



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
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»

Πολυκριτήρια Ανάλυση για τη Βελτιστοποίηση του Ενεργειακού Αποτυπώματος Κτιρίων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταμάτιος Ν. Τσεσμελής

Επιβλέπων : Ευάγγελος Μαρινάκης
Επίκουρος Καθηγητής, ΕΜΠ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



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

Πολυκριτήρια Ανάλυση για τη Βελτιστοποίηση του Ενεργειακού αποτυπώματος Κτιρίου

Επιβλέπων: Ευάγγελος Μαρινάκης
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19^η Φεβρουαρίου 2025.

.....
Δ. Ασκούνης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ι. Ψαρράς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ε. Μαρινάκης
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα Φεβρουάριος, 2025

Σταμάτιος Τσεσμελής του Νικολάου



Διπλωματούχος/Κάτοχος Μεταπτυχιακού Προγράμματος (ΔΠΜΣ) "Τεχνο-Οικονομικά Συστήματα", της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π και του Τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας της Σχολής Ναυτιλίας & Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Πειραιώς."

Copyright © Stamatios N. Tsesmelis, 2025.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη βελτιστοποίηση του ενεργειακού αποτυπώματος των κτιρίων μέσω πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων (MCDA), εστιάζοντας στις μεθόδους AHP και TOPSIS. Η ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων αποτελεί έναν από τους κύριους παράγοντες περιβαλλοντικού και οικονομικού αντίκτυπου, με τις σύγχρονες τάσεις να στοχεύουν στη μείωση της ενεργειακής σπατάλης και την αύξηση της απόδοσης.

Στο πλαίσιο της μελέτης, δημιουργήθηκε ένα εργαλείο ανάλυσης σε αρχείο Excel, το οποίο ενσωματώνει κλιματικά δεδομένα, τεχνικές προδιαγραφές υλικών και επιλογές συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει βασικά χαρακτηριστικά της οικίας και να λάβει αποτελέσματα για την κατανάλωση ενέργειας και το βέλτιστο συνδυασμό παραμέτρων με βάση οικονομικά και ενεργειακά κριτήρια.

Η μέθοδος AHP χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό των βαρών των κριτηρίων, ενώ η TOPSIS εφαρμόστηκε για την ιεράρχηση των 420 εναλλακτικών σεναρίων. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τη σημασία της ορθής επιλογής θερμομόνωσης, παραθύρων και συστήματος θέρμανσης, ενώ παράλληλα επισημαίνονται βελτιώσεις για μελλοντική έρευνα, όπως η ενσωμάτωση πρόσθετων παραμέτρων (φωτοβολταϊκά, ηλεκτρικές συσκευές, αυτοματισμοί).

Τα ευρήματα της μελέτης επιβεβαιώνουν ότι η πολυκριτήρια ανάλυση μπορεί να αποτελέσει ένα πολύτιμο εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων, συμβάλλοντας στην επίτευξη βιώσιμων και οικονομικά αποδοτικών λύσεων.

Λέξεις κλειδιά: Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA), Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων, Μέθοδος AHP, Μέθοδος TOPSIS, Βελτιστοποίηση Ενεργειακής Κατανάλωσης

Abstract

This thesis examines the optimization of the energy footprint of buildings through multi-criteria decision analysis (MCDA), focusing on the AHP and TOPSIS methods. Energy consumption in buildings is a major factor affecting both environmental sustainability and economic efficiency, with modern trends aiming to reduce energy waste and improve performance.

As part of this study, an analysis tool was developed in an Excel file, integrating climate data, technical specifications of materials, and various heating and cooling system options. Users can input key building characteristics and receive results regarding energy consumption and the optimal combination of parameters based on economic and energy efficiency criteria.

The AHP method was employed to determine the weight of the criteria, while TOPSIS was applied to rank 420 alternative scenarios. The results highlight the importance of selecting appropriate insulation, window materials, and heating systems, while also suggesting improvements for future research, such as the integration of additional parameters (photovoltaics, electrical appliances, automation systems).

The findings confirm that multi-criteria analysis can serve as a valuable decision-making tool for building energy upgrades, contributing to the achievement of sustainable and cost-effective solutions.

Keywords: Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA), Building Energy Efficiency, AHP Method, TOPSIS Method, Energy Consumption Optimization

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας αποτελεί ένα σημαντικό σταθμό στην ακαδημαϊκή και επαγγελματική μου πορεία, και δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τη στήριξη και την ενθάρρυνση σημαντικών ανθρώπων στη ζωή μου.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στους επιβλέποντες υποψήφιους διδάκτορες Συμεών Χορόζογλου και Βασίλη Μιχαλακόπουλο, για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές και τη διαρκή υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνάς μου. Η συμβολή τους υπήρξε καταλυτική τόσο στην επιστημονική προσέγγιση του θέματος όσο και στη διαμόρφωση της τελικής εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης την οικογένειά μου, για την αμέριστη συμπαράστασή τους, που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια αυτής της απαιτητικής διαδικασίας.

Ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη οφείλω στη σύζυγό μου, Έφη, που στάθηκε δίπλα μου με αστείρευτη υπομονή, κατανόηση και αγάπη, στηρίζοντάς με σε κάθε βήμα αυτής της προσπάθειας. Χωρίς τη δική της υποστήριξη, η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας θα ήταν πολύ πιο δύσκολη.

