



Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου
Σχεδιασμού

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός (ΠΣΧ)»

ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ

«Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Κτιρίων»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

«Βιοκλιματικός επανασχεδιασμός σχολικών κτιρίων:

**Ανάλυση, αξιολόγηση και επανασχεδιασμός εσωτερικών και
εξωτερικών χώρων»**

Λάζιου Ελπινίκη - Παρασκευή

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: κ. Σοφία Γιάνναρου:

Πάτρα, Ιούλιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή/φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, 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 επανασχεδιασμός σχολικών κτιρίων:
Ανάλυση, αξιολόγηση και επανασχεδιασμός εσωτερικών και
εξωτερικών χώρων»**

Λάζιου Ελπινίκη - Παρασκευή

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Σοφία Γιάνναρου

Μέλος ΣΕΠ ΕΑΠ

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Δημήτριος Τσεσμελής

Μέλος ΣΕΠ ΕΑΠ

Πάτρα, Ιούλιος 2026

«Ευχαριστίες»

Η ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε μια απαιτητική αλλά ιδιαίτερα δημιουργική διαδικασία. Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν, με τον δικό τους τρόπο, στην εκπόνηση και την ολοκλήρωσή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κ. Σοφία Γιάνναρου, για την επιστημονική καθοδήγηση, τις ουσιαστικές παρατηρήσεις και για τη συνεχή παρότρυνση και επιμονή της, οι οποίες υπήρξαν καθοριστικές για την ομαλή ολοκλήρωση της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στη διεύθυνση και στο προσωπικό του υπό μελέτη σχολείου για τη συνεργασία, τη διάθεση των απαραίτητων στοιχείων και τη διευκόλυνση της επιτόπιας αποτύπωσης του κτιρίου και του αύλειου χώρου. Η συμβολή τους υπήρξε ουσιαστική για τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου και την πραγματοποίηση των ενεργειακών και περιβαλλοντικών αναλύσεων.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους ανθρώπους του επαγγελματικού μου περιβάλλοντος για την κατανόηση τους, την στήριξη και την ενθάρρυνσή τους κατά τη διάρκεια της έρευνας.

Πάνω απ' όλα, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Η παρουσία τους μου έδωσε τη δύναμη να συνεχίσω στις δυσκολότερες στιγμές και να ολοκληρώσω αυτή την προσπάθεια.

Τέλος, αναγνωρίζω τη δική μου επιμονή και αφοσίωση σε μια περίοδο με πολλές απαιτήσεις και υποχρεώσεις. Η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας αποτελεί για εμένα όχι μόνο έναν ακαδημαϊκό στόχο, αλλά και την ολοκλήρωση μιας σημαντικής προσωπικής διαδρομής.

Περίληψη

Η ενεργειακή και βιοκλιματική αναβάθμιση των υφιστάμενων σχολικών κτιρίων απαιτεί μια προσέγγιση που δεν περιορίζεται αποκλειστικά στο κτιριακό κέλυφος, αλλά λαμβάνει υπόψη και τις περιβαλλοντικές συνθήκες του αύλειου χώρου. Η παρούσα εργασία προσεγγίζει το σχολικό συγκρότημα ως ενιαίο περιβαλλοντικό σύστημα και αναπτύσσει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο αποτύπωσης, ενεργειακής προσομοίωσης και συγκριτικής αξιολόγησης παρεμβάσεων με τη χρήση Building Information Modeling (BIM). Η ερευνητική της συμβολή έγκειται στη σύνδεση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου με το λειτουργικό και ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα, καθώς και με τη χωρική κατανομή της ηλιακής έκθεσης και της σκίασης στη σχολική αυλή. Με τον τρόπο αυτό, η αξιολόγηση δεν περιορίζεται στην εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά εξετάζει διαφορετικές πλευρές της περιβαλλοντικής απόδοσης του σχολικού συγκροτήματος.

Ως πεδίο εφαρμογής επιλέχθηκε σχολικό συγκρότημα στην Ελλάδα. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν επιτόπια αποτύπωση και συλλογή γεωμετρικών, κατασκευαστικών και λειτουργικών δεδομένων. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε παραμετρικό μοντέλο στο Autodesk Revit, καθορίστηκαν οι θερμικοί χώροι και πραγματοποιήθηκε ενεργειακή προσομοίωση. Εξετάστηκαν τέσσερα διαδοχικά σενάρια: αντικατάσταση κουφωμάτων, εξωτερική θερμομόνωση τοίχων, συνδυασμένη θερμομόνωση τοίχων και στέγης και ολοκληρωμένη εφαρμογή όλων των παρεμβάσεων. Η περιβαλλοντική επίδραση αξιολογήθηκε συμπληρωματικά με το Autodesk Forma Carbon Insights, ενώ για τον αύλειο χώρο πραγματοποιήθηκε χωρική ανάλυση της ηλιακής έκθεσης και της διάρκειας σκίασης.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η υφιστάμενη ενεργειακή κατανάλωση κυριαρχείται από τις ανάγκες θέρμανσης, γεγονός που συνδέεται με την ανεπαρκή θερμική προστασία του κελύφους. Η αντικατάσταση των κουφωμάτων παρουσίασε περιορισμένο συνολικό όφελος, ενώ η θερμομόνωση των τοίχων μείωσε τη θέρμανση αλλά αύξησε τις θεωρητικές ανάγκες ψύξης. Η προσθήκη θερμομόνωσης στη στέγη βελτίωσε ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του κτιρίου. Το Σενάριο 4 απέδωσε τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση, μειώνοντας τη συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση κατά 53,35%, τη θέρμανση κατά 62,57% και το Site EUI κατά 53,86%. Παράλληλα, μειώθηκε ο λειτουργικός άνθρακας, αλλά αυξήθηκε ο ενσωματωμένος άνθρακας λόγω των νέων υλικών. Η ανάλυση της αυλής ανέδειξε

εκτεταμένη ηλιακή έκθεση στις κεντρικές ζώνες και περιορισμένη σκίαση κατά τις κρίσιμες ώρες χρήσης.

Συνολικά, η εργασία διαμορφώνει μια επαναλήψιμη BIM-based μεθοδολογική προσέγγιση για την τεκμηριωμένη ιεράρχηση παρεμβάσεων σε υφιστάμενα σχολικά συγκροτήματα. Αναδεικνύει ότι η καταλληλότερη λύση δεν καθορίζεται μόνο από τη μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση, αλλά από την ισορροπία μεταξύ ενεργειακής απόδοσης, ανθρακικού αποτυπώματος και βιοκλιματικής ποιότητας του σχολικού περιβάλλοντος.

Λέξεις - Κλειδιά

Βιοκλιματικός σχεδιασμός, σχολικά κτίρια και αυλές, BIM, ενεργειακή αναβάθμιση, ενεργειακή προσομοίωση, ανθρακικό αποτύπωμα.

«Bioclimatic redesign of school buildings: Analysis, evaluation and redesign of interior and exterior spaces»

«Laziou Elpiniki-Paraskevi»

Abstract

The energy and bioclimatic retrofitting of existing school buildings requires an approach that is not limited solely to the building envelope, but also takes into account the environmental conditions of the school grounds. This study approaches the school complex as a unified environmental system and develops a comprehensive framework for mapping, energy simulation, and comparative evaluation of interventions using Building Information Modeling (BIM). Its research contribution lies in linking the building's energy performance to its operational and embedded carbon footprint, as well as to the spatial distribution of solar exposure and shading in the schoolyard. In this way, the assessment is not limited to energy savings but examines various aspects of the school complex's environmental performance.

A school complex in Greece was selected as the study site. Initially, on-site surveys were conducted, and geometric, structural, and operational data were collected. Next, a parametric model was developed in Autodesk Revit, the thermal zones were defined, and an energy simulation was performed. Four sequential scenarios were examined: replacement of window and door frames, exterior wall insulation, combined wall and roof insulation, and the comprehensive implementation of all interventions. The environmental impact was additionally assessed using Autodesk Forma Carbon Insights, while a spatial analysis of solar exposure and shading duration was conducted for the outdoor area.

The results showed that current energy consumption is dominated by heating needs, a fact linked to the building envelope's inadequate thermal protection. Replacing the window frames yielded limited overall benefits, while insulating the walls reduced heating needs but increased theoretical cooling needs. Adding insulation to the roof satisfactorily improved the building's performance. Scenario 4 yielded the greatest savings, reducing total annual

energy consumption by 53.35%, heating by 62.57%, and Site EUI by 53.86%. At the same time, operational carbon was reduced, but embodied carbon increased due to the new materials. The analysis of the courtyard revealed extensive solar exposure in the central zones and limited shading during critical hours of use.

Overall, this study establishes a repeatable BIM-based methodological approach for the evidence-based prioritization of interventions in existing school complexes. It demonstrates that the most appropriate solution is determined not only by the greatest energy savings, but by the balance between energy efficiency, carbon footprint, and the bioclimatic quality of the school environment.

Keywords

Bioclimatic design, school buildings and yards, BIM, energy retrofit, energy simulation, carbon footprint

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract	vii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Εικόνων	xii
Κατάλογος Σχημάτων	xiv
Κατάλογος Πινάκων.....	xv
Συνοτομογραφίες & Ακρωνύμια.....	xvi
HIGHLIGHTS.....	xviii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. Γενικός προβληματισμός	2
1.2. Το σχολικό κτιριακό απόθεμα στην Ελλάδα.....	3
1.3. Θερμική άνεση και μικροκλίμα στους σχολικούς χώρους.....	4
1.4. Διεθνείς τάσεις και ανάγκη αναβάθμισης σχολικών υποδομών	4
1.5. Ο ρόλος του BIM στην αναβάθμιση των σχολικών κτιρίων	5
1.6. Σημερινή κατάσταση σε επίπεδο γνώσεων και τεχνικής	5
1.7. Κενά και ελλείψεις που καλείται να καλύψει η παρούσα εργασία	6
1.8. Προτεινόμενη μεθοδολογία.....	6
1.9. Προσδοκώμενα αποτελέσματα	7
1.10. Συμβολή της εργασίας.....	7
1.11. Δομή της εργασίας	8
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....	9
Εισαγωγή- Βιοκλιματικός σχεδιασμός σχολικών κτιρίων	9
2.1. Θερμική άνεση και δείκτες (PMV/PPD, Tmrt, Operative Temperature)	9
2.2. Θερμική άνεση στις σχολικές αίθουσες.....	13
2.3. Θερμική άνεση σε σχολικές αυλές.....	17
2.4. Βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων και αυλών	21

2.5. Ενεργειακή απόδοση σχολικών κτιρίων- Προβλήματα και λύσεις	25
2.6. BIM για ενεργειακή και θερμική ανάλυση	29
2.7. Autodesk Revit & Autodesk Forma Carbon Insights σε ενεργειακές προσομοιώσεις	35
2.8. Διεθνείς μελέτες αντίστοιχων αναβαθμίσεων	38
2.9. Ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας και τεκμηρίωσή τους	40
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	42
3.1. Επιλογή και περιγραφή της περιοχής μελέτης	42
3.2. Αποτύπωση υφιστάμενης κατάστασης	45
3.3. Δημιουργία BIM μοντέλου στο Revit.....	47
3.4. Ορισμός θερμοφυσικών ιδιοτήτων δομικών υλικών	50
3.5. Δημιουργία ενεργειακού μοντέλου	55
3.6. Ενεργειακή προσομοίωση	61
3.7. Ανάπτυξη σεναρίων ενεργειακής και βιοκλιματικής αναβάθμισης.....	63
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	64
4.1. Εισαγωγή.....	64
4.2. Υφιστάμενη κατάσταση	64
4.3. Σενάριο 1 - Αντικατάσταση κουφωμάτων	70
4.4. Σενάριο2 - Εξωτερική θερμομόνωση.....	75
4.5. Σενάριο 3 -Θερμομόνωση τοίχων και στέγης.....	79
4.6. Σενάριο 4 -Συνδυασμός παρεμβάσεων	83
4.7. Συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων.....	87
5. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	91
5.1. Εισαγωγή.....	91
5.2. Ερμηνεία της ενεργειακής συμπεριφοράς της υφιστάμενης κατάστασης	91
5.3. Αποτίμηση των σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης.....	95

5.4. Συσχέτιση ενεργειακής απόδοσης και αποτυπώματος άνθρακα.....	98
5.5. Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη διεθνή βιβλιογραφία	100
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	103
6.1. Συμπεράσματα	103
6.2. Προτάσεις αναβάθμισης.....	103
6.3. Αναπάντητα ερωτήματα και αδυναμίες της εργασίας	104
6.5. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	109
Ελληνική Βιβλιογραφία	110
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	110

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Αεροφωτογραφία (Πηγή: Εθνικό Κτηματολόγιο).....	43
Εικόνα 2. Τρισδιάστατη απεικόνιση σχολικού συγκροτήματος. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	45
Εικόνα 3 Τρισδιάστατη απεικόνιση του υφιστάμενου σχολικού κτιρίου στο Autodesk Revit- Δυτική Όψη. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.....	48
Εικόνα 4. Τρισδιάστατη απεικόνιση του υφιστάμενου σχολικού κτιρίου στο Autodesk Revit- Βόρεια Όψη. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	48
Εικόνα 5. Τρισδιάστατη απεικόνιση του υφιστάμενου σχολικού κτιρίου στο Autodesk Revit- Ανατολική Όψη. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	49
Εικόνα 6. Τρισδιάστατη απεικόνιση του υφιστάμενου σχολικού κτιρίου στο Autodesk Revit- Νότια Όψη. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	49
Εικόνα 7. Σύνθεση εξωτερικής τοιχοποιίας 30εκ.. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.....	51
Εικόνα 8. Σύνθεση εξωτερικής τοιχοποιίας 20εκ.. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.....	52
Εικόνα 9. Σύνθεση εξωτερικής τοιχοποιίας 50 εκ.. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.....	52
Εικόνα 10. Σύνθεση εξωτερικής τοιχοποιίας 10εκ.. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.....	53
Εικόνα 11. Σύνθεση δαπέδου. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	54
Εικόνα 12. Σύνθεση στέγης. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	54
Εικόνα 13. Ορισμός τύπου υαλοπίνακα τύπου ως singleglazing. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	55
Εικόνα 14. Κάτοψη στάθμης ισογείου και ορισμός spaces. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.....	57
Εικόνα 15. Κάτοψη στάθμης ορόφου και ορισμός spaces. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	57
Εικόνα 16. Απόσπασμα ρυθμίσεων Revit.....	58
Εικόνα 17. Ενεργειακές Ρυθμίσεις για SpaceType: Classroom - Αίθουσες	59
Εικόνα 18. SchoolOccupancy. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.....	60
Εικόνα 19. Building Type Settings για Σχολείο.....	61

Εικόνα 20. Επιλογή διαθέσιμος μετεωρολογικού σταθμού. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.....	62
Εικόνα 21. Ενεργειακό μοντέλο σχολικού κτιρίου μέσω Revit – AnalyticalSpaces. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	62
Εικόνα 22. Ενεργειακό μοντέλο σχολικού κτιρίου μέσω Revit – Analytical Surfaces. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	62
Εικόνα 23. Αποτελέσματα του Υφιστάμενου στο Autodesk Forma Carbon Insights.	70
Εικόνα 24. Ιδιότητες υαλοπίνακας – τριπλός υαλοπίνακας.....	71
Εικόνα 25. Αποτελέσματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης του Σεναρίου 1 στο Autodesk Forma Carbon Insights.....	74
Εικόνα 26. Σύνθεση εξωτερικής τοιχοποιίας 20 εκ. με προσθήκη θερμομονωτικού υλικού εξωτερικά. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.....	76
Εικόνα 27. Αποτελέσματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης του Σεναρίου 2 στο Autodesk Forma Carbon Insights.....	78
Εικόνα 28. Σύνθεση στέγης με προσθήκη θερμομονωτικού υλικού. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	79
Εικόνα 29. Αποτελέσματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης του Σεναρίου 3 στο Autodesk Forma Carbon Insights.....	82
Εικόνα 30 Αποτελέσματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης του Σεναρίου 4 στο Autodesk Forma Carbon Insights.....	86
Εικόνα 31. Τρισδιάστατη απεικόνιση των θερμικών χώρων (Spaces) με τις υψηλότερες απαιτήσεις ψύξης στο υπό μελέτη σχολικό κτίριο (Spaces 37, 40, 38, 36 και 33).....	93
Εικόνα 32. Ηλιακή έκθεση του αύλειου χώρου με τη χρήση Add-inShadowColour.....	95
Εικόνα 33. Σκίαση του αύλειου χώρου με τη χρήση Add-in Shadow Colour.....	95

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Κατανομή της ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης της υφιστάμενης κατάστασης ανά τελική χρήση.	65
Σχήμα 2. Μηνιαία κατανομή φορτίων ψύξης	66
Σχήμα 3. Μηνιαία κατανομή φορτίων θέρμανσης.....	66
Σχήμα 4. Φορτία αιχμής θέρμανσης και ψύξης ανά θερμική ζώνη (Space) για τις αίθουσες διδασκαλίας του υφιστάμενου κτιρίου.....	69
Σχήμα 5. Μηνιαία κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων Σεναρίου 1	73
Σχήμα 6. Μηνιαία κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων Σεναρίου 2	77
Σχήμα 7. Μηνιαία κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων του Σεναρίου 3.....	81
Σχήμα 8. Μηνιαία κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων του Σεναρίου 4.....	85
Σχήμα 9. Συγκριτική εξέλιξη των δεικτών Site EUI και Source EUI.....	89

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Θερμοφυσικές ιδιότητες υλικών - τιμές εισαγωγής στο Revit (Manage → Materials → Thermal).....	50
Πίνακας 2. Σύνθεση και U-values δομικών στοιχείων κελύφους.....	51
Πίνακας 3. Κατηγορίες χώρων - spaces	56
Πίνακας 4. Παράμετροι λειτουργίας ανά τύπο χώρου	60
Πίνακας 5. Ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά κατηγορία χρήσης (υφιστάμενη κατάσταση)	64
Πίνακας 6. Μηνιαία κατανάλωση θέρμανσης και θεωρητικής ψύξης (kWh)	67
Πίνακας 7. Συγκριτική αξιολόγηση της ενεργειακής κατανάλωσης Σ1	72
Πίνακας 8. Συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών περιβαλλοντικής αξιολόγησης Σ1	74
Πίνακας 9. Συγκριτική αξιολόγηση της ενεργειακής κατανάλωσης Σεναρίου 2	76
Πίνακας 10. Συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών περιβαλλοντικής αξιολόγησης Σ2.....	78
Πίνακας 11. Συγκριτική αξιολόγηση της ενεργειακής κατανάλωσης	80
Πίνακας 12. Συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών περιβαλλοντικής αξιολόγησης Σ3.....	82
Πίνακας 13. Συγκριτική αξιολόγηση της ενεργειακής κατανάλωσης	84
Πίνακας 14. Συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών περιβαλλοντικής αξιολόγησης Σ4.....	86
Πίνακας 15. Συγκριτική αξιολόγηση των ενεργειακών δεικτών της υφιστάμενης κατάστασης και των τεσσάρων σεναρίων αναβάθμισης.....	87
Πίνακας 16. Συγκριτική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών δεικτών της υφιστάμενης κατάστασης και των τεσσάρων σεναρίων.....	89

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

Συντομογραφία	Επεξήγηση
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BIM	Building Information Modelling - Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κτιρίου
BPA	Building Performance Analysis - Ανάλυση Κτιριακής Απόδοσης
CO ₂	Carbon Dioxide - Διοξείδιο του άνθρακα
CO _{2e}	Carbon Dioxide Equivalent - Ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα
COBIM	Common BIM Requirements - Κοινές απαιτήσεις BIM
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive - Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων
EPS	Expanded Polystyrene - Διογκωμένη πολυστερίνη
EUI	Energy Use Intensity - Δείκτης ενεργειακής έντασης
gbXML	Green Building XML - Πρότυπο ανταλλαγής δεδομένων ενεργειακών μοντέλων
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning - Θέρμανση, αερισμός και κλιματισμός
IFC	Industry Foundation Classes - Ανοικτό πρότυπο ανταλλαγής δεδομένων BIM
KENAK	Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων
LCA	Life Cycle Assessment - Αξιολόγηση κύκλου ζωής
nZEB	nearly Zero-Energy Building - Κτίριο σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας
PET	Physiological Equivalent Temperature - Φυσιολογικά ισοδύναμη θερμοκρασία

PMV	Predicted Mean Vote - Προβλεπόμενη μέση ψήφος
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied - Προβλεπόμενο ποσοστό δυσανεστημένων
SHGC	Solar Heat Gain Coefficient - Συντελεστής ηλιακών θερμικών κερδών
Tmrt	Mean Radiant Temperature - Μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας
TOTEE	Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας
UTCI	Universal Thermal Climate Index - Παγκόσμιος δείκτης θερμικού κλίματος
VLT	Visible Light Transmittance - Διαπερατότητα ορατού φωτός

HIGHLIGHTS

1. Το σχολικό συγκρότημα αξιολογείται ως ενιαίο σύστημα κτιρίου και αύλειου χώρου.
2. Η BIM μεθοδολογία συνδέει ενεργειακή απόδοση, εκπομπές άνθρακα και ηλιακή έκθεση.
3. Το ολοκληρωμένο σενάριο παρεμβάσεων πέτυχε μείωση της συνολικής ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης κατά 53,35%.
4. Η μείωση του λειτουργικού άνθρακα συνοδεύτηκε από αύξηση του ενσωματωμένου.
5. Η κεντρική αυλή εμφανίζει υψηλή ηλιακή έκθεση και περιορισμένη σκίαση τις κρίσιμες ώρες.

Συνεισφορά της εργασίας

Η παρούσα εργασία απευθύνεται σε μηχανικούς, μελετητές, φορείς διαχείρισης σχολικών υποδομών και μέλη της σχολικής κοινότητας, προσφέροντας ένα πρακτικό πλαίσιο για την αξιολόγηση και τον βιοκλιματικό επανασχεδιασμό υφιστάμενων σχολικών συγκροτημάτων. Η βασική της συνεισφορά έγκειται στην ενιαία θεώρηση του κτιρίου και του αύλειου χώρου, μέσα από τη συνδυασμένη χρήση BIM, ενεργειακής προσομοίωσης, αξιολόγησης λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα και ανάλυσης της ηλιακής έκθεσης. Με τη σύγκριση διαδοχικών σεναρίων αναβάθμισης αναδεικνύεται ότι η ενεργειακά αποδοτικότερη λύση δεν είναι πάντοτε και η περιβαλλοντικά βέλτιστη, καθώς απαιτείται ισορροπία μεταξύ της λειτουργικής εξοικονόμησης και της επιβάρυνσης από τα νέα υλικά. Παράλληλα, η ανάλυση της αυλής επιτρέπει τον εντοπισμό περιοχών με αυξημένη δυνητική θερμική επιβάρυνση και υποστηρίζει τη διατύπωση στοχευμένων προτάσεων σκίασης, φύτευσης και αναδιαμόρφωσης. Το μεθοδολογικό πλαίσιο μπορεί να προσαρμοστεί και σε άλλα σχολικά κτίρια με παρόμοια χαρακτηριστικά, λειτουργώντας ως εργαλείο τεκμηριωμένης λήψης αποφάσεων.

ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΟΣ ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΧΟΛΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ: ΑΝΑΛΥΣΗ, ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ

Ελπινίκη-Παρασκευή Λάζιου¹, Σοφία Γιάνναρου¹

¹Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο,

Πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Πάτρα

email: nikilaziou@gmail.com, giannarou.sofia@ac.eap.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ενεργειακή αναβάθμιση των υφιστάμενων σχολικών κτιρίων απαιτεί μια προσέγγιση που δεν περιορίζεται αποκλειστικά στο κτιριακό κέλυφος, αλλά λαμβάνει υπόψη και τις περιβαλλοντικές συνθήκες του αύλειου χώρου. Η εργασία αναπτύσσει και εφαρμόζει BIM-based μεθοδολογία σε σχολικό συγκρότημα της Αριδαίας, αντιμετωπίζοντας το κτίριο και την αυλή ως ενιαίο περιβαλλοντικό σύστημα. Μετά την επιτόπια αποτύπωση δημιουργήθηκε τρισδιάστατο μοντέλο στο Autodesk Revit και εξετάστηκαν τέσσερα σενάρια: αντικατάσταση κουφωμάτων, θερμομόνωση τοίχων, θερμομόνωση τοίχων και στέγης και συνδυασμός όλων των παρεμβάσεων. Η ενεργειακή προσομοίωση συμπληρώθηκε με συγκριτική εκτίμηση λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα και με χωρική ανάλυση ηλιακής έκθεσης και σκίασης. Το συνδυαστικό σενάριο μείωσε τη συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση κατά 53,35% και τη θέρμανση κατά 62,57%. Ωστόσο, η μείωση του λειτουργικού άνθρακα συνοδεύτηκε από αύξηση του ενσωματωμένου άνθρακα. Στην αυλή εντοπίστηκαν εκτεταμένες κεντρικές ζώνες υψηλής ηλιακής έκθεσης. Η συνεισφορά της εργασίας είναι ένα επαναλήψιμο πλαίσιο που συνδέει ενεργειακή απόδοση, εκπομπές άνθρακα και ηλιακή συμπεριφορά για την τεκμηριωμένη ιεράρχηση παρεμβάσεων σε υφιστάμενα σχολεία.

Λέξεις κλειδιά: *BIM, σχολικά κτίρια, ενεργειακή αναβάθμιση, ανθρακικό αποτύπωμα, σχολική αυλή*

ABSTRACT

The energy retrofit of existing school buildings requires an approach that is not limited solely to the building envelope, but also takes into account the environmental conditions of the school grounds. This project develops and applies a BIM-based methodology to a school complex in Aridaia, treating the building and the schoolyard as a single environmental system. Following an on-site survey, a 3D model was created in Autodesk Revit, and four scenarios were examined: replacement of window and door frames, wall insulation, wall and roof insulation, and a combination of all interventions. The energy simulation was supplemented with a comparative assessment of operational and embodied carbon, as well as a spatial analysis of solar exposure and shading. The combined scenario reduced total annual energy consumption by 53.35% and heating energy consumption by 62.57%. However, the reduction in operational carbon was accompanied by an increase in embodied carbon. Extensive central zones of high solar exposure were identified in the courtyard. The contribution of this study is a replicable framework that links energy performance, carbon emissions, and solar behavior to support the evidence-based prioritization of interventions in existing schools.

Keywords: *BIM, school buildings, energy retrofit, carbon footprint, schoolyard*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σχολικά κτίρια αποτελούν ενεργοβόρες δημόσιες υποδομές με άμεση επίδραση στην άνεση, την υγεία και την εκπαιδευτική λειτουργία. Μεγάλο μέρος του ευρωπαϊκού και του ελληνικού σχολικού αποθέματος κατασκευάστηκε πριν από την εφαρμογή σύγχρονων απαιτήσεων θερμομόνωσης, με αποτέλεσμα υψηλές ανάγκες θέρμανσης, ανεπαρκή θερινή προστασία και αυξημένα λειτουργικά κόστη (IEA SHC Programme 2015). Παράλληλα, οι σχολικές αυλές συχνά χαρακτηρίζονται από εκτεταμένες σκληρές επιφάνειες, περιορισμένη φύτευση και ανεπαρκή σκίαση, παράγοντες που ενισχύουν την έκθεση των μαθητών στην ηλιακή ακτινοβολία και τη δυνητική θερμική καταπόνηση (Antoniadis et al. 2020; Vanos 2015).

Οι περισσότερες μελέτες αναβάθμισης εστιάζουν είτε στο κτιριακό κέλυφος είτε στο υπαίθριο μικροκλίμα. Εξακολουθούν να είναι περιορισμένες οι εφαρμογές που αντιμετωπίζουν το σχολικό συγκρότημα ως ενιαίο περιβαλλοντικό σύστημα και συνδέουν την ενεργειακή προσομοίωση με τις εκπομπές άνθρακα και τη χωρική συμπεριφορά της αυλής. Το Building Information Modeling (BIM) μπορεί να καλύψει μέρος αυτού του κενού, καθώς οργανώνει σε κοινό ψηφιακό υπόβαθρο τη γεωμετρία, τα υλικά, τις χρήσεις και τις λειτουργικές παραμέτρους, επιτρέποντας τη δοκιμή εναλλακτικών λύσεων (Di Giuda et al. 2015; Duarte et al. 2021; Vilutiene et al. 2021).

Στόχος της έρευνας είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή μιας BIM-based διαδικασίας για: α) την ανάλυση της υφιστάμενης ενεργειακής συμπεριφοράς, β) τη συγκριτική αξιολόγηση παρεμβάσεων στο κέλυφος, γ) τη διερεύνηση της σχέσης λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα και δ) τον εντοπισμό των περιοχών της σχολικής αυλής με αυξημένη ηλιακή έκθεση. Η ερευνητική συνεισφορά έγκειται στη

σύνδεση των παραπάνω διαστάσεων σε ένα επαναλήψιμο πλαίσιο υποστήριξης αποφάσεων, το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί σε σχολικά και μη κτίρια με παρόμοια κατασκευαστικά και κλιματικά χαρακτηριστικά.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ - ΠΗΓΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

2.1. Περιοχή και κτίριο μελέτης

Ως πεδίο εφαρμογής επιλέχθηκε το 3ο Δημοτικό Σχολείο Αριδαίας, κτίριο κατασκευής 1988 που βρίσκεται σε οικόπεδο 13.200 m² και αποτελεί μέρος ευρύτερου σχολικού συγκροτήματος. Το διώροφο κτίριο έχει κάλυψη 805,60 m², φέροντα οργανισμό από σπλισμένο σκυρόδεμα και τοιχοποιίες πλήρωσης από οπτόπλινθους. Η Αριδαία ανήκει στην Κλιματική Ζώνη Γ και παρουσιάζει ψυχρούς χειμώνες με συχνούς παγετούς, γεγονός που καθιστά τη θερμική προστασία του κελύφους κρίσιμη. Η επιλογή του κτιρίου βασίστηκε στην αντιπροσωπευτικότητά του ως προς την ηλικία και την κατασκευαστική τυπολογία, στη διαθεσιμότητα σχεδίων και στη δυνατότητα επιτόπιας αποτύπωσης.

2.2. BIM και ενεργειακό μοντέλο

Η έρευνα συνδύασε τα διαθέσιμα σχέδια της οικοδομικής άδειας, επιτόπιες μετρήσεις και καταγραφή των λειτουργικών χαρακτηριστικών. Στο Autodesk Revit δημιουργήθηκε αναλυτικό ενεργειακό μοντέλο και οι εσωτερικοί χώροι οργανώθηκαν σε θερμικά spaces. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των δομικών στοιχείων αποδόθηκαν με βάση τις διαθέσιμες κατασκευαστικές πληροφορίες και λογικές παραδοχές. Η ανάλυση υλοποιήθηκε με το ενσωματωμένο περιβάλλον OpenStudio. Το πραγματικό κτίριο διαθέτει λέβητα πετρελαίου και θερμαντικά σώματα, χωρίς εγκατεστημένο μηχανικό σύστημα ψύξης. Για τον λόγο αυτό, οι τιμές ψύξης ερμηνεύονται ως θεωρητικές

ενεργειακές απαιτήσεις Ideal Loads και χρησιμοποιούνται μόνο για τη σχετική σύγκριση των σεναρίων.

2.3. Σενάρια αναβάθμισης και δείκτες αξιολόγησης

Εξετάστηκαν τέσσερα διαδοχικά σενάρια: Α. Σ1, αντικατάσταση των υφιστάμενων κουφωμάτων με κουφώματα υψηλότερης θερμομονωτικής απόδοσης και τριπλούς υαλοπίνακες. Β. Σ2, εφαρμογή εξωτερικής θερμομόνωσης στους τοίχους. Γ. Σ3, συνδυασμένη θερμομόνωση τοίχων και στέγης και Δ. Σ4, συνδυασμός όλων των προηγούμενων παρεμβάσεων.

Η αξιολόγηση βασίστηκε στην ετήσια κατανάλωση, στις απαιτήσεις θέρμανσης και θεωρητικής ψύξης και στους δείκτες Site EUI και Source EUI. Η περιβαλλοντική επίδραση εκτιμήθηκε συμπληρωματικά με το Autodesk Forma Carbon Insights, με κοινό χρονικό ορίζοντα ενός έτους για τη σχετική σύγκριση λειτουργικού, ενσωματωμένου και συνολικού άνθρακα. Η εκτίμηση αυτή δεν αποτελεί πλήρη ανάλυση κύκλου ζωής, καθώς δεν περιλαμβάνει αναλυτικά μεταφορές, συντήρηση, αντικαταστάσεις και τέλος ζωής και βασίστηκε στις ενσωματωμένες τιμές του Revit.

2.4. Ανάλυση ηλιακής έκθεσης του αύλειου χώρου

Για την αυλή πραγματοποιήθηκε χωρική ανάλυση της αθροιστικής άμεσης ηλιακής έκθεσης στις 21 Μαΐου 2026, από 08:00 έως

17:00, και της διάρκειας σκίασης στις 7 Ιουνίου 2026, από 10:00 έως 15:00, με χρονικό βήμα 30 λεπτών. Η ανάλυση αποτυπώνει τη γεωμετρική επίδραση των κτιρίων και της υφιστάμενης βλάστησης. Δεν υπολογίστηκαν πλήρεις δείκτες εξωτερικής θερμικής άνεσης, όπως PET ή UTCI, συνεπώς, τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό περιοχών δυνητικής θερμικής επιβάρυνσης και όχι για την πιστοποίηση συγκεκριμένων συνθηκών άνεσης.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Υφιστάμενη ενεργειακή συμπεριφορά

Η συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση της υφιστάμενης κατάστασης υπολογίστηκε σε 147.178 kWh. Η θέρμανση ανήλθε σε 119.608 kWh και αντιστοιχεί στο 81,27% του συνόλου, ενώ οι θεωρητικές απαιτήσεις ψύξης περιορίστηκαν σε 7.986 kWh. Το Site EUI ήταν 103,01 kWh/m² και το Source EUI 351,79 kWh/m². Η κυριαρχία της θέρμανσης είναι συμβατή με την παλαιότητα του κτιρίου, την ανεπαρκή προστασία των τοίχων, της στέγης και των κουφωμάτων και τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής (Ζώνης Γ). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μεγαλύτερο περιθώριο εξοικονόμησης ενέργειας βρίσκεται στην αναβάθμιση του αδιαφανούς κελύφους του κτιρίου.

3.2. Ενεργειακή απόδοση των σεναρίων

Πίνακας 1. Συγκριτική ενεργειακή αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης και των σεναρίων.

Κατάσταση	Θέρμανση (kWh)	Θεωρητική ψύξη (kWh)	Συνολική ενέργεια (kWh)	Site EUI (kWh/m ²)
Υφιστάμενο	119.608	7.986	147.178	103,01
Σ1	117.786	4.956	141.539	99,61
Σ2	100.181	12.486	132.483	91,36
Σ3	50.514	6.133	76.377	52,88
Σ4	44.775	4.156	68.661	47,53

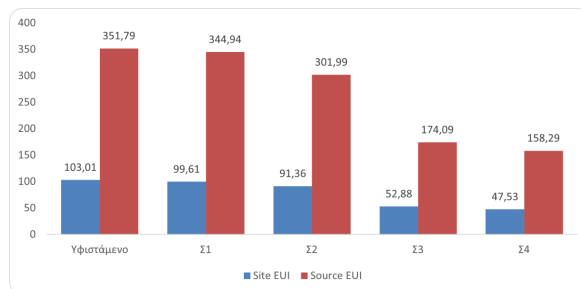
Η αντικατάσταση των κουφωμάτων (Σ1) είχε περιορισμένο συνολικό αποτέλεσμα: η ετήσια κατανάλωση μειώθηκε κατά 3,83% και η θέρμανση κατά 1,52%, παρότι η θεωρητική ψύξη περιορίστηκε κατά 37,94%. Η θερμομόνωση των εξωτερικών τοίχων (Σ2) μείωσε τη συνολική κατανάλωση κατά 9,98% και τη θέρμανση κατά 16,24%, αλλά αύξησε τις θεωρητικές απαιτήσεις ψύξης κατά 56,35%. Το εύρημα δείχνει ότι, υπό τις παραδοχές του μοντέλου, η ενίσχυση της θερμικής αντίστασης μπορεί να περιορίζει τη θερινή αποβολή της συσσωρευμένης θερμότητας όταν δεν συνοδεύεται από επαρκή σκίαση και αερισμό. Αντίστοιχη συμπεριφορά έχει καταγραφεί σε μεσογειακό κλίμα, όπου η θερμομόνωση μείωσε τη θέρμανση αλλά αύξησε την ψύξη, ενώ ο φυσικός αερισμός περιόρισε το αποτέλεσμα (Lozoya-Peral et al. 2023).

Η ουσιαστική μεταβολή εμφανίστηκε στο Σ3, με ταυτόχρονη θερμομόνωση τοίχων και στέγης. Η συνολική κατανάλωση μειώθηκε κατά 48,11% και η θέρμανση κατά 57,77%, αναδεικνύοντας τον κρίσιμο ρόλο της στέγης και της συνολικής συνέχειας του θερμικού περιβλήματος. Το Σ4 παρουσίασε την καλύτερη ενεργειακή επίδοση: η συνολική κατανάλωση μειώθηκε κατά 53,35%, η θέρμανση κατά 62,57%, η θεωρητική ψύξη κατά 47,96%, το Site EUI κατά 53,86% και το Source EUI κατά 55,00%. Η τάση συμφωνεί με διεθνείς μελέτες που δείχνουν ότι τα ολοκληρωμένα συστήματα παρεμβάσεων αποδίδουν περισσότερο από τις μεμονωμένες πρακτικές. Στο σχολείο Tito

Πίνακας 2. Συγκριτικοί δείκτες άνθρακα από το Autodesk Forma Carbon Insights.

Κατάσταση	Ενσωματωμένος (kgCO ₂ e)	Λειτουργικός (kgCO ₂ e)	Συνολικός (kgCO ₂ e)	Annual EUI (kWh/m ²)
Υφιστάμενο	769.332	36.577	805.909	119,21
Σ1	784.479	35.468	819.947	115,43
Σ2	811.206	33.495	844.701	108,32
Σ3	841.547	20.110	861.657	61,12
Σ4	856.951	18.202	875.153	54,50

Maccio Plauto, ένα ευρύτερο πακέτο που περιλάμβανε κέλυφος, συστήματα, μηχανικό αερισμό και φωτοβολταϊκά πέτυχε μειώσεις 80-81% στους βασικούς ενεργειακούς δείκτες (Zinzi et al. 2014; Zinzi et al. 2016).



Σχήμα 1. Συγκριτική εξέλιξη των δεικτών Site EUI και Source EUI.

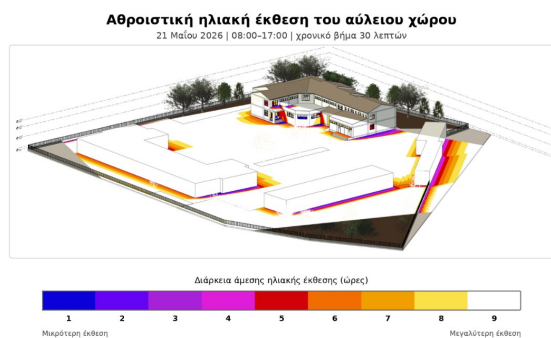
3.3. Λειτουργικός και ενσωματωμένος άνθρακας

Καθώς αυξάνεται το εύρος των παρεμβάσεων, ο λειτουργικός άνθρακας μειώνεται σταθερά, από 36.577 kgCO₂e στην υφιστάμενη κατάσταση σε 18.202 kgCO₂e στο Σ4. Αντίθετα, ο ενσωματωμένος άνθρακας αυξάνεται από 769.332 σε 856.951 kgCO₂e λόγω της προσθήκης νέων υλικών. Έτσι, στο κοινό χρονικό πλαίσιο, το Σ4 έχει τη χαμηλότερη λειτουργική αλλά την υψηλότερη συνολική τιμή άνθρακα. Το αποτέλεσμα δεν σημαίνει ότι οι εκτεταμένες παρεμβάσεις είναι περιβαλλοντικά ασύμφορες.

Συνεπώς, τα αποτελέσματα τεκμηριώνουν κυρίως τη σχετική κατεύθυνση των μεταβολών και όχι μια τελική περιβαλλοντική κατάταξη.

3.4. Ηλιακή έκθεση και σκίαση της σχολικής αυλής

Η χωρική ανάλυση ανέδειξε ότι οι κεντρικές περιοχές της αυλής παραμένουν εκτεθειμένες στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία για μεγάλο μέρος της σχολικής ημέρας, ενώ οι ζώνες μεγαλύτερης σκίασης συγκεντρώνονται κυρίως κοντά στις όψεις των κτιρίων, στα στέγαστρα και στην υφιστάμενη βλάστηση. Η εικόνα αυτή είναι κρίσιμη κατά το τέλος της άνοιξης και την αρχή του καλοκαιριού, όταν η αυλή χρησιμοποιείται σε ώρες υψηλής ηλιακής επιβάρυνσης. Επειδή δεν υπολογίστηκαν ολοκληρωμένοι δείκτες εξωτερικής θερμικής άνεσης, το εύρημα ερμηνεύεται ως ένδειξη αυξημένης δυνητικής θερμικής επιβάρυνσης και όχι ως πλήρης ποσοτικοποίηση της άνεσης.



Σχήμα 2. Αθροιστική άμεση ηλιακή έκθεση του αύλειου χώρου στις 21 Μαΐου 2026, 08:00-17:00

Η βιοκλιματική αναβάθμιση της αυλής πρέπει επομένως να επικεντρωθεί στη δημιουργία συνεχών σκιασμένων διαδρομών και χώρων παραμονής. Προτείνονται φυλλοβόλα δέντρα σε επιλεγμένες κεντρικές ζώνες, ελαφρά στέγαστρα, αύξηση των επιφανειών πρασίνου, περιορισμός των εκτεταμένων

τσιμεντοστρώσεων και χρήση διαπερατών ή ψυχρών υλικών. Οι παρεμβάσεις αυτές μπορούν να μειώσουν την αποθήκευση θερμότητας και να βελτιώσουν τη λειτουργική ποιότητα της αυλής

3.5. Μεθοδολογική συνεισφορά και περιορισμοί

Η μεθοδολογική αξία της εργασίας βρίσκεται στη χρήση ενός κοινού BIM μοντέλου για την οργάνωση των δεδομένων, την ανάπτυξη διαδοχικών σεναρίων και τη σύγκριση ενεργειακών και περιβαλλοντικών αποτελεσμάτων. Η προσέγγιση ενισχύει τη διαφάνεια των παραδοχών και επιτρέπει την επανάληψη της διαδικασίας σε άλλα σχολεία (Di Giuda et al. 2015; Otuh 2016). Ωστόσο, τα ποσοτικά αποτελέσματα αφορούν ένα συγκεκριμένο κτίριο και δεν μπορούν να γενικευθούν αυτούσια. Το ενεργειακό μοντέλο δεν βαθμονομήθηκε με μακροχρόνιες μετρημένες καταναλώσεις, οι τιμές ψύξης είναι θεωρητικές, η εκτίμηση άνθρακα δεν αποτελεί πλήρη LCA και η αυλή δεν αξιολογήθηκε με επιτόπιες μικροκλιματικές μετρήσεις ή δείκτες PET/UTCI. Η χρήση κοινών παραδοχών σε όλα τα σενάρια υποστηρίζει μια συνεπή σχετική σύγκριση, αλλά όχι την ακριβή πρόβλεψη των μελλοντικών πραγματικών καταναλώσεων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η έρευνα έδειξε ότι η ενεργειακή αδυναμία του σχολικού κτιρίου συνδέεται κυρίως με το ανεπαρκές θερμικό κέλυφος και την υψηλή εξάρτηση από τη θέρμανση. Η μεμονωμένη αντικατάσταση των κουφωμάτων είχε περιορισμένη επίδραση, ενώ η συνδυασμένη θερμομόνωση τοίχων και στέγης προκάλεσε την ουσιαστικότερη μεταβολή. Το Σ4 αποτέλεσε την ενεργειακά αποδοτικότερη από τις εξεταζόμενες λύσεις, μείωση της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης

κατά 53,35%. Η αύξηση του ενσωματωμένου άνθρακα επιβεβαιώνει, όμως, ότι η επιλογή παρέμβασης δεν πρέπει να βασίζεται μόνο στην εξοικονόμηση λειτουργικής ενέργειας, αλλά να εξετάζει το συνολικό αποτύπωμα σε βάθος χρόνου.

Για τον αύλειο χώρο, η περιορισμένη σκίαση των κεντρικών ζωνών υποδεικνύει την ανάγκη στοχευμένων παρεμβάσεων φύτευσης, σκίασης και αντικατάστασης επιφανειών. Η κύρια συνεισφορά της εργασίας είναι η διαμόρφωση ενός ενιαίου BIM-based πλαισίου που συνδέει την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου, τις εκπομπές άνθρακα και τη χωρική ηλιακή συμπεριφορά της αυλής. Το πλαίσιο μπορεί να λειτουργήσει ως βάση για την ιεράρχηση παρεμβάσεων σε υφιστάμενα σχολικά συγκροτήματα, υπό την προϋπόθεση ότι συμπληρώνεται με πραγματικές ενεργειακές καταγραφές, πλήρη ανάλυση κύκλου ζωής και μικροκλιματικές μετρήσεις.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

-Antoniadis D., Katsoulas N., Papanastasiou D.K., Thermal environment of urban schoolyards: Current and future design with respect to children's thermal comfort, *Atmosphere*, 2020, 11(11), 1144.
-Balikci M., *Enhancing energy efficiency in Italian school buildings: A comparative study of sustainable strategies with use of BIM and Edilclima*, Master's thesis, Politecnico di Torino, 2024.
-Duarte, J. G. C. L. M., Zemero, B. R., Souza, A. C. D. B. de, Tostes, M. E. de L., & Bezerra, U. H., Building Information Modeling approach to optimize energy efficiency in educational buildings, *Journal of Building Engineering*, 2021, 43, 102587.
-Di Giuda G.M., Villa V., Piantanida P., BIM and energy efficient retrofitting in school buildings, *Energy Procedia*, 2015, 78, 1045-1050.
-IEA SHC Programme, Sustainable refurbishment: School buildings - A guide for designers and planners, *International Energy Agency*, 2015.

-Lozoya-Peral A., Pérez-Carramiñana C., Galiano-Garrigós A., González-Avilés Á.B., Emmitt S., Exploring energy retrofitting strategies and their effect on comfort in a vernacular building in a dry Mediterranean climate, *Buildings*, 2023, 13(6), 1381.
-Otuh N., *BIM-based energy/sustainability analysis for educational buildings*, Master's thesis, HAMK University of Applied Sciences, 2016.
-Rabani M., Madessa H.B., Ljungström M., Aamodt L., Lønvold S., Nord N., Life cycle analysis of GHG emissions from the building retrofitting: The case of a Norwegian office building, *Building and Environment*, 2021, 204, 108159.
-Vanos J.K., Children's health and vulnerability in outdoor microclimates: A comprehensive review, *Environment International*, 2015, 76, 1-15.
-Vilutienė T., Džiugaitė-Tumenienė R., Kalibatienė D., Kalibatas D., How BIM contributes to a building's energy efficiency throughout its whole life cycle: Systematic mapping, *Energies*, 2021, 14, 6680.
-Zinzi M., Agnoli S., Battistini G., Bernabini G., Retrofit of an existing school in Italy with high energy standards, *Energy Procedia*, 2014, 48, 1529-1538.
-Zinzi M., Agnoli S., Battistini G., Bernabini G., Deep energy retrofit of the T.M. Plauto School in Italy: A five years experience, *Energy and Buildings*, 2016, 126, 239-251.

