



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΛΗΨΗΣ
ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ
ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΑΠΟ
ΦΥΣΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΠΡΟΣ ΑΝΑΚΑΙΝΙΣΗ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ**

Πέτρος-Αντώνης Γερογιάννης

Επιβλέπων: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΑΤΣΟΠΟΥΛΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΛΗΨΗΣ
ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ
ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΑΠΟ
ΦΥΣΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΠΡΟΣ ΑΝΑΚΑΙΝΙΣΗ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ**

Πέτρος-Αντώνης Γερογιάννης

Επιβλέπων: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΑΤΣΟΠΟΥΛΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18^η Φεβρουαρίου 2025.

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΑΤΣΟΠΟΥΛΟΣ Σ. ΠΑΠΑΒΑΣΙΛΙΟΥ
Καθηγητής, Ε.Μ.Π. Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

Α. ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ
Αναπληρωτής καθηγητής, Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2025

Πέτρος-Αντώνης Α Γερογιάννης

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Κάτοχος Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Τεχνοοικονομικά Συστήματα» της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Πέτρος-Αντώνης Γερογιάννης, 2025

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο κατασκευαστικός τομέας υιοθετεί ολοένα και περισσότερο προκατασκευασμένα συστήματα εκτός εργοταξίου για βαθιά ενεργειακή ανακαίνιση. Αυτές οι τεχνολογίες, που προσφέρουν μειωμένη παραγωγή αποβλήτων, ταχύτερη εγκατάσταση και ευέλικτες λύσεις, αποτελούν κρίσιμο εργαλείο για την επίτευξη των Κτιρίων Σχεδόν Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης (NZEB). Σε συνδυασμό με προηγμένα συστήματα HVAC και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), ενισχύουν την ενεργειακή απόδοση και συμβάλλουν στην εκπλήρωση των ευρωπαϊκών στόχων για Κτίρια Μηδενικών Εκπομπών (ZeB).

Ένα βασικό στοιχείο για τη βιώσιμη ανακαίνιση είναι η επιλογή των δομικών υλικών. Σε αυτό το πλαίσιο, τα φυσικά μονωτικά υλικά παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύγκριση με τα συμβατικά, καθιστώντας τα ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή. Η ενσωμάτωση προκατασκευασμένων τοιχοποιιών ξύλινης βάσης με φυσικά μονωτικά προσφέρει βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση και μειώνει το ενσωματωμένο αποτύπωμα άνθρακα, συμβάλλοντας στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα των κτιρίων.

Η παρούσα μελέτη διερευνά την εφαρμογή πολυκριτηριακής ανάλυσης απόφασης (MCDA) για την επιλογή του βέλτιστου φυσικού μονωτικού υλικού σε προκατασκευασμένα συστήματα τοιχοποιίας. Τα υλικά που αξιολογούνται περιλαμβάνουν ξυλοϊνες, άχυρο ρυζιού, διογκωμένη περλίτη, πετροβάμβακα, μαλλί προβάτου και κάνναβη, ενώ ως σημείο αναφοράς χρησιμοποιείται η μονωτική πλάκα κενού (VIP). Η αξιολόγηση βασίζεται σε κριτήρια όπως η ενεργειακή απόδοση, η βιωσιμότητα, η οικονομικότητα και η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος, με χρήση εξειδικευμένων εργαλείων όπως το COMSOL, το TRNSYS, το OneClick LCA και το MATLAB μέσω των μεθοδολογιών MAUT, TOPSIS, VIKOR και PROMETHEE.

Τα ευρήματα της μελέτης όχι μόνο επιβεβαιώνουν τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την οικονομική αποδοτικότητα, αλλά αναδεικνύουν και την περιβαλλοντική υπευθυνότητα των φυσικών μονωτικών. Μέσω της ολοκληρωμένης ανάλυσης καθίσταται σαφές πως η επιλογή αυτών των υλικών μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, συμβάλλοντας στην προστασία του περιβάλλοντος και διασφαλίζοντας την άνεση και λειτουργικότητα των κτιρίων. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση παρέχει αξιόπιστα δεδομένα για μελλοντικές πολύ επιτυχημένες ανακαινίσεις παγκοσμίως.

Λέξεις κλειδιά

Φυσικά μονωτικά υλικά, κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης, κτίρια μηδενικών εκπομπών, προκατασκευασμένα πάνελ πρόσοψης, ενσωματωμένη ενέργεια, πολυκριτηριακή ανάλυση

ABSTRACT

The construction sector is increasingly embracing off-site prefabricated systems for deep energy retrofitting, offering reduced waste, rapid installation, and customizable solutions tailored to specific building needs. These systems, when combined with efficient Heating & cooling, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems and Renewable Energy Sources (RES), have emerged as a key strategy for achieving Near Zero Energy Buildings (NZEB). Alongside energy performance improvements, there is a growing need to evaluate the environmental footprint of such interventions, particularly within the evolving European framework for Zero Emission Buildings (ZeB). A crucial aspect of sustainable retrofitting is the selection of materials, with nature-based insulating materials providing a sustainable alternative to conventional options. The integration of prefabricated timber-based wall panels with natural insulation materials presents an opportunity for enhancing building energy efficiency while maintaining a low embodied carbon footprint.

This study focuses on applying various multi-criteria decision analysis methods in order to select the optimal (nature-based) insulation materials to be incorporated into a prefabricated façade panel designed for deep renovation applications. The examined bio-based materials include wood fiber insulation board, rice straw insulation panel, expanded perlite insulation panel, stone wool, sheep wool, and hemp. Additionally, a high-performance Vacuum Insulation Panel (VIP) is considered as a benchmark. The evaluation employs a multi-criteria decision analysis (MCDA) framework, incorporating energy performance, sustainability, economic feasibility, and indoor environmental quality as key criteria. The performance assessment utilizes various computational tools: COMSOL for modeling the alternative prefabricated wall assemblies, TRNSYS for energy performance and thermal comfort simulations, OneClick LCA for life cycle assessment (LCA), and MATLAB for implementing MCDA methodologies, specifically MAUT, TOPSIS, VIKOR, and PROMETHEE.

The results indicate that nature-based insulation materials are better than conventional and high-performance materials in terms of environmental impact and at least comparative in economic and energy performance terms. While certain bio-based materials exhibit higher embodied energy during the manufacturing phase, their superior thermal properties and long-term energy savings contribute to their overall sustainability. The study demonstrates that prefabricated façade panels incorporating natural materials offer a viable solution for deep renovation projects, aligning with ZeB objectives while ensuring cost-effectiveness and indoor comfort. The findings support the potential of nature-based materials as an effective alternative for achieving energy-efficient and environmentally responsible building retrofits.

Keywords

Nature-based insulation materials, nearly Zero Energy Buildings, Zero Emission Buildings, Prefabricated façade panel, Multicriteria analysis

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη σχολή των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2024-2025, στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΔΠΜΣ) «Τεχνο-οικονομικά Συστήματα». Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Γεώργιο Ματσόπουλο για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, αλλά και για την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Πέτρος-Αντώνης Γερογιάννης

Φεβρουάριος 2025

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	I
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ	I
ABSTRACT.....	III
KEYWORDS.....	III
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	VI
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	VIII
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	X
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	2
1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	3
2. ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	4
2.1 ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ	4
2.1.1 Πλεονεκτήματα.....	4
2.1.2 Μειονεκτήματα – Προκλήσεις	9
2.1.3 Παγκόσμια και ευρωπαϊκή αγορά	10
2.2 ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	12
2.2.1 Συμβατικά μονωτικά υλικά	12
2.2.2 Μονωτικά υψηλής απόδοσης – Υπερ-μονωτικά υλικά.....	17
2.2.3 Φυσικά υλικά με θερμομονωτικές ιδιότητες	19
3. ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ.....	27
3.1 ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	27
3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΛΗΨΕΙΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ.....	28
3.2.1 Θεωρία χρησιμότητας	28
3.2.2 Γραμμικά προσθετικά μοντέλα	30
3.2.3 Μοντέλο ιεράρχησης	34
3.2.4 Θεωρία σχέσεων υπεροχής.....	37
4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ	43
4.1 ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟ ΚΤΙΡΙΟ	43
4.2 ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΝΑΚΑΙΝΙΣΗΣ	47
4.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ	52
4.3.1 Καθορισμός εναλλακτικών.....	52
4.3.2 Καθορισμός κριτηρίων.....	54
4.3.3 Προσδιορισμός βαρύτητας κριτηρίων	55
5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ.....	58
5.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	58
5.2 LCA.....	62
5.3 LCC	65
5.4 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΕΣΗ	67
5.4.1 Το μοντέλο του Fanger	68
5.4.2 «Προβλεπόμενη μέση ψήφος» (PMV).....	70
5.4.3 «Προβλεπόμενο ποσοστό δυσανεσθέντων» (PPD)	70
5.4.4 Ώρες που δεν εξασφαλίστηκε θερμική άνεση (TDH)	71

6.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	73
6.1	ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΑΥΤ	73
6.2	ΜΕΘΟΔΟΣ TOPSIS	75
6.3	ΜΕΘΟΔΟΣ VIKOR	77
6.4	ΜΕΘΟΔΟΣ PROMETHEE	80
6.5	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	82
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	83
7.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	83
7.2	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	84
8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	86

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Μεταφορά προκατασκευασμένου στοιχείου πρόσοψης εντός εργοταξίου.	5
Σχήμα 2.2: Ανάλυση παγκόσμιας αγοράς προκατασκευασμένων κατοικιών.	11
Σχήμα 2.3: Πετροβάμβακας.	13
Σχήμα 2.4: Διογκωμένη πολυστερίνη (αριστερά) και η εφαρμογή της σε κτίριο (δεξιά).	14
Σχήμα 2.5: Πάνελ πολυουρεθάνης (αριστερά) και εφαρμογή αφρού πολυουρεθάνης (δεξιά).	15
Σχήμα 2.6: Διογκωμένος περλίτης σε κόκους (αριστερά) και σε πάνελ (δεξιά).	16
Σχήμα 2.7: VIP με εμφανές πορώδες (αριστερά) και θεωρητική οπτικοποίηση του προστατευτικού του περιβλήματος (δεξιά).	18
Σχήμα 2.8: VIP σε εφαρμογές ψύξης (αριστερά) και σε αεροσκάφος (δεξιά).	18
Σχήμα 2.9: Aerogel σε αφή (αριστερά) και υπό φλόγα (δεξιά).	19
Σχήμα 2.10: Ξυλόμαλλο πριν (αριστερά) και μετά την επεξεργασία (δεξιά).	20
Σχήμα 2.11: Φάσεις επεξεργασίας του άχυρου ρυζιού.	22
Σχήμα 2.12: Άχυρο ρυζιού (αριστερά) ως εξωτερική θερμομόνωση (δεξιά).	22
Σχήμα 2.13: Μαλλί προβάτου (αριστερά) ως θερμομόνωση κτιρίου (δεξιά).	23
Σχήμα 2.14: Ρολό βιομηχανικής κάνναβης (αριστερά) και τοποθέτηση της (δεξιά).	24
Σχήμα 2.15: Επεξεργασμένες πλάκες φελλού (αριστερά) και τοποθέτηση τους (δεξιά).	25
Σχήμα 3.1: Αποτέλεσμα αξιολόγησης εναλλακτικών στη θεωρία σχέσεων υπεροχής	38
Σχήμα 4.1: Τοποθεσία κτιρίου. Όψη από χάρτες.	43
Σχήμα 4.2: Φωτογραφία υφιστάμενου κτιρίου (αριστερά) και 3Δ αναπαράσταση του μοντέλου (δεξιά).	44
Σχήμα 4.3: Αποτύπωση της υφιστάμενης κατοικίας σε τέσσερις όψεις.	44
Σχήμα 4.4: Ημερήσια προφίλ παρουσίας ανθρώπων, χρήσης τεχνητού φωτισμού και ηλεκτρικών συσκευών [51]	46
Σχήμα 4.5: Ημερήσια προφίλ κατανάλωσης ZNX σε αντιπαραβολή με το προφίλ παρουσίας [51]	46
Σχήμα 4.6: Αξονομετρική όψη του ανακαινισμένου κτιρίου	48
Σχήμα 4.7: Εσωτερική και εξωτερική όψη του πανελ (αριστερά) και ενσωμάτωση παραθύρων, σκιάστρων και fancoil λεπτού τύπου (δεξιά).	49
Σχήμα 4.8: 1 ^{ος} τύπος, απλός (αριστερά) και 2 ^{ος} τύπος (ενσωματωμένα συστήματα) προκατασκευασμένου στοιχείου (δεξιά).	49
Σχήμα 4.9: Επισκόπηση διάταξης και επί μέρους κομματιών της προκατασκευασμένης τοιχοποιίας	50
Σχήμα 4.10: Επισκόπηση διάταξης των συνεργαζόμενων συστημάτων	51
Σχήμα 5.1: Χρωματική αναπαράσταση της θερμοκρασίας (a) και του U (b) του 1 ^{ου} τύπου.	59

Σχήμα 5.2: Χρωματική αναπαράσταση της θερμοκρασίας (a) και του U (b) του 2 ^{ου} τύπου.....	59
Σχήμα 5.3: Τρισδιάστατη αναπαράσταση του κτιριακού μοντέλου.....	60
Σχήμα 5.4: Μοντέλο TRNSYS (συνδυασμός συστημάτων και κτιρίου)	61
Σχήμα 5.5: Στάδια της ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA), στα αγγλικά.....	63
Σχήμα 5.6: Ο δείκτης PPD συναρτήσει του PMV	71

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Η κλίμακα βαθμολόγησης των εναλλακτικών ανά ζεύγη της μεθόδου AHP	35
Πίνακας 3.2: Οι τιμές του δείκτη τυχειότητας ανάλογα με το πλήθος των εξεταζόμενων εναλλακτικών N_A	37
Πίνακας 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά υφιστάμενου κτιρίου	45
Πίνακας 4.2: Συντελεστές θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων	45
Πίνακας 4.3: Εσωτερικά θερμικά κέρδη και αερισμός	45
Πίνακας 4.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά υφιστάμενου κτιρίου	47
Πίνακας 4.5: Υλικά τοιχοποιίας και θερμικές ιδιότητες	51
Πίνακας 4.6: Περιγραφή των εναλλακτικών του προβλήματος.....	52
Πίνακας 4.7: Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και πυκνότητα εναλλακτικών ...	53
Πίνακας 4.8: Περιγραφή των κριτηρίων αξιολόγησης του προβλήματος απόφασης	54
Πίνακας 4.9: Η πενταβάθμια κλίμακα για τον προσδιορισμό της βαρύτητας των κριτηρίων.....	56
Πίνακας 4.10: Οι συντελεστές βαρύτητας με βάση τη μέθοδο AHP	56
Πίνακας 5.1: Συντελεστής θερμοπερατότητας των 2 τύπων για τα 7 εξεταζόμενα υλικά	59
Πίνακας 5.2: Απόδοση εναλλακτικών στο πρώτο κριτήριο (C_1)	61
Πίνακας 5.3: Συντελεστής θερμοπερατότητας των 2 τύπων για τα 7 εξεταζόμενα υλικά	63
Πίνακας 5.4: Απόδοση εναλλακτικών στο πρώτο κριτήριο (C_2)	64
Πίνακας 5.5: Συντελεστής θερμοπερατότητας των 2 τύπων για τα 7 εξεταζόμενα υλικά	65
Πίνακας 5.6: Απόδοση εναλλακτικών στο πρώτο κριτήριο (C_3)	67
Πίνακας 5.7: Η επταβάθμια κλίμακα θερμικής άνεσης του δείκτη PMV	70
Πίνακας 5.8: Κατηγορίες θερμικής άνεσης για τον σχεδιασμό κτιρίων [59].....	71
Πίνακας 5.9: Απόδοση εναλλακτικών στο πρώτο κριτήριο (C_4)	72
Πίνακας 6.1: Πίνακας απόφασης του πολυπαραμετρικού προβλήματος.....	73
Πίνακας 6.2: Ο πίνακας απόφασης και η μέγιστη και η ελάχιστη απόδοση σε κάθε κριτήριο, για τη μέθοδο MAUT	74
Πίνακας 6.3: Κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης της μεθόδου MAUT.....	74
Πίνακας 6.4: Η πολυκριτήρια χρησιμότητα κάθε εναλλακτικής με βάση τη μέθοδο MAUT	74
Πίνακας 6.5: Κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης της μεθόδου TOPSIS	75
Πίνακας 6.6: Ο σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης και η θετική και αρνητική ιδεατή λύση της μεθόδου TOPSIS, 1 ^ο σενάριο	76
Πίνακας 6.7: Ο σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης και η θετική και αρνητική ιδεατή λύση της μεθόδου TOPSIS, 2 ^ο σενάριο	76

Πίνακας 6.8: Οι αποστάσεις από τη θετική και την αρνητική ιδεατή λύση και η σχετική εγγύτητα της μεθόδου TOPSIS, για το πρώτο σενάριο.....	76
Πίνακας 6.9: Οι αποστάσεις από τη θετική και την αρνητική ιδεατή λύση και η σχετική εγγύτητα της μεθόδου TOPSIS, για το δεύτερο	77
Πίνακας 6.10: Ο πίνακας απόφασης και η καλύτερη και η χειρότερη επίδοση για τη μέθοδο VIKOR.....	77
Πίνακας 6.11: Η κατάταξη των εναλλακτικών κατά S και R για τη μέθοδο VIKOR, 1 ^ο σενάριο	78
Πίνακας 6.12: Η κατάταξη των εναλλακτικών κατά S και R για τη μέθοδο VIKOR, 2 ^ο σενάριο	78
Πίνακας 6.13: Η κατάταξη των εναλλακτικών κατά Q για τη μέθοδο VIKOR, 1 ^ο σενάριο	78
Πίνακας 6.14: Η κατάταξη των εναλλακτικών κατά Q για τη μέθοδο VIKOR, 2 ^ο σενάριο	79
Πίνακας 6.15: Ο δείκτης προτίμησης για κάθε ζεύγος εναλλακτικών για τη μέθοδο PROMETHEE, 1 ^ο σενάριο	80
Πίνακας 6.16: Ο δείκτης προτίμησης για κάθε ζεύγος εναλλακτικών για τη μέθοδο PROMETHEE, 2 ^ο σενάριο	80
Πίνακας 6.17: Οι ροές υπεροχής και η τελική κατάταξη με βάση τη μέθοδο PROMETHEE, 1 ^ο σενάριο	81
Πίνακας 6.18: Οι ροές υπεροχής και η τελική κατάταξη με βάση τη μέθοδο PROMETHEE, 2 ^ο σενάριο	81

1. Εισαγωγή

Το ενεργειακό ζήτημα αποτελεί μία από τις πλέον κρίσιμες προκλήσεις της σύγχρονης εποχής, έχοντας σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην ποιότητα της ανθρώπινης ζωής. Ειδικότερα, ο κτιριακός τομέας, ως κύρια πηγή κατανάλωσης ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ευθύνεται για περίπου το 40% της τελικής ενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται για θέρμανση, ψύξη, κλιματισμό, αερισμό και τεχνητό φωτισμό με σκοπό τη διασφάλιση συνθηκών άνεσης στο εσωτερικό των κτιρίων [1]. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι το 75% του υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος χαρακτηρίζεται από χαμηλή ενεργειακή απόδοση, διαφαίνεται ότι υφίσταται σημαντικό περιθώριο για εξοικονόμηση ενέργειας [2]. Επιπλέον, σύμφωνα με το παρατηρητήριο κτιριακού αποθέματος (Building Stock Observatory) της Ευρωπαϊκής Ένωσης η πλειοψηφία των κτιρίων κατασκευάστηκαν πριν από την εφαρμογή των εθνικών θερμικών προτύπων, με αποτέλεσμα οι προσόψεις αυτών να είναι ανεπαρκώς μονωμένες [3]. Συνεπώς, οι παρεμβάσεις αναβάθμισης του κτιριακού κελύφους αποτελούν πιθανώς την πλέον οικονομική πρακτική στην προσπάθεια μείωσης των ενεργειακών αναγκών και επίτευξη του προτύπου σχεδόν μηδενικής ενέργειας (nearly-Zero Energy Buildings - nZEB).

Ταυτόχρονα, η ενεργειακή κατανάλωση είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, οι οποίες επιδεινώνουν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Ως εκ τούτου, η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας αποτελεί αναγκαία αλλά όχι επαρκή συνθήκη για την αντιμετώπιση του περιβαλλοντικού ζητήματος, καθώς είναι κρίσιμο να διασφαλιστεί ότι η διαθέσιμη ενέργεια παράγεται με ελάχιστη επιβάρυνση από εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η ανάγκη εύρεσης και εφαρμογής ολιστικών και βιώσιμων λύσεων οδηγεί τις περιβαλλοντικές πολιτικές να μεταβούν από τα nZEB προς την επίτευξη κτιρίων με ουδέτερο ανθρακικό αποτύπωμα, κτιρίων δηλαδή μηδενικών εκπομπών (Zero Emission Buildings - ZEB). Ο καθορισμός και η εδραίωση, λοιπόν, τυποποιημένων ορισμών και μεθόδων αξιολόγησης για αυτές τις έννοιες κρίνεται μείζονος σημασίας [4]. Γενικά, τα κτίρια με ουδέτερο ανθρακικό αποτύπωμα στοχεύουν στην εξάλειψη των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέσω ενός συνδυασμού υψηλής ενεργειακής απόδοσης κατά τη λειτουργία [5], μείωσης του ενσωματωμένου άνθρακα και ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [6].

Το πρώτο μεγάλο βήμα προς την επίτευξη ολιστικών παρεμβάσεων είναι η μετάβαση σε τεχνολογίες υψηλότερης αποδοτικότητας που τροφοδοτούνται με μορφές ενέργειας μειωμένου ανθρακικού αποτυπώματος, όπως η ηλεκτρική ενέργεια όταν παράγεται από ανανεώσιμες πηγές (ΑΠΕ). Αναπόφευκτα, η τάση στην ανακαίνιση κτιρίων στρέφεται προς ριζικές ανακαινίσεις, οι οποίες επεμβαίνουν τόσο στην αναβάθμιση του κελύφους όσο και στην εκσυγχρόνιση των παλιών συστημάτων. Ταυτόχρονα συνεκτιμάται θετικά η εγκατάσταση ΑΠΕ μικρής κλίμακας για τοπική παραγωγή ενέργεια και άμεση τροφοδοσία των συστημάτων προς κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου ή και ενός συμπλέγματος κτιρίων.

Οι επεμβάσεις ριζικής ανακαίνισης με προκατασκευασμένες τοιχοποιίες έχουν αναδειχθεί ως μια μετασχηματιστική στρατηγική για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων. Η προκατασκευή προσφέρει πολυάριθμα πλεονεκτήματα, όπως η ταχεία εγκατάσταση, ο αυστηρός ποιοτικός έλεγχος και η μείωση των διαταραχών στο χώρο εργασίας, συμβαδίζοντας με την ευρύτερη στροφή του κατασκευαστικού τομέα προς τις βιομηχανοποιημένες μεθόδους. Επιπρόσθετα, ενσωματώνοντας ενεργειακά αποδοτικά συστήματα θέρμανσης, κλιματισμού, αερισμού (HVAC), ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στοιχεία κελύφους πολλαπλών λειτουργιών, αυτές οι λύσεις ανοίγουν τον δρόμο για την επίτευξη των επιθυμητών κτιριακών προτύπων [7-9].

Η ενσωμάτωση φυσικών υλικών σε προκατασκευασμένα πάνελ ανακαίνισης ενισχύει περαιτέρω την περιβαλλοντική και οικονομική απόδοση της λύσης. Τα υλικά που απαντώνται στη φύση, όπως οι ξυλοΐνες (wood fiber), η κάνναβη (hemp), ο φελλός και το άχυρο (rice straw) καθίστανται όλο και πιο δημοφιλή λόγω της δυνατότητάς τους να αποθηκεύουν άνθρακα [10-11]. Οι μονωτικές πλάκες και οι κατασκευαστικές πλάκες που παρασκευάζονται από άχυρο προσφέρουν ανταγωνιστικές θερμικές ιδιότητες με χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα [12-14].

1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αξιοποίηση ενός ολοκληρωμένου πλαισίου διαφορετικών μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης για την επιλογή του βέλτιστου μονωτικού υλικού, από μια σειρά φυσικών, συμβατικών, αλλά και υψηλής απόδοσης επιλογών. Συγκεκριμένα, υλοποιείται πολυκριτηριακή ανάλυση στηριζόμενη στις κύριες οικογένειες πολυκριτηριακών μεθόδων, όπως είναι η θεωρία χρησιμότητας, τα γραμμικά προσθετικά μοντέλα και η θεωρία σχέσεων υπεροχής. Τα εξεταζόμενα υλικά εντάσσονται ως μονωτικά στρώματα στο εσωτερικό προκατασκευασμένων πάνελ τοιχοποιίας, τα οποία ενσωματώνουν και δυναμικά στοιχεία όπως συστήματα θέρμανσης, κλιματισμού και αερισμού. Ως μελέτη περίπτωσης επιλέγεται μια μονοκατοικία στα προάστια του Βερολίνου της Γερμανίας. Οι εναλλακτικές αξιολογούνται βάσει κριτηρίων ενεργειακής αποδοτικότητας, βιωσιμότητας, οικονομικότητας και ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος. Για τα αντίστοιχα βάρη εξετάζονται δύο σενάρια. Το πρώτο ακολουθεί μία ισοβαρή προσέγγιση, υποθέτοντας ίση σημασία για όλα τα κριτήρια, ενώ το δεύτερο βασίζεται σε ερωτηματολόγιο που συμπληρώθηκε από κατοίκους, εργολάβους, μηχανικούς και λοιπούς σχετιζόμενους. Για τον προσδιορισμό των αποδόσεων κάθε εναλλακτικής στο εκάστοτε κριτήριο χρησιμοποιήθηκε μια πληθώρα υπολογιστικών λογισμικών και μεθόδων. Συγκεκριμένα, η ενεργειακή απόδοση και η θερμική άνεση των ενοίκων υπολογίστηκε με χρήση του λογισμικού TRNSYS και η βιωσιμότητα μέσω του OneClick και του EcoInvent όπου πραγματοποιήθηκε η ανάλυση κύκλου ζωής (LCA). Το λογισμικό COMSOL χρησιμοποιήθηκε, επίσης, για τη μοντελοποίηση των εναλλακτικών προκατασκευασμένων τοιχοποιιών, ενώ οι πολυκριτηριακές μέθοδοι εφαρμόστηκαν στο MATLAB.

1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια, τα οποία καλύπτουν το θεωρητικό υπόβαθρο, τη μελέτη περίπτωσης, τη μεθοδολογία, την ανάλυση των αποτελεσμάτων και τα τελικά συμπεράσματα. Ξεκινώντας με την εισαγωγή, αναλύεται το ενεργειακό και περιβαλλοντικό ζήτημα που αντιμετωπίζει ο κτιριακός τομέας και η ανάγκη για αποδοτικές και βιώσιμες λύσεις, όπως οι προκατασκευασμένες τοιχοποιίες από φυσικά υλικά. Επιπλέον, διατυπώνεται ο σκοπός της εργασίας και περιγράφεται η διάρθρωσή της. Στο 2^ο κεφάλαιο, γίνεται μια περιγραφή των τεχνολογιών προκατασκευασμένων, τις ιδιότητες και τα πλεονεκτήματα της χρήσης φυσικών μονωτικών υλικών. Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφονται θεωρητικά οι πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης αποφάσεων που θα εφαρμοστούν στα πλαίσια της εργασίας. Στο 4^ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η εξεταζόμενη μελέτη περίπτωσης, καθορισμός του προβλήματος απόφασης και των εναλλακτικών σεναρίων, καθώς και ο προσδιορισμός των βαρών για κάθε κριτήριο. Το 5^ο κεφάλαιο αφορά τη μεθοδολογία προσδιορισμού της απόδοσης κάθε εναλλακτικής για τα αντίστοιχα κριτήρια μελέτης. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται αξιολόγηση των διαφορετικών μονωτικών υλικών ως προς την ενεργειακή απόδοσή τους, την περιβαλλοντική και οικονομική βιωσιμότητα τους, αλλά και την ικανότητα τους να προσφέρουν αυξημένη ποιότητα εσωτερικού χώρου. Στο 6^ο κεφάλαιο, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης από την εφαρμογή των πολυκριτηριακών μεθόδων αξιολόγησης που περιγράφηκαν. Τέλος, στο 7^ο κεφάλαιο, συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα που αναδείχθηκαν από την εργασία και προτείνονται πιθανές επεκτάσεις της μελέτης που ενδεχομένως να εμπλούτιζαν την παρούσα μελέτη.

2. Προκατασκευασμένα στοιχεία και μονωτικά υλικά

2.1 Προκατασκευασμένα στοιχεία τοιχοποιίας

Η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων τοιχοποιίας έχει γίνει μια δημοφιλής λύση στην κατασκευή και ανακαίνιση κτιρίων τα τελευταία χρόνια. Αυτή η μέθοδος, η οποία περιλαμβάνει την παραγωγή και συναρμολόγηση προκατασκευασμένων τμημάτων σε εργοστασιακό περιβάλλον, προσφέρει πλήθος πλεονεκτημάτων σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής. Εκτός από την ταχύτερη και πιο οργανωμένη ολοκλήρωση των έργων, η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων εξασφαλίζει υψηλότερη ποιότητα κατασκευής, χαμηλότερο κόστος και ενισχυμένη ασφάλεια για τους εργαζομένους. Αν και οι προκλήσεις στην μεταφορά και την προσαρμογή τους σε συγκεκριμένες ανάγκες δεν είναι αμελητέες, τα οφέλη στην αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα καθιστούν την προκατασκευή μια εξαιρετική επιλογή για πολλές σύγχρονες κατασκευές.

2.1.1 Πλεονεκτήματα

Η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων στην κατασκευή και ανακαίνιση κτιρίων έχει αναδειχθεί ως μια καινοτόμος λύση που προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε διάφορες πτυχές του έργου. Τα προκατασκευασμένα στοιχεία συμβάλλουν στη μείωση του χρόνου ολοκλήρωσης, στη βελτίωση της ποιότητας κατασκευής, στη μείωση της όχλησης των κατοίκων, στη βελτιστοποίηση του κόστους και στη βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης. Παράλληλα, ενισχύουν την ασφάλεια των εργαζομένων στο εργοτάξιο και παρέχουν ανώτερη υγροθερμική απόδοση, καθιστώντας τις κατασκευές πιο ανθεκτικές και βιώσιμες.

Στα επόμενα υποκεφάλαια αναλύονται διεξοδικά τα βασικά οφέλη της προκατασκευής σε κάθε μία από αυτές τις διαστάσεις. Αρχικά, εξετάζεται η συνεισφορά των προκατασκευασμένων στοιχείων στη μείωση του χρόνου κατασκευής, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της παράλληλης εκτέλεσης εργασιών στο εργοστάσιο και στο εργοτάξιο. Στη συνέχεια, αναλύεται η μείωση της όχλησης των κατοίκων στις περιπτώσεις ανακαίνισης κτιρίων, καθώς και η συμβολή της προκατασκευής στη μείωση του συνολικού κόστους του έργου. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι τρόποι με τους οποίους η προκατασκευή βελτιώνει την ποιότητα κατασκευής και την περιβαλλοντική της απόδοση, εστιάζοντας στη μείωση των αποβλήτων, στη χρήση ανακυκλώσιμων υλικών και στη μείωση των εκπομπών άνθρακα. Τέλος, εξετάζονται η ασφάλεια των εργαζομένων στο εργοτάξιο και η βελτίωση της υγροθερμικής συμπεριφοράς των τοιχοποιιών, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στα πλεονεκτήματα της προκατασκευής στην κατασκευή και ανακαίνιση κτιρίων.

2.1.1.1 Χρονοδιάγραμμα – Ταχύτητα ολοκλήρωσης έργου

Ένα από τα σημαντικότερα και ελκυστικότερα πλεονεκτήματα που προσφέρεται από τη χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων είναι η καταλυτική μείωση του απαιτούμενου χρόνου περάτωσης του έργου.

Μια σημαντική αιτία που οδηγεί στη μείωση του συνολικού χρονοδιαγράμματος του έργου, εντοπίζεται στην αυτοματοποιημένη διαδικασία κατασκευής της τοιχοποιίας σε εργοστασιακό περιβάλλον εκτός εργοταξίου. Το γεγονός αυτό, επιτρέπει την παράλληλη εκτέλεση εργασιών στο εργοστάσιο και στο εργοτάξιο. Συγκεκριμένα, ενώ η παραγωγή του προκατασκευασμένων στοιχείων πραγματοποιείται σε ελεγχόμενο βιομηχανικό περιβάλλον, μπορούν να προχωρούν και να εκτελούνται ταυτόχρονα τυχόν εργασίες προετοιμασίας του εργοταξίου, μειώνοντας έτσι σημαντικά τη συνολική διάρκεια του έργου [15].

Ίσως το πιο επιδραστικό χαρακτηριστικό των προκατασκευασμένων στοιχείων είναι η εξάλειψη του χρόνου κατασκευής τους στο εργοτάξιο. Αναλυτικότερα, δεν απαιτείται από τους εργάτες να κτίσουν παρά μόνο να συναρμολογήσουν τα προκατασκευασμένα στοιχεία που φτάνουν στο χώρο του έργου έτοιμα προς εγκατάσταση. Η διαδικασία τοποθέτησης και σύνδεσης είναι ταχύτατη περιορίζοντας δραστικά τόσο την ανάγκη σε εργατικό δυναμικό όσο και τη διάρκεια της παρέμβασης [16]. Επιπλέον, η εργοστασιακή παραγωγή προστατεύει τη διαδικασία από εξωτερικούς παράγοντες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ανεπιθύμητες και απρόσμενες καθυστερήσεις, όπως οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες, καθώς και από κινδύνους όπως βανδαλισμοί ή κλοπές στο εργοτάξιο [17].



Σχήμα 2.1: Μεταφορά προκατασκευασμένου στοιχείου πρόσοψης εντός εργοταξίου.

Σχετικά με ριζικές ανακαίνισεις που απαιτούν επιπλέον αναβάθμιση των ηλεκτρολογικών συστημάτων, οι προκατασκευασμένες τοιχοποιίες με ενσωματωμένα συστήματα (HVAC) συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση της συνολικής διάρκειας του έργου, καθώς συνδυάζουν σε ένα ενιαίο στοιχείο τόσο τη δομική όσο και τη μηχανολογική υποδομή. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη για διαδοχικές φάσεις εγκατάστασης, όπως η τοποθέτηση τοιχοποιίας, η διέλευση αγωγών και η εγκατάσταση συστημάτων HVAC, που σε μια συμβατική κατασκευή απαιτούν επιπλέον χρόνο και συντονισμό μεταξύ διαφορετικών συνεργείων [18]. Με αυτόν τον τρόπο, η συναρμολόγηση και η λειτουργική ολοκλήρωση των τοιχοποιιών γίνεται ταχύτερα, επιταχύνοντας την πρόοδο του έργου και επιτρέποντας την ταχύτερη παράδοσή του.

2.1.1.2 Όχληση κατοίκων

Στις περιπτώσεις ανακαίνισης υφιστάμενων κτιρίων, η διάρκεια και ο βαθμός έντασης και παρεμβατικότητας των εργασιών προκαλούν όχληση και δυσαρέσκεια στους κατοίκους. Σε περίπτωση που τα μεγέθη αυτά κριθούν σημαντικά από του κατοίκους μπορεί να οδηγήσουν ακόμη και σε απόρριψη του έργου. Αξίζει, λοιπόν, να επισημανθεί πως η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων στην ανακαίνιση κτιρίων συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της όχλησης των κατοίκων, καθώς επιτρέπει την ταχύτερη και πιο οργανωμένη εκτέλεση των εργασιών. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, όπου μεγάλο μέρος των εργασιών πραγματοποιείται επί τόπου, η προκατασκευή επιτρέπει την κατασκευή των δομικών στοιχείων σε εργοστασιακό περιβάλλον, μειώνοντας έτσι τον χρόνο παραμονής συνεργείων στο εργοτάξιο. Αυτό συνεπάγεται λιγότερο θόρυβο, μειωμένη έκθεση σε σκόνη και κατασκευαστικά απόβλητα, καθώς και μικρότερη παρεμπόδιση της καθημερινής δραστηριότητας των ενοίκων. Επιπλέον, η συναρμολόγηση των προκατασκευασμένων τοιχοποιιών ή προσόψεων πραγματοποιείται με ταχύτητα και ακρίβεια, ελαχιστοποιώντας τη χρονική διάρκεια της όχλησης και επιτρέποντας στους κατοίκους να συνεχίσουν να διαμένουν στον χώρο τους με όσο το δυνατόν μικρότερη ενόχληση, πολλές φορές χωρίς να χρειαστεί να χρησιμοποιούνται οι εσωτερικοί, κατοικημένοι χώροι από τα συνεργεία. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα ωφέλιμη σε περιπτώσεις ενεργειακής αναβάθμισης κατοικημένων κτιρίων, όπου η ανάγκη για γρήγορες και αποτελεσματικές παρεμβάσεις είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της ποιότητας ζωής των ενοίκων [19].