Αυτή η διπλωματική εργασία είναι αφιερωμένη στον γιο μου, Νικόλα, που στους 18 του μόλις μήνες αποτελεί την μεγαλύτερη έμπνευση και κίνητρό μου. Εύχομαι να έχει πάντα το πάθος για γνώση, την περιέργεια να ανακαλύπτει τον κόσμο και τη δύναμη να κυνηγά τα όνειρά του.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	7
Ευχαριστίες	9
Κεφάλαιο 1	13
1.1 Παρουσίαση του προβλήματος: Η ανάγκη για ενεργειακή βελτιστοποίηση κτιρίων	13
1.1.1 Εισαγωγή στην Ενεργειακή Κατανάλωση των Κτιρίων	13
1.1.2 Ανάγκη για Συστηματική Προσέγγιση στη Βελτιστοποίηση της Ενεργειακής Απόδοσης	14
1.1.3 Συμπέρασμα	15
1.2 Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA) και η Εφαρμογή της στην Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων	15
1.2.1 Τι είναι η Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA);	15
1.2.2 Χρήση της MCDA στην Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων	16
1.2.3 Κύριες Μέθοδοι MCDA και Εφαρμογή τους στα Κτίρια	16
1.2.4 Επιλογή Κατάλληλης Μεθόδου MCDA για την Παρούσα Μελέτη	18
1.3 Συμπεράσματα	18
Κεφάλαιο 2	20
2.1 Εισαγωγή στη Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	20
2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων ...	21
2.2.1 Κλιματικοί Παράγοντες	21
2.2.2 Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά του Κτιρίου	22
2.2.3 Τεχνολογίες Θέρμανσης, Ψύξης και Αερισμού	23
2.2.4 Συμπεράσματα	23
2.3 Σύγχρονες Πρακτικές Ενεργειακής Εξοικονόμησης	23
2.3.1 Παθητικές Τεχνικές Ενεργειακής Εξοικονόμησης	24
2.3.2 Ενεργητικές Τεχνικές Ενεργειακής Εξοικονόμησης	25
2.3.3 Υβριδικές Προσεγγίσεις & Έξυπνα Κτίρια	25
2.3.4 Συμπέρασμα	26
2.4 Χρήση MCDA στην Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων	26
2.4.1 Γιατί να Χρησιμοποιηθεί MCDA στην Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων;	27
2.4.2 Οι Κύριες Μέθοδοι MCDA για την Ανάλυση Ενεργειακής Απόδοσης	27
2.4.3 Η Σημασία της Επιλογής Κριτηρίων στην MCDA	28
2.4.4 Συμπέρασμα	29
2.5 Συγκριτική Ανάλυση Μελετών MCDA στην Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων	29
2.5.1 Ανάλυση Επιλεγμένων Μελετών MCDA για Κτίρια	30
2.5.2 Συγκριτική Αξιολόγηση των Μεθόδων MCDA	31
2.5.3 Συμπεράσματα	31
Κεφάλαιο 3	32
3.1 Γενική Περιγραφή της Μεθοδολογίας	32
3.1.1 Στάδια της Μεθοδολογίας	32
3.1.2 Εργαλεία και Πηγές Δεδομένων	33
3.1.3 Συμπέρασμα	33

3.2	Οργάνωση Δεδομένων	34
3.2.1	Πηγές Δεδομένων	34
3.2.2	Δομή της Βάσης Δεδομένων	34
3.2.3	Εισαγωγή Δεδομένων από τον Χρήστη στο Αρχείο Excel	45
3.2.4	Υπολογισμοί Ενεργειακών Απωλειών και Κατανάλωσης	48
3.2.5	Υπολογισμός Κόστους Θέρμανσης & Ψύξης	51
3.3	Επιλογή Κριτηρίων	52
3.3.1	Επιλογή Κριτηρίων για τη MCDA	52
3.3.2	Βάρη Κριτηρίων μέσω AHP	52
3.3.3	Συμπέρασμα	56
3.4	Εφαρμογή της Μεθόδου TOPSIS	57
3.4.1	Εισαγωγή στη Μέθοδο TOPSIS	57
3.4.2	Βασικές Αρχές της TOPSIS	57
3.4.3	Βήματα Εφαρμογής της TOPSIS	57
Κεφάλαιο 4.....		61
4.1	Υπολογισμός βαρών κριτηρίων μέσω της AHP	61
4.2	Εφαρμογή της μεθόδου TOPSIS	63
4.2.1	Διαμόρφωση των Εναλλακτικών Λύσεων	63
4.2.2	Διαδικασία Εφαρμογής της Μεθόδου TOPSIS	64
4.2.3	Παρουσίαση των 20 Καλύτερων Εναλλακτικών	66
Κεφάλαιο 5.....		69
5.1	Ανάλυση των Αποτελεσμάτων	69
5.1.1	Περιορισμοί της Παρούσας Μεθόδου Υπολογισμού	69
5.2	Βελτιώσεις για Μελλοντική Έρευνα	70
5.2.1	Αναθεώρηση της Μεθοδολογίας Υπολογισμού της Ενεργειακής Κατανάλωσης	70
5.2.2	Ενσωμάτωση Νέων Κριτηρίων Αξιολόγησης	71
5.3	Συμπέρασμα	71
Βιβλιογραφία.....		72

Πίνακας 1. Επιλεγμένες Μελέτες MCDA.....	30
Πίνακας 2. Είδη εξωτερικής θερμομόνωσης	35
Πίνακας 3. Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας συστήματος εξωτερικός σοβάς - τούβλο - εσωτερικός σοβάς.....	36
Πίνακας 4. Δεδομένα παραθύρων	36
Πίνακας 5.Στοιχεία Κεντρικής Θέρμανσης.....	37
Πίνακας 6. Στοιχεία απόδοσης και κόστους κλιματιστικών και αντλιών θερμότητας	38
Πίνακας 7.Στοιχεία απόδοσης και κόστους καυστήρων	39
Πίνακας 8.Μέση θερμοκρασία ημέρας και νύχτας ανά μήνα (°C).....	40
Πίνακας 9.Μέση ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα (kWh/m ²).	42
Πίνακας 10.Μέση διάρκεια ημέρας και νύχτας σε ώρες ανά μήνα (h).	44
Πίνακας 11.Ένταση σχετικής σημασίας των κριτηρίων.....	54
Πίνακας 12. Συγκρίσεων	54
Πίνακας 13. Τιμές RI.	56
Πίνακας 14.Παράμετροι δημιουργίας εναλλακτικών.	64
Πίνακας 15.Οι 20 Καλύτερες Εναλλακτικές.....	67

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1	46
Εικόνα 2	47
Εικόνα 3	47
Εικόνα 4. Συνολικό Διάγραμμα Ροής	68

Κεφάλαιο 1

1.1 Παρουσίαση του προβλήματος: Η ανάγκη για ενεργειακή βελτιστοποίηση κτιρίων

1.1.1 Εισαγωγή στην Ενεργειακή Κατανάλωση των Κτιρίων

Η ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν το περιβάλλον, την οικονομία και την ποιότητα ζωής. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA, 2020), τα κτίρια καταναλώνουν περίπου 40% της συνολικής παγκόσμιας ενέργειας και ευθύνονται για το 36% των εκπομπών CO₂. Αυτά τα ποσοστά καθιστούν σαφές ότι ο τομέας των κτιρίων πρέπει να βελτιώσει την ενεργειακή του απόδοση μέσω τεχνολογικών καινοτομιών και στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας.