Ανάλυση, αξιολόγηση και επανασχεδιασμός εσωτερικών και εξωτερικών χώρων

Ελπινίκη - Παρασκευή Λάζιου¹, Σοφία Γιάνναρου¹

¹ Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα, e-mail: nikilaziou@gmail.com

ΣΚΟΠΟΣ

Μεγάλο μέρος του ελληνικού σχολικού αποθέματος κατασκευάστηκε πριν από τη θέσπιση σύγχρονων κανονισμών θερμομόνωσης (ELSTAT, 2015), ενώ το BIM έχει ήδη αξιοποιηθεί για την ενεργειακή αναβάθμιση σχολικών κτιρίων (Di Giuda et al., 2015). Η εργασία αξιολογεί την ενεργειακή αναβάθμιση ενός υφιστάμενου σχολικού κτιρίου στην Αριδαία Πέλλας και ιεραρχεί εναλλακτικά σενάρια ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους. Κτίριο και αύλειος χώρος εξετάζονται ως ενιαίο περιβαλλοντικό σύστημα, με κριτήρια την κατανάλωση ενέργειας, το ανθρακικό αποτύπωμα και την ηλιακή έκθεση της αυλής.

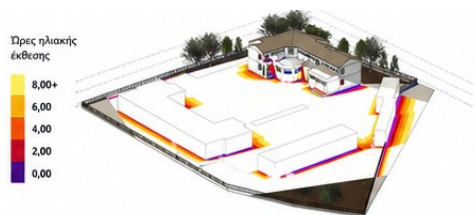
ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

3ο Δημοτικό Σχολείο Αριδαίας: διώροφο κτίριο ΟΣΚ του 1988, εμβαδού 1.611,20 m², εντός οικοπέδου 13.200 m² με τέσσερα κτίρια. Υφιστάμενη κατάσταση: τοιχοποιία 30 εκ. → U = 0,54 W/m²K, κουφώματα → μονά υαλοστάσια με μεταλλικό πλαίσιο, σύστημα θέρμανσης → κεντρική θέρμανση με λέβητα πετρελαίου και θερμαντικά σώματα, χωρίς μηχανικό σύστημα ψύξης.

ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ

Σεν.	Παρέμβαση στο κέλυφος
Σ1	Αντικατάσταση κουφωμάτων (U: 6,7 → 1,5 W/m ² K · SHGC: 0,86 → 0,68)
Σ2	Εξωτερική θερμομόνωση τοίχων με EPS 10 cm
Σ3	Θερμομόνωση τοίχων και στέγης
Σ4	Συνδυασμός Σ1 + Σ2 + Σ3

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΥΛΕΙΟΥ ΧΩΡΟΥ



Εικόνα 1. Ηλιακή έκθεση του αύλειου χώρου (ώρες/ημέρα).



Εικόνα 2. Διάρκεια σκίασης του αύλειου χώρου (ώρες/ημέρα).

Η ανάλυση του αύλειου χώρου, έκτασης περίπου 11.600 m² εντόπισε εκτεταμένες ζώνες υψηλής ηλιακής έκθεσης στις κεντρικές αδιαπέραστες επιφάνειες, με σκίαση μόνο περιμετρικά των κτιρίων. Κατά τις ώρες λειτουργίας (08:00–14:00) το μεγαλύτερο τμήμα παραμένει εκτεθειμένο σε άμεση ακτινοβολία, αυξάνοντας τον κίνδυνο θερμικής καταπόνησης των μαθητών (Vanos et al., 2015; Antoniadis et al., 2020).

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

- Επιτόπια αποτύπωση και συλλογή δεδομένων από τα αρχικά σχέδια της οικοδομικής άδειας.
- Ανάπτυξη παραμετρικού μοντέλου BIM στο Autodesk Revit.
- Ορισμός αναλυτικών δομικών στοιχείων, ορισμός κλειστών θερμικών χώρων και απόδοση θερμοφυσικών ιδιοτήτων.
- Ενεργειακή προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης και των τεσσάρων σεναρίων παρεμβάσεων.
- Αποτίμηση ανθρακικού αποτυπώματος με το Forma Carbon Insights.
- Χωρική ανάλυση ηλιακής έκθεσης και σκίασης του αύλειου χώρου.

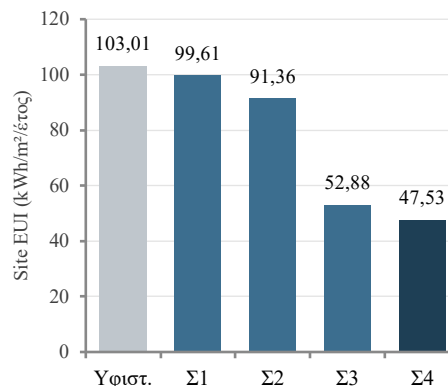
ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Ο δείκτης Site EUI της υφιστάμενης κατάστασης είναι 103,01 kWh/m² και ο Source EUI 351,79 kWh/m². Η θέρμανση καλύπτει το 81,27% της κατανάλωσης.

Πίνακας 1. Ετήσια κατανάλωση ανά κατηγορία.

Κατηγορία κατανάλωσης	Ποσοστό (%)
Θέρμανση	81,27
Εσωτερικός φωτισμός	9,52
Θεωρητική ψύξη	5,43
Εσωτερικός εξοπλισμός	3,78

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ



Σχήμα 1. Δείκτης Site EUI ανά σενάριο αναβάθμισης.

Η αντικατάσταση των κουφωμάτων (Σ1) αποδίδει περιορισμένο όφελος, καθώς τα ανοίγματα καλύπτουν μικρό ποσοστό της επιφάνειας του κελύφους. Η θερμομόνωση των τοίχων (Σ2) μειώνει αισθητά τα φορτία θέρμανσης, αυξάνοντας ωστόσο τη θεωρητική ζήτηση ψύξης. Η προσθήκη μόνωσης στη στέγη (Σ3) επιφέρει τη μεγαλύτερη μεμονωμένη βελτίωση, ενώ ο συνδυασμός των παρεμβάσεων (Σ4) οδηγεί σε Site EUI 47,53 kWh/m², δηλαδή σε μείωση 53,35% της συνολικής κατανάλωσης και 62,57% των αναγκών θέρμανσης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η θέρμανση αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα κατανάλωσης (81,27%), οπότε οι παρεμβάσεις στο κέλυφος έχουν προτεραιότητα. Οι μεμονωμένες λύσεις υστερούν έναντι των συνδυασμένων. Ειδικότερα, το Σ4 μειώνει τη συνολική κατανάλωση κατά 53,35% και τη θέρμανση κατά 62,57%. Η ενεργειακή εξοικονόμηση όμως δεν επαρκεί ως κριτήριο, καθώς το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα αυξάνεται κατά 8,59% λόγω του ενσωματωμένου άνθρακα των νέων υλικών. Ο αύλειος χώρος παρουσιάζει σοβαρή έλλειψη σκίασης και χρήζει βιοκλιματικής παρέμβασης με δενδροφυτεύσεις, ελαφρά σκίαστρα και ψυχρά ή διαπερατά υλικά. Η μεθοδολογία είναι επαναλήψιμη και μπορεί να εφαρμοστεί σε αντίστοιχα σχολικά κτίρια άλλων κλιματικών ζωνών.

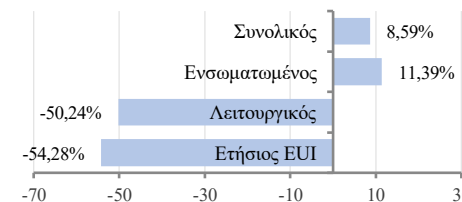
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Antoniadis, D., Katsoulas, N., Papanastasiou, D. K. (2020). Atmosphere, 11(11), 1144; Di Giuda, G. M. et al. (2015). Energy Procedia.; ELSTAT (2015). Απογραφή Κτιρίων 2011.; Vanos, J. K. et al. (2015). Environment International

ΑΝΘΡΑΚΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ

Πίνακας 2. Δείκτες άνθρακα σε kgCO₂e (Σ4 ως προς υφιστάμενη).

Δείκτης	Υφιστ.	Σ4	Μεταβολή
Συνολικός άνθρακας	805.909	875.153	+8,59%
Ενσωματωμένος	769.332	856.951	+11,39%
Λειτουργικός	36.577	18.202	-50,24%
Ετήσιος EUI (kWh/m ²)	119,21	54,50	-54,28%



Σχήμα 2. Ποσοστιαία μεταβολή των δεικτών στο Σ4.

Η μείωση του λειτουργικού άνθρακα κατά 50,24% συνοδεύεται από αύξηση του ενσωματωμένου κατά 11,39%, λόγω των υλικών που προστίθενται στο κέλυφος. Το συνολικό αποτύπωμα αυξάνεται κατά 8,59%· η αξιολόγηση των παρεμβάσεων δεν μπορεί να στηρίζεται μόνο στην ενεργειακή εξοικονόμηση.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σχολικά κτίρια αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα της εκπαιδευτικής διαδικασίας, καθώς διαμορφώνουν το περιβάλλον μέσα στο οποίο οι μαθητές μορφώνονται, αλληλεπιδρούν και αναπτύσσονται. Η ποιότητα του κτιριακού περιβάλλοντος και του μικροκλίματος επηρεάζει όχι μόνο τη λειτουργικότητα και την ασφάλεια των υποδομών, αλλά και τη γνωστική απόδοση, τη συγκέντρωση, τη σωματική υγεία και την ψυχολογική ευεξία των μαθητών (U.S. Department of Energy, 2007; Vanos, 2015). Σε μία περίοδο έντονης κλιματικής μεταβολής, αύξησης των θερμοκρασιών και επιβάρυνσης των αστικών περιβαλλόντων, η ικανοποίηση των απαιτήσεων θερμικής άνεσης, ενεργειακής αποδοτικότητας και κλιματικής ανθεκτικότητας στα σχολικά κτίρια καθίσταται επιτακτική στο σύγχρονο πλαίσιο επιταχυνόμενης κλιματικής μεταβολής και αστικής υπερθέρμανσης (Sayad et al., 2022).

Το ελληνικό σχολικό κτιριακό απόθεμα, όπως αποτυπώνεται σε επίσημες στατιστικές, αποτελείται κυρίως από παλαιά κτίρια που κατασκευάστηκαν πριν από την καθιέρωση σύγχρονων κανονισμών θερμομόνωσης (ELSTAT, 2015). Η πλειονότητα αυτών των κτιρίων παρουσιάζει σημαντικές ελλείψεις ως προς τη θερμική προστασία, τον φυσικό αερισμό και την ενεργειακή συμπεριφορά, ενώ οι σχολικές αυλές συχνά χαρακτηρίζονται από εκτεταμένες αδιαπέραστες επιφάνειες, περιορισμένη φύτευση και ανεπάρκεια στοιχείων σκίασης (U.S. Department of Energy, 2007). Αυτές οι συνθήκες οδηγούν σε υψηλά επίπεδα θερμικής καταπόνησης, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες, και επιβαρύνουν ουσιαστικά την καθημερινή σχολική ζωή (Antoniadis et al., 2020; Vanos, 2015).

Σε διεθνές επίπεδο, η αναβάθμιση των σχολικών υποδομών αποτελεί κοινή πρόκληση, καθώς πολλά εκπαιδευτικά κτίρια ευρωπαϊκών χωρών παρουσιάζουν παρόμοια ενεργειακά και λειτουργικά προβλήματα με τα ελληνικά (IEA SHC Programme, 2015). Η ανάγκη για βιώσιμες, ανθεκτικές και ενεργειακά αποδοτικές σχολικές εγκαταστάσεις έχει οδηγήσει στη συστηματική εφαρμογή βιοκλιματικού σχεδιασμού, στη χρήση πράσινων υποδομών και στη διεύρυνση ψηφιακών τεχνολογιών στις διαδικασίες σχεδιασμού και ανακαίνισης (Taing et al., 2025).

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, το Building Information Modeling (BIM) αναδεικνύεται σε κρίσιμο εργαλείο για τον ολοκληρωμένο σχεδιασμό και την ενεργειακή αξιολόγηση των σχολικών υποδομών. Η δυνατότητα μοντελοποίησης των γεωμετρικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός κτιρίου, η προσομοίωση σεναρίων ενεργειακής και μικροκλιματικής απόδοσης, καθώς και η διευκόλυνση της συνεργασίας μεταξύ διαφορετικών ειδικοτήτων καθιστούν το BIM ιδιαίτερα αποτελεσματικό για την αναβάθμιση σχολικών εγκαταστάσεων (Duarte et al., 2021; Vilutienė et al., 2021). Επιπλέον, η θεσμική προώθηση του BIM στην Ευρώπη και η σταδιακή του εισαγωγή στα δημόσια έργα στην Ελλάδα καταδεικνύουν ότι η ψηφιακή τεκμηρίωση του δομημένου περιβάλλοντος θα αποτελέσει βασική απαίτηση των μελλοντικών μελετών και αδειοδοτήσεων (Ren, 2025; Yao, 2025).

Η παρούσα εργασία εξετάζει ένα σχολικό κτίριο και τον περιβάλλοντα χώρο του, αποτυπώνει τη σημερινή τους κατάσταση με ψηφιακές μεθόδους BIM και αξιολογεί τη θερμική και ενεργειακή τους συμπεριφορά. Στόχος της είναι να διερευνήσει τη συμβολή βιοκλιματικών και ενεργειακών παρεμβάσεων στη βελτίωση της άνεσης και της απόδοσης του κτιρίου, καθώς και να αναδείξει τον ρόλο του BIM ως σύγχρονου εργαλείου σχεδιασμού, προσομοίωσης και λήψης τεκμηριωμένων αποφάσεων (Di Giuda et al., 2015; Jadhav et al., 2024).

1.1. Γενικός προβληματισμός

Ο γενικός προβληματισμός της παρούσας έρευνας εστιάζει στην αναντιστοιχία μεταξύ των σύγχρονων απαιτήσεων για υγιή, ανθεκτικά και ενεργειακά αποδοτικά σχολικά περιβάλλοντα και της πραγματικής κατάστασης μεγάλου μέρους των υφιστάμενων σχολικών υποδομών. Στην Ελλάδα, πολλά σχολικά κτίρια έχουν κατασκευαστεί χωρίς βιοκλιματικά κριτήρια και χωρίς επαρκή θερμική προστασία, ενώ οι σχολικές αυλές συχνά παρουσιάζουν περιορισμένη σκίαση, ανεπαρκή φύτευση και έντονη θερμική επιβάρυνση (Antoniadis et al., 2020; Vanos, 2015). Οι συνθήκες αυτές επηρεάζουν την καθημερινότητα των μαθητών, προκαλώντας μειωμένη συγκέντρωση, κόπωση και αυξημένη ευαισθησία στο θερμικό στρες (Pellegrino et al., 2015; Sayad et al., 2022). Σε συνδυασμό με τη συνεχή αύξηση των θερμοκρασιών λόγω κλιματικής αλλαγής, η ανάγκη για αναβάθμιση των σχολικών κτιρίων αποκτά επίκαιρο και κρίσιμο χαρακτήρα (Taing et al., 2025).

1.2. Το σχολικό κτιριακό απόθεμα στην Ελλάδα

Η κατάσταση του σχολικού κτιριακού αποθέματος στην Ελλάδα αναδεικνύει σημαντικές προκλήσεις ως προς τη θερμική και ενεργειακή του συμπεριφορά. Σύμφωνα με την Απογραφή Κτιρίων της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛΣΤΑΤ), στη χώρα καταγράφονται 19.474 σχολικά κτίρια, αποτελώντας περίπου το 0,5% του συνολικού κτιριακού δυναμικού, από τα οποία το 17,1% των σχολικών κτιρίων κατασκευάστηκε μεταξύ 1946-1960, δηλαδή πριν από τη θέσπιση κανονισμών θερμομόνωσης και ενεργειακής απόδοσης, ενώ ένα ακόμη μεγαλύτερο ποσοστό έχει ανεγερθεί πριν από τη δεκαετία του 1980 (ELSTAT, 2015). Η παλαιότητα αυτή συνδέεται συχνά με ανεπαρκή προστασία του κελύφους, περιορισμένες δυνατότητες φυσικού αερισμού και αυξημένες ανάγκες συντήρησης.

Πολλά από τα κτίρια αυτά σχεδιάστηκαν με γνώμονα την τυποποίηση και την ταχεία κατασκευή, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού ή οι τοπικές κλιματικές συνθήκες (IEA SHC Programme, 2015). Παράλληλα, το 58,8% των σχολικών κτιρίων είναι κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα, υλικό με υψηλή θερμική μάζα, το οποίο συσσωρεύει θερμότητα και επιβαρύνει σημαντικά το θερμικό περιβάλλον των εσωτερικών χώρων, ειδικά κατά τους θερινούς μήνες (Santamouris, 2016). Σε συνδυασμό με την ανεπαρκή μόνωση, την έκθεση των οριζόντιων επιφανειών στην ηλιακή ακτινοβολία και την απουσία επαρκών παθητικών μέτρων σκίασης, πολλά σχολικά κτίρια εμφανίζουν αυξημένη θερμική επιβάρυνση κατά τη θερινή περίοδο και υψηλές απώλειες κατά τη χειμερινή. Τέλος, η απουσία σκεπών στα σχολικά κτίρια οδηγεί στην αυξημένη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από τις εκτεθειμένες οριζόντιες επιφάνειες των δωματίων, γεγονός που εντείνει τη θερμική καταπόνηση του κτιριακού κελύφους (Sayad et al., 2022).

Συνεπώς, η παλαιότητα του κτιριακού δυναμικού, η ανεπαρκής θερμική προστασία και οι αυξημένες ανάγκες συντήρησης καθιστούν ένα μεγάλο μέρος των σχολικών υποδομών ενεργειακά ανεπαρκές και λειτουργικά προβληματικό, δημιουργώντας σημαντικό κενό σε σχέση με τις σύγχρονες απαιτήσεις άνεσης, υγείας και ασφάλειας (Pellegrino et al., 2015; UK Department for Education, 2016).

1.3. Θερμική άνεση και μικροκλίμα στους σχολικούς χώρους

Η θερμική άνεση στους σχολικούς χώρους αφορά τόσο το εσωτερικό περιβάλλον των αιθουσών όσο και το εξωτερικό μικροκλίμα των αύλειων χώρων. Η εγχώρια έρευνα έχει καταγράψει ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες θερμικής άνεσης σε ελληνικά σχολεία. Η έρευνα του Αντωνιάδη (2018) σε σχολεία του Βόλου έδειξε ότι το 80,5% των σχολικών αυλών καταγράφει PET άνω των 41°C, ενώ η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας (T_{mrt}) φτάνει τους 65°C στις μη σκιασμένες επιφάνειες. Αυτές οι συνθήκες καθιστούν μεγάλο μέρος της σχολικής ημέρας δυσμενές για τα παιδιά, με επιπτώσεις σε υγεία, συγκέντρωση και συμπεριφορά. Η μελέτη της Γκαϊδατζή (2022) αναδεικνύει τη σημασία της βλάστησης: αύξηση φύτευσης κατά 25-50% μπορεί να μειώσει τον δείκτη PET κατά 4-11%, ενώ η θερμοκρασία επιφανειών μειώνεται έως 8°C. Η σκίαση μέσω δέντρων μειώνει την ηλιακή ακτινοβολία κατά 79-94%, ενώ η ενίσχυση του φυσικού αερισμού μπορεί να μειώσει τη θερμική επιβάρυνση κατά 3,7-5°C για κάθε αύξηση 1 m/s στην ταχύτητα ανέμου.

Τα δεδομένα αυτά επιβεβαιώνουν ότι οι ελληνικές σχολικές υποδομές, τόσο σε επίπεδο κτιριακού κελύφους όσο και εξωτερικών χώρων, απαιτούν στοχευμένες παρεμβάσεις για τη βελτίωση των μικροκλιματικών συνθηκών και της ενεργειακής απόδοσης, με έμφαση στη φύτευση, τη σκίαση και τη χρήση κατάλληλων υλικών εδαφοκάλυψης (Antoniadis et al., 2020).

1.4. Διεθνείς τάσεις και ανάγκη αναβάθμισης σχολικών υποδομών

Σε διεθνές επίπεδο, η αναβάθμιση των σχολικών κτιρίων αντιμετωπίζεται πλέον ως πολυπαραμετρικό ζήτημα που δεν περιορίζεται μόνο στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Οι σύγχρονες προσεγγίσεις δίνουν έμφαση στη βελτίωση της θερμικής και οπτικής άνεσης, στην ποιότητα του εσωτερικού αέρα, στην αναβάθμιση του υπαίθριου σχολικού περιβάλλοντος και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των υποδομών απέναντι στην κλιματική αλλαγή.

Πολλές ευρωπαϊκές χώρες καταγράφουν παρόμοια προβλήματα παλαιότητας, ανεπαρκούς θερμομόνωσης και ξεπερασμένων συστημάτων θέρμανσης και αερισμού. Η μελέτη του Politecnico di Torino (2024) καταγράφει ότι μεγάλο μέρος των ιταλικών σχολικών κτιρίων

παρουσιάζει παρόμοια ενεργειακά μειονεκτήματα με τα ελληνικά, επιβεβαιώνοντας ότι οι ανάγκες αναβάθμισης είναι έντονες σε ευρωπαϊκό επίπεδο.

Οι διεθνείς πρακτικές πλέον ενσωματώνουν βιοκλιματικό σχεδιασμό, ενεργειακές προσομοιώσεις και αξιολόγηση πολλαπλών σεναρίων. Τα σχολεία αντιμετωπίζονται όχι μόνο ως χώροι μάθησης, αλλά και ως ενεργά περιβαλλοντικά συστήματα που πρέπει να ανταποκρίνονται στις ανάγκες άνεσης, υγείας και ανθεκτικότητας. Η ενεργειακή αναβάθμιση των σχολείων έχει ισχυρά περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη, από τη μείωση κατανάλωσης ενέργειας έως τη βελτίωση της ευημερίας των μαθητών και της εκπαιδευτικής λειτουργίας (IEA SHC Programme, 2015; Taing et al., 2025).

1.5. Ο ρόλος του BIM στην αναβάθμιση των σχολικών κτιρίων

Το Building Information Modelling (BIM) αποτελεί πλέον βασική τεχνολογία στον σχεδιασμό, αξιολόγηση και διαχείριση των κτιρίων. Η δυνατότητα δημιουργίας πλήρους ψηφιακού μοντέλου που ενσωματώνει γεωμετρία, υλικά και τις παραμέτρους λειτουργίας του κτιρίου, όπως η χρήση των χώρων, τα ωράρια και τα εσωτερικά θερμικά φορτία, επιτρέπει την ακριβή αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς και τη σύγκριση διαφορετικών σεναρίων αναβάθμισης (Alkhatib & Alawag, 2021; Vilutienė et al., 2021).

Η χρήση του BIM σε έργα σχολικών κτιρίων διεθνώς έχει δείξει σημαντικές δυνατότητες βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης, καθώς επιτρέπει τη δοκιμή εναλλακτικών λύσεων σχεδιασμού και την εκτίμηση των ενεργειακών φορτίων πριν την υλοποίηση των παρεμβάσεων (Di Giuda et al., 2015; Duarte et al., 2021). Παράλληλα, η προώθηση του BIM από την Ευρωπαϊκή Ένωση και η σταδιακή υιοθέτησή του στην Ελλάδα σε δημόσια έργα υποδομών επιβεβαιώνουν ότι η ψηφιακή διαχείριση των κτιρίων θα αποτελέσει ισχυρή προϋπόθεση στις διαδικασίες αδειοδότησης και εκπόνησης μελετών δημόσιων έργων (Ren, 2025; Yao, 2025).

1.6. Σημερινή κατάσταση σε επίπεδο γνώσεων και τεχνικής

Η επιστημονική βιβλιογραφία προσφέρει πληθώρα δεδομένων σχετικά με τον βιοκλιματικό σχεδιασμό, τις στρατηγικές βελτίωσης της θερμικής άνεσης και τις εφαρμογές ενεργειακής

ανάλυσης. Παράλληλα, η εξέλιξη των υπολογιστικών εργαλείων, όπως τα BIM συστήματα και τα εξειδικευμένα λογισμικά ενεργειακής προσομοίωσης, επιτρέπουν ολοκληρωμένες αξιολογήσεις που συνδέουν εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους.

Ωστόσο, παρά την πρόοδο αυτή, παραμένουν σημαντικά κενά ως προς την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων σε υφιστάμενα σχολικά κτίρια της ελληνικής πραγματικότητας. Ειδικότερα, είναι περιορισμένες οι μελέτες που συνδυάζουν τη διερεύνηση του εσωτερικού θερμικού περιβάλλοντος, του εξωτερικού μικροκλίματος και της αξιοποίησης BIM σε ένα ενιαίο πλαίσιο αξιολόγησης και επανασχεδιασμού.

1.7. Κενά και ελλείψεις που καλείται να καλύψει η παρούσα εργασία

Από την ανάλυση της βιβλιογραφίας προκύπτουν ορισμένα ουσιαστικά ερευνητικά κενά. Πρώτον, η μελέτη των μικροκλιματικών συνθηκών στις σχολικές αυλές ελληνικών πόλεων παραμένουν περιορισμένες, ιδίως υπό το πρίσμα της κλιματικής επιβάρυνσης και της παιδικής θερμικής άνεσης.. Δεύτερον, απουσιάζουν ολοκληρωμένες μελέτες που να εξετάζουν ταυτόχρονα εσωτερικούς και εξωτερικούς σχολικούς χώρους. Τρίτον, η εφαρμογή BIM στην ελληνική πραγματικότητα για ενεργειακές αναλύσεις σχολικών κτιρίων είναι ακόμα περιορισμένη. Τέταρτον, δεν υπάρχουν επαρκή εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων για παρεμβάσεις χαμηλού κόστους. Τέλος, η θερμική άνεση παιδιών ως ξεχωριστή πληθυσμιακή ομάδα, με διακριτές θερμοφυσιολογικές παραμέτρους, υποεκπροσωπείται σε σύγκριση με γενικότερα μοντέλα άνεσης ενηλίκων στη διεθνή βιβλιογραφία (Luyao et al., 2025).

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να συμβάλει στην κάλυψη των παραπάνω κενών, προσεγγίζοντας το σχολικό συγκρότημα ως ενιαίο περιβαλλοντικό σύστημα και συνδυάζοντας την αξιολόγηση εσωτερικών και εξωτερικών συνθηκών με τη χρήση ψηφιακής BIM μοντελοποίησης και την εξέταση εναλλακτικών βιοκλιματικών παρεμβάσεων.

1.8. Προτεινόμενη μεθοδολογία

Η έρευνα θα ακολουθήσει τα παρακάτω στάδια:

1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τον βιοκλιματικό σχεδιασμό σε σχολικά κτίρια, τη θερμική και οπτική άνεση, την ενεργειακή απόδοση και το BIM, με στόχο τη διαμόρφωση θεωρητικού πλαισίου.
2. Καταγραφή και αποτύπωση του υφιστάμενου σχολικού συγκροτήματος μέσω αρχιτεκτονικών σχεδίων, επιτόπιων επιθεωρήσεων και μετρήσεων
3. Ψηφιακή μοντελοποίηση του κτιρίου με τη χρήση BIM (Autodesk Revit).
4. Ενεργειακή και περιβαλλοντική προσομοίωση με σενάρια βελτίωσης των εσωτερικών και εξωτερικών χώρων.
5. Αξιολόγηση σεναρίων με βάση τους δείκτες θερμικής και οπτικής άνεσης.
6. Σύνθεση προτάσεων βιοκλιματικού επανασχεδιασμού, τεχνικά τεκμηριωμένων και εφαρμόσιμων.

1.9. Προσδοκώμενα αποτελέσματα

Αναμένεται ότι η παρούσα εργασία θα οδηγήσει σε μια ολοκληρωμένη αποτίμηση της υφιστάμενης κατάστασης του υπό μελέτη σχολικού συγκροτήματος, τόσο σε επίπεδο εσωτερικού περιβάλλοντος όσο και σε επίπεδο εξωτερικού μικροκλίματος. Παράλληλα, αναμένεται να προκύψει ένα ψηφιακό BIM μοντέλο του κτιρίου, ικανό να υποστηρίξει τη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων παρέμβασης. Μέσα από τη διαδικασία αυτή, επιδιώκεται η διατύπωση τεκμηριωμένων προτάσεων βιοκλιματικού επανασχεδιασμού που θα συμβάλλουν στη βελτίωση της θερμικής άνεσης, της λειτουργικότητας και της ενεργειακής συμπεριφοράς του σχολικού συγκροτήματος.

1.10. Συμβολή της εργασίας

Η συμβολή της παρούσας εργασίας είναι πολλαπλή:

- προσφέρει ένα πρακτικό μοντέλο διαδικασίας βιοκλιματικού επανασχεδιασμού σχολικών κτιρίων
- αξιοποιεί σύγχρονα εργαλεία BIM σε πραγματικό κτιριακό παράδειγμα
- ενισχύει την κατανόηση της μικροκλιματικής συμπεριφοράς σχολικών αυλών

- διευκολύνει τη διαμόρφωση κατευθυντήριων γραμμών για βιώσιμες και ενεργειακά αποδοτικές σχολικές υποδομές
- πραγματοποιεί σύνδεση εσωτερικού και εξωτερικού μικροκλίματος

1.11. Δομή της εργασίας

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1- Εισαγωγή: Παρουσιάζονται ο γενικός προβληματισμός, το πλαίσιο της έρευνας, η σημερινή κατάσταση σε επίπεδο γνώσεων και τεχνικής, τα κενά της βιβλιογραφίας, η προτεινόμενη μεθοδολογία, τα προσδοκώμενα αποτελέσματα, η συμβολή και η δομή της εργασίας.

Κεφάλαιο 2- Θεωρητικό υπόβαθρο και βιβλιογραφική ανασκόπηση: Αναλύονται οι βασικές έννοιες του βιοκλιματικού σχεδιασμού, οι δείκτες θερμικής και οπτικής άνεσης, τα χαρακτηριστικά του σχολικού κτιριακού αποθέματος, καθώς και η διεθνής και εγχώρια βιβλιογραφία σχετικά με το μικροκλίμα σχολικών αυλών και τη χρήση BIM.

Κεφάλαιο 3- Μεθοδολογία: Περιγράφεται αναλυτικά η ερευνητική διαδικασία, τα εργαλεία και τα στάδια της ανάλυσης, καθώς και τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη σχολικού συγκροτήματος.

Κεφάλαιο 4- Αποτελέσματα: Παρουσιάζονται τα ευρήματα της αποτύπωσης, των μετρήσεων και των προσομοιώσεων για την υφιστάμενη κατάσταση και για τα εξεταζόμενα σενάρια παρεμβάσεων.

Κεφάλαιο 5- Σχολιασμός Αποτελεσμάτων: Ερμηνεύονται και σχολιάζονται κριτικά τα αποτελέσματα, συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας και αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί των προτεινόμενων λύσεων.

Κεφάλαιο 6- Συμπεράσματα και προτάσεις: Συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της έρευνας και διατυπώνονται προτάσεις για βελτιωτικές παρεμβάσεις, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα στον τομέα του βιοκλιματικού σχεδιασμού σχολικών κτιρίων.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Εισαγωγή- Βιοκλιματικός σχεδιασμός σχολικών κτιρίων

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός αποτελεί θεμελιώδη προσέγγιση για την ανάπτυξη κτιρίων υψηλής περιβαλλοντικής απόδοσης. Στόχος του είναι η αξιοποίηση των κλιματικών συνθηκών και των φυσικών πόρων έτσι ώστε να επιτυγχάνεται θερμική και οπτική άνεση με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας (Sayad et al., 2022). Η σημασία αυτής της προσέγγισης στα σχολικά κτίρια είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς τα παιδιά είναι πιο ευάλωτα στο θερμικό στρες και περνούν πολλές ώρες στις αίθουσες και στις σχολικές αυλές.

Οι De Angelis et al. (2017) προτείνουν μια μέθοδο σύγκρισης διαφορετικών στρατηγικών βιοκλιματικού σχεδιασμού μέσω της δυναμικής αξιολόγησης της θερμικής άνεσης. Τα αποτελέσματά τους δείχνουν ότι παθητικά μέτρα, όπως συστήματα σκίασης και υλικά υψηλής θερμικής μάζας, μειώνουν σημαντικά τα επίπεδα δυσφορίας των μαθητών. Παράλληλα, η διεθνής βιβλιογραφία επισημαίνει ότι τα παιδιά δεν πρέπει να θεωρούνται «μικροί ενήλικες» όσον αφορά τη θερμική άνεση. Έρευνες δείχνουν ότι ο μεταβολικός τους ρυθμός, η σωματική τους δραστηριότητα και η φυσιολογία τους διαφέρουν σημαντικά από εκείνες των ενηλίκων, γεγονός που απαιτεί ειδική προσαρμογή των δεικτών άνεσης (Luyao et al., 2025).

Με βάση τα παραπάνω, η βιβλιογραφική ανασκόπηση που ακολουθεί οργανώνεται γύρω από τέσσερις βασικούς άξονες: α) τους δείκτες θερμικής άνεσης και τη θεωρητική τους θεμελίωση, β) τις συνθήκες άνεσης σε εσωτερικούς και εξωτερικούς σχολικούς χώρους, γ) τις βιοκλιματικές και ενεργειακές στρατηγικές αναβάθμισης και δ) τον ρόλο των ψηφιακών εργαλείων BIM στην αξιολόγηση και σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων.

2.1. Θερμική άνεση και δείκτες (PMV/PPD, Tmrt, Operative Temperature)

Η θερμική άνεση είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες ποιότητας του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος ενός κτιρίου, ειδικά σε εκπαιδευτικά κτίρια

όπου μαθητές και καθηγητές παραμένουν για μεγάλες περιόδους κατά τη διάρκεια της ημέρας (Antoniadis et al., 2020). Σύμφωνα με το πρότυπο ASHRAE 55, η θερμική άνεση ορίζεται ως η κατάσταση στην οποία ένα άτομο εκφράζει ικανοποίηση από το θερμικό του περιβάλλον, ένα φαινόμενο που επηρεάζεται από ατομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες (ASHRAE, 2017).

Οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν τη θερμική άνεση είναι η θερμοκρασία αέρα, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα αέρα και η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας, ενώ στους προσωπικούς παράγοντες περιλαμβάνονται ο ρουχισμός και ο μεταβολισμός των χρηστών (Fanger, 1970). Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι διεθνείς δείκτες για την ποσοτικοποίηση της θερμικής άνεσης, με τους PMV, PPD, T_{mrt} και τη λειτουργική θερμοκρασία να είναι οι πιο διαδεδομένοι και επιστημονικά τεκμηριωμένοι.

2.1.1. Δείκτης PMV (Predicted Mean Vote)

Ο δείκτης PMV (Predicted Mean Vote), που εισήγαγε ο Fanger (1970), εκφράζει την προβλεπόμενη μέση θερμική αίσθηση ενός τυποποιημένου πληθυσμού χρηστών υπό συγκεκριμένες περιβαλλοντικές και φυσιολογικές συνθήκες, σε κλίμακα από -3 (πολύ κρύο) έως $+3$ (πολύ ζεστό)

Ο PMV λαμβάνει υπόψη έξι παραμέτρους:

- θερμοκρασία αέρα,
- σχετική υγρασία,
- ταχύτητα αέρα,
- μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας,
- θερμική αντίσταση ενδυμασίας (clo),
- μεταβολισμό χρήστη (met)

Η προσέγγιση αυτή προσφέρει μια ολιστική αξιολόγηση του θερμικού περιβάλλοντος, η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε σχολικά κτίρια όπου οι μαθητές έχουν σχετικά σταθερή δραστηριότητα (μεταβολισμός 1.2-1.4 met). Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί ευρέως σε σχολεία για τον προσδιορισμό της θερμικής άνεσης μαθητών και εκπαιδευτικών, δεδομένου ότι οι μαθητές παρουσιάζουν διαφορετικές θερμοφυσιολογικές αντιδράσεις από τους ενήλικες (Vanos et al., 2010).

2.1.2. Δείκτης PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)

Ο δείκτης PPD λειτουργεί συμπληρωματικά στον PMV και υποδεικνύει το ποσοστό των ατόμων που είναι πιθανό να αισθάνονται δυσφορία σε ένα ορισμένο περιβάλλον. Το πρότυπο ASHRAE 55 θέτει ως αποδεκτή περιοχή άνεσης τιμές PMV μεταξύ -0.5 και +0.5 και $PPD < 10\%$, όρια που θεωρούνται κατάλληλα και για σχολικά περιβάλλοντα (ASHRAE, 2017). Ακόμη και σε ιδανικές συνθήκες ($PMV = 0$), το PPD δεν πέφτει κάτω από 5%, αναγνωρίζοντας έτσι τη φυσική διακύμανση της ανθρώπινης αντίληψης.

Στα σχολεία, οι διεθνείς οδηγίες προτείνουν:

- **PMV μεταξύ -0.5 και +0.5**
- **PPD < 10%**

Αυτά τα όρια εξασφαλίζουν συνθήκες άνεσης που ευνοούν τη συγκέντρωση και τη μαθησιακή απόδοση.

2.1.3. Μέση Θερμοκρασία Ακτινοβολίας (Mean Radiant Temperature - T_{mrt})

Ο T_{mrt} είναι ένας κρίσιμος δείκτης θερμικής άνεσης, καθώς επηρεάζει άμεσα την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ σώματος και περιβάλλοντος μέσω ακτινοβολίας. Η T_{mrt} εξαρτάται από τις θερμοκρασίες και τις θέσεις των περιβαλλόντων επιφανειών, καθώς και από την ηλιακή ακτινοβολία που μπορεί να εισέρχεται στους χώρους (Vanos, 2015).

Στα σχολικά κτίρια, ιδιαίτερα σε αίθουσες με νότιο προσανατολισμό και μεγάλες επιφάνειες με υαλοστάσια χωρίς επαρκή σκίαση, η T_{mrt} συχνά αποτελεί κύριο παράγοντα υπερθέρμανσης (Antoniadis et al., 2020).

Ταυτόχρονα, η T_{mrt} είναι θεμελιώδης έννοια στην αξιολόγηση του εξωτερικού μικροκλίματος, ιδιαίτερα στις σχολικές αυλές, όπου τα παιδιά εκτίθενται άμεσα σε θερμική ακτινοβολία, συχνά σε επίπεδα υψηλότερα από αυτά που συναντώνται σε εσωτερικούς χώρους (Luyao et al., 2025).

Η T_{mrt} επηρεάζεται από:

- την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στους χώρους,
- τη θερμική μάζα των δομικών στοιχείων του κτιρίου,
- την παρουσία θερμών ή ψυχρών επιφανειών στον χώρο,

- τη γεωμετρία της αίθουσας και τη θέση του χρήστη.

2.1.4. Λειτουργική θερμοκρασία (Operative Temperature)

Η λειτουργική θερμοκρασία συνδυάζει την επίδραση της θερμοκρασίας αέρα και της T_{mrt} και θεωρείται ένας από τους πιο αξιόπιστους δείκτες για την αξιολόγηση πραγματικών συνθηκών άνεσης (ASHRAE, 2017). Αυτός ο δείκτης χρησιμοποιείται συχνά σε ενεργειακές προσομοιώσεις καθώς παρέχει μία πιο ρεαλιστική εικόνα των συνθηκών άνεσης.

Η εξίσωση υπολογισμού είναι:

$$T_{op} = (h_c T_a + h_r T_{mrt}) / (h_c + h_r)$$

όπου:

- T_a = θερμοκρασία αέρα
- T_{mrt} = μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας
- h_c, h_r = συντελεστές συναγωγής και ακτινοβολίας

Στα σχολικά κτίρια, οι αποκλίσεις από τις επιθυμητές τιμές συχνά οφείλονται σε ανεπαρκή μόνωση, αυξημένες θερμικές απώλειες ή υπερβολική ηλιακή ακτινοβολία μέσω των παραθύρων. Μελέτες σε σχολικές τάξεις έχουν δείξει ότι η θερμοκρασία λειτουργίας μπορεί να επηρεάσει άμεσα την ικανότητα συγκέντρωσης των μαθητών (De Angelis et al., 2017), γεγονός που καθιστά τον δείκτη αυτό ιδιαίτερα σημαντικό για περιβάλλοντα μάθησης.

2.1.5. Η σημασία των δεικτών στην παρούσα διπλωματική εργασία

Οι παραπάνω δείκτες αποτελούν τη βάση για την αξιολόγηση θερμικής άνεσης στο κτιριακό συγκρότημα που μελετάται. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία, η αξιολόγηση της θερμικής άνεσης στα σχολικά περιβάλλοντα δεν μπορεί να βασιστεί σε έναν μόνο δείκτη, αλλά απαιτεί συνδυαστική θεώρηση ανάλογα με την κλίμακα του χώρου. Στην παρούσα εργασία, οι δείκτες PMV/PPD και η λειτουργική θερμοκρασία θεωρούνται καταλληλότεροι για την αξιολόγηση των αιθουσών διδασκαλίας, ενώ για τον εξωτερικό χώρο της αυλής κρίνεται αναγκαία η αξιοποίηση βιομετεωρολογικών δεικτών όπως ο PET και ο UTCI. Παράλληλα, η T_{mrt} αντιμετωπίζεται ως κομβική παράμετρος,

καθώς εκφράζει τον ρόλο της ακτινοβολίας τόσο στην εσωτερική υπερθέρμανση όσο και στη μικροκλιματική επιβάρυνση των υπαίθριων χώρων. Η λειτουργική θερμοκρασία χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της συνολικής θερμικής εμπειρίας των χρηστών σε συνδυασμό με τις ενεργειακές προσομοιώσεις BIM (Revit - Insight).

Η χρήση των δεικτών αυτών επιτρέπει μια τεκμηριωμένη αξιολόγηση των συνθηκών άνεσης πριν και μετά τις προτεινόμενες παρεμβάσεις, προσφέροντας μία αντικειμενική βάση για τη διαμόρφωση σεναρίων βελτίωσης.

2.2. Θερμική άνεση στις σχολικές αίθουσες

2.2.1. Θερμική άνεση στις αίθουσες: βασικά προβλήματα

Η θερμική άνεση στους εσωτερικούς χώρους των σχολικών κτιρίων έχει άμεση σχέση με την απόδοση των μαθητών. Σύμφωνα με τον BB101 (UK Department for Education, 2016), η υπερθέρμανση στις σχολικές αίθουσες μπορεί να μειώσει την ικανότητα συγκέντρωσης των μαθητών, ενώ ένα ανεπαρκές σύστημα αερισμού αυξάνει τα επίπεδα CO₂, οδηγώντας σε μειωμένη γνωστική λειτουργία. Επειδή οι μαθητές περνούν σημαντικό μέρος της ημέρας μέσα στις αίθουσες διδασκαλίας, ακόμα και μικρές αποκλίσεις από τα προτεινόμενα όρια θερμικής άνεσης μπορεί να επηρεάσουν τη συγκέντρωση, την άνεση και τις επιδόσεις τους (Vanos et al., 2010).

Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ότι οι σχολικές αίθουσες αντιμετωπίζουν συχνά προβλήματα υπερθέρμανσης, ιδιαίτερα σε χώρες με θερμά καλοκαίρια -όπως η Ελλάδα - και ανεπαρκή σκίαση ή χαμηλή ενεργειακή απόδοση του κτιριακού κελύφους (Antoniadis et al., 2020; Brown & Gillespie, 2011). Σχολικά κτίρια κατασκευασμένα πριν από την εφαρμογή σύγχρονων κανονισμών θερμομόνωσης παρουσιάζουν συνήθως:

- υψηλές θερμικές απώλειες τον χειμώνα,
- σημαντικά ηλιακά κέρδη το καλοκαίρι,
- ελλιπή αερισμό,
- αδυναμία διατήρησης σταθερής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας

Οι παράγοντες αυτοί οδηγούν σε συχνές αποκλίσεις από τα διεθνώς αποδεκτά όρια των δεικτών PMV/PPD ή της operative temperature, επηρεάζοντας την αντιληπτή θερμική άνεση των μαθητών (De Angelis et al., 2017).

2.2.2. Ιδιαιτερότητα των παιδιών ως χρηστών

Επιπλέον, η θερμική άνεση στα σχολικά περιβάλλοντα είναι ιδιαίζουσα λόγω της φυσιολογίας των μαθητών. Έρευνες έχουν δείξει ότι τα παιδιά έχουν διαφορετικές αντιδράσεις στη θερμότητα και το ψύχος σε σύγκριση με τους ενήλικες, με μεγαλύτερη ευαισθησία στις υψηλές θερμοκρασίες και μεγαλύτερη ανάγκη θερμικής σταθερότητας (Luyao et al., 2025; Vanos, 2015). Σε συνθήκες υψηλής θερμικής επιβάρυνσης, είτε λόγω ανεπαρκούς σκίασης, είτε λόγω μεγάλων υαλοστασίων, η T_{mrt} μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, προκαλώντας δυσφορία ακόμη και όταν η θερμοκρασία αέρα παραμένει εντός αποδεκτών ορίων.

2.2.3. Το προσαρμοστικό μοντέλο θερμικής άνεσης

Το κλασικό μοντέλο PMV/PPD, που ανέπτυξε ο Fanger (1970), αντιμετωπίζει τη θερμική άνεση ως αποτέλεσμα αυστηρά φυσιολογικών παραμέτρων, θεωρώντας έναν «τυποποιημένο» χρήστη σε σταθερές συνθήκες. Ωστόσο, η επιστημονική βιβλιογραφία έχει αναδείξει ότι το μοντέλο αυτό παρουσιάζει συστηματική απόκλιση όταν εφαρμόζεται σε φυσικά αεριζόμενα κτίρια, ιδίως υπό μεσογειακές κλιματικές συνθήκες, όπου τα άτομα αναπτύσσουν προσαρμοστικές αντιδράσεις στις εξωτερικές θερμοκρασίες (de Dear & Brager, 1998).

Το προσαρμοστικό μοντέλο θερμικής άνεσης (Adaptive Comfort Model) στηρίζεται στην υπόθεση ότι οι χρήστες ενός κτιρίου δεν είναι παθητικοί δέκτες του θερμικού περιβάλλοντος, αλλά αναπτύσσουν ενεργητικές στρατηγικές προσαρμογής τόσο συμπεριφορικές, φυσιολογικές και ψυχολογικές. Αυτές περιλαμβάνουν αλλαγές ενδυμασίας, ρύθμιση ανοιγμάτων, κινητικότητα εντός χώρου, καθώς και ψυχολογική προσαρμογή στις εποχιακές διακυμάνσεις (Nicol & Humphreys, 2002). Ως εκ τούτου, η θερμική ουδετερότητα ορίζεται όχι ως σταθερή τιμή, αλλά ως συνάρτηση της μέσης εξωτερικής θερμοκρασίας της προηγούμενης περιόδου (running mean outdoor temperature).

Σε επίπεδο προτύπων, το πρότυπο ASHRAE 55-2020 (Section 5.4) και το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 16798-1:2019 ενσωματώνουν το προσαρμοστικό μοντέλο ως εναλλακτικό κριτήριο αξιολόγησης για κτίρια με δυνατότητα φυσικού αερισμού. Σύμφωνα με αυτά, η επιτρεπόμενη λειτουργική θερμοκρασία (operative temperature) κυμαίνεται σε εύρος $\pm 2^{\circ}\text{C}$ έως $\pm 3^{\circ}\text{C}$ γύρω από μια τιμή άνεσης που εξαρτάται από τη μέση εξωτερική θερμοκρασία, παρέχοντας σημαντικά μεγαλύτερη ευελιξία σε σχέση με τα σταθερά όρια του PMV (ASHRAE, 2020).

