



«ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ »

«Διαχείριση Τεχνικών Έργων»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ενεργειακή και Περιβαλλοντική Αναβάθμιση Σχολικού Κτιρίου με Αξιοποίηση
Τεχνολογιών BIM: Παραμετρική Διερεύνηση και Αξιολόγηση Σεναρίων».

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ:

Όλγα Σταμπουλή

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Α. Χασιακός

Πάτρα, Ιούνιος 2026

© Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Όλγας Σταμπουλή που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης η συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημοσίου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης 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 της 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 την ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση της συγγραφέα/δημιουργού. Η συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών δικαιωμάτων.

Δήλωση χρήσης εργαλείων παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης

Κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν συμβουλευτικά εργαλεία παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης, με σκοπό τη γλωσσική επιμέλεια και τη βελτίωση της διατύπωσης του κειμένου, την οργάνωση της δομής των κεφαλαίων και τον έλεγχο της εσωτερικής συνέπειας μεταξύ πινάκων και κειμένου.

Τα εργαλεία αυτά δεν χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου BIM, την εκτέλεση των ενεργειακών προσομοιώσεων, τους υπολογισμούς της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, την πολυκριτηριακή κατάταξη ή τη διατύπωση των συμπερασμάτων.

Το σύνολο των τεχνικών αποτελεσμάτων, των παραδοχών, των ερμηνειών και των συμπερασμάτων αποτελεί προϊόν προσωπικής εργασίας και αναλαμβάνω πλήρως την ευθύνη για το περιεχόμενο της εργασίας.



«Ενεργειακή και Περιβαλλοντική Αναβάθμιση Σχολικού Κτιρίου με
Αξιοποίηση Τεχνολογιών BIM: Παραμετρική Διερεύνηση και Αξιολόγηση
Σεναρίων».

Μελέτη Περίπτωσης: Κτίριο Πρωτοβάθμιας Εκπαίδευσης στη Θεσσαλονίκη
(30ό Δημοτικό Θεσσαλονίκης)
Όλγα Σταμπούλη

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Αθανάσιος Χασιακός

Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών

Μηχανικών,

Πανεπιστήμιο Πατρών

Συντονιστής ΣΕΠ, Ελληνικό Ανοικτό

Πανεπιστήμιο

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Σωτήριος Τσιβίλης

Καθηγητής Χημείας και

Τεχνολογίας Δομικών

Υλικών,

Σχολή Χημικών

Μηχανικών, Εθνικό

Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Πάτρα, Ιούνιος 2026

«Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή κ.
Αθανάσιο Χασιακό για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες παρατηρήσεις και τη συνεχή
υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.
Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξη, την υπομονή
και την ενθάρρυνση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.»

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη βιώσιμη αναβάθμιση υφιστάμενης σχολικής μονάδας μέσω της συνδυαστικής αξιοποίησης της Μοντελοποίησης Πληροφοριών Κτιρίου (BIM), της παραμετρικής διερεύνησης, της ενεργειακής προσομοίωσης, της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) και της πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Στόχος είναι η συστηματική διερεύνηση και σύγκριση εναλλακτικών παρεμβάσεων ενεργειακής και περιβαλλοντικής αναβάθμισης.

Ως μελέτη περίπτωσης επιλέχθηκε το 30ό Δημοτικό Σχολείο Θεσσαλονίκης, για το οποίο αναπτύχθηκε ψηφιακό μοντέλο στο Autodesk Revit και οργανώθηκαν ελεγχόμενα σενάρια με τη χρήση Dynamo. Εξετάστηκαν οι θερμοφυσικές ιδιότητες του κελύφους, το πάχος της θερμομόνωσης, τα χαρακτηριστικά των κουφωμάτων, ο λόγος διαφανών ανοιγμάτων προς όψη (WWR) και τα στοιχεία σκίασης. Η ενεργειακή αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μέσω Αναλυτικού Ενεργειακού Μοντέλου (EAM) στο Autodesk Forma Carbon Insights, ενώ η περιβαλλοντική αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με περιορισμένη ή επιμέρους Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA), με όρια A1–A3 και B6 και περίοδο αναφοράς 20 ετών. Συνολικά εξετάστηκαν δύο αρχικά σενάρια, T1 και T2, 32 τεχνικά εφαρμόσιμα σενάρια σχεδιασμού και τρεις πρόσθετες διαμορφώσεις του λόγου διαφανών ανοιγμάτων προς επιφάνεια όψης (WWR), οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά για ανάλυση ευαισθησίας.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι παράμετροι του κελύφους παρουσιάζουν διαφορετική ευαισθησία. Τα κουφώματα παρουσίασαν τη μεγαλύτερη επίδραση μεταξύ των τεχνικά εφαρμόσιμων παραμέτρων, ενώ η εξωτερική τοιχοποιία ανέδειξε σαφέστερα την αντιστάθμιση μεταξύ λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα. Η αυξημένη θερμομόνωση σε ήδη βελτιωμένα στοιχεία παρουσίασε περιορισμένο οριακό όφελος, ενώ η εξεταζόμενη μορφή εξωτερικής σκίασης, μέσω οριζόντιων προβόλων από οπλισμένο σκυρόδεμα, δεν βελτίωσε το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα. Η διερεύνηση του WWR ανέδειξε υψηλή θεωρητική ευαισθησία, αλλά τα συγκεκριμένα σενάρια δεν θεωρήθηκαν αυτομάτως σχεδιαστικά εφαρμόσιμα.

Συνολικά, η πολυκριτηριακή κατάταξη, με κριτήρια τον λειτουργικό και τον ενσωματωμένο άνθρακα, ανέδειξε το R_COMB01 στην πρώτη θέση και στα πέντε σχήματα στάθμισης, ενώ το R_COMB03 διατήρησε τη δεύτερη θέση. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ενεργειακή εξοικονόμηση πρέπει να αξιολογείται παράλληλα με το ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα των υλικών εντός του καθορισμένου λογιστικού ορίου, καθώς η αύξηση της έντασης των επεμβάσεων δεν οδηγεί αναγκαστικά σε αντίστοιχη βελτίωση του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος.

Λέξεις-κλειδιά: Βιώσιμη ενεργειακή αναβάθμιση, σχολικά κτίρια, BIM, παραμετρική διερεύνηση, ενεργειακή προσομοίωση, Ανάλυση Κύκλου Ζωής, πολυκριτηριακή αξιολόγηση, ανθρακικό αποτύπωμα.



“Energy and Environmental Upgrade of a School Building Using BIM Technologies:
Parametric Investigation and Scenario Assessment”.

Olga Stampouli

Abstract

This thesis investigates the sustainable retrofit of an existing school building through the combined use of Building Information Modeling (BIM), parametric investigation, energy simulation, Life Cycle Assessment (LCA), and multi-criteria evaluation. The aim is to systematically investigate and compare alternative energy and environmental retrofit interventions.

The 30th Primary School of Thessaloniki was selected as the case study, for which a digital model was developed in Autodesk Revit and controlled scenarios were organized using Dynamo. The investigated parameters include the thermophysical properties of the building envelope, insulation thickness, window characteristics, window-to-wall ratio (WWR), and shading elements. Energy assessment was performed through an Energy Analytical Model (EAM) using Autodesk Forma Carbon Insights, while the environmental assessment was based on a limited or partial Life Cycle Assessment (LCA) with A1–A3 and B6 system boundaries and a 20-year reference period. Overall, two initial scenarios, T1 and T2, 32 technically feasible design scenarios, and three additional configurations of the window-to-wall ratio (WWR) were examined exclusively for sensitivity analysis.

The results showed that the investigated envelope parameters exhibit different levels of sensitivity. Window upgrades had the greatest impact among the technically feasible parameters, while the external wall showed a clearer trade-off between operational and embodied carbon. Further increases in insulation thickness for already improved elements provided limited marginal benefit, while the investigated form of external shading, through horizontal reinforced-concrete overhangs, did not improve the overall carbon footprint. The WWR analysis showed high theoretical sensitivity, although the specific scenarios were not considered automatically suitable as design solutions.

Overall, the multi-criteria ranking, based on operational and embodied carbon, identified R_COMB01 as the leading scenario under all five weighting schemes, while R_COMB03 consistently ranked second. The results show that energy savings should be evaluated alongside the embodied carbon of the materials within the defined

accounting boundary, as greater intervention intensity does not necessarily lead to a corresponding improvement in the overall carbon footprint.

Keywords: Sustainable energy retrofit, school buildings, BIM, parametric investigation, energy simulation, Life Cycle Assessment, multi-criteria evaluation, carbon footprint.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	6
Abstract	9
Κατάλογος Εικόνων/Σχημάτων	15
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	16
Κατάλογος Πινάκων	18
Συντομογραφίες και Ακρόνυμα	20
Σύμβολα και Μεταβλητές	23
1. Εισαγωγή.....	27
1.1 Αντικείμενο και σημασία της μελέτης.....	27
1.2 Ευρωπαϊκό πλαίσιο για βιώσιμα κτίρια	28
1.3 Περιορισμοί και ερευνητικά κενά στη βιώσιμη αναβάθμιση υφιστάμενων σχολικών μονάδων	29
1.4 Στόχος της εργασίας - Ειδικοί στόχοι	30
1.5 Μεθοδολογία και τρόπος προσέγγισης της έρευνας.....	32
1.6 Δομή εργασίας	33
2. Θεωρητικό Πλαίσιο και Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	35
2.1 Βιώσιμος και βιοκλιματικός σχεδιασμός.....	35
2.1.1 Αρχές βιώσιμου και βιοκλιματικού σχεδιασμού	35
2.1.2 Εφαρμογές και προκλήσεις βιοκλιματικού σχεδιασμού σε σχολικές μονάδες	36
2.1.3 Από τα Κτίρια Σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης στα Κτίρια Μηδενικών Εκπομπών.....	38
2.1.4 Σχολική αυλή, μικροκλίμα και περιβαλλοντική ποιότητα του υπαίθριου χώρου.....	39
2.2 Έρευνες σε υφιστάμενες σχολικές μονάδες.....	39
2.2.1 Ενεργειακό προφίλ και κατανάλωση στα σχολεία στην Ελλάδα	40
2.2.2 Παρεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης και δυναμικό εξοικονόμησης	43

2.2.3	Ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος: αερισμός και συνθήκες χρήσης	45
2.2.4	Κτιριακό κέλυφος, όψεις και περιβαλλοντική αξιολόγηση (LCA) - Ελληνικές εφαρμογές	46
2.3	Building Information Modeling (BIM) στον βιώσιμο σχεδιασμό	48
2.3.1	Βασικές αρχές και χαρακτηριστικά του BIM	48
2.3.2	BIM και βιώσιμος σχεδιασμός κτιρίων	48
2.3.3	Εφαρμογές BIM σε εκπαιδευτικά κτίρια	49
2.3.4	Περιορισμοί και προκλήσεις εφαρμογής του BIM	49
2.4	Παραμετρικός σχεδιασμός και υπολογιστικές μέθοδοι αξιολόγησης ..	50
2.4.1	Παραμετρικός σχεδιασμός στον αρχιτεκτονικό και ενεργειακό σχεδιασμό	50
2.4.2	Σύνδεση παραμετρικού σχεδιασμού με BIM	50
2.4.3	Υπολογιστική βελτιστοποίηση στον σχεδιασμό κτιρίων	51
2.4.4	Εφαρμογή σε υφιστάμενες σχολικές μονάδες	52
2.5	Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA)	53
2.6	Ερευνητικό κενό	54
3.	Μεθοδολογία και Εργαλεία Ανάλυσης	56
3.1	Μεθοδολογικό πλαίσιο και ερευνητική ροή	56
3.2	Δεδομένα, τεκμηρίωση και παραδοχές	57
3.2.1	Ειδικά χαρακτηριστικά σχολικής χρήσης και ενσωμάτωσή τους στο μοντέλο	58
3.3	Μοντελοποίηση στο Revit: επίπεδο λεπτομέρειας και πληροφορίας, όρια μοντέλου και κανόνες μοντελοποίησης	58
3.4	Δημιουργία Αναλυτικού Ενεργειακού Μοντέλου και ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση	59
3.4.1	Ρυθμίσεις Αναλυτικού Ενεργειακού Μοντέλου (EAM) και παραδοχές προσομοίωσης	60
3.5	Παραμετρικό μοντέλο και συστηματική διερεύνηση σεναρίων	61
3.6	Δείκτες αξιολόγησης και κριτήρια ερμηνείας αποτελεσμάτων	63
3.6.1	Διάκριση σεναρίων διερεύνησης και σεναρίων σχεδιασμού	67

3.7	Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA).....	67
3.8	Περιορισμοί, αβεβαιότητες και έλεγχοι ποιότητας.....	69
4.	Πυλοτική Εφαρμογή - Μελέτη Περίπτωσης	71
4.1	Περιγραφή υφιστάμενου σχολικού κτιρίου	71
4.2	Ανάπτυξη ψηφιακού μοντέλου (BIM).....	73
4.2.1	Γεωμετρική και κατασκευαστική αποτύπωση.....	73
4.2.2	Κέλυφος και δομικά στοιχεία	75
4.2.3	Κουφώματα και στοιχεία σκίασης.....	76
4.2.4	Θερμικές ζώνες και λειτουργικά δεδομένα.....	77
4.2.5	Παραμετρική διαχείριση μέσω Dynamo.....	79
4.3	Παραμετρική διαμόρφωση και σενάρια	80
4.4	Ενεργειακή αξιολόγηση.....	83
4.4.1	Εξωτερική τοιχοποιία.....	83
4.4.2	Τοιχώματα υπογείου και πλάκα δαπέδου σε επαφή με το έδαφος ...	85
4.4.3	Πλάκα σε επαφή με ΜΘΧ και πλάκα σε επαφή με εξωτερικό αέρα	86
4.4.4	Τύποι κουφωμάτων.....	88
4.5	Περιβαλλοντική αξιολόγηση μέσω Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.....	90
4.6	Έλεγχοι ποιότητας και τεκμηρίωση.....	92
4.7	Μητρώο Δεδομένων και Παραδοχών και βασικοί τεχνικοί πίνακες	94
5.	Αποτελέσματα και Ανάλυση Σεναρίων	99
5.1	Βασικά σενάρια.....	99
5.1.1	Αποτελέσματα βασικών σεναρίων.....	99
5.1.2	Έλεγχος αριθμητικής συνέπειας	101
5.2	Δομή της παραμετρικής διερεύνησης	103
5.2.1	Λογική διερεύνησης.....	103
5.2.2	Παράμετροι και εύρος διερεύνησης.....	104
5.3	Επίδραση παραμέτρων.....	105
5.3.1	Συγκριτική αξιολόγηση της επίδρασης των παραμέτρων.....	105
5.3.2	Συστήματα σκίασης	108
5.4	Σενάρια εκτός κατάταξης.....	110
5.4.1	Λόγος διαφανών ανοιγμάτων προς όψη	110

5.5	Συνδυαστικά σενάρια.....	111
5.6	Πολυκριτηριακή κατάταξη	114
5.6.1	Εφαρμογή του σύνθετου δείκτη.....	114
5.6.2	Έλεγχος ευαισθησίας των συντελεστών βαρύτητας.....	116
5.6.3	Περιορισμοί της διαδικασίας.....	116
5.7	Συζήτηση σε σχέση με τη βιβλιογραφία.....	117
6.	Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	121
6.1	Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα.....	121
6.1.1	Επίδραση των παραμέτρων του κελύφους.....	121
6.1.2	Αντιστάθμιση λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα	121
6.1.3	Σταθερότητα της πολυκριτηριακής κατάταξης.....	122
6.2	Κύρια ποσοτικά ευρήματα.....	122
6.3	Τεχνική ερμηνεία και συμπεράσματα για τη μελέτη περίπτωσης	123
6.4	Περιορισμοί και αβεβαιότητα.....	124
6.5	Συνεισφορά της έρευνας και προσωπική συνεισφορά.....	125
6.6	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	127
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ:.....	128
8.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	134
8.1	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - Συγκεντρωτικός πίνακας παραμετρικών σεναρίων	134
8.2	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β - Δεδομένα κανονικοποίησης και συντελεστές βαρύτητας	137
8.3	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ - Πλήρης κατάταξη σεναρίων.....	138
8.4	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ - Διαγράμματα παραμετρικής διερεύνησης.....	140

Κατάλογος Εικόνων/Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Διαδικασία παραμετρικής διερεύνησης και πολυκριτηριακής αξιολόγησης σεναρίων.

Σχήμα 3.1 Ροή δεδομένων και εργαλείων της μεθοδολογίας.

Σχήμα 3.2 Στιγμιότυπο από το αρχείο Dynamo για την παραμετρική και μαζική μεταβολή του πάχους της θερμομόνωσης των εξωτερικών τοιχοποιιών.

Εικόνα 4.1 Φωτογραφίες του σχολικού κτιρίου από την επιτόπια αυτοψία.

Εικόνα 4.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση της υπό ανάλυση σχολικής μονάδας μέσω Revit.

Εικόνα 4.3 Κάτοψη ισογείου από το λογισμικό Revit.

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1 Μέση κατανάλωση θερμικής ενέργειας θερμομονωμένων και μη θερμομονωμένων σχολικών κτιρίων ανά Κλιματική Ζώνη.

Διάγραμμα 2.2 Μέση κατανάλωση ενέργειας σε σχολικά κτίρια στην κλιματική ζώνη Γ.

Διάγραμμα 2.3 Ποσοστά εφαρμογής μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας σχολικών κτιρίων.

Διάγραμμα 2.4 Απόδοση παρεμβάσεων στην εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση εκπομπών CO₂.

Διάγραμμα 2.5 Μέση ετήσια κατανάλωση θερμικής ενέργειας ανάλογα με το γεωμετρικό σχήμα και τον βαθμό θερμομόνωσης των σχολικών κτιρίων.

Διάγραμμα 5.1 Λειτουργικός και ενσωματωμένος άνθρακας των σεναρίων T1-T3.

Διάγραμμα 5.2 Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση ανά μονάδα επιφάνειας των σεναρίων T1-T3.

Διάγραμμα 5.3 Συγκριτική επίδραση των παραμέτρων του κελύφους στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα.

Διάγραμμα 5.4 Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση, λειτουργικός και ενσωματωμένος άνθρακας ανά βάθος σκίασης.

Διάγραμμα 5.5 Επίδραση του λόγου διαφανών ανοιγμάτων στην ετήσια ενεργειακή κατανάλωση και στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα.

Διάγραμμα 5.6 Σύνθεση του ανθρακικού αποτυπώματος των συνδυαστικών σεναρίων.

Διάγραμμα 5.7 Κανονικοποιημένες τιμές των δύο κριτηρίων ανά σενάριο.

Διάγραμμα Δ.1 Επίδραση του πάχους θερμομόνωσης της εξωτερικής τοιχοποιίας.

Διάγραμμα Δ.2 Επίδραση του πάχους θερμομόνωσης της πλάκας που εδράζεται η στέγη.

Διάγραμμα Δ.3 Επίδραση του πάχους θερμομόνωσης των τοιχωμάτων υπογείου.

Διάγραμμα Δ.4 Επίδραση του πάχους θερμομόνωσης του δαπέδου επί εδάφους.

Διάγραμμα Δ.5 Επίδραση του πάχους θερμομόνωσης του δαπέδου σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα.

Διάγραμμα Δ.6 Επίδραση των χαρακτηριστικών των κουφωμάτων.

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Βασικές ευρωπαϊκές απαιτήσεις και κατευθύνσεις για την ενεργειακή αναβάθμιση υφιστάμενων δημόσιων κτιρίων.

Πίνακας 2.1 Κάλυψη των βασικών διαστάσεων του προβλήματος από την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

Πίνακας 4.1 Βασικά χαρακτηριστικά του υφιστάμενου σχολικού κτιρίου.

Πίνακας 4.2 Κατηγορίες δομικών στοιχείων και αντιμετώπισή τους στο BIM μοντέλο.

Πίνακας 4.3 Εξεταζόμενες παράμετροι και τρόπος παραμετρικής μεταβολής.

Πίνακας 4.4 Βασικές λειτουργικές παραδοχές ανά τύπο χώρου στο ενεργειακό μοντέλο.

Πίνακας 4.5 Θερμικές ζώνες του ενεργειακού μοντέλου: πλήθος χώρων, επιφάνεια και όγκος.

Πίνακας 4.6 Βασικά script στο πρόγραμμα Dynamo.

Πίνακας 4.7 Πίνακας σεναρίων και χαρακτηριστικών T1-T2-T3.

Πίνακας 4.8 Βασικές παράμετροι των σεναρίων.

Πίνακας 4.9 Στρωματογραφία εξωτερικού τοίχου - Σενάριο T1.

Πίνακας 4.10 Στρωματογραφία εξωτερικού τοίχου - Σενάριο T2.

Πίνακας 4.11 Στρωματογραφία εξωτερικού τοίχου - Σενάριο T3.

Πίνακας 4.12 Στρωματογραφία, πάχος και συντελεστής θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων υπογείου ανά σενάριο.

Πίνακας 4.13 Στρωματογραφία, πάχος και συντελεστής θερμοπερατότητας πλάκας σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο και δαπέδου σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα, ανά σενάριο.

Πίνακας 4.14 Τύποι κουφωμάτων και θερμικές παραδοχές.

Πίνακας 4.15 Τύποι εξωτερικών θυρών και θερμικές παραδοχές.

Πίνακας 4.16 Περιβαλλοντικοί συντελεστές και υλικά σεναρίων.

Πίνακας 4.17 Μητρώο βασικών δεδομένων, παραμέτρων και παραδοχών της μελέτης.

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα βασικών σεναρίων T1-T3.

Πίνακας 5.2 Ποσοστιαία μεταβολή ενεργειακών και περιβαλλοντικών δεικτών σε σχέση με το σενάριο αναφοράς T1.

Πίνακας 5.3 Έλεγχος αριθμητικής συνέπειας των βασικών σεναρίων.

Πίνακας 5.4 Παράμετροι, εύρος και βήμα μεταβολής.

Πίνακας 5.5 Εύρος επίδρασης των εξεταζόμενων παραμέτρων στην ενεργειακή και περιβαλλοντική επίδοση.

Πίνακας 5.6 Επίδραση της ευνοϊκότερης τιμής των εξεταζόμενων παραμέτρων ως προς το σενάριο αναφοράς (T3).

Πίνακας 5.7 Αποτελέσματα σεναρίων συστημάτων σκίασης.

Πίνακας 5.8 Αποτελέσματα σεναρίων μεταβολής του λόγου διαφανών ανοιγμάτων προς όψη.

Πίνακας 5.9 Αποτελέσματα συνδυαστικών σεναρίων.

Πίνακας 5.10 Κατάταξη σεναρίων (ίσα βάρη) - δέκα πρώτες θέσεις.

Πίνακας 5.11 Κατάταξη ανά εναλλακτικό σχήμα συντελεστών βαρύτητας.

Πίνακας 5.12 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με ευρήματα της βιβλιογραφίας.

Πίνακας 6.1 Κύρια ποσοτικά ευρήματα της μελέτης.

Πίνακας Α.1 Συγκεντρωτικός πίνακας παραμετρικών και συνδυαστικών σεναρίων.

Πίνακας Β.1 Ακραίες τιμές των κριτηρίων για την κανονικοποίηση ελαχίστου-μεγίστου.

Πίνακας Β.2 Κριτήρια αξιολόγησης και συντελεστές βαρύτητας.

Πίνακας Β.3 Εναλλακτικά σχήματα στάθμισης για τον έλεγχο ευαισθησίας.

Πίνακας Γ.1 Πλήρης κατάταξη των σεναρίων βάσει του σύνθετου δείκτη (ίσα βάρη).

Πίνακας Γ.2 Θέση κατάταξης κάθε σεναρίου ανά σχήμα στάθμισης.

Συντομογραφίες και Ακρώνυμα

BIM	Building Information Modeling / Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κτιρίου
BMS	Building Management System / Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου
CO₂	Carbon Dioxide / Διοξείδιο του άνθρακα
CO₂eq	Carbon Dioxide Equivalent / Ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα
DHW	Domestic Hot Water / Ζεστό Νερό Χρήσης
EAM	Energy Analytical Model / Αναλυτικό Ενεργειακό Μοντέλο
EC	Embodied Carbon / Ενσωματωμένος άνθρακας
EED	Energy Efficiency Directive / Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive / Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων
EPD	Environmental Product Declaration / Περιβαλλοντική Δήλωση Προϊόντος
EPS	Expanded Polystyrene / Διογκωμένη πολυστερίνη
EUI	Energy Use Intensity / Δείκτης ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης ανά μονάδα επιφάνειας
GHG	Greenhouse Gases / Αέρια του θερμοκηπίου
GWP	Global Warming Potential / Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning / Θέρμανση, αερισμός και κλιματισμός

IEQ	Indoor Environmental Quality / Ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος
IFC	Industry Foundation Classes / Πρότυπο διαλειτουργικότητας BIM
ISO	International Organization for Standardization / Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης
LCA	Life Cycle Assessment / Ανάλυση Κύκλου Ζωής
LCIA	Life Cycle Impact Assessment / Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής
LOD	Level of Development / Επίπεδο ανάπτυξης μοντέλου
LOI	Level of Information / Επίπεδο πληροφορίας
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis / Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων
nZEB	nearly Zero Energy Building / Κτίριο σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας
OC	Operational Carbon / Λειτουργικός άνθρακας
SHGC	Solar Heat Gain Coefficient / Ηλιακός συντελεστής κερδών
TC	Total Carbon / Συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα
TMY	Typical Meteorological Year / Τυπικό μετεωρολογικό έτος
U-value	Συντελεστής θερμοπερατότητας δομικού στοιχείου

Uw	Window Thermal Transmittance / Συντελεστής θερμοπερατότητας κουφώματος
VT	Visible Transmittance / Διαπερατότητα ορατού φωτός
WWR	Window-to-Wall Ratio / Λόγος διαφανών ανοιγμάτων προς επιφάνεια όψης
XPS	Extruded Polystyrene / Εξηλασμένη πολυστερίνη
ZEB	Zero Emission Building / Κτίριο μηδενικών εκπομπών
KENAK	Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων
ΚΘΚ	Κανονισμός Θερμομόνωσης Κτιρίων
ΤΕΕ	Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας
TOTEE	Τεχνικές Οδηγίες Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας

Σύμβολα και Μεταβλητές

U	Συντελεστής θερμοπερατότητας δομικού στοιχείου (W/m ² K)
U_w	Συντελεστής θερμοπερατότητας κουφώματος (W/m ² K)
λ	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας υλικού (W/mK)
ρ	Πυκνότητα υλικού (kg/m ³)
c	Ειδική θερμοχωρητικότητα υλικού (J/kgK)
R	Θερμική αντίσταση στρώσης ή δομικού στοιχείου (m ² K/W)
R_{si}	Εσωτερική επιφανειακή θερμική αντίσταση (m ² K/W)
R_{se}	Εξωτερική επιφανειακή θερμική αντίσταση (m ² K/W)
d	Πάχος στρώσης υλικού (m ή cm)
A	Επιφάνεια δομικού στοιχείου (m ²)
V	Όγκος υλικού ή χώρου (m ³)
WWR	Λόγος διαφανών ανοιγμάτων προς όψη (%)
g	Ηλιακός συντελεστής κερδών κουφώματος (-)
VT	Διαπερατότητα ορατού φωτός (-)

EUI	Δείκτης ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης ανά μονάδα επιφάνειας (kWh/m ² ·έτος)
Q	Ενεργειακή κατανάλωση (kWh)
Q_{annual}	Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση (kWh/έτος)
A_{floor}	Ωφέλιμη ή εξεταζόμενη επιφάνεια δαπέδου (m ²)
CO_{2eq}	Ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα (kgCO _{2eq})
GWP	Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (kgCO _{2eq})
C_{op}	Λειτουργικός άνθρακας (kgCO _{2eq})
C_{emb}	Ενσωματωμένος άνθρακας (kgCO _{2eq})
C_{tot}	Συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα (kgCO _{2eq})
C_f	Μέσος συντελεστής εκπομπών τελικής ενέργειας (kgCO _{2eq} /kWh)
C*_{op,i}	Κανονικοποιημένη τιμή λειτουργικού άνθρακα σεναρίου i (-)
C*_{emb,i}	Κανονικοποιημένη τιμή ενσωματωμένου άνθρακα σεναρίου i (-)
w_{op}	Συντελεστής βαρύτητας λειτουργικού άνθρακα (-)
w_{emb}	Συντελεστής βαρύτητας ενσωματωμένου άνθρακα (-)

Si	Σύνθετος δείκτης αξιολόγησης σεναρίου i (-)
ΔΕUI	Μεταβολή δείκτη ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης (% ή kWh/m ² ·έτος)
ΔCO_{2eq}	Μεταβολή ανθρακικού αποτυπώματος (% ή kgCO _{2eq})
t	Χρόνος ή διάρκεια περιόδου αξιολόγησης (έτη)
n	Αριθμός σεναρίου, επανάληψης ή δοκιμής (-)
dsh	Βάθος ή μήκος συστήματος σκίασης (cm ή m)
x	Παραμετρική μεταβλητή σχεδιασμού (-)
T1	Σενάριο υφιστάμενης κατάστασης χωρίς τεκμηριωμένη θερμομόνωση (-)
T2	Πιθανή υφιστάμενη κατάσταση με περιορισμένη θερμομονωτική προστασία (-)
T3	Τυπική ολοκληρωμένη ενεργειακή αναβάθμιση (-)
R_AF	Παραμετρικό σενάριο δαπέδου σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα (-)
R_BASE	Σενάριο αναφοράς παραμετρικής ανάλυσης (-)
R_BW	Παραμετρικό σενάριο τοιχωμάτων υπογείου (-)
R_COMB01	Επικρατέστερο συνδυαστικό παραμετρικό σενάριο (-)

R_GF	Παραμετρικό σενάριο δαπέδου επί εδάφους (-)
R_R	Παραμετρικό σενάριο πλάκας έδρασης της στέγης (-)
R_SHD	Παραμετρικό σενάριο σκίασης (-)
R_W	Παραμετρικό σενάριο εξωτερικής τοιχοποιίας (-)
R_WIN	Παραμετρικό σενάριο κουφωμάτων (-)

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και σημασία της μελέτης

Ο κτιριακός τομέας της Ευρωπαϊκής Ένωσης αποτελεί έναν από τους πλέον ενεργοβόρους τομείς, καθώς περίπου το 85% του κτιριακού αποθέματος έχει κατασκευαστεί πριν από το 2001, ενώ εκτιμάται ότι το 85-95% των σημερινών κτιρίων θα εξακολουθούν να υφίστανται και το 2050 (European Parliament and Council of the European Union, 2018). Η πλειονότητα αυτών των κτιρίων παρουσιάζει χαμηλή ενεργειακή απόδοση, βασίζεται σε παλαιωμένα τεχνικά συστήματα και στη χρήση ορυκτών καυσίμων, συμβάλλοντας περίπου στο 40% της συνολικής τελικής ενεργειακής κατανάλωσης της Ευρωπαϊκής Ένωσης και στο 36% των ενεργειακών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (European Parliament and Council of the European Union, 2018, 2024).

Η ανάγκη αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη στα υφιστάμενα δημόσια κτίρια, και ειδικότερα στις σχολικές μονάδες, όπου η ενεργειακή απόδοση συνδέεται όχι μόνο με την κατανάλωση ενέργειας, αλλά και με την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος, τη θερμική και οπτική άνεση, καθώς και τις συνθήκες χρήσης των χώρων. Η αναθεωρημένη Οδηγία (ΕΕ) 2024/1275 (EPBD) ενισχύει την ανάγκη ενεργειακής αναβάθμισης του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής πορείας προς τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος έως το 2050.

Η παρούσα μελέτη διερευνά την ενεργειακή και περιβαλλοντική αναβάθμιση υφιστάμενης σχολικής μονάδας μέσω της συνδυαστικής αξιοποίησης BIM και παραμετρικής διερεύνησης. Η προσέγγιση επιτρέπει τη συστηματική παραγωγή και συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων παρέμβασης ως προς την ενεργειακή απόδοση και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, υποστηρίζοντας την επιλογή λύσεων αναβάθμισης με βάση δεδομένα (Eastman et al., 2011; Sacks et al., 2018).

1.2 Ευρωπαϊκό πλαίσιο για βιώσιμα κτίρια

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει διαμορφώσει ένα δεσμευτικό πλαίσιο για τη μετάβαση του κτιριακού τομέα προς την κλιματική ουδετερότητα έως το 2050, με βασικό άξονα την αναθεωρημένη Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (EPBD) (European Parliament and Council of the European Union, 2024).

Σύμφωνα με την αναθεωρημένη EPBD, τα νέα δημόσια κτίρια, συμπεριλαμβανομένων των σχολικών μονάδων, θα πρέπει να πληρούν τα κριτήρια των κτιρίων μηδενικών εκπομπών (Zero-Emission Buildings - ZEB) από το 2028, ενώ για το σύνολο των νέων κτιρίων η αντίστοιχη απαίτηση εφαρμόζεται από το 2030. Παράλληλα, η Οδηγία (EE) 2023/1791 για την Ενεργειακή Απόδοση θεσπίζει στόχο ετήσιας ανακαίνισης τουλάχιστον 3% του συνολικού ωφέλιμου εμβαδού των δημόσιων κτιρίων (European Parliament and Council of the European Union, 2023).

Η μετάβαση προς τα κτίρια μηδενικών εκπομπών διευρύνει την έννοια της ενεργειακής απόδοσης, καθώς απαιτεί συνεκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των παρεμβάσεων σε όλο τον κύκλο ζωής του κτιρίου. Η μελέτη του Chastas et al. (2020), με εφαρμογή σε κατοικία στη Θεσσαλονίκη, έδειξε ότι η συνεκτίμηση των ενσωματωμένων περιβαλλοντικών επιπτώσεων μπορεί να επηρεάσει την αξιολόγηση εναλλακτικών ενεργειακών λύσεων. Ως εκ τούτου, η ενεργειακή και η περιβαλλοντική αξιολόγηση εξετάζονται συνδυαστικά στην παρούσα εργασία.

Πίνακας 1.1 Βασικές ευρωπαϊκές απαιτήσεις και κατευθύνσεις για την ενεργειακή αναβάθμιση υφιστάμενων δημόσιων κτιρίων. (Πηγές: European Parliament and Council of the European Union (2010, 2023, 2024)).

Απαίτηση / κατεύθυνση	Υφιστάμενα δημόσια κτίρια	Χρονικός ορίζοντας	Οδηγία / Πηγή
Ετήσια ανακαίνιση δημόσιων κτιρίων	Τουλάχιστον 3% του συνολικού εμβαδού δαπέδου των θερμαινόμενων και/ή ψυχόμενων κτιρίων που ανήκουν σε δημόσιους φορείς, σύμφωνα με τις προϋποθέσεις της Οδηγίας	Ετήσια	EED 2023/1791, Άρθρο 6
Κτίρια που περιλαμβάνονται στον υπολογισμό του 3%	Κτίρια με συνολικό ωφέλιμο εμβαδόν >250 m ² που ανήκουν σε δημόσιους φορείς και δεν ήταν nZEB την 1/1/2024	Από το 2024	EED 2023/1791, Άρθρο 6

Επίπεδο ενεργειακής επίδοσης μετά την ανακαίνιση	Τα κτίρια που ανακαινίζονται στο πλαίσιο της υποχρέωσης πρέπει να μετασχηματίζονται τουλάχιστον σε nZEB ή ZEB, σύμφωνα με το εφαρμοζόμενο πλαίσιο	Ετήσια	EED 2023/1791, Άρθρο 6
Απογραφή δημόσιων κτιρίων	Δημιουργία και δημοσιοποίηση απογραφής θερμαινόμενων/ψυχόμενων δημόσιων κτιρίων >250 m ²	Έως 11/10/2025	EED 2023/1791, Άρθρο 6
Μακροπρόθεσμος μετασχηματισμός υφιστάμενου αποθέματος	Προοδευτική ανακαίνιση του εθνικού κτιριακού αποθέματος με στόχο ένα υψηλής ενεργειακής απόδοσης και απανθρακοποιημένο κτιριακό απόθεμα και μετασχηματισμό των υφιστάμενων κτιρίων σε ZEB	Έως 2050	EPBD 2024/1275

1.3 Περιορισμοί και ερευνητικά κενά στη βιώσιμη αναβάθμιση υφιστάμενων σχολικών μονάδων

Η διαχείριση και ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων, και ιδιαίτερα των υφιστάμενων σχολικών μονάδων, χαρακτηρίζεται από αυξημένη πολυπλοκότητα, καθώς απαιτεί την ταυτόχρονη ικανοποίηση ενεργειακών, περιβαλλοντικών, λειτουργικών και ανθρωποκεντρικών κριτηρίων, εντός συγκεκριμένων κατασκευαστικών και λειτουργικών περιορισμών. Παρά τη σταδιακή ενίσχυση των κανονιστικών απαιτήσεων σε ευρωπαϊκό επίπεδο, πλήθος μελετών καταδεικνύει ότι τα σχολικά κτίρια συχνά παρουσιάζουν ελλείψεις ως προς τη θερμική άνεση, τον φυσικό φωτισμό και τη συνολική ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος (Indoor Environmental Quality - IEQ), γεγονός που υπογραμμίζει την ανάγκη για πιο ολοκληρωμένες και συστηματικές προσεγγίσεις αναβάθμισης (Dascalaki & Sermpetzoglou, 2011).

Παράλληλα, η λήψη αποφάσεων για την ενεργειακή αναβάθμιση υφιστάμενων κτιρίων παραμένει σύνθετη και συχνά κατακερματισμένη, καθώς οι περιορισμοί του υφιστάμενου κελύφους και της δομικής κατάστασης δυσχεραίνουν τη συστηματική σύγκριση εναλλακτικών παρεμβάσεων. Η διεθνής βιβλιογραφία επισημαίνει ότι οι παραδοσιακές διαδικασίες σχεδιασμού δυσκολεύονται να υποστηρίξουν

πολυκριτηριακές αξιολογήσεις και συγκριτική ανάλυση σεναρίων, ιδιαίτερα όταν συνυπολογίζονται ενεργειακές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Shen et al., 2010).

Υπό το πρίσμα αυτό, το Building Information Modeling (BIM), ο παραμετρικός σχεδιασμός και οι υπολογιστικά υποστηριζόμενες μέθοδοι αξιολόγησης μπορούν να διευκολύνουν τη συστηματική διερεύνηση και σύγκριση εναλλακτικών παρεμβάσεων. Η σχετική βιβλιογραφία δείχνει ότι οι υπολογιστικές προσεγγίσεις μπορούν να υποστηρίξουν την αξιολόγηση πολλαπλών σεναρίων ως προς την ενεργειακή απόδοση, τη θερμική και οπτική άνεση και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Manmatharasan et al., 2025).

1.4 Στόχος της εργασίας - Ειδικοί στόχοι

Με βάση τα παραπάνω, στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της συμβολής του Building Information Modeling (BIM), του παραμετρικού σχεδιασμού και των υπολογιστικά υποστηριζόμενων μεθόδων αξιολόγησης στη βιώσιμη αναβάθμιση υφιστάμενων σχολικών μονάδων. Για τον σκοπό αυτό αναπτύσσεται και εφαρμόζεται ένα υπολογιστικό πλαίσιο για τη συστηματική παραγωγή, ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση και συγκριτική κατάταξη εναλλακτικών σεναρίων παρέμβασης. Οι ειδικοί στόχοι της εργασίας περιλαμβάνουν:

- Την ανάλυση της επίδρασης κρίσιμων παραμέτρων του κελύφους, όπως η θερμομονωτική προστασία των αδιαφανών στοιχείων, τα θερμικά και οπτικά χαρακτηριστικά των κουφωμάτων, ο λόγος διαφανών ανοιγμάτων προς όψη (WWR) και τα συστήματα σκίασης, στην ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση του κτιρίου.
- Την ανάπτυξη BIM μοντέλου της υφιστάμενης σχολικής μονάδας σε περιβάλλον Revit και την παραμετρική μεταβολή επιλεγμένων χαρακτηριστικών μέσω Dynamo, με σκοπό τη συστηματική παραγωγή και αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων αναβάθμισης.
- Την ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση και την πολυκριτηριακή κατάταξη των εξεταζόμενων σεναρίων, με εφαρμογή Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

(Life Cycle Assessment - LCA) και ποιοτική συνεκτίμηση ζητημάτων φυσικού φωτισμού, οπτικής άνεσης και λειτουργικότητας, όπου αυτά επηρεάζουν την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

- Τη διατύπωση τεκμηριωμένων προτάσεων για τη βιώσιμη αναβάθμιση υφιστάμενων σχολικών μονάδων, βάσει των αποτελεσμάτων της παραμετρικής διερεύνησης.

Με βάση τους παραπάνω στόχους, η εργασία διαρθρώνεται γύρω από τρία ερευνητικά ερωτήματα:

EE1. Ποια είναι η σχετική επίδραση των επιμέρους παραμέτρων του κελύφους

- θερμομόνωση τοιχοποιιών, πλάκας υπό μη θερμαινόμενο χώρο, δαπέδων και στοιχείων σε επαφή με το έδαφος, θερμικά και οπτικά χαρακτηριστικά κουφωμάτων, λόγος διαφανών ανοιγμάτων προς όψη (WWR) και βάθος σκίασης - στην ετήσια ενεργειακή κατανάλωση και στο ανθρακικό αποτύπωμα υφιστάμενης σχολικής μονάδας της κλιματικής ζώνης Γ;

EE2. Σε ποια δομικά στοιχεία και σε ποιο εύρος τιμών εμφανίζεται αντιστάθμιση (trade-off) μεταξύ της μείωσης του λειτουργικού άνθρακα και της αύξησης του ενσωματωμένου άνθρακα των υλικών αναβάθμισης;

EE3. Πόσο ευσταθής είναι η ιεράρχηση των εναλλακτικών σεναρίων ως προς την επιλογή των κριτηρίων και των συντελεστών βαρύτητας της πολυκριτηριακής αξιολόγησης;

Επισημαίνεται ότι η εργασία αποτελεί μη βαθμονομημένη μελέτη περίπτωσης. Οι απόλυτες τιμές των αποτελεσμάτων δεν έχουν επικυρωθεί μέσω λογαριασμών ενέργειας ή επιτόπιων μετρήσεων και, συνεπώς, δεν αποτελούν πρόβλεψη της πραγματικής κατανάλωσης του κτιρίου. Τα αποτελέσματα αξιοποιούνται συγκριτικά μεταξύ των εξεταζόμενων σεναρίων, τα οποία βασίζονται σε κοινές παραδοχές, ενώ η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε άλλες σχολικές μονάδες απαιτεί προσαρμογή στα αντίστοιχα δεδομένα και χαρακτηριστικά τους.