Η ανάγκη για ενεργειακή βελτιστοποίηση των κτιρίων προκύπτει από διάφορους λόγους, οι οποίοι χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

1. Περιβαλλοντική Διάσταση

Η κλιματική αλλαγή και η εξάντληση των φυσικών πόρων καθιστούν απαραίτητη τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων. Ο τομέας των κατασκευών συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου λόγω της χρήσης ορυκτών καυσίμων για θέρμανση, ψύξη και ηλεκτρική ενέργεια.

Σύμφωνα με τους Pombo et al. (2016), οι κυριότερες πηγές ενεργειακής κατανάλωσης στα κτίρια είναι:

- Η θέρμανση και η ψύξη των εσωτερικών χώρων (50-60% της συνολικής κατανάλωσης).
- Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για φωτισμό και λειτουργία συσκευών.
- Η θερμική απώλεια μέσω των τοίχων, παραθύρων και της οροφής λόγω ανεπαρκούς μόνωσης.

Οι σύγχρονες ενεργειακές πολιτικές, όπως η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal, 2019), επιβάλλουν μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας με στόχο τη μείωση των εκπομπών CO₂ των κτιρίων κατά 55% έως το 2030.

2. Οικονομική Διάσταση

Η ενεργειακή κατανάλωση έχει άμεσο οικονομικό αντίκτυπο τόσο για τους ιδιοκτήτες και ενοικιαστές όσο και για την εθνική οικονομία. Οι υψηλές τιμές ενέργειας και το αυξανόμενο κόστος των καυσίμων καθιστούν τη μείωση της ενεργειακής σπατάλης ζήτημα ζωτικής σημασίας.

Η υιοθέτηση ενεργειακά αποδοτικών λύσεων, όπως, θερμομονωτικά υλικά, υψηλής απόδοσης παράθυρα, συστήματα έξυπνης διαχείρισης ενέργειας, οδηγεί σε μακροπρόθεσμη μείωση του κόστους για τους χρήστες, καθώς μειώνει τις ενεργειακές απώλειες και περιορίζει την ανάγκη για επιπλέον κατανάλωση ενέργειας.

Σύμφωνα με τον IEA (2021), οι ενεργειακές επενδύσεις σε κτίρια μπορούν να οδηγήσουν σε εξοικονόμηση κόστους 20-40%, καθιστώντας τις οικονομικά βιώσιμες ακόμη και χωρίς κρατικές επιδοτήσεις.

3. Κοινωνική Διάσταση

Η ποιότητα ζωής μέσα σε ένα κτίριο επηρεάζεται από το θερμικό περιβάλλον, την ακουστική άνεση και την ποιότητα του αέρα. Τα ενεργειακά αποδοτικά κτίρια προσφέρουν:

- Καλύτερη θερμική άνεση για τους ενοίκους.
- Μειωμένες διακυμάνσεις θερμοκρασίας, ειδικά σε περιοχές με ακραίες κλιματικές συνθήκες.
- Αύξηση της αξίας των ακινήτων, καθώς τα ενεργειακά αποδοτικά κτίρια έχουν υψηλότερη εμπορική αξία στην αγορά.

Μελέτες όπως των Lizana et al. (2016) δείχνουν ότι οι επενδύσεις σε ενεργειακή απόδοση έχουν θετικό αντίκτυπο στη δημόσια υγεία, καθώς μειώνουν τη χρήση ρυπογόνων καυσίμων και βελτιώνουν την ποιότητα του αέρα.

1.1.2 Ανάγκη για Συστηματική Προσέγγιση στη Βελτιστοποίηση της Ενεργειακής Απόδοσης

Δεδομένων των παραπάνω προβλημάτων, η ανάγκη για συστηματική βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων είναι επιτακτική.

Προκλήσεις και Εμπόδια

Παρότι οι τεχνολογίες βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης είναι διαθέσιμες, η επιλογή των βέλτιστων λύσεων είναι δύσκολη λόγω αντικρουόμενων παραμέτρων:

- Το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης (αν και η απόσβεση γίνεται σταδιακά).
- Η ανάγκη για εξισορρόπηση κόστους και ενεργειακού οφέλους.
- Οι κλιματικές διαφοροποιήσεις, που καθιστούν δύσκολη τη γενίκευση των βέλτιστων λύσεων.

Για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα, η Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA) έχει αναδειχθεί ως μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους για την αξιολόγηση και επιλογή ενεργειακά αποδοτικών λύσεων στα κτίρια.

1.1.3 Συμπέρασμα

Η ανάγκη για ενεργειακή βελτιστοποίηση κτιρίων προκύπτει από περιβαλλοντικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς λόγους. Η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης συμβάλλει στη μείωση του κόστους, στη βελτίωση της ποιότητας ζωής και στη μείωση των εκπομπών CO₂.

Ωστόσο, η επιλογή των βέλτιστων λύσεων δεν είναι εύκολη και απαιτεί δομημένη λήψη αποφάσεων. Στο επόμενο υποκεφάλαιο θα παρουσιαστεί η Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA), η οποία χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση διαφορετικών εναλλακτικών λύσεων με βάση πολλαπλά κριτήρια.