Εμβαθύνοντας ακόμη περισσότερο, τα προκατασκευασμένα στοιχεία προσόψεων με ενσωματωμένα συστήματα (HVAC) και φωτοβολταϊκά μειώνουν περαιτέρω την όχληση των κατοίκων, καθώς επιτρέπουν την εγκατάσταση κρίσιμων μηχανολογικών υποδομών χωρίς εκτεταμένες επεμβάσεις στο εσωτερικό του κτιρίου. Δεδομένου ότι οι αεραγωγοί, οι σωληνώσεις και οι ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις ενσωματώνονται εξ αρχής στα προκατασκευασμένα στοιχεία, η ανάγκη για χρονοβόρες και θορυβώδεις εργασίες διάνοιξης και τοποθέτησης μειώνεται σημαντικά [20]. Επομένως, όπως είναι λογικό η τεχνική αυτή συνεπάγεται λιγότερη σκόνη, λιγότερο θόρυβο και ταχύτερη ολοκλήρωση της ανακαίνισης, καθιστώντας την όλη διαδικασία πιο προσιτή και ελκυστική στους ενοίκους που συνεχίζουν να διαμένουν στο κτίριο κατά τη διάρκεια των εργασιών [21].

2.1.1.3 Κόστος

Το κόστος ενός έργου ίσως είναι το πιο κρίσιμο κριτήριο στη λήψη απόφασης υλοποίησης του, είναι σίγουρα όμως ένας παράγοντας που πάντα θα αναλύεται και θα επηρεάζει τους αποφασίζοντες αλλά και όλους τους εμπλεκόμενους. Ένα διόλου αμελητέο πλεονέκτημα της χρήσης προκατασκευασμένων στοιχείων είναι ότι συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του κόστους κατασκευής, καθώς βελτιστοποιεί τη διαχείριση των πόρων, μειώνει τα απόβλητα, ελαχιστοποιεί τη διάρκεια του έργου και περιορίζει τις απρόβλεπτες καθυστερήσεις. Πρωτίστως, η παραγωγή των στοιχείων σε εργοστασιακό περιβάλλον επιτρέπει την ακριβή κοστολόγηση των υλικών και την

αποφυγή σπατάλης, σε αντίθεση με την επιτόπια κατασκευή, όπου οι απρόβλεπτες απώλειες και οι αναποτελεσματικές διαδικασίες μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τις δαπάνες [22]. Ακόμη, οι προκατασκευασμένες τοιχοποιίες, όπως τα στοιχεία σκυροδέματος, μπορούν να ενσωματώσουν κατασκευαστικά απόβλητα, μειώνοντας την ανάγκη για νέα υλικά [23]. Επιπλέον, η προκατασκευή μειώνει τον χρόνο κατασκευής έως και 40%, περιορίζοντας έτσι τα εργατικά κόστη και τις πρόσθετες δαπάνες που σχετίζονται με την παράταση του έργου, όπως οι ενοικιάσεις εξοπλισμού και η χρηματοοικονομική επιβάρυνση από καθυστερημένες παραδόσεις [24]. Επιπρόσθετα, οι βελτιωμένες διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου στο εργοστάσιο μειώνουν τις ανάγκες για διορθώσεις και συντηρήσεις, περιορίζοντας έτσι τα μελλοντικά κόστη. Τέλος, το μειωμένο κατασκευαστικό αποτύπωμα στο εργοτάξιο συνεπάγεται χαμηλότερες δαπάνες για διαχείριση αποβλήτων, προσωρινές υποδομές και ασφάλεια εργοταξίου.

Η ενσωμάτωση ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων (HVAC) στα προκατασκευασμένα στοιχεία ενισχύει ακόμη περισσότερο την οικονομική αποδοτικότητα του έργου, καθώς εξαιλεί τη δαπανηρή και χρονοβόρα διαδικασία επιτόπιας εγκατάστασης [25]. Οι προ-τοποθετημένοι αεραγωγοί, σωληνώσεις και καλωδιώσεις μειώνουν την ανάγκη για εξειδικευμένα συνεργεία και τις επιπλέον εργασίες διαμόρφωσης, συμβάλλοντας έτσι σε μια πιο συγκροτημένη και οικονομικά αποδοτική διαδικασία κατασκευής.

2.1.1.4 Ποιότητα

Η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων βελτιώνει σημαντικά ακόμη και την ποιότητα της κατασκευής, καθώς η παραγωγή τους πραγματοποιείται σε ελεγχόμενο εργοστασιακό περιβάλλον, όπου εφαρμόζονται αυστηροί κανόνες ποιοτικού ελέγχου. Σε αντίθεση με την επιτόπια κατασκευή, όπου οι καιρικές συνθήκες, η ανθρώπινη αστοχία και οι αποκλίσεις στις κατασκευαστικές διαδικασίες μπορούν να επηρεάσουν την τελική ποιότητα του έργου, η προκατασκευή εξασφαλίζει υψηλή ακρίβεια στις διαστάσεις, στην ομοιομορφία των υλικών και στη σωστή συναρμογή των στοιχείων [23]. Επιπλέον, οι προκατασκευασμένες τοιχοποιίες και προσόψεις σχεδιάζονται με βελτιστοποιημένες συνθήκες θερμομόνωσης, στεγανότητας και αντοχής, μειώνοντας τον κίνδυνο αστοχιών και την ανάγκη για μελλοντικές επισκευές. Ο συνδυασμός αυτών των παραγόντων οδηγεί σε μια συνολικά πιο ανθεκτική, αξιόπιστη και μακροχρόνια κατασκευή, που πληροί υψηλά πρότυπα ασφάλειας.

Η ενσωμάτωση ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων (HVAC) στα προκατασκευασμένα στοιχεία συμβάλλει ακόμη περισσότερο στη βελτίωση της ποιότητας, καθώς οι αεραγωγοί, οι σωληνώσεις και οι ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις τοποθετούνται με ακρίβεια σε εργοστασιακές συνθήκες, αποφεύγοντας κακοτεχνίες που μπορεί να προκύψουν από επιτόπιες εργασίες. Έτσι, διασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία των μηχανολογικών συστημάτων, μειώνονται οι απώλειες ενέργειας και εξασφαλίζεται ένα πιο άνετο και υγιεινό εσωτερικό περιβάλλον.

2.1.1.5 Περιβαλλοντική απόδοση

Εξετάζοντας και το περιβαλλοντικό ζήτημα, η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων συμβάλλει σημαντικά στη βελτιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κατασκευών, καθώς επιτρέπει τη μείωση της σπατάλης υλικών και των ενσωματωμένων εκπομπών άνθρακα, τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση των εκπομπών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του έργου. Αναλυτικότερα, οι προκατασκευασμένες τοιχοποιίες μπορούν να μειώσουν τις ενσωματωμένες εκπομπές άνθρακα έως και 50% μέσω βελτιωμένου σχεδιασμού για αποσυναρμολόγηση, που ενισχύει τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των υλικών [28]. Επιπλέον, η παραγωγή των στοιχείων σε εργοστασιακό περιβάλλον επιτρέπει ακριβέστερη διαχείριση των υλικών, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες και μειώνοντας τα κατασκευαστικά απόβλητα που θα προκύπταν σε ένα εργοτάξιο [29].

Η ενσωμάτωση συστημάτων HVAC στα προκατασκευασμένα στοιχεία ενισχύει περαιτέρω τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, καθώς τα μηχανολογικά δίκτυα τοποθετούνται με ακρίβεια, βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Η μείωση των θερμικών απωλειών, η βελτιστοποιημένη ροή αέρα και η αποδοτικότερη λειτουργία των συστημάτων HVAC μειώνουν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας, συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών άνθρακα κατά τη λειτουργία του κτιρίου [30].

2.1.1.6 Διαχείριση υγρασίας

Όσον αφορά σε ένα συχνά παραμελημένο μέγεθος, όπως είναι αυτό της υγρασίας, τα προκατασκευασμένα στοιχεία βελτιστοποιούν την υγρασθερμική (hygrothermal) απόδοση των τοίχων μέσω της ενσωμάτωσης διαπνεόντων μεμβρανών και ατμοφραγών μπορούν να ελέγξουν τη διάχυση υδρατμών, αποτρέποντας τη συσσώρευση υγρασίας στο εσωτερικό των δομικών στρώσεων. Αυτό μειώνει τον κίνδυνο εμφάνισης συμπυκνωμάτων, μούχλας και δομικών φθορών, διατηρώντας ένα πιο σταθερό και υγιεινό εσωτερικό περιβάλλον [31].

2.1.1.7 Ασφάλεια

Το ποσοστό θνησιμότητας στον κατασκευαστικό τομέα δεν έχει παρουσιάσει μεταβολές τα τελευταία χρόνια, παρά τη συνολική συρρίκνωση του κλάδου [32]. Αυτό αποδίδεται κυρίως στη φύση των εργασιών που εκτελούνται στο εργοτάξιο, όπου οι κίνδυνοι για τους εργαζομένους παραμένουν υψηλοί. Η αρθρωτή κατασκευή κτιρίων βελτιώνει σημαντικά τις συνθήκες ασφάλειας, καθώς περίπου το 85% των εργασιών πραγματοποιείται σε εργοστασιακό περιβάλλον υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Έτσι, μειώνονται σημαντικά οι κίνδυνοι εργατικών ατυχημάτων, η έκθεση σε εργασίες μεγάλου ύψους, η συμφόρηση στο εργοτάξιο και οι δυσμενείς επιπτώσεις των καιρικών συνθηκών [33]. Σύμφωνα με μελέτη [34], η υιοθέτηση εφαρμογής προκατασκευασμένων στοιχείων οδηγεί σε μείωση των καταγεγραμμένων εργατικών ατυχημάτων έως και 80% σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους δόμησης.

2.1.2 Μειονεκτήματα – Προκλήσεις

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων στην κατασκευή και ανακαίνιση κτιρίων, ενέχει και αρκετούς αρνητικούς παράγοντες που μπορούν να περιορίσουν την εφαρμογή της. Ένας από τους μεγαλύτερους περιορισμούς αφορά τον σχεδιασμό του έργου, καθώς απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και λεπτομέρεια, με την ανάγκη ακριβούς προετοιμασίας των στοιχείων πριν την κατασκευή. Επίσης, η μεταφορά και εγκατάσταση των προκατασκευασμένων τμημάτων μπορεί να είναι δύσκολη, λόγω των μεγάλων τους διαστάσεων και του αυξημένου κόστους μεταφοράς, ενώ η διαδικασία αυτή απαιτεί ειδικό εξοπλισμό και μπορεί να προκαλέσει καθυστερήσεις. Επιπλέον, η αρνητική αντίληψη που έχει ορισμένο μέρος του κοινού για την ποιότητα των προκατασκευασμένων κτιρίων και οι οικονομικοί περιορισμοί που συνδέονται με την αρχική επένδυση στην εγκατάσταση εργοστασίων παραγωγής, αποτελούν εμπόδια στην ευρεία διάδοσή τους. Τέλος, η έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού στις προκατασκευασμένες κατασκευές μπορεί να καθυστερήσει την εξέλιξη και ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας.

2.1.2.1 Σχεδιασμός έργου

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στην προκατασκευή, την προσυναρμολόγηση και γενικότερα στην αρθρωτή κατασκευή κτιρίων είναι η ανάγκη για λεπτομερή και ακριβή σχεδιασμό του έργου. Ο τρόπος σχεδιασμού στις προκατασκευασμένες κατασκευές διαφέρει σημαντικά από εκείνον που εφαρμόζεται στις παραδοσιακές μεθόδους δόμησης. Πέρα από την αυξημένη πολυπλοκότητα που συνεπάγεται ο σχεδιασμός των επιμέρους δομικών στοιχείων, ιδιαίτερες δυσκολίες προκύπτουν και κατά τη διαδικασία μεταφοράς και τοποθέτησής τους [35]. Συνεπώς, η λεπτομερής προετοιμασία και ο ακριβής σχεδιασμός κάθε τμήματος πριν από την κατασκευή και τη συναρμολόγηση είναι ζωτικής σημασίας για την ομαλή και αποδοτική ολοκλήρωση του έργου.

2.1.2.2 Μεταφορά και μετακίνηση

Κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχή εφαρμογή των προκατασκευασμένων στοιχείων τοιχοποιίας αποτελεί η εφοδιαστική αλυσίδα τους. Όπως είναι αναμενόμενο, τα στοιχεία αυτά παράγονται σε μεγάλα μεγέθη, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πολυπλοκότητα και η διάρκεια της απαιτούμενης εργασίας στο εργοτάξιο. Αναπόφευκτα, λοιπόν, οι ογκώδεις αυτές τοιχοποιίες χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής και μεταχείρισης κατά τη μεταφορά τους στο σημείο εφαρμογής τους. Πριν από τον σχεδιασμό των επιμέρους τμημάτων μιας τέτοιας κατασκευής, είναι απαραίτητο να προηγηθεί λεπτομερής ανάλυση των πιθανών περιορισμών που σχετίζονται με τη μεταφορά τους στην περιοχή εγκατάστασης [35]. Εκτός από τους γενικούς κανονισμούς μεταφορών, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και ειδικές κυκλοφοριακές ρυθμίσεις, ιδίως σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές όπου οι συνθήκες μετακίνησης είναι πιο σύνθετες. Επιπλέον, η μεταφορά προκατασκευασμένων δομικών στοιχείων σε μεγάλες αποστάσεις μπορεί να καταστεί μη συμφέρουσα λόγω του

υψηλού κόστους μεταφοράς και των απαιτούμενων προσαρμογών στη διαδικασία μετακίνησης.

Εκτός από την εφοδιαστική αλυσίδα, οι ίδιες οι διαστάσεις των προκατασκευασμένων τμημάτων μπορούν να αποτελέσουν περιοριστικό παράγοντα, καθώς πρέπει να συμμορφώνονται με τις νομοθετικές προβλέψεις που διέπουν τις μεταφορές μεγάλου όγκου. Κατά συνέπεια, η επιλογή της μεταφορικής μεθόδου και της διαδρομής επηρεάζει άμεσα τις επιτρεπόμενες διαστάσεις, το βάρος και τον όγκο των στοιχείων. Επιπλέον, διαδικασίες όπως η έκδοση ειδικών αδειών μεταφοράς για υπερμεγέθη φορτία, καθώς και ο εκτελωνισμός στα σύνορα, ενδέχεται να προκαλέσουν σημαντικές καθυστερήσεις στην παράδοση και ολοκλήρωση του έργου [36].

Τέλος, λόγω του μεγάλου όγκου και βάρους των προκατασκευασμένων στοιχείων δημιουργείται η ανάγκη για ειδικό εξοπλισμό ανύψωσης. Συγκεκριμένα, απαιτείται χρήση γερανών υψηλής ακρίβειας, προκειμένου οι τοιχοποιίες να ευθυγραμμιστούν σωστά χωρίς να προκληθούν ζημιές ή αποκλίσεις στις συνδέσεις.

2.1.2.3 Αρνητική προκατάληψη

Ένας επιπλέον παράγοντας που περιορίζει τη γρήγορη διάδοση των προκατασκευασμένων κατοικιών και της χρήσης προκατασκευασμένων στοιχείων προς ανακαίνιση κτιρίων, είναι η αρνητική αντίληψη που διατηρεί ένα μέρος του κοινού. Συχνά, τα προκατασκευασμένα κτίρια συγχέονται λανθασμένα με τα τροχόσπιτα ή με πρόχειρες κατασκευές χαμηλής ποιότητας, κάτι που απέχει πολύ από την πραγματικότητα. Η έλλειψη ενημέρωσης των κατοίκων, των εργολάβων και των λοιπών ενδιαφερόμενων σχετικά με τα οφέλη και τις δυνατότητες των προκατασκευασμένων στοιχείων επηρεάζει αρνητικά τόσο τη ζήτηση στην αγορά των προκατασκευασμένων κτιρίων όσο και την περαιτέρω ανάπτυξη του κλάδου [37].

2.1.2.4 Οικονομικοί και κοινωνικοί περιορισμοί

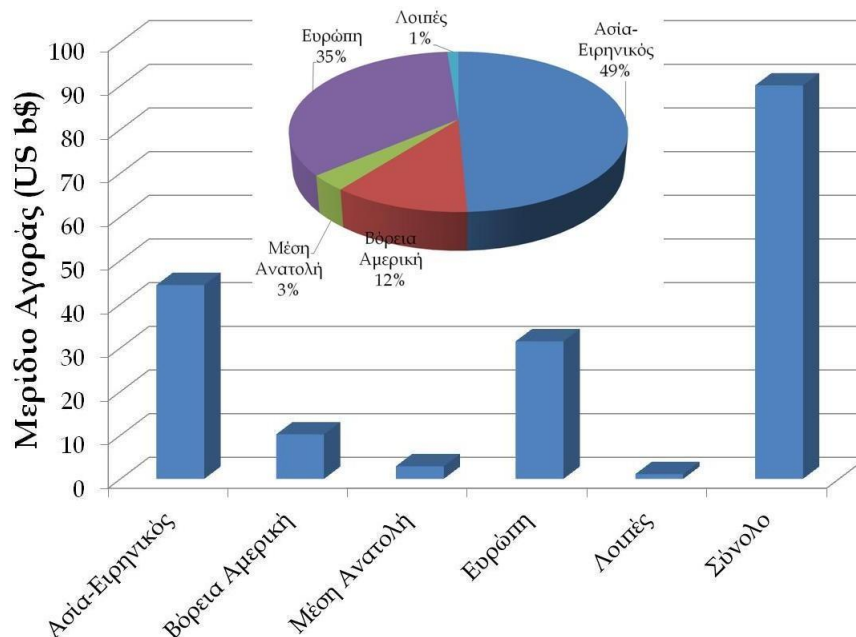
Όπως κάθε τι μη συμβατικό, έτσι και η εγκατάσταση και λειτουργία ενός εργοστασίου παραγωγής προκατασκευασμένων κτιρίων προϋποθέτει αρκετά υψηλή αρχική επένδυση [34]. Παράλληλα, η οικονομική κατάσταση της περιοχής όπου σχεδιάζεται η ανάπτυξη της βιομηχανίας αυτής διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην επιτυχία της. Σε περιοχές με χαμηλό εργατικό κόστος, οι σύγχρονες κατασκευαστικές τεχνικές μπορεί να μην είναι ελκυστικές, καθώς η παραδοσιακή εργασία παραμένει οικονομικά πιο συμφέρουσα. Τέλος, ένας ακόμη περιοριστικός παράγοντας είναι η έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού, όπως μηχανικών και σχεδιαστών με εμπειρία στις προκατασκευασμένες δομές, γεγονός που μπορεί να επιβραδύνει την υιοθέτηση και διάδοση αυτής της τεχνολογίας.

2.1.3 Παγκόσμια και ευρωπαϊκή αγορά

Τα τελευταία είκοσι χρόνια, η παγκόσμια αγορά προκατασκευασμένων κτιρίων και στοιχείων έχει σημειώσει σημαντική ανάπτυξη, αντανakλώντας τις μεταβαλλόμενες ανάγκες και τάσεις στον κατασκευαστικό τομέα. Σύμφωνα με την Infinite Data Expert [38], η αξία της παγκόσμιας αγοράς συστημάτων προκατασκευασμένων

κτιρίων ήταν 11,9 δισεκατομμύρια δολάρια το 2021 και αναμένεται να φτάσει τα 19,27 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2030, με ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) 5,5% κατά την περίοδο 2023-2030. Η ζήτηση για προκατασκευασμένα κτίρια ενισχύεται από την ανάγκη για ταχύτερες, οικονομικότερες και πιο βιώσιμες κατασκευαστικές λύσεις. Η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων, όπως μπλοκ τοιχοποιίας, φύλλα χάλυβα και προκατασκευασμένο σκυρόδεμα, προσφέρει οικονομικά αποδοτικές εναλλακτικές λύσεις στην παραδοσιακή κατασκευή. Επιπλέον, η ταχεία αστικοποίηση και η αύξηση του πληθυσμού συμβάλλουν στην αυξημένη ζήτηση για τέτοιες λύσεις.

Η αγορά της περιοχής Ασίας-Ειρηνικού κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό στην παγκόσμια αγορά προκατασκευασμένων κτιρίων, φτάνοντας το 49,3%. Στην περιοχή αυτή, η Κίνα διατηρεί το μεγαλύτερο μερίδιο με 61%, ακολουθούμενη από την Ιαπωνία, την Αυστραλία και την Ινδονησία με 22,3%, 6,8% και 5,1%, αντίστοιχα. Στη Βόρεια Αμερική, η αγορά των προκατασκευασμένων κτιρίων αντιπροσωπεύει το 11,3% με τις Ηνωμένες Πολιτείες να κατέχουν το μεγαλύτερο μερίδιο αυτής, με 74,8%. Στη Μέση Ανατολή, η αγορά περιορίστηκε στο 3,2% κατατάσσοντας την περιοχή στην τελευταία θέση. Στην Ευρώπη, η αγορά των προκατασκευασμένων κτιρίων έφτασε το 35% του συνολικού μεριδίου, όπου η Ιταλία κατείχε το μεγαλύτερο ποσοστό με 25,4%, ενώ ακολουθούσαν η Γερμανία, η Γαλλία, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Ρωσία με ποσοστά 12,7%, 10,7%, 9,2% και 8,5%, αντίστοιχα. Το Σχήμα 2.2 απεικονίζει συνοπτικά την κατανομή της παγκόσμιας αγοράς προκατασκευασμένων κτιρίων.



Σχήμα 2.2: Ανάλυση παγκόσμιας αγοράς προκατασκευασμένων κατοικιών.

Στην Ελλάδα, το μερίδιο των προκατασκευασμένων κτιρίων παραμένει σχετικά χαμηλό, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 8% της συνολικής οικοδομικής δραστηριότητας, ενώ στην Ευρώπη το αντίστοιχο ποσοστό φτάνει έως και το 40%. Παρ' όλα αυτά, η τάση είναι ανοδική, καθώς τα πλεονεκτήματα των

προκατασκευασμένων κτιρίων γίνονται όλο και πιο αναγνωρίσιμα, ενώ οι τράπεζες χρηματοδοτούν πλήρως τις προκατασκευασμένες κατοικίες με τους ίδιους όρους που ισχύουν για τις παραδοσιακές. Επιπλέον, παρατηρείται μια σημαντική αλλαγή στην προτίμηση των καταναλωτών: ενώ πριν από μια δεκαπενταετία τα προκατασκευασμένα σπίτια επιλέγονταν κυρίως για εξοχικές κατοικίες (σε ποσοστό περίπου 95%), σήμερα το 60% των καταναλωτών τα προτιμούν για μόνιμη κατοικία και το 40% για εξοχικά. Αυτή η στροφή οφείλεται τόσο στη βελτίωση της ποιότητας των προκατασκευασμένων κατοικιών όσο και στην αυξημένη ενημέρωση του κοινού.

Συνολικά, η προκατασκευασμένη κατασκευή έχει εξελιχθεί από μια εξειδικευμένη επιλογή σε μια κύρια τάση στον κατασκευαστικό τομέα, προσφέροντας λύσεις που ανταποκρίνονται στις σύγχρονες απαιτήσεις για ταχύτητα, οικονομία και βιωσιμότητα.

2.2 Μονωτικά υλικά

Τα μονωτικά υλικά είναι καθοριστικά για τη θερμική απόδοση ενός κτιρίου, καθώς στοχεύουν στη μείωση της θερμοπερατότητας των δομικών στοιχείων, περιορίζοντας έτσι τις θερμικές απώλειες το χειμώνα και την εισροή θερμότητας το καλοκαίρι. Η λειτουργία τους βασίζεται στον εγκλωβισμό αέρα που περιέχουν, ο οποίος οδηγεί σε χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Επιπλέον, η παρουσία αυτού του αέρα δημιουργεί το χαρακτηριστικό ελαφρύ βάρος των μονωτικών υλικών. Συνήθως, ως δείκτης θερμικής απόδοσης των μονωτικών υλικών χρησιμοποιείται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας με συμβολισμό λ ή κ και μονάδες $W/(m \cdot K)$, καθώς αποτελεί ποσοτικοποίηση της ικανότητας ενός υλικού ή της αντίστασης αυτού στη μεταφορά θερμότητας, ανά μονάδα χρόνου, λόγω αγωγής όταν θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο άκρων του. Ωστόσο, όταν πρόκειται για τοιχοποιίες και γενικά δομικά στοιχεία χρησιμοποιείται ο συντελεστής θερμοπερατότητας (*U-value*) που δείχνει την ποσότητα θερμότητας, ανά μονάδα χρόνου, που περνά μέσα από 1 m^2 δομικού στοιχείου όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο άκρων του είναι ίση με 1 K και εκφράζεται σε $W/(m^2 \cdot K)$. Η ταξινόμηση των μονωτικών υλικών γίνεται ανάλογα με την προέλευσή τους (ανόργανα ή οργανικά), την επεξεργασία που έχουν υποστεί (φυσική ή τεχνητή), το πορώδες τους (ανοιχτό ή κλειστό) και το φαινόμενο βάρος (ελαφρύ ή βαρύ). Πέρα από αυτά, εμείς θα τα εξετάσουμε διακρίνοντας τα σε τρεις άλλες κατηγορίες. Τα συμβατικά μονωτικά υλικά που έχουν κυριαρχήσει στην πλειοψηφία των εφαρμογών, τα μονωτικά υψηλής απόδοσης ή υπερ-μονωτικά υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από διακεκριμένα υψηλές θερμομονωτικές ιδιότητες και τα φυσικά υλικά που αποτελούν και αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας.

2.2.1 Συμβατικά μονωτικά υλικά

Τα συμβατικά μονωτικά υλικά αποτελούν την πιο διαδεδομένη επιλογή για τη θερμομόνωση κτιρίων, χάρη στην ευρεία διαθεσιμότητά τους, το χαμηλό κόστος και την ικανοποιητική θερμομονωτική τους απόδοση. Πρόκειται κυρίως για βιομηχανικά παραγόμενα υλικά, τα οποία έχουν σχεδιαστεί ώστε να προσφέρουν αποτελεσματική θερμομόνωση, ηχομόνωση και, σε ορισμένες περιπτώσεις, πυραντίσταση. Η χρήση

τους εκτείνεται τόσο σε οικιστικές όσο και σε βιομηχανικές κατασκευές, καλύπτοντας εφαρμογές όπως τοιχοποιίες, δάπεδα, στέγες και μηχανολογικές εγκαταστάσεις. Ανάμεσα στα πιο κοινά συμβατικά μονωτικά συγκαταλέγονται ο πετροβάμβακας, η διογκωμένη πολυστερίνη, η πολυουρεθάνη και ο διογκωμένος περλίτης. Το κάθε υλικό διαθέτει μοναδικά χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και περιορισμούς, που καθορίζουν την καταλληλότητά του για συγκεκριμένες εφαρμογές. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά οι βασικές περιπτώσεις μονωτικών υλικών, μαζί με τις ιδιότητες και τις χρήσεις τους.

➤ Πετροβάμβακας

Ο πετροβάμβακας (mineral wool) (Σχήμα 2.3) είναι ένα μονωτικό υλικό που αποτελείται από ίνες οξειδίου του πυριτίου και αλουμινίου. Παρότι αποτελεί υλικό φυσικής προέλευσης και συγκεντρώνει αρκετά χαρακτηριστικά ενός φυσικού υλικού, χρησιμοποιείται ευρέως σε κτίρια (π.χ. τοιχοποιία, στέγες, δάπεδα, οροφές, συστήματα ξηράς δόμησης κ.ά.) και σε διάφορες τεχνικές εφαρμογές (όπως αεραγωγοί θέρμανσης, κλιματισμού, σωληνώσεις και δεξαμενές υψηλών ή χαμηλών θερμοκρασιών), γεγονός που το καθιστά πρακτικά συμβατικό μονωτικό. Ο πετροβάμβακας έχει πυκνότητα περίπου 30 kg/m^3 και θερμική αγωγιμότητα που κυμαίνεται από 0,033 έως 0,045 W/(m.K) . Ωστόσο, η θερμομονωτική του απόδοση επηρεάζεται αρνητικά όταν προσβάλλεται από υγρασία ή όταν κατά τη διαδικασία παραγωγής του σχηματίζονται συμπαγή σφαιρίδια τήξης σε υψηλό ποσοστό, τα οποία μειώνουν την ποιότητα των ινών.



Σχήμα 2.3: Πετροβάμβακας.

Τα κύρια πλεονεκτήματα του πετροβάμβακα περιλαμβάνουν:

- ✓ Ανθεκτικότητα στη φωτιά (άκαυστος)
- ✓ Υψηλές μηχανικές ιδιότητες, ιδιαίτερα όταν η πυκνότητά του είναι αυξημένη
- ✓ Δυνατότητα χρήσης σε ένα ευρύ θερμοκρασιακό εύρος
- ✓ Αντοχή στον χρόνο, διατηρώντας τις ιδιότητες και τις διαστάσεις του για μεγάλο χρονικό διάστημα
- ✓ Ανθεκτικότητα σε διαλύτες, έντομα και παράσιτα

- ✓ Αδιάφορος προς την ηλιακή ακτινοβολία
- ✓ Άοσμος

Παρά την ευρεία χρήση του, ο πετροβάμβακας υστερεί σε σημεία, όπως η ευαισθησία του στην υγρασία λόγω του υψηλού πορώδους του, καθώς και η δυσκολία στην τοποθέτησή του.

➤ **Διογκωμένη πολυστερίνη**

Η διογκωμένη πολυστερίνη (Expanded Polystyrene – EPS) (Σχήμα 2.4) αποτελεί ένα ελαφρύ και ευέλικτο μονωτικό υλικό, το οποίο συντίθεται από διογκωμένες χάντρες πολυστυρολίου και πολυστυρενίου. Χάρη στα βασικά της χαρακτηριστικά, όπως το χαμηλό βάρος, την εύκολη διαμόρφωσή της και η ακαμψία του, χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές (π.χ. συσκευασία τροφίμων, μονωτικά υλικά, κ.ά.). Το κυριότερο πλεονέκτημα της διογκωμένης πολυστερίνης είναι ο χαμηλός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, που κυμαίνεται μεταξύ 0,030 και 0,034 W/(m·K), ο οποίος προκύπτει από το πορώδες του υλικού που εγκλωβίζει ακίνητο αέρα, αλλά και από την προσθήκη υλικών πληρώσεως, όπως αλουμίνιο και γραφίτη.



Σχήμα 2.4: Διογκωμένη πολυστερίνη (αριστερά) και η εφαρμογή της σε κτίριο (δεξιά).

Τα κύρια πλεονεκτήματα της διογκωμένης πολυστερίνης είναι τα εξής:

- ✓ Εξαιρετική ευχρηστία: μπορεί να κοπεί, διαμορφωθεί, μεταφερθεί και τοποθετηθεί εύκολα.
- ✓ Χαμηλό κόστος και καλές θερμομονωτικές ιδιότητες.
- ✓ Ικανότητα να συνδυάζεται εύκολα με όλα τα οικοδομικά υλικά.

Ωστόσο, η διογκωμένη πολυστερίνη έχει και κάποια βασικά μειονεκτήματα, όπως:

- Περιορισμένες μηχανικές ιδιότητες σε χαμηλή πυκνότητα.
- Ευφλεκτότητα, γεγονός που την καθιστά ακατάλληλη για χώρους με υψηλές θερμοκρασίες.
- Ευαισθησία στην ηλιακή ακτινοβολία, διαλύτες, έντομα και τρωκτικά.

Η διογκωμένη πολυστερίνη αποτελεί πιθανότατα το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μονωτικό υλικό, ιδίως στην Ελλάδα, για εξωτερική τοποθέτηση.

➤ Πολυουρεθάνη

Η πολυουρεθάνη (polyurethane) είναι ένα συνθετικό υλικό το οποίο περιλαμβάνει εποξικά, πολυεστέρες και φαινόλες, ενώ παράγεται με χημική αντίδραση μεταξύ ισοκυανικών και πολυολών, και διατίθεται σε διάφορες μορφές, όπως αφρός ή πάνελ (Σχήμα 2.5). Ο αφρός πολυουρεθάνης είναι ένα υλικό το οποίο δεν έχει βρει ιδιαίτερη απήχηση στη θερμομόνωση των κτιρίων.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της πολυουρεθάνης είναι:

- ✓ Καλή μονωτική ικανότητα, με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, συνήθως μεταξύ 0,022 και 0,028 W/(m·K)
- ✓ Καλή μηχανική αντοχή
- ✓ Ανθεκτικότητα
- ✓ Υγροπροστασία
- ✓ Αντιδιαβρωτική ικανότητα

Παρά τις πολύτιμες ιδιότητές της η πολυουρεθάνη χαρακτηρίζεται και από σημαντικά μειονεκτήματα, όπως:

- Υψηλό κόστος
- Δυσκολίες στην εφαρμογή
- Ευαίσθητη σε υψηλές τιμές θερμότητας
- Ευαισθησία σε υπεριώδη ακτινοβολία (UV)
- Ευαισθησία σε ορισμένους διαλύτες



Σχήμα 2.5: Πάνελ πολυουρεθάνης (αριστερά) και εφαρμογή αφρού πολυουρεθάνης (δεξιά).

Συνοψίζοντας, η πολυουρεθάνη παρουσιάζει εξαιρετικά χαρακτηριστικά που την καθιστούν ιδανική για συγκεκριμένες εφαρμογές, αλλά εμφανίζει και αρνητικά που την έχουν αποκλείσει από την ευρεία χρήση στη θερμομόνωση κτιρίων.

➤ **Διογκωμένος περλίτης**

Ο διογκωμένος περλίτης είναι ένα υλικό φυσικής προέλευσης με χαρακτηριστικά συμβατικού μονωτικού υλικού με ευρεία χρήση στην οικοδομική και βιομηχανική μόνωση, χάρη στις θερμομονωτικές και ηχομονωτικές του ιδιότητες. Πρόκειται για ένα φυσικό ηφαιστειακό πέτρωμα, το οποίο, μέσω θερμικής επεξεργασίας, διογκώνεται και αποκτά πορώδη δομή, αυξάνοντας σημαντικά την ικανότητά του να παγιδεύει ακίνητο αέρα. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητάς του κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0,040 και 0,060 W/(m·K), προσφέροντας αποτελεσματική θερμομόνωση σε κτίρια, ψυκτικούς θαλάμους και βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Τα κύρια πλεονεκτήματά του περιλαμβάνουν:

- ✓ Άκαυστος
- ✓ Χημικά αδρανής
- ✓ Ανθεκτικότητα
- ✓ Αντοχή στην υγρασία και τους μικροοργανισμούς
- ✓ Δυνατότητα συνδυασμού με άλλα δομικά υλικά
- ✓ Μη τοξικό

Πέρα από πλεονεκτήματα, προφανώς διαθέτει και αδύναμα σημεία, μεταξύ των οποίων είναι:

- Υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα, σε σύγκριση με άλλα μονωτικά
- Χρειάζεται προσοχή και προφυλάξεις στην εφαρμογή



Σχήμα 2.6: Διογκωμένος περλίτης σε κόκκους (αριστερά) και σε πάνελ (δεξιά).

Ο διογκωμένος περλίτης είναι ένα υλικό που παρότι είναι συμβατικό, παρουσιάζει κάποια κοινά χαρακτηριστικά με τα φυσικά υλικά. Στην παρούσα εργασία θα εξεταστεί σαν εναλλακτική λύση.