1.5 Μεθοδολογία και τρόπος προσέγγισης της έρευνας

Η μεθοδολογία της εργασίας οργανώνεται σε διακριτά στάδια, από τη θεωρητική τεκμηρίωση και τη συλλογή των δεδομένων έως την ανάπτυξη του BIM μοντέλου, την παραμετρική διερεύνηση και τη συγκριτική αξιολόγηση των εξεταζόμενων σεναρίων.

Ακολούθησε συλλογή και επεξεργασία των διαθέσιμων γεωμετρικών, κατασκευαστικών και λειτουργικών δεδομένων της μελέτης περίπτωσης. Κεντρικό στάδιο αποτέλεσε η ανάπτυξη του BIM μοντέλου της υφιστάμενης σχολικής μονάδας στο Autodesk Revit, με βάση τα διαθέσιμα σχέδια του φακέλου της οικοδομικής άδειας που λήφθηκαν από την αρμόδια Υπηρεσία Δόμησης. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την αναπαράσταση της γεωμετρίας και των βασικών δομικών χαρακτηριστικών του κτιρίου και ως βάση για την ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε παραμετρική διερεύνηση επιλεγμένων παραμέτρων του κελύφους, όπως τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων, τα θερμικά και οπτικά χαρακτηριστικά των κουφωμάτων, ο λόγος διαφανών ανοιγμάτων προς όψη (WWR) και τα συστήματα σκίασης. Η διαδικασία υποστηρίχθηκε μέσω Dynamo, επιτρέποντας τη συστηματική δημιουργία και σύγκριση διακριτών σεναρίων.

Τα παραγόμενα σενάρια αξιολογήθηκαν συγκριτικά ως προς την ενεργειακή κατανάλωση και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, ενώ τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την πολυκριτηριακή κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων.

Διευκρινίζεται ότι στην παρούσα εργασία δεν εφαρμόστηκε αλγοριθμική βελτιστοποίηση, όπως γενετικοί αλγόριθμοι ή αναζήτηση σε συνεχή χώρο σχεδιασμού. Η διερεύνηση βασίστηκε στην ελεγχόμενη παραγωγή και συγκριτική αξιολόγηση πεπερασμένου συνόλου διακριτών σεναρίων. Ως «επικρατέστερο σενάριο» νοείται, επομένως, η καταλληλότερη επιλογή μεταξύ των εξεταζόμενων σεναρίων και όχι μια καθολικά βέλτιστη λύση.

1.6 Δομή εργασίας

Η εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια, τα οποία ακολουθούν τη διαδοχή της θεωρητικής τεκμηρίωσης, της μεθοδολογίας, της εφαρμογής στη μελέτη περίπτωσης, της ανάλυσης των αποτελεσμάτων και της διατύπωσης συμπερασμάτων.

Στο **Κεφάλαιο 1**, «Εισαγωγή», παρουσιάζονται το αντικείμενο και η σημασία της μελέτης, το σχετικό θεσμικό πλαίσιο, τα ερευνητικά κενά, ο στόχος, τα ερευνητικά ερωτήματα και η γενική μεθοδολογική προσέγγιση.

Στο **Κεφάλαιο 2**, «Θεωρητικό Πλαίσιο και Βιβλιογραφική Ανασκόπηση», παρουσιάζονται οι βασικές αρχές του βιώσιμου και βιοκλιματικού σχεδιασμού, η ενεργειακή συμπεριφορά των σχολικών κτιρίων, η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος, καθώς και οι προσεγγίσεις BIM, παραμετρικού σχεδιασμού και LCA. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τη διαμόρφωση του ερευνητικού κενού.

Στο **Κεφάλαιο 3**, «Μεθοδολογία και Εργαλεία Ανάλυσης», παρουσιάζονται τα δεδομένα και οι παραδοχές της έρευνας, η ανάπτυξη του BIM και ενεργειακού μοντέλου, η παραμετρική διερεύνηση μέσω Dynamo και η διαδικασία ενεργειακής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης των σεναρίων.

Στο **Κεφάλαιο 4**, «Πιλοτική Εφαρμογή - Μελέτη Περίπτωσης», παρουσιάζεται η υπό μελέτη σχολική μονάδα και τεκμηριώνεται η υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου, με έμφαση στη γεωμετρία, το κελύφος, τα δομικά στοιχεία και τα ανοίγματα. Παρουσιάζεται η ανάπτυξη και παραμετροποίηση του BIM μοντέλου, η οργάνωση των θερμικών ζωνών και οι βασικές λειτουργικές και ενεργειακές παραδοχές. Στη συνέχεια περιγράφεται η εφαρμογή των επιλεγμένων παραμετρικών σεναρίων, καθώς και η διαδικασία ενεργειακής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης της μελέτης περίπτωσης.

Στο **Κεφάλαιο 5**, «Αποτελέσματα και Ανάλυση Σεναρίων», παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της ενεργειακής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης των εξεταζόμενων σεναρίων. Αρχικά εξετάζονται τα βασικά σενάρια T1, T2 και T3, τα οποία χρησιμοποιούνται για την αποτύπωση διαφορετικών εκδοχών της θερμικής κατάστασης του κελύφους και τον καθορισμό του αναβαθμισμένου μοντέλου βάσης. Ακολούθως διερευνάται η επίδραση επιμέρους παραμέτρων, όπως η θερμομόνωση, τα κουφώματα, ο λόγος διαφανών ανοιγμάτων προς όψη (WWR) και η σκίαση, στην

ενεργειακή κατανάλωση και στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Τέλος, τα επιλεγμένα σενάρια συγκρίνονται μέσω της πολυκριτηριακής αξιολόγησης και κατατάσσονται με βάση τα καθορισμένα κριτήρια και βάρη.

Στο **Κεφάλαιο 6**, «Συμπεράσματα και Προτάσεις», συνοψίζονται τα βασικά ευρήματα της έρευνας, αξιολογείται η επίτευξη των στόχων της εργασίας και διατυπώνονται προτάσεις για τη βιώσιμη αναβάθμιση υφιστάμενων σχολικών μονάδων.

Η εργασία ολοκληρώνεται με τις **Βιβλιογραφικές Αναφορές** και τα **Παραρτήματα**. Στις Βιβλιογραφικές Αναφορές παρατίθενται οι πηγές, τα πρότυπα και η επιστημονική βιβλιογραφία, ενώ στα Παραρτήματα περιλαμβάνονται οι αναλυτικοί πίνακες τεκμηρίωσης και κατάταξης των εξεταζόμενων σεναρίων.

2. Θεωρητικό Πλαίσιο και Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Βιώσιμος και βιοκλιματικός σχεδιασμός

2.1.1 Αρχές βιώσιμου και βιοκλιματικού σχεδιασμού

Η αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας στον κτιριακό τομέα και οι συνακόλουθες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) καθιστούν αναγκαία την υιοθέτηση στρατηγικών που μειώνουν την εξάρτηση των κτιρίων από ενεργοβόρα τεχνικά συστήματα. Στο πλαίσιο αυτό, ο βιοκλιματικός σχεδιασμός συνιστά βασική προσέγγιση βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης μέσω της αξιοποίησης παθητικών στρατηγικών.

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός βασίζεται στη συστηματική αξιοποίηση των τοπικών κλιματικών συνθηκών. Σύμφωνα με τον Olgyay (1963), θεμελιώνεται στη δυναμική σχέση κλίματος-κτιρίου-ανθρώπου και στην προσαρμογή της γεωμετρίας, του προσανατολισμού και των ανοιγμάτων στις κλιματικές ιδιαιτερότητες της περιοχής, με στόχο την επίτευξη θερμικής άνεσης με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Αποτελεί έτσι θεωρητικό υπόβαθρο τόσο για τον σχεδιασμό νέων κτιρίων όσο και για την αναβάθμιση υφιστάμενων κατασκευών.

Οι βασικές αρχές περιλαμβάνουν τον κατάλληλο προσανατολισμό, τη διαχείριση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ηλιασμού και σκίασης, την ενίσχυση του φυσικού αερισμού και τη χρήση δομικών υλικών με επαρκή θερμική μάζα. Οι αρχές αυτές αποτελούν κρίσιμες σχεδιαστικές μεταβλητές ιδιαίτερα σε θερμά και εύκρατα κλίματα, όπου οι παθητικές στρατηγικές μπορούν να μειώσουν την ενεργειακή κατανάλωση και τις εκπομπές CO₂ (Taing et al., 2025). Στα υφιστάμενα κτίρια εφαρμόζονται κυρίως μέσω στοχευμένων παρεμβάσεων στο κέλυφος, στα ανοίγματα και στα συστήματα σκίασης.

Συνοπτικά, οι αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού συνοψίζονται στους ακόλουθους άξονες:

- (α) Σχεδιασμός και θερμική αναβάθμιση του κτιριακού κελύφους (θερμομόνωση, κουφώματα, λόγος διαφανών ανοιγμάτων),
- (β) Διαχείριση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω στρατηγικών σκίασης,

- (γ) Ενίσχυση του φυσικού αερισμού,
- (δ) Αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού,
- (ε) Διαμόρφωση του υπαίθριου χώρου και του μικροκλίματος.

Στο πλαίσιο αυτό, οι αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού συνδέονται άμεσα με το ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο, το οποίο εξελίσσεται από τα κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας προς τα κτίρια μηδενικών εκπομπών, όπως αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

2.1.2 Εφαρμογές και προκλήσεις βιοκλιματικού σχεδιασμού σε σχολικές μονάδες

Η εφαρμογή των αρχών του βιοκλιματικού σχεδιασμού στα σχολικά κτίρια παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις, καθώς συνδέεται τόσο με την ενεργειακή απόδοση όσο και με την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος. Μελέτες δείχνουν ότι σημαντικό μέρος του υφιστάμενου σχολικού αποθέματος παρουσιάζει αποκλίσεις από τα συνιστώμενα επίπεδα θερμικής άνεσης και ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος, οι οποίες σχετίζονται μεταξύ άλλων με τον σχεδιασμό του κελύφους, τη διαχείριση της ηλιακής ακτινοβολίας και την περιορισμένη αξιοποίηση παθητικών στρατηγικών.

Η μελέτη των Mohelníková et al. (2020), βασισμένη σε ενεργειακές επιθεωρήσεις, επιτόπιες μετρήσεις και αξιολόγηση θερμικής και οπτικής άνεσης σε σχολικά κτίρια, καταδεικνύει ότι ακόμη και μετά από αποσπασματικές παρεμβάσεις αναβάθμισης, αρκετές σχολικές μονάδες εξακολουθούν να παρουσιάζουν χαμηλή ενεργειακή απόδοση και αυξημένες ώρες θερμικής δυσφορίας. Τα ευρήματα καταδεικνύουν τη σημασία του κελύφους, των ανοιγμάτων και της σκίασης για τη θερμική και οπτική συμπεριφορά των αιθουσών, υποστηρίζοντας την ανάγκη ολοκληρωμένων παρεμβάσεων.

Αντίστοιχα, δυναμικές θερμικές προσομοιώσεις έχουν τεκμηριώσει τη συμβολή παθητικών στοιχείων στις όψεις στη μείωση των θερινών θερμικών φορτίων, ιδίως σε ανατολικούς και δυτικούς προσανατολισμούς (Kontoleon & Eumorphoulou, 2010). Στη σχετική βιβλιογραφία εξετάζονται διαφορετικές μορφές εξωτερικής σκίασης, όπως οριζόντιοι και κατακόρυφοι πρόβολοι ή πτερύγια, σταθερά ή κινητά σκίαστρα, καθώς και συνδυασμοί παθητικών στοιχείων με τα χαρακτηριστικά των

ανοιγμάτων. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος δεν εξαρτάται επομένως μόνο από το βάθος της σκίασης, αλλά και από τον προσανατολισμό, τη γεωμετρία του ανοίγματος, την εποχική μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας και τις λειτουργικές απαιτήσεις του κτιρίου.

Σε επίπεδο συνολικής αποτίμησης της θερμικής άνεσης στα εκπαιδευτικά κτίρια, η μελέτη των Romero et al. (2023) δείχνει ότι προβλήματα θερμικής δυσφορίας εμφανίζονται συστηματικά στις σχολικές αίθουσες, ενώ η πανδημία COVID-19 ανέδειξε επιπλέον τη σημασία του φυσικού αερισμού και της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος. Η μελέτη επισημαίνει την εξωτερική σκίαση, τον προσανατολισμό και την κατάλληλη διαστασιολόγηση των ανοιγμάτων ως βασικές παθητικές στρατηγικές για τη βελτίωση της θερμικής άνεσης.

Στην ελληνική πραγματικότητα, αντίστοιχα ευρήματα προκύπτουν από μελέτες υφιστάμενων σχολικών μονάδων. Οι Tsikra και Andreou (2017) καταδεικνύουν ότι η αναβάθμιση των συστημάτων σκίασης και η ορθολογική αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού μπορούν να μειώσουν την ενεργειακή κατανάλωση και να βελτιώσουν τις συνθήκες θερμικής και οπτικής άνεσης. Παράλληλα, οι Dimoudi και Kostarela (2009), μέσω επιτόπιων μετρήσεων σε ελληνικά σχολικά κτίρια, διαπιστώνουν προβλήματα θερμικής άνεσης που συνδέονται με ανεπαρκή θερμική προστασία και ελλιπή σκίαση. Οι Tsikaloudaki et al. (2015) επιβεβαιώνουν τη σημασία παραμέτρων του κελύφους, όπως τα κουφώματα, η θερμομόνωση και ο λόγος διαφανών ανοιγμάτων προς όψη, για την ενεργειακή απόδοση σχολικών κτιρίων σε μεσογειακές κλιματικές συνθήκες.

Συνολικά, η βιβλιογραφία αναδεικνύει τον προσανατολισμό, την εξωτερική σκίαση, τα ανοίγματα και τη θερμική προστασία του κελύφους ως βασικές παραμέτρους της ενεργειακής και θερμικής συμπεριφοράς των σχολικών μονάδων. Η αλληλεπίδραση των παραμέτρων αυτών καθιστά χρήσιμη την αξιοποίηση υπολογιστικών εργαλείων για τη συστηματική διερεύνηση και σύγκριση εναλλακτικών σχεδιαστικών επιλογών. Στο πλαίσιο αυτό, τα περιβάλλοντα Building Information Modeling (BIM) και οι παραμετρικές μέθοδοι μπορούν να υποστηρίξουν τη συστηματική παραγωγή και αξιολόγηση σεναρίων, όπως εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία.

2.1.3 Από τα Κτίρια Σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης στα Κτίρια Μηδενικών Εκπομπών

Η έννοια των κτιρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας (nearly Zero Energy Buildings - nZEB) εισήχθη στο ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο μέσω της Οδηγίας 2010/31/ΕΕ (EPBD) ως βασικό εργαλείο περιορισμού της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων. Ως nZEB ορίζεται ένα κτίριο με πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση, του οποίου η πολύ χαμηλή ενεργειακή απαίτηση καλύπτεται σε μεγάλο βαθμό από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας που παράγεται επιτόπου ή πλησίον του κτιρίου (European Parliament and Council of the European Union, 2010).

Τα nZEB εστιάζουν κυρίως στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης κατά τη λειτουργία του κτιρίου (Operational Energy). Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή δεν αποτυπώνει από μόνη της το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, καθώς δεν λαμβάνει συστηματικά υπόψη τις εκπομπές που συνδέονται με την παραγωγή και χρήση των δομικών υλικών, την κατασκευή και τον κύκλο ζωής των δομικών στοιχείων (Embodied Carbon). Στο Ελληνικό θεσμικό πλαίσιο, η εφαρμογή των απαιτήσεων nZEB καθορίστηκε μέσω του Ν. 4122/2013, με την υποχρέωση τα νέα κτίρια να πληρούν τις σχετικές απαιτήσεις από το 2021 και τα νέα δημόσια κτίρια από το 2019.

Η εξέλιξη της ευρωπαϊκής ενεργειακής πολιτικής προς την κλιματική ουδετερότητα οδήγησε στην εισαγωγή της έννοιας των Κτιρίων Μηδενικών Εκπομπών (Zero-Emission Buildings - ZEB), όπως αποτυπώνεται στην αναθεωρημένη Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (European Parliament and Council of the European Union, 2024). Η προσέγγιση των ZEB διευρύνει την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδοσης των κτιρίων, λαμβάνοντας υπόψη τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που συνδέονται με τον κύκλο ζωής τους.

Η μετάβαση από τα nZEB στα ZEB σηματοδοτεί τη διεύρυνση της αξιολόγησης από την ενεργειακή κατανάλωση προς τη συνολική περιβαλλοντική επίδοση του κτιρίου. Στο πλαίσιο αυτό, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA) συνιστά το κατεξοχήν εργαλείο για την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τη σύγκριση εναλλακτικών λύσεων αναβάθμισης.

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός αποκτά, συνεπώς, κεντρικό ρόλο, καθώς συμβάλλει άμεσα στον περιορισμό των ενεργειακών φορτίων και, κατ' επέκταση, στη μείωση των εκπομπών κατά τη φάση λειτουργίας του κτιρίου.

2.1.4 Σχολική αυλή, μικροκλίμα και περιβαλλοντική ποιότητα του υπαίθριου χώρου

Η περιβαλλοντική ποιότητα μιας σχολικής μονάδας δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την ενεργειακή συμπεριφορά του κελύφους και των εσωτερικών χώρων, αλλά και από τα χαρακτηριστικά του υπαίθριου χώρου, ιδίως της σχολικής αυλής, η οποία αποτελεί βασικό χώρο παραμονής και δραστηριότητας των μαθητών. Η διεθνής βιβλιογραφία δείχνει ότι συμβατικές αυλές με εκτεταμένες σκληρές επιφάνειες και περιορισμένη βλάστηση συνδέονται με αυξημένες θερμοκρασίες επιφανειών και συνθήκες θερμικής καταπόνησης, με τα παιδιά να αποτελούν ιδιαίτερα ευάλωτη ομάδα (Antoniadis et al., 2020).

Η βελτίωση του μικροκλίματος επιτυγχάνεται μέσω ενίσχυσης της φύτευσης, δημιουργίας σκιάσεων και επιλογής κατάλληλων υλικών επιφανειών· η βλάστηση, ειδικότερα, μειώνει τη θερμοκρασία μέσω σκίασης και εξατμισοδιαπνοής (Antoniadis et al., 2020; Tsikra & Andreou, 2017). Η διαμόρφωση του υπαίθριου χώρου μπορεί, συνεπώς, να επηρεάσει και την ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου, αναδεικνύοντας τη σχέση μεταξύ κτιρίου και περιβάλλοντος χώρου.

Παρότι η διάσταση αυτή αποτελεί σημαντική συνιστώσα της συνολικής περιβαλλοντικής ποιότητας μιας σχολικής μονάδας, δεν εντάσσεται στο πεδίο της παρούσας ανάλυσης, η οποία περιορίζεται στο κτιριακό κέλυφος, τα ανοίγματα και τα συστήματα σκίασης. Ο υπαίθριος χώρος εξετάζεται συνεπώς σε θεωρητικό επίπεδο και αποτελεί αντικείμενο ενδεχόμενης περαιτέρω διερεύνησης.

2.2 Έρευνες σε υφιστάμενες σχολικές μονάδες

Οι σχολικές μονάδες αποτελούν κατηγορία δημόσιων κτιρίων με ιδιαίτερη σημασία, καθώς συνδυάζουν κοινωνικό ρόλο και αυξημένες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης και ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος. Η βιβλιογραφία συγκλίνει στο ότι οι σχολικές μονάδες, ιδίως ως υφιστάμενο κτιριακό απόθεμα, παρουσιάζουν

σημαντικό δυναμικό ενεργειακής αναβάθμισης μέσω συνδυασμού παθητικών και ενεργητικών παρεμβάσεων, γεγονός που τις καθιστά προτεραιότητα για στρατηγικές βιώσιμης ανακαίνισης (Le et al., 2018; Pedone et al., 2023).

2.2.1 Ενεργειακό προφίλ και κατανάλωση στα σχολεία στην Ελλάδα

Σε εθνικό επίπεδο, το σχολικό κτιριακό απόθεμα εμφανίζει σημαντική παλαιότητα, καθώς μεγάλο ποσοστό των σχολικών μονάδων έχει κατασκευαστεί πριν την εισαγωγή του Κανονισμού Θερμομόνωσης Κτιρίων (ΚΘΚ) το 1979. Ειδικότερα, περίπου το 41% των σχολικών κτιρίων είναι άνω των 30 ετών, γεγονός που συνεπάγεται ελλιπή ή ανύπαρκτη θερμική προστασία του κελύφους και αυξημένες θερμικές απώλειες (Dascalaki & Sermpetzoglou, 2011). Παρά την εισαγωγή του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK) το 2010, το μεγαλύτερο μέρος του υφιστάμενου σχολικού αποθέματος εξακολουθεί να χαρακτηρίζεται από χαμηλή ενεργειακή απόδοση.

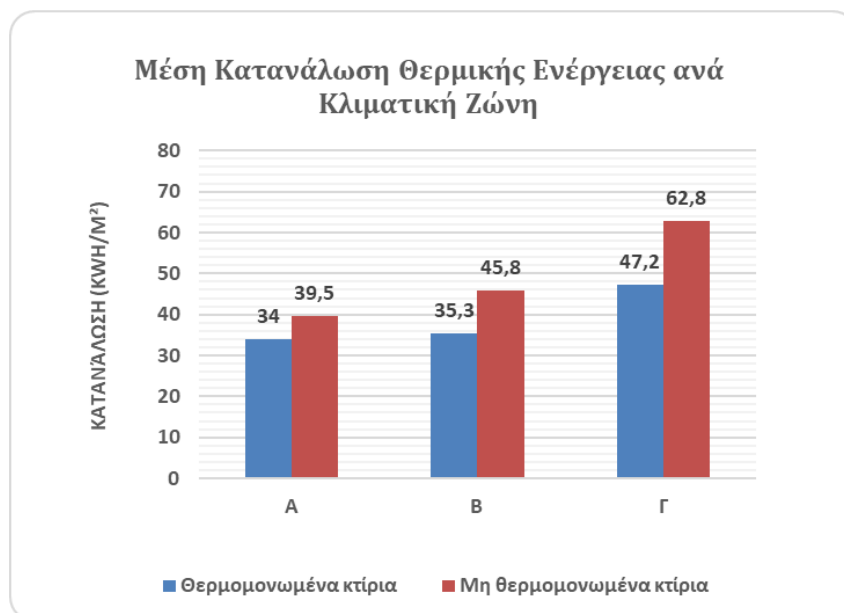
Η ενεργειακή κατανάλωση των σχολικών κτιρίων παρουσιάζει σημαντική διακύμανση, με τις διαθέσιμες μελέτες να αναφέρουν διαφορετικές μέσες τιμές, ανάλογα με την ηλικία, την κλιματική ζώνη, τη θερμομόνωση και τις συνθήκες λειτουργίας. Ενδεικτικά, έχουν αναφερθεί μέσες καταναλώσεις από περίπου 69 έως 95 kWh/m²·έτος, ενώ σε επιμέρους περιπτώσεις οι τιμές είναι σημαντικά υψηλότερες (Dimoudi & Kostarela, 2009; Dascalaki & Sermpetzoglou, 2011). Οι διαφοροποιήσεις αυτές αποτυπώνουν την ετερογένεια του σχολικού κτιριακού αποθέματος και οφείλονται σε παράγοντες όπως η κλιματική ζώνη, η ηλικία του κτιρίου, ο βαθμός θερμομόνωσης και οι συνθήκες λειτουργίας.

Ως δείκτες αναφοράς έχουν προταθεί τα 72 kWh/m²·έτος για τυπικό σχολικό κτίριο και τα 42 kWh/m²·έτος για κτίριο υψηλής ενεργειακής απόδοσης (Dimoudi & Kostarela, 2009). Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται ως εργαλεία αξιολόγησης της ενεργειακής απόδοσης, επιτρέποντας τη σύγκριση της πραγματικής κατανάλωσης ενός κτιρίου με τυπικές και βέλτιστες τιμές αναφοράς, καθώς και την εκτίμηση του δυναμικού ενεργειακής αναβάθμισης.

Η κατανομή της ενεργειακής κατανάλωσης ανά χρήση αναδεικνύει τη σαφή κυριαρχία της θέρμανσης. Συγκεκριμένα, η ενέργεια που καταναλώνεται για θέρμανση καλύπτει το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης, φτάνοντας σε πολλές

περιπτώσεις το 70-85% και σε ψυχρότερες περιοχές έως και το 85-88% (Dimoudi & Kostarela, 2009; Vagi & Dimoudi, 2011). Αντίθετα, η κατανάλωση για ψύξη είναι περιορισμένη, καθώς τα σχολεία δεν λειτουργούν κατά τους θερινούς μήνες, ενώ η ηλεκτρική κατανάλωση αφορά κυρίως φωτισμό και εξοπλισμό.

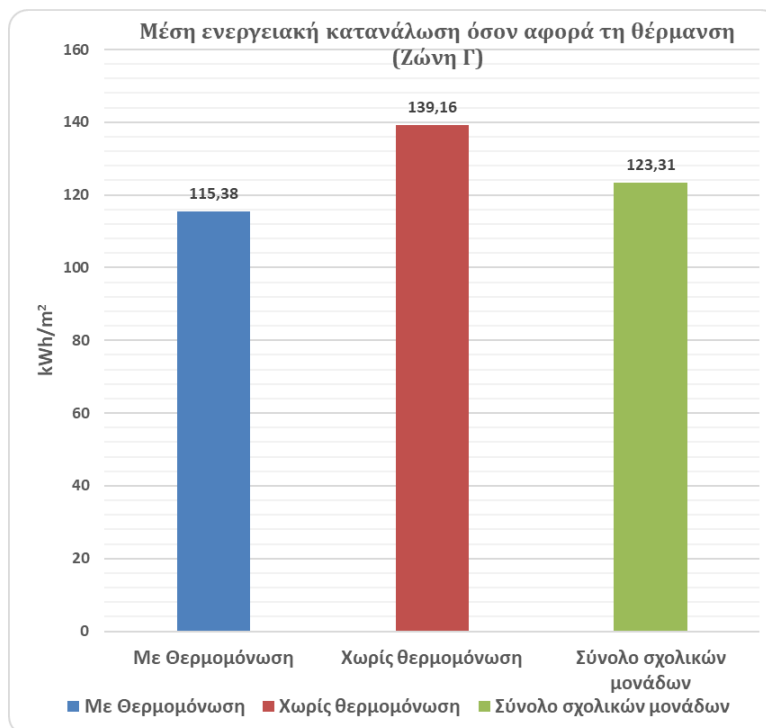
Η επίδραση της θερμομόνωσης στην ενεργειακή κατανάλωση παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 2.1 Μέση κατανάλωση θερμικής ενέργειας θερμομονωμένων και μη θερμομονωμένων σχολικών κτιρίων ανά Κλιματική Ζώνη. Πηγή: ίδια επεξεργασία βάσει (Dimoudi & Kostarela, 2009).

Το Διάγραμμα 2.1 δείχνει ότι τα θερμομονωμένα σχολικά κτίρια παρουσιάζουν χαμηλότερη μέση κατανάλωση θερμικής ενέργειας από τα μη θερμομονωμένα στις εξεταζόμενες κλιματικές ζώνες, με τη διαφορά να εντείνεται στις ψυχρότερες περιοχές (Dimoudi & Kostarela, 2009).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η κλιματική ζώνη Γ, όπου οι ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση είναι σημαντικά αυξημένες. Η μέση συνολική κατανάλωση ανέρχεται σε 123,31 kWh/m², ενώ η θερμομόνωση συνδέεται με μείωση της κατανάλωσης από περίπου 139 σε 115 kWh/m² όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2.2 (Dimoudi & Kostarela, 2009).



Διάγραμμα 2.2 Μέση κατανάλωση ενέργειας σε σχολικά κτίρια στην κλιματική ζώνη Γ.
Πηγή: ίδια επεξεργασία βάσει (Dimoudi & Kostarela, 2009).

Τα παραπάνω ευρήματα επιβεβαιώνονται και από επιμέρους μελέτες στη Βόρεια Ελλάδα. Ειδικότερα, σε σχολικά κτίρια δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης στον Νομό Έβρου καταγράφηκε μέση κατανάλωση θέρμανσης περίπου 70,6 kWh/m², ενώ τα θερμομονωμένα κτίρια παρουσίασαν περίπου 27% χαμηλότερη κατανάλωση σε σχέση με τα μη μονωμένα. Σε δείγμα λυκείων, οι τιμές κατανάλωσης διαμορφώθηκαν περίπου σε 96 kWh/m² για μη μονωμένα και 67 kWh/m² για μονωμένα κτίρια, επιβεβαιώνοντας τη σημαντική επίδραση της θερμομόνωσης (Vagi & Dimoudi, 2011).

Η ενεργειακή συμπεριφορά των σχολικών κτιρίων δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά του κελύφους, αλλά και από τη λειτουργία των εγκαταστάσεων. Η έλλειψη αυτοματισμών, η ανεπαρκής συντήρηση και η μη ορθολογική λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης μπορούν να αυξήσουν την κατανάλωση ακόμη και σε σχετικά σύγχρονα κτίρια (Dascalaki & Sermpetzoglou, 2011). Παράλληλα, ο φυσικός αερισμός επηρεάζει τη μεταβλητότητα των εσωτερικών συνθηκών (Santamouris et al., 2008). Η πολυπαραγοντική αυτή φύση καθιστά αναγκαίες ολιστικές και όχι αποσπασματικές στρατηγικές αναβάθμισης.

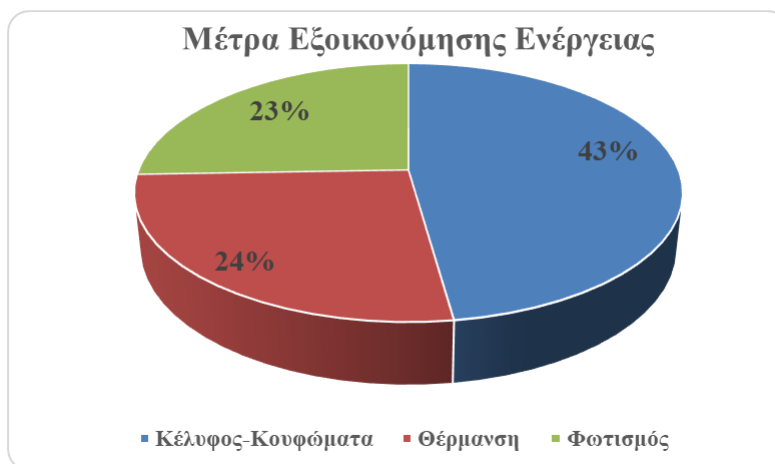
2.2.2 Παρεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης και δυναμικό εξοικονόμησης

Η διεθνής και ελληνική βιβλιογραφία καταγράφει σημαντικό δυναμικό εξοικονόμησης στα υφιστάμενα σχολικά κτίρια μέσω στοχευμένων και συνδυαστικών παρεμβάσεων. Στην ελληνική πραγματικότητα, οι Karakosta και Vryzidis (2025) επισημαίνουν ότι συνδυαστικά σενάρια στο κέλυφος και στα συστήματα μπορούν να μειώσουν ουσιαστικά την ενεργειακή κατανάλωση και τις σχετικές εκπομπές.

Οι παρεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης στα σχολικά κτίρια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις βασικές ομάδες:

- (α) παρεμβάσεις στο κτιριακό κέλυφος,
- (β) αναβάθμιση ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων και
- (γ) βελτιώσεις στον φωτισμό.

Η εφαρμογή μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας στα σχολικά κτίρια παρουσιάζει σαφή προτεραιότητα σε παρεμβάσεις που σχετίζονται με το κτιριακό κέλυφος. Όπως αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 2.3, το 43% των σχολικών μονάδων προχώρησε σε παρεμβάσεις στο κέλυφος, κυρίως μέσω αντικατάστασης κουφωμάτων, γεγονός που επιβεβαιώνει τον καθοριστικό ρόλο των δομικών στοιχείων στη διαμόρφωση της ενεργειακής συμπεριφοράς. Ακολουθούν οι παρεμβάσεις στα συστήματα θέρμανσης με ποσοστό 24%, καθώς και οι αναβαθμίσεις φωτισμού με 23%, οι οποίες στοχεύουν κυρίως στη μείωση της ηλεκτρικής κατανάλωσης (Dascalaki & Sermpetzoglou, 2011).

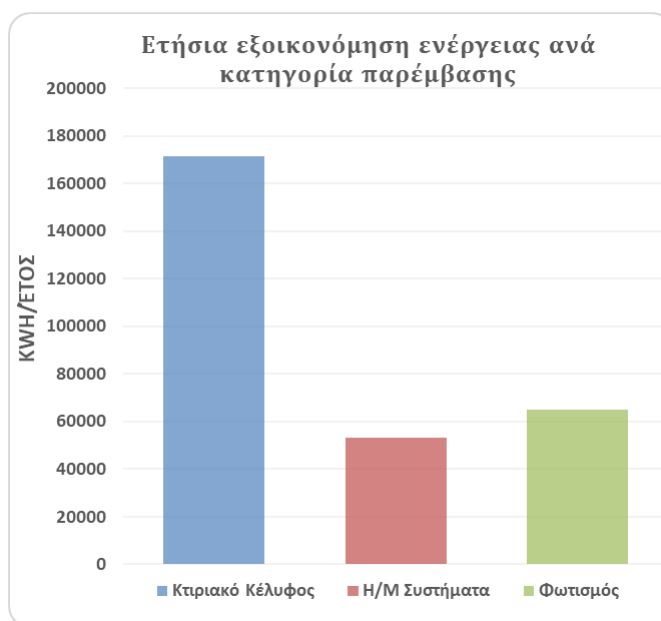


Διάγραμμα 2.3 Ποσοστά εφαρμογής μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας σχολικών κτιρίων.
Πηγή: ίδια επεξεργασία βάσει Dascalaki & Sermpetzoglou (2011).

Τα ευρήματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι οι παρεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης επικεντρώνονται κυρίως σε τεχνικά εφαρμόσιμες και άμεσα αποδοτικές λύσεις, με έμφαση στο κέλυφος του κτιρίου.

Οι παρεμβάσεις στα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα και στον φωτισμό λειτουργούν συμπληρωματικά προς τις παρεμβάσεις του κελύφους και μπορούν να συμβάλουν περαιτέρω στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης (Dascalaki & Sermpetzoglou, 2011).

Η συμβολή των βασικών κατηγοριών παρεμβάσεων στην εξοικονόμηση ενέργειας και στη μείωση των εκπομπών CO₂ παρουσιάζεται συγκεντρωτικά στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 2.4 Απόδοση παρεμβάσεων στην εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση εκπομπών CO₂. Πηγή: ίδια επεξεργασία βάσει Karakosta & Vryzidis (2025).

Το Διάγραμμα 2.4 αποτυπώνει τη σχετική συμβολή των βασικών κατηγοριών παρεμβάσεων στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών CO₂. Οι παρεμβάσεις στο κέλυφος εμφανίζουν τη μεγαλύτερη συνολική συμβολή, ενώ ο φωτισμός και τα συστήματα λειτουργούν συμπληρωματικά (Karakosta & Vryzidis, 2025).

Αντίστοιχα, μελέτες σε εκπαιδευτικά κτίρια μεσογειακού κλίματος επιβεβαιώνουν το δυναμικό εξοικονόμησης μέσω συνδυαστικών παρεμβάσεων (Mytafides et al., 2017).

Συμπερασματικά, η βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι τα σχολικά κτίρια διαθέτουν υψηλό δυναμικό ενεργειακής εξοικονόμησης, υπό την προϋπόθεση ότι οι παρεμβάσεις σχεδιάζονται με ολιστική και τεκμηριωμένη προσέγγιση, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κτιρίου όσο και τις συνθήκες λειτουργίας του. Συνεπώς, η μέγιστη ενεργειακή απόδοση επιτυγχάνεται όχι μέσω μεμονωμένων παρεμβάσεων, αλλά μέσω συνδυαστικών στρατηγικών που ενσωματώνουν παθητικά και ενεργητικά μέτρα.

2.2.3 Ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος: αερισμός και συνθήκες χρήσης

Πέρα από την ενεργειακή κατανάλωση, τα σχολικά κτίρια αξιολογούνται και ως προς την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος (Indoor Environmental Quality - IEQ), καθώς παράμετροι όπως η θερμική άνεση, η ποιότητα του αέρα και οι συνθήκες αερισμού επηρεάζουν την υγεία, την ευεξία και τη μαθησιακή απόδοση των χρηστών. Η διεθνής βιβλιογραφία δείχνει ότι τα σχολικά κτίρια, και ιδιαίτερα οι υφιστάμενες σχολικές μονάδες, συχνά παρουσιάζουν αποκλίσεις από τα συνιστώμενα επίπεδα αερισμού και θερμικής άνεσης, γεγονός που επιτείνεται από την υψηλή πυκνότητα χρήσης και τον περιορισμένο έλεγχο των συνθηκών λειτουργίας.

Χαρακτηριστική είναι η πολυετής εμπειρική μελέτη των Santamouris et al. (2008) σε 62 αίθουσες φυσικά αεριζόμενων σχολείων στην Αθήνα. Η μελέτη έδειξε ότι σημαντικό μέρος των αιθουσών δεν πληρούσε τις συνιστώμενες συνθήκες αερισμού, με τη διάμεση παροχή αέρα να ανέρχεται περίπου σε 4,5 l/p/s έναντι της συνιστώμενης τιμής των 8 l/p/s. Παράλληλα, αναδείχθηκε η σημαντική επίδραση της συμπεριφοράς των χρηστών στη λειτουργία του φυσικού αερισμού και, κατ' επέκταση, στις συνθήκες του εσωτερικού περιβάλλοντος (Santamouris et al., 2008).

Ως εκ τούτου, η αποτελεσματικότητα του φυσικού αερισμού εξαρτάται όχι μόνο από τα χαρακτηριστικά του κτιρίου αλλά και από τις συνθήκες χρήσης και τη συμπεριφορά των χρηστών.

Παράλληλα, οι Antoniadou et al. (2015, 2018) τονίζουν τη σημασία της αλληλεπίδρασης μεταξύ φυσικών παραμέτρων, χαρακτηριστικών των χρηστών και δυνατότητας ελέγχου του εσωτερικού περιβάλλοντος, με την αντιλαμβανόμενη άνεση να συνδέεται, μεταξύ άλλων, με την ποιότητα του αέρα και τον φυσικό φωτισμό.

Συνολικά, η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος είναι πολυπαραγοντικό ζήτημα, στο οποίο αλληλεπιδρούν ο κτιριακός σχεδιασμός, οι λειτουργικές συνθήκες και η συμπεριφορά των χρηστών. Η παράμετρος αυτή πρέπει, επομένως, να λαμβάνεται υπόψη κατά την αξιολόγηση παρεμβάσεων σε υφιστάμενες σχολικές μονάδες.

2.2.4 Κτιριακό κέλυφος, όψεις και περιβαλλοντική αξιολόγηση (LCA) -

Ελληνικές εφαρμογές

Το κτιριακό κέλυφος συνιστά καθοριστικό παράγοντα της ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης των σχολικών κτιρίων, καθώς επηρεάζει τις θερμικές απώλειες, τα ηλιακά κέρδη και τις συνθήκες εσωτερικής άνεσης. Τα χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων, των ανοιγμάτων και των όψεων επηρεάζουν τόσο την κατανάλωση ενέργειας κατά τη λειτουργία όσο και τη συνολική περιβαλλοντική επίδοση του κτιρίου.

Οι παράμετροι θερμικής άνεσης και ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος αξιολογούνται βάσει διεθνών προτύπων, όπως τα EN 16798 και ASHRAE 55, τα οποία χρησιμοποιούνται ως σημεία αναφοράς για τις συνθήκες θερμοκρασίας, αερισμού και άνεσης.

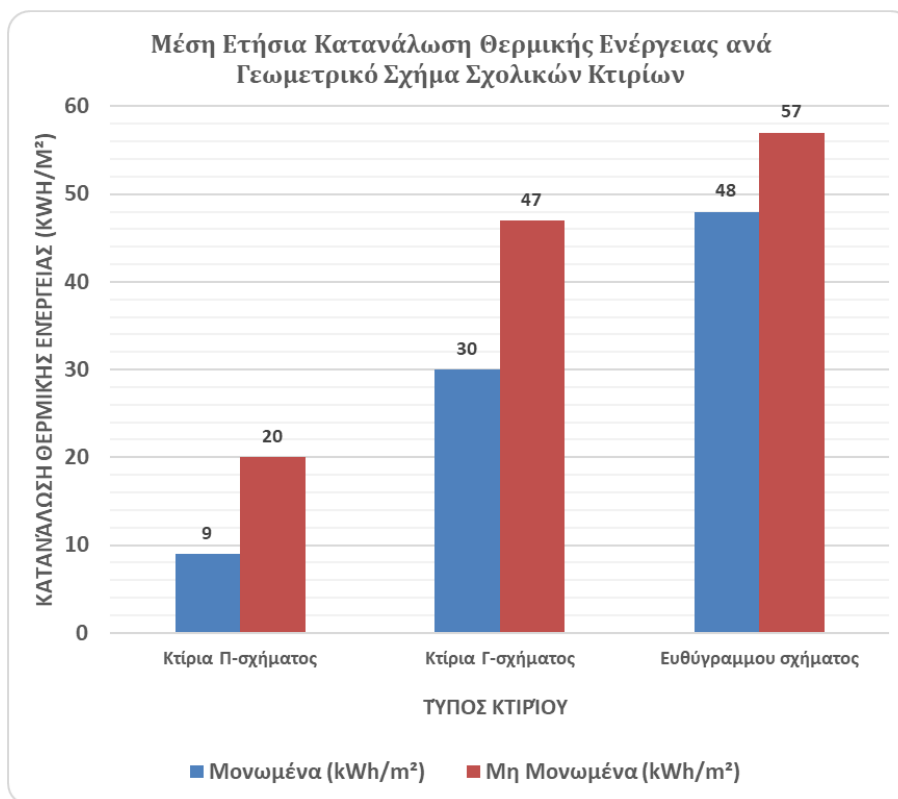
Μελέτες σε ελληνικά κτίρια γραφείων έχουν επίσης αναδείξει ότι η ενεργειακή αξιολόγηση δεν ταυτίζεται πάντοτε με την αντιλαμβανόμενη ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος, καθώς η θερμοκρασία, η ποιότητα του αέρα και η δυνατότητα ελέγχου από τους χρήστες επηρεάζουν την αξιολόγηση της άνεσης (Antoniadou et al. 2020 ,2018). Παρότι οι μελέτες αφορούν κτίρια γραφείων, τα ευρήματα είναι χρήσιμα για την κατανόηση της πολυπαραγοντικής φύσης της άνεσης.