1.2 Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA) και η Εφαρμογή της στην Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων

1.2.1 Τι είναι η Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA);

Η Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Analysis - MCDA) είναι ένα σύνολο μεθοδολογιών που επιτρέπουν τη λήψη αποφάσεων όταν υπάρχουν πολλαπλά και συχνά αντικρουόμενα κριτήρια.

Η κλασσική ανάλυση αποφάσεων βασίζεται σε μία κύρια παράμετρο (π.χ., κόστος), όμως σε πολύπλοκα προβλήματα, όπως η ενεργειακή απόδοση κτιρίων, υπάρχουν πολλοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- Ενεργειακή κατανάλωση (kWh/m²)
- Κόστος εφαρμογής (€)
- Περιβαλλοντικός αντίκτυπος (εκπομπές CO₂)
- Άνεση των χρηστών

Η MCDA βοηθά στη συστηματική σύγκριση και επιλογή της βέλτιστης λύσης με βάση σταθμισμένα κριτήρια, επιτρέποντας μια πιο ισορροπημένη και αντικειμενική απόφαση.

1.2.2 Χρήση της MCDA στην Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων

Η MCDA έχει ευρεία εφαρμογή στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Οι πιο συνηθισμένες χρήσεις της περιλαμβάνουν:

- Αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων θερμομόνωσης και εξοπλισμού θέρμανσης/ψύξης.
- Σύγκριση υλικών παραθύρων και δομικών στοιχείων.
- Εκτίμηση της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας ενεργειακών επεμβάσεων.
- Ανάλυση κόστους - οφέλους για την εφαρμογή ενεργειακών πολιτικών.

Σύμφωνα με μελέτες των Mardani et al. (2016) και Wang et al. (2020), η MCDA χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο για τη διαμόρφωση ενεργειακών στρατηγικών λόγω της ικανότητάς της να συνδυάζει ποσοτικά και ποιοτικά δεδομένα.

1.2.3 Κύριες Μέθοδοι MCDA και Εφαρμογή τους στα Κτίρια

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι MCDA που χρησιμοποιούνται για την ενεργειακή ανάλυση των κτιρίων. Οι πιο διαδεδομένες είναι οι εξής:

1. Μέθοδος AHP (Analytic Hierarchy Process)

Περιγραφή: Το AHP αναπτύχθηκε από τον Saaty (1980) και είναι μια ιεραρχική μέθοδος που επιτρέπει τον υπολογισμό των βαρών των κριτηρίων μέσω συγκριτικής αξιολόγησης.

Εφαρμογή στην ενεργειακή ανάλυση:

- Χρησιμοποιείται για να καθορίσει ποιο κριτήριο είναι πιο σημαντικό στη λήψη αποφάσεων (π.χ., τι βαρύτητα θα δοθεί στο κόστος σε σχέση με την ενεργειακή κατανάλωση).
- Επιτρέπει τη χρήση πίνακα σύγκρισης ζευγών για να υπολογιστούν οι βέλτιστοι συντελεστές βαρύτητας.
- Πολύ χρήσιμο για ποιοτικές κρίσεις που δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν άμεσα.

Παράδειγμα εφαρμογής:

Σε μια μελέτη των Motuzienė & Rogoža (2016), το AHP χρησιμοποιήθηκε για να προσδιορίσει τη βέλτιστη επιλογή θέρμανσης σε κτίρια κατοικιών, λαμβάνοντας υπόψη κόστος, απόδοση, εκπομπές CO₂ και αποδοτικότητα.

2. Μέθοδος TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)

Περιγραφή: Το TOPSIS είναι μια κατάταξη εναλλακτικών λύσεων με βάση την απόστασή τους από την ιδανική λύση.

Εφαρμογή στην ενεργειακή ανάλυση:

- Κανονικοποιεί τα δεδομένα για να κάνει συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών μονάδων (π.χ., κόστος σε € και ενεργειακή απόδοση σε kWh/m²).
- Χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει πολλαπλές εναλλακτικές λύσεις με βάση πολλαπλά κριτήρια.
- Βασίζεται στην εύρεση της βέλτιστης και της χειρότερης λύσης και στη σύγκριση των υπολοίπων εναλλακτικών με βάση αυτές.

Παράδειγμα εφαρμογής:

Σύμφωνα με τους Hu et al. (2019), η TOPSIS χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή του καλύτερου τύπου εξωτερικής θερμομόνωσης για κτίρια

κατοικιών, λαμβάνοντας υπόψη κόστος, ενεργειακή απόδοση και οικολογικό αποτύπωμα.

3. Άλλες δημοφιλείς μέθοδοι MCDA

ELECTRE (Elimination and Choice Expressing Reality): Κατάλληλη για σύνθετα προβλήματα που περιλαμβάνουν συνθήκες αποκλεισμού (π.χ., συγκεκριμένα υλικά δεν είναι διαθέσιμα σε όλες τις περιοχές).

PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation): Χρησιμοποιείται όταν υπάρχει ανάγκη για εξέταση μεγάλου αριθμού κριτηρίων και επιλογών.

1.2.4 Επιλογή Κατάλληλης Μεθόδου MCDA για την Παρούσα Μελέτη

Για την παρούσα εργασία, η ανάλυση θα βασιστεί στις μεθόδους AHP και TOPSIS, επειδή η μέθοδος AHP (Analytic Hierarchy Process) επιτρέπει τον υπολογισμό των βαρών των κριτηρίων με δομημένο τρόπο.

Η μέθοδος TOPSIS είναι ιδανική για την αξιολόγηση πολλαπλών ενεργειακών επιλογών και την επιλογή της βέλτιστης λύσης.

Ο συνδυασμός αυτών των δύο μεθόδων χρησιμοποιείται ευρέως σε παρόμοιες μελέτες και προσφέρει αξιόπιστα και επεξηγήσιμα αποτελέσματα.

Η Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA) αποτελεί ένα εξαιρετικό εργαλείο για τη συστηματική αξιολόγηση διαφορετικών ενεργειακών λύσεων σε κτίρια. Οι μέθοδοι AHP και TOPSIS επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση του ενεργειακού αποτυπώματος λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλά κριτήρια, όπως κόστος, ενεργειακή απόδοση και βιωσιμότητα.