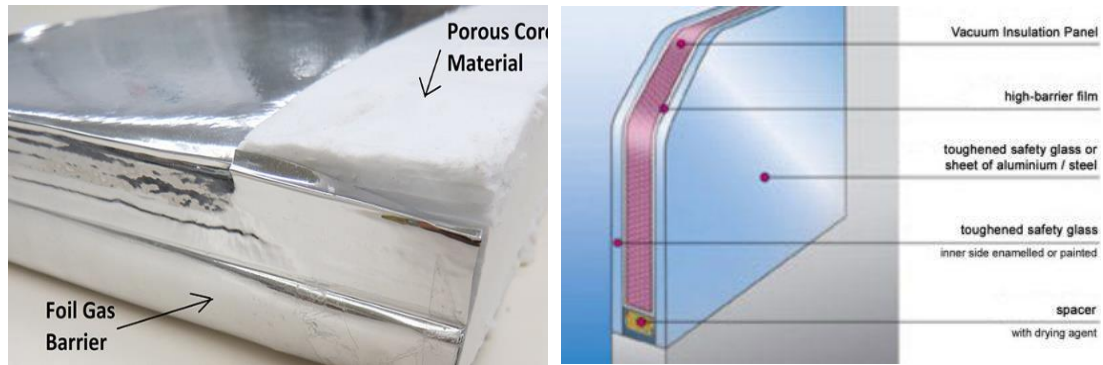
2.2.2 Μονωτικά υψηλής απόδοσης – Υπερ-μονωτικά υλικά

Παρά το γεγονός ότι τα συμβατικά μονωτικά υλικά διαθέτουν χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και κατά συνέπεια προσφέρουν ικανοποιητική θερμομονωτική απόδοση, οι αυξανόμενες απαιτήσεις για ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτίρια, αλλά και σε άλλες εφαρμογές, έχουν οδηγήσει την έρευνα στην ανάπτυξη πιο προηγμένων μονωτικών λύσεων. Τα καινοτόμα αυτά υλικά, γνωστά και ως μονωτικά υψηλής απόδοσης ή υπερ-μονωτικά (Super Insulation Materials – SIM), χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, η οποία δεν ξεπερνά τα $0,015 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ και μπορεί να είναι ακόμη χαμηλότερη, προσφέροντας έτσι σημαντικά βελτιωμένες ιδιότητες μόνωσης σε σύγκριση με τις παραδοσιακές επιλογές. Ιδιαίτερα δημοφιλής είναι επίσης σε ειδικές εφαρμογές που ο όγκος, το πάχος και το βάρος είναι είτε μεταβλητές πρωτεύοντας σημασίας είτε διέπονται από αυστηρούς ή ακόμη και απαράβατους περιορισμούς. Τέτοιες ιδιαιτερότητες μπορεί να απαντώνται για παράδειγμα σε αεροδιαστημικές εφαρμογές ή σε περιπτώσεις όπου η προσαύξηση του πάχους ενός υφιστάμενου τοίχου είναι αυστηρά περιορισμένη.

Δύο από τις πιο διαδεδομένες και αποδοτικές λύσεις στον τομέα των υπερ-μονωτικών, τα μονωτικά πάνελ κενού (VIP) και η αερογέλη (Aerogel), προσφέρουν εξαιρετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και υψηλή ενεργειακή απόδοση. Τα VIP εκμεταλλεύονται τις ιδιότητες του κενού αέρα για τη μείωση της μεταφοράς θερμότητας, ενώ η αερογέλη, με την εξαιρετικά πορώδη νανοδομή της, επιτυγχάνει απαράμιλλη θερμομονωτική ικανότητα με ελάχιστο βάρος. Παρά το υψηλό κόστος και τις τεχνικές προκλήσεις που συνοδεύουν την εφαρμογή τους, αυτά τα υλικά ανοίγουν νέους ορίζοντες στη θερμομόνωση κτιρίων και σε εξειδικευμένες βιομηχανικές χρήσεις.

➤ **Μονωτικό πάνελ κενού (vacuum insulation panel – VIP)**

Ως ένα εκ των πιο ελπιδοφόρων, αποδοτικών και ανερχόμενων υπερ-μονωτικών, το μονωτικό πάνελ κενού ή VIP έκανε, αρχικά, την εμφάνισή του σε εφαρμογές ψυκτικής αποθήκευσης, έπειτα στη βιομηχανία μεταφορών, ενώ τελικά βρήκε πεδίο εφαρμογής και στη θερμομόνωση κτιρίων. Χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται εξαιρετικά λεπτό μονωτικό στρώμα με μέγιστη απόδοση. Αποτελούμενο από έναν πορώδη πυρήνα (συνήθως από πυριτική σκόνη ή ίνες υάλου) που περικλείεται σε ένα αεροστεγές περίβλημα, από το οποίο έχει αφαιρεθεί ο αέρας, δημιουργώντας συνθήκες κενού, επιτυγχάνει εξαιρετικά χαμηλές τιμές συντελεστή αγωγιμότητας από $0,003$ έως $0,005 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Η τιμή αυτή είναι πέντε με επτά φορές χαμηλότερη από την αντίστοιχη των συμβατικών μονωτικών



Σχήμα 2.7: VIP με εμφανές πορώδες (αριστερά) και θεωρητική οπτικοποίηση του προστατευτικού του περιβλήματος (δεξιά).

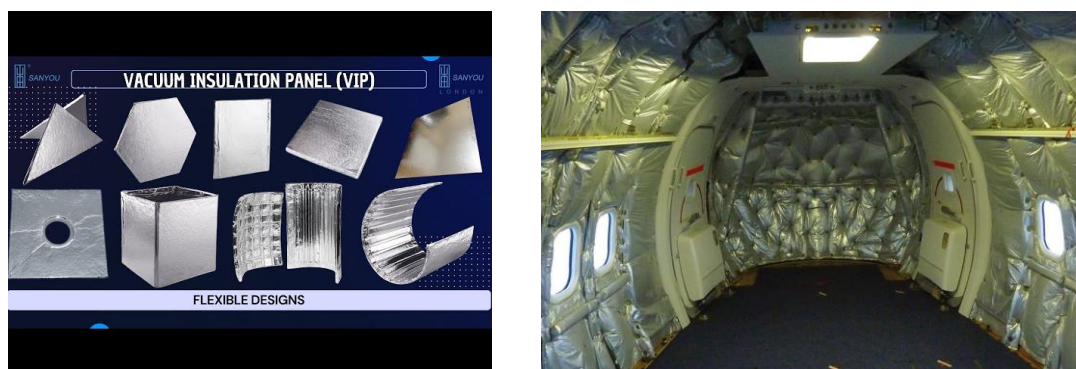
Τα VIP έχει γίνει γνωστό κυρίως λόγω δύο χαρακτηριστικών στους οποίους θριαμβεύει:

- ✓ Εξαιρετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα ($0,003-0,008 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)
- ✓ Μικρό πάχος, σε σύγκριση με τα συμβατικά μονωτικά υλικά

Ωστόσο, παρά τις εξέχουσες ιδιότητες του εμφανίζει και σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως:

- Υψηλό κόστος παραγωγής και εγκατάστασης
- Ευαισθησία σε μηχανικές καταπονήσεις
- Περιορισμένη ευελιξία σε αλλαγές και προσαρμογές

Παρά τα μειονεκτήματά τους που αποτρέπουν την ευρεία χρήση τους, τα VIP θεωρούνται από τις πιο καινοτόμες λύσεις θερμομόνωσης, ειδικά σε περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλή απόδοση σε ελάχιστο διαθέσιμο χώρο.



Σχήμα 2.8: VIP σε εφαρμογές ψύξης (αριστερά) και σε αεροσκάφος (δεξιά).

➤ Αερογέλη - Aerogel

Η αερογέλη (Aerogel) είναι ένα εξαιρετικά ελαφρύ και πορώδες υλικό, το οποίο αποτελείται έως και 99% από αέρα εγκλωβισμένο σε μια νανοπορώδη δομή.

Κατασκευάζεται κυρίως από διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), ενώ υπάρχουν και άλλες εκδοχές με διαφορετικά οξείδια. Η ιδιαίτερη δομή της μειώνει δραστικά τη μεταφορά θερμότητας, καθιστώντας την ένα από τα πιο αποδοτικά μονωτικά υλικά, με θερμική αγωγιμότητα που μπορεί να φτάσει έως $0,013 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, πολύ χαμηλότερη από τα συμβατικά μονωτικά υλικά. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου απαιτείται μέγιστη θερμομονωτική απόδοση με ελάχιστο βάρος, όπως στη βιομηχανία αεροδιαστημικής, στη νανοτεχνολογία και σε ενεργειακά αποδοτικά κτίρια.



Σχήμα 2.9: Aerogel σε αφή (αριστερά) και υπό φλόγα (δεξιά).

Το aerogel εμφανίζει παρόμοια πλεονεκτήματα με το VIP, όπως:

- ✓ Εξαιρετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, μεγαλύτερη του VIP
- ✓ Μικρός όγκος και χαμηλό βάρος
- ✓ Υψηλή αντοχή στη φωτιά
- ✓ Ανθεκτικό στην υγρασία

Βέβαια πέραν των θετικών του ιδιοτήτων περιορίζεται από μειονεκτήματα, όπως:

- Υψηλό κόστος παραγωγής
- Ευθραυστότητα
- Δύσκολη εφαρμογή
- Περιορισμένη ευελιξία σε αλλαγές και προσαρμογές

Παρά τα μειονεκτήματά της, η αερογέλ αποτελεί ένα από τα πιο υποσχόμενα υπερμονωτικά υλικά, με σημαντική προοπτική για μελλοντική χρήση στη βιώσιμη δόμηση και την ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων.

2.2.3 Φυσικά υλικά με θερμομονωτικές ιδιότητες

Στη φύση υπάρχουν σε αφθονία υλικά που μπορεί να είναι είτε κάποιου είδους παράγωγα είτε φυσικά απόβλητα, τα οποία συνοψίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα λόγω των χαρακτηριστικών τους και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μονωτικά υλικά. Τα φυσικά μονωτικά υλικά αποτελούν μια καινοτόμο και οικολογική εναλλακτική

λύση για τη θερμομόνωση κτιρίων, συνδυάζοντας υψηλές επιδόσεις μόνωσης με βιώσιμες και ανανεώσιμες πρώτες ύλες. Χρησιμοποιώντας υλικά όπως το ξυλόμαλλο (wood fibre), το άχυρο ρυζιού (rice straw), το μαλλί προβάτου (sheep wool), τη βιομηχανική κάνναβη (hemp) και το φελλό (cork), επιτυγχάνεται όχι μόνο αποτελεσματική θερμομόνωση και ηχομόνωση, αλλά και μια φυσική ρύθμιση της υγρασίας μέσα στους εσωτερικούς χώρους. Αυτή η προσέγγιση μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των κατασκευών, προωθώντας την οικολογική κατασκευή και την ενεργειακή αποδοτικότητα, ενώ ανταποκρίνεται στις σύγχρονες απαιτήσεις για βιώσιμες λύσεις στον τομέα της δόμησης.

➤ Ξυλοΐνες ή ξυλόμαλλο (Wood fibre)

Το ξυλόμαλλο (wood fibre) είναι ένα φυσικό μονωτικό υλικό που προέρχεται από ίνες ξύλου, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους μέσω μηχανικής πίεσης ή με τη χρήση φυσικών ρητινών και παραφίνης. Η διαδικασία παραγωγής του περιλαμβάνει τη θρυμματοποίηση ξύλου (συνήθως κωνοφόρων δέντρων) και τη διαμόρφωσή του σε πλάκες ή ρολά, προσφέροντας μια φιλική προς το περιβάλλον λύση θερμομόνωσης. Χαρακτηρίζεται από υψηλή θερμική μάζα, γεγονός που του επιτρέπει να προσφέρει εξαιρετική προστασία τόσο από το κρύο τον χειμώνα όσο και από τη ζέστη το καλοκαίρι, περιορίζοντας σημαντικά τη μεταβολή θερμοκρασίας στον εσωτερικό χώρο. Οι συνήθειες τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ) κυμαίνονται μεταξύ 0,036 - 0,050 W/(m·K) με ειδική θερμοχωρητικότητα (C_p) μεταξύ 2100 και 2500 J/(kg·K), ενώ η πυκνότητά (ρ) του παίρνει τιμές από 110 έως 250 kg/m³. Επιπλέον, το ξυλόμαλλο διαθέτει καλή ηχομονωτική ικανότητα, συμβάλλοντας στη μείωση του θορύβου, ενώ είναι διαπνέον υλικό με συντελεστή διάχυσης υδρατμών (μ) 3 - 5, επιτρέποντας τη φυσική ρύθμιση της υγρασίας και αποτρέποντας τη συμπύκνωση υδρατμών. Χρησιμοποιείται ευρέως σε ξύλινες κατασκευές, στέγες, τοιχοποιίες και δάπεδα, συνδυάζοντας μονωτικές ιδιότητες με βιώσιμα χαρακτηριστικά.



Σχήμα 2.10: Ξυλόμαλλο πριν (αριστερά) και μετά την επεξεργασία (δεξιά).

Τα πλεονεκτήματα της σανίδας ξυλοϊνών (Wood fibre) συνοψίζονται στα εξής:

- ✓ Φυσικό και οικολογικό υλικό
- ✓ Καλή θερμομονωτική ικανότητα, με υψηλή θερμική μάζα

- ✓ Διαπνέον υλικό, ικανότητα ρύθμισης της υγρασίας,
- ✓ Ηχομονωτικό
- ✓ Βιοδιασπώμενο και ανακυκλώσιμο
- ✓ Ανθεκτικό

Πέρα από τα οφέλη που παρουσιάζει, δεν λείπουν μειονεκτήματα, όπως:

- Χαμηλότερη θερμομονωτική απόδοση συγκριτικά με συνθετικά υλικά
- Μέτριο κόστος
- Χαμηλή αντοχή στη φωτιά

Παρά τα μειονεκτήματά του, το ξυλόμαλλο αποτελεί μια εξαιρετική επιλογή για βιώσιμη και ελκυστική θερμομόνωση, συμβάλλοντας στη δημιουργία ενεργειακά αποδοτικών και άνετων εσωτερικών χώρων. Οι ιδιότητες και η συμπεριφορά του αξίζουν μελέτη και θα αναλυθούν περαιτέρω στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

➤ **Άχυρο ρυζιού (Rice straw)**

Το άχυρο ρυζιού (rice straw) είναι ένα φυσικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μονωτικό, ενώ προέρχεται από τα υπολείμματα της καλλιέργειας ρυζιού. Λόγω της ινώδους δομής του και της υψηλής περιεκτικότητας σε σιλικόνη, προσφέρει καλή θερμική μόνωση, καθώς και αντοχή στη φωτιά και τη φθορά. Παραδοσιακά, το άχυρο ρυζιού χρησιμοποιούνταν ως οικοδομικό υλικό σε συμπιεσμένες μπάλες ή σε μονωτικά πάνελ, ενώ σήμερα επεξεργάζεται και σε μορφή πλάκας ή χαλαρής μάζας για χρήση σε οικολογικές κατασκευές.

Η επεξεργασία του άχυρου ρυζιού για τη δημιουργία μονωτικών στρώσεων περιλαμβάνει αρκετά βήματα, τα οποία ξεκινούν από τη συλλογή και το στέγνωμα του άχυρου μετά τη συγκομιδή. Αρχικά, το άχυρο καθαρίζεται από ακαθαρσίες και μικροσωματίδια, ώστε να απομακρυνθούν φύλλα, σπόροι και ξένα υλικά. Στη συνέχεια, υποβάλλεται σε κοπή ή άλεση σε μικρότερες ίνες για να επιτευχθεί ομοιομορφία, και αναμειγνύεται με φυσικούς συνδετικούς παράγοντες (όπως φυσικές ρητίνες, ασβέστιο ή άλλους οργανικούς συνδετήρες) που βοηθούν στη δημιουργία μιας συνεκτικής μάζας. Η μάζα αυτή πιέζεται και διαμορφώνεται σε πάνελ ή στρώματα με το επιθυμητό πάχος, χρησιμοποιώντας θερμότητα και πίεση για την επιτάχυνση του στεγνώματος και την επίτευξη σταθερότητας. Τέλος, τα τελικά μονωτικά προϊόντα μπορεί να επιχριστούν ή να υποβληθούν σε επιφανειακές επεξεργασίες για να ενισχύσουν την αντοχή τους σε υγρασία, φθορά και πυρκαγιά, καθιστώντας τα κατάλληλα για χρήση σε θερμομόνωση κτιρίων.



Σχήμα 2.11: Φάσεις επεξεργασίας του άχυρου ρυζιού

Στα κτίρια χρησιμοποιείται ως μονωτικό υλικού λόγω του σχετικά χαμηλού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ) του που κυμαίνεται μεταξύ 0,038 - 0,055 W/(m·K). Ταυτόχρονα, χαρακτηρίζεται από ειδική θερμοχωρητικότητα (C_p) μεταξύ 1700 και 2000 J/(kg·K), ενώ η πυκνότητά (ρ) του παίρνει τιμές από 50 έως 120 kg/m³. Είναι, επίσης, ιδιαίτερα αποτελεσματικό στη ρύθμιση της υγρασίας, καθώς επιτρέπει τη διάχυση των υδρατμών και μειώνει τον κίνδυνο συμπύκνωσης, παρουσιάζοντας συντελεστή διάχυσης υδρατμών (μ) 1 - 5. Αξίζει να σημειωθεί πως η χρήση του συμβάλλει στη μείωση των αγροτικών αποβλήτων και των εκπομπών άνθρακα, καθιστώντας το μια βιώσιμη επιλογή για θερμομόνωση κτιρίων.



Σχήμα 2.12: Άχυρο ρυζιού (αριστερά) ως εξωτερική θερμομόνωση (δεξιά).

Τα πλεονεκτήματα του άχυρου ρυζιού (rice straw) συνοψίζονται στα εξής:

- ✓ Φυσικό υλικό
- ✓ Βιοδιασπώμενο και ανακυκλώσιμο
- ✓ Καλή θερμομονωτική ικανότητα
- ✓ Διαπνέον υλικό, ικανότητα ρύθμισης της υγρασίας,
- ✓ Ηχομονωτικό
- ✓ Διαθέσιμο σε αφθονία
- ✓ Φθηνό

Το άχυρο ρυζιού προσφέρει κάποια αδιαμφισβήτητα οφέλη, παρουσιάζει όμως και κάποιες αδυναμίες, όπως:

- Ελαφρά χαμηλότερη θερμομονωτική απόδοση συγκριτικά με συνθετικά υλικά
- Ευαισθησία σε παράσιτα
- Χαμηλή μηχανική αντοχή

Παρά τα μειονεκτήματά του, το άχυρο ρυζιού αποτελεί μια ελκυστική επιλογή για οικολογική θερμομόνωση, ειδικά σε βιοκλιματικά και φυσικά κτίρια, χάρη στη χαμηλή περιβαλλοντική του επίπτωση και την καλή μονωτική του απόδοση. Οι ιδιότητες και τα οφέλη που προσφέρει αξίζουν μελέτη και θα αναλυθούν περαιτέρω στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

➤ **Μαλλί προβάτου (Sheep wool)**

Το μαλλί προβάτου αποτελεί ένα φυσικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μονωτικό με εξαιρετικές θερμομονωτικές και περιβαλλοντικές ιδιότητες. Προέρχεται από την επεξεργασία των φυσικών ινών του μαλλιού και διακρίνεται για τη χαμηλή του θερμική αγωγιμότητα, η οποία κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0,035 και 0,045 W/(m·K), καθώς και για την ικανότητά του να ρυθμίζει την υγρασία μέσα στο υλικό, απορροφώντας και απελευθερώνοντας υδρατμούς χωρίς να υγραίνεται υπερβολικά. Η πυκνότητα του μαλλιού ως μονωτικό κυμαίνεται περίπου μεταξύ 15 και 60 kg/m³, ενώ η ειδική θερμοχωρητικότητά του είναι περίπου 1400–1600 J/(kg·K), επιτρέποντας τη διατήρηση μιας σταθερής θερμοκρασίας σε εσωτερικούς χώρους. Επιπλέον, το μαλλί προβάτου είναι βιοδιασπώμενο, ανανεώσιμο και συμβάλλει στη διατήρηση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος χάρη στις φυσικές του αντιβακτηριακές και πυρασφαλιστικές ιδιότητες.



Σχήμα 2.13: Μαλλί προβάτου (αριστερά) ως θερμομόνωση κτιρίου (δεξιά).

Πλεονεκτήματα του μαλλιού προβάτου (sheep wool) στη θερμομόνωση κτιρίων:

- ✓ Φυσικό και οικολογικό υλικό
- ✓ Καλή θερμομονωτική ικανότητα,
- ✓ Εξαιρετική ρύθμιση υγρασίας

- ✓ Ηχομονωτικό
- ✓ Βιοδιασπώμενο και ανανεώσιμο
- ✓ Ανθεκτικό στη φωτιά
- ✓ Εύκολη εγκατάσταση

Μειονεκτήματα του μαλλιού προβάτου στη θερμομόνωση κτιρίων:

- Ευαισθησία σε παρατεταμένη έκθεση σε νερό
- Ευαισθησία σε παράσιτα
- Υψηλό κόστος

Το μαλλί προβάτου, παρά τις προκλήσεις που μπορεί να παρουσιάσει σε ορισμένες περιπτώσεις, παραμένει μια ελκυστική επιλογή για οικολογική και υγιεινή θερμομόνωση, ιδιαίτερα σε οικοδομές που στοχεύουν στη βιωσιμότητα και την ενεργειακή αποδοτικότητα. Για τους παραπάνω λόγους, αποτελεί αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας.

➤ **Βιομηχανική κάνναβη (Hemp)**

Η βιομηχανική κάνναβη (hemp) έχει αναδειχθεί τα τελευταία χρόνια ως ένα αξιόλογο φυσικό μονωτικό υλικό, συνδυάζοντας τις οικολογικές της ιδιότητες με εξαιρετικές θερμομονωτικές επιδόσεις. Κατασκευάζεται από τις ίνες του φυτού, οι οποίες επεξεργάζονται ώστε να παραχθούν πάνελ ή χαλαρές μάζες που μπορούν να τοποθετηθούν σε τοιχοποιίες, οροφές και δάπεδα. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της επεξεργασμένης κάνναβης κυμαίνεται περίπου μεταξύ 0,038 και 0,045 W/(m·K), ενώ η πυκνότητά της είναι γύρω στα 40–120 kg/m³, ανάλογα με την τεχνική συμπίεσης και το τελικό προϊόν. Επιπλέον, η κάνναβη διαθέτει υψηλή ικανότητα απορρόφησης και απελευθέρωσης υδρατμών, συμβάλλοντας στη ρύθμιση της υγρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου, ενώ έχει και καλή αντοχή στη φθορά και την πυρκαγιά, ιδιαίτερα όταν υποβάλλεται σε πρόσθετες επεξεργασίες ή επικάλυψη με πυρασφαλή υλικά.



Σχήμα 2.14: Ρολό βιομηχανικής κάνναβης (αριστερά) και τοποθέτηση της (δεξιά).

Πλεονεκτήματα της βιομηχανικής κάνναβης στη θερμομόνωση κτιρίων:

- ✓ Φυσικό και οικολογικό υλικό
- ✓ Καλή θερμομονωτική ικανότητα
- ✓ Διαπνέον υλικό
- ✓ Ανθεκτικό
- ✓ Βιοδιασπώμενο και ανακυκλώσιμο
- ✓ Εύκολη εφαρμογή

Μειονεκτήματα της βιομηχανικής κάνναβης στη θερμομόνωση κτιρίων:

- Χαμηλότερη θερμομονωτική απόδοση συγκριτικά με συνθετικά υλικά
- Σχετικά υψηλό κόστος
- Μεταβλητότητα ποιότητας

Η βιομηχανική κάνναβη, παρά τις ορισμένες προκλήσεις, προσφέρει μια βιώσιμη και οικολογική εναλλακτική λύση για τη θερμομόνωση κτιρίων, συνδυάζοντας φυσικές ιδιότητες με ικανοποιητικές επιδόσεις και συμβάλλοντας στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κατασκευών. Αποτελεί επίσης ένα υλικό που θα εξεταστεί σαν μονωτικό στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

➤ Φελλός (Cork)

Ο φελλός (cork) αποτελεί ένα φυσικό, ανανεώσιμο μονωτικό υλικό που εξάγεται από τον φλοιό της κυκλαδικής δρυς, χωρίς να καταστρέφεται το δέντρο, εξασφαλίζοντας έτσι βιωσιμότητα και οικολογική ισορροπία. Χάρη στην μοναδική του κυψελοειδή, κλειστή δομή, ο φελλός παρουσιάζει εξαιρετικές θερμομονωτικές ιδιότητες, με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που κυμαίνεται μεταξύ 0,034 και 0,040 W/(m·K) και πυκνότητα περίπου 160–240 kg/m³. Επιπλέον, το υλικό αυτό διαθέτει εξαιρετική αντοχή στη θλίψη (συμπίεση), καλή ηχομονωτική απόδοση και πολύ χαμηλή απορρόφηση υγρασίας, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές σε τοιχοποιίες, οροφές και δάπεδα.



Σχήμα 2.15: Επεξεργασμένες πλάκες φελλού (αριστερά) και τοποθέτηση τους (δεξιά).

Πλεονεκτήματα του φελλού (cork) στη θερμομόνωση κτιρίων:

- ✓ Φυσικό, ανανεώσιμο και οικολογικό
- ✓ Καλή θερμομονωτική ικανότητα
- ✓ Υγρομονωτικό
- ✓ Ηχομονωτικό
- ✓ Υψηλή αντοχή στη συμπίεση και επανόρθωση
- ✓ Εύκολη εγκατάσταση

Μειονεκτήματα του φελλού (cork) στη θερμομόνωση κτιρίων:

- Χαμηλότερη θερμομονωτική απόδοση συγκριτικά με συνθετικά υλικά
- Υψηλό κόστος
- Ανάγκη επεξεργασίας για ομοιομορφία

Ο φελλός προσφέρει μια βιώσιμη και οικολογική εναλλακτική λύση για τη θερμομόνωση κτιρίων, συνδυάζοντας φυσικές ιδιότητες με ικανοποιητικές επιδόσεις και συμβάλλοντας στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κατασκευών. Πάραυτα, επιβαρύνεται από υψηλό κόστος και δεν θα εξεταστεί στην παρούσα μελέτη.

3. Πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης αποφάσεων

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων σε σύνθετα και σημαντικά ζητήματα δεν μπορεί να βασίζεται σε μια απλή, μονοδιάστατη ανάλυση. Για αυτόν τον λόγο, η πολυκριτηριακή ανάλυση αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο, καθώς επιτρέπει τη συνεκτική επεξεργασία μεγάλου όγκου πληροφοριών, διατηρώντας παράλληλα τους στόχους και τις προτιμήσεις του εκάστοτε αποφασίζοντα ή μελετητή.

3.1 Κύρια χαρακτηριστικά

Ο κύριος στόχος της πολυκριτηριακής ανάλυσης είναι η διαμόρφωση σχέσεων προτίμησης μεταξύ των εναλλακτικών επιλογών, στη βάση ενός συνόλου στόχων που έχουν καθοριστεί με σαφήνεια από τον αποφασίζοντα. Αυτοί οι στόχοι αξιολογούνται μέσω μετρήσιμων κριτηρίων, προκειμένου να εκτιμηθεί ο βαθμός επίτευξής τους. Ο προσδιορισμός των στόχων και των κριτηρίων αποτελεί μια διαδικασία που μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες στον αποφασίζοντα ή μελετητή. Ωστόσο, όταν απαιτείται μεγαλύτερη λεπτομέρεια, η πολυκριτηριακή ανάλυση προσφέρει κατάλληλους δείκτες για τη συνολική αξιολόγηση των εναλλακτικών, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για κάθε κριτήριο.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό της πολυκριτηριακής ανάλυσης είναι η εγγενής υποκειμενικότητα που διέπει τον καθορισμό των στόχων, των κριτηρίων και της σχετικής σημαντικότητάς τους (βάρη). Οι αποφάσεις αυτές βασίζονται σε προσωπικές επιλογές του εκάστοτε αποφασίζοντα ή μελετητή, γεγονός που ενδέχεται να επηρεάσει το τελικό αποτέλεσμα. Παρ' όλα αυτά, σε σύγκριση με την άτυπη λήψη αποφάσεων, όπου δεν υπάρχει συστηματική ανάλυση, η πολυκριτηριακή μέθοδος προσφέρει ευελιξία, επιτρέποντας στον αποφασίζοντα:

- Να αναθεωρήσει ή να τροποποιήσει τους στόχους και τα κριτήρια εφόσον το κρίνει αναγκαίο.
- Να εξετάσει και να προσαρμόσει τις τιμές των εναλλακτικών για κάθε κριτήριο, καθώς και τα αντίστοιχα βάρη.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η αποτίμηση των εναλλακτικών θα πρέπει να γίνεται από ειδικούς στον εκάστοτε τομέα και όχι από τον αποφασίζοντα.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των πολυκριτηριακών μεθοδολογιών είναι:

- ❖ **Οι εναλλακτικές:** Οι διαθέσιμες επιλογές που εξετάζει ο αποφασίζων για την αντιμετώπιση ενός προβλήματος. Μέσω της πολυκριτηριακής ανάλυσης, αξιολογείται κάθε εναλλακτική ως προς τα καθορισμένα κριτήρια.
- ❖ **Τα κριτήρια:** Οι παράμετροι ή οι περιορισμοί βάσει των οποίων αξιολογούνται οι εναλλακτικές λύσεις.

❖ **Τα βάρη:** Οι συντελεστές που εκφράζουν τη σχετική σημαντικότητα κάθε κριτηρίου στην τελική απόφαση.

3.2 Βασικές πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψεως αποφάσεων

Οι κυριότερες κατηγορίες πολυκριτηριακών μεθόδων λήψεως αποφάσεων είναι οι ακόλουθες:

- Η θεωρία χρησιμότητας
- Τα γραμμικά προσθετικά μοντέλα
- Το μοντέλο ιεράρχησης
- Η θεωρία σχέσεων υπεροχής [39]

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε μιας από τις παραπάνω κατηγορίες. Επιπλέον, αναλύονται συγκεκριμένες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την αντιμετώπιση του υπό εξέταση προβλήματος λήψης απόφασης.

3.2.1 Θεωρία χρησιμότητας

3.2.1.1 Η μέθοδος MAUT

Η μέθοδος MAUT (Multi-Attribute Utility Theory – Πολυκριτήρια Θεωρία Χρησιμότητας) [40], αποτελεί μια προσέγγιση στη λήψη αποφάσεων, σχεδιασμένη για να αποτυπώνει το σύστημα αξιών που υιοθετεί, είτε συνειδητά είτε ασυνείδητα, ο αποφασίζων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας συνάρτησης χρησιμότητας ή αξιών $U(\mathbf{g})$, η οποία βασίζεται σε ένα σύνολο κριτηρίων αξιολόγησης $\mathbf{g}=\{g_1, g_2, \dots, g_n\}$, τα οποία καθορίζουν την τελική απόφαση.

$$U(\mathbf{g}) = U(g_1, g_2, \dots, g_n) \quad (3.1)$$

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι συναρτήσεις αξιών/χρησιμότητας U είναι μη Στη συντριπτική πλειονότητα των περιπτώσεων, οι συναρτήσεις χρησιμότητας U είναι αύξουσες και μη γραμμικές στο πεδίο τιμών των κριτηρίων $\mathbf{g}$. Δύο βασικές τους ιδιότητες είναι οι εξής:

$$U(\mathbf{g}_x) > U(\mathbf{g}_y) \Leftrightarrow x > y \quad (3.2)$$

$$U(\mathbf{g}_x) = U(\mathbf{g}_y) \Leftrightarrow x \sim y \quad (3.3)$$

Δηλαδή, στην πρώτη περίπτωση, όπου η συνάρτηση αξιών/χρησιμότητας της εναλλακτικής x είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης συνάρτησης αξιών/χρησιμότητας της εναλλακτικής y , αυτό σημαίνει ότι η εναλλακτική x προτιμάται της εναλλακτικής y .

Αντίθετα, ισότητα μεταξύ των συναρτήσεων αξιών/χρησιμότητας των δύο εναλλακτικών συνεπάγεται ισοδυναμία μεταξύ των εναλλακτικών x και y .

Η πιο διαδεδομένη μορφή συνάρτησης χρησιμότητας, που επιλέγεται κυρίως λόγω απλότητας, είναι η προσθετική συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία εκφράζεται ως εξής:

$$U(\mathbf{g}) = \sum_{k=1}^{N_C} w_k u_k \quad (3.4)$$

Όπου:

- N_C είναι ο συνολικός αριθμός των κριτηρίων
- u_k είναι οι συναρτήσεις μερικών αξιών/χρησιμοτήτων των κριτηρίων αξιολόγησης
- w_k είναι οι σταθερές που υποδηλώνουν τη σημαντικότητα (βαρύτητα) του εκάστοτε κριτηρίου

Οι συντελεστές βαρύτητας ορίζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε το άθροισμά τους να είναι ίσο με τη μονάδα, δηλαδή:

$$\sum_{k=1}^{N_C} w_k = 1 \quad (3.5)$$

Στο πλαίσιο της προσθετικής συνάρτησης χρησιμότητας κάθε επίπεδο σημαντικότητας w_k υποδεικνύει την παραχώρηση που είναι διατεθειμένος να κάνει ο αποφασίζων σε ένα κριτήριο αναφοράς, προκειμένου να επιτύχει αύξηση μίας μονάδας στο κριτήριο g_k .

Στη περίπτωση που οι αξίες των εναλλακτικών για κάθε κριτήριο είναι διαφορετικής κλίμακας τότε η συνάρτηση αξιών/χρησιμότητας εκφράζεται με βάση τις κανονικοποιημένες αξίες, όπως φαίνεται στη σχέση:

$$U(\hat{\mathbf{g}}(A_i)) = \sum_{k=1}^{N_C} w_k \cdot u_k(\hat{g}_k(A_i)) \quad (3.6)$$

Όπου $\hat{g}_k(A_i)$ είναι η κανονικοποιημένη αξία του κριτηρίου k για την εναλλακτική A_i , η οποία προσδιορίζεται ανάλογα με το αν το κριτήριο k είναι προς μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\hat{g}_k(A_i) = \begin{cases} \frac{g_k(A_i) - g_k(A_i)|_{\min}}{g_k(A_i)|_{\max} - g_k(A_i)|_{\min}}, & \text{όταν } k \rightarrow \max \\ \frac{g_k(A_i)|_{\max} - g_k(A_i)}{g_k(A_i)|_{\max} - g_k(A_i)|_{\min}}, & \text{όταν } k \rightarrow \min \end{cases} \quad (3.7)$$

Όπου $g_k(A_i)|_{\max}$ και $g_k(A_i)|_{\min}$ είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή, αντίστοιχα, της αξίας της εναλλακτικής A_i στο κριτήριο k .

Η προσθετική συνάρτηση χρησιμότητας μπορεί να θεωρηθεί γενίκευση της μεθόδου του σταθμισμένου αθροίσματος (WSM - Weighted Sum Method), η οποία αποτελεί μια ειδική περίπτωση όπου οι μονοκριτήριες συναρτήσεις χρησιμότητας είναι γραμμικές.

$$WSM(g) = \sum_{k=1}^{N_C} w_k \cdot u_k(\hat{g}_k(A_i)) \quad (3.8)$$

Η MAUT εκφυλίζεται στη μέθοδο WSM όταν ισχύουν οι εξής προϋποθέσεις:

- Όλα τα κριτήρια παρουσιάζουν μονοτονία
- Οι μονοκριτήριες συναρτήσεις χρησιμότητας είναι γραμμικές

Συνοψίζοντας, η πολυκριτήρια συνάρτηση χρησιμότητας στη MAUT είναι προσθετική, επιτρέποντας μια σαφή και δομημένη προσέγγιση στην ανάλυση και λήψη αποφάσεων..