Προς την κατεύθυνση αυτή, η ενσωμάτωση μεθοδολογιών Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA) στη διαδικασία λήψης αποφάσεων αναδεικνύεται ως ιδιαίτερα κρίσιμη. Μελέτη ελληνικής εφαρμογής σε κτίριο γραφείων έδειξε ότι οι επιλογές υλικών και συστημάτων όψεων επηρεάζουν όχι μόνο την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας στη φάση λειτουργίας, αλλά και τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την κατασκευή, τη συντήρηση και το τέλος ζωής των δομικών στοιχείων (Giama et al., 2021). Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι λύσεις με υψηλή ενεργειακή απόδοση δεν συνεπάγονται κατ'

ανάγκη βέλτιστη περιβαλλοντική επίδοση σε όρους κύκλου ζωής, ενισχύοντας την ανάγκη ολοκληρωμένης αξιολόγησης των παρεμβάσεων κελύφους.

Η γεωμετρία και το σχήμα του κτιρίου επηρεάζουν την ενεργειακή του συμπεριφορά, καθώς πιο συμπαγείς μορφές, με μικρότερο λόγο επιφάνειας προς όγκο (S/V), περιορίζουν τις θερμικές απώλειες μέσω του κελύφους. Αντίθετα, πιο σύνθετες μορφές, όπως τα σχήματα Γ ή Π, συνδέονται με αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις λόγω μεγαλύτερης εκτεθειμένης επιφάνειας (Dascalaki & Sermpetzoglou, 2011).

Η επίδραση της γεωμετρίας στην κατανάλωση θερμικής ενέργειας αποτυπώνεται ενδεικτικά στο Διάγραμμα 2.5.



Διάγραμμα 2.5 Μέση ετήσια κατανάλωση θερμικής ενέργειας ανάλογα με το γεωμετρικό σχήμα και τον βαθμό θερμομόνωσης των σχολικών κτιρίων. Πηγή: ιδία επεξεργασία βάσει Dascalaki & Sermpetzoglou (2011).

Το Διάγραμμα 2.5 δείχνει τη χαμηλότερη κατανάλωση των πιο συμπαγών γεωμετριών, ιδιαίτερα στα θερμομονωμένα σχολικά κτίρια (Dascalaki & Sermpetzoglou, 2011). Ωστόσο, η επίδραση της γεωμετρίας δεν μπορεί να εξεταστεί ανεξάρτητα, καθώς συνδέεται άμεσα με άλλες παραμέτρους, όπως ο βαθμός θερμομόνωσης, ο λόγος ανοιγμάτων και τα χαρακτηριστικά του κελύφους. Για τον

λόγο αυτό, η γεωμετρία του κτιρίου αντιμετωπίζεται ως μέρος μιας συνολικής μορφολογικής και ενεργειακής προσέγγισης.

Πρόσφατες μελέτες σε εκπαιδευτικά κτίρια υπογραμμίζουν τη σημασία της συνδυασμένης αξιολόγησης της ενεργειακής απόδοσης, του κύκλου ζωής των υλικών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για τη μετάβαση προς κτίρια χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος (Moghayed et al., 2024).

Συμπερασματικά, η αναβάθμιση του κτιριακού κελύφους σε σχολικές μονάδες απαιτεί συνδυαστική αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς, της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε όλο τον κύκλο ζωής του κτιρίου, στο πλαίσιο της μετάβασης από τα nZEB προς τα ZEB.

2.3 Building Information Modeling (BIM) στον βιώσιμο σχεδιασμό

2.3.1 Βασικές αρχές και χαρακτηριστικά του BIM

Το Building Information Modeling (BIM) ορίζεται ως ψηφιακή αναπαράσταση των φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός κτιρίου, η οποία λειτουργεί ως κοινή βάση γνώσης για τη συλλογή, διαχείριση και ανταλλαγή πληροφοριών καθ' όλο τον κύκλο ζωής του έργου (Sacks et al., 2018). Δεν περιορίζεται σε τρισδιάστατη γεωμετρική απεικόνιση, αλλά αποτελεί πληροφοριακό σύστημα στο οποίο κάθε δομικό στοιχείο συνδέεται με παραμέτρους και δεδομένα που υποστηρίζουν τον σχεδιασμό, την ανάλυση και τη λήψη αποφάσεων.

Σε αντίθεση με τον δισδιάστατο σχεδιασμό, το μοντέλο BIM ενσωματώνει γεωμετρικές, κατασκευαστικές, λειτουργικές και περιβαλλοντικές πληροφορίες σε ενιαίο περιβάλλον. Η παραμετρική του φύση επιτρέπει τη δυναμική τροποποίηση των σχεδιαστικών επιλογών και την άμεση αποτύπωση των επιπτώσεών τους, χαρακτηριστικό που το καθιστά κατάλληλο για τη διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων.

2.3.2 BIM και βιώσιμος σχεδιασμός κτιρίων

Στον βιώσιμο σχεδιασμό, το BIM λειτουργεί ως πλατφόρμα ενοποίησης δεδομένων, διευκολύνοντας τη σύνδεση αρχιτεκτονικών, ενεργειακών και περιβαλλοντικών παραμέτρων. Μέσω της διαλειτουργικότητας με λογισμικά

ενεργειακής προσομοίωσης και περιβαλλοντικής αξιολόγησης, επιτρέπει τη διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων και τη συγκριτική αξιολόγηση παθητικών και ενεργητικών στρατηγικών.

Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε δημόσια και εκπαιδευτικά κτίρια, όπου οι σχεδιαστικές αποφάσεις επηρεάζουν τόσο τη λειτουργική απόδοση όσο και τις συνθήκες χρήσης.

Πρόσφατες μελέτες αξιοποιούν το BIM σε συνδυασμό με προηγμένες αναλυτικές και υπολογιστικές μεθόδους για την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Οι Pedone et al. (2023) προτείνουν τη χρήση μοντέλων βασισμένων σε δεδομένα BIM για την ταχεία αξιολόγηση σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης, υπογραμμίζοντας τη δυνατότητα αξιοποίησης του BIM πέρα από την απλή αναπαράσταση του κτιρίου.

2.3.3 Εφαρμογές BIM σε εκπαιδευτικά κτίρια

Η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει τον ρόλο του BIM ως βασικού εργαλείου στον σχεδιασμό και τη διαχείριση εκπαιδευτικών κτιρίων. Οι Moreno et al. (2019) καταγράφουν εκτεταμένη χρήση του BIM σε σχολικές και πανεπιστημιακές εγκαταστάσεις, επισημαίνοντας τη συμβολή του στον συντονισμό μεταξύ των εμπλεκόμενων ειδικοτήτων και στη μείωση σχεδιαστικών αστοχιών.

Οι Koutamanis et al. (2017) υπογραμμίζουν ότι το BIM μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο συμμετοχικού σχεδιασμού, επιτρέποντας την οπτικοποίηση εναλλακτικών λύσεων και τη συμμετοχή χρηστών και φορέων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων καθ' όλο τον κύκλο ζωής των σχολικών κτιρίων. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε σχολικά κτίρια, όπου οι συνθήκες χρήσης επηρεάζουν άμεσα τη λειτουργική και περιβαλλοντική απόδοση.

Η χρήση του BIM σε εκπαιδευτικά κτίρια επιτρέπει επίσης τη σύνδεση του σχεδιασμού με πραγματικά δεδομένα λειτουργίας και την καλύτερη προσαρμογή των σχεδιαστικών λύσεων στις ανάγκες των χρηστών.

2.3.4 Περιορισμοί και προκλήσεις εφαρμογής του BIM

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρει, η εφαρμογή του BIM στον βιώσιμο σχεδιασμό συνοδεύεται από περιορισμούς. Η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων, το επίπεδο

ωριμότητας των ψηφιακών εργαλείων και τον βαθμό ενσωμάτωσης των περιβαλλοντικών παραμέτρων στα πρότυπα μοντελοποίησης.

Οι Hetemi et al. (2020) επισημαίνουν ότι, σε έργα με στόχο τη βιωσιμότητα, το BIM συχνά χρησιμοποιείται κυρίως ως εργαλείο αναπαράστασης και συντονισμού, χωρίς να αξιοποιείται πλήρως ως μέσο υποστήριξης αποφάσεων. Το γεγονός αυτό συνδέεται με τεχνικούς, θεσμικούς και οργανωτικούς παράγοντες, όπως η έλλειψη τυποποίησης και η περιορισμένη ψηφιακή ωριμότητα των εμπλεκόμενων φορέων.

Συνολικά, το BIM παρέχει το πλαίσιο για τη σύνδεση του ψηφιακού μοντέλου με ενεργειακά και περιβαλλοντικά δεδομένα και τη συστηματική διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων.

2.4 Παραμετρικός σχεδιασμός και υπολογιστικές μέθοδοι αξιολόγησης

2.4.1 Παραμετρικός σχεδιασμός στον αρχιτεκτονικό και ενεργειακό σχεδιασμό

Ο παραμετρικός σχεδιασμός νοείται ως υπολογιστική προσέγγιση αρχιτεκτονικού και ενεργειακού σχεδιασμού, κατά την οποία η γεωμετρία και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός κτιρίου ορίζονται μέσω παραμέτρων, κανόνων και μαθηματικών σχέσεων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη δυναμική παραγωγή και συστηματική τροποποίηση εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων, μετατρέποντας τον σχεδιασμό από μια γραμμική διαδικασία σε διερεύνηση ενός πολυδιάστατου σχεδιαστικού χώρου (Woodbury, 2010).

Σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους, όπου εξετάζεται περιορισμένος αριθμός λύσεων, ο παραμετρικός σχεδιασμός επιτρέπει τη μεταβολή επιλεγμένων μεταβλητών και τη δημιουργία πολλαπλών σεναρίων, διευκολύνοντας τη σύγκριση και την τεκμηριωμένη επιλογή των βέλτιστων λύσεων.

2.4.2 Σύνδεση παραμετρικού σχεδιασμού με BIM

Η σύνδεση του παραμετρικού σχεδιασμού με περιβάλλοντα Building Information Modeling (BIM), μέσω εργαλείων οπτικού προγραμματισμού όπως το Dynamo, επιτρέπει την αυτοματοποίηση επαναλαμβανόμενων τροποποιήσεων και τη συστηματική διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων.

Η παραμετροποίηση μεταβλητών του κελύφους, όπως τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων, τα χαρακτηριστικά των ανοιγμάτων και τα συστήματα σκίασης, διευκολύνει την επαναληπτική αξιολόγηση της επίδρασής τους στην ενεργειακή απόδοση και στις συνθήκες άνεσης (Turrin et al., 2011).

Η διασύνδεση αυτή καθιστά το BIM όχι μόνο εργαλείο μοντελοποίησης, αλλά και πλατφόρμα διερεύνησης και αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων.

2.4.3 Υπολογιστική βελτιστοποίηση στον σχεδιασμό κτιρίων

Η σύζευξη της παραμετρικής μοντελοποίησης με μεθόδους υπολογιστικής βελτιστοποίησης επιτρέπει την αυτόματη αναζήτηση βέλτιστων ή σχεδόν βέλτιστων λύσεων βάσει προκαθορισμένων στόχων, όπως η ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης ή των ωρών θερμικής δυσφορίας.

Η προσέγγιση αυτή μετατοπίζει τον ρόλο του μελετητή από τον χειροκίνητο έλεγχο μεμονωμένων λύσεων στη διαμόρφωση στόχων, περιορισμών και κριτηρίων αξιολόγησης. Πρόσφατες μελέτες επιβεβαιώνουν τη χρησιμότητα του συνδυασμού παραμετρικού σχεδιασμού, εργαλείων ανάλυσης και τεχνικών βελτιστοποίησης σε σύνθετα σχεδιαστικά προβλήματα (Allassaf, 2025; Wang et al., 2024).

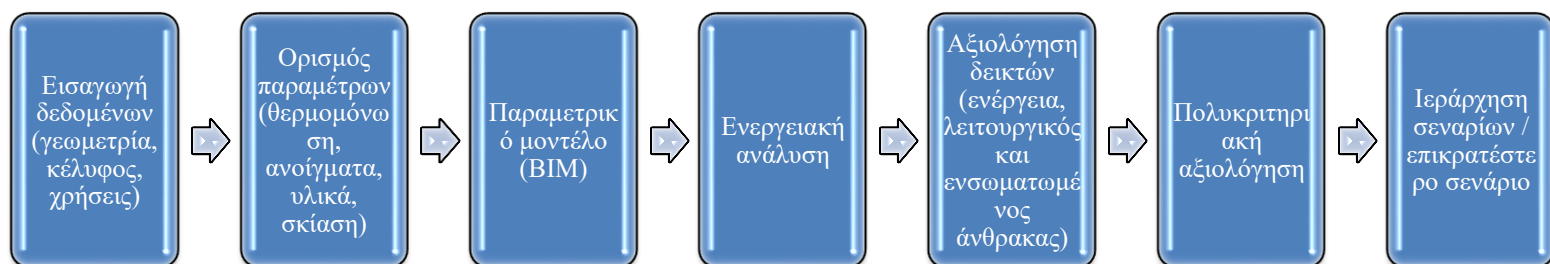
Στην παρούσα εργασία, ωστόσο, δεν εφαρμόζεται αλγοριθμική βελτιστοποίηση. Η αξιολόγηση βασίζεται σε πεπερασμένο σύνολο διακριτών σεναρίων, τα οποία συγκρίνονται και ιεραρχούνται με χρήση πολυκριτηριακής αξιολόγησης.

Η βιβλιογραφία αξιοποιεί επίσης συμβατικές μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Analysis - MCDA), όπως η σταθμισμένη άθροιση κανονικοποιημένων δεικτών, το TOPSIS και η AHP, για τη σύγκριση πεπερασμένου αριθμού εναλλακτικών σεναρίων. Οι μέθοδοι αυτές δεν παράγουν νέες λύσεις, αλλά ιεραρχούν προκαθορισμένες εναλλακτικές. Το χαρακτηριστικό αυτό τις καθιστά κατάλληλες για την αξιολόγηση τεχνικά εφαρμόσιμων παρεμβάσεων σε υφιστάμενα δημόσια κτίρια, όπου οι επιλογές περιορίζονται από την υφιστάμενη γεωμετρία, τον φέροντα οργανισμό και τους διαθέσιμους πόρους. Η προσέγγιση αυτή υιοθετείται και στην παρούσα εργασία.

2.4.4 Εφαρμογή σε υφιστάμενες σχολικές μονάδες

Στις υφιστάμενες σχολικές μονάδες, ο παραμετρικός σχεδιασμός επιτρέπει τη διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης χωρίς πλήρη ανασχεδιασμό του κτιρίου. Οι παρεμβάσεις πρέπει να είναι συμβατές με την υφιστάμενη γεωμετρία, τη λειτουργία του σχολείου, τους κατασκευαστικούς περιορισμούς και τις οικονομικές δυνατότητες του δημόσιου τομέα.

Για τον λόγο αυτό, η παραμετρική διερεύνηση επικεντρώνεται σε τεχνικά εφαρμόσιμες μεταβλητές, όπως η θερμομονωτική αναβάθμιση του κελύφους, τα χαρακτηριστικά των κουφωμάτων, τα συστήματα σκίασης και επιλεγμένες λειτουργικές παράμετροι των θερμικών ζωνών. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη συστηματική σύγκριση ρεαλιστικών σεναρίων με βάση αντικειμενικά κριτήρια απόδοσης. Η συνολική διαδικασία παραμετρικής διερεύνησης και αξιολόγησης συνοψίζεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Διαδικασία παραμετρικής διερεύνησης και πολυκριτηριακής αξιολόγησης σεναρίων. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Η μεθοδολογία αυτή λειτουργεί ως βασικό εργαλείο για τη μετάβαση από εμπειρικές πρακτικές σχεδιασμού σε τεκμηριωμένες στρατηγικές ενεργειακής αναβάθμισης υφιστάμενων σχολικών κτιρίων.

2.5 Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA)

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA) είναι διεθνώς αναγνωρισμένη μεθοδολογία για την ποσοτική εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός κτιρίου καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, από την εξόρυξη των πρώτων υλών και την κατασκευή έως τη λειτουργία και το τέλος ζωής. Στο πλαίσιο αυτό, αξιολογούνται τόσο οι επιπτώσεις που συνδέονται με τη λειτουργία όσο και εκείνες που προκύπτουν από την παραγωγή, μεταφορά, συντήρηση, αντικατάσταση και τελική διάθεση των υλικών και συστημάτων. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, καθώς η μείωση της λειτουργικής κατανάλωσης μέσω πρόσθετων υλικών ή τεχνικών συστημάτων μπορεί να συνοδεύεται από αύξηση των ενσωματωμένων ενεργειακών και ανθρακικών επιπτώσεων (Chastas, 2020). Σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044, η LCA επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών επιλογών με βάση περιβαλλοντικούς δείκτες, όπως το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential - GWP).

Τα τελευταία χρόνια, η ενσωμάτωση της LCA σε περιβάλλοντα Building Information Modeling (BIM) έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας, καθώς το BIM διευκολύνει την εξαγωγή ποσοτικών δεδομένων υλικών και τη σύνδεσή τους με περιβαλλοντικές βάσεις δεδομένων. Η προσέγγιση BIM-LCA μπορεί να περιορίσει την πολυπλοκότητα και τον χρόνο εκτέλεσης της ανάλυσης, καθιστώντας εφικτή την ενσωμάτωσή της ήδη από τα πρώιμα στάδια του σχεδιασμού (Soust-Verdaguer et al., 2017).

Πρόσφατες έρευνες επιβεβαιώνουν ότι τα BIM-based εργαλεία LCA μπορούν να υποστηρίξουν τη συστηματική σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων υλικών και κατασκευαστικών λύσεων (Zimmermann et al., 2021). Επιπλέον, σύγχρονες προσεγγίσεις βασισμένες σε ανοικτά πρότυπα δεδομένων, όπως το IFC, ενισχύουν την ανταλλαγή και αξιοποίηση πληροφοριών μεταξύ BIM και LCA εργαλείων, διευκολύνοντας την ενσωμάτωση περιβαλλοντικών δεικτών στον σχεδιασμό κτιρίων (Strelets et al., 2025).

Η σημασία της LCA ενισχύεται και στο ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο μέσω της αναθεωρημένης Οδηγίας για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (EPBD), η οποία

ενισχύει την προσέγγιση κύκλου ζωής στην αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κτιρίων. Η εξέλιξη αυτή ενισχύει την ανάγκη συνδυασμού ενεργειακής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης στις παρεμβάσεις αναβάθμισης.

2.6 Ερευνητικό κενό

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση δείχνει ότι η βιώσιμη αναβάθμιση σχολικών κτιρίων έχει εξεταστεί από διαφορετικές, συχνά μεμονωμένες, προσεγγίσεις. Ορισμένες μελέτες επικεντρώνονται στην ενεργειακή απόδοση του κελύφους, άλλες αξιοποιούν το BIM και παραμετρικές μεθόδους, ενώ άλλες εξετάζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των παρεμβάσεων μέσω LCA. Στον Πίνακα 2.1 συνοψίζονται οι βασικές μελέτες που εξετάστηκαν και οι κύριες διαστάσεις στις οποίες εστιάζουν.

Πίνακας 2.1 Κάλυψη των βασικών διαστάσεων του προβλήματος από την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

Μελέτη	BIM	Ενεργειακή προσομοίωση	LCA	Σχολικά κτίρια	Ελληνικό πλαίσιο
Dascalaki και Sermpezoglou (2011)	-	✓	-	✓	✓
Dimoudi και Kostarela (2009)	-	✓	-	✓	✓
Tsikra και Andreou (2017)	-	✓	-	✓	✓
Tsikaloudaki et al. (2015)	-	✓	-	-	-
Chastas (2020)	-	✓	✓	-	✓
Giama et al. (2021)	-	✓	✓	-	Μερικώς
Le et al. (2018)	Μερικώς	Μερικώς	Μερικώς	✓	-
Soust-Verdaguer et al. (2017)	✓	-	✓	-	-
Zimmermann et al. (2021)	✓	-	✓	-	-
Pedone et al. (2023)	✓	✓	-	✓	-
Παρούσα εργασία	✓	✓	✓	✓	✓

Από τη συγκριτική εξέταση των μελετών προκύπτει ότι η ελληνική βιβλιογραφία για τα σχολικά κτίρια επικεντρώνεται κυρίως στην ενεργειακή απόδοση, τη θερμική και οπτική άνεση, την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος και την αξιολόγηση μέτρων ενεργειακής αναβάθμισης. Αντίστοιχα, οι ελληνικές εφαρμογές που ενσωματώνουν LCA αφορούν κυρίως κατοικίες και κτίρια γραφείων, ενώ οι προσεγγίσεις που συνδέουν συστηματικά το BIM με την LCA έχουν αναπτυχθεί κυρίως σε διαφορετικά κανονιστικά και κτιριακά περιβάλλοντα.

Επιπροσθέτως, η διεθνής βιβλιογραφία παρουσιάζει προσεγγίσεις που συνδυάζουν BIM, LCA και παραμετρική ή υπολογιστική διερεύνηση, καθώς και εφαρμογές ενεργειακής αναβάθμισης υφιστάμενων σχολικών κτιρίων. Ωστόσο, από το σύνολο των μελετών που εξετάστηκαν δεν εντοπίστηκε εφαρμογή που να συνδυάζει σε υφιστάμενη ελληνική σχολική μονάδα τη δημιουργία ψηφιακού μοντέλου BIM, την παραγωγή παραμετρικών σεναρίων και την ολοκληρωμένη ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγησή τους, συμπεριλαμβανομένου του ενσωματωμένου περιβαλλοντικού αντίκτυπου.

Το συγκεκριμένο ερευνητικό κενό οριοθετεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας και συνδέεται με τα ερευνητικά ερωτήματα EE1-EE3.

3. Μεθοδολογία και Εργαλεία Ανάλυσης

3.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο και ερευνητική ροή

Η μεθοδολογία της παρούσας εργασίας εφαρμόστηκε στη μελέτη περίπτωσης του υφιστάμενου σχολικού κτιρίου και οργανώθηκε σε διαδοχικά στάδια, από την αποτύπωση και τεκμηρίωση της υφιστάμενης κατάστασης έως τη δημιουργία και αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων ενεργειακής και περιβαλλοντικής αναβάθμισης. Η διαδικασία βασίστηκε στη δημιουργία ψηφιακού μοντέλου στο Autodesk Revit, στην παραμετρική διαχείριση επιλεγμένων στοιχείων μέσω Dynamo και στην ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση των εξεταζόμενων σεναρίων.

Η ερευνητική προσέγγιση οργανώθηκε στα ακόλουθα διαδοχικά στάδια:

- (α) Αποτύπωση και τεκμηρίωση της υφιστάμενης κατάστασης
- (β) Ανάπτυξη του ψηφιακού μοντέλου του κτιρίου στο Revit
- (γ) Δημιουργία του Αναλυτικού Ενεργειακού Μοντέλου και καθορισμός των λειτουργικών και θερμικών παραμέτρων
- (δ) Παραγωγή και διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων
- (ε) Ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση των σεναρίων
- (στ) Συγκριτική και πολυκριτηριακή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Κρίσιμο ενδιάμεσο στάδιο της μεθοδολογίας αποτέλεσε το Αναλυτικό Ενεργειακό Μοντέλο (Energy Analytical Model - EAM), το οποίο προκύπτει από το γεωμετρικό και πληροφοριακό μοντέλο του κτιρίου και χρησιμοποιείται για την ενεργειακή αξιολόγηση. Η ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση των σεναρίων πραγματοποιήθηκε μέσω ενεργειακής ανάλυσης και Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, αντίστοιχα.

3.2 Δεδομένα, τεκμηρίωση και παραδοχές

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του ψηφιακού μοντέλου και την ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- (α) πρωτογενή δεδομένα από διαθέσιμα αρχιτεκτονικά σχέδια, τομές, χειρόγραφα της αρχικής μελέτης και διοικητικά στοιχεία,
- (β) δεδομένα που προέκυψαν από επιτόπια διερεύνηση και φωτογραφική τεκμηρίωση της υφιστάμενης κατάστασης, και
- (γ) κανονιστικές τιμές και τεκμηριωμένες παραδοχές, οι οποίες υιοθετήθηκαν όπου δεν ήταν δυνατός ο άμεσος προσδιορισμός συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του κτιρίου.

Τα γεωμετρικά στοιχεία του κτιρίου, όπως οι βασικές διαστάσεις, οι επιφάνειες, οι όγκοι, η διάταξη των χώρων, τα ανοίγματα και τα δομικά πάχη, προέκυψαν από την επεξεργασία των διαθέσιμων σχεδίων και συμπληρώθηκαν, όπου ήταν απαραίτητο, από την επιτόπια διερεύνηση.

Η επιτόπια διερεύνηση και η φωτογραφική τεκμηρίωση χρησιμοποιήθηκαν για την επιβεβαίωση χαρακτηριστικών που δεν προκύπτουν επαρκώς από τα σχέδια. Ειδικότερα, μέσω της επιτόπιας παρατήρησης διαπιστώθηκαν μορφολογικά και κατασκευαστικά στοιχεία, όπως ο τύπος των εξωτερικών κουφωμάτων και η μεταλλική φύση των εξωτερικών θυρών. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την τεκμηρίωση της υφιστάμενης κατάστασης, χωρίς να θεωρηθούν άμεση ποσοτική τεκμηρίωση των θερμοτεχνικών παραμέτρων.

Οι λειτουργικές και κλιματικές συνθήκες του κτιρίου καθορίστηκαν σύμφωνα με τις σχετικές Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας, οι απαιτήσεις νωπού αέρα, τα χρονοπρογράμματα και τα κλιματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4 (Τεδες και τα σχόλιαχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2010).

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των δομικών στοιχείων και των υλικών προσδιορίστηκαν σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2017 (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2017b). Για χαρακτηριστικά που δεν ήταν δυνατό να προσδιοριστούν με βεβαιότητα, όπως η ακριβής παρουσία θερμομόνωσης στο υφιστάμενο κέλυφος, ο

τύπος υάλωσης ή η αεροστεγανότητα, υιοθετήθηκαν τεκμηριωμένες παραδοχές συμβατές με την εποχή κατασκευής του κτιρίου και το διαθέσιμο τεκμηριωτικό υλικό.

Όλα τα δεδομένα και οι παραδοχές καταγράφηκαν σε Μητρώο Δεδομένων και Παραδοχών, στο οποίο περιλαμβάνονται η τιμή κάθε παραμέτρου, η πηγή της, ο τρόπος ενσωμάτωσής της στο ψηφιακό μοντέλο και, όπου απαιτείται, το επίπεδο αβεβαιότητας. Το μητρώο παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

3.2.1 Ειδικά χαρακτηριστικά σχολικής χρήσης και ενσωμάτωσή τους στο μοντέλο

Οι λειτουργικές παράμετροι ορίστηκαν ως προσαρμοσμένοι τύποι χώρων για τις βασικές λειτουργικές ενότητες της σχολικής μονάδας, με διαφοροποιημένες τιμές ως προς την πληρότητα, τα εσωτερικά θερμικά κέρδη, τον φωτισμό, τον εξοπλισμό και τις απαιτήσεις νωπού αέρα. Επιπλέον, δημιουργήθηκαν προσαρμοσμένα χρονοπρογράμματα λειτουργίας, τα οποία αποτυπώνουν το σχολικό ωράριο και τις περιόδους μη λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό διαφοροποιήθηκαν οι συνθήκες λειτουργίας των διδακτικών και μη διδακτικών χώρων. Οι αναλυτικές τιμές ανά τύπο χώρου παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

3.3 Μοντελοποίηση στο Revit: επίπεδο λεπτομέρειας και πληροφoρίας, όρια μοντέλου και κανόνες μοντελοποίησης

Στο πλαίσιο της μεθοδολογίας αναπτύχθηκε ψηφιακό μοντέλο BIM του υφιστάμενου σχολικού κτιρίου στο Autodesk Revit 2026 (έκδοση 26.4.0.32). Η ανάπτυξη βασίστηκε στα διαθέσιμα σχέδια του φακέλου της οικοδομικής άδειας, τα οποία λήφθηκαν από την αρμόδια Υπηρεσία Δόμησης, καθώς και στα στοιχεία της επιτόπιας διερεύνησης της υφιστάμενης κατάστασης. Το μοντέλο περιλαμβάνει τη γεωμετρία του κτιρίου, τα βασικά δομικά στοιχεία, τα υλικά και τις απαιτούμενες πληροφορίες για την ενεργειακή ανάλυση και την εξαγωγή ποσοτήτων για την περιβαλλοντική αξιολόγηση.

Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε στον βαθμό λεπτομέρειας και πληροφoρίας που απαιτείται για τις παραπάνω αναλύσεις, με έμφαση στο κτιριακό κέλυφος και στα βασικά δομικά στοιχεία, δηλαδή εξωτερικούς τοίχους, δάπεδα,

οροφές, κουφώματα και θύρες, καθώς και στην αναπαράσταση των βασικών εσωτερικών χώρων.

Στο μοντέλο ενσωματώθηκαν οι βασικές ιδιότητες των υλικών, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των χώρων και οι θερμοφυσικές παράμετροι που απαιτούνται για τη δημιουργία του Αναλυτικού Ενεργειακού Μοντέλου (Energy Analytical Model - EAM). Τα δομικά στοιχεία του κελύφους οργανώθηκαν σε τύπους, ώστε να είναι δυνατή η συστηματική μεταβολή των θερμικών χαρακτηριστικών τους κατά τη διερεύνηση των σεναρίων. Η αναλυτική περιγραφή των δομικών συνθέσεων και των αντίστοιχων τιμών παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη γεωμετρική συνέπεια του μοντέλου και στην αποφυγή ασυνεχειών, επικαλύψεων ή κενών που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη δημιουργία του EAM. Η μοντελοποίηση βασίστηκε σε διακριτούς χώρους, οι οποίοι οργανώθηκαν σε θερμικές ζώνες σύμφωνα με τις βασικές λειτουργικές ενότητες του κτιρίου, ώστε να αποτυπώνονται οι διαφοροποιήσεις στις συνθήκες λειτουργίας και να υποστηρίζεται η ενεργειακή ανάλυση.

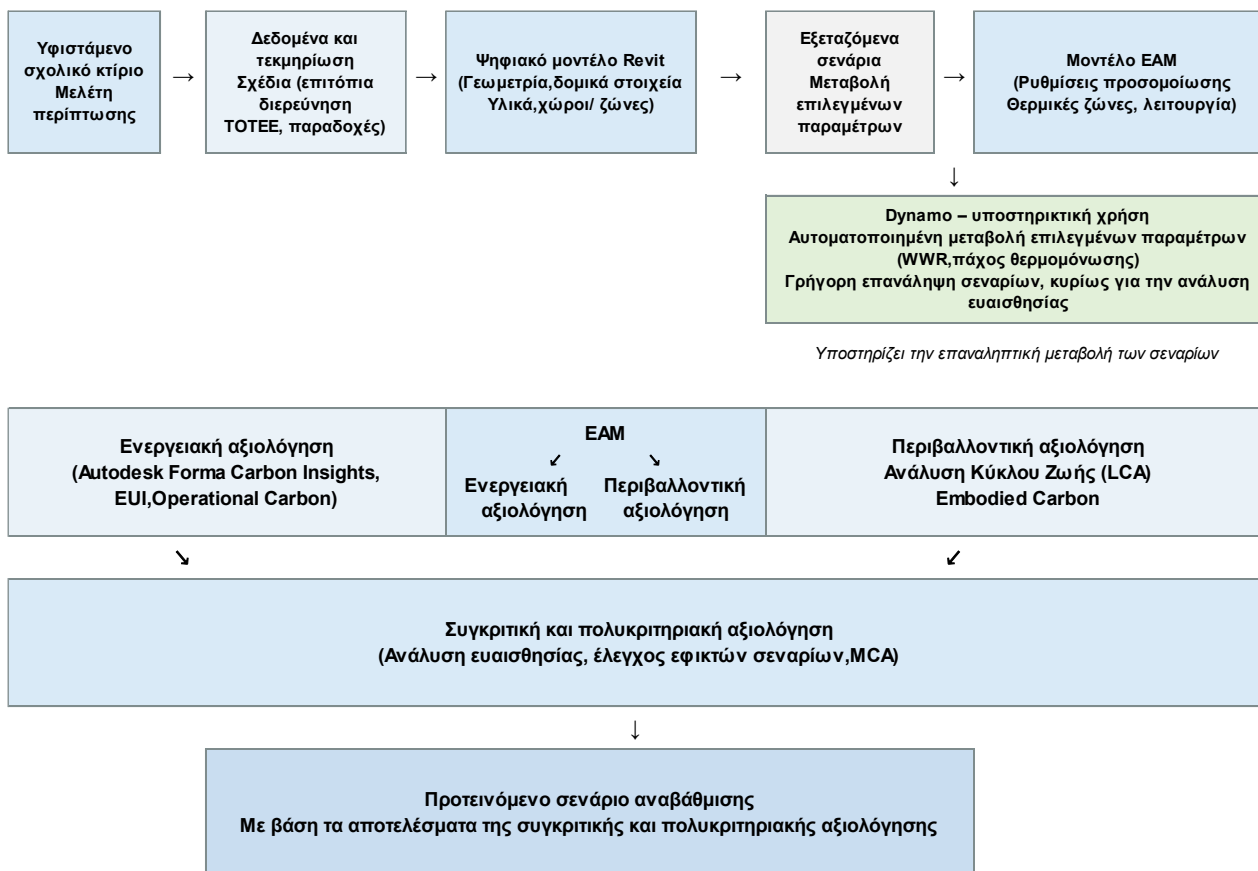
Για την υποστήριξη της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής εφαρμόστηκαν ενιαίοι κανόνες ως προς τη χρήση υλικών, τη σύνθεση των δομικών στοιχείων και την ονοματοδοσία των τύπων και παραμέτρων, ώστε να είναι δυνατή η αντιστοίχιση των στοιχείων του μοντέλου με τις αντίστοιχες ποσότητες υλικών και, όπου ήταν διαθέσιμα κατάλληλα δεδομένα, με περιβαλλοντικούς συντελεστές.

3.4 Δημιουργία Αναλυτικού Ενεργειακού Μοντέλου και ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση

Η ενεργειακή αναπαράσταση του κτιρίου υλοποιήθηκε μέσω της δημιουργίας Αναλυτικού Ενεργειακού Μοντέλου (Energy Analytical Model - EAM) στο περιβάλλον του Revit. Το EAM χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την ενεργειακή προσομοίωση και δημιουργήθηκε από τη γεωμετρία, τα δομικά στοιχεία, τους χώρους και τις θερμικές παραμέτρους του ψηφιακού μοντέλου.

Για την ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκε το Autodesk Forma Carbon Insights, μέσω του οποίου αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα του

Αναλυτικού Ενεργειακού Μοντέλου για την εξαγωγή δεικτών ενεργειακής κατανάλωσης και ανθρακικού αποτυπώματος. Τα κλιματικά δεδομένα της προσομοίωσης επιλέγονται από το εργαλείο βάσει της γεωγραφικής θέσης της μελέτης περίπτωσης. Οι βασικές παραδοχές λειτουργίας, όπως το ωράριο, οι θερμοκρασίες σχεδιασμού και οι απαιτήσεις αερισμού, διατηρήθηκαν κοινές σε όλα τα σενάρια, ώστε οι διαφορές των αποτελεσμάτων να αποδίδονται στις εξεταζόμενες παραμέτρους.



Σχήμα 3.1 Ροή δεδομένων και εργαλείων της μεθοδολογίας. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

3.4.1 Ρυθμίσεις Αναλυτικού Ενεργειακού Μοντέλου (EAM) και παραδοχές προσομοίωσης

Ως μέθοδος δημιουργίας του αναλυτικού μοντέλου επιλέχθηκε η χρήση των δομικών στοιχείων του μοντέλου, ώστε η γεωμετρία και οι θερμικές ιδιότητες του κτιρίου να προκύπτουν απευθείας από το ψηφιακό μοντέλο. Η θερμική συμπεριφορά του κελύφους προσδιορίστηκε με βάση την παράμετρο λειτουργίας κάθε δομικού στοιχείου, λαμβάνοντας υπόψη τον χαρακτηρισμό των επιφανειών ως εξωτερικών, εσωτερικών ή σε επαφή με μη θερμαινόμενους χώρους.

Για την απλοποίηση του υπολογιστικού μοντέλου επιλέχθηκε απλοποιημένο επίπεδο ανάλυσης με διατήρηση των επιφανειών σκίασης, το οποίο επιτρέπει την επαρκή αποτύπωση των βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών και των στοιχείων σκίασης, διατηρώντας ταυτόχρονα περιορισμένο υπολογιστικό κόστος. Ο τύπος κτιρίου ορίστηκε ως εκπαιδευτικό κτίριο και το βασικό πρόγραμμα λειτουργίας αντιστοιχήθηκε σε σχολική χρήση. Οι επιμέρους λειτουργικές παράμετροι, όπως η πληρότητα, τα εσωτερικά θερμικά κέρδη, ο φωτισμός, ο εξοπλισμός και οι απαιτήσεις νωπού αέρα, διαφοροποιήθηκαν ανά τύπο χώρου μέσω των αντίστοιχων προσαρμοσμένων χρονοπρογραμμάτων.

Ως σύστημα θέρμανσης, αερισμού και κλιματισμού ορίστηκε κεντρικό σύστημα μεταβλητής παροχής αέρα, ενώ η παροχή νωπού αέρα ορίστηκε διαφοροποιημένα ανά τύπο χώρου και η διείσδυση αέρα θεωρήθηκε μέτρια, ώστε να αποδοθούν ρεαλιστικά οι απώλειες λόγω αεροδιαφυγών σε υφιστάμενο κτίριο. Ο καθορισμός των θερμικών ζωνών βασίστηκε στους διακριτούς χώρους του μοντέλου.

Οι αναλυτικές τιμές των ρυθμίσεων και των παραδοχών προσομοίωσης, καθώς και οι βαθμοί απόδοσης των συστημάτων, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο Κεφάλαιο 4.

3.5 Παραμετρικό μοντέλο και συστηματική διερεύνηση σεναρίων

Για τη συστηματική διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων αναβάθμισης αναπτύχθηκε παραμετρικό μοντέλο σε περιβάλλον Dynamo, διασυνδεδεμένο με το μοντέλο Revit. Η χρήση του οπτικού προγραμματισμού επέτρεψε την αυτοματοποιημένη διαχείριση επιλεγμένων σχεδιαστικών παραμέτρων και τη δημιουργία συγκρίσιμων σεναρίων χωρίς επαναμοντελοποίηση του κτιρίου σε πολλά ξεχωριστά αρχεία (Sacks et al., 2018).

Αναπτύχθηκαν εργαλεία οπτικού προγραμματισμού για δύο βασικές λειτουργίες. Το πρώτο σύνολο εντοπίζει τα δομικά στοιχεία του κελύφους βάσει της ονοματολογίας των παραμετρικών τύπων και εφαρμόζει τον αντίστοιχο τύπο κάθε σεναρίου, με διακριτές διαδικασίες για τοιχοποιίες, οριζόντια στοιχεία και κουφώματα. Το δεύτερο μεταβάλλει τα θερμικά και οπτικά χαρακτηριστικά των τύπων

κουφωμάτων, όπως τον συντελεστή θερμοπερατότητας, τον ηλιακό συντελεστή και τη διαπερατότητα ορατού φωτός. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται συνεπής και επαναλήψιμη μετάβαση μεταξύ των σεναρίων.

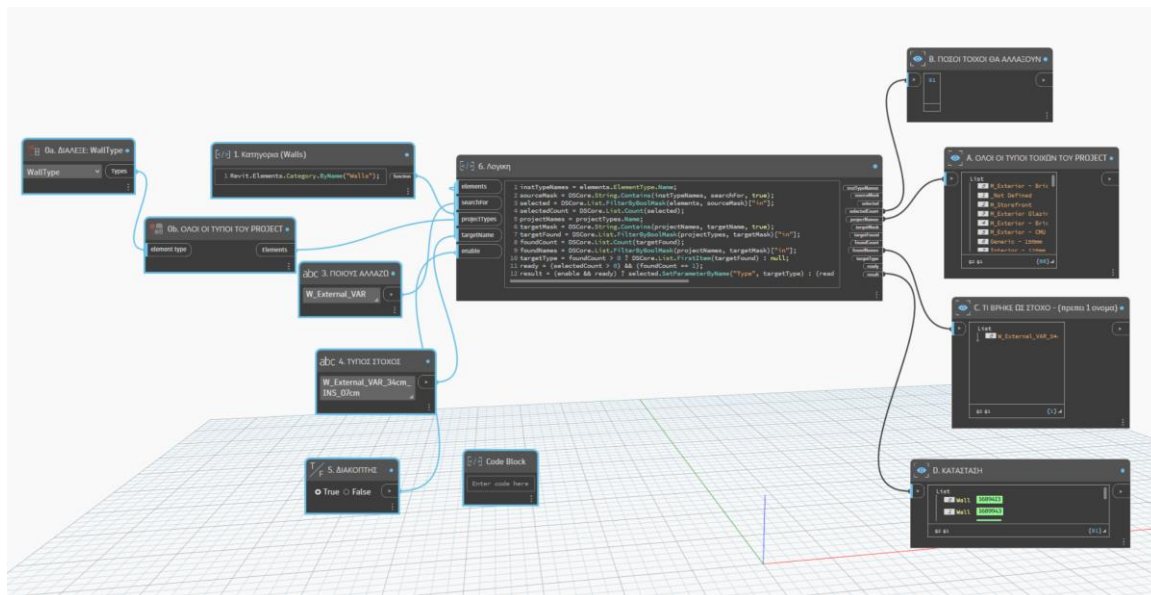
Η παραμετρική διερεύνηση οργανώθηκε ως σύνολο διακριτών σεναρίων για τα βασικά στοιχεία του κελύφους και των ανοιγμάτων. Για τους εξωτερικούς τοίχους, τα δώματα, τα κουφώματα και τις εξωτερικές θύρες ορίστηκαν εναλλακτικοί τύποι, οι οποίοι ενεργοποιούνται μέσω Dynamo στο ίδιο μοντέλο. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την ελεγχόμενη διερεύνηση τεχνικά εφαρμόσιμων παρεμβάσεων, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τις αβεβαιότητες της υφιστάμενης κατασκευής. Οι βασικές κατηγορίες μεταβλητών που παραμετροποιούνται περιλαμβάνουν:

- (i) τα θερμικά χαρακτηριστικά του κελύφους, όπως το επίπεδο θερμομονωτικής προστασίας των εξωτερικών τοίχων και της πλάκας που διαχωρίζει τον θερμαινόμενο από τον μη θερμαινόμενο χώρο κάτω από τη στέγη,
- (ii) τα χαρακτηριστικά των κουφωμάτων και των θυρών, όπως ο συντελεστής θερμοπερατότητας και ο ηλιακός συντελεστής,
- (iii) τη γεωμετρία και το βάθος στοιχείων σκίασης, και
- (iv) μορφολογικούς δείκτες, όπως ο λόγος διαφανών ανοιγμάτων προς όψη (WWR), όπου αυτό είναι τεχνικά εφαρμόσιμο χωρίς επέμβαση στον φέροντα οργανισμό.