1.3 Συμπεράσματα

Η ανάγκη για ενεργειακή βελτιστοποίηση των κτιρίων αποτελεί μια από τις βασικές προκλήσεις της σύγχρονης εποχής. Η συνεχής αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης, σε συνδυασμό με τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς και τις νέες πολιτικές βιωσιμότητας, επιβάλλει την υιοθέτηση νέων μεθόδων

βελτιστοποίησης που βασίζονται σε πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων (MCDA).

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η σπουδαιότητα της ενεργειακής βελτιστοποίησης των κτιρίων και οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας, όπως:

- Η θερμομόνωση (εξωτερική μόνωση και ποιότητα των κουφωμάτων).
- Το σύστημα θέρμανσης και ψύξης (λέβητες, αντλίες θερμότητας κ.λπ.).
- Οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε περιοχή.

Παράλληλα, αναλύθηκε η Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA) και οι κυριότερες μέθοδοί της, οι οποίες επιτρέπουν την αντικειμενική σύγκριση διαφορετικών επιλογών βάσει πολλαπλών κριτηρίων.

Βασικά σημεία που προέκυψαν:

1. Η Μέθοδος AHP είναι εξαιρετικά χρήσιμη για τον καθορισμό βαρών στα κριτήρια λήψης αποφάσεων.
2. Η Μέθοδος TOPSIS επιτρέπει την ιεράρχηση εναλλακτικών λύσεων με βάση την εγγύτητά τους στην ιδανική λύση.
3. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων προσφέρει ένα αξιόπιστο και συστηματικό εργαλείο για την επιλογή της βέλτιστης λύσης θερμομόνωσης και θέρμανσης στα κτίρια.
4. Η MCDA μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με τις ανάγκες κάθε περιοχής, επιτρέποντας τη διαμόρφωση εξειδικευμένων στρατηγικών ενεργειακής εξοικονόμησης.

Η χρήση πολυκριτήριας ανάλυσης επιτρέπει τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης, ελαχιστοποιώντας παράλληλα το κόστος και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση προηγούμενων ερευνών, εστιάζοντας στις μεθόδους MCDA που έχουν χρησιμοποιηθεί στον τομέα της ενεργειακής βελτιστοποίησης κτιρίων.

Κεφάλαιο 2

2.1 Εισαγωγή στη Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων αποτελεί βασικό τομέα έρευνας τα τελευταία χρόνια, λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων για βιώσιμες και ενεργειακά αποδοτικές υποδομές. Δεδομένης της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας στον τομέα των κατασκευών, η επιστημονική κοινότητα έχει εστιάσει στη διερεύνηση μεθόδων βελτιστοποίησης της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων, με σκοπό τη μείωση των εκπομπών CO₂ και του συνολικού ενεργειακού κόστους.

Η χρήση πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων (MCDA) έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμη για την επιλογή των καλύτερων συνδυασμών θερμομόνωσης, κουφωμάτων, και συστημάτων θέρμανσης. Μέθοδοι όπως το AHP και το TOPSIS, που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιούνται συχνά για τη σύγκριση διαφορετικών εναλλακτικών με στόχο την ενεργειακή αποδοτικότητα.

Στο παρόν κεφάλαιο, πραγματοποιείται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση προηγούμενων ερευνών που έχουν ασχοληθεί με τη σημασία της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, τις σύγχρονες μεθόδους και στρατηγικές για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, τη χρήση της Πολυκριτήριας Ανάλυσης Αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση ενεργειακών συστημάτων και συγκριτικές μελέτες που εφάρμοσαν τη μέθοδο AHP και τη μέθοδο TOPSIS στον τομέα των κτιρίων.

Η ανασκόπηση αυτή θα στηριχθεί σε ακαδημαϊκές δημοσιεύσεις, βιβλία και επιστημονικά άρθρα που έχουν δημοσιευθεί τα τελευταία χρόνια. Στόχος είναι να αναλυθεί η τρέχουσα γνώση στο πεδίο και να εντοπιστούν τα κενά στη βιβλιογραφία, ώστε να δικαιολογηθεί η εφαρμογή των μεθόδων AHP και TOPSIS στην παρούσα μελέτη.

Στα επόμενα υποκεφάλαια, θα παρουσιαστούν αναλυτικά:

- Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων.
- Οι σύγχρονες πρακτικές ενεργειακής εξοικονόμησης.
- Η εφαρμογή της πολυκριτήριας ανάλυσης σε ενεργειακές μελέτες.

2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων

Η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων εξαρτάται από πολλαπλούς παράγοντες που σχετίζονται τόσο με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά όσο και με τις κλιματικές συνθήκες και τη συμπεριφορά των χρηστών. Σύμφωνα με μελέτες των Pombo et al. (2016) και Lizana et al. (2016), η σωστή διαχείριση αυτών των παραμέτρων μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας έως και 40%.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή κατανάλωση ενός κτιρίου μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

1. Κλιματικοί παράγοντες
2. Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά
3. Τεχνολογίες θέρμανσης, ψύξης και αερισμού
4. Συμπεριφορά και προτιμήσεις των χρηστών

2.2.1 Κλιματικοί Παράγοντες

Οι κλιματικές συνθήκες επηρεάζουν άμεσα την ενεργειακή απόδοση ενός κτιρίου, καθώς καθορίζουν το επίπεδο των θερμικών απωλειών και κερδών. Σύμφωνα με τον International Energy Agency (IEA, 2020), τα βασικά κλιματικά δεδομένα που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας είναι:

- Μέση θερμοκρασία ημέρας & νύχτας: Υψηλές θερμοκρασίες αυξάνουν την κατανάλωση κλιματισμού, ενώ χαμηλές θερμοκρασίες απαιτούν περισσότερη θέρμανση.
- Ηλιακή ακτινοβολία: Αυξάνει τη θερμική φόρτιση του κτιρίου, ειδικά τους καλοκαιρινούς μήνες.
- Υγρασία: Υψηλά επίπεδα υγρασίας αυξάνουν την αίσθηση δυσφορίας, επηρεάζοντας την ανάγκη για ψύξη ή αερισμό.
- Ταχύτητα ανέμου: Επηρεάζει τις θερμικές απώλειες μέσω των ανοιγμάτων του κτιρίου.

