλότερο λειτουργικό κόστος και αυξημένες λειτουργικές εκπομπές.

Όλες οι κατοικίες του κτιρίου έχουν ενεργειακή κατάταξη **κατηγορίας Ε** βάσει Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης. Η κατάταξη αυτή είναι συμβατή με την κατασκευαστική εικόνα του κτιρίου, δηλαδή το παλαιό κέλυφος, τα ανεπαρκώς θερμομονωμένα δομικά στοιχεία, τα παλαιά κουφώματα, την απουσία εξωτερικής σκίασης και τις παλαιές ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις. Για τη συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων, η κατηγορία Ε χρησιμοποιείται ως βασική ένδειξη της χαμηλής υφιστάμενης ενεργειακής επίδοσης.

Οι ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις θεωρούνται αρχικής περιόδου κατασκευής, δηλαδή του 1987. Το κτίριο διαθέτει κεντρική θέρμανση, με επτά σώματα καλοριφέρ ανά διαμέρισμα. Συνολικά, για δέκα διαμερίσματα, καταγράφονται εβδομήντα σώματα καλοριφέρ. Η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης γίνεται με ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες 120 L, έναν ανά διαμέρισμα, δηλαδή συνολικά δέκα θερμοσίφωνες. Δεν υπάρχουν ηλιακοί θερμοσίφωνες ή άλλο σύστημα αξιοποίησης ανανεώσιμης ενέργειας για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης.

**Πίνακας 5.0.3 Υφιστάμενες εγκαταστάσεις Σεναρίου 0**

| Παράμετρος                             | Τιμή |
|----------------------------------------|------|
| Συνολικός αριθμός διαμερισμάτων        | 10   |
| Άτομα ανά διαμέρισμα                   | 3    |
| Συνολικός αριθμός κατοίκων             | 30   |
| Σώματα καλοριφέρ ανά διαμέρισμα        | 7    |
| Συνολικά σώματα καλοριφέρ              | 70   |
| Ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες ανά διαμέρισμα | 1    |

| Παράμετρος                        | Τιμή         |
|-----------------------------------|--------------|
| Συνολικοί ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες | 10           |
| Χωρητικότητα κάθε θερμοσίφωνα     | 120 L        |
| Ηλιακοί θερμοσίφωνες              | Δεν υπάρχουν |

Για την εκτίμηση της κατανάλωσης νερού λαμβάνεται παραδοχή 250 L ανά άτομο ημερησίως. Με βάση 30 κατοίκους, η συνολική ημερήσια κατανάλωση νερού ανέρχεται σε 7.500 L/ημέρα, δηλαδή 7,50 m<sup>3</sup>/ημέρα. Σε ετήσια βάση, η κατανάλωση νερού υπολογίζεται σε 2.737,50 m<sup>3</sup>/έτος. Για τον υπολογισμό του ζεστού νερού χρήσης υιοθετείται η παραδοχή ότι το 30% της συνολικής κατανάλωσης νερού θερμαίνεται. Επομένως, ο ετήσιος όγκος ζεστού νερού χρήσης υπολογίζεται σε 821,25 m<sup>3</sup>/έτος.

Για την ενεργειακή απαίτηση παραγωγής ζεστού νερού χρήσης λαμβάνεται υπόψη η ποσότητα νερού που θερμαίνεται, η θερμοκρασιακή διαφορά και η ειδική θερμότητα του νερού. Με βάση τις παραδοχές του υπολογιστικού μοντέλου, η τελική ηλεκτρική ενέργεια για ZNX ανέρχεται σε 31.837,13 kWh/έτος. Η τιμή αυτή αποτελεί σημαντικό μέρος της συνολικής λειτουργικής κατανάλωσης, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της παραγωγής ζεστού νερού χρήσης στην ενεργειακή συμπεριφορά των πολυκατοικιών κατοικίας.

**Πίνακας 5.0.4 Κατανάλωση νερού και ZNX Σεναρίου 0**

| Παράμετρος                            | Τιμή                          |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| Συνολικοί κάτοικοι                    | 30                            |
| Ημερήσια κατανάλωση νερού ανά άτομο   | 250 L/άτομο·ημέρα             |
| Συνολική ημερήσια κατανάλωση νερού    | 7.500 L/ημέρα                 |
| Συνολική ετήσια κατανάλωση νερού      | 2.737,50 m <sup>3</sup> /έτος |
| Ποσοστό νερού που θερμαίνεται για ZNX | 30%                           |
| Ετήσιος όγκος ZNX                     | 821,25 m <sup>3</sup> /έτος   |
| Τελική ηλεκτρική ενέργεια για ZNX     | 31.837,13 kWh/έτος            |

Η συνολική λειτουργική κατανάλωση ενέργειας του Σεναρίου 0 υπολογίζεται σε 188.298,05 kWh/έτος. Η τιμή αυτή περιλαμβάνει τις ανάγκες θέρμανσης, ψύξης, ζεστού νερού χρήσης, φωτισμού και λοιπών καταναλώσεων, σύμφωνα με τις τεκμηριωμένες παραδοχές του υπολογιστικού μοντέλου. Η ειδική ετήσια κατανάλωση, με βάση τη

θερμαινόμενη/κατοικήσιμη επιφάνεια των 1.062,60 m<sup>2</sup>, υπολογίζεται σε 177,21 kWh/m<sup>2</sup>·έτος. Η τιμή αυτή είναι συμβατή με κτίριο κατοικίας χαμηλής ενεργειακής επίδοσης, ενεργειακής κατηγορίας E, με παλαιό κέλυφος και μη αναβαθμισμένα συστήματα.

**Πίνακας 0.5 Ενεργειακοί δείκτες Σεναρίου 0**

| Δείκτης                                     | Τιμή                            |
|---------------------------------------------|---------------------------------|
| Συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας        | 188.298,05 kWh/έτος             |
| Θερμαινόμενη/κατοικήσιμη επιφάνεια αναφοράς | 1.062,60 m <sup>2</sup>         |
| Ειδική ετήσια κατανάλωση ενέργειας          | 177,21 kWh/m <sup>2</sup> ·έτος |
| Ενεργειακή κατηγορία κατοικιών              | E                               |
| Τελική ηλεκτρική ενέργεια ZNX               | 31.837,13 kWh/έτος              |

Για την οικονομική αποτίμηση της λειτουργικής ενέργειας χρησιμοποιείται τιμή ηλεκτρικής ενέργειας 0,23 €/kWh ως ρεαλιστική τιμή εργασίας. Με βάση τη συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας, το ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας του Σεναρίου 0 υπολογίζεται σε 32.151,28 €/έτος. Το κόστος αυτό εκφράζει τη λειτουργική επιβάρυνση της υφιστάμενης κατάστασης και θα χρησιμοποιηθεί ως βάση για τον υπολογισμό της οικονομικής εξοικονόμησης στα επόμενα σενάρια.

Για την περιβαλλοντική αποτίμηση των λειτουργικών εκπομπών χρησιμοποιείται συντελεστής εκπομπών 0,27 kg CO<sub>2</sub>eq/kWh. Με βάση τον συντελεστή αυτό, οι ετήσιες λειτουργικές εκπομπές του Σεναρίου 0 υπολογίζονται σε 50.840,47 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος, δηλαδή περίπου 50,84 t CO<sub>2</sub>eq/έτος. Η τιμή αυτή αποτελεί το βασικό περιβαλλοντικό μέγεθος αναφοράς για τη σύγκριση των επόμενων σεναρίων.

**Πίνακας 5.0.6 Οικονομικοί και περιβαλλοντικοί δείκτες Σεναρίου 0**

| Δείκτης                              | Τιμή                                 |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Τιμή ενέργειας                       | 0,23 €/kWh                           |
| Ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας | 32.151,28 €/έτος                     |
| Συντελεστής εκπομπών ενέργειας       | 0,27 kg CO <sub>2</sub> eq/kWh       |
| Ετήσιες λειτουργικές εκπομπές        | 50.840,47 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος |
| Ετήσιες λειτουργικές εκπομπές        | 50,84 t CO <sub>2</sub> eq/έτος      |

Η υφιστάμενη κατάσταση αναδεικνύει τρία βασικά προβλήματα. Το πρώτο είναι η χαμηλή ενεργειακή επίδοση του κελύφους, η οποία συνδέεται με ανεπαρκή θερμομόνωση

και παλαιά κουφώματα. Το δεύτερο είναι η περιορισμένη ή ανύπαρκτη βιοκλιματική λειτουργία, καθώς δεν υπάρχουν οργανωμένα συστήματα σκίασης, αξιοποίησης φυσικού αερισμού ή ελέγχου των θερινών ηλιακών κερδών. Το τρίτο είναι η παλαιότητα των τεχνικών συστημάτων και η απουσία αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδίως στην παραγωγή ζεστού νερού χρήσης.

Η απουσία βιοκλιματικού σχεδιασμού επιβαρύνει ιδιαίτερα τη λειτουργική συμπεριφορά του κτιρίου. Η νότια όψη δεν διαθέτει οργανωμένη εξωτερική σκίαση, γεγονός που αυξάνει τα θερινά θερμικά κέρδη. Τα παλαιά συρόμενα κουφώματα με μονό υαλοπίνακα προκαλούν αυξημένες θερμικές απώλειες τον χειμώνα και περιορισμένη προστασία από την ηλιακή ακτινοβολία το καλοκαίρι. Η ανεπαρκής θερμομονωτική προστασία των τοίχων και του δώματος αυξάνει τη ζήτηση θέρμανσης και ψύξης. Έτσι, το κτίριο βασίζεται περισσότερο στη μηχανική κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση και αυξημένες εκπομπές.

Το Σενάριο 0, επομένως, δεν αποτελεί απλώς περιγραφή της αρχικής κατάστασης, αλλά λειτουργεί ως κρίσιμη βάση τεκμηρίωσης για τα επόμενα σενάρια. Οι τιμές της ετήσιας κατανάλωσης, του κόστους και των λειτουργικών εκπομπών θα χρησιμοποιηθούν ως σημεία αναφοράς για τον υπολογισμό της εξοικονόμησης ενέργειας, της μείωσης κόστους και της μείωσης εκπομπών που θα προκύψουν από τα σενάρια βιοκλιματικής και ενεργειακής αναβάθμισης.

Συνολικά, η υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου χαρακτηρίζεται από αυξημένη ενεργειακή ζήτηση, παλαιά δομικά και ηλεκτρομηχανολογικά στοιχεία, ανεπαρκή θερμική προστασία και περιορισμένη βιοκλιματική λειτουργία. Η ειδική κατανάλωση των 177,21 kWh/m<sup>2</sup>·έτος, το ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας των 32.151,28 € και οι ετήσιες λειτουργικές εκπομπές των 50,84 t CO<sub>2</sub>eq αποτυπώνουν με ποσοτικό τρόπο την αρχική ενεργειακή και περιβαλλοντική επιβάρυνση. Με βάση τα στοιχεία αυτά, τα επόμενα σενάρια θα αξιολογηθούν ως προς τη δυνατότητά τους να μειώσουν την ενεργειακή κατανάλωση, το λειτουργικό κόστος και το ανθρακικό αποτύπωμα του κτιρίου.

## **5.2 Σενάριο 1: Παθητική και βιοκλιματική αναβάθμιση κελύφους**

Το Σενάριο 1 αφορά την παθητική και βιοκλιματική αναβάθμιση του κελύφους του κτιρίου. Η λογική του σεναρίου βασίζεται στην αρχή ότι η ενεργειακή βελτίωση ενός υφιστάμενου κτιρίου πρέπει να ξεκινά από τη μείωση των θερμικών και ψυκτικών

φορτίων, πριν εξεταστεί η αναβάθμιση των τεχνικών συστημάτων. Με τον τρόπο αυτό, το κτίριο περιορίζει την εξάρτησή του από μηχανολογικά μέσα θέρμανσης και ψύξης, βελτιώνει τη θερμική άνεση των χρηστών και μειώνει τις λειτουργικές ενεργειακές απαιτήσεις.

Στο συγκεκριμένο σενάριο εξετάζονται παρεμβάσεις που αφορούν το εξωτερικό κέλυφος, το δώμα, τα εξωτερικά κουφώματα και την ηλιακή προστασία. Οι παρεμβάσεις αυτές συνδέονται άμεσα με τις βιοκλιματικές αρχές του σχεδιασμού, καθώς επηρεάζουν τη θερμική προστασία, τη διαχείριση των ηλιακών κερδών, τη θερινή υπερθέρμανση και τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης. Η επιλογή τους προκύπτει από την υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου, η οποία χαρακτηρίζεται από ανεπαρκή θερμομόνωση, παλαιά συρόμενα κουφώματα αλουμινίου με μονό υαλοπίνακα και απουσία οργανωμένης εξωτερικής σκίασης.

Το Σενάριο 1 δεν επεμβαίνει στα βασικά ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα. Εστιάζει αποκλειστικά στη μείωση της ενεργειακής ζήτησης μέσω του κελύφους και των παθητικών στρατηγικών. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να απομονωθεί η συμβολή του βιοκλιματικού σχεδιασμού και να εκτιμηθεί σε ποιο βαθμό η βελτίωση του κελύφους μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας, το λειτουργικό κόστος και τις εκπομπές CO<sub>2eq</sub>.

**Πίνακας 0.7 Βασικές παρεμβάσεις Σεναρίου 1**

| Κατηγορία παρέμβασης | Αντικείμενο                                                        | Στόχος                                                          |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Εξωτερικό κέλυφος    | Θερμική αναβάθμιση εκτεθειμένων τοιχοποιιών                        | Μείωση θερμικών απωλειών και περιορισμός θερμικών κερδών        |
| Δώμα                 | Θερμομονωτική και στεγανωτική αναβάθμιση                           | Περιορισμός απωλειών τον χειμώνα και υπερθέρμανσης το καλοκαίρι |
| Εξωτερικά κουφώματα  | Αντικατάσταση παλαιών συρόμενων κουφωμάτων με ενεργειακά κουφώματα | Βελτίωση θερμοπερατότητας, αεροστεγανότητας και θερμικής άνεσης |
| Ηλιακή προστασία     | Ελεγχόμενη εξωτερική σκίαση στη νότια όψη                          | Μείωση θερινών ηλιακών κερδών και ψυκτικών φορτίων              |

Η πρώτη ομάδα παρεμβάσεων αφορά τη θερμική αναβάθμιση των εκτεθειμένων εξωτερικών τοιχοποιιών. Οι εξωτερικοί τοίχοι του κτιρίου είναι μπατικοί, πάχους 0,25 m, με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία. Η βελτίωση της θερμικής προστασίας των τοίχων μειώνει τις θερμικές απώλειες κατά τη χειμερινή περίοδο και περιορίζει την είσοδο

θερμότητας κατά τη θερινή περίοδο. Η παρέμβαση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις βόρειες και νότιες εκτεθειμένες όψεις, οι οποίες συμμετέχουν άμεσα στη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου.

Η δεύτερη ομάδα παρεμβάσεων αφορά το δώμα. Το δώμα αποτελεί μία από τις σημαντικότερες επιφάνειες θερμικής ανταλλαγής σε πολώροφο κτίριο, ιδίως στον τελευταίο όροφο. Σε κτίρια παλαιότερης κατασκευής, η ανεπαρκής θερμική προστασία του δώματος μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες απώλειες τον χειμώνα και έντονη υπερθέρμανση κατά τη θερινή περίοδο. Η θερμομονωτική και στεγανωτική αναβάθμιση του δώματος συμβάλλει στη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς και στη μείωση των ψυκτικών φορτίων του ανώτερου ορόφου.

Η τρίτη ομάδα παρεμβάσεων αφορά τα εξωτερικά κουφώματα. Στην υφιστάμενη κατάσταση, τα κουφώματα είναι παλαιά συρόμενα αλουμινίου με μονό υαλοπίνακα και περιορισμένη αεροστεγανότητα. Η αντικατάστασή τους με ενεργειακά κουφώματα οδηγεί σε μείωση των θερμικών απωλειών, περιορισμό ανεπιθύμητων διεισδύσεων αέρα και βελτίωση της εσωτερικής θερμικής άνεσης. Επειδή η συνολική επιφάνεια των εξωτερικών και κοινόχρηστων κουφωμάτων ανέρχεται σε 117,38 m<sup>2</sup>, η παρέμβαση αυτή έχει σημαντική βαρύτητα τόσο ενεργειακά όσο και οικονομικά.

Η τέταρτη ομάδα παρεμβάσεων αφορά την εξωτερική ηλιακή προστασία, κυρίως στη νότια όψη. Η νότια πρόσοψη δέχεται σημαντική ηλιακή ακτινοβολία, η οποία μπορεί να είναι ευνοϊκή κατά τη χειμερινή περίοδο, αλλά να επιβαρύνει σημαντικά το κτίριο κατά τη θερινή περίοδο. Η ελεγχόμενη σκίαση επιτρέπει τον περιορισμό των ανεπιθύμητων θερινών ηλιακών κερδών, συμβάλλοντας στη μείωση των ψυκτικών φορτίων. Η παρέμβαση αυτή έχει καθαρά βιοκλιματικό χαρακτήρα, επειδή δεν βασίζεται στην παραγωγή ή κατανάλωση ενέργειας, αλλά στη ρύθμιση της σχέσης του κτιρίου με την ηλιακή ακτινοβολία.

Οι βασικές ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν στο Σενάριο 1 προέρχονται από το αρχείο επιμετρήσεων του κτιρίου. Η καθαρή επιφάνεια εκτεθειμένων όψεων Βορρά και Νότου ανέρχεται σε 383,10 m<sup>2</sup>, η επιφάνεια του κύριου δώματος σε 246,40 m<sup>2</sup> και η συνολική επιφάνεια εξωτερικών και κοινόχρηστων κουφωμάτων σε 117,38 m<sup>2</sup>. Οι ποσότητες αυτές αποτελούν τη βάση για την κοστολόγηση και για τον υπολογισμό του ενσωματωμένου περιβαλλοντικού αποτυπώματος των παρεμβάσεων.

**Πίνακας 5.0.8 Βασικές ποσότητες Σεναρίου 1**

| Κατηγορία                                                       | Ποσότητα                |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Καθαρή επιφάνεια εκτεθειμένων όψεων Βορρά και Νότου             | 383,10 m <sup>2</sup>   |
| Κύριο δώμα                                                      | 246,40 m <sup>2</sup>   |
| Συνολική επιφάνεια εξωτερικών και κοινόχρηστων κουφωμάτων       | 117,38 m <sup>2</sup>   |
| Εκτιμώμενη επιφάνεια πλαισίων αλουμινίου υφιστάμενων κουφωμάτων | 11,74 m <sup>2</sup>    |
| Εκτιμώμενη επιφάνεια υαλοπινάκων υφιστάμενων κουφωμάτων         | 105,64 m <sup>2</sup>   |
| Θερμαινόμενη/κατοικήσιμη επιφάνεια αναφοράς                     | 1.062,60 m <sup>2</sup> |

Η κοστολόγηση του Σεναρίου 1 περιλαμβάνει το κόστος υλικών, το κόστος εργασιών και τις πρόσθετες απαιτήσεις εφαρμογής των παρεμβάσεων. Το συνολικό αρχικό κόστος του σεναρίου υπολογίζεται σε 121.974,84 €. Η τιμή αυτή εκφράζει το συνολικό κόστος εφαρμογής των παρεμβάσεων του κελύφους και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της οικονομικής αποδοτικότητας. Το κόστος αυτό δεν πρέπει να εξετάζεται μεμονωμένα, αλλά σε σχέση με την ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας, τη μείωση λειτουργικού κόστους και τη μείωση λειτουργικών εκπομπών.

Μετά την εφαρμογή των παρεμβάσεων του Σεναρίου 1, η ετήσια τελική κατανάλωση ενέργειας μειώνεται από 188.298,05 kWh/έτος στο Σενάριο 0 σε 141.684,23 kWh/έτος. Η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας ανέρχεται σε 46.613,82 kWh/έτος, δηλαδή ποσοστό 24,76% σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Η μείωση αυτή θεωρείται σημαντική, διότι επιτυγχάνεται αποκλειστικά μέσω παθητικών και βιοκλιματικών παρεμβάσεων στο κέλυφος, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη αναβάθμιση των βασικών τεχνικών συστημάτων.

**Πίνακας 5.0.9 Ενεργειακά αποτελέσματα Σεναρίου 1**

| Δείκτης                            | Σενάριο 0                       | Σενάριο 1                       | Μεταβολή                        |
|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Ετήσια τελική κατανάλωση ενέργειας | 188.298,05 kWh/έτος             | 141.684,23 kWh/έτος             | -46.613,82 kWh/έτος             |
| Ποσοστό εξοικονόμησης              | -                               | -                               | 24,76%                          |
| Ειδική ετήσια κατανάλωση           | 177,21 kWh/m <sup>2</sup> ·έτος | 133,33 kWh/m <sup>2</sup> ·έτος | -43,88 kWh/m <sup>2</sup> ·έτος |

Η ειδική ετήσια κατανάλωση του κτιρίου μειώνεται από 177,21 kWh/m<sup>2</sup>·έτος σε 133,33 kWh/m<sup>2</sup>·έτος. Η μείωση αυτή αποτυπώνει τη βελτίωση της ενεργειακής έντασης του κτιρίου σε σχέση με την επιφάνεια αναφοράς. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι οι παρεμβάσεις στο κέλυφος μπορούν να έχουν ουσιαστική επίδραση στη συνολική

ενεργειακή συμπεριφορά, ακόμη και πριν εξεταστούν αποδοτικότερα Η/Μ συστήματα ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Το ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας μειώνεται από 32.151,28 €/έτος σε 24.928,55 €/έτος. Η ετήσια οικονομική εξοικονόμηση υπολογίζεται σε 7.222,74 €/έτος. Με βάση το συνολικό αρχικό κόστος του σεναρίου, η απλή περίοδος αποπληρωμής υπολογίζεται σε 16,89 έτη. Ο δείκτης αυτός δείχνει ότι η παρέμβαση έχει μεσοπρόθεσμο οικονομικό χρόνο απόσβεσης, ο οποίος πρέπει να αξιολογείται σε σχέση με τη διάρκεια ζωής των παρεμβάσεων και με τα μη οικονομικά οφέλη, όπως η βελτίωση θερμικής άνεσης και η μείωση εκπομπών.

**Πίνακας 5.0.10 Οικονομικά αποτελέσματα Σεναρίου 1**

| Δείκτης                                         | Τιμή             |
|-------------------------------------------------|------------------|
| Συνολικό αρχικό κόστος παρεμβάσεων              | 121.974,84 €     |
| Ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας Σεναρίου 0 | 32.151,28 €/έτος |
| Ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας Σεναρίου 1 | 24.928,55 €/έτος |
| Ετήσια οικονομική εξοικονόμηση                  | 7.222,74 €/έτος  |
| Απλή περίοδος αποπληρωμής                       | 16,89 έτη        |
| Κόστος ανά σωρευτική kWh εξοικονόμησης 50ετίας  | 0,052 €/kWh      |

Η περιβαλλοντική αποτίμηση του Σεναρίου 1 περιλαμβάνει δύο βασικές συνιστώσες: τις λειτουργικές εκπομπές και το ενσωματωμένο GWP των παρεμβάσεων. Οι λειτουργικές εκπομπές μειώνονται από 50.840,47 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος στο Σενάριο 0 σε 38.254,74 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος στο Σενάριο 1. Η ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών ανέρχεται σε 12.585,73 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος, δηλαδή περίπου 12,59 t CO<sub>2</sub>eq/έτος.

Το αρχικό ενσωματωμένο GWP των παρεμβάσεων υπολογίζεται σε 27.939,70 kg CO<sub>2</sub>eq. Το μέγεθος αυτό αντιπροσωπεύει τις εκπομπές που συνδέονται με τα υλικά και τις εργασίες των παρεμβάσεων. Η σύγκριση του ενσωματωμένου GWP με τη μείωση λειτουργικών εκπομπών δείχνει ότι ο περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης του Σεναρίου 1 είναι 2,22 έτη. Αυτό σημαίνει ότι, μετά από περίπου 2,22 έτη λειτουργίας, η μείωση των λειτουργικών εκπομπών έχει αντισταθμίσει την αρχική περιβαλλοντική επιβάρυνση των υλικών της παρέμβασης.

**Πίνακας 5.0.11 Περιβαλλοντικά αποτελέσματα Σεναρίου 1**

| Δείκτης                                                 | Τιμή                                       |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Λειτουργικές εκπομπές Σεναρίου 0                        | 50.840,47 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος       |
| Λειτουργικές εκπομπές Σεναρίου 1                        | 38.254,74 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος       |
| Ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών                     | 12.585,73 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος       |
| Αρχικό ενσωματωμένο GWP παρεμβάσεων                     | 27.939,70 kg CO <sub>2</sub> eq            |
| Αρχικό GWP ανά m <sup>2</sup> θερμαινόμενης επιφάνειας  | 26,29 kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> |
| Περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης                        | 2,22 έτη                                   |
| Καθαρή μείωση εκπομπών 50ετίας                          | 570.695,70 kg CO <sub>2</sub> eq           |
| Κόστος ανά καθαρό kg CO <sub>2</sub> eq που αποφεύγεται | 0,214 €/kg CO <sub>2</sub> eq              |

Η καθαρή μείωση εκπομπών στην περίοδο αναφοράς των 50 ετών υπολογίζεται σε 570.695,70 kg CO<sub>2</sub>eq, δηλαδή περίπου 570,70 t CO<sub>2</sub>eq. Το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει από τη σωρευτική μείωση των λειτουργικών εκπομπών, αφού αφαιρεθεί το αρχικό ενσωματωμένο GWP των παρεμβάσεων. Η τιμή αυτή δείχνει ότι το Σενάριο 1 έχει σημαντικό θετικό περιβαλλοντικό ισοζύγιο σε βάθος χρόνου.

Ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι ο περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης είναι πολύ μικρότερος από την οικονομική περίοδο αποπληρωμής. Ενώ οικονομικά η παρέμβαση αποσβένεται σε περίπου 16,89 έτη, περιβαλλοντικά αποσβένεται σε 2,22 έτη. Αυτό σημαίνει ότι, ακόμη και αν η οικονομική απόδοση απαιτεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, η περιβαλλοντική επίδραση του σεναρίου γίνεται θετική πολύ νωρίτερα. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική για την αξιολόγηση παρεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης, διότι η οικονομική και η περιβαλλοντική απόδοση δεν έχουν πάντα τον ίδιο χρονικό ορίζοντα.

Στο πλαίσιο του Σεναρίου 1 πραγματοποιήθηκε και ανάλυση ευαισθησίας, με σκοπό να εξεταστεί η επίδραση διαφορετικών εκτιμήσεων εξοικονόμησης. Η ανάλυση περιλαμβάνει συντηρητική, βασική και αισιόδοξη εκτίμηση. Η βασική εκτίμηση αντιστοιχεί στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Η συντηρητική εκτίμηση εξετάζει χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση των παρεμβάσεων, ενώ η αισιόδοξη εκτίμηση εξετάζει υψηλότερη απόδοση. Η προσέγγιση αυτή είναι χρήσιμη, επειδή οι πραγματικές εξοικονομήσεις σε υφιστάμενα κτίρια επηρεάζονται από τη συμπεριφορά των χρηστών, τις πραγματικές κλιματικές συνθήκες, την ποιότητα εφαρμογής των παρεμβάσεων και τη λειτουργία των τεχνικών συστημάτων.

**Πίνακας 5.0.12 Ανάλυση ευαισθησίας Σεναρίου 1**

| Εκτίμηση    | Χαρακτήρας                         | Ρόλος στην αξιολόγηση        |
|-------------|------------------------------------|------------------------------|
| Συντηρητική | Χαμηλότερη εκτιμώμενη εξοικονόμηση | Έλεγχος δυσμενούς περίπτωσης |
| Βασική      | Κύρια υπολογιστική παραδοχή        | Βασικό αποτέλεσμα σεναρίου   |
| Αισιόδοξη   | Υψηλότερη εκτιμώμενη εξοικονόμηση  | Έλεγχος ευνοϊκής περίπτωσης  |

Η ανάλυση ευαισθησίας επιβεβαιώνει ότι τα αποτελέσματα του Σεναρίου 1 πρέπει να ερμηνεύονται ως τεκμηριωμένη εκτίμηση και όχι ως απόλυτη ενεργειακή πρόβλεψη. Το σημαντικότερο συμπέρασμα δεν είναι μόνο η ακριβής τιμή εξοικονόμησης, αλλά η σαφής τάση βελτίωσης που προκύπτει από την παθητική και βιοκλιματική αναβάθμιση του κελύφους. Ακόμη και με συντηρητικότερες παραδοχές, οι παρεμβάσεις στο κέλυφος αναμένεται να έχουν θετική επίδραση στη μείωση της ενεργειακής ζήτησης.

Η βιοκλιματική σημασία του Σεναρίου 1 είναι ιδιαίτερα έντονη. Σε αντίθεση με λύσεις που περιορίζονται στην αντικατάσταση μηχανολογικού εξοπλισμού, το Σενάριο 1 επεμβαίνει στην ίδια τη φυσική συμπεριφορά του κτιρίου. Η θερμική προστασία μειώνει τις απώλειες και τα ανεπιθύμητα κέρδη. Τα νέα κουφώματα βελτιώνουν τη θερμική άνεση και περιορίζουν τη διείσδυση αέρα. Η σκίαση ελέγχει την ηλιακή ακτινοβολία και περιορίζει τη θερινή υπερθέρμανση. Το δώμα αποκτά καλύτερη θερμική συμπεριφορά και μειώνει την επιβάρυνση του ανώτερου ορόφου. Με τον τρόπο αυτό, το κτίριο λειτουργεί πιο αποδοτικά πριν ακόμη εξεταστεί η αναβάθμιση των εγκαταστάσεων.

Το Σενάριο 1 αναδεικνύει επίσης το περιβαλλοντικό κόστος των παρεμβάσεων. Η εφαρμογή νέων υλικών συνεπάγεται αρχικό ενσωματωμένο GWP. Ωστόσο, το μικρό χρονικό διάστημα περιβαλλοντικής απόσβεσης δείχνει ότι η λειτουργική μείωση εκπομπών υπερκαλύπτει σχετικά γρήγορα την αρχική επιβάρυνση. Αυτό αποτελεί σημαντικό εύρημα, επειδή επιβεβαιώνει ότι η ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους μπορεί να έχει θετικό περιβαλλοντικό ισοζύγιο, εφόσον σχεδιαστεί με κατάλληλα υλικά και τεχνικές προδιαγραφές.