Οι μεταβλητές ορίζονται με συγκεκριμένα εύρη τιμών ή με διακριτά σενάρια και συνοδεύονται από τεχνικούς περιορισμούς εφαρμοσιμότητας. Ενδεικτικά, οι μεταβολές περιορίζονται σε παρεμβάσεις που αφορούν το κέλυφος και τα δευτερεύοντα στοιχεία, χωρίς τροποποίηση του φέροντος οργανισμού. Η λογική αυτή ανταποκρίνεται στις πραγματικές δυνατότητες ενεργειακής αναβάθμισης υφιστάμενου σχολικού κτιρίου και διασφαλίζει ότι τα εξεταζόμενα σενάρια παραμένουν τεχνικά υλοποιήσιμα.

Η επιλογή των παραμέτρων βασίστηκε σε βιβλιογραφικά και κανονιστικά τεκμηριωμένους παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση, όπως η θερμομονωτική επάρκεια του κελύφους, η κατανομή και η ποιότητα των ανοιγμάτων και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των επεμβάσεων. Όπου υπήρχε αβεβαιότητα ως προς την υφιστάμενη κατάσταση, ορίστηκαν εναλλακτικά σενάρια

αναφοράς και αναβάθμισης, ώστε η αβεβαιότητα να αντιμετωπίζεται ως μέρος της διερεύνησης και όχι ως αυθαίρετη απλοποίηση.



Σχήμα 3.2 Στιγμιότυπο από το αρχείο Dynamo για την παραμετρική και μαζική μεταβολή του πάχους της θερμομόνωσης των εξωτερικών τοιχοποιιών.

Η αξιολόγηση των παραμετρικών σεναρίων πραγματοποιείται μέσω πολυκριτηριακού πλαισίου, με ενεργειακούς δείκτες και περιβαλλοντικές επιπτώσεις μέσω Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Για κάθε σενάριο τροποποιήθηκε ο αντίστοιχος τύπος δομικού στοιχείου στο μοντέλο Revit μέσω Dynamo και πραγματοποιήθηκε νέα ενεργειακή ανάλυση, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρήθηκαν σταθερές σύμφωνα με το μητρώο παραδοχών.

Στην παρούσα εργασία, το Dynamo χρησιμοποιήθηκε για τη συνεπή και ελεγχόμενη διαχείριση των παραμετρικών τύπων και την παραγωγή των εξεταζόμενων σεναρίων. Παρότι ο οπτικός προγραμματισμός μπορεί να υποστηρίξει πιο σύνθετες διαδικασίες αυτοματοποίησης και βελτιστοποίησης, αυτές δεν εφαρμόστηκαν στην παρούσα μελέτη.

3.6 Δείκτες αξιολόγησης και κριτήρια ερμηνείας αποτελεσμάτων

Η αξιολόγηση των εναλλακτικών σεναρίων πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα. Το πρώτο περιλαμβάνει τα ποσοτικά κριτήρια που συμμετέχουν στην τελική κατάταξη,

δηλαδή τον λειτουργικό και τον ενσωματωμένο άνθρακα. Το δεύτερο αφορά τον ποιοτικό προκαταρκτικό έλεγχο εφικτότητας των σεναρίων βάσει γεωμετρικών και λειτουργικών περιορισμών του υφιστάμενου κτιρίου. Ο έλεγχος αυτός δεν αποτελεί υπολογιστική αξιολόγηση φωτισμού ή θερμικής άνεσης.

Η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση ανά μονάδα επιφάνειας και το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα παρουσιάζονται ως ενημερωτικοί δείκτες και δεν συμμετέχουν ανεξάρτητα στην κατάταξη. Η επιλογή αυτή αποφεύγει τη διπλή προσμέτρηση της λειτουργικής διάστασης, καθώς η ενεργειακή κατανάλωση συνδέεται με τον λειτουργικό άνθρακα, ενώ το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα αποτελεί άθροισμα λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα. Επειδή ο επιφανειακός δείκτης και το αντίστοιχο απόλυτο μέγεθος μπορούν έτσι να δίνουν διαφορετική εικόνα της ίδιας επέμβασης, η τελική κατάταξη βασίζεται στα απόλυτα μεγέθη εκπομπών, τα οποία δεν εξαρτώνται από την επιφάνεια κανονικοποίησης.

Για την αποφυγή διαφοροποιήσεων στους επιφανειακούς δείκτες που οφείλονται αποκλειστικά στη μεταβολή της επιφάνειας αναφοράς μεταξύ των σεναρίων, για τη συγκριτική αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκε κοινή επιφάνεια αναφοράς ίση με $1.077,29 \text{ m}^2$. Η επιλογή αυτή εξασφαλίζει ότι ο δείκτης ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης ανά μονάδα επιφάνειας (EUI) υπολογίζεται για όλα τα σενάρια με τον ίδιο παρονομαστή. Οι συνολικές ετήσιες ενεργειακές καταναλώσεις των σεναρίων διατηρήθηκαν από τα αποτελέσματα της ενεργειακής προσομοίωσης και δεν απαιτήθηκε επανάληψη της προσομοίωσης. Για κάθε σενάριο, ο EUI επανυπολογίστηκε από τη συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση και την κοινή επιφάνεια αναφοράς. Με βάση την κοινή επιφάνεια, ο EUI διαμορφώνεται σε $142,19 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{έτος}$ για το T1, $137,77 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{έτος}$ για το T2 και $127,84 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{έτος}$ για το T3. Συνεπώς, η μετάβαση από το T1 στο T3 αντιστοιχεί σε μείωση του EUI κατά 10,1%, η οποία συμφωνεί με τη μείωση της απόλυτης ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης. Η κοινή επιφάνεια αναφοράς χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κανονικοποίηση των επιφανειακών δεικτών και δεν μεταβάλλει τις συνολικές ενεργειακές καταναλώσεις ή τις αντίστοιχες τιμές λειτουργικού και συνολικού άνθρακα.

Το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα κάθε σεναρίου υπολογίζεται ως:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{op}} + C_{\text{emb}} \quad (3.1) \text{ όπου:}$$

C_{tot} = συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα (kgCO_2e)

C_{op} = λειτουργικός άνθρακας (kgCO_2e)

C_{emb} = ενσωματωμένος άνθρακας

Ο λειτουργικός άνθρακας κάθε σεναρίου υπολογίζεται από τη συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση, τη διάρκεια της περιόδου αναφοράς και τον μέσο συντελεστή εκπομπών της τελικής ενέργειας: $C_{\text{op},i} = E_i \cdot t \cdot C_{f,i}$ (3.2) όπου:

E_i = συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση του σεναρίου i ($\text{kWh}/\text{έτος}$)

t = διάρκεια της περιόδου αναφοράς, $t = 20$ έτη

$C_{f,i}$ = μέσος συντελεστής εκπομπών της τελικής ενέργειας του σεναρίου i ($\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{kWh}$).

Ο δείκτης EUi κάθε σεναρίου υπολογίζεται από τη σχέση $\text{EUi} = E_i / A_{\text{ref}}$, όπου $A_{\text{ref}} = 1.077,29 \text{ m}^2$ είναι η κοινή επιφάνεια αναφοράς για όλα τα σενάρια.

Για τη συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων, οι δύο επιμέρους δείκτες κανονικοποιούνται με τη μέθοδο ελαχίστου-μεγίστου, ώστε να καταστούν αδιάστατοι και συγκρίσιμοι στην ίδια κλίμακα:

$$C^*_{\text{op},i} = \frac{C_{\text{op},i} - C_{\text{op},\min}}{C_{\text{op},\max} - C_{\text{op},\min}} \quad (3.3)$$

$$C^*_{\text{emb},i} = \frac{C_{\text{emb},i} - C_{\text{emb},\min}}{C_{\text{emb},\max} - C_{\text{emb},\min}} \quad (3.4) \text{ όπου:}$$

$C_{\text{op}/\text{emb},i}$ = λειτουργικός άνθρακας / ενσωματωμένος άνθρακας του σεναρίου i

$C_{\text{op}/\text{emb},\max}$ = μέγιστη τιμή λειτουργικού / ενσωματωμένου άνθρακα

$C_{\text{op}/\text{emb},\min}$ = ελάχιστη τιμή λειτουργικού / ενσωματωμένου άνθρακα.

όπου i είναι το εξεταζόμενο σενάριο, ενώ οι δείκτες $\min$ και $\max$ αντιστοιχούν στις ελάχιστες και μέγιστες τιμές του αντίστοιχου μεγέθους στο σύνολο των τριάντα δύο σεναρίων σχεδιασμού που συμμετέχουν στην τελική κατάταξη. Η $\min$ - $\max$ κανονικοποίηση εξαρτάται επομένως από το συγκεκριμένο σύνολο υποψηφίων σεναρίων και οι κανονικοποιημένες τιμές και ο σύνθετος δείκτης ισχύουν για το συγκεκριμένο σύνολο.

Ο σύνθετος δείκτης αξιολόγησης υπολογίζεται ως σταθμισμένο άθροισμα των κανονικοποιημένων τιμών: $Si = w_{\text{op}} C^*_{\text{op},i} + w_{\text{emb}} C^*_{\text{emb},i}$: (3.5)

$$\mu\epsilon: w_{op} + w_{emb} = 1 : (3.6)$$

όπου:

S_i = σύνθετος δείκτης αξιολόγησης του σεναρίου i

w_{op} = συντελεστής βαρύτητας του λειτουργικού άνθρακα

w_{emb} = συντελεστής βαρύτητας του ενσωματωμένου άνθρακα.

Επειδή χαμηλότερες εκπομπές αντιστοιχούν σε καλύτερη περιβαλλοντική επίδοση, χαμηλότερη τιμή του σύνθετου δείκτη υποδηλώνει ευνοϊκότερο σενάριο. Ως βασικό σχήμα στάθμισης υιοθετούνται ίσα βάρη ($w_{op} = w_{emb} = 0,50$), ώστε να μην εισαχθεί εκ των προτέρων προτεραιότητα σε κάποιο από τα δύο κριτήρια. Ο έλεγχος της επίδρασης των συντελεστών βαρύτητας στην κατάταξη εξετάζεται στο Κεφάλαιο 5 μέσω πέντε διαφορετικών σχημάτων στάθμισης.

Δεν πραγματοποιήθηκε ανεξάρτητη υπολογιστική αξιολόγηση φυσικού φωτισμού, οπτικής ή θερμικής άνεσης. Τα συγκεκριμένα ζητήματα χρησιμοποιήθηκαν μόνο στο πλαίσιο προκαταρκτικού ποιοτικού ελέγχου εφικτότητας, με βάση τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του υφιστάμενου κτιρίου. Επομένως, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας δεν τεκμηριώνουν ποσοτικά την επίδραση των εξεταζόμενων παρεμβάσεων στις συνθήκες φωτισμού ή άνεσης και απαιτείται ανεξάρτητη αξιολόγηση αυτών των παραμέτρων πριν από τη λήψη τελικών σχεδιαστικών αποφάσεων.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις προκύπτουν μέσω της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) και εκφράζονται κυρίως ως Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (Global Warming Potential - GWP) σε ισοδύναμα CO₂. Η σχετική περιβαλλοντική αποτίμηση παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040, ISO 14044 και EN 15978 (European Committee for Standardization, 2011; International Organization for Standardization, 2006a, 2006b).

Η τελική αξιολόγηση βασίζεται επομένως σε συγκρίσιμα ποσοτικά κριτήρια, ενώ ο καθορισμός των σεναρίων που συμμετέχουν στην τελική κατάταξη βασίζεται σε ποιοτικό προκαταρκτικό έλεγχο εφικτότητας βάσει γεωμετρικών και λειτουργικών περιορισμών. Ο έλεγχος αυτός δεν υποκαθιστά την αναλυτική αξιολόγηση φωτισμού, θερμικής άνεσης ή άλλων απαιτήσεων εσωτερικού περιβάλλοντος.

3.6.1 Διάκριση σεναρίων διερεύνησης και σεναρίων σχεδιασμού

Τα εξεταζόμενα σενάρια διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Τα σενάρια διερεύνησης χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ευαισθησίας και την ποσοτικοποίηση της επίδρασης επιμέρους παραμέτρων, χωρίς να συμμετέχουν στην τελική κατάταξη. Τα σενάρια σχεδιασμού αντιστοιχούν σε τεχνικά και λειτουργικά εφαρμόσιμες προτάσεις επέμβασης και αξιολογούνται συγκριτικά.

Η ένταξη ενός σεναρίου στην κατηγορία των σεναρίων σχεδιασμού προϋποθέτει τη σωρευτική ικανοποίηση των ακόλουθων κριτηρίων:

- (α) διατήρηση της επιφάνειας των διαφανών ανοιγμάτων των διδακτικών χώρων ως προκαταρκτικού γεωμετρικού και λειτουργικού περιορισμού,
- (β) μη επέμβαση στον φέροντα οργανισμό του κτιρίου, και
- (γ) διατήρηση της αρχιτεκτονικής ταυτότητας των όψεων.

Με βάση τον παραπάνω προκαταρκτικό έλεγχο εφικτότητας, τα σενάρια μεταβολής του λόγου διαφανών ανοιγμάτων προς όψη (WWR) δεν εντάχθηκαν στην τελική κατηγορία των τεχνικά εφαρμόσιμων σεναρίων σχεδιασμού. Οι εξεταζόμενες μεταβολές χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά για την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου. Η επιλογή αυτή δεν αποτελεί συμπέρασμα σχετικά με την επίδρασή τους στον φυσικό φωτισμό ή στη θερμική άνεση, καθώς οι παράμετροι αυτές δεν αξιολογήθηκαν υπολογιστικά. Πριν από την αξιοποίηση αντίστοιχων μεταβολών ως πραγματικών σχεδιαστικών λύσεων απαιτείται ανεξάρτητη αξιολόγηση φωτισμού, άνεσης και των λοιπών αρχιτεκτονικών και κατασκευαστικών περιορισμών.

3.7 Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA)

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση της παρούσας μελέτης βασίζεται στη μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA), σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044, τα οποία ορίζουν τη γενική δομή της απογραφής, της αξιολόγησης επιπτώσεων και της ερμηνείας αποτελεσμάτων (International Organization for Standardization, 2006b, 2006a).

Σε επίπεδο κτιρίου, η ανάλυση οργανώνεται σύμφωνα με το πρότυπο EN 15978, το οποίο καθορίζει τα στάδια του κύκλου ζωής και τα αντίστοιχα συστημικά

όρια. Στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκε περιορισμένη ή επιμέρους Ανάλυση Κύκλου Ζωής, με όρια A1-A3 και B6. Εξετάστηκαν, επομένως, το στάδιο παραγωγής των δομικών προϊόντων (A1-A3) και η λειτουργική κατανάλωση ενέργειας κατά τη χρήση του κτιρίου (B6). Δεν περιλαμβάνονται τα στάδια A4-A5, B4, C και D. Η περίοδος αναφοράς των 20 ετών αποτελεί μεθοδολογική παραδοχή της μελέτης και επηρεάζει τη σχετική στάθμιση μεταξύ λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα. Διαφορετική περίοδος αναφοράς ενδέχεται να μεταβάλει τη σχετική κατάταξη των εξεταζόμενων σεναρίων.

Για κάθε εξεταζόμενο σενάριο ορίστηκαν συγκεκριμένα υλικά και κατασκευαστικές συνθέσεις στο μοντέλο Revit. Τα υλικά αυτά αντιστοιχίστηκαν με τα αντίστοιχα διαθέσιμα περιβαλλοντικά δεδομένα της βιβλιοθήκης του εργαλείου περιβαλλοντικής αποτίμησης. Οι χρησιμοποιούμενοι περιβαλλοντικοί συντελεστές βασίζονται σε δεδομένα Περιβαλλοντικών Δηλώσεων Προϊόντος σύμφωνα με το πρότυπο EN 15804 (European Committee for Standardization, 2019), χωρίς να αντιστοιχούν κατ' ανάγκη σε συγκεκριμένο εμπορικό προϊόν ή σε μεμονωμένη Περιβαλλοντική Δήλωση Προϊόντος.

Η διασύνδεση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής με το μοντέλο BIM πραγματοποιήθηκε μέσω της εξαγωγής των ποσοτήτων των δομικών υλικών από το μοντέλο Revit και της αντιστοίχισής τους με τα αντίστοιχα περιβαλλοντικά δεδομένα της βιβλιοθήκης του εργαλείου. Με βάση την ποσότητα κάθε υλικού και τον αντίστοιχο περιβαλλοντικό συντελεστή υπολογίστηκε το ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα (Cemb) κάθε σεναρίου. Το λογιστικό όριο του Cemb περιλαμβάνει τόσο τα κοινά και αμετάβλητα υλικά που αποτυπώνονται στο περιβαλλοντικό μοντέλο όσο και τα υλικά που διαφοροποιούνται λόγω των εξεταζόμενων επεμβάσεων. Οι κοινές και αμετάβλητες ποσότητες αποτελούν κοινή συνιστώσα των σεναρίων και δεν αποδίδονται ως πρόσθετο περιβαλλοντικό φορτίο των επεμβάσεων ούτε επηρεάζουν τις μεταξύ τους διαφορές. Συνεπώς, οι απόλυτες τιμές Cemb εκφράζουν το ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα εντός του συγκεκριμένου λογιστικού ορίου, ενώ η επίδραση των επεμβάσεων ερμηνεύεται μέσω της μεταβολής του Cemb μεταξύ των συγκρινόμενων σεναρίων. Οι βασικές αντιστοιχίσεις υλικών και οι αντίστοιχοι συντελεστές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.16.

Ως βασικός δείκτης περιβαλλοντικής επίδοσης χρησιμοποιήθηκε το Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (Global Warming Potential - GWP), εκφρασμένο σε kgCO_2eq . Το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα κάθε σεναρίου προέκυψε από το άθροισμα του ενσωματωμένου και του λειτουργικού άνθρακα. Ο λειτουργικός άνθρακας υπολογίστηκε από τη συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση του σεναρίου, την περίοδο αναφοράς των 20 ετών και τον μέσο συντελεστή εκπομπών της τελικής ενέργειας Cf_i . Στο ενεργειακό μοντέλο περιλαμβάνονται η ηλεκτρική ενέργεια για ψύξη, φωτισμό και συσκευές, καθώς και το καύσιμο για το σύστημα θέρμανσης του κτιρίου. Ο Cf_i προκύπτει από τη σύνθεση των επιμέρους ενεργειακών καταναλώσεων του κάθε σεναρίου και των αντίστοιχων συντελεστών εκπομπών που εφαρμόζει το εργαλείο Autodesk Forma Carbon Insights. Επειδή η κατανομή της τελικής ενέργειας μεταβάλλεται μεταξύ των σεναρίων, ο μέσος συντελεστής Cf_i μεταβάλλεται επίσης.

Η ίδια περίοδος αναφοράς, τα ίδια συστημικά όρια και η ίδια βάση περιβαλλοντικών δεδομένων εφαρμόστηκαν σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια, ώστε η σύγκριση να βασίζεται αποκλειστικά στις διαφοροποιήσεις των υλικών, των κατασκευαστικών συνθέσεων και της λειτουργικής ενεργειακής επίδοσης που προκύπτουν από τις εξεταζόμενες παρεμβάσεις.

3.8 Περιορισμοί, αβεβαιότητες και έλεγχοι ποιότητας

Η μεθοδολογία παρουσιάζει περιορισμούς που σχετίζονται κυρίως με τη διαθεσιμότητα και την ακρίβεια των δεδομένων εισόδου. Η ανάλυση βασίζεται εν μέρει σε τεκμηριωμένες παραδοχές για τη σύσταση του κελύφους, τον τύπο των κουφωμάτων και την αεροστεγανότητα, λόγω μη πλήρους κατασκευαστικής τεκμηρίωσης. Οι θερμογέφυρες λαμβάνονται υπόψη προσεγγιστικά και όχι μέσω αναλυτικής αριθμητικής μεθόδου.

Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται από τη γεωμετρική συνέπεια του μοντέλου, την ορθή διαμόρφωση των θερμικών ζωνών και των λειτουργικών παραμέτρων σύμφωνα με την T.O.T.E.E., καθώς και την κατάλληλη αντιστοίχιση των

υλικών με περιβαλλοντικά δεδομένα. Το Revit και το Dynamo χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση και την παραμετρική διερεύνηση, ενώ η ενεργειακή και περιβαλλοντική αποτίμηση πραγματοποιήθηκε στο εξειδικευμένο εργαλείο της Ενότητας 3.4.

Η περιβαλλοντική αποτίμηση περιορίζεται στα στάδια A1–A3 και B6. Η βάση περιβαλλοντικών συντελεστών δεν διαφοροποιεί τον ενσωματωμένο άνθρακα βάσει όλων των επιμέρους τεχνικών ιδιοτήτων της υάλωσης. Οι διαφοροποιήσεις του Cemb στα σενάρια κουφωμάτων συνδέονται με τις ποσότητες και τις αναθέσεις υλικών του περιβαλλοντικού μοντέλου, ενώ η ενεργειακή διαφοροποίηση αποτυπώνεται μέσω του Cor. Επιπλέον, ορισμένα δομικά στοιχεία διατηρούν προεπιλεγμένους τύπους του λογισμικού, γεγονός που εισάγει περιορισμένη αβεβαιότητα στον υπολογισμό του ενσωματωμένου άνθρακα.

Η αύξηση του πάχους των εξωτερικών τοιχοποιιών επηρεάζει την οριοθέτηση των οριζόντιων δομικών στοιχείων, μειώνοντας την επιφάνεια και τις αντίστοιχες ποσότητες υλικού σε πλάκες, δάπεδα και δώμα. Ως αποτέλεσμα, η αύξηση του ενσωματωμένου άνθρακα των τοιχοποιιών αντισταθμίζεται εν μέρει από τη μείωση των υπόλοιπων στοιχείων. Η επίδραση αυτή αποτελεί συνέπεια της γεωμετρικής συνέπειας του ψηφιακού μοντέλου και λαμβάνεται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Για τον έλεγχο ποιότητας πραγματοποιήθηκε επανέλεγχος των πρωτογενών αποτελεσμάτων ως προς την εσωτερική τους συνέπεια. Ελέγχθηκαν η σχέση μεταξύ λειτουργικού, ενσωματωμένου και συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος, η συνέπεια μεταξύ των ποσοτήτων υλικών, των αντίστοιχων περιβαλλοντικών συντελεστών και των υπολογιζόμενων τιμών ενσωματωμένου άνθρακα, καθώς και η μεταβολή του συνεπαγόμενου συντελεστή εκπομπών της τελικής ενέργειας μεταξύ των σεναρίων. Σε περιπτώσεις εντοπισμού ασυνεπειών πραγματοποιήθηκε επανέλεγχος και, όπου απαιτήθηκε, επανεκτέλεση του αντίστοιχου σεναρίου. Οι βασικές αβεβαιότητες καταγράφονται στο Μητρώο Δεδομένων και Παραδοχών, μαζί με την προέλευση και τον βαθμό αβεβαιότητας των αντίστοιχων παραμέτρων.

4. Πιλοτική Εφαρμογή - Μελέτη Περίπτωσης

Η πιλοτική εφαρμογή της παρούσας εργασίας αποσκοπεί στην αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας μέσω της εφαρμογής της σε υφιστάμενη σχολική μονάδα. Η μελέτη περίπτωσης λειτουργεί ως πεδίο ελέγχου της αποτελεσματικότητας του συνδυασμού Building Information Modeling (BIM), παραμετρικής μοντελοποίησης, ενεργειακής προσομοίωσης και Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA), με στόχο τη διερεύνηση βιώσιμων σεναρίων ενεργειακής και περιβαλλοντικής αναβάθμισης. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται η υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου, η ανάπτυξη του ψηφιακού μοντέλου, η παραμετροποίηση των βασικών στοιχείων του κελύφους και των κουφωμάτων, η διαμόρφωση των θερμικών ζωνών και των σεναρίων αναβάθμισης, καθώς και η διαδικασία ενεργειακής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης.

4.1 Περιγραφή υφιστάμενου σχολικού κτιρίου

Η μελέτη περίπτωσης αφορά το 30^ο Δημοτικό Σχολείο Θεσσαλονίκης, το οποίο βρίσκεται εντός του αστικού ιστού της Θεσσαλονίκης και εντάσσεται στην κλιματική ζώνη Γ, σύμφωνα με την ελληνική ταξινόμηση κλιματικών ζωνών (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2010).

Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία του κτιρίου, η κατασκευή του χρονολογείται στο 1999. Το κτίριο αναπτύσσεται σε τέσσερα επίπεδα, αποτελούμενα από υπόγειο, ισόγειο, πρώτο και δεύτερο όροφο, και έχει συνολική επιφάνεια δόμησης 1.643 m² υπέρ το έδαφος, πλέον 380 m² υπογείου. Η κάτοψη έχει μορφή «Γ» και περιλαμβάνει αίθουσες διδασκαλίας, χώρους κυκλοφορίας και βοηθητικούς χώρους.

Τα βασικά γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του κτιρίου που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του ψηφιακού μοντέλου συνοψίζονται στην υποενότητα 4.2.



Εικόνα 4.1 Φωτογραφίες του σχολικού κτιρίου από την επιτόπια αυτοψία.

4.2 Ανάπτυξη ψηφιακού μοντέλου (BIM)

Για τη μελέτη περίπτωσης αναπτύχθηκε ψηφιακό μοντέλο του 30ού Δημοτικού Σχολείου Θεσσαλονίκης στο Autodesk Revit, με βάση τα διαθέσιμα σχέδια του φακέλου της οικοδομικής άδειας και την επιτόπια τεκμηρίωση της υφιστάμενης κατάστασης. Στο μοντέλο αποδόθηκαν η γεωμετρία του κτιρίου, τα επίπεδα, οι χώροι, τα δομικά στοιχεία, οι κατασκευαστικές συνθέσεις και τα ανοίγματα, με τις αντίστοιχες ιδιότητές τους.

Το ψηφιακό μοντέλο δημιουργήθηκε εξ ολοκλήρου στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Δεν παρελήφθη υφιστάμενο μοντέλο BIM· ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά τα δισδιάστατα σχέδια του φακέλου της οικοδομικής άδειας και η επιτόπια φωτογραφική και διαστασιολογική τεκμηρίωση της υφιστάμενης κατάστασης. Η γεωμετρία, οι κατασκευαστικές συνθέσεις, οι τύποι κουφωμάτων, οι χώροι και οι θερμικές ζώνες αποδόθηκαν από τη συγγραφέα.

Η δομή του μοντέλου οργανώθηκε έτσι ώστε τα στοιχεία του κελύφους και των κουφωμάτων να μπορούν να τροποποιούνται παραμετρικά για την εφαρμογή των εξεταζόμενων σεναρίων. Το μοντέλο αποτέλεσε τη βάση για την επακόλουθη παραμετρική διαχείριση μέσω Dynamo και την ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση των σεναρίων.

4.2.1 Γεωμετρική και κατασκευαστική αποτύπωση

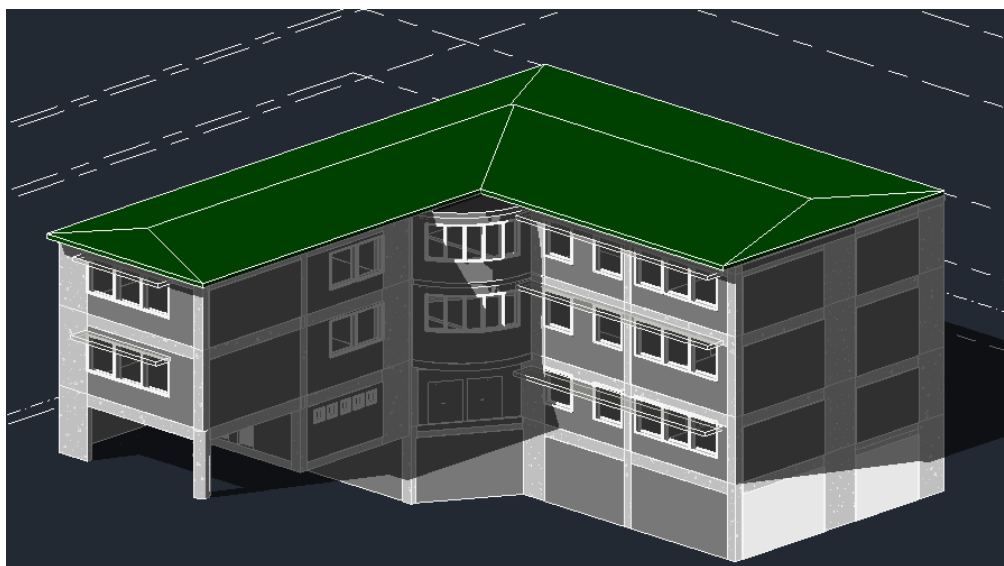
Η γεωμετρία του κτιρίου αποδόθηκε στο BIM μοντέλο σύμφωνα με τα διαθέσιμα σχέδια και την επιτόπια τεκμηρίωση. Αποτυπώθηκαν τα επίπεδα, οι βασικές διαστάσεις, οι χώροι και η γεωμετρική διάταξη των επιμέρους τμημάτων του κτιρίου.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1, ενώ η τρισδιάστατη απεικόνιση του κτιρίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.2.

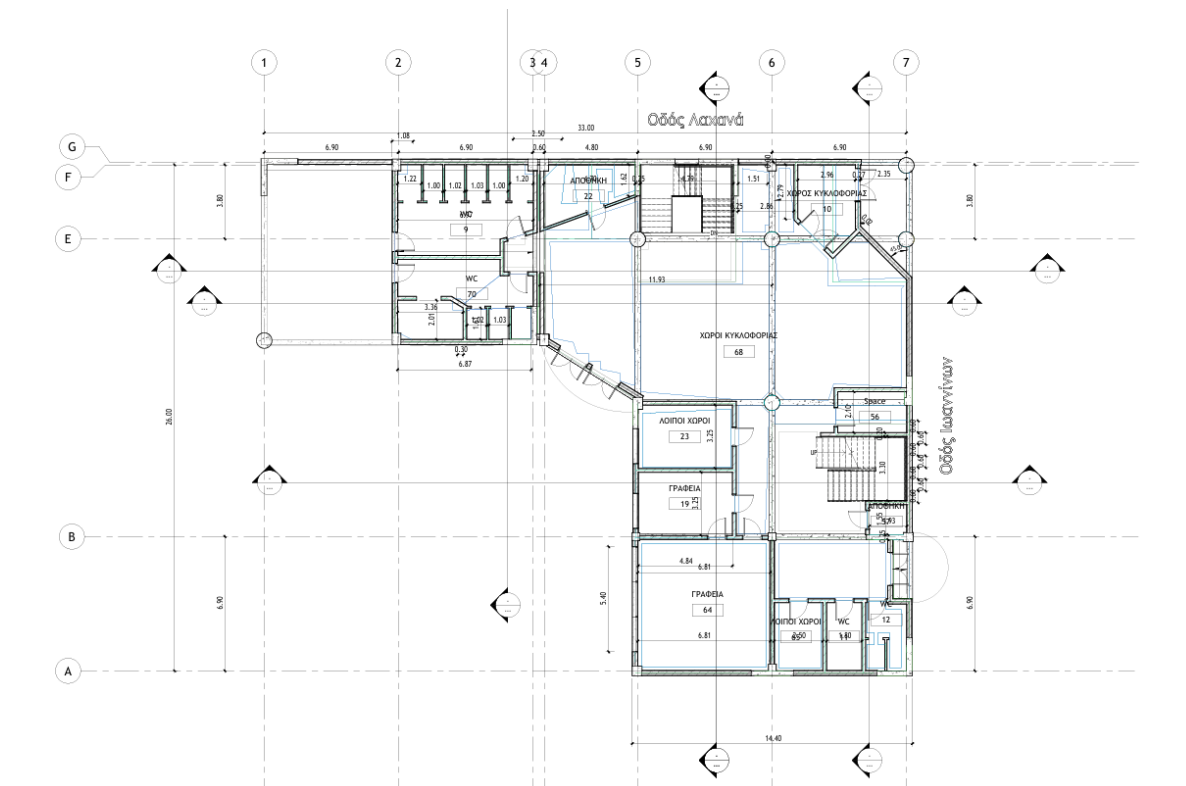
Πίνακας 4.1 Βασικά χαρακτηριστικά του υφιστάμενου σχολικού κτιρίου.

Χαρακτηριστικό	Τιμή	Πηγή
Έτος έκδοσης οικοδομικής άδειας	1999	Φάκελος οικοδομικής άδειας
Κλιματική ζώνη	Γ	KENAK
Στοιχεία φακέλου οικοδομικής άδειας		
Αριθμός επιπέδων	3 όροφοι υπέρ το έδαφος + υπόγειο	Φάκελος οικοδομικής άδειας

Γεωμετρική μορφή κάτοψης	«Γ»	Αρχιτεκτονικά σχέδια
Ωράριο λειτουργίας	8:00-14:00 (μία πρωινή βάρδια)	Μελέτη παθητικής πυροπροστασίας (1997)
Στοιχεία ενεργειακού μοντέλου		
Επιφάνεια αναφοράς ενεργειακής αποτίμησης	1.077 m ²	Εργαλείο ενεργειακής αποτίμησης
Αριθμός θερμικών ζωνών	29 (6 τύποι χρήσης)	Αναλυτικό Ενεργειακό Μοντέλο (Revit)
Όγκος θερμικών ζωνών	2.972 m ³	Αναλυτικό Ενεργειακό Μοντέλο (Revit)



Εικόνα 4.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση της υπό ανάλυση σχολικής μονάδας μέσω Revit.



Εικόνα 4.3 Κάτοψη ισογείου από το λογισμικό Revit.

4.2.2 Κέλυφος και δομικά στοιχεία

Τα βασικά δομικά στοιχεία του κελύφους μοντελοποιήθηκαν στο Revit ως σύνθετες κατασκευές με διακριτές στρώσεις υλικών. Σε κάθε στρώση αποδόθηκαν οι απαιτούμενες θερμοφυσικές ιδιότητες, όπως η θερμική αγωγιμότητα, η πυκνότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα, με βάση τις παραδοχές του Κεφαλαίου 3 και την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2017 (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2017a).

Για τον καθορισμό του θερμικού ορίου του κτιρίου εξετάστηκε η πραγματική σχέση των δομικών στοιχείων με τους θερμαινόμενους και μη θερμαινόμενους χώρους. Στο ανώτατο επίπεδο, ως θερμικό όριο θεωρήθηκε η οριζόντια πλάκα οροφής, πάνω από την οποία τοποθετούνται οι στρώσεις θερμομόνωσης, στεγάνωσης και ρύσεων.

Η υπερκείμενη κεκλιμένη στέγη δεν θεωρήθηκε τμήμα του θερμικού κελύφους, καθώς ο χώρος μεταξύ της πλάκας και της στέγης αντιμετωπίστηκε ως μη θερμαινόμενος. Η στέγη μοντελοποιήθηκε ως γεωμετρικό στοιχείο και χρησιμοποιήθηκε στην ενεργειακή ανάλυση ως επιφάνεια σκίασης.

Ο χώρος μεταξύ της πλάκας και της κεκλιμένης στέγης θεωρήθηκε ως μη θερμαινόμενος χώρος. Στο ενεργειακό μοντέλο η κεκλιμένη στέγη δεν αποτελεί τμήμα του θερμικού κελύφους και συμμετέχει αποκλειστικά ως επιφάνεια σκίασης, ενώ το θερμικό όριο ορίζεται στην οριζόντια πλάκα, επί της οποίας τοποθετείται η θερμομονωτική στρώση στα σενάρια αναβάθμισης. Δεν πραγματοποιήθηκε σύγκριση με εναλλακτική διαμόρφωση της πλάκας έδρασης της στέγης, επομένως δεν εξάγονται συμπεράσματα ως προς την επίδραση της γεωμετρίας της στέγης.

Για την υφιστάμενη κατάσταση χρησιμοποιήθηκαν οι κατασκευαστικές συνθέσεις που προέκυψαν από τα διαθέσιμα στοιχεία και τις παραδοχές της μελέτης. Στα σενάρια αναβάθμισης τροποποιήθηκαν οι αντίστοιχες στρώσεις του κελύφους, σύμφωνα με τις εξεταζόμενες επεμβάσεις. Οι αναλυτικές κατασκευαστικές συνθέσεις και οι αντίστοιχες τιμές θερμοπερατότητας παρουσιάζονται στις επόμενες υποενότητες.

Πίνακας 4.2 Κατηγορίες δομικών στοιχείων και αντιμετώπισή τους στο BIM μοντέλο.

Κατηγορία δομικού στοιχείου	Επαφή / θέση	Μοντελοποίηση στο Revit	Θερμικός ρόλος
Εξωτερικοί τοίχοι	Εξωτερικός αέρας	Σύνθετο δομικό στοιχείο	Θερμικό όριο
Δάπεδα σε επαφή με εξωτερικό αέρα	Εξωτερικό περιβάλλον	Σύνθετο δομικό στοιχείο	Θερμικό όριο
Δάπεδα σε επαφή με έδαφος	Έδαφος	Σύνθετο δομικό στοιχείο	Θερμικό όριο
Τοιχώματα υπογείου	Έδαφος	Σύνθετο δομικό στοιχείο	Θερμικό όριο
Πλάκα οροφής κάτω από τη στέγη	Πάνω από μη θερμαινόμενο χώρο	Γενικό/σύνθετο δομικό στοιχείο	Θερμικό όριο

4.2.3 Κουφώματα και στοιχεία σκίασης

Για κάθε διάσταση κουφώματος δημιουργήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί τύποι στο Revit. Οι τρεις αντιστοιχούν στα βασικά σενάρια T1, T2 και T3, ενώ ο τέταρτος χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση ευαισθησίας T3.x, με μεταβολή των ιδιοτήτων (U_w), (g) και VT.

Επιπλέον, στο πλαίσιο της παραμετρικής διερεύνησης εξετάστηκε η μεταβολή του λόγου διαφανών ανοιγμάτων προς τη συνολική επιφάνεια της όψης (Window-to-

Wall Ratio, WWR). Η μεταβολή του WWR υλοποιήθηκε γεωμετρικά μέσω αύξησης ή μείωσης της επιφάνειας των κουφωμάτων, χωρίς μεταβολή των λοιπών χαρακτηριστικών τους.

Η υφιστάμενη σκίαση του κτιρίου αποτυπώθηκε στο BIM μοντέλο και διατηρήθηκε στα βασικά σενάρια T1, T2 και T3. Επιπλέον, στο πλαίσιο της ανάλυσης ευαισθησίας εξετάστηκε η προσθήκη πρόσθετων οριζόντιων στοιχείων σκίασης στις όψεις του κτιρίου. Τα στοιχεία αυτά προσομοιώθηκαν ως οριζόντιες προεξοχές τύπου προβόλου από οπλισμένο σκυρόδεμα, αντίστοιχες με κατασκευαστική επέκταση των υφιστάμενων πλακών/προβόλων, και η επίδρασή τους διερευνήθηκε μέσω παραμετρικής μεταβολής του βάθους τους.

Πίνακας 4.3 Εξεταζόμενες παράμετροι και τρόπος παραμετρικής μεταβολής.

Παράμετρος	Συμβολισμός	Περιγραφή	Τρόπος μεταβολής
Συντελεστής θερμοπερατότητας κουφώματος	Uw	Θερμική επίδοση κουφώματος	Μεταβολή ανά σενάριο
Ηλιακός συντελεστής διείσδυσης	g-value	Ηλιακά κέρδη μέσω υαλοπίνακα	Μεταβολή ανά σενάριο
Διαπερατότητα ορατού φωτός	VT	Διέλευση φυσικού φωτός	Μεταβολή ανά σενάριο
Λόγος ανοίγματος προς όψη	WWR	Ποσοστό διαφανών ανοιγμάτων στην όψη	Γεωμετρική μεταβολή
Πρόσθετη σκίαση Οριζόντιοι πρόβολοι από Ο/Σ	-	Πρόβολοι	Μεταβολή γεωμετρίας

4.2.4 Θερμικές ζώνες και λειτουργικά δεδομένα

Οι εσωτερικοί χώροι του κτιρίου οργανώθηκαν σε θερμικές ζώνες με βάση τη λειτουργία τους, ώστε να αποτυπώνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια οι πραγματικές συνθήκες χρήσης και οι αντίστοιχες ενεργειακές απαιτήσεις. Οι βασικές κατηγορίες ζωνών περιλαμβάνουν τις αίθουσες διδασκαλίας, τους χώρους κυκλοφορίας, τα γραφεία, τους χώρους βιβλιοθήκης και σταθερών καθισμάτων, τους χώρους υγιεινής και τους βοηθητικούς χώρους.

Σε κάθε τύπο χώρου αποδόθηκαν οι απαιτούμενες λειτουργικές παράμετροι του ενεργειακού μοντέλου, σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017, όπως η πυκνότητα πληρότητας, τα εσωτερικά θερμικά κέρδη, η ισχύς φωτισμού και εξοπλισμού, ο νωπός αέρας και οι θερμοκρασίες θέρμανσης και ψύξης. Οι βασικές παραδοχές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4 Βασικές λειτουργικές παραδοχές ανά τύπο χώρου στο ενεργειακό μοντέλο.

Τύπος χώρου	Επ. ανά άτομο (m ² /άτομο)	Αισθητό θερμ. κέρδος ανά άτομο (W)	Λανθάνον θερμικό κέρδος ανά άτομο (W)	Φωτισμός (W/m ²)	Εξοπλισμός (W/m ²)	Νωπός αέρας ανά άτομο (L/s)	Νωπός αέρας ανά επιφάνεια (L/s·m ²)	Θέρμανση (°C)	Ψύξη (°C)
Αίθουσα Διδασκαλίας	2,00	75,00	55,00	10,00	3,50	4,72	0,61	20,00	26,00
Γραφείο	10,00	75,00	55,00	14,00	12,00	4,72	0,00	20,00	26,00
Βιβλιοθήκη / Σταθερά καθίσματα	4,50	75,00	55,00	15,00	4,00	4,72	0,61	20,00	26,00
Χώροι κυκλοφορίας	15,00	75,00	55,00	4,00	0,00	0,00	0,61	20,00	26,00
Αποθήκη	30,00	0,00	0,00	3,00	0,00	0,00	0,20	18,00	26,00
Χώροι υγιεινής	20,00	0,00	0,00	6,00	0,00	0,72	1,60	20,00	26,00

Το Αναλυτικό Ενεργειακό Μοντέλο περιλαμβάνει συνολικά 38 αναλυτικούς χώρους. Από αυτούς, 29 αποδόθηκαν σε έξι διακριτούς τύπους θερμικών ζωνών, με συνολική επιφάνεια 876 m² και συνολικό όγκο 2.972 m³, ενώ οι υπόλοιποι αντιστοιχούν σε βοηθητικούς και μη θερμαινόμενους όγκους του κτιρίου. Η κατανομή των ζωνών ανά τύπο χώρου παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5 Θερμικές ζώνες του ενεργειακού μοντέλου: πλήθος χώρων, επιφάνεια και όγκος.