Η έρευνα των Karatasou et al. (2018) έδειξε ότι τα κτίρια σε περιοχές με έντονες διακυμάνσεις θερμοκρασίας καταναλώνουν έως και 30% περισσότερη ενέργεια για θέρμανση και ψύξη, συγκριτικά με κτίρια σε σταθερά κλίματα.

2.2.2 Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά του Κτιρίου

Τα δομικά στοιχεία του κτιρίου παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ενεργειακή του συμπεριφορά. Στοιχεία όπως η μόνωση, τα παράθυρα και ο προσανατολισμός καθορίζουν τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση.

Θερμομόνωση

Η ποιότητα της εξωτερικής θερμομόνωσης είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που μειώνει τις θερμικές απώλειες. Σύμφωνα με τους Paradoopoulos et al. (2019) η σωστή θερμομόνωση μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας έως 50% σε ψυχρά κλίματα. Επίσης, η προσθήκη θερμομονωτικών υλικών στην τοιχοποιία μειώνει τις απώλειες θερμότητας τον χειμώνα και τα θερμικά κέρδη το καλοκαίρι. Τέλος, υλικά όπως διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) και πετροβάμβακας είναι εξαιρετικά αποτελεσματικά.

Παράθυρα και Υαλοπίνακες

Τα παράθυρα είναι βασική πηγή θερμικών απωλειών και κερδών. Σύμφωνα με τον European Building Performance Institute (2021) τα διπλά ή τριπλά τζάμια μπορούν να μειώσουν τις απώλειες κατά 40-60%, ενώ τα χαμηλού συντελεστή εκπομπής (Low-E) τζάμια συμβάλλουν στη μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο κτίριο, μειώνοντας την ανάγκη για ψύξη. Σημαντικό ρόλο παίζει ο προσανατολισμός των παραθύρων, ο οποίος επηρεάζει τα ηλιακά κέρδη (π.χ., τα νότια παράθυρα επιτρέπουν μέγιστη εκμετάλλευση της ηλιακής θερμότητας τον χειμώνα).

Προσανατολισμός Κτιρίου

Ο προσανατολισμός του κτιρίου μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας έως 20%. Οι Givoni et al. (2017) προτείνουν νότιο προσανατολισμό για μέγιστη ηλιακή εκμετάλλευση τον χειμώνα, μικρά ανοίγματα στη βόρεια πλευρά

για μείωση των θερμικών απωλειών και χρήση σκίασης (πέργκολες, εξωτερικά ρολά) για έλεγχο των ηλιακών κερδών το καλοκαίρι.

2.2.3 Τεχνολογίες Θέρμανσης, Ψύξης και Αερισμού

Τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης είναι οι μεγαλύτεροι καταναλωτές ενέργειας στα κτίρια. Σύμφωνα με τους Balaras et al. (2020), η επιλογή συστημάτων υψηλής απόδοσης μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας έως 35-50%. Ισχύει ότι:

- Λέβητες συμπύκνωσης: 20-30% πιο αποδοτικοί από τους συμβατικούς λέβητες.
- Αντλίες θερμότητας: 3-4 φορές πιο αποδοτικές από τα συμβατικά συστήματα.
- Φωτοβολταϊκά & Ανανεώσιμες Πηγές: Συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

2.2.4 Συμπεράσματα

Η ενεργειακή κατανάλωση ενός κτιρίου καθορίζεται από πολλούς παράγοντες, όπως η μόνωση, τα παράθυρα, το σύστημα θέρμανσης και οι κλιματικές συνθήκες.

Οι κατάλληλες παρεμβάσεις και τεχνολογικές επιλογές μπορούν να μειώσουν την ενεργειακή σπατάλη, να αυξήσουν την άνεση των ενοίκων και να βελτιώσουν τη βιωσιμότητα των κτιρίων.

2.3 Σύγχρονες Πρακτικές Ενεργειακής Εξοικονόμησης

Η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων αποτελεί βασικό στόχο της σύγχρονης βιώσιμης αρχιτεκτονικής και της ενεργειακής πολιτικής. Οι προηγμένες τεχνολογίες και τα νέα πρότυπα κατασκευών στοχεύουν στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, την αύξηση της αυτονομίας των κτιρίων και την προώθηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ).

Στο παρόν υποκεφάλαιο, παρουσιάζονται οι πιο σύγχρονες πρακτικές ενεργειακής εξοικονόμησης, που εφαρμόζονται τόσο σε νεόδμητα όσο και σε

υφιστάμενα κτίρια, σύμφωνα με τις τελευταίες ερευνητικές μελέτες και τις διεθνείς ενεργειακές πολιτικές.

2.3.1 Παθητικές Τεχνικές Ενεργειακής Εξοικονόμησης

Οι παθητικές τεχνικές αφορούν αρχιτεκτονικές λύσεις και δομικές επιλογές που μειώνουν τις θερμικές απώλειες και τα ενεργειακά φορτία χωρίς την ανάγκη μηχανικών συστημάτων.

Βιοκλιματικός Σχεδιασμός

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός περιλαμβάνει τεχνικές που προσαρμόζουν τα κτίρια στις τοπικές κλιματικές συνθήκες. Οι Givoni et al. (2017) αναφέρουν ότι η ορθή τοποθέτηση ανοιγμάτων και η θερμική μάζα μειώνουν τις ενεργειακές απαιτήσεις έως 30%.

- Νότιος προσανατολισμός για εκμετάλλευση της ηλιακής θερμότητας.
- Σκίαση με πέργκολες, εξώστες, δέντρα για έλεγχο θερμικών κερδών.
- Φυσικός αερισμός για μείωση της ανάγκης κλιματισμού.