Η εφαρμογή του προσαρμοστικού μοντέλου σε σχολικά κτίρια εγείρει ειδικά ερωτήματα. Σε αντίθεση με τα ενήλικα άτομα, τα παιδιά παρουσιάζουν μικρότερη συμπεριφορική αυτονομία, δεν μπορούν δηλαδή να ρυθμίσουν ελεύθερα τον ρουχισμό τους ή να εγκαταλείψουν τον χώρο, γεγονός που περιορίζει την προσαρμοστική τους ικανότητα (Vanos, 2015). Ωστόσο, έρευνες σε μεσογειακά σχολεία έδειξαν ότι μαθητές σε κτίρια με φυσικό αερισμό ανεχόντουσαν μεγαλύτερα εύρη θερμοκρασίας σε σχέση με τα προβλεπόμενα από το μοντέλο Fanger, επιβεβαιώνοντας μια μορφή προσαρμοστικής απόκρισης ακόμα και στις μικρότερες ηλικίες (de Dear & Brager, 1998).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η γνώση του προσαρμοστικού μοντέλου είναι κρίσιμη για δύο λόγους. Αρχικά, για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων PMV/PPD από το Autodesk Insight, τα οποία ενδέχεται να υπερεκτιμούν το ποσοστό δυσφορίας σε χώρους με φυσικό αερισμό και δευτερευόντως, για τη διαμόρφωση ρεαλιστικών ορίων άνεσης στα σενάρια βιοκλιματικής αναβάθμισης, λαμβάνοντας υπόψη το τοπικό μεσογειακό κλίμα και τη δυνατότητα προσαρμοστικής ανταπόκρισης των χρηστών.

2.2.4. Ποιότητα Εσωτερικού Αέρα (IAQ) & Αερισμός

Η ποιότητα του εσωτερικού αέρα (Indoor Air Quality - IAQ) αποτελεί παράγοντα άρρηκτα συνδεδεμένο με τη θερμική άνεση και την ευρύτερη περιβαλλοντική ποιότητα των σχολικών αιθουσών. Παρά τη διαφορετική φύση τους, οι δύο αυτές παράμετροι αλληλεπιδρούν καθώς ανεπαρκής αερισμός οδηγεί σε συσσώρευση CO_2 και υδρατμών, ενώ παράλληλα εμποδίζει την αποβολή θερμότητας από τον χώρο, επιβαρύνοντας τόσο την αισθητή άνεση των χρηστών όσο και τους δείκτες PMV/PPD (Wargocki & Wyon, 2007).

Σε σχολικές αίθουσες, τα επίπεδα CO_2 αποτελούν τον κυριότερο δείκτη επάρκειας αερισμού, δεδομένης της υψηλής πυκνότητας χρηστών ανά μονάδα επιφάνειας. Ο οδηγός BB101 (UK Department for Education, 2016) θέτει ως οριακή τιμή τα 1500 ppm, ενώ

πρόσφατες μελέτες υποστηρίζουν αυστηρότερο όριο των 1000 ppm για τη διατήρηση υψηλής γνωστικής λειτουργίας (Satish et al., 2012; Taing et al). Η έρευνα των Wargocki & Wyon (2007) σε σχολεία της Δανίας απέδειξε ότι η αύξηση της παροχής εξωτερικού αέρα από 3 σε 9,5 L/s/άτομο βελτίωσε σημαντικά την ταχύτητα εκτέλεσης γνωστικών εργασιών και μείωσε το ποσοστό λαθών, τεκμηριώνοντας άμεση σχέση μεταξύ ποιότητας αέρα και ακαδημαϊκής απόδοσης.

Η ανεπαρκής ανανέωση αέρα στα σχολεία αποδίδεται κυρίως σε δύο αιτίες. Πρώτον, στον σχεδιασμό κτιρίων που δεν προβλέπει επαρκή φυσικό αερισμό μέσω ανοιγμάτων (cross-ventilation) και δεύτερον, στην απουσία μηχανικών συστημάτων αερισμού ελεγχόμενης παροχής (Antoniadis et al., 2020). Σε ελληνικά σχολεία, όπου οι αίθουσες αερίζονται κυρίως μέσω ανοιγμάτων, η αποτελεσματικότητα εξαρτάται από τον προσανατολισμό των κουφωμάτων, τη διαφορά πίεσης και τη συχνότητα χειροκίνητης λειτουργίας από τους χρήστες, παράμετροι που καθιστούν τον αερισμό αναξιόπιστο και ανομοιόμορφο κατά τη διάρκεια της σχολικής ημέρας.

Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 16798-1:2019 κατηγοριοποιεί τα κτίρια σε τέσσερις κατηγορίες ποιότητας εσωτερικού αέρα (IEQ Categories I-IV) και ορίζει ελάχιστες παροχές αερισμού για κάθε κατηγορία χρήσης, συμπεριλαμβανομένων των εκπαιδευτικών χώρων. Για σχολικές αίθουσες Κατηγορίας II, η οποία αποτελεί το πρότυπο επίπεδο σχεδιασμού για νέα κτίρια και ανακαινίσεις σύμφωνα με το EN 16798-1:2019, η ελάχιστη παροχή εξωτερικού αέρα ορίζεται στα 7 L/s/άτομο, τιμή που συχνά δεν επιτυγχάνεται σε ελληνικά σχολεία χωρίς σύστημα μηχανικού αερισμού.

2.2.5. Θερμική Άνεση σε Μεσογειακά Κλίματα

Ειδικότερα στη Μεσόγειο, όπου οι θερμοκρασίες κατά τους θερινούς μήνες είναι υψηλές, η ανάγκη για βελτιστοποιημένη σκίαση και φυσικό αερισμό καθίσταται επιτακτική (Agencia Provincial de la Energía de Granada, 2010). Σύμφωνα με τους ίδιους τονίζεται ότι σε κλιματικές ζώνες με θερμά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες, η προστασία από την ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί τη σημαντικότερη συνιστώσα βιοκλιματικού σχεδιασμού.

Οι αναλύσεις του θερμικού περιβάλλοντος σε σχολικές αίθουσες διεθνώς έχουν δείξει ότι:

- η έλλειψη σκίασης οδηγεί σε μεγάλα ηλιακά κέρδη,

- τα μεγάλα υαλοστάσια χωρίς θερμικές προδιαγραφές αυξάνουν τη T_{int} και το ψυκτικό φορτίο,
- τα παλαιά συστήματα θέρμανσης δεν καλύπτουν ομοιόμορφα τους χώρους,
- οι αίθουσες με νότιο και δυτικό προσανατολισμό είναι πιο ευάλωτες στην υπερθέρμανση. (Pellegrino et al., 2015; Ma et al., 2021).

Η χρήση εργαλείων ενεργειακής προσομοίωσης, και ειδικότερα BIM-based μεθοδολογιών όπως το Revit και το Insight, δίνει τη δυνατότητα ακριβούς υπολογισμού της θερμικής συμπεριφοράς των αιθουσών, λαμβάνοντας υπόψη τα υλικά, τον προσανατολισμό, τις σκιές και τα σενάρια χρήσης (Fung et al., 2022; Duarte et al., 2021).

Συνολικά, η βιβλιογραφία συγκλίνει στο ότι η περιβαλλοντική ποιότητα των σχολικών αιθουσών δεν εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία αέρα, αλλά από τη συνδυασμένη επίδραση της ακτινοβολίας, του αερισμού, της ποιότητας αέρα, της ηλιακής προστασίας και των προσαρμοστικών δυνατοτήτων των χρηστών. Η πολυπαραμετρική αυτή φύση της άνεσης καθιστά αναγκαία την αξιολόγηση των αιθουσών μέσω συνδυαστικών δεικτών και όχι μεμονωμένων θερμοκρασιακών τιμών.

2.3. Θερμική άνεση σε σχολικές αυλές

2.3.1. Η σημασία της θερμικής άνεσης στις σχολικές αυλές

Η σχολική αυλή δεν αποτελεί απλώς συμπληρωματικό υπαίθριο χώρο του σχολείου, αλλά βασικό πεδίο κοινωνικοποίησης, παιχνιδιού, φυσικής δραστηριότητας και καθημερινής αποφόρτισης των μαθητών. Συνεπώς, η θερμική ποιότητα του υπαίθριου σχολικού περιβάλλοντος επηρεάζει όχι μόνο την άνεση κατά τη διάρκεια του διαλείμματος, αλλά και τη συνολική σχολική εμπειρία. Οι εξωτερικοί χώροι, σε αντίθεση με τους εσωτερικούς, χαρακτηρίζονται από υψηλότερη έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία, έχουν μεγαλύτερες θερμοκρασιακές μεταβολές και επηρεάζονται έντονα από τη γεωμετρία και τα υλικά, στοιχεία που μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική θερμική καταπόνηση (Antoniadis et al., 2020). Οι συνθήκες έντονης θερμικής καταπόνησης στους υπαίθριους χώρους μπορούν να περιορίσουν τη χρήση της αυλής, να μειώσουν τη διάθεση για δραστηριότητα και να επηρεάσουν αρνητικά τη συγκέντρωση στις επόμενες διδακτικές ώρες (Vanos, 2015).

Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, τα παιδιά αποτελούν μια ιδιαίτερα ευάλωτη ομάδα απέναντι στο θερμικό στρες, παρουσιάζοντας ταχύτερη άνοδο της θερμοκρασίας σώματος και μειωμένη ικανότητα θερμορυθμιστικής προσαρμογής σε σχέση με τους ενήλικες (Vanos, 2015). Αυτό συμβαίνει γιατί τα παιδιά έχουν διαφορετικό μεταβολισμό, διαφορετική αναλογία σώματος - επιφάνειας, κινούνται περισσότερο, εκτίθενται περισσότερο στον ήλιο και έχουν διαφορετική αντίληψη της θερμικής επιβάρυνσης.

Σε αστικά σχολικά περιβάλλοντα, η ανεπαρκής σκίαση, η χρήση σκληρών υλικών όπως ασφαλτος και τσιμέντο, καθώς και η απουσία πράσινων υποδομών οδηγούν σε αυξημένες τιμές μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας (T_{mrt}), που αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την αντίληψη της θερμικής επιβάρυνσης (Luyao et al., 2025).

Για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης σε εξωτερικούς χώρους, έχουν αναπτυχθεί ειδικοί βιομετεωρολογικοί δείκτες, με πιο διαδεδομένους τους Physiological Equivalent Temperature (PET) και Universal Thermal Climate Index (UTCI) (Liu et al., 2023). Ο δείκτης PET χρησιμοποιείται ευρέως στην αξιολόγηση της εξωτερικής θερμικής άνεσης σε αστικούς και ημιυπαίθριους χώρους, επειδή αποδίδει τη θερμική εμπειρία σε ισοδύναμη θερμοκρασία εύκολα ερμηνεύσιμη από τον σχεδιαστή (Antoniadis et al., 2020; Jing et al., 2024). Αντίθετα, ο UTCI είναι περισσότερο προσανατολισμένος στην αποτίμηση της έντασης θερμικού στρες και της βιομετεωρολογικής επιβάρυνσης υπό ευρύτερο φάσμα περιβαλλοντικών συνθηκών (Pantavou et al., 2024). Για τον λόγο αυτό, οι δύο δείκτες μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά, ο PET ως δείκτης αντιληπτής άνεσης και ο UTCI ως δείκτης κατηγοριοποίησης θερμικού στρες (Tousi et al. 2024; Liuet al., 2023).

2.3.2. Physiological Equivalent Temperature (PET)

Ο δείκτης PET αποτελεί από τους σημαντικότερους βιομετεωρολογικούς δείκτες για εξωτερικούς χώρους και χρησιμοποιείται εκτεταμένα σε σχολικά και αστικά περιβάλλοντα. Ο PET εκτιμά τις συνθήκες άνεσης μεταφράζοντάς τες σε μία «ισοδύναμη» θερμοκρασία που θα προκαλούσε το ίδιο θερμικό φορτίο σε ένα εσωτερικό, ήρεμο περιβάλλον (Vanos, 2015). Ο δείκτης ενσωματώνει θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία, ταχύτητα ανέμου, T_{mrt} καθώς και φυσιολογικές παραμέτρους όπως ο μεταβολισμός και ο ρουχισμός. Σε σχολικές αυλές, υψηλές τιμές PET ($>35-40^{\circ}\text{C}$) συνδέονται με θερμική δυσφορία, μείωση δραστηριότητας, αύξηση κινδύνων θερμικής καταπόνησης και ανάγκη για πρόσθετη σκίαση (Antoniadis et al., 2020).

2.3.3. Universal Thermal Climate Index (UTCI)

Ο δείκτης UTCI έχει αναπτυχθεί ως ένα εξελιγμένο εργαλείο αξιολόγησης του θερμικού στρες σε εξωτερικά περιβάλλοντα, λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις του ανέμου, της υγρασίας και κυρίως της θερμικής ακτινοβολίας. Ο UTCI προσφέρει λεπτομερή κατηγοριοποίηση της θερμικής άνεσης, από συνθήκες «άμεσης άνεσης» έως «πολύ υψηλό θερμικό στρες», καθιστώντας τον κατάλληλο για περιβάλλοντα όπου τα παιδιά εκτίθενται σε ηλιακή ακτινοβολία για περιορισμένα αλλά συχνά χρονικά διαστήματα (Luyao et al., 2025).

Έρευνες σε σχολεία έχουν δείξει ότι ο UTCI:

- αναδεικνύει τις ακραίες τιμές θερμικού στρες τις μεσημεριανές ώρες,
- αποτυπώνει τις επιπτώσεις των υλικών επίστρωσης,
- βοηθά στον σχεδιασμό υφιστάμενων και νέων χώρων με βάση θερμικά κριτήρια.

2.3.4. Μέση Θερμοκρασία Ακτινοβολίας - T_{mrt}

Η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας (mean radiant temperature, T_{mrt}) αποτελεί βασική παράμετρο για την αξιολόγηση της εξωτερικής θερμικής άνεσης, καθώς αποτυπώνει το συνολικό ακτινοβολικό φορτίο που δέχεται το ανθρώπινο σώμα από το περιβάλλον. Σε αντίθεση με τη θερμοκρασία αέρα, η T_{mrt} εκφράζει τη συνδυασμένη επίδραση της άμεσης και ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και της μακροκυματικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τις περιβάλλουσες επιφάνειες (Guo et al., 2020).

Στους υπαίθριους σχολικούς χώρους η T_{mrt} είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς οι αυλές συχνά περιλαμβάνουν εκτεταμένες σκληρές επιφάνειες και περιορισμένη σκίαση. Σε συνθήκες έντονου ηλιασμού, οι τιμές της αυξάνονται σημαντικά στα μη σκιασμένα σημεία, με αποτέλεσμα η ακτινοβολία να αποτελεί συχνά σημαντικότερο παράγοντα θερμικής δυσφορίας από τη θερμοκρασία αέρα. Αντίστοιχα, έρευνες σε σχολικές αυλές δείχνουν ότι η παρουσία σκίασης και βλάστησης μειώνει αισθητά την ακτινοβολική επιβάρυνση και βελτιώνει τη θερμική άνεση των παιδιών (Antoniadis et al., 2020).

Παράλληλα, τα υλικά των επιφανειών επηρεάζουν ουσιαστικά την T_{mrt} , καθώς υλικά όπως η ασφάλτος και το σκυρόδεμα απορροφούν και επανεκπέμπουν σημαντικά ποσά θερμότητας, εντείνοντας τη θερμική επιβάρυνση του χρήστη. Για τον λόγο αυτό, η

βελτίωση της θερμικής άνεσης στις σχολικές αυλές δεν εξαρτάται μόνο από τη μείωση της θερμοκρασίας αέρα, αλλά κυρίως από παρεμβάσεις που περιορίζουν το ακτινοβολικό φορτίο, όπως η δένδροφύτευση, τα σκίαστρα και η χρήση καταλληλότερων υλικών επιφάνειας (Santamouris, 2013).

2.3.5. Θερμικό μικροκλίμα σχολικών αυλών

Το μικροκλίμα των σχολικών αυλών εξαρτάται από μια σειρά δομικών και περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως:

- ο προσανατολισμός και γεωμετρία του αύλειου χώρου,
- η παρουσία ή η έλλειψη βλάστησης,
- η ανακλαστικότητα και θερμοχωρητικότητα υλικών,
- η ταχύτητα του ανέμου
- η υγρασία
- η περίκλειση από ψηλά κτίρια (αστικό φαράγγι) (Brown & Gillespie, 2011; Antoniadis et al., 2020; Vanos, 2015).

Σε μελέτες σε ελληνικά σχολεία έχει καταγραφεί ότι η απουσία δέντρων και σκιάστρων οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλές τιμές T_{mrt} , οι οποίες μπορούν να ξεπεράσουν τους 60-70°C τις θερινές ημέρες (Antoniadis, 2018). Αυτό καθιστά τον εξωτερικό χώρο όχι μόνο δυσάρεστο αλλά και εν δυνάμει επικίνδυνο για την υγεία των παιδιών.

Η τοποθέτηση βλάστησης, η χρήση ψυχρών υλικών και οι παρεμβάσεις σκίασης έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές λύσεις για την υποβάθμιση της θερμικής επιβάρυνσης και τη βελτίωση των δεικτών PET και UTCI (Brown & Gillespie, 2011).

2.3.6. Εφαρμογή των δεικτών PET και UTCI στην παρούσα εργασία

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η αξιολόγηση του υπαίθριου σχολικού περιβάλλοντος θα βασιστεί σε συνδυασμό βιομετεωρολογικών και φυσικών δεικτών. Ειδικότερα, ο PET θα χρησιμοποιηθεί για την αποτίμηση της αντιληπτής θερμικής άνεσης σε επιλεγμένα σημεία της αυλής, ενώ ο UTCI θα αξιοποιηθεί για την κατηγοριοποίηση της έντασης του θερμικού στρες σε διαφορετικές εποχικές και ωριαίες συνθήκες. Παράλληλα, η T_{mrt} θα λειτουργήσει ως βασική φυσική παράμετρος για την ερμηνεία της επίδρασης της ακτινοβολίας και της σκίασης. Με τον τρόπο αυτό θα καταστεί δυνατή η αξιολόγηση της

συμβολής παρεμβάσεων όπως τα σκίαστρα, η δενδροφύτευση και η χρήση ψυχρών υλικών στη βελτίωση του μικροκλίματος της σχολικής αυλής.

2.4. Βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων και αυλών

2.4.1. Έννοια και στόχοι του βιοκλιματικού σχεδιασμού

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός αποτελεί έναν ολοκληρωμένο τρόπο προσέγγισης της αρχιτεκτονικής και της ενεργειακής απόδοσης, με στόχο τη δημιουργία κτιριακών και υπαίθριων χώρων που λειτουργούν σε αρμονία με το τοπικό κλίμα, ελαχιστοποιούν τις ενεργειακές ανάγκες και μεγιστοποιούν την άνεση των χρηστών. Η βασική αρχή του βιοκλιματικού σχεδιασμού είναι η αξιοποίηση των φυσικών ενεργειακών ροών όπως της ηλιακής ακτινοβολίας, του ανέμου και της θερμικής ακτινοβολίας, με τρόπο που ενισχύει τα παθητικά οφέλη και μειώνει τις θερμικές καταπονήσεις (Sayad et al., 2022).

Σε εκπαιδευτικά κτίρια, ο βιοκλιματικός σχεδιασμός αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς οι μαθητές περνούν μεγάλο μέρος της ημέρας στους εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους, οι οποίοι συχνά παρουσιάζουν χαμηλή θερμική άνεση ή υψηλά ενεργειακά φορτία (De Angelis et al., 2017).

Η διαχείριση των ανοιγμάτων, η εξωτερική σκίαση, η θερμική προστασία του κελύφους και η ενίσχυση του φυσικού αερισμού αποτελούν βασικές παθητικές στρατηγικές για τη βελτίωση της θερμικής άνεσης στις αίθουσες διδασκαλίας. Παράλληλα, η αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού οφείλει να συνδυάζεται με έλεγχο της θάμβωσης και της υπερθέρμανσης, ώστε να επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ οπτικής και θερμικής άνεσης.

2.4.2. Βασικές αρχές βιοκλιματικού σχεδιασμού

Η διεθνής βιβλιογραφία συγκλίνει ότι οι βασικοί άξονες βιοκλιματικού σχεδιασμού περιλαμβάνουν (Taing et al., 2025; Brown & Gillespie, 2011):

1. Ορθό προσανατολισμό του κτιρίου
 - Μέγιστη αξιοποίηση χειμερινού ήλιου.
 - Ελαχιστοποίηση θερινής ακτινοβολίας.
2. Αποδοτικές στρατηγικές σκίασης

- Οριζόντια σκίαστρα για νότιες όψεις.
 - Κατακόρυφα για ανατολικές / δυτικές όψεις.
 - Φυσική σκίαση μέσω δέντρων.
3. Θερμική προστασία κελύφους
- Βελτιωμένη θερμομόνωση.
 - Υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής (low-e).
 - Μείωση θερμικών γεφυρών.
4. Αξιοποίηση φυσικού φωτισμού
- Εξασφάλιση επαρκούς ημερήσιου φωτός χωρίς θάμβωση.
 - Βέλτιστη γεωμετρία και θέση ανοιγμάτων.
5. Φυσικός αερισμός και διαμπερείς ροές
- Στρατηγική τοποθέτηση ανοιγμάτων.
 - Ενεργοποίηση νυχτερινού εξαερισμού.
6. Σχεδιασμός εξωτερικών χώρων και μικροκλίματος
- Υλικά υψηλής ανακλαστικότητας.
 - Πράσινες υποδομές και δέντρα.
 - Αποφυγή «θερμικών νησίδων».

Οι αρχές αυτές εφαρμόζονται προσαρμοσμένα ανάλογα με το κλίμα. Για μεσογειακές χώρες όπως η Ελλάδα, η προστασία από τον θερινό ήλιο και η διατήρηση δροσιάς αποτελούν κεντρικές προτεραιότητες.

2.4.3. Βιοκλιματικός σχεδιασμός σε σχολικά κτίρια

Οι σχολικές μονάδες αποτελούν συχνά παλαιά κτίρια, τα οποία δεν έχουν σχεδιαστεί με βάση σύγχρονες αρχές ενεργειακής απόδοσης ή θερμικής άνεσης (IEASHC Programme, 2015). Η βιβλιογραφία δείχνει ότι τα σχολεία εμφανίζουν:

- αυξημένα θερμικά φορτία το καλοκαίρι,
- χαμηλά επίπεδα ηλιακών κερδών τον χειμώνα,
- συχνές διακυμάνσεις θερμοκρασίας λόγω ανεπαρκούς θερμικής μάζας ή μόνωσης,
- αυξημένες ανάγκες φωτισμού και αερισμού,
- προβλήματα υπερθέρμανσης από εκτεταμένα υαλοστάσια (Pellegrino et al., 2015).

Μελέτες ενεργειακής αναβάθμισης σχολείων έχουν δείξει ότι παρεμβάσεις που αφορούν το κέλυφος όπως βελτιωμένα κουφώματα, αναβαθμισμένη θερμομόνωση και συστήματα σκίασης μπορούν να επιτύχουν μείωση ψυκτικών και θερμικών φορτίων της τάξης του 30-50% (Peixoto, 2020; Balikci, 2024). Η εφαρμογή παθητικών συστημάτων, όπως η φυσική ροή αέρα, η θερμική μάζα και ο έλεγχος ηλιασμού, έχει δείξει αποτελεσματικά αποτελέσματα στη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας και στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας (Sayad et al., 2022).

2.4.4. Βιοκλιματικός σχεδιασμός υπαίθριων χώρων σχολείων

Οι αυλές των σχολείων, ως χώροι έντονης χρήσης από μαθητές, απαιτούν ειδικό σχεδιασμό. Η έλλειψη βλάστησης και η χρήση σκληρών επιφανειών, όπως σκυρόδεμα, άσφαλτος ή πλακάκια, οδηγεί σε σημαντική αύξηση θερμικής ακτινοβολίας και υψηλές τιμές T_{mrt} , PET και UTCI, φαινόμενο που έχει καταγραφεί τόσο σε ελληνικά όσο και διεθνή σχολεία (Antoniadis et al., 2020).

Ενδεικτικές στρατηγικές βελτίωσης περιλαμβάνουν (Brown&Gillespie, 2011):

- φύτευση δέντρων για σκίαση,
- χρήση ψυχρών υλικών με υψηλό albedo,
- εγκατάσταση στεγάστρων,
- βελτιστοποίηση της γεωμετρίας για αερισμό,
- δημιουργία ζωνών υψηλής και χαμηλής δραστηριότητας.

Η ενσωμάτωση πράσινων υποδομών έχει αποδειχθεί ότι μειώνει τη θερμοκρασία επιφανειών έως και 10-15°C και βελτιώνει σημαντικά τη βιομετεωρολογική άνεση των παιδιών (Vanos, 2015).

Κρίσιμη παράμετρος για την ποσοτικοποίηση της ικανότητας σκίασης που προέρχεται από τη βλάστηση αποτελεί ο Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας (Leaf Area Index - LAI), ο οποίος εκφράζει τον λόγο της συνολικής επιφάνειας φύλλων προς την εδαφική επιφάνεια που καλύπτει το φυτό. Δέντρα με υψηλό LAI ($> 4-5$) παρέχουν ισχυρή σκίαση με αντίστοιχη μείωση της T_{mrt} στους υπό κάλυψη χώρους, ενώ δέντρα με χαμηλό LAI (< 2) παρέχουν αραιή σκίαση που επιτρέπει τη διέλευση διάχυτου φωτός (Bowler et al., 2010). Για μεσογειακό κλίμα, η επιλογή φυλλοβόλων ειδών είναι ιδιαίτερα ενδεδειγμένη καθώς

παρέχουν πυκνή σκίαση το καλοκαίρι, ενώ κατά τη χειμερινή περίοδο, με την πτώση των φύλλων, επιτρέπουν τη διείσδυση ηλιακής ακτινοβολίας, συμβάλλοντας στην παθητική ηλιακή θέρμανση του κτιρίου και των εξωτερικών χώρων (Dimoudi & Nikolopoulou, 2003).

2.4.5. Αστική θερμική νησίδα και σχολικές αυλές

Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας αναφέρεται στην αυξημένη θερμοκρασία που παρατηρείται σε αστικές περιοχές σε σχέση με τον περιβάλλοντα αγροτικό χώρο, ως αποτέλεσμα της τροποποίησης της επιφάνειας της γης, της απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας από ανθρωπογενή υλικά και της μειωμένης εξατμισοδιαπνοής λόγω απουσίας βλάστησης (Santamouris, 2013). Στις ελληνικές πόλεις, η ένταση του φαινομένου εκτιμάται έως και 10°C σε σχέση με τον περιαστικό χώρο κατά τις θερινές νύχτες, ενώ η επίδρασή του στη θερμική καταπόνηση κατά την ημέρα είναι σημαντική, ιδίως σε πυκνοδομημένες περιοχές με εκτεταμένες αδιαπέραστες επιφάνειες και ελάχιστη κάλυψη από βλάστηση (Santamouris et al., 2011).

Οι σχολικές αυλές, ως χαρακτηριστικά αστικές επιφάνειες κυριαρχούμενες από σκληρά υλικά (άσφαλτος, σκυρόδεμα, κεραμικά πλακίδια) υψηλής θερμοχωρητικότητας και χαμηλής ανακλαστικότητας, αποτελούν ιδιαίτερα ευάλωτα μικροπεριβάλλοντα στο φαινόμενο της θερμικής νησίδας (Antoniadis et al., 2020). Τα υλικά αυτά απορροφούν ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας και την επανεκπέμπουν ως μακροκυματική ακτινοβολία αργότερα, συμβάλλοντας σε παρατεταμένη θερμική καταπόνηση ακόμα και μετά τη δύση του ηλίου. Η επίδραση αυτή αυξάνει τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας (T_{mrt}) στους εξωτερικούς χώρους, επιβαρύνοντας τους δείκτες PET και UTCI σε επίπεδα δυσφορίας ή θερμικής καταπόνησης (Luyao et al., 2025).

Μια κρίσιμη παράμετρος αντιμετώπισης του φαινομένου θερμικής αστικής νησίδας στον σχολικό χώρο είναι η ανακλαστικότητα (albedo) των επιφανειών. Σύμφωνα με τους Synnefa et al. (2007), η χρήση ψυχρών υλικών (cool materials) με albedo > 0,5 σε αντικατάσταση παραδοσιακής ασφάλτου (albedo $\approx$ 0,05-0,10) μπορεί να μειώσει τη θερμοκρασία επιφάνειας κατά 10-20°C, με αντίστοιχη μείωση της T_{mrt} στους γειτονικούς χώρους. Ο Santamouris (2013) παρουσιάζει συστηματική ανασκόπηση εφαρμογών ψυχρών οδοστρωμάτων (cool pavements) σε αστικά περιβάλλοντα, καταλήγοντας ότι αποτελούν μία από τις πλέον αποδοτικές, σε αναλογία κόστους αποτελέσματος, στρατηγικές

άμβλυνσης του φαινομένου. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η αντικατάσταση αδιαπέρατων επιφανειών με ψυχρά υλικά υψηλού albedo εξετάζεται ως ένα από τα σενάρια βελτίωσης του μικροκλίματος της σχολικής αυλής, αξιολογούμενο μέσω των δεικτών PET και UTCI.

2.4.6. Ο ρόλος της προσομοίωσης στον βιοκλιματικό σχεδιασμό

Η πρόοδος των BIM εργαλείων έχει ενισχύσει τη δυνατότητα αποτύπωσης και προσομοίωσης του μικροκλίματος τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους (Fung et al., 2022). Οι ψηφιακές προσομοιώσεις επιτρέπουν:

- τον υπολογισμό ηλιασμού και σκίασης,
- την ανάλυση θερμικών φορτίων,
- την προσομοίωση σκιάστρων και φυτεύσεων,
- την πρόβλεψη Tmrt και θερμικής άνεσης πριν την κατασκευή.

Η ενσωμάτωση BIM στον βιοκλιματικό σχεδιασμό βελτιώνει τη λήψη αποφάσεων και μειώνει τα σφάλματα σχεδιασμού, ενώ επιτρέπει πολλαπλές δοκιμές σεναρίων που διαφορετικά θα απαιτούσαν υψηλό κόστος υλοποίησης (Duarte et al., 2021; Yao, 2025).

2.5. Ενεργειακή απόδοση σχολικών κτιρίων- Προβλήματα και λύσεις

Η ενεργειακή απόδοση των σχολικών κτιρίων αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τη βιωσιμότητα, την άνεση των μαθητών και το λειτουργικό κόστος των εκπαιδευτικών υποδομών. Παγκοσμίως, μεγάλο ποσοστό των σχολικών συγκροτημάτων κατασκευάστηκε πριν από την υιοθέτηση σύγχρονων κανονισμών θερμομόνωσης και ενεργειακού σχεδιασμού, με αποτέλεσμα να εμφανίζει υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, χαμηλή θερμική απόδοση και σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (IEA SHC Programme, 2015).

2.5.1. Κύρια ενεργειακά προβλήματα στα σχολικά κτίρια

Σύμφωνα με διεθνείς μελέτες, τα βασικότερα προβλήματα που επηρεάζουν την ενεργειακή συμπεριφορά των σχολικών κτιρίων περιλαμβάνουν:

1. Ανεπαρκής θερμομόνωση κελύφους

Πολλά σχολικά κτίρια διαθέτουν παλαιούς τοίχους, οροφές και δάπεδα με χαμηλές θερμομονωτικές ιδιότητες, γεγονός που οδηγεί σε μεγάλες θερμικές απώλειες τον χειμώνα και υπερθέρμανση το καλοκαίρι (De Angelis et al., 2017).

Η ανεπάρκεια της μόνωσης αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη και μειώνει την ομοιομορφία της θερμοκρασίας στους χώρους διδασκαλίας.

2. Παλαιά και μη αποδοτικά συστήματα θέρμανσης/ψύξης (HVAC)

Πολλές σχολικές μονάδες λειτουργούν με συστήματα θέρμανσης και ψύξης χαμηλής απόδοσης, τα οποία είτε δεν μπορούν να καλύψουν τις πραγματικές ανάγκες είτε λειτουργούν με υψηλές απώλειες (U.S. Department of Energy, 2007).

Η έλλειψη συστημάτων ελεγχόμενου φυσικού ή μηχανικού αερισμού οδηγεί επίσης σε κακή ποιότητα εσωτερικού αέρα, επηρεάζοντας θερμική άνεση και υγεία.

3. Παλαιά κουφώματα χωρίς ενεργειακές προδιαγραφές

Τα μεγάλα παράθυρα αποτελούν χαρακτηριστικό πολλών σχολικών κτιρίων. Χωρίς διπλούς υαλοπίνακες, σκίαση ή επαρκή θερμομόνωση, οι αίθουσες παρουσιάζουν έντονα θερμικά κέρδη το καλοκαίρι και απώλειες τον χειμώνα (Pellegrino et al., 2015).

4. Ανεπαρκής ή παρωχημένος φωτισμός

Ο παλαιός φωτισμός αυξάνει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και συμβάλλει στη θερμική επιβάρυνση. Η έλλειψη αξιοποίησης φυσικού φωτισμού επιβαρύνει επιπλέον το ενεργειακό ισοζύγιο (Ma et al., 2021).

5. Έλλειψη βιοκλιματικού σχεδιασμού στον αύλειο χώρο

Οι θερμές επιφάνειες των αυλών αυξάνουν το θερμικό φορτίο των κτιρίων, ιδιαίτερα σε νότιες και δυτικές όψεις. Η θερμική ακτινοβολία μεταφέρεται στα κτίρια αυξάνοντας τα ψυκτικά φορτία (Antoniadis et al., 2020).

2.5.2. Σύγχρονες λύσεις για ενεργειακή αναβάθμιση σχολικών κτιρίων

Οι διεθνείς οδηγίες προτείνουν ένα συνδυασμό παθητικών και ενεργητικών στρατηγικών, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν μεμονωμένα ή συνολικά στο πλαίσιο μιας ενεργειακής ανακαίνισης:

1. Αναβάθμιση κτιριακού κελύφους

Η ενίσχυση της θερμομόνωσης, η χρήση ενεργειακών κουφωμάτων και η αντιμετώπιση θερμικών γεφυρών αποτελούν την αποτελεσματικότερη παρέμβαση για μείωση θερμικών απωλειών και ψυκτικών φορτίων (Peixoto, 2020).

2. Εγκατάσταση συστημάτων σκίασης

Σκίαστρα οριζόντια, κατακόρυφα, δυναμικά ή φυτεμένα συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση της T_{mrt} και στην αποφυγή υπερθέρμανσης (Brown & Gillespie, 2011).

3. Βελτίωση και αυτοματοποίηση συστημάτων HVAC

Η χρήση ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων, η εγκατάσταση συστημάτων ανάκτησης θερμότητας και η αυτοματοποίηση λειτουργιών μπορούν να μειώσουν σημαντικά την κατανάλωση (U.S. Department of Energy, 2007).

4. Αναβάθμιση φωτισμού

LED φωτισμός και αξιοποίηση φυσικού φωτισμού μειώνουν το ηλεκτρικό φορτίο και βελτιώνουν την ποιότητα φωτισμού (Pellegrino et al., 2015).

5. Παρεμβάσεις στον αύλειο χώρο

Η χρήση ψυχρών υλικών, η αύξηση φυτεύσεων και η ενίσχυση της σκίασης μειώνουν τη θερμική καταπόνηση και τα θερμικά φορτία στο κτίριο (Antoniadis et al., 2020).

6. Χρήση BIM για σχεδιασμό και αξιολόγηση λύσεων

Τα εργαλεία BIM, όπως Autodesk Revit και Insight, επιτρέπουν την προσομοίωση ενεργειακής απόδοσης, τη σύγκριση σεναρίων και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων (Vilutienė et al., 2021; Duarte et al., 2021).

2.5.3. Νομοθετικό Πλαίσιο: EPBD, nZEB και KENAK

Η ενεργειακή αναβάθμιση των σχολικών κτιρίων δεν αποτελεί αποκλειστικά τεχνική ανάγκη, αλλά και θεσμική υποχρέωση, καθώς εντάσσεται σε ένα πολυεπίπεδο ευρωπαϊκό και εθνικό νομοθετικό πλαίσιο που θέτει δεσμευτικούς στόχους ενεργειακής απόδοσης για τα δημόσια κτίρια. Η Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (Energy Performance of Buildings Directive; EPBD, 2010/31/EE) αποτέλεσε τον ακρογωνιαίο λίθο της ευρωπαϊκής ενεργειακής πολιτικής στον κτιριακό τομέα, εισάγοντας την υποχρέωση όλα τα νέα κτίρια που ανεγείρονται μετά το 2020 και συγκεκριμένα τα δημόσια μετά το

2018, να πληρούν τις προδιαγραφές κτιρίων σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης (nearly Zero Energy Buildings; nZEB) (European Parliament, 2010).

Η αναθεώρηση της EPBD το 2024 (Οδηγία 2024/1275/EE) εισάγει επιπλέον υποχρεώσεις για την ενεργειακή αναβάθμιση του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος, με έμφαση στα δημόσια και εκπαιδευτικά κτίρια. Συγκεκριμένα, προβλέπεται η σταδιακή ανακαίνιση τουλάχιστον του 3% της επιφάνειας δημόσιων κτιρίων ετησίως έως το 2030, με στόχο τη μετατροπή τους σε κτίρια μηδενικής εκπομπής έως το 2050 (European Parliament, 2024). Στο πλαίσιο αυτό, οι σχολικές υποδομές ως κτίρια αυξημένης κοινωνικής αξίας και εντατικής χρήσης αποτελούν πρωταρχικό πεδίο εφαρμογής.

Σε εθνικό επίπεδο, ο Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK), ο οποίος εναρμονίζεται με την EPBD, ορίζει τις ελάχιστες ενεργειακές απαιτήσεις για νέα και ανακαινιζόμενα κτίρια στην Ελλάδα, κατηγοριοποιώντας τα σε ενεργειακές κλάσεις A+ έως H. Οι τεχνικές προδιαγραφές υλοποίησης παρέχονται από τις Τεχνικές Οδηγίες Τεχνικού Επιμελητηρίου (TOTEΕ), και συγκεκριμένα τις TOTEΕ 20701-1 έως 20701-4, οι οποίες καλύπτουν θερμοφυσικές ιδιότητες υλικών, κλιματικά δεδομένα, υπολογισμό ενεργειακών φορτίων και απαιτήσεις φωτισμού. Σύμφωνα με τον D'Agostino et al. (2017), η πλειονότητα των ευρωπαϊκών κρατών, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, ορίζει τα nZEB ως κτίρια με κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας $< 50-70 \text{ kWh/m}^2/\text{έτος}$, τιμή που αντιστοιχεί στην ενεργειακή κλάση A ή A+ του KENAK.

Στην παρούσα εργασία, το νομοθετικό αυτό πλαίσιο λειτουργεί αφενός, ως ποσοτικός στόχος αξιολόγησης των σεναρίων αναβάθμισης, δηλαδή σε ποιο βαθμό κάθε σενάριο συμβάλλει στην προσέγγιση των απαιτήσεων nZEB αφετέρου, ως θεσμικό επιχείρημα που ενισχύει την κοινωνική και πολιτική αναγκαιότητα της παρέμβασης, δεδομένου ότι τα σχολικά κτίρια υπόκεινται σε δεσμευτικές προθεσμίες ενεργειακής αναβάθμισης στο πλαίσιο της αναθεωρημένης ευρωπαϊκής οδηγίας.

2.5.4. Συνολική αξιολόγηση

Από τις διεθνείς μελέτες διαφαίνεται ότι ολοκληρωμένα πακέτα παρεμβάσεων μπορούν να επιτύχουν μείωση κατανάλωσης ενέργειας της τάξης του 40-60%, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνουν αισθητά τη θερμική άνεση και την ποιότητα εσωτερικού αέρα (IEA SHC Programme, 2015; Pellegrino et al., 2015). Τα σχολικά κτίρια, ως δημόσιες υποδομές με

έντονη κοινωνική διάσταση, αποτελούν ιδανικό πεδίο εφαρμογής και επίδειξης βιώσιμων πρακτικών (Di Giuda et al., 2015).

2.6. BIM για ενεργειακή και θερμική ανάλυση

2.6.1. Building Information Modelling (BIM)

Το Building Information Modelling (BIM) ορίζεται ως μια ψηφιακή αναπαράσταση των φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός κτιρίου, η οποία λειτουργεί ως κοινή βάση δεδομένων για όλες τις πληροφορίες που αφορούν τον κύκλο ζωής του (Vilutienė et al., 2021). Ως ενιαίο πληροφοριακό περιβάλλον, το BIM επιτρέπει τη συνεργασία μεταξύ αρχιτεκτόνων, μηχανικών, κατασκευαστών και εργολάβων δημιουργώντας μία κοινή βάση για όλα τα στάδια μελέτης και λειτουργίας ενός κτιρίου (Alkhatib & Alawag, 2021).

Η θεωρία του BIM στηρίζεται στην αρχή ότι κάθε μοντέλο αποτελεί κατ' ανάγκη μια προσέγγιση της πραγματικότητας και όχι πλήρη αναπαράστασή της. Κατ' επέκταση της γενικής αρχής της υπολογιστικής μοντελοποίησης -που αναγνωρίζει κάθε μοντέλο ως προσεγγιστική αναπαράσταση της πραγματικότητας - το BIM δεν αποσκοπεί στην τέλεια αναπαραγωγή του φυσικού κτιρίου, αλλά στη δημιουργία ενός αξιόπιστου ψηφιακού υποβάθρου για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων κατά τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία (Duarte et al., 2021; Eastman et al., 2011).

Στη Φινλανδία, οι Common BIM Requirements 2012 (COBIM 2012) έχουν καθιερωθεί ως βασικό πλαίσιο για την εφαρμογή BIM διαδικασιών σε δημόσια και ιδιωτικά έργα, μέσω των προδιαγραφών που ανέπτυξε το buildingSMARTFinland σε συνεργασία με τον δημόσιο τομέα. Παράλληλα, σε διεθνές επίπεδο, η διαλειτουργικότητα στην AEC βιομηχανία εξασφαλίζεται όλο και περισσότερο μέσω ανοικτών προτύπων ανταλλαγής δεδομένων, με κυριότερα τα Industry Foundation Classes (IFC) του buildingSMART International και το σχήμα Green Building XML (gbXML), το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως ως ενδιάμεση φόρμα ανταλλαγής μεταξύ BIM λογισμικών και εργαλείων ενεργειακών προσομοιώσεων (buildingSMARTFinland, 2012; Yang et al., 2022).

Σε εθνικό επίπεδο, η Ελλάδα έχει ξεκινήσει τη θεσμική διαδικασία εισαγωγής του BIM στα δημόσια έργα. Τον Ιανουάριο του 2024, το Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών έθεσε σε δημόσια διαβούλευση την Εθνική Στρατηγική και τον Οδικό Χάρτη για την εφαρμογή

του BIM, η οποία εγκρίθηκε επίσημα τον Μάιο του 2024 (Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, 2024). Η στρατηγική αυτή προβλέπει τη σταδιακή εισαγωγή του BIM σε δημόσια κατασκευαστικά έργα, την τροποποίηση της νομοθεσίας περί δημοσίων συμβάσεων - ιδίως του Ν. 4412/2016 - και την ανάπτυξη εθνικών προτύπων βάσει του ΕΛΟΤ EN ISO 19650. Παράλληλα, μέσω των Περιφερειακών Προγραμμάτων του ΕΣΠΑ 2021-2027, χρηματοδοτούνται έργα ενεργειακής αναβάθμισης σχολικών κτιρίων σε πολλές περιφέρειες της χώρας, ενισχύοντας έτσι τη ζήτηση για τεκμηριωμένες ψηφιακές μελέτες αναβάθμισης (Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, 2025; Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, 2025). Το πλαίσιο αυτό καθιστά τη χρήση BIM όχι απλώς τεχνικά αναγκαία, αλλά και στρατηγικά ευθυγραμμισμένη με τις επερχόμενες θεσμικές απαιτήσεις για τα δημόσια εκπαιδευτικά κτίρια στην Ελλάδα.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του BIM, όπως επισημαίνει η πρόσφατη βιβλιογραφία, περιλαμβάνουν:

- Ενοποίηση διαφορετικών ειδικοτήτων σε ένα κοινό ψηφιακό περιβάλλον.
- Ακρίβεια γεωμετρικών και υλικών δεδομένων.
- Αξιοποίηση για ενεργειακές, θερμικές, φωτιστικές και αεροδυναμικές προσομοιώσεις.
- Υποστήριξη λήψης αποφάσεων μέσω BuildingPerformanceAnalysis (BPA).
- Εξοικονόμηση χρόνου και πόρων σε σχέση με παραδοσιακές μεθόδους.
- Ισχυρή βάση για εκτίμηση βιωσιμότητας και κύκλου ζωής κτιρίων (Alkhatib & Alawag, 2021; Duarte et al., 2021).

Η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου BIM μοντέλου συμβάλλει όχι μόνο στην ενεργειακή ανάλυση, αλλά και στη δημιουργία ενός ψηφιακού υποβάθρου που μπορεί να αξιοποιηθεί σε πλήθος επιπλέον εφαρμογών. Το μοντέλο μπορεί να λειτουργήσει ως πλατφόρμα για 4D χρονικό προγραμματισμό, 5D κοστολόγηση, τεchnοοικονομικές αναλύσεις, καθώς και για εκτίμηση κύκλου ζωής (LCA), υποστηρίζοντας τον ολιστικό σχεδιασμό και τη μακροχρόνια διαχείριση της σχολικής υποδομής (Vilutienė et al., 2021; Yao, 2025). Η αυξανόμενη αποδοχή του BIM διεθνώς οφείλεται ακριβώς σε αυτές τις δυνατότητες, καθώς επιτρέπει ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό περιβάλλον για αρχιτεκτονικό, στατικό, ηλεκτρομηχανολογικό σχεδιασμό, αλλά και για ενεργειακές αναλύσεις, προσομοιώσεις

θερμικής άνεσης, διαχείριση έργου και λειτουργία εγκαταστάσεων (facility management) σε όλο τον κύκλο ζωής του κτιρίου (Alkhatib & Alawag, 2021; Vilutienė et al., 2021; Ren, 2025).

2.6.2. BIM στην ενεργειακή προσομοίωση

Η ενεργειακή ανάλυση ενός κτιρίου απαιτεί υψηλή ακρίβεια στην περιγραφή του κελύφους, των συστημάτων και των συνθηκών λειτουργίας. Τα BIM μοντέλα επιτρέπουν την αυτόματη εξαγωγή κρίσιμων δεδομένων, όπως:

- θερμοφυσικές ιδιότητες υλικών,
- ποσοστά ανοιγμάτων στις όψεις,
- σκίαση και ηλιασμός,
- κατανομή θερμικών ζωνών
- συστήματα HVAC και φωτισμού (Duarte et al., 2021; Vilutienė et al., 2021; Fung et al., 2022; Alkhatib & Alawag, 2021).

Η ενσωμάτωση αυτών των πληροφοριών σε λογισμικά ανάλυσης, όπως το Autodesk Insight, το DesignBuilder, το EnergyPlus ή άλλα εξειδικευμένα εργαλεία, επιτρέπει την εκπόνηση λεπτομερών ενεργειακών προσομοιώσεων (Duarte et al., 2021).

Επιπλέον, η χρήση BIM μειώνει δραστικά σφάλματα που παραδοσιακά εμφανίζονταν με χειροκίνητη εισαγωγή δεδομένων, οδηγώντας σε πιο αξιόπιστες προσομοιώσεις και αποφάσεις καθώς μέσω της αυτοματοποιημένης μεταφοράς δεδομένων από το ψηφιακό μοντέλο προς τα λογισμικά προσομοίωσης, εξασφαλίζεται μεγαλύτερη ακρίβεια στις υπολογιστικές διαδικασίες και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για την αξιολόγηση των ενεργειακών παρεμβάσεων (Di Giuda et al., 2015).