Τύπος θερμικής ζώνης	Πλήθος χώρων	Επιφάνεια (m ²)	Όγκος (m ³)	Μέσο ύψος (m)
Αίθουσα Διδασκαλίας	11	463	1.617,1	3,49
Χώροι κυκλοφορίας	3	192	663,6	3,46
Γραφείο	5	103	341,0	3,31
Χώροι υγιεινής (WC)	6	82	232,6	2,84
Βιβλιοθήκη / σταθερά καθίσματα	1	25	76,8	3,07
Αποθήκη	3	11	40,5	3,68
Σύνολο θερμικών ζωνών	29	876	2.971,5	3,39

Σημείωση: Οι επιφάνειες προκύπτουν από τον πίνακα αναλυτικών χώρων του Revit, στρογγυλοποιημένες σε ακέραια m². τα αθροίσματα φέρουν αντίστοιχη μικρή απόκλιση.

4.2.5 Παραμετρική διαχείριση μέσω Dynamo

Για την αυτοματοποίηση των απαιτούμενων τροποποιήσεων του ψηφιακού μοντέλου αναπτύχθηκαν scripts στο περιβάλλον Dynamo και συνδέθηκαν με το μοντέλο του Revit. Μέσω των διαδικασιών αυτών πραγματοποιήθηκαν οι παραμετρικές μεταβολές των στοιχείων που εξετάστηκαν στα επιμέρους σενάρια.

Η χρήση του Dynamo επέτρεψε την επαναλαμβανόμενη εφαρμογή των ίδιων διαδικασιών για διαφορετικές τιμές παραμέτρων, περιορίζοντας τις χειροκίνητες τροποποιήσεις και εξασφαλίζοντας συνεπή εφαρμογή των μεταβολών μεταξύ των σεναρίων.

Πίνακας 4.6 Βασικά script στο πρόγραμμα Dynamo.

Script	Είσοδος	Επεξεργασία	Έξοδος	Αυτοματοποιημένη ενέργεια
Script 1	Τύπος στοιχείου	Επιλογή στοιχείων	Νέος τύπος	Αντικατάσταση δομικού τύπου
Script 2	Τύπος κουφώματος + παράμετροι	Επιλογή οικογενειών/τύπων	Νέες ιδιότητες	Ενημέρωση κουφωμάτων

4.3 Παραμετρική διαμόρφωση και σενάρια

Ως σενάριο αναφοράς για την ανάλυση ευαισθησίας ορίστηκε το T3, το οποίο αντιστοιχεί στη βασική διαμόρφωση ενεργειακής αναβάθμισης του σχολικού κτιρίου. Από το T3 προέκυψαν οι επιμέρους παραλλαγές T3.x, μέσω της συστηματικής μεταβολής επιλεγμένων παραμέτρων του κελύφους, των κουφωμάτων και των στοιχείων σκίασης. Τα εξεταζόμενα σενάρια περιλαμβάνουν τη θερμική αναβάθμιση του κελύφους, τη μεταβολή των θερμικών και οπτικών χαρακτηριστικών των κουφωμάτων, τη μεταβολή του WWR, τη μεταβολή των στοιχείων σκίασης και, σε επόμενο στάδιο, επιλεγμένους συνδυασμούς των παραμέτρων αυτών.

Η παραμετρική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε αρχικά με μεταβολή μίας παραμέτρου κάθε φορά, ενώ οι υπόλοιπες βασικές παραδοχές του T3 διατηρήθηκαν σταθερές. Με βάση τα αποτελέσματα της επιμέρους διερεύνησης επιλέχθηκαν στη συνέχεια συνδυασμοί παραμέτρων για την περαιτέρω αξιολόγηση της συνολικής τους επίδρασης. Η εφαρμογή των σεναρίων πραγματοποιήθηκε μέσω των παραμετρικών τύπων του Revit και των διαδικασιών Dynamo. Οι εξεταζόμενες παράμετροι, οι αντίστοιχες τιμές ή περιοχές μεταβολής και οι περιορισμοί εφαρμοσιμότητας παρουσιάζονται στην Ενότητα 4.7.

Πίνακας 4.7 Πίνακας σεναρίων και χαρακτηριστικών T1-T2-T3.

Σενάριο	Κατάσταση κτιρίου	Περιγραφή σεναρίου	Ρόλος στην αξιολόγηση
T1	Αρχική θερμική κατάσταση χωρίς τεκμηριωμένη θερμομόνωση	Αρχική διαμόρφωση του κτιρίου σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία και τις παραδοχές της μελέτης.	Συντηρητικό σενάριο αναφοράς
T2	Αρχική θερμική κατάσταση με περιορισμένη θερμομόνωση (εναλλακτική παραδοχή)	Εναλλακτική αρχική παραδοχή περιορισμένης θερμομονωτικής προστασίας, η οποία χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας ως προς την υφιστάμενη κατάσταση.	Εναλλακτικό σενάριο αναφοράς

Παράμετρος	Σύμβολο	Μονάδα	T1	T2	T3	T3.x (εύρος διερεύνησης)
Θερμομόνωση εξωτ. τοιχοποιίας	d	cm	-	2	7	5 - 11 cm
Θερμοπερατότητα εξωτ. τοιχοποιίας	U	W/m ² K	1,44	0,91	0,39	μεταβλητή
Θερμομόνωση πλάκας σε επαφή με ΜΘΧ (στέγη)	d	cm	-	4	10	6 - 14 cm
Θερμοπερατότητα πλάκας σε επαφή με ΜΘΧ (στέγη)	U	W/m ² K	2,49	0,71	0,31	μεταβλητή
Θερμομόνωση τοιχωμάτων υπογείου	d	cm	-	3	10	6 - 12 cm
Θερμοπερατότητα τοιχωμάτων υπογείου	U	W/m ² K	2,68	0,91	0,31	μεταβλητή
Θερμομόνωση δαπέδου επί εδάφους	d	cm	-	3	10	6 - 12 cm
Θερμοπερατότητα δαπέδου επί εδάφους	U	W/m ² K	2,20	0,83	0,30	μεταβλητή
Θερμομόνωση δαπέδου σε εξωτ. αέρα	d	cm	-	3	10	6 - 14 cm
Θερμοπερατότητα δαπέδου σε εξωτ. αέρα	U	W/m ² K	2,13	0,82	0,30	μεταβλητή
Θερμοπερατότητα κουφωμάτων	Uw	W/m ² K	6,00	4,50	1,40	2,80 - 0,80
Ηλιακός συντελεστής	g	-	0,85	0,70	0,45	0,65 - 0,39
Διαπερατότητα ορατού φωτός	VT	-	0,85	0,78	0,60	0,70 - 0,52
Λόγος ανοιγμάτων προς όψη	WWR	%	22	22	22	WWR×0,25 - WWR×1,50
Πρόσθετη σκίαση	d	cm	-	-	-	0 - 120 cm
T3	Αναβαθμισμένη κατάσταση	Εφαρμογή της βασικής δέσμης επεμβάσεων θερμομονωτικής αναβάθμισης στο κέλυφος και στα δομικά στοιχεία του κτιρίου.			Βασικό σενάριο αναφοράς για την ανάλυση ευαισθησίας	
T3.x	Ανάλυση ευαισθησίας	Παραλλαγές του T3, στις οποίες μεταβάλλονται συστηματικά οι εξεταζόμενες παράμετροι.			Ανάλυση ευαισθησίας και διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων	

Πίνακας 4.8 Βασικές παράμετροι των σεναρίων.

Σημείωση: Το T3.x αφορά τις παραλλαγές του σεναρίου T3 στο πλαίσιο της ανάλυσης ευαισθησίας. Οι λειτουργικές παράμετροι του ενεργειακού μοντέλου - ωράριο και περίοδος λειτουργίας,

πυκνότητα πληρότητας, εσωτερικά θερμικά κέρδη, εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού και εξοπλισμού, παροχή νωπού αέρα, κλάση διείσδυσης αέρα, σύστημα HVAC και βαθμοί απόδοσης, καθώς και οι θερμοκρασίες σχεδιασμού θέρμανσης και ψύξης - διατηρήθηκαν ταυτόσημες σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια, με τις τιμές των Πινάκων 4.4 και 4.17. Οι μεταβολές αφορούν αποκλειστικά τα δομικά στοιχεία του κελύφους, τα ανοίγματα και τα στοιχεία σκίασης, ώστε οι διαφορές των αποτελεσμάτων να αποδίδονται μονοσήμαντα στις εξεταζόμενες παρεμβάσεις. Οι μεταβολές πραγματοποιούνται μία παράμετρο κάθε φορά, με τις υπόλοιπες σταθερές στις τιμές του T3.

4.4 Ενεργειακή αξιολόγηση

Η ενεργειακή αξιολόγηση των σεναρίων βασίστηκε στο τρισδιάστατο μοντέλο BIM που αναπτύχθηκε στο Revit. Αρχικά ορίστηκαν η γεωμετρία του κτιρίου, οι χώροι, τα δομικά στοιχεία και τα υλικά, καθώς και οι απαιτούμενες παράμετροι για την ενεργειακή ανάλυση. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε από το μοντέλο του Revit το Αναλυτικό Ενεργειακό Μοντέλο (Energy Analytical Model - EAM) και πραγματοποιήθηκε η ενεργειακή ανάλυση μέσω του Autodesk Forma Carbon Insights.

Πριν από την ανάλυση καθορίστηκαν η γεωγραφική θέση, ο τύπος του κτιρίου, τα λειτουργικά προγράμματα και οι θερμικές ζώνες. Οι βασικές ρυθμίσεις διατηρήθηκαν σταθερές μεταξύ των σεναρίων, ενώ για κάθε σενάριο μεταβλήθηκαν μόνο οι προκαθορισμένες παραμετρικές τιμές, ώστε οι διαφορές στα αποτελέσματα να αποδίδονται στις εξεταζόμενες παρεμβάσεις.

4.4.1 Εξωτερική τοιχοποιία

Η αναλυτική στρωματογραφία της εξωτερικής τοιχοποιίας για τα σενάρια T1, T2 και T3 παρουσιάζεται στους Πίνακες 4.9-4.11. Οι τιμές των θερμικών αντιστάσεων υπολογίστηκαν με βάση το πάχος και τη θερμική αγωγιμότητα των επιμέρους στρώσεων, ενώ στον συνολικό υπολογισμό συνυπολογίστηκαν οι επιφανειακές θερμικές αντιστάσεις εσωτερικής και εξωτερικής πλευράς.

Σημείωση: Οι τιμές των Πινάκων 4.4 και 4.9-4.15 προέρχονται από βιβλιογραφικές τιμές και παραδοχές της μελέτης, εκτός όπου δηλώνεται διαφορετικά.

Πίνακας 4.9 Στρωματογραφία εξωτερικού τοίχου - Σενάριο T1.

A/A	Στρώση	Πάχος (m)	λ (W/mK)	R (m ² K/W)
1	Εξωτερικό Επίχρισμα	0,02	0,87	0,02
2	Τοιχοποιία	0,09	0,72	0,13
3	Διάκενο αέρα	0,05	0,22	0,23
4	Τοιχοποιία	0,09	0,72	0,13
5	Εσωτερικό Επίχρισμα	0,02	0,87	0,02

Συνολικό πάχος δομικού στοιχείου:	0,27
Συνολικό R:	0,52
$R_{tot}=R+0,13+0,04$	0,69
$U = 1/ R_{tot}$:	1,44

Το σενάριο T1 αντιπροσωπεύει την υφιστάμενη κατάσταση της εξωτερικής τοιχοποιίας, με διπλή τοιχοποιία και ενδιάμεσο διάκενο αέρα, χωρίς τεκμηριωμένη θερμομονωτική στρώση.

Πίνακας 4.10 Στρωματογραφία εξωτερικού τοίχου - Σενάριο T2.

A/A	Στρώση	Πάχος (m)	λ (W/mK)	R (m ² K/W)
1	Εξωτερικό Επίχρισμα	0,02	0,87	0,02
2	Τοιχοποιία	0,09	0,72	0,13
3	Διάκενο αέρα	0,03	0,22	0,14
4	Θερμομόνωση (Διογκωμένη πολυστερίνη)	0,02	0,04	0,50
5	Τοιχοποιία	0,09	0,72	0,13
6	Εσωτερικό Επίχρισμα	0,02	0,87	0,02
Συνολικό πάχος δομικού στοιχείου:				0,27
Σύνολο R:				0,93
$R_{tot}=R+0,13+0,04$				1,10
$U = 1/ R_{tot}$:				0,91

Στο σενάριο T2 εξετάζεται η ύπαρξη περιορισμένης θερμομονωτικής στρώσης εντός της τοιχοποιίας, σε συνδυασμό με το διάκενο αέρα. Η παραδοχή αυτή χρησιμοποιείται ως ενδιάμεση εκδοχή μεταξύ της υφιστάμενης κατάστασης και της πλήρους θερμομονωτικής αναβάθμισης.

Πίνακας 4.11 Στρωματογραφία εξωτερικού τοίχου - Σενάριο T3.

A/A	Στρώση	Πάχος (m)	λ (W/mK)	R (m ² K/W)
1	Εξωτερικό Επίχρισμα	0,02	0,87	0,02
2	Νέα Θερμομόνωση (Πετροβάμβακας)	0,07	0,037	1,89
3	Τοιχοποιία	0,09	0,72	0,13
4	Διάκενο αέρα	0,05	0,22	0,23
5	Τοιχοποιία	0,09	0,72	0,13
6	Εσωτερικό Επίχρισμα	0,02	0,87	0,02
Συνολικό πάχος δομικού στοιχείου:				0,34
Σύνολο R:				2,42
$R_{tot}=R+0,13+0,04$				2,59
$U = 1/ R_{tot}$:				0,39

Στα εξεταζόμενα σενάρια T1, T2 και T3 μεταβάλλονται τα δομικά στοιχεία του εξωτερικού κελύφους που βρίσκονται σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Οι εσωτερικές τοιχοποιίες και οι τοιχοποιίες σε επαφή με θερμαινόμενους ή μη εκτεθειμένους γειτονικούς χώρους δεν αποτέλεσαν αντικείμενο παραμετρικής θερμομονωτικής αναβάθμισης. Στο ενεργειακό μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για τον γεωμετρικό και λειτουργικό διαχωρισμό των χώρων και για την ορθή οργάνωση των θερμικών ζωνών.

4.4.2 Τοιχώματα υπογείου και πλάκα δαπέδου σε επαφή με το έδαφος

Τα τοιχώματα υπογείου και η πλάκα δαπέδου σε επαφή με το έδαφος αντιμετωπίστηκαν ως διακριτά στοιχεία του θερμικού κελύφους, λόγω της διαφορετικής θερμικής συμπεριφοράς τους σε σχέση με τα στοιχεία που βρίσκονται σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα. Η θερμική τους απόδοση επηρεάζεται από την ύπαρξη του εδάφους, το οποίο παρουσιάζει αυξημένη θερμική αδράνεια και μικρότερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Στο Revit τα τοιχώματα υπογείου προσομοιώθηκαν ως στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος με εσωτερικό επίχρισμα και στεγανωτική στρώση, ενώ στα σενάρια T2 και T3 προστέθηκε εξωτερική θερμομονωτική στρώση. Αντίστοιχα, η πλάκα δαπέδου υπογείου προσομοιώθηκε ως οριζόντιο δομικό στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα με στρώσεις δαπέδου, υγραμόνωση και, στα σενάρια T2 και T3, θερμομονωτική στρώση φαίνεται στον Πίνακα 4.12.

Πίνακας 4.12 Στρωματογραφία, πάχος και συντελεστής θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων υπογείου ανά σενάριο.

Σενάριο	Περιγραφή	Στρωματογραφία	Πάχος (m)	U (W/m ² K)
ΤΟΙΧΩΜΑ ΥΠΟΓΕΙΟΥ	T1 Αρχική θερμική κατάσταση χωρίς τεκμηριωμένη θερμομόνωση	- Επίχρισμα - Τοίχωμα Ο/Σ - Υγραμόνωση	0,25	2,68
	T2 Αρχική θερμική κατάσταση με περιορισμένη θερμομόνωση (εναλλακτική παραδοχή)	- Επίχρισμα - Τοίχωμα Ο/Σ - Θερμομόνωση 3 cm - Υγραμόνωση	0,25	0,91

ΔΑΠΕΔΟ ΣΕ ΕΠΑΦΗ ΜΕ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	T3	Πλήρης θερμομονωτική αναβάθμιση (Εξηλασμένη πολυστερίνη)	- Επίχρισμα - Τοίχωμα Ο/Σ - Θερμομόνωση 10 cm - Υγρομόνωση	0,32	0,31
	T1	Αρχική θερμική κατάσταση χωρίς τεκμηριωμένη θερμομόνωση	- Στρώσεις δαπέδου υγρομόνωση - Πλάκα Ο/Σ - Σκυρόδεμα καθαριότητας	0,30	2,20
	T2	Αρχική θερμική κατάσταση με περιορισμένη θερμομόνωση (Διογκωμένη πολυστερίνη)	- Στρώσεις δαπέδου - Θερμομόνωση 3 cm - Υγρομόνωση - Πλάκα Ο/Σ - Σκυρόδεμα καθαριότητας	0,33	0,83
	T3	Πλήρης θερμομονωτική αναβάθμιση (Εξηλασμένη πολυστερίνη)	- Στρώσεις δαπέδου - Θερμομόνωση 10 cm - Υγρομόνωση - Πλάκα Ο/Σ - Σκυρόδεμα καθαριότητας	0,40	0,30

Οι τιμές των Πινάκων 4.9-4.13 χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου για τη συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας κάθε δομικού στοιχείου προκύπτει από τη θερμική αντίσταση των στρώσεων, όπως αυτή υπολογίζεται στο ενεργειακό μοντέλο, με προσθήκη των επιφανειακών θερμικών αντιστάσεων εσωτερικής και εξωτερικής πλευράς κατά EN ISO 6946.

4.4.3 Πλάκα σε επαφή με ΜΘΧ και πλάκα σε επαφή με εξωτερικό αέρα

Το ανώτερο δομικό σύστημα του κτιρίου αποτελείται από πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος, επί της οποίας εδράζεται κεκλιμένη στέγη με επικάλυψη κεραμιδιών. Η διάταξη αυτή δημιουργεί ενδιάμεσο μη θερμαινόμενο χώρο μεταξύ της πλάκας και της στέγης. Σύμφωνα με τη λογική καθορισμού του θερμικού κελύφους, ως ανώτερο στοιχείο του κελύφους θεωρήθηκε η πλάκα που διαχωρίζει τον θερμαινόμενο χώρο από τον μη θερμαινόμενο χώρο κάτω από τη στέγη, ενώ η κεκλιμένη στέγη αντιμετωπίστηκε ως μη θερμαινόμενος χώρος και δεν συμμετείχε άμεσα στον υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας. Η πλάκα έδρασης της στέγης

προσομοιώθηκε στο Revit ως οριζόντιο δομικό στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα, με στρώσεις στεγάνωσης, διαμόρφωσης κλίσεων και εσωτερικού επίχρισματος.

Πίνακας 4.13 Στρωματογραφία, πάχος και συντελεστής θερμοπερατότητας πλάκας σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο και δαπέδου σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα, ανά σενάριο.

	Σενάριο	Περιγραφή σεναρίου	Στρωματογραφία	Πάχος (m)	U (W/m ² K)
ΠΛΑΚΑ ΣΕ ΕΠΑΦΗ ΜΕ ΜΟΧ	T1	Υφιστάμενη κατάσταση χωρίς θερμομόνωση	- Στεγάνωση - Στρώση κλίσεων - Πλάκα Ο/Σ - Εσωτερικό επίχρισμα	0,27	2,49
	T2	Υφιστάμενη κατάσταση με περιορισμένη θερμομόνωση (Διογκωμένη πολυστερίνη)	- Στεγάνωση - Θερμομόνωση 4 cm - Στρώση κλίσεων - Πλάκα Ο/Σ - Εσωτερικό επίχρισμα	0,31	0,71
	T3	Πλήρης θερμομονωτική αναβάθμιση (Εξηλασμένη πολυστερίνη)	- Στεγάνωση EPDM - Θερμομόνωση 10 cm - Στρώση κλίσεων - Πλάκα Ο/Σ - Εσωτερικό επίχρισμα	0,37	0,31
ΔΑΠΕΔ Ο ΣΕ ΕΠΑΦΗ ΜΕ ΤΟΝ ΕΞΩΤΕ ΡΙΚΟ ΑΕΡΑ	T1	Υφιστάμενη κατάσταση χωρίς θερμομόνωση	- Κεραμικά πλακίδια - Τσιμεντοκονία - Σκυρόδεμα C25/30 - Επίχρισμα	0,27	2,13
	T2	Υφιστάμενη κατάσταση με περιορισμένη θερμομόνωση (Διογκωμένη πολυστερίνη)	- Κεραμικά πλακίδια - Τσιμεντοκονία - Σκυρόδεμα C25/30 - EPS 3 cm - Επίχρισμα	0,30	0,82
	T3	Πλήρης θερμομονωτική αναβάθμιση (Εξηλασμένη πολυστερίνη)	- Κεραμικά πλακίδια - Τσιμεντοκονία - Σκυρόδεμα C25/30 - XPS 10 cm - Επίχρισμα	0,37	0,30

4.4.4 Τύποι κουφωμάτων

Τα κουφώματα αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για τις θερμικές απώλειες και τα ηλιακά κέρδη του κτιρίου, κυρίως σε κατασκευές της δεκαετίας του 1990, όπου η θερμομονωτική προστασία ήταν περιορισμένη και τα συστήματα χωρίς θερμοδιακοπή ήταν ευρέως διαδεδομένα.

Ως βασικό σενάριο θεωρείται τυπικό σύστημα κουφωμάτων αλουμινίου χωρίς θερμοδιακοπή, με μονό ή απλό διπλό υαλοπίνακα, αντιπροσωπευτικό της περιόδου κατασκευής του κτιρίου. Για τα σενάρια ενεργειακής αναβάθμισης εξετάζονται εναλλακτικοί τύποι κουφωμάτων με βελτιωμένες θερμικές και οπτικές ιδιότητες, σύμφωνα με τις σύγχρονες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2017a).

Ο Πίνακας 4.14 παρουσιάζει συγκριτικά τους βασικούς τύπους κουφωμάτων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, με βασικό κριτήριο τον συνολικό συντελεστή θερμοπερατότητας του κουφώματος (U_w).

Πίνακας 4.14 Τύποι κουφωμάτων και θερμικές παραδοχές.

Σενάριο	Περιγραφή	U_w (W/m ² K)	Πηγή / Τεκμηρίωση
1	Μεταλλικό πλαίσιο χωρίς θερμοδιακοπή με μονό υαλοπίνακα	6,00	TOTEE 20701-2, ενδεικτικές τιμές για παλαιά μεταλλικά κουφώματα
2	Μεταλλικό πλαίσιο χωρίς θερμοδιακοπή με διπλό υαλοπίνακα	4,50	TOTEE 20701-2 και τεχνική παραδοχή για ενδιάμεσο επίπεδο επίδοσης
3	Πλαίσιο με θερμοδιακοπή και βελτιωμένη υάλωση	1,40	TOTEE 20701-2 / KENAK, επίπεδο θερμικής αναβάθμισης

Η προσέγγιση βασίστηκε κυρίως στον συνολικό συντελεστή θερμοπερατότητας του κουφώματος (U_w), ενώ οι οπτικές ιδιότητες των υαλοπινάκων, όπως ο ηλιακός συντελεστής διείσδυσης και η διαπερατότητα ορατού φωτός, αξιοποιήθηκαν όπου ήταν διαθέσιμες για την ερμηνεία των σεναρίων. Στο περιβάλλον BIM τα σενάρια υλοποιήθηκαν μέσω διακριτών τύπων, ώστε να διασφαλίζεται η αντιστοίχιση των θερμικών ιδιοτήτων με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των

ανοιγμάτων. Το σενάριο T2 χρησιμοποιήθηκε ως ενδιάμεση κατάσταση αναφοράς για τα κουφώματα, ενώ τα T1 και T3 αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα την υφιστάμενη και την αναβαθμισμένη κατάσταση.

Παράλληλα με τα κουφώματα, στο ενεργειακό μοντέλο αποτυπώθηκαν και οι εξωτερικές θύρες ως διακριτή κατηγορία ανοιγμάτων. Για τις θύρες ορίστηκαν τρεις τύποι θερμικής συμπεριφοράς, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.15.

Πίνακας 4.15 Τύποι εξωτερικών θυρών και θερμικές παραδοχές.

Σενάριο	Περιγραφή	Ud (W/m ² K)	Πηγή / Τεκμηρίωση
T1	Υφιστάμενη μεταλλική θύρα χωρίς θερμομονωτική ενίσχυση	6,00	EN ISO 10077-1
T2	Μεταλλική θύρα περιορισμένης θερμικής βελτίωσης	4,50	EN ISO 10077-1
T3	Θερμομονωμένη εξωτερική θύρα αναβάθμισης	1,80	EN ISO 10077-1

Σε περιπτώσεις έλλειψης ακριβών δεδομένων, ιδίως για την υφιστάμενη κατάσταση του 1999, υιοθετήθηκαν παραδοχές βασισμένες σε κανονιστικές τιμές, τεχνικά δελτία και βιβλιογραφικές πηγές. Οι τιμές των σεναρίων αναβάθμισης χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση της θερμικής συμπεριφοράς των ανοιγμάτων και τη σύνδεσή τους με την ενεργειακή αξιολόγηση του Κεφαλαίου 5, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις του Κ.ΕΝ.Α.Κ. Πέρα από τις γενικές ρυθμίσεις δημιουργίας του Μοντέλου Ενεργειακής Ανάλυσης, ιδιαίτερη σημασία έχουν οι λειτουργικές παραδοχές που αποδίδονται στους επιμέρους τύπους χώρων. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκαν διακριτοί τύποι χώρων για τις βασικές χρήσεις του σχολικού κτιρίου, όπως αίθουσες διδασκαλίας, γραφεία, χώροι κυκλοφορίας, χώροι βιβλιοθήκης, βοηθητικοί χώροι και χώροι υγιεινής.

4.5 Περιβαλλοντική αξιολόγηση μέσω Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση των εξεταζόμενων σεναρίων πραγματοποιήθηκε με προσέγγιση Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA), με στόχο τη συγκριτική αποτίμηση του ενσωματωμένου και του λειτουργικού άνθρακα των σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης. Η αξιολόγηση περιλαμβάνει τα υλικά του κελύφους, τα κουφώματα, τις παρεμβάσεις σκίασης και την καταναλισκόμενη ενέργεια κατά τη λειτουργία του κτιρίου, σύμφωνα με τα καθορισμένα συστημικά όρια της μελέτης.

Για τα δομικά προϊόντα χρησιμοποιήθηκε η βάση περιβαλλοντικών συντελεστών του εργαλείου περιβαλλοντικής αποτίμησης, η οποία βασίζεται σε δεδομένα Περιβαλλοντικών Δηλώσεων Προϊόντος (Environmental Product Declarations - EPDs) σύμφωνα με το πρότυπο EN 15804. Ως βασικός δείκτης αξιολόγησης χρησιμοποιήθηκε το Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (Global Warming Potential - GWP), εκφρασμένο σε kgCO_2eq . Τα όρια της ανάλυσης περιλαμβάνουν το στάδιο παραγωγής των υλικών και τη λειτουργική κατανάλωση ενέργειας του κτιρίου. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε για περίοδο αναφοράς 20 ετών. Η περίοδος αυτή αποτελεί μεθοδολογική παραδοχή της μελέτης και επηρεάζει τη σχετική στάθμιση μεταξύ λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα, ενώ διαφορετική περίοδος αναφοράς ενδέχεται να μεταβάλει τη σχετική κατάταξη των εξεταζόμενων σεναρίων.

Ως λειτουργική μονάδα της περιβαλλοντικής αξιολόγησης ορίζεται η λειτουργία του εξεταζόμενου σχολικού κτιρίου για περίοδο αναφοράς 20 ετών. Η κοινή επιφάνεια αναφοράς χρησιμοποιείται για την κανονικοποίηση του δείκτη EUI και για τη μετατροπή του σε απόλυτη ετήσια ενεργειακή κατανάλωση ανά σενάριο. Η ανάλυση περιλαμβάνει τα στάδια A1-A3 (παραγωγή δομικών προϊόντων) και B6 (λειτουργική κατανάλωση ενέργειας). Δεν περιλαμβάνονται τα στάδια A4-A5 (μεταφορά και κατασκευή), B4 (αντικαταστάσεις), C (τέλος ζωής) και D (οφέλη εκτός ορίων συστήματος). Ο αποκλεισμός του σταδίου B4 τεκμηριώνεται από το γεγονός ότι, εντός της εικοσαετούς περιόδου αναφοράς, δεν προβλέπεται κύκλος αντικατάστασης για τα εξεταζόμενα υλικά του κελύφους και τα κουφώματα. Ο αποκλεισμός των

σταδίων A4-A5 και C οφείλεται στην απουσία δεδομένων εφοδιαστικής αλυσίδας και διαχείρισης αποβλήτων για το συγκεκριμένο έργο και αποτελεί αναγνωρισμένο περιορισμό της ανάλυσης.

Η σύνδεση της περιβαλλοντικής αξιολόγησης με το BIM μοντέλο πραγματοποιήθηκε μέσω της εξαγωγής των ποσοτήτων των υλικών από το μοντέλο Revit και της αντιστοίχισής τους με τα αντίστοιχα περιβαλλοντικά δεδομένα της βιβλιοθήκης του εργαλείου. Με βάση την ποσότητα κάθε υλικού και τον αντίστοιχο περιβαλλοντικό συντελεστή υπολογίστηκε το ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα (Cemb) κάθε σεναρίου, ενώ η λειτουργική συνιστώσα προέκυψε από τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση και τον αντίστοιχο μέσο συντελεστή εκπομπών. Το λογιστικό όριο του Cemb περιλαμβάνει τόσο τα κοινά και αμετάβλητα υλικά όσο και τα υλικά που διαφοροποιούνται λόγω των εξεταζόμενων επεμβάσεων. Το κοινό και αμετάβλητο μέρος αποτελεί κοινή συνιστώσα των σεναρίων και δεν επηρεάζει τις μεταξύ τους διαφορές. Συνεπώς, οι απόλυτες τιμές Cemb εκφράζουν το ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα εντός του καθορισμένου λογιστικού ορίου και δεν χαρακτηρίζονται ως «πρόσθετο περιβαλλοντικό φορτίο». Η επίδραση των επεμβάσεων ερμηνεύεται μέσω της μεταβολής του Cemb μεταξύ των συγκρινόμενων σεναρίων. Οι βασικές περιβαλλοντικές παραδοχές και οι χρησιμοποιούμενοι συντελεστές καταγράφονται στον Πίνακα 4.16 και στο Μητρώο Δεδομένων και Παραδοχών.

Πίνακας 4.16 Περιβαλλοντικοί συντελεστές και υλικά σεναρίων.

Κατηγορία	Υλικό	Σενάριο	Περιβαλλοντική αντιστοίχιση	Συντελεστής
Τοιχοποιία	Γύψος/σοβάς	T1-T3	Γυψοσοβάς	1,73 kgCO ₂ eq/m ²
Τοιχοποιία	Τούβλο	T1-T2	Τούβλο	0,27 kgCO ₂ eq/kg
Τοιχοποιία	Θερμομόνωση EPS	T2	Θερμομονωτικό υλικό EPS	5,31 kgCO ₂ eq/m ² RSI
Τοιχοποιία	Θερμομόνωση πετροβάμβακα	T3	Πετροβάμβακας	5,79 kgCO ₂ eq/m ² RSI
Δάπεδα	Σκυρόδεμα C25/30	T1-T3	Έτοιμο σκυρόδεμα με οπλισμό	441 kgCO ₂ eq/m ³
Δάπεδα	Θερμομόνωση XPS	T3	Θερμομονωτικό υλικό XPS	4,55 kgCO ₂ eq/m ² RSI
Δάπεδα	Τσιμεντοκονία	T1-T3	Ελαφροβαρές σκυρόδεμα	339,16 kgCO ₂ eq/m ³
Δάπεδα	Κεραμικά πλακίδια	T1-T3	Κεραμικά πλακίδια	17,08 kgCO ₂ eq/m ²

Πλάκα σε επαφή με Μ.Θ.Χ.	Θερμομόνωση XPS	T3	Θερμομονωτικό υλικό XPS	4,55 kgCO ₂ eq/m ² RSI
Πλάκα σε επαφή με Μ.Θ.Χ.	Θερμομόνωση EPS	T2	Θερμομονωτικό υλικό EPS	5,31 kgCO ₂ eq/m ² RSI
Πλάκα σε επαφή με Μ.Θ.Χ.	Στεγανοποίηση	T2	Ασφαλτική στεγανωτική μεμβράνη	4,22 kgCO ₂ eq/m ²
Πλάκα σε επαφή με Μ.Θ.Χ.	EPDM	T3	Στεγανοποιητικό υλικό	2,95 kgCO ₂ eq/m ²
Κουφώματα	K1	T1	Μεταλλικό πλαίσιο χωρίς θερμοδιακοπή και μονός υαλοπίνακας	82 kgCO ₂ eq/m ²
Κουφώματα	K2	T2	Μεταλλικό πλαίσιο χωρίς θερμοδιακοπή και διπλός υαλοπίνακας	82 kgCO ₂ eq/m ²
Κουφώματα	K3	T3	Πλαίσιο με θερμοδιακοπή και βελτιωμένη υάλωση	105 kgCO ₂ eq/m ²
Πόρτες	Μεταλλικές	T2	Μεταλλικές πόρτες και πλαίσια	188,30 kgCO ₂ eq/τεμ.
Πόρτες	Ξύλινες εσωτερικές	T1-T3	Ξύλινες πόρτες	105,14 kgCO ₂ eq/τεμ.

Σημείωση: Οι τιμές των περιβαλλοντικών συντελεστών προέρχονται από την αντιστοίχιση των υλικών με τη βάση περιβαλλοντικών δεδομένων του εργαλείου. Στο λογιστικό όριο του ενσωματωμένου άνθρακα περιλαμβάνονται τόσο κοινά και αμετάβλητα υλικά όσο και υλικά που διαφοροποιούνται μεταξύ των εξεταζόμενων σεναρίων.

4.6 Έλεγχοι ποιότητας και τεκμηρίωση

Για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της εσωτερικής συνέπειας της διαδικασίας πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι ποιότητας τόσο στο BIM μοντέλο όσο και στο αντίστοιχο Αναλυτικό Ενεργειακό Μοντέλο (Energy Analytical Model – EAM). Οι έλεγχοι επικεντρώθηκαν στη γεωμετρική συνέπεια του μοντέλου, στην ορθή οργάνωση των χώρων και των θερμικών ζωνών, στη συνεπή αντιστοίχιση των δομικών στοιχείων και υλικών και στην ορθή εφαρμογή των παραμετρικών μεταβολών.

Αρχικά ελέγχθηκε η γεωμετρική συνέπεια του μοντέλου, με έμφαση στη συνέχεια του κελύφους, στη σωστή σύνδεση των δομικών στοιχείων και στην αποφυγή

κενών, επικαλύψεων ή άλλων ασυνεχειών που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη δημιουργία των αναλυτικών επιφανειών του EAM. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στις επιφάνειες σε επαφή με το έδαφος, στην πλάκα έδρασης της στέγης, στα ανοίγματα και στις επιφάνειες που γειτνιάζουν με όμορο κτίριο.

Στη συνέχεια ελέγχθηκε η ορθή οργάνωση των χώρων και των θερμικών ζωνών. Οι χώροι αντιστοιχίστηκαν στους κατάλληλους τύπους χρήσης, ώστε να εφαρμοστούν οι αντίστοιχες λειτουργικές παραδοχές ως προς την πληρότητα, τα εσωτερικά θερμικά κέρδη, τον φωτισμό, τον εξοπλισμό και τον αερισμό. Η κατανομή των χώρων σε θερμικές ζώνες και τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ενεργειακού μοντέλου τεκμηριώνονται στην Ενότητα 4.2.4 και στον Πίνακα 4.5.

Παράλληλα, ελέγχθηκε η συνέπεια των υλικών και των δομικών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στα επιμέρους σενάρια. Οι τύποι τοίχων, πλακών, δαπέδων, κουφωμάτων και στοιχείων σε επαφή με το έδαφος οργάνωθηκαν με διακριτή ονοματοδοσία και αντιστοιχίστηκαν στις αντίστοιχες παραμετρικές διαμορφώσεις. Με τον τρόπο αυτό υποστηρίχθηκε η ιχνηλασιμότητα των μεταβολών μεταξύ των σεναρίων και η συνεπής σύνδεση των υλικών και των ποσοτήτων τους με την περιβαλλοντική αξιολόγηση.

Επιπλέον, ελέγχθηκε η ορθή εφαρμογή των παραμετρικών μεταβολών μεταξύ των σεναρίων, ώστε κάθε μεταβολή να αφορά αποκλειστικά την προκαθορισμένη παράμετρο, ενώ οι υπόλοιπες βασικές ρυθμίσεις να παραμένουν σταθερές. Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε μέσω των τύπων του Revit και των υποστηρικτικών scripts του Dynamo, με στόχο τη συνεπή αναπαραγωγή των σεναρίων.

Τέλος, οι βασικές τιμές εισόδου, οι πηγές τους, οι παραδοχές και ο βαθμός αβεβαιότητας καταγράφηκαν στο Μητρώο Δεδομένων και Παραδοχών, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως εργαλείο τεκμηρίωσης και ελέγχου της μελέτης. Ο έλεγχος της αριθμητικής συνέπειας των ενεργειακών και περιβαλλοντικών αποτελεσμάτων, καθώς και η επαλήθευση της σχέσης μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας, λειτουργικού άνθρακα, ενσωματωμένου άνθρακα και συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος, παρουσιάζονται στην Ενότητα 5.1.2.

4.7 Μητρώο Δεδομένων και Παραδοχών και βασικοί τεχνικοί πίνακες

Το Μητρώο Δεδομένων και Παραδοχών (Assumptions Register) συγκεντρώνει όλες τις κρίσιμες τιμές εισόδου της παρούσας μελέτης, συμπεριλαμβανομένων γεωμετρικών, λειτουργικών, θερμικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων, καθώς και της προέλευσης και του επιπέδου αβεβαιότητάς τους. Η χρήση του μητρώου διασφαλίζει την επιστημονική διαφάνεια, την επαναληψιμότητα της διαδικασίας και τη συγκρισιμότητα των εναλλακτικών σεναρίων, ιδιαίτερα σε μελέτες που βασίζονται σε παραμετρικές μεταβολές και σε πολλαπλά σενάρια ανάλυσης.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το μητρώο περιλαμβάνει:

- (α) βασικές παραδοχές έργου και ενεργειακών ρυθμίσεων,
- (β) λειτουργικές παραμέτρους και προγράμματα χρήσης,
- (γ) θερμικά χαρακτηριστικά δομικών στοιχείων και υλικών,
- (δ) τύπους κουφωμάτων και τις θερμικές και οπτικές ιδιότητές τους,
- (ε) τιμές αναφοράς και τιμές αναβάθμισης για το κέλυφος και τα ανοίγματα, και
- (στ) βασικές παραμέτρους για τη διασύνδεση του BIM μοντέλου με την ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση.

Ο Πίνακας 4.17 συνοψίζει, μεταξύ άλλων, τις βασικές παραμέτρους λειτουργίας (ώρες λειτουργίας, ημέρες, μήνες, συνθήκες θερμικής άνεσης και απαιτήσεις αερισμού), οι οποίες χρησιμοποιούνται ως κοινή βάση για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια, διασφαλίζοντας τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων.

Ο βαθμός αβεβαιότητας κάθε παραμέτρου χαρακτηρίζεται με βάση την προέλευση της τιμής και όχι την ακρίβειά της. Ως χαμηλός χαρακτηρίζεται ο βαθμός αβεβαιότητας παραμέτρων που προκύπτουν άμεσα από τα αρχιτεκτονικά σχέδια ή από το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο. Ως μέτριος χαρακτηρίζεται ο βαθμός αβεβαιότητας παραμέτρων που προκύπτουν από επιτόπια οπτική τεκμηρίωση, από τυποποιημένες τιμές λογισμικού ή από τεκμηριωμένες παραδοχές συμβατές με την περίοδο κατασκευής. Παράμετροι με αυξημένη αβεβαιότητα αντιμετωπίστηκαν μέσω εναλλακτικών σεναρίων αναφοράς και όχι με υιοθέτηση μοναδικής τιμής.

Πίνακας 4.17 Μητρώο βασικών δεδομένων, παραμέτρων και παραδοχών της μελέτης.