Θερμομόνωση & Μονωτικά Υλικά

Σύμφωνα με τους Papadopoulos et al. (2019), η χρήση θερμομονωτικών υλικών στις τοιχοποιίες, τις στέγες και τα δάπεδα μειώνει την κατανάλωση θέρμανσης και ψύξης κατά 40-50%.

Τα πιο αποδοτικά υλικά περιλαμβάνουν:

- Διογκωμένη πολυστερίνη (EPS): Χαμηλό κόστος, καλή θερμομονωτική ικανότητα.
- Πετροβάμβακας: Φυσικό υλικό με εξαιρετική απόδοση.
- Ανακλαστικά υλικά: Χρησιμοποιούνται σε στέγες για μείωση των θερμικών κερδών.

Υψηλής Απόδοσης Κουφώματα & Υαλοπίνακες

Τα διπλά και τριπλά τζάμια με επίστρωση χαμηλής εκπομπής (Low-E) μειώνουν τις απώλειες θερμότητας κατά 50-60%. Οι European Building Performance Institute (2021) τονίζουν ότι η σωστή επιλογή παραθύρων συμβάλλει σημαντικά στην ενεργειακή εξοικονόμηση.

- Τριπλά τζάμια: Κατάλληλα για ψυχρά κλίματα.
- Ηλεκτροχρωματικά τζάμια: Ρυθμίζουν τη διαπερατότητα φωτός και θερμότητας.

2.3.2 Ενεργητικές Τεχνικές Ενεργειακής Εξοικονόμησης

Οι ενεργητικές τεχνικές περιλαμβάνουν προηγμένα μηχανικά συστήματα που αυξάνουν την ενεργειακή απόδοση.

Αντλίες Θερμότητας

Οι αντλίες θερμότητας είναι έως 4 φορές πιο αποδοτικές από τους συμβατικούς λέβητες. Οι Balaras et al. (2020) αναφέρουν ότι η εγκατάσταση αντλιών θερμότητας μπορεί να μειώσει έως 50% την κατανάλωση θέρμανσης.

Φωτοβολταϊκά Συστήματα (PV)

Τα φωτοβολταϊκά μειώνουν την εξάρτηση από το ηλεκτρικό δίκτυο. Σύμφωνα με τον IEA (2021), τα net-metering συστήματα προσφέρουν σημαντική μείωση των λογαριασμών ηλεκτρικού ρεύματος.

- Φωτοβολταϊκά σε στέγες για μέγιστη απόδοση.
- Ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά σε παράθυρα για συμπληρωματική παραγωγή ενέργειας.

Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας (BEMS)

Τα Building Energy Management Systems (BEMS) χρησιμοποιούν αισθητήρες και τεχνητή νοημοσύνη για τη βέλτιστη ρύθμιση της ενεργειακής κατανάλωσης. Οι Ongpeng et al. (2022) αναφέρουν ότι τέτοια συστήματα μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας έως 25-35%.

2.3.3 Υβριδικές Προσεγγίσεις & Έξυπνα Κτίρια

Τα έξυπνα κτίρια συνδυάζουν παθητικές και ενεργητικές τεχνικές, χρησιμοποιώντας αισθητήρες, τεχνητή νοημοσύνη και IoT για μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας. Έξυπνοι θερμοστάτες για βέλτιστη ρύθμιση της

θερμοκρασίας, αυτόματες περσίδες που προσαρμόζονται στον ήλιο και έξυπνος φωτισμός LED με αισθητήρες κίνησης είναι μερικές προσεγγίσεις στην κατεύθυνση των έξυπνων κτιρίων.

Σύμφωνα με τους Karmellos et al. (2015), οι υβριδικές στρατηγικές βελτιστοποιούν την ενεργειακή απόδοση λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες του χρήστη και τις καιρικές συνθήκες σε πραγματικό χρόνο.

2.3.4 Συμπέρασμα

Η εφαρμογή σύγχρονων πρακτικών ενεργειακής εξοικονόμησης μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση ενός κτιρίου έως και 70%, εφόσον συνδυάζονται παθητικές, ενεργητικές και υβριδικές λύσεις.

- Τα παθητικά συστήματα (μόνωση, παράθυρα, σχεδιασμός) είναι η βάση της ενεργειακής εξοικονόμησης.
- Τα ενεργητικά συστήματα (αντλίες θερμότητας, ΑΠΕ, αυτοματισμοί) μεγιστοποιούν την αποδοτικότητα.
- Οι έξυπνες τεχνολογίες επιτρέπουν τη συνεχή προσαρμογή στις ανάγκες των χρηστών.

Η επόμενη ενότητα θα παρουσιάσει τη χρήση της Πολυκριτήριας Ανάλυσης Αποφάσεων (MCDA) για την επιλογή της βέλτιστης ενεργειακής στρατηγικής.

2.4 Χρήση MCDA στην Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων

Η Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA) έχει καθιερωθεί ως ένα απαραίτητο εργαλείο στη μελέτη της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Οι σύγχρονες προκλήσεις απαιτούν λύσεις που να λαμβάνουν υπόψη πολλαπλά κριτήρια, όπως ενεργειακή κατανάλωση, κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αντοχή υλικών και διάρκεια ζωής.

Η MCDA επιτρέπει την δομημένη αξιολόγηση διαφορετικών επιλογών, οδηγώντας στη βέλτιστη στρατηγική ενεργειακής απόδοσης.

2.4.1 Γιατί να Χρησιμοποιηθεί MCDA στην Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων;

Η επιλογή της κατάλληλης ενεργειακής στρατηγικής δεν είναι απλή υπόθεση, καθώς οι παράμετροι της κατανάλωσης ενέργειας είναι πολυδιάστατες. Σύμφωνα με τους Mardani et al. (2016), οι πιο συνηθισμένες προσεγγίσεις ενεργειακής βελτιστοποίησης βασίζονταν σε οικονομικά μοντέλα, τα οποία όμως δεν λαμβάνουν υπόψη την πολυπλοκότητα των ενεργειακών απαιτήσεων.