Συνολικά, το Σενάριο 1 οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής επίδοσης του κτιρίου. Η ετήσια κατανάλωση ενέργειας μειώνεται κατά 46.613,82 kWh/έτος, οι λειτουργικές εκπομπές κατά 12.585,73 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος και η καθαρή μείωση εκπομπών στην περίοδο αναφοράς ανέρχεται σε 570,70 t CO<sub>2</sub>eq. Παράλληλα, το οικονομικό κόστος των παρεμβάσεων είναι σημαντικό, με απλή περίοδο αποπληρωμής 16,89 έτη, γεγονός που δείχνει ότι η τελική αξιολόγηση πρέπει να λάβει

υπόψη όχι μόνο το οικονομικό κριτήριο, αλλά και την ενεργειακή, περιβαλλοντική και βιοκλιματική συμβολή του σεναρίου.

### **5.3 Σενάριο 2: Αναβάθμιση τεχνικών συστημάτων και ZNX**

Το Σενάριο 2 αφορά την αναβάθμιση των τεχνικών συστημάτων του κτιρίου και της παραγωγής ζεστού νερού χρήσης. Σε αντίθεση με το Σενάριο 1, το οποίο εστιάζει κυρίως στο κέλυφος και στις παθητικές βιοκλιματικές παρεμβάσεις, το Σενάριο 2 εξετάζει την επίδραση αποδοτικότερων ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων στη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας, στο λειτουργικό κόστος και στις εκπομπές CO<sub>2</sub>eq. Η λογική του σεναρίου είναι ότι, ακόμη και σε ένα υφιστάμενο κτίριο με ενεργειακές αδυναμίες στο κέλυφος, η αντικατάσταση ή αναβάθμιση παλαιών συστημάτων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας.

Στην υφιστάμενη κατάσταση, το κτίριο διαθέτει κεντρική θέρμανση παλαιάς τεχνολογίας, σώματα καλοριφέρ στα διαμερίσματα, ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης και παλαιές ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις. Συνολικά υπάρχουν δέκα διαμερίσματα, εβδομήντα σώματα καλοριφέρ και δέκα ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες των 120 L. Δεν υπάρχουν ηλιακοί θερμοσίφωνες ή άλλο σύστημα αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή ZNX. Η κατάσταση αυτή δημιουργεί σημαντικές δυνατότητες εξοικονόμησης, κυρίως μέσω αποδοτικότερων συστημάτων θέρμανσης, ψύξης, παραγωγής ZNX και φωτισμού κοινόχρηστων χώρων.

Στο Σενάριο 2 εξετάζεται η αναβάθμιση των τεχνικών συστημάτων χωρίς να θεωρείται ότι προηγούνται παρεμβάσεις στο κέλυφος. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, επειδή επιτρέπει να εκτιμηθεί η καθαρή συμβολή των εγκαταστάσεων στη μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης. Το σενάριο περιλαμβάνει αναβάθμιση του συστήματος θέρμανσης με χρήση αποδοτικότερου συστήματος, βελτίωση των συστημάτων ψύξης, ηλιακή υποβοήθηση ή αντικατάσταση του τρόπου παραγωγής ZNX και βελτίωση του φωτισμού κοινόχρηστων χώρων με αποδοτικότερα φωτιστικά και αυτοματισμούς. Οι παρεμβάσεις αυτές επηρεάζουν κυρίως τη λειτουργική κατανάλωση και λιγότερο τη γεωμετρική ή βιοκλιματική συμπεριφορά του κτιρίου.

**Πίνακας 5.0.13 Βασικές παρεμβάσεις Σεναρίου 2**

| Κατηγορία<br>παρέμβασης  | Αντικείμενο                                                 | Στόχος                                                          |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Θέρμανση                 | Αναβάθμιση κεντρικού συστήματος με αποδοτικότερη τεχνολογία | Μείωση ενεργειακής κατανάλωσης για θέρμανση                     |
| Ψύξη                     | Βελτίωση ή αντικατάσταση τοπικών συστημάτων ψύξης           | Μείωση κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη θερινή περίοδο  |
| Ζεστό νερό χρήσης        | Ηλιακή υποβοήθηση ή αποδοτικότερη παραγωγή ZNX              | Μείωση κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από θερμοσίφωνες        |
| Φωτισμός<br>κοινόχρηστων | LED και αυτοματισμοί                                        | Μείωση κατανάλωσης φωτισμού και περιορισμός άσκοπης λειτουργίας |

Η αναβάθμιση της θέρμανσης αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παρεμβάσεις του σεναρίου. Το υφιστάμενο σύστημα θεωρείται παλαιό, με περιορισμένη απόδοση σε σχέση με σύγχρονες λύσεις. Η χρήση αποδοτικότερου συστήματος, όπως αντλία θερμότητας ή άλλο σύστημα υψηλής ενεργειακής απόδοσης, μπορεί να μειώσει σημαντικά την τελική κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση. Η παρέμβαση αυτή δεν περιορίζει τις θερμικές απώλειες του κελύφους, αλλά μειώνει την ενέργεια που απαιτείται για την κάλυψη των ίδιων θερμικών αναγκών.

Η αναβάθμιση των τοπικών συστημάτων ψύξης συνδέεται με τη θερινή λειτουργία του κτιρίου. Δεδομένου ότι το κτίριο δεν διαθέτει οργανωμένη εξωτερική σκίαση και έχει παλαιά κουφώματα, τα ψυκτικά φορτία μπορεί να είναι αυξημένα. Στο Σενάριο 2 η μείωση της κατανάλωσης ψύξης προκύπτει κυρίως από τη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων και όχι από τον περιορισμό των ηλιακών κερδών. Για τον λόγο αυτό, η επίδραση της παρέμβασης είναι σημαντική, αλλά δεν αντιμετωπίζει πλήρως τις αιτίες της θερινής υπερθέρμανσης.

Η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης αποτελεί κρίσιμο τμήμα της ενεργειακής κατανάλωσης του κτιρίου. Στο Σενάριο 0 υπολογίστηκε ότι οι τριάντα κάτοικοι του κτιρίου καταναλώνουν συνολικά 2.737,50 m<sup>3</sup> νερού ετησίως, από τα οποία το 30% θεωρείται ότι θερμαίνεται για χρήση ZNX. Η ετήσια τελική ηλεκτρική ενέργεια για ZNX υπολογίστηκε σε 31.837,13 kWh/έτος. Η αντικατάσταση ή υποβοήθηση των ηλεκτρικών θερμοσίφωνων με αποδοτικότερο σύστημα ή ηλιακή αξιοποίηση μπορεί να μειώσει σημαντικά αυτή την κατανάλωση, καθώς η παραγωγή ZNX με απευθείας ηλεκτρική αντίσταση είναι ενεργειακά επιβαρυντική.

Η αντικατάσταση φωτισμού κοινόχρηστων χώρων με LED και αυτοματισμούς έχει μικρότερη απόλυτη επίδραση σε σχέση με τη θέρμανση ή το ZNX, αλλά αποτελεί παρέμβαση χαμηλότερης πολυπλοκότητας και συνήθως μικρότερου χρόνου απόσβεσης. Οι αυτοματισμοί, όπως χρονοδιακόπτες, αισθητήρες κίνησης ή φωτιστικά υψηλής απόδοσης, περιορίζουν την άσκοπη λειτουργία και μειώνουν την ηλεκτρική κατανάλωση στους κοινόχρηστους χώρους. Η παρέμβαση αυτή έχει συμπληρωματικό χαρακτήρα και ενισχύει τη συνολική ενεργειακή απόδοση του κτιρίου.

**Πίνακας 5.0.14 Βασικά δεδομένα υφιστάμενων εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούνται στο  
Σενάριο 2**

| Παράμετρος                                  | Τιμή                          |
|---------------------------------------------|-------------------------------|
| Συνολικός αριθμός διαμερισμάτων             | 10                            |
| Άτομα ανά διαμέρισμα                        | 3                             |
| Συνολικός αριθμός κατοίκων                  | 30                            |
| Σώματα καλοριφέρ ανά διαμέρισμα             | 7                             |
| Συνολικά σώματα καλοριφέρ                   | 70                            |
| Ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες                     | 10                            |
| Χωρητικότητα θερμοσίφωνα                    | 120 L                         |
| Ετήσια κατανάλωση νερού                     | 2.737,50 m <sup>3</sup> /έτος |
| Ετήσιος όγκος ZNX                           | 821,25 m <sup>3</sup> /έτος   |
| Τελική ηλεκτρική ενέργεια ZNX στο Σενάριο 0 | 31.837,13 kWh/έτος            |

Το συνολικό αρχικό κόστος του Σεναρίου 2 υπολογίζεται σε 126.500,00 €. Το ποσό αυτό αφορά την προμήθεια, εγκατάσταση και εφαρμογή των τεχνικών επιλογών που περιλαμβάνονται στο σενάριο. Σε σχέση με το Σενάριο 1, το κόστος του Σεναρίου 2 είναι ελαφρώς υψηλότερο, καθώς η αναβάθμιση τεχνικών συστημάτων περιλαμβάνει εξοπλισμό μεγαλύτερης αξίας, εξειδικευμένες εργασίες εγκατάστασης και πιθανές προσαρμογές στις υφιστάμενες εγκαταστάσεις του κτιρίου.

Με την εφαρμογή του Σεναρίου 2, η ετήσια τελική κατανάλωση ενέργειας μειώνεται από 188.298,05 kWh/έτος στο Σενάριο 0 σε 71.082,54 kWh/έτος. Η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας ανέρχεται σε 117.215,52 kWh/έτος, που αντιστοιχεί σε ποσοστό εξοικονόμησης 62,25%. Η μείωση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική και οφείλεται κυρίως στη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και παραγωγής ZNX.

**Πίνακας 5.0.15 Ενεργειακά αποτελέσματα Σεναρίου 2**

| Δείκτης                                     | Σενάριο 0                          | Σενάριο 2                         | Μεταβολή                            |
|---------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Ετήσια τελική κατανάλωση ενέργειας          | 188.298,05<br>kWh/έτος             | 71.082,54<br>kWh/έτος             | -117.215,52<br>kWh/έτος             |
| Ποσοστό εξοικονόμησης                       | -                                  | -                                 | 62,25%                              |
| Θερμαινόμενη/κατοικήσιμη επιφάνεια αναφοράς | 1.062,60 m <sup>2</sup>            | 1.062,60 m <sup>2</sup>           | -                                   |
| Ειδική ετήσια κατανάλωση                    | 177,21<br>kWh/m <sup>2</sup> ·έτος | 66,89<br>kWh/m <sup>2</sup> ·έτος | -110,32<br>kWh/m <sup>2</sup> ·έτος |

Η ειδική ετήσια κατανάλωση μειώνεται από 177,21 kWh/m<sup>2</sup>·έτος σε 66,89 kWh/m<sup>2</sup>·έτος. Η μείωση αυτή δείχνει ότι η αναβάθμιση των τεχνικών συστημάτων μπορεί να επηρεάσει έντονα τη λειτουργική κατανάλωση του κτιρίου. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι το αποτέλεσμα αυτό αφορά κυρίως τη βελτίωση της απόδοσης κάλυψης των αναγκών και όχι τη μείωση των ίδιων των θερμικών αναγκών του κτιρίου. Δηλαδή το κτίριο εξακολουθεί να έχει παλαιό κέλυφος, παλαιά κουφώματα και ανεπαρκή βιοκλιματική συμπεριφορά, αλλά οι ανάγκες του καλύπτονται με πιο αποδοτικά συστήματα.

Το ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας μειώνεται από 32.151,28 €/έτος στο Σενάριο 0 σε 16.348,98 €/έτος στο Σενάριο 2. Η ετήσια οικονομική εξοικονόμηση υπολογίζεται σε 15.802,30 €/έτος. Με βάση το συνολικό αρχικό κόστος των 126.500,00 €, η απλή περίοδος αποπληρωμής υπολογίζεται σε 8,01 έτη. Ο χρόνος αυτός είναι σημαντικά μικρότερος από τον αντίστοιχο του Σεναρίου 1, γεγονός που δείχνει ότι οι παρεμβάσεις στα τεχνικά συστήματα εμφανίζουν υψηλή οικονομική αποδοτικότητα ως προς τη μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης.

**Πίνακας 5.0.16 Οικονομικά αποτελέσματα Σεναρίου 2**

| Δείκτης                                         | Τιμή             |
|-------------------------------------------------|------------------|
| Συνολικό αρχικό κόστος παρεμβάσεων              | 126.500,00 €     |
| Ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας Σεναρίου 0 | 32.151,28 €/έτος |
| Ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας Σεναρίου 2 | 16.348,98 €/έτος |
| Ετήσια οικονομική εξοικονόμηση                  | 15.802,30 €/έτος |
| Απλή περίοδος αποπληρωμής                       | 8,01 έτη         |

Η περιβαλλοντική αποτίμηση του Σεναρίου 2 δείχνει επίσης σημαντική βελτίωση. Οι λειτουργικές εκπομπές μειώνονται από 50.840,47 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος στο Σενάριο 0 σε 19.192,28 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος στο Σενάριο 2. Η ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών ανέρχεται σε 31.648,19 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος, δηλαδή περίπου 31,65 t CO<sub>2</sub>eq/έτος. Η μείωση αυτή είναι μεγαλύτερη από τη μείωση που προκύπτει στο Σενάριο 1, επειδή οι παρεμβάσεις του Σεναρίου 2 επιδρούν άμεσα στις ενεργειακές καταναλώσεις των τεχνικών συστημάτων.

Το αρχικό ενσωματωμένο GWP των παρεμβάσεων του Σεναρίου 2 υπολογίζεται σε 39.000,00 kg CO<sub>2</sub>eq. Επειδή τα τεχνικά συστήματα έχουν συγκεκριμένη διάρκεια ζωής και ενδέχεται να απαιτήσουν αντικατάσταση μέσα σε περίοδο αξιολόγησης 50 ετών, υπολογίζεται επίσης GWP παρεμβάσεων με αντικαταστάσεις 50ετίας, το οποίο ανέρχεται σε 126.000,00 kg CO<sub>2</sub>eq. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, διότι τα Η/Μ συστήματα δεν έχουν συνήθως την ίδια διάρκεια ζωής με το φέροντα οργανισμό ή το κέλυφος του κτιρίου.

**Πίνακας 5.0.17 Περιβαλλοντικά αποτελέσματα Σεναρίου 2**

| Δείκτης                                      | Τιμή                                 |
|----------------------------------------------|--------------------------------------|
| Λειτουργικές εκπομπές Σεναρίου 0             | 50.840,47 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος |
| Λειτουργικές εκπομπές Σεναρίου 2             | 19.192,28 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος |
| Ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών          | 31.648,19 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος |
| Αρχικό ενσωματωμένο GWP παρεμβάσεων          | 39.000,00 kg CO <sub>2</sub> eq      |
| GWP παρεμβάσεων με αντικαταστάσεις 50ετίας   | 126.000,00 kg CO <sub>2</sub> eq     |
| Περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης αρχικού GWP | 1,23 έτη                             |
| Καθαρή μείωση εκπομπών 50ετίας με αρχικό GWP | 1.543,41 t CO <sub>2</sub> eq        |

Ο περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης του αρχικού ενσωματωμένου GWP υπολογίζεται σε 1,23 έτη. Αυτό σημαίνει ότι η μείωση των λειτουργικών εκπομπών αντισταθμίζει την αρχική περιβαλλοντική επιβάρυνση των παρεμβάσεων σε λίγο περισσότερο από έναν χρόνο λειτουργίας. Το αποτέλεσμα αυτό είναι ιδιαίτερα θετικό και δείχνει ότι οι τεχνικές παρεμβάσεις του Σεναρίου 2 έχουν έντονη περιβαλλοντική απόδοση ως προς τη μείωση λειτουργικών εκπομπών.

Η καθαρή μείωση εκπομπών σε περίοδο 50 ετών, λαμβάνοντας υπόψη το αρχικό GWP των παρεμβάσεων, υπολογίζεται σε 1.543,41 t CO<sub>2</sub>eq. Το μέγεθος αυτό είναι σημαντικά υψηλό, καθώς η ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών συσσωρεύεται σε

βάθος χρόνου. Ωστόσο, επειδή τα τεχνικά συστήματα έχουν πιθανές αντικαταστάσεις, η αξιολόγηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη και το GWP κύκλου ζωής των συστημάτων. Για τον λόγο αυτό, στο υπολογιστικό αρχείο καταγράφεται χωριστά το αρχικό GWP και το GWP με αντικαταστάσεις σε περίοδο 50 ετών.

Η ανάλυση του Σεναρίου 2 δείχνει ότι οι παρεμβάσεις στα τεχνικά συστήματα έχουν ισχυρή επίδραση στη λειτουργική κατανάλωση. Αυτό οφείλεται στο ότι η υφιστάμενη κατάσταση χαρακτηρίζεται από παλαιά συστήματα, ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες και περιορισμένη αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών. Η αντικατάσταση ή υποβοήθηση αυτών των συστημάτων μπορεί να μειώσει άμεσα την κατανάλωση, χωρίς να απαιτεί μεγάλες αλλαγές στη γεωμετρία ή στο κέλυφος του κτιρίου.

Παρά τα θετικά αποτελέσματα, το Σενάριο 2 έχει έναν σημαντικό περιορισμό. Επειδή δεν επεμβαίνει στο κέλυφος, δεν αντιμετωπίζει πλήρως τα αίτια της αυξημένης ενεργειακής ζήτησης. Οι θερμικές απώλειες από το ανεπαρκώς μονωμένο κέλυφος, τα παλαιά κουφώματα και η απουσία σκίασης εξακολουθούν να υφίστανται. Επομένως, το κτίριο λειτουργεί με πιο αποδοτικά συστήματα, αλλά δεν μετατρέπεται σε κτίριο με ολοκληρωμένη βιοκλιματική συμπεριφορά. Αυτό το στοιχείο είναι κρίσιμο για τη συγκριτική αξιολόγηση με το Σενάριο 1 και με το συνδυαστικό Σενάριο 3.

Η σύγκριση με το Σενάριο 1 δείχνει ότι το Σενάριο 2 έχει μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και μικρότερη οικονομική περίοδο αποπληρωμής. Ωστόσο, το Σενάριο 1 βελτιώνει τη φυσική λειτουργία του κτιρίου και μειώνει τη ζήτηση μέσω παθητικών μέτρων. Αντίθετα, το Σενάριο 2 βελτιώνει κυρίως την απόδοση των συστημάτων που καλύπτουν τη ζήτηση. Οι δύο προσεγγίσεις δεν είναι ανταγωνιστικές, αλλά συμπληρωματικές. Η ολοκληρωμένη ενεργειακή αναβάθμιση ενός κτιρίου απαιτεί τόσο μείωση των αναγκών όσο και αποδοτική κάλυψη των υπολειπόμενων φορτίων.

Στο πλαίσιο του Σεναρίου 2 πραγματοποιείται και ανάλυση ευαισθησίας, ώστε να εξεταστεί η επίδραση διαφορετικών παραδοχών στην τελική εξοικονόμηση. Η πραγματική απόδοση των τεχνικών συστημάτων μπορεί να επηρεαστεί από την ποιότητα εγκατάστασης, τη συντήρηση, τη συμπεριφορά των χρηστών, τις θερμοκρασίες ρύθμισης και τις πραγματικές κλιματικές συνθήκες. Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα πρέπει να ερμηνεύονται ως τεκμηριωμένη υπολογιστική εκτίμηση και όχι ως απόλυτη πρόβλεψη πραγματικής κατανάλωσης.

**Πίνακας 5.0.18 Ανάλυση ευαισθησίας Σεναρίου 2**

| Εκτίμηση    | Χαρακτήρας                                           | Ρόλος στην αξιολόγηση        |
|-------------|------------------------------------------------------|------------------------------|
| Συντηρητική | Χαμηλότερη απόδοση τεχνικών συστημάτων               | Έλεγχος δυσμενούς περίπτωσης |
| Βασική      | Κύρια υπολογιστική παραδοχή                          | Βασικό αποτέλεσμα σεναρίου   |
| Αισιόδοξη   | Υψηλότερη απόδοση και καλύτερη λειτουργία συστημάτων | Έλεγχος ευνοϊκής περίπτωσης  |

Η σημασία του Σεναρίου 2 είναι ότι αναδεικνύει τη μεγάλη συμβολή των τεχνικών συστημάτων στη λειτουργική ενεργειακή κατανάλωση. Η μετάβαση από παλαιές εγκαταστάσεις σε αποδοτικότερες λύσεις μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση ενέργειας, κόστους και εκπομπών. Παράλληλα, το σενάριο δείχνει ότι η παραγωγή ZNX αποτελεί κρίσιμη χρήση στα κτίρια κατοικίας, ιδιαίτερα όταν βασίζεται αποκλειστικά σε ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες. Η ηλιακή υποβοήθηση ή η αντικατάσταση με αποδοτικότερο σύστημα μπορεί να έχει ουσιαστικό ενεργειακό και περιβαλλοντικό όφελος.

Συνολικά, το Σενάριο 2 οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της λειτουργικής επίδοσης του κτιρίου. Η ετήσια κατανάλωση ενέργειας μειώνεται κατά 117.215,52 kWh/έτος, οι λειτουργικές εκπομπές κατά 31.648,19 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος και η απλή περίοδος αποπληρωμής υπολογίζεται σε 8,01 έτη. Το αρχικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα των παρεμβάσεων αποσβένεται σε 1,23 έτη, γεγονός που αναδεικνύει τη σημαντική περιβαλλοντική απόδοση του σεναρίου. Ωστόσο, επειδή το σενάριο δεν επιλύει τις αδυναμίες του κελύφους και δεν ενσωματώνει πλήρως παθητικές βιοκλιματικές στρατηγικές, η τελική του αξιολόγηση πρέπει να γίνει συγκριτικά με τα υπόλοιπα σενάρια και ιδίως με το συνδυαστικό σενάριο ολοκληρωμένης αναβάθμισης.

#### **5.4 Σενάριο 3: Συνδυαστικό σενάριο βέλτιστης αναβάθμισης**

Το Σενάριο 3 αποτελεί το συνδυαστικό σενάριο βέλτιστης αναβάθμισης του κτιρίου και συγκεντρώνει τις βασικές κατευθύνσεις των δύο προηγούμενων σεναρίων. Στόχος του είναι να εξεταστεί η συνολική επίδραση μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής, στην οποία η βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς δεν βασίζεται αποκλειστικά ούτε στο κέλυφος ούτε στα τεχνικά συστήματα, αλλά στον συνδυασμό παθητικών, βιοκλιματικών και Η/Μ παρεμβάσεων. Με τον τρόπο αυτό, το κτίριο δεν αντιμετωπίζεται μόνο ως σύνολο εγκαταστάσεων που πρέπει να αντικατασταθούν, αλλά ως ολοκληρωμένο

ενεργειακό σύστημα, στο οποίο η μείωση της ζήτησης και η αποδοτική κάλυψη των υπολειπόμενων φορτίων λειτουργούν συμπληρωματικά.

Η βασική λογική του Σεναρίου 3 είναι ότι η ενεργειακή αναβάθμιση πρέπει να ακολουθεί ιεραρχημένη προσέγγιση. Αρχικά επιδιώκεται η μείωση των θερμικών και ψυκτικών φορτίων μέσω βελτίωσης του κελύφους, των κουφωμάτων, του δώματος και της ηλιακής προστασίας. Στη συνέχεια, οι μειωμένες πλέον ενεργειακές ανάγκες καλύπτονται με αποδοτικότερα τεχνικά συστήματα, αναβαθμισμένη παραγωγή ζεστού νερού χρήσης και βελτιωμένες ηλεκτρομηχανολογικές λύσεις. Η προσέγγιση αυτή είναι πιο ολοκληρωμένη, επειδή συνδυάζει τη βιοκλιματική λειτουργία του κτιρίου με την τεχνική αποδοτικότητα των εγκαταστάσεων.

Στο Σενάριο 3 λαμβάνονται υπόψη οι παρεμβάσεις παθητικής και βιοκλιματικής αναβάθμισης του κελύφους, όπως η θερμική αναβάθμιση των εκτεθειμένων τοιχοποιιών, η θερμομονωτική και στεγανωτική βελτίωση του δώματος, η αντικατάσταση των παλαιών εξωτερικών κουφωμάτων και η εφαρμογή ελεγχόμενης εξωτερικής σκίασης. Παράλληλα, περιλαμβάνονται παρεμβάσεις αναβάθμισης των τεχνικών συστημάτων, όπως αποδοτικότερη θέρμανση, βελτίωση ψύξης, ενεργειακά αποδοτικότερη παραγωγή ZNX, καθώς και βελτιώσεις φωτισμού και αυτοματισμών στους κοινόχρηστους χώρους.

**Πίνακας 5.0.19 Βασική λογική Σεναρίου 3**

| Ομάδα παρεμβάσεων              | Ρόλος στο σενάριο                            | Αναμενόμενη επίδραση                         |
|--------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Βελτίωση κελύφους              | Μείωση ενεργειακής ζήτησης                   | Μείωση θερμικών απωλειών και θερινών κερδών  |
| Βελτίωση κουφωμάτων            | Περιορισμός απωλειών και διεισδύσεων αέρα    | Βελτίωση θερμικής άνεσης και μείωση φορτίων  |
| Ηλιακή προστασία               | Έλεγχος θερινής υπερθέρμανσης                | Μείωση ψυκτικών φορτίων                      |
| Αναβάθμιση θέρμανσης και ψύξης | Αποδοτικότερη κάλυψη φορτίων                 | Μείωση λειτουργικής κατανάλωσης              |
| Αναβάθμιση ZNX                 | Μείωση κατανάλωσης για παραγωγή ζεστού νερού | Περιορισμός ηλεκτρικής κατανάλωσης           |
| Φωτισμός και αυτοματισμοί      | Περιορισμός άσκοπης λειτουργίας              | Μείωση μικρότερων αλλά σταθερών καταναλώσεων |

Η διαφορά του Σεναρίου 3 από την απλή άθροιση των Σεναρίων 1 και 2 είναι σημαντική. Όταν οι παρεμβάσεις συνδυάζονται, η συνολική εξοικονόμηση δεν μπορεί να

υπολογίζεται ως απλό άθροισμα των επιμέρους εξοικονομήσεων, επειδή ορισμένες παρεμβάσεις επηρεάζουν τα ίδια ενεργειακά φορτία. Για παράδειγμα, η βελτίωση του κελύφους μειώνει ήδη τη ζήτηση θέρμανσης και ψύξης. Επομένως, όταν στη συνέχεια εφαρμόζεται αποδοτικότερο σύστημα θέρμανσης ή ψύξης, αυτό λειτουργεί σε μικρότερη ενεργειακή ζήτηση από εκείνη της αρχικής κατάστασης. Για τον λόγο αυτό, στο υπολογιστικό αρχείο εφαρμόζεται ακολουθιακή λογική υπολογισμού, ώστε να αποφεύγεται η διπλομέτρηση της εξοικονόμησης.

Η προσέγγιση αυτή είναι πιο ρεαλιστική, επειδή αποτυπώνει τη σειρά με την οποία λειτουργούν οι παρεμβάσεις στο κτίριο. Πρώτα μειώνονται οι ανάγκες μέσω του κελύφους και των παθητικών στρατηγικών και στη συνέχεια τα τεχνικά συστήματα καλύπτουν τα υπολειπόμενα φορτία με μεγαλύτερη απόδοση. Με αυτόν τον τρόπο, το Σενάριο 3 εκφράζει μια ολοκληρωμένη στρατηγική ενεργειακής αναβάθμισης και όχι απλώς μια αριθμητική πρόσθεση ανεξάρτητων μέτρων.

Το συνολικό αρχικό κόστος του Σεναρίου 3 υπολογίζεται σε 248.474,84 €. Το κόστος αυτό είναι το υψηλότερο μεταξύ των εξεταζόμενων σεναρίων, καθώς περιλαμβάνει τόσο τις παρεμβάσεις στο κέλυφος όσο και τις παρεμβάσεις στα τεχνικά συστήματα. Το αυξημένο αρχικό κόστος είναι αναμενόμενο, επειδή το σενάριο καλύπτει μεγαλύτερο εύρος εργασιών, υλικών και εξοπλισμού. Ωστόσο, η αξιολόγησή του δεν πρέπει να γίνει μόνο με βάση το αρχικό κόστος, αλλά σε συνδυασμό με τη μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης, τη μείωση του ετήσιου κόστους ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>eq.

Με την εφαρμογή του Σεναρίου 3, η ετήσια τελική κατανάλωση ενέργειας μειώνεται από 188.298,05 kWh/έτος στο Σενάριο 0 σε 61.120,20 kWh/έτος. Η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας ανέρχεται σε 127.177,85 kWh/έτος, που αντιστοιχεί σε ποσοστό εξοικονόμησης 67,54%. Η ειδική ετήσια κατανάλωση μειώνεται από 177,21 kWh/m<sup>2</sup>·έτος σε 57,52 kWh/m<sup>2</sup>·έτος, γεγονός που δείχνει σημαντική βελτίωση της ενεργειακής έντασης του κτιρίου.

**Πίνακας 5.0.20 Ενεργειακά αποτελέσματα Σεναρίου 3**

| Δείκτης                            | Σενάριο 0               | Σενάριο 3               | Μεταβολή                |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Ετήσια τελική κατανάλωση ενέργειας | 188.298,05<br>kWh/έτος  | 61.120,20<br>kWh/έτος   | -127.177,85<br>kWh/έτος |
| Ποσοστό εξοικονόμησης              | -                       | -                       | 67,54%                  |
| Θερμαινόμενη/κατοικήσιμη επιφάνεια | 1.062,60 m <sup>2</sup> | 1.062,60 m <sup>2</sup> | -                       |

| Δείκτης                  | Σενάριο 0                          | Σενάριο 3                         | Μεταβολή                            |
|--------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| αναφοράς                 |                                    |                                   |                                     |
| Ειδική ετήσια κατανάλωση | 177,21<br>kWh/m <sup>2</sup> ·έτος | 57,52<br>kWh/m <sup>2</sup> ·έτος | -119,69<br>kWh/m <sup>2</sup> ·έτος |

Η μείωση της ειδικής κατανάλωσης σε 57,52 kWh/m<sup>2</sup>·έτος δείχνει ότι το κτίριο μεταβαίνει από μια κατάσταση χαμηλής ενεργειακής επίδοσης σε κατάσταση σαφώς βελτιωμένης λειτουργικής συμπεριφοράς. Η βελτίωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το Σενάριο 3 επιδρά ταυτόχρονα στη ζήτηση και στην απόδοση των συστημάτων. Η παθητική και βιοκλιματική βελτίωση περιορίζει τις ανάγκες, ενώ η αναβάθμιση των εγκαταστάσεων μειώνει την ενέργεια που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών αυτών.