3.2.2 Γραμμικά προσθετικά μοντέλα

Το απλό γραμμικό προσθετικό μοντέλο εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου τα κριτήρια μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητα μεταξύ τους ή όπου η αβεβαιότητα δεν λαμβάνεται υπόψη στην πολυκριτηριακή ανάλυση. Η βασική αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στην ιδέα ότι η συνολική επίδοση μιας εναλλακτικής μπορεί να υπολογιστεί μέσω του συνδυασμού των επιδόσεών της στα επιμέρους κριτήρια. Συγκεκριμένα, η συνολική τιμή προκύπτει από το γινόμενο της τιμής ενός κριτηρίου με το αντίστοιχο βάρος του και το άθροισμα όλων των σταθμισμένων αποτελεσμάτων. Σε γενικές γραμμές, τα γραμμικά προσθετικά μοντέλα έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικά στη διαδικασία λήψης αποφάσεων σε διάφορους τομείς και εφαρμογές [39].

3.2.2.1 Η μέθοδος TOPSIS

Η μέθοδος TOPSIS αναπτύχθηκε από τους Huang και Yoon [41] ως μια εναλλακτική προσέγγιση στις μεθόδους ELECTRE. Η κεντρική της ιδέα βασίζεται στην υπόθεση ότι η καλύτερη εναλλακτική είναι αυτή που έχει τη μικρότερη ευκλείδεια απόσταση από μια θετική ιδεατή λύση και τη μεγαλύτερη απόσταση από μια αρνητική ιδεατή λύση.

Για τον λόγο αυτό, κάθε ιδιότητα (κριτήριο) εκφράζεται μέσω μιας συνάρτησης που είτε αυξάνεται είτε μειώνεται μονοτονικά. Αυτό διευκολύνει τον καθορισμό των ιδεατών λύσεων:

- **Θετική ιδεατή λύση ($\hat{U}^+$):** η καλύτερη δυνατή τιμή για κάθε κριτήριο.
- **Αρνητική ιδεατή λύση ($\hat{U}^-$):** η χειρότερη δυνατή τιμή για κάθε κριτήριο.

Η κανονικοποιημένη και σταθμισμένη απόδοση μιας εναλλακτικής σε ένα κριτήριο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\hat{u}_k(A_i) = w_k \cdot \hat{g}_k(A_i) \quad (3.9)$$

Όπου η κανονικοποιημένη απόδοση $\hat{g}_k(A_i)$, μιας εναλλακτικής A_i σε ένα κριτήριο k , δίνεται από τη σχέση:

$$\hat{g}_k(A_i) = \frac{g_k(A_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_A} \{g_k(A_i)\}^2}} \quad (3.10)$$

Μετά την κανονικοποίηση και τη στάθμιση των αξιών της κάθε εναλλακτικής στο κάθε κριτήριο, προσδιορίζεται η θετική ιδεατή λύση ($\hat{U}^+$), και η αρνητική ιδεατή λύση ($\hat{U}^-$), οι οποίες υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις στην περίπτωση που επιθυμείται η μεγιστοποίηση του κριτηρίου k :

$$\hat{U}^+ = \{max_i[\hat{u}_k(A_i)]\} = \{\hat{u}_1^+, \hat{u}_2^+, \dots, \hat{u}_{N_C}^+\} \quad (3.11)$$

$$\hat{U}^+ = \{max_i[\hat{u}_k(A_i)]\} = \{\hat{u}_1^+, \hat{u}_2^+, \dots, \hat{u}_{N_C}^+\} \quad (3.12)$$

Όταν είναι επιθυμητή η ελαχιστοποίηση του κριτηρίου k , η θετική και η αρνητική ιδεατή λύση δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$\hat{U}^+ = \{min_i[\hat{u}_k(A_i)]\} = \{\hat{u}_1^+, \hat{u}_2^+, \dots, \hat{u}_{N_C}^+\} \quad (3.13)$$

$$\hat{U}^- = \{max_i[\hat{u}_k(A_i)]\} = \{\hat{u}_1^-, \hat{u}_2^-, \dots, \hat{u}_{N_C}^-\} \quad (3.14)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η ευκλείδεια απόσταση κάθε εναλλακτικής από τη θετική ιδεατή, S_i^+ , και την αρνητική ιδεατή, S_i^- , λύση:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_C} (\hat{u}_k(A_i) - \hat{u}_k^+)^2} \quad (3.15)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_C} (\hat{u}_k(A_i) - \hat{u}_k^-)^2} \quad (3.16)$$

Τέλος, υπολογίζεται η σχετική εγγύτητα D_i και ακολουθεί κατάταξη με βάση τη τιμή αυτή:

$$D_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (3.17)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή της σχετικής εγγύτητας κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0 και 1. Όσο η τιμή, D_i , της σχετικής εγγύτητας τείνει προς το 1, τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός προτεραιότητας της εναλλακτικής i , ενώ ως βέλτιστη εναλλακτική επιλέγεται αυτή που έχει τη μικρότερη απόσταση από τη θετική ιδεατή λύση και τη μεγαλύτερη απόσταση από την αρνητική ιδεατή λύση, δηλαδή η εναλλακτική με τη μεγαλύτερη τιμή D_i .

3.2.2.2 Η μέθοδος VIKOR

Πολλά πρακτικά προβλήματα λήψης αποφάσεων χαρακτηρίζονται από αντικρουόμενα κριτήρια, τα οποία συχνά διαφέρουν σε κλίμακα μέτρησης. Σε πολλές περιπτώσεις, δεν υπάρχει μία μοναδική λύση που να ικανοποιεί ταυτόχρονα όλα τα κριτήρια. Για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων, έχουν αναπτυχθεί διάφορες πολυκριτήριες μέθοδοι ανάλυσης, μία εκ των οποίων είναι η μέθοδος VIKOR.

Η VIKOR [42-44] έχει σχεδιαστεί για την κατάταξη και επιλογή μεταξύ διαθέσιμων εναλλακτικών, προσδιορίζοντας μια λύση συμβιβασμού (compromise solution). Η προσέγγισή της βασίζεται στη μέτρηση της απόστασης κάθε εναλλακτικής από μία ιδεατή βέλτιστη λύση, χρησιμοποιώντας τη μετρική L_p σε μορφή συνάρτησης συνάθροισης:

$$L_p = \left(\sum_{k=1}^{N_C} \left| \frac{g_k^* - g_k(A_i)}{g_k^* - g_k^-} \right|^p \right)^{\frac{1}{p}}, \text{ όπου } 1 \leq p \leq \infty \quad (3.18)$$

Στην παραπάνω σχέση, τα g_k^* και g_k^- αντιπροσωπεύουν την καλύτερη και τη χειρότερη δυνατή επίδοση για το κριτήριο k , όπου $k=1, \dots, N_C$. Όταν το κριτήριο αντιπροσωπεύει ένα όφελος, ισχύει:

$$g_k^* = \{ \max_i [g_k(A_i)] \} = \{ g_1^*, g_2^*, \dots, g_{N_C}^* \} \quad (3.19)$$

$$g_k^- = \{ \min_i [g_k(A_i)] \} = \{ g_1^-, g_2^-, \dots, g_{N_C}^- \} \quad (3.20)$$

Αντίστοιχα, για κριτήριο κόστους ισχύει:

$$g_k^* = \{ \min_i [g_k(A_i)] \} = \{ g_1^*, g_2^*, \dots, g_{N_C}^* \} \quad (3.21)$$

$$g_k^- = \{ \max_i [g_k(A_i)] \} = \{ g_1^-, g_2^-, \dots, g_{N_C}^- \} \quad (3.22)$$

Το βασικό πλεονέκτημα της VIKOR είναι η δυνατότητα εξισορρόπησης μεταξύ δύο διαφορετικών προσεγγίσεων στη λήψη αποφάσεων:

- Όταν $p=1$, δίνεται προτεραιότητα στη συνολική απόδοση όλων των κριτηρίων, ακολουθώντας την αρχή της μέγιστης συνολικής χρησιμότητας (group utility).
- Όταν $p=\infty$, δίνεται έμφαση στη μείωση της μέγιστης δυσαρέσκειας για οποιοδήποτε κριτήριο, σύμφωνα με την αρχή της μεμονωμένης δυσαρέσκειας (individual regret).

Για την εφαρμογή της μεθόδου, υπολογίζονται οι τιμές S_i και R_i για κάθε εναλλακτική $i=1, \dots, NA$, ως εξής:

$$S_i = \sum_{k=1}^{N_C} w_k \cdot \left| \frac{g_k^* - g_k(A_i)}{g_k^* - g_k^-} \right| \quad (3.23)$$

$$R_i = \max_k \left[w_k \cdot \left| \frac{g_k^* - g_k(A_i)}{g_k^* - g_k^-} \right| \right] \quad (3.24)$$

Η τιμή S_i αντιστοιχεί στη σταθμισμένη L1-μετρική και εκφράζει την συνολική απόσταση από την ιδεατή βέλτιστη λύση, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα κριτήρια. Συνεπώς, αντανακλά την αρχή της μέγιστης συνολικής χρησιμότητας. Από την άλλη πλευρά, η τιμή R_i συνδέεται με την L ∞ -μετρική, εκφράζοντας τη μέγιστη δυσαρέσκεια για κάθε εναλλακτική και αντιπροσωπεύοντας την αρχή της μεμονωμένης δυσαρέσκειας. Και στις δύο περιπτώσεις, όσο μικρότερη είναι η τιμή, τόσο καλύτερη θεωρείται η εναλλακτική.

Στη συνέχεια, οι τιμές S_i και R_i συνδυάζονται στον υπολογισμό του Q_i για κάθε εναλλακτική:

$$Q_i = v \cdot \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \cdot \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \quad (3.25)$$

Όπου:

$$S^* = \min_i S_i, \quad S^- = \max_i S_i \quad (3.26)$$

$$R^* = \min_i R_i, \quad R^- = \max_i R_i \quad (3.27)$$

Η παράμετρος v ($0 \leq v \leq 1$) καθορίζει το βάρος που δίνεται στη συνολική χρησιμότητα σε σχέση με τη μεμονωμένη δυσαρέσκεια. Αν $v=1$, δίνεται προτεραιότητα στη συνολική χρησιμότητα, ενώ αν $v=0$, η ανάλυση επικεντρώνεται στη μείωση της

μέγιστης δυσαρέσκειας. Συνήθως, επιλέγεται η τιμή $v=0.5$ για ισορροπημένη στάθμιση.

Με βάση αυτές τις τιμές, δημιουργούνται τρεις ξεχωριστές κατατάξεις των εναλλακτικών ως προς τα S_i , R_i και Q_i , με στόχο την εύρεση της βέλτιστης εναλλακτικής που επιτυγχάνει τη χαμηλότερη τιμή Q_i . Ωστόσο, για να διασφαλιστεί η μοναδικότητα της καλύτερης εναλλακτικής, πρέπει να πληρούνται οι εξής συνθήκες:

1. Συνθήκη του συγκριτικού πλεονεκτήματος

Αν A' είναι η κορυφαία εναλλακτική βάσει της τιμής Q και A'' είναι η αμέσως επόμενη καλύτερη, τότε πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$Q(A'') - Q(A') \geq \frac{1}{N_A - 1} \quad (3.28)$$

2. Συνθήκη της ευστάθειας

Η εναλλακτική A' που είναι καλύτερη ως προς Q θα πρέπει να είναι καλύτερη ως προς S ή/και R .

Αν κάποια από τις παραπάνω συνθήκες δεν ικανοποιείται, προκύπτει σύνολο λύσεων συμβιβασμού (compromise solution set). Συγκεκριμένα, αν δεν ικανοποιείται η συνθήκη της ευστάθειας, ως βέλτιστες λύσεις επιλέγονται οι A' και A'' , ενώ αν δεν ικανοποιείται η συνθήκη του συγκριτικού πλεονεκτήματος, ως λύση θεωρείται το σύνολο $\{A', A'', \dots, A^{(M)}\}$, όπου η εναλλακτική $A^{(M)}$ προσδιορίζεται βρίσκοντας το μέγιστο M που ικανοποιεί τη σχέση:

$$Q(A^{(M)}) - Q(A') < \frac{1}{N_A - 1} \quad (3.29)$$

Η μέθοδος VIKOR συχνά συγκρίνεται με την TOPSIS, αν και χρησιμοποιούν διαφορετικές συναρτήσεις συνάθροισης και μεθόδους κανονικοποίησης. Η κύρια διαφορά μεταξύ τους είναι ότι η TOPSIS λαμβάνει υπόψη τόσο τη θετική όσο και την αρνητική ιδεατή λύση, ενώ η VIKOR επικεντρώνεται μόνο στη θετική ιδεατή λύση, επιδιώκοντας τη μεγιστοποίηση του οφέλους, χωρίς να δίνει τόσο μεγάλη έμφαση στον κίνδυνο. Αυτό καθιστά τη μέθοδο VIKOR ιδιαίτερα κατάλληλη για αποφασίζοντες που είναι πιο ανεκτικοί στον κίνδυνο και αναζητούν λύσεις με υψηλό συνολικό όφελος.

3.2.3 Μοντέλο ιεράρχησης

Η λήψη σύνθετων αποφάσεων αποτελεί από τη φύση της μια πολύπλοκη διαδικασία. Για τον λόγο αυτό, απαιτούνται μέθοδοι που είναι εύκολα κατανοητές, εφαρμόσιμες και μπορούν να υποστηρίξουν αποτελεσματικά τη διαδικασία αυτή. Μία από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους είναι η AHP (Analytical Hierarchy Process), η οποία αναπτύχθηκε από τον Tomas Saaty [45]. Η δημοτικότητά της οφείλεται στην απλότητα και την ευκολία εφαρμογής της, ιδιαίτερα σε τομείς όπου η λήψη αποφάσεων βασίζεται

στην επιλογή, την ιεράρχηση προτεραιοτήτων και την πρόβλεψη, όπως στις επιχειρήσεις, την έρευνα και ανάπτυξη και τη διαμόρφωση κυβερνητικών πολιτικών.

3.2.3.1 Η μέθοδος AHP

Η AHP είναι μια μέθοδος που βασίζεται στη σύγκριση των εναλλακτικών ανά ζεύγη για κάθε κριτήριο ενδιαφέροντος, χρησιμοποιώντας μια προκαθορισμένη κλίμακα αξιολόγησης. Στόχος είναι ο υπολογισμός των βαρών και των σχετικών αξιών των εναλλακτικών λύσεων. Η μέθοδος διασπά το συνολικό πρόβλημα σε επιμέρους υποπροβλήματα, τα οποία μπορούν να αξιολογηθούν ξεχωριστά, με μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι αξιολογήσεις των εναλλακτικών μετατρέπονται σε αριθμητικές τιμές με βάση μια συγκεκριμένη κλίμακα, οι οποίες χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την κατάταξή τους.

Η μέθοδος AHP αποτελείται από τέσσερα κύρια βήματα [46]:

1. Αποσύνθεση προβλήματος και ιεράρχηση στόχων
2. Σύγκριση ανά ζεύγη
3. Έλεγχος συνέπειας συγκρίσεων
4. Συγκέντρωση συγκρίσεων.

Η σύγκριση ανά ζεύγη των εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο (αλλά και των κριτηρίων μεταξύ τους) γίνεται με βάση μια ενιαία κλίμακα (Πίνακας 3.1). Για κάθε κριτήριο, κάθε εναλλακτική συγκρίνεται με τις υπόλοιπες και ο αποφασίζων εκφράζει την προτίμησή του με βάση την ενιαία κλίμακα, δίνοντας και την αντίστοιχη τιμή. Στην περίπτωση που ο αποφασίζων συγκρίνει τις εναλλακτικές A_i και A_j για ένα συγκεκριμένο κριτήριο k και εκφράζει την προτίμησή του για την A_i , δίνει και την αντίστοιχη τιμή, $u^{(k)}_{i,j}$, η οποία καταγράφεται στον αντίστοιχο πίνακα βαθμολόγησης. Από τη στιγμή που ο αποφασίζων εκφράσει την προτίμησή του μεταξύ των εναλλακτικών A_i και A_j , τότε η τιμή της σύγκρισης μεταξύ των εναλλακτικών A_j και A_i ισούται με $u^{(k)}_{j,i} = 1/u^{(k)}_{i,j}$.

Πίνακας 3.1: Η κλίμακα βαθμολόγησης των εναλλακτικών ανά ζεύγη της μεθόδου AHP

Τιμή	Προτίμηση (Preference)
1	Εξίσου προτιμητέο (Equally preferred)
2	Εξίσου με μετρίως προτιμητέο (Equally to moderately preferred)
3	Μετρίως προτιμητέο (Moderately preferred)
4	Μετρίως με έντονα προτιμητέο (Moderately to strongly preferred)
5	Έντονα προτιμητέο (Strongly preferred)
6	Έντονα με πολύ έντονα προτιμητέο (Strongly to very strongly preferred)

Τιμή	Προτίμηση (Preference)
7	Πολύ έντονα προτιμητέο (Very strongly preferred)
8	Πολύ έντονα με εξαιρετικά προτιμητέο (Very strongly to extremely preferred)
9	Εξαιρετικά προτιμητέο (Extremely preferred)

Από τη στιγμή που ο αποφασίζων βαθμολογήσει τις εναλλακτικές μεταξύ τους για κάθε κριτήριο, δηλαδή καθορίσει τις τιμές $u^{(k)}_{i,j}$, ακολουθούνται συγκεκριμένα βήματα για τον υπολογισμό της αξίας της κάθε εναλλακτικής.

Αρχικά, κανονικοποιούνται οι τιμές αξιολόγησης μεταξύ των εναλλακτικών A_i και A_j για το κριτήριο k με βάση την παρακάτω σχέση:

$$\hat{u}^{(k)}_{i,j} = \frac{u^{(k)}_{i,j}}{\sum_{i=1}^{N_A} u^{(k)}_{i,j}} \quad (3.30)$$

Όπου $\hat{u}^{(k)}_{i,j}$ είναι η κανονικοποιημένη τιμή αξιολόγησης μεταξύ των εναλλακτικών A_i και A_j για το κριτήριο k .

Η αξία της εναλλακτικής A_i για το κριτήριο k δίνεται από τη σχέση:

$$g_k(A_i) = \frac{\sum_{j=1}^{N_A} \hat{u}^{(k)}_{i,j}}{N_A} \quad (3.31)$$

Όπου $g_k(A_i)$ είναι η αξία της εναλλακτικής A_i στο κριτήριο k και N_A είναι ο συνολικός αριθμός εναλλακτικών.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το μέτρο συνέπειας $CM_k(A_i)$ της εναλλακτικής A_i στο κριτήριο k και ο μέσος όρος του μέτρου συνέπειας λ_k , για το κριτήριο k , για όλες τις εναλλακτικές με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$CM_k(A_i) = \frac{\sum_{j=1}^{N_A} [u^{(k)}_{i,j} \cdot g_k(A_j)]}{g_k(A_i)} \quad (3.32)$$

$$\lambda_k = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} CM_k(A_i)}{N_A} \quad (3.33)$$

Στην εξίσωση (4.32) θα πρέπει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται η αρχική τιμή αξιολόγησης μεταξύ των εναλλακτικών A_i και A_j και όχι η κανονικοποιημένη.

Έπειτα, προσδιορίζεται ο δείκτης συνέπειας (consistency index), CI_k , του κριτηρίου k , με βάση τη σχέση:

$$CI_k = \frac{\lambda_k - N_A}{N_A - 1} \quad (3.34)$$

Τέλος, προσδιορίζεται ο λόγος συνέπειας (consistency ratio), CR_k , του κριτηρίου k , με βάση τη σχέση:

$$CR_k = \frac{CI_k}{RI} \quad (3.35)$$

Ο δείκτης RI είναι ένας δείκτης τυχειότητας ο οποίος λαμβάνει διάφορες τιμές, ανάλογα με τον αριθμό των εναλλακτικών (Πίνακας 3.2).

Πίνακας 3.2: Οι τιμές του δείκτη τυχειότητας ανάλογα με το πλήθος των εξεταζόμενων εναλλακτικών N_A

N_A	RI
2	0.00
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο λόγος συνέπειας CR_k θα πρέπει να λαμβάνει τιμές μικρότερες του 0.1, ώστε να θεωρηθεί ότι οι αρχικές τιμές αξιολόγησης που δόθηκαν από τον αποφασίζοντα έχουν συνέπεια.

Η ίδια μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των αξιών των εναλλακτικών μπορεί να εφαρμοστεί και στον προσδιορισμό των βαρών των κριτηρίων. Αυτό ακολουθήθηκε και στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης.

3.2.4 Θεωρία σχέσεων υπεροχής

Η θεωρία των σχέσεων υπεροχής (Outranking Relation Theory – ORT) αναπτύχθηκε από τον Roy [47], [48] και βασίζεται στη θεωρία της κοινωνικής επιλογής (social choice theory) [49]. Ο κύριος στόχος της είναι η διαμόρφωση ενός μεθοδολογικού πλαισίου που επιτρέπει τη διμερή σύγκριση (pairwise comparison) μεταξύ των εναλλακτικών ενός προβλήματος.

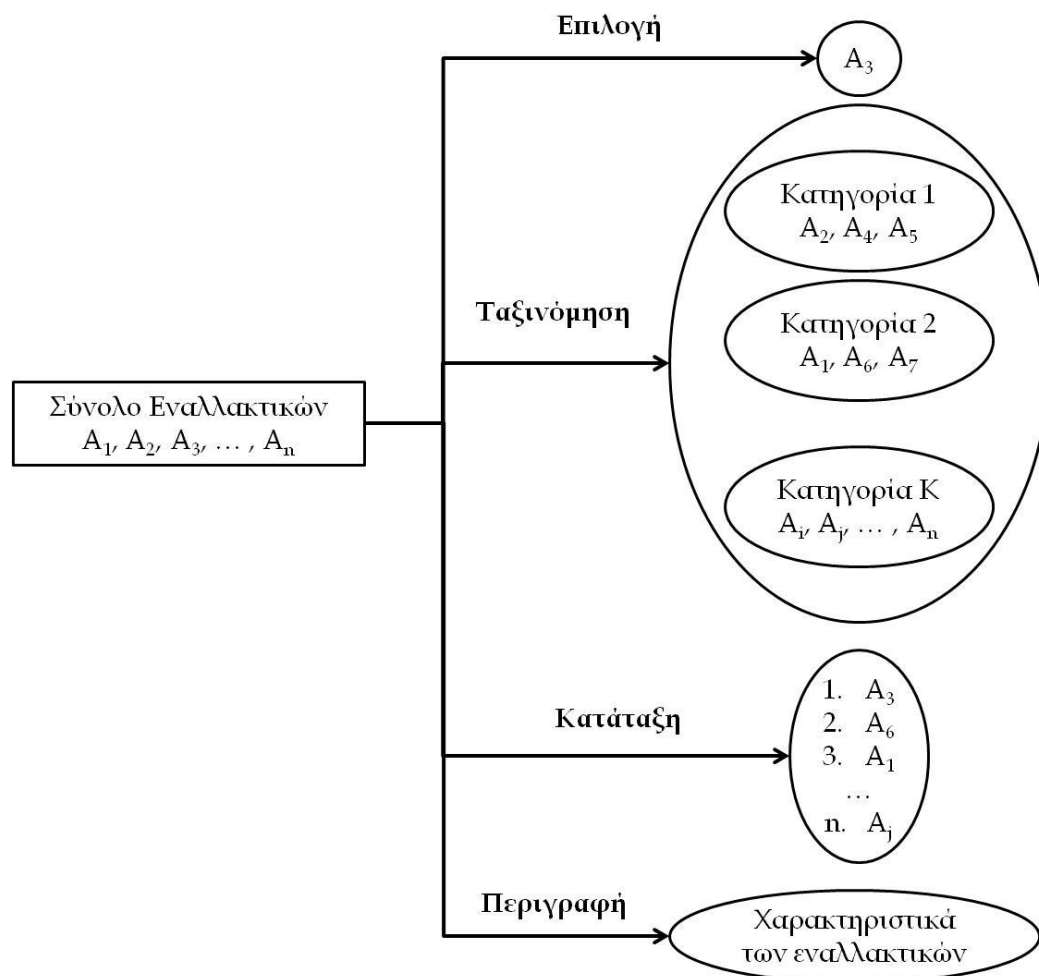
Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της ORT είναι ότι επιτρέπει όχι μόνο την κατάταξη των εναλλακτικών αλλά και την αναγνώριση περιπτώσεων όπου δύο εναλλακτικές δεν

είναι άμεσα συγκρίσιμες λόγω ανεπαρκών πληροφοριών. Σε αντίθεση, μέθοδοι όπως η Πολυκριτήρια Θεωρία Χρησιμότητας (MAUT) και η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP) απαιτούν τη δημιουργία μιας συνάρτησης βαθμολόγησης, με την προϋπόθεση ότι όλες οι εναλλακτικές είναι συγκρίσιμες. Ωστόσο, αυτή η παραδοχή μπορεί να είναι προβληματική όταν τα διαθέσιμα δεδομένα δεν επαρκούν για μια σαφή διάκριση μεταξύ των εναλλακτικών.

Η μέθοδος ORT βασίζεται στη δημιουργία μιας διμερούς σχέσης υπεροχής S , η οποία επιτρέπει την αξιολόγηση της υπεροχής μιας εναλλακτικής A_i έναντι μιας άλλης A_j . Η βασική αρχή της σχέσης υπεροχής στηρίζεται σε δύο παράγοντες:

- **Θετικές ενδείξεις (συμφωνία κριτηρίων):** Εκφράζουν τον βαθμό στον οποίο τα διαθέσιμα στοιχεία υποστηρίζουν τον ισχυρισμό ότι η εναλλακτική A_i είναι τουλάχιστον εξίσου καλή με την A_j
- **Αρνητικές ενδείξεις (ασυμφωνία κριτηρίων):** Αντικατοπτρίζουν τον βαθμό στον οποίο τα κριτήρια καταδεικνύουν το αντίθετο.

Όταν η ισχύς των θετικών ενδείξεων είναι υψηλή και η αντίστοιχη ισχύς των αρνητικών ενδείξεων χαμηλή, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει η σχέση υπεροχής $A_i S A_j$.



Σχήμα 3.1: Αποτέλεσμα αξιολόγησης εναλλακτικών στη θεωρία σχέσεων υπεροχής

Όλες οι μεθοδολογίες που βασίζονται στη θεωρία των σχέσεων υπεροχής λειτουργούν σε δύο βασικά βήματα:

- Πραγματοποίηση της σχέσης υπεροχής S μεταξύ των εναλλακτικών
- Εκμετάλλευση της σχέσης υπεροχής.

Στο δεύτερο βήμα εξάγεται και το αποτέλεσμα της αξιολόγησης των εναλλακτικών, το οποίο μπορεί να λάβει τις παρακάτω μορφές:

- Επιλογή (choice)
- Ταξινόμηση (classification)
- Κατάταξη (ranking)
- Περιγραφή (description).

Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζονται όλες οι μορφές του αποτελέσματος αξιολόγησης των εναλλακτικών ενός προβλήματος στη θεωρία των σχέσεων υπεροχής.

3.2.4.1 Η μέθοδος PROMETHEE

Οι μέθοδοι PROMETHEE αναπτύχθηκαν από τους Brans, Mareschal και Vincke [50] με στόχο την παροχή μιας ευκολότερα κατανοητής προσέγγισης στη λήψη αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματά τους είναι η ευελιξία στη διαχείριση της υποκειμενικότητας, επιτρέποντας στους λήπτες αποφάσεων να προσαρμόσουν τη μέθοδο στις ανάγκες του εκάστοτε προβλήματος.

Στην προσέγγιση PROMETHEE, για κάθε κριτήριο ορίζεται μια συνάρτηση προτίμησης, η οποία χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί ο βαθμός προτίμησης μιας εναλλακτικής έναντι μιας άλλης σε διμερείς συγκρίσεις.

Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό θετικών και αρνητικών ροών προτίμησης για κάθε εναλλακτική:

- Θετική ροή (leaving flow): Αντιπροσωπεύει το πλεονέκτημα μιας εναλλακτικής έναντι των υπόλοιπων.
- Αρνητική ροή (entering flow): Αντικατοπτρίζει το πόσο μια εναλλακτική κυριαρχείται από τις άλλες.

Ανάλογα με τον τύπο της κατάταξης που απαιτείται, υπάρχουν δύο βασικές εκδοχές της μεθόδου:

- PROMETHEE I: Παρέχει μερική κατάταξη των εναλλακτικών, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις θετικές όσο και τις αρνητικές ροές.
- PROMETHEE II: Παράγει πλήρη κατάταξη, εξισορροπώντας τις θετικές και αρνητικές ροές σε μια συνολική καθαρή ροή προτίμησης.

Η σχέση υπεροχής μεταξύ δύο εναλλακτικών A_i και A_j καθορίζεται από τον δείκτη προτίμησης (preference index) $\pi(A_i, A_j)$, ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\pi(A_i, A_j) = \sum_{k=1}^{N_C} w_k p_k(\hat{g}_k(A_i), \hat{g}_k(A_j)) \quad (3.36)$$

Όπου:

- w_k το βάρος του κριτηρίου k
- N_C ο αριθμός των κριτηρίων
- p_k η συνάρτηση προτίμησης για το κριτήριο k .

Υπάρχουν έξι διαφορετικές συναρτήσεις προτίμησης, οι οποίες επιτρέπουν προσαρμογή του επιπέδου αυστηρότητας ή ευελιξίας στη σύγκριση των εναλλακτικών.

3.2.4.1.1 Το κοινό κριτήριο (Usual criterion)

Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι υπάρχει σαφής προτίμηση της εναλλακτικής A_i έναντι της εναλλακτικής A_j αν η αξία της εναλλακτικής A_i είναι μεγαλύτερη της αξίας της εναλλακτικής A_j . Στην περίπτωση που οι αξίες είναι ίσες τότε θεωρείται ότι υπάρχει αδιαφορία μεταξύ των δύο εναλλακτικών στο συγκεκριμένο κριτήριο. Η συνάρτηση p_k δίνεται από τη σχέση:

$$p_k(\hat{g}_k(A_i), \hat{g}_k(A_j)) = \begin{cases} 0, & \text{όταν } \hat{g}_k(A_i) \leq \hat{g}_k(A_j) \\ 1, & \text{όταν } \hat{g}_k(A_i) > \hat{g}_k(A_j) \end{cases} \quad (3.37)$$

3.2.4.1.2 Το κριτήριο U-καμπύλης

Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι υπάρχει σαφής προτίμηση της εναλλακτικής A_i έναντι της εναλλακτικής A_j αν η διαφορά της αξίας της A_i μείον την αξία της A_j είναι μεγαλύτερη από ένα κατώφλι αδιαφορίας, q . Αλλιώς θεωρείται ότι υπάρχει αδιαφορία μεταξύ των δύο εναλλακτικών. Η συνάρτηση p_k δίνεται από τη σχέση:

$$p_k(\hat{g}_k(A_i), \hat{g}_k(A_j)) = \begin{cases} 0, & \text{όταν } \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) \leq q \\ 1, & \text{όταν } \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) > q \end{cases} \quad (3.38)$$

3.2.4.1.3 Το κριτήριο V-καμπύλης

Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι στην περίπτωση που η διαφορά της αξίας της A_i μείον την αξία της A_j δεν υπερβαίνει ένα κατώφλι προτίμησης p , τότε ο βαθμός προτίμησης της εναλλακτικής A_i έναντι της A_j αυξάνει γραμμικά συναρτήσει της διαφοράς των αξιών των δύο εναλλακτικών. Στην περίπτωση που η παραπάνω διαφορά των αξιών ξεπεράσει το κατώφλι προτίμησης τότε υπάρχει σαφής προτίμηση της εναλλακτικής A_i έναντι της A_j . Η συνάρτηση p_k δίνεται από τη σχέση:

$$p_k(\hat{g}_k(A_i), \hat{g}_k(A_j)) = \begin{cases} 0, & \text{όταν } \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) \leq 0 \\ \frac{\hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j)}{p}, & \text{όταν } 0 < \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) \leq p \\ 1, & \text{όταν } \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) > p \end{cases} \quad (3.39)$$

3.2.4.1.4 Το κριτήριο επιπέδων (Level criterion)

Στην περίπτωση αυτή λαμβάνεται υπόψη τόσο το κατώφλι αδιαφορίας όσο και το κατώφλι προτίμησης. Στην περίπτωση που η διαφορά της αξίας της A_i μείον την αξία της A_j είναι ανάμεσα στο κατώφλι αδιαφορίας και προτίμησης τότε θεωρείται ότι υπάρχει ελαφριά προτίμηση της εναλλακτικής A_i έναντι της εναλλακτικής A_j . Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, ισχύουν οι παρατηρήσεις των προηγούμενων δύο κριτηρίων. Η συνάρτηση p_k δίνεται από τη σχέση:

$$p_k(\hat{g}_k(A_i), \hat{g}_k(A_j)) = \begin{cases} 0, & \text{όταν } \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) \leq q \\ 0.5, & \text{όταν } q < \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) \leq p \\ 1, & \text{όταν } \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) > p \end{cases} \quad (3.40)$$

3.2.4.1.5 Το κριτήριο V-καμπύλης με κατώφλι αδιαφορίας (Linear criterion)

Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι ο βαθμός προτίμησης της εναλλακτικής A_i έναντι της A_j αυξάνεται από το μηδέν μέχρι το ένα, όταν η διαφορά της αξίας της A_i μείον την αξία της A_j είναι ανάμεσα των κατωφλίων αδιαφορίας και προτίμησης. Η συνάρτηση p_k δίνεται από τη σχέση:

$$p_k(\hat{g}_k(A_i), \hat{g}_k(A_j)) = \begin{cases} 0, & \text{όταν } \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) \leq q \\ \frac{\hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) - q}{p - q}, & \text{όταν } q < \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) \leq p \\ 1, & \text{όταν } \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) > p \end{cases} \quad (3.41)$$

3.2.4.1.6 Το κριτήριο Gauss (Gaussian criterion)

Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι ο βαθμός προτίμησης είναι μια συνεχή συνάρτηση μορφής Gauss, όπου η συνάρτηση p_k δίνεται από τη σχέση:

$$p_k(\hat{g}_k(A_i), \hat{g}_k(A_j)) = 1 - e^{-\frac{(\hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j))^2}{2\sigma^2}} \quad (3.42)$$

Η μεταβλητή σ συμβολίζει την παράμετρο που καθορίζει το σημείο καμπής.

3.2.4.1.7 Ο υπολογισμός των ροών

Για τον προσδιορισμό των σχέσεων υπεροχής πρέπει να υπολογιστούν, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι θετικές (ροές εξόδου), αρνητικές (ροές εισόδου) και καθαρές ροές.

Η ροή εξόδου (leaving flow), που δείχνει την υπεροχή της εναλλακτικής A_i έναντι της A_j , δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi^+(A_i) = \frac{1}{N_A - 1} \sum_{j=1}^{N_A} \pi(A_i, A_j) \quad (3.43)$$

Η ροή εισόδου (entering flow), που δείχνει την υπεροχή όλων των υπόλοιπων εναλλακτικών έναντι της A_i , δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi^-(A_i) = \frac{1}{N_A - 1} \sum_{j=1}^{N_A} \pi(A_j, A_i) \quad (3.44)$$

Η καθαρή ροή (net flow) δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi(A_i) = \varphi^+(A_i) - \varphi^-(A_i) \quad (3.45)$$

Η τελική κατάταξη δίνεται από τη σχέση:

$$A_i \succ A_j \Leftrightarrow \Phi(A_i) > \Phi(A_j) \quad (3.46)$$

$$A_i \sim A_j \Leftrightarrow \Phi(A_i) = \Phi(A_j) \quad (3.47)$$

4. Μελέτη περίπτωσης

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μια μελέτη περίπτωσης που αφορά την ενεργειακή αξιολόγηση και ανακαίνιση μιας υφιστάμενης μονοκατοικίας στο Βερολίνο. Παρουσιάζονται τόσο τα γεωμετρικά και κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του κτιρίου, όσο και τα σημεία παρέμβασης με το προκατασκευασμένο στοιχείο πρόσοψης. Πραγματοποιείται, επίσης, καθορισμός και παρουσίαση των εναλλακτικών με αναφορά στο καθένα υλικό ξεχωριστά, καθώς και στη διαδικασία προσδιορισμού της βαρύτητας κάθε κριτηρίου και τα αποτελέσματα αυτής.