Η MCDA, αντίθετα, επιτρέπει αντικειμενική σύγκριση εναλλακτικών λύσεων με βάση πολλαπλά κριτήρια, ισορροπία μεταξύ κόστους και ενεργειακής αποδοτικότητας και προσαρμογή των ενεργειακών στρατηγικών σε συγκεκριμένες ανάγκες.

Η έρευνα των Karmellos et al. (2015) έδειξε ότι η MCDA είναι πιο αποδοτική από τις κλασικές οικονομικές αναλύσεις, καθώς λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση διαφορετικών κριτηρίων, οδηγώντας σε ακριβέστερα αποτελέσματα.

2.4.2 Οι Κύριες Μέθοδοι MCDA για την Ανάλυση Ενεργειακής Απόδοσης

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι MCDA, αλλά οι πιο διαδεδομένες στην ανάλυση ενεργειακής απόδοσης κτιρίων είναι:

AHP (Analytic Hierarchy Process)

Η μέθοδος AHP χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των βαρών των κριτηρίων. Βασίζεται στη σύγκριση ζευγών και στη δημιουργία ιεραρχίας προτεραιοτήτων. Σύμφωνα με τους Motuzienė & Rogoža (2016), το AHP είναι ιδανικό για ποιοτικές αποφάσεις, όπως η επιλογή κατάλληλων μονωτικών υλικών.

Παράδειγμα εφαρμογής:

Σύμφωνα με τον Hu et al. (2019), το AHP χρησιμοποιήθηκε για να προσδιορίσει το κατάλληλο σύστημα ψύξης σε θερμές κλιματικές ζώνες, λαμβάνοντας υπόψη κόστος, αποδοτικότητα και περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)

Η μέθοδος TOPSIS χρησιμοποιείται για την ιεράρχηση ενεργειακών επιλογών. Βασίζεται στον υπολογισμό της απόστασης κάθε εναλλακτικής από την ιδανική λύση.

Σύμφωνα με τους Melià et al. (2019), η μέθοδος TOPSIS είναι ιδανική για την ανάλυση ενεργειακών σεναρίων, όπου απαιτείται σύγκριση πολλών παραμέτρων.

Παράδειγμα εφαρμογής:

Σε μια έρευνα των Lizana et al. (2016), η TOPSIS χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση διαφόρων τεχνολογιών θέρμανσης, λαμβάνοντας υπόψη κόστος, απόδοση και μακροχρόνια βιωσιμότητα.

PROMETHEE & ELECTRE

Οι μέθοδοι PROMETHEE & ELECTRE χρησιμοποιούνται κυρίως σε μελέτες μεγάλης κλίμακας, όπως η ενεργειακή πολιτική. Σύμφωνα με τους Wang et al. (2020), η PROMETHEE είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την κατάταξη ενεργειακών στρατηγικών σε διαφορετικές περιοχές.

Παράδειγμα εφαρμογής:

Η PROMETHEE χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή ενεργειακών παρεμβάσεων σε δημόσια κτίρια στην Ε.Ε. (IEA, 2021), αποδεικνύοντας ότι η ενεργειακή αποδοτικότητα μπορεί να αυξηθεί κατά 30-40% με τις σωστές στρατηγικές.

2.4.3 Η Σημασία της Επιλογής Κριτηρίων στην MCDA

Στην εφαρμογή MCDA, η σωστή επιλογή κριτηρίων είναι κρίσιμη. Οι συχνότεροι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στην ενεργειακή απόδοση των κτιρίων είναι:

1. Ενεργειακή κατανάλωση (kWh/m²)
2. Οικονομικό κόστος εγκατάστασης (€)
3. Εκπομπές CO₂ και περιβαλλοντικό αποτύπωμα

4. Άνεση χρηστών και ποιότητα εσωτερικού αέρα

Οι Mardani et al. (2017) επισημαίνουν ότι η κακή επιλογή κριτηρίων μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα, καθιστώντας τη διαδικασία αξιολόγησης λιγότερο αποτελεσματική.

2.4.4 Συμπέρασμα

Η MCDA αποτελεί αναπόσπαστο εργαλείο στη μελέτη ενεργειακής απόδοσης κτιρίων, καθώς επιτρέπει την συστηματική και πολυδιάστατη αξιολόγηση διαφορετικών τεχνολογιών.

- Η μέθοδος AHP είναι κατάλληλη για την επιλογή κριτηρίων και βαρών.
- Η μέθοδος TOPSIS βοηθά στην κατάταξη των εναλλακτικών επιλογών.
- Άλλες μέθοδοι όπως PROMETHEE & ELECTRE χρησιμοποιούνται για σύνθετες ενεργειακές στρατηγικές.

Η χρήση των σωστών εργαλείων MCDA διασφαλίζει ακριβείς και αντικειμενικές αποφάσεις, επιτρέποντας την ανάπτυξη ολοκληρωμένων ενεργειακών στρατηγικών για κτίρια.

2.5 Συγκριτική Ανάλυση Μελετών MCDA στην Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων

Η Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA) έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές μελέτες για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Οι μέθοδοι AHP, TOPSIS, PROMETHEE και ELECTRE έχουν εφαρμοστεί για την επιλογή κατάλληλων ενεργειακών στρατηγικών, υλικών και τεχνολογιών θέρμανσης και ψύξης.

Στο παρόν υποκεφάλαιο, παρουσιάζεται μια συγκριτική ανάλυση πρόσφατων μελετών που εφάρμοσαν MCDA στην ενεργειακή διαχείριση κτιρίων.

2.5.1 Ανάλυση Επιλεγμένων Μελετών MCDA για Κτίρια

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται μερικές από τις πιο σημαντικές μελέτες που εφαρμόζουν MCDA στην ενεργειακή απόδοση κτιρίων.

Πίνακας 1. Επιλεγμένες Μελέτες MCDA

Μελέτη	Μέθοδος MCDA	Εφαρμογή	Βασικά Αποτελέσματα
Mardani et al. (2016)	AHP	Επιλογή θερμομονωτικών υλικών	Τα πολυμερή μονωτικά υλικά επιλέχθηκαν ως τα πιο