Το ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας μειώνεται από 32.151,28 €/έτος στο Σενάριο 0 σε 14.057,65 €/έτος στο Σενάριο 3. Η ετήσια οικονομική εξοικονόμηση ανέρχεται σε 18.093,63 €/έτος. Με βάση το συνολικό αρχικό κόστος των 248.474,84 €, η απλή περίοδος αποπληρωμής υπολογίζεται σε 13,73 έτη. Ο χρόνος αυτός είναι μεγαλύτερος από την αντίστοιχη απόσβεση του Σεναρίου 2, λόγω του υψηλότερου αρχικού κόστους, αλλά μικρότερος από την απόσβεση του Σεναρίου 1.

**Πίνακας 5.0.21 Οικονομικά αποτελέσματα Σεναρίου 3**

| Δείκτης                                         | Τιμή             |
|-------------------------------------------------|------------------|
| Συνολικό αρχικό κόστος παρεμβάσεων              | 248.474,84 €     |
| Ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας Σεναρίου 0 | 32.151,28 €/έτος |
| Ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας Σεναρίου 3 | 14.057,65 €/έτος |
| Ετήσια οικονομική εξοικονόμηση                  | 18.093,63 €/έτος |
| Απλή περίοδος αποπληρωμής                       | 13,73 έτη        |

Η οικονομική συμπεριφορά του Σεναρίου 3 δείχνει ότι η ολοκληρωμένη αναβάθμιση απαιτεί σημαντική αρχική επένδυση, αλλά προσφέρει τη μεγαλύτερη ετήσια εξοικονόμηση κόστους από όλα τα εξεταζόμενα σενάρια. Η περίοδος αποπληρωμής των 13,73 ετών κρίνεται μεσοπρόθεσμη και πρέπει να αξιολογηθεί σε σχέση με τη διάρκεια ζωής των επιμέρους παρεμβάσεων, τη μελλοντική πιθανή αύξηση των τιμών ενέργειας και τα μη οικονομικά οφέλη, όπως η θερμική άνεση, η αναβάθμιση της ποιότητας κατοίκησης και η περιβαλλοντική βελτίωση.

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση του Σεναρίου 3 δείχνει σημαντική μείωση των λειτουργικών εκπομπών. Οι ετήσιες λειτουργικές εκπομπές μειώνονται από 50.840,47 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος στο Σενάριο 0 σε 16.502,45 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος. Η ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών ανέρχεται σε 34.338,02 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος, δηλαδή περίπου 34,34 t CO<sub>2</sub>eq/έτος. Το αποτέλεσμα αυτό είναι το υψηλότερο μεταξύ των σεναρίων, καθώς το Σενάριο 3 συνδυάζει μείωση ζήτησης και αποδοτικότερη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.

Το αρχικό ενσωματωμένο GWP των παρεμβάσεων υπολογίζεται σε 66.939,70 kg CO<sub>2</sub>eq. Το μέγεθος αυτό είναι υψηλότερο από τα αντίστοιχα των Σεναρίων 1 και 2, καθώς το Σενάριο 3 περιλαμβάνει περισσότερα υλικά, εξοπλισμό και εργασίες. Λαμβάνοντας υπόψη τις αντικαταστάσεις των τεχνικών συστημάτων και των επιμέρους στοιχείων σε περίοδο 50 ετών, το GWP παρεμβάσεων με αντικαταστάσεις υπολογίζεται σε 184.353,50 kg CO<sub>2</sub>eq. Η διάκριση μεταξύ αρχικού και 50ετούς GWP είναι σημαντική, διότι το σενάριο περιλαμβάνει στοιχεία με διαφορετική διάρκεια ζωής.

**Πίνακας 5.0.22 Περιβαλλοντικά αποτελέσματα Σεναρίου 3**

| Δείκτης                                      | Τιμή                                 |
|----------------------------------------------|--------------------------------------|
| Λειτουργικές εκπομπές Σεναρίου 0             | 50.840,47 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος |
| Λειτουργικές εκπομπές Σεναρίου 3             | 16.502,45 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος |
| Ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών          | 34.338,02 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος |
| Αρχικό ενσωματωμένο GWP παρεμβάσεων          | 66.939,70 kg CO <sub>2</sub> eq      |
| GWP παρεμβάσεων με αντικαταστάσεις 50ετίας   | 184.353,50 kg CO <sub>2</sub> eq     |
| Περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης             | 1,95 έτη                             |
| Καθαρή μείωση εκπομπών 50ετίας με αρχικό GWP | 1.649,96 t CO <sub>2</sub> eq        |

Ο περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης του Σεναρίου 3 υπολογίζεται σε 1,95 έτη. Αυτό σημαίνει ότι η αρχική περιβαλλοντική επιβάρυνση των παρεμβάσεων αντισταθμίζεται από τη μείωση των λειτουργικών εκπομπών σε διάστημα μικρότερο των δύο ετών. Παρά το γεγονός ότι το σενάριο έχει το υψηλότερο αρχικό ενσωματωμένο GWP, η μεγάλη ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών οδηγεί σε γρήγορη περιβαλλοντική απόσβεση. Το αποτέλεσμα αυτό αναδεικνύει τη σημασία της ολοκληρωμένης προσέγγισης, καθώς το περιβαλλοντικό όφελος συσσωρεύεται γρήγορα κατά τη φάση λειτουργίας.

Η καθαρή μείωση εκπομπών στην περίοδο αναφοράς των 50 ετών, λαμβάνοντας υπόψη το αρχικό ενσωματωμένο GWP των παρεμβάσεων, υπολογίζεται σε 1.649,96 t CO<sub>2</sub>eq. Το μέγεθος αυτό αποτελεί το υψηλότερο καθαρό περιβαλλοντικό όφελος μεταξύ των εξεταζόμενων σεναρίων. Ακόμη και αν ληφθεί υπόψη ότι ορισμένα τεχνικά συστήματα θα απαιτήσουν αντικαταστάσεις μέσα στην περίοδο αναφοράς, το σενάριο εξακολουθεί να εμφανίζει ισχυρή περιβαλλοντική απόδοση λόγω της σημαντικής ετήσιας μείωσης λειτουργικών εκπομπών.

Η βιοκλιματική συμβολή του Σεναρίου 3 είναι ουσιαστική. Σε αντίθεση με ένα σενάριο που βασίζεται μόνο στα Η/Μ συστήματα, το συνδυαστικό σενάριο βελτιώνει τη φυσική συμπεριφορά του κτιρίου. Η θερμική προστασία του κελύφους, η αναβάθμιση του δώματος, τα ενεργειακά κουφώματα και η ελεγχόμενη σκίαση μειώνουν τις ενεργειακές ανάγκες πριν αυτές καλυφθούν από τις εγκαταστάσεις. Έτσι, τα τεχνικά συστήματα λειτουργούν σε ευνοϊκότερες συνθήκες, με μικρότερα φορτία και καλύτερη συνολική απόδοση.

Η προσέγγιση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για ένα αστικό κτίριο κατοικίας με νότια πρόσοψη και πλευρική γειτνίαση με όμορες ιδιοκτησίες. Η νότια όψη μπορεί να αξιοποιήσει χειμερινά ηλιακά κέρδη, αλλά χρειάζεται έλεγχο των θερινών θερμικών κερδών. Η εφαρμογή σκίασης συμβάλλει στη μείωση της θερινής υπερθέρμανσης, ενώ η βελτίωση του κελύφους και των κουφωμάτων περιορίζει τις απώλειες και τις ανεπιθύμητες ανταλλαγές θερμότητας. Με αυτόν τον τρόπο, το Σενάριο 3 δεν προσφέρει μόνο αριθμητική εξοικονόμηση, αλλά και ουσιαστική αναβάθμιση της λειτουργικής συμπεριφοράς του κτιρίου.

Η σύγκριση με τα δύο προηγούμενα σενάρια δείχνει ότι το Σενάριο 3 έχει το μεγαλύτερο συνολικό κόστος, αλλά και τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και τη μεγαλύτερη καθαρή μείωση εκπομπών. Το Σενάριο 1 αποτυπώνει τη συμβολή της παθητικής και βιοκλιματικής αναβάθμισης, ενώ το Σενάριο 2 αποτυπώνει τη συμβολή των τεχνικών συστημάτων. Το Σενάριο 3 αποδεικνύει ότι οι δύο προσεγγίσεις λειτουργούν συμπληρωματικά, με αποτέλεσμα καλύτερη συνολική ενεργειακή και περιβαλλοντική επίδοση.

**Πίνακας 5.0.23 Συνοπτική σύγκριση Σεναρίου 3 με τα προηγούμενα σενάρια**

| Δείκτης                                | Σενάριο 1                               | Σενάριο 2                               | Σενάριο 3                               |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Συνολικό αρχικό κόστος                 | 121.974,84 €                            | 126.500,00 €                            | 248.474,84 €                            |
| Ετήσια τελική κατανάλωση               | 141.684,23 kWh/έτος                     | 71.082,54 kWh/έτος                      | 61.120,20 kWh/έτος                      |
| Εξοικονόμηση έναντι Σεναρίου 0         | 46.613,82 kWh/έτος                      | 117.215,52 kWh/έτος                     | 127.177,85 kWh/έτος                     |
| Ποσοστό εξοικονόμησης                  | 24,76%                                  | 62,25%                                  | 67,54%                                  |
| Απλή περίοδος αποπληρωμής              | 16,89 έτη                               | 8,01 έτη                                | 13,73 έτη                               |
| Ετήσια μείωση λειτουργικών<br>εκπομπών | 12.585,73 kg<br>CO <sub>2</sub> eq/έτος | 31.648,19 kg<br>CO <sub>2</sub> eq/έτος | 34.338,02 kg<br>CO <sub>2</sub> eq/έτος |
| Περιβαλλοντικός<br>απόσβεσης χρόνος    | 2,22 έτη                                | 1,23 έτη                                | 1,95 έτη                                |

Το Σενάριο 3 έχει ελαφρώς μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας από το Σενάριο 2, αλλά με σημαντικά μεγαλύτερο αρχικό κόστος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το Σενάριο 2 επιτυγχάνει μεγάλη μείωση μέσω αποδοτικότερων συστημάτων, ενώ το Σενάριο 3 προσθέτει και τις παρεμβάσεις του κελύφους. Ωστόσο, η προστιθέμενη αξία του Σεναρίου 3 δεν περιορίζεται στην πρόσθετη αριθμητική εξοικονόμηση. Περιλαμβάνει και τη βελτίωση της θερμικής άνεσης, της ποιότητας του κελύφους, της ανθεκτικότητας του κτιρίου απέναντι σε θερινή υπερθέρμανση και της συνολικής βιοκλιματικής λειτουργίας.

Η ανάλυση ευαισθησίας του Σεναρίου 3 εξετάζει την επίδραση διαφορετικών εκτιμήσεων εξοικονόμησης και απόδοσης των παρεμβάσεων. Η πραγματική συμπεριφορά ενός συνδυαστικού σεναρίου μπορεί να επηρεαστεί από την ποιότητα εφαρμογής, τη χρήση του κτιρίου, τις κλιματικές συνθήκες, τη συντήρηση των συστημάτων και τη συμπεριφορά των ενοίκων. Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα πρέπει να ερμηνεύονται ως τεκμηριωμένη υπολογιστική προσέγγιση και όχι ως απόλυτη πρόβλεψη πραγματικής κατανάλωσης.

**Πίνακας 5.0.24 Ανάλυση ευαισθησίας Σεναρίου 3**

| Εκτίμηση    | Χαρακτήρας                                | Ρόλος στην αξιολόγηση        |
|-------------|-------------------------------------------|------------------------------|
| Συντηρητική | Χαμηλότερη συνολική απόδοση παρεμβάσεων   | Έλεγχος δυσμενούς περίπτωσης |
| Βασική      | Κύρια υπολογιστική παραδοχή               | Βασικό αποτέλεσμα σεναρίου   |
| Αισιόδοξη   | Υψηλότερη απόδοση κελύφους και συστημάτων | Έλεγχος ευνοϊκής περίπτωσης  |

Η συνολική αξιολόγηση του Σεναρίου 3 δείχνει ότι η ολοκληρωμένη αναβάθμιση προσφέρει το μεγαλύτερο ενεργειακό και περιβαλλοντικό όφελος, αλλά απαιτεί και τη μεγαλύτερη αρχική επένδυση. Η απλή περίοδος αποπληρωμής των 13,73 ετών είναι μεγαλύτερη από του Σεναρίου 2, αλλά το σενάριο παρουσιάζει καλύτερη συνολική ποιότητα παρέμβασης, επειδή δεν περιορίζεται στη βελτίωση συστημάτων, αλλά βελτιώνει και τη φυσική συμπεριφορά του κτιρίου. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για κτίρια κατοικίας, όπου η θερμική άνεση, η μείωση της υπερθέρμανσης και η ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους.

Συνολικά, το Σενάριο 3 μειώνει την ετήσια κατανάλωση ενέργειας κατά 127.177,85 kWh/έτος, το λειτουργικό κόστος κατά 18.093,63 €/έτος και τις λειτουργικές εκπομπές κατά 34.338,02 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος. Παρά το υψηλό αρχικό κόστος και το αυξημένο ενσωματωμένο GWP, η περιβαλλοντική απόσβεση επιτυγχάνεται σε 1,95 έτη και η καθαρή μείωση εκπομπών σε περίοδο 50 ετών ανέρχεται σε 1.649,96 t CO<sub>2</sub>eq. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η συνδυαστική αναβάθμιση μπορεί να αποτελέσει την πληρέστερη τεχνική και περιβαλλοντική στρατηγική, εφόσον ο στόχος δεν είναι μόνο η γρήγορη οικονομική απόσβεση, αλλά η συνολική βελτίωση της ενεργειακής, βιοκλιματικής και περιβαλλοντικής επίδοσης του κτιρίου.

## 5.5 Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων σεναρίων

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των τεσσάρων καταστάσεων που εξετάστηκαν στην εργασία: της υφιστάμενης κατάστασης αναφοράς, δηλαδή του Σεναρίου 0, και των τριών σεναρίων αναβάθμισης. Η συγκεντρωτική παρουσίαση έχει ως σκοπό να αποτυπώσει σε ενιαία μορφή τα βασικά μεγέθη κόστους, ενεργειακής κατανάλωσης, οικονομικής εξοικονόμησης, λειτουργικών εκπομπών και ενσωματωμένου περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Η αναλυτική ερμηνεία και η τελική συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιούνται στο επόμενο κεφάλαιο.

Το Σενάριο 0 αντιπροσωπεύει την υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου. Το Σενάριο 1 αφορά την παθητική και βιοκλιματική αναβάθμιση του κελύφους. Το Σενάριο 2 αφορά την αναβάθμιση των τεχνικών συστημάτων και της παραγωγής ζεστού νερού χρήσης. Το Σενάριο 3 αποτελεί το συνδυαστικό σενάριο, στο οποίο συνεξετάζονται οι βασικές

παθητικές, βιοκλιματικές και Η/Μ παρεμβάσεις. Η διάρθρωση αυτή επιτρέπει την αποτύπωση της σταδιακής βελτίωσης του κτιρίου και τη διακριτή παρακολούθηση της συμβολής κάθε ομάδας παρεμβάσεων.

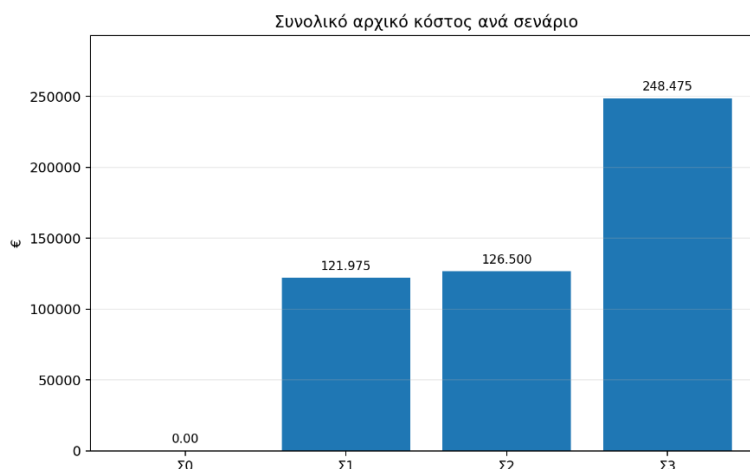
**Πίνακας 5.0.25 Συνοπτική περιγραφή εξεταζόμενων σεναρίων**

| Σενάριο   | Περιγραφή                                               | Βασικός χαρακτήρας                                    |
|-----------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Σενάριο 0 | Υφιστάμενη κατάσταση κτιρίου                            | Βάση σύγκρισης                                        |
| Σενάριο 1 | Παθητική και βιοκλιματική αναβάθμιση κελύφους           | Μείωση ενεργειακής ζήτησης                            |
| Σενάριο 2 | Αναβάθμιση τεχνικών συστημάτων και ZNX                  | Βελτίωση απόδοσης εγκαταστάσεων                       |
| Σενάριο 3 | Συνδυαστική αναβάθμιση κελύφους και τεχνικών συστημάτων | Ολοκληρωμένη ενεργειακή και περιβαλλοντική αναβάθμιση |

Η σύγκριση των αρχικών επενδυτικών δαπανών δείχνει ότι το Σενάριο 0 δεν έχει πρόσθετο κόστος, επειδή αντιπροσωπεύει τη διατήρηση της υφιστάμενης κατάστασης. Το Σενάριο 1 έχει συνολικό αρχικό κόστος 121.974,84 €, το Σενάριο 2 έχει κόστος 126.500,00 €, ενώ το Σενάριο 3 έχει το υψηλότερο κόστος, 248.474,84 €, καθώς συνδυάζει τις παρεμβάσεις του κελύφους με τις παρεμβάσεις των τεχνικών συστημάτων.

**Πίνακας 5.0.26 Συνολικό αρχικό κόστος ανά σενάριο**

| Σενάριο   | Συνολικό αρχικό κόστος |
|-----------|------------------------|
| Σενάριο 0 | 0,00 €                 |
| Σενάριο 1 | 121.974,84 €           |
| Σενάριο 2 | 126.500,00 €           |
| Σενάριο 3 | 248.474,84 €           |

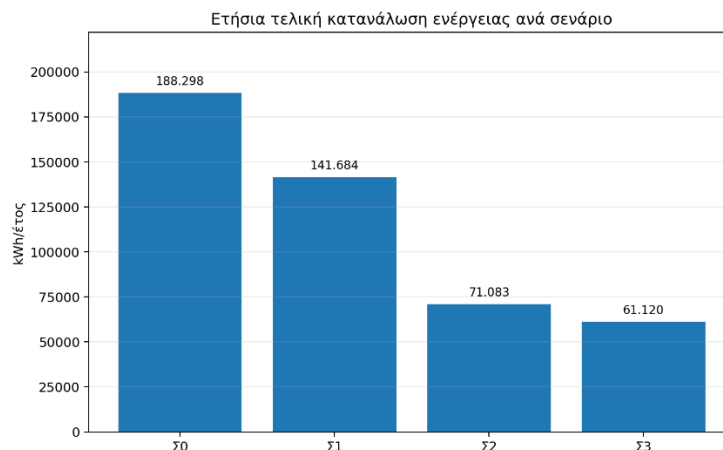


**Σχήμα 5.0.1 Συνολικό αρχικό κόστος ανά σενάριο.**

Ως προς την ετήσια τελική κατανάλωση ενέργειας, το Σενάριο 0 εμφανίζει κατανάλωση 188.298,05 kWh/έτος. Με την εφαρμογή του Σεναρίου 1 η κατανάλωση μειώνεται σε 141.684,23 kWh/έτος. Στο Σενάριο 2 η ετήσια τελική κατανάλωση μειώνεται σημαντικά, φτάνοντας τις 71.082,54 kWh/έτος. Το Σενάριο 3 παρουσιάζει τη χαμηλότερη ετήσια τελική κατανάλωση, 61.120,20 kWh/έτος.

**Πίνακας 5.0.27 Ετήσια τελική κατανάλωση ενέργειας ανά σενάριο**

| Σενάριο   | Ετήσια τελική κατανάλωση | Ειδική ετήσια κατανάλωση        |
|-----------|--------------------------|---------------------------------|
| Σενάριο 0 | 188.298,05 kWh/έτος      | 177,21 kWh/m <sup>2</sup> ·έτος |
| Σενάριο 1 | 141.684,23 kWh/έτος      | 133,33 kWh/m <sup>2</sup> ·έτος |
| Σενάριο 2 | 71.082,54 kWh/έτος       | 66,89 kWh/m <sup>2</sup> ·έτος  |
| Σενάριο 3 | 61.120,20 kWh/έτος       | 57,52 kWh/m <sup>2</sup> ·έτος  |

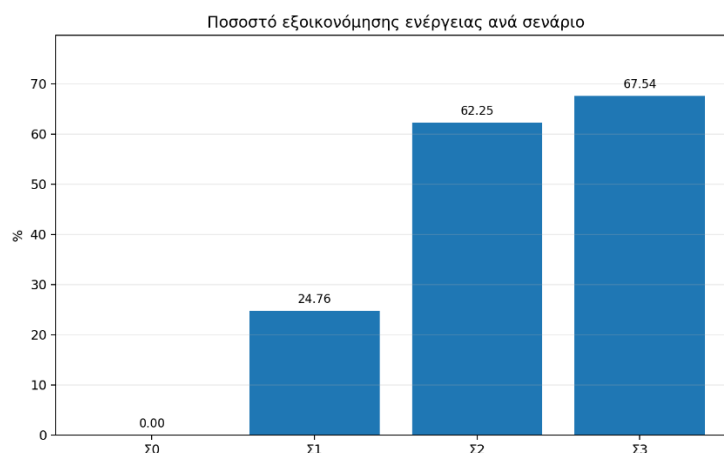


**Σχήμα 5.0.2 Ετήσια τελική κατανάλωση ενέργειας ανά σενάριο.**

Η εξοικονόμηση ενέργειας υπολογίζεται σε σχέση με το Σενάριο 0. Το Σενάριο 1 οδηγεί σε ετήσια εξοικονόμηση 46.613,82 kWh/έτος, που αντιστοιχεί σε ποσοστό 24,76%. Το Σενάριο 2 οδηγεί σε εξοικονόμηση 117.215,52 kWh/έτος, δηλαδή 62,25%. Το Σενάριο 3 εμφανίζει τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση, 127.177,85 kWh/έτος, δηλαδή 67,54% σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση.

**Πίνακας 5.0.28 Εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με το Σενάριο 0**

| Σενάριο   | Εξοικονόμηση ενέργειας | Ποσοστό εξοικονόμησης |
|-----------|------------------------|-----------------------|
| Σενάριο 0 | 0,00 kWh/έτος          | 0,00%                 |
| Σενάριο 1 | 46.613,82 kWh/έτος     | 24,76%                |
| Σενάριο 2 | 117.215,52 kWh/έτος    | 62,25%                |
| Σενάριο 3 | 127.177,85 kWh/έτος    | 67,54%                |

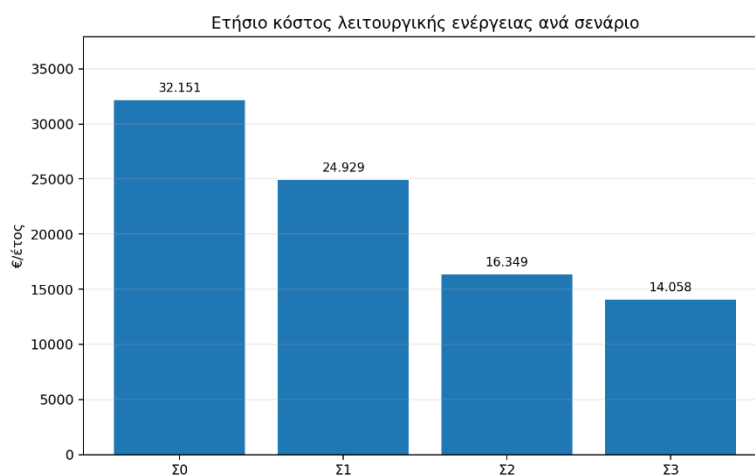


**Σχήμα 5.0.3 Ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας ανά σενάριο.**

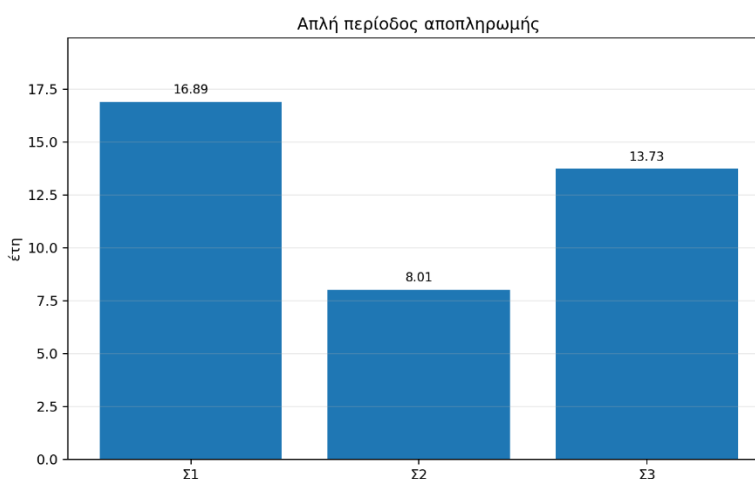
Η οικονομική επίδραση των σεναρίων αποτυπώνεται μέσω του ετήσιου κόστους λειτουργικής ενέργειας, της ετήσιας οικονομικής εξοικονόμησης και της απλής περιόδου αποπληρωμής. Στο Σενάριο 0 το ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας είναι 32.151,28 €/έτος. Στο Σενάριο 1 μειώνεται σε 24.928,55 €/έτος, στο Σενάριο 2 σε 16.348,98 €/έτος και στο Σενάριο 3 σε 14.057,65 €/έτος. Η μεγαλύτερη ετήσια οικονομική εξοικονόμηση εμφανίζεται στο Σενάριο 3, με 18.093,63 €/έτος, ενώ το Σενάριο 2 παρουσιάζει την ευνοϊκότερη απλή περίοδο αποπληρωμής, 8,01 έτη.

**Πίνακας 5.0.29 Οικονομικά αποτελέσματα σεναρίων**

| Σενάριο   | Ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας | Ετήσια οικονομική εξοικονόμηση | Απλή περίοδος αποπληρωμής |
|-----------|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Σενάριο 0 | 32.151,28 €/έτος                     | 0,00 €/έτος                    | -                         |
| Σενάριο 1 | 24.928,55 €/έτος                     | 7.222,74 €/έτος                | 16,89 έτη                 |
| Σενάριο 2 | 16.348,98 €/έτος                     | 15.802,30 €/έτος               | 8,01 έτη                  |
| Σενάριο 3 | 14.057,65 €/έτος                     | 18.093,63 €/έτος               | 13,73 έτη                 |



**Σχήμα 5.0.4 Ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας ανά σενάριο.**

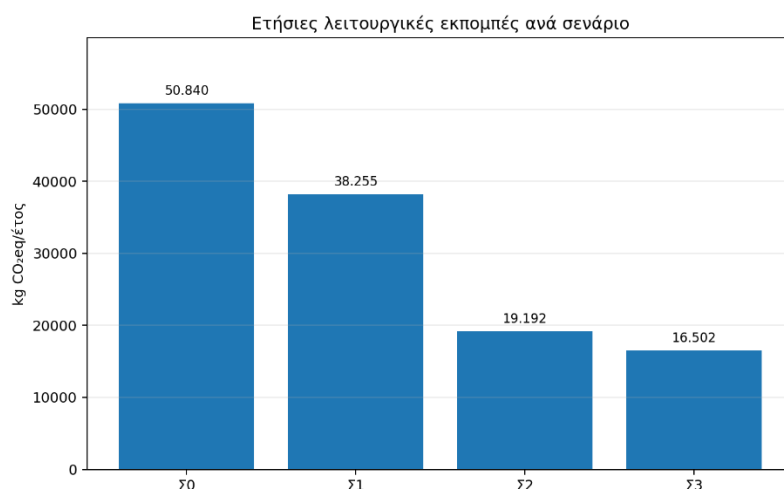


**Σχήμα 5.0.5 Απλή περίοδος αποπληρωμής Σεναρίων 1, 2 και 3.**

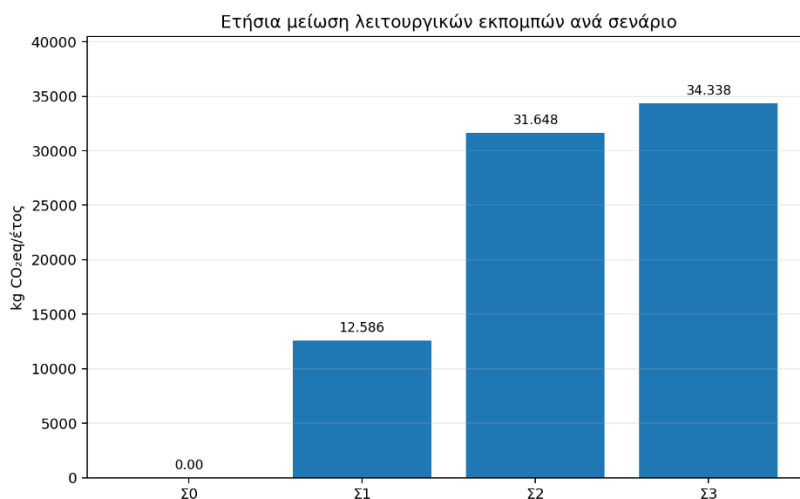
Ως προς τις λειτουργικές εκπομπές, το Σενάριο 0 εμφανίζει ετήσιες εκπομπές 50.840,47 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος. Στο Σενάριο 1 οι λειτουργικές εκπομπές μειώνονται σε 38.254,74 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος, στο Σενάριο 2 σε 19.192,28 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος και στο Σενάριο 3 σε 16.502,45 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος. Η μεγαλύτερη ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών παρατηρείται στο Σενάριο 3, με 34.338,02 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος.