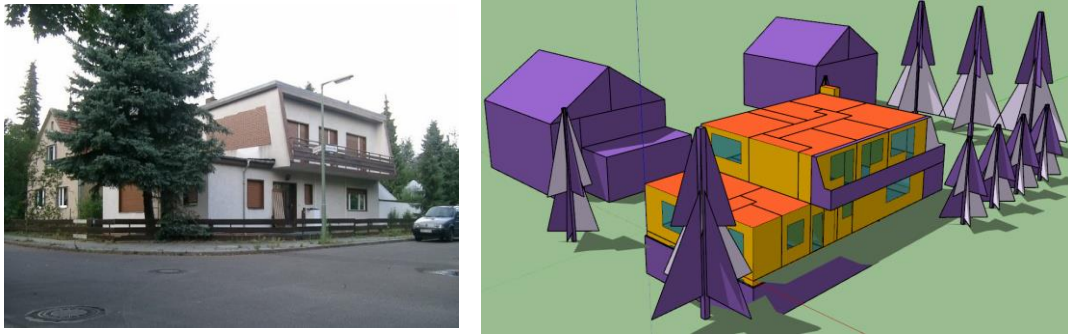
4.1 Υφιστάμενο κτίριο

Το εξεταζόμενο κτίριο είναι μια υφιστάμενη μονοκατοικία που κατασκευάστηκε το 1965 σε μια αποκλειστικά κατοικημένη περιοχή στο νότιο τμήμα του Βερολίνου (Σχήμα 2.2). Το Βερολίνο τοποθετείται στη βόρεια-κεντρική Ευρώπη με γεωγραφικό πλάτος περίπου $52,50^{\circ}\text{N}$ και γεωγραφικό μήκος $13,40^{\circ}\text{E}$, ενώ χαρακτηρίζεται ψυχρούς χειμώνες και από ήπιες θερμοκρασίες κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Όπως γίνεται ξεκάθαρο και από τη δορυφορική εικόνα, οι απομονωμένες μονοκατοικίες, όπως η εξεταζόμενη, αποτελούν τη χαρακτηριστική τοπολογία της τοποθεσίας αυτής. Επίσης, είναι συνήθης η ύπαρξη βλάστησης και δέντρων μεσαίου με υψηλού μεγέθους, καθώς και οι αμελητέες υψομετρικές διαφορές των γειτονικών κτιρίων σε συνδυασμό με τις αποστάσεις τους οδηγούν σε μικρή μόνο σκίαση των κτιρίων επιτρέποντας την αποτελεσματική απορρόφηση των ηλιακών κερδών.

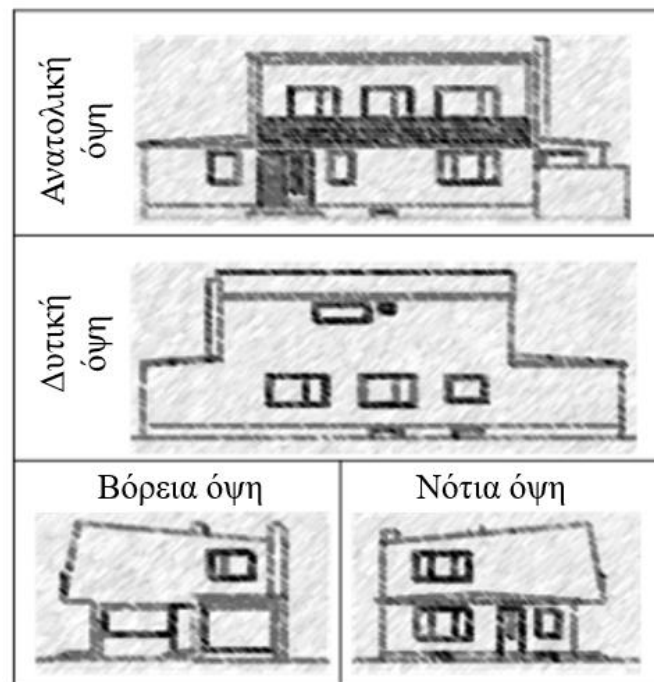


Σχήμα 4.1: Τοποθεσία κτιρίου. Όψη από χάρτες

Το κτίριο, γεωμετρικά, διαρθρώνεται με ένα κύριο σώμα δύο ορόφων, το οποίο διαθέτει μια επίπεδη, επικλινή στέγη, συνοδευόμενο από δύο επεκτάσεις ενός ορόφου στις εγκάρσιες πλευρές και ένα μη θερμαινόμενο υπόγειο (Εικόνα 7). Από άποψη ενεργειακής απόδοσης, η υφιστάμενη κατάσταση κατατάσσεται στην Ενεργειακή Κατηγορία F βάσει της εθνικής πιστοποίησης κτιρίων.



Σχήμα 4.2: Φωτογραφία υφιστάμενου κτιρίου (αριστερά) και 3Δ αναπαράσταση του μοντέλου (δεξιά).



Σχήμα 4.3: Αποτύπωση της υφιστάμενης κατοικίας σε τέσσερις όψεις

Από άποψη γεωμετρίας, τα χαρακτηριστικά της υφιστάμενης κατάστασης του κτιρίου συνοψίζονται παρακάτω (Πίνακας 4.1). Παρατηρούμε πως ο λόγος της επιφάνειας παραθύρων προς την επιφάνεια της εξωτερικής τοιχοποιίας είναι σχετικά υψηλός. Το γεγονός αυτό είναι μία ένδειξη υψηλών απωλειών θερμότητας, υψηλής απορρόφησης ηλιακών κερδών και αναβάθμισης των κουφωμάτων, αν αυτά δεν είναι ενεργειακά αποδοτικά.

Πίνακας 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά υφιστάμενου κτιρίου

Μέγεθος	Τιμή
Επιφάνεια δαπέδου	267 m ²
Επιφάνεια εξωτερικών τοίχων	272 m ²
Επιφάνεια παραθύρων	62 m ²
Λόγος επιφάνειας παραθύρων προς τοίχων	23%
Συνολικός όγκος	742 m ³

Οι συντελεστές θερμοπερατότητας των δομικών στοιχείων του κτιριακού κελύφους φαίνονται στον

Πίνακας 4.2: Συντελεστές θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων

Δομικό στοιχείο	Συντελεστής θερμοπερατότητας U [W/(m ² ·K)]
Εξωτερικοί τοίχοι	0,64
Εσωτερικοί τοίχοι	0,80
Οροφή	0,38
Δάπεδο	1,07
Παράθυρα	2,88 (g=0.703)

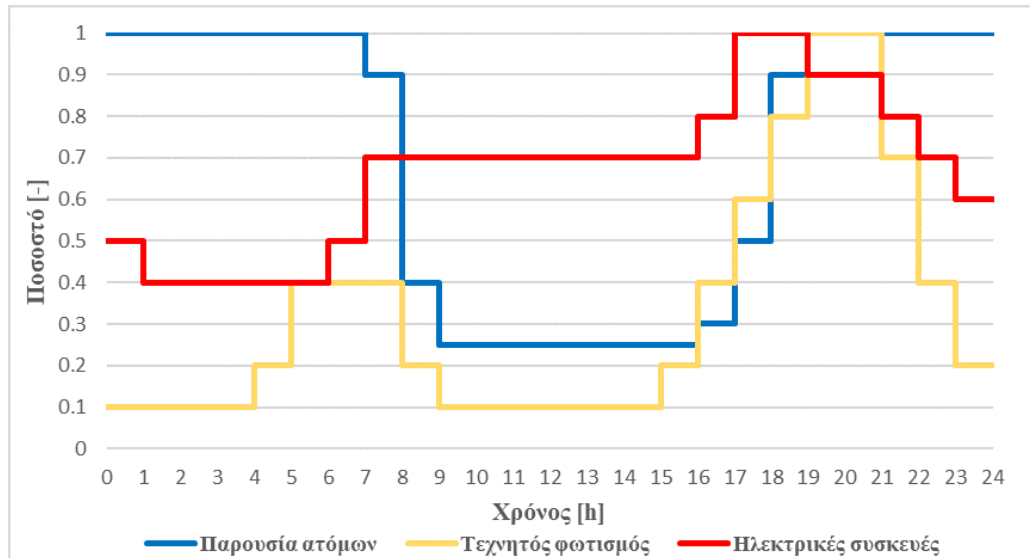
Η λειτουργία του κτιρίου παραμένει κοινή τόσο για την υφιστάμενη περίπτωση όσο και για την ανακαίνισμένη κατάσταση. Συγκεκριμένα, γίνεται υπόθεση κάποιων μέσων τιμών, σύμφωνα με πρότυπα και οδηγίες, για τις διάφορες λειτουργίες του κτιρίου που αφορούν κυρίως στα εσωτερικά θερμικά κέρδη και τον αερισμό των χώρων. Επίσης, λόγω των ήπιων θερμοκρασιών που επικρατούν το καλοκαίρι οι ανάγκες ψύξης είναι αμελητέες και καλύπτονται πλήρως με χρήση φυσικού αερισμού.

Πίνακας 4.3: Εσωτερικά θερμικά κέρδη και αερισμός

Μέγεθος	Τιμή
Αερισμός	0,5 h ⁻¹
Φορτίο ατόμων	80 W/άτομο
Αριθμός κατοίκων	6
Φορτίο τεχνητού φωτισμού	6,4 W/m ²
Φορτίο ηλεκτρικών συσκευών	4 W/m ²

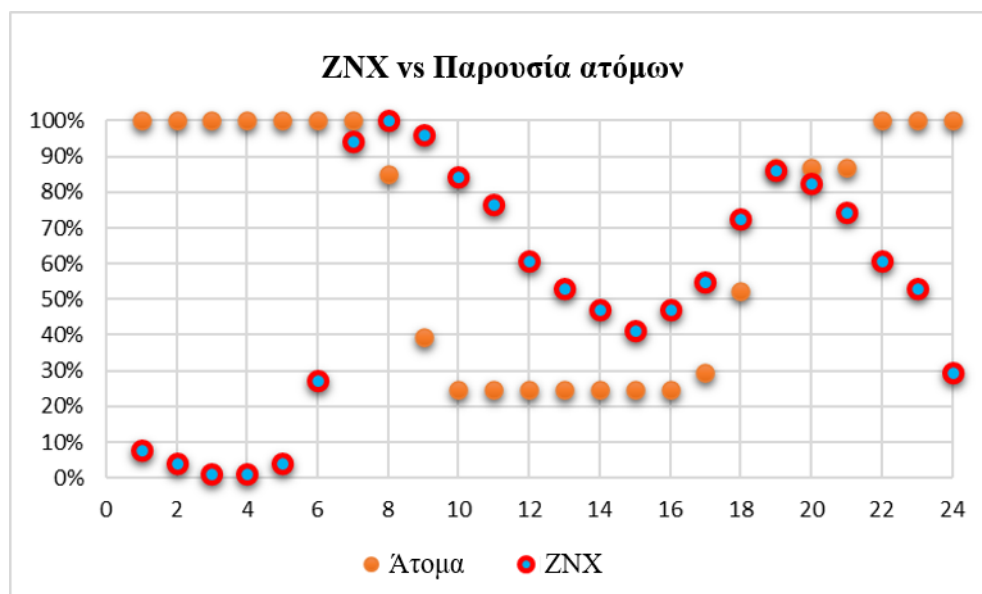
Σε συνδυασμό με το μέσο επίπεδο των λειτουργιών, χρησιμοποιούνται και μερικά δυναμικά προφίλ, προσδίδοντας έτσι μια πιο αναλυτική και ρεαλιστική ημερήσια αναπαράσταση της καθημερινής λειτουργίας μιας κατοικίας. Για την παρουσία των ατόμων εντός της κατοικίας κατά τη διάρκεια της μέρας, τη λειτουργία του τεχνητού

φωτισμού και των ηλεκτρικών συσκευών υιοθετήθηκαν ημερήσια προφίλ λειτουργίας, σύμφωνα με το πρότυπο ASHRAE 90.1-2019 [51], τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Ημερήσια προφίλ παρουσίας ανθρώπων, χρήσης τεχνητού φωτισμού και ηλεκτρικών συσκευών [51]

Σύμφωνα με τον ελληνικό εθνικό οικοδομικό κανονισμό, η ημερήσια κατανάλωση ζεστού νερού χρήσης (ZNX) για κάθε κάτοικο είναι 50 L/άτομο/ημέρα και θεωρείται τυπική θερμοκρασία νερού 45 °C. Για την καθημερινή ζήτηση ZNX χρησιμοποιήθηκε δυναμικό, ωριαίο προφίλ κατανάλωσης [51], το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Ημερήσια προφίλ κατανάλωσης ZNX σε αντιπαραβολή με το προφίλ παρουσίας [51]

Όσον αφορά τις συνθήκες θερμικής άνεσης, χρησιμοποιείται το ευρωπαϊκό πρότυπο EN ISO 7730. Για κάθε θερμαινόμενη ζώνη η θερμοκρασία πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 20 °C και 26 °C και η σχετική υγρασία μεταξύ 30% και 70%. Όλοι οι θερμοστάτες χώρων και οι θερμοκρασιακές ρυθμίσεις που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των συστημάτων θα πρέπει να μπορούν να ικανοποιούν αυτές τις συνθήκες.

Η θέρμανση χώρων, αλλά και ζεστού νερού χρήσεις, πραγματοποιείται μέσω λέβητα φυσικού αερίου με βαθμό απόδοσης 0.8, Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων θερμικής άνεσης, η ταχύτητα του αέρα στους εσωτερικούς χώρους θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 0.1 m/s, ενώ η μονωτική ικανότητα του ρουχισμού θεωρήθηκε ίση με 1 clo για την περίοδο θέρμανσης και 0.5 clo για την περίοδο ψύξης.

4.2 Σενάριο ανακαίνισης

Για το υφιστάμενο κτίριο που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη υποενότητα, εξετάζεται σενάριο ριζικής ανακαίνισης αποσκοπώντας στην αντιμετώπιση και αναβάθμιση των αδύναμων σημείων της υπάρχουσας κατοικίας. Ως αδύναμα σημεία του οικήματος μπορεί να εκληφθεί η ύπαρξη μπαλκονιού, η σχετικά χαμηλή θερμομονωτική απόδοση των κάθετων και οριζόντιων δομικών στοιχείων, καθώς και των παραθύρων. Ακόμη, τα συστήματα χρήζουν αναβάθμισης και αντικατάστασης με πιο αποδοτικά, τα οποία ιδανικά θα απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία τους. Τέλος, η εγκατάσταση και τοποθέτηση συστημάτων ΑΠΕ όπως οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες (ST) για ZNX και τα φωτοβολταϊκά (PV) για επιτόπια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, κρίνονται πλέον απαραίτητα.

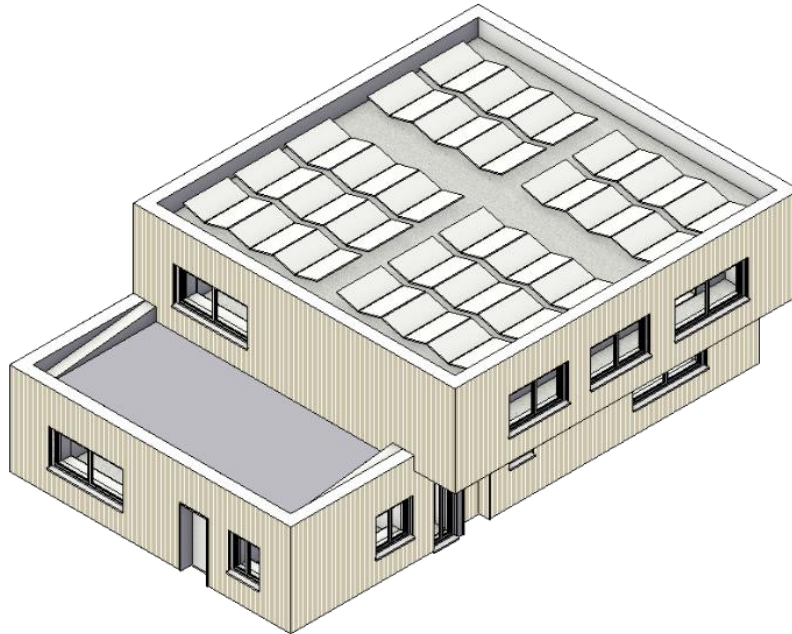
Συνεπώς, η γενική ιδέα της ανακαίνισης είναι να διατηρηθεί η υπάρχουσα δομή και τα στοιχεία φέροντος οργανισμού και να προστεθεί μόνο μια νέα πρόσοψη και στέγη, η οποία θα κλείσει το μπαλκόνι και να το ενσωματώσει ως εσωτερικό θερμαινόμενο χώρο, προκειμένου να εξοικονομηθεί σημαντική ποσότητα ενσωματωμένης ενέργειας από δομικά υλικά. Σε αντιπαραβολή με τον **Πίνακα 4.4** περιγραφής του υφιστάμενου κτιρίου, ο Πίνακας 4.4 συνοψίζει τα τελικά χαρακτηριστικά της κατοικίας μετά την ανακαίνιση.

Πίνακας 4.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά υφιστάμενου κτιρίου

Μέγεθος	Τιμή
Επιφάνεια δαπέδου	284 m ²
Επιφάνεια εξωτερικών τοίχων	279 m ²
Επιφάνεια παραθύρων	59 m ²
Λόγος επιφάνειας παραθύρων προς τοίχων	21%
Συνολικός όγκος	742 m ³

Για τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό της ανακαίνισης, στόχος είναι μια συμπαγής, ξύλινη πρόσοψη που εναρμονίζεται με τα γειτονικά κτίρια. Το Σχήμα 4.6 δείχνει την

αισθητική επισκόπηση του κτιρίου, το οποίο διατηρείται και προσαρμόζεται σε ένα σύγχρονο σχέδιο βασισμένο στη φύση.



Σχήμα 4.6: Αξονομετρική όψη του ανακαινισμένου κτιρίου

Για την υλοποίηση του σχεδιασμού ριζικής ανακαίνισης που μόλις αναλύθηκε, σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε ένα προκατασκευασμένο στοιχείο τοιχοποιίας πολλαπλών λειτουργιών, που θα ανταπεξέρχεται στις ανάγκες και θα ευθυγραμμίζεται με τις ιδιαιτερότητες της εφαρμογής. Συγκεκριμένα, το προκατασκευασμένο αυτό στοιχείο πρόσοψης διαθέτει πλήρως προκατασκευασμένους τοίχους με ξύλινο πλαίσιο και μονωτικά υλικά, ενσωματώνοντας ένα fan coil λεπτού τύπου ως τερματική μονάδα για θέρμανση και ψύξη, καθώς και παράθυρα υψηλής απόδοσης. Μπορεί να εγκατασταθεί εξωτερικά ως πρόσοψη ή εσωτερικά, ανάλογα με τις απαιτήσεις του χώρου ή την αισθητική. Στην παρούσα περίπτωση, τα πάνελ τοιχώματος εφαρμόζονται στην εξωτερική πρόσοψη, ενώ φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να προσαρτηθούν είτε στην εξωτερική επιφάνεια του τοίχου είτε στη στέγη, εάν τα μπαλκόνια ή ορισμένοι όγκοι σκιάζουν τις κάθετες επιφάνειες. Το σύστημα είναι προσαρμόσιμο σε διαστάσεις έως 4 μέτρα σε ύψος ανά πακέτο, ενώ οι εξωτερικές του επιφάνειες μπορούν να επιστρωθούν με διάφορα υλικά, όπως ένα τυπικό επίχρισμα. Το υπό μελέτη πάνελ είναι κατάλληλο για όλα τα ευρωπαϊκά κλίματα, ιδιαίτερα για περιοχές με σημαντική ζήτηση ψύξης, όπως αυτή του Βερολίνου της Γερμανίας. Ως ένα πάνελ αρθρωτού τύπου έτοιμο να συνδεθεί και να λειτουργήσει, «Plug and Play», (Σχήμα 4.7), περιλαμβάνει ευέλικτες συνδέσεις σωληνώσεων και ηλεκτρικών καλωδιώσεων για υπάρχοντα ή καινούργια συστήματα θέρμανσης/ψύξης και ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, μειώνοντας σημαντικά το χρόνο εγκατάστασης στο εργοτάξιο.

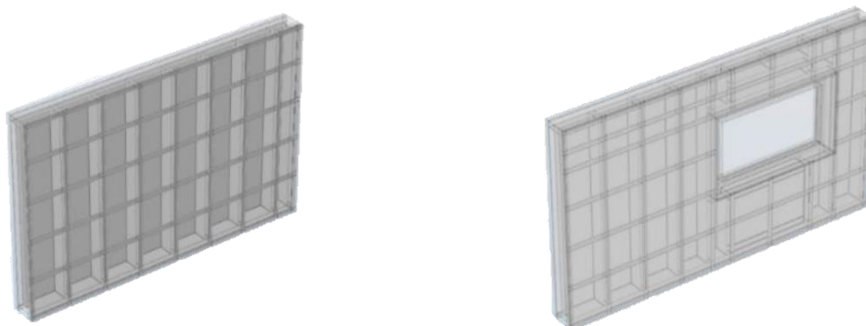


Σχήμα 4.7: Εσωτερική και εξωτερική όψη του πάνελ (αριστερά) και ενσωμάτωση παραθύρων, σκιάστρων και fancoil λεπτού τύπου (δεξιά).

Το θερμομονωτικό πάνελ πρόσοψης συνδυάζει παράθυρα χαμηλής θερμικής διαπερατότητας, διπλού ή τριπλού υαλοπινάκων (με στρώση low-e) υψηλής απόδοσης και μηχανικό εξαερισμό με ανάκτηση θερμότητας. Τα παράθυρα μπορούν να διαθέτουν έξυπνα σκίαστρα για βέλτιστη οπτική και θερμική άνεση, ενώ τα υλικά επιλέγονται με βάση τις θερμικές και περιβαλλοντικές τους ιδιότητες. Ακόμη, μπορεί να επιτευχθεί πλήρη ενεργειακή αυτονομία με την εγκατάσταση υψηλής απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων στη στέγη ή στην πρόσοψη.

Οι διαστάσεις ενός εκ των υπό μελέτη προκατασκευασμένων πάνελ εξαρτώνται από το ύψος του κτιρίου και τα ενσωματωμένα συστήματα, όπως οι διαστάσεις του fan coil. Τα φινιρίσματα διαφέρουν ανάλογα με το εάν το πάνελ εγκαθίσταται εσωτερικά ή εξωτερικά. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή ορίστηκε μήκος 4767 mm και ύψος 3113 mm, σχεδιασμένο για εξωτερική εγκατάσταση.

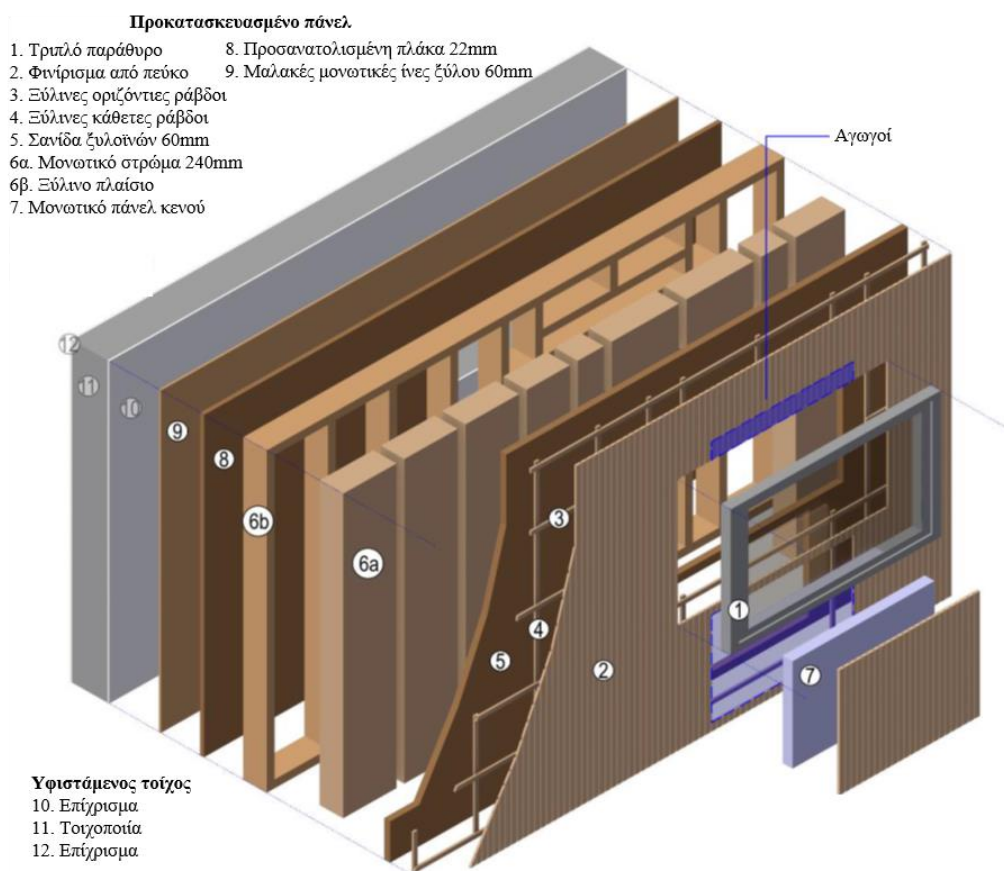
Όπως βέβαια είναι λογικό, δεν γίνεται μία σχεδίαση να ταιριάζει σε όλες τις περιπτώσεις. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν δύο εκδοχές-τύποι του προκατασκευασμένου στοιχείου. Ο πρώτος τύπος είναι ένα απλό πάνελ που περιέχει όλα τα στρώματα χωρίς ενσωματωμένα στοιχεία. Ο δεύτερος τύπος περιλαμβάνει ενσωματωμένα συστήματα, όπως το fan coil, και παράθυρο (Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8: 1^{ος} τύπος, απλός (αριστερά) και 2^{ος} τύπος (ενσωματωμένα συστήματα) προκατασκευασμένου στοιχείου (δεξιά).

Το κούφωμα που περιλαμβάνεται στο πάνελ αποτελείται από ξύλινο-αλουμινένιο πλαίσιο, όπου η τιμή της θερμικής του διαπερατότητας (U_f) είναι $1.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Αντίστοιχα, το παράθυρο απαρτίζεται από τριπλό υαλοπίνακα γεμάτο με αργό (Ar), με συντελεστή θερμικής διαπερατότητας (U_g) ίσο με $0.58 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Η συνολική θερμική διαπερατότητα του παραθύρου είναι $U_w = 0.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Η ενσωματωμένη μονάδα fan coil καταλαμβάνει σημαντικό μέρος της μονωτικής στρώσης, συνεπώς στην οπίσθια πλευρά του fan coil εγκαθίσταται ένα πάνελ κενού (VIP) πάχους 20 mm, οδηγώντας σε ομοιόμορφη θερμική διαπερατότητα σε ολόκληρη την επιφάνεια της τοιχοποιίας.



Σχήμα 4.9: Επισκόπηση διάταξης και επί μέρους κομματιών της προκατασκευασμένης τοιχοποιίας

Τα υλικά στερεώνονται σε ένα ξύλινο πλαίσιο με κάθετους δοκούς (240x80 mm) τοποθετημένους σε απόσταση 625 mm. Την κατασκευή του τοίχου ολοκληρώνουν οι σανίδες από σκέλη ξύλου (OSB), οι μαλακές ίνες ξύλου και τα εξωτερικά φινιρίσματα πεύκου, σε συνδυασμό με μια επαρκώς αεριζόμενη στρώση πρόσοψης. Για το μονωτικό στρώμα (6α) εξετάζονται διαφορετικά υλικά, τα οποία μπορούν να ομαδοποιηθούν σε 3 κατηγορίες. Ειδικότερα, συγκρίνονται συμβατικά, υψηλής απόδοσης και φυσικά μονωτικά υλικά. Όλα τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη, καθώς και οι θερμικές τους ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.

4.3 Καθορισμός προβλήματος απόφασης

Όπως αναφέρθηκε στα αρχικά κεφάλαια, η υψηλή ενεργειακή κατανάλωση στον κτιριακό τομέα επιβάλλει την ανάγκη βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας. Η νούμερο ένα προσέγγιση αυτού του ζητήματος είναι η αναβάθμιση του κτιριακού κελύφους προσθέτοντας θερμομόνωση, ενώ μια επίσης συνηθισμένη και αποδοτική λύση είναι η αναβάθμιση ή αντικατάσταση των συστημάτων με νέα, αποδοτικότερα. Μια προκατασκευασμένη τοιχοποιία έχει να προσφέρει ποικίλα και διόλου ευκαταφρόνητα οφέλη, τα οποία αναφέρθηκαν εκτενώς στο θεωρητικό κεφάλαιο, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να αποτελέσει συνδυασμό των δύο προτεινόμενων λύσεων, ενσωματώνοντας συστήματα και ενισχύοντας τη θερμομονωτική απόδοση του κτιριακού κελύφους. Ωστόσο, πέραν της ενεργειακής απόδοσης πλέον δεν υπάρχει η πολυτέλεια αγνόησης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος κάθε παρέμβασης, συνεπώς αναζητούνται διαρκώς ολιστικές και βιώσιμες λύσεις. Τα προκατασκευασμένα στοιχεία πρόσωσης πληρούν πολλές προϋποθέσεις, αλλά όταν συνδυαστούν με υλικά φιλικά προς το περιβάλλον μπορούν να αποτελέσουν μια πανίσχυρη πρόταση στο χώρο των κτιριακών ανακαινίσεων και όχι μόνο. Έτσι, εξετάζουμε τη χρήση διάφορων φυσικών υλικών για το βασικό μονωτικό στρώμα της τοιχοποιίας. Για την επιτυχή διάδοση και εισαγωγή των φυσικών, μονωτικών υλικών στην κατασκευαστική αγορά, είναι ουσιώδης μια λεπτομερής αξιολόγηση σε σχέση με τα συμβατικά και τα υψηλής απόδοσης μονωτικά υλικά, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα σχετικά κριτήρια και τη αντίστοιχή τους σημασία. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, εξετάζεται το ζήτημα απόφασης για την επιλογή του βέλτιστου μονωτικού υλικού για μία αντιπροσωπευτική μονοκατοικία στην περιοχή του Βερολίνου, αξιολογώντας τόσο οικονομικούς, ενεργειακούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες όσο και κριτήρια που σχετίζονται με τις συνθήκες άνεσης των κατοίκων.

4.3.1 Καθορισμός εναλλακτικών

Πρώτο βήμα στην επίλυση ενός πολυπαραμετρικού ζητήματος είναι ο σαφής ορισμός των υπό μελέτη εναλλακτικών. Προτείνεται, λοιπόν, η καινοτόμα λύση των φυσικών μονωτικών υλικών να συγκριθεί με συμβατικά, αλλά και υψηλής απόδοσης μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται για χρόνια στην αγορά. Οι αντιπαραβαλλόμενες εναλλακτικές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6: Περιγραφή των εναλλακτικών του προβλήματος

Κωδικός	Εναλλακτική	Χαρακτηρισμός
A ₁	Σανίδα από ξυλοΐνες (wood fiber board)	Φυσικό
A ₂	Άχυρο ρυζιού (rice straw)	Φυσικό
A ₃	Διογκωμένος περλίτης (expanded perlite)	Συμβατικό
A ₄	Πετροβάμβακας (stone wool)	Συμβατικό
A ₅	Μαλλί προβάτου (sheep wool)	Φυσικό
A ₆	Βιομηχανική κάνναβη (hemp)	Φυσικό
A ₇	Μονωτικό πάνελ κενού (VIP)	Υπερ-μονωτικό

Για τα υλικά των επτά εναλλακτικών έχει γίνει εκτενής αναφορά στο κεφάλαιο 2.2, ωστόσο αξίζει να αναφέρουμε κάποια γενικά χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας. Τα συμβατικά μονωτικά υλικά, όπως ο πετροβάμβακας, προσφέρουν αξιόπιστη θερμομόνωση σε προσιτό κόστος, και χαίρουν της αναγνώρισης και της εμπιστοσύνης της αγοράς. Αντίθετα, τα υπερ-μονωτικά υλικά, όπως τα πάνελ κενού (VIP), διακρίνονται για τις εξαιρετικά χαμηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας και την ικανότητα επίτευξης υψηλής απόδοσης σε λεπτά στρώματα, παρόλο που συνοδεύονται από υψηλότερο κόστος και ειδικές απαιτήσεις εγκατάστασης. Τέλος, τα φυσικά μονωτικά υλικά, όπως το ξυλόμαλλο και το άχυρο ρυζιού, συνδυάζουν οικολογικά και βιώσιμα χαρακτηριστικά με ικανοποιητική θερμομονωτική απόδοση, προσφέροντας επίσης πλεονεκτήματα όπως η φυσική ρύθμιση της υγρασίας και την ανανεώσιμη προέλευση τους. Οι ιδιότητες των εναλλακτικών υλικών παρουσιάζονται στον

Πίνακας 4.7: Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και πυκνότητα εναλλακτικών

Κωδικός	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (λ) [W/(m·K)]	Πυκνότητα (ρ) [kg/m ³]
A ₁	0.044	200
A ₂	0.039	50
A ₃	0.045	95
A ₄	0.033	69
A ₅	0.039	18
A ₆	0.040	40
A ₇	0.007	181

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω η εναλλακτική A₇ του VIP, ως μονωτικό υψηλής απόδοσης, παρουσιάζει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που μπορεί να είναι μέχρι και 6 φορές μικρότερος από αυτό των υπόλοιπων. Από την άλλη, τα συμβατικά με τα φυσικά υλικά έχουν διαφορές, ως προς τη θερμική τους απόδοση, αλλά όχι τόσο σημαντικές.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως όλες οι εναλλακτικές πέραν αυτής του υπερ-μονωτικού υλικού (A₇) εξετάζονται ως μονωτικά πλήρωσης του στρώματος 6α, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9, δηλαδή θα προστεθούν τα αντίστοιχα υλικά τους με πάχος 240 mm. Αντιθέτως, στην εναλλακτική A₇ το VIP εξετάζεται ως υλικό πλήρωσης του στρώματος 9, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9, αφήνοντας το 6α κενό. Η διαφοροποίηση αυτή έγκειται στο γεγονός ότι το VIP είναι σημαντικά πιο θερμομονωτικό, οπότε η προσθήκη 240 mm θα οδηγούσαν σε συντελεστή θερμοπερατότητας U σημαντικά χαμηλότερο από αυτόν των υπόλοιπων σεναρίων. Συνεπώς, για λόγους δίκαιης σύγκρισης συμφωνήθηκε αυτή η παραδοχή και μετατροπή, ώστε να καταφέρουμε να πετύχουμε εναλλακτικές τοιχοποιίες με αν όχι παραπλήσιους, τουλάχιστον συγκρίσιμους συντελεστές U.

4.3.2 Καθορισμός κριτηρίων

Για την αξιολόγηση των εναλλακτικών του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά κριτήρια τα οποία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν και σε μία διαφορετική κατηγορία.

- Ενεργειακά: Τα κριτήρια που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία αφορούν τον αντίκτυπο κάθε εναλλακτικής ως προς την πρωτογενή ενέργεια που καταναλώνεται ετησίως για την κάλυψη των αναγκών του εξεταζόμενου κτιρίου. Συνήθως είναι δείκτες της ενεργειακής αποδοτικότητας/κλάσης ενός κτιρίου
- Περιβαλλοντικά: Τα κριτήρια που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία αφορούν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παρέμβασης ή του ίδιου του κτιρίου. Συνήθως έχουν να κάνουν με εκπομπές CO₂.
- Οικονομικά: Τα κριτήρια που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία αφορούν τον οικονομικό αντίκτυπο κάθε εναλλακτικής. Συνήθως πρόκειται για κάποιο κόστος ή κάποιο κέρδος.
- Θερμικής άνεσης: Τα κριτήρια που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία μετρούν σε τι βαθμό και πόσο ικανοποιητικά διασφαλίζεται η θερμική άνεση των ανθρώπων που βρίσκονται στον εξεταζόμενο χώρο. Συνήθως μετρούνται σε ώρες ή χρησιμοποιούνται ειδικοί αδιάστατοι δείκτες που έχω πλέον καθιερωθεί.