Η πολυπλοκότητα των παρεμβάσεων σε σχολικές υποδομές, η ανάγκη ακριβούς αποτύπωσης, οι ενεργειακές προσομοιώσεις και ο συντονισμός πολλών ειδικοτήτων καθιστούν το Building Information Modeling (BIM) βασικό εργαλείο στον σύγχρονο τεχνικό σχεδιασμό. Το BIM δεν αποτελεί απλώς τεχνολογία τρισδιάστατης μοντελοποίησης, αλλά ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον που επιτρέπει τη διαχείριση του κτιρίου καθ' όλο τον κύκλο ζωής του, από την αποτύπωση και τη μελέτη έως τη λειτουργία και συντήρησή του (Vilutienė et al., 2021; Duarte et al., 2021).

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η Οδηγία 2014/24/ΕΕ προωθεί την υποχρεωτική χρήση ψηφιακών μεθόδων στα δημόσια έργα (European Parliament, 2014; EU BIM Task Group, 2017). Χώρες όπως το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ιταλία και η Ολλανδία έχουν ήδη θεσμοθετήσει την υποχρεωτική εφαρμογή BIM. Η Ελλάδα ακολουθεί σταδιακά την ίδια πορεία, με την εισαγωγή BIM στα δημόσια έργα και την προγραμματισμένη μελλοντική ενσωμάτωσή του στις διαδικασίες έκδοσης οικοδομικών αδειών και ψηφιακής τεκμηρίωσης κατασκευών.

Η συμβολή του BIM σε έργα εκπαιδευτικών κτιρίων έχει αποδειχθεί στην πράξη. Η εργασία της Balikei (2024) για την ανακαίνιση του σχολικού συγκροτήματος Amaldi-Sraffa στο Τορίνο ανέδειξε ότι η χρήση BIM σε συνδυασμό με εργαλεία ενεργειακής ανάλυσης οδήγησε σε μείωση του ενεργειακού φορτίου κατά 81-83%. Το BIM προωθεί την ακρίβεια, την αποφυγή σφαλμάτων, τη δυνατότητα σύγκρισης σεναρίων και την αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ μηχανικών, αρχιτεκτόνων και ενεργειακών μελετητών.

Για τους λόγους αυτούς, η ενσωμάτωση του BIM στη μελέτη και αναβάθμιση σχολικών υποδομών δεν αποτελεί απλώς τεχνική επιλογή, αλλά στρατηγική αναγκαιότητα, συμβατή με τις ευρωπαϊκές κατευθύνσεις, τις τάσεις ψηφιοποίησης του τεχνικού κλάδου και τις επερχόμενες θεσμικές εξελίξεις.

2.6.3. BIM και θερμική άνεση

Σύγχρονες εφαρμογές δείχνουν ότι το BIM μπορεί να υποστηρίξει υπολογισμούς θερμικής άνεσης σε πραγματικές συνθήκες (Otuh, 2016; Yao, 2025; Schlueter & Thesseling, 2009). Τα BIM μοντέλα επιτρέπουν:

- υπολογισμό PMV/PPD ανά θερμική ζώνη,
- εξαγωγή T_{mrt} μέσω ακτινοβολίας και ηλιασμού,
- προσομοίωση σκίασης και εισόδου φωτός,
- δυναμική προσαρμογή υλικών και συστημάτων,
- συνδυασμό με εξωτερικά κλιματικά δεδομένα.

Η δυνατότητα ενσωμάτωσης δεδομένων πραγματικών μετρήσεων όπως καταγραφές θερμοκρασίας, ποσοστά CO₂ και δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας ενισχύει περαιτέρω την ακρίβεια των προσομοιώσεων και μειώνει την απόκλιση μεταξύ θεωρητικών και πραγματικών τιμών.

2.6.4. BIM για αξιολόγηση σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του BIM είναι η δυνατότητα αξιολόγησης πολλαπλών σεναρίων βελτίωσης χωρίς την ανάγκη κατασκευής ή πειραματισμού σε πραγματικό περιβάλλον. Όπως δείχνουν διεθνείς μελέτες:

- αλλαγές στη μόνωση,
- αντικατάσταση υαλοστασίων,
- βελτιστοποίηση σκίασης,
- ενίσχυση φυσικού αερισμού,
- βελτίωση HVAC συστημάτων,
- αλλαγές υλικών στον αύλειο χώρο

μπορούν να εξεταστούν ως σενάρια μέσα από το ίδιο BIM μοντέλο, επιτρέποντας την ποσοτική σύγκριση κόστους-οφέλους (Vilutienė et al., 2021; Otuh, 2016).

Μελέτες σε σχολικά κτίρια έδειξαν ότι η συνδυασμένη χρήση BIM και ενεργειακών εργαλείων μπορεί να οδηγήσει σε 30-60% μείωση ενεργειακής κατανάλωσης όταν εφαρμοστούν στρατηγικές παθητικής και ενεργητικής αναβάθμισης (Di Giuda et al., 2015; De Angelis et al., 2017).

2.6.5. Διαλειτουργικότητα BIM (IFC & gbXML)

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του Building Information Modeling (BIM) είναι η δυνατότητα διαλειτουργικότητας (interoperability) μεταξύ διαφορετικών λογισμικών σχεδιασμού και ανάλυσης. Η διαλειτουργικότητα επιτρέπει την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ αρχιτεκτονικών, στατικών, ηλεκτρομηχανολογικών και ενεργειακών εφαρμογών, διασφαλίζοντας τη συνέχεια της πληροφορίας σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός κτιρίου (Eastman et al., 2011).

Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν τα ανοικτά πρότυπα ανταλλαγής δεδομένων, όπως τα Industry Foundation Classes (IFC) και το Green Building XML (gbXML). Το πρότυπο IFC, που αναπτύχθηκε από τον οργανισμό buildingSMART, επιτρέπει την ανταλλαγή γεωμετρικών και πληροφοριακών δεδομένων μεταξύ διαφορετικών λογισμικών BIM, διασφαλίζοντας ότι τα μοντέλα μπορούν να

χρησιμοποιηθούν ανεξάρτητα από την πλατφόρμα δημιουργίας τους (buildingSMART International, 2020).

Αντίστοιχα, το gbXML αποτελεί ένα πρότυπο που έχει σχεδιαστεί ειδικά για τη μεταφορά δεδομένων από BIM μοντέλα προς λογισμικά ενεργειακής προσομοίωσης, όπως το EnergyPlus, το Design Builder και το Autodesk Revit. Μέσω του gbXML μπορούν να μεταφερθούν πληροφορίες σχετικά με τη γεωμετρία του κτιρίου, τις θερμικές ζώνες, τα υλικά και τις επιφάνειες ανοιγμάτων, διευκολύνοντας την εκτέλεση ενεργειακών αναλύσεων χωρίς την ανάγκη επαναδημιουργίας του μοντέλου σε διαφορετικό περιβάλλον λογισμικού (Otuh, 2016).

2.6.6. BIM και Building Performance Analysis (BPA)

Η έννοια του Building Performance Analysis (BPA) αναφέρεται στη συστηματική αξιολόγηση της ενεργειακής, περιβαλλοντικής και λειτουργικής απόδοσης ενός κτιρίου μέσω υπολογιστικών μοντέλων και προσομοιώσεων. Στο πλαίσιο του σύγχρονου σχεδιασμού, το BIM αποτελεί βασικό εργαλείο για την υλοποίηση αναλύσεων BPA, καθώς επιτρέπει τη σύνδεση του ψηφιακού μοντέλου του κτιρίου με εξειδικευμένα λογισμικά προσομοίωσης (Schlueter & Thesseling, 2009).

Μέσω της ενσωμάτωσης γεωμετρικών, κατασκευαστικών και λειτουργικών δεδομένων, τα BIM μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση κρίσιμων δεικτών απόδοσης, όπως η ενεργειακή κατανάλωση, τα θερμικά φορτία, οι συνθήκες θερμικής άνεσης, η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος και η επίδραση των σχεδιαστικών επιλογών στην ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου (Alkhatib & Alawag, 2021).

Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού, καθώς επιτρέπει τη δοκιμή εναλλακτικών λύσεων και τη σύγκριση διαφορετικών σεναρίων πριν από την υλοποίηση των παρεμβάσεων. Με τον τρόπο αυτό, οι μελετητές μπορούν να εντοπίσουν τις βέλτιστες στρατηγικές βιοκλιματικού σχεδιασμού και ενεργειακής αναβάθμισης, μειώνοντας το κόστος και βελτιώνοντας την απόδοση των προτεινόμενων λύσεων (Duarte et al., 2021). Στην περίπτωση των σχολικών κτιρίων, η εφαρμογή BIM-based Building Performance Analysis επιτρέπει την αξιολόγηση της επίδρασης παρεμβάσεων όπως η βελτίωση της θερμομόνωσης, η χρήση σκιάστρων, η βελτιστοποίηση φυσικού αερισμού ή η αναβάθμιση των συστημάτων HVAC. Η δυνατότητα αυτή καθιστά

το BIM ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων κατά τον σχεδιασμό και την ενεργειακή αναβάθμιση εκπαιδευτικών υποδομών.

2.7. Autodesk Revit & Autodesk Forma Carbon Insights σε ενεργειακές προσομοιώσεις

Η χρήση ψηφιακών εργαλείων προσομοίωσης αποτελεί βασικό πυλώνα στην ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Στο πλαίσιο αυτό, το Autodesk Revit σε συνδυασμό με επικουρικά προγράμματα ενσωματωμένα στο περιβάλλον εργασίας του Revit προσφέρει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον για τη δημιουργία BIM μοντέλων και τη διενέργεια ενεργειακών και θερμικών προσομοιώσεων. Μετά την οριστική απόσυρση του GreenBuildingStudio (GBS), το Autodesk Insight το οποίο μετονομάστηκε σε Autodesk Forma Carbon Insights στα τέλη του 2025, είναι αυτό του αποτελεί πλέον την κύρια πλατφόρμα της Autodesk για την ενεργειακή αποτίμηση και την υποστήριξη σχεδιαστικών αποφάσεων παρέχοντας συνολική ανάλυση άνθρακα, συμπεριλαμβανομένου του ενσωματωμένου και του λειτουργικού άνθρακα, σε όλα τα στάδια του σχεδιασμού (Autodesk, 2026).

2.7.1. Autodesk Revit ως εργαλείο ενεργειακής μοντελοποίησης

Το Autodesk Revit λειτουργεί ως κεντρική πληροφοριακή πλατφόρμα δεδομένων ενός ολοκληρωμένου BIM μοντέλου, περιλαμβάνοντας:

- γεωμετρία χώρου και δομικών στοιχείων,
- ιδιότητες υλικών (U-values, θερμική μάζα),
- θερμικές ζώνες (HVAC zones),
- επιφάνειες ανοιγμάτων και σκίασης,
- πληροφορίες χρήσης και ωραρίων λειτουργίας.

Η ακρίβεια των ενεργειακών αποτελεσμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σωστή παραμετροποίηση του BIM μοντέλου (Vilutienė et al., 2021). Οι θερμικές ζώνες (spaces / zones) και η πληρότητα των δομικών στοιχείων αποτελούν κρίσιμα στοιχεία, καθώς το Revit εξάγει τα δεδομένα αυτά στο Autodesk FormaCarbonInsights για τη διενέργεια της δυναμικής ενεργειακής ανάλυσης.

2.7.2. Autodesk Forma Carbon Insights

Το Autodesk Insight είναι μια cloud-based πλατφόρμα ενεργειακής προσομοίωσης που λειτουργεί σε άμεση σύνδεση με το Revit και αξιοποιεί υπολογιστικές μηχανές όπως Energy Plus και Radiance για τον υπολογισμό ενεργειακών δεικτών (Autodesk, 2023; Duarte et al., 2021). Η λειτουργία του βασίζεται στην αξιολόγηση της πραγματικής απόδοσης του κτιρίου, δίνοντας τη δυνατότητα στον μελετητή να εξετάζει και να συγκρίνει σε σύντομο χρόνο τις επιπτώσεις διαφορετικών σχεδιαστικών επιλογών στην ενεργειακή και θερμική συμπεριφορά του κτιρίου (Autodesk, 2023; Duarte et al., 2021).

Μέσω του Insight μπορούν να υπολογιστούν δείκτες όπως:

- Κατανάλωση ενέργειας,
- Θερμικά φορτία,
- Απόδοση κελύφους,
- HVAC αποδοτικότητα,
- επίδραση σκίασης και ανοιγμάτων,
- δείκτες φυσικού φωτισμού (daylight autonomy & glare potential),
- εκπομπές CO₂.

Το Insight παρουσιάζει τα αποτελέσματα με τη μορφή EnergyRange, επιτρέποντας συγκρίσεις μεταξύ πολλαπλών σεναρίων σχεδιασμού (Duarte et al., 2021). Η σύνδεση των BIM μοντέλων με εργαλεία ενεργειακής προσομοίωσης πραγματοποιείται μέσω των διαδικασιών διαλειτουργικότητας που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

2.7.3. Περιορισμοί του Autodesk Forma Insights (πρώην Insight)

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά του, το Autodesk Forma Insights παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Η πλατφόρμα βασίζεται στον υπολογιστικό πυρήνα DOE-2, ένα δοκιμασμένο αλλά παλαιότερης γενιάς εργαλείο ενεργειακής προσομοίωσης, το οποίο παρέχει λιγότερο λεπτομερή δυναμική ανάλυση σε σύγκριση με νεότερες μεθόδους, όπως ο EnergyPlus (Yang et al., 2022). Επιπλέον, το Insight προσφέρει περιορισμένη δυνατότητα ανάλυσης φυσικού αερισμού, συνεπώς δεν μπορεί να προσομοιώσει με ακρίβεια ροές αέρα μέσω ανοιγμάτων ή διαμπερούς εξάερωσης, οι οποίες είναι κρίσιμες παράμετροι στον

βιοκλιματικό σχεδιασμό σχολικών κτιρίων (Duarte et al., 2021). Επιπρόσθετα, η cloud-based λειτουργία του εργαλείου απαιτεί σταθερή σύνδεση στο διαδίκτυο και συνεχή ενεργή άδεια χρήσης, γεγονός που μπορεί να αποτελεί πρακτικό περιορισμό σε εκπαιδευτικά ή δημόσια περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους. Τέλος, τα ωράρια λειτουργίας και τα εσωτερικά φορτία βασίζονται σε τυποποιημένα πρότυπα (templates) του ASHRAE, τα οποία χρειάζονται προσεκτική προσαρμογή για να αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια τη λειτουργία ελληνικών σχολείων -ειδικά ως προς τα ωράρια, την πληρότητα αιθουσών και τις εποχιακές διακυμάνσεις χρήσης. Ωστόσο, το γεγονός αυτό δεν ακυρώνει τη χρησιμότητα του εργαλείου. Αντίθετα, αναδεικνύει την ανάγκη προσεκτικής ερμηνείας των αποτελεσμάτων του και διασταύρωσής τους, όπου είναι δυνατόν, με εναλλακτικές μεθόδους υπολογισμού ή με πραγματικά δεδομένα.

2.7.4. Εφαρμογή σε σχολικά κτίρια

Η εφαρμογή των εργαλείων αυτών στα σχολικά κτίρια θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική λόγω:

- προβλημάτων υπερθέρμανσης (ιδίως σε νότιες και δυτικές όψεις),
- υψηλής κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση,
- συχνών αστοχιών σε μόνωση και υαλοστάσια,
- ανάγκης για τεκμηριωμένες παρεμβάσεις χαμηλού κόστους.

Έρευνες σε σχολεία έχουν δείξει ότι η χρήση Revit & Insight μπορεί να συμβάλει σε ενεργειακή μείωση 30-60%, ανάλογα με τις παρεμβάσεις (Vilutienė et al., 2021; Di Giuda et al., 2015).

Τα BIM εργαλεία επιτρέπουν επίσης:

- υπολογισμό PMV/PPD σε αίθουσες,
- εκτίμηση T_{mr,t} μέσω ηλιασμού,
- ανάλυση θερμικών ροών ανά επιφάνεια,
- αξιολόγηση σκιάστρων στην αυλή ή στις όψεις,
- σύνδεση με μετρήσεις (όργανα θερμοκρασίας-υγρασίας-ακτινοβολίας) (Schlueter & Thesseling, 2009; Otuh, 2016; Yao, 2025; Vilutienė et al., 2021).

2.7.5. Ο ρόλος BIM στη παρούσα εργασία

Στην παρούσα μελέτη, η χρήση Revit και Insight:

- θα επιτρέψει την ψηφιακή αποτύπωση του σχολικού συγκροτήματος,
- θα παρέχει ποσοτικές ενεργειακές προσομοιώσεις,
- θα επιτρέψει τη σύγκριση σεναρίων (σκίαση, μόνωση, υαλοστάσια),
- θα συμβάλει στον βιοκλιματικό επανασχεδιασμό τόσο των εσωτερικών όσο και των εξωτερικών χώρων.

Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα ολοκληρωμένο, τεκμηριωμένο πλαίσιο για τη διατύπωση προτάσεων ενεργειακής και θερμικής αναβάθμισης των σχολικών υποδομών.

2.8. Διεθνείς μελέτες αντίστοιχων αναβαθμίσεων

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί σημαντική αύξηση των ερευνών που συνδυάζουν τον βιοκλιματικό και ενεργειακό επανασχεδιασμό εκπαιδευτικών κτιρίων με τη χρήση εργαλείων BIM. Οι μελέτες αυτές παρέχουν πολύτιμα παραδείγματα μεθοδολογίας και αποτελεσμάτων, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν ως σημείο αναφοράς για την παρούσα εργασία.

Μία από τις πλέον χαρακτηριστικές εργασίες είναι αυτή των Di Giuda, Villa και Piantanida (2015), οι οποίοι εξετάζουν την ενεργειακή ανακαίνιση σχολικών κτιρίων μέσω BIM. Στη μελέτη τους, αναπτύσσεται λεπτομερές BIM μοντέλο σχολικού κτιρίου, το οποίο χρησιμοποιείται για την αποτίμηση της υφιστάμενης κατάστασης και για τη σύγκριση διαφορετικών σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης. Οι συγγραφείς δείχνουν ότι στοχευμένες παρεμβάσεις σε κελυφος, υαλοστάσια και συστήματα σκίασης μπορούν να μειώσουν σημαντικά τα θερμικά φορτία και να βελτιώσουν την άνεση των χρηστών, αναδεικνύοντας τον επανασχεδιασμό με χρήση BIM ως αποτελεσματικό εργαλείο λήψης αποφάσεων (Di Giuda et al., 2015).

Αντίστοιχα, η εργασία του Otuh (2016) εστιάζει σε εκπαιδευτικό κτίριο και αξιοποιεί BIM σε συνδυασμό με ενεργειακά εργαλεία (Revit και Green Building Studio ή Insight) για να διερευνήσει τη βιωσιμότητα διαφορετικών παρεμβάσεων. Το BIM μοντέλο λειτουργεί ως κεντρικός κόμβος δεδομένων, ενώ η ενεργειακή προσομοίωση εξετάζει την επίδραση

αλλαγών στο κέλυφος, στα συστήματα HVAC και στις παραμέτρους χρήσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η συνδυασμένη χρήση BIM και ενεργειακής ανάλυσης οδηγεί σε πιο αξιόπιστους υπολογισμούς και στενότερη σύγκλιση μεταξύ θεωρητικών και πραγματικών ενεργειακών επιδόσεων (Otuh, 2016).

Σε επίπεδο ευρωπαϊκών σχολικών κτιρίων, η μελέτη της Balicki (2024) εστιάζει σε ιταλικά σχολικά κτίρια και εξετάζει συγκριτικά διαφορετικές στρατηγικές ενεργειακής αναβάθμισης με χρήση BIM και εξειδικευμένου λογισμικού ενεργειακής ανάλυσης. Η εργασία αναδεικνύει τη σημασία της σωστής θερμικής κατηγοριοποίησης σε ζώνες, της αναβάθμισης της μόνωσης και της επιλογής αποδοτικών υαλοπινάκων, καθώς και τη συμβολή του BIM στην εκτίμηση του κόστους και του οφέλους των παρεμβάσεων (Balicki, 2024). Τα ευρήματα είναι ιδιαίτερα σημαντικά για σχολικά κτίρια με παρόμοια γεωμετρικά και ενεργειακά χαρακτηριστικά.

Σε επίπεδο κελύφους, η μελέτη της Peixoto (2020) επικεντρώνεται στην εφαρμογή βιοκλιματικών στρατηγικών στις όψεις σχολικών κτιρίων. Μέσω BIM μοντελοποίησης και ενεργειακών προσομοιώσεων, διερευνώνται διαφορετικές διαμορφώσεις σκίασης, πάχους μόνωσης και τύπων υαλοπινάκων. Η εργασία επισημαίνει ότι οι όψεις, ως βασικός διαμεσολαβητής μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τόσο την ενεργειακή κατανάλωση όσο και τη θερμική άνεση στις αίθουσες (Peixoto, 2020).

Πιο γενικευμένες προσεγγίσεις παρουσιάζονται στις εργασίες των De Lima Montenegro, Silva και Braga (2021) και Vilutienė et al. (2021), όπου το BIM προτείνεται ως ολοκληρωμένο πλαίσιο βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων. Οι συγγραφείς εξετάζουν πλήθος περιπτώσεων κτιρίων (συμπεριλαμβανομένων δημόσιων και εκπαιδευτικών) και καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η χρήση BIM για ενεργειακή ανάλυση επιτρέπει την παράλληλη εξέταση πολλαπλών σχεδιαστικών κριτηρίων όπως ενέργεια, άνεση, κόστος, περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε πρώιμα στάδια του σχεδιασμού (Duarte et al., 2021; Vilutienė et al., 2021).

Παράλληλα, οι Ren (2025) και Yao (2025) αναδεικνύουν την εφαρμογή της τεχνολογίας BIM στον πράσινο σχεδιασμό και στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων γενικότερα. Στις εργασίες αυτές παρουσιάζονται παραδείγματα εφαρμογών σε δημόσια κτίρια, όπου το BIM χρησιμοποιείται για να ενσωματώσει πληροφορίες υλικών,

συστημάτων και σεναρίων λειτουργίας, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και τη βελτιστοποίηση του κύκλου ζωής.

Επιπλέον, η εργασία των Jadhav et al. (2024) παρουσιάζει μια ανάλυση ενεργειακής κατανάλωσης βασισμένη σε BIM με έμφαση στη θερμική και φωτιστική απόδοση. Αν και η μελέτη εστιάζει σε κτίρια κατοικίας, η μεθοδολογία - ανάπτυξη BIM μοντέλου στο λογισμικό Revit, η εξαγωγή ενεργειακού μοντέλου, η προσομοίωση με χρήση Insight και η ανάλυση επιδράσεων σε PMV, θερμικά φορτία και κατανάλωση είναι απόλυτα εφαρμόσιμη και στο πλαίσιο των σχολικών κτιρίων (Jadhav et al., 2024).

Τέλος, σε επίπεδο μικροκλίματος και εξωτερικών χώρων σχολικών συγκροτημάτων, οι μελέτες των Antoniadis (2018) και Antoniadis et al. (2020) εξετάζουν με λεπτομέρεια τις θερμικές συνθήκες σε αστικές σχολικές αυλές, αναδεικνύοντας τον ρόλο της βλάστησης, των ψυχρών υλικών και της σκίασης στη βελτίωση βιομετεωρολογικών δεικτών όπως ο PET και η Tmrt. Παρότι δεν βασίζονται σε BIM, οι εργασίες αυτές παρέχουν κρίσιμα δεδομένα και κατευθύνσεις για τον σχεδιασμό των εξωτερικών χώρων, τα οποία μπορούν να συνδεθούν με BIM μοντέλα στο πλαίσιο ολοκληρωμένου βιοκλιματικού επανασχεδιασμού (Antoniadis, 2018; Antoniadis et al., 2020).

Συνολικά, οι διεθνείς μελέτες αποδεικνύουν ότι ο συνδυασμός BIM, ενεργειακής προσομοίωσης και βιοκλιματικού σχεδιασμού σε σχολικά και εκπαιδευτικά κτίρια μπορεί να οδηγήσει σε ουσιαστική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, βελτίωση της θερμικής άνεσης και τεκμηριωμένες παρεμβάσεις αναβάθμισης. Η παρούσα διπλωματική εργασία αξιοποιεί τα συμπεράσματα αυτών των ερευνών για να διαμορφώσει τη δική της μεθοδολογία και να τοποθετήσει τη μελέτη περίπτωσης στο ευρύτερο διεθνές πλαίσιο.

2.9. Ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας και τεκμηρίωσή τους

Η βιβλιογραφική επισκόπηση ανέδειξε περιορισμένες εφαρμογές που συνδυάζουν ενεργειακή προσομοίωση, ανθρακικό αποτύπωμα και ανάλυση αύλειου χώρου σε υφιστάμενα ελληνικά σχολεία. Με βάση αυτό το κενό διατυπώνονται τα εξής ερευνητικά ερωτήματα:

Ποια είναι η υφιστάμενη ενεργειακή συμπεριφορά ενός τυπικού σχολικού κτιρίου της δεκαετίας του 1980 και ποια στοιχεία του κελύφους προκαλούν τις μεγαλύτερες απώλειες;

Πώς επηρεάζουν οι επιμέρους και οι συνδυασμένες παρεμβάσεις στο κέλυφος την ενεργειακή κατανάλωση;

Η ενεργειακά αποδοτικότερη λύση παρουσιάζει και το χαμηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα;

Πώς κατανέμονται η ηλιακή έκθεση και η σκίαση στον αύλειο χώρο κατά τις ώρες λειτουργίας;

Μπορεί η BIM-based μεθοδολογία να εφαρμοστεί ως πλαίσιο αξιολόγησης και σε άλλα σχολικά συγκροτήματα;

Τα ερωτήματα τεκμηριώνονται από την περιορισμένη χρήση BIM στα υφιστάμενα ελληνικά σχολεία, τις διαφοροποιήσεις στην απόδοση των παρεμβάσεων, την ανάγκη συνεκτίμησης λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα και την ελλιπή ενιαία αξιολόγηση κτιρίου και αύλειου χώρου.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία της παρούσας εργασίας ακολουθεί μία προσέγγιση που συνδυάζει επιτόπια αποτύπωση, ψηφιακή μοντελοποίηση και ενεργειακή προσομοίωση. Στόχος είναι η τεκμηριωμένη αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης ενός σχολικού κτιρίου και η ανάδειξη των βέλτιστων βιοκλιματικών και ενεργειακών παρεμβάσεων μέσω της χρήσης εργαλείων BIM. Η μεθοδολογική αυτή διαδρομή ευθυγραμμίζεται με αντίστοιχες διεθνείς ερευνητικές εφαρμογές σε εκπαιδευτικά κτίρια, στις οποίες η BIM-based ενεργειακή ανάλυση αποδεικνύεται αξιόπιστη και επαναλήψιμη μέθοδος (Otuh, 2016; Balikci, 2024; Di Giuda et al., 2015)

3.1. Επιλογή και περιγραφή της περιοχής μελέτης

Η επιλογή της περιοχής μελέτης αποτελεί θεμελιώδες στάδιο κάθε ερευνητικής εργασίας που βασίζεται σε μελέτη περίπτωσης (casestudy), καθώς καθορίζει το πλαίσιο ανάλυσης και τη δυνατότητα γενίκευσης των αποτελεσμάτων (Eastman et al., 2011). Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ένα σχολικό συγκρότημα της Ελλάδας, συγκεκριμένα το 3^ο Δημοτικό Σχολείο Αριδαίας, το οποίο παρουσιάζει χαρακτηριστικά αντιπροσωπευτικά του ευρύτερου ελληνικού σχολικού κτιριακού αποθέματος όπως παλαιότητα κατασκευής, ανεπαρκή θερμομόνωση, σχολική αυλή με εκτεταμένες αδιαπέραστες επιφάνειες και περιορισμένη φύτευση. Το κτίριο κατασκευάστηκε το έτος 1988 και παρουσιάζει τυπικά χαρακτηριστικά της εποχής, όπως φέρουσα κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα, τοιχοποιία από οπτοπλινθοδομή και απουσία ολοκληρωμένου βιοκλιματικού σχεδιασμού.

Το σχολικό συγκρότημα βρίσκεται σε οικόπεδο συνολικού εμβαδού 13.200,00 τ.μ. σε κεντρική θέση εντός της πόλης, σε άμεση γειτνίαση με το οδικό δίκτυο και τον οικιστικό ιστό. Το οικόπεδο φιλοξενεί τέσσερα κτίρια διαφορετικής περιόδου κατασκευής, τα οποία αποτελούν ένα ολοκληρωμένο εκπαιδευτικό συγκρότημα.



Εικόνα 1. Αεροφωτογραφία (Πηγή: Εθνικό Κτηματολόγιο)

Συγκεκριμένα εντός του οικοπέδου λειτουργούν:

- το 3ο Δημοτικό Σχολείο Αριδαίας (κτίριο αναφοράς της παρούσας εργασίας): διώροφο κτίριο κατασκευής 1988, συνολικής κάλυψης 805,60 τ.μ. στο νοτιοδυτικό τμήμα του οικοπέδου
- το 2^ο Νηπιαγωγείο Αριδαίας: μονώροφο κτίριο στο βόρειο τμήμα του οικοπέδου.
- Ειδικό Σχολείο Αριδαίας: αυτοτελές κτίριο στο ανατολικό τμήμα του γηπέδου.
- Βοηθητικό κτίριο βορειοανατολικά που εξυπηρετεί τις ανάγκες αποθήκευσης του 3^{ου} Δημοτικού Σχολείου Αριδαίας.

Ο ακάλυπτος χώρος αποτελεί τη σχολική αυλή, η οποία διαχωρίζεται νοητά και χρησιμοποιείται διακριτά από κάθε εκπαιδευτική μονάδα. Η αυλή χαρακτηρίζεται από εκτεταμένες αδιαπέραστες επιφάνειες (ασφαλτοστρωμένες και τσιμεντοστρωμένες), περιορισμένη φύτευση και απουσία στοιχείων σκίασης, στοιχεία που παίζουν σημαντικό

ρόλο για την αξιολόγηση του μικροκλίματος του εξωτερικού χώρου (Antoniadis et al., 2020; Γκαϊδατζή, 2022).

Η Αριδαία αποτελεί την έδρα του Δήμου Αλμωπίας της Περιφερειακής Ενότητας Πέλλας, Κεντρικής Μακεδονίας και βρίσκεται σε υψόμετρο 122 μ. στη δυτική όχθη του Αλμωπαίου ποταμού (Δήμος Αλμωπίας, 2023). Το κτίριο μελέτης βρίσκεται επί της οδού Παύλου Μελά 24. Το κλίμα της Αριδαίας είναι ηπειρωτικό μεσογειακό (Köppen: Cfa/Dfa), χαρακτηριστικό των εσωτερικών κοιλάδων της Κεντρικής Μακεδονίας (Meteofarm, 2023; EMY, 2023). Διακρίνεται από μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ χειμώνα και καλοκαιριού, με ψυχρούς χειμώνες, θερμά καλοκαίρια και σημαντική έλλειψη βροχόπτωσης κατά τη θερινή περίοδο. Σύμφωνα με τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής, η μέση θερμοκρασία Ιανουαρίου κυμαίνεται από 1°C έως +2°C, ενώ η μέση θερμοκρασία Ιουλίου φθάνει τους 24°C -26°C, με μέγιστες άνω των 35°C τα καλοκαίρια (EMY, 2023). Οι νύχτες κατά τη χειμερινή περίοδο χαρακτηρίζονται από αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες με συχνούς παγετούς (Δεκέμβριος - Φεβρουάριος) οι οποίοι αποτελούν χαρακτηριστικό φαινόμενο, καθιστώντας κρίσιμη την επάρκεια θέρμανσης στα σχολικά κτίρια.

Σύμφωνα με τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK, 2017), ο Νομός Πέλλας εντάσσεται στην Κλιματική Ζώνη Γ, η οποία χαρακτηρίζεται από μέτριες χειμερινές θερμοκρασίες σχεδιασμού (-8°C) και υψηλές θερινές (36°C).

Η γεωγραφική θέση, η έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία και το αστικό μικροκλίμα της περιοχής αποτελούν παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στη μεθοδολογία ανάλυσης, καθώς επηρεάζουν άμεσα τις ενεργειακές ανάγκες και τη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου (Brown & Gillespie, 2011).

Τα κριτήρια επιλογής του συγκεκριμένου κτιρίου περιλαμβάνουν: α) την αντιπροσωπευτικότητά του ως προς τον τύπο κατασκευής και την ηλικία, β) τη διαθεσιμότητα αρχιτεκτονικών σχεδίων και τη δυνατότητα επιτόπιας αποτύπωσης, γ) την πρόσβαση στο χώρο για τη συλλογή δεδομένων και δ) τη σαφή ανάγκη βιοκλιματικής αναβάθμισης, που καθιστά την εργασία λειτουργικά χρήσιμη και ερευνητικά αξιόλογη. Η επιλογή αυτή διασφαλίζει ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορούν να αποτελέσουν αναφορά για παρόμοια κτίρια σε ανάλογο κλιματικό και κατασκευαστικό πλαίσιο (IEA SHC Programme, 2015).

Στο πρώτο στάδιο παρουσιάζεται το σχολικό κτίριο που αποτελεί το αντικείμενο της έρευνας. Περιγράφονται:

- η γεωγραφική θέση,
- το κλίμα της περιοχής,
- η περίοδος κατασκευής του κτιρίου,
- τα βασικά μορφολογικά χαρακτηριστικά,
- η χρήση των χώρων.



Εικόνα 2. Τρισδιάστατη απεικόνιση σχολικού συγκροτήματος. Πηγή: Ιδία επεξεργασία

3.2. Αποτύπωση υφιστάμενης κατάστασης

Η αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης του κτιρίου αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για τη δημιουργία ενός αξιόπιστου BIM μοντέλου και για τη βαθμονόμηση της ενεργειακής προσομοίωσης. Σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική, η αποτύπωση υφισταμένων κτιρίων για ενεργειακή ανάλυση ακολουθεί τα πρότυπα ενεργειακής επιθεώρησης επιπέδου ASHRAE Level 2, τα οποία προβλέπουν λεπτομερή επιτόπια καταγραφή των υλικών κατασκευής του

κελύφους, των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και φωτισμού (ASHRAE, 2017; Vilutiene et al., 2021). Το ASHRAE Level III Audit αφορά κτίρια στον αμερικανικό κανονιστικό χώρο.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η αποτύπωση πραγματοποιήθηκε σε τρία επίπεδα. Πρώτον, συλλέχθηκαν διαθέσιμα αρχιτεκτονικά σχέδια και άδειες δόμησης. Δεύτερον, πραγματοποιήθηκε επιτόπια αυτοψία, κατά την οποία καταγράφηκαν τα γεωμετρικά στοιχεία του κτιρίου, τα δομικά υλικά κελύφους (τοιχοί, πλάκες, στέγη, δάπεδα), οι επιφάνειες και ο τύπος των ανοιγμάτων, ο προσανατολισμός των όψεων, καθώς και τα υπάρχοντα συστήματα θέρμανσης, ψύξης και αερισμού. Τρίτον, έγινε καταγραφή των συνθηκών χρήσης των χώρων, όπως τα ωράρια λειτουργίας, ο αριθμός χρηστών ανά αίθουσα και η πληρότητα χώρων κατά τη διάρκεια της σχολικής ημέρας.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην καταγραφή του αύλειου χώρου όπως ο τύπος και το χρώμα των επιφανειών εδαφοκάλυψης, η παρουσία ή απουσία βλάστησης, η ύπαρξη σκιάστρων και η γεωμετρία σε σχέση με το κτίριο. Τα στοιχεία αυτά είναι κρίσιμα για τον υπολογισμό των δεικτών θερμικής άνεσης στον εξωτερικό χώρο (Antoniadis et al., 2020; Γκαϊδατζή, 2022). Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αποτέλεσαν την πρωτογενή βάση για τη δημιουργία και την παραμετροποίηση του ενεργειακού μοντέλου, συμβάλλοντας στον έλεγχο της γεωμετρικής, κατασκευαστικής και λειτουργικής αντιστοιχίας του ψηφιακού μοντέλου με το πραγματικό κτίριο (Duarte et al., 2021).

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η καταγραφή των βασικών χαρακτηριστικών του κτιρίου:

- γεωμετρικά στοιχεία,
- δομικά υλικά κελύφους,
- επιφάνειες ανοιγμάτων,
- προσανατολισμός όψεων,
- συστήματα θέρμανσης / ψύξης,
- συνθήκες χρήσης των χώρων.

Η αποτύπωση βασίζεται σε σχέδια οικοδομικών αδειών, επιτόπια παρατήρηση και καταγραφή των βασικών λειτουργικών χαρακτηριστικών του κτιρίου, όπως το ωράριο

λειτουργίας, η χρήση των αιθουσών και ο φυσικός αερισμός, ώστε να δημιουργηθεί ρεαλιστικό προφίλ λειτουργίας για την ενεργειακή προσομοίωση.

3.3. Δημιουργία BIM μοντέλου στο Revit

Βάσει των δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά την αποτύπωση, δημιουργήθηκε το ψηφιακό BIM μοντέλο του κτιρίου στο Autodesk Revit. Το Revit επιλέχθηκε λόγω της ευρείας εφαρμογής του στον κλάδο της κατασκευής, της δυνατότητας παραμετρικής μοντελοποίησης και της άμεσης διασύνδεσής του με εργαλεία ενεργειακής ανάλυσης όπως το Autodesk Forma Insights (Alkhatib & Alawag, 2021; Fung et al., 2022).

Η διαδικασία μοντελοποίησης ακολούθησε τα τρία βασικά επίπεδα ανάπτυξης BIM μοντέλου για ενεργειακή ανάλυση, όπως αυτά ορίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία (Eastman et al., 2011) τα οποία είναι τα εξής: α) γεωμετρική μοντελοποίηση - δημιουργία τρισδιάστατης αναπαράστασης του κτιρίου με τοιχοποιίες, πλάκες, ανοίγματα και εξωτερικά στοιχεία, β) ορισμός υλικών, δηλαδή καταχώρηση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων σε κάθε δομικό στοιχείο (συντελεστής θερμοπερατότητας U-value, θερμική μάζα, ανακλαστικότητα) και γ) ορισμός θερμικών ζωνών (Spaces & Zones) δηλαδή δημιουργία θερμικών ζωνών ανά χώρο, οι οποίες αποτελούν τη βάση για την εξαγωγή του ενεργειακού μοντέλου.

Οι εξωτερικοί τοίχοι μοντελοποιήθηκαν με διαφορετικούς τύπους, ανάλογα με το συνολικό πάχος και τη σύσταση της τοιχοποιίας. Καταγράφηκαν κυρίως τοιχοποιίες πάχους 20 cm και 30 cm, χαρακτηριστικές της περιόδου κατασκευής του κτιρίου (τέλη δεκαετίας 1980). Η επικρατούσα κατασκευή αποτελείται από διπλή οπτοπλινθοδομή με ενδιάμεση θερμομόνωση 5-10εκ., στοιχείο που παρατηρείται συχνά σε σχολικά κτίρια της εποχής.

Το μοντέλο περιέλαβε επίσης στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, όπως υποστυλώματα και ποδιές παραθύρων, με διατομές που προσεγγίζουν την πραγματική κατασκευή του σχολικού συγκροτήματος. Οι πλάκες μοντελοποιήθηκαν ως πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος με τελική επίστρωση μωσαϊκού, ενώ η στέγη αποδόθηκε ως επικλινή κεραμοσκεπή με ξύλινο φέροντα οργανισμό επάνω από πλάκα σκυροδέματος.

Για τα ανοίγματα χρησιμοποιήθηκαν curtain wall στοιχεία, ώστε να αποδοθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα συνεχή υαλοστάσια και τα μεταλλικά κουφώματα του σχολείου.

Στα αναλυτικά χαρακτηριστικά των υαλοπινάκων καταχωρήθηκαν τιμές που αντιστοιχούν σε μονό υαλοπίνακα χωρίς θερμοδιακοπή, τυπικό για σχολικά κτίρια της δεκαετίας του 1980.



Εικόνα 3. Τρισδιάστατη απεικόνιση του υφιστάμενου σχολικού κτιρίου στο Autodesk Revit- Δυτική Όψη. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.



Εικόνα 4. Τρισδιάστατη απεικόνιση του υφιστάμενου σχολικού κτιρίου στο Autodesk Revit- Βόρεια Όψη. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.



Εικόνα 5.Τρισδιάστατη απεικόνιση του υφιστάμενου σχολικού κτιρίου στο Autodesk Revit- Ανατολική Όψη. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.



Εικόνα 6.Τρισδιάστατη απεικόνιση του υφιστάμενου σχολικού κτιρίου στο Autodesk Revit- Νότια Όψη. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

3.4. Ορισμός θερμοφυσικών ιδιοτήτων δομικών υλικών

Ο προσδιορισμός των θερμοφυσικών ιδιοτήτων στα δομικά υλικά του BIM μοντέλου αποτελεί κρίσιμο στάδιο για τη διενέργεια αξιόπιστης ενεργειακής προσομοίωσης, καθώς καθορίζει τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας διαμέσου του κτιριακού κελύφους (Vilutienė et al., 2021). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ο προσδιορισμός βασίστηκε στην αρχιτεκτονική τομή των διαθέσιμων σχεδίων από την οικοδομική άδεια του σχολείου με αριθμό 57/1988, η οποία ακολουθεί την τυπική κατασκευαστική λογική των σχολικών κτιρίων της εποχής δηλαδή σκελετός οπλισμένου σκυροδέματος με πλήρωση οπτόπλινθων μεταξύ των υποστυλωμάτων.

Επειδή δεν ήταν εφικτή η επεμβατική εργαστηριακή μέτρηση των υλικών, οι τιμές εκτιμήθηκαν βάσει τυπικών συνθέσεων αντίστοιχης περιόδου, σύμφωνα με τις τιμές αναφοράς της TOTEE 20701-2 (TEE, 2017) και του EN ISO 10456. Η προσέγγιση αυτή είναι τεκμηριωμένη στη βιβλιογραφία για υφιστάμενα κτίρια όπου δεν διατίθενται αναλυτικά κατασκευαστικά στοιχεία (De Wilde, 2014; Duarte et al., 2021).

Πίνακας 3. Θερμοφυσικές ιδιότητες υλικών - τιμές εισαγωγής στο Revit (Manage → Materials → Thermal)

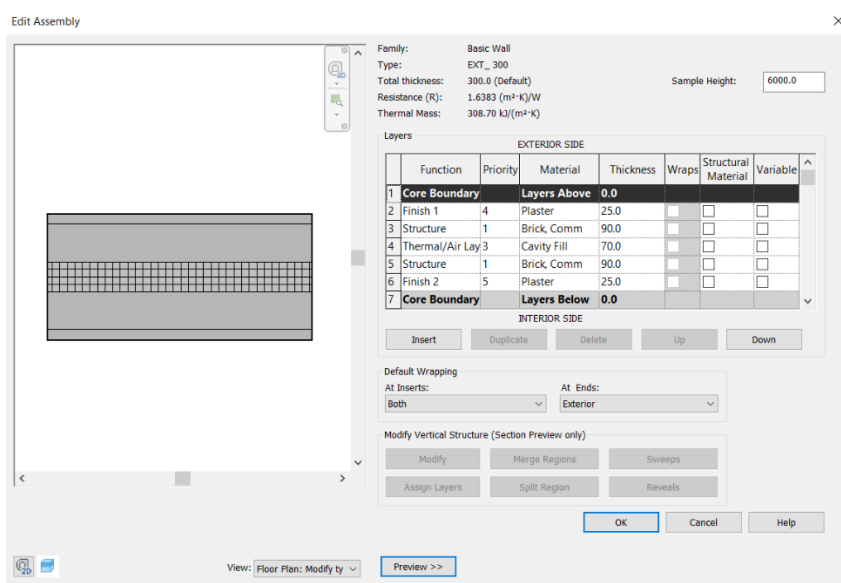
Υλικό	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kgK)	Πηγή
Σοβάς (ασβεστοτσιμεντοκονίαμα)	0.87	1800	1000	TOTEE 20701-2
Οπτοπλινθοδομή με διάτρητες οπτόπλινθους	0.58	900	1000	TOTEE 20701-2
Οπλισμένο σκυρόδεμα	2.5	2400	1000	TOTEE 20701-2; EN ISO 10456
EPS (διογκωμένη πολυστερίνη)	0.038	15	1450	TOTEE 20701- 2;EN13163

Για τους εξωτερικούς τοίχους ορίστηκαν τέσσερις τύποι στο Revit, αντίστοιχοι των παχών που εντοπίστηκαν κατά την αποτύπωση.

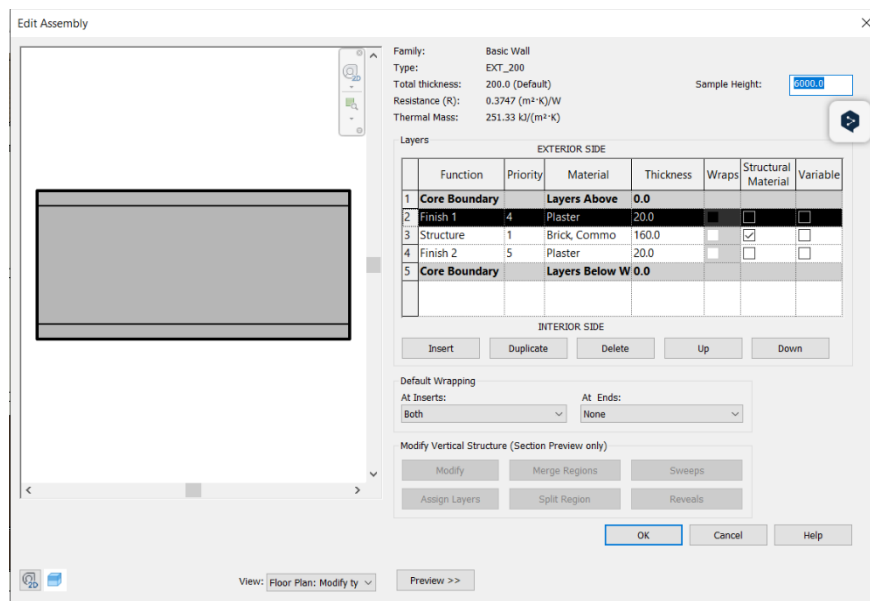
Πίνακας 4. Σύνθεση και U-values δομικών στοιχείων κελύφους

Τύπος τοίχου	Σύνθεση (mm)	U υφιστάμενο (W/m ² K)	U max KENAK Ζώνη Γ
Εξωτερικός 20cm	Σοβάς20+Τούβλο160+Σοβάς20	2.67	0.45
Εξωτερικός 30cm	Σοβάς25+Τούβλο90+Μόνωση 70+Τούβλο90+Σοβάς25	0.61	0.45
Εξωτερικός 50cm	Σοβάς20+Σκυρόδεμα460+Σοβάς20	1,93	0.45
Εξωτερικός 10cm	Σοβάς20+Τούβλο80	5,34	0.45
Δάπεδο	Μωσαϊκό25 + Επιπεδωτικό40 + Σκυρόδεμα150 + Σοβάς20	3,97	0,40
Στέγη	Κεραμίδι20 + ξύλινος σκελετός 70	0,45	0,40

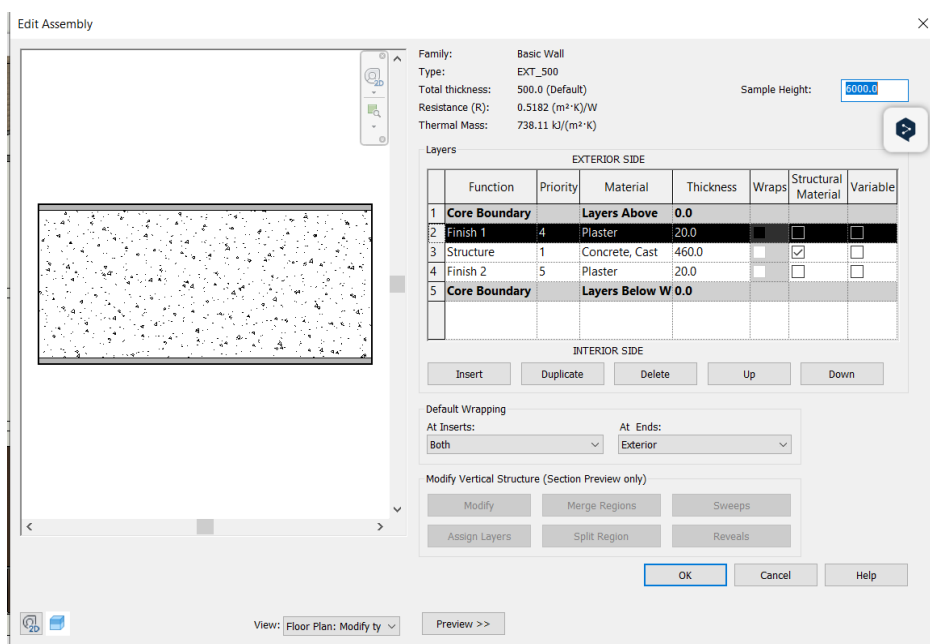
Οι θερμικές ιδιότητες των υλικών βασίστηκαν σε τυπικές τιμές που προέρχονται από την TOTEE 20701-1, την TOTEE 20701-2, καθώς και από διεθνείς βάσεις δεδομένων υλικών του Autodesk Revit.