**Πίνακας 5.0.30 Λειτουργικές εκπομπές και ετήσια μείωση εκπομπών**

| Σενάριο   | Ετήσιες λειτουργικές εκπομπές        | Ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών  |
|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Σενάριο 0 | 50.840,47 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος | 0,00 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος      |
| Σενάριο 1 | 38.254,74 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος | 12.585,73 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος |
| Σενάριο 2 | 19.192,28 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος | 31.648,19 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος |
| Σενάριο 3 | 16.502,45 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος | 34.338,02 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος |



**Σχήμα 5.0.6 Ετήσιες λειτουργικές εκπομπές ανά σενάριο.**

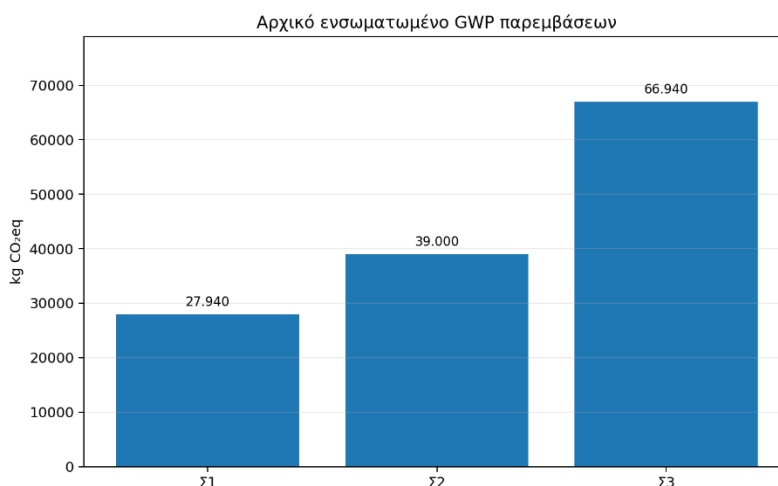


**Σχήμα 5.0.7 Ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών ανά σενάριο.**

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση περιλαμβάνει και το ενσωματωμένο GWP των παρεμβάσεων, δηλαδή το πρόσθετο ανθρακικό αποτύπωμα που συνδέεται με τα υλικά και τον εξοπλισμό που απαιτούνται για την υλοποίηση κάθε σεναρίου. Το Σενάριο 1 έχει αρχικό ενσωματωμένο GWP 27.939,70 kg CO<sub>2</sub>eq, το Σενάριο 2 έχει 39.000,00 kg CO<sub>2</sub>eq και το Σενάριο 3 έχει 66.939,70 kg CO<sub>2</sub>eq. Το υψηλότερο ενσωματωμένο GWP του Σεναρίου 3 είναι αναμενόμενο, καθώς περιλαμβάνει συνδυασμό παρεμβάσεων στο κέλυφος και στα τεχνικά συστήματα.

**Πίνακας 5.0.31 Ενσωματωμένο GWP παρεμβάσεων**

| Σενάριο   | Αρχικό ενσωματωμένο GWP παρεμβάσεων | GWP παρεμβάσεων με αντικαταστάσεις 50ετίας |
|-----------|-------------------------------------|--------------------------------------------|
| Σενάριο 0 | -                                   | -                                          |
| Σενάριο 1 | 27.939,70 kg CO <sub>2</sub> eq     | -                                          |
| Σενάριο 2 | 39.000,00 kg CO <sub>2</sub> eq     | 126.000,00 kg CO <sub>2</sub> eq           |
| Σενάριο 3 | 66.939,70 kg CO <sub>2</sub> eq     | 184.353,50 kg CO <sub>2</sub> eq           |

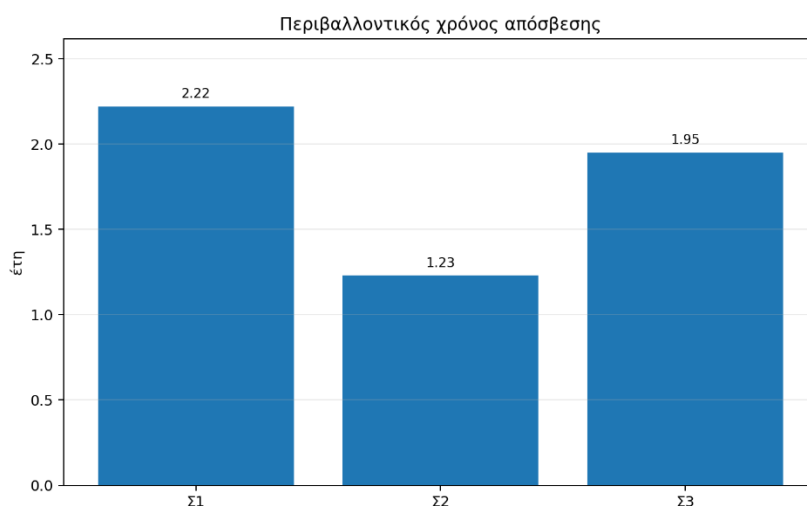


**Σχήμα 5.0.8 Αρχικό ενσωματωμένο GWP παρεμβάσεων ανά σενάριο.**

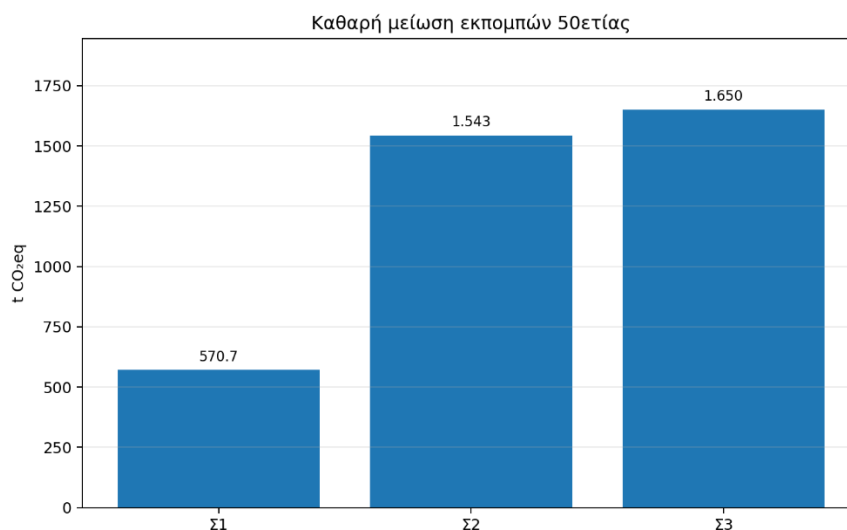
Ο περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης αποτυπώνει το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε η ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών να αντισταθμίσει το αρχικό ενσωματωμένο GWP των παρεμβάσεων. Στο Σενάριο 1 ο περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης είναι 2,22 έτη, στο Σενάριο 2 είναι 1,23 έτη και στο Σενάριο 3 είναι 1,95 έτη. Και στα τρία σενάρια, ο περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης είναι μικρός σε σχέση με την περίοδο αναφοράς της αξιολόγησης.

**Πίνακας 5.0.32 Περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης και καθαρή μείωση εκπομπών**

| Σενάριο   | Περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης | Καθαρή μείωση εκπομπών 50ετίας |
|-----------|----------------------------------|--------------------------------|
| Σενάριο 1 | 2,22 έτη                         | 570,70 t CO <sub>2</sub> eq    |
| Σενάριο 2 | 1,23 έτη                         | 1.543,41 t CO <sub>2</sub> eq  |
| Σενάριο 3 | 1,95 έτη                         | 1.649,96 t CO <sub>2</sub> eq  |



**Σχήμα 5.9 Περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης ανά σενάριο.**



**Σχήμα 5.10 Καθαρή μείωση εκπομπών 50ετίας ανά σενάριο.**

Η συγκεντρωτική παρουσίαση δείχνει ότι κάθε σενάριο έχει διαφορετικό προφίλ αποτελεσμάτων. Το Σενάριο 1 εμφανίζει τη μικρότερη ενεργειακή εξοικονόμηση από τα τρία σενάρια αναβάθμισης, αλλά βελτιώνει τη φυσική και βιοκλιματική λειτουργία του κτιρίου μέσω του κελύφους. Το Σενάριο 2 εμφανίζει πολύ σημαντική μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης και την ευνοϊκότερη απλή περίοδο αποπληρωμής. Το Σενάριο 3 εμφανίζει τη μεγαλύτερη συνολική εξοικονόμηση ενέργειας και τη μεγαλύτερη καθαρή μείωση εκπομπών, αλλά και το υψηλότερο αρχικό κόστος.

**Πίνακας 5.0.33 Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών αποτελεσμάτων**

| Δείκτης                                           | Σενάριο 0      | Σενάριο 1      | Σενάριο 2      | Σενάριο 3      |
|---------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Συνολικό αρχικό κόστος                            | 0,00 €         | 121.974,84 €   | 126.500,00 €   | 248.474,84 €   |
| Ετήσια τελική κατανάλωση                          | 188.298,05 kWh | 141.684,23 kWh | 71.082,54 kWh  | 61.120,20 kWh  |
| Εξοικονόμηση ενέργειας                            | 0,00 kWh       | 46.613,82 kWh  | 117.215,52 kWh | 127.177,85 kWh |
| Ποσοστό εξοικονόμησης                             | 0,00%          | 24,76%         | 62,25%         | 67,54%         |
| Ετήσιο κόστος ενέργειας                           | 32.151,28 €    | 24.928,55 €    | 16.348,98 €    | 14.057,65 €    |
| Ετήσια οικονομική εξοικονόμηση                    | 0,00 €         | 7.222,74 €     | 15.802,30 €    | 18.093,63 €    |
| Απλή περίοδος αποπληρωμής                         | -              | 16,89 έτη      | 8,01 έτη       | 13,73 έτη      |
| Ετήσιες λειτουργικές εκπομπές CO <sub>2</sub> eq  | 50.840,47 kg   | 38.254,74 kg   | 19.192,28 kg   | 16.502,45 kg   |
| Ετήσια μείωση εκπομπών CO <sub>2</sub> eq         | 0,00 kg        | 12.585,73 kg   | 31.648,19 kg   | 34.338,02 kg   |
| Αρχικό ενσωματωμένο GWP CO <sub>2</sub> eq        | -              | 27.939,70 kg   | 39.000,00 kg   | 66.939,70 kg   |
| Περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης                  | -              | 2,22 έτη       | 1,23 έτη       | 1,95 έτη       |
| Καθαρή μείωση εκπομπών 50ετίας CO <sub>2</sub> eq | -              | 570,70 t       | 1.543,41 t     | 1.649,96 t     |

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων αναδεικνύει ότι η επιλογή σεναρίου δεν μπορεί να βασιστεί σε έναν μόνο δείκτη. Η οικονομική, ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση δεν ταυτίζονται πάντοτε. Το σενάριο με τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας δεν είναι απαραίτητα εκείνο με τη μικρότερη περίοδο οικονομικής αποπληρωμής. Αντίστοιχα, το σενάριο με το υψηλότερο ενσωματωμένο GWP μπορεί να εμφανίζει σημαντικό καθαρό περιβαλλοντικό όφελος σε βάθος χρόνου, εφόσον μειώνει σημαντικά τις λειτουργικές εκπομπές.

Συνολικά, το Κεφάλαιο 5 αποτυπώνει τα αποτελέσματα της εφαρμογής των υπολογιστικών σεναρίων στο κτίριο μελέτης. Τα αποτελέσματα αυτά αποτελούν τη βάση για το Κεφάλαιο 6, όπου πραγματοποιείται η συγκριτική αξιολόγηση, η ερμηνεία των διαφορών μεταξύ των σεναρίων και η εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων.

## 6.

### 6.1 Συγκριτική αξιολόγηση κόστους

Η οικονομική αξιολόγηση των σεναρίων αποτελεί βασικό στάδιο της συγκριτικής ανάλυσης, καθώς επιτρέπει την εκτίμηση της οικονομικής αποδοτικότητας κάθε ομάδας παρεμβάσεων σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου. Η σύγκριση δεν περιορίζεται στο αρχικό κόστος εφαρμογής, αλλά λαμβάνει υπόψη το ετήσιο λειτουργικό κόστος ενέργειας, την ετήσια οικονομική εξοικονόμηση, την απλή περίοδο αποπληρωμής και τη σχέση κόστους προς ενεργειακό και περιβαλλοντικό όφελος. Με τον τρόπο αυτό, κάθε σενάριο αξιολογείται όχι μόνο ως τεχνική λύση, αλλά και ως επένδυση που παράγει συγκεκριμένο οικονομικό αποτέλεσμα σε βάθος χρόνου.

Η υφιστάμενη κατάσταση, δηλαδή το Σενάριο 0, δεν έχει αρχικό κόστος παρέμβασης, καθώς αντιπροσωπεύει τη διατήρηση του κτιρίου όπως είναι σήμερα. Ωστόσο, εμφανίζει το υψηλότερο ετήσιο λειτουργικό κόστος ενέργειας, το οποίο υπολογίζεται σε 32.151,28 €/έτος. Το μέγεθος αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, διότι δείχνει ότι η μη πραγματοποίηση παρεμβάσεων δεν συνεπάγεται πραγματική οικονομική ουδετερότητα. Αντίθετα, η διατήρηση της υφιστάμενης κατάστασης οδηγεί σε συνεχιζόμενο ετήσιο κόστος, το οποίο συνδέεται με την αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου.

**Πίνακας 6.0.1 Συγκριτική παρουσίαση αρχικού κόστους και λειτουργικού κόστους ενέργειας**

| Σενάριο   | Συνολικό αρχικό κόστος | Ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας | Ετήσια οικονομική εξοικονόμηση |
|-----------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Σενάριο 0 | 0,00 €                 | 32.151,28 €/έτος                     | 0,00 €/έτος                    |
| Σενάριο 1 | 121.974,84 €           | 24.928,55 €/έτος                     | 7.222,74 €/έτος                |
| Σενάριο 2 | 126.500,00 €           | 16.348,98 €/έτος                     | 15.802,30 €/έτος               |
| Σενάριο 3 | 248.474,84 €           | 14.057,65 €/έτος                     | 18.093,63 €/έτος               |

Το Σενάριο 1, που αφορά την παθητική και βιοκλιματική αναβάθμιση του κελύφους, έχει αρχικό κόστος 121.974,84 €. Το κόστος αυτό συνδέεται με παρεμβάσεις που αφορούν τις εκτεθειμένες τοιχοποιίες, το δώμα, τα εξωτερικά κουφώματα και την

ηλιακή προστασία. Η εφαρμογή του σεναρίου μειώνει το ετήσιο λειτουργικό κόστος ενέργειας από 32.151,28 €/έτος σε 24.928,55 €/έτος, δηλαδή επιφέρει ετήσια εξοικονόμηση 7.222,74 €. Η απλή περίοδος αποπληρωμής υπολογίζεται σε 16,89 έτη.

Η περίοδος αποπληρωμής του Σεναρίου 1 είναι η μεγαλύτερη μεταξύ των τριών σεναρίων αναβάθμισης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι παρεμβάσεις στο κέλυφος έχουν σημαντικό αρχικό κόστος, ενώ η οικονομική εξοικονόμηση προκύπτει κυρίως από τη μείωση των θερμικών και ψυκτικών φορτίων. Ωστόσο, η αξιολόγηση του Σεναρίου 1 δεν πρέπει να γίνεται αποκλειστικά με βάση την οικονομική αποπληρωμή. Οι παρεμβάσεις αυτές βελτιώνουν τη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου, μειώνουν την εξάρτηση από μηχανολογικά συστήματα, ενισχύουν τη βιοκλιματική λειτουργία και μπορούν να βελτιώσουν ουσιαστικά τη θερμική άνεση των κατοίκων.

Το Σενάριο 2, που αφορά την αναβάθμιση των τεχνικών συστημάτων και της παραγωγής ζεστού νερού χρήσης, έχει αρχικό κόστος 126.500,00 €, δηλαδή ελαφρώς μεγαλύτερο από το κόστος του Σεναρίου 1. Παρόλα αυτά, η ετήσια οικονομική εξοικονόμηση είναι σημαντικά υψηλότερη, καθώς υπολογίζεται σε 15.802,30 €/έτος. Το ετήσιο λειτουργικό κόστος ενέργειας μειώνεται σε 16.348,98 €/έτος και η απλή περίοδος αποπληρωμής υπολογίζεται σε 8,01 έτη. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι οι παρεμβάσεις στα τεχνικά συστήματα έχουν ιδιαίτερα υψηλή οικονομική αποδοτικότητα, επειδή μειώνουν άμεσα την ενεργειακή κατανάλωση των εγκαταστάσεων.

Το Σενάριο 2 εμφανίζεται ως το οικονομικά αποδοτικότερο σενάριο ως προς την απλή περίοδο αποπληρωμής. Η αναβάθμιση συστημάτων θέρμανσης, ψύξης, ΖΝΧ και φωτισμού οδηγεί σε μεγάλη μείωση της ετήσιας ενεργειακής δαπάνης, με αρχικό κόστος που δεν διαφέρει σημαντικά από το Σενάριο 1. Αυτό εξηγεί γιατί ο χρόνος αποπληρωμής του είναι περίπου ο μισός σε σχέση με το Σενάριο 1. Ωστόσο, το Σενάριο 2 δεν βελτιώνει ουσιαστικά τη φυσική ενεργειακή συμπεριφορά του κελύφους, ούτε αντιμετωπίζει πλήρως τις αδυναμίες που σχετίζονται με την ανεπαρκή θερμομόνωση, τα παλαιά κουφώματα και την απουσία βιοκλιματικής σκίασης.

Το Σενάριο 3, δηλαδή το συνδυαστικό σενάριο βέλτιστης αναβάθμισης, έχει το μεγαλύτερο αρχικό κόστος, το οποίο ανέρχεται σε 248.474,84 €. Το αυξημένο κόστος είναι αναμενόμενο, καθώς το σενάριο περιλαμβάνει τόσο παθητικές και βιοκλιματικές παρεμβάσεις στο κέλυφος όσο και αναβάθμιση των τεχνικών συστημάτων. Παρά το υψηλό αρχικό κόστος, το Σενάριο 3 οδηγεί στο χαμηλότερο ετήσιο λειτουργικό κόστος ενέργειας, το οποίο υπολογίζεται σε 14.057,65 €/έτος, και στη μεγαλύτερη ετήσια

οικονομική εξοικονόμηση, 18.093,63 €/έτος. Η απλή περίοδος αποπληρωμής υπολογίζεται σε 13,73 έτη.

**Πίνακας 6.0.2 Απλή περίοδος αποπληρωμής σεναρίων αναβάθμισης**

| Σενάριο   | Συνολικό αρχικό κόστος | Ετήσια οικονομική εξοικονόμηση | Απλή περίοδος αποπληρωμής |
|-----------|------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Σενάριο 1 | 121.974,84 €           | 7.222,74 €/έτος                | 16,89 έτη                 |
| Σενάριο 2 | 126.500,00 €           | 15.802,30 €/έτος               | 8,01 έτη                  |
| Σενάριο 3 | 248.474,84 €           | 18.093,63 €/έτος               | 13,73 έτη                 |

Η σύγκριση των περιόδων αποπληρωμής δείχνει ότι το Σενάριο 2 είναι το πιο ευνοϊκό με καθαρά οικονομικά κριτήρια, καθώς παρουσιάζει τον μικρότερο χρόνο ανάκτησης της αρχικής επένδυσης. Το Σενάριο 3, παρότι έχει τη μεγαλύτερη ετήσια εξοικονόμηση, δεν έχει τη μικρότερη περίοδο αποπληρωμής, επειδή απαιτεί πολύ μεγαλύτερη αρχική επένδυση. Το Σενάριο 1 έχει τον μεγαλύτερο χρόνο αποπληρωμής, γεγονός που δείχνει ότι οι παρεμβάσεις στο κέλυφος, αν και ενεργειακά και βιοκλιματικά σημαντικές, έχουν πιο αργή οικονομική απόδοση όταν εξετάζονται μεμονωμένα.

Η αξιολόγηση του κόστους πρέπει επίσης να εξετάζει τη σχέση μεταξύ αρχικής επένδυσης και ενεργειακής εξοικονόμησης. Για τον λόγο αυτό υπολογίζεται ο δείκτης κόστους ανά σωρευτική kWh εξοικονόμησης στην περίοδο αναφοράς των 50 ετών. Ο δείκτης αυτός εκφράζει πόσο κοστίζει κάθε kWh ενέργειας που εξοικονομείται σε βάθος χρόνου. Με βάση τα αποτελέσματα, το Σενάριο 1 έχει κόστος περίπου 0,052 €/kWh, το Σενάριο 2 περίπου 0,022 €/kWh και το Σενάριο 3 περίπου 0,039 €/kWh.

**Πίνακας 5.0.3 Κόστος ανά σωρευτική εξοικονομούμενη kWh στην περίοδο 50 ετών**

| Σενάριο   | Συνολικό αρχικό κόστος | Σωρευτική εξοικονόμηση ενέργειας 50ετίας | Κόστος ανά εξοικονομούμενη kWh |
|-----------|------------------------|------------------------------------------|--------------------------------|
| Σενάριο 1 | 121.974,84 €           | 2.330.691 kWh                            | 0,052 €/kWh                    |
| Σενάριο 2 | 126.500,00 €           | 5.860.776 kWh                            | 0,022 €/kWh                    |
| Σενάριο 3 | 248.474,84 €           | 6.358.893 kWh                            | 0,039 €/kWh                    |

Ο δείκτης αυτός επιβεβαιώνει ότι το Σενάριο 2 είναι το οικονομικά αποδοτικότερο ως προς την ενέργεια που εξοικονομείται. Με σχετικά παρόμοιο αρχικό κόστος με το Σενάριο 1, πετυχαίνει πολύ μεγαλύτερη ετήσια και σωρευτική εξοικονόμηση ενέργειας.

Το Σενάριο 3 εμφανίζει καλύτερη σχέση κόστους ανά kWh από το Σενάριο 1, αλλά όχι από το Σενάριο 2, λόγω του αυξημένου αρχικού κόστους του. Παρόλα αυτά, το Σενάριο 3 έχει ευρύτερη τεχνική αξία, επειδή συνδυάζει την ενεργειακή αποδοτικότητα των συστημάτων με τη βελτίωση του κελύφους και της βιοκλιματικής λειτουργίας.

Εκτός από το κόστος ανά kWh, ιδιαίτερη σημασία έχει και το κόστος ανά kg CO<sub>2</sub>eq που αποφεύγεται. Ο δείκτης αυτός συνδέει την οικονομική επένδυση με το καθαρό περιβαλλοντικό όφελος στην περίοδο αναφοράς. Με βάση την καθαρή μείωση εκπομπών 50ετίας, το Σενάριο 1 έχει κόστος περίπου 0,214 €/kg CO<sub>2</sub>eq που αποφεύγεται, το Σενάριο 2 περίπου 0,082 €/kg CO<sub>2</sub>eq και το Σενάριο 3 περίπου 0,151 €/kg CO<sub>2</sub>eq.

**Πίνακας 0.4 Κόστος ανά καθαρό kg CO<sub>2</sub>eq που αποφεύγεται στην περίοδο 50 ετών**

| Σενάριο   | Συνολικό αρχικό κόστος | Καθαρή μείωση εκπομπών 50ετίας   | Κόστος ανά kg CO <sub>2</sub> eq που αποφεύγεται |
|-----------|------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------|
| Σενάριο 1 | 121.974,84 €           | 570.695,70 kg CO <sub>2</sub> eq | 0,214 €/kg CO <sub>2</sub> eq                    |
| Σενάριο 2 | 126.500,00 €           | 1.543.410 kg CO <sub>2</sub> eq  | 0,082 €/kg CO <sub>2</sub> eq                    |
| Σενάριο 3 | 248.474,84 €           | 1.649.960 kg CO <sub>2</sub> eq  | 0,151 €/kg CO <sub>2</sub> eq                    |

Ο δείκτης αυτός οδηγεί στο ίδιο βασικό συμπέρασμα: το Σενάριο 2 εμφανίζει την καλύτερη σχέση κόστους προς περιβαλλοντικό αποτέλεσμα, όταν η αξιολόγηση γίνεται με βάση το κόστος ανά kg CO<sub>2</sub>eq που αποφεύγεται. Το Σενάριο 3 έχει το μεγαλύτερο συνολικό περιβαλλοντικό όφελος, αλλά επειδή έχει και πολύ υψηλότερο αρχικό κόστος, η σχέση κόστους προς αποφυγή εκπομπών είναι λιγότερο ευνοϊκή από εκείνη του Σεναρίου 2. Το Σενάριο 1 έχει τη μεγαλύτερη τιμή ανά kg CO<sub>2</sub>eq που αποφεύγεται, καθώς η εξοικονόμηση ενέργειας και εκπομπών είναι χαμηλότερη σε σχέση με τα άλλα δύο σενάρια.

Ωστόσο, η οικονομική ερμηνεία των αποτελεσμάτων δεν πρέπει να είναι μονοδιάστατη. Το Σενάριο 2 είναι το πιο αποδοτικό με βάση τους οικονομικούς δείκτες, αλλά δεν αντιμετωπίζει τις βασικές αδυναμίες του κελύφους. Το Σενάριο 1 έχει μικρότερη οικονομική αποδοτικότητα, αλλά βελτιώνει τη θερμική προστασία, την ηλιακή συμπεριφορά και τη βιοκλιματική λειτουργία του κτιρίου. Το Σενάριο 3 έχει υψηλότερο αρχικό κόστος, αλλά αποτελεί την πληρέστερη τεχνική λύση, καθώς μειώνει τα φορτία και ταυτόχρονα βελτιώνει την απόδοση των συστημάτων.

Από καθαρά οικονομική άποψη, το Σενάριο 2 μπορεί να θεωρηθεί η πιο άμεση και αποδοτική επιλογή. Η απλή περίοδος αποπληρωμής των 8,01 ετών, η μεγάλη ετήσια οικονομική εξοικονόμηση και το χαμηλό κόστος ανά εξοικονομούμενη kWh το καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικό. Η οικονομική αποδοτικότητα του Σεναρίου 2 οφείλεται στο γεγονός ότι οι παρεμβάσεις στα τεχνικά συστήματα επιφέρουν άμεση μείωση της κατανάλωσης χωρίς να απαιτούν το εύρος δομικών εργασιών που απαιτούνται στο κέλυφος.

Από την άλλη πλευρά, το Σενάριο 3 προσφέρει τη μεγαλύτερη συνολική μείωση του λειτουργικού κόστους, καθώς μειώνει το ετήσιο κόστος ενέργειας σε 14.057,65 €/έτος. Παρότι η περίοδος αποπληρωμής του είναι μεγαλύτερη από του Σεναρίου 2, η συνολική ετήσια εξοικονόμηση είναι η υψηλότερη. Επομένως, το Σενάριο 3 είναι οικονομικά βαρύτερο στην αρχική εφαρμογή, αλλά προσφέρει πιο ολοκληρωμένη και μακροπρόθεσμη αναβάθμιση του κτιρίου.

Το Σενάριο 1, αν και εμφανίζει τη μεγαλύτερη περίοδο αποπληρωμής, δεν πρέπει να θεωρηθεί οικονομικά αδιάφορο. Οι παρεμβάσεις στο κέλυφος έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και προσφέρουν οφέλη που δεν αποτυπώνονται πλήρως στην απλή οικονομική αποπληρωμή. Τέτοια οφέλη είναι η βελτίωση της θερμικής άνεσης, η μείωση της υπερθέρμανσης, η αναβάθμιση της ποιότητας κατοίκησης, η πιθανή αύξηση της αξίας του ακινήτου και η μείωση της εξάρτησης από τα μηχανολογικά συστήματα. Επομένως, η οικονομική του αξιολόγηση πρέπει να συνδυάζεται με τεχνικά και περιβαλλοντικά κριτήρια.

Συνολικά, η συγκριτική αξιολόγηση κόστους δείχνει ότι κάθε σενάριο έχει διαφορετικό οικονομικό προφίλ. Το Σενάριο 2 είναι το πιο αποδοτικό με βάση την απλή περίοδο αποπληρωμής, το κόστος ανά εξοικονομούμενη kWh και το κόστος ανά kg CO<sub>2</sub>eq που αποφεύγεται. Το Σενάριο 3 έχει τη μεγαλύτερη συνολική εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους και αποτελεί την πιο ολοκληρωμένη αναβάθμιση, αλλά απαιτεί σημαντικά υψηλότερη αρχική επένδυση. Το Σενάριο 1 έχει πιο αργή οικονομική απόδοση, αλλά προσφέρει ουσιαστική βελτίωση της βιοκλιματικής συμπεριφοράς του κτιρίου. Συνεπώς, η τελική επιλογή δεν μπορεί να βασιστεί μόνο στο αρχικό κόστος ή στην περίοδο αποπληρωμής, αλλά πρέπει να συνδυαστεί με την ενεργειακή, περιβαλλοντική και τεχνική αξιολόγηση που ακολουθεί στα επόμενα υποκεφάλαια.

## 6.2 Συγκριτική αξιολόγηση ενεργειακής εξοικονόμησης

Η συγκριτική αξιολόγηση της ενεργειακής εξοικονόμησης αποτελεί κεντρικό τμήμα της ανάλυσης, καθώς αποτυπώνει τον βαθμό στον οποίο κάθε σενάριο μειώνει τη λειτουργική ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Η ενεργειακή απόδοση δεν εξετάζεται μόνο ως αριθμητική μείωση των kWh, αλλά και ως αποτέλεσμα διαφορετικών τεχνικών στρατηγικών. Το Σενάριο 1 μειώνει την ενεργειακή ζήτηση μέσω παθητικών και βιοκλιματικών παρεμβάσεων στο κέλυφος. Το Σενάριο 2 μειώνει την κατανάλωση μέσω αποδοτικότερων τεχνικών συστημάτων. Το Σενάριο 3 συνδυάζει τις δύο προσεγγίσεις, επιδιώκοντας ταυτόχρονα μείωση ζήτησης και αποδοτικότερη κάλυψη των υπολειπόμενων ενεργειακών φορτίων.

Η υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου, δηλαδή το Σενάριο 0, εμφανίζει ετήσια τελική κατανάλωση ενέργειας 188.298,05 kWh/έτος. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ειδική ετήσια κατανάλωση 177,21 kWh/m<sup>2</sup>·έτος, με βάση τη θερμαινόμενη/κατοικήσιμη επιφάνεια αναφοράς των 1.062,60 m<sup>2</sup>. Η ενεργειακή αυτή εικόνα είναι συμβατή με κτίριο κατοικιών παλαιότερης κατασκευής, με ανεπαρκή θερμική προστασία, παλαιά κουφώματα, απουσία οργανωμένης σκίασης και τεχνικά συστήματα της αρχικής περιόδου κατασκευής. Το Σενάριο 0 αποτελεί τη βάση σύγκρισης για την ποσοτικοποίηση της ενεργειακής βελτίωσης των υπόλοιπων σεναρίων.