Ο πίνακας παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 4.8: Περιγραφή των κριτηρίων αξιολόγησης του προβλήματος απόφασης

Κωδικός	Κριτήριο	Κατηγορία	Μονάδες	Στόχος
C ₁	Ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας	Ενεργειακό	kWh/(m ² ·έτος)	Ελαχιστοποίηση
C ₂	LCA	Περιβαλλοντικό	kg/έτος	Ελαχιστοποίηση
C ₃	LCC	Οικονομικό	€	Ελαχιστοποίηση
C ₄	Ώρες που δεν εξασφαλίστηκε θερμική άνεση	Θερμικής άνεσης	h/έτος	Ελαχιστοποίηση

Αφού περιγράφηκε συνοπτικά η κάθε κατηγορία, ακολούθως θα περιγραφούν σύντομα και τα κριτήρια που συνάδουν των αντίστοιχων κατηγοριών.

- **Κριτήριο C₁ – Ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας**: Το κριτήριο αυτό αναφέρεται στην τελική τιμή καταναλισκόμενης πρωτογενούς ενέργειας που προκύπτει από την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού χρήσης. Μετράται σε kWh/(m²·έτος) και αποτελεί βασικό δείκτη της ενεργειακής αποδοτικότητας του κτιρίου, αφού λαμβάνει υπόψη τόσο τα

παθητικά στοιχεία (μόνωση) όσο και τα ενεργητικά του στοιχεία (συστήματα θέρμανσης κ.α.).

- **Κριτήριο C₂ – LCA:** Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA) αποτελεί ένα ολοκληρωμένο περιβαλλοντικό κριτήριο αξιολόγησης, καθώς εξετάζει τις επιπτώσεις μιας εναλλακτικής επιλογής σε όλο τον κύκλο ζωής της, από την εξόρυξη των πρώτων υλών και την παραγωγή έως τη χρήση και την τελική διάθεση. Μέσω της LCA, μπορούν να αξιολογηθούν κρίσιμες παράμετροι, όπως η κατανάλωση ενέργειας, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και η διαχείριση αποβλήτων, επιτρέποντας τη σύγκριση διαφορετικών υλικών ή τεχνολογιών με βάση την περιβαλλοντική τους απόδοση. Έτσι, η LCA συμβάλλει στην επιλογή βιώσιμων λύσεων με μειωμένο οικολογικό αποτύπωμα, ενισχύοντας τη μετάβαση προς πιο φιλικές προς το περιβάλλον κατασκευές και προϊόντα. Μετράται συνήθως σε αποτύπωμα άνθρακα (Global Warming Potential - GWP) με μονάδες τα ισοδύναμα κιλά διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ equivalent) και δείχνει τη συνολική συνεισφορά μιας διαδικασίας ή προϊόντος στην κλιματική αλλαγή μέσω των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου.
- **Κριτήριο C₃ – LCC:** Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής Κόστους (Life Cycle Cost) αποτελεί ολιστικό οικονομικό κριτήριο αξιολόγησης μιας εναλλακτικής, καθώς λαμβάνει υπόψη το συνολικό κόστος μιας επένδυσης καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της. Περιλαμβάνει όχι μόνο το αρχικό κόστος αγοράς ή κατασκευής, αλλά και τα κόστη λειτουργίας, συντήρησης, επισκευών και απόρριψης. Έτσι, το LCC επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών επιλογών με βάση το πραγματικό οικονομικό τους αντίκτυπο μακροπρόθεσμα, προάγοντας λύσεις που είναι οικονομικά βιώσιμες και αποδοτικές. Η χρήση του συμβάλλει στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων, ειδικά σε επενδύσεις που σχετίζονται με την ενέργεια, τις υποδομές και τις κατασκευές.
- **Κριτήριο C₄ – Ώρες που δεν εξασφαλίστηκε θερμική άνεση:** χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης σε έναν εσωτερικό, θερμαινόμενο χώρο, καταγράφοντας τις ώρες του έτους κατά τις οποίες η θερμοκρασία ή άλλες παράμετροι ξεφεύγουν από τα αποδεκτά όρια άνεσης. Όσο μικρότερος είναι ο αριθμός αυτών των ωρών, τόσο πιο αποδοτική θεωρείται μια εναλλακτική λύση ως προς τη θερμική άνεση. Το κριτήριο αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στη σύγκριση δομικών υλικών, συστημάτων θέρμανσης και ψύξης ή στρατηγικών σκίασης, καθώς αντικατοπτρίζει την πραγματική ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος και την επίδρασή του στην ευεξία των χρηστών. Ο ορισμός της θερμικής άνεσης θα αναλυθεί στο 5.4 μαζί με τους επίσημους δείκτες που χρησιμοποιούνται ευρέως.

4.3.3 Προσδιορισμός βαρύτητας κριτηρίων

Το βάρος που θα επιλεγεί για κάθε κριτήριο επηρεάζει καθοριστικά το τελικό αποτέλεσμα μιας πολυκριτηριακής ανάλυσης, καθιστώντας τον καθορισμό της βαρύτητάς τους κρίσιμο στάδιο της διαδικασίας. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης,

εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικά σενάρια για τα βάρη κριτηρίων. Το πρώτο αφορά την ισοβαρή περίπτωση, δηλαδή την κατάσταση όπου όλα τα κριτήρια θεωρούνται το ίδιο σημαντικά μεταξύ τους. Το δεύτερο σενάριο αφορά ερωτηματολόγιο που δημιουργήθηκε για αυτό το σκοπό.

Το ερωτηματολόγιο σχεδιάστηκε και διανεμήθηκε, με στόχο την εξαγωγή μιας αντιπροσωπευτικής μέσης τιμής, που να αποτυπώνει την προτεραιότητα που θα έδινε ένας τυπικός κάτοικος, εργολάβος, ιδιοκτήτης κ.α. σε κάθε κριτήριο. Η δομή του ερωτηματολογίου βασίστηκε, κυρίως, στη μέθοδο των διμερών συγκρίσεων, ζητώντας από τους συμμετέχοντες να επιλέξουν, για κάθε πιθανό ζεύγος κριτηρίων, ποιο θεωρούν πιο σημαντικό. Έπειτα, τους ζητήθηκε να αξιολογήσουν τον βαθμό σημαντικότητας του επιλεγμένου κριτηρίου έναντι του άλλου, χρησιμοποιώντας μια πενταβάθμια λεκτική κλίμακα. Η κλίμακα αυτή είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη καθώς παρουσιάζει σημαντικά οφέλη από την περιοριστική τριβάθμια και από την περίπλοκη και χαώδη εννιαβάθμια κλίμακα. Στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζεται, για τυπικούς λόγους η πενταβάθμια κλίμακα.

Πίνακας 4.9: Η πενταβάθμια κλίμακα για τον προσδιορισμό της βαρύτητας των κριτηρίων

Ένταση σχετικής σημασίας	Ερμηνεία
1	Πολύ χαμηλότερης σπουδαιότητας
2	Χαμηλότερης σπουδαιότητας
3	Ίσης σπουδαιότητας
4	Μεγαλύτερης σπουδαιότητας
5	Πολύ μεγαλύτερης σπουδαιότητας

Συνολικά συμπληρώθηκαν 83 ερωτηματολόγια, από τα οποία προέκυψαν οι συντελεστές βαρύτητας του Πίνακα 4.10 μέσω της μεθόδου AHP.

Πίνακας 4.10: Οι συντελεστές βαρύτητας με βάση τη μέθοδο AHP

Κριτήριο	Συντελεστής βαρύτητας
C ₁	0,227
C ₂	0,187
C ₃	0,413
C ₄	0,174

Η ανάλυση των συντελεστών βαρύτητας δείχνει ότι το οικονομικό κριτήριο (C3) έχει τη μεγαλύτερη σημασία (0,413), γεγονός που υποδηλώνει ότι το κόστος αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα στη διαδικασία αξιολόγησης. Ακολουθεί το ενεργειακό κριτήριο (C1) με συντελεστή 0,227, τονίζοντας τη σημασία της ενεργειακής απόδοσης. Το περιβαλλοντικό κριτήριο (C2) και το κριτήριο της θερμικής άνεσης (C4) λαμβάνουν

μικρότερα βάρη (0,187 και 0,174 αντίστοιχα), υποδεικνύοντας ότι, αν και κρίσιμα, θεωρούνται από τους ερωτηθέντες λιγότερο καθοριστικά συγκριτικά με την οικονομική και ενεργειακή απόδοση. Ωστόσο, αξίζει να διανεμηθεί μελλοντικά αντίστοιχο ερωτηματολόγιο σε ευρύτερο κύκλο ερωτηθέντων και να λάβει ακόμη περισσότερες απαντήσεις, ώστε να επιτευχθεί μια στατιστικά καλύτερη απεικόνιση της γνώμης της αγοράς.

5. Προσδιορισμού απόδοσης των εναλλακτικών

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία προσδιορισμού της απόδοσης των εναλλακτικών λύσεων αποτελεί κρίσιμο στάδιο της ανάλυσης, καθώς επιτρέπει την αντικειμενική αξιολόγηση και σύγκριση των διαφόρων σεναρίων. Η διαδικασία βασίζεται σε πολυκριτηριακή προσέγγιση, λαμβάνοντας υπόψη ενεργειακά, περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια. Αρχικά, εξετάζεται η ενεργειακή απόδοση των δομικών στοιχείων και του συνολικού κτιριακού μοντέλου μέσω προσομοιώσεων, αξιοποιώντας εξειδικευμένο λογισμικό (TRNSYS). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καθώς και ανάλυση κόστους κύκλου ζωής (LCC) για τη συνολική οικονομική αποτίμηση. Τέλος, περιγράφεται η μεθοδολογία υπολογισμού της απόδοσης κάθε εναλλακτικής στο κριτήριο θερμικής άνεσης. Με αυτήν την ολιστική μεθοδολογία, διαμορφώνεται ένα τεκμηριωμένο πλαίσιο σύγκρισης των εναλλακτικών, διευκολύνοντας την επιλογή της βέλτιστης λύσης.

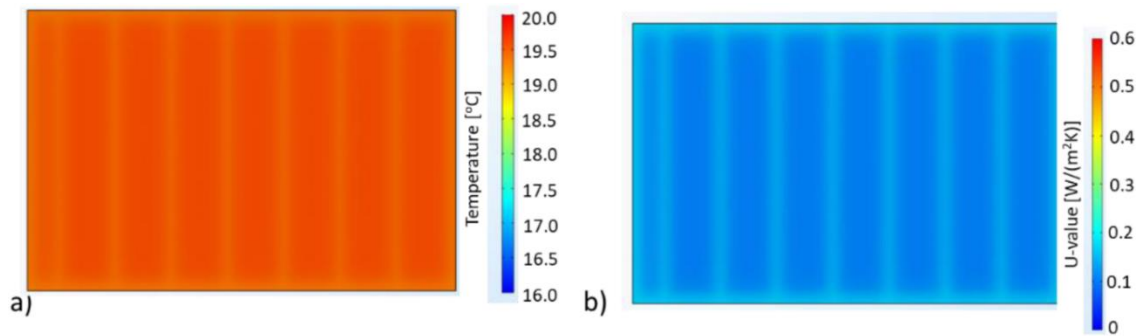
5.1 Ενεργειακή αποδοτικότητα

Η ενεργειακή αποδοτικότητα των εναλλακτικών σεναρίων έχει επιλεγεί ως πρώτο κριτήριο της συγκριτικής ανάλυσης, καθώς αποτελεί κύριο χαρακτηριστικό που επηρεάζει, χωρίς να καθορίζει μονοσήμαντα, το περιβαλλοντικό και το οικονομικό κριτήριο. Για τον υπολογισμό, λοιπόν, της καταναλισκόμενης ενέργειας δημιουργήθηκαν δυναμικά μοντέλα προσομοιώσεων, για κάθε εναλλακτική, με χρήση του λογισμικού TRNSYS. Πριν όμως περάσουμε σε επίπεδο κτιρίου (building level) χρειάζεται να περάσουμε από το επίπεδο δομικού στοιχείου (component level).

➤ Επίπεδο δομικού στοιχείου (component level)

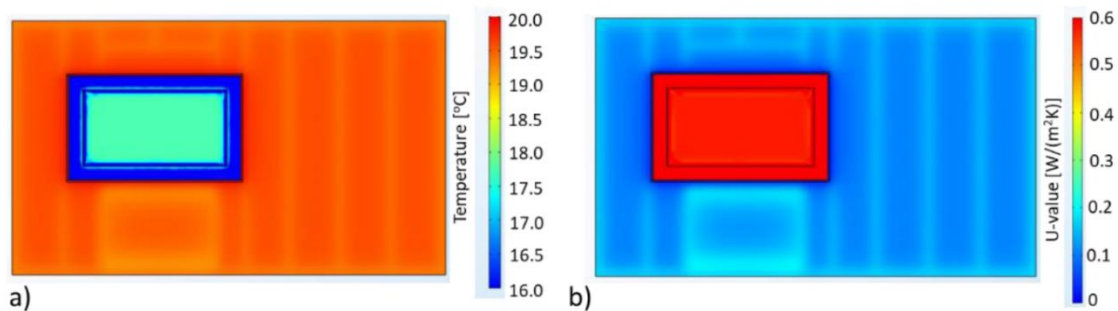
Πριν τη μετάβαση από τα δομικά στοιχεία στην προσομοίωση του συνόλου του κτιρίου απαιτείται ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των δομικών στοιχείων για την ενσωμάτωσή τους στο μοντέλο. Το πρώτο βήμα της μοντελοποίησης περιλαμβάνει την αξιολόγηση της τελικής θερμικής απόδοσης της υπό μελέτη προκατασκευασμένης τοιχοποιίας εφαρμοσμένη στην εξωτερική επιφάνεια των υφιστάμενων κάθετων δομικών στοιχείων. Στη διαδικασία αυτή των αναλυτικών υπολογισμών, λαμβάνονται υπόψη και οι θερμογέφυρες από τα ενσωματωμένα εξαρτήματα και υλοποιήθηκε με χρήση του υπολογιστικού λογισμικού COMSOL για κάθε ένα από τα επτά διαφορετικά σενάρια.

Η ανάλυση σταθερής κατάστασης (steady state), σύμφωνα με το ISO 10211:2007 [52], υπολογίζει τον ισοδύναμο συντελεστή θερμικής διαπερατότητας (U-value) ή την αντίσταση (R-value) λαμβάνοντας υπόψη όλες τις θερμογέφυρες. Η δομή του προκατασκευασμένου πάνελ μαζί με τα fan coil μεταξύ των πλαισίων, εισάγει αξιόλογες θερμογέφυρες. Το Σχήμα 5.1 και το Σχήμα 5.2 παρουσιάζουν χρωματικά διαγράμματα της θερμοκρασίας και της τιμής U στην επιφάνεια της τοιχοποιίας, υπό συνθήκες σταθερής κατάστασης.



Σχήμα 5.1: Χρωματική αναπαράσταση της θερμοκρασίας (a) και του U (b) του 1^{ου} τύπου

Το Σχήμα 5.1 δείχνει ότι ο απλός, 1^{ος} τύπος έχει ελάχιστες θερμογέφυρες, με αποτέλεσμα μια σχεδόν ομοιόμορφη θερμοκρασία επιφάνειας, με την περιοχή του καρφιού να είναι μόνο 0,2 K πιο κρύα από ό,τι μεταξύ των καρφιών. Το αεριζόμενο ξύλινο πλαίσιο στην εξωτερική πλευρά του δημιουργεί επίσης αμελητέα θερμογέφυρα. Από την άλλη πλευρά, ο τύπος 2 (Σχήμα 5.2), με ενσωματωμένα εξαρτήματα, όπως παράθυρα και fan-coil, παρουσιάζει σημαντικές θερμογέφυρες, αυξάνοντας το συντελεστή U-value του τοίχου κατά 66%.



Σχήμα 5.2: Χρωματική αναπαράσταση της θερμοκρασίας (a) και του U (b) του 2^{ου} τύπου

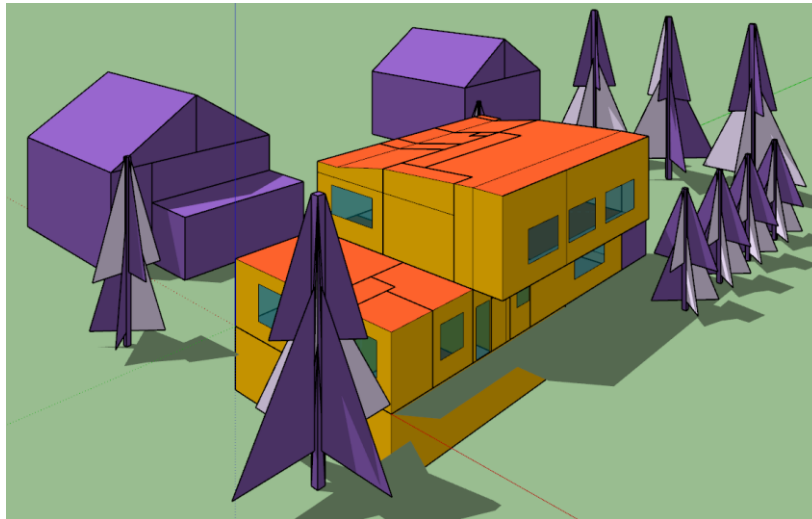
Συνοψίζοντας, η θερμική διαπερατότητα των δύο τύπων για τα επτά εξεταζόμενα σενάρια, με την επίδραση των θερμικών γεφυρών, παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Συντελεστής θερμοπερατότητας των 2 τύπων για τα 7 εξεταζόμενα υλικά

Εναλλακτική	U - 1 ^{ος} τύπος	U - 2 ^{ος} τύπος
Σανίδα από ξυλοϊνες (A ₁)	0,128	0,173
Άχυρο ρυζιού (A ₂)	0,123	0,169
Διογκωμένος περλίτης (A ₃)	0,129	0,173
Πετροβάμβακας (A ₄)	0,115	0,163
Μαλλί προβάτου (A ₅)	0,123	0,169
Βιομηχανική κάνναβη (A ₆)	0,124	0,170
VIP (A ₇)	0,093	0,153

➤ Επίπεδο κτιρίου (building level)

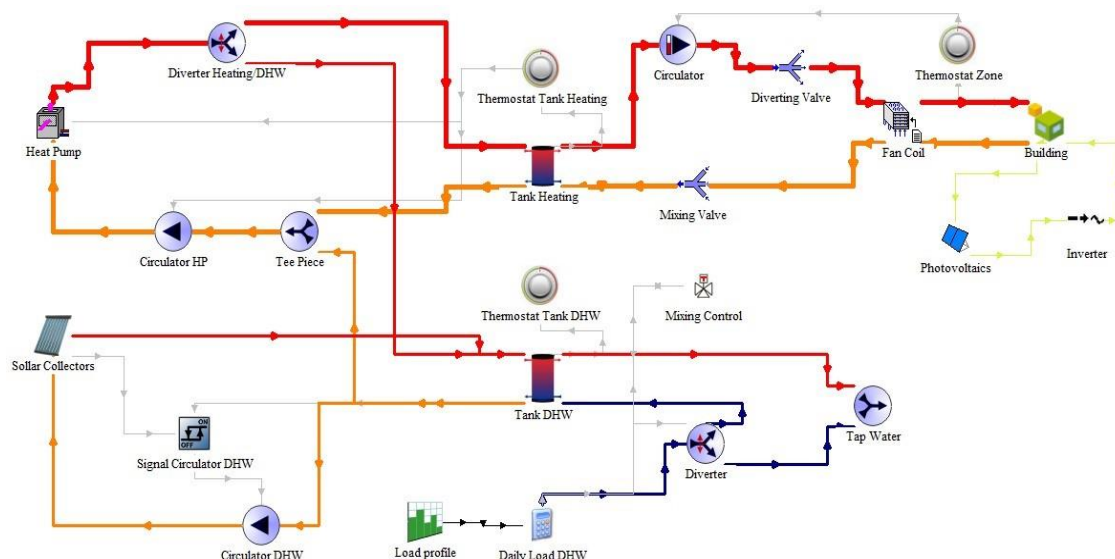
Όσον αφορά την ανάλυση επιπέδου κτιρίου, μοντελοποιούνται και συγκρίνονται επτά διαφορετικά σενάρια, βασισμένα στα εναλλακτικά μονωτικά υλικά, πατώντας πάνω σε την κοινή γεωμετρία όπως περιγράφηκε στο 4.2. Για τον τρισδιάστατο σχεδιασμό του κτιρίου χρησιμοποιήθηκε το SketchUp (Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3: Τρισδιάστατη αναπαράσταση του κτιριακού μοντέλου

Το λογισμικό TRNSYS χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των σεναρίων με εγκατεστημένα στοιχεία προκατασκευασμένης τοιχοποιίας με φυσικά υλικά και συστήματα, αξιολογώντας την επίδρασή τους στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Οι ετήσιες ενεργειακές προσομοιώσεις ενσωματώνουν κλιματικά δεδομένα του Βερολίνου από τη βάση δεδομένων Meteororm. Κάθε δωμάτιο στο προσομοιωμένο κτίριο αντιμετωπίζεται ως μια μοναδική θερμική ζώνη με ανεξάρτητους θερμοστατικούς ελέγχους, ρυθμισμένους στους 20°C για θέρμανση και 26°C για ψύξη. Η προσομοίωση επαλήθευσε ότι οι ανάγκες ψύξης είναι αμελητέες. Για τη θέρμανση και το ζεστό νερό χρήσης (ZNX), η υφιστάμενη κατάσταση χρησιμοποιεί λέβητα πετρελαίου, ενώ η ανακαινισμένη κατάσταση χρησιμοποιεί ένα συνδυασμένο σύστημα αντλίας θερμότητας και ηλιακού συλλέκτη.

Η διαμόρφωση του μοντέλου TRNSYS, που φαίνεται στο Σχήμα 5.4, περιλαμβάνει τρία κύρια τμήματα για τα χρησιμοποιούμενα συστήματα. Η κτιριακή συνιστώσα καλύπτει παραμέτρους όπως γεωμετρία, λειτουργία και χαρακτηριστικά στοιχείων (τοίχοι, οροφή κ.λπ.). Η θερμότητα για τη θέρμανση εσωτερικών χώρων διανέμεται μέσω ενός fan coil μεταβλητής ταχύτητας (ονομαστικής ισχύος 2,18 kW) σε κάθε ζώνη, ελεγχόμενης από θερμοστάτη. Οι μονάδες fan coil τροφοδοτούνται με νερό από μια αντλία θερμότητας αέρα-νερού (ονομαστικής ισχύος 9,37 kW), η οποία χρησιμοποιείται τόσο για τη θέρμανση χώρων όσο και για το ZNX. Η αντλία θερμότητας διατηρεί ζεστό νερό σε αποθηκευτικό δοχείο 300 L, μειώνοντας τις εκκινήσεις-διακοπές (on-off) και βελτιώνοντας την απόδοση.



Σχήμα 5.4: Μοντέλο TRNSYS (συνδυασμός συστημάτων και κτιρίου)

Για το ZNX, μια άλλη δεξαμενή 300 L αποθηκεύει ζεστό νερό, τόσο από τους ηλιακούς συλλέκτες όσο και από την αντλία θερμότητας. Ένας ηλιακός συλλέκτης κενού θερμαίνει το νερό, με την αντλία θερμότητας να συμπληρώνει την απαιτούμενη θερμότητα για τη διατήρηση της υψηλής θερμοκρασίας του νερού, όταν αυτό είναι απαραίτητο. Ο έλεγχος της αντλίας θερμότητας για το ZNX συνδυάζει ένα ωριαίο προφίλ με θερμοστατική ρύθμιση, προσαρμόζοντας τη θερμοκρασία του νερού καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Μία φωτοβολταϊκή (PV) διάταξης προσομοιώνει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με επιλογές για μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά ή λεπτού υμενίου πάνελ και έναν ελεγκτή μέγιστου σημείου ισχύος (MPPT). Δέκα φωτοβολταϊκά πάνελ υψηλής απόδοσης, που καλύπτουν 20 m², είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Ένας μετατροπέας ηλεκτρικής τάσης (inverter) μετατρέπει τη συνεχή τάση (DC) σε εναλλασσόμενη (AC), αντιστοιχίζοντας την στο φορτίο ή στο δίκτυο υπό καθεστώς αυτοπαραγωγής με συμψηφισμό (net-metering), χωρίς αποθήκευση σε μπαταρίες. Η περίσσεια ενέργειας επιστρέφεται στο εθνικό δίκτυο, αντισταθμίζοντας την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε μεταγενέστερο χρόνο.

Τέλος, εκτελώντας την προσομοίωση για διάρκεια ενός έτους και για κάθε ένα από τα επτά διαφορετικά υλικά, προκύπτει η τελική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (kWh/m²·έτος) για κάθε εναλλακτική. Οι τιμές αυτές συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Απόδοση εναλλακτικών στο πρώτο κριτήριο (C₁)

Κωδικός	Εναλλακτική	C ₁ (kWh/m ² ·έτος)
A ₁	Σανίδα από ξυλοΐνες (wood fiber board)	9354
A ₂	Άχυρο ρυζιού (rice straw)	9316
A ₃	Διογκωμένος περλίτης (expanded perlite)	9366

Κωδικός	Εναλλακτική	C ₁ (kWh/m ² ·έτος)
A ₄	Πετροβάμβακας (stone wool)	9296
A ₅	Μαλλί προβάτου (sheep wool)	9322
A ₆	Βιομηχανική κάνναβη (hemp)	9356
A ₇	Μονωτικό πάνελ κενού (VIP)	9173

Όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση, παρατηρείται (Πίνακας 5.2) μια σαφής συσχέτιση μεταξύ της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και της θερμικής διαπερατότητας (U-value) των μονωτικών υλικών (Πίνακας 5.1), όπως ήταν αναμενόμενο. Υλικά με χαμηλότερες τιμές U, όπως το VIP (0,093 W/m²K) και η πετροβάμβακας (0,115 W/m²K), παρουσιάζουν ανώτερη ενεργειακή απόδοση, με ετήσια κατανάλωση 9173 kWh και 9296 kWh, αντίστοιχα. Αντίθετα, υλικά με υψηλότερες τιμές U, όπως η διογκωμένη περλίτης (0,129 W/m²K), τείνουν να έχουν μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση.

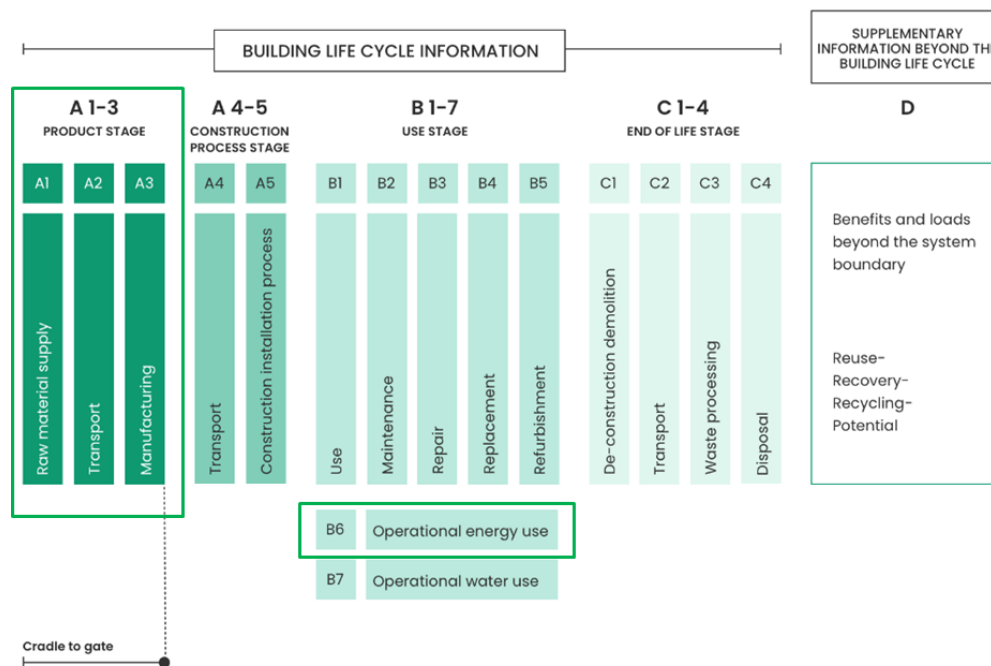
5.2 LCA

Για την ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) έχουν ληφθεί υπόψη αρκετές παραδοχές και έχουν καθοριστεί οριακές συνθήκες με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα και το πεδίο εφαρμογής της παρούσας εργασίας. Οι εκτιμήσεις για τη διάρκεια ζωής των υλικών και των συστημάτων καθορίζονται σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές τους, αξιοποιώντας όπου είναι δυνατόν τις περιβαλλοντικές δηλώσεις προϊόντων (EPDs). Οι μεταφορές των υλικών πραγματοποιούνται εντός της Ευρώπης, διασφαλίζοντας μια τοπική προσέγγιση στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Οι εκπομπές από την παραγωγή των υλικών, ιδιαίτερα εκείνες που συνδέονται με την ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου, προσαρμόζονται στο ευρωπαϊκό πλαίσιο, ευθυγραμμιζόμενες με τα περιφερειακά ενεργειακά πρότυπα και κανονισμούς.

Για τη φάση λειτουργίας του κτιρίου και δεδομένης της τοποθεσίας της μελέτης περίπτωσης, το προφίλ ηλεκτρικής ενέργειας της Γερμανίας, όπως προκύπτει από την πλατφόρμα ÖKOBAUDAT [53] που αντικατοπτρίζει το ενεργειακό μείγμα του 2022, χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση. Η μεθοδολογία υπολογισμού ακολουθεί τα πρότυπα EN 15978 [54] και EN 15804+A1/A2 [55], διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με το ευρωπαϊκό πλαίσιο για την περιβαλλοντική αξιολόγηση των κτιρίων. Το τυποποιημένο αυτό μοντέλο κύκλου ζωής ορίζει κάποια διακριτά στάδια, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5. Εντός των καθορισμένων ορίων του συστήματος, η περιβαλλοντική αξιολόγηση των εξεταζόμενων σεναρίων βασίζεται σε μια προσέγγιση «από την εξόρυξη έως κατασκευή» (cradle-to-gate). Ο υπολογισμός περιλαμβάνει το συνολικό ενσωματωμένο άνθρακα των υλικών που απαρτίζουν τα δομικά προκατασκευασμένα στοιχεία της κατασκευής, συμπεριλαμβανομένων τόσο των κατασκευαστικών όσο και των μηχανολογικών εξοπλισμών. Δεδομένου ότι η μελέτη εξετάζει φυσικά υλικά ως μονωτικά, ο μετριασμός του βιογενούς άνθρακα λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση, αν και αντιμετωπίζεται διαφορετικά από μια εκτίμηση κύκλου ζωής «από την εξόρυξη έως την απόρριψη» (cradle-to-grave). Παράμετροι όπως η δέσμευση του βιογενούς

άνθρακα, οι εκπομπές κατά την παραγωγή και η αποθήκευση βιογενούς άνθρακα περιλαμβάνονται στους υπολογισμούς, συχνά ως αρνητικές εκπομπές CO₂. Ωστόσο, οι εκπομπές του τελευταίου σταδίου ζωής (“end of life stage”, C1-C4) και τα πιθανά οφέλη από την επαναχρησιμοποίηση ή την ανακύκλωση (στάδιο D) δεν αποτελούν μέρος της παρούσας ανάλυσης.

Εκτός από τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο του σταδίου παραγωγής (A1-A3), η ενεργειακή κατανάλωση κατά τη φάση λειτουργίας (B6), όπως προκύπτει από την ενεργειακή ανάλυση της προηγούμενης υποενότητας (TRNSYS), περιλαμβάνεται επίσης στην αξιολόγηση.



Σχήμα 5.5: Στάδια της ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA), στα αγγλικά

Η απογραφή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ενσωματωμένης ενέργειας παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.3). Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε λαμβάνει υπόψη τον κατάλογο των υλικών που προστέθηκαν στην υπάρχουσα κατάσταση του κτιρίου λόγω της ανακαίνισης. Τα κατασκευαστικά υλικά της υφιστάμενης κατάστασης, συμπεριλαμβανομένων των θεμελίων και του φέροντα οργανισμού, δεν έχουν συμπεριληφθεί στην αξιολόγηση.

Πίνακας 5.3: Συντελεστής θερμοπερατότητας των 2 τύπων για τα 7 εξεταζόμενα υλικά

Υποδομή		Συστήματα	
Υλικά	Βάρος (kg)	Υλικά	Βάρος (kg)
Σοβάς	2855.9	Μεταλλικό φύλλο (fan coil)	270
Ξύλινο φινιρίσμα	2124.9	Οπλισμός	120

Υποδομή		Συστήματα	
Υλικά	Βάρος (kg)	Υλικά	Βάρος (kg)
OSB	4501.5	Χαλκός	35.2
Σανίδα από ξυλοΐνες	6055.2	Χάλυβας χαμηλού κράματος	32
Άχυρο ρυζιού	4642.5	Μόνωση σωληνώσεων	16
Διογκωμένος περλίτης	9285	Λιπαντικό λάδι	2.7
Πετροβάμβακας	6406.6	Δοχείο ZNX	139
Μαλλί προβάτου	1671.3	Ηλιακός συλλέκτης	3.2 (m ²)
Βιομηχανική κάνναβη	3714	Φωτοβολταϊκά	20 (m ²)
VIP	4201.4	Τριφασικός μετατροπέας	-
Αεριζόμενη ξύλινη πρόσοψη	3131.4	Αντλία θερμότητας	-
Φλις (Fleece)	1054.5	VIP	34.41
Στρώμα αποστράγγισης	4218.2		
Μεμβράνη ανθεκτική σε ρίζες	249.4		

Για την ανάλυση των επτά σεναρίων όσον αφορά την ενσωματωμένη ενέργεια, η λειτουργική μονάδα για τη συγκριτική αξιολόγηση κύκλου ζωής (LCA) από την εξόρυξη έως την κατασκευή (cradle-to-gate) ορίστηκε ως 1 m² επιφάνειας δαπέδου ανά έτος. Για τη μοντελοποίηση και την εκτίμηση κάποιων διεργασιών, όπως η εξόρυξη πρώτων υλών, η επεξεργασία αποβλήτων, η μελέτη βασίστηκε σε γενικά δεδομένα από τη βάση EcoInvent και το λογισμικό OneClick LCA.

Τέλος, ακολουθώντας την προαναφερθείσα μεθοδολογία για κάθε ένα από τα επτά διαφορετικά υλικά, προκύπτει το τελικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα (kg CO₂e) για κάθε εναλλακτική. Οι τιμές αυτές συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Απόδοση εναλλακτικών στο πρώτο κριτήριο (C₂)

Κωδικός	Εναλλακτική	C ₂ (kg CO ₂ e)
A ₁	Σανίδα από ξυλοΐνες (wood fiber board)	251782
A ₂	Άχυρο ρυζιού (rice straw)	271530
A ₃	Διογκωμένος περλίτης (expanded perlite)	300144
A ₄	Πετροβάμβακας (stone wool)	281420

Κωδικός	Εναλλακτική	C ₂ (kg CO ₂ e)
A ₅	Μαλλί προβάτου (sheep wool)	277354
A ₆	Βιομηχανική κάνναβη (hemp)	261689
A ₇	Μονωτικό πάνελ κενού (VIP)	9173

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA) παρατηρούμε κάτι αξιοσημείωτο. Τα περισσότερα φυσικά υλικά, όπως οι ίνες ξύλου, το άχυρο ρυζιού και η κάνναβη, εμφανίζουν παρόμοια περιβαλλοντική απόδοση, με τις ίνες ξύλου να καταγράφουν το χαμηλότερο GWP, στα 251782 kg CO₂e. Η σημαντική συμβολή της ετησίως καταναλισκόμενης ενέργειας στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα όλων των εναλλακτικών, αναδεικνύει τη σημασία της επιλογής μονωτικών υλικών με υψηλή θερμική απόδοση για τον περιορισμό των μακροπρόθεσμων εκπομπών άνθρακα. Ωστόσο, παρά τη βελτιωμένη ενεργειακή του απόδοση, το VIP αδυνατεί να αντισταθμίσει το πολύ υψηλό ενσωματωμένο αποτύπωμα άνθρακα, καταλήγοντας στο υψηλότερο GWP που παρατηρείται, στα 373947 kg CO₂e.