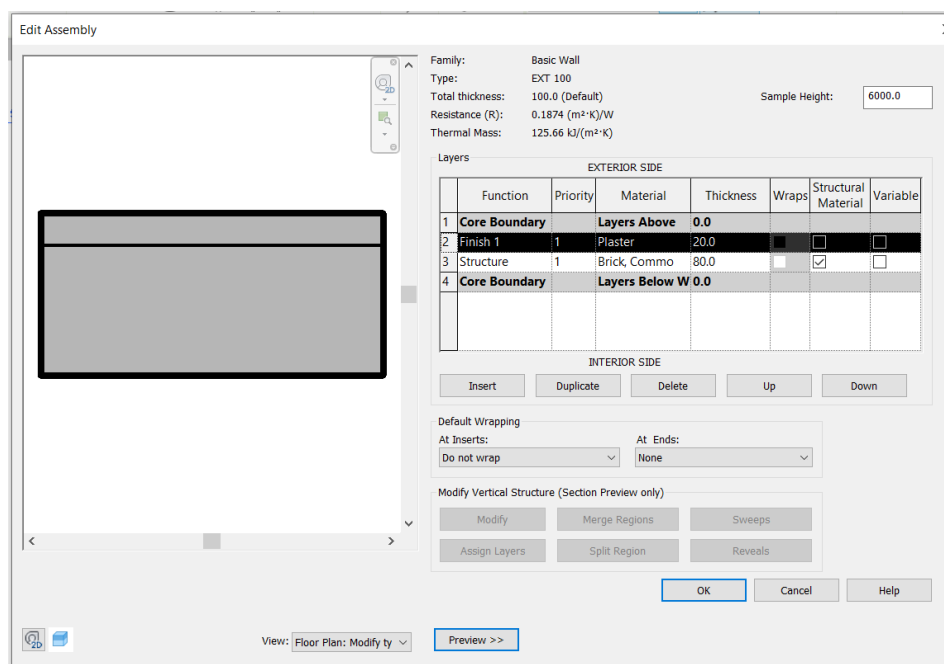
Εικόνα 7. Σύνθεση εξωτερικής τοιχοποιίας 30εκ.. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.



Εικόνα 8. Σύνθεση εξωτερικής τοιχοποιίας 20εκ.. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

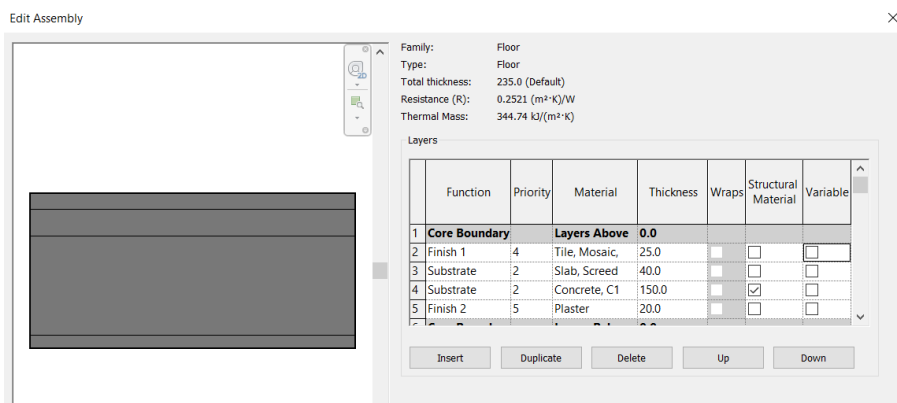


Εικόνα 9. Σύνθεση εξωτερικής τοιχοποιίας 50 εκ.. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.



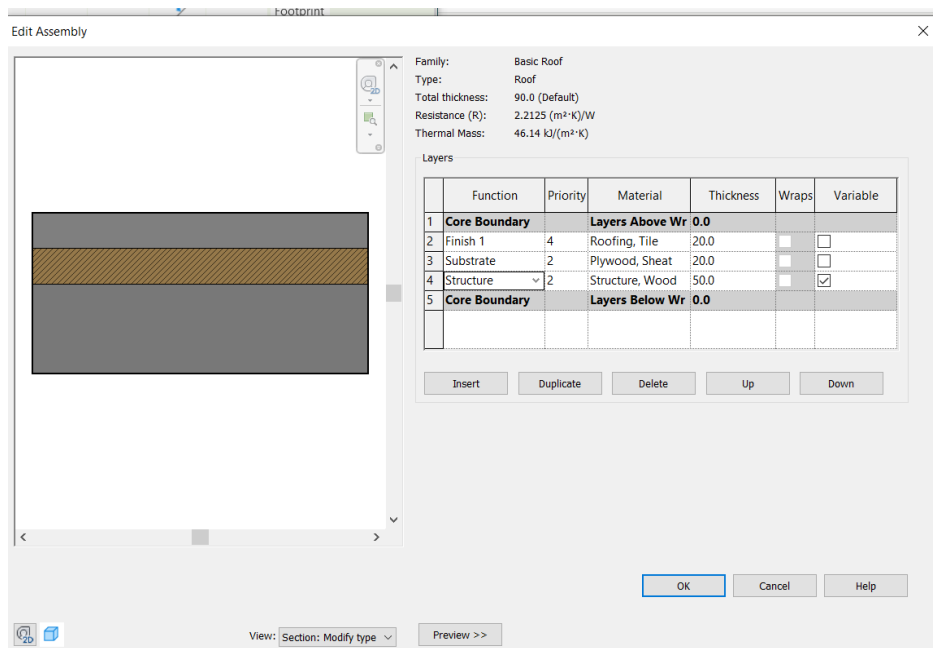
Εικόνα 10.Σύνθεση εξωτερικής τοιχοποιίας 10εκ.. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Οι εξωτερικές τοιχοποιίες αποδόθηκαν ως σύνθετες κατασκευές πολλαπλών στρώσεων, αποτελούμενες από εσωτερικό και εξωτερικό σοβά, οπτοπλινθοδομή και, όπου υπάρχει, ενδιάμεση θερμομόνωση διογκωμένης πολυστερίνης (EPS). Ο κυρίαρχος τύπος EXT_200 (20cm, χωρίς μόνωση) εμφανίζει U-value 2,67 W/m²K, δηλαδή σχεδόν εξαπλάσιο της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής KENAK για Κλιματική Ζώνη Γ (0,45W/m²K), αναδεικνύοντας τη σοβαρή ενεργειακή ανεπάρκεια του κελύφους. Ο τύπος EXT_300 (30cm, με EPS 70mm) παρουσιάζει σαφώς καλύτερη θερμική συμπεριφορά (U=0,61 W/m²K), ωστόσο παραμένει εκτός των ορίων KENAK. Οι ποδιές παραθύρων από μονολιθικό σκυρόδεμα (EXT_500) και οι λεπτές τοιχοποιίες πλήρωσης στη στέγη (EXT_100) αποτελούν σημεία έντονης θερμογέφυρας με U-values 1,93 και 5,34 W/m²K αντίστοιχα.



Εικόνα 11.Σύνθεση δαπέδου. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

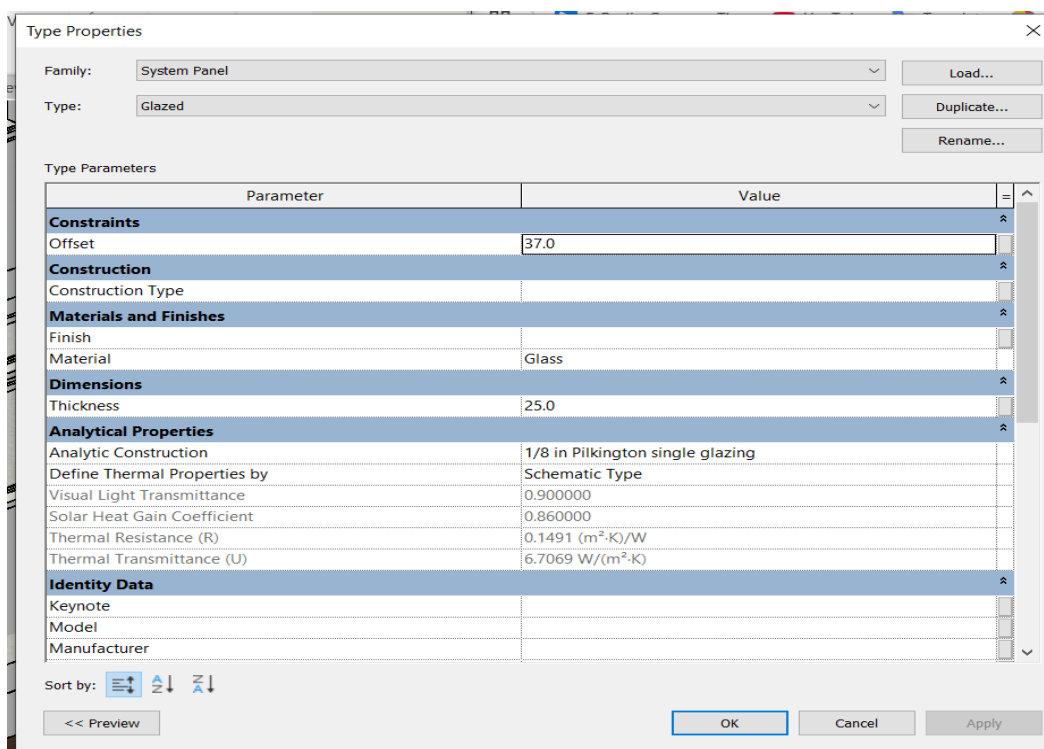
Οι πλάκες σκυροδέματος αποδόθηκαν με υλικό οπλισμένου σκυροδέματος κατηγορίας αντίστοιχης με τις συνήθεις κατασκευές της εποχής, ενώ στις επιστρώσεις χρησιμοποιήθηκε υλικό μωσαϊκού. Για τη στέγη ορίστηκαν θερμικές ιδιότητες ξυλείας και κεραμιδιών, ώστε να προσεγγιστεί η πραγματική θερμική συμπεριφορά της ξύλινης κεραμοσκεπούς κατασκευής.



Εικόνα 12.Σύνθεση στέγης. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Για τα ανοίγματα (παράθυρα), καταγράφηκαν κουφώματα μεταλλικής κατασκευής με μονό υαλοπίνακα, τυπικά της δεκαετίας του 1980. Για τις ανάγκες της ενεργειακής

προσομοίωσης, τα ανοίγματα σχεδιάστηκαν στο Revit ως curtain wall στοιχεία με System Panel τύπου Glazed. Στα Analytical Properties του panel καταχωρήθηκε κατασκευή τύπου 1/8 in Pilkington single glazing, με τις ακόλουθες τιμές: Thermal Transmittance $U = 6,71 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, Solar Heat Gain Coefficient SHGC = 0,86 και Visual Light Transmittance VLT = 0,90. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε μονό υαλοπίνακα χωρίς επίστρωση χαμηλής εκπομπής, χαρακτηριστικό κουφωμάτων προ KENAK (TOTEE 20701-1). Για σύγκριση, σύμφωνα με τον KENAK και την TOTEE 20701-1/2017, η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας του συνολικού κουφώματος ανοίγματος σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα, σε περίπτωση ριζικής ανακαίνισης υφιστάμενου κτιρίου στην Κλιματική Ζώνη Γ, ανέρχεται σε $2,80 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.



Εικόνα 13. Ορισμός τύπου υαλοπίνακά και τύπου ως single glazing. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

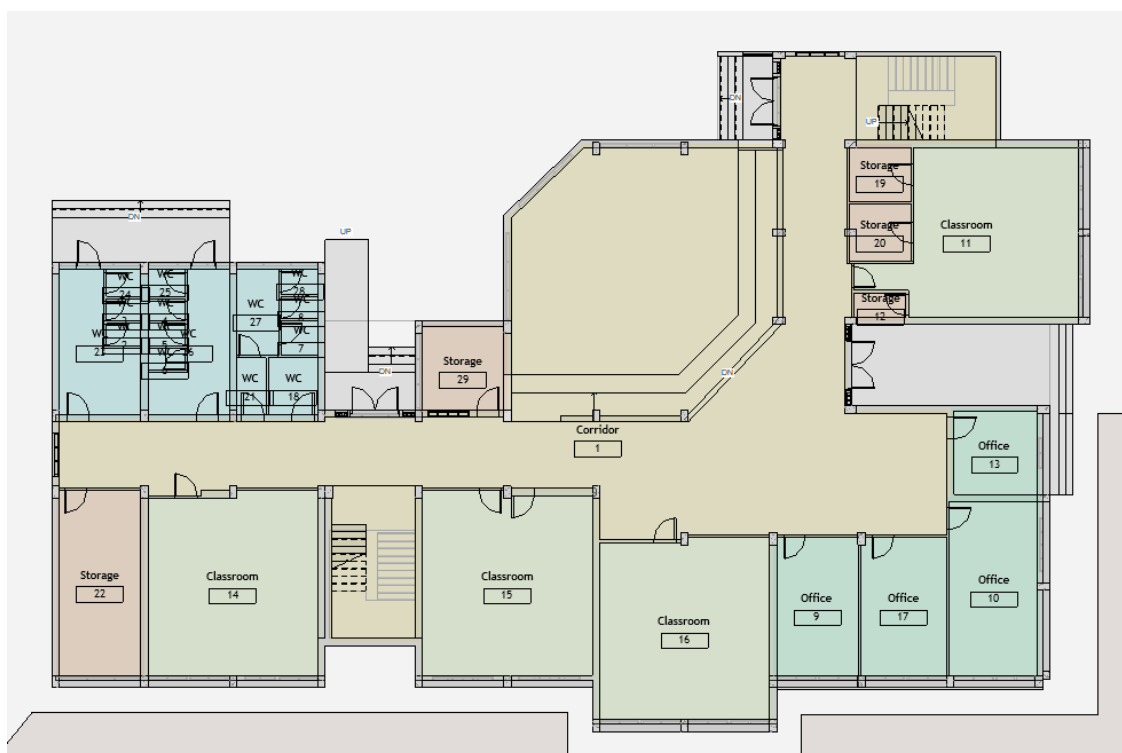
3.5. Δημιουργία ενεργειακού μοντέλου

3.5.1. Ορισμός Spaces και ενεργειακών παραμέτρων λειτουργίας

Για την εκτέλεση της ενεργειακής προσομοίωσης, κάθε χώρος του κτιρίου αποδόθηκε ως ξεχωριστό Analytical Space στο Autodesk Revit μέσω της εντολής Analyze → Spaces. Συνολικά ορίστηκαν 39 Spaces, κατανομημένα στους δύο ορόφους του κτιρίου. Η αίθουσα πολλαπλών χρήσεων, λόγω της άμεσης επικοινωνίας της με τον κεντρικό διάδρομο και της απουσίας διαχωριστικού στοιχείου, ενσωματώθηκε στη θερμική ζώνη του διαδρόμου. Κάθε Space ταξινομήθηκε σε έναν από τους ακόλουθους τύπους βάσει της λειτουργίας του: Classroom/Lecture/Training για τις 12 αίθουσες διδασκαλίας, Corridor για τους 2 διαδρόμους και τα κλιμακοστάσια, Office για τα 4 γραφεία διδακτικού και διοικητικού προσωπικού, Restroom για τους 15 χώρους υγιεινής και Storage για τις 5 αποθήκες. Επιπλέον, ο χώρος ανάμεσα στην οροφή των αποχωρητηρίων και της σκεπής του ορίστηκε ως plenum Space. Η κατηγοριοποίηση αυτή αντικατοπτρίζεται οπτικά στο μοντέλο, καθώς κάθε τύπος χώρου αποδίδεται με διαφορετικό χρώμα στην προβολή Analytical Spaces, επιτρέποντας τον άμεσο εποπτικό έλεγχο της ορθότητας της κατανομής (Εικόνα 14,15).

Πίνακας 5. Κατηγορίες χώρων - spaces

Κατηγορία χώρου	Spaces
Αίθουσες διδασκαλίας	11, 14, 15, 16, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40
Γραφεία	9, 10, 13, 17
Διάδρομοι	1, 39
Χώροι υγιεινής	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 18, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28
Αποθήκες	12, 19, 20, 22, 29
Λοιποί χώροι	32



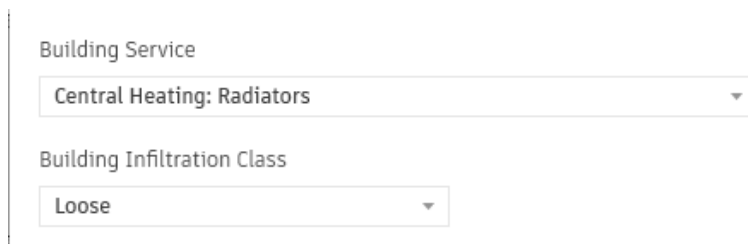
Εικόνα 14. Κάτοψη στάθμης ισογείου και ορισμός spaces. Πηγή: Ιδία επεξεργασία



Εικόνα 15. Κάτοψη στάθμης ορόφου και ορισμός spaces. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Για κάθε Space Type ρυθμίστηκαν τα αντίστοιχα θερμικά set points μέσω του παραθύρου Space Type Settings. Για τις αίθουσες διδασκαλίας, τους διαδρόμους και τα γραφεία ορίστηκε Heating Set Point 20°C και Cooling Set Point 26°C, σύμφωνα με τις απαιτήσεις KENAK και ASHRAE 55 για εκπαιδευτικά κτίρια (ASHRAE, 2020). Για τους χώρους υγιεινής ορίστηκε Heating Set Point 18°C και Cooling Set Point 26°C, ενώ για τις αποθήκες εφαρμόστηκαν τιμές που αντικατοπτρίζουν τη μη κλιματιζόμενη φύση τους, καθώς δεν υπάρχει σύστημα θέρμανσης σε αυτούς τους χώρους. (Heating Set Point 15°C, Cooling Set Point 30°C).

Όσον αφορά τις τιμές φωτισμού και εξοπλισμού αντλήθηκαν αυτόματα από τη βιβλιοθήκη Space Types του Revit για τον τύπο Classroom/Lecture/Training, και επαληθεύτηκαν ως συμβατές με τα πρότυπα ASHRAE 90.1 για εκπαιδευτικές χρήσεις (ASHRAE, 2022). Ο αερισμός ορίστηκε σε 8,00 L/s/άτομο για τις αίθουσες διδασκαλίας, τιμή σύμφωνη με την Κατηγορία I του EN 16798-1:2019 για εκπαιδευτικούς χώρους. Η παροχή νωπού αέρα ανά επιφάνεια ορίστηκε σε 0,30 L/(s;m²) για όλους τους κύριους χώρους. Να σημειωθεί ότι το κτίριο δεν διαθέτει μηχανικό σύστημα ψύξης. Το μοναδικό σύστημα είναι το σύστημα θέρμανσης, το οποίο αποτελείται από λέβητα πετρελαίου με διανομή μέσω καλοριφέρ (σώματα θέρμανσης) σε όλους τους κύριους χώρους. Στις ρυθμίσεις Energy Settings του Revit αυτό αποδόθηκε με Building Service = Central Heating Radiators, αντικατοπτρίζοντας την πραγματική κατάσταση του κτιρίου.



Εικόνα 16. Απόσπασμα ρυθμίσεων Revit

Building/Space Type Settings

Filter: Enter Search Words

☐ Building Type ☒ Space Type

Parameter	Value
Identity Data	
Design Option	Main Model
Energy Analysis	
Area per Person	2.000 m ²
Sensible Heat Gain per person	73.27 W
Latent Heat Gain per person	58.61 W
Lighting Load Density	10.00 W/m ²
Power Load Density	5.00 W/m ²
Infiltration Airflow per area	0.19 L/(s·m ²)
Plenum Lighting Contribution	20.0000%
Occupancy Schedule	School Occupancy - 8am to 4pm
Lighting Schedule	School Lighting - 7 AM to 9 PM
Power Schedule	School Lighting - 7 AM to 9 PM
Outdoor Air per Person	8.00 L/s
Outdoor Air per Area	0.30 L/(s·m ²)
Air Changes per Hour	0.000000
Outdoor Air Method	by People and by Area
Heating Set Point	20.00 °C
Cooling Set Point	26.00 °C
Humidification Set Point	0.0000%
Dehumidification Set Point	70.0000%

Εικόνα 17. Ενεργειακές Ρυθμίσεις για Space Type: Classroom -Αίθουσες

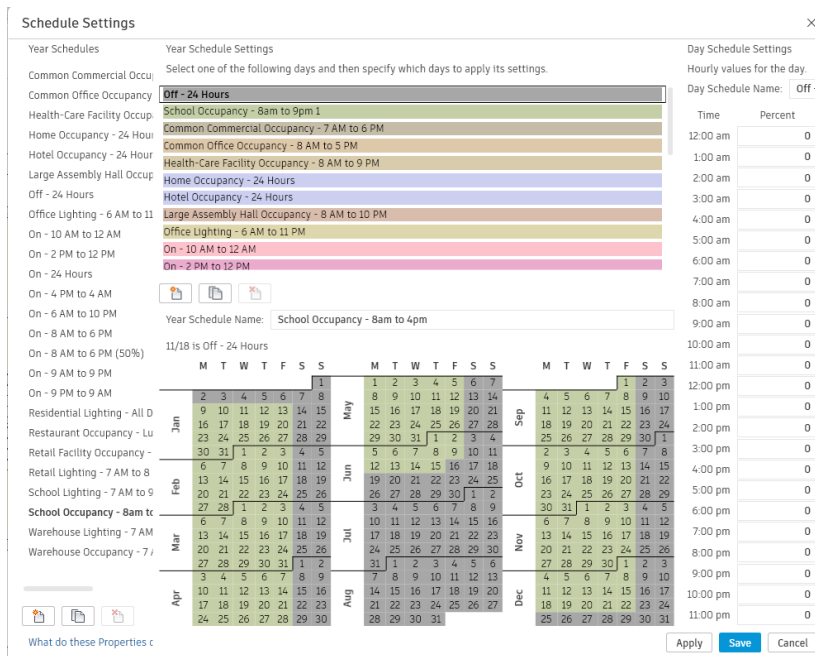
Το Building Operating Schedule ορίστηκε σε School (K-12), με ωράριο λειτουργίας Δευτέρα έως Παρασκευή 08:00-14:00, διακοπή λειτουργίας κατά τα Σαββατοκύριακα, τις αργίες και την καλοκαιρινή περίοδο από 15 Ιουνίου έως 1 Σεπτεμβρίου, αντικατοπτρίζοντας το τυπικό πρόγραμμα λειτουργίας ενός ελληνικού σχολείου πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης, όπως το εξεταζόμενο.

Το 3ο Δημοτικό Σχολείο Αριδαίας περιλαμβάνει συνολικά 39 χώρους, οι οποίοι κατηγοριοποιήθηκαν σε τύπους Space βάσει χρήσης. Οι αίθουσες διδασκαλίας (Space Type: Classroom) ορίστηκαν με πυκνότητα 25 ατόμων ανά αίθουσα, ωράριο λειτουργίας 08:00-14:00 για πέντε ημέρες εβδομαδιαίως, φορτίο φωτισμού 10 W/m² και φορτίο εξοπλισμού 5 W/m², σύμφωνα με τα πρότυπα ASHRAE 90.1 για εκπαιδευτικές χρήσεις (ASHRAE, 2022). Για τον αερισμό εφαρμόστηκε η τιμή 7.0 L/s/άτομο βάσει EN 16798-1:2019 (Κατηγορία II).

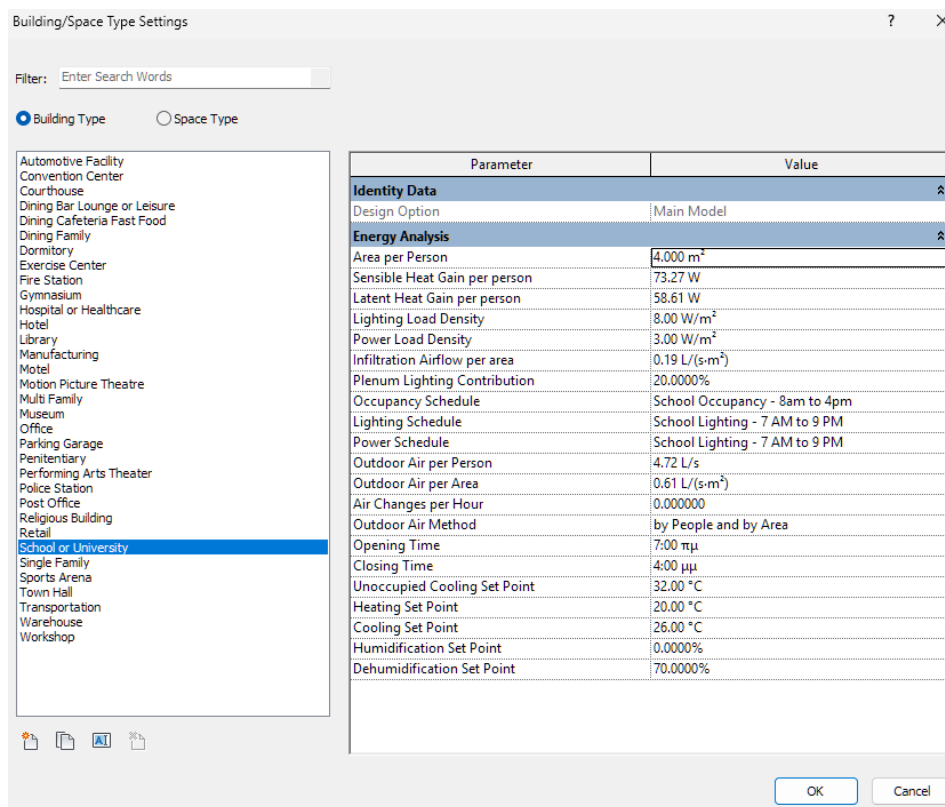
Πίνακας 6. Παράμετροι λειτουργίας ανά τύπο χώρου

Τύπος χώρου	Space Type	Άτομα	Φωτισμός W/m ²	Εξοπλισμός W/m ²	Ωράριο
Αίθουσα διδασκαλίας	Classroom	25	10	5	08:00-14:00, Δε-Πα
Γραφείο διευθυντή/δασκ.	Office	4	10	8	07:00-16:00, Δε-Πα
Αποθήκη	Storage	-	5	1	Αδρανής
WC	Restroom	-	8	1	08:00-14:00
Διάδρομος/ Κλιμακοστάσιο	Corridor	-	8	1	07:30-14:30

Οι ρυθμίσεις Energy Settings διαμορφώθηκαν ως εξής: Building Type = School, Project Phase = Existing, Building Service = Central Heating: Radiators (λέβητας πετρελαίου χωρίς ψύξη), Building Infiltration Class = Loose (τυπικό για παλιά κτίρια χωρίς επεμβάσεις στεγανοποίησης). Το Building Operating Schedule ορίστηκε σε School (K-12), αντικατοπτρίζοντας το ελληνικό σχολικό ωράριο με θερινές διακοπές.



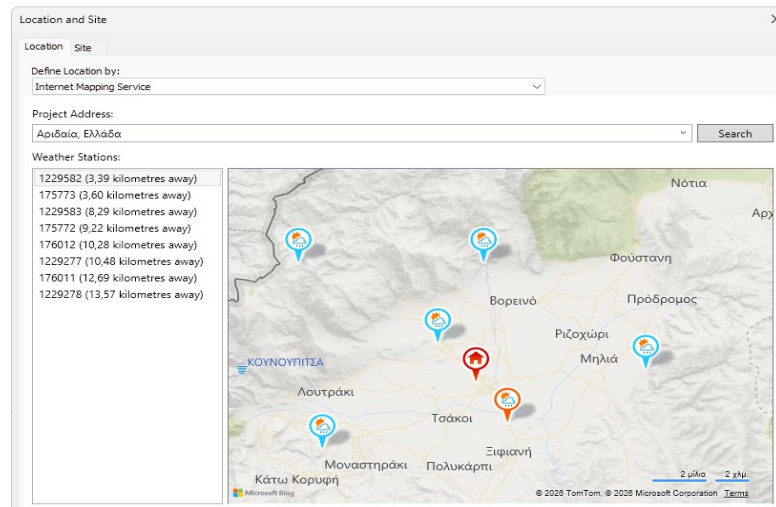
Εικόνα 18. School Occupancy. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.



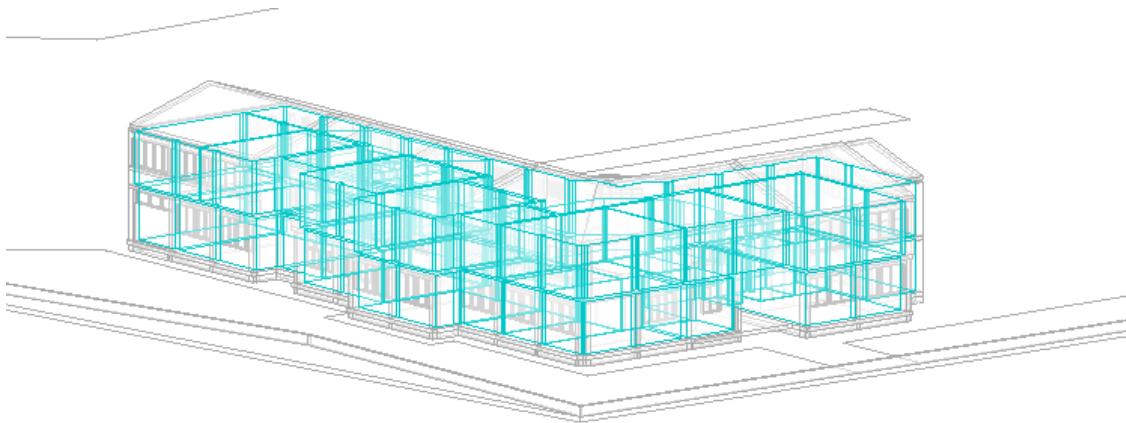
Εικόνα19. Building Type Settings για Σχολείο

3.6. Ενεργειακή προσομοίωση

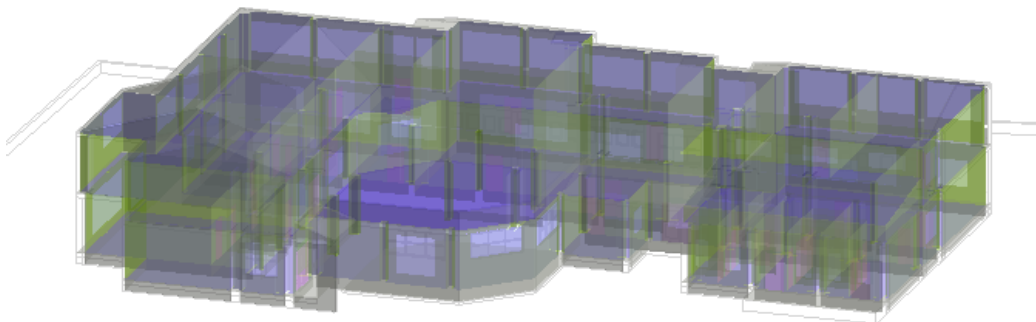
Η ενεργειακή προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης εκτελέστηκε μέσω των εργαλείων ενεργειακής ανάλυσης του Autodesk Revit. Η δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου βασίστηκε στο αναλυτικό μοντέλο κτιρίου (Analytical Energy Model), το οποίο παράγεται από τα δομικά στοιχεία, τις θερμικές ζώνες και τις λειτουργικές παραμέτρους που ορίστηκαν στο BIM μοντέλο. Για την αξιολόγηση του αποτυπώματος άνθρακα και της ενεργειακής έντασης χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα Autodesk Forma Carbon Insights.. Για τα κλιματικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκε ο πλησιέστερος διαθέσιμος μετεωρολογικός σταθμός στην Αριδαία (Weather Station 1229582, απόσταση 3,39 km, υψόμετρο 547 m, έτος δεδομένων 2006), μέσω της υπηρεσίας Internet Mapping Service του Revit.



Εικόνα 20. Επιλογή διαθέσιμος μετεωρολογικού σταθμού. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.



Εικόνα 21. Ενεργειακό μοντέλο σχολικού κτιρίου μέσω Revit – Analytical Spaces. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.



Εικόνα 22. Ενεργειακό μοντέλο σχολικού κτιρίου μέσω Revit – Analytical Surfaces. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

3.7. Ανάπτυξη σεναρίων ενεργειακής και βιοκλιματικής αναβάθμισης

Με βάση τα προβλήματα που εντοπίστηκαν στην υφιστάμενη κατάσταση, αναπτύχθηκαν εναλλακτικά σενάρια παρεμβάσεων, δίνοντας προτεραιότητα στη μείωση των θερμικών απωλειών, στον περιορισμό των ηλιακών θερμικών κερδών κατά τη θερινή περίοδο και στη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής αποδοτικότητας του κελύφους.

Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας κάθε λύσης δημιουργήθηκαν τέσσερα ανεξάρτητα σενάρια προσομοίωσης, στα οποία εφαρμόστηκε κάθε παρέμβαση διαδοχικά, καθώς και ένα τελικό συνδυαστικό σενάριο. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μέσω ενεργειακών προσομοιώσεων στο Autodesk Revit, ενώ παράλληλα εκτιμήθηκε η περιβαλλοντική επίδραση των παρεμβάσεων με χρήση του Autodesk Forma Carbon Insights, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την ετήσια ενεργειακή κατανάλωση όσο και το λειτουργικό και ενσωματωμένο αποτύπωμα άνθρακα.

Τα σενάρια που εξετάστηκαν είναι τα ακόλουθα:

Σενάριο 1: Αντικατάσταση των υφιστάμενων κουφωμάτων με νέα ενεργειακά κουφώματα υψηλής θερμομονωτικής απόδοσης και τριπλούς υαλοπίνακες.

Σενάριο 2: Εφαρμογή εξωτερικής θερμομόνωσης

Σενάριο 3: Θερμομόνωση των εξωτερικών τοίχων και της στέγης, με στόχο τη μείωση των θερμικών απωλειών κατά τη χειμερινή περίοδο και τον περιορισμό των θερμικών κερδών κατά το καλοκαίρι.

Σενάριο 4: Συνδυαστική εφαρμογή όλων των παραπάνω παρεμβάσεων, ώστε να αξιολογηθεί η συνολική επίδρασή τους στην ενεργειακή κατανάλωση, στους δείκτες ενεργειακής έντασης (Site EUI και Source EUI) και στο ανθρακικό αποτύπωμα του κτιρίου.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων βασίστηκε στους δείκτες ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση και θεωρητική ψύξη, στη συνολική κατανάλωση ενέργειας, στους δείκτες ενεργειακής έντασης (Site EUI και Source EUI), καθώς και στους δείκτες λειτουργικού και ενσωματωμένου ανθρακικού αποτυπώματος.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ενεργειακής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης του υπό μελέτη σχολικού κτιρίου. Αρχικά αναλύεται η ενεργειακή συμπεριφορά της υφιστάμενης κατάστασης, η οποία αποτελεί τη βάση σύγκρισης (baseline) για την αξιολόγηση των προτεινόμενων παρεμβάσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε σενάριο ενεργειακής και βιοκλιματικής αναβάθμισης, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση όλων των σεναρίων.

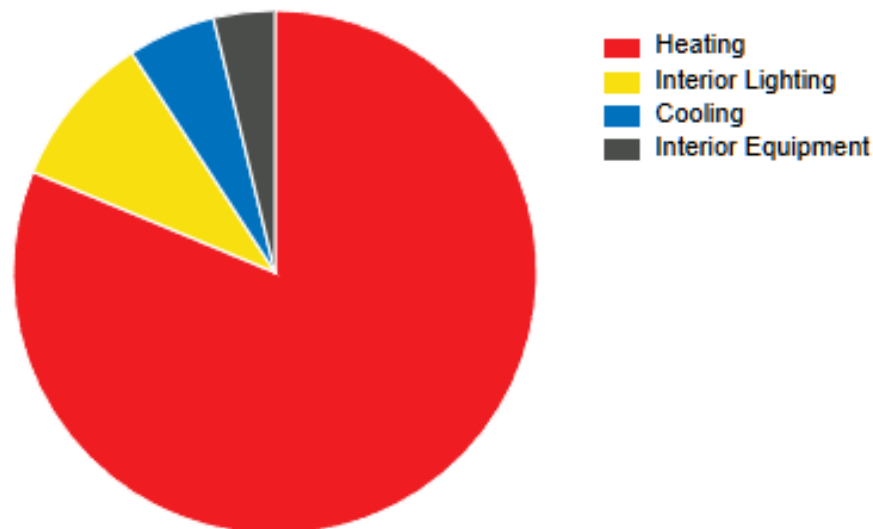
4.2. Υφιστάμενη κατάσταση

4.2.1. Συνολική ενεργειακή κατανάλωση

Η ενεργειακή προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης, η οποία χρησιμοποιείται ως μοντέλο αναφοράς (baseline) για την αξιολόγηση όλων των σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης, έδειξε ότι η ετήσια συνολική κατανάλωση ενέργειας (Total Site Energy) του κτιρίου ανέρχεται σε 529,84 GJ, που αντιστοιχούν σε 147.178 kWh. Ο Δείκτης Ενεργειακής Χρήσης (Energy Use Intensity, EUI) διαμορφώνεται σε 103,01 kWh/m² (370,83 MJ/m²) για την ενέργεια στο σημείο χρήσης (Site Energy), ενώ ο αντίστοιχος δείκτης πρωτογενούς ενέργειας (Source Energy Intensity) ανέρχεται σε 351,79 kWh/m² (1.266,43 MJ/m²), αποτυπώνοντας τις απώλειες που προκύπτουν κατά την παραγωγή και μεταφορά της ενέργειας..

Πίνακας 7. Ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά κατηγορία χρήσης (υφιστάμενη κατάσταση)

Κατηγορία	GJ	kWh	Ποσοστό (%)
Θέρμανση	430,59	119,608	81,27
Θεωρητική ψύξη	28,75	7.986	5,43
Εσωτερικός φωτισμός	50,46	14.017	9,52
Εσωτερικός εξοπλισμός	20,04	5.567	3,78
Σύνολο	529,84	147.178	100,00



Σχήμα 1. Κατανομή της ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης της υφιστάμενης κατάστασης ανά τελική χρήση.

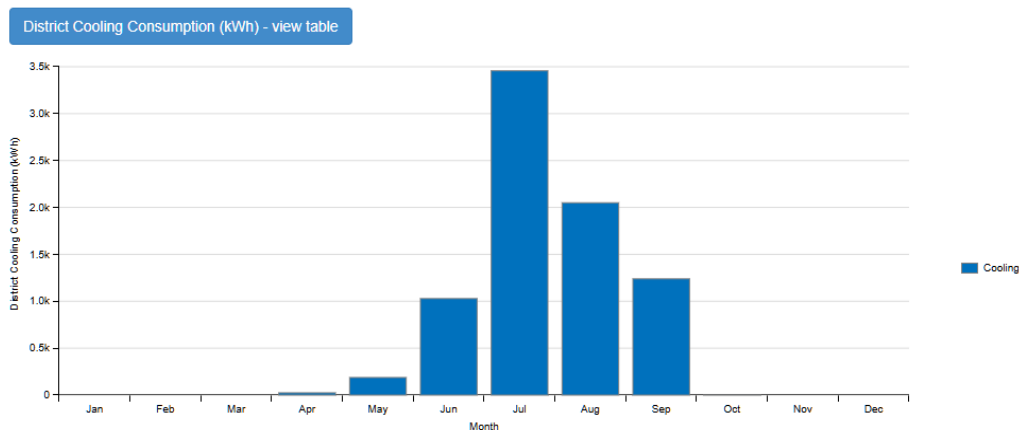
Η ανάλυση της ετήσιας κατανάλωσης καταδεικνύει ότι ο κυρίαρχος παράγοντας ενεργειακής κατανάλωσης είναι η θέρμανση, η οποία αντιστοιχεί στο 81,27% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης του κτιρίου. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο για κτίριο κατασκευής του 1988 χωρίς επαρκή θερμομόνωση κελύφους, σε κλιματική ζώνη με ψυχρούς χειμώνες και συχνούς παγετούς (Κλιματική Ζώνη Γ, Αριδαία). Ο εσωτερικός φωτισμός αποτελεί το 9,5% της κατανάλωσης, ενώ ο εξοπλισμός και τα θεωρητικά φορτία ψύξης αντιστοιχούν σε 3,8% και 5,4%, αντίστοιχα. Η κατανομή αυτή υποδηλώνει ότι η μεγαλύτερη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας εντοπίζεται στη μείωση των θερμικών απωλειών μέσω του κτιριακού κελύφους.

Σημειώνεται ότι το κτίριο δεν διαθέτει εγκατεστημένο μηχανικό σύστημα ψύξης. Συνεπώς, τα φορτία ψύξης που προκύπτουν από την ενεργειακή ανάλυση (7.986 kWh) αποτελούν θεωρητικές ενεργειακές απαιτήσεις που υπολογίζονται υπό συνθήκες ιδανικού συστήματος κάλυψης φορτίων (Ideal Loads Cooling) και όχι πραγματική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.. Οι τιμές αυτές εκφράζουν την ενέργεια που θα απαιτούνταν από ένα ιδανικό

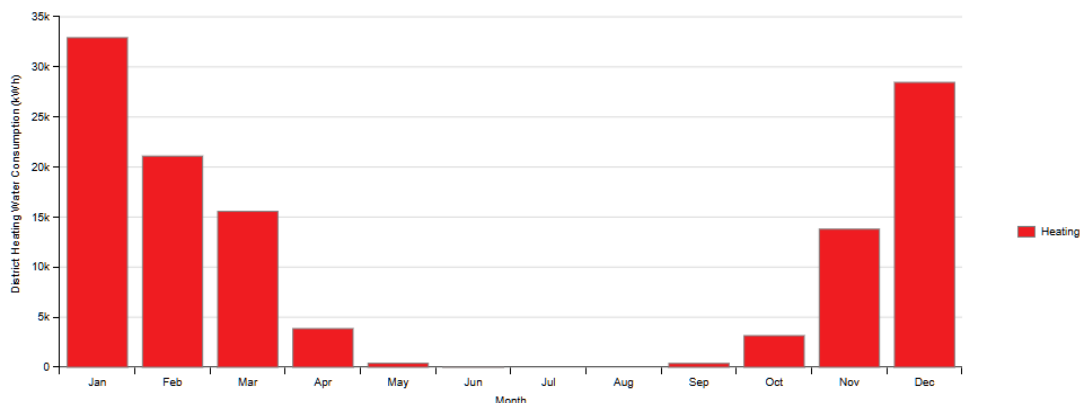
σύστημα ψύξης για τη διατήρηση των συνθηκών θερμικής άνεσης κατά τη θερινή περίοδο και χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τη συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης.

4.2.2. Μηνιαίο προφίλ κατανάλωσης

Η ανάλυση της μηνιαίας κατανομής των ενεργειακών απαιτήσεων παρέχει μια πιο αναλυτική εικόνα της εποχικής συμπεριφοράς του κτιρίου, αναδεικνύοντας τις μεταβολές των αναγκών θέρμανσης και θεωρητικής ψύξης κατά τη διάρκεια του έτους. Οι τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5 προέκυψαν από την ενεργειακή προσομοίωση του μοντέλου αναφοράς (baseline) και εκφράζουν τις μηνιαίες ενεργειακές απαιτήσεις για τη διατήρηση των συνθηκών θερμικής άνεσης στους εσωτερικούς χώρους.



Σχήμα 2. Μηνιαία κατανομή φορτίων ψύξης



Σχήμα 3. Μηνιαία κατανομή φορτίων θέρμανσης

Πίνακας 8. Μηνιαία κατανάλωση θέρμανσης και θεωρητικής ψύξης (kWh)

Μήνας	Θέρμανση (kWh)	Ψύξη (kWh)
Ιανουάριος	32.912,50	0
Φεβρουάριος	21.089,94	0
Μάρτιος	15.564,42	0
Απρίλιος	3.853,61	24,10
Μάιος	394,52	187,38
Ιούνιος	10,87	1.028,59
Ιούλιος	0	3.456,81
Αύγουστος	0	2.050,19
Σεπτέμβριος	380,74	1.239,05
Οκτώβριος	3.151,61	0,41
Νοέμβριος	13.794,22	0
Δεκέμβριος	28.455,00	0
Σύνολο	119.607,45	7.986,54

Η μηνιαία κατανομή της ενεργειακής κατανάλωσης αναδεικνύει τον έντονα εποχικό χαρακτήρα των θερμικών αναγκών του σχολικού κτιρίου. Η κατανάλωση θέρμανσης συγκεντρώνεται σχεδόν αποκλειστικά κατά τη χειμερινή περίοδο, με μέγιστες τιμές τον Ιανουάριο (32.912,50 kWh) και τον Δεκέμβριο (28.455,00 kWh), ενώ παραμένει ιδιαίτερα υψηλή και κατά τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο. Από τον Απρίλιο οι απαιτήσεις θέρμανσης μειώνονται σημαντικά και κατά τους θερινούς μήνες Ιούλιο και Αύγουστο

μηδενίζονται, γεγονός που αντανακλά τόσο τις κλιματικές συνθήκες όσο και τη διακοπή της λειτουργίας του σχολείου.