**Πίνακας 6.0.5 Συγκριτική παρουσίαση ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης**

| Σενάριο   | Ετήσια τελική κατανάλωση ενέργειας | Ειδική ετήσια κατανάλωση        | Μείωση έναντι Σεναρίου 0 |
|-----------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| Σενάριο 0 | 188.298,05 kWh/έτος                | 177,21 kWh/m <sup>2</sup> ·έτος | 0,00 kWh/έτος            |
| Σενάριο 1 | 141.684,23 kWh/έτος                | 133,33 kWh/m <sup>2</sup> ·έτος | 46.613,82 kWh/έτος       |
| Σενάριο 2 | 71.082,54 kWh/έτος                 | 66,89 kWh/m <sup>2</sup> ·έτος  | 117.215,52 kWh/έτος      |
| Σενάριο 3 | 61.120,20 kWh/έτος                 | 57,52 kWh/m <sup>2</sup> ·έτος  | 127.177,85 kWh/έτος      |

Το Σενάριο 1 οδηγεί σε ετήσια τελική κατανάλωση 141.684,23 kWh/έτος, δηλαδή σε μείωση 46.613,82 kWh/έτος σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Το ποσοστό εξοικονόμησης ανέρχεται σε 24,76%. Η ειδική ετήσια κατανάλωση μειώνεται από 177,21 kWh/m<sup>2</sup>·έτος σε 133,33 kWh/m<sup>2</sup>·έτος. Η μείωση αυτή είναι σημαντική, διότι προκύπτει

χωρίς αντικατάσταση των βασικών τεχνικών συστημάτων, αλλά μέσω παρεμβάσεων στο κέλυφος και στη βιοκλιματική λειτουργία του κτιρίου.

Η ενεργειακή συμβολή του Σεναρίου 1 πρέπει να ερμηνευθεί κυρίως ως μείωση της ζήτησης. Η θερμική αναβάθμιση των εκτεθειμένων τοιχοποιιών και του δώματος περιορίζει τις θερμικές απώλειες κατά τη χειμερινή περίοδο και μειώνει τη θερμική επιβάρυνση κατά τη θερινή περίοδο. Η αντικατάσταση των παλαιών κουφωμάτων βελτιώνει τη θερμομονωτική συμπεριφορά των ανοιγμάτων και μειώνει τις ανεπιθύμητες διεισδύσεις αέρα. Η εξωτερική σκίαση στη νότια όψη περιορίζει τα θερινά ηλιακά κέρδη και συμβάλλει στη μείωση των ψυκτικών φορτίων. Επομένως, το Σενάριο 1 δεν μειώνει απλώς την κατανάλωση ενέργειας, αλλά βελτιώνει τον τρόπο με τον οποίο το ίδιο το κτίριο αλληλεπιδρά με το εξωτερικό περιβάλλον.

Το Σενάριο 2 εμφανίζει πολύ μεγαλύτερη μείωση της ετήσιας κατανάλωσης. Η τελική κατανάλωση μειώνεται σε 71.082,54 kWh/έτος, δηλαδή εξοικονομούνται 117.215,52 kWh/έτος σε σχέση με το Σενάριο 0. Το ποσοστό εξοικονόμησης ανέρχεται σε 62,25%, ενώ η ειδική ετήσια κατανάλωση μειώνεται σε 66,89 kWh/m<sup>2</sup>·έτος. Το αποτέλεσμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό και δείχνει ότι τα παλαιά τεχνικά συστήματα του κτιρίου αποτελούν βασική πηγή ενεργειακής επιβάρυνσης.

Η ενεργειακή βελτίωση του Σεναρίου 2 οφείλεται κυρίως στη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και παραγωγής ζεστού νερού χρήσης. Η αντικατάσταση ή αναβάθμιση παλαιών συστημάτων μειώνει την ενέργεια που απαιτείται για την κάλυψη των ιδίων λειτουργικών αναγκών. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η συμβολή της παραγωγής ZNX, καθώς στο Σενάριο 0 η χρήση ηλεκτρικών θερμοσιφώνων οδηγεί σε σημαντική ηλεκτρική κατανάλωση. Η ηλιακή υποβοήθηση ή η χρήση αποδοτικότερης λύσης μειώνει άμεσα αυτή την κατανάλωση. Αντίστοιχα, η αναβάθμιση της θέρμανσης και της ψύξης μειώνει τη λειτουργική κατανάλωση χωρίς να μεταβάλλει το ίδιο το κέλυφος.

Ωστόσο, το Σενάριο 2 δεν αντιμετωπίζει την αιτία των αυξημένων θερμικών φορτίων. Το κτίριο εξακολουθεί να έχει ανεπαρκώς θερμομονωμένες εξωτερικές επιφάνειες, παλαιά κουφώματα και απουσία οργανωμένης βιοκλιματικής προστασίας. Συνεπώς, η ενεργειακή εξοικονόμηση του Σεναρίου 2 προκύπτει κυρίως επειδή οι ενεργειακές ανάγκες καλύπτονται με αποδοτικότερο τρόπο, όχι επειδή μειώνονται ουσιαστικά οι ίδιες οι ανάγκες του κτιρίου. Η διάκριση αυτή είναι κρίσιμη για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, διότι μια λύση που βασίζεται μόνο στα συστήματα μπορεί

να είναι ενεργειακά αποτελεσματική, αλλά δεν βελτιώνει πλήρως τη θερμική ποιότητα και τη βιοκλιματική συμπεριφορά του κελύφους.

Το Σενάριο 3 παρουσιάζει τη χαμηλότερη ετήσια τελική κατανάλωση, η οποία υπολογίζεται σε 61.120,20 kWh/έτος. Η εξοικονόμηση σε σχέση με το Σενάριο 0 ανέρχεται σε 127.177,85 kWh/έτος, δηλαδή ποσοστό 67,54%. Η ειδική ετήσια κατανάλωση μειώνεται σε 57,52 kWh/m<sup>2</sup>·έτος. Η επίδοση αυτή είναι η καλύτερη μεταξύ των εξεταζόμενων σεναρίων και αποτυπώνει τη συνολική συμβολή της συνδυαστικής προσέγγισης.

**Πίνακας 6.0.6 Ποσοστά ενεργειακής εξοικονόμησης έναντι υφιστάμενης κατάστασης**

| Σενάριο   | Εξοικονόμηση ενέργειας | Ποσοστό εξοικονόμησης | Μείωση ειδικής κατανάλωσης      |
|-----------|------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Σενάριο 1 | 46.613,82 kWh/έτος     | 24,76%                | 43,88 kWh/m <sup>2</sup> ·έτος  |
| Σενάριο 2 | 117.215,52 kWh/έτος    | 62,25%                | 110,32 kWh/m <sup>2</sup> ·έτος |
| Σενάριο 3 | 127.177,85 kWh/έτος    | 67,54%                | 119,69 kWh/m <sup>2</sup> ·έτος |

Το Σενάριο 3 έχει καλύτερη ενεργειακή επίδοση επειδή συνδυάζει δύο συμπληρωματικές λογικές. Αρχικά, οι παθητικές και βιοκλιματικές παρεμβάσεις μειώνουν τις ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου. Στη συνέχεια, οι αναβαθμισμένες εγκαταστάσεις καλύπτουν τα μειωμένα πλέον φορτία με μεγαλύτερη απόδοση. Η ακολουθία αυτή είναι τεχνικά ορθότερη από την απλή αντικατάσταση συστημάτων, διότι περιορίζει τη ζήτηση πριν από την κάλυψή της. Με αυτόν τον τρόπο, το κτίριο αποκτά καλύτερη συνολική ενεργειακή συμπεριφορά.

Η διαφορά μεταξύ Σεναρίου 2 και Σεναρίου 3 είναι ενεργειακά μικρότερη από τη διαφορά μεταξύ Σεναρίου 1 και Σεναρίου 2. Το Σενάριο 2 εξοικονομεί 117.215,52 kWh/έτος, ενώ το Σενάριο 3 εξοικονομεί 127.177,85 kWh/έτος. Η πρόσθετη εξοικονόμηση του Σεναρίου 3 έναντι του Σεναρίου 2 είναι 9.962,33 kWh/έτος. Αυτό δείχνει ότι οι παρεμβάσεις των τεχνικών συστημάτων έχουν πολύ ισχυρή επίδραση στη συνολική τελική κατανάλωση, ενώ η προσθήκη των παρεμβάσεων κελύφους στο συνδυαστικό σενάριο βελτιώνει περαιτέρω το αποτέλεσμα, αλλά με μικρότερη επιπλέον αριθμητική μείωση σε σχέση με την αρχική υφιστάμενη κατάσταση.

Η παραπάνω διαπίστωση δεν μειώνει τη σημασία του κελύφους. Αντίθετα, αναδεικνύει τη διαφορά μεταξύ ποσοτικής ενεργειακής εξοικονόμησης και ποιοτικής ενεργειακής αναβάθμισης. Το Σενάριο 1 βελτιώνει τη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου,

μειώνει τις απώλειες, περιορίζει την υπερθέρμανση και αυξάνει τη θερμική άνεση. Τα οφέλη αυτά δεν αποτυπώνονται πάντα πλήρως μόνο στην ετήσια τελική κατανάλωση. Αντιθέτως, η αναβάθμιση συστημάτων αποδίδει άμεσα σε kWh, επειδή αλλάζει τον βαθμό απόδοσης της κάλυψης των ενεργειακών αναγκών. Για τον λόγο αυτό, η ενεργειακή αξιολόγηση πρέπει να διακρίνει ανάμεσα στη μείωση φορτίων και στη βελτίωση απόδοσης συστημάτων.

**Πίνακας 6.0.7 Ενεργειακή διαφοροποίηση μεταξύ των σεναρίων αναβάθμισης**

| Σύγκριση                    | Διαφορά ετήσιας κατανάλωσης | Ερμηνεία                                                   |
|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------|
| Σενάριο 1 έναντι Σεναρίου 0 | -46.613,82 kWh/έτος         | Μείωση ζήτησης μέσω κελύφους και βιοκλιματικών παρεμβάσεων |
| Σενάριο 2 έναντι Σεναρίου 0 | -117.215,52 kWh/έτος        | Μείωση κατανάλωσης μέσω αποδοτικότερων τεχνικών συστημάτων |
| Σενάριο 3 έναντι Σεναρίου 0 | -127.177,85 kWh/έτος        | Συνδυασμένη μείωση ζήτησης και βελτίωση απόδοσης           |
| Σενάριο 3 έναντι Σεναρίου 2 | -9.962,34 kWh/έτος          | Πρόσθετο όφελος ολοκληρωμένης προσέγγισης                  |

Η ειδική ετήσια κατανάλωση αποτελεί χρήσιμο δείκτη, επειδή συνδέει την κατανάλωση με την επιφάνεια του κτιρίου. Η υφιστάμενη κατάσταση εμφανίζει τιμή 177,21 kWh/m<sup>2</sup>·έτος. Με το Σενάριο 1 η τιμή μειώνεται σε 133,33 kWh/m<sup>2</sup>·έτος, με το Σενάριο 2 σε 66,89 kWh/m<sup>2</sup>·έτος και με το Σενάριο 3 σε 57,52 kWh/m<sup>2</sup>·έτος. Η μείωση αυτή δείχνει ότι όλα τα σενάρια βελτιώνουν σημαντικά την ενεργειακή ένταση του κτιρίου, αλλά με διαφορετικό τρόπο και σε διαφορετικό βαθμό.

Η μετάβαση από τα 177,21 kWh/m<sup>2</sup>·έτος στα 57,52 kWh/m<sup>2</sup>·έτος στο Σενάριο 3 είναι ιδιαίτερα σημαντική. Αποτυπώνει μείωση της ειδικής κατανάλωσης κατά 119,69 kWh/m<sup>2</sup>·έτος, δηλαδή ουσιαστική αλλαγή στην ενεργειακή λειτουργία του κτιρίου. Η τιμή αυτή δείχνει ότι το κτίριο, μετά την ολοκληρωμένη αναβάθμιση, λειτουργεί με πολύ χαμηλότερη ενεργειακή ένταση σε σχέση με την αρχική κατάσταση. Η διαφορά αυτή είναι σημαντική όχι μόνο για το κόστος και τις εκπομπές, αλλά και για τη συνολική ποιότητα λειτουργίας του κτιρίου.

Η συμβολή του βιοκλιματικού σχεδιασμού στην ενεργειακή εξοικονόμηση γίνεται περισσότερο εμφανής όταν εξεταστεί το Σενάριο 1 και η συμμετοχή του στο Σενάριο 3.

Το κτίριο, στην υφιστάμενη κατάσταση, δεν διαθέτει ολοκληρωμένη βιοκλιματική λογική. Η νότια όψη δεν προστατεύεται με οργανωμένη σκίαση, τα κουφώματα είναι παλαιά και χαμηλής ενεργειακής απόδοσης, το δώμα δεν προσφέρει επαρκή θερμική προστασία και οι εξωτερικές τοιχοποιίες έχουν περιορισμένη μονωτική ικανότητα. Οι ελλείψεις αυτές οδηγούν σε αυξημένες απώλειες τον χειμώνα και σε αυξημένα θερμικά κέρδη το καλοκαίρι.

Η βιοκλιματική αναβάθμιση έχει επομένως διπλή λειτουργία. Από τη μία πλευρά, μειώνει την ενεργειακή κατανάλωση. Από την άλλη, βελτιώνει τις συνθήκες μέσα στις οποίες λειτουργούν τα τεχνικά συστήματα. Όταν το κτίριο έχει καλύτερο κέλυφος και ελεγχόμενη ηλιακή προστασία, τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης λειτουργούν λιγότερο εντατικά και με μικρότερα φορτία. Αυτό σημαίνει ότι η ενεργειακή αξία του βιοκλιματικού σχεδιασμού δεν περιορίζεται στην άμεση εξοικονόμηση που εμφανίζεται στο Σενάριο 1, αλλά επεκτείνεται και στη βελτίωση της συνολικής λειτουργίας του Σεναρίου 3.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι η αναβάθμιση τεχνικών συστημάτων προσφέρει τη μεγαλύτερη άμεση εξοικονόμηση, ενώ η αναβάθμιση κελύφους προσφέρει πιο δομική και μακροπρόθεσμη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς. Η πρώτη προσέγγιση είναι περισσότερο λειτουργική, καθώς μειώνει την ενέργεια που καταναλώνουν τα συστήματα. Η δεύτερη είναι περισσότερο παθητική και βιοκλιματική, καθώς μειώνει τις ανάγκες που πρέπει να καλυφθούν. Η ολοκληρωμένη προσέγγιση του Σεναρίου 3 συνδυάζει τα πλεονεκτήματα και των δύο.

Η ενεργειακή αξιολόγηση πρέπει επίσης να λάβει υπόψη ότι οι τιμές των σεναρίων βασίζονται σε τεκμηριωμένες υπολογιστικές παραδοχές. Σε υφιστάμενα κτίρια, η πραγματική εξοικονόμηση μπορεί να διαφοροποιηθεί ανάλογα με τη συμπεριφορά των χρηστών, τις κλιματικές συνθήκες, την ποιότητα εφαρμογής των παρεμβάσεων, τη συντήρηση των εγκαταστάσεων και τις εσωτερικές θερμοκρασίες λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα πρέπει να ερμηνεύονται κυρίως ως συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ σεναρίων και όχι ως απόλυτη πρόβλεψη μελλοντικής κατανάλωσης.

Παρά τις παραπάνω αβεβαιότητες, η τάση των αποτελεσμάτων είναι σαφής. Όλα τα σενάρια μειώνουν την ετήσια τελική κατανάλωση σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Το Σενάριο 1 παρουσιάζει μέτρια αλλά ουσιαστική ενεργειακή βελτίωση μέσω του κελύφους. Το Σενάριο 2 παρουσιάζει πολύ μεγάλη ενεργειακή εξοικονόμηση

μέσω των εγκαταστάσεων. Το Σενάριο 3 παρουσιάζει την καλύτερη συνολική ενεργειακή επίδοση, επειδή συνδυάζει μείωση ζήτησης και αποδοτικότερη κάλυψη φορτίων.

Συνολικά, η συγκριτική αξιολόγηση της ενεργειακής εξοικονόμησης δείχνει ότι το Σενάριο 3 είναι το ενεργειακά αποδοτικότερο, καθώς οδηγεί στη χαμηλότερη τελική κατανάλωση και στο υψηλότερο ποσοστό εξοικονόμησης. Το Σενάριο 2 ακολουθεί με πολύ μικρή διαφορά στην τελική κατανάλωση και εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλή απόδοση λόγω της αναβάθμισης των τεχνικών συστημάτων. Το Σενάριο 1 έχει τη μικρότερη αριθμητική εξοικονόμηση, αλλά είναι καθοριστικό για τη βιοκλιματική αναβάθμιση και τη μείωση της ενεργειακής ζήτησης του κτιρίου. Συνεπώς, από ενεργειακή άποψη, η βέλτιστη στρατηγική δεν είναι η αποκλειστική επιλογή μιας ομάδας παρεμβάσεων, αλλά ο συνδυασμός παθητικών μέτρων και αποδοτικών συστημάτων, όπως αποτυπώνεται στο Σενάριο 3.

### **6.3 Συγκριτική αξιολόγηση ανθρακικού αποτυπώματος**

Η συγκριτική αξιολόγηση του ανθρακικού αποτυπώματος αποτελεί βασικό τμήμα της συνολικής αποτίμησης των σεναρίων, καθώς συνδέει την ενεργειακή εξοικονόμηση με το περιβαλλοντικό όφελος. Η ανάλυση δεν περιορίζεται στις λειτουργικές εκπομπές που προκύπτουν από την κατανάλωση ενέργειας κατά τη χρήση του κτιρίου, αλλά λαμβάνει υπόψη και το ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα των υλικών και του εξοπλισμού που απαιτούνται για την εφαρμογή των παρεμβάσεων. Με τον τρόπο αυτό, κάθε σενάριο αξιολογείται όχι μόνο ως προς το πόση ενέργεια εξοικονομεί, αλλά και ως προς το αν η εξοικονόμηση αυτή αντισταθμίζει την πρόσθετη περιβαλλοντική επιβάρυνση των νέων υλικών και τεχνικών συστημάτων.

Η υφιστάμενη κατάσταση, δηλαδή το Σενάριο 0, εμφανίζει τις υψηλότερες ετήσιες λειτουργικές εκπομπές, οι οποίες υπολογίζονται σε 50.840,47 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος. Η τιμή αυτή συνδέεται με την υψηλή τελική κατανάλωση ενέργειας του κτιρίου, η οποία οφείλεται στο ανεπαρκώς θερμομονωμένο κέλυφος, στα παλαιά κουφώματα, στην απουσία οργανωμένης σκίασης, στην παλαιότητα των τεχνικών συστημάτων και στη χρήση ηλεκτρικών θερμοσιφώνων για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Το Σενάριο 0 δεν έχει πρόσθετο ενσωματωμένο αποτύπωμα παρεμβάσεων, επειδή δεν εφαρμόζεται καμία νέα τεχνική λύση. Ωστόσο, έχει το μεγαλύτερο συνεχιζόμενο λειτουργικό αποτύπωμα,

γεγονός που δείχνει ότι η μη επέμβαση στο κτίριο διατηρεί υψηλή περιβαλλοντική επιβάρυνση σε ετήσια βάση.

**Πίνακας 6.0.8 Συγκριτική παρουσίαση λειτουργικών εκπομπών**

| Σενάριο   | Ετήσια τελική<br>κατανάλωση | Ετήσιες λειτουργικές<br>εκπομπές     | Μείωση λειτουργικών<br>έκπομπών<br>έναντι Σ0 |
|-----------|-----------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|
| Σενάριο 0 | 188.298,05 kWh/έτος         | 50.840,47 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος | 0,00 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος              |
| Σενάριο 1 | 141.684,23 kWh/έτος         | 38.254,74 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος | 12.585,73 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος         |
| Σενάριο 2 | 71.082,54 kWh/έτος          | 19.192,28 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος | 31.648,19 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος         |
| Σενάριο 3 | 61.120,20 kWh/έτος          | 16.502,45 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος | 34.338,02 kg CO <sub>2</sub> eq/έτος         |

Το Σενάριο 1 μειώνει τις λειτουργικές εκπομπές από 50.840,47 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος σε 38.254,74 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος. Η ετήσια μείωση ανέρχεται σε 12.585,73 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος, δηλαδή περίπου 12,59 t CO<sub>2</sub>eq/έτος. Η μείωση αυτή προκύπτει από την παθητική και βιοκλιματική αναβάθμιση του κελύφους, η οποία περιορίζει τις θερμικές απώλειες, μειώνει τα ανεπιθύμητα θερινά θερμικά κέρδη και βελτιώνει τη συνολική ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου. Το περιβαλλοντικό όφελος του Σεναρίου 1 προκύπτει επομένως κυρίως από τη μείωση της ζήτησης ενέργειας.

Το ενσωματωμένο GWP των παρεμβάσεων του Σεναρίου 1 υπολογίζεται σε 27.939,70 kg CO<sub>2</sub>eq. Η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει την αρχική περιβαλλοντική επιβάρυνση που συνδέεται με τα νέα υλικά και τις εργασίες αναβάθμισης του κελύφους, του δώματος, των κουφωμάτων και της σκίασης. Παρότι το σενάριο εισάγει πρόσθετο ενσωματωμένο αποτύπωμα, ο περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης είναι 2,22 έτη. Αυτό σημαίνει ότι οι μειωμένες λειτουργικές εκπομπές αντισταθμίζουν την αρχική περιβαλλοντική επιβάρυνση των παρεμβάσεων σε μικρό χρονικό διάστημα, σε σχέση με τη συνολική περίοδο αναφοράς.

Το Σενάριο 2 οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερη μείωση λειτουργικών εκπομπών. Οι ετήσιες εκπομπές μειώνονται σε 19.192,28 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος, δηλαδή η ετήσια μείωση έναντι του Σεναρίου 0 είναι 31.648,19 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στη μεγάλη μείωση της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης μέσω της αναβάθμισης των τεχνικών συστημάτων και της παραγωγής ζεστού νερού χρήσης. Επειδή τα παλαιά

συστήματα του κτιρίου είναι ενεργειακά επιβαρυντικά, η αντικατάσταση ή βελτίωσή τους οδηγεί σε άμεση περιβαλλοντική ωφέλεια στη φάση λειτουργίας.

Το αρχικό ενσωματωμένο GWP των παρεμβάσεων του Σεναρίου 2 υπολογίζεται σε 39.000,00 kg CO<sub>2</sub>eq. Το μέγεθος αυτό είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του Σεναρίου 1, επειδή το Σενάριο 2 περιλαμβάνει τεχνικό εξοπλισμό και συστήματα με μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση παραγωγής. Επιπλέον, επειδή τα Η/Μ συστήματα έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής από τα βασικά δομικά στοιχεία του κελύφους, στο υπολογιστικό μοντέλο λαμβάνεται υπόψη και GWP παρεμβάσεων με αντικαταστάσεις 50ετίας, το οποίο ανέρχεται σε 126.000,00 kg CO<sub>2</sub>eq. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, διότι η περιβαλλοντική αποτίμηση τεχνικών συστημάτων πρέπει να λαμβάνει υπόψη ότι ενδέχεται να απαιτηθούν αντικαταστάσεις μέσα στην περίοδο αναφοράς.

Παρά το υψηλότερο ενσωματωμένο αποτύπωμα, το Σενάριο 2 παρουσιάζει τον μικρότερο περιβαλλοντικό χρόνο απόσβεσης, 1,23 έτη. Η ταχεία αυτή απόσβεση οφείλεται στη μεγάλη ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών. Με άλλα λόγια, οι πρόσθετες εκπομπές που σχετίζονται με την παραγωγή και εγκατάσταση του εξοπλισμού αντισταθμίζονται πολύ γρήγορα από τη μείωση των εκπομπών κατά τη λειτουργία του κτιρίου. Το στοιχείο αυτό αναδεικνύει την περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα της αναβάθμισης τεχνικών συστημάτων, ιδίως όταν η υφιστάμενη κατάσταση βασίζεται σε παλαιές και ενεργειακά μη αποδοτικές εγκαταστάσεις.

Το Σενάριο 3 εμφανίζει τη μεγαλύτερη μείωση λειτουργικών εκπομπών. Οι ετήσιες λειτουργικές εκπομπές μειώνονται σε 16.502,45 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος, ενώ η ετήσια μείωση έναντι του Σεναρίου 0 ανέρχεται σε 34.338,02 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος. Το αποτέλεσμα αυτό είναι το υψηλότερο από όλα τα σενάρια και αποτυπώνει τη συνδυαστική επίδραση της βιοκλιματικής αναβάθμισης του κελύφους και της αναβάθμισης των τεχνικών συστημάτων. Το Σενάριο 3 μειώνει τόσο τη ζήτηση όσο και την κατανάλωση που απαιτείται για την κάλυψη της ζήτησης.

Το αρχικό ενσωματωμένο GWP του Σεναρίου 3 είναι 66.939,70 kg CO<sub>2</sub>eq, δηλαδή το υψηλότερο μεταξύ των σεναρίων αναβάθμισης. Η τιμή αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς το σενάριο περιλαμβάνει τόσο τις παρεμβάσεις του κελύφους όσο και τις παρεμβάσεις των τεχνικών συστημάτων. Το GWP παρεμβάσεων με αντικαταστάσεις 50ετίας υπολογίζεται σε 184.353,50 kg CO<sub>2</sub>eq. Η υψηλότερη αρχική περιβαλλοντική επιβάρυνση δεν αναιρεί το περιβαλλοντικό όφελος του σεναρίου, αλλά δείχνει ότι η ολοκληρωμένη

αναβάθμιση πρέπει να αξιολογείται με βάση το ισοζύγιο ενσωματωμένων και λειτουργικών εκπομπών.

**Πίνακας 6.0.9 Ενσωματωμένο GWP και περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης**

| Σενάριο   | Αρχικό ενσωματωμένο GWP         | GWP με αντικαταστάσεις 50ετίας   | Περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης |
|-----------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Σενάριο 1 | 27.939,70 kg CO <sub>2</sub> eq | -                                | 2,22 έτη                         |
| Σενάριο 2 | 39.000,00 kg CO <sub>2</sub> eq | 126.000,00 kg CO <sub>2</sub> eq | 1,23 έτη                         |
| Σενάριο 3 | 66.939,70 kg CO <sub>2</sub> eq | 184.353,50 kg CO <sub>2</sub> eq | 1,95 έτη                         |

Ο περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης του Σεναρίου 3 είναι 1,95 έτη. Παρότι το σενάριο έχει το μεγαλύτερο αρχικό ενσωματωμένο GWP, η υψηλή ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών οδηγεί σε γρήγορη αντιστάθμιση της αρχικής επιβάρυνσης. Η τιμή αυτή βρίσκεται μεταξύ του Σεναρίου 1 και του Σεναρίου 2. Είναι μικρότερη από του Σεναρίου 1, επειδή το συνδυαστικό σενάριο επιτυγχάνει μεγαλύτερη ετήσια μείωση εκπομπών, αλλά μεγαλύτερη από του Σεναρίου 2, επειδή έχει υψηλότερο αρχικό ενσωματωμένο αποτύπωμα.

Η σύγκριση των τριών σεναρίων δείχνει ότι ο περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης είναι μικρός σε όλες τις περιπτώσεις. Και τα τρία σενάρια αποσβένουν την αρχική περιβαλλοντική επιβάρυνση των παρεμβάσεων σε χρονικό διάστημα μικρότερο των τριών ετών. Αυτό αποτελεί σημαντικό εύρημα, διότι δείχνει ότι οι εξεταζόμενες παρεμβάσεις, παρά το πρόσθετο ενσωματωμένο GWP τους, οδηγούν γρήγορα σε καθαρό περιβαλλοντικό όφελος μέσω της μείωσης των λειτουργικών εκπομπών.

Η καθαρή μείωση εκπομπών στην περίοδο αναφοράς αποτελεί πιο ολοκληρωμένο δείκτη, επειδή λαμβάνει υπόψη τη σωρευτική μείωση λειτουργικών εκπομπών και αφαιρεί το αρχικό ενσωματωμένο GWP των παρεμβάσεων. Με βάση την περίοδο αναφοράς των 50 ετών, το Σενάριο 1 οδηγεί σε καθαρή μείωση 570,70 t CO<sub>2</sub>eq, το Σενάριο 2 σε 1.543,41 t CO<sub>2</sub>eq και το Σενάριο 3 σε 1.649,96 t CO<sub>2</sub>eq.

**Πίνακας 6.0.10 Καθαρή μείωση εκπομπών στην περίοδο αναφοράς**

| Σενάριο   | Ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών | Καθαρή μείωση εκπομπών 50ετίας |
|-----------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Σενάριο 1 | 12,59 t CO <sub>2</sub> eq/έτος     | 570,70 t CO <sub>2</sub> eq    |
| Σενάριο 2 | 31,65 t CO <sub>2</sub> eq/έτος     | 1.543,41 t CO <sub>2</sub> eq  |
| Σενάριο 3 | 34,34 t CO <sub>2</sub> eq/έτος     | 1.649,96 t CO <sub>2</sub> eq  |

Το Σενάριο 3 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη καθαρή μείωση εκπομπών σε βάθος 50 ετών. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς έχει τη μεγαλύτερη ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών. Παράλληλα, το Σενάριο 2 εμφανίζει πολύ κοντινό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα, με χαμηλότερο αρχικό κόστος και μικρότερο περιβαλλοντικό χρόνο απόσβεσης. Η διαφορά μεταξύ Σεναρίου 2 και Σεναρίου 3 ως προς την καθαρή μείωση εκπομπών είναι 106,55 t CO<sub>2</sub>eq σε περίοδο 50 ετών, ενώ η διαφορά στο αρχικό κόστος είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Το στοιχείο αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στην τελική πολυκριτηριακή αξιολόγηση.