5.3 LCC

Η μεθοδολογία ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής (Life cycle cost - LCC) που εφαρμόζεται σε αυτή τη μελέτη περιλαμβάνει μια συστηματική αξιολόγηση του συνολικού κόστους διαφορετικών επιλογών μόνωσης στο πλαίσιο μιας βαθιάς ενεργειακής ανακαίνισης, με χρονικό ορίζοντα 50 ετών. Η μεθοδολογία ακολουθεί την καθορισμένη κατευθυντήρια γραμμή του προτύπου ISO 15686-5 [56], το οποίο τυποποιεί το πλαίσιο των υπολογισμών για τον εντοπισμό του LCC για κτιριακά και κατασκευαστικά έργα.

Βασικές παράμετροι της ανάλυσης περιλαμβάνουν το προεξοφλητικό επιτόκιο (3,1%) και την ανακαινισμένη επιφάνεια τοίχου (279 m²). Τα κόστη που λαμβάνονται υπόψη περιλαμβάνουν την αρχική επένδυση (CAPEX), τα λειτουργικά και συντηρητικά έξοδα (OPEX), καθώς και τυχόν περιοδικές αντικαταστάσεις ή υπολειμματικές αξίες στο τέλος της περιόδου μελέτης. Οι εναλλακτικές επιλογές παρουσιάζουν πανομοιότυπα κόστη συντήρησης, αντικατάστασης και υπολειμματικής αξίας, με βασική διαφοροποίηση στα αρχικά και λειτουργικά έξοδα.

Τα αρχικά κόστη (initial cost) περιλαμβάνουν τις δαπάνες απόκτησης (acquisition), δηλαδή το κόστος του μονωτικού υλικού, καθώς και τα έξοδα συναρμολόγησης (assembly), μεταφοράς (transport) και εγκατάστασης (installation). Οι αρχικές δαπάνες εξοφλούνται κατά τη χρονική αφετηρία του έργου, συνεπώς δεν χρειάζονται αναγωγή σε παρούσα αξία. Τα εκτιμώμενα κόστη των εναλλακτικών μονωτικών υλικών, που διαμορφώνουν τις διαφορές στα αρχικά κόστη, συνοψίζονται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: Συντελεστής θερμοπερατότητας των 2 τύπων για τα 7 εξεταζόμενα υλικά

Εναλλακτική	Κόστος υλικού (€/m ²)
Σανίδα από ξυλοΐνες (A ₁)	24,25

Εναλλακτική	Κόστος υλικού (€/m ²)
Άχυρο ρυζιού (A ₂)	10
Διογκωμένος περλίτης (A ₃)	38,9
Πετροβάμβακας (A ₄)	29,8
Μαλλί προβάτου (A ₅)	59,02
Βιομηχανική κάνναβη (A ₆)	33,5
VIP (A ₇)	366,7

Τα λειτουργικά έξοδα (operational cost) σχετίζονται κυρίως με την ετήσια κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση χώρων και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ZNX), καθώς και με τα κόστη συντήρησης (maintenance). Για την εκτίμηση των οικονομικών επιπτώσεων των μελλοντικών δαπανών χρησιμοποιείται ανάλυση προεξοφλημένων ταμειακών ροών, διασφαλίζοντας ότι όλα τα μελλοντικά κόστη εκφράζονται σε παρούσες αξίες. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της οικονομικής αποδοτικότητας των εναλλακτικών επιλογών, διευκολύνοντας τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων. Συγκεκριμένα, τα λειτουργικά κόστη, έχουν εκτιμηθεί ως ετήσιες δαπάνες που επαναλαμβάνονται σταθερά κατά τη διάρκεια του 50-ετούς χρονικού ορίζοντα ζωής του έργου. Για τις περιπτώσεις αναγωγής σε παρούσα αξία σταθερών μελλοντικών αξιών που επαναλαμβάνονται περιοδικά χρησιμοποιείται η σχέση (5.1).

$$PA = C \cdot \frac{1 - (1 + r)^{-N}}{r} \quad (5.1)$$

Όπου:

- ΠΑ είναι η παρούσα αξία που υπολογίζεται
- C είναι η ετήσια σταθερή αξία που θέλουμε να μετατρέψουμε
- r είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο, δείκτης της διαχρονικής αξίας του χρήματος (εδώ 3,1%)
- N είναι ο χρονικός ορίζοντας μελέτης (εδώ 50 έτη)

Τέλος, υπολογίζονται και τα κόστη ή τα οφέλη από τυχόν αντικαταστάσεις (replacement), απόρριψη ή ανακύκλωση (disposal) και υπολειπόμενης αξίας (residual value). Όπως είναι αναμενόμενο, δεν χαρακτηρίζεται όλος ο εξοπλισμός του έργου από κοινό χρονικό ορίζοντα. Για παράδειγμα, ενώ για την τοιχοποιία θεωρείται 50-ετής χρονικός ορίζοντας, τα συστήματα θέρμανσης χρειάζονται αντικατάσταση, μερική ή ολική, πολύ συντομότερα, περίπου κάθε 20 χρόνια. Συνεπώς, τα επαναλαμβανόμενα κόστη αντικατάστασης πρέπει να εκτιμηθούν και να αναχθούν σε παρούσα αξία. Το ίδιο ισχύει και για τα κόστη απόρριψης και της υπολειμματικής αξίας που παρουσιάζονται στο τέλος των 50 χρόνων. Η σχέση υπολογισμού της παρούσας αξίας μεμονωμένων μελλοντικών αξιών δίνεται στην (5.2).

$$PA = \frac{MA}{(1+r)^n} \quad (5.2)$$

Όπου:

- MA είναι η μελλοντική αξία που ανάγεται σε παρούσα αξία
- n είναι η χρονική περίοδος στην οποία προκύπτει η MA

Στο τέλος, για τον υπολογισμό του συνολικού LCC αρκεί να αθροιστούν οι παρούσες αξίας όλων των κατηγοριών κόστους (αρχικό, λειτουργικό, αντικατάστασης, απόρριψης, υπολειπόμενης αξίας).

Τέλος, ακολουθώντας την προαναφερθείσα μεθοδολογία για κάθε ένα από τα επτά διαφορετικά υλικά, προκύπτει το τελικό κόστος κύκλου ζωής (€) για κάθε εναλλακτική. Οι τιμές αυτές συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6: Απόδοση εναλλακτικών στο πρώτο κριτήριο (C₃)

Κωδικός	Εναλλακτική	C ₃ (€)
A ₁	Σανίδα από ξυλοΐνες (wood fiber board)	112607
A ₂	Άχυρο ρυζιού (rice straw)	108296
A ₃	Διογκωμένος περλίτης (expanded perlite)	116801
A ₄	Πετροβάμβακας (stone wool)	113643
A ₅	Μαλλί προβάτου (sheep wool)	122025
A ₆	Βιομηχανική κάνναβη (hemp)	115206
A ₇	Μονωτικό πάνελ κενού (VIP)	206543

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα, τα φυσικά μονωτικά υλικά αποτελούν σαφώς πιο οικονομικές λύσεις συγκριτικά με τις υψηλής απόδοσης μονώσεις, όπως το VIP. Αν και τα περισσότερα βιολογικής προέλευσης υλικά εμφανίζουν παρόμοιες τιμές LCC, το άχυρο ρυζιού ξεχωρίζει ως η πιο οικονομική επιλογή, με συνολικό κόστος 108296€. Αντίθετα, παρά τη μειωμένη ενεργειακή κατανάλωση λόγω της εξαιρετικής θερμικής του απόδοσης, η πολύ υψηλή αρχική επένδυση του VIP οδηγεί στο υψηλότερο συνολικό κόστος κύκλου ζωής (LCC), σχεδόν διπλάσιο από αυτό του πάνελ από άχυρο ρυζιού.

5.4 Θερμική άνεση

Ο όρος θερμική άνεση αναφέρεται στην αίσθηση ικανοποίησης που βιώνουν τα άτομα σε σχέση με τις θερμικές συνθήκες του περιβάλλοντός τους. Πρόκειται για μια κατάσταση όπου το άτομο αισθάνεται ότι η θερμοκρασία του χώρου είναι ιδανική και δεν έχει την ανάγκη για καμία μεταβολή σε αυτήν. Δεδομένου ότι η αίσθηση της θερμικής άνεσης είναι υποκειμενική, διαφορετικά άτομα στον ίδιο χώρο μπορεί να έχουν διαφορετική αντίληψη της θερμικής άνεσης· ένας χρήστης μπορεί να αισθάνεται απόλυτα ικανοποιημένος, ενώ ένας άλλος να νιώθει δυσφορία.

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική άνεση ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

1. **Φυσικοί παράγοντες**, που περιλαμβάνουν:

- Τη θερμοκρασία του αέρα
- Τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία των επιφανειών (Mean radiant temperature)
- Τη σχετική υγρασία του αέρα
- Την ταχύτητα του εσωτερικού αέρα

2. **Βιολογικοί παράγοντες**, όπως:

- Το φύλο των ατόμων στον χώρο
- Η ηλικία των χρηστών
- Ανθρώπινοι παράγοντες (π.χ. το βάρος)

3. **Εξωτερικοί παράγοντες**, που σχετίζονται με:

- Τη φύση των δραστηριοτήτων των ανθρώπων στον χώρο
- Το είδος του ρουχισμού των κατοίκων

Η θερμική άνεση αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα σε εσωτερικούς χώρους, καθώς επηρεάζει την υγεία, την παραγωγικότητα και τη συνολική ευεξία των ανθρώπων. Ο υπολογισμός της θερμικής άνεσης βασίζεται σε μοντέλα όπως το «προβλεπόμενη μέση ψήφος» (Predicted Mean Vote - PMV) και το «προβλεπόμενο ποσοστό δυσαρεστημένων» (Predicted Percentage of Dissatisfied - PPD), τα οποία αναπτύχθηκαν από τον Fanger [57].

5.4.1 Το μοντέλο του Fanger

Το μοντέλο θερμικής άνεσης του Fanger είναι από τα πιο διαδεδομένα και εύχρηστα, καθώς μπορεί να απεικονιστεί και γραφικά [57]. Αναπτύχθηκε μέσα από εκτεταμένα πειράματα που εξέτασαν την επίδραση διαφόρων θερμικών συνθηκών στον άνθρωπο και βασίζεται σε μια επταβάθμια κλίμακα θερμικής αντίληψης. Η θεμελιώδης αρχή του μοντέλου βασίζεται στο ισοζύγιο ενέργειας του ανθρώπινου σώματος, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους μηχανισμούς θερμικών απωλειών (L).

Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του περιβάλλοντος συμβαίνει με τους εξής τρόπους:

- **Αγωγή** μέσω της επαφής του σώματος με τα ρούχα, που στη συνέχεια μεταδίδεται στον αέρα, όταν η θερμοκρασία του αέρα είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του σώματος.
- **Συναγωγή**, όπου η θερμότητα μεταφέρεται από το δέρμα στον αέρα με τον οποίο έρχεται σε επαφή.

- **Ακτινοβολία**, μέσω ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ του σώματος και των περιβαλλόντων επιφανειών, με βάση τη διαφορά θερμοκρασίας τους.
- **Εξάτμιση**, είτε μέσω της αναπνοής είτε μέσω της εφίδρωσης και της άδηλης διαπνοής από την επιδερμίδα.

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, το θερμικό ισοζύγιο του σώματος περιγράφεται από την εξίσωση:

$$H_M - W = H_r + H_c + H_e + (H_{ld} + H_{lr}) [W] \quad (5.3)$$

Όπου:

- H_M είναι ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας λόγω του μεταβολισμού
- W είναι το εξωτερικό μηχανικό έργο
- H_r είναι η ανταλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία
- H_c είναι η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή
- H_e είναι η απώλεια θερμότητας εξαιτίας της εξάτμισης του ιδρώτα από την επιφάνεια του δέρματος
- H_{ld} είναι η απώλεια αισθητής θερμότητας δια μέσου της αναπνοής (λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς του εισερχόμενου και εξερχόμενου αέρα)
- H_{lr} είναι η απώλεια λανθάνουσας θερμότητας δια μέσου της αναπνοής (λόγω της εξάτμισης του νερού)

Ο ρυθμός με τον οποίο παράγεται και αποβάλλεται θερμότητα ποικίλλει μεταξύ των ατόμων. Για να ληφθεί υπόψη αυτή η διαφοροποίηση, οι σχετικές παράμετροι εκφράζονται ως προς τη μονάδα επιφάνειας σώματος. Η επιφάνεια του ανθρώπινου σώματος μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση.

$$A_N = 0.202 \cdot W_b^{0.425} B_h^{0.725} \quad (5.4)$$

Όπου:

- W_b είναι το βάρος του σώματος και
- B_h είναι το αντίστοιχο ύψος.

Ενδεικτικά, μια μέση γυναίκα έχει επιφάνεια σώματος περίπου **1.6 m²**, ενώ ένας μέσος άνδρας έχει περίπου **1.8 m²**.

Το ποσοστό του μεταβολικού ρυθμού που μετατρέπεται σε μηχανικό έργο ονομάζεται ικανότητα έργου (work efficiency). Σε καθημερινές δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα σε κατοικίες ή χώρους εργασίας, η τιμή αυτή είναι συνήθως χαμηλή.

Βασιζόμενο σε αυτό το μοντέλο, προκύπτουν οι δύο κύριοι δείκτες αξιολόγησης της θερμικής άνεσης:

- Predicted Percentage Dissatisfied (PPD)
- Predicted Mean Vote (PMV)

Αυτοί οι δείκτες χρησιμοποιούνται για την αντικειμενική εκτίμηση του επιπέδου θερμικής άνεσης στον χώρο.

5.4.2 «Προβλεπόμενη μέση ψήφος» (PMV)

Ο δείκτης PMV υπολογίζει τη μέση τιμή των «ψηφών» μιας μεγάλης ομάδας ατόμων σε μια επταβάθμια κλίμακα θερμικής άνεσης (Πίνακας 5.7), βασιζόμενος στην εξίσωση θερμικής ισορροπίας του ανθρώπινου σώματος. Όταν ο PMV είναι ίσος με μηδέν, σημαίνει ότι το άτομο αισθάνεται πλήρως ικανοποιημένο με τις θερμικές συνθήκες του περιβάλλοντος.

Πίνακας 5.7: Η επταβάθμια κλίμακα θερμικής άνεσης του δείκτη PMV

PMV [-]	Ερμηνεία
+3	Υπερβολικά ζεστό (Hot)
+2	Θερμό (Warm)
+1	Ελαφρώς θερμό (Slightly warm)
0	Ουδέτερο (Neutral)
-1	Ελαφρώς ψυχρό (Slightly cool)
-2	Ψυχρό (Cool)
-3	Υπερβολικά κρύο (Cold)

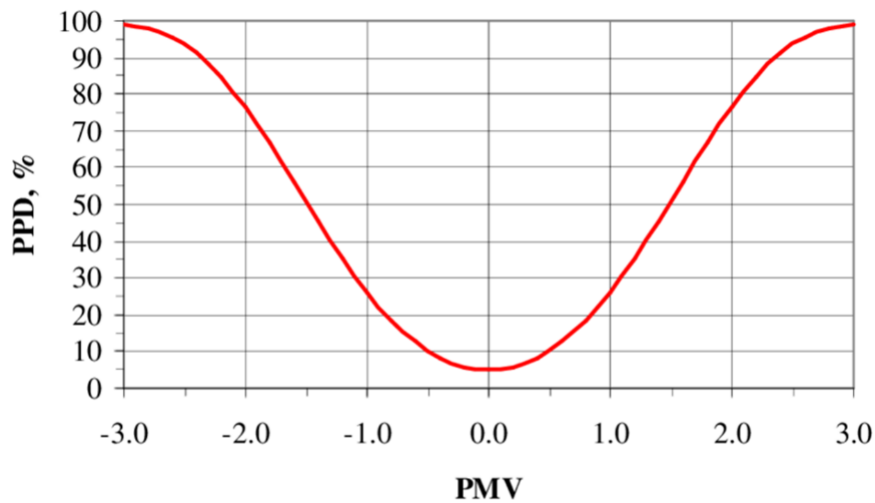
Ο υπολογισμός του δείκτη PMV ακολουθεί μισ στριφνή και περίπλοκη επαναληπτική διαδικασία. Στην περίπτωση μας, το λογισμικό TRNSYS πραγματοποιεί εσωτερικά αυτή τη διαδικασία και υπολογίζει το ζητούμενο PMV για κάθε χρονική στιγμή, σύμφωνα με τις παραμέτρους που το τροφοδοτούμαι και τις συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό του χώρου.

5.4.3 «Προβλεπόμενο ποσοστό δυσανεστημένων» (PPD)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο δείκτης PMV εκφράζει τον μέσο όρο των «ψηφών» μιας μεγάλης ομάδας ατόμων που βιώνουν το ίδιο θερμικό περιβάλλον. Ωστόσο, οι επιμέρους απαντήσεις των ατόμων παρουσιάζουν διακυμάνσεις γύρω από αυτή τη μέση τιμή. Η μέτρηση αυτής της διασποράς είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει την εκτίμηση του ποσοστού των ατόμων που ενδέχεται να αισθάνονται δυσφορία λόγω υπερβολικής ζέστης ή κρύου.

Ο δείκτης Predicted Percentage Dissatisfied (PPD) προσφέρει μια εκτίμηση της έλλειψης θερμικής άνεσης, υπολογίζοντας το ποσοστό των ατόμων που πιθανότατα θα αντιληφθούν το θερμικό περιβάλλον ως υπερβολικά θερμό ή ψυχρό. Ο υπολογισμός του βασίζεται στην τιμή του PMV [58], μέσω της ακόλουθης εξίσωσης:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.217 \cdot PMV^2) \quad (5.5)$$



Σχήμα 5.6: Ο δείκτης PPD συναρτήσει του PMV

Από την ανάλυση του παραπάνω τύπου προκύπτει ότι, ακόμη και όταν το PMV είναι μηδενικό—δηλαδή όταν θεωρητικά επικρατεί ιδανική θερμική άνεση—θα υπάρχει πάντοτε ένα 5% των ατόμων που θα νιώθουν δυσανεξία με τις θερμικές συνθήκες. Αντίστοιχα, σε ακραίες τιμές PMV όπως +3 ή -3, ο δείκτης PPD ανέρχεται στο 99,12%, γεγονός που υποδηλώνει ότι, ακόμη και σε έντονα θερμές ή ψυχρές συνθήκες, ένα μικρό ποσοστό, περίπου 1%, ενδέχεται να αισθάνεται άνετα. Σε πολλές χώρες που έχουν υιοθετήσει τη θεωρία του Fanger, θεωρείται ότι ένα εσωτερικό περιβάλλον είναι αποδεκτό όταν το ποσοστό των δυσαρεστημένων ατόμων (PPD) δεν υπερβαίνει το 10%.

Ο Ευρωπαϊκός κανονισμός EN 15251 [59] καθορίζει τέσσερις κατηγορίες θερμικής άνεσης, ανάλογα με τα εύρη τιμών των δεικτών PMV και PPD, όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.8: Κατηγορίες θερμικής άνεσης για τον σχεδιασμό κτιρίων [59]

Κατηγορία	PPD [%]	PMV [-]
A	<6	-0.2<PMV<+0.2
B	<10	-0.5<PMV<+0.5
C	<15	-0.7<PMV<+0.7
D	>15	PMV<-0.7 ή +0.7<PMV

5.4.4 Ώρες που δεν εξασφαλίστηκε θερμική άνεση (TDH)

Στην παρούσα εργασία, ως κριτήριο θερμικής άνεσης, χρησιμοποιούνται οι ώρες που δεν εξασφαλίστηκε θερμική άνεση (Thermal Discomfort Hours – TDH). Το TDH

ορίζεται ως το συνολικό πλήθος ωρών κατά τη διάρκεια ενός έτους, όπου η απόλυτη τιμή του PMV υπερβαίνει το 0,7 ($|PMV| > 0,7$). Το όριο αυτό αντιστοιχεί στην κατηγορία άνεσης C (Class-C) σύμφωνα με τα πρότυπα θερμικής άνεσης (Πίνακας 5.8), υποδεικνύοντας ώρες κατά τις οποίες οι συνθήκες δεν θεωρούνται ιδανικές για τους ενοίκους.

Ειδικότερα, αφού υπολογιστεί μέσω του λογισμικού TRNSYS το PMV για κάθε ζώνη διενεργείται υπολογισμούς σταθμισμένου μέσου όρου για τις τιμές PMV της κάθε ζώνης, αναλογικά με το λόγο επιφανείας που καταλαμβάνει η συγκεκριμένη ζώνη στο σύνολο του κτιρίου. Έπειτα, αφού έχει εκτιμηθεί η τιμή του PMV για όλο το κτίριο, εξετάζουμε για κάθε χρονική στιγμή (για παράδειγμα ανά ώρα αν το υπολογιστικό βήμα είναι ωριαίο) αν η τιμή αυτή υπερβαίνει το όριο της κλάσης C. Τέλος, αθροίζονται όλες οι ώρες, κατά τη διάρκεια του έτους, όπου ισχύει $|PMV| > 0,7$ ώστε να προκύψουν οι συνολικές ώρες μη επίτευξης θερμικής άνεσης, TDH.

Τέλος, ακολουθώντας την προαναφερθείσα μεθοδολογία για κάθε ένα από τα επτά διαφορετικά υλικά, προκύπτουν οι συνολικές ώρες που δεν εξασφαλίστηκε θερμική άνεση (h/έτος) για κάθε εναλλακτική. Οι τιμές αυτές συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.9.

Πίνακας 5.9: Απόδοση εναλλακτικών στο πρώτο κριτήριο (C_4)

Κωδικός	Εναλλακτική	C_4 (h/έτος)
A ₁	Σανίδα από ξυλοΐνες (wood fiber board)	901
A ₂	Άχυρο ρυζιού (rice straw)	903
A ₃	Διογκωμένος περλίτης (expanded perlite)	928
A ₄	Πετροβάμβακας (stone wool)	909
A ₅	Μαλλί προβάτου (sheep wool)	933
A ₆	Βιομηχανική κάνναβη (hemp)	954
A ₇	Μονωτικό πάνελ κενού (VIP)	864

Τα αποτελέσματα του κριτηρίου θερμικής άνεσης ακολουθούν παρόμοια τάση με τις τιμές θερμικής αγωγιμότητας (Πίνακας 5.1), επιβεβαιώνοντας τη συσχέτιση μεταξύ της απόδοσης της μόνωσης και της θερμικής άνεσης. Η μόνωση VIP επιτυγχάνει τις λιγότερες ώρες θερμικής δυσaréσκειας, με 864 ώρες ετησίως, ακολουθούμενη από το ξύλινο ινώδες πάνελ και τη πετροβάμβακα. Αντίθετα, η μόνωση από κάνναβη, με 954 ώρες TDH, παρουσιάζει τη χειρότερη επίδοση όσον αφορά τη θερμική άνεση.

6. Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης, τα οποία προέκυψαν από την εφαρμογή των πολυκριτηριακών μεθόδων MAUT, TOPSIS, VIKOR και PROMETHEE. Στο προηγούμενο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός των αποδόσεων των εναλλακτικών για κάθε κριτήριο, με βάση τον οποίο διαμορφώθηκε ο πίνακας απόφασης του προβλήματος (Πίνακας 6.1).

Πίνακας 6.1: Πίνακας απόφασης του πολυπαραμετρικού προβλήματος

	$g_1(A_i)$	$g_2(A_i)$	$g_3(A_i)$	$g_4(A_i)$
A_1	9354	251782	112607	901
A_2	9316	271530	108296	903
A_3	9366	300144	116801	928
A_4	9296	281420	113643	909
A_5	9322	277354	122025	933
A_6	9356	261689	115206	954
A_7	9173	308629	206543	864
Στόχος	min	min	min	min
Βάρος $w_{k,1}$	0,25	0,25	0,25	0,25
Βάρος $w_{k,2}$	0,227	0,187	0,413	0,174

Παρατηρώντας τον πίνακα απόφασης επιβεβαιώνεται η ανάγκη χρήσης πολυκριτηριακών μεθόδων ανάλυσης για τη λήψη αποφάσεων, καθώς η βέλτιστη λύση δεν είναι προφανής. Παρότι, για παράδειγμα, το VIP συγκεντρώνει τις καλύτερες επιδόσεις στο πρώτο και στο τελευταίο κριτήριο, παρουσιάζει και τη χειρότερη απόδοση στα άλλα δύο.

Ο πίνακας απόφασης αποτελεί τη βάση για την εφαρμογή όλων των μεθόδων που ακολουθούν. Στη συνέχεια, αναλύονται τα αποτελέσματα κάθε μεθόδου ξεχωριστά, συγκρίνονται οι διαφορετικές κατατάξεις των εναλλακτικών και εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα.

6.1 Μέθοδος MAUT

Η εφαρμογή της μεθόδου ξεκινά με τη διαμόρφωση του πίνακα απόφασης (Πίνακας 6.1). Δεδομένου ότι οι τιμές των εναλλακτικών εκφράζονται σε διαφορετικές μονάδες μέτρησης, κρίνεται απαραίτητος ο υπολογισμός του κανονικοποιημένου πίνακα απόφασης. Για τον σκοπό αυτό, προσδιορίζονται η μέγιστη και η ελάχιστη απόδοση των εναλλακτικών για κάθε κριτήριο, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 6.2: Ο πίνακας απόφασης και η μέγιστη και η ελάχιστη απόδοση σε κάθε κριτήριο, για τη μέθοδο MAUT

	$g_1(A_i)$	$g_2(A_i)$	$g_3(A_i)$	$g_4(A_i)$
A_1	9354	251782	112607	901
A_2	9316	271530	108296	903
A_3	9366	300144	116801	928
A_4	9296	281420	113643	909
A_5	9322	277354	122025	933
A_6	9356	261689	115206	954
A_7	9173	308629	206543	864
Στόχος	min	min	min	min
Βάρος $w_{k,1}$	0,25	0,25	0,25	0,25
Βάρος $w_{k,2}$	0,227	0,187	0,413	0,174
Max	9173	251782	108296	864
Min	9366	308629	206543	954

Οι κανονικοποιημένοι πίνακες απόφασης για τα δύο σενάρια βαρών προκύπτουν σύμφωνα με τη σχέση (3.7).

Πίνακας 6.3: Κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης της μεθόδου MAUT

	$\hat{g}_1(A_i)$	$\hat{g}_2(A_i)$	$\hat{g}_3(A_i)$	$\hat{g}_4(A_i)$
A_1	0.0622	1	0.9561	0.5889
A_2	0.2591	0.6526	1	0.5667
A_3	0	0.1493	0.9134	0.2889
A_4	0.3627	0.4786	0.9456	0.5000
A_5	0.2280	0.5502	0.8603	0.2333
A_6	0.0518	0.8257	0.9297	0
A_7	1	0	0	1
Στόχος	min	min	min	min
Βάρος $w_{k,1}$	0,25	0,25	0,25	0,25
Βάρος $w_{k,2}$	0,227	0,187	0,413	0,174

Αξιοποιώντας τις τιμές της μονοκριτήριας χρησιμότητας που προκύπτουν από τον συγκεκριμένο πίνακα, υπολογίζεται η συνολική πολυκριτήρια χρησιμότητα κάθε εναλλακτικής, βάσει της προσθετικής σχέσης (3.6).

Πίνακας 6.4: Η πολυκριτήρια χρησιμότητα κάθε εναλλακτικής με βάση τη μέθοδο MAUT

	$U(\hat{g}(A_i))_1$	$U(\hat{g}(A_i))_2$	Κατάταξη1	Κατάταξη2
A_1	65.18%	69.85%	1	1
A_2	61.96%	69.24%	2	2

	$U(\hat{g}(A_i))_1$	$U(\hat{g}(A_i))_2$	Κατάταξη1	Κατάταξη2
A ₃	33.79%	45.54%	7	6
A ₄	57.17%	64.94%	3	3
A ₅	46.79%	55.05%	5	4
A ₆	45.18%	55.01%	6	5
A ₇	50.00%	40.10%	4	7

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4, Η μέθοδος MAUT αναδεικνύει την A1, σανίδα από ξυλοΐνες (wood fiber board) ως τη βέλτιστη επιλογή, αφού καταλαμβάνει την πρώτη θέση και στις δύο κατατάξεις με τις υψηλότερες τιμές χρησιμότητας. Η A2, άχυρο ρυζιού (rice straw) αποτελεί την αμέσως επόμενη καλύτερη λύση, καθώς καταλαμβάνει τη 2^η θέση και στα δύο σενάρια βαρών. Αντίστοιχα, η A4, πετροβάμβακας (stone wool), ακολουθεί σταθερά στην τρίτη θέση της κατάταξης. Αντιθέτως, η A3, διογκωμένος περλίτης (expanded perlite) κατατάσσεται σταθερά χαμηλά, καθιστώντας τη λιγότερο ανταγωνιστική επιλογή. Οι υπόλοιπες εναλλακτικές καταλαμβάνουν τις ενδιάμεσες θέσεις στην κατάταξη με διαφορετική κατάταξη για τα δύο σενάρια.

6.2 Μέθοδος TOPSIS

Η εφαρμογή της μεθόδου TOPSIS ξεκινά με τη διαμόρφωση του πίνακα απόφασης (Πίνακας 6.1) και ακολουθεί ο υπολογισμός του κανονικοποιημένου πίνακα, σύμφωνα με τη σχέση (3.10).

Πίνακας 6.5: Κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης της μεθόδου TOPSIS

	$\hat{g}_1(A_i)$	$\hat{g}_2(A_i)$	$\hat{g}_3(A_i)$	$\hat{g}_4(A_i)$
A ₁	0.3797	0.3404	0.3227	0.3728
A ₂	0.3781	0.3671	0.3103	0.3736
A ₃	0.3801	0.4058	0.3347	0.3840
A ₄	0.3773	0.3805	0.3256	0.3761
A ₅	0.3784	0.3750	0.3497	0.3860
A ₆	0.3798	0.3538	0.3301	0.3947
A ₇	0.3723	0.4172	0.5918	0.3574
Στόχος	min	min	min	min

Ο σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των τιμών κάθε στήλης του Πίνακα 6.5 με το αντίστοιχο βάρος για κάθε σενάριο και κριτήριο, βάσει της εξίσωσης (3.9). Στη συνέχεια, προσδιορίζονται η θετική ($\hat{U}^+$) και η αρνητική ιδεατή λύση ($\hat{U}^-$) για κάθε κριτήριο, με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.6 για το ισοβαρές σενάριο και στον Πίνακα 6.7 για τις απαντήσεις του ερωτηματολογίου.

Πίνακας 6.6: Ο σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης και η θετική και αρνητική ιδεατή λύση της μεθόδου TOPSIS, 1^ο σενάριο

	$\hat{u}_1(A_i)$	$\hat{u}_2(A_i)$	$\hat{u}_3(A_i)$	$\hat{u}_4(A_i)$
A ₁	0.0949	0.0851	0.0807	0.0932
A ₂	0.0945	0.0918	0.0776	0.0934
A ₃	0.0950	0.1015	0.0837	0.0960
A ₄	0.0943	0.0951	0.0814	0.0940
A ₅	0.0946	0.0937	0.0874	0.0965
A ₆	0.0949	0.0885	0.0825	0.0987
A ₇	0.0931	0.1043	0.1480	0.0894
Στόχος	min	min	min	min
$\hat{U}^+$	0.0931	0.0851	0.0776	0.0894
$\hat{U}^-$	0.0950	0.1043	0.1480	0.0987

Πίνακας 6.7: Ο σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης και η θετική και αρνητική ιδεατή λύση της μεθόδου TOPSIS, 2^ο σενάριο

	$\hat{u}_1(A_i)$	$\hat{u}_2(A_i)$	$\hat{u}_3(A_i)$	$\hat{u}_4(A_i)$
A ₁	0.0862	0.0637	0.1333	0.0649
A ₂	0.0858	0.0687	0.1282	0.0650
A ₃	0.0863	0.0759	0.1382	0.0668
A ₄	0.0857	0.0712	0.1345	0.0654
A ₅	0.0859	0.0701	0.1444	0.0672
A ₆	0.0862	0.0662	0.1363	0.0687
A ₇	0.0845	0.0780	0.2444	0.0622
Στόχος	min	min	min	min
$\hat{U}^+$	0.0845	0.0637	0.1282	0.0622
$\hat{U}^-$	0.0863	0.0780	0.2444	0.0687

Για κάθε εναλλακτική, υπολογίζονται οι αποστάσεις S_i^+ και S_i^- από τις ιδεατές λύσεις των σχέσεων (3.15) και (3.16) και η σχετική εγγύτητα σύμφωνα με τη σχέση (3.17).

Πίνακας 6.8: Οι αποστάσεις από τη θετική και την αρνητική ιδεατή λύση και η σχετική εγγύτητα της μεθόδου TOPSIS, για το πρώτο σενάριο

Εναλλακτική	$S_i^+, 1$	$S_i^-, 1$	$D_i, 1$	Κατάταξη
A ₁	0.0052	0.0702	0.9304	1
A ₂	0.0079	0.0717	0.9004	2
A ₃	0.0188	0.0644	0.7744	6
A ₄	0.0118	0.0673	0.8514	4
A ₅	0.0150	0.0615	0.8040	5
A ₆	0.0112	0.0673	0.8572	3
A ₇	0.0730	0.0095	0.1154	7

Πίνακας 6.9: Οι αποστάσεις από τη θετική και την αρνητική ιδεατή λύση και η σχετική εγγύτητα της μεθόδου TOPSIS, για το δεύτερο

Εναλλακτική	$S^+_{i,1}$	$S^-_{i,1}$	$D_{i,1}$	Κατάταξη
A ₁	0.0060	0.1122	0.9493	2
A ₂	0.0059	0.1167	0.9521	1
A ₃	0.0166	0.1062	0.8649	5
A ₄	0.0104	0.1102	0.9138	3
A ₅	0.0182	0.1003	0.8463	6
A ₆	0.0109	0.1087	0.9092	4
A ₇	0.1172	0.0067	0.0542	7

Παρατηρούμε πως η κατάταξη των εναλλακτικών, όπως ήταν εξάλλου αναμενόμενο, δεν είναι κοινή για τα δύο σενάρια βαρών των κριτηρίων. Ωστόσο, γίνεται ξεκάθαρο πως οι μονώσεις από ξυλοΐνες (A₁) και από άχυρο ρυζιού (A₂) αποτελούν τις βέλτιστες λύσεις, καθώς καταλαμβάνουν τις κορυφαίες θέσεις της κατάταξης και στις δύο περιπτώσεις. Ακόμη, η χρήση VIP (A₇) ξεχωρίζει ως η χειρίστη επιλογή, καταλαμβάνοντας την τελευταία θέση και στα δύο σενάρια. Τέλος, τα υπόλοιπα υλικά καταλαμβάνουν τις ενδιάμεσες θέσεις χωρίς κάποια ξεκάθαρη προτίμηση.

6.3 Μέθοδος VIKOR

Η εφαρμογή της μεθόδου VIKOR ξεκινά με τη διαμόρφωση του πίνακα απόφασης (Πίνακας 6.1) και τον προσδιορισμό των βέλτιστων (g_k^*) και χειρίστων (g_k^-) επιδόσεων για κάθε κριτήριο, βάσει των εξισώσεων (3.19)-(3.22), όπως αποτυπώνεται στον Πίνακα 6.10.

Πίνακας 6.10: Ο πίνακας απόφασης και η καλύτερη και η χειρότερη επίδοση για τη μέθοδο VIKOR

	$g_1(A_i)$	$g_2(A_i)$	$g_3(A_i)$	$g_4(A_i)$
A ₁	9354	251782	112607	901
A ₂	9316	271530	108296	903
A ₃	9366	300144	116801	928
A ₄	9296	281420	113643	909
A ₅	9322	277354	122025	933
A ₆	9356	261689	115206	954
A ₇	9173	308629	206543	864
Στόχος	min	min	min	min
g_k^*	9173	251782	108296	864
g_k^-	9366	308629	206543	954

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι δείκτες S_i και R_i σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.23) και (3.24).