A/A	Κατηγορία	Παράμετρος	Τιμή βάσης	Εύρος / τιμές σεναρίων	Μονάδα	Πηγή	Αβεβαιότητα
1	Κλιματικά δεδομένα	Κλιματική ζώνη	Γ	-	-	KENAK	Χαμηλή
2	Κτίριο	Έτος έκδοσης οικοδομικής άδειας	1999	-	έτος	Φάκελος οικοδομικής άδειας (αρ. 886)	Χαμηλή
3	Λειτουργία	Ώρες λειτουργίας	6 (8:00-14:00)	6-10	h/ημέρα	Μελέτη παθητικής πυροπροστασίας (1997)	Χαμηλή
4	Λειτουργία	Περίοδος λειτουργίας	Σεπτέμβριος- Μάιος	-	-	TOTEE 20701- 1/2017	Μέτρια
5	Λειτουργία	Ημέρες λειτουργίας	Δευτέρα- Παρασκευή	-	ημέρες/ε βδομάδα	TOTEE 20701- 1/2017	Χαμηλή
6	Θερμική άνεση	Θερμοκρασία θέρμανσης	20	18-21	°C	TOTEE 20701- 1/2017	Χαμηλή
7	Θερμική άνεση	Θερμοκρασία ψύξης	26	25-27	°C	TOTEE 20701- 1/2017	Χαμηλή
8	Αερισμός	Παροχή νωπού αέρα	4,72	0,00-4,72 (ανά τύπο χώρου)	L/s·άτομ ο	TOTEE 20701- 1/2017	Μέτρια
9	Πληρότητα	Πυκνότητα πληθυσμού	50	-	άτομα/10 0 m ²	TOTEE 20701- 1/2017 · Μελέτη πυροπροστασίας (2 m ² /άτομο σε αίθουσες)	Χαμηλή
10	Φωτισμός	Εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού	10	3-15 (ανά τύπο χώρου)	W/m ²	TOTEE 20701- 1/2017	Χαμηλή
11	Φωτισμός	Επίπεδα φωτισμού	300-500	-	lux	EN 12464-1	Μέτρια
12	Κέλυφος	U εξωτερικής τοιχοποιίας	1,44	1,44 / 0,91 / 0,39	W/m ² K	Ενεργειακό μοντέλο · EN ISO 6946	Μέτρια

13	Κέλυφος	U υπόγειων τοίχων	2,68	2,68 / 0,91 / 0,31	W/m ² K	Ενεργειακό μοντέλο · EN ISO 6946	Μέτρια
14	Κέλυφος	U δαπέδων σε επαφή με έδαφος	2,20	2,20 / 0,83 / 0,30	W/m ² K	Ενεργειακό μοντέλο · EN ISO 6946	Μέτρια
15	Κέλυφος	U πλάκας σε επαφή με ΜΘΧ	2,49	2,49 / 0,71 / 0,31	W/m ² K	Ενεργειακό μοντέλο · EN ISO 6946	Μέτρια
16	Κέλυφος	U δαπέδου σε επαφή με εξωτ. αέρα	2,13	2,13 / 0,82 / 0,30	W/m ² K	Ενεργειακό μοντέλο · EN ISO 6946	Μέτρια
17	Κουφώματα	Uw εξωτερικών κουφωμάτων	6,00	6,00 / 4,50 / 1,40	W/m ² K	TOTEE / πρότυπα EN	Μέτρια
18	Κουφώματα	g-value	0,85	0,85 / 0,70 / 0,45 · παραμετρική μεταβολή	-	Τεχνικά δεδομένα / παραδοχή	Μέτρια
19	Κουφώματα	VT	0,85	0,85 / 0,78 / 0,60 · παραμετρική μεταβολή	-	Τεχνικά δεδομένα / παραδοχή	Μέτρια
20	Ανοίγματα	Λόγος διαφανών ανοιγμάτων προς όψη (WWR)	22	6-33 (ανάλυση ευαισθησίας)	%	BIM / Dynamo	Μέτρια
21	Πόρτες	Ud εξωτερικών θυρών	6,00	6,00 / 4,50 / 1,80	W/m ² K	Τεχνικά δεδομένα / παραδοχή	Μέτρια
22	Στέγη	Απορροφητικότητα κεκλιμένης στέγης	0,70	-	-	Προεπιλογή λογισμικού	Μέτρια
23	Σκίαση	Εξωτερικά στοιχεία σκίασης	-	Παραμετρική μεταβολή	cm	BIM / Dynamo	Μέτρια
24	BIM	Παραμετρική μεταβολή δομικών στοιχείων	-	T1 / T2 / T3	-	Revit / Dynamo	Χαμηλή
25	BIM	Παραμετρική μεταβολή κουφωμάτων	-	T1 / T2 / T3 και σενάρια ευαισθησίας	-	Revit / Dynamo	Χαμηλή
26	Γεωμετρία	Αριθμός θερμικών ζωνών	29 (6 τύποι)	-	-	Αναλυτικό Ενεργειακό Μοντέλο	Χαμηλή

27	Γεωμετρία	Όγκος θερμικών ζωνών	2.972	-	m ³	Αναλυτικό Ενεργειακό Μοντέλο	Χαμηλή
28	Γεωμετρία	Κοινή επιφάνεια αναφοράς	1.077,29	1.077,29	m ²	Μεθοδολογική παραδοχή βάσει §3.6 και §5.1.2	Χαμηλή
29	Ενέργεια	Συντελεστής μετατροπής	0,299	0,290 - 0,300	kgCO ₂ eq /kWh	Υπολογισμός (βλ. §5.1.2)	Μέτρια
30	Ενέργεια	Τρόπος υπολογισμού λειτουργικού άνθρακα	Ετήσια συνολική κατανάλωση × έτη × συντελεστής εκπομπών	-	-	Υπολογισμός (βλ. §5.1.2)	Χαμηλή
31	Συστήματα	Σύστημα HVAC	Κεντρικό VAV	-	-	Ρυθμίσεις λογισμικού	Μέτρια
32	Συστήματα	Βαθμός απόδοσης ψύκτη / λέβητα	5,96 / 84,5	-	COP / %	Ρυθμίσεις λογισμικού	Μέτρια
33	Αερισμός	Κλάση διείσδυσης αέρα	Μέτρια	-	-	Ρυθμίσεις λογισμικού	Μέτρια
34	Λογισμικό	Περιβάλλον μοντελοποίησης	Autodesk Revit [26.4.0.32]	-	-	-	Χαμηλή
35	Λογισμικό	Εργαλείο ενεργειακής και περιβαλλοντικής αποτίμησης	Autodesk Forma Carbon Insights	-	-	-	Χαμηλή
36	Λογισμικό	Τύπος κτιρίου / πρόγραμμα λειτουργίας	School or University / K-12 School	-	-	Ρυθμίσεις λογισμικού	Μέτρια
37	Κλιματικά δεδομένα	Τοποθεσία αναφοράς	Θεσσαλονίκη	-	-	Βάση κλιματικών δεδομένων εργαλείου	Χαμηλή
38	Ενέργεια	Ενεργειακοί φορείς	Ηλεκτρισμός (ψύξη, φωτισμός, συσκευές) και καύσιμο θέρμανσης (λέβητας)	-	-	Ρυθμίσεις λογισμικού	Μέτρια
39	Περιβαλλοντική αξιολόγηση	Περιβαλλοντική επίπτωση	-	T1 / T2 / T3 και σενάρια ευαισθησίας	kgCO ₂ eq	Βάση περιβαλλοντικών δεδομένων εργαλείου	Μέτρια

40	Περιβαλλοντική αξιολόγηση	Περίοδος αναφοράς	20	-	έτη	Παραδοχή μελέτης	Μέτρια
41	Περιβαλλοντική αξιολόγηση	Δείκτης επίπτωσης	GWP	-	kgCO ₂ eq	EN 15804	Μέτρια
42	Περιβαλλοντική αξιολόγηση	Όρια ανάλυσης	A1-A3 και B6	-	-	EN 15978	Χαμηλή
43	Περιβαλλοντική αξιολόγηση	Εύρος αποτίμησης	Κέλυφος και εσωτερικά αρχιτεκτονικά στοιχεία του ΕΑΜ	-	-	Ρυθμίσεις εργαλείου	Μέτρια

Σημείωση: Δεν πραγματοποιήθηκαν επιτόπιες μετρήσεις κατανάλωσης ή εσωτερικών συνθηκών· επομένως καμία παράμετρος του μητρώου δεν κατατάσσεται στην κατηγορία των μετρημένων δεδομένων. Οι τιμές των γραμμών 13-17 προκύπτουν από τη θερμική αντίσταση των στρώσεων του ενεργειακού μοντέλου, με προσθήκη των επιφανειακών θερμικών αντιστάσεων κατά EN ISO 6946· η T.O.T.E.E. 20701-2/2017 αποτελεί πηγή για τις τιμές θερμικής αγωγιμότητας των υλικών.

5. Αποτελέσματα και Ανάλυση Σεναρίων

5.1 Βασικά σενάρια

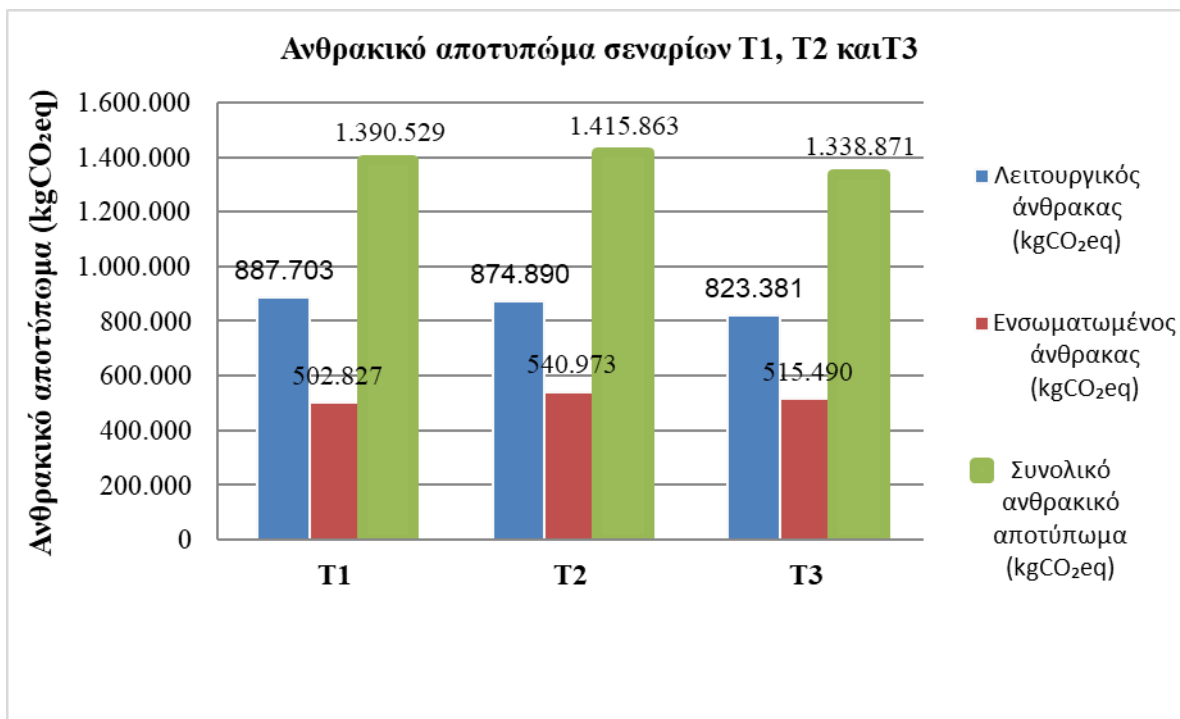
5.1.1 Αποτελέσματα βασικών σεναρίων

Η αξιολόγηση ξεκινά από τα τρία βασικά σενάρια T1, T2 και T3. Τα T1 και T2 αποτυπώνουν δύο εναλλακτικές εκδοχές της αρχικής θερμικής κατάστασης του κτιρίου, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας ως προς την υφιστάμενη θερμομονωτική προστασία. Το T3 αντιστοιχεί στη βασική διαμόρφωση θερμικής αναβάθμισης και χρησιμοποιείται ως σενάριο αναφοράς για την παραμετρική διερεύνηση.

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα βασικών σεναρίων T1–T3.

Σενάριο	Μόνωση (cm)	Uw (W/m ² K)	EUI (kWh/m ² ·έτος)	Λειτουργικός άνθρακας (kgCO ₂ eq)	Ενσωματωμένος άνθρακας (kgCO ₂ eq)	Συνολικό (kgCO ₂ eq)
T1	0	6,0	142,19	887.703	502.827	1.390.529
T2	2	4,5	137,77	874.890	540.973	1.415.863
T3	7-10	1,4	127,84	823.381	515.490	1.338.871

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 5.1, η μετάβαση από το T1 στο T3 συνοδεύεται από μείωση του δείκτη ετήσιας ενεργειακής χρήσης (EUI) από 142,19 σε 127,84 kWh/m²·έτος, που αντιστοιχεί σε βελτίωση κατά 10,1%. Σε απόλυτους όρους, η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση μειώνεται από περίπου 153.177 kWh στο T1 σε περίπου 137.721 kWh στο T3, δηλαδή κατά 10,1%. Παράλληλα, ο λειτουργικός άνθρακας μειώνεται από 887.703 σε 823.381 kgCO₂eq, παρουσιάζοντας μείωση 7,25%, ενώ ο ενσωματωμένος άνθρακας αυξάνεται από 502.827 σε 515.490 kgCO₂eq, δηλαδή κατά 2,52%. Ως αποτέλεσμα της ταυτόχρονης μεταβολής των δύο συνιστωσών, το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα μειώνεται από 1.390.529 σε 1.338.871 kgCO₂eq, παρουσιάζοντας συνολική μείωση 3,71%.



Διάγραμμα 5.1 Λειτουργικός και ενσωματωμένος άνθρακας των σεναρίων T1-T3.

Το Διάγραμμα 5.1 αποτυπώνει τη διαφοροποίηση μεταξύ λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα στα τρία βασικά σενάρια. Παρατηρείται ότι, ενώ η θερμική αναβάθμιση που χαρακτηρίζει το T3 οδηγεί σε αισθητή μείωση του λειτουργικού άνθρακα, η μείωση αυτή αντισταθμίζεται εν μέρει από την αύξηση του ενσωματωμένου άνθρακα. Η συμπεριφορά αυτή αναδεικνύει τη σημασία της συνεκτίμησης των δύο συνιστωσών κατά την αξιολόγηση των επεμβάσεων ενεργειακής αναβάθμισης.



Διάγραμμα 5.2 Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση ανά μονάδα επιφάνειας των σεναρίων T1-T3.

Το T2 παρουσιάζει ενδιάμεση ενεργειακή επίδοση, με EUI 137,77 kWh/m²·έτος και λειτουργικό άνθρακα 874.890 kgCO₂eq. Ωστόσο, ο ενσωματωμένος άνθρακας ανέρχεται σε 540.973 kgCO₂eq και το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα σε 1.415.863 kgCO₂eq, δηλαδή σε υψηλότερα επίπεδα από εκείνα του T1 και του T3. Η υψηλότερη τιμή του ενσωματωμένου άνθρακα στο T2, παρά το μικρότερο πάχος θερμομόνωσης, συνδέεται με το διαφορετικό μονωτικό υλικό που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο σενάριο. Επομένως, η βελτίωση της ενεργειακής επίδοσης δεν συνεπάγεται κατ' ανάγκη αντίστοιχη μείωση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Πίνακας 5.2 Ποσοστιαία μεταβολή ενεργειακών και περιβαλλοντικών δεικτών σε σχέση με το σενάριο αναφοράς T1.

Μέγεθος	T2	T3
Συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα	+1,82%	-3,71%
Ενσωματωμένος άνθρακας	+7,59%	+2,52%
Λειτουργικός άνθρακας	-1,44%	-7,25%
Ενεργειακή ένταση (EUI)	-3,11%	-10,10%

5.1.2 Έλεγχος αριθμητικής συνέπειας

Πριν από την παραμετρική διερεύνηση, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της αριθμητικής συνέπειας των αποτελεσμάτων των βασικών σεναρίων. Στόχος του

ελέγχου ήταν να επιβεβαιωθεί, αφενός, η συμβατότητα μεταξύ της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης και του λειτουργικού άνθρακα και, αφετέρου, η συνέπεια μεταξύ των επιμέρους συνιστωσών του ανθρακικού αποτυπώματος. Για τον σκοπό αυτό ελέγχθηκαν, για κάθε σενάριο, η συνολική ενέργεια της περιόδου αναφοράς, ο μέσος συντελεστής εκπομπών της τελικής ενέργειας (C_f) και η λογιστική σχέση $C_{op} + C_{emb} = C_{tot}$. Ενδεικτικά, για το σενάριο T3:

$$\text{Ενέργεια περιόδου αναφοράς} = 2.754.415 \text{ kWh}$$

$$\text{Μέση ετήσια ενεργειακή κατανάλωση} = 2.754.415 / 20 = 137.720,75 \text{ kWh/έτος}$$

$$\text{EUI} = 137.720,75 / 1.077,29 = 127,84 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{έτος}$$

$$C_f = 823.381 / 2.754.415 = 0,2989 \text{ kgCO}_2\text{eq/kWh}$$

$$C_{op} + C_{emb} = 823.381 + 515.490 = 1.338.871 \text{ kgCO}_2\text{eq}$$

Στους αντίστοιχους υπολογισμούς των T1 και T2 χρησιμοποιούνται οι συνολικές ενεργειακές καταναλώσεις της προσομοίωσης, ενώ οι εμφανιζόμενες τιμές EUI στον Πίνακα 5.1 είναι στρογγυλοποιημένες σε δύο δεκαδικά ψηφία. Για τον λόγο αυτό, η επαλήθευση της αριθμητικής σχέσης βασίζεται στις συνολικές ενεργειακές καταναλώσεις της προσομοίωσης και όχι σε επανυπολογισμό από τις στρογγυλοποιημένες τιμές EUI.

Από τον Πίνακα 5.3 προκύπτει ότι το $C_{op} + C_{emb}$ συμφωνεί με το C_{tot} και στα τρία βασικά σενάρια, με πιθανή απόκλιση έως $1 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ στις εμφανιζόμενες τιμές λόγω στρογγυλοποίησης. Ο μέσος συντελεστής εκπομπών (C_f) μεταβάλλεται από $0,2898 \text{ kgCO}_2\text{eq/kWh}$ στο T1 σε $0,2947 \text{ kgCO}_2\text{eq/kWh}$ στο T2 και $0,2989 \text{ kgCO}_2\text{eq/kWh}$ στο T3. Η μεταβολή αυτή συνδέεται με τη διαφορετική σύνθεση της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης μεταξύ των σεναρίων. Καθώς βελτιώνεται η θερμομονωτική προστασία, περιορίζεται η απαίτηση για θέρμανση και μεταβάλλεται σχετικά η συμμετοχή της ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη, φωτισμό και εξοπλισμό, με αποτέλεσμα τη μεταβολή του μέσου συντελεστή C_f .

Πίνακας 5.3 Έλεγχος αριθμητικής συνέπειας των βασικών σεναρίων.

Σενάριο	Επιφάνεια αναφοράς (m ²)	Ενέργεια περιόδου αναφοράς (kWh)	Μέσος συντελεστής εκπομπών, Cf (kgCO ₂ eq/kWh)	Cop + Cemb (kgCO ₂ eq)	Ctot (kgCO ₂ eq)
T1	1.077,29	3.063.534	0,2898	1.390.529	1.390.529
T2	1.077,29	2.968.283	0,2947	1.415.863	1.415.863
T3	1.077,29	2.754.415	0,2989	1.338.871	1.338.871

Σημείωση: Οι τιμές έχουν στρογγυλοποιηθεί στην πλησιέστερη μονάδα· τυχόν απόκλιση ± 1 kgCO₂eq στα αθροίσματα οφείλεται αποκλειστικά σε στρογγυλοποίηση.

Μετά την υιοθέτηση κοινής επιφάνειας αναφοράς, η σύγκριση του EUI πραγματοποιείται με τον ίδιο παρονομαστή για όλα τα σενάρια. Η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση παραμένει αυτή που προκύπτει από την αντίστοιχη ενεργειακή προσομοίωση και δεν μεταβάλλεται από την κανονικοποίηση της επιφάνειας. Στην περίπτωση T1-T3, η μείωση του EUI από 142,19 σε 127,84 kWh/m²·έτος αντιστοιχεί σε μείωση κατά 10,1%, ενώ η απόλυτη ετήσια κατανάλωση μειώνεται από περίπου 153.177 σε 137.721 kWh/έτος, επίσης κατά 10,1%. Η κοινή επιφάνεια αναφοράς χρησιμοποιείται επομένως αποκλειστικά για τη συγκρίσιμη παρουσίαση του EUI και δεν μεταβάλλει τα συνολικά ενεργειακά ή ανθρακικά μεγέθη των σεναρίων.

Μετά την υιοθέτηση κοινής επιφάνειας αναφοράς, ο EUI και η απόλυτη ετήσια κατανάλωση ενέργειας συγκρίνονται με σαφώς διακριτό τρόπο. Ο EUI χρησιμοποιείται ως κανονικοποιημένος δείκτης, ενώ η απόλυτη ετήσια κατανάλωση αποτελεί το μέγεθος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του λειτουργικού άνθρακα. Στην περίπτωση T1-T3, τόσο ο EUI όσο και η απόλυτη ετήσια ενεργειακή κατανάλωση μειώνονται κατά 10,1%, από 142,19 σε 127,84 kWh/m²·έτος και από περίπου 153.177 σε 137.721 kWh/έτος, αντίστοιχα.

5.2 Δομή της παραμετρικής διερεύνησης

5.2.1 Λογική διερεύνησης

Η παραμετρική διερεύνηση βασίστηκε στη μεταβολή μίας παραμέτρου κάθε φορά, ενώ όλες οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρήθηκαν σταθερές στις τιμές του σεναρίου T3. Με τον τρόπο αυτό απομονώνεται η επίδραση κάθε εξεταζόμενης μεταβλητής στην ενεργειακή και περιβαλλοντική επίδοση. Η προσέγγιση αυτή δεν

αποτυπώνει πλήρως τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις, οι οποίες εξετάζονται συμπληρωματικά μέσω των συνδυαστικών σεναρίων. Στην περίπτωση των κουφωμάτων μεταβάλλονται ταυτόχρονα ο συντελεστής θερμοπερατότητας U_w , ο ηλιακός συντελεστής g και η διαπερατότητα ορατού φωτός VT , ώστε τα εξεταζόμενα σενάρια να αντιστοιχούν σε διαφορετικές τεχνολογικές διαμορφώσεις κουφωμάτων. Επομένως, τα αποτελέσματα της διερεύνησης των κουφωμάτων εκφράζουν την επίδραση της συνολικής τεχνολογικής διαμόρφωσης του κουφώματος και δεν επιτρέπουν την απομόνωση της ανεξάρτητης συμβολής των επιμέρους ιδιοτήτων U_w , g και VT .

5.2.2 Παράμετροι και εύρος διερεύνησης

Πίνακας 5.4 Παράμετροι, εύρος και βήμα μεταβολής.

Παράμετρος	Αρχική	Τελική	Βήμα	Σενάρια
Εξωτερική τοιχοποιία	5 cm	11 cm	2 cm	4
Πλάκα σε επαφή με Μ.Θ.Χ.	6 cm	14 cm	2 cm	5
Τοιχώματα υπογείου	6 cm	12 cm	2 cm	4
Δάπεδο επί εδάφους	6 cm	12 cm	2 cm	4
Δάπεδο σε εξωτ. αέρα	6 cm	14 cm	2 cm	5
Κουφώματα (U_w , g , VT)	2,8	0,8	μεταβλητό	6
Σκίαση	0 cm	120 cm	20-40 cm	6
WWR (διερεύνηση)	×0,25	×1,50	-	3

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 41 εκτελέσεις προσομοίωσης στο βασικό σύνολο της παραμετρικής και συνδυαστικής διερεύνησης, στις οποίες περιλαμβάνονται τα τρία βασικά σενάρια και τα τέσσερα συνδυαστικά. Στις επιμέρους σειρές παραμετρικής διερεύνησης η βασική διαμόρφωση T3 επαναλαμβάνεται ως κοινό σημείο αναφοράς, ώστε κάθε παράμετρος να αξιολογείται ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες. Μετά την αφαίρεση των δύο σεναρίων αρχικής κατάστασης T1 και T2 και των επτά επαναλήψεων της βασικής διαμόρφωσης T3, προκύπτουν 32 διακριτά σενάρια σχεδιασμού, τα οποία συμμετέχουν στην τελική πολυκριτηριακή κατάταξη. Επιπλέον, εξετάστηκαν τρεις πρόσθετες διαμορφώσεις του λόγου διαφανών ανοιγμάτων προς όψη (WWR), αποκλειστικά για την ανάλυση ευαισθησίας και χωρίς συμμετοχή στην τελική κατάταξη.

5.3 Επίδραση παραμέτρων

Η επίδραση των εξεταζόμενων παραμέτρων αξιολογήθηκε με βάση τη μεταβολή της ενεργειακής και περιβαλλοντικής επίδοσης ως προς το σενάριο αναφοράς T3. Για κάθε παράμετρο εξετάστηκε το αντίστοιχο εύρος τιμών που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρήθηκαν στις τιμές του T3. Η συγκριτική αξιολόγηση βασίστηκε στον δείκτη ετήσιας ενεργειακής χρήσης (EUI), στον λειτουργικό άνθρακα, στον ενσωματωμένο άνθρακα και στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα.

5.3.1 Συγκριτική αξιολόγηση της επίδρασης των παραμέτρων

Πίνακας 5.5 Εύρος επίδρασης των εξεταζόμενων παραμέτρων στην ενεργειακή και περιβαλλοντική επίδοση.

Παράμετρος	Εύρος	Τιμή αναφοράς/επιλογής	ΔEUI	ΔC_{op}	ΔC_{emb}	ΔC_{tot}	Σχετική επίδραση
Κουφώματα	U_w 2,8-0,8 W/m ² K	$U_w = 0,8$ W/m ² K	6,01%	1,36%	0,02%	3,08%	1
Σκίαση	0-120 cm	0 cm	1,20%	1,14%	6,46%	1,78%	2
Πλάκα σε επαφή με Μ.Θ.Χ.	6-14 cm	6 cm	0,23%	0,09%	0,33%	0,72%	3
Δάπεδο επί εδάφους	6-12 cm	6 cm	0,62%	0,31%	0,29%	0,57%	4
Εξωτερική τοιχοποιία	5-11 cm	9 cm	1,41%	0,93%	0,33%	0,44%	5
Τοιχώματα υπογείου	6-12 cm	6 cm	0,42%	0,31%	0,27%	0,41%	6
Δάπεδο σε εξωτ. αέρα	6-14 cm	10 cm	0,05%	0,00%	0,00%	0,12%	7

Σημείωση: Οι στήλες του πίνακα δεν έχουν κοινή βάση υπολογισμού. Τα ΔEUI και ΔC_{tot} εκφράζουν το πλήρες εύρος μεταβολής (max-min) της παραμέτρου στο εξεταζόμενο διάστημα, ανηγμένο στην τιμή του σεναρίου αναφοράς T3 (R_{BASE}). Τα ΔC_{op} και ΔC_{emb} εκφράζουν τη μεταβολή της εννοϊκότερης ως προς το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα τιμής της παραμέτρου έναντι του T3. Για τη σκίαση, όπου η εννοϊκότερη τιμή ταυτίζεται με το σενάριο αναφοράς (0 cm), τα ΔC_{op} και ΔC_{emb} δίνονται για το σενάριο των 120 cm. Η στήλη «Σχετική επίδραση» ακολουθεί τη φθίνουσα κατάταξη του ΔC_{tot} .

Ο Πίνακας 5.5 καταδεικνύει ότι η σχετική επίδραση των παραμέτρων δεν είναι ομοιόμορφη. Τα κουφώματα παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη μεταβολή ως προς την

ενεργειακή επίδοση, με εύρος ΔΕUI 6,01%, ενώ ακολουθούν η εξωτερική τοιχοποιία και η σκίαση, με 1,41% και 1,20%, αντίστοιχα. Ως προς το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα, η μεγαλύτερη μεταβολή εντοπίζεται επίσης στα κουφώματα, με ΔCtot 3,08%, ενώ η σκίαση ακολουθεί με 1,78%. Αντίθετα, τα στοιχεία σε επαφή με το έδαφος ή τον εξωτερικό αέρα παρουσιάζουν σαφώς μικρότερη μεταβλητότητα στο εξεταζόμενο εύρος. Η κατάταξη αυτή αποτυπώνει τη σχετική ευαισθησία του αποτελέσματος στις συγκεκριμένες παραμέτρους και δεν αποτελεί από μόνη της κριτήριο επιλογής τελικής λύσης.

Για την περαιτέρω ερμηνεία των αποτελεσμάτων εξετάστηκαν οι τιμές των παραμέτρων που οδηγούν στο χαμηλότερο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα, με εξαίρεση τη σκίαση, για την οποία η ελάχιστη τιμή του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος συμπίπτει με το σενάριο αναφοράς και, συνεπώς, οι επιμέρους μεταβολές παρουσιάζονται για την ακραία τιμή των 120 cm, σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.6 Επίδραση της ευνοϊκότερης τιμής των εξεταζόμενων παραμέτρων ως προς το σενάριο αναφοράς (T3).

Παράμετρος	Ευνοϊκότερη τιμή	ΔΛειτουργικός	ΔΕνσωματωμένος	ΔΣυνολικό
Κουφώματα	Uw 0,8	-11.159	-112	-11.271
Εξωτ. τοιχοποιία	9 cm	-7.648	1.707	-5.941
Δάπεδο επί εδάφους	6 cm	-2.555	-1.502	-4.057
Τοιχώματα υπογείου	6 cm	-2.566	-1.374	-3.940
Πλάκα σε επαφή με Μ.Θ.Χ.	6 cm	717	-1.690	-973

Η σύγκριση των επιμέρους μεταβολών αναδεικνύει διαφορετικούς μηχανισμούς επίδρασης μεταξύ των παραμέτρων. Τα κουφώματα παρουσιάζουν το μεγαλύτερο λειτουργικό όφελος, με μείωση του λειτουργικού άνθρακα κατά 11.159 kgCO₂eq και ταυτόχρονη μικρή μείωση του ενσωματωμένου άνθρακα κατά 112 kgCO₂eq. Συνεπώς, η συγκεκριμένη παρέμβαση οδηγεί σε καθαρή μείωση του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος κατά 11.271 kgCO₂eq.

Η εξωτερική τοιχοποιία παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά. Για πάχος θερμομόνωσης 9 cm, η μείωση του λειτουργικού άνθρακα κατά 7.648 kgCO₂eq συνοδεύεται από αύξηση του ενσωματωμένου άνθρακα κατά 1.707 kgCO₂eq. Το καθαρό αποτέλεσμα παραμένει θετικό, με μείωση του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος κατά 5.941 kgCO₂eq. Η περίπτωση αυτή αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα της αντιστάθμισης μεταξύ λειτουργικών και ενσωματωμένων επιπτώσεων.

Αντίστοιχα, το δάπεδο επί εδάφους και τα τοιχώματα του υπογείου παρουσιάζουν μέτριο καθαρό όφελος, ενώ στην πλάκα σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο παρατηρείται μικρή αύξηση του λειτουργικού άνθρακα, η οποία υπεραντισταθμίζεται από τη μείωση του ενσωματωμένου άνθρακα. Οι αντίστοιχες καθαρές μεταβολές ανέρχονται σε -4.057, -3.940 και -973 kgCO₂eq, αντίστοιχα. Τα αναλυτικά διαγράμματα ανά δομικό στοιχείο παρατίθενται στο Παράρτημα Δ.



Διάγραμμα 5.3 Συγκριτική επίδραση των παραμέτρων του κελύφους στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα.

Το Διάγραμμα 5.3 αποτυπώνει γραφικά τη διαφοροποίηση της επίδρασης των εξεταζόμενων παραμέτρων στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα. Η υπεροχή των κουφωμάτων ως προς το εύρος μεταβολής είναι σαφής, ενώ ακολουθούν η σκίαση και οι υπόλοιπες παράμετροι του κελύφους με αισθητά μικρότερη επίδραση. Η εικόνα αυτή συμφωνεί με τη σχετική κατάταξη του Πίνακα 5.5 και επιβεβαιώνει ότι, στο

συγκεκριμένο μοντέλο και για τα εξεταζόμενα εύρη, οι παρεμβάσεις στα κουφώματα αποτελούν την παράμετρο με τη μεγαλύτερη συνολική ευαισθησία.

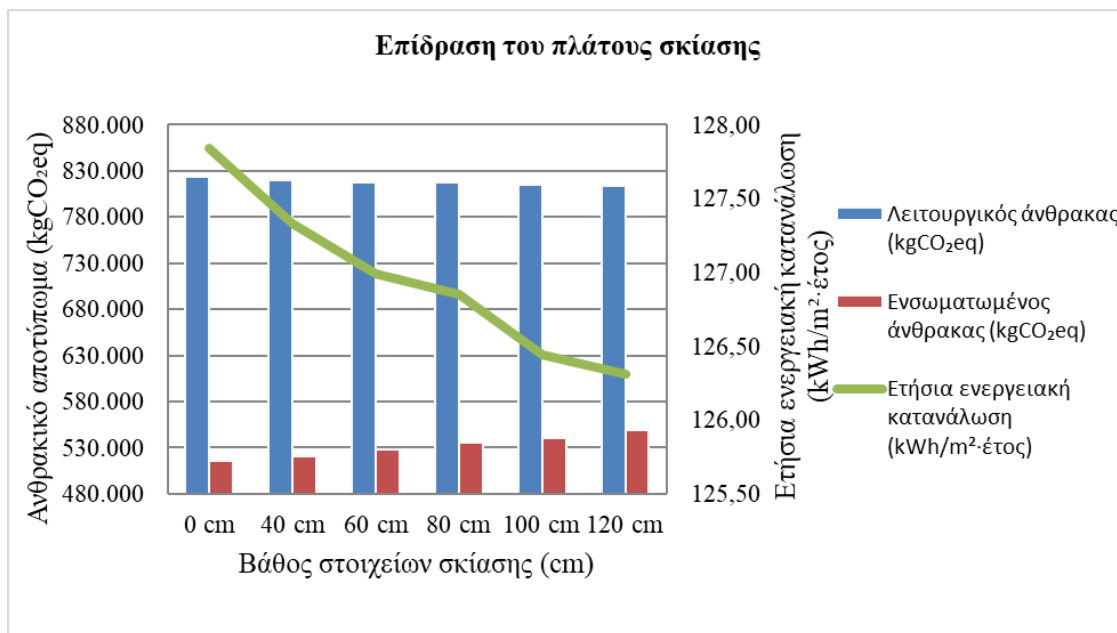
Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αύξηση της θερμομονωτικής προστασίας δεν οδηγεί κατ' ανάγκη σε ανάλογη βελτίωση της συνολικής περιβαλλοντικής επίδοσης. Η τελική επίδραση κάθε παρέμβασης προκύπτει από την ισορροπία μεταξύ της εξοικονόμησης λειτουργικής ενέργειας και του συνολικού περιβαλλοντικού φορτίου που εισάγουν τα υλικά. Ως εκ τούτου, η επιλογή μεταξύ εναλλακτικών λύσεων απαιτεί συνεκτίμηση τόσο της ενεργειακής όσο και της περιβαλλοντικής διάστασης και δεν μπορεί να βασίζεται σε μία μόνο παράμετρο ή σε έναν μόνο δείκτη.

5.3.2 Συστήματα σκίασης

Η διερεύνηση της σκίασης αφορά αποκλειστικά την προσθήκη οριζόντιων προβόλων από οπλισμένο σκυρόδεμα στις όψεις του εξεταζόμενου κτιρίου. Η παράμετρος που μεταβλήθηκε ήταν το βάθος του προβόλου, από 0 έως 120 cm, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι του σεναρίου T3 διατηρήθηκαν σταθερές.

Πίνακας 5.7 Αποτελέσματα σεναρίων συστημάτων σκίασης.

Σενάριο	Βάθος	EUI	Λειτουργικός	Ενσωματωμένος	Συνολικό
R_SHD01	0 cm	127,84	823.381	515.490	1.338.871
R_SHD02	40 cm	127,33	819.728	520.407	1.340.134
R_SHD03	60 cm	126,99	817.834	527.671	1.345.505
R_SHD04	80 cm	126,85	817.169	535.900	1.353.069
R_SHD05	100 cm	126,44	814.613	540.602	1.355.215
R_SHD06	120 cm	126,31	813.958	548.806	1.362.764



Διάγραμμα 5.4 Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση, λειτουργικός και ενσωματωμένος άνθρακας ανά βάθος σκίασης.

Η αύξηση του βάθους των εξεταζόμενων οριζόντιων προβόλων σκίασης οδηγεί σε σταδιακή βελτίωση της ενεργειακής επίδοσης, με τον EUI να μειώνεται από 127,84 kWh/m²·έτος στο σενάριο αναφοράς σε 126,31 kWh/m²·έτος στα 120 cm. Παράλληλα, ο λειτουργικός άνθρακας μειώνεται σταδιακά και φθάνει σε μείωση 1,14% ως προς το T3. Η επίδραση παραμένει, ωστόσο, περιορισμένη, γεγονός που συνδέεται με τις ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας του σχολικού κτιρίου και τη χρονική κατανομή των ηλιακών κερδών. Σε αντίθεση με την ενεργειακή επίδοση, ο ενσωματωμένος άνθρακας αυξάνεται όσο αυξάνεται το βάθος των προβόλων, λόγω της πρόσθετης ποσότητας οπλισμένου σκυροδέματος που απαιτείται για την κατασκευή τους. Στα 120 cm η αύξηση του ενσωματωμένου άνθρακα ανέρχεται σε 6,46% σε σχέση με το T3, με αποτέλεσμα το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα να αυξάνεται ήδη από τα 40 cm. Ως εκ τούτου, η συγκεκριμένη μορφή σκίασης, όπως προσομοιώθηκε στην παρούσα εργασία, δεν οδηγεί σε βελτίωση του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος.

5.4 Σενάρια εκτός κατάταξης

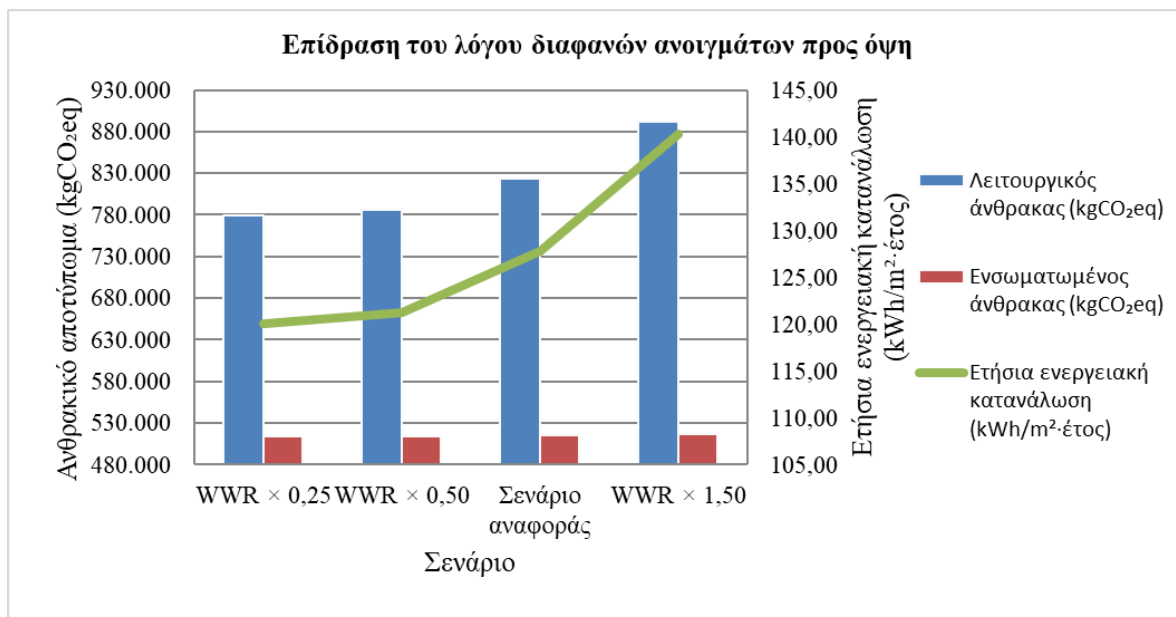
5.4.1 Λόγος διαφανών ανοιγμάτων προς όψη

Ο λόγος διαφανών ανοιγμάτων προς την όψη (WWR) εξετάστηκε συμπληρωματικά ως παράμετρος ευαισθησίας, με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση της μεταβολής της διαφάνειας του κελύφους στην ενεργειακή και περιβαλλοντική επίδοση του κτιρίου. Τα σενάρια αυτά δεν εντάχθηκαν στην τελική κατάταξη, καθώς οι εξεταζόμενες μεταβολές δεν αντιμετωπίζονται ως ισοδύναμες, τεχνικά εφαρμόσιμες παρεμβάσεις στο υφιστάμενο κτίριο.

Πίνακας 5.8 Αποτελέσματα σεναρίων μεταβολής του λόγου διαφανών ανοιγμάτων προς όψη.

Σενάριο	WWR	EUI	Λειτουργικός	Ενσωματωμένος	Συνολικό
WWR× 0,25	6%	120,06	779.478	514.281	1.293.760
WWR× 0,50	11%	121,20	786.243	514.518	1.300.761
T3(αναφορά)	22%	127,84	823.381	515.490	1.338.871
WWR × 1,50	33%	140,25	892.334	516.467	1.408.801

Τα αποτελέσματα δείχνουν σαφή εξάρτηση της επίδοσης από το ποσοστό των διαφανών ανοιγμάτων. Η μείωση του WWR από το 22% του σεναρίου αναφοράς στο 6% οδηγεί σε μείωση του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος κατά 3,37%, ενώ η αύξησή του στο 33% οδηγεί σε αύξηση κατά 5,22%. Παράλληλα, ο EUI μεταβάλλεται από 127,84 kWh/m²·έτος στο T3 σε 120,06 kWh/m²·έτος για WWR 6% και σε 140,25 kWh/m²·έτος για WWR 33%. Συνεπώς, το συγκεκριμένο αποτέλεσμα παρουσιάζει υψηλή ευαισθησία ως προς τη συγκεκριμένη μεταβλητή.



Διάγραμμα 5.5 Επίδραση του λόγου διαφανών ανοιγμάτων στην ετήσια ενεργειακή κατανάλωση και στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα.

Η γραφική απεικόνιση επιβεβαιώνει τη διαφορετική τάση των δύο πλευρών της μεταβολής: όσο μειώνεται το WWR, μειώνεται και η ενεργειακή κατανάλωση και, κατ' επέκταση, το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα, ενώ η αύξησή του οδηγεί σε αντίστροφη μεταβολή. Ωστόσο, τα αποτελέσματα δεν πρέπει να ερμηνευθούν ως άμεση πρόταση μείωσης ή αύξησης των ανοιγμάτων. Στο υφιστάμενο σχολικό κτίριο, η μείωση του WWR σε 6% ή 11% συνεπάγεται σημαντικό περιορισμό των διαφανών επιφανειών των χώρων διδασκαλίας, με πιθανές επιπτώσεις στον φυσικό φωτισμό και στη λειτουργικότητα, ενώ η αύξηση στο 33% απαιτεί ουσιώδη επέμβαση στις όψεις και στον φέροντα οργανισμό. Για τον λόγο αυτό, τα σενάρια WWR αξιοποιούνται αποκλειστικά ως δοκιμή ευαισθησίας και δεν συμμετέχουν στην τελική κατάταξη.