Το Σενάριο 1 εμφανίζει τη μικρότερη καθαρή μείωση εκπομπών, αλλά έχει ιδιαίτερη σημασία από άποψη βιοκλιματικής λειτουργίας. Η περιβαλλοντική του συμβολή δεν περιορίζεται μόνο στην αριθμητική μείωση των λειτουργικών εκπομπών. Η βελτίωση του κελύφους, η θερμική προστασία, η αναβάθμιση των κουφωμάτων και η εξωτερική σκίαση μειώνουν την ενεργειακή ζήτηση του κτιρίου και βελτιώνουν τις συνθήκες λειτουργίας του. Επομένως, το περιβαλλοντικό όφελος του Σεναρίου 1 συνδέεται με την παθητική μείωση των αναγκών και όχι μόνο με τη μείωση της τελικής κατανάλωσης.

Η σύγκριση μεταξύ λειτουργικών και ενσωματωμένων εκπομπών αναδεικνύει μία κρίσιμη μεθοδολογική διάσταση. Τα σενάρια αναβάθμισης δημιουργούν αρχική περιβαλλοντική επιβάρυνση λόγω νέων υλικών και εξοπλισμού, αλλά μειώνουν τις ετήσιες λειτουργικές εκπομπές. Το περιβαλλοντικά επιθυμητό σενάριο είναι εκείνο στο οποίο η λειτουργική μείωση εκπομπών είναι αρκετά μεγάλη ώστε να αντισταθμίσει γρήγορα το ενσωματωμένο GWP και να δημιουργήσει καθαρό όφελος σε βάθος χρόνου. Με βάση τα αποτελέσματα, και τα τρία σενάρια ικανοποιούν αυτή την απαίτηση, με διαφορετικό όμως βαθμό αποτελεσματικότητας.

Από την άποψη του απόλυτου περιβαλλοντικού οφέλους, το Σενάριο 3 είναι το πιο αποδοτικό, καθώς οδηγεί στη μεγαλύτερη καθαρή μείωση εκπομπών. Από την άποψη της ταχύτητας περιβαλλοντικής απόσβεσης, το Σενάριο 2 είναι το ευνοϊκότερο, με χρόνο απόσβεσης 1,23 έτη. Από την άποψη της βιοκλιματικής περιβαλλοντικής λογικής, το

Σενάριο 1 έχει ιδιαίτερη αξία, επειδή μειώνει τη ζήτηση μέσω παθητικών παρεμβάσεων και όχι μόνο μέσω αποδοτικότερης λειτουργίας συστημάτων. Συνεπώς, κάθε σενάριο εμφανίζει διαφορετικό περιβαλλοντικό προφίλ.

**Πίνακας 6.0.11 Περιβαλλοντική ερμηνεία σεναρίων**

| Σενάριο   | Περιβαλλοντικό πλεονέκτημα                             | Περιβαλλοντικός περιορισμός                                  |
|-----------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Σενάριο 1 | Μείωση ζήτησης μέσω βιοκλιματικής αναβάθμισης κελύφους | Μικρότερη ετήσια μείωση εκπομπών σε σχέση με τα άλλα σενάρια |
| Σενάριο 2 | Μεγάλη και γρήγορη μείωση λειτουργικών εκπομπών        | Δεν αντιμετωπίζει πλήρως τις αδυναμίες του κελύφους          |
| Σενάριο 3 | Μεγαλύτερη καθαρή μείωση εκπομπών 50ετίας              | Υψηλότερο αρχικό και 50ετές ενσωματωμένο GWP                 |

Ιδιαίτερη σημασία έχει η περιβαλλοντική αποτίμηση των τεχνικών συστημάτων σε βάθος χρόνου. Τα συστήματα θέρμανσης, ψύξης, ZNX και ο λοιπός εξοπλισμός έχουν συνήθως μικρότερη διάρκεια ζωής από τα δομικά στοιχεία. Επομένως, σε μια περίοδο αναφοράς 50 ετών είναι πιθανό να απαιτηθούν μία ή περισσότερες αντικαταστάσεις. Αυτό εξηγεί γιατί στο Σενάριο 2 και στο Σενάριο 3 καταγράφεται διακριτά το GWP παρεμβάσεων με αντικαταστάσεις 50ετίας. Η συμπερίληψη αυτής της παραμέτρου αποτρέπει την υποεκτίμηση του πραγματικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος των τεχνικών συστημάτων.

Αντίθετα, οι παρεμβάσεις στο κέλυφος έχουν συνήθως μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και πιο σταθερή επίδραση στη λειτουργική συμπεριφορά του κτιρίου. Αυτό σημαίνει ότι το Σενάριο 1, παρότι έχει μικρότερη ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών, προσφέρει μακροχρόνια παθητική βελτίωση. Η θερμομόνωση, τα νέα κουφώματα και η σκίαση μεταβάλλουν τη φυσική συμπεριφορά του κτιρίου και μειώνουν τις ανάγκες ανεξάρτητα από το είδος των συστημάτων που θα χρησιμοποιηθούν στο μέλλον. Αυτό αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό πλεονέκτημα, ιδίως σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής και αυξανόμενης θερινής θερμικής καταπόνησης.

Η απουσία βιοκλιματικού σχεδιασμού στην υφιστάμενη κατάσταση οδηγεί σε υψηλότερες λειτουργικές εκπομπές, επειδή το κτίριο καταναλώνει περισσότερη ενέργεια για να διατηρήσει αποδεκτές συνθήκες άνεσης. Η ανεπαρκής θερμομόνωση αυξάνει τις απώλειες τον χειμώνα, ενώ η απουσία σκίασης και η χαμηλή ποιότητα κουφωμάτων

επιβαρύνουν τη θερινή συμπεριφορά. Έτσι, το περιβαλλοντικό κόστος της αρχικής κατάστασης δεν είναι μόνο το αποτέλεσμα παλαιών τεχνικών συστημάτων, αλλά και συνέπεια της μειωμένης παθητικής ικανότητας του κτιρίου να ανταποκρίνεται στο κλίμα.

Το Σενάριο 3 δείχνει ότι η συνδυαστική προσέγγιση προσφέρει το πληρέστερο περιβαλλοντικό αποτέλεσμα, επειδή περιορίζει τόσο τις αιτίες όσο και τα μέσα της ενεργειακής κατανάλωσης. Με τη βελτίωση του κελύφους μειώνονται οι ανάγκες. Με την αναβάθμιση των συστημάτων μειώνεται η ενέργεια που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών. Με τον τρόπο αυτό, το κτίριο αποκτά χαμηλότερη λειτουργική εκπομπή και καλύτερη περιβαλλοντική συμπεριφορά συνολικά. Ωστόσο, επειδή η πρόσθετη μείωση εκπομπών του Σεναρίου 3 σε σχέση με το Σενάριο 2 δεν είναι πολύ μεγάλη, η τελική επιλογή πρέπει να λάβει υπόψη και το κόστος, τη θερμική άνεση, τη διάρκεια ζωής των παρεμβάσεων και την ποιότητα της αναβάθμισης.

Συνολικά, η συγκριτική αξιολόγηση του ανθρακικού αποτυπώματος δείχνει ότι όλα τα σενάρια αναβάθμισης οδηγούν σε καθαρό περιβαλλοντικό όφελος σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Το Σενάριο 1 έχει τη μικρότερη καθαρή μείωση εκπομπών, αλλά συμβάλλει ουσιαστικά στη βιοκλιματική αναβάθμιση και στη μείωση της ενεργειακής ζήτησης. Το Σενάριο 2 παρουσιάζει την καλύτερη περιβαλλοντική απόσβεση και πολύ υψηλή μείωση λειτουργικών εκπομπών μέσω των τεχνικών συστημάτων. Το Σενάριο 3 εμφανίζει τη μεγαλύτερη καθαρή μείωση εκπομπών σε βάθος 50 ετών και αποτελεί την πληρέστερη περιβαλλοντική στρατηγική, παρά το υψηλότερο αρχικό ενσωματωμένο αποτύπωμα. Συνεπώς, η τελική αξιολόγηση πρέπει να συνδυάσει το απόλυτο περιβαλλοντικό όφελος με την οικονομική αποδοτικότητα και τη βιοκλιματική ποιότητα κάθε σεναρίου.

## **6.4 Ρόλος του βιοκλιματικού σχεδιασμού**

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στην ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση του κτιρίου, διότι επηρεάζει την ίδια τη ζήτηση ενέργειας πριν από την κάλυψή της από τα τεχνικά συστήματα. Σε αντίθεση με τις παρεμβάσεις που εστιάζουν αποκλειστικά στην απόδοση του εξοπλισμού, οι βιοκλιματικές στρατηγικές στοχεύουν στη βελτίωση της φυσικής συμπεριφοράς του κτιρίου μέσω του κελύφους, του προσανατολισμού, της σκίασης, του φυσικού αερισμού, της θερμικής μάζας και της αξιοποίησης ή αποφυγής των ηλιακών κερδών. Η λογική αυτή είναι θεμελιώδης στον

βιοκλιματικό σχεδιασμό, καθώς το κτίριο αντιμετωπίζεται ως σύστημα που αλληλεπιδρά με το κλίμα και όχι ως παθητικός αποδέκτης μηχανολογικών λύσεων (Olgyay, 1963; Givoni, 1998).

Στην υφιστάμενη κατάσταση, δηλαδή στο Σενάριο 0, το κτίριο παρουσιάζει περιορισμένη βιοκλιματική λειτουργία. Η κατασκευή του έγινε το 1987, με χαρακτηριστικά που δεν ανταποκρίνονται στις σημερινές απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης και θερμικής προστασίας. Οι εξωτερικοί τοίχοι έχουν ανεπαρκή θερμομονωτική συμπεριφορά, τα κουφώματα είναι παλαιά συρόμενα αλουμινίου με μονό υαλοπίνακα, δεν υπάρχουν οργανωμένα εξωτερικά συστήματα σκίασης και η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης γίνεται με ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες. Τα στοιχεία αυτά οδηγούν σε αυξημένες θερμικές απώλειες τον χειμώνα, αυξημένα ηλιακά και θερμικά κέρδη το καλοκαίρι και μεγαλύτερη εξάρτηση από μηχανολογικά συστήματα.

Η κύρια πρόσοψη του κτιρίου έχει νότιο προσανατολισμό, γεγονός που αποτελεί σημαντική βιοκλιματική παράμετρο. Η νότια όψη μπορεί να συμβάλει θετικά στη χειμερινή λειτουργία μέσω ηλιακών κερδών, εφόσον αυτά ελέγχονται σωστά. Ωστόσο, όταν δεν υπάρχει κατάλληλη εξωτερική σκίαση, η ίδια όψη μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη θερινή υπερθέρμανση και σε μεγαλύτερες ανάγκες ψύξης. Στην παρούσα περίπτωση, η απουσία τεντών ή άλλων συστημάτων σκίασης περιορίζει την ικανότητα του κτιρίου να διαχειριστεί την ηλιακή ακτινοβολία με παθητικό τρόπο. Συνεπώς, η νότια όψη, ενώ έχει βιοκλιματικό δυναμικό, στην υφιστάμενη κατάσταση δεν αξιοποιείται επαρκώς.

Η βόρεια πλευρά του κτιρίου απέχει περίπου 10 m από την όμορη ιδιοκτησία και λειτουργεί ως εκτεθειμένη όψη, με κύρια επίδραση στις θερμικές απώλειες κατά τη χειμερινή περίοδο. Αντίθετα, οι πλευρικές όψεις συνορεύουν με όμορες ιδιοκτησίες και έχουν περιορισμένη έκθεση. Η διαφοροποίηση αυτή δείχνει ότι ο βιοκλιματικός σχεδιασμός δεν μπορεί να εφαρμόζεται ομοιόμορφα σε όλες τις όψεις, αλλά πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό, τη γειτνίαση, τη σκίαση από γειτονικά κτίρια και τις πραγματικές συνθήκες του αστικού περιβάλλοντος. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση των παρεμβάσεων πρέπει να συνδέεται με τη συγκεκριμένη γεωμετρία και θέση του κτιρίου.

**Πίνακας 6.0.12 Βιοκλιματική ερμηνεία βασικών χαρακτηριστικών του κτιρίου**

| Χαρακτηριστικό    | Υφιστάμενη κατάσταση                            | Βιοκλιματική επίπτωση                                       |
|-------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Νότια κύρια όψη   | Χωρίς οργανωμένη εξωτερική σκίαση               | Αυξημένα θερινά ηλιακά κέρδη και ανάγκες ψύξης              |
| Βόρεια όψη        | Εκτεθειμένη λόγω απόστασης από όμορη ιδιοκτησία | Αυξημένες θερμικές απώλειες τον χειμώνα                     |
| Πλευρικές όψεις   | Γειτνίαση με όμορες ιδιοκτησίες                 | Περιορισμένη έκθεση και περιορισμένη δυνατότητα παρεμβάσεων |
| Εξωτερικοί τοίχοι | Ανεπαρκής θερμομονωτική προστασία               | Αύξηση θερμικών απωλειών και θερινής επιβάρυνσης            |
| Κουφώματα         | Παλαιά συρόμενα με μονό υαλοπίνακα              | Απώλειες, διεισδύσεις αέρα και χαμηλή θερμική άνεση         |
| Δώμα              | Κρίσιμη οριζόντια επιφάνεια                     | Αυξημένη θερινή υπερθέρμανση και χειμερινές απώλειες        |
| Φυσικός αερισμός  | Μη οργανωμένη στρατηγική                        | Περιορισμένη παθητική αποφόρτιση                            |

Το Σενάριο 1 αναδεικνύει άμεσα τη συμβολή του βιοκλιματικού σχεδιασμού, καθώς περιλαμβάνει παρεμβάσεις στο κέλυφος, στο δώμα, στα κουφώματα και στη σκίαση. Η ετήσια τελική κατανάλωση μειώνεται από 188.298,05 kWh/έτος σε 141.684,23 kWh/έτος, δηλαδή επιτυγχάνεται εξοικονόμηση 46.613,82 kWh/έτος ή 24,76%. Η μείωση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι προκύπτει χωρίς αλλαγή των βασικών τεχνικών συστημάτων. Επομένως, αποτυπώνει τη δυνατότητα των παθητικών παρεμβάσεων να μειώσουν τη ζήτηση ενέργειας του κτιρίου.

Η βελτίωση του κελύφους μειώνει τις θερμικές ανταλλαγές μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος. Η θερμομονωτική αναβάθμιση των εκτεθειμένων τοιχοποιιών περιορίζει τις απώλειες κατά τη χειμερινή περίοδο και βελτιώνει τη θερμική σταθερότητα των εσωτερικών χώρων. Η αναβάθμιση του δώματος είναι επίσης κρίσιμη, διότι το δώμα αποτελεί επιφάνεια έντονης θερμικής καταπόνησης, ειδικά κατά τη θερινή περίοδο. Η βελτίωση των κουφωμάτων μειώνει τις θερμικές απώλειες, περιορίζει τις ανεπιθύμητες διεισδύσεις αέρα και βελτιώνει την εσωτερική άνεση. Η εξωτερική σκίαση στη νότια όψη περιορίζει την υπερθέρμανση, μειώνοντας τα ψυκτικά φορτία.

Η σημασία του Σεναρίου 1 δεν αποτυπώνεται μόνο στις kWh που εξοικονομούνται. Αποτυπώνεται και στην αλλαγή του τρόπου λειτουργίας του κτιρίου. Με τις παρεμβάσεις αυτές, το κτίριο αποκτά καλύτερη ικανότητα παθητικής προστασίας

από το κλίμα. Αυτό σημαίνει ότι οι εσωτερικές συνθήκες μπορούν να παραμένουν πιο σταθερές με μικρότερη χρήση μηχανολογικών συστημάτων. Η βιοκλιματική αξία του σεναρίου βρίσκεται ακριβώς σε αυτή τη μετατόπιση: από ένα κτίριο που αντιδρά στις θερμικές καταπονήσεις μέσω κατανάλωσης ενέργειας, σε ένα κτίριο που περιορίζει τις καταπονήσεις μέσω του ίδιου του κελύφους.

Το Σενάριο 2, αντίθετα, έχει διαφορετική λογική. Η ετήσια τελική κατανάλωση μειώνεται σημαντικά, από 188.298,05 kWh/έτος σε 71.082,54 kWh/έτος, δηλαδή κατά 62,25%. Το αποτέλεσμα είναι ενεργειακά πολύ ισχυρό, όμως προκύπτει κυρίως από την αναβάθμιση των τεχνικών συστημάτων και της παραγωγής ZNX. Το σενάριο αυτό μειώνει την κατανάλωση επειδή τα συστήματα λειτουργούν αποδοτικότερα, όχι επειδή μειώνεται ουσιαστικά η ενεργειακή ζήτηση που δημιουργείται από το κέλυφος.

Η διαφοροποίηση αυτή είναι κρίσιμη. Ένα κτίριο με παλιό και ανεπαρκές κέλυφος μπορεί να εμφανίσει σημαντική μείωση κατανάλωσης όταν εγκατασταθούν αποδοτικότερα συστήματα, αλλά εξακολουθεί να έχει αυξημένα θερμικά φορτία, μειωμένη παθητική προστασία και πιθανές συνθήκες δυσφορίας σε περιόδους έντονης ζέστης ή ψύχους. Επομένως, το Σενάριο 2 είναι ενεργειακά και οικονομικά αποδοτικό, αλλά δεν αντιμετωπίζει πλήρως το πρόβλημα της βιοκλιματικής ανεπάρκειας του αρχικού σχεδιασμού.

**Πίνακας 6.0.13 Διαφοροποίηση Σεναρίων 1 και 2 ως προς τη βιοκλιματική λειτουργία**

| Παράμετρος                            | Σενάριο 1                  | Σενάριο 2                                |
|---------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|
| Κύρια λογική                          | Μείωση ενεργειακής ζήτησης | Αποδοτικότερη κάλυψη ενεργειακών αναγκών |
| Παρέμβαση στο κέλυφος                 | Ναι                        | Όχι                                      |
| Βελτίωση θερμικής προστασίας          | Ναι                        | Περιορισμένη ή έμμεση                    |
| Έλεγχος ηλιακών κερδών                | Ναι                        | Όχι ουσιαστικά                           |
| Βελτίωση φυσικής συμπεριφοράς κτιρίου | Υψηλή                      | Χαμηλή έως μέτρια                        |
| Μείωση λειτουργικής κατανάλωσης       | Μέτρια                     | Πολύ υψηλή                               |
| Βιοκλιματική συμβολή                  | Άμεση                      | Έμμεση                                   |

Το Σενάριο 3 συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο προηγούμενων προσεγγίσεων. Η ετήσια τελική κατανάλωση μειώνεται σε 61.120,20 kWh/έτος, δηλαδή η εξοικονόμηση

φτάνει τις 127.177,85 kWh/έτος ή 67,54%. Το αποτέλεσμα αυτό είναι το καλύτερο από ενεργειακή άποψη, αλλά η σημασία του δεν βρίσκεται μόνο στη μεγαλύτερη αριθμητική εξοικονόμηση. Το Σενάριο 3 εφαρμόζει την ορθότερη τεχνική λογική: πρώτα μειώνει τη ζήτηση μέσω παθητικών και βιοκλιματικών μέτρων και στη συνέχεια καλύπτει τα μειωμένα φορτία με αποδοτικότερα συστήματα.

Η προσέγγιση αυτή είναι πιο ολοκληρωμένη, επειδή αποφεύγει την αποκλειστική εξάρτηση από τον μηχανολογικό εξοπλισμό. Ένα αποδοτικό σύστημα μπορεί να μειώσει την κατανάλωση, αλλά η συνολική ποιότητα της ενεργειακής συμπεριφοράς είναι υψηλότερη όταν το κτίριο έχει πρώτα βελτιωμένο κέλυφος, ελεγχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και καλύτερη θερμική σταθερότητα. Με τον τρόπο αυτό, τα συστήματα λειτουργούν λιγότερο εντατικά, οι εσωτερικές συνθήκες είναι πιο ομαλές και το κτίριο αποκτά μεγαλύτερη ανθεκτικότητα απέναντι στις εξωτερικές θερμικές μεταβολές.

Η βιοκλιματική αναβάθμιση έχει ιδιαίτερη σημασία και σε σχέση με την κλιματική προσαρμογή. Τα κτίρια κατοικίας στην Αθήνα επηρεάζονται έντονα από τις θερινές θερμοκρασίες, την ηλιακή ακτινοβολία και το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας. Σε αυτές τις συνθήκες, η σκίαση, η θερμομόνωση του δώματος, ο περιορισμός των θερμικών κερδών και η δυνατότητα φυσικής αποφόρτισης αποκτούν αυξημένη σημασία. Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός δεν συμβάλλει μόνο στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, αλλά και στη βελτίωση της ανθεκτικότητας του κτιρίου σε θερμικές καταπονήσεις.

Η μη ύπαρξη βιοκλιματικού σχεδιασμού στην υφιστάμενη κατάσταση έχει πολλαπλές επιπτώσεις. Πρώτον, οδηγεί σε αυξημένες θερμικές απώλειες τον χειμώνα, λόγω ανεπαρκούς θερμομόνωσης και παλαιών κουφωμάτων. Δεύτερον, αυξάνει τη θερινή υπερθέρμανση, λόγω απουσίας εξωτερικής σκίασης και περιορισμένου ελέγχου των ηλιακών κερδών. Τρίτον, αυξάνει τη χρήση μηχανολογικών συστημάτων, άρα και την ενεργειακή κατανάλωση. Τέταρτον, επιβαρύνει το ετήσιο λειτουργικό κόστος και τις εκπομπές CO<sub>2</sub>eq. Πέμπτον, μπορεί να μειώσει τη θερμική άνεση των κατοίκων, ιδιαίτερα σε περιόδους ακραίων θερμοκρασιών.

**Πίνακας 6.0.14 Επιπτώσεις απουσίας βιοκλιματικού σχεδιασμού στην υφιστάμενη κατάσταση**

| Πεδίο επίδρασης       | Συνέπεια                                                       |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------|
| Θερμική προστασία     | Αυξημένες απώλειες τον χειμώνα και αυξημένα κέρδη το καλοκαίρι |
| Ηλιακή ακτινοβολία    | Ανεπαρκής έλεγχος θερινών ηλιακών κερδών                       |
| Ψυκτικά φορτία        | Αυξημένη ανάγκη μηχανικής ψύξης                                |
| Θερμική άνεση         | Μεγαλύτερες διακυμάνσεις εσωτερικής θερμοκρασίας               |
| Λειτουργικό κόστος    | Αυξημένες ετήσιες δαπάνες ενέργειας                            |
| Λειτουργικές εκπομπές | Αυξημένο ανθρακικό αποτύπωμα κατά τη χρήση                     |
| Ανθεκτικότητα         | Μειωμένη προσαρμοστικότητα σε θερινές θερμικές καταπονήσεις    |

Η βιοκλιματική λειτουργία του κτιρίου πρέπει επίσης να αξιολογείται σε σχέση με την ποιότητα κατοίκησης. Η ενεργειακή εξοικονόμηση αποτελεί σημαντικό δείκτη, αλλά δεν είναι ο μόνος. Ένα κτίριο με καλύτερο κέλυφος, σωστή σκίαση και βελτιωμένη θερμική προστασία προσφέρει πιο σταθερές εσωτερικές συνθήκες, λιγότερη ανάγκη συνεχούς λειτουργίας συστημάτων και καλύτερη αίσθηση άνεσης. Αυτά τα οφέλη δεν αποτυπώνονται πλήρως στην απλή οικονομική αποπληρωμή, αλλά είναι κρίσιμα για την πραγματική ποιότητα της αναβάθμισης.

Στο πλαίσιο αυτό, το Σενάριο 1 μπορεί να θεωρηθεί ως το σενάριο που αποτυπώνει καθαρότερα τη βιοκλιματική συμβολή, ενώ το Σενάριο 3 ως το σενάριο που ενσωματώνει τη βιοκλιματική λογική σε μια ολοκληρωμένη ενεργειακή αναβάθμιση. Το Σενάριο 2, παρότι εμφανίζει πολύ ισχυρή ενεργειακή και οικονομική απόδοση, παραμένει περισσότερο τεχνολογικό και λιγότερο βιοκλιματικό. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική για την τελική ερμηνεία, διότι η βέλτιστη λύση δεν είναι απαραίτητα εκείνη που έχει μόνο τη μικρότερη κατανάλωση, αλλά εκείνη που συνδυάζει ενεργειακή απόδοση, θερμική άνεση, περιβαλλοντικό όφελος και μακροπρόθεσμη ποιότητα λειτουργίας.

Η σύγκριση των σεναρίων δείχνει ότι ο βιοκλιματικός σχεδιασμός έχει ουσιαστική αλλά όχι πάντα άμεσα κυρίαρχη αριθμητική επίδραση. Σε επίπεδο kWh, οι τεχνικές παρεμβάσεις του Σεναρίου 2 εμφανίζονται πιο αποδοτικές. Σε επίπεδο ποιότητας ενεργειακής λειτουργίας, όμως, το κέλυφος και οι παθητικές στρατηγικές έχουν μακροπρόθεσμη αξία, επειδή μειώνουν τις ανάγκες ανεξάρτητα από το είδος των

συστημάτων. Για τον λόγο αυτό, η βιοκλιματική αναβάθμιση δεν πρέπει να θεωρείται δευτερεύουσα, αλλά βασική προϋπόθεση μιας ολοκληρωμένης ενεργειακής στρατηγικής.

Συνολικά, ο βιοκλιματικός σχεδιασμός συμβάλλει στη μείωση της ενεργειακής ζήτησης, στη μείωση των λειτουργικών εκπομπών, στη βελτίωση της θερμικής άνεσης και στην αύξηση της ανθεκτικότητας του κτιρίου. Η υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου δείχνει τις επιπτώσεις της απουσίας του: υψηλή κατανάλωση, αυξημένο κόστος, αυξημένες εκπομπές και εξάρτηση από μηχανολογικά συστήματα. Το Σενάριο 1 αναδεικνύει την αξία των παθητικών παρεμβάσεων, ενώ το Σενάριο 3 δείχνει ότι η βέλτιστη ενεργειακή και περιβαλλοντική συμπεριφορά επιτυγχάνεται όταν η βιοκλιματική αναβάθμιση συνδυάζεται με αποδοτικά τεχνικά συστήματα. Επομένως, ο βιοκλιματικός σχεδιασμός αποτελεί βασικό άξονα της τελικής αξιολόγησης και όχι απλώς συμπληρωματικό στοιχείο των σεναρίων.

## **6.5 Τεχνικοοικονομική και περιβαλλοντική κατάταξη σεναρίων**

Η τελική κατάταξη των σεναρίων δεν μπορεί να βασιστεί σε έναν μόνο δείκτη, καθώς κάθε σενάριο εμφανίζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Η αξιολόγηση πρέπει να συνδυάζει οικονομικά, ενεργειακά, περιβαλλοντικά και βιοκλιματικά κριτήρια, ώστε να προκύπτει μια συνολική εικόνα της αποδοτικότητας κάθε επιλογής. Για τον λόγο αυτό, στο παρόν υποκεφάλαιο τα σενάρια συγκρίνονται με πολυκριτηριακή λογική, λαμβάνοντας υπόψη το αρχικό κόστος, την ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας, την ετήσια οικονομική εξοικονόμηση, την απλή περίοδο αποπληρωμής, τη μείωση λειτουργικών εκπομπών, το ενσωματωμένο GWP, τον περιβαλλοντικό χρόνο απόσβεσης και τη συνολική συμβολή στη βιοκλιματική αναβάθμιση του κτιρίου.

Το Σενάριο 0 αποτελεί τη βάση σύγκρισης και δεν συμμετέχει στην κατάταξη ως σενάριο αναβάθμισης. Ωστόσο, η παρουσία του είναι απαραίτητη, επειδή αποτυπώνει το κόστος της αδράνειας. Παρότι δεν απαιτεί αρχική επένδυση, εμφανίζει τη μεγαλύτερη ετήσια κατανάλωση ενέργειας, το μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος και τις υψηλότερες λειτουργικές εκπομπές. Επομένως, η διατήρηση της υφιστάμενης κατάστασης δεν μπορεί να θεωρηθεί οικονομικά ή περιβαλλοντικά ουδέτερη επιλογή, καθώς συνεπάγεται συνεχή ενεργειακή και οικονομική επιβάρυνση σε όλη τη διάρκεια χρήσης του κτιρίου.

**Πίνακας 6.0.15 Συνολικοί δείκτες κατάταξης σεναρίων αναβάθμισης**

| Δείκτης                                | Σενάριο 1                               | Σενάριο 2                               | Σενάριο 3                               |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Συνολικό αρχικό κόστος                 | 121.974,84 €                            | 126.500,00 €                            | 248.474,84 €                            |
| Εξοικονόμηση ενέργειας                 | 46.613,82 kWh/έτος                      | 117.215,52 kWh/έτος                     | 127.177,85 kWh/έτος                     |
| Ποσοστό εξοικονόμησης                  | 24,76%                                  | 62,25%                                  | 67,54%                                  |
| Ετήσια οικονομική εξοικονόμηση         | 7.222,74 €/έτος                         | 15.802,30 €/έτος                        | 18.093,63 €/έτος                        |
| Απλή περίοδος αποπληρωμής              | 16,89 έτη                               | 8,01 έτη                                | 13,73 έτη                               |
| Ετήσια μείωση λειτουργικών<br>εκπομπών | 12.585,73 kg<br>CO <sub>2</sub> eq/έτος | 31.648,19 kg<br>CO <sub>2</sub> eq/έτος | 34.338,02 kg<br>CO <sub>2</sub> eq/έτος |
| Αρχικό ενσωματωμένο GWP                | 27.939,70 kg CO <sub>2</sub> eq         | 39.000,00 kg CO <sub>2</sub> eq         | 66.939,70 kg CO <sub>2</sub> eq         |
| Περιβαλλοντικός χρόνος<br>απόσβεσης    | 2,22 έτη                                | 1,23 έτη                                | 1,95 έτη                                |
| Καθαρή μείωση εκπομπών 50ετίας         | 570,70 t CO <sub>2</sub> eq             | 1.543,41 t CO <sub>2</sub> eq           | 1.649,96 t CO <sub>2</sub> eq           |

Με βάση το αρχικό κόστος, το Σενάριο 1 και το Σενάριο 2 βρίσκονται σε παρόμοιο επίπεδο, με μικρή διαφορά υπέρ του Σεναρίου 1. Το Σενάριο 3 έχει σχεδόν διπλάσιο κόστος, επειδή συνδυάζει παρεμβάσεις στο κέλυφος και στα τεχνικά συστήματα. Αν η αξιολόγηση γινόταν αποκλειστικά με κριτήριο τη χαμηλότερη αρχική επένδυση, το Σενάριο 1 θα ήταν το οικονομικότερο. Ωστόσο, η αρχική δαπάνη δεν επαρκεί ως κριτήριο, διότι δεν αποτυπώνει την ετήσια εξοικονόμηση και τη μελλοντική μείωση λειτουργικού κόστους.