Πίνακας 6.11: Η κατάταξη των εναλλακτικών κατά S και R για τη μέθοδο VIKOR, 1^ο σενάριο

Εναλλακτική	S _i	R _i	Κατάταξη S _i	Κατάταξη R _i
A ₁	0.3482	0.2345	1	4
A ₂	0.3804	0.1852	2	2
A ₃	0.6621	0.2500	7	5
A ₄	0.4283	0.1593	3	1
A ₅	0.5321	0.1930	5	3
A ₆	0.5482	0.2500	6	6
A ₇	0.5000	0.2500	4	7

Πίνακας 6.12: Η κατάταξη των εναλλακτικών κατά S και R για τη μέθοδο VIKOR, 2^ο σενάριο

Εναλλακτική	S _i	R _i	Κατάταξη S _i	Κατάταξη R _i
A ₁	0.3025	0.2129	1	4
A ₂	0.3086	0.1682	2	2
A ₃	0.5456	0.2270	6	6
A ₄	0.3516	0.1447	3	1
A ₅	0.4505	0.1752	4	3
A ₆	0.4509	0.2152	5	5
A ₇	0.6000	0.4130	7	7

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει για το πρώτο σενάριο $S^*_1 = 0.3482$, $S^-_1 = 0.6621$, $R^*_1 = 0.1593$ και $R^-_1 = 0.2500$, ενώ για το δεύτερο σενάριο $S^*_2 = 0.3025$, $S^-_2 = 0.6000$, $R^*_2 = 0.1447$ και $R^-_2 = 0.2500$.

Για τον υπολογισμό των Q_i , σύμφωνα με την εξίσωση (3.25), χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου ν (0, 0.5 και 1). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.13: Η κατάταξη των εναλλακτικών κατά Q για τη μέθοδο VIKOR, 1^ο σενάριο για το 1^ο σενάριο και στον Πίνακα 6.14 για το 2^ο.

Πίνακας 6.13: Η κατάταξη των εναλλακτικών κατά Q για τη μέθοδο VIKOR, 1^ο σενάριο

Εναλλακτική	$\nu=0$		$\nu=0.5$		$\nu=1$	
	Q _i	Κατάταξη	Q _i	Κατάταξη	Q _i	Κατάταξη
A ₁	0.8286	4	0.4143	3	0.0000	1
A ₂	0.2857	2	0.1942	2	0.1026	2
A ₃	1.0000	5	1.0000	7	1.0000	7
A ₄	0.0000	1	0.1275	1	0.2551	3
A ₅	0.3714	3	0.4786	4	0.5857	5
A ₆	1.0000	6	0.8186	6	0.6371	6
A ₇	1.0000	7	0.7418	5	0.4836	4

Πίνακας 6.14: Η κατάταξη των εναλλακτικών κατά Q για τη μέθοδο VIKOR, 2^ο σενάριο

Εναλλακτική	ν=0		ν=0.5		ν=1	
	Q _i	Κατάταξη	Q _i	Κατάταξη	Q _i	Κατάταξη
A ₁	0.2542	4	0.1271	3	0.0000	1
A ₂	0.0877	2	0.0539	1	0.0202	2
A ₃	0.3068	6	0.5619	6	0.8170	6
A ₄	0.0000	1	0.0825	2	0.1651	3
A ₅	0.1140	3	0.3057	4	0.4973	4
A ₆	0.2630	5	0.3808	5	0.4987	5
A ₇	1.0000	7	1.0000	7	1.0000	7

Στη μέθοδο VIKOR αναδεικνύεται μία λύση ως βέλτιστη επιλογή, όταν ικανοποιεί δύο αναγκαίες συνθήκες, αυτήν της ευστάθειας και αυτήν του συγκριτικού πλεονεκτήματος. Σε περίπτωση που κάποια συνθήκη δεν πληρείται, τότε οδηγούμαστε σε σύνολο λύσεων συμβιβασμού (compromise solution set), το οποίο με τη σειρά του να μπορεί να ικανοποιήσει και τις δύο εν λόγω συνθήκες.

- 1) **Συνθήκη ευστάθειας:** Ικανοποιείται όταν υπάρχει κοινή βέλτιστη εναλλακτική (A') ως προς S και ως προς R. Αν δεν υπάρχει μοναδική τέτοια εναλλακτική, επιλέγεται το μικρότερο δυνατό σύνολο εναλλακτικών (A', A'', A'''...) που να ικανοποιεί τη συνθήκη.
 - a) **Σενάριο ίσων βαρών:** Παρατηρώντας τον Πίνακα 6.11, συμπεραίνεται πως δεν πληρείται η συνθήκη ευστάθειας για κάποια λύση. Αναζητώντας σύνολο εναλλακτικών, προκύπτει πως ο μοναδικός συνδυασμός που ικανοποιεί τη συνθήκη είναι αυτός του πλήρες συνόλου των 7 εναλλακτικών. Συνεπώς, δεν δίνεται σαφής απάντηση προτίμησης μεταξύ των προτεινόμενων λύσεων.
 - b) **Σενάριο ερωτηματολογίου:** Παρατηρώντας τον Πίνακα 6.12 συμπεραίνεται πως δεν πληρείται η συνθήκη ευστάθειας για κάποια λύση. Αναζητώντας σύνολο εναλλακτικών, προκύπτει πως το ελάχιστο σύνολο που ικανοποιεί τη συνθήκη ευστάθειας είναι αυτό των εναλλακτικών A₁, A₂, A₄ και A₅.
- 2) **Συνθήκη συγκριτικού πλεονεκτήματος:** Ικανοποιείται όταν ισχύει η σχέση (6.1) για τη βέλτιστη (Q_{min}) εναλλακτική (A') έναντι της δεύτερης καλύτερης (A''). Ως N_A ορίζεται το πλήθος των εξεταζόμενων εναλλακτικών.

$$Q(A'') - Q(A') \geq \frac{1}{N_A - 1} = 0.5 \quad (6.1)$$

- a) **Σενάριο ίσων βαρών:** Εφόσον η συνθήκη ευστάθειας δεν πληρείται παρά μόνο για το πλήρες σύνολο των εναλλακτικών, δεν έχει νόημα η διερεύνηση της παρούσας συνθήκης.
- b) **Σενάριο ερωτηματολογίου:** Παρατηρώντας τον Πίνακα 6.14, προκύπτει πως για καμία τιμή του ν δεν πληρείται η συνθήκη για το σύνολο των 4 εναλλακτικών που ικανοποιούν τη συνθήκη ευστάθειας. Έπειτα, εξετάζεται

ξανά μεγαλώνοντας το σύνολο εναλλακτικών κατά ένα, προσθέτοντας δηλαδή την εναλλακτική A_6 . Προκύπτει πως το νέο σύνολο των 5 εναλλακτικών καταφέρνει να ικανοποιήσει και τις δύο αναγκαίες συνθήκες.

Συνοψίζοντας, η μέθοδος VIKOR δεν οδηγεί σε σαφή προτίμηση στην πρώτη περίπτωση των ίσων βαρών, καθώς η συνθήκη ευστάθειας δεν ικανοποιείται για κάποιο υποσύνολο των διαθέσιμων εναλλακτικών. Αντιθέτω, ενώ για το δεύτερο σενάριο του ερωτηματολογίου πάλι δεν υπάρχει ξεκάθαρη μοναδική βέλτιστη λύση, αναδεικνύεται σύνολο λύσεων συμβιβασμού, το οποίο ικανοποιεί τόσο τη συνθήκη ευστάθειας όσο παρουσιάζει και συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι των υπόλοιπων εναλλακτικών. Το σύνολο αυτό αποτελείται από την A_1 (ξύλοϊνες), A_2 (άχυρο ρυζιού), A_4 (πετροβάμβακας), A_5 (μαλλί προβάτου) και την A_6 (βιομηχανική κάνναβη). Αξίζει να σημειωθεί πως το σύνολο συμβιβασμού περιέχει ως λύσεις μόνο φυσικά υλικά με τον πετροβάμβακα να είναι το μοναδικό που εμφανίζει χαρακτηριστικά συμβατικού μονωτικού.

6.4 Μέθοδος PROMETHEE

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης εφαρμόστηκε η μέθοδος PROMETHEE II, η οποία επιτρέπει την πλήρη ιεράρχηση των εναλλακτικών λύσεων. Αρχικά, ο πίνακας απόφασης κανονικοποιήθηκε μέσω της εξίσωσης (3.7), ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με τη μέθοδο MAUT. Στη συνέχεια, για κάθε ζεύγος εναλλακτικών A_i και A_j , υπολογίστηκε ο δείκτης προτίμησης $\pi(A_i, A_j)$, με τη συνάρτηση προτίμησης να βασίζεται στο κριτήριο V-καμπύλης χρησιμοποιώντας κατώφλι αδιαφορίας $q=0.05$ και προτίμησης $p=0.15$. Τα αποτελέσματα του δείκτη προτίμησης για όλα τα ζεύγη εναλλακτικών για τα δύο σενάρια βαρών αποτυπώνονται στον Πίνακα 6.16.

Πίνακας 6.15: Ο δείκτης προτίμησης για κάθε ζεύγος εναλλακτικών για τη μέθοδο PROMETHEE, 1^ο σενάριο

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
A_1	-	0.0924	0.3137	0.1557	0.2255	0.1999	0.4894
A_2	0.0598	-	0.2811	0.0739	0.1514	0.2106	0.4132
A_3	0	0	-	0	0.0275	0.0722	0.2663
A_4	0.0751	0.0259	0.2331	-	0.1213	0.2061	0.3559
A_5	0.0415	0	0.1572	0.0179	-	0.1024	0.3528
A_6	0	0.0433	0.1860	0.0868	0.0865	-	0.4393
A_7	0.3372	0.2936	0.4278	0.2843	0.3847	0.4871	-

Πίνακας 6.16: Ο δείκτης προτίμησης για κάθε ζεύγος εναλλακτικών για τη μέθοδο PROMETHEE, 2^ο σενάριο

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
A_1	-	0.0688	0.2428	0.1182	0.1859	0.1482	0.5826
A_2	0.0621	-	0.2361	0.0668	0.1415	0.1739	0.5350

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇
A ₃	0	0	-	0	0.0322	0.0503	0.4061
A ₄	0.0682	0.0235	0.1928	-	0.1116	0.1632	0.4798
A ₅	0.0376	0	0.1267	0.0134	-	0.0806	0.4586
A ₆	0	0.0324	0.1448	0.0649	0.0806	-	0.5391
A ₇	0.2844	0.2436	0.3507	0.2317	0.3087	0.3892	-

Στη συνέχεια, προσδιορίστηκαν οι ροές προτίμησης κάθε εναλλακτικής: η θετική ροή (Φ^+), η αρνητική ροή (Φ^-) και η καθαρή ροή (Φ), βάσει των οποίων προέκυψε η τελική κατάταξη των εναλλακτικών, όπως φαίνεται στον πίνακα 6.11.

Πίνακας 6.17: Οι ροές υπεροχής και η τελική κατάταξη με βάση τη μέθοδο PROMETHEE, 1^ο σενάριο

	Φ^+	Φ^-	Φ	Κατάταξη
A ₁	1.4767	0.5136	0.9631	1
A ₂	1.1899	0.4552	0.7348	2
A ₃	0.3660	1.5990	-1.2330	7
A ₄	1.0175	0.6186	0.3990	3
A ₅	0.6718	0.9969	-0.3251	5
A ₆	0.8418	1.2783	-0.4364	6
A ₇	2.2146	2.3169	-0.1023	4

Πίνακας 6.18: Οι ροές υπεροχής και η τελική κατάταξη με βάση τη μέθοδο PROMETHEE, 2^ο σενάριο

	Φ^+	Φ^-	Φ	Κατάταξη
A ₁	1.3464	0.4524	0.8940	1
A ₂	1.2155	0.3683	0.8472	2
A ₃	0.4886	1.2938	-0.8053	6
A ₄	1.0392	0.4949	0.5442	3
A ₅	0.7169	0.8604	-0.1435	4
A ₆	0.8618	1.0054	-0.1437	5
A ₇	1.8083	3.0012	-1.1929	7

Η μέθοδος PROMETHEE II επιλέγει ως βέλτιστη εναλλακτική αυτή με τη μέγιστη καθαρή ροή, με αποτέλεσμα η A₁ (Σανίδα από ξυλοΐνες - wood fiber board) να καταλαμβάνει την πρώτη θέση με μικρή διαφορά από τη δεύτερη A₂ (άχυρο ρυζιού - rice straw). Η τρίτη πιο ελκυστική λύση είναι η A₄ (Πετροβάμβακας - stone wool) με μεγάλη διαφορά από τις 2 καλύτερες. Η προτίμηση αυτή προκύπτει και από τα δύο σενάρια βαρών, ενώ η κατάταξη των υπόλοιπων υλικών δεν είναι σταθερή στα δύο σενάρια με την A₃ (διογκωμένος περλίτης - expanded perlite) να κατατάσσεται σταθερά χαμηλά, καθιστώντας τη λιγότερο ανταγωνιστική επιλογή μαζί με το υπερμονωτικό υλικό VIP (A₇).

6.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Για την πολυκριτηριακή ανάλυση του προβλήματος εφαρμόστηκαν τέσσερις διαφορετικές μέθοδοι αξιολόγησης (MAUT, TOPSIS, VIKOR, PROMETHEE) και δύο διαφορετικά σενάρια για τα βάρη σημαντικότητας του καθενός εκ των τεσσάρων κριτηρίων. Εξετάστηκαν επτά διαφορετικά υλικά ως εναλλακτική μονωτικού στρώματος τοιχοποιίας, που περιέχουν φυσικά υλικά, συμβατικά αλλά και υψηλής απόδοσης μονωτικά. Παρακάτω συνοψίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα-συμπεράσματα της κάθε μεθόδου που εφαρμόστηκε.

❖ MAUT

- Σανίδα από ξυλοΐνες (A_1) ως βέλτιστη λύση
- Άχυρο ρυζιού (A_2) ως δεύτερη βέλτιστη λύση
- Πετροβάμβακας (A_4) ως τρίτη βέλτιστη λύση
- Διογκωμένος περλίτης (A_3) ως χειρότερη λύση

❖ TOPSIS

- Οι μονώσεις από ξυλοΐνες (A_1) και από άχυρο ρυζιού (A_2) αποτελούν τις βέλτιστες λύσεις
- Το VIP (A_7) ξεχωρίζει ως η χειρίστη επιλογή

❖ VIKOR

- Αδυναμία ανάδειξης μοναδικής βέλτιστης λύσης
- Ύπαρξη συνόλου λύσεων συμβιβασμού που περιέχει τις A_1 (ξυλοΐνες), A_2 (άχυρο ρυζιού), A_4 (πετροβάμβακας), A_5 (μαλλί προβάτου) και την A_6 (βιομηχανική κάνναβη)

❖ PROMETHEE

- Σανίδα από ξυλοΐνες (A_1) ως βέλτιστη λύση
- Άχυρο ρυζιού (A_2) ως δεύτερη βέλτιστη λύση με μικρή διαφορά από την πρώτη
- Πετροβάμβακας (A_4) ως τρίτη βέλτιστη λύση με μεγάλη διαφορά από τις προηγούμενες
- Διογκωμένος περλίτης (A_3) ως χειρότερη λύση μαζί με το VIP (A_7)

Όπως είναι αναμενόμενο, τα αποτελέσματα των τεσσάρων μεθόδων δεν συμπίπτουν πλήρως. Ωστόσο, παρουσιάζουν κάποια σημαντικά κοινά σημεία τα οποία θα μπορούσαν να γενικευτούν με βεβαιότητα ως πόρισμα της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, η σανίδα από ξυλοΐνες και το άχυρο ρυζιού αποτελούν ξεκάθαρα τις δύο καλύτερες λύσεις, με την πρώτη να εμφανίζει ενδείξεις πως είναι η βέλτιστη. Η επιλογή του πετροβάμβακα φαίνεται να αποτελεί την αμέσως επόμενη καλύτερη λύση, με αδιαμφισβήτητη διαφορά, όμως, από τις πρώτες δύο. Ακόμη, ο διογκωμένος περλίτης και το VIP αναδείχθηκαν ως οι χειρότερες λύσεις. Τέλος, για τα υπόλοιπα υλικά δεν προκύπτει ξεκάθαρη προτίμηση, καθώς καταλαμβάνουν ανακατεμένα τις ενδιάμεσες θέσεις στην κατάταξη των μεθόδων.

7. Συμπεράσματα-Προτάσεις για μελλοντική εργασία

7.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία εστίασε στην αξιολόγηση προκατασκευασμένων τοιχοποιιών με ενσωματωμένα συστήματα (HVAC) που χρησιμοποιούν φυσικά μονωτικά υλικά για την ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων, χρησιμοποιώντας πολυκριτηριακές μεθόδους λήψης αποφάσεων. Στόχος ήταν η σύγκριση των φυσικών υλικών με άλλα συμβατικά και υψηλής απόδοσης μονωτικά, ως προς τη δυνατότητα αναβάθμισης της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου, περιορισμού του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, βελτίωση της θερμικής άνεσης και όλα αυτά λαμβάνοντας υπόψη την ελαχιστοποίηση του κόστους.

Ως προτεινόμενες λύσεις μονωτικών υλικών εξετάστηκαν η σανίδα από ξυλοΐνες ή ξυλόμαλλο (εναλλακτική A₁), το άχυρο ρυζιού (εναλλακτική A₂), ο διογκωμένος περλίτης (εναλλακτική A₃), ο πετροβάμβακας (εναλλακτική A₄), το μαλλί προβάτου (εναλλακτική A₅), η βιομηχανική κάνναβη (εναλλακτική A₆) και το μονωτικό πάνελ κενού – VIP (εναλλακτική A₇). Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα κριτήρια αξιολόγησης από τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες. Συγκεκριμένα, αξιολογήθηκαν η τελική ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του κτιρίου ως δείκτης ενεργειακής αποδοτικότητας, το ενεργειακό αποτύπωμα σε ισοδύναμα kg CO₂ από ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) ως περιβαλλοντικό κριτήριο, το συνολικό κόστος κύκλου ζωής (LCC) ως οικονομικό κριτήριο και τέλος οι ώρες που δεν εξασφαλίστηκε θερμική άνεση (TDH) ως ένδειξη της βελτιωμένης θερμικής άνεσης. Εξετάστηκαν, ακόμη, δύο διαφορετικά σενάρια για τα βάρη σημαντικότητας των κριτηρίων. Πρώτα, η ισοβαρής περίπτωση όπου όλα τα κριτήρια θεωρούνται ίσης σημαντικότητας. Έπειτα, μία περίπτωση βασισμένη σε απαντήσεις αντίστοιχου ερωτηματολογίου, που ανέδειξαν το οικονομικό ως σημαντικότερο κριτήριο, και την ενεργειακή αποδοτικότητα ως λίγο πιο σημαντική από τα εναπομείναντα δύο. Για την κατάταξη των εναλλακτικών και την επιλογή της βέλτιστης λύσης, πραγματοποιήθηκε εφαρμογή τεσσάρων διαφορετικών πολυκριτηριακών μεθόδων (MAUT, TOPSIS, VIKOR, PROMETHEE).

Ως μελέτη περίπτωσης εξετάστηκε μία διώροφη μονοκατοικία περίπου 267 m² με μη θερμαινόμενο υπόγειο στην περιοχή του Βερολίνου. Πραγματοποιήθηκε ριζική ανακίνηση με αναβάθμιση του κτιριακού κελύφους, αλλά και των συστημάτων (HVAC). Για τον προσδιορισμό της ενεργειακής απόδοσης και της θερμικής άνεσης πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις στο λογισμικό TRNSYS, για το LCA χρησιμοποιήθηκε το OneClick LCA, ενώ για την εφαρμογή των πολυκριτηριακών μεθόδων χρησιμοποιήθηκε το MATLAB.

Η ανάλυση κατέδειξε ότι διαφορετικά υλικά παρουσιάζουν πλεονεκτήματα σε συγκεκριμένους τομείς. Για παράδειγμα, υλικά με χαμηλό συντελεστή θερμοπερατότητας (U-value), όπως το VIP επέδειξαν υψηλή ενεργειακή απόδοση, μειώνοντας την ετήσια κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, η λύση αυτή συνοδεύεται από υψηλό αρχικό κόστος, το οποίο επηρεάζει την οικονομική τους βιωσιμότητα σε όρους

ανάλυσης κύκλου ζωής κόστους (LCC). Αναφορικά με την περιβαλλοντική επίπτωση, τα φυσικά μονωτικά υλικά εμφάνισαν σημαντικά χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα συγκριτικά με τις συνθετικές επιλογές. Ειδικότερα, υλικά όπως το άχυρο ρυζιού και η κάνναβη παρουσίασαν χαμηλές εκπομπές CO₂ στο στάδιο παραγωγής τους, ενισχύοντας το περιβαλλοντικό προφίλ των προκατασκευασμένων τοιχοποιιών που τα ενσωματώνουν.

Οι πολυκριτηριακές μέθοδοι MAUT, TOPSIS, VIKOR και PROMETHEE δεν ανέδειξαν ακριβώς τις ίδιες κατατάξεις των εναλλακτικών λύσεων, όπως ήταν αναμενόμενο. Αξίζει, ωστόσο, να σημειωθούν ορισμένα σημαντικά σημεία που εμφάνισαν τα οποία μπορούν να εξαχθούν ως γενικά συμπεράσματα της ανάλυσης. Ειδικότερα, υπογραμμίζεται πως η σανίδα από ξυλοΐνες και το άχυρο ρυζιού αποτελούν τις δύο καλύτερες λύσεις, με την πρώτη να εμφανίζει ενδείξεις πως είναι η βέλτιστη. Η επιλογή του πετροβάμβακα φαίνεται να αποτελεί την αμέσως επόμενη καλύτερη λύση, με αδιαμφισβήτητη διαφορά, όμως, από τις πρώτες δύο. Ακόμη, ο διογκωμένος περλίτης και το VIP αναδείχθηκαν ως οι χειρότερες λύσεις. Τέλος, για τα υπόλοιπα υλικά δεν προκύπτει ξεκάθαρη προτίμηση, καθώς καταλαμβάνουν ανακατεμένα τις ενδιάμεσες θέσεις στην κατάταξη των μεθόδων

Συνοψίζοντας, η μελέτη πρότεινε ότι η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων τοιχοποιίας με ενσωματωμένα συστήματα μπορεί να αποτελέσει μια ισχυρή λύση στην ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων, βελτιώνοντας τη θερμική άνεση διατηρώντας μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και κόστος έργου. Ειδικότερα, υπογραμμίζει χρήση φυσικών υλικών ως μονωτικά εξαιρετικά συμφέρουσα με καλές αποδόσεις σε όλα τα κριτήρια. Τέλος, τα φυσικά μονωτικά υλικά αναδεικνύονται όχι απλά ως ανταγωνιστικά των συμβατικών και των υπερ-μονωτικών υλικών, αλλά ακόμη και ελκυστικότερα αυτών, καθώς προέκυψαν με διαφορά ως προτιμότερες λύσεις.

7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η παρούσα εργασία προσέφερε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στην επιλογή προκατασκευασμένων τοιχοποιιών από φυσικά υλικά βάσει πολυκριτηριακής ανάλυσης. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετές προοπτικές για μελλοντική έρευνα που θα μπορούσαν να επεκτείνουν και να βελτιώσουν τα αποτελέσματα της μελέτης. Μια σίγουρη πρόταση θα ήταν η προσθήκη επιπλέον κριτηρίων αξιολόγησης, η οποία θα μπορούσε να προσφέρει πληρέστερη και πιο δίκαια αξιολόγηση των εναλλακτικών. Τέτοια κριτήρια θα μπορούσαν να είναι η ακουστική απόδοση, η ανθεκτικότητα, η δυνατότητα ανάληψης φορτίου και η οπτική άνεση στους εσωτερικούς χώρους. Επιπλέον, ένα ερωτηματολόγιο με σημαντικά περισσότερες απαντήσεις και ευρύτερο κύκλο ερωτηθέντων θα μπορούσε να συνεισφέρει περαιτέρω στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Μια ακόμη ιδέα είναι η σύγκριση ακόμη περισσότερων εναλλακτικών, τόσο φυσικών όσο και άλλων χαρακτηριστικών, όπως για παράδειγμα τα υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials - PCM). Όπως πάντα, η σύγκριση με πραγματικά δεδομένα έχει να προσφέρει πολλά οφέλη σε μια μελέτη, επικυρώνοντας τα ευρήματά της και κερδίζοντας μεγαλύτερη αποδοχή από το

κοινό. Ας μην ξεχνάμε πως τα φυσικά υλικά δεν είναι ευρέως εδραιωμένα και οι διαδικασίες επεξεργασίας τους δεν είναι ακόμη βιομηχανοποιημένες σε ευρύ πλαίσιο. Συνεπώς, η εξέταση μιας παρόμοιας ανάλυσης μελλοντικά θα είχε ενδιαφέρον και πιθανόν να αναδείκνυε τα φυσικά υλικά ως ακόμη καλύτερες λύσεις.

Μελλοντικές επεκτάσεις που συνδυάζουν τις ανωτέρω προτάσεις θα μπορούσαν να συμβάλουν στη διαμόρφωση ενός ακόμη πιο αξιόπιστου και πολυδιάστατου εργαλείου λήψης αποφάσεων, υποστηρίζοντας την ευρύτερη εφαρμογή των φυσικών μονωτικών υλικών και των προκατασκευασμένων λύσεων στην ενεργειακή αναβάθμιση του κτιριακού τομέα.

8. Βιβλιογραφία

- [1] Eurostat, Simplified energy balances - annual data, Last update: 08-06-2017.
- [2] Commission welcomes final vote on energy performance of buildings. Brussels, 2018.
- [3] D'Oca, S., Ferrante, A., Ferrer, C., Perneti, R., Gralka, A., Sebastian, R., & Veld, P. op t. (2018). Technical, financial, and social barriers and challenges in deep building renovation: Integration of lessons learned from the H2020 cluster projects. *Buildings*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/buildings8120174>
- [4] Causone, F., Tatti, A., & Alongi, A. (2021). From nearly zero energy to carbon-neutral: Case study of a hospitality building. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(21). <https://doi.org/10.3390/app112110148>
- [5] Chan, A. P. C., Darko, A., & Ameyaw, E. E. (2017). Strategies for promoting green building technologies adoption in the construction industry-An international study. *Sustainability (Switzerland)*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/su9060969>
- [6] Zuo, J., Read, B., Pullen, S., & Shi, Q. (2012). Achieving carbon neutrality in commercial building developments - Perceptions of the construction industry. *Habitat International*, 36(2), 278–286. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2011.10.010>
- [7] Yang, H., & Wang, Y. (2021). SEM - Based construction cost analysis of prefabricated building. *E3S Web of Conferences*, 248. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124803002>
- [8] Katsigiannis, E., Gerogiannis, P. A., Atsonios, I., Bonou, A., Mandilaras, I., Georgi, A., Papadopoulou, S., Tsoutis, C., & Founti, M. (2022a). Energy assessment of a residential building renovated with a novel prefabricated envelope integrating HVAC components. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1078(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012130>
- [9] Katsigiannis, E., Gerogiannis, P. A., Atsonios, I., Bonou, A., Mandilaras, I., Georgi, A., Papadopoulou, S., Tsoutis, C., & Founti, M. (2022b). *Energy assessment of a residential building renovated with a novel prefabricated envelope integrating HVAC components*.
- [10] Galimshina, A., Moustapha, M., Hollberg, A., Padey, P., Lasvaux, S., Sudret, B., & Habert, G. (2022). Bio-based materials as a robust solution for building renovation: A case study. *Applied Energy*, 316. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119102>

- [11] Vašatko, H., Gosch, L., Jauk, J., & Stavric, M. (2022). Basic Research of Material Properties of Mycelium-Based Composites. *Biomimetics*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/biomimetics7020051>
- [12] Abobakr, H., Raji, M., Essabir, H., Bensalah, M. O., Bouhfid, R., & Qaiss, A. el kacem. (2024). Enhancing oriented strand board performance using wheat straw for eco-friendly construction. *Construction and Building Materials*, 417. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135135>
- [13] Lesiecki, M., Kawalerczyk, J., Derkowski, A., Wieruszewski, M., Dziurka, D., & Mirski, R. (2023). Properties of Lightweight Insulating Boards Produced from Triticale Straw Particles. *Materials*, 16(15). <https://doi.org/10.3390/ma16155272>
- [14] Zheng, C., Sun, K., Chen, Y., Zhang, W., & Wu, Y. (2023). Mechanical and thermal properties of environmentally friendly straw boards. *Construction and Building Materials*, 407. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133493>
- [15] Kawecki L.R., Environmental performance of modular fabrication: calculating the carbon footprint of energy used in the construction of a modular home, (PhD thesis), USA: Arizona State University, 2010.
- [16] Julien E., Blanchet P., Gosselin L. (2022). Case-Study: Fully Prefabricated Wood Wall Connection to Improve Building Envelope and On-Site Efficiency, *Buildings* 2022, 12, 2185. <https://doi.org/10.3390/buildings12122185>
- [17] Bofo F. E., Kim J. H., Kim J. T. (2016). Performance of Modular Prefabricated Architecture: Case Study-Based Review and Future Pathways, *Sustainability* 2016, 8, 558. <https://www.mdpi.com/journal/sustainability>
- [18] Van Roosmalen M., Hermann A., Kumar A. (2021). A review of prefabricated elf-sufficient facades with integrated decentralised HVAC and renewable energy generation and storage, *Energy & Buildings* 2021, 248, 111 107. <https://www.mdpi.com/journal/sustainability>
- [19] Atsonios I., Katsigiannis E., Koklas A., Kolaitis D., Founti M., Mouzakis C., Tsoutis C., Adamovsky D., Colom J., Philippen D., Diego A. (2023). Off-site prefabricated hybrid façade systems: A holistic assessment, *Journal of façade design & engineering* 2023, 11. <https://jfde.eu/index.php/jfde/article/view/288>
- [20] Holøs S. B. et al (2019). Process-related risks in refurbishment of dwellings using prefabricated wall elements with integrated PV and ventilation ducts. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 352, 012047. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/352/1/012047>
- [21] Pungercar V., Zhan Q., Ciao Y., Musso F., Dinkel A., Oflug T. (2021). A new retrofitting strategy for the improvement of indoor environment quality and energy efficiency in residential buildings in temperate climate using prefabricated elements, *Energy & Buildings*, 2023, 241, 110951. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110951>

- [22] Rezgui Y., Hamini S., Ramdani., A. (2022). Sustainable Renovation through Modular semantic prefabrication, *IEEE 28th International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC) & 31st International Association For Management of Technology (IAMOT) Joint Conference* , 2023, 241, 110951.
- [23] Zhang C., Hu M., Laclau B., Garnesson T., Yang X., Tukker A. (2021). Energy-carbon-investment payback analysis of prefabricated envelope-cladding system for building energy renovation: Cases in Spain, the Netherlands, and Sweden, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 145, 111077. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111077>
- [24] Liu H., Abidin N. Z. (2024). A Review on Research of Prefabricated Building Costs: Exploring Collaborations, Intellectual Basis, and Research Trends, *Sustainability*, 2024, 16, 9823. <https://doi.org/10.3390/su16229823>
- [25] Avesani S., Andaloro A., Ilardi S., Orlandi M., Terletti S., Fedrizzi R. (2020). Development of an Offsite Prefabricated Rainscreen Façade System for Building Energy Retrofitting, *Journal of façade design & engineering*, 2020, 8, 039.
- [26] Skrzypczak I. (2023). Statistical Quality Inspection Methodology in Production of Precast Concrete Elements, *Materials*, 2023, 16, 431. <https://doi.org/10.3390/ma16010431>
- [27] Skrzypczak I. (2023). Statistical Quality Inspection Methodology in Production of Precast Concrete Elements, *Materials*, 2023, 16, 431. <https://doi.org/10.3390/ma16010431>
- [28] Bergmans Ivar. J.B., Bhochhibhoya S., Van Oorschot J. A.W.H. (2023). Assessing the circular re-design of prefabricated building envelope elements for carbon neutral renovation, *Journal of façade design & engineering*, 2023, 11, 169. <http://doi.org/10.47982/jfde.2023.2.A4>
- [29] Tavares V., Soares N., Raposo N., Marques P., Freire F. (2021). Prefabricated versus conventional construction: Comparing life-cycle impacts of alternative structural materials, *Journal of Building Engineering*, 2021, 41, 102705. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102705>
- [30] Katsigiannis E., Gerogiannis P., Atsonios I., Manolitsis A., Founti M. (2023). SmartWall: Towards residential nZEB with off-site prefabricated hybrid façade systems using a variety of materials, *Journal of façade design & engineering*, 2023, 11, 029. <http://doi.org/10.47982/jfde.2023.2.T2>
- [31] Pihelo P., Lelumees M., Kalamees T. (2016). Influence of Moisture Dry-out on Hygrothermal Performance of Prefabricated Modular Renovation Elements. *Energy Procedia*, 2016, 96, 745-755.
- [32] Buckley B. and Ichniowski T., (2010). Fatalities down, but rate stays flat, *Engineering News-Record*, 2010, 265(6), 13.

- [33] Haas C.T. and Fagerlund W.R., (2002). Preliminary research on prefabrication, pre- assembly, modularization and off-site fabrication in construction, Report, Austin, Texas: The Construction Industry Institute, The University of Texas at Austin, 2002.
- [34] Lawson R.M., Ogden R.G. and Bergin R., (2012). Application of modular construction in highrise buildings, *Journal of Architectural Engineering*, 18(2) (2012) 148– 154.
- [35] O'Connor J.T., O'Brien W.J. and Choi J.O., (2016). Industrial project execution planning: Modularization versus stick-built, *Pract Period Struct Des Constr* 21 (1), (2016) :4015014.
- [36] Velamati S., (2012). Feasibility, benefits and challenges of modular construction in high rise development in the United States: a developers' perspective, Master's thesis, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [37] Mao C., Shen Q., Pan W. and Ye K., (2015). Major barriers to off-site construction: the developer's perspective in China, *Journal of Management in Engineering*, 2015, 31(3), 4014043
- [38] <https://www.infinitivedataexpert.com/el/industry-report/prefabricated-building-system-market>
- [39] Φενέρη Α.Μ., Εφαρμογή μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης στη χωροθέτηση λειτουργιών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας και Ανάπτυξης, Βέροια, 2012.
- [40] Keeney R.L., Raiffa H., Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs. Cambridge university press, 1993.
- [41] Hwang C. L., Yoon K., Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Springer, Berlin, 1981.
- [42] Opricovic S. (1998). Multicriteria optimization of civil engineering systems, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 2 (1), 5–21.
- [43] Opricovic, S., Tzeng G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research* 156 (2), 445–455.
- [44] Opricovic S., Tzeng G. H. (2007). Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. *European Journal of Operational Research*, 178 (2), 514–529.
- [45] Saaty T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process, Planning, Priority Setting, Resource Allocation. McGraw-Hill, New York.
- [46] Naumann F., Data Fusion and Data Quality, Proceedings of the New Techniques and Technologies for Statistics Seminar, Sorrento, Italy, 1998, pp. 147-154.

- [47] Roy B., The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods, Theory and Decision 31 (1991) 49-73.
- [48] Roy B., Multicriteria Methodology for Decision Aiding, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1996.
- [49] Arrow K.J. and Raynaud H., Social Choice and Multicriterion Decision-Making, MIT Press, Cambridge, 1986.
- [50] Brans J.P., Vincke P., Mareschal B. (1986). How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. European journal of operational research, 24(2), 228-238.
- [51] ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2019, Energy standard for buildings except low-rise residential buildings.
- [52] ISO 10211:2007. Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations
- [53] <https://www.oekobaudat.de/en.html>
- [54] EN 15978:2011. Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method
- [55] EN 15804+A1/+A2. Sustainability of construction works - Environmental product declarations – Core rules of the product category of construction products
- [56] ISO 15686-5:2017. Buildings and constructed assets — Service life planning. Part 5: Life-cycle costing
- [57] Fanger P.O., Thermal Comfort-Analysis and Applications in Environmental Engineering, Danish Technical Press, Copenhagen, 1970
- [58] EN ISO 7730:2005 – Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and the PPD indices and local thermal comfort criteria.
- [59] EN 15251:2007 – Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.