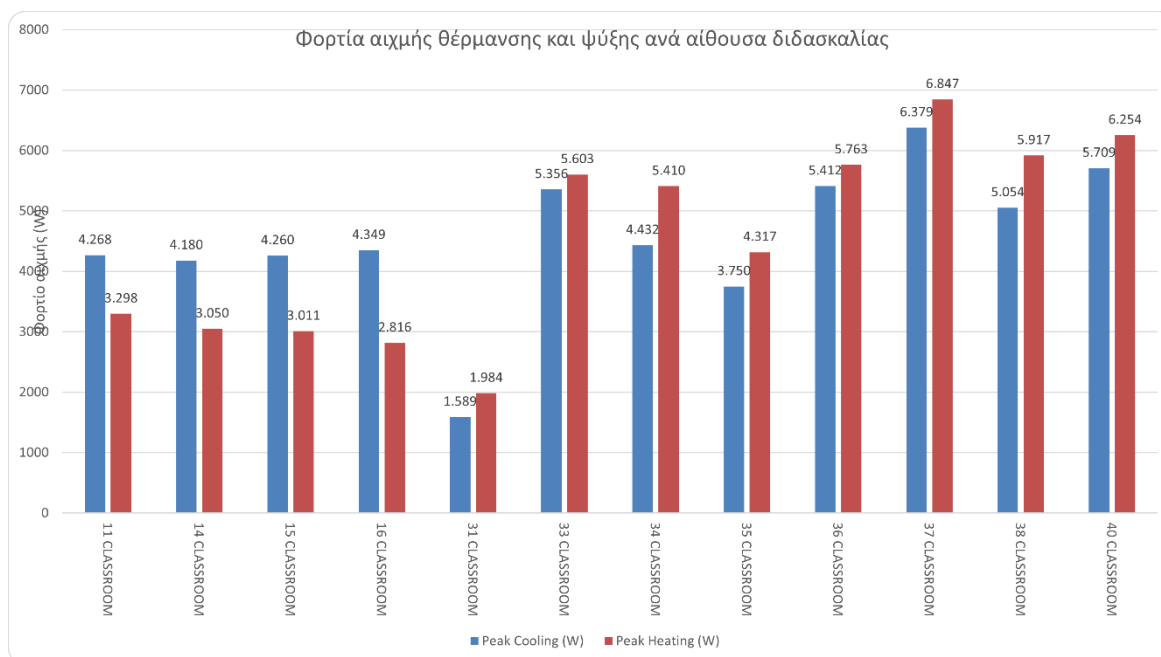
Αντίστοιχα, οι θεωρητικές ανάγκες ψύξης εμφανίζονται από τον Απρίλιο, αυξάνονται σταδιακά κατά τους μήνες Μάιο και Ιούνιο και κορυφώνονται τον Ιούλιο (3.456,80 kWh), ενώ παραμένουν αυξημένες και τον Αύγουστο (2.050,20 kWh). Τον Σεπτέμβριο καταγράφεται ακόμη σημαντική απαίτηση ψύξης (1.239,10 kWh), η οποία ουσιαστικά μηδενίζεται από τον Οκτώβριο.

4.2.3. Ενεργειακή συμπεριφορά των θερμικών χώρων (Spaces)

Η ανάλυση των φορτίων αιχμής θέρμανσης και ψύξης ανά θερμική ζώνη ανέδειξε σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των επιμέρους χώρων του σχολικού κτιρίου. Οι διαφοροποιήσεις αυτές αποδίδονται κυρίως στον προσανατολισμό, τη γεωμετρία του κελύφους, την επιφάνεια των υαλοπινάκων, καθώς και στη θέση κάθε χώρου μέσα στο κτίριο.

Όσον αφορά τα φορτία αιχμής θέρμανσης, οι υψηλότερες τιμές στο σύνολο των θερμικών χώρων καταγράφηκαν στους διαδρόμους Space 39 (24,02 kW) και Space 1 (22,68 kW), γεγονός που συνδέεται με το μεγάλο εμβαδόν τους και την εκτεταμένη επαφή τους με το εξωτερικό περιβάλλον. Μεταξύ των αιθουσών διδασκαλίας, τα υψηλότερα φορτία θέρμανσης εμφανίστηκαν στις θερμικές ζώνες Space 37 (6,85 kW), Space 40 (6,25 kW), Space 38 (5,92 kW), Space 36 (5,76 kW) και Space 33 (5,60 kW), ενώ η χαμηλότερη τιμή καταγράφηκε στη Space 31 (1,98 kW).

Αντίστοιχα, ως προς τα φορτία αιχμής ψύξης, οι υψηλότερες απαιτήσεις μεταξύ των αιθουσών διδασκαλίας καταγράφηκαν στις θερμικές ζώνες Space 37 (6,38 kW), Space 40 (5,71 kW), Space 36 (5,41 kW), Space 33 (5,36 kW) και Space 38 (5,05 kW), ενώ η χαμηλότερη απαίτηση παρατηρήθηκε στη Space 31 (1,59 kW). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι ίδιες περίπου αίθουσες εμφανίζουν αυξημένη ενεργειακή επιβάρυνση τόσο κατά τη χειμερινή όσο και κατά τη θερινή περίοδο.



Σχήμα 4. Φορτία αιχμής θέρμανσης και ψύξης ανά θερμική ζώνη (Space) για τις αίθουσες διδασκαλίας του υφιστάμενου κτιρίου.

4.2.4. Αποτύπωμα Άνθρακα

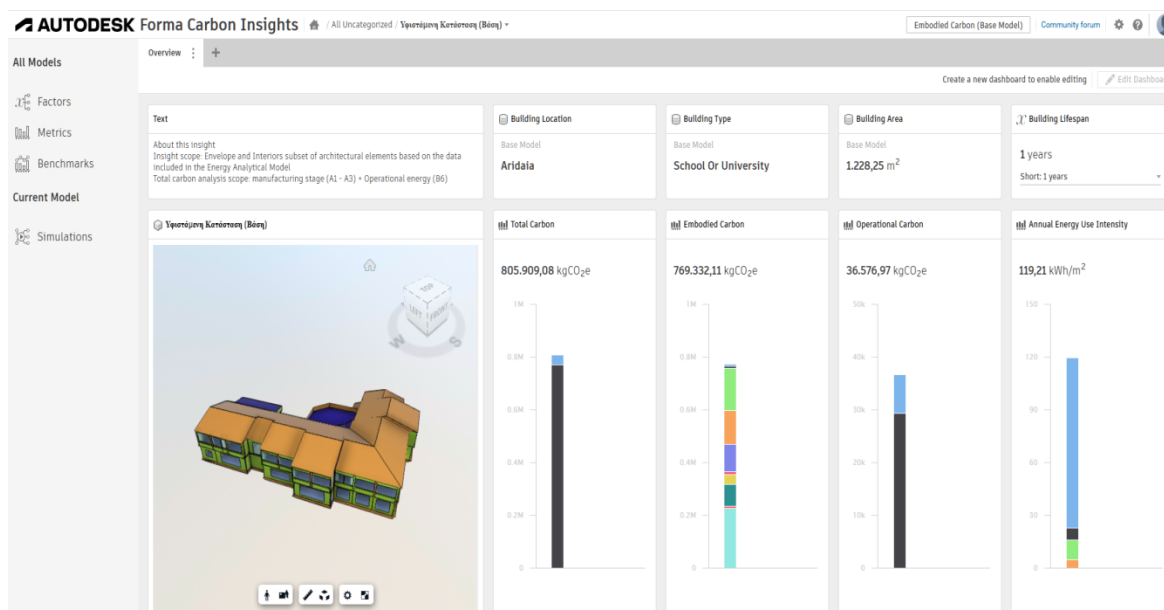
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη χρήση του λογισμικού Autodesk Forma Carbon Insights, το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του κτιρίου ανέρχεται σε 805.909,08 kgCO_{2e}. Από αυτό, 769.332,11 kgCO_{2e} (95,46%) αντιστοιχούν στον ενσωματωμένο άνθρακα των δομικών υλικών (Embodied Carbon), ενώ 36.576,97 kgCO_{2e} (4,54%) αφορούν τον λειτουργικό άνθρακα (Operational Carbon), ο οποίος σχετίζεται με την ετήσια κατανάλωση ενέργειας του κτιρίου.

Η ιδιαίτερα υψηλή συμμετοχή του ενσωματωμένου άνθρακα οφείλεται κυρίως στη μεγάλη ποσότητα δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται στο κτίριο, όπως το οπλισμένο σκυρόδεμα, οι τοιχοποιίες, η στέγη και τα υπόλοιπα στοιχεία του φέροντος οργανισμού και του κελύφους. Αντίθετα, ο λειτουργικός άνθρακας εξαρτάται από τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του και επηρεάζεται άμεσα από τις ανάγκες θέρμανσης, ψύξης και ηλεκτρικής κατανάλωσης.

Παράλληλα, το Autodesk Forma Carbon Insights υπολογίζει ετήσιο δείκτη ενεργειακής έντασης (Annual Energy Use Intensity -EUI) ίσο με 119,21 kWh/m², για συνολική επιφάνεια κτιρίου 1.228,25 m². Η τιμή αυτή προκύπτει από το υπολογιστικό περιβάλλον του Forma Carbon Insights και δεν είναι άμεσα συγκρίσιμη με τον δείκτη Site EUI που

εξήχθη από το Open Studio, καθώς τα δύο λογισμικά χρησιμοποιούν διαφορετικές παραδοχές, βάσεις δεδομένων και μεθοδολογίες υπολογισμού. Για τον λόγο αυτό, ο συγκεκριμένος δείκτης αξιοποιείται αποκλειστικά ως συμπληρωματικός δείκτης περιβαλλοντικής αξιολόγησης και όχι για την αριθμητική σύγκριση των ενεργειακών σεναρίων.

Τα αποτελέσματα αυτά αποτελούν τη βάση αναφοράς για την εκτίμηση της περιβαλλοντικής επίδρασης των προτεινόμενων παρεμβάσεων. Η αξιολόγηση των σεναρίων θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο τη μείωση του λειτουργικού ανθρακικού αποτυπώματος που επιτυγχάνεται μέσω της εξοικονόμησης ενέργειας όσο και την πιθανή αύξηση του ενσωματωμένου άνθρακα που συνεπάγεται η προσθήκη νέων θερμομονωτικών υλικών και ενεργειακών κουφωμάτων, ώστε να προκύπτει μια ολοκληρωμένη αποτίμηση του συνολικού περιβαλλοντικού οφέλους.



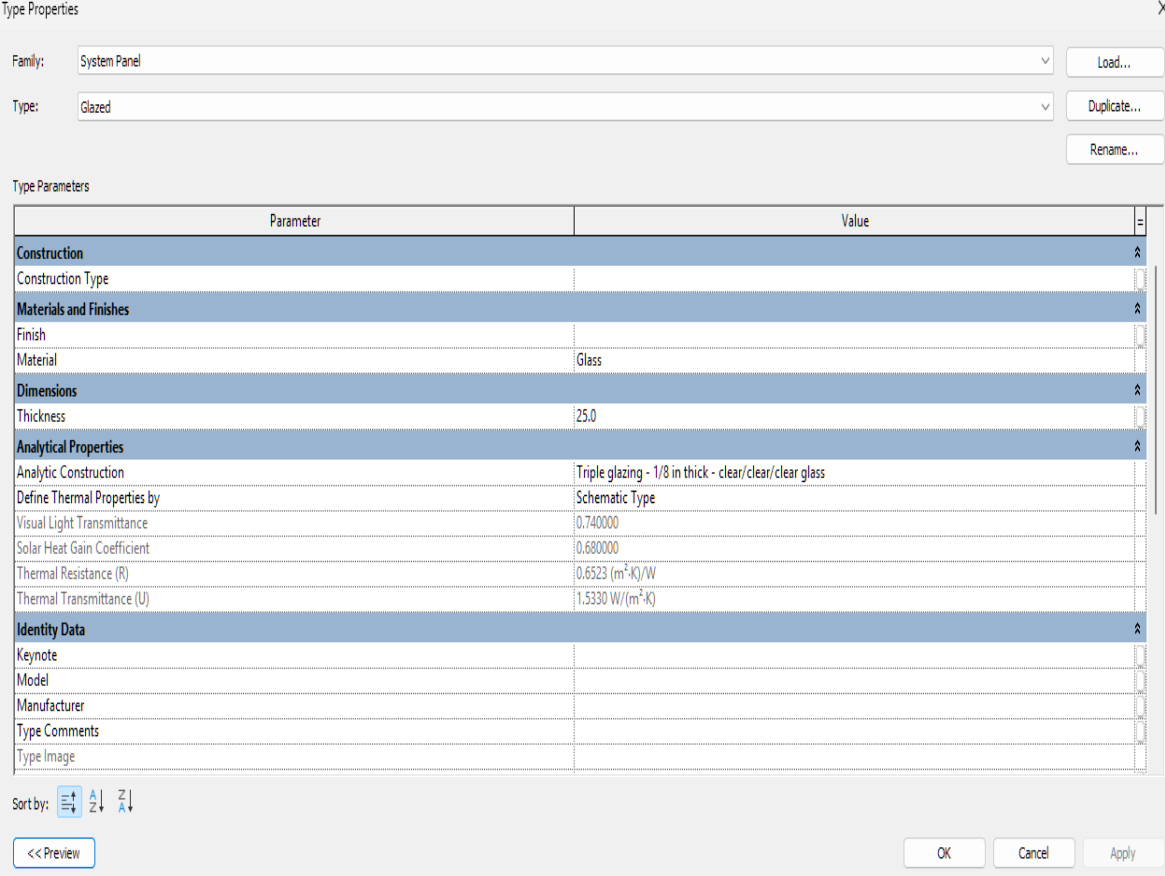
Εικόνα 23. Αποτελέσματα του Υφιστάμενου στο Autodesk Forma Carbon Insights.

4.3. Σενάριο 1 - Αντικατάσταση κουφωμάτων

4.3.1. Περιγραφή της παρέμβασης

Το πρώτο σενάριο αφορά την αντικατάσταση όλων των υφιστάμενων εξωτερικών κουφωμάτων του σχολικού κτιρίου με νέα ενεργειακά αποδοτικά κουφώματα αλουμινίου με θερμοδιακοπή και τριπλούς υαλοπίνακες. Η γεωμετρία του κτιρίου, ο προσανατολισμός, η χρήση των χώρων, τα εσωτερικά θερμικά κέρδη και όλες οι υπόλοιπες παράμετροι του ενεργειακού μοντέλου παρέμειναν αμετάβλητες, ώστε η μεταβολή των αποτελεσμάτων να αποδίδεται αποκλειστικά στη βελτίωση των θερμικών χαρακτηριστικών των κουφωμάτων.

Η παρέμβαση στοχεύει στη μείωση των θερμικών απωλειών κατά τη χειμερινή περίοδο, στον περιορισμό των ανεπιθύμητων ηλιακών θερμικών κερδών κατά τη θερινή περίοδο και στη συνολική βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κελύφους.



Type Properties

Family: System Panel Load...

Type: Glazed Duplicate... Rename...

Type Parameters

Parameter	Value
Construction	
Construction Type	
Materials and Finishes	
Finish	
Material	Glass
Dimensions	
Thickness	25.0
Analytical Properties	
Analytic Construction	Triple glazing - 1/8 in thick - clear/clear/clear glass
Define Thermal Properties by	Schematic Type
Visual Light Transmittance	0.740000
Solar Heat Gain Coefficient	0.680000
Thermal Resistance (R)	0.6523 (m ² ·K)/W
Thermal Transmittance (U)	1.5330 W/(m ² ·K)
Identity Data	
Keynote	
Model	
Manufacturer	
Type Comments	
Type Image	

Sort by: [icon] [icon] [icon]

<< Preview OK Cancel Apply

Εικόνα 24. Ιδιότητες υαλοπίνακας – τριπλός υαλοπίνακας

4.3.2. Αποτελέσματα ενεργειακής αξιολόγησης Σεναρίου 1

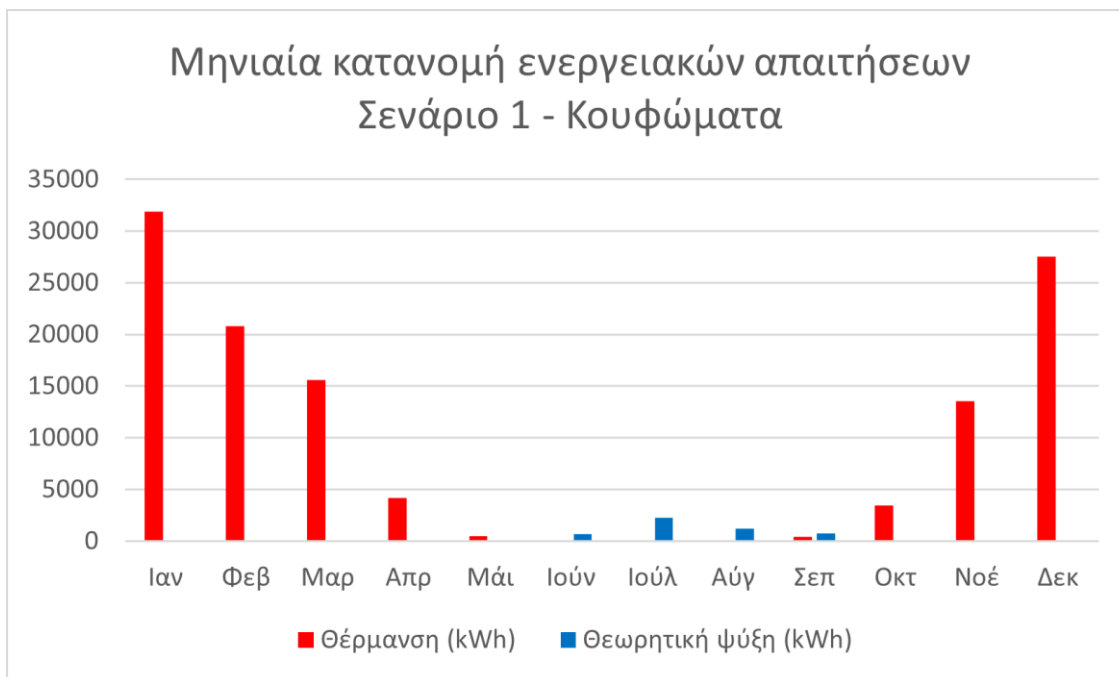
Η αντικατάσταση των υφιστάμενων κουφωμάτων επέφερε περιορισμένη αλλά μετρήσιμη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου. Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 6, η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση μειώθηκε από 119.608 kWh σε 117.786

kWh, δηλαδή κατά 1,52%. Αντίθετα, οι θεωρητικές απαιτήσεις ψύξης μειώθηκαν σημαντικότερα, από 7.987 kWh σε 4.956 kWh, παρουσιάζοντας μείωση 37,95%.

Ως αποτέλεσμα, η συνολική κατανάλωση του συστήματος HVAC μειώθηκε από 127.594 kWh σε 122.742 kWh, δηλαδή κατά 3,80%. Παράλληλα, η συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου περιορίστηκε από 147.178 kWh σε 141.539 kWh, παρουσιάζοντας μείωση 3,83%. Οι δείκτες ενεργειακής έντασης εμφάνισαν επίσης βελτίωση. Συγκεκριμένα, το Site EUI μειώθηκε από 103,01 σε 99,61 kWh/m² (-3,30%), ενώ το Source EUI περιορίστηκε από 351,79 σε 344,94 kWh/m² (-1,95%). Οι μεταβολές αυτές επιβεβαιώνουν ότι η αντικατάσταση των κουφωμάτων συμβάλλει θετικά στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου, αν και το συνολικό ενεργειακό όφελος παραμένει σχετικά περιορισμένο.

Πίνακας 9. Συγκριτική αξιολόγηση της ενεργειακής κατανάλωσης Σ1

Δείκτης	Υφιστάμενο	Σενάριο 1	Μεταβολή
Θέρμανση	119.608kWh	117.786kWh	-1,52 %
Θεωρητική ψύξη	7.986kWh	4.956kWh	-37,95 %
Συνολική κατανάλωση HVAC	127.594kWh	122.742kWh	-3,80 %
Συνολική ενεργειακή κατανάλωση	147.178 kWh	141.539 kWh	-3,83%
Site EUI (kWh/m ²)	103,01	99,61	-3,30 %
Source EUI(kWh/m ²)	351,79	344,94	-1,95 %



Σχήμα 5. Μηνιαία κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων Σεναρίου 1

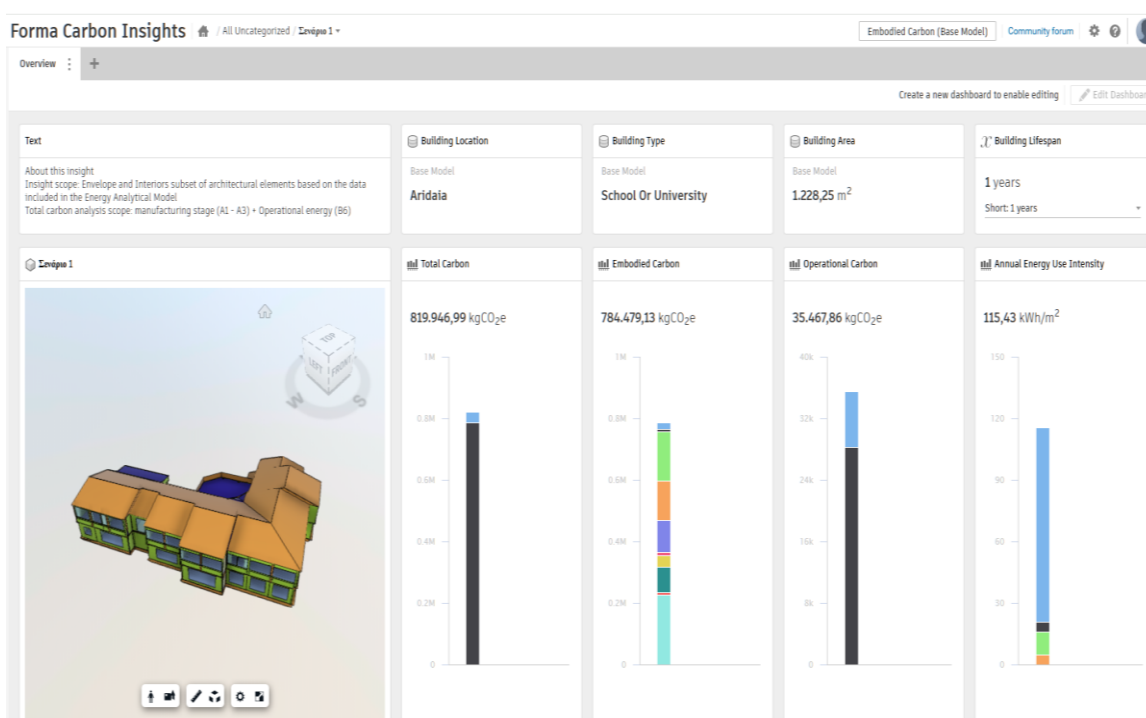
Η μηνιαία κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων δείχνει ότι η μεγαλύτερη μείωση παρατηρείται κατά τη θερινή περίοδο, όπου περιορίζονται σημαντικά τα ψυκτικά φορτία, ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες η μείωση των απαιτήσεων θέρμανσης είναι μικρότερη. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι η βελτίωση των θερμοφυσικών χαρακτηριστικών των κουφωμάτων μειώνει αποτελεσματικά τα ηλιακά θερμικά κέρδη μέσω των ανοιγμάτων, χωρίς όμως να αντιμετωπίζει τις θερμικές απώλειες που οφείλονται στο ανεπαρκώς μονωμένο κέλυφος του κτιρίου.

4.3.3. Περιβαλλοντική αξιολόγηση με το Autodesk Forma Carbon Insights

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση του Σεναρίου 1 πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του Autodesk Forma Carbon Insights, με στόχο την εκτίμηση της επίδρασης της αντικατάστασης των κουφωμάτων στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του κτιρίου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 24.

Σύμφωνα με την ανάλυση, το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του κτιρίου διαμορφώθηκε σε 819.946,99 kgCO_{2e}, εκ των οποίων 784.479,13 kgCO_{2e} αντιστοιχούν στον ενσωματωμένο άνθρακα (Embodied Carbon) και 35.467,86 kgCO_{2e} στον λειτουργικό άνθρακα (Operational Carbon). Παράλληλα, ο δείκτης Annual Energy Use Intensity (Annual EUI) ανήλθε σε 115,43 kWh/m².

Σε σύγκριση με την υφιστάμενη κατάσταση, παρατηρείται μείωση του λειτουργικού ανθρακικού αποτυπώματος, γεγονός που συνδέεται άμεσα με τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας που προέκυψε από τη βελτίωση των θερμοφυσικών χαρακτηριστικών των κουφωμάτων. Αντίθετα, ο ενσωματωμένος άνθρακας εμφανίζει μικρή αύξηση, καθώς η αντικατάσταση των υφιστάμενων κουφωμάτων απαιτεί την παραγωγή και εγκατάσταση νέων δομικών στοιχείων, τα οποία επιβαρύνουν το αποτύπωμα άνθρακα κατά το στάδιο της κατασκευής.



Εικόνα 25. Αποτελέσματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης του Σεναρίου 1 στο Autodesk Forma Carbon Insights.

Πίνακας 10. Συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών περιβαλλοντικής αξιολόγησης Σ1

Δείκτης	Υφιστάμενο	Σενάριο 1	Μεταβολή
Total Carbon	805.909 kgCO ₂ e	819.947 kgCO ₂ e	+1,74%

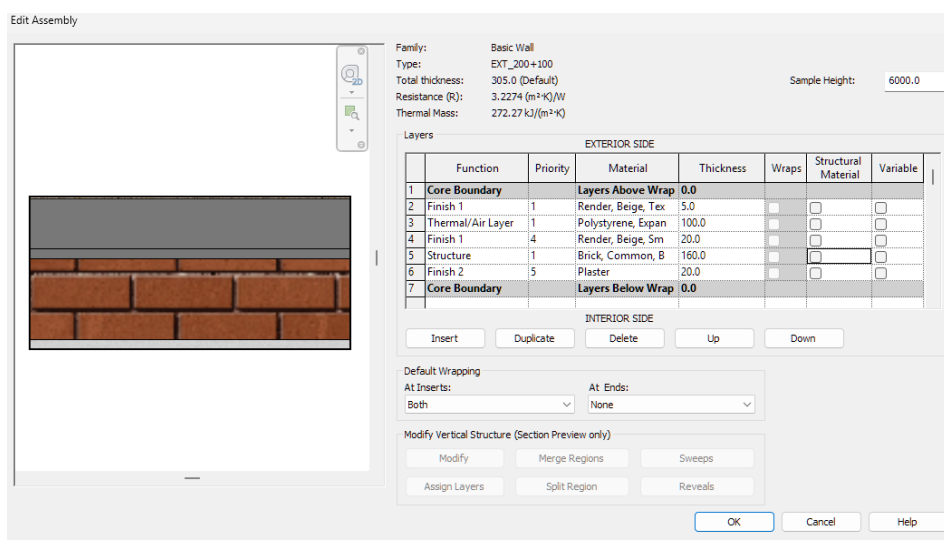
Embodied Carbon	769.332 kgCO ₂ e	784.479 kgCO ₂ e	+1,97%
Operational Carbon	36.577 kgCO ₂ e	35.468 kgCO ₂ e	-3,03%
Annual EUI	119,21 kWh/m ²	115,43 kWh/m ²	-3,17%

4.4. Σενάριο2 - Εξωτερική θερμομόνωση

4.4.1. Περιγραφή της παρέμβασης

Το δεύτερο σενάριο εξετάζει την επίδραση της εφαρμογής εξωτερικής θερμομόνωσης στους εξωτερικούς τοίχους του σχολικού κτιρίου. Για τον σκοπό αυτό, στο ενεργειακό μοντέλο του Autodesk Revit τροποποιήθηκαν αποκλειστικά τα θερμικά χαρακτηριστικά των εξωτερικών τοίχων, μέσω της προσθήκης θερμομονωτικού υλικού πάχους 10 cm, ενώ όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του κτιρίου παρέμειναν αμετάβλητα σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς. Συγκεκριμένα, η γεωμετρία του κτιρίου, τα κουφώματα, η στέγη, οι συνθήκες λειτουργίας, τα εσωτερικά θερμικά κέρδη και οι παράμετροι της ενεργειακής προσομοίωσης δεν μεταβλήθηκαν.

Η παρέμβαση στοχεύει κυρίως στον περιορισμό των θερμικών απωλειών μέσω των εξωτερικών τοιχοποιιών και στη βελτίωση της θερμικής προστασίας του κελύφους.



Εικόνα 26. Σύνθεση εξωτερικής τοιχοποιίας 20 εκ. με προσθήκη θερμομονωτικού υλικού εξωτερικά.
Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

4.4.2. Αποτελέσματα ενεργειακής αξιολόγησης Σεναρίου 2

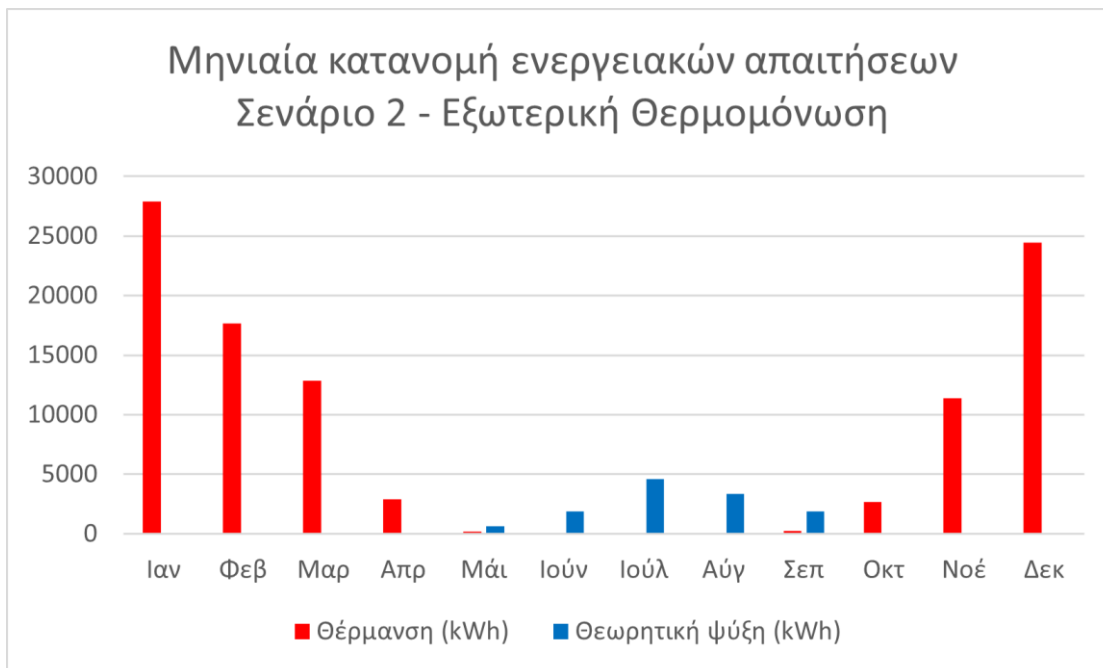
Η ενεργειακή αξιολόγηση του Σεναρίου 2 πραγματοποιήθηκε με στόχο την εκτίμηση της επίδρασης της εφαρμογής εξωτερικής θερμομόνωσης στις τοιχοποιίες του σχολικού κτιρίου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 8, ενώ η μηνιαία κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων απεικονίζεται στο Σχήμα 6.

Η εφαρμογή της εξωτερικής θερμομόνωσης οδήγησε σε σημαντική βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου. Η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση μειώθηκε από 119.608 kWh σε 100.181 kWh, παρουσιάζοντας μείωση 16,24%. Αντίθετα, οι θεωρητικές απαιτήσεις ψύξης αυξήθηκαν από 7.986 kWh σε 12.486 kWh, σημειώνοντας αύξηση 56,35%.

Παρά την αύξηση των αναγκών ψύξης, η συνολική κατανάλωση του συστήματος HVAC μειώθηκε από 127.594 kWh σε 112.667 kWh, δηλαδή κατά 11,70%, γεγονός που δείχνει ότι η σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση υπεραντισταθμισε την αύξηση των ψυκτικών απαιτήσεων. Παράλληλα, η συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου μειώθηκε κατά 9,98%, ενώ οι δείκτες ενεργειακής έντασης παρουσίασαν επίσης σημαντική βελτίωση. Συγκεκριμένα, το Site EUI μειώθηκε από 103,01 σε 91,36 kWh/m² (-11,31%), ενώ το Source EUI περιορίστηκε από 351,79 σε 301,99 kWh/m² (-14,15%).

Πίνακας 11. Συγκριτική αξιολόγηση της ενεργειακής κατανάλωσης Σεναρίου 2

Δείκτης	Υφιστάμενο	Σενάριο 2	Μεταβολή
Θέρμανση (kWh)	119.608	100.181	-16,24%
Θεωρητική ψύξη(kWh)	7.986	12.486	+56,35%
Συνολική κατανάλωση HVAC (kWh)	127.594	112.667	-11,70%
Συνολική ενεργειακή κατανάλωση (kWh)	147.178	132.483	-9,98%
Site EUI(kWh/m ²)	103,01	91,36	-11,31%
Source EUI (kWh/m ²)	351,79	301,99	-14,15%



Σχήμα 6. Μηνιαία κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων Σεναρίου 2

Η μηνιαία κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων δείχνει ότι η εφαρμογή της εξωτερικής θερμομόνωσης περιορίζει σημαντικά τις ανάγκες θέρμανσης κατά τους χειμερινούς μήνες, μειώνοντας τις θερμικές απώλειες μέσω των εξωτερικών τοιχοποιιών. Αντίθετα, κατά τη θερινή περίοδο παρατηρείται αύξηση των απαιτήσεων ψύξης, καθώς η βελτιωμένη θερμομονωτική προστασία περιορίζει την αποβολή της θερμότητας που συσσωρεύεται στο εσωτερικό του κτιρίου. Παρότι τα ψυκτικά φορτία αυξάνονται, η συνολική ενεργειακή απόδοση του κτιρίου βελτιώνεται αισθητά, καθώς οι ανάγκες θέρμανσης αποτελούν το κυρίαρχο ενεργειακό φορτίο του σχολικού κτιρίου.

4.4.3. Περιβαλλοντική αξιολόγηση με το Autodesk Forma Carbon Insights

Σύμφωνα με την ανάλυση, το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του κτιρίου διαμορφώθηκε σε 844.700,98 kgCO_{2e}, εκ των οποίων 811.205,75 kgCO_{2e} αντιστοιχούν στον ενσωματωμένο άνθρακα (Embodied Carbon) και 33.495,22 kgCO_{2e} στον λειτουργικό άνθρακα (Operational Carbon). Παράλληλα, ο δείκτης Annual Energy Use Intensity (Annual EUI) ανήλθε σε 108,32 kWh/m².

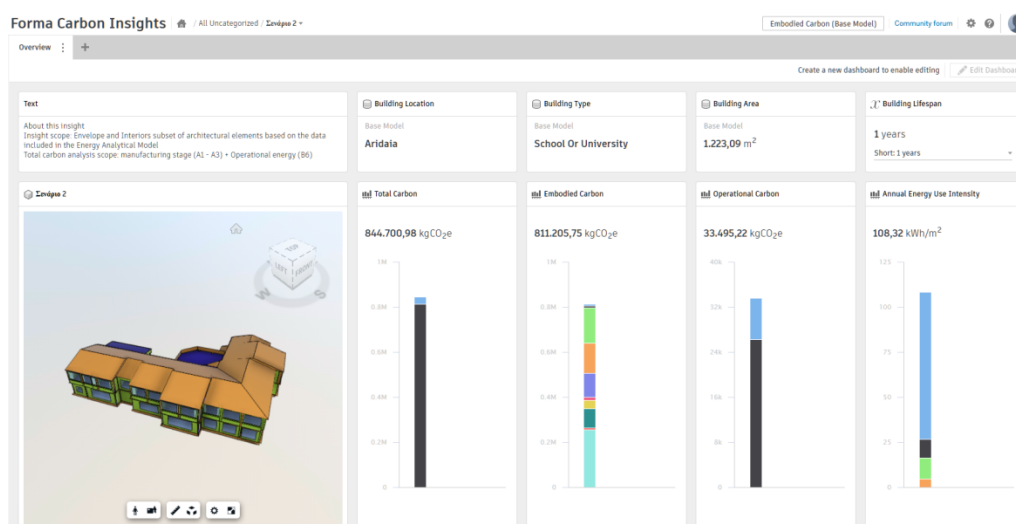
Σε σύγκριση με την υφιστάμενη κατάσταση, παρατηρείται σημαντική μείωση του λειτουργικού ανθρακικού αποτυπώματος, γεγονός που οφείλεται στη σημαντική μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση που επιφέρει η εφαρμογή της εξωτερικής

θερμομόνωσης. Αντίθετα, ο ενσωματωμένος άνθρακας αυξάνεται λόγω της προσθήκης των νέων θερμομονωτικών υλικών στο κτιριακό κέλυφος, γεγονός που συνεπάγεται επιπλέον περιβαλλοντική επιβάρυνση κατά το στάδιο παραγωγής και εγκατάστασής τους.

Πίνακας 12. Συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών περιβαλλοντικής αξιολόγησης Σ2

Δείκτης	Υφιστάμενο	Σενάριο 2	Μεταβολή
Total Carbon	805.909 kgCO ₂ e	844.701 kgCO ₂ e	+4,81%
Embodied Carbon	769.332 kgCO ₂ e	811.206 kgCO ₂ e	+5,44%
Operational Carbon	36.577 kgCO ₂ e	33.495 kgCO ₂ e	-8,42%
Annual EUI	119,21 kWh/m ²	108,32 kWh/m ²	-9,14%

Παρά την αύξηση του ενσωματωμένου άνθρακα, η εφαρμογή της εξωτερικής θερμομόνωσης οδηγεί σε αισθητή μείωση του δείκτη Annual EUI, γεγονός που επιβεβαιώνει τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου κατά τη φάση λειτουργίας. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι η αξιολόγηση των παρεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο τη μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης ενέργειας όσο και την περιβαλλοντική επιβάρυνση που σχετίζεται με τα νέα δομικά υλικά.



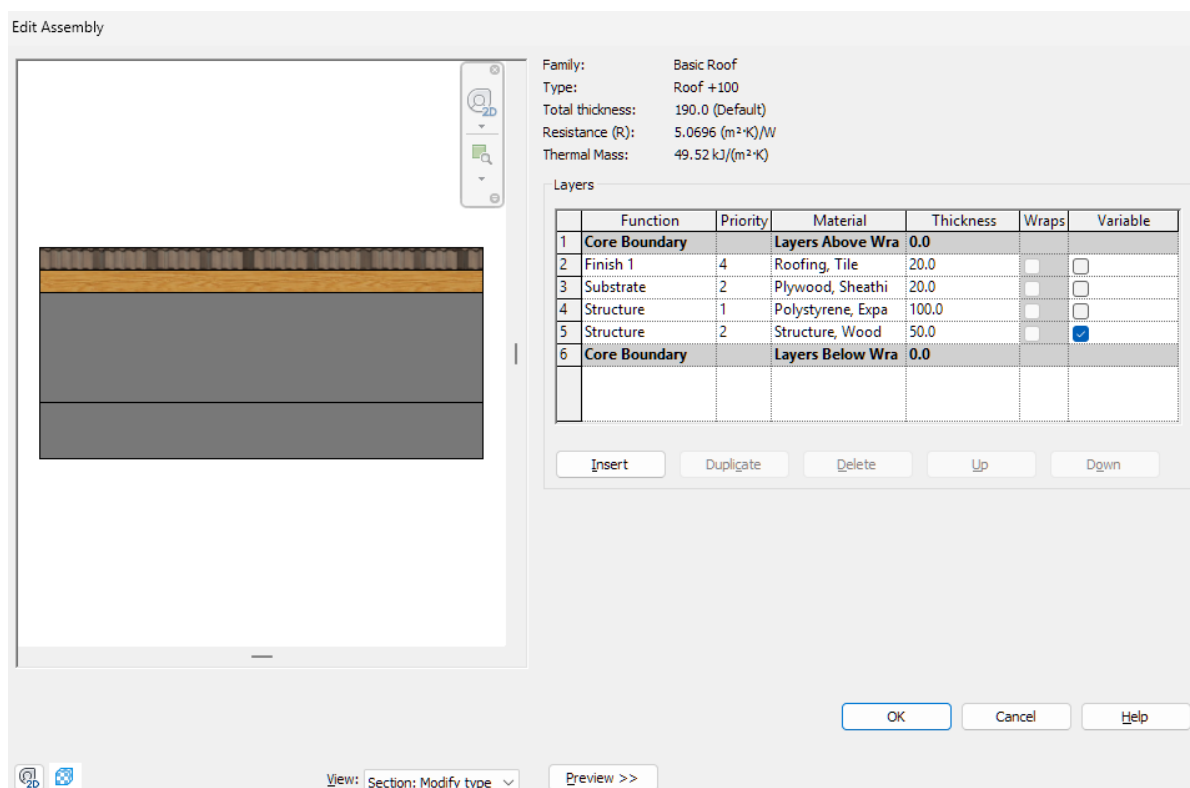
Εικόνα 27. Αποτελέσματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης του Σεναρίου 2 στο Autodesk Forma Carbon Insights.

4.5. Σενάριο 3 -Θερμομόνωση τοίχων και στέγης

4.5.1. Περιγραφή της παρέμβασης

Το τρίτο σενάριο εξετάζει την επίδραση της εφαρμογής εξωτερικής θερμομόνωσης στο κέλυφος του σχολικού κτιρίου συνδυαστικά με μόνωση της στέγης με θερμομονωτικές πλάκες διογκωμένης πολυστερίνης πάχους 10εκ.. Ουσιαστικά, στο μοντέλο του σεναρίου 2, τροποποιήθηκαν αποκλειστικά τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά της στέγης, μέσω της προσθήκης θερμομονωτικού υλικού διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) πάχους 10 cm. Όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του κτιρίου, όπως η γεωμετρία, τα κουφώματα, οι συνθήκες λειτουργίας, τα εσωτερικά θερμικά κέρδη και οι παράμετροι της ενεργειακής προσομοίωσης, διατηρήθηκαν αμετάβλητα σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς.

Η παρέμβαση στοχεύει στον δραστικό περιορισμό των θερμικών απωλειών μέσω του κελύφους, βελτιώνοντας τόσο τη θερμομονωτική προστασία των κατακόρυφων δομικών στοιχείων όσο και της οροφής, η οποία αποτελεί μία από τις σημαντικότερες επιφάνειες ανταλλαγής θερμότητας με το εξωτερικό περιβάλλον.



Εικόνα 28. Σύνθεση στέγης με προσθήκη θερμομονωτικού υλικού. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

4.5.2. Αποτελέσματα ενεργειακής αξιολόγησης Σεναρίου 3

Η ενεργειακή αξιολόγηση του Σεναρίου 3 πραγματοποιήθηκε με στόχο την εκτίμηση της επίδρασης της συνδυασμένης εφαρμογής εξωτερικής θερμομόνωσης στους τοίχους και θερμομόνωσης της στέγης στην ενεργειακή συμπεριφορά του σχολικού κτιρίου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 10, ενώ η μηνιαία κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων απεικονίζεται στο Σχήμα 28.

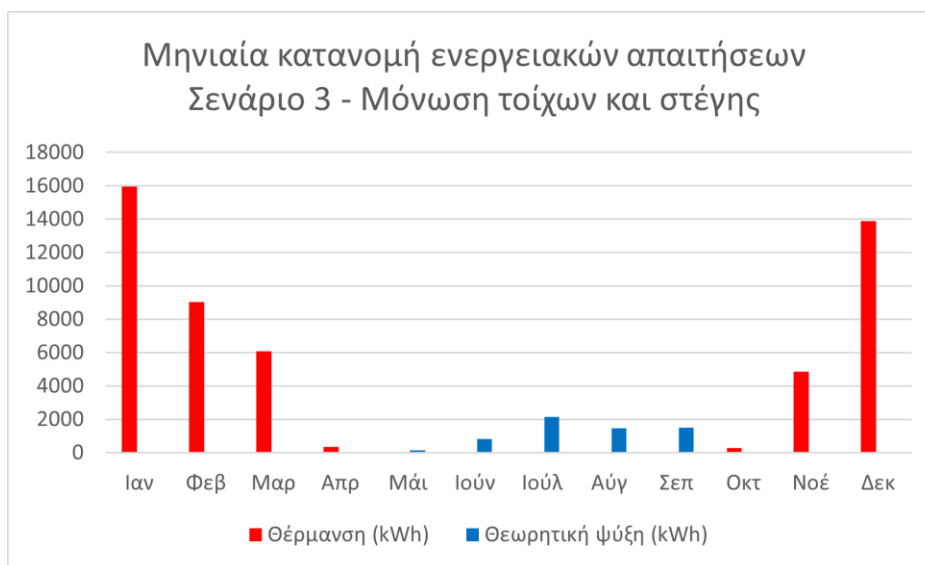
Η εφαρμογή της συνδυασμένης θερμομόνωσης επέφερε τη σημαντικότερη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου έως το στάδιο αυτό της ανάλυσης. Η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση μειώθηκε από 119.608 kWh σε 50.514 kWh, παρουσιάζοντας μείωση 57,77%. Παράλληλα, οι θεωρητικές απαιτήσεις ψύξης μειώθηκαν από 7.986 kWh σε 6.133 kWh, σημειώνοντας μείωση 23,21%.

Ως αποτέλεσμα, η συνολική κατανάλωση του συστήματος HVAC μειώθηκε από 127.594 kWh σε 56.647 kWh, δηλαδή κατά 55,60%, ενώ η συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου περιορίστηκε από 147.178 kWh σε 76.377 kWh, παρουσιάζοντας μείωση 48,11%. Αντίστοιχα, οι δείκτες ενεργειακής έντασης παρουσίασαν ιδιαίτερα σημαντική βελτίωση, καθώς το Site EUI μειώθηκε από 103,01 σε 52,88 kWh/m² (−48,67%) και το Source EUI από 351,79 σε 174,09 kWh/m² (−50,51%).

Πίνακας 13. Συγκριτική αξιολόγηση της ενεργειακής κατανάλωσης

Δείκτης	Υφιστάμενο	Σενάριο 3	Μεταβολή
Θέρμανση (kWh)	119.608	50.514	−57,77%
Θεωρητική ψύξη (kWh)	7.986	6.133	−23,21%
Συνολική κατανάλωση HVAC (kWh)	127.594	56.647	−55,60%
Συνολική ενεργειακή κατανάλωση (kWh)	147.178	76.377	−48,11%
Site EUI(kWh/m ²)	103,01	52,88	−48,67%

Source EUI (kWh/m ²)	351,79	174,09	-50,51%
----------------------------------	--------	--------	----------------



Σχήμα 7. Μηνιαία κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων του Σεναρίου 3.

Η μηνιαία κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων καταδεικνύει ότι η συνδυασμένη θερμομόνωση των εξωτερικών τοίχων και της στέγης περιορίζει σημαντικά τις ενεργειακές απαιτήσεις καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Σε αντίθεση με το Σενάριο 2, όπου παρατηρήθηκε αύξηση των απαιτήσεων ψύξης, η προσθήκη θερμομόνωσης στη στέγη συμβάλλει και στη μείωση των θερινών ψυκτικών φορτίων. Το αποτέλεσμα αυτό αποδίδεται στη συνολική αναβάθμιση του θερμομονωτικού κελύφους, η οποία περιορίζει τόσο τις θερμικές απώλειες κατά τη χειμερινή περίοδο όσο και τα θερμικά κέρδη μέσω της οροφής κατά τους θερινούς μήνες.