Με βάση την απλή περίοδο αποπληρωμής, το Σενάριο 2 κατατάσσεται πρώτο, με χρόνο αποπληρωμής 8,01 έτη. Το Σενάριο 3 ακολουθεί με 13,73 έτη, ενώ το Σενάριο 1 εμφανίζει τη μεγαλύτερη περίοδο αποπληρωμής, 16,89 έτη. Η κατάταξη αυτή δείχνει ότι οι παρεμβάσεις στα τεχνικά συστήματα έχουν την υψηλότερη άμεση οικονομική αποδοτικότητα, επειδή μειώνουν σημαντικά την ενεργειακή κατανάλωση με αρχικό κόστος παρόμοιο με εκείνο του Σεναρίου 1.

**Πίνακας 6.0.16 Κατάταξη σεναρίων με βάση οικονομικά κριτήρια**

| Κριτήριο                                  | 1η θέση   | 2η θέση   | 3η θέση   |
|-------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Χαμηλότερο αρχικό κόστος                  | Σενάριο 1 | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 |
| Μεγαλύτερη ετήσια οικονομική εξοικονόμηση | Σενάριο 3 | Σενάριο 2 | Σενάριο 1 |
| Μικρότερη απλή περίοδος αποπληρωμής       | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 1 |

| Κριτήριο                                                    | 1η θέση   | 2η θέση   | 3η θέση   |
|-------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Χαμηλότερο κόστος ανά εξοικονομούμενη kWh                   | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 1 |
| Χαμηλότερο κόστος ανά kg CO <sub>2</sub> eq που αποφεύγεται | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 1 |

Από καθαρά οικονομική άποψη, το Σενάριο 2 είναι το πιο αποδοτικό. Συνδυάζει σχετικά συγκρατημένο αρχικό κόστος, μεγάλη ετήσια οικονομική εξοικονόμηση και τη μικρότερη περίοδο αποπληρωμής. Η οικονομική του υπεροχή οφείλεται στη σημαντική μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης μέσω αποδοτικότερων συστημάτων θέρμανσης, ψύξης, ZNX και φωτισμού. Για έναν ιδιοκτήτη ή διαχειριστή που θέτει ως κύριο στόχο τη γρήγορη οικονομική απόσβεση, το Σενάριο 2 αποτελεί την πιο συμφέρουσα επιλογή.

Με βάση την ενεργειακή εξοικονόμηση, το Σενάριο 3 κατατάσσεται πρώτο. Η ετήσια εξοικονόμηση φτάνει τις 127.177,85 kWh/έτος και το ποσοστό μείωσης της κατανάλωσης ανέρχεται σε 67,54%. Το Σενάριο 2 ακολουθεί με πολύ μικρότερη διαφορά από το Σενάριο 3, καθώς εξοικονομεί 117.215,52 kWh/έτος και επιτυγχάνει ποσοστό εξοικονόμησης 62,25%. Το Σενάριο 1 κατατάσσεται τρίτο ως προς την καθαρή αριθμητική εξοικονόμηση, με 46.613,82 kWh/έτος και ποσοστό 24,76%.

Η μικρή ενεργειακή διαφορά μεταξύ Σεναρίου 2 και Σεναρίου 3 σε σχέση με τη μεγάλη διαφορά κόστους δείχνει ότι η αναβάθμιση των τεχνικών συστημάτων έχει πολύ ισχυρή επίδραση στην τελική κατανάλωση. Ωστόσο, το Σενάριο 3 έχει ποιοτικά πλεονεκτήματα που δεν αποτυπώνονται πλήρως μόνο στις kWh. Βελτιώνει τη θερμική συμπεριφορά του κελύφους, μειώνει τα φορτία, ενισχύει τη βιοκλιματική λειτουργία και βελτιώνει τη συνολική ανθεκτικότητα του κτιρίου.

**Πίνακας 6.0.17 Κατάταξη σεναρίων με βάση ενεργειακά κριτήρια**

| Κριτήριο                                            | 1η θέση     | 2η θέση   | 3η θέση   |
|-----------------------------------------------------|-------------|-----------|-----------|
| Μεγαλύτερη ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας            | Σενάριο 3   | Σενάριο 2 | Σενάριο 1 |
| Χαμηλότερη τελική κατανάλωση                        | Σενάριο 3   | Σενάριο 2 | Σενάριο 1 |
| Χαμηλότερη ειδική κατανάλωση                        | Σενάριο 3   | Σενάριο 2 | Σενάριο 1 |
| Μεγαλύτερη μείωση ενεργειακής ζήτησης μέσω κελύφους | Σενάριο 1/3 | -         | Σενάριο 2 |

Η ενεργειακή αξιολόγηση αναδεικνύει το Σενάριο 3 ως την πληρέστερη λύση ως προς την τελική κατανάλωση. Παρόλα αυτά, το Σενάριο 2 εμφανίζει σχεδόν αντίστοιχη ενεργειακή βελτίωση με μικρότερη αρχική επένδυση. Η διαφορά μεταξύ τους πρέπει να

ερμηνευθεί όχι μόνο αριθμητικά, αλλά και τεχνικά. Το Σενάριο 2 μειώνει την κατανάλωση μέσω των συστημάτων, ενώ το Σενάριο 3 μειώνει και τη ζήτηση του κτιρίου. Για τον λόγο αυτό, το Σενάριο 3 είναι πιο ολοκληρωμένο, παρότι δεν είναι το πιο οικονομικά αποδοτικό.

Με βάση το ανθρακικό αποτύπωμα, το Σενάριο 3 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών, 34.338,02 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος, και τη μεγαλύτερη καθαρή μείωση εκπομπών σε περίοδο 50 ετών, 1.649,96 t CO<sub>2</sub>eq. Το Σενάριο 2 ακολουθεί με πολύ κοντινή καθαρή μείωση, 1.543,41 t CO<sub>2</sub>eq, και εμφανίζει τον καλύτερο περιβαλλοντικό χρόνο απόσβεσης, 1,23 έτη. Το Σενάριο 1 παρουσιάζει μικρότερη καθαρή μείωση, 570,70 t CO<sub>2</sub>eq, αλλά έχει τη μικρότερη αρχική περιβαλλοντική επιβάρυνση των παρεμβάσεων.

**Πίνακας 6.0.18 Κατάταξη σεναρίων με βάση περιβαλλοντικά κριτήρια**

| Κριτήριο                                                         | 1η θέση   | 2η θέση   | 3η θέση   |
|------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Μεγαλύτερη ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών                   | Σενάριο 3 | Σενάριο 2 | Σενάριο 1 |
| Μεγαλύτερη καθαρή μείωση εκπομπών 50ετίας                        | Σενάριο 3 | Σενάριο 2 | Σενάριο 1 |
| Μικρότερος περιβαλλοντικός χρόνος απόσβεσης                      | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 1 |
| Χαμηλότερο αρχικό ενσωματωμένο GWP                               | Σενάριο 1 | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 |
| Καλύτερη σχέση κόστους ανά kg CO <sub>2</sub> eq που αποφεύγεται | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 1 |

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση δείχνει ότι το Σενάριο 3 έχει το μεγαλύτερο συνολικό περιβαλλοντικό όφελος, αλλά το Σενάριο 2 είναι περιβαλλοντικά πιο αποδοτικό σε σχέση με το κόστος και τον χρόνο απόσβεσης. Το Σενάριο 3 έχει υψηλότερο ενσωματωμένο GWP λόγω του μεγαλύτερου εύρους παρεμβάσεων, όμως η μεγάλη μείωση λειτουργικών εκπομπών οδηγεί σε καθαρό όφελος σε μικρό χρόνο. Το Σενάριο 2, από την άλλη πλευρά, εμφανίζει την ταχύτερη περιβαλλοντική απόσβεση, επειδή η μείωση λειτουργικών εκπομπών είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με το αρχικό ενσωματωμένο αποτύπωμα.

Η βιοκλιματική κατάταξη διαφοροποιείται από την καθαρά οικονομική και ενεργειακή κατάταξη. Το Σενάριο 1 και το Σενάριο 3 έχουν τη μεγαλύτερη βιοκλιματική αξία, επειδή περιλαμβάνουν παρεμβάσεις στο κέλυφος, στο δώμα, στα κουφώματα και στην ηλιακή προστασία. Το Σενάριο 1 αποτυπώνει καθαρά τη συμβολή των παθητικών μέτρων, ενώ το Σενάριο 3 ενσωματώνει αυτή τη λογική σε μια συνολική στρατηγική. Το

Σενάριο 2, παρότι είναι οικονομικά και ενεργειακά ιδιαίτερα αποδοτικό, έχει περιορισμένη βιοκλιματική συμβολή, επειδή δεν αντιμετωπίζει τις βασικές αδυναμίες του κελύφους.

**Πίνακας 6.0.19 Ποιοτική κατάταξη σεναρίων με βάση τη βιοκλιματική συμβολή**

| Κριτήριο                              | Σενάριο 1        | Σενάριο 2           | Σενάριο 3           |
|---------------------------------------|------------------|---------------------|---------------------|
| Βελτίωση θερμικής προστασίας κελύφους | Υψηλή            | Χαμηλή              | Υψηλή               |
| Έλεγχος θερινής υπερθέρμανσης         | Υψηλός           | Περιορισμένος       | Υψηλός              |
| Μείωση ενεργειακής ζήτησης            | Μέτρια έως υψηλή | Περιορισμένη        | Υψηλή               |
| Βελτίωση θερμικής άνεσης              | Υψηλή            | Μέτρια              | Υψηλή               |
| Εξάρτηση από μηχανολογικά συστήματα   | Μειώνεται        | Παραμένει σημαντική | Μειώνεται σημαντικά |
| Συνολική βιοκλιματική αξία            | Υψηλή            | Μέτρια              | Πολύ υψηλή          |

Η πολυκριτηριακή θεώρηση δείχνει ότι δεν υπάρχει ένα μοναδικό σενάριο που υπερέχει σε όλα τα κριτήρια. Το Σενάριο 2 είναι το ισχυρότερο από πλευράς οικονομικής απόδοσης και ταχύτητας περιβαλλοντικής απόσβεσης. Το Σενάριο 3 είναι το ισχυρότερο από πλευράς συνολικής ενεργειακής και περιβαλλοντικής επίδοσης. Το Σενάριο 1 έχει χαμηλότερη αριθμητική απόδοση, αλλά είναι κρίσιμο για τη βιοκλιματική αναβάθμιση και τη μακροπρόθεσμη βελτίωση της ποιότητας του κτιρίου.

Για την τελική κατάταξη είναι χρήσιμη η διαμόρφωση ενός συνοπτικού πίνακα ερμηνείας, ο οποίος δεν αντικαθιστά τους αναλυτικούς υπολογισμούς, αλλά βοηθά στην κατανόηση της συνολικής εικόνας. Στον πίνακα αυτό τα σενάρια αξιολογούνται ως προς πέντε βασικούς άξονες: κόστος, ενέργεια, εκπομπές, βιοκλιματική συμβολή και συνολική ισορροπία.

**Πίνακας 6.0.20 Συνολική ποιοτική αξιολόγηση σεναρίων**

| Άξονας αξιολόγησης             | Σενάριο 1 | Σενάριο 2  | Σενάριο 3        |
|--------------------------------|-----------|------------|------------------|
| Οικονομική αποδοτικότητα       | Μέτρια    | Υψηλή      | Μέτρια έως υψηλή |
| Ενεργειακή εξοικονόμηση        | Μέτρια    | Πολύ υψηλή | Πολύ υψηλή       |
| Μείωση ανθρακικού αποτυπώματος | Μέτρια    | Πολύ υψηλή | Πολύ υψηλή       |

| Άξονας αξιολόγησης         | Σενάριο 1        | Σενάριο 2    | Σενάριο 3               |
|----------------------------|------------------|--------------|-------------------------|
| Βιοκλιματική αναβάθμιση    | Υψηλή            | Περιορισμένη | Πολύ υψηλή              |
| Συνολική τεχνική πληρότητα | Μέτρια έως υψηλή | Υψηλή        | Πολύ υψηλή              |
| Αρχική επενδυτική απαίτηση | Μέτρια           | Μέτρια       | Υψηλή                   |
| Συνολική ισορροπία         | Καλή             | Πολύ καλή    | Πολύ καλή έως<br>άριστη |

Με βάση τη συνολική αξιολόγηση, το Σενάριο 2 μπορεί να θεωρηθεί ως η πλέον συμφέρουσα λύση όταν το βασικό κριτήριο είναι η οικονομική απόδοση και η γρήγορη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Προσφέρει μεγάλη εξοικονόμηση, μικρή περίοδο αποπληρωμής και πολύ καλή περιβαλλοντική απόδοση. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλο όταν ο διαθέσιμος προϋπολογισμός είναι περιορισμένος ή όταν προτεραιότητα αποτελεί η άμεση μείωση των ενεργειακών δαπανών.

Το Σενάριο 3 μπορεί να θεωρηθεί ως η πληρέστερη τεχνική και περιβαλλοντική λύση. Παρουσιάζει τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας, τη μεγαλύτερη καθαρή μείωση εκπομπών και την υψηλότερη βιοκλιματική συμβολή. Το μειονέκτημά του είναι το υψηλό αρχικό κόστος και η μεγαλύτερη οικονομική περίοδος αποπληρωμής σε σχέση με το Σενάριο 2. Επομένως, είναι καταλληλότερο όταν ο στόχος είναι η ολοκληρωμένη αναβάθμιση του κτιρίου και όχι μόνο η ταχύτερη οικονομική απόσβεση.

Το Σενάριο 1 μπορεί να θεωρηθεί ως βασική στρατηγική βιοκλιματικής αναβάθμισης. Παρότι έχει μικρότερη ενεργειακή και οικονομική απόδοση σε σχέση με τα άλλα δύο σενάρια, βελτιώνει τη φυσική συμπεριφορά του κτιρίου και περιορίζει την ενεργειακή ζήτηση. Η αξία του είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη θερμική άνεση, την ποιότητα κατοίκησης και την προσαρμογή του κτιρίου σε θερινές θερμικές καταπονήσεις. Δεν αποτελεί την πιο συμφέρουσα επιλογή με στενά οικονομικά κριτήρια, αλλά αποτελεί κρίσιμο στοιχείο μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής.

Συνεπώς, η τελική τεχνικοοικονομική και περιβαλλοντική κατάταξη μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: το Σενάριο 2 είναι το βέλτιστο ως προς την οικονομική αποδοτικότητα και τη γρήγορη απόσβεση, το Σενάριο 3 είναι το βέλτιστο ως προς τη συνολική ενεργειακή, περιβαλλοντική και βιοκλιματική πληρότητα, ενώ το Σενάριο 1 είναι το βασικό σενάριο παθητικής αναβάθμισης που βελτιώνει τη φυσική λειτουργία του κτιρίου. Η επιλογή του καταλληλότερου σεναρίου εξαρτάται από το βάρος που αποδίδεται

σε κάθε κριτήριο. Αν προτεραιότητα είναι η οικονομική απόδοση, υπερέχει το Σενάριο 2. Αν προτεραιότητα είναι η ολιστική αναβάθμιση και η μακροπρόθεσμη περιβαλλοντική επίδοση, υπερέχει το Σενάριο 3. Αν προτεραιότητα είναι η βιοκλιματική αναβάθμιση του κελύφους, το Σενάριο 1 αποτελεί απαραίτητη βάση παρέμβασης.

## 6.6 Περιορισμοί της μεθοδολογίας

Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων ενεργειακής, βιοκλιματικής και περιβαλλοντικής αναβάθμισης του κτιρίου μελέτης, με βάση επιμετρήσεις, τεκμηριωμένες παραδοχές, ενεργειακούς δείκτες, κόστος και ανθρακικό αποτύπωμα. Παρά τη συστηματική οργάνωση της ανάλυσης, τα αποτελέσματα πρέπει να ερμηνεύονται μέσα στα όρια της μεθοδολογίας που υιοθετήθηκε. Η εργασία δεν αποσκοπεί στην έκδοση επίσημου Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης, ούτε στην πλήρη πιστοποιημένη Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής, αλλά στη διαμόρφωση ενός διαφανούς και ελέγξιμου υπολογιστικού πλαισίου για τη σύγκριση τεχνικών επιλογών αναβάθμισης.

Ο πρώτος περιορισμός αφορά τη φύση των ενεργειακών υπολογισμών. Η εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης και της εξοικονόμησης βασίστηκε σε υπολογιστικό μοντέλο με παραδοχές, οι οποίες συνδέονται με την ενεργειακή κατηγορία του κτιρίου, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, την υφιστάμενη κατάσταση του κελύφους, τα τεχνικά συστήματα και τη χρήση των διαμερισμάτων. Δεν εφαρμόστηκε αναλυτική δυναμική ενεργειακή προσομοίωση με ωριαία κλιματικά δεδομένα, ούτε πλήρης υπολογισμός σύμφωνα με λογισμικό ενεργειακής επιθεώρησης. Για τον λόγο αυτό, οι τιμές κατανάλωσης και εξοικονόμησης πρέπει να θεωρούνται τεκμηριωμένες εκτιμήσεις συγκριτικού χαρακτήρα και όχι απόλυτες προβλέψεις της πραγματικής μελλοντικής κατανάλωσης.

Η απουσία δυναμικής ενεργειακής προσομοίωσης σημαίνει ότι δεν αποτυπώνονται με πλήρη λεπτομέρεια φαινόμενα όπως η ωριαία μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμική αδράνεια των δομικών στοιχείων, η νυχτερινή αποφόρτιση, η αλληλεπίδραση φυσικού αερισμού και θερμικής μάζας, οι πραγματικές συνθήκες σκίασης από γειτονικά κτίρια και η ακριβής συμπεριφορά των χρηστών. Τα στοιχεία αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά σε βιοκλιματικές αναλύσεις, επειδή η απόδοση παθητικών στρατηγικών εξαρτάται έντονα από τον χρόνο, τον προσανατολισμό, τις εξωτερικές συνθήκες και τη

χρήση του κτιρίου. Επομένως, η παρούσα εργασία αποτιμά τη βιοκλιματική συμβολή σε επίπεδο συγκριτικών δεικτών και όχι σε επίπεδο λεπτομερούς θερμοδυναμικής προσομοίωσης.

Ο δεύτερος περιορισμός αφορά τις παραδοχές χρήσης του κτιρίου. Στην ανάλυση θεωρήθηκε ότι κάθε διαμέρισμα κατοικείται από τρία άτομα, δηλαδή ότι το κτίριο φιλοξενεί συνολικά τριάντα κατοίκους. Για την κατανάλωση νερού χρησιμοποιήθηκε παραδοχή 250 L ανά άτομο ημερησίως, ενώ για τον υπολογισμό του ζεστού νερού χρήσης θεωρήθηκε ότι το 30% της συνολικής κατανάλωσης νερού θερμαίνεται. Οι παραδοχές αυτές επιτρέπουν τη συστηματική εκτίμηση της κατανάλωσης ZNX, αλλά η πραγματική κατανάλωση μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις συνήθειες των κατοίκων, τη διάρκεια παραμονής στο σπίτι, τον αριθμό των ατόμων ανά διαμέρισμα, τον τύπο των συσκευών και τη συμπεριφορά χρήσης.

Η συμπεριφορά των χρηστών αποτελεί γενικότερο παράγοντα αβεβαιότητας. Οι εσωτερικές θερμοκρασίες ρύθμισης, οι ώρες λειτουργίας θέρμανσης και ψύξης, η χρήση φυσικού αερισμού, η χρήση σκίασης, η λειτουργία θερμοσιφώνων, η διάρκεια χρήσης φωτισμού και η συντήρηση των συστημάτων επηρεάζουν σημαντικά την πραγματική κατανάλωση ενέργειας. Δύο διαμερίσματα με τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά μπορεί να εμφανίζουν διαφορετική ενεργειακή κατανάλωση λόγω διαφορετικής συμπεριφοράς των ενοίκων. Για τον λόγο αυτό, τα σενάρια αξιολογήθηκαν με κοινές παραδοχές χρήσης, ώστε η σύγκριση να είναι συνεπής, ακόμη και αν οι απόλυτες τιμές ενδέχεται να αποκλίνουν από την πραγματική λειτουργία.

Ο τρίτος περιορισμός αφορά τις επιμετρήσεις. Οι ποσότητες του κτιρίου προέκυψαν από τα διαθέσιμα σχέδια, τις κατόψεις, τον ξυλότυπο, την κάτοψη δώματος και τις τεχνικές πληροφορίες της υφιστάμενης κατάστασης. Η διαδικασία αυτή παρέχει ικανοποιητική βάση για τη συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων. Ωστόσο, δεν υποκαθιστά πλήρη αναλυτική αποτύπωση πεδίου με επιβεβαίωση όλων των διαστάσεων, των υλικών και των πραγματικών κατασκευαστικών λεπτομερειών. Ιδίως σε υφιστάμενα κτίρια, είναι πιθανό να υπάρχουν αποκλίσεις από τα σχέδια, μεταγενέστερες τροποποιήσεις ή κατασκευαστικές λεπτομέρειες που δεν αποτυπώνονται πλήρως στα διαθέσιμα αρχεία.

Ιδιαίτερη παραδοχή έγινε για τη θεμελίωση, όπου υιοθετήθηκε τυπική τεχνική λύση με κωνικά πέδιλα και συνδετήριους δοκούς. Η παραδοχή αυτή επιτρέπει την ενσωμάτωση της θεμελίωσης στην επιμετρητική και περιβαλλοντική εικόνα του κτιρίου,

αλλά δεν αποτελεί ακριβή αποτύπωση ξυλοτύπου θεμελίωσης. Εάν ήταν διαθέσιμος αναλυτικός ξυλότυπος θεμελίωσης, οι ποσότητες θα μπορούσαν να υπολογιστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια. Παρόλα αυτά, επειδή οι παρεμβάσεις των σεναρίων εστιάζουν κυρίως στο κέλυφος και στα τεχνικά συστήματα, η παραδοχή της θεμελίωσης δεν επηρεάζει καθοριστικά τη συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων αναβάθμισης.

Ο τέταρτος περιορισμός αφορά τις τιμές κόστους. Οι κοστολογήσεις βασίστηκαν σε ρεαλιστικές τιμές εργασίας και υλικών, με σκοπό τη συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων. Οι πραγματικές τιμές αγοράς μπορεί να διαφοροποιηθούν ανάλογα με τον χρόνο υλοποίησης, την περιοχή, τη διαθεσιμότητα συνεργείων, την ποιότητα των προϊόντων, τις τεχνικές δυσκολίες εφαρμογής, το μέγεθος του έργου και τις συνθήκες πρόσβασης στο κτίριο. Επίσης, σε πραγματική εφαρμογή μπορεί να προκύψουν πρόσθετες δαπάνες για ικριώματα, αποξηλώσεις, αποκομιδή αποβλήτων, επισκευές υποστρωμάτων, μελέτες, άδειες ή απρόβλεπτα.

Η οικονομική αξιολόγηση βασίστηκε κυρίως στην απλή περίοδο αποπληρωμής και σε δείκτες κόστους ανά εξοικονομούμενη kWh ή ανά kg CO<sub>2</sub>eq που αποφεύγεται. Η προσέγγιση αυτή είναι κατανοητή και κατάλληλη για συγκριτική αξιολόγηση, όμως δεν αποτελεί πλήρη ανάλυση κόστους κύκλου ζωής με προεξόφληση. Δεν ενσωματώθηκαν αναλυτικά παράμετροι όπως επιτόκιο προεξόφλησης, πληθωρισμός, μελλοντική αύξηση τιμών ενέργειας, κόστος συντήρησης ανά έτος, υπολειμματική αξία ή πιθανές επιδοτήσεις. Επομένως, η οικονομική αξιολόγηση αποδίδει κυρίως τη σχετική αποδοτικότητα των σεναρίων και όχι πλήρη χρηματοοικονομική ανάλυση επένδυσης.

Ο πέμπτος περιορισμός αφορά τους περιβαλλοντικούς συντελεστές. Το ενσωματωμένο GWP των υλικών και των τεχνικών συστημάτων υπολογίστηκε με βάση συντελεστές εργασίας, οι οποίοι μπορούν να αντικατασταθούν σε μεταγενέστερο στάδιο από Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντων συγκεκριμένων προϊόντων. Η χρήση γενικών ή μέσων συντελεστών είναι αποδεκτή για συγκριτική αξιολόγηση, αλλά εισάγει αβεβαιότητα. Διαφορετικά προϊόντα της ίδιας κατηγορίας μπορεί να έχουν σημαντικά διαφορετικό ανθρακικό αποτύπωμα λόγω διαφορετικής πρώτης ύλης, ενεργειακού μείγματος παραγωγής, τεχνολογίας, ποσοστού ανακυκλωμένου υλικού, μεταφοράς και διάρκειας ζωής.

Ειδικά για τα τεχνικά συστήματα, το ενσωματωμένο GWP επηρεάζεται από τη σύνθεση του εξοπλισμού, τα μέταλλα, τα ηλεκτρονικά στοιχεία, τα ψυκτικά μέσα, τη διάρκεια ζωής και τις αντικαταστάσεις. Για τον λόγο αυτό, στα Σενάρια 2 και 3

υπολογίστηκε και GWP με αντικαταστάσεις σε περίοδο 50 ετών. Παρόλα αυτά, η ακριβής περιβαλλοντική αποτίμηση των συστημάτων θα απαιτούσε εξειδικευμένα δεδομένα για συγκεκριμένες συσκευές και όχι μόνο γενικούς συντελεστές. Επομένως, τα αποτελέσματα του ενσωματωμένου αποτύπωματος πρέπει να ερμηνεύονται ως συγκριτικά και όχι ως πιστοποιημένες τιμές προϊόντων.

Ο έκτος περιορισμός αφορά τους συντελεστές εκπομπών ενέργειας. Για τη μετατροπή της ενεργειακής κατανάλωσης σε λειτουργικές εκπομπές χρησιμοποιήθηκε σταθερός συντελεστής εκπομπών. Στην πραγματικότητα, ο συντελεστής εκπομπών της ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλεται με τον χρόνο, καθώς αλλάζει το ενεργειακό μείγμα της χώρας, η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών, η χρήση φυσικού αερίου, η λιγνιτική παραγωγή και οι εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, οι λειτουργικές εκπομπές σε βάθος 50 ετών ενδέχεται να διαφοροποιηθούν από τις υπολογισμένες τιμές, ιδίως εάν το ηλεκτρικό σύστημα γίνει σημαντικά χαμηλότερων εκπομπών στο μέλλον.

Αυτός ο περιορισμός επηρεάζει κυρίως την περιβαλλοντική αξιολόγηση των σεναρίων με μεγάλη εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας. Εάν ο συντελεστής εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας μειωθεί σημαντικά στο μέλλον, τότε η ετήσια μείωση λειτουργικών εκπομπών θα είναι μικρότερη από αυτή που υπολογίζεται με σημερινό σταθερό συντελεστή. Ωστόσο, η ενεργειακή εξοικονόμηση παραμένει σημαντική, διότι μειώνει την κατανάλωση, το κόστος και την πίεση στο ενεργειακό σύστημα. Για τον λόγο αυτό, ο συντελεστής εκπομπών πρέπει να θεωρείται κρίσιμη παράμετρος για πιθανή ανάλυση ευαισθησίας.

Ο έβδομος περιορισμός αφορά τη μη πλήρη αποτίμηση όλων των σταδίων κύκλου ζωής. Η εργασία επικεντρώνεται κυρίως στο αρχικό ενσωματωμένο GWP των παρεμβάσεων και στις λειτουργικές εκπομπές κατά τη χρήση του κτιρίου. Δεν αναλύθηκαν πλήρως όλα τα στάδια A1–A5, B1–B7, C1–C4 και D για κάθε υλικό και τεχνικό σύστημα. Για παράδειγμα, οι μεταφορές υλικών, οι εργοταξιακές διεργασίες, η συντήρηση, η επισκευή, η αποξήλωση, η επεξεργασία αποβλήτων και η πιθανή ανακύκλωση δεν υπολογίστηκαν με την ίδια λεπτομέρεια για όλες τις κατηγορίες. Επομένως, η ανάλυση έχει χαρακτήρα απλοποιημένης περιβαλλοντικής αποτίμησης και όχι πλήρους πιστοποιημένης LCA.

Παρά τον περιορισμό αυτό, η μεθοδολογία διατηρεί τη βασική λογική κύκλου ζωής, επειδή διακρίνει σαφώς το ενσωματωμένο αποτύπωμα των παρεμβάσεων από τις λειτουργικές εκπομπές και υπολογίζει τον περιβαλλοντικό χρόνο απόσβεσης. Αυτό είναι

ιδιαίτερα σημαντικό, διότι αποφεύγεται η μονοδιάστατη αξιολόγηση μόνο με βάση την εξοικονόμηση ενέργειας. Η εργασία δείχνει αν οι εκπομπές που απαιτούνται για την εφαρμογή των παρεμβάσεων αντισταθμίζονται από τη μείωση των εκπομπών κατά τη λειτουργία του κτιρίου.

Ο όγδοος περιορισμός αφορά τον υπολογισμό των συνδυαστικών επιδράσεων. Στο Σενάριο 3 εφαρμόστηκε ακολουθιακή λογική, ώστε να αποφευχθεί η διπλομέτρηση της εξοικονόμησης όταν συνδυάζονται παρεμβάσεις κελύφους και τεχνικών συστημάτων. Ωστόσο, η πραγματική αλληλεπίδραση των παρεμβάσεων μπορεί να είναι πιο σύνθετη. Η βελτίωση του κελύφους επηρεάζει τα φορτία θέρμανσης και ψύξης, ενώ η απόδοση των συστημάτων επηρεάζεται από το μέγεθος και το προφίλ των φορτίων. Χωρίς δυναμική προσομοίωση, η αλληλεπίδραση αυτή προσεγγίζεται υπολογιστικά, αλλά δεν αποτυπώνεται με πλήρη φυσική λεπτομέρεια.