5.5 Συνδυαστικά σενάρια

Με βάση τα αποτελέσματα της επιμέρους παραμετρικής διερεύνησης, εξετάστηκε στη συνέχεια η συνδυασμένη επίδραση επιλεγμένων παρεμβάσεων στο κέλυφος και στα κουφώματα. Στόχος ήταν να αξιολογηθεί κατά πόσο η ταυτόχρονη εφαρμογή περισσότερων παρεμβάσεων μπορεί να οδηγήσει σε ευνοϊκότερο συνολικό

αποτέλεσμα σε σχέση με το σενάριο αναφοράς T3 (R_BASE). Τα συνδυαστικά σενάρια σχεδιάστηκαν ως τεχνικά εφαρμόσιμες διαμορφώσεις και αξιολογήθηκαν με τα ίδια ενεργειακά και περιβαλλοντικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

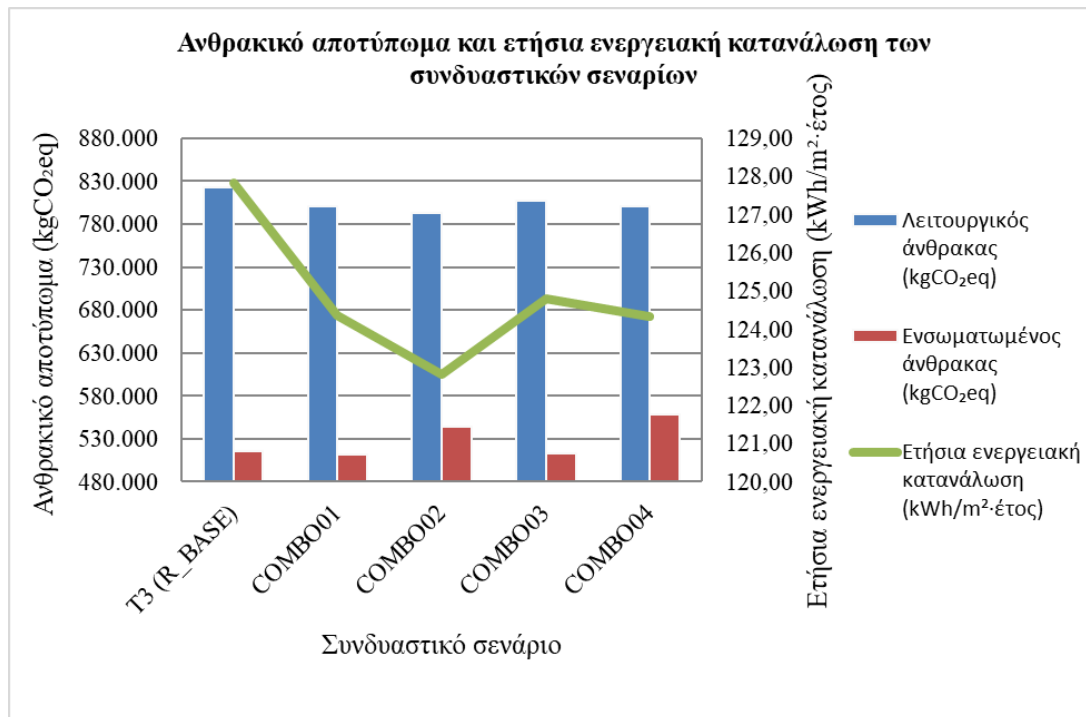
Τα τέσσερα συνδυαστικά σενάρια προκύπτουν από τη βασική διαμόρφωση T3 (R_BASE) με ταυτόχρονη μεταβολή περισσότερων της μίας παραμέτρων του κελύφους και των κουφωμάτων, ενώ όλες οι υπόλοιπες παραδοχές παραμένουν ταυτόσημες. Καθένα από αυτά διαμορφώθηκε με βάση διακριτό κριτήριο επιλογής, ώστε να ελεγχθεί κατά πόσο η λογική με την οποία επιλέγονται οι επιμέρους τιμές επηρεάζει το συνολικό αποτέλεσμα. Το R_COMB01 συνδυάζει, για κάθε παράμετρο χωριστά, την τιμή που εμφάνισε το χαμηλότερο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα στην αντίστοιχη σειρά παραμετρικής διερεύνησης. Το R_COMB02 συνδυάζει την τιμή με τον χαμηλότερο λειτουργικό άνθρακα, χωρίς να αγνοείται η ταυτόχρονη μεταβολή του ενσωματωμένου άνθρακα των υλικών. Το R_COMB03 περιλαμβάνει αποκλειστικά τις τρεις παρεμβάσεις που μειώνουν ταυτόχρονα και τα δύο μεγέθη, δηλαδή τα κουφώματα, τα τοιχώματα του υπογείου και το δάπεδο επί εδάφους. Το R_COMB04, τέλος, αντιστοιχεί στη μέγιστη ένταση επεμβάσεων που εξετάστηκε, με πλήρη θερμομονωτική ενίσχυση του κελύφους και πρόσθετη σκίαση βάθους 120 cm. Η αναλυτική σύνθεση των τεσσάρων συνδυασμών παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α.

Πίνακας 5.9 Αποτελέσματα συνδυαστικών σεναρίων.

Σενάριο	Λειτουργικός άνθρακας (kgCO ₂ eq)	Ενσωματωμένος άνθρακας (kgCO ₂ eq)	Συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα (kgCO ₂ eq)	Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση (kWh/m ² ·έτος)
R_BASE	823.381	515.490	1.338.871	127,84
R_COMB01	800.750	512.168	1.312.918	124,36
R_COMB02	792.791	543.838	1.336.628	122,81
R_COMB03	806.994	512.950	1.319.944	124,79
R_COMB04	801.231	558.227	1.359.458	124,34

Η σύγκριση με το R_BASE δείχνει ότι οι συνδυασμοί οδηγούν σε διαφορετικές ισορροπίες μεταξύ ενεργειακής επίδοσης, λειτουργικού άνθρακα και ενσωματωμένου άνθρακα. Το R_COMB01 παρουσιάζει τη χαμηλότερη συνολική τιμή ανθρακικού αποτυπώματος μεταξύ των εξεταζόμενων συνδυασμών, ενώ το R_COMB02 παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή λειτουργικού άνθρακα. Ωστόσο, η επίτευξη χαμηλότερου λειτουργικού άνθρακα δεν συνεπάγεται κατ' ανάγκη και χαμηλότερο

συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα, καθώς η μεταβολή του ενσωματωμένου άνθρακα των υλικών μπορεί να αντισταθμίσει μέρος του λειτουργικού οφέλους.



Διάγραμμα 5.6 Σύνοψη του ανθρακικού αποτυπώματος των συνδυαστικών σεναρίων.

Όπως αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 5.6, το R_COMB01 συνδυάζει χαμηλότερο λειτουργικό και χαμηλότερο ενσωματωμένο άνθρακα σε σχέση με το R_BASE και, συνεπώς, επιτυγχάνει το ευνοϊκότερο συνολικό αποτέλεσμα από τους εξεταζόμενους συνδυασμούς. Το R_COMB03 παρουσιάζει αντίστοιχη συμπεριφορά, αν και με μικρότερο συνολικό όφελος. Αντίθετα, στο R_COMB02 η μεγαλύτερη μείωση του λειτουργικού άνθρακα συνοδεύεται από αισθητή αύξηση του ενσωματωμένου άνθρακα, με αποτέλεσμα το συνολικό αποτύπωμα να παραμένει μόνο οριακά χαμηλότερο από το R_BASE. Το R_COMB04 εμφανίζει τη μεγαλύτερη ενίσχυση της θερμομονωτικής προστασίας μεταξύ των εξεταζόμενων συνδυασμών, αλλά η αντίστοιχη αύξηση του ενσωματωμένου άνθρακα οδηγεί τελικά σε υψηλότερο συνολικό αποτύπωμα από το σενάριο αναφοράς.

Η σύγκριση των συνδυαστικών σεναρίων καταδεικνύει ότι η συνδυασμένη εφαρμογή παρεμβάσεων δεν οδηγεί αναγκαστικά σε αθροιστική βελτίωση όλων των δεικτών. Η τελική επίδοση εξαρτάται από την αλληλεπίδραση μεταξύ της

εξοικονόμησης λειτουργικής ενέργειας και του ενσωματωμένου άνθρακα των επεμβάσεων. Στην παρούσα διερεύνηση, οι αποκλίσεις μεταξύ των συνδυαστικών αποτελεσμάτων και του αθροίσματος των αντίστοιχων επιμέρους επιδράσεων παραμένουν περιορισμένες και δεν υπερβαίνουν το 0,15%, γεγονός που υποδεικνύει μικρή αλληλεπίδραση μεταξύ των εξεταζόμενων παραμέτρων στο συγκεκριμένο εύρος τιμών.

5.6 Πολυκριτηριακή κατάταξη

5.6.1 Εφαρμογή του σύνθετου δείκτη

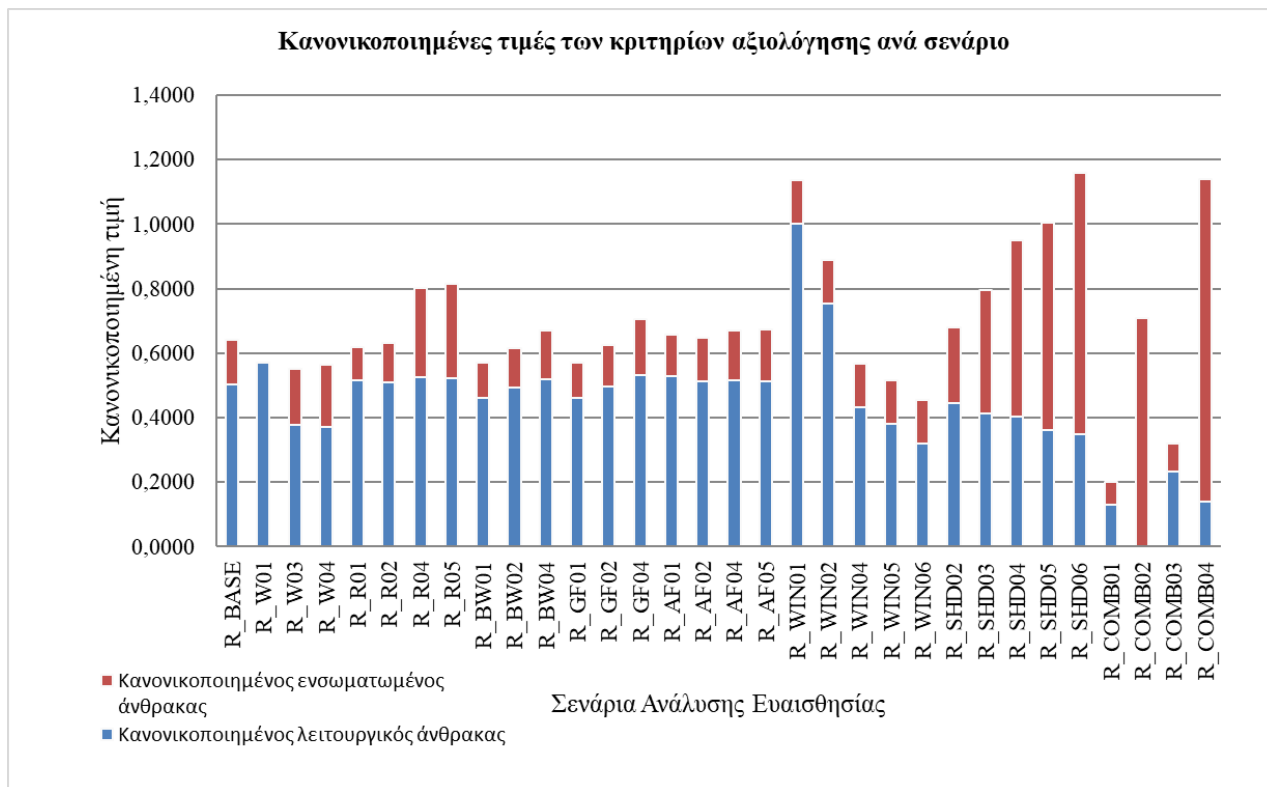
Μετά την αξιολόγηση των επιμέρους και των συνδυαστικών σεναρίων, εφαρμόστηκε πολυκριτηριακή διαδικασία για τη συγκριτική κατάταξη των τεχνικά και λειτουργικά εφαρμόσιμων εναλλακτικών. Η κατάταξη βασίστηκε σε σύνθετο δείκτη, ο οποίος προκύπτει από σταθμισμένο άθροισμα των κανονικοποιημένων τιμών του λειτουργικού και του ενσωματωμένου άνθρακα. Στην τελική διαδικασία περιλαμβάνονται μόνο τα σενάρια που πληρούν τα κριτήρια εφαρμοσιμότητας της μελέτης, ενώ τα σενάρια μεταβολής του WWR παραμένουν εκτός κατάταξης, καθώς χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά για την ανάλυση ευαισθησίας.

Ως βασικό σχήμα στάθμισης χρησιμοποιήθηκαν ίσα βάρη 0,50 για τον λειτουργικό και 0,50 για τον ενσωματωμένο άνθρακα. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την ισόρροπη συνεκτίμηση των δύο περιβαλλοντικών διαστάσεων και αποφεύγει την εκ των προτέρων προτεραιοποίηση μίας από αυτές.

Πίνακας 5.10 Κατάταξη σεναρίων (ίσα βάρη) - δέκα πρώτες θέσεις.

Θέση	Σενάριο	Λειτουργικός	Ενσωματωμένος	Συνολικό	C*op,i	C*emb,i	Si
1	R_COMB01	800.750	512.168	1.312.918	0,1312	0,0705	0,1008
2	R_COMB03	806.994	512.950	1.319.944	0,2340	0,0862	0,1601
3	R_WIN06	812.222	515.379	1.327.601	0,3202	0,1353	0,2277
4	R_WIN05	815.857	515.379	1.331.235	0,3801	0,1353	0,2577
5	R_W03	815.733	517.197	1.332.931	0,3781	0,1720	0,2750
6	R_W04	815.246	518.261	1.333.507	0,3700	0,1934	0,2817
7	R_WIN04	819.083	515.379	1.334.462	0,4332	0,1353	0,2843
8	R_GF01	820.826	513.988	1.334.815	0,4620	0,1072	0,2846
9	R_W01	827.363	508.677	1.336.039	0,5697	0,0000	0,2848
10	R_BW01	820.815	514.116	1.334.931	0,4618	0,1098	0,2858

Με βάση το βασικό σχήμα ίσων βαρών, το R_COMB01 καταλαμβάνει την πρώτη θέση με σύνθετο δείκτη 0,1008, ενώ το R_COMB03 καταλαμβάνει τη δεύτερη θέση με τιμή 0,1601. Και τα δύο σενάρια συνδυάζουν χαμηλές τιμές λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα και, συνεπώς, παρουσιάζουν την ευνοϊκότερη ισορροπία μεταξύ των δύο κριτηρίων. Στις επόμενες θέσεις εμφανίζονται κυρίως σενάρια βελτίωσης των κουφωμάτων και της εξωτερικής τοιχοποιίας. Η πλήρης κατάταξη των 32 σεναρίων παρατίθεται στο Παράρτημα Γ.



Διάγραμμα 5.7 Κανονικοποιημένες τιμές των δύο κριτηρίων ανά σενάριο.

Η γραφική απεικόνιση των κανονικοποιημένων τιμών επιτρέπει την άμεση σύγκριση της σχετικής επίδοσης των σεναρίων ως προς τα δύο κριτήρια. Τα δύο υψηλότερα καταταγμένα συνδυαστικά σενάρια εμφανίζουν ταυτόχρονα χαμηλές κανονικοποιημένες τιμές λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα, γεγονός που εξηγεί την ευνοϊκή θέση τους στον σύνθετο δείκτη. Αντίθετα, σενάρια τα οποία παρουσιάζουν βελτίωση μόνο στη μία από τις δύο διαστάσεις δεν κατατάσσονται κατ' ανάγκη στις υψηλότερες θέσεις, καθώς η τελική αξιολόγηση εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ των δύο κριτηρίων.

5.6.2 Έλεγχος ευαισθησίας των συντελεστών βαρύτητας

Με δεδομένο ότι η επιλογή των συντελεστών βαρύτητας επηρεάζει τον σύνθετο δείκτη, εξετάστηκε η σταθερότητα της κατάταξης υπό διαφορετικές προτεραιότητες μεταξύ λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα. Για τον σκοπό αυτό εφαρμόστηκαν πέντε σχήματα στάθμισης: ίσα βάρη, αυξημένη βαρύτητα στον λειτουργικό άνθρακα, αυξημένη βαρύτητα στον ενσωματωμένο άνθρακα και δύο ενδιάμεσες περιπτώσεις.

Πίνακας 5.11 Κατάταξη ανά εναλλακτικό σχήμα συντελεστών βαρύτητας.

Σενάριο	A (0,50/0,50)	B (0,70/0,30)	Γ (0,30/0,70)	Δ (0,60/0,40)	Ε (0,40/0,60)	Εύρος
R_COMB01	1	1	1	1	1	0
R_COMB03	2	2	2	2	2	0
R_COMB02	23	3	28	5	27	25
R_COMB04	31	17	32	29	32	15

Ο έλεγχος ευαισθησίας δείχνει ότι το R_COMB01 διατηρεί την πρώτη θέση και στα πέντε σχήματα στάθμισης, ενώ το R_COMB03 παραμένει σταθερά στη δεύτερη θέση. Αντίθετα, οι χαμηλότερες θέσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στη μεταβολή των βαρών. Ενδεικτικά, το R_COMB02 μετακινείται από την 3η έως την 28η θέση, γεγονός που δείχνει ότι η σχετική προτεραιότητα μεταξύ λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα επηρεάζει σημαντικά την κατάταξη των σεναρίων που παρουσιάζουν ισχυρότερη αντιστάθμιση μεταξύ των δύο κριτηρίων.

Κατά συνέπεια, οι δύο πρώτες θέσεις παρέμειναν αμετάβλητες στα πέντε εξεταζόμενα σχήματα στάθμισης και για το εξεταζόμενο εύρος βαρών 0,30–0,70. Η παρατήρηση αυτή αφορά αποκλειστικά το συγκεκριμένο σύνολο εναλλακτικών σεναρίων και κριτηρίων και δεν αποτελεί καθολική ιδιότητα της μεθόδου.

5.6.3 Περιορισμοί της διαδικασίας

Ο σύνθετος δείκτης χρησιμοποιείται ως εργαλείο συγκριτικής αξιολόγησης των εξεταζόμενων σεναρίων και όχι ως απόλυτο μέτρο περιβαλλοντικής επίδοσης. Η χρήση ίσων βαρών αποτελεί αναλυτική παραδοχή για την ισόρροπη συνεκτίμηση των δύο κριτηρίων, χωρίς να εξαλείφει τη διαφορετική αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει τον λειτουργικό και τον ενσωματωμένο άνθρακα. Ο πρώτος προκύπτει από το ενεργειακό

μοντέλο, ενώ ο δεύτερος από τις περιβαλλοντικές παραμέτρους και συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν στην LCA.

Για τον λόγο αυτό, μικρές διαφορές μεταξύ σεναρίων, ιδιαίτερα όταν είναι μικρότερες του 1% ως προς το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα, δεν θα πρέπει να ερμηνεύονται ως σαφής και απόλυτη υπεροχή της μίας λύσης έναντι της άλλης. Η τελική κατάταξη αποτελεί εργαλείο υποστήριξης της τεχνικής απόφασης και πρέπει να συνεκτιμάται παράλληλα με την τεχνική εφαρμοσιμότητα, τη λειτουργικότητα και τους περιορισμούς του υφιστάμενου κτιρίου.

5.7 Συζήτηση σε σχέση με τη βιβλιογραφία

Για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε συγκριτική εξέταση με ευρήματα προηγούμενων μελετών που αφορούν την ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση σχολικών και λοιπών κτιρίων. Η σύγκριση επικεντρώνεται σε κοινές παραμέτρους και δείκτες, όπως η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση, η επίδραση της θερμομόνωσης, των κουφωμάτων και της σκίασης, καθώς και η σχέση μεταξύ λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα. Οι βιβλιογραφικές τιμές αξιοποιούνται τόσο σε επίπεδο απόλυτων μεγεθών όσο και ποσοσטיών μεταβολών, με συνεκτίμηση των διαφορών ως προς την κλιματική ζώνη, την τυπολογία και γεωμετρία των κτιρίων, τις συνθήκες λειτουργίας, τα ενεργειακά συστήματα και τα όρια της περιβαλλοντικής αξιολόγησης.

Πίνακας 5.12 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με ευρήματα της βιβλιογραφίας.

Μελέτη	Παράμετρος / δείκτης	Βιβλιογραφικό εύρημα	Παρούσα εργασία	Ερμηνεία
Dascalaki και Sermpetzoglou (2011)	Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση μη θερμομονωμένων σχολικών κτιρίων, κλιματική ζώνη Γ	139 kWh/m ² ·έτος	142,19 kWh/m ² ·έτος (T1)	Υψηλότερη τιμή στην παρούσα εργασία, πιθανώς λόγω διαφορών στη γεωμετρία, την ηλικία και τις παραδοχές λειτουργίας.
Dascalaki και Sermpetzoglou (2011)	Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση θερμομονωμένων σχολικών κτιρίων, κλιματική ζώνη Γ	115 kWh/m ² ·έτος	127,84 kWh/m ² ·έτος (T3)	Το T3 παραμένει υψηλότερο, γεγονός που συνδέεται με τις ιδιαίτερες συνθήκες του εξεταζόμενου κτιρίου και τις παραδοχές του μοντέλου.

Dimoudi και Kostarela (2009)	Ενεργειακή εξοικονόμηση από παρεμβάσεις	17,3%	10,1% (T3 έναντι T1)	Συγκρίσιμο μέγεθος εξοικονόμησης, με μικρότερη βελτίωση στην παρούσα εργασία λόγω διαφορετικού κτιρίου και συνδυασμού επεμβάσεων.
Tsikra και Andreou (2017)	Πρόσθετη θερμομόνωση εξωτερικών τοιχοποιιών	0,45% εξοικονόμηση	Περιορισμένη επίδραση σε σχέση με άλλες παραμέτρους	Σύγκλιση: όταν το υφιστάμενο κέλυφος διαθέτει ήδη ικανοποιητική θερμική προστασία, η πρόσθετη θερμομόνωση έχει περιορισμένο περιθώριο βελτίωσης.
Tsikra και Andreou (2017)	Πρόσθετη θερμομόνωση δώματος	15,09% εξοικονόμηση	Μικρότερη σχετική επίδραση	Απόκλιση που μπορεί να αποδοθεί στη διαφορετική αρχική κατάσταση του κελύφους και στα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου κτιρίου. Η βιβλιογραφική τιμή αφορά δώμα σε άμεση επαφή με τον εξωτερικό αέρα, ενώ στην παρούσα εργασία το αντίστοιχο στοιχείο είναι πλάκα υπό μη θερμαινόμενο χώρο, προστατευμένη από την υπερκείμενη κεκλιμένη στέγη. Η μειωμένη θερμοκρασιακή διαφορά εκατέρωθεν της πλάκας ερμηνεύει το μεγαλύτερο μέρος της απόκλισης.
Dascalaki και Sermpezoglou (2011)	Αναβάθμιση κουφωμάτων με υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής	≈3% μείωση συνολικής πρωτογενούς ενέργειας	Τα κουφώματα αποτελούν την ισχυρότερη ενεργειακή παράμετρο	Σύγκλιση ως προς τη σημαντική συμβολή των κουφωμάτων στη βελτίωση της ενεργειακής επίδοσης.
Tsikra και Andreou (2017)	Αναβάθμιση κουφωμάτων	1,5% εξοικονόμηση	Ισχυρή επίδραση των κουφωμάτων	Σύγκλιση ως προς τη σημασία των θερμικών χαρακτηριστικών των ανοιγμάτων.
Tsikra και Andreou (2017)	Συστήματα σκίασης	-2,6% ψυκτικά φορτία και +2,7% θερμικά φορτία	Μείωση EUI από 127,84 σε 126,31 kWh/m ² ·έτος για σκίαση 120 cm	Σύγκλιση ως προς τη μικρή καθαρή ενεργειακή επίδραση της σκίασης λόγω ταυτόχρονης μεταβολής θερινών και χειμερινών ηλιακών κερδών.
Giama et al. (2021)	Θερμομόνωση - ενέργεια και ανθρακικό αποτύπωμα	53,56 → 33,31 kWh/m ² πρωτογενής ενέργεια, ενώ το ανθρακικό αποτύπωμα μεταβάλλεται πολύ λιγότερο	-10,1% EUI και -3,71% συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα από T1 → T3	Ισχυρή σύγκλιση: η ενεργειακή βελτίωση δεν συνεπάγεται ανάλογη μείωση του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος.
Giama et al. (2021)	Περιβαλλοντική επίδραση μονωτικών υλικών	Το μη μονωμένο σενάριο είχε 392,56 kgCO ₂ /m ² , ενώ ορισμένα μονωμένα	Ο ενσωματωμένος άνθρακας αυξάνεται κατά	Σύγκλιση: το περιβαλλοντικό όφελος της λειτουργίας αντισταθμίζεται εν μέρει από τον

		σενάρια παρουσίασαν υψηλότερες τιμές λόγω των εκπομπών παραγωγής των μονωτικών	2,52% στο T3, ενώ το συνολικό αποτύπωμα μειώνεται κατά 3,71%	ενσωματωμένο άνθρακα των υλικών.
Pedone et al. (2023)	Σχετική επίδραση υαλοστασίων και δομικών στοιχείων	Τα υαλοστάσια εμφανίζονται ως σημαντική αδυναμία του κελύφους των σχολικών κτιρίων	Τα κουφώματα κατατάσσονται μεταξύ των σημαντικότερων παραμέτρων	Σύγκλιση ως προς την αυξημένη ευαισθησία της ενεργειακής επίδοσης στα χαρακτηριστικά των ανοιγμάτων.

Ως προς την ενεργειακή επίδοση, η παρούσα εργασία παρουσιάζει υψηλότερες τιμές EUI από εκείνες των Dascalaki και Sermpetzoglou (2011), τόσο για το T1 όσο και για το T3. Για τα μη θερμομονωμένα σχολικά κτίρια, η τιμή των 142,19 kWh/m²·έτος του T1 είναι υψηλότερη κατά 9,44 kWh/m²·έτος από τη βιβλιογραφική τιμή των 139 kWh/m²·έτος, ενώ για τα θερμομονωμένα κτίρια το T3, με 127,84 kWh/m²·έτος, υπερβαίνει τα 115 kWh/m²·έτος κατά 12,84 kWh/m²·έτος.

Παράλληλα, η μετάβαση από το T1 στο T3 επιφέρει μείωση του δείκτη ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης ανά μονάδα επιφάνειας (EUI) κατά 10,1%, έναντι 17,3% εξοικονόμησης που αναφέρεται από τους Dimoudi και Kostarela (2009). Η διαφορά αυτή αντιστοιχεί σε 3,4 ποσοστιαίες μονάδες και μπορεί να συνδέεται με τη διαφορετική αρχική κατάσταση του κελύφους, τον συνδυασμό των εξεταζόμενων παρεμβάσεων, τη γεωμετρία και τις παραδοχές λειτουργίας των επιμέρους μοντέλων.

Η σύγκριση των επιμέρους παραμέτρων παρουσιάζει επίσης σημαντικές συγκρίσεις ως προς τη σχετική τους επίδραση. Για την πρόσθετη θερμομόνωση εξωτερικών τοιχοποιιών, η βιβλιογραφική εξοικονόμηση 0,45% των Tsikra και Andreou (2017) είναι μικρότερη από το εύρος μεταβολής του EUI που προέκυψε για την εξωτερική τοιχοποιία στην παρούσα διερεύνηση (1,41%), ενώ για τη θερμομόνωση δώματος η βιβλιογραφική επίδραση 15,09% είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μεταβολή 0,23% που παρατηρείται στην πλάκα κάτω από τον μη θερμαινόμενο χώρο της στέγης. Οι διαφορές αυτές δείχνουν ότι το αποτέλεσμα της θερμομόνωσης εξαρτάται έντονα από την αρχική θερμική προστασία και τα χαρακτηριστικά του δομικού στοιχείου. Αντίθετα, η αυξημένη ευαισθησία των κουφωμάτων στην παρούσα εργασία, όπου η παράμετρος κατατάσσεται πρώτη ως προς τη σχετική επίδραση, βρίσκεται σε συμφωνία με τις βιβλιογραφικές αναφορές για εξοικονόμηση περίπου 3% και 1,5% από αναβαθμίσεις κουφωμάτων. Η επίδραση της

εξεταζόμενης μορφής σκίασης είναι επίσης περιορισμένη, όπως και σε σχετικές βιβλιογραφικές προσεγγίσεις, με μείωση του EUI κατά περίπου 1,20% στο εξεταζόμενο εύρος. Η σύγκριση, ωστόσο, αφορά διαφορετικές μορφές και συνθήκες εφαρμογής σκίασης και συνεπώς δεν επιτρέπει άμεση γενίκευση. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν ειδικά οριζόντιοι πρόβολοι από οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ η βιβλιογραφία περιλαμβάνει ευρύτερο φάσμα συστημάτων και γεωμετριών σκίασης. Η μικρή καθαρή επίδραση αποδίδεται στην ταυτόχρονη μεταβολή των θερινών και χειμερινών ηλιακών κερδών και στις ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας της σχολικής μονάδας.

Ιδιαίτερη συμφωνία με τη βιβλιογραφία παρατηρείται στη σχέση μεταξύ ενεργειακής και περιβαλλοντικής επίδοσης. Στην παρούσα εργασία, η μείωση του EUI κατά 10,1% από το T1 στο T3 συνοδεύεται από μικρότερη μείωση του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος, κατά 3,71%, ενώ ο ενσωματωμένος άνθρακας αυξάνεται κατά 2,52%. Η τάση αυτή είναι συμβατή με τα ευρήματα των Giama et al. (2021), όπου η ενεργειακή βελτίωση δεν συνοδεύεται από αντίστοιχη μεταβολή του ανθρακικού αποτυπώματος, καθώς η αύξηση του ενσωματωμένου άνθρακα των υλικών μπορεί να αντισταθμίσει μέρος του λειτουργικού οφέλους. Παρόμοια, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας δείχνουν ότι η αξιολόγηση μιας επέμβασης αποκλειστικά με ενεργειακό κριτήριο μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικό συμπέρασμα από εκείνο που προκύπτει όταν συνεκτιμηθεί ο ενσωματωμένος άνθρακας.

Συνολικά, η αυξημένη ευαισθησία των κουφωμάτων που προέκυψε στην παρούσα εργασία συμφωνεί με τα ευρήματα των Pedone et al. (2023), ενώ αντίστοιχη σύγκλιση παρατηρείται για την περιορισμένη πρόσθετη επίδραση της θερμομόνωσης και τη σχετικά μικρή καθαρή επίδραση της σκίασης. Οι αποκλίσεις των απόλυτων τιμών και των επιμέρους ποσοστών μεταξύ των μελετών πρέπει, ωστόσο, να ερμηνεύονται με προσοχή, καθώς επηρεάζονται από την κλιματική ζώνη, την τυπολογία και γεωμετρία του κτιρίου, την αρχική κατάσταση του κελύφους, τις παραδοχές λειτουργίας, τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης και τα όρια της LCA. Επομένως, η βιβλιογραφική σύγκριση χρησιμοποιείται κυρίως για την αξιολόγηση της συμφωνίας των τάσεων και του σχετικού μεγέθους των επιδράσεων και όχι για άμεση ιεράρχηση των απόλυτων τιμών διαφορετικών μελετών.

6. Συμπεράσματα και Προτάσεις

6.1 Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα

6.1.1 Επίδραση των παραμέτρων του κελύφους

Το πρώτο ερευνητικό ερώτημα αφορούσε τη σχετική επίδραση των βασικών παραμέτρων του κελύφους στην ενεργειακή και περιβαλλοντική επίδοση του εξεταζόμενου σχολικού κτιρίου. Η παραμετρική διερεύνηση έδειξε ότι οι εξεταζόμενες παράμετροι παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς το μέγεθος και την κατεύθυνση της επίδρασής τους. Μεταξύ των τεχνικά εφαρμόσιμων παραμέτρων, τα κουφώματα παρουσίασαν τη μεγαλύτερη σχετική επίδραση, με εύρος μεταβολής 6,01% στον EUI και 3,08% στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα. Η εξωτερική τοιχοποιία παρουσίασε μικρότερη ενεργειακή επίδραση, αλλά σαφέστερη περιβαλλοντική αντιστάθμιση, ενώ οι πλάκες και τα στοιχεία σε επαφή με το έδαφος ή τον εξωτερικό αέρα εμφάνισαν περιορισμένη ευαισθησία.

Η διερεύνηση του WWR παρουσίασε μεγαλύτερη θεωρητική ευαισθησία, αλλά δεν εντάχθηκε στο σύνολο των τεχνικά εφαρμόσιμων σεναρίων. Ως εκ τούτου, για το συγκεκριμένο υφιστάμενο σχολικό κτίριο η ενεργειακή ευαισθησία μιας παραμέτρου δεν επαρκεί από μόνη της για την επιλογή παρέμβασης, αλλά πρέπει να συνδυάζεται με κριτήρια τεχνικής και λειτουργικής εφικτότητας.

6.1.2 Αντιστάθμιση λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα

Το δεύτερο ερευνητικό ερώτημα αφορούσε την εμφάνιση αντιστάθμισης μεταξύ λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα. Η αντιστάθμιση αναδεικνύεται εντονότερα στην εξωτερική τοιχοποιία και στην εξεταζόμενη μορφή εξωτερικής σκίασης. Στην εξωτερική τοιχοποιία, πάχος θερμομόνωσης 9 cm μειώνει τον λειτουργικό άνθρακα κατά 7.648 kgCO₂eq, αλλά αυξάνει τον ενσωματωμένο κατά 1.707 kgCO₂eq, οδηγώντας σε καθαρή μείωση του συνολικού αποτυπώματος κατά 5.941 kgCO₂eq. Αντίστοιχα, η αύξηση του βάθους των οριζόντιων προβόλων σκίασης από 0 έως 120 cm μειώνει τον λειτουργικό άνθρακα κατά 1,14%, αλλά αυξάνει τον ενσωματωμένο κατά 6,46%, με αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος.

Επομένως, η περιβαλλοντική επίδοση μιας επέμβασης δεν μπορεί να αποτιμηθεί αποκλειστικά από τη λειτουργική εξοικονόμηση ενέργειας. Η ενσωμάτωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των υλικών είναι κρίσιμη, ιδιαίτερα σε επεμβάσεις που αυξάνουν σημαντικά τις απαιτούμενες ποσότητες υλικών.

6.1.3 Σταθερότητα της πολυκριτηριακής κατάταξης

Το τρίτο ερευνητικό ερώτημα αφορούσε τη μεταβολή της κατάταξης ως προς την επιλογή των συντελεστών βαρύτητας. Το R_COMB01 κατατάσσεται στην πρώτη θέση και στα πέντε εξεταζόμενα σχήματα στάθμισης, ενώ το R_COMB03 διατηρεί τη δεύτερη θέση. Αντίθετα, άλλα σενάρια παρουσιάζουν σημαντικότερες μεταβολές της θέσης τους όταν μεταβάλλονται τα βάρη, γεγονός που δείχνει ότι η κατάταξη δεν είναι ίδια για όλα τα σενάρια και εξαρτάται από τη σχετική βαρύτητα που αποδίδεται στα δύο κριτήρια. Τα αποτελέσματα της ευαισθησιακής ανάλυσης αφορούν αποκλειστικά τα πέντε εξεταζόμενα σχήματα και το εύρος βαρών 0,30–0,70.

Στα πέντε εξεταζόμενα σχήματα στάθμισης, οι δύο πρώτες θέσεις της κατάταξης παρέμειναν αμετάβλητες: το R_COMB01 κατατάσσεται στην πρώτη θέση και το R_COMB03 στη δεύτερη. Η παρατήρηση αυτή αφορά αποκλειστικά τα πέντε εξεταζόμενα σχήματα και το εύρος βαρών 0,30–0,70 που εξετάστηκε και δεν επεκτείνεται πέρα από το συγκεκριμένο σύνολο εναλλακτικών και συντελεστών στάθμισης.

6.2 Κύρια ποσοτικά ευρήματα

Πίνακας 6.1 Κύρια ποσοτικά ευρήματα της μελέτης.

Εύρημα	Αποτέλεσμα
Μεταβολή T1 → T3 στον δείκτη ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης ανά μονάδα επιφάνειας	–10,1%
Μεταβολή T1 → T3 στην απόλυτη ετήσια κατανάλωση ενέργειας	–10,1%
Μεταβολή T1 → T3 στον λειτουργικό άνθρακα	–7,25%
Μεταβολή T1 → T3 στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα	–3,71%
Εύρος μεταβολής του δείκτη ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης για τα κουφώματα	6,01%
Εξωτερική τοιχοποιία με πάχος θερμομόνωσης 9 cm	–5.941 kgCO _{2eq} καθαρό όφελος

R_COMB04 - συνδυασμός μέγιστης θερμομονωτικής ενίσχυσης και σκίασης 120 cm	+1,54% στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα
R_COMB01	1η θέση σε όλα τα εξεταζόμενα σχήματα βαρών

Τα παραπάνω ευρήματα δείχνουν ότι η ενεργειακή αναβάθμιση του εξεταζόμενου κτιρίου μπορεί να επιφέρει μείωση της λειτουργικής ενεργειακής κατανάλωσης, χωρίς όμως το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα να μεταβάλλεται γραμμικά με την ένταση των επεμβάσεων. Η συνδυαστική αξιολόγηση των σεναρίων βασίζεται στην ταυτόχρονη εξέταση του λειτουργικού και του ενσωματωμένου άνθρακα εντός των καθορισμένων λογιστικών ορίων.

6.3 Τεχνική ερμηνεία και συμπεράσματα για τη μελέτη περίπτωσης

Για το εξεταζόμενο σχολικό κτίριο, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η στρατηγική αναβάθμισης δεν θα πρέπει να βασίζεται στη μέγιστη δυνατή θερμομονωτική ενίσχυση όλων των δομικών στοιχείων. Η μεγαλύτερη σχετική επίδραση μεταξύ των τεχνικά εφαρμόσιμων παραμέτρων εντοπίζεται στα κουφώματα, ενώ η εξωτερική τοιχοποιία παρουσιάζει ένα περιορισμένο εύρος στο οποίο η πρόσθετη θερμομόνωση παραμένει περιβαλλοντικά ευνοϊκή.

Η συγκεκριμένη συμπεριφορά πρέπει να ερμηνεύεται σε συνάρτηση με τη σχολική χρήση του κτιρίου. Το συγκεντρωμένο ωράριο λειτουργίας, οι περίοδοι μη λειτουργίας και η χρονική κατανομή των εσωτερικών και ηλιακών φορτίων επηρεάζουν το σχετικό βάρος των επιμέρους παρεμβάσεων. Η περιορισμένη καθαρή επίδραση της σκίασης δεν αποτελεί γενικό συμπέρασμα για όλα τα κτίρια ή για όλα τα συστήματα σκίασης. Στην παρούσα εργασία το συμπέρασμα αφορά αποκλειστικά την εξεταζόμενη διαμόρφωση οριζόντιων προβόλων από οπλισμένο σκυρόδεμα και τις συγκεκριμένες διαστάσεις, προσανατολισμούς και συνθήκες λειτουργίας της υπό μελέτη σχολικής μονάδας. Διαφορετικός τύπος σκίασης, όπως κατακόρυφα στοιχεία, ελαφρά μεταλλικά σκίαστρα ή κινητά συστήματα, θα μπορούσε να παρουσιάσει διαφορετική ενεργειακή και περιβαλλοντική συμπεριφορά και δεν έχει εξεταστεί στην παρούσα εργασία.

Συγχρόνως, η αξιολόγηση του WWR ανέδειξε τη διάκριση μεταξύ υπολογιστικής ευαισθησίας και σχεδιαστικής εφαρμοσιμότητας. Τα σενάρια WWR εμφάνισαν σημαντικές μεταβολές στην ενεργειακή και περιβαλλοντική επίδοση του μοντέλου, αλλά δεν συμμετείχαν στην τελική κατάταξη, καθώς οι εξεταζόμενες γεωμετρικές μεταβολές δεν θεωρήθηκαν, στο πλαίσιο του προκαταρκτικού ελέγχου, ισοδύναμες τεχνικά και λειτουργικά εφαρμόσιμες παρεμβάσεις στο υφιστάμενο κτίριο. Δεν πραγματοποιήθηκε ανεξάρτητη υπολογιστική αξιολόγηση φυσικού φωτισμού ή θερμικής άνεσης και, συνεπώς, δεν τεκμηριώνεται από την παρούσα εργασία η επίδοση των σεναρίων WWR ως προς τα συγκεκριμένα κριτήρια.

6.4 Περιορισμοί και αβεβαιότητα

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας πρέπει να ερμηνεύονται ως συγκριτικά αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης περίπτωσης και των αντίστοιχων παραδοχών. Το ενεργειακό μοντέλο δεν έχει βαθμονομηθεί με βάση πραγματικές μετρήσεις ή ιστορικές καταναλώσεις του κτιρίου και, συνεπώς, οι απόλυτες τιμές της ενεργειακής κατανάλωσης δεν αποτελούν επικυρωμένη πρόβλεψη της πραγματικής λειτουργίας.

Επιπλέον, ορισμένες ιδιότητες της υφιστάμενης κατασκευής, όπως η ακριβής σύσταση ορισμένων δομικών στοιχείων, τα χαρακτηριστικά των κουφωμάτων και η αεροστεγανότητα, βασίζονται σε τεκμηριωμένες παραδοχές. Η περιβαλλοντική αξιολόγηση αποτελεί περιορισμένη ή επιμέρους LCA με όρια A1-A3 και B6. Η περίοδος αναφοράς των 20 ετών αποτελεί μεθοδολογική παραδοχή και επηρεάζει τη σχετική στάθμιση μεταξύ λειτουργικού και ενσωματωμένου άνθρακα. Επομένως, διαφορετική περίοδος αναφοράς ενδέχεται να μεταβάλει τη σχετική κατάταξη των σεναρίων. Επιπλέον, οι περιβαλλοντικοί συντελεστές προέρχονται από τη βάση δεδομένων του χρησιμοποιούμενου εργαλείου και δεν αντιστοιχούν σε μεμονωμένες EPDs.

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών του ενεργειακού μοντέλου παρουσιάζουν, για ορισμένα υλικά, αποκλίσεις από τις κανονιστικές τιμές της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2017. Ειδικότερα, το οπλισμένο σκυρόδεμα φέρει θερμική

αγωγιμότητα χαμηλότερη της κανονιστικής. Η απόκλιση αυτή επηρεάζει κυρίως τα σενάρια χωρίς θερμομονωτική προστασία, υποεκτιμώντας τις θερμικές απώλειες της υφιστάμενης κατάστασης και, κατ' επέκταση, το μέγεθος του οφέλους που αποδίδεται στην αναβάθμιση. Στα θερμομονωμένα σενάρια, όπου η θερμική αντίσταση καθορίζεται από τη μονωτική στρώση, η επίδραση είναι αμελητέα. Τα αποτελέσματα της εργασίας είναι επομένως συντηρητικά ως προς το εκτιμώμενο όφελος.