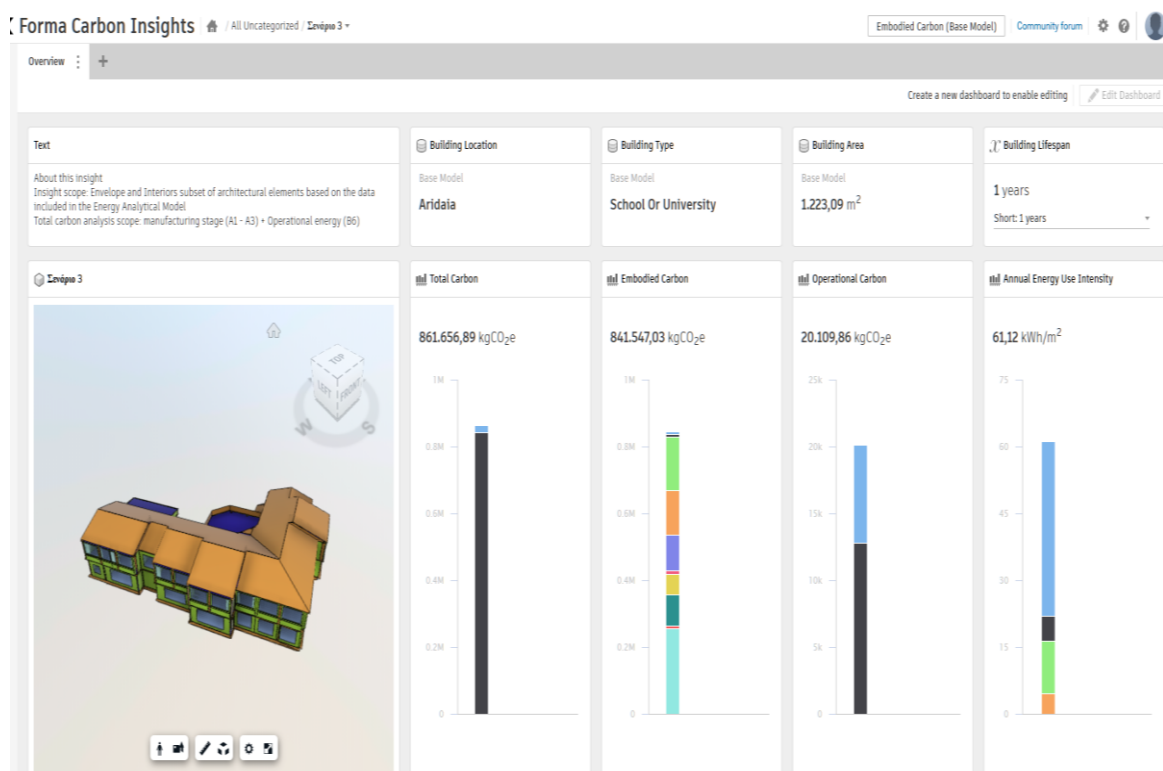
4.5.3. Περιβαλλοντική αξιολόγηση με το Autodesk Forma Carbon Insights

Σύμφωνα με την ανάλυση, το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του κτιρίου διαμορφώθηκε σε 861.656,89 kgCO_{2e}, εκ των οποίων 841.547,03 kgCO_{2e} αντιστοιχούν στον ενσωματωμένο άνθρακα (Embodied Carbon) και 20.109,86 kgCO_{2e} στον λειτουργικό άνθρακα (Operational Carbon). Παράλληλα, ο δείκτης Annual Energy Use Intensity (Annual EUI) μειώθηκε σε 61,12 kWh/m².

Σε σύγκριση με την υφιστάμενη κατάσταση, παρατηρείται σημαντική μείωση του λειτουργικού ανθρακικού αποτυπώματος, γεγονός που αποδίδεται στη δραστική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του κτιρίου μετά την αναβάθμιση του θερμομονωτικού κελύφους. Αντίθετα, ο ενσωματωμένος άνθρακας αυξάνεται περαιτέρω, καθώς η εφαρμογή

θερμομόνωσης τόσο στους εξωτερικούς τοίχους όσο και στη στέγη συνεπάγεται μεγαλύτερη ποσότητα νέων δομικών υλικών σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια.

Παρά την αύξηση του ενσωματωμένου άνθρακα, το Σενάριο 3 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μέχρι στιγμής μείωση του λειτουργικού ανθρακικού αποτυπώματος και του δείκτη Annual EUI, γεγονός που καταδεικνύει ότι η συνδυασμένη θερμομόνωση των τοίχων και της στέγης αποτελεί ιδιαίτερα αποτελεσματική παρέμβαση για τη βελτίωση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής επίδοσης του κτιρίου κατά τη φάση λειτουργίας του.



Εικόνα 29. Αποτελέσματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης του Σεναρίου 3 στο Autodesk Forma Carbon Insights.

Πίνακας 14. Συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών περιβαλλοντικής αξιολόγησης Σ3

Δείκτης	Υφιστάμενο	Σενάριο 3	Μεταβολή
Total Carbon	805.909 kgCO ₂ e	861.657 kgCO ₂ e	+6,92%
Embodied Carbon	769.332 kgCO ₂ e	841.547 kgCO ₂ e	+9,39%

Operational Carbon	36.577 kgCO _{2e}	20.110 kgCO _{2e}	-45,02%
Annual EUI	119,21 kWh/m ²	61,12 kWh/m ²	-48,73%

4.6. Σενάριο 4 -Συνδυασμός παρεμβάσεων

4.6.1. Περιγραφή της παρέμβασης

Στο Σενάριο 4 εξετάστηκε η συνδυασμένη εφαρμογή των τριών προηγούμενων παρεμβάσεων στο κέλυφος του σχολικού κτιρίου, με στόχο τη μέγιστη δυνατή μείωση των θερμικών απωλειών κατά τη χειμερινή περίοδο και των θερμικών κερδών κατά τη θερινή περίοδο. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε εξωτερική θερμομόνωση στους εξωτερικούς τοίχους, θερμομόνωση στη στέγη και αντικατάσταση όλων των υφιστάμενων κουφωμάτων με νέα ενεργειακά κουφώματα υψηλής θερμομονωτικής απόδοσης.

4.6.2. Αποτελέσματα ενεργειακής αξιολόγησης Σεναρίου 4

Η ενεργειακή αξιολόγηση του Σεναρίου 4 πραγματοποιήθηκε με στόχο την εκτίμηση της επίδρασης της συνδυασμένης εφαρμογής όλων των προτεινόμενων παρεμβάσεων στην ενεργειακή συμπεριφορά του σχολικού κτιρίου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 12, ενώ η μηνιαία κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων απεικονίζεται στο Σχήμα 31.

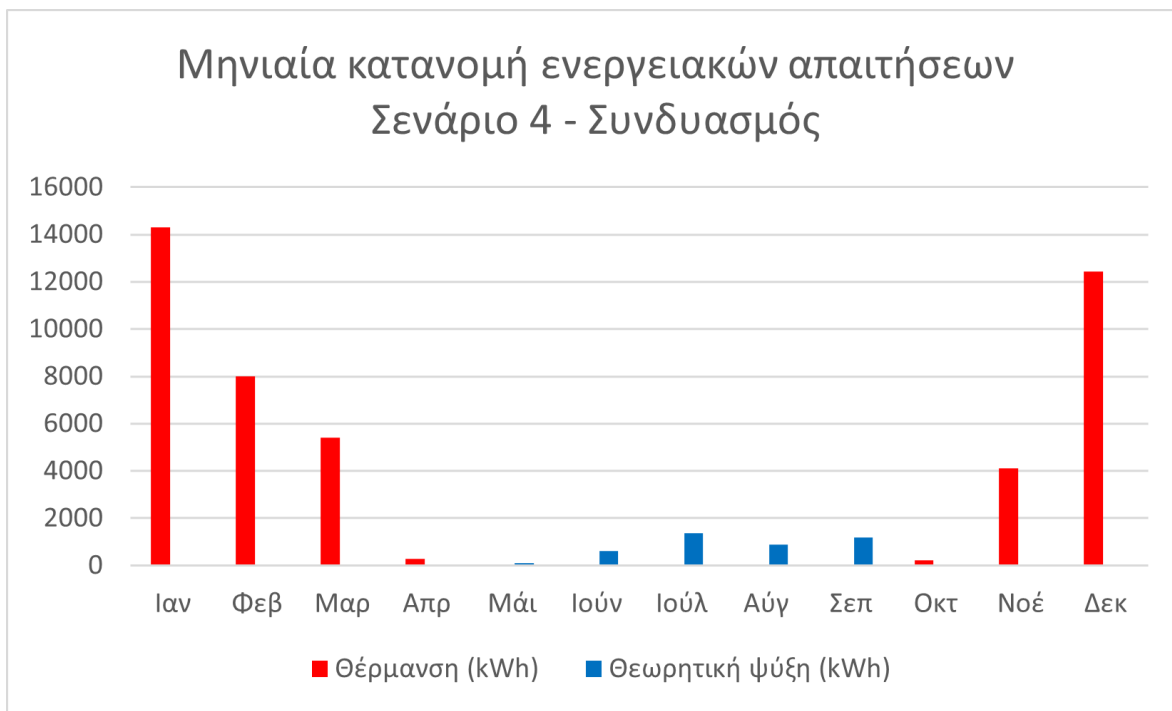
Η ταυτόχρονη εφαρμογή της εξωτερικής θερμομόνωσης στους τοίχους, της θερμομόνωσης της στέγης και της αντικατάστασης των κουφωμάτων οδήγησε στη μεγαλύτερη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου μεταξύ όλων των εξεταζόμενων σεναρίων. Η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση μειώθηκε από 119.608 kWh σε 44.775 kWh, παρουσιάζοντας μείωση 62,57%. Παράλληλα, οι θεωρητικές απαιτήσεις ψύξης περιορίστηκαν από 7.986 kWh σε 4.156 kWh, επιτυγχάνοντας τη χαμηλότερη τιμή από όλα τα εξεταζόμενα σενάρια.

Ως αποτέλεσμα, η συνολική κατανάλωση του συστήματος HVAC μειώθηκε από 127.594 kWh σε 48.931 kWh, ενώ η συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου περιορίστηκε από 147.178 kWh σε 68.661 kWh. Παράλληλα, οι δείκτες ενεργειακής έντασης παρουσίασαν τις χαμηλότερες τιμές της ανάλυσης, με το Site EUI να

διαμορφώνεται σε 47,53 kWh/m² και το Source EUI να παρουσιάζει επίσης σημαντική μείωση σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς.

Πίνακας 15. Συγκριτική αξιολόγηση της ενεργειακής κατανάλωσης

Δείκτης	Υφιστάμενο	Σενάριο 4	Μεταβολή
Θέρμανση (kWh)	119.608	44.775	−62,57%
Θεωρητική ψύξη (kWh)	7.986	4.156	−47,96%
Συνολική κατανάλωση HVAC (kWh)	127.594	48.931	−61,65%
Συνολική ενεργειακή κατανάλωση (kWh)	147.178	68.661	−53,35%
Site EUI(kWh/m ²)	103,01	47,53	−53,86%
Source EUI (kWh/m ²)	351,79	158,29	−55,00%



Σχήμα 8. Μηνιαία κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων του Σεναρίου 4.

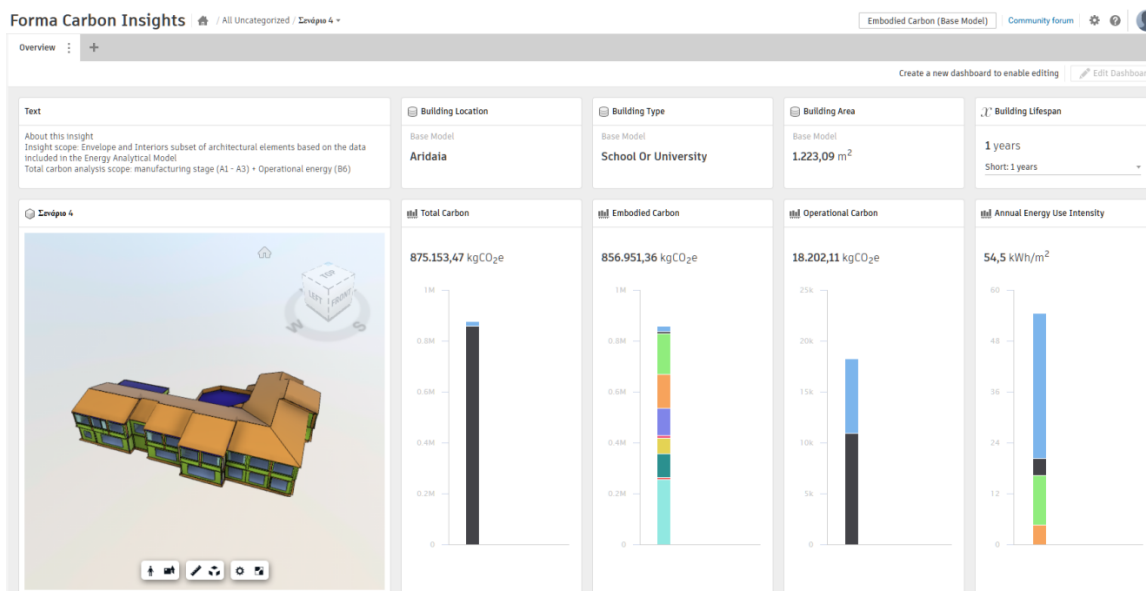
Η μηνιαία κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων καταδεικνύει ότι η συνδυασμένη εφαρμογή όλων των παρεμβάσεων επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η ταυτόχρονη αναβάθμιση των τοίχων, της στέγης και των κουφωμάτων περιορίζει αποτελεσματικά τόσο τις θερμικές απώλειες κατά τη χειμερινή περίοδο όσο και τα θερμικά κέρδη κατά τη θερινή, οδηγώντας στη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση μεταξύ όλων των εξεταζόμενων σεναρίων.

4.6.3. Περιβαλλοντική αξιολόγηση με το Autodesk Forma Carbon Insights

Σύμφωνα με την ανάλυση, το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του κτιρίου διαμορφώθηκε σε 875.153,47 kgCO₂e, εκ των οποίων 856.951,36 kgCO₂e αντιστοιχούν στον ενσωματωμένο άνθρακα (Embodied Carbon) και 18.202,11 kgCO₂e στον λειτουργικό άνθρακα (Operational Carbon). Παράλληλα, ο δείκτης Annual Energy Use Intensity (Annual EUI) μειώθηκε σε 54,5 kWh/m².

Σε σύγκριση με την υφιστάμενη κατάσταση, το Σενάριο 4 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μείωση του λειτουργικού ανθρακικού αποτυπώματος, γεγονός που συνδέεται άμεσα με τη σημαντική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης που επιτυγχάνεται μέσω της ταυτόχρονης αναβάθμισης όλων των βασικών στοιχείων του κελύφους. Αντίθετα, ο ενσωματωμένος άνθρακας εμφανίζει τη μεγαλύτερη αύξηση μεταξύ όλων των εξεταζόμενων σεναρίων,

καθώς η εφαρμογή πολλαπλών παρεμβάσεων απαιτεί μεγαλύτερη ποσότητα νέων δομικών υλικών και συνεπάγεται αυξημένες εκπομπές κατά το στάδιο παραγωγής και εγκατάστασής τους.



Εικόνα 30 Αποτελέσματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης του Σεναρίου 4 στο Autodesk Forma Carbon Insights.

Παρά την αύξηση του ενσωματωμένου άνθρακα, το Σενάριο 4 επιτυγχάνει τη χαμηλότερη τιμή του δείκτη Annual EUI και του λειτουργικού ανθρακικού αποτυπώματος μεταξύ όλων των σεναρίων, γεγονός που καταδεικνύει ότι ο συνδυασμός των παρεμβάσεων αποτελεί την αποτελεσματικότερη λύση για τη βελτίωση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής επίδοσης του κτιρίου κατά τη φάση λειτουργίας.

Πίνακας 16. Συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών περιβαλλοντικής αξιολόγησης Σ4

Δείκτης	Υφιστάμενο	Σενάριο 4	Μεταβολή
Total Carbon	805.909 kgCO _{2e}	875.153 kgCO _{2e}	+8,59%
Embodied Carbon	769.332 kgCO _{2e}	856.951 kgCO _{2e}	+11,39%

Operational Carbon	36.577 kgCO _{2e}	18.202 kgCO _{2e}	-50,24%
Annual EUI	119,21 kWh/m ²	54,50 kWh/m ²	-54,28%

4.7. Συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των τεσσάρων σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης ως προς την ενεργειακή τους απόδοση και την περιβαλλοντική τους επίδραση. Η σύγκριση βασίζεται στους δείκτες κατανάλωσης ενέργειας, στις ενεργειακές απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης, στους δείκτες ενεργειακής έντασης (Site EUI και Source EUI), καθώς και στους δείκτες ανθρακικού αποτυπώματος που προέκυψαν από το Autodesk Forma Carbon Insights.

Ο Πίνακας 15 συνοψίζει τα αποτελέσματα όλων των σεναρίων.

Πίνακας 17. Συγκριτική αξιολόγηση των ενεργειακών δεικτών της υφιστάμενης κατάστασης και των τεσσάρων σεναρίων αναβάθμισης

Δείκτης	Υφιστάμενο	Σεν.1	Σεν.2	Σεν.3	Σεν.4
Θέρμανση (kWh)	119.608	117.786	100.181	50.514	44.775
Ψύξη (kWh)	7.986	4.956	12.486	6.133	4.156
HVAC (kWh)	127.594	122.742	112.667	56.647	48.931
Συνολική κατανάλωση (kWh)	147.178	141.539	132.483	76.377	68.661
Site EUI (kWh/m ²)	103,01	99,61	91,36	52,88	47,53
Source EUI (kWh/m ²)	351,79	344,94	301,99	174,09	158,29

Η αντικατάσταση των κουφωμάτων (Σενάριο 1) επέφερε περιορισμένη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου, μειώνοντας κυρίως τις απαιτήσεις ψύξης. Η επίδρασή της στις ανάγκες θέρμανσης ήταν σχετικά μικρή, γεγονός που δείχνει ότι οι θερμικές απώλειες του υφιστάμενου κτιρίου οφείλονται κυρίως στην ανεπαρκή θερμομόνωση του κελύφους.

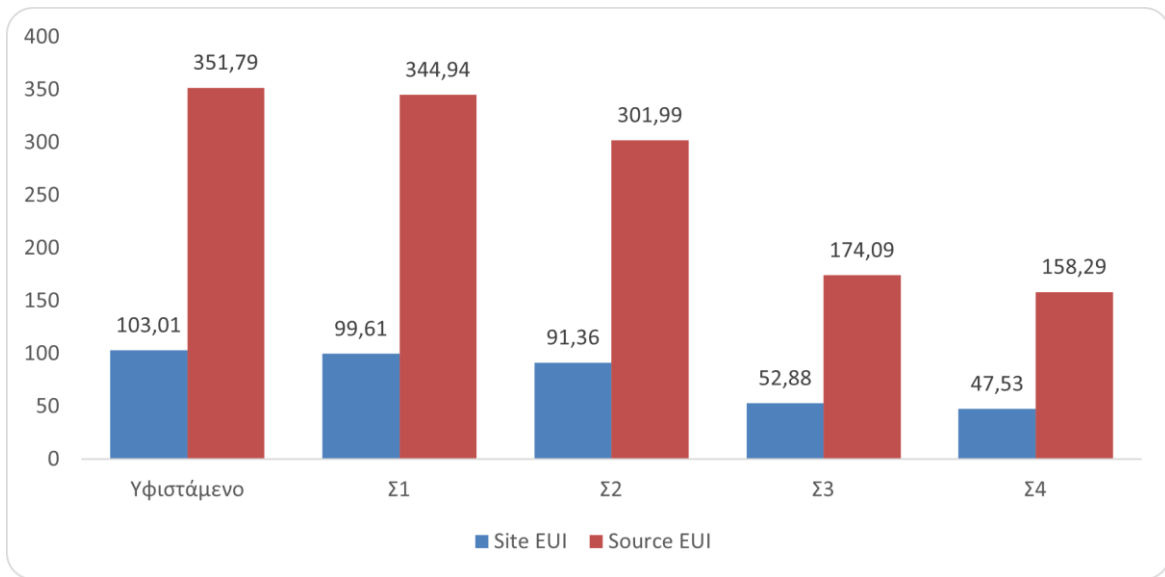
Η εφαρμογή εξωτερικής θερμομόνωσης στους τοίχους (Σενάριο 2) οδήγησε σε σημαντική μείωση των απαιτήσεων θέρμανσης και των δεικτών ενεργειακής έντασης. Ωστόσο, παρατηρήθηκε αύξηση των απαιτήσεων ψύξης κατά τη θερινή περίοδο, γεγονός που αποδίδεται στη μεγαλύτερη συγκράτηση της θερμότητας στο εσωτερικό του κτιρίου.

Η προσθήκη θερμομόνωσης στη στέγη (Σενάριο 3) βελτίωσε περαιτέρω την ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου. Σε αντίθεση με το Σενάριο 2, μειώθηκαν τόσο οι ανάγκες θέρμανσης όσο και οι απαιτήσεις ψύξης, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αναβάθμιση της οροφής περιορίζει αποτελεσματικά τόσο τις χειμερινές θερμικές απώλειες όσο και τα θερινά θερμικά κέρδη.

Το Σενάριο 4, το οποίο συνδυάζει όλες τις προηγούμενες παρεμβάσεις, παρουσίασε την καλύτερη συνολική ενεργειακή επίδοση. Καταγράφηκαν οι χαμηλότερες απαιτήσεις θέρμανσης (44.775 kWh), οι μικρότερες απαιτήσεις ψύξης (4.156 kWh), καθώς και οι χαμηλότερες τιμές των δεικτών Site EUI (47,53 kWh/m²) και Source EUI (158,29 kWh/m²). Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι η ολοκληρωμένη αναβάθμιση του κελύφους αποτελεί την αποτελεσματικότερη στρατηγική για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του σχολικού κτιρίου.

Όσον αφορά την περιβαλλοντική αξιολόγηση, παρατηρήθηκε σταδιακή μείωση του λειτουργικού ανθρακικού αποτυπώματος από το Σενάριο 1 έως το Σενάριο 4, ως αποτέλεσμα της συνεχούς μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη λειτουργία του κτιρίου. Αντίθετα, ο ενσωματωμένος άνθρακας αυξήθηκε προοδευτικά, καθώς κάθε πρόσθετη παρέμβαση απαιτούσε μεγαλύτερη ποσότητα νέων δομικών υλικών. Το εύρημα αυτό αναδεικνύει τη σημασία της αξιολόγησης των επεμβάσεων όχι μόνο με βάση την ενεργειακή εξοικονόμηση, αλλά και με βάση το συνολικό περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα.

Συνολικά, το Σενάριο 4 αναδείχθηκε ως η βέλτιστη λύση, επιτυγχάνοντας τη μεγαλύτερη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και του λειτουργικού ανθρακικού αποτυπώματος. Παρότι συνοδεύεται από τη μεγαλύτερη αύξηση του ενσωματωμένου άνθρακα, η σημαντική βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου καθιστά τη συγκεκριμένη λύση την αποτελεσματικότερη μεταξύ των εξεταζόμενων παρεμβάσεων.



Σχήμα 9. Συγκριτική εξέλιξη των δεικτών Site EUI και Source EUI

Το διάγραμμα δείχνει τη σταδιακή μείωση των δεικτών ενεργειακής έντασης με την εφαρμογή των διαδοχικών παρεμβάσεων. Η περιορισμένη βελτίωση των Σεναρίων 1 και 2 ακολουθείται από σαφώς μεγαλύτερη μείωση στα Σενάρια 3 και 4, γεγονός που αναδεικνύει τη σημαντική συμβολή της συνδυασμένης θερμομόνωσης των εξωτερικών τοίχων και της στέγης. Το Σενάριο 4 παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές Site EUI και Source EUI, επιβεβαιώνοντας τη βέλτιστη ενεργειακή του επίδοση.

Πίνακας 18. Συγκριτική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών δεικτών της υφιστάμενης κατάστασης και των τεσσάρων σεναρίων

Δείκτης	Υφιστάμενο	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Total Carbon (kgCO ₂ e)	805.909	819.947	844.701	861.657	875.153
Embodied Carbon (kgCO ₂ e)	769.332	784.479	811.206	841.547	856.951
Operational Carbon (kgCO ₂ e)	36.577	35.468	33.495	20.110	18.202
Annual EUI (kWh/m ²)	119,21	115,43	108,32	61,12	54,50

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση αναδεικνύει αντίρροπες μεταβολές μεταξύ του ενσωματωμένου και του λειτουργικού άνθρακα. Με την προσθήκη νέων υλικών, ο ενσωματωμένος άνθρακας αυξάνεται προοδευτικά από 769.332 kgCO_{2e} στην υφιστάμενη κατάσταση σε 856.951 kgCO_{2e} στο Σενάριο 4. Αντίθετα, ο λειτουργικός άνθρακας μειώνεται από 36.577 σε 18.202 kgCO_{2e}, ακολουθώντας τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου.

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω μεταβολών, το Σενάριο 4 εμφανίζει τη χαμηλότερη τιμή λειτουργικού άνθρακα, αλλά ταυτόχρονα τη μεγαλύτερη τιμή συνολικού και ενσωματωμένου άνθρακα. Επομένως, το Σενάριο 4 αναδεικνύεται ως η βέλτιστη λύση ως προς την ενεργειακή απόδοση και τις λειτουργικές εκπομπές, όχι όμως αυτομάτως ως η βέλτιστη λύση ως προς το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα. Όπως επισημαίνουν οι Rabani et al. (2021), η περιβαλλοντική αξιολόγηση των ενεργειακών αναβαθμίσεων πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο τις λειτουργικές όσο και τις ενσωματωμένες εκπομπές άνθρακα σε επίπεδο κύκλου ζωής, καθώς και τον χρόνο ανθρακικής απόσβεσης των πρόσθετων υλικών.

5. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η κριτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Η συζήτηση επικεντρώνεται στην ενεργειακή συμπεριφορά της υφιστάμενης κατάστασης, που έχουν οι επιμέρους παρεμβάσεις, καθώς και στην αποτελεσματικότητα της συνολικής ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους. Παράλληλα, διερευνάται η σχέση μεταξύ της μείωσης της λειτουργικής ενεργειακής κατανάλωσης και της αύξησης του ενσωματωμένου ανθρακικού αποτυπώματος που προκύπτει από τη χρήση νέων δομικών υλικών.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην κατανόηση του ρόλου που παίζουν οι ανάγκες θέρμανσης στο συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο του σχολικού κτιρίου, στις διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ θέρμανσης και ψύξης, καθώς και στη συμβολή κάθε επιμέρους στοιχείου του κελύφους στη συνολική ενεργειακή απόδοση. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με ευρήματα διεθνών μελετών σχετικά με την ενεργειακή αναβάθμιση σχολικών κτιρίων, ώστε να αξιολογηθεί ο βαθμός συμφωνίας των παρατηρούμενων τάσεων με τη σχετική βιβλιογραφία.

Τέλος, συζητείται η χρησιμότητα των εργαλείων BIM για τη δημιουργία, προσομοίωση και συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων παρέμβασης.

5.2. Ερμηνεία της ενεργειακής συμπεριφοράς της υφιστάμενης κατάστασης

5.2.1. Ερμηνεία της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου

Η ενεργειακή προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης ανέδειξε ένα ενεργειακό προφίλ που κυριαρχείται από τις ανάγκες θέρμανσης. Από τη συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση των 147.178 kWh, οι 119.608 kWh αντιστοιχούν στη θέρμανση, δηλαδή περίπου στο 81,27% του συνόλου. Αντίθετα, ο εσωτερικός φωτισμός αντιπροσωπεύει το 9,52%, οι θεωρητικές απαιτήσεις ψύξης το 5,43% και ο εσωτερικός εξοπλισμός το 3,78%. Η κατανομή αυτή δείχνει ότι η βασική ενεργειακή αδυναμία του κτιρίου σχετίζεται με τη

θερμική προστασία του κελύφους και όχι με τις ηλεκτρικές καταναλώσεις φωτισμού και εξοπλισμού.

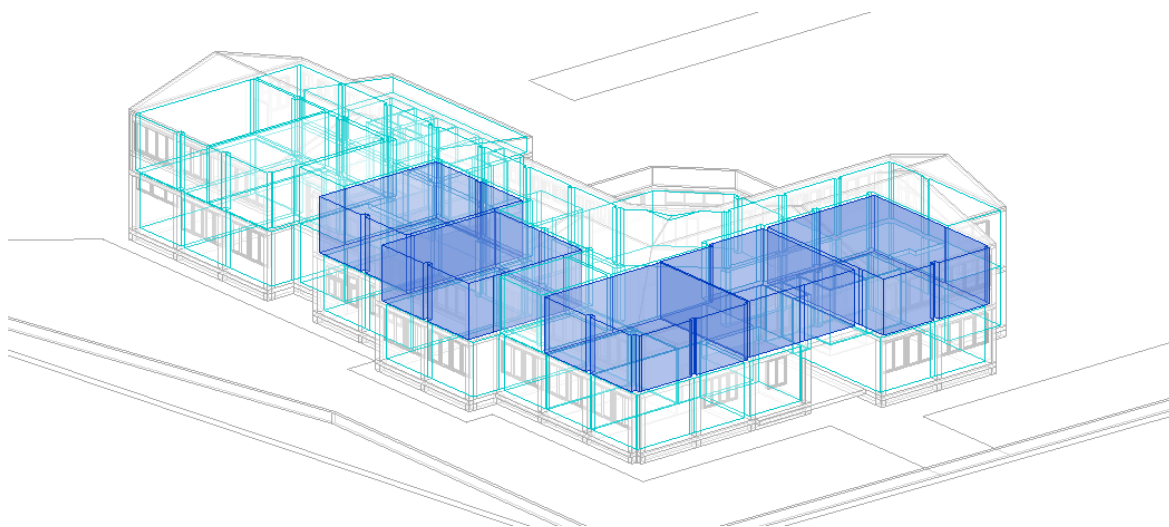
Η κυριαρχία της θέρμανσης μπορεί να ερμηνευθεί από τον συνδυασμό των κατασκευαστικών και κλιματικών χαρακτηριστικών του σχολικού κτιρίου. Το κτίριο κατασκευάστηκε το 1988, σε περίοδο κατά την οποία η εφαρμογή αποτελεσματικών μέτρων θερμομόνωσης ήταν περιορισμένη, και παρουσιάζει υψηλές θερμικές απώλειες μέσω των εξωτερικών τοιχοποιιών, της στέγης και των υφιστάμενων κουφωμάτων. Παράλληλα, η θέση του στην Αριδαία, στην Κλιματική Ζώνη Γ, συνεπάγεται χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες και συχνούς παγετούς κατά τη χειμερινή περίοδο. Συνεπώς, η υψηλή κατανάλωση θέρμανσης δεν αποτελεί μεμονωμένο αποτέλεσμα της προσομοίωσης, αλλά είναι συμβατή με την παλαιότητα, την κατασκευαστική τυπολογία και τις κλιματικές συνθήκες του κτιρίου.

Η μηνιαία κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων επιβεβαιώνει τον έντονα εποχικό χαρακτήρα της ενεργειακής συμπεριφοράς. Οι υψηλότερες ανάγκες θέρμανσης καταγράφονται τον Ιανουάριο και τον Δεκέμβριο, με 32.912,50 και 28.455,00 kWh αντίστοιχα, ενώ σημαντικές απαιτήσεις εμφανίζονται επίσης τον Φεβρουάριο, τον Μάρτιο και τον Νοέμβριο. Η απότομη μείωση των αναγκών κατά τις μεταβατικές περιόδους και ο μηδενισμός τους τον Ιούλιο και τον Αύγουστο υποδηλώνουν ότι η ετήσια κατανάλωση επηρεάζεται καθοριστικά από τη χειμερινή λειτουργία του σχολείου.

Οι απαιτήσεις ψύξης είναι σημαντικά χαμηλότερες. Οι τιμές που προέκυψαν από την προσομοίωση αντιπροσωπεύουν θεωρητικές απαιτήσεις ενός ιδανικού συστήματος κάλυψης φορτίων και όχι πραγματική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, αφού το κτίριο δεν διαθέτει σύστημα ψύξης. Η εμφάνισή τους, ωστόσο, επιβεβαιώνει την ύπαρξη κινδύνου θερινής υπερθέρμανσης, ιδιαίτερα κατά τον Ιούλιο, τον Αύγουστο και τον Σεπτέμβριο. Καθότι τα σχολεία δεν λειτουργούν Ιούλιο και Αύγουστο, το κρίσιμο μέγεθος είναι ο Σεπτέμβριος, όπου ανοίγουν τα σχολεία. Επομένως, παρόλο που η θέρμανση αποτελεί την κύρια ενεργειακή προτεραιότητα, οι παρεμβάσεις αναβάθμισης δεν πρέπει να εξετάζονται αποκλειστικά με χειμερινά κριτήρια, καθώς ενδέχεται να επηρεάζουν δυσμενώς τη θερινή συμπεριφορά του κτιρίου.

Η ανάλυση ανά θερμικό χώρο ανέδειξε ότι η ενεργειακή επιβάρυνση δεν κατανέμεται ομοιόμορφα στο κτίριο. Τα υψηλότερα φορτία αιχμής θέρμανσης στο σύνολο των χώρων

καταγράφηκαν στους διαδρόμους Space 39 και Space 1, γεγονός που συνδέεται με το μεγάλο εμβαδόν και την χαμηλή ροή αέρα. Μεταξύ των αιθουσών διδασκαλίας, οι Spaces 37, 40, 38, 36 και 33 εμφάνισαν τις υψηλότερες απαιτήσεις τόσο στη θέρμανση όσο και στην ψύξη. Ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι οι συγκεκριμένοι χώροι βρίσκονται στη νοτιοδυτική πλευρά του κτιρίου. Ο προσανατολισμός αυτός συνεπάγεται αυξημένη έκθεση στην απογευματινή ηλιακή ακτινοβολία, με αποτέλεσμα την ενίσχυση των ηλιακών θερμικών κερδών και των απαιτήσεων ψύξης κατά τη θερινή περίοδο. Παράλληλα, η έκταση των εξωτερικών επιφανειών, η επιφάνεια των ανοιγμάτων μπορούν να αυξήσουν και τις θερμικές απώλειες κατά τη χειμερινή περίοδο. Βάσει αυτού του ευρήματος, ενισχύεται η ανάγκη για διαφοροποιημένη αντιμετώπιση των χώρων και όχι αποκλειστικά για μία ενιαία παρέμβαση στο επίπεδο ολόκληρου του κτιρίου. Παραδείγματος χάρη, θα μπορούσε να εξεταστεί η εγκατάσταση υαλοπινάκων χαμηλής εκπομπής, με κατάλληλο συντελεστή ηλιακών θερμικών κερδών, καθώς και η εφαρμογή εξωτερικών συστημάτων σκίασης στις περισσότερες εκτεθειμένες όψεις.



Εικόνα 31. Τρισδιάστατη απεικόνιση των θερμικών χώρων (Spaces) με τις υψηλότερες απαιτήσεις ψύξης στο υπό μελέτη σχολικό κτίριο (Spaces 37, 40, 38, 36 και 33).

Ως προς την περιβαλλοντική επίδοση της υφιστάμενης κατάστασης, το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού αποτυπώματος άνθρακα αποδίδεται στον ενσωματωμένο άνθρακα των υφιστάμενων δομικών υλικών. Συγκεκριμένα, από τα 805.909,08 kgCO_{2e} του συνολικού αποτυπώματος, τα 769.332,11 kgCO_{2e} αντιστοιχούν στον ενσωματωμένο άνθρακα και τα 36.576,97 kgCO_{2e} στον λειτουργικό άνθρακα. Η κατανομή αυτή δείχνει ότι, στο συγκεκριμένο υπολογιστικό μοντέλο, η κατασκευαστική μάζα του υφιστάμενου κτιρίου

έχει μεγαλύτερη συμμετοχή από τις ετήσιες λειτουργικές εκπομπές. Κατά συνέπεια, η περιβαλλοντική αξιολόγηση των σεναρίων πρέπει να εξετάζει όχι μόνο τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, αλλά και την πρόσθετη επιβάρυνση που προκαλεί η εισαγωγή νέων υλικών.

Συνολικά, η υφιστάμενη κατάσταση χαρακτηρίζεται από ανεπαρκή θερμική προστασία, υψηλή εξάρτηση από τη θέρμανση και σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των επιμέρους θερμικών χώρων. Τα αποτελέσματα τεκμηριώνουν ότι η αναβάθμιση του κελύφους αποτελεί την κύρια κατεύθυνση παρέμβασης. Παράλληλα, όμως, αναδεικνύουν την ανάγκη για ισορροπημένο σχεδιασμό, ώστε η μείωση των χειμερινών θερμικών απωλειών να μη συνοδεύεται από αύξηση της θερινής υπερθέρμανσης ή από δυσανάλογη αύξηση του ενσωματωμένου ανθρακικού αποτυπώματος.

5.2.2. Βιοκλιματική αποτίμηση του αύλειου χώρου

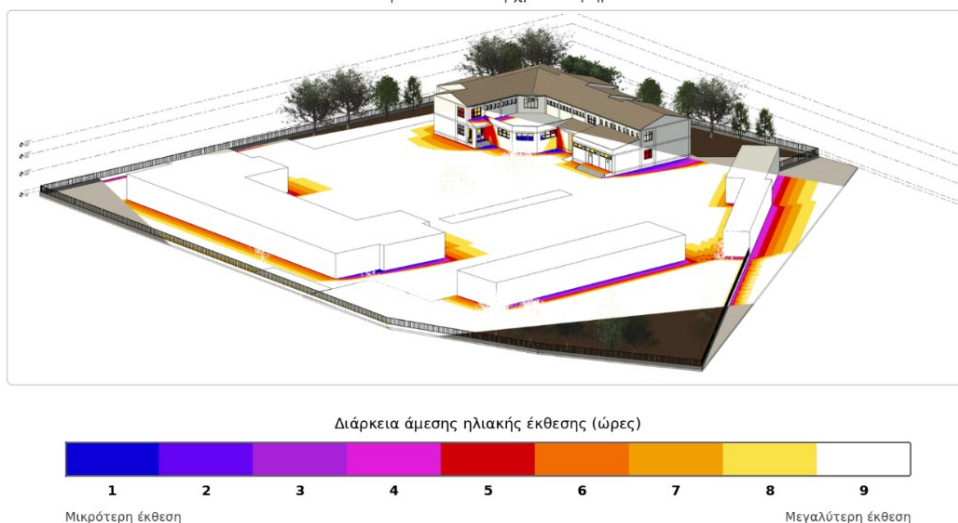
Η ανάλυση του αύλειου χώρου ανέδειξε ότι η γεωμετρία του σχολικού συγκροτήματος και η υφιστάμενη βλάστηση δεν εξασφαλίζουν επαρκή σκίαση στις κεντρικές ζώνες της αυλής κατά τις ώρες αυξημένης ηλιακής επιβάρυνσης. Οι σκιασμένες επιφάνειες αναπτύσσονται κυρίως κοντά στα κτίρια και δεν συμπίπτουν με τις κύριες περιοχές συγκέντρωσης και δραστηριότητας των μαθητών.

Το αποτέλεσμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη λειτουργία του σχολείου κατά το τέλος της άνοιξης και την αρχή του καλοκαιριού, όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι αυξημένες. Η παρατεταμένη έκθεση των σκληρών επιστρώσεων μπορεί να αυξήσει τις επιφανειακές θερμοκρασίες και τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας, επιβαρύνοντας τη θερμική αίσθηση των χρηστών ακόμη και όταν η θερμοκρασία του αέρα παραμένει σχετικά χαμηλότερη.

Επομένως, η βιοκλιματική αναβάθμιση του αύλειου χώρου πρέπει να εστιάζει στη δημιουργία συνεχών και λειτουργικά τοποθετημένων σκιασμένων διαδρομών και χώρων παραμονής. Η προσθήκη φυλλοβόλων δέντρων μπορεί να παρέχει σκίαση κατά τη θερμή περίοδο, επιτρέποντας παράλληλα την ηλιακή ακτινοβολία τον χειμώνα. Συμπληρωματικά, η χρήση στεγάστρων, διαπερατών επιστρώσεων και υλικών υψηλής ανακλαστικότητας μπορεί να περιορίσει την αποθήκευση θερμότητας και να βελτιώσει τις συνθήκες χρήσης της αυλής.

Αθροιστική ηλιακή έκθεση του αύλειου χώρου

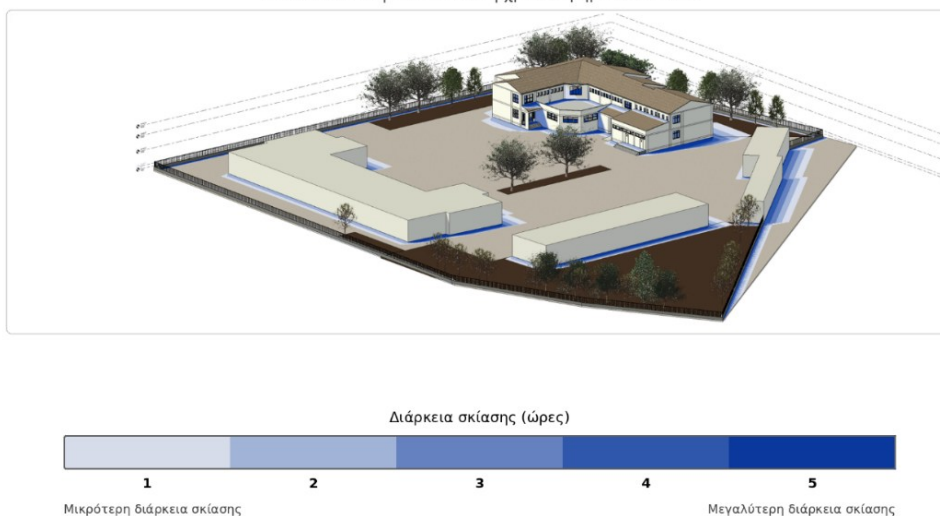
21 Μαΐου 2026 | 08:00-17:00 | χρονικό βήμα 30 λεπτών



Εικόνα 32. Ηλιακή έκθεση του αύλειου χώρου με τη χρήση Add-in Shadow Colour

Αθροιστική διάρκεια σκίασης του αύλειου χώρου

7 Ιουνίου 2026 | 10:00-15:00 | χρονικό βήμα 30 λεπτών



Εικόνα 33. Σκίαση του αύλειου χώρου με τη χρήση Add-in Shadow Colour

5.3. Αποτίμηση των σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης

Η συγκριτική εξέταση των τεσσάρων σεναρίων ανέδειξε σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τη συμβολή κάθε παρέμβασης στην ενεργειακή συμπεριφορά του σχολικού κτιρίου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αποτελεσματικότητα μιας επέμβασης δεν εξαρτάται μόνο από τη βελτίωση ενός μεμονωμένου δομικού στοιχείου, αλλά και από τον τρόπο με τον

οποίο αυτό αλληλεπιδρά με τα υπόλοιπα στοιχεία του κελύφους, τα ηλιακά και εσωτερικά θερμικά κέρδη και τις συνθήκες λειτουργίας του κτιρίου.

Η σταδιακή εφαρμογή των παρεμβάσεων επέτρεψε να διακριθεί η σχετική συμβολή των κουφωμάτων, των εξωτερικών τοιχοποιιών και της στέγης. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι οι παρεμβάσεις στα αδιαφανή στοιχεία του κελύφους και ιδιαίτερα η θερμομόνωση της στέγης είχαν καθοριστικότερη επίδραση στη μείωση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης, ενώ η αντικατάσταση των κουφωμάτων λειτούργησε κυρίως συμπληρωματικά.

5.3.1. Επίδραση της αντικατάστασης των κουφωμάτων

Το Σενάριο 1 παρουσίασε περιορισμένη συνολική ενεργειακή βελτίωση. Η αντικατάσταση των υφιστάμενων κουφωμάτων με νέα κουφώματα αλουμινίου με θερμοδιακοπή και τριπλούς υαλοπίνακες μείωσε τη συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση κατά 3,83%, ενώ η κατανάλωση θέρμανσης μειώθηκε μόλις κατά 1,52%. Αντίθετα, η επίδραση στις θεωρητικές απαιτήσεις ψύξης ήταν σαφώς εντονότερη, καθώς καταγράφηκε μείωση κατά 37,95%.

Η μικρή μεταβολή στη θέρμανση υποδηλώνει ότι οι απώλειες μέσω των κουφωμάτων δεν αποτελούν τον κυρίαρχο μηχανισμό θερμικών απωλειών του συγκεκριμένου κτιρίου. Παρότι τα νέα κουφώματα βελτιώνουν την αεροστεγανότητα και τη θερμική αντίσταση των ανοιγμάτων, οι εξωτερικές τοιχοποιίες και η στέγη παραμένουν ανεπαρκώς μονωμένες, περιορίζοντας το συνολικό όφελος της παρέμβασης.

Συνεπώς, η αντικατάσταση των κουφωμάτων αποτελεί χρήσιμη αλλά ανεπαρκή ως αυτοτελή παρέμβαση. Η εφαρμογή της δικαιολογείται περισσότερο ως μέρος μιας ολοκληρωμένης αναβάθμισης του κελύφους και όχι ως η βασική στρατηγική για τη δραστική μείωση των αναγκών θέρμανσης.

5.3.2. Επίδραση της εξωτερικής θερμομόνωσης

Το Σενάριο 2 οδήγησε σε ουσιαστικότερη ενεργειακή βελτίωση, επιβεβαιώνοντας τη σημαντική συμμετοχή των εξωτερικών τοιχοποιιών στις θερμικές απώλειες του κτιρίου. Η κατανάλωση θέρμανσης μειώθηκε κατά 16,24%, ενώ η συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση και το Site EUI περιορίστηκαν κατά 9,98% και 11,31% αντίστοιχα.

Ωστόσο, οι θεωρητικές απαιτήσεις ψύξης αυξήθηκαν κατά 56,35%. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι, υπό τις συγκεκριμένες παραδοχές του μοντέλου, η μείωση της θερμικής διαπερατότητας των τοιχοποιιών περιορίζει την ανταλλαγή θερμότητας και προς τις δύο κατευθύνσεις. Δηλαδή, όταν η ηλιακή ακτινοβολία και τα εσωτερικά θερμικά κέρδη δεν αποβάλλονται επαρκώς μέσω φυσικού ή νυχτερινού αερισμού, η θερμότητα μπορεί να παραμένει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στους εσωτερικούς χώρους.

Η αύξηση της ψύξης πρέπει επομένως να ερμηνευθεί σε συνδυασμό με τις παραδοχές για τα ωράρια λειτουργίας, τον αερισμό, τα εσωτερικά φορτία και τη σκίαση των ανοιγμάτων. Παρά την αρνητική αυτή μεταβολή, η μεγάλη συμμετοχή της θέρμανσης στο αρχικό ενεργειακό ισοζύγιο είχε ως αποτέλεσμα η εξοικονόμηση κατά τη χειμερινή περίοδο να υπεραντισταθμίσει την αύξηση των θερινών φορτίων. Αντίστοιχη συμπεριφορά καταγράφηκε σε μελέτη κτιρίου σε ξηρό μεσογειακό κλίμα, όπου η προσθήκη θερμομόνωσης μείωσε τις ανάγκες θέρμανσης, αλλά αύξησε τις θερινές ανάγκες ψύξης, ενώ η ενίσχυση του φυσικού αερισμού συνέβαλε στον περιορισμό τους (Lozoya-Peral et al., 2023).

Το εύρημα αναδεικνύει ότι η εξωτερική θερμομόνωση των τοίχων αποτελεί ενεργειακά αποτελεσματική παρέμβαση, αλλά χρειάζεται να συνοδεύεται από στρατηγικές θερινού ελέγχου, όπως εξωτερική σκίαση, επαρκή φυσικό αερισμό και νυχτερινή αποβολή της συσσωρευμένης θερμότητας.

5.3.3. Επίδραση της συνδυασμένης θερμομόνωσης τοίχων και στέγης

Το Σενάριο 3 διαφοροποιήθηκε καθοριστικά από τα δύο προηγούμενα, καθώς οδήγησε σε σημαντική μείωση τόσο των αναγκών θέρμανσης όσο και των θεωρητικών απαιτήσεων ψύξης. Η κατανάλωση θέρμανσης μειώθηκε κατά 57,77%, η ψύξη κατά 23,21% και η συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση κατά 48,11%. Αντίστοιχα, το Site EUI περιορίστηκε κατά 48,67% και το Source EUI κατά 50,51%.