Ο ένατος περιορισμός αφορά τη μη ποσοτικοποίηση όλων των ποιοτικών ωφελειών. Παρεμβάσεις όπως η θερμομόνωση, η αντικατάσταση κουφωμάτων και η σκίαση δεν προσφέρουν μόνο ενεργειακή εξοικονόμηση. Βελτιώνουν επίσης τη θερμική άνεση, μειώνουν τις διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας, περιορίζουν την υπερθέρμανση, βελτιώνουν την ακουστική προστασία, αυξάνουν την ποιότητα κατοίκησης και πιθανώς την αξία του ακινήτου. Τα οφέλη αυτά αναγνωρίζονται ποιοτικά στην ανάλυση, αλλά δεν αποτιμώνται πλήρως οικονομικά ή αριθμητικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σενάρια όπως το Σενάριο 1 να εμφανίζονται λιγότερο αποδοτικά με στενά οικονομικούς δείκτες, παρότι έχουν σημαντική τεχνική και βιοκλιματική αξία.

Ο δέκατος περιορισμός αφορά την επιλογή της περιόδου αναφοράς. Η περίοδος των 50 ετών είναι κατάλληλη για συγκριτική περιβαλλοντική αποτίμηση, όμως διαφορετικές τεχνικές επιλογές έχουν διαφορετική διάρκεια ζωής. Ορισμένα στοιχεία κελύφους μπορούν να διατηρηθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα με κατάλληλη συντήρηση, ενώ ο τεχνικός εξοπλισμός συνήθως απαιτεί αντικατάσταση σε μικρότερο διάστημα. Η χρήση ενιαίας περιόδου αναφοράς είναι απαραίτητη για τη σύγκριση, αλλά απαιτεί προσοχή στην ερμηνεία, ιδίως όταν συγκρίνονται υλικά μεγάλης διάρκειας ζωής με Η/Μ συστήματα μικρότερης διάρκειας.

**Πίνακας 6.21 Κύριοι περιορισμοί της μεθοδολογίας και επίδραση στα αποτελέσματα**

| Πεδίο περιορισμού              | Περιγραφή                                              | Επίδραση στην ερμηνεία                                 |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Ενεργειακός υπολογισμός        | Δεν εφαρμόστηκε δυναμική προσομοίωση                   | Τα αποτελέσματα είναι συγκριτικές εκτιμήσεις           |
| Χρήση κτιρίου                  | Παραδοχές για κατοίκους, νερό και ZNX                  | Η πραγματική κατανάλωση μπορεί να διαφέρει             |
| Επιμετρήσεις                   | Βάση σε σχέδια και τεχνικές παραδοχές                  | Πιθανές αποκλίσεις από την πραγματική κατασκευή        |
| Θεμελίωση                      | Τυπική παραδοχή κωνικών πεδύλων και συνδετήριων δοκών  | Περιορισμένη επίδραση στα σενάρια αναβάθμισης          |
| Κόστη                          | Ρεαλιστικές τιμές εργασίας και υλικών                  | Απαιτείται επικαιροποίηση με πραγματικές προσφορές     |
| Περιβαλλοντικοί συντελεστές    | Χρήση γενικών ή μέσων τιμών GWP                        | Αβεβαιότητα έναντι EPD συγκεκριμένων προϊόντων         |
| Συντελεστής εκπομπών ενέργειας | Σταθερός συντελεστής                                   | Δεν αποτυπώνει μελλοντική απανθρακοποίηση του δικτύου  |
| Κύκλος ζωής                    | Απλοποιημένη προσέγγιση LCA                            | Δεν καλύπτονται πλήρως όλα τα στάδια                   |
| Συνδυασμός παρεμβάσεων         | Υπολογιστική ακολουθιακή προσέγγιση                    | Η πραγματική αλληλεπίδραση μπορεί να είναι πιο σύνθετη |
| Ποιοτικά οφέλη                 | Δεν αποτιμώνται πλήρως θερμική άνεση και αξία ακινήτου | Ορισμένα σενάρια μπορεί να υποεκτιμώνται οικονομικά    |

Παρά τους παραπάνω περιορισμούς, η μεθοδολογία παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Είναι διαφανής, καθώς κάθε αποτέλεσμα συνδέεται με συγκεκριμένες ποσότητες, παραδοχές και συντελεστές. Είναι ελέγξιμη, επειδή τα υπολογιστικά φύλλα επιτρέπουν την αναθεώρηση των τιμών και την επανάληψη των υπολογισμών. Είναι συγκρίσιμη, επειδή όλα τα σενάρια αξιολογούνται με κοινή βάση αναφοράς, κοινές επιμετρήσεις και ίδιους ενεργειακούς και περιβαλλοντικούς συντελεστές. Τέλος, είναι πρακτικά εφαρμόσιμη, επειδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο προκαταρκτικής τεχνικοοικονομικής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης σε υφιστάμενα κτίρια κατοικίας.

Η αξία της μεθοδολογίας έγκειται κυρίως στη δυνατότητα σύγκρισης. Ακόμη και αν οι απόλυτες τιμές περιέχουν αβεβαιότητα, η σχετική κατάταξη των σεναρίων είναι χρήσιμη, επειδή όλα τα σενάρια υπολογίστηκαν με κοινές παραδοχές. Έτσι, η εργασία μπορεί να δείξει ποια κατηγορία παρεμβάσεων έχει καλύτερη οικονομική απόδοση, ποια

έχει μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση, ποια οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση εκπομπών και ποια προσφέρει πληρέστερη βιοκλιματική αναβάθμιση. Αυτή η συγκριτική λογική είναι ιδιαίτερα σημαντική για την υποστήριξη αποφάσεων σε υφιστάμενα κτίρια, όπου οι διαθέσιμοι πόροι είναι συνήθως περιορισμένοι και οι τεχνικές επιλογές πρέπει να ιεραρχούνται.

Για μελλοντική βελτίωση της ανάλυσης, θα μπορούσαν να ενσωματωθούν πραγματικά στοιχεία κατανάλωσης ενέργειας από λογαριασμούς, αναλυτικά στοιχεία ΠΕΑ, θερμογραφικός έλεγχος του κελύφους, επιτόπιες μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας, αναλυτική αποτύπωση κουφωμάτων, δυναμική ενεργειακή προσομοίωση και ειδικές EPD προϊόντων που θα επιλεγούν για τις παρεμβάσεις. Επίσης, θα μπορούσε να εφαρμοστεί αναλυτική LCC με προεξόφληση και ανάλυση ευαισθησίας για τιμές ενέργειας, συντελεστές εκπομπών και κόστος υλικών. Με αυτά τα πρόσθετα δεδομένα, τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να αποκτήσουν μεγαλύτερη ακρίβεια και να υποστηρίξουν πιο λεπτομερείς αποφάσεις εφαρμογής.

Συμπερασματικά, οι περιορισμοί της μεθοδολογίας δεν αναιρούν την αξιοπιστία της συγκριτικής αξιολόγησης, αλλά καθορίζουν το πλαίσιο μέσα στο οποίο πρέπει να ερμηνεύονται τα αποτελέσματα. Η εργασία παρέχει μια τεκμηριωμένη, διαφανή και επαναλήψιμη προσέγγιση για τη σύγκριση σεναρίων ενεργειακής, βιοκλιματικής και περιβαλλοντικής αναβάθμισης. Τα αποτελέσματα πρέπει να χρησιμοποιούνται ως βάση τεχνικής και στρατηγικής αξιολόγησης και όχι ως υποκατάστατο πλήρους ενεργειακής μελέτης, πιστοποιημένης LCA ή αναλυτικής μελέτης εφαρμογής.

## **6.7 Συμπεράσματα και προτάσεις**

Η παρούσα εργασία είχε ως κύριο αντικείμενο τη διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων ενεργειακής, βιοκλιματικής και περιβαλλοντικής αναβάθμισης υφιστάμενης πολυκατοικίας, με στόχο την αξιολόγηση της σχέσης μεταξύ κόστους, εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης ανθρακικού αποτυπώματος. Η ανάλυση βασίστηκε σε πραγματική γεωμετρική αποτύπωση του κτιρίου, σε αναλυτικές επιμετρήσεις, σε υπολογιστικά φύλλα Excel και σε τεκμηριωμένες παραδοχές για την υφιστάμενη ενεργειακή συμπεριφορά, τις τεχνικές παρεμβάσεις, το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου, η οποία ορίστηκε ως Σενάριο 0, ανέδειξε τα βασικά προβλήματα ενός τυπικού κτιρίου κατοικίας της δεκαετίας του 1980. Το κτίριο

χαρακτηρίζεται από ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία, παλαιά συρόμενα κουφώματα αλουμινίου με μονό υαλοπίνακα, απουσία οργανωμένης εξωτερικής σκίασης, παλαιές ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες. Τα χαρακτηριστικά αυτά οδηγούν σε υψηλή ετήσια τελική κατανάλωση ενέργειας, η οποία υπολογίστηκε σε 188.298,05 kWh/έτος, με ειδική κατανάλωση 177,21 kWh/m<sup>2</sup>·έτος. Το ετήσιο λειτουργικό κόστος ενέργειας υπολογίστηκε σε 32.151,28 €/έτος, ενώ οι ετήσιες λειτουργικές εκπομπές σε 50.840,47 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος.

Το Σενάριο 1, το οποίο αφορά την παθητική και βιοκλιματική αναβάθμιση του κελύφους, έδειξε ότι οι παρεμβάσεις στη θερμική προστασία, στα κουφώματα, στο δώμα και στην ηλιακή προστασία μπορούν να μειώσουν ουσιαστικά την ενεργειακή ζήτηση του κτιρίου. Η ετήσια τελική κατανάλωση μειώθηκε σε 141.684,23 kWh/έτος, επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση 46.613,82 kWh/έτος, δηλαδή 24,76% σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Η ετήσια οικονομική εξοικονόμηση ανήλθε σε 7.222,74 €/έτος και η απλή περίοδος αποπληρωμής σε 16,89 έτη. Παρά τη σχετικά μεγαλύτερη οικονομική περίοδο αποπληρωμής, το σενάριο αυτό έχει μεγάλη τεχνική και βιοκλιματική σημασία, διότι μειώνει τα θερμικά φορτία του κτιρίου και βελτιώνει τη φυσική του συμπεριφορά.

Το Σενάριο 2, το οποίο αφορά την αναβάθμιση των τεχνικών συστημάτων και της παραγωγής ζεστού νερού χρήσης, παρουσίασε τη μεγαλύτερη οικονομική αποδοτικότητα. Η ετήσια τελική κατανάλωση μειώθηκε σε 71.082,54 kWh/έτος, με εξοικονόμηση 117.215,52 kWh/έτος ή 62,25%. Το ετήσιο λειτουργικό κόστος μειώθηκε σε 16.348,98 €/έτος, ενώ η ετήσια οικονομική εξοικονόμηση ανήλθε σε 15.802,30 €/έτος. Η απλή περίοδος αποπληρωμής υπολογίστηκε σε 8,01 έτη, καθιστώντας το Σενάριο 2 το πιο αποδοτικό από καθαρά οικονομική άποψη. Η σημαντική αυτή επίδοση οφείλεται κυρίως στη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης, ΖΝΧ και φωτισμού.

Το Σενάριο 3, το οποίο αποτελεί το συνδυαστικό σενάριο βέλτιστης αναβάθμισης, παρουσίασε τη μεγαλύτερη συνολική ενεργειακή και περιβαλλοντική βελτίωση. Η ετήσια τελική κατανάλωση μειώθηκε σε 61.120,20 kWh/έτος, με εξοικονόμηση 127.177,85 kWh/έτος ή 67,54% σε σχέση με το Σενάριο 0. Το ετήσιο κόστος λειτουργικής ενέργειας μειώθηκε σε 14.057,65 €/έτος και η ετήσια οικονομική εξοικονόμηση ανήλθε σε 18.093,63 €/έτος. Ωστόσο, λόγω του υψηλού αρχικού κόστους των 248.474,84 €, η απλή περίοδος αποπληρωμής υπολογίστηκε σε 13,73 έτη. Το σενάριο αυτό είναι το πληρέστερο τεχνικά, επειδή συνδυάζει τη μείωση της ενεργειακής ζήτησης μέσω του κελύφους με την αποδοτικότερη κάλυψη των υπολειπόμενων φορτίων μέσω αναβαθμισμένων συστημάτων.

Από την περιβαλλοντική αξιολόγηση προέκυψε ότι όλα τα σενάρια αναβάθμισης οδηγούν σε σημαντική μείωση των λειτουργικών εκπομπών και σε θετικό καθαρό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα. Το Σενάριο 1 μειώνει τις λειτουργικές εκπομπές κατά 12.585,73 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος και εμφανίζει περιβαλλοντικό χρόνο απόσβεσης 2,22 έτη. Το Σενάριο 2 μειώνει τις λειτουργικές εκπομπές κατά 31.648,19 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος και εμφανίζει τον μικρότερο περιβαλλοντικό χρόνο απόσβεσης, 1,23 έτη. Το Σενάριο 3 μειώνει τις λειτουργικές εκπομπές κατά 34.338,02 kg CO<sub>2</sub>eq/έτος και οδηγεί στη μεγαλύτερη καθαρή μείωση εκπομπών σε περίοδο 50 ετών, η οποία υπολογίστηκε σε 1.649,96 t CO<sub>2</sub>eq.

Η σύγκριση των σεναρίων δείχνει ότι δεν υπάρχει μία μοναδική λύση που να υπερέχει σε όλα τα κριτήρια. Το Σενάριο 2 είναι το βέλτιστο ως προς την οικονομική αποδοτικότητα, την απλή περίοδο αποπληρωμής και το κόστος ανά μονάδα εξοικονομούμενης ενέργειας ή αποφευγόμενων εκπομπών. Το Σενάριο 3 είναι το βέλτιστο ως προς τη συνολική ενεργειακή εξοικονόμηση, τη μείωση λειτουργικών εκπομπών και τη συνολική τεχνική πληρότητα. Το Σενάριο 1 είναι το πιο αντιπροσωπευτικό ως προς τη βιοκλιματική λογική, επειδή επεμβαίνει στη φυσική συμπεριφορά του κτιρίου και μειώνει την ενεργειακή ζήτηση πριν από την κάλυψή της από μηχανολογικά συστήματα.

Ιδιαίτερα σημαντικό συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι ο βιοκλιματικός σχεδιασμός δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως δευτερεύον ή αισθητικό στοιχείο, αλλά ως ουσιαστικός άξονας ενεργειακής αναβάθμισης. Η απουσία βιοκλιματικής λογικής στην υφιστάμενη κατάσταση οδηγεί σε αυξημένα θερμικά φορτία, μεγαλύτερη εξάρτηση από μηχανολογικά συστήματα, υψηλότερη κατανάλωση και αυξημένες εκπομπές. Αντίθετα, η θερμική προστασία του κελύφους, η αναβάθμιση των κουφωμάτων, η θερμομονωτική προστασία του δώματος και η ελεγχόμενη σκίαση της νότιας όψης βελτιώνουν τη φυσική λειτουργία του κτιρίου και συμβάλλουν στη μείωση της ζήτησης ενέργειας.

Από τεχνική άποψη, η ορθότερη στρατηγική είναι η συνδυαστική προσέγγιση. Η αποκλειστική αναβάθμιση των συστημάτων μπορεί να προσφέρει σημαντική και γρήγορη εξοικονόμηση, όμως δεν επιλύει τις αδυναμίες του κελύφους. Αντίστοιχα, η αποκλειστική αναβάθμιση του κελύφους βελτιώνει τη βιοκλιματική συμπεριφορά και την άνεση, αλλά έχει πιο αργή οικονομική απόδοση όταν εξετάζεται μόνη της. Η συνδυαστική προσέγγιση επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη συνολική μείωση κατανάλωσης και εκπομπών, επειδή μειώνει πρώτα τη ζήτηση και στη συνέχεια καλύπτει τα μειωμένα φορτία με αποδοτικότερα συστήματα.

Με βάση τα αποτελέσματα της εργασίας, προτείνεται η ιεράρχηση των παρεμβάσεων να γίνεται ως εξής. Πρώτα πρέπει να εξετάζεται η βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κελύφους και των παθητικών χαρακτηριστικών του κτιρίου, ώστε να μειωθούν οι πραγματικές ανάγκες θέρμανσης και ψύξης. Στη συνέχεια πρέπει να εξετάζεται η αναβάθμιση των τεχνικών συστημάτων, ώστε τα μειωμένα φορτία να καλύπτονται με μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση. Τέλος, όπου υπάρχουν διαθέσιμες επιφάνειες και τεχνικές δυνατότητες, πρέπει να διερευνάται η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κυρίως για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης ή για την υποστήριξη της ηλεκτρικής κατανάλωσης.

Για το συγκεκριμένο κτίριο, εάν το βασικό κριτήριο είναι η άμεση οικονομική απόδοση, το Σενάριο 2 εμφανίζεται ως η πιο συμφέρουσα επιλογή. Προσφέρει μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας, σημαντική μείωση λειτουργικού κόστους και μικρή περίοδο αποπληρωμής. Εάν όμως το βασικό κριτήριο είναι η συνολική αναβάθμιση του κτιρίου, η μακροπρόθεσμη περιβαλλοντική επίδοση, η θερμική άνεση και η βιοκλιματική λειτουργία, τότε το Σενάριο 3 αποτελεί την πληρέστερη στρατηγική. Το Σενάριο 1, αν και λιγότερο αποδοτικό οικονομικά, παραμένει απαραίτητο ως βάση βιοκλιματικής βελτίωσης και ως μέσο αντιμετώπισης των κατασκευαστικών αδυναμιών του κελύφους.

Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε αποδείχθηκε κατάλληλη για τη συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων. Η χρήση CAD σχεδίων, επιμετρήσεων και υπολογιστικών φύλλων Excel επέτρεψε τη σύνδεση της γεωμετρίας του κτιρίου με τις ποσότητες, το κόστος, την ενεργειακή εξοικονόμηση και το ανθρακικό αποτύπωμα. Το πλεονέκτημα της προσέγγισης είναι η διαφάνεια και η δυνατότητα ελέγχου των υπολογισμών. Κάθε αποτέλεσμα μπορεί να συνδεθεί με συγκεκριμένη ποσότητα, παραδοχή ή συντελεστή, γεγονός που καθιστά τη μεθοδολογία επαναλήψιμη και προσαρμόσιμη σε άλλα υφιστάμενα κτίρια κατοικίας.

Παράλληλα, η εργασία ανέδειξε την ανάγκη προσεκτικής ερμηνείας των αποτελεσμάτων. Οι ενεργειακές τιμές βασίζονται σε τεκμηριωμένες παραδοχές και όχι σε πλήρη δυναμική ενεργειακή προσομοίωση. Οι περιβαλλοντικοί συντελεστές αποτελούν τιμές εργασίας και μπορούν να αντικατασταθούν από Περιβαλλοντικές Δηλώσεις Προϊόντων συγκεκριμένων υλικών ή συστημάτων. Τα κόστη επίσης πρέπει να επικαιροποιούνται με πραγματικές προσφορές και τρέχουσες τιμές αγοράς πριν από οποιαδήποτε εφαρμογή. Επομένως, τα αποτελέσματα πρέπει να χρησιμοποιούνται ως συγκριτικό εργαλείο λήψης αποφάσεων και όχι ως οριστική μελέτη εφαρμογής.

Για μελλοντική διερεύνηση προτείνεται η ενσωμάτωση πραγματικών δεδομένων κατανάλωσης ενέργειας από λογαριασμούς ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης, ώστε να βαθμονομηθεί καλύτερα το υπολογιστικό μοντέλο. Επίσης, θα ήταν χρήσιμη η πραγματοποίηση δυναμικής ενεργειακής προσομοίωσης με ωριαία κλιματικά δεδομένα, ώστε να αποτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η επίδραση της σκίασης, του φυσικού αερισμού, της θερμικής μάζας και της θερινής υπερθέρμανσης. Η προσθήκη θερμογραφικού ελέγχου, αναλυτικής αποτύπωσης κουφωμάτων και πραγματικών δεδομένων λειτουργίας των εγκαταστάσεων θα βελτίωνε περαιτέρω την ακρίβεια της αξιολόγησης.

Επιπλέον, προτείνεται η μελλοντική χρήση ειδικών EPD για τα επιλεγμένα υλικά και συστήματα, ώστε το ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα να υπολογιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η σύνδεση των επιμετρήσεων με δεδομένα EPD θα μπορούσε να οδηγήσει σε πιο ολοκληρωμένη αξιολόγηση κύκλου ζωής. Παράλληλα, θα μπορούσε να εφαρμοστεί αναλυτική κοστολόγηση κύκλου ζωής με προεξόφληση, μεταβολή τιμών ενέργειας, κόστος συντήρησης και πιθανές αντικαταστάσεις, ώστε η οικονομική αξιολόγηση να αποκτήσει μεγαλύτερο βάθος.

Συνοψίζοντας, η εργασία καταλήγει ότι η ενεργειακή αναβάθμιση υφιστάμενων πολυκατοικιών πρέπει να αντιμετωπίζεται με ολοκληρωμένο τρόπο. Η απλή αντικατάσταση συστημάτων μπορεί να είναι οικονομικά ελκυστική, αλλά δεν αρκεί για την πλήρη βελτίωση της κτιριακής συμπεριφοράς. Η βιοκλιματική αναβάθμιση του κελύφους είναι απαραίτητη για τη μείωση της ζήτησης και τη βελτίωση της άνεσης. Ο συνδυασμός παθητικών παρεμβάσεων και αποδοτικών τεχνικών συστημάτων οδηγεί στο πληρέστερο αποτέλεσμα, ιδίως όταν η αξιολόγηση λαμβάνει υπόψη όχι μόνο το κόστος, αλλά και την ενέργεια, τις εκπομπές, τη διάρκεια ζωής και την ποιότητα λειτουργίας του κτιρίου.

Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι η βέλτιστη στρατηγική εξαρτάται από τον στόχο της παρέμβασης. Για άμεση οικονομική απόδοση, προκρίνεται η αναβάθμιση τεχνικών συστημάτων. Για ολοκληρωμένη ενεργειακή, περιβαλλοντική και βιοκλιματική αναβάθμιση, προκρίνεται το συνδυαστικό σενάριο. Για ουσιαστική βελτίωση της φυσικής συμπεριφοράς του κτιρίου, οι παρεμβάσεις στο κέλυφος αποτελούν αναγκαία βάση. Συνεπώς, η τελική επιλογή δεν πρέπει να βασίζεται σε έναν μόνο δείκτη, αλλά σε πολυκριτηριακή αξιολόγηση που λαμβάνει υπόψη το κόστος, την ενεργειακή

εξοικονόμηση, το ανθρακικό αποτύπωμα, τη θερμική άνεση και τη μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα του κτιρίου.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνόγλωσσες αναφορές

- Ελληνική Δημοκρατία. (2013). *Νόμος 4122/2013: Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων, Εναρμόνιση με την Οδηγία 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και λοιπές διατάξεις*. ΦΕΚ Α 42/19.02.2013.
- Ελληνική Δημοκρατία. (2020). *Νόμος 4685/2020: Εκσυγχρονισμός περιβαλλοντικής νομοθεσίας, ενσωμάτωση στην ελληνική νομοθεσία των Οδηγιών 2018/844 και 2019/692 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και λοιπές διατάξεις*. ΦΕΚ Α 92/07.05.2020.
- Ελληνική Δημοκρατία. (2022). *Νόμος 4936/2022: Εθνικός Κλιματικός Νόμος, μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα και προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή*. ΦΕΚ Α 105/27.05.2022.
- Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. (2017a). *TOTEE 20701-1/2017: Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης*. ΤΕΕ.
- Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. (2017b). *TOTEE 20701-2/2017: Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτιρίων*. ΤΕΕ.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2017a). *Υ.Α. ΔΕΠΕΑ/οικ.178581/2017: Έγκριση Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων*. ΦΕΚ Β 2367/12.07.2017.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2017b). *Υ.Α. ΔΕΠΕΑ/οικ.182365/2017: Έγκριση και εφαρμογή των Τεχνικών Οδηγιών ΤΕΕ για την ενεργειακή απόδοση κτιρίων*. ΦΕΚ Β 4003/17.11.2017.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2021). *Υ.Α. ΥΠΕΝ/ΔΕΠΕΑ/20334/148/2021: Έκθεση μακροπρόθεσμης στρατηγικής ανακαίνισης του κτιριακού αποθέματος*. ΦΕΚ Β 974/12.03.2021.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2024). *Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα*. ΥΠΕΝ.

### Ξενόγλωσσες αναφορές

- CEN/ISO. (2022). *EN ISO 22057:2022 Sustainability in buildings and civil engineering works: Data templates for the use of environmental product declarations for construction products in building information modelling*. European Committee for Standardization / International Organization for Standardization.
- Dodd, N., Donatello, S., & Cordella, M. (2021). *Level(s) indicator 1.2: Life cycle Global Warming Potential (GWP): User manual, introductory briefing, instructions and guidance*. Publications Office of the European Union.
- Elaouzy, Y., & El Fadar, A. (2022). A multi-level evaluation of bioclimatic design in Mediterranean climates. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102124. doi: 10.1016/j.seta.2022.102124
- European Commission. (2020). *In focus: Energy efficiency in buildings*. European Commission.
- European Commission. (n.d.-a). *Energy Performance of Buildings Directive*. Directorate-General for Energy.
- European Commission. (n.d.-b). *Energy Efficiency Directive*. Directorate-General for Energy.
- European Commission. (n.d.-c). *Renewable Energy Directive*. Directorate-General for Energy.
- European Commission. (n.d.-d). *European Climate Law*. Directorate-General for Climate Action.
- European Commission. (n.d.-e). *Global warming potential of buildings*. Directorate-General for Energy.
- European Commission. (n.d.-f). *Calculation framework for new building life-cycle Global Warming Potential*. Directorate-General for Energy.
- European Commission. (n.d.-g). *Construction Products Regulation*. Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs.
- European Committee for Standardization. (2019). *EN 15804:2012+A2:2019 Sustainability of construction works: Environmental product declarations: Core rules for the product category of construction products*. CEN.

- European Committee for Standardization. (2021). *EN 15942:2021 Sustainability of construction works: Environmental product declarations: Communication format business-to-business*. CEN.
- European Committee for Standardization. (2024). *EN 15941:2024 Sustainability of construction works: Data quality for environmental assessment of products and construction work: Selection and use of data*. CEN.
- European Committee for Standardization. (2026). *EN 15978:2026 Sustainability of construction works: Assessment of environmental performance of buildings: Requirements and guidance*. CEN.
- European Parliament and Council of the European Union. (2021). *Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality*. Official Journal of the European Union.
- European Parliament and Council of the European Union. (2023a). *Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency*. Official Journal of the European Union.
- European Parliament and Council of the European Union. (2023b). *Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001 as regards the promotion of energy from renewable sources*. Official Journal of the European Union.
- European Parliament and Council of the European Union. (2024a). *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings*. Official Journal of the European Union.
- European Parliament and Council of the European Union. (2024b). *Regulation (EU) 2024/3110 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 laying down harmonised rules for the marketing of construction products*. Official Journal of the European Union.
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. John Wiley & Sons.
- Hart, J., D'Amico, B., & Pomponi, F. (2021). Whole-life embodied carbon in multistory buildings: Steel, concrete and timber structures. *Journal of Industrial Ecology*, 25(2), 403–418. doi: 10.1111/jiec.13139

- Huang, Z., Zhou, H., Miao, Z., Tang, H., Lin, B., & Zhuang, W. (2024). Life-cycle carbon emissions of buildings: Implications, calculations, and reductions. *Engineering*, 35(4), 120–146. doi: 10.1016/j.eng.2023.08.019
- International Energy Agency. (2024). *Buildings*. IEA.
- International Organization for Standardization. (2006a). *ISO 14025:2006 Environmental labels and declarations: Type III environmental declarations: Principles and procedures*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2006b). *ISO 14040:2006 Environmental management: Life cycle assessment: Principles and framework*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2006c). *ISO 14044:2006 Environmental management: Life cycle assessment: Requirements and guidelines*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2017). *ISO 21930:2017 Sustainability in buildings and civil engineering works: Core rules for environmental product declarations of construction products and services*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 14067:2018 Greenhouse gases: Carbon footprint of products: Requirements and guidelines for quantification*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2026). *ISO 14001:2026 Environmental management systems: Requirements with guidance for use*. ISO.
- Keyhani, M., Abbaspour, A., Bahadori-Jahromi, A., Mylona, A., Janbey, A., Godfrey, P., & Zhang, H. (2023). Whole life carbon assessment of a typical UK residential building using different embodied carbon data sources. *Sustainability*, 15(6), 5115. doi: 10.3390/su15065115
- Lima, M. S. S., Duarte, S., Exenberger, H., Fröch, G., & Flora, M. (2024). Integrating BIM–LCA to enhance sustainability assessments of constructions. *Sustainability*, 16(3), 1172. doi: 10.3390/su16031172
- Méndez Echenagucia, T., Moroseos, T., & Meek, C. (2023). On the tradeoffs between embodied and operational carbon in building envelope design: The impact of local climates and energy grids. *Energy and Buildings*, 278, 112589. doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112589

- Myint, N. N., Shafique, M., Zhou, X., & Zheng, Z. (2025). Net zero carbon buildings: A review on recent advances, knowledge gaps and research directions. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04200. doi: 10.1016/j.cscm.2024.e04200
- Olgyay, V. (2015). *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton University Press. Original work published 1963.
- Resch, E., Andresen, I., Cherubini, F., & Brattebø, H. (2021). Estimating dynamic climate change effects of material use in buildings: Timing, uncertainty, and emission sources. *Building and Environment*, 187, 107399. doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107399
- Salvati, A., Coch Roura, H., & Cecere, C. (2017). Assessing the urban heat island and its energy impact on residential buildings in Mediterranean climate: Barcelona case study. *Energy and Buildings*, 146, 38–54. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.04.025
- Santamouris, M. (2015). On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings: A review. *Energy and Buildings*, 98, 119–124. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.09.052
- Szokolay, S. V. (2014). *Introduction to architectural science: The basis of sustainable design* (3rd ed.). Routledge.
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. United Nations.
- United Nations Environment Programme. (2025). *Global status report for buildings and construction 2024/2025*. UNEP.
- Waldman, B., Huang, M., & Simonen, K. (2020). Embodied carbon in construction materials: A framework for quantifying data quality in EPDs. *Buildings and Cities*, 1(1), 625–636. doi: 10.5334/bc.31
- Watari, T., Yamashita, N., & Cabrera Serrenho, A. (2024). Net-zero embodied carbon in buildings with today's available technologies. *Environmental Science & Technology*, 58(4), 1793–1801. doi: 10.1021/acs.est.3c04618
- World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. (2011). *Greenhouse Gas Protocol: Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development.
- Zinzi, M., & Agnoli, S. (2012). Cool and green roofs: An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for

residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings*, 55, 66–76.  
doi: 10.1016/j.enbuild.2011.09.024

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

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