Τέλος, ο φυσικός φωτισμός, η οπτική άνεση και η θερμική άνεση δεν αξιολογήθηκαν μέσω ανεξάρτητης λεπτομερούς προσομοίωσης. Τα ζητήματα αυτά συνεκτιμήθηκαν μόνο στο πλαίσιο προκαταρκτικού ποιοτικού ελέγχου εφικτότητας και οριοθετούν το πεδίο εφαρμογής των συμπερασμάτων. Πριν από οποιαδήποτε τελική σχεδιαστική απόφαση απαιτείται ανεξάρτητη αξιολόγηση φυσικού φωτισμού, θερμικής και οπτικής άνεσης. Τα αποτελέσματα πρέπει επομένως να ερμηνεύονται ως συγκριτικά αποτελέσματα για τη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης και τις συγκεκριμένες παραδοχές και όχι ως βαθμονομημένη πρόβλεψη της πραγματικής λειτουργίας του κτιρίου.

6.5 Συνεισφορά της έρευνας και προσωπική συνεισφορά

Η συνεισφορά της εργασίας έγκειται στην εφαρμογή ενός ενιαίου πλαισίου BIM, παραμετρικής διερεύνησης, ενεργειακής αξιολόγησης, Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) και πολυκριτηριακής κατάταξης σε υφιστάμενη σχολική μονάδα. Το πλαίσιο αυτό επέτρεψε τη συστηματική σύγκριση εναλλακτικών παρεμβάσεων και την ανάδειξη περιβαλλοντικών αντισταθμίσεων που δεν αποτυπώνονται μέσω ενός αποκλειστικά ενεργειακού δείκτη.

Σε επίπεδο προσωπικής συνεισφοράς, η εργασία περιλαμβάνει την ανάπτυξη και οργάνωση του ψηφιακού μοντέλου της μελέτης περίπτωσης στο Autodesk Revit, τη διαμόρφωση των παραμετρικών τύπων του κελύφους και των κουφωμάτων, την ανάπτυξη και εφαρμογή διαδικασιών στο Dynamo για τις επαναλαμβανόμενες μεταβολές, τη διαχείριση και εκτέλεση των ενεργειακών και περιβαλλοντικών σεναρίων, καθώς και την επεξεργασία, οργάνωση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων μέσω υπολογιστικών φύλλων, πινάκων και διαγραμμάτων.

Η προσωπική αυτή συνεισφορά αφορά, συνεπώς, όχι μόνο την παραγωγή και οργάνωση του ψηφιακού μοντέλου, αλλά και τη διαμόρφωση και υλοποίηση της υπολογιστικής ροής από την παραμετρική διαχείριση των σεναρίων έως τη συγκριτική αξιολόγηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

6.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η περαιτέρω ανάπτυξη της μεθοδολογικής προσέγγισης θα μπορούσε, πρώτον, να περιλαμβάνει τη συλλογή πραγματικών δεδομένων κατανάλωσης και επιτόπιων μετρήσεων θερμοκρασίας, υγρασίας, αερισμού και ποιότητας εσωτερικού αέρα, ώστε να καταστεί δυνατή η βαθμονόμηση και η επικύρωση του ενεργειακού μοντέλου.

Δεύτερον, η διερεύνηση του λόγου διαφανών ανοιγμάτων προς όψη θα μπορούσε να επεκταθεί με ανεξάρτητη αξιολόγηση φυσικού φωτισμού, θάμβωσης και θερμικής άνεσης, ώστε η ενεργειακή επίδραση των ανοιγμάτων να συνεκτιμάται με την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος.

Τρίτον, η πολυκριτηριακή αξιολόγηση θα μπορούσε να διευρυνθεί με οικονομικά κριτήρια, όπως το αρχικό κόστος, το κόστος συντήρησης και το κόστος κύκλου ζωής, καθώς και με εναλλακτικά δομικά υλικά χαμηλότερου ενσωματωμένου άνθρακα.

Τέταρτον, θα ήταν χρήσιμη η διερεύνηση της αβεβαιότητας των βασικών παραμέτρων του μοντέλου, μέσω συστηματικής ανάλυσης ευαισθησίας ή πιθανοτικής προσέγγισης, ώστε να εκτιμηθεί κατά πόσο οι διαφοροποιήσεις στην κατάταξη παραμένουν σταθερές όταν μεταβάλλονται αβέβαιες εισροές, όπως οι θερμοφυσικές ιδιότητες, η αεροστεγανότητα, οι συντελεστές περιβαλλοντικών επιπτώσεων και οι παραδοχές λειτουργίας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συγκριτική διερεύνηση εναλλακτικών συστημάτων εξωτερικής σκίασης, όπως κατακόρυφα στοιχεία, ελαφρά σταθερά σκίαστρα και κινητά συστήματα, με παράλληλη αξιολόγηση της ενεργειακής επίδοσης, του ενσωματωμένου άνθρακα, του φυσικού φωτισμού και της θερμικής και οπτικής άνεσης.

Τέλος, η εφαρμογή της ίδιας μεθοδολογικής προσέγγισης σε διαφορετικές σχολικές μονάδες και κλιματικές ζώνες θα επέτρεπε την εξέταση της συμπεριφοράς της σε διαφορετικές γεωμετρίες, κατασκευαστικές καταστάσεις και συνθήκες λειτουργίας και θα βοηθούσε να διαπιστωθεί ποια από τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης εμφανίζουν σταθερότητα και ποια εξαρτώνται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης μελέτης περίπτωσης.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ:

- Alassaf, N. (2025). From Abstraction to Realization: A Diagrammatic BIM Framework for Conceptual Design in Architectural Education. *Sustainability*, 17(19), 8853. <https://doi.org/10.3390/su17198853>
- 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>
- Antoniadou, P., Giama, E., & Papadopoulos, A. M. (2015). Low Energy Office Buildings in Greece: Potential and Perspectives. *46th International HVAC&R Congress and Exhibition*.
- Antoniadou, P., Giama, E., & Papadopoulos, A. M. (2018). Analysis of environmental aspects affecting comfort in commercial buildings. *Thermal Science*, 22. <https://doi.org/10.2298/tsci170921016a>
- Antoniadou, P., Symeonidou, M., Kyriaki, E., Giama, E., Boemi, S. N., Chadiarakou, S., & Papadopoulos, A. M. (2020). High performance building façades for Zero Energy Buildings in Greece: State of the art and perspectives. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 410(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/410/1/012036>
- Chastas, P. (2020). Μεθοδολογική-υπολογιστική προσέγγιση της επιρροής των εμπεριεχομένων περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα βέλτιστα επίπεδα κόστους των κτιρίων σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης [Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ), Σχολή Πολυτεχνική, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Επιστήμης και Τεχνολογίας των Κατασκευών, Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτιρίων]. <https://doi.org/10.12681/eadd/47988>
- Dascalaki, E. G., & Sermpetzoglou, V. G. (2011). Energy performance and indoor environmental quality in Hellenic schools. *Energy and Buildings*, 43(2-3), 718-727. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.017>

- Dimoudi, A., & Kostarela, P. (2009). Energy monitoring and conservation potential in school buildings in the C' climatic zone of Greece. *Renewable Energy*, 34(1), 289-296. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.025>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. John Wiley & Sons.
- European Committee for Standardization. (2011). *EN 15978: Sustainability of construction works—Assessment of environmental performance of buildings—Calculation method*.
- European Parliament and Council of the European Union. (2010). *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)*.
- European Parliament and Council of the European Union. (2018). Directive (EU) 2018/844 of 30 May 2018 on the energy performance of buildings. In *Brussels*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj>
- European Parliament and Council of the European Union. (2023). *Directive (EU) 2023/1791 on energy efficiency (recast)*.
- European Parliament and Council of the European Union. (2024). *Directive (EU) 2024/1275 on the energy performance of buildings (recast)*.
- Giama, E., Kyriaki, E., Antoniadou, P., Symeonidou, M., & Papadopoulos, A. M. (2021). Energy and environmental evaluation of retrofitting facades for zero energy buildings: The case of an office building in Greece. *Journal of Physics: Conference Series*, 2069. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012108>
- Hetemi, E., Ordieres-Meré, J., & Nuur, C. (2020). An institutional approach to digitalization in sustainability-oriented infrastructure projects: The limits of the building information model. *Sustainability (Switzerland)*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/su12093893>
- International Organization for Standardization. (2006a). *ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*.
- International Organization for Standardization. (2006b). *ISO 14044 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*.

- Karakosta, C., & Vryzidis, I. (2025). Cost-Effective Energy Retrofit Pathways for Buildings: A Case Study in Greece. *Energies*, 18(15), 4014.
<https://doi.org/10.3390/en18154014>
- Kontoleon, K. J., & Eumorfopoulou, E. A. (2010). The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and Environment*, 45(5), 1287-1303.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.11.013>
- Koutamanis, A., Heuer, J., & Könings, K. D. (2017). A visual information tool for user participation during the lifecycle of school building design: BIM. *European Journal of Education*, 52(3). <https://doi.org/10.1111/ejed.12226>
- Le, A. T. H., Park, K. S., Domingo, N., Rasheed, E., & Mithraratne, N. (2018). Sustainable refurbishment for school buildings: a literature review. In *International Journal of Building Pathology and Adaptation* (Vol. 39, Number 1). <https://doi.org/10.1108/IJBPA-01-2018-0009>
- Manmatharasan, P., Bitsuamlak, G., & Grolinger, K. (2025). AI-driven design optimization for sustainable buildings: A systematic review. *Energy and Buildings*, 332, 115440. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115440>
- Moghayedi, A., Michell, K., Hübner, D., Le Jeune, K., & Massyn, M. (2024). Examine the impact of green methods and technologies on the environmental sustainability of supportive education buildings, perspectives of circular economy and net-zero carbon operation. *Facilities*, 42(3-4).
<https://doi.org/10.1108/F-12-2022-0161>
- Mohelníková, J., Novotný, M., & Mocová, P. (2020). Evaluation of School Building Energy Performance and Classroom Indoor Environment. *Energies*, 13(10), 2489. <https://doi.org/10.3390/en13102489>
- Moreno, C., Olbina, S., & Issa, R. R. (2019). BIM Use by Architecture, Engineering, and Construction (AEC) Industry in Educational Facility Projects. *Advances in Civil Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/1392684>
- Mytafides, C., Dimoudi, A., & Zoras, S. (2017). Transformation of a university building into a zero energy building in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 155, 98-114.

- Olgyay, V. (1963). *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press.
<https://press.princeton.edu/books/paperback/9780691006982/design-with-climate>
- Pedone, L., Molaioni, F., Vallati, A., & Pampanin, S. (2023). Energy refurbishment planning of Italian school buildings using data-driven predictive models. *Applied Energy*, 350, 121730. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121730>
- Romero, P., Miranda, M. T., Montero, I., Sepúlveda, F. J., & Valero-Amaro, V. (2023). Critical Review of the Literature on Thermal Comfort in Educational Buildings: Study of the Influence of the COVID-19 Pandemic. *Indoor Air*, 2023, 1-36. <https://doi.org/10.1155/2023/8347598>
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM Handbook*. Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781119287568>
- Santamouris, M., Synnefa, A., Assimakopoulos, M., Livada, I., Pavlou, K., Papaglastra, M., Gaitani, N., Kolokotsa, D., & Assimakopoulos, V. D. (2008). Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation. *Energy and Buildings*, 40(10), 1833-1843. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.04.002>
- Shen, W., Hao, Q., Mak, H., Neelamkavil, J., Xie, H., Dickinson, J., Thomas, R., Pardasani, A., & Xue, H. (2010). Systems integration and collaboration in architecture, engineering, construction, and facilities management: A review. *Advanced Engineering Informatics*, 24(2), 196-207.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2009.09.001>
- Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., & García-Martínez, A. (2017). Critical review of bim-based LCA method to buildings. *Energy and Buildings*, 136, 110-120.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009>
- Strelets, K., Zaborova, D., Kokaya, D., Petrochenko, M., & Melekhin, E. (2025). Building Information Modeling (BIM)-Based Building Life Cycle Assessment (LCA) Using Industry Foundation Classes (IFC) File Format. *Sustainability*, 17(7), 2848. <https://doi.org/10.3390/su17072848>

- 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>
- Tsikaloudaki, K., Laskos, K., & Bikas, D. (2015). The energy performance of windows in Mediterranean regions. *Energy Reports*, 7, 4022-4034.
- Tsikra, P., & Andreou, E. (2017). Investigation of the Energy Saving Potential in Existing School Buildings in Greece. The role of Shading and Daylight Strategies in Visual Comfort and Energy Saving. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 204-211. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.107>
- Turrin, M., von Buelow, P., & Stouffs, R. (2011). Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, 25(4), 656-675. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.07.009>
- Vagi, F., & Dimoudi, A. (2011). *Analysing the Energy Performance of Secondary Schools in N. Greece*. 1837-1844. <https://doi.org/10.3384/ecp110571837>
- Wang, M., Xu, Y., Shen, R., & Wu, Y. (2024). Performance-Oriented Parametric Optimization Design for Energy Efficiency of Rural Residential Buildings: A Case Study from China's Hot Summer and Cold Winter Zone. *Sustainability*, 16(19), 8330. <https://doi.org/10.3390/su16198330>
- Woodbury, R. (2010). *Elements of Parametric Design*.
- Zimmermann, R. K., Bruhn, S., & Birgisdóttir, H. (2021). BIM-Based Life Cycle Assessment of Buildings—An Investigation of Industry Practice and Needs. *Sustainability*, 13(10), 5455. <https://doi.org/10.3390/su13105455>
- Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. (2010). *T.O.T.E.E. 20701-3/2010: Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών*.
- Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. (2017a). *T.O.T.E.E. 20701-1/2017: Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων και την έκδοση του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης*.

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. (2017b). *Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2017 Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων.*

8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Στα παρόντα Παραρτήματα παρατίθενται οι αναλυτικοί πίνακες τεκμηρίωσης της παραμετρικής διερεύνησης. Περιλαμβάνονται ο συγκεντρωτικός πίνακας των εξεταζόμενων σεναρίων, τα αντίστοιχα ενεργειακά και περιβαλλοντικά αποτελέσματα, οι τιμές κανονικοποίησης και η πλήρης κατάταξη βάσει του σύνθετου δείκτη πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Οι πίνακες αυτοί υποστηρίζουν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται συνοπτικά στο Κεφάλαιο 5.

8.1 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - Συγκεντρωτικός πίνακας παραμετρικών σεναρίων

Στο παρόν παράρτημα παρατίθεται το σύνολο των σεναρίων που εξετάστηκαν, με τις τιμές των παραμέτρων του κελύφους και τα αντίστοιχα αποτελέσματα ενεργειακής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης. Οι τιμές του ανθρακικού αποτυπώματος αφορούν περίοδο αναφοράς είκοσι ετών και όρια ανάλυσης A1-A3 και B6.

Πίνακας Α.1 Συγκεντρωτικός πίνακας παραμετρικών και συνδυαστικών σεναρίων.

Σενάριο	Θερμ. τοιχοποιίας (cm)	Θερμ. πλάκας έδρασης στέγης (cm)	Θερμ. τοιχώμ. υπογείου (cm)	Θερμ. δαπέδου επί εδάφους (cm)	Θερμ. δαπέδου σε εξωτερικό αέρα (cm)	Uw (W/m²K)	SHGC	VT	Πρόσθετη Σκίαση (cm)	WWR	Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση (kWh/m²-έτος)	Λειτουργικός άνθρακας (kgCO ₂ eq)	Ενσωματωμένο άνθρακας (kgCO ₂ eq)	Συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα (kgCO ₂ eq)
T1	0	0	0	0	0	6	0,85	0,85	0cm	Υφιστάμενο	142,19	887703	502827	1390529
T2	2	4	3	3	3	4,5	0,7	0,78	0cm	Υφιστάμενο	137,77	874890	540973	1415863
T3	7	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,84	823381	515490	1338871
R_W01	5	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	128,66	827363	508677	1336039
R_W02	7	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,84	823381	515490	1338871
R_W03	9	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,06	815733	517197	1332931
R_W04	11	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	126,86	815246	518261	1333507

Σενάριο	Θερμ. τοιχοποιίας (cm)	Θερμ. πλάκας έδρασης στέγης (cm)	Θερμ. τοιχώμ. υπογείου (cm)	Θερμ. δαπέδου επί εδάφους (cm)	Θερμ. δαπέδου σε εξωτερικό αέρα (cm)	Uw (W/m ² K)	SHGC	VT	Πρόσθετη Σκίαση (cm)	WWR	Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση (kWh/m ² ·έτος)	Λειτουργικός άνθρακας (kgCO ₂ e/q)	Ενσωματωμένο ς άνθρακας (kgCO ₂ e/q)	Συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα (kgCO ₂ e/q)
R_R01	7	6	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,97	824098	513801	1337899
R_R02	7	8	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,89	823735	514646	1338381
R_R03	7	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,84	823381	515490	1338871
R_R04	7	12	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	128,13	824716	522267	1346983
R_R05	7	14	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	128,09	824479	523105	1347584
R_BW01	7	10	6	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,40	820815	514116	1334931
R_BW02	7	10	8	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,67	822726	514773	1337499
R_BW03	7	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,84	823381	515490	1338871
R_BW04	7	10	12	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,94	824222	516165	1340387
R_GF01	7	10	10	6	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,32	820826	513988	1334815
R_GF02	7	10	10	8	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,69	822842	515077	1337919
R_GF03	7	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,84	823381	515490	1338871
R_GF04	7	10	10	12	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	128,11	825139	517253	1342393
R_AF01	7	10	10	10	6	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,87	824805	515131	1339936
R_AF02	7	10	10	10	8	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,89	823873	515387	1339260
R_AF03	7	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,84	823381	515490	1338871
R_AF04	7	10	10	10	12	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,91	824067	516337	1340404
R_AF05	7	10	10	10	14	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,88	823946	516509	1340455
R_WIN01	7	10	10	10	10	2,8	0,65	0,7	0cm	Υφιστάμενο	133,33	853477	515379	1368856
R_WIN02	7	10	10	10	10	2	0,55	0,65	0cm	Υφιστάμενο	130,54	838533	515379	1353912
R_WIN03	7	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,84	823381	515490	1338871
R_WIN04	7	10	10	10	10	1,2	0,42	0,58	0cm	Υφιστάμενο	126,96	819083	515379	1334462
R_WIN05	7	10	10	10	10	1	0,4	0,55	0cm	Υφιστάμενο	126,35	815857	515379	1331235
R_WIN06	7	10	10	10	10	0,8	0,38	0,52	0cm	Υφιστάμενο	125,65	812222	515379	1327601

Σενάριο	Θερμ. τοιχοποιίας (cm)	Θερμ. πλάκας έδρασης στέγης (cm)	Θερμ. τοιχώμ. υπογείου (cm)	Θερμ. δαπέδου επί εδάφους (cm)	Θερμ. δαπέδου σε εξωτερικό αέρα (cm)	U _w (W/m ² K)	SHGC	VT	Πρόσθετη Σκίαση (cm)	WWR	Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση (kWh/m ² -έτος)	Λειτουργικός άνθρακας (kgCO ₂ e/q)	Ενσωματωμένος άνθρακας (kgCO ₂ e/q)	Συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα (kgCO ₂ e/q)
R_SHD01	7	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,84	823381	515490	1338871
R_SHD02	7	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	40cm	Υφιστάμενο	127,33	819728	520407	1340134
R_SHD03	7	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	60cm	Υφιστάμενο	126,99	817834	527671	1345505
R_SHD04	7	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	80cm	Υφιστάμενο	126,85	817169	535900	1353069
R_SHD05	7	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	100cm	Υφιστάμενο	126,44	814613	540602	1355215
R_SHD06	7	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	120cm	Υφιστάμενο	126,31	813958	548806	1362764
R_WWR1	7	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	WWR × 0,25	120,06	779478	514281	1293760
R_WWR2	7	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	WWR × 0,50	121,20	786243	514518	1300761
R_WWR3	7	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	Υφιστάμενο	127,84	823381	515490	1338871
R_WWR4	7	10	10	10	10	1,4	0,45	0,6	0cm	WWR × 1,50	140,25	892334	516467	1408801
R_COMB01	9	6	6	6	10	0,8	0,38	0,52	0cm	Υφιστάμενο	124,36	800750	512168	1312918
R_COMB02	11	10	6	6	10	0,8	0,38	0,52	120cm	Υφιστάμενο	122,81	792791	543838	1336628
R_COMB03	7	10	6	6	10	0,8	0,38	0,52	0cm	Υφιστάμενο	124,79	806994	512950	1319944
R_COMB04	11	14	12	12	14	0,8	0,38	0,52	120cm	Υφιστάμενο	124,34	801231	558227	1359458

Σημείωση: Τα T3 (R_BASE), R_W02, R_BW03, R_R03, R_AF03, R_GF03, R_WIN03, R_SHD01 και R_WWR3 αντιστοιχούν στην ίδια βασική διαμόρφωση του κτιρίου και, συνεπώς, παρουσιάζουν τα ίδια αποτελέσματα. Η διαφορετική ονομασία τους χρησιμοποιείται αποκλειστικά για λόγους πληρότητας και για τη συνεπή κωδικοποίηση κάθε επιμέρους ομάδας παραμετρικής διερεύνησης.

8.2 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β - Δεδομένα κανονικοποίησης και συντελεστές βαρύτητας

Η κανονικοποίηση των δύο κριτηρίων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο ελαχίστου-μεγίστου, σύμφωνα με τις σχέσεις (3.3) και (3.4) του Κεφαλαίου 3. Οι ακραίες τιμές προκύπτουν από το σύνολο των τριάντα δύο σεναρίων σχεδιασμού που συμμετέχουν στην κατάταξη.

Πίνακας Β.1 Ακραίες τιμές των κριτηρίων για την κανονικοποίηση ελαχίστου-μεγίστου.

Κριτήριο	Σύμβολο	Ελάχιστη τιμή	Σενάριο	Μέγιστη τιμή	Σενάριο	Μονάδα
Λειτουργικός άνθρακας	Cop	792.791	R_COMB02	853.477	R_WIN01	kgCO ₂ eq
Ενσωματωμένος άνθρακας	Cemb	508.677	R_W01	558.227	R_COMB04	kgCO ₂ eq

Πίνακας Β.2 Κριτήρια αξιολόγησης και συντελεστές βαρύτητας.

Κριτήριο	Σύμβολο	Συντελεστής βαρύτητας	Κατεύθυνση	Αιτιολόγηση
Λειτουργικός άνθρακας	wop	0,50	Ελαχιστοποίηση	Εκφράζει το περιβαλλοντικό κόστος λειτουργίας του κτιρίου για την περίοδο αναφοράς
Ενσωματωμένος άνθρακας	wemb	0,50	Ελαχιστοποίηση	Εκφράζει το ενσωματωμένο ανθρακικό αποτύπωμα των υλικών εντός του καθορισμένου λογιστικού ορίου.

Σημείωση: Υιοθετήθηκαν ίσα βάρη, ώστε να μην εισαχθεί εκ των προτέρων προτεραιότητα σε κάποιο από τα δύο κριτήρια. Χαμηλότερη τιμή του σύνθετου δείκτη υποδηλώνει ευνοϊκότερο σενάριο.

Πίνακας Β.3 Εναλλακτικά σχήματα στάθμισης για τον έλεγχο ευαισθησίας.

Σχήμα	Συντελεστής Βαρύτητας λειτουργικού	Συντελεστής Βαρύτητας ενσωματωμένου	Ερμηνεία
A	0,50	0,50	Ίσα βάρη - βασικό σχήμα
B	0,70	0,30	Ενεργειακή προτεραιότητα
Γ	0,30	0,70	Προτεραιότητα ενσωματωμένου άνθρακα
Δ	0,60	0,40	Ήπια ενεργειακή προτεραιότητα
E	0,40	0,60	Ήπια προτεραιότητα ενσωματωμένου άνθρακα

8.3 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ - Πλήρης κατάταξη σεναρίων

Στον Πίνακα Γ.1 παρατίθεται η πλήρης κατάταξη των τριάντα δύο σεναρίων σχεδιασμού με βάση τον σύνθετο δείκτη πολυκριτηριακής αξιολόγησης, για ίσα βάρη. Εξαιρούνται τα σενάρια μεταβολής του λόγου διαφανών ανοιγμάτων προς όψη, τα οποία δεν ικανοποιούν τα κριτήρια εφικτότητας της ενότητας 3.6.1.

Πίνακας Γ.1 Πλήρης κατάταξη των σεναρίων βάσει του σύνθετου δείκτη (ίσα βάρη).

Θέση	Σενάριο	Λειτουργικός άνθρακας	Ενσωματωμένος άνθρακας	Συνολικό αποτύπωμα	Κανονικοπ. λειτουργικός, C* _{op,i}	Κανονικοπ. ενσωματωμένος, C* _{emb,i}	Σύνθετος δείκτης, Si
1	R COMB01	800.750	512.168	1.312.918	0,1312	0,0705	0,1008
2	R COMB03	806.994	512.950	1.319.944	0,2340	0,0862	0,1601
3	R WIN06	812.222	515.379	1.327.601	0,3202	0,1353	0,2277
4	R WIN05	815.857	515.379	1.331.235	0,3801	0,1353	0,2577
5	R W03	815.733	517.197	1.332.931	0,3781	0,1720	0,2750
6	R W04	815.246	518.261	1.333.507	0,3700	0,1934	0,2817
7	R WIN04	819.083	515.379	1.334.462	0,4332	0,1353	0,2843
8	R GF01	820.826	513.988	1.334.815	0,4620	0,1072	0,2846
9	R W01	827.363	508.677	1.336.039	0,5697	0,0000	0,2848
10	R BW01	820.815	514.116	1.334.931	0,4618	0,1098	0,2858
11	R BW02	822.726	514.773	1.337.499	0,4933	0,1230	0,3082
12	R R01	824.098	513.801	1.337.899	0,5159	0,1034	0,3097
13	R GF02	822.842	515.077	1.337.919	0,4952	0,1292	0,3122
14	R R02	823.735	514.646	1.338.381	0,5099	0,1205	0,3152
15	R BASE	823.381	515.490	1.338.871	0,5041	0,1375	0,3208
16	R AF02	823.873	515.387	1.339.260	0,5122	0,1354	0,3238
17	R AF01	824.805	515.131	1.339.936	0,5275	0,1302	0,3289
18	R BW04	824.222	516.165	1.340.387	0,5179	0,1511	0,3345
19	R AF04	824.067	516.337	1.340.404	0,5154	0,1546	0,3350
20	R AF05	823.946	516.509	1.340.455	0,5134	0,1581	0,3357
21	R SHD02	819.728	520.407	1.340.134	0,4439	0,2367	0,3403
22	R GF04	825.139	517.253	1.342.393	0,5330	0,1731	0,3531
23	R COMB02	792.791	543.838	1.336.628	0,0000	0,7096	0,3548
24	R SHD03	817.834	527.671	1.345.505	0,4127	0,3833	0,3980
25	R R04	824.716	522.267	1.346.983	0,5261	0,2743	0,4002
26	R R05	824.479	523.105	1.347.584	0,5222	0,2912	0,4067
27	R WIN02	838.533	515.379	1.353.912	0,7537	0,1353	0,4445
28	R SHD04	817.169	535.900	1.353.069	0,4017	0,5494	0,4756
29	R SHD05	814.613	540.602	1.355.215	0,3596	0,6443	0,5019
30	R WIN01	853.477	515.379	1.368.856	1,0000	0,1353	0,5676
31	R COMB04	801.231	558.227	1.359.458	0,1391	1,0000	0,5695
32	R SHD06	813.958	548.806	1.362.764	0,3488	0,8099	0,5793

Πίνακας Γ.2 Θέση κατάταξης κάθε σεναρίου ανά σχήμα στάθμισης.

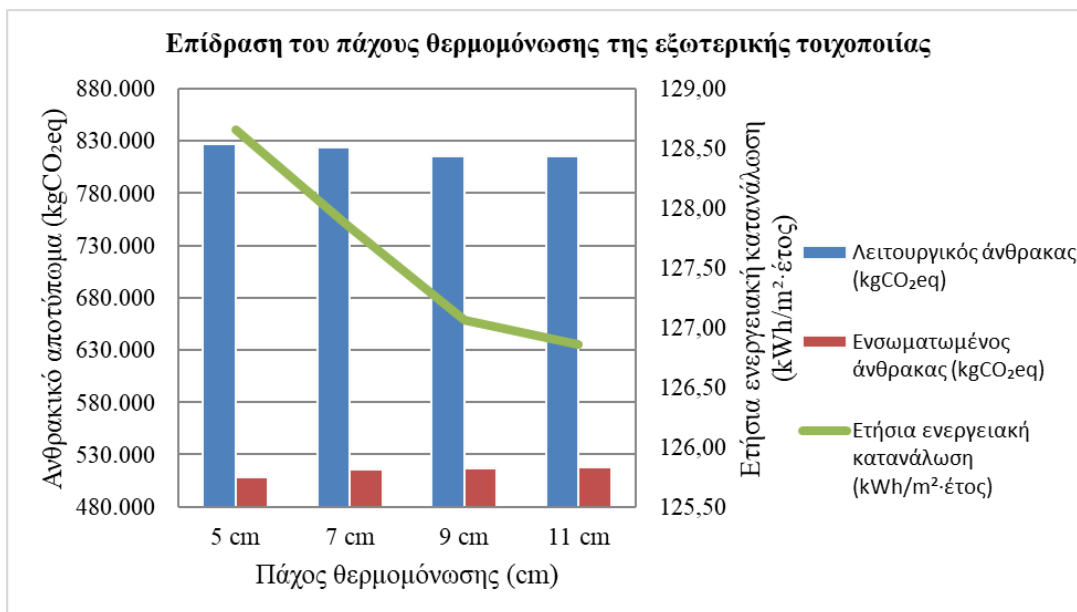
Ο πίνακας αποτυπώνει τη μεταβολή της θέσης κάθε σεναρίου για τα πέντε εναλλακτικά σχήματα στάθμισης του Πίνακα Β.3. Το εύρος εκφράζει τη διαφορά μεταξύ της υψηλότερης και της χαμηλότερης θέσης και αποτυπώνει τη μεταβολή της θέσης του σεναρίου μεταξύ των πέντε σχημάτων στάθμισης.

Σενάριο	Σχήμα Α	Σχήμα Β	Σχήμα Γ	Σχήμα Δ	Σχήμα Ε	Εύρος θέσεων
R_COMB01	1	1	1	1	1	0
R_COMB03	2	2	2	2	2	0
R_WIN06	3	4	4	3	3	1
R_WIN05	4	5	5	4	5	1
R_W03	5	6	10	6	8	5
R_W04	6	7	14	7	10	8
R_WIN04	7	8	8	8	9	2
R_GF01	8	9	6	9	6	3
R_W01	9	18	3	11	4	15
R_BW01	10	10	7	10	7	3
R_BW02	11	12	11	12	12	1
R_R01	12	14	9	14	11	5
R_GF02	13	13	13	13	13	0
R_R02	14	15	12	15	14	3
R_BASE	15	16	15	16	15	1
R_AF02	16	19	16	18	16	3
R_AF01	17	24	17	19	17	7
R_BW04	18	23	18	21	18	5
R_AF04	19	22	19	20	19	3
R_AF05	20	21	20	22	20	2
R_SHD02	21	11	22	17	22	1
R_GF04	22	25	21	23	21	4
R_COMB02	23	3	28	5	27	25
R_SHD03	24	20	26	24	26	6
R_R04	25	28	24	25	23	5
R_R05	26	29	25	26	25	4
R_WIN02	27	31	23	30	24	8
R_SHD04	28	27	29	27	29	2
R_SHD05	29	26	30	28	30	4
R_WIN01	30	32	27	32	28	5
R_COMB04	31	17	32	29	32	15
R_SHD06	32	30	31	31	31	2

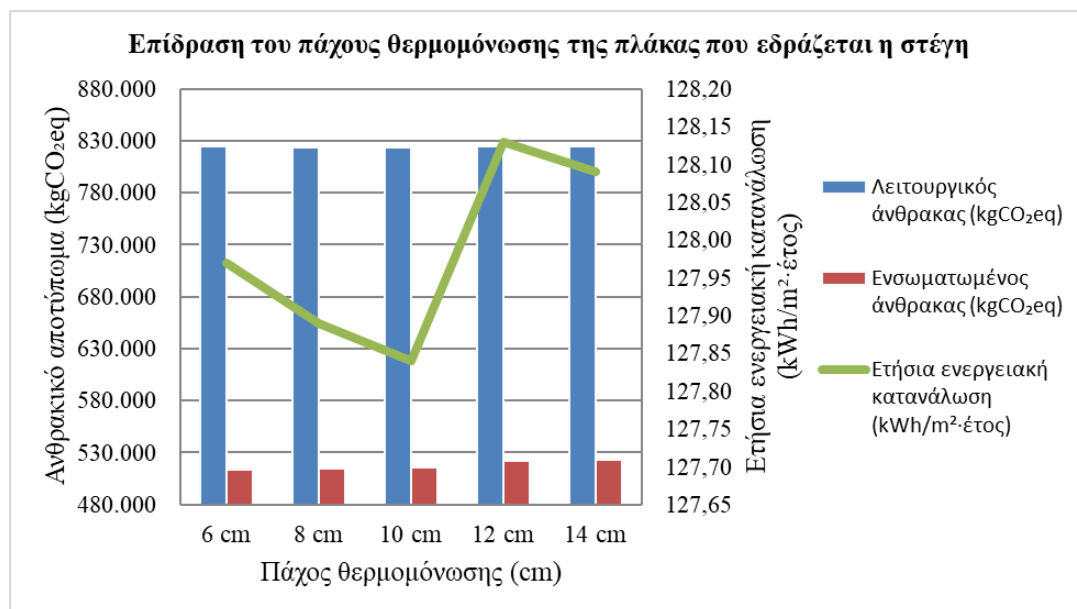
Σημείωση: Μηδενικό εύρος υποδηλώνει σενάριο του οποίου η θέση δεν επηρεάζεται από την επιλογή των συντελεστών βαρύτητας.

8.4 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ - Διαγράμματα παραμετρικής διερεύνησης

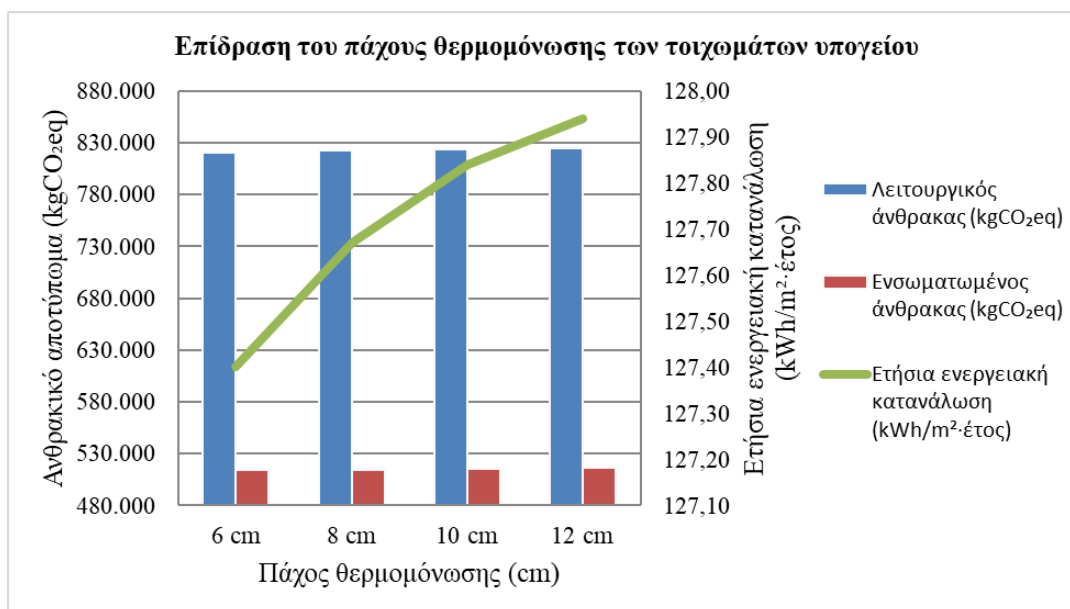
Στο παρόν παράρτημα παρατίθενται τα διαγράμματα της παραμετρικής διερεύνησης και της πολυκριτηριακής αξιολόγησης, με τη σειρά και την αρίθμηση που είχαν στο Κεφάλαιο 5, με ανεξάρτητη αρίθμηση Δ.1-Δ.6.



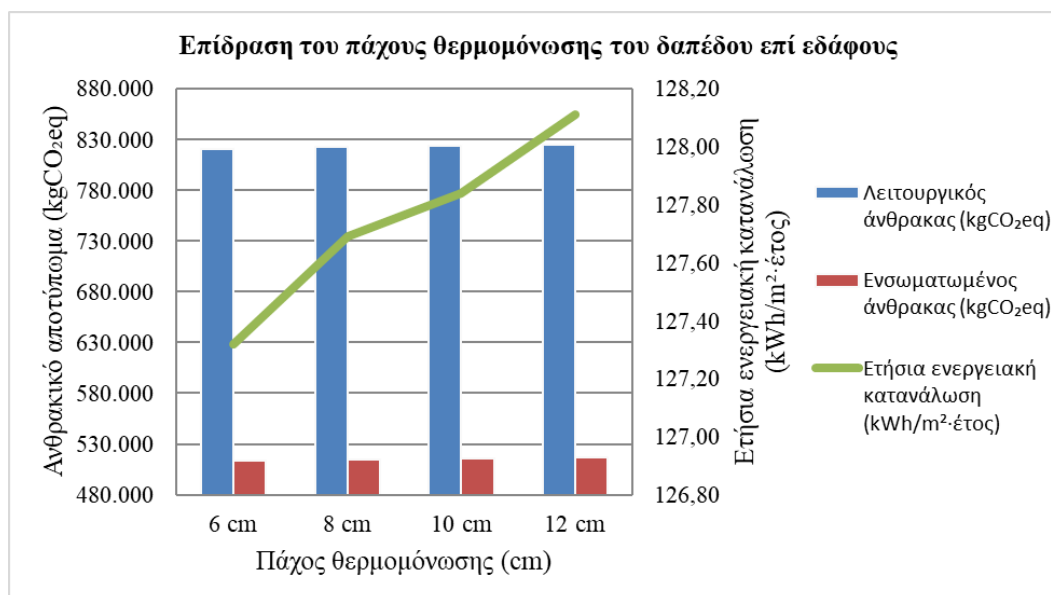
Διάγραμμα Δ.1 Επίδραση του πάχους θερμομόνωσης της εξωτερικής τοιχοποιίας.



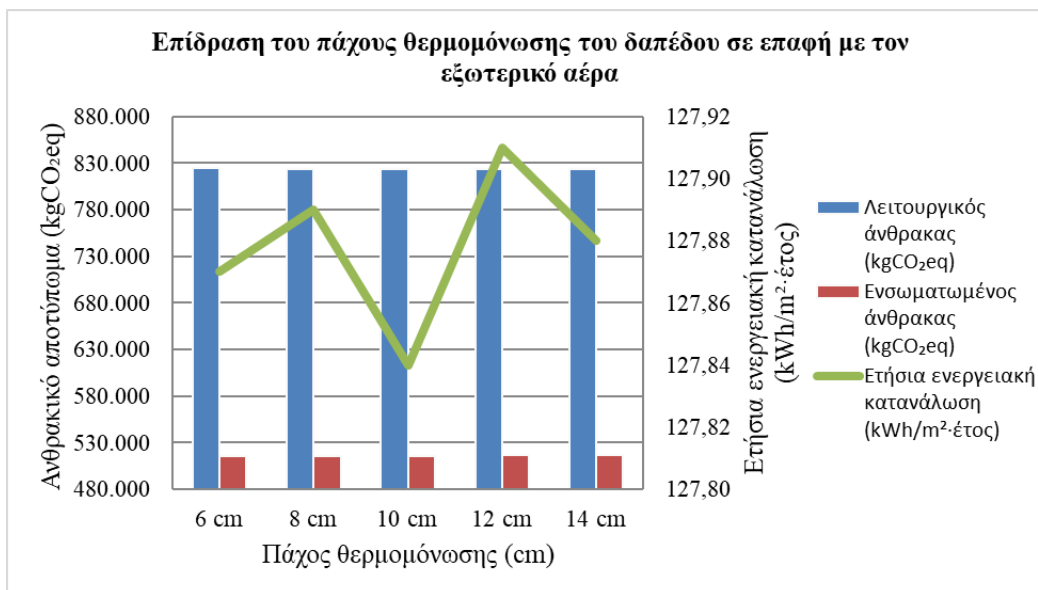
Διάγραμμα Δ.2 Επίδραση του πάχους θερμομόνωσης της πλάκας που εδράζεται η στέγη.



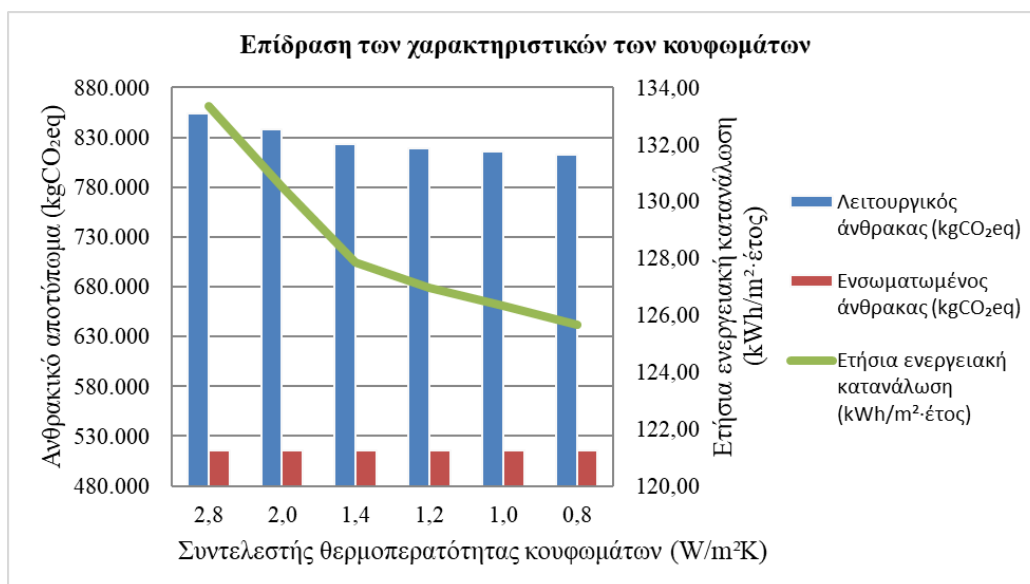
Διάγραμμα Δ.3 Επίδραση του πάχους θερμομόνωσης των τοιχωμάτων υπογείου.



Διάγραμμα Δ.4 Επίδραση του πάχους θερμομόνωσης του δαπέδου επί εδάφους.



Διάγραμμα Δ.5 Επίδραση του πάχους θερμομόνωσης του δαπέδου σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα.



Διάγραμμα Δ.6 Επίδραση των χαρακτηριστικών των κουφωμάτων.