Δεδομένου ότι το Σενάριο 3 προέκυψε με την προσθήκη θερμομόνωσης στη στέγη πάνω στο μοντέλο του Σεναρίου 2, η μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων αναδεικνύει την καθοριστική συμμετοχή της στέγης στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου. Η στέγη αποτελεί εκτεταμένη επιφάνεια άμεσης επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον και δέχεται υψηλή ηλιακή ακτινοβολία. Χωρίς επαρκή θερμομόνωση, λειτουργεί ως αγωγός θερμικών απωλειών τον χειμώνα και θερμικών κερδών το καλοκαίρι.

Η προσθήκη θερμομόνωσης περιορίσε τις χειμερινές απώλειες, ενώ παράλληλα ανέκοψε τη μετάδοση της ηλιακής θερμότητας προς το εσωτερικό κατά τη θερινή περίοδο. Με τον τρόπο αυτό αντιστράφηκε η αύξηση των ψυκτικών απαιτήσεων που είχε παρατηρηθεί στο Σενάριο 2.

Το αποτέλεσμα δείχνει ότι η αποσπασματική θερμομόνωση μόνο των κατακόρυφων στοιχείων δεν αξιοποιεί πλήρως τις δυνατότητες ενεργειακής αναβάθμισης. Αντίθετα, η συνεκτική αντιμετώπιση των τοίχων και της στέγης δημιουργεί ένα περισσότερο προστατευμένο θερμικό κέλυφος, με οφέλη καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

5.3.4. Επίδραση του συνδυαστικού σεναρίου

Το Σενάριο 4 παρουσίασε - όπως ήταν αναμενόμενο - την καλύτερη ενεργειακή επίδοση μεταξύ όλων των εξεταζόμενων λύσεων. Ο συνδυασμός θερμομόνωσης των εξωτερικών τοίχων και της στέγης με την αντικατάσταση των κουφωμάτων μείωσε τη θέρμανση κατά 62,57%, τη θεωρητική ψύξη κατά 47,96% και τη συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση κατά 53,35%.

Η σύγκριση του Σεναρίου 4 με το Σενάριο 3 δείχνει ότι η προσθήκη των ενεργειακά αποδοτικών κουφωμάτων σε ένα ήδη θερμομονωμένο κέλυφος επιφέρει περαιτέρω μείωση της συνολικής κατανάλωσης κατά περίπου 10%. Το πρόσθετο όφελος είναι μικρότερο από εκείνο που προέκυψε με τη θερμομόνωση της στέγης, γεγονός το οποίο δείχνει ότι τα κουφώματα λειτουργούν συμπληρωματικά, ενώ οι μεγαλύτερες ενεργειακές απώλειες του κτιρίου συνδέονται με τα αδιαφανή στοιχεία.

Συνολικά, η ανάλυση αναδεικνύει μία σαφή ιεράρχηση των παρεμβάσεων. Η αντικατάσταση των κουφωμάτων προσφέρει περιορισμένο αυτοτελές ενεργειακό όφελος, η εξωτερική θερμομόνωση των τοίχων μειώνει αισθητά τις ανάγκες θέρμανσης αλλά απαιτεί παράλληλο έλεγχο της θερινής υπερθέρμανσης, ενώ η συνδυασμένη θερμομόνωση τοίχων και στέγης επιτυγχάνει τη σημαντικότερη συνολική βελτίωση.

5.4. Συσχέτιση ενεργειακής απόδοσης και αποτυπώματος άνθρακα

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση των σεναρίων αποκάλυψε μια ξεκάθαρη αντίστροφη σχέση ανάμεσα στο λειτουργικό και το ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα. Όσο πιο εκτεταμένες είναι οι παρεμβάσεις και όσο περισσότερο βελτιώνεται η ενεργειακή απόδοση του κτιρίου, τόσο μειώνονται οι εκπομπές που σχετίζονται με τη λειτουργία του. Ωστόσο,

η χρήση νέων υλικών οδηγεί σε αύξηση των εκπομπών που προκύπτουν από την παραγωγή και την εγκατάστασή τους.

Στο Σενάριο 1, η περιορισμένη ενεργειακή αναβάθμιση είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του λειτουργικού άνθρακα κατά 3,03%, αλλά και την αύξηση του ενσωματωμένου άνθρακα κατά 1,97%. Συνολικά, το ανθρακικό αποτύπωμα αυξήθηκε κατά 1,74%. Ακόμη πιο έντονη ήταν η τάση αυτή στο Σενάριο 2. Η εφαρμογή εξωτερικής θερμομόνωσης μείωσε τον λειτουργικό άνθρακα κατά 8,42%, όμως αύξησε τον ενσωματωμένο κατά 5,44%. Παρά τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά τη χρήση του κτιρίου, το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα αυξήθηκε τελικά κατά 4,81%.

Στο Σενάριο 3 η συνδυασμένη θερμομόνωση τοίχων και στέγης μείωσε τον λειτουργικό άνθρακα κατά 45,02%, αντισταθμίζοντας τη μεγάλη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Ωστόσο, ο ενσωματωμένος άνθρακας αυξήθηκε κατά 9,39%, με αποτέλεσμα το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα να παραμένει αυξημένο κατά 6,92% σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση.

Το ίδιο συνέβη και στο Σενάριο 4. Η ολοκληρωμένη αναβάθμιση του κελύφους οδήγησε στη μεγαλύτερη μείωση του λειτουργικού άνθρακα, κατά 50,24%, αλλά και στη μεγαλύτερη αύξηση του ενσωματωμένου άνθρακα, κατά 11,39%. Κατά συνέπεια, το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα αυξήθηκε από 805.909 σε 875.153 kgCO_{2e}, δηλαδή κατά 8,59%. Το Σενάριο 4 αποτελεί επομένως τη βέλτιστη λύση ως προς την ενεργειακή κατανάλωση και τις λειτουργικές εκπομπές, αλλά όχι ως προς τη συνολική τιμή άνθρακα που προέκυψε από το συγκεκριμένο μοντέλο.

Η διαπίστωση αυτή δεν σημαίνει ότι οι εκτεταμένες παρεμβάσεις είναι απαραίτητα περιβαλλοντικά ασύμφορες. Ένα σημαντικό ποσοστό του πρόσθετου ενσωματωμένου άνθρακα εκλύεται κυρίως στα πρώτα στάδια - κατά την παραγωγή, τη μεταφορά και την εγκατάσταση των υλικών. Αντίθετα, η εξοικονόμηση στις λειτουργικές εκπομπές επαναλαμβάνεται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του κτιρίου. Για να διαπιστωθεί αν και πότε το σωρευτικό λειτουργικό όφελος αντισταθμίζει την αρχική περιβαλλοντική επιβάρυνση, χρειάζεται αξιολόγηση σε συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα και υπολογισμός του χρόνου ανθρακικής απόσβεσης των παρεμβάσεων (Rabani et al., 2021).

Στην παρούσα ανάλυση, μέσω του Autodesk Forma Carbon Insights, η διάρκεια ζωής του κτιρίου έχει οριστεί σε μόλις ένα έτος. Ως αποτέλεσμα, οι τιμές Total Carbon

περιλαμβάνουν τον συνολικό ενσωματωμένο άνθρακα των υλικών, συν τις λειτουργικές εκπομπές μόνο για αυτό το ένα έτος. Με αυτή τη ρύθμιση, είναι αναμενόμενο ο ενσωματωμένος άνθρακας να κυριαρχεί και το Total Carbon να αυξάνεται σε όλα τα σενάρια που περιλαμβάνουν νέα υλικά.

Επομένως, τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σχετική σύγκριση των σεναρίων υπό κοινές παραδοχές, αλλά δεν επαρκούν για οριστικό συμπέρασμα ως προς το συνολικό αποτύπωμα κύκλου ζωής. Για μια ολοκληρωμένη περιβαλλοντική εκτίμηση, είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί κοινός χρονικός ορίζοντας αναφοράς για όλα τα σενάρια, καθώς και να ληφθούν υπόψη οι εκπομπές που σχετίζονται με τη συντήρηση, την επισκευή, την αντικατάσταση και τυχόν ανακαίνιση των δομικών στοιχείων και των συστημάτων του κτιρίου (RICS, 2023).

Συνολικά, η ανάλυση δείχνει ότι η επιλογή της κατάλληλης παρέμβασης δεν πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Είναι αναγκαίο να συνεκτιμηθούν τόσο οι λειτουργικές όσο και οι ενσωματωμένες εκπομπές σε όλο τον κύκλο ζωής, δίνοντας προτεραιότητα σε υλικά με χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα και σε παρεμβάσεις των οποίων το λειτουργικό όφελος μπορεί να αντισταθμίσει την πρόσθετη περιβαλλοντική επιβάρυνση που προκύπτει από τη χρήση νέων υλικών και συστημάτων (Rabani et al., 2021; Grossi et al., 2024).

5.5. Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη διεθνή βιβλιογραφία

Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας ευθυγραμμίζονται με τα ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας, επιβεβαιώνοντας ότι τα παλαιότερα σχολικά κτίρια –ιδίως εκείνα που κατασκευάστηκαν πριν από την καθιέρωση αυστηρότερων προδιαγραφών θερμομόνωσης– παρουσιάζουν αυξημένες ανάγκες για θέρμανση και σημαντικά περιθώρια ενεργειακής αναβάθμισης. Το σχολείο της Αριδαίας εμφανίζει παρόμοια χαρακτηριστικά με το σχολείο Mascagni στο Melzo της Ιταλίας, το οποίο ανεγέρθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1970 και διαθέτει φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα, τοιχοποιία από οπτόπλινθους και μονούς υαλοπίνακες (Di Giuda et al., 2015).

Στο Σενάριο 1, η αντικατάσταση των κουφωμάτων είχε σχετικά περιορισμένη επίδραση στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση, η οποία μειώθηκε κατά 3,83%, ενώ οι ανάγκες

θέρμανσης περιορίστηκαν μόλις κατά 1,52%. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι, με τις ιδιότητες των υαλοπινάκων που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο, η σημαντικότερη βελτίωση εμφανίστηκε στη θερινή συμπεριφορά.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ολοκληρωμένης ενεργειακής αναβάθμισης είναι το σχολείο Tito Maccio Plauto στην Cesena. Οι παρεμβάσεις που πραγματοποιήθηκαν περιλάμβαναν εξωτερική θερμομόνωση στις όψεις και στη στέγη, μερική μόνωση του δαπέδου, αντικατάσταση των κουφωμάτων με εξωτερικά κινητά σκίαστρα, πλήρη αναβάθμιση του συστήματος θέρμανσης, εγκατάσταση μηχανικού αερισμού, σύστημα ενεργειακής διαχείρισης και φωτοβολταϊκά πάνελ. Αρχικά, οι υπολογισμοί έδειξαν ότι η μόνωση μόνο των βόρειων και δυτικών όψεων δεν επαρκούσε για να επιτευχθούν οι επιθυμητοί στόχοι. Για τον λόγο αυτό, αποφασίστηκε η θερμομόνωση να επεκταθεί σε ολόκληρο το κέλυφος του κτιρίου (Zinzi et al., 2014).

Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών, τα αποτελέσματα ήταν εντυπωσιακά: καταγράφηκε μείωση 81% στην κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, 80% στη συνολική τελική ενέργεια και 81% στην πρωτογενή ενέργεια (Zinzi et al., 2016). Οι επιδόσεις αυτές ξεπερνούν τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, γεγονός που οφείλεται στο ότι το συγκεκριμένο έργο περιλάμβανε ένα πολύ πιο εκτεταμένο πακέτο παρεμβάσεων, καλύπτοντας τόσο το σύνολο του κελύφους όσο και τα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα και την παραγωγή ενέργειας.

Η ανάλυση του Σεναρίου 2 αναδεικνύει πόσο σημαντικός είναι ο συνδυασμός της θερμομόνωσης με μέτρα που περιορίζουν την υπερθέρμανση το καλοκαίρι. Η μόνωση των εξωτερικών τοίχων μείωσε τις ανάγκες για θέρμανση κατά 16,24%, αλλά ταυτόχρονα αύξησε τις θεωρητικές ανάγκες για ψύξη κατά 56,35%. Αυτό δείχνει ότι η ενίσχυση της θερμικής αντίστασης του κελύφους δεν πρέπει να εξετάζεται απομονωμένα, αλλά σε συνδυασμό με τη σκίαση, τον έλεγχο των ηλιακών κερδών και τον φυσικό ή νυχτερινό αερισμό.

Αξιοσημείωτα αποτελέσματα προέκυψαν από το Σενάριο 3, όπου η ταυτόχρονη θερμομόνωση των εξωτερικών τοίχων και της στέγης οδήγησε σε μείωση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης κατά 48,11%. Το εύρημα αυτό υπογραμμίζει τον καθοριστικό ρόλο που παίζει η στέγη στο ενεργειακό ισοζύγιο του σχολικού κτιρίου. Στο συγκρότημα Amaldi - Sraffa, η εφαρμογή θερμομόνωσης τύπου EPS αποκλειστικά στη στέγη μείωσε τον δείκτη μη ανανεώσιμης πρωτογενούς ενέργειας κατά περίπου 10,7%, ενώ παρόμοια

αποτελέσματα επιτεύχθηκαν και με τη χρήση φυτεμένου δώματος ή θερμομόνωσης από ξυλόμαλλο (Balicki, 2024).

Η σημασία των συνδυασμένων παρεμβάσεων επιβεβαιώνεται και από τη μελέτη του Otuh (2016). Σε ένα εκπαιδευτικό κτίριο στη Φινλανδία, η βελτίωση της θερμομόνωσης οδήγησε σε μείωση του EUI κατά περίπου 22,5%, ενώ όταν συνδυάστηκε με αναβάθμιση του συστήματος HVAC, η συνολική μείωση έφτασε περίπου το 71%. Παρόμοια, στην παρούσα εργασία, η σταδιακή προσθήκη παρεμβάσεων οδήγησε σε ολοένα μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας, με το Σενάριο 4 να εμφανίζει τη χαμηλότερη συνολική ενεργειακή κατανάλωση και μείωση 53,35%. Ωστόσο, η ενεργειακά πιο αποδοτική λύση δεν είναι πάντα και η περιβαλλοντικά βέλτιστη. Στη μελέτη των Amaldi και Sraffa, για παράδειγμα, το φυτεμένο δώμα αξιολογήθηκε θετικότερα σε ορισμένα περιβαλλοντικά κριτήρια, ενώ το EPS παρουσίασε χαμηλότερο κόστος και μικρότερο χρόνο οικονομικής απόσβεσης (Balicki, 2024). Αντίστοιχα, στην παρούσα ανάλυση το Σενάριο 4 επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης και του λειτουργικού άνθρακα, αλλά συνοδεύεται από υψηλότερο ενσωματωμένο άνθρακα λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας νέων υλικών.

Συνοψίζοντας, οι μελέτες που εξετάστηκαν επιβεβαιώνουν ότι το BIM αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο, λειτουργώντας ως ενιαία βάση για την αποτύπωση του κτιρίου και τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών λύσεων. Οι Di Giuda et al. (2015) τονίζουν ότι η εφαρμογή του BIM στα υφιστάμενα κτίρια πρέπει να ξεκινά από τη μελέτη της διαθέσιμης τεκμηρίωσης και την ακριβή καταγραφή της πραγματικής κατάστασης. Παράλληλα, ο Otuh (2016) υπογραμμίζει ότι η αξιοπιστία των ενεργειακών αποτελεσμάτων εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα των δεδομένων εισόδου και τη σωστή διαμόρφωση του μοντέλου. Η προσέγγιση αυτή συνάδει με τη μεθοδολογία της παρούσας εργασίας, όπου το BIM αξιοποιήθηκε για την αποτύπωση του σχολικού κτιρίου, την εφαρμογή διαδοχικών σεναρίων και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αξιολόγησε την ενεργειακή και βιοκλιματική απόδοση ενός υφιστάμενου σχολικού συγκροτήματος μέσω ψηφιακής μοντελοποίησης BIM και ενεργειακής προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το κτίριο παρουσιάζει αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις, οι οποίες οφείλονται κυρίως λόγω των αναγκών θέρμανσης και της ανεπαρκούς θερμικής προστασίας του κελύφους.

Η αντικατάσταση μόνο των κουφωμάτων είχε περιορισμένο συνολικό όφελος, ενώ η θερμομόνωση των εξωτερικών τοίχων οδήγησε σε πιο αισθητή βελτίωση. Ο συνδυασμός θερμομόνωσης τοίχων και στέγης αποδείχθηκε καθοριστικός για την ενεργειακή απόδοση. Το Σενάριο 4, το οποίο περιλάμβανε όλες τις παρεμβάσεις, αναδείχθηκε ως η πιο αποδοτική λύση, μειώνοντας τη συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση κατά 53,35%, τις ανάγκες θέρμανσης κατά 62,57% και το Site EUI κατά 53,86%. Ωστόσο, η περιβαλλοντική αξιολόγηση έδειξε ότι η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των σχετικών εκπομπών δεν οδηγεί απαραίτητα και σε μικρότερο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα, καθώς η χρήση νέων υλικών αυξάνει τον ενσωματωμένο άνθρακα. Επομένως, η επιλογή των παρεμβάσεων πρέπει να στηρίζεται σε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που συνδυάζει ενεργειακή, περιβαλλοντική και οικονομική αξιολόγηση. Η ανάλυση του αύλειου χώρου αποκάλυψε ότι μεγάλο τμήμα της κεντρικής αυλής παραμένει εκτεθειμένο στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία, ενώ οι περιοχές με σκίαση είναι περιορισμένες και εντοπίζονται κυρίως κοντά στα κτίρια. Αυτή η κατάσταση υποδηλώνει αυξημένη πιθανότητα θερμικής επιβάρυνσης κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου.

6.2. Προτάσεις αναβάθμισης

Για την ενεργειακή αναβάθμιση του κτιρίου προτείνεται η συνδυασμένη θερμομόνωση των εξωτερικών τοίχων και της στέγης, σε συνδυασμό με την αντικατάσταση των υφιστάμενων κουφωμάτων. Οι παρεμβάσεις αυτές μπορούν να υλοποιηθούν σταδιακά, δίνοντας προτεραιότητα στη στέγη και στα σημεία του κελύφους που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες ενεργειακές απώλειες. Για μια πιο ολοκληρωμένη ενεργειακή και βιοκλιματική αναβάθμιση του σχολικού συγκροτήματος, μπορεί να εξεταστεί η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών

συστημάτων στις νότια προσανατολισμένες επιφάνειες των στεγών, ώστε να καλύπτεται μέρος των ενεργειακών αναγκών από ανανεώσιμες πηγές. Παράλληλα, προτείνεται να διερευνηθεί η δυνατότητα κατασκευής φυτεμένου δώματος πάνω από τον πολυχώρο δραστηριοτήτων, το οποίο θα ενισχύσει τη θερμική προστασία, θα αυξήσει το πράσινο και θα μειώσει τη θερμική καταπόνηση του κτιρίου. Για τον αύλειο χώρο προτείνεται η ενίσχυση της σκίασης με φυλλοβόλα δέντρα και η τοποθέτηση στεγάστρων, η δημιουργία σκιασμένων διαδρομών και χώρων παραμονής, η μείωση της έκτασης του δαπέδου από τσιμέντο και η δημιουργία μεγαλύτερων χώρων πρασίνου, καθώς και η χρήση διαπερατών ή ψυχρών υλικών επίστρωσης. Οι παρεμβάσεις αυτές μπορούν να περιορίσουν την αποθήκευση θερμότητας και να βελτιώσουν τις συνθήκες χρήσης της αυλής.

6.3. Αναπάντητα ερωτήματα και αδυναμίες της εργασίας

Παρά τη συστηματική ανάπτυξη του BIM μοντέλου και τη συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων αναβάθμισης, τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας πρέπει να ερμηνεύονται με προσοχή, λαμβάνοντας υπόψη ορισμένους μεθοδολογικούς και υπολογιστικούς περιορισμούς.

Πρώτα απ' όλα, η μελέτη επικεντρώνεται σε ένα συγκεκριμένο σχολικό κτίριο στην Αριδαία, το οποίο διαθέτει ιδιαίτερα γεωμετρικά, κατασκευαστικά, λειτουργικά και κλιματικά χαρακτηριστικά. Επομένως, τα αριθμητικά αποτελέσματα και τα ποσοστά εξοικονόμησης δεν μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικά για όλα τα σχολικά κτίρια. Ωστόσο, η μεθοδολογική διαδικασία που ακολουθήθηκε, δηλαδή η αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης, η ανάπτυξη BIM μοντέλου, ο ορισμός spaces, η ενεργειακή προσομοίωση και η συγκριτική εξέταση εναλλακτικών σεναρίων, μπορεί να εφαρμοστεί ευρύτερα και σε άλλα έργα.

Ένας βασικός περιορισμός της μελέτης είναι επαρκών πραγματικών δεδομένων κατανάλωσης, γεγονός που δεν επιτρέπει την επαλήθευση της ακρίβειας του ενεργειακού μοντέλου ως προς τη λειτουργία του κτιρίου. Ως αποτέλεσμα, οι απόλυτες τιμές κατανάλωσης βασίζονται αποκλειστικά σε υπολογιστικές εκτιμήσεις. Η αξιοπιστία των ενεργειακών προσομοιώσεων που βασίζονται σε BIM εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων εισόδου, τη γεωμετρική πολυπλοκότητα του μοντέλου και τη σωστή ρύθμιση των παραμέτρων του. Οι συνθήκες λειτουργίας προσομοιώθηκαν με τη

χρήση προκαθορισμένων ωραρίων, ποσοστών πληρότητας, εσωτερικών θερμικών κερδών, θερμοκρασιών ρύθμισης και παροχών αερισμού. Ωστόσο, στην πραγματικότητα, οι παράμετροι αυτοί μεταβάλλονται συνεχώς, ανάλογα με τη χρήση κάθε χώρου, τη δραστηριότητα των χρηστών, το άνοιγμα των παραθύρων και τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες. Ακόμη και μικρές αποκλίσεις σε αυτές τις παραδοχές μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα υπολογιζόμενα θερμικά φορτία και τις ετήσιες ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου.

Όπως έχει αναφερθεί, το υφιστάμενο σχολικό κτίριο δεν διαθέτει εγκατεστημένο μηχανικό σύστημα ψύξης, αλλά μόνο σύστημα θέρμανσης με λέβητα πετρελαίου και θερμαντικά σώματα. Οι τιμές ψύξης που παρουσιάστηκαν αποτελούν θεωρητικές απαιτήσεις ενός ιδανικού συστήματος κάλυψης φορτίων και χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά για τη συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων.

Ένας επιπλέον περιορισμός σχετίζεται με το γεγονός ότι η ενεργειακή και η περιβαλλοντική αξιολόγηση πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικά υπολογιστικά περιβάλλοντα. Οι δείκτες Site EUI και Source EUI προέκυψαν από το ενσωματωμένο λογισμικό OpenStudio, ενώ ο Annual EUI και οι δείκτες άνθρακα υπολογίστηκαν μέσω του AutodeskFormaCarbonInsights. Τα δύο αυτά εργαλεία βασίζονται σε διαφορετικές βάσεις δεδομένων, μεθόδους υπολογισμού και παραδοχές, γεγονός που καθιστά τους δείκτες τους μη άμεσα συγκρίσιμους σε αριθμητικό επίπεδο. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση επικεντρώθηκε κυρίως στις σχετικές μεταβολές μεταξύ της υφιστάμενης κατάστασης και των προτεινόμενων σεναρίων, παρά στις απόλυτες τιμές.

Η εκτίμηση του αποτυπώματος άνθρακα μέσω του FormaCarbonInsights έχει καθαρά ενδεικτικό και συγκριτικό χαρακτήρα και δεν συνιστά πλήρη ανάλυση κύκλου ζωής σύμφωνα με εξειδικευμένη μεθοδολογία LCA. Η ανάλυση στηρίζεται στις διαθέσιμες βιβλιοθήκες υλικών και στους ενσωματωμένους συντελεστές εκπομπών του λογισμικού. Δεν έχουν ληφθεί υπόψη παράγοντες όπως οι αποστάσεις μεταφοράς, οι πραγματικοί κατασκευαστές, η κατανάλωση ενέργειας στο εργοτάξιο, η συντήρηση, η αντικατάσταση επιμέρους στοιχείων, η τελική αποξήλωση ή η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης των υλικών. Η έρευνα επικεντρώθηκε κυρίως στις παρεμβάσεις που αφορούν το κτιριακό κέλυφος. Δεν εξετάστηκαν αναλυτικά η αντικατάσταση του συστήματος θέρμανσης, η εγκατάσταση αντλίας θερμότητας, η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών

ενέργειας, η αναβάθμιση του φωτισμού ή η εφαρμογή συστήματος μηχανικού αερισμού με ανάκτηση θερμότητας. Κατά συνέπεια, το Σενάριο 4 θεωρείται η βέλτιστη επιλογή μόνο σε σχέση με τα τέσσερα σενάρια που μελετήθηκαν και όχι σε σύγκριση με όλες τις τεχνικά διαθέσιμες λύσεις.

Τέλος, η θερμική άνεση και οι συνθήκες του αύλειου χώρου δεν επαληθεύτηκαν με μακροχρόνιες επιτόπιες μετρήσεις θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας αέρα και ακτινοβολίας. Συνεπώς, η επίδραση των παρεμβάσεων στη θερινή υπερθέρμανση, στους δείκτες PMV/PPD και στις βιοκλιματικές συνθήκες της σχολικής αυλής εξετάστηκε περιορισμένα και δεν μπορεί να θεωρηθεί πλήρως ποσοτικοποιημένη.

Παρά τους παραπάνω περιορισμούς, η ενιαία εφαρμογή των ίδιων παραδοχών σε όλα τα σενάρια επιτρέπει μια συνεπή σχετική σύγκριση των παρεμβάσεων. Τα αποτελέσματα είναι επομένως περισσότερο αξιόπιστα ως προς την κατεύθυνση και τη σχετική έκταση των μεταβολών και λιγότερο ως προς την πρόβλεψη των απόλυτων πραγματικών καταναλώσεων.

6.4. Θεωρητικές και πρακτικές εφαρμογές των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, πέραν της άμεσης συμβολής τους στον βιοκλιματικό επανασχεδιασμό του 3ου Δημοτικού Σχολείου Αριδαίας, φέρουν σημαντικές θεωρητικές και πρακτικές προεκτάσεις που επεκτείνονται πέρα από το συγκεκριμένο παράδειγμα. Η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου BIM-based πλαισίου αξιολόγησης που συνδέει ενεργειακή απόδοση, ανθρακικό αποτύπωμα και ηλιακή έκθεση αύλειου χώρου προσφέρει ένα επαναλήψιμο μεθοδολογικό εργαλείο με ευρύτερες εφαρμογές στον τομέα της βιώσιμης σχολικής αρχιτεκτονικής.

6.4.1. Θεωρητικές εφαρμογές

Σε θεωρητικό επίπεδο, η εργασία συμβάλλει στη διεύρυνση του ερευνητικού πεδίου που αφορά στη BIM-based περιβαλλοντική αξιολόγηση σχολικών κτιρίων. Αναδεικνύεται ότι η ενιαία θεώρηση κτιρίου και αύλειου χώρου ως ενός ολοκληρωμένου περιβαλλοντικού συστήματος αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για την ακριβή αποτίμηση της ενεργειακής και βιοκλιματικής απόδοσης, και όχι απλώς μια μεθοδολογική επιλογή (Antoniadis et al., 2020; Duarte et al., 2021). Παράλληλα, η συνδυαστική χρήση δεικτών λειτουργικού και

ενσωματωμένου άνθρακα αναδεικνύει ότι η βέλτιστη ενεργειακή λύση δεν συνεπάγεται αναγκαστικά και τη βέλτιστη περιβαλλοντική επιλογή - εύρημα που εμπλουτίζει τη θεωρητική συζήτηση για τη σύγκριση σεναρίων αναβάθμισης υφιστάμενων κτιρίων (Di Giuda et al., 2015; Vilutienė et al., 2021).

Επιπλέον, η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε κτίριο ΟΣΚ κατασκευής 1988 επιβεβαιώνει εμπειρικά τα θεωρητικά κενά που επισημαίνονται στη βιβλιογραφία σχετικά με την ενεργειακή ανεπάρκεια τυποποιημένων σχολικών κτιρίων της εποχής εκείνης (IEA SHC Programme, 2015; ELSTAT, 2015). Η τεκμηρίωση αυτή με ψηφιακά μέσα BIM ενισχύει τη βάση αποδεικτικών στοιχείων για τη διαμόρφωση εθνικής πολιτικής ενεργειακής αναβάθμισης σχολικών υποδομών, ιδίως στο πλαίσιο του ΕΣΠΑ 2021–2027 και της αναθεωρημένης Οδηγίας EPBD 2024/1275/EE (European Parliament, 2024; Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, 2024).

Από μεθοδολογική άποψη, η εργασία τεκμηριώνει ότι το Autodesk Revit σε συνδυασμό με το Forma Carbon Insights αποτελεί ένα αποτελεσματικό και προσβάσιμο εργαλείο για πολυκριτηριακή αξιολόγηση υφιστάμενων κτιρίων, παρά τους περιορισμούς που υφίστανται κατά την πρακτική εφαρμογή. Η ενσωμάτωση ανάλυσης ηλιακής έκθεσης αύλειου χώρου εντός του BIM περιβάλλοντος αποτελεί καινοτόμο πτυχή που ανοίγει νέες ερευνητικές κατευθύνσεις προς την κατεύθυνση της ολιστικής ψηφιακής αξιολόγησης σχολικών συγκροτημάτων και όχι μόνο.

6.4.2. Πρακτικές εφαρμογές

Σε πρακτικό επίπεδο, τα ευρήματα και η μεθοδολογία της εργασίας μπορούν να αξιοποιηθούν από διαφορετικές κατηγορίες χρηστών και φορείς λήψης αποφάσεων. Συγκεκριμένα:

Α. Μηχανικοί και μελετητές: Το BIM μοντέλο και η μεθοδολογία αξιολόγησης που αναπτύχθηκαν μπορούν να αποτελέσουν πρότυπο εφαρμογής για παρόμοια έργα αναβάθμισης σχολικών κτιρίων, τα οποία αποτελούν την πλειονότητα του ελληνικού σχολικού κτιριακού αποθέματος. Η επαναλαμβανόμενη δομή της μεθοδολογίας - αποτύπωση, BIM μοντελοποίηση, ενεργειακή προσομοίωση, αξιολόγηση σεναρίων - επιτρέπει την άμεση εφαρμογή της σε νέες μελέτες με ελάχιστες προσαρμογές. Το BIM μοντέλο μπορεί επιπλέον να λειτουργήσει ως ψηφιακή βάση για μεταγενέστερες μελέτες, για την καταγραφή των δομικών στοιχείων και για τη δοκιμή πρόσθετων

σεναρίων, όπως η αντικατάσταση του συστήματος θέρμανσης, η εγκατάσταση αντλίας θερμότητας, η αξιοποίηση φωτοβολταϊκών και η χρήση υλικών χαμηλότερου ανθρακικού αποτυπώματος.

- Β. Φορείς διαχείρισης σχολικών υποδομών (Δήμοι, Τεχνικές Υπηρεσίες, Περιφέρειες): Τα αποτελέσματα μπορούν να υποστηρίξουν δήμους, τεχνικές υπηρεσίες, κατά την προκαταρκτική αξιολόγηση και την ιεράρχηση έργων ενεργειακής αναβάθμισης. Αναδεικνύεται ότι η συνδυασμένη θερμομόνωση τοίχων, στέγης και αντικατάσταση κουφωμάτων (Σενάριο 4) επιτυγχάνει τη μέγιστη ενεργειακή εξοικονόμηση (53,35%), γεγονός που μπορεί να καθοδηγήσει τις προτεραιότητες χρηματοδότησης μέσω ΕΣΠΑ 2021–2027 για παρόμοια κτίρια ανά την Ελλάδα (Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, 2025).
- Γ. Αρχές εκπαίδευσης και σχολικές κοινότητες: Η ανάλυση ηλιακής έκθεσης του αύλειου χώρου αναδεικνύει ζώνες υψηλής θερμικής επιβάρυνσης κατά τις κρίσιμες ώρες χρήσης (10:00–14:00), παρέχοντας έτσι επιστημονικά τεκμηριωμένη βάση για παρεμβάσεις χαμηλού κόστους, όπως η φύτευση φυλλοβόλων δέντρων, η τοποθέτηση στεγάστρων και η αντικατάσταση επιφανειών με ψυχρά υλικά, οι οποίες μπορούν να υλοποιηθούν σταδιακά με τοπικά κονδύλια (Antoniadis et al., 2020; Γκαϊδατζή, 2022). Επίσης, μπορεί να συμβάλει στην κατανόηση των περιβαλλοντικών προβλημάτων από μαθητές, εκπαιδευτικούς και γονείς και να υποστηρίξει συμμετοχικές δράσεις φύτευσης, σκίασης και ορθολογικής χρήσης της ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, η πρακτική εφαρμογή της έρευνας δεν περιορίζεται στην τεχνική αναβάθμιση των υποδομών, αλλά επεκτείνεται στην περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση και στην ενεργό συμμετοχή των χρηστών του σχολείου.
- Δ. Ερευνητική κοινότητα: Η παρούσα εργασία παρέχει βάση σύγκρισης για μελλοντικές μελέτες που θα εξετάσουν επιπλέον παραμέτρους, όπως η βαθμονόμηση του μοντέλου με πραγματικές καταναλώσεις, η πλήρης ανάλυση κύκλου ζωής (LCA), ο υπολογισμός δεικτών εξωτερικής θερμικής άνεσης (PET/UTCI) και η οικονομική αξιολόγηση των παρεμβάσεων. Το BIM μοντέλο παραμένει διαθέσιμο για επέκταση και επανάχρηση σε μελλοντικές έρευνες.
- Ε. Εκπαίδευση αρχιτεκτόνων και μηχανικών: Η εφαρμογή αποτελεί παράδειγμα πρακτικής χρήσης BIM εργαλείων σε πραγματικό κτίριο, συνδέοντας ακαδημαϊκή γνώση με επαγγελματική πρακτική. Η μεθοδολογία μπορεί να αξιοποιηθεί ως

εκπαιδευτικό υλικό στο πλαίσιο μεταπτυχιακών προγραμμάτων Περιβαλλοντικού Σχεδιασμού και Βιώσιμης Ανάπτυξης.

Συνολικά, η παρούσα εργασία αναδεικνύει ότι η BIM-based αξιολόγηση σχολικών κτιρίων δεν αποτελεί αποκλειστικά ακαδημαϊκή άσκηση, αλλά εφαρμόσιμο εργαλείο τεκμηριωμένης λήψης αποφάσεων που μπορεί να στηρίξει τόσο επιμέρους παρεμβάσεις αναβάθμισης όσο και την ευρύτερη εθνική στρατηγική για ενεργειακά αποδοτικά και βιοκλιματικά σχολικά περιβάλλοντα.

6.5. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Μελλοντική έρευνα μπορεί να περιλαμβάνει τη βαθμονόμηση του ενεργειακού μοντέλου με πραγματικές καταναλώσεις, την πραγματοποίηση επιτόπιων μικροκλιματικών μετρήσεων και τον υπολογισμό δεικτών εξωτερικής θερμικής άνεσης, όπως οι PET και UTCI. Επιπλέον, προτείνεται η πλήρης ανάλυση κύκλου ζωής και η οικονομική αξιολόγηση των παρεμβάσεων, ώστε να προσδιοριστούν ο χρόνος ενεργειακής, οικονομικής και ανθρακικής απόσβεσής τους.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Γκαϊδατζή, Λ.-Δ. (2022). Διερεύνηση του θερμικού περιβάλλοντος σε αυλές σχολικών κτιρίων σε συνθήκες μεσογειακού κλίματος: Συμβολή στη βελτίωση των βιοκλιματικών συνθηκών με την εφαρμογή ήπιων παρεμβάσεων - Εφαρμογή σε σχολείο εντός αστικού περιβάλλοντος (Διπλωματική εργασία). Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών. (2024). Εθνική Στρατηγική και Οδικός Χάρτης για την εφαρμογή του Building Information Modelling (BIM). Αθήνα: ΥΜΕ.

Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας. (2025). Ενεργειακή αναβάθμιση 15 σχολικών κτιρίων μέσω ΕΣΠΑ 2021-2027.

Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης. (2025). Ενεργειακή αναβάθμιση σχολείων και δημόσιων κτιρίων - Περιφερειακό Πρόγραμμα 2021-2027.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2017). Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK). ΦΕΚ Β' 2367/2017. Αθήνα: ΥΠΕΝ.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Alkhatib, F., Alawag, A. M., & Daris, A. (2021). Building information modelling (BIM) and energy performance of building: A review. *Journal of Applied Artificial Intelligence*, 2(1), 22-31. <https://doi.org/10.48185/jaai.v2i1.581>

Antoniadis, D. G. (2018). *Investigation of the effect of vegetation and green infrastructures on outdoor bioclimatology: The case study of the environment of urban school buildings* (Doctoral dissertation, University of Thessaly).

Antoniadis, D., Katsoulas, N., & Kittas, C. (2018). Simulation of schoolyard's microclimate and human thermal comfort under Mediterranean climate conditions: Effects of trees and green structures. *International Journal of Biometeorology*, 62(11), 2025-2036. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1605-7>

Antoniadis, D., Katsoulas, N., & Papanastasiou, D. K. (2020). Thermal environment of urban schoolyards: Current and future design with respect to children's thermal comfort. *Atmosphere*, 11(11), 1144. <https://doi.org/10.3390/atmos11111144>

ASHRAE. (2020). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal environmental conditions for human occupancy*. ASHRAE.

ASHRAE. (2021). *ASHRAE handbook-Fundamentals*.

ASHRAE. (2022). *Standard 90.1-2022: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*.

Autodesk. (2023). Autodesk Insight - Energy analysis for Revit.

<https://www.autodesk.com/products/insight/overview>

Balikci, M. (2024). *Enhancing energy efficiency in Italian school buildings: A comparative study of sustainable strategies with use of BIM and Edilclima* (Master's thesis, Politecnico di Torino).

Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., & Tinz, B. (2012). Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 515-535. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>

Bordass, B., & Leaman, A. (2005). Making feedback and post-occupancy evaluation routine. *Building Research & Information*, 33(4), 347-352. <https://doi.org/10.1080/09613210500162016>

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>

Box, G. E. P. (1976). Science and statistics. *Journal of the American Statistical Association*, 71(356), 791-799. <https://doi.org/10.1080/01621459.1976.10480949>

Brown, R. D., & Gillespie, T. (2011). Ameliorating the effects of climate change: Modifying microclimates through landscape design. *Landscape and Urban Planning*, 100(4), 372-380. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.034>

BuildingSMART Finland. (2012). *Common BIM Requirements 2012* (COBIM 2012).

BuildingSMART International. (2020). *Industry Foundation Classes*. <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/>

- D'Agostino, D., Zangheri, P., & Castellazzi, L. (2017). Towards Nearly Zero Energy Buildings in Europe: A Focus on Retrofit in Non-Residential Buildings. *Energies*, 10(1), 117. <https://doi.org/10.3390/en10010117>
- De Angelis, E., De Lieto Vollaro, A., Groppi, D., & Tallini, A. (2017). A simple method for the comparison of bioclimatic design strategies based on dynamic indoor thermal comfort assessment for school buildings. *Procedia Engineering*, 180, 1175-1184. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.278>
- De Dear, R., & Brager, G. S. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, 104(1), 145-167.
- Di Giuda, G. M., Villa, V., & Piantanida, P. (2015). BIM and energy efficient retrofitting in school buildings. *Energy Procedia*, 78, 1045–1050. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.066>
- Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: Microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, 35(1), 69-76. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00081-6)
- Duarte, J. G. C. L. M., Zemero, B. R., Souza, A. C. D. B. de, Tostes, M. E. de L., & Bezerra, U. H. (2021). Building Information Modeling approach to optimize energy efficiency in educational buildings. *Journal of Building Engineering*, 43, 102587. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102587>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling For Owners, Managers, Architects, Engineers and Contractors*. (2nd ed.). Wiley.
- ELSTAT. (2015). *2011 Buildings Census: Number and characteristics of buildings in Greece*. Hellenic Statistical Authority.
- European Committee for Standardization. (2017). *Energy performance of buildings—Overarching EPB assessment—Part 1: General framework and procedures* (EN ISO 52000-1:2017).
- EU BIM Task Group. (2017). *Handbook for the introduction of Building Information Modelling by the European public sector*.

European Parliament. (2010). Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings (EPBD).

European Parliament. (2014). Directive 2014/24/EU on public procurement. Official Journal of the European Union.

European Parliament. (2024). Directive (EU) 2024/1275 on the energy performance of buildings (recast).

Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. Danish Technical Press.

Fung, A., Shukla, A., & Thomas, P. (2022). BIM-based daylight performance prediction in university buildings: A Brisbane case study. *Journal of Building Performance*, 13, 85-94.

Grossi, F., Ge, H., Zmeureanu, R., & Baba, F. (2024). Assessing the effectiveness of building retrofits in reducing GHG emissions: A Canadian school case study. *Journal of Building Engineering*, 91, 109622. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109622>

Guo, H., Aviv, D., Loyola, M., Teitelbaum, E., Houchois, N., & Meggers, F. (2020). On the understanding of the mean radiant temperature within both the indoor and outdoor environment: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, Article 109207. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.014>

IEA Solar Heating and Cooling Programme. (2015). *Sustainable refurbishment: School buildings—A guide for designers and planners*.

Jadhav, P., & Minde, P. (2024). BIM-based energy consumption analysis for residential buildings: Effects of orientation, size, and type of windows. *Discover Civil Engineering*, 1, 110. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00116-5>

Jing, W., Qin, Z., Mu, T., Ge, Z., & Dong, Y. (2024). Evaluating thermal comfort indices for outdoor spaces on a university campus. *Scientific Reports*, 14, Article 21253. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71805-5>

Liu, Z., Li, J., & Xi, T. (2023). A review of thermal comfort evaluation and improvement in urban outdoor spaces. *Buildings*, 13(12), Article 3050. <https://doi.org/10.3390/buildings13123050>

- Lozoya-Peral, A., Pérez-Carramiñana, C., Galiano-Garrigós, A., González-Avilés, Á. B., & Emmitt, S. (2023). Exploring energy retrofitting strategies and their effect on comfort in a vernacular building in a dry Mediterranean climate. *Buildings*, 13(6), 1381. <https://doi.org/10.3390/buildings13061381>
- Luyao, H., Ling, L., Xinkai, L., Junfeng, D. (2025). Outdoor thermal comfort benchmarks and optimization design for children in open parks of hot summer and cold winter region. *Scientific Reports*, 15, 16702. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95979-8>
- Ma, Z., Wang, J., & Zhang, X. (2021). Daylight optimization for school buildings in the hot summer and cold winter zone of China. *Building Simulation*, 14, 555-566.
- Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34(6), 563-572. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3)
- Otuh, N. (2016). *BIM-based energy/sustainability analysis for educational buildings* (Master's thesis, HAMK University of Applied Sciences).
- Pantavou, K., Kotroni, V., & Lagouvardos, K. (2024). Thermal environment and indices: An analysis for effectiveness in operational weather applications in a Mediterranean city (Athens, Greece). *International Journal of Biometeorology*, 68, 79-87. <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02572-7>
- Peixoto, C. (2020). *Bioclimatic strategies applied to the facades of school buildings* (Master's thesis, Instituto Superior Técnico).
- Pellegrino, A., Cammarano, S., & Savio, V. (2015). Daylighting for green schools: A resource for indoor quality and energy efficiency in educational environments. *Energy Procedia*, 78, 3162-3167. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.774>
- Rabani, M., Madessa, H. B., Ljungström, M., Aamodt, L., Løvvold, S., & Nord, N. (2021). Life cycle analysis of GHG emissions from the building retrofitting: The case of a Norwegian office building. *Building and Environment*, 204, Article 108159. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108159>
- Ren, C. (2025). Application of BIM technology in green building design. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 137, 35-41. <https://doi.org/10.54097/3ee27j55>

- Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85(12), 3085–3102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island: A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224–240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Santamouris, M. (2016). Cooling the buildings—Past, present and future. *Energy and Buildings*, 128, 617–638. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.034>.
- Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., & Fisk, W. J. (2012). Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Environmental Health Perspectives*, 120(12), 1671-1677. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>
- Sayad, B., Menni, Y., Al-Bahrani, M., Hegazy, I. R., Imam, A. A., Abed, A. M., & Alhubashi, H. H. (2022). Designing for optimum thermal comfort using bioclimate simulation and analysis as an urban and architectural design and educational support tool. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 17, 1470–1477. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac134>
- Schlueter, A., & Thesseling, F. (2009). Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages. *Automation in Construction*, 18(2), 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.07.003>
- Taing, K., Reiter, S., Han, V., & Leclercq, P. (2025). Bioclimatic Design Guidelines for Design Decision Support to Enhance Residential Building Thermal Performance in Tropical Regions. *Sustainability*, 17(4), 1591. <https://doi.org/10.3390/su17041591>
- Tousi, E., Mela, A., & Tseliou, A. (2024). Thermal Stress in Outdoor Spaces During Mediterranean Heatwaves: A PET and UTCI Analysis of Different Demographics. *Urban Science*, 8(4), 193. <https://doi.org/10.3390/urbansci8040193>
- UK Department for Education. (2016). *Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools (BB101)*.

U.S. Department of Energy. (2007). *National best practices manual for building high performance schools* (Rev. ed., DOE/GO-102002-1610).

Vanos, J. K., Warland, J. S., Gillespie, T. J., & Kenny, N. A. (2010). Review of the physiology of human thermal comfort while exercising in urban landscapes and implications for bioclimatic design. *International Journal of Biometeorology*, 54, 319-334.
<https://doi.org/10.1007/s00484-010-0301-9>

Vanos, J. K. (2015). Children's health and vulnerability in outdoor microclimates: A comprehensive review. *Environment International*, 76, 1-15.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.016>

Vilutienė, T., Džiugaitė-Tumenienė, R., Kalibatienė, D., & Kalibatas, D. (2021). How BIM contributes to a building's energy efficiency throughout its whole life cycle: Systematic mapping. *Energies*, 14(20), 6680. <https://doi.org/10.3390/en14206680>

Wargocki, P., & Wyon, D. P. (2007). The effects of moderately raised classroom temperatures and classroom ventilation rate on the performance of schoolwork by children (RP-1257). *HVAC&R Research*, 13(2), 193–220.
<https://doi.org/10.1080/10789669.2007.10390951>

Yang, Y., et al. (2022). A gbXML reconstruction workflow and tool development for BIM-based building energy simulation. *Buildings*, 12(2), 221.
<https://doi.org/10.3390/buildings12020221>

Yao, H. (2025). The application of BIM technology in energy-saving design of low-energy-consumption green buildings. In *Proceedings of the 2025 10th International Conference on Civil Architecture and Structural Engineering (ICCASE 2025)* (pp. 283-287).
<https://doi.org/10.1145/3747012.3748391>

Zinzi, M., Agnoli, S., Battistini, G., & Bernabini, G. (2014). Retrofit of an existing school in Italy with high energy standards. *Energy Procedia*, 48, 1529–1538.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.173>

Zinzi, M., Agnoli, S., Battistini, G., & Bernabini, G. (2016). Deep energy retrofit of the T. M. Plauto School in Italy: A five years' experience. *Energy and Buildings*, 126, 239–251.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.030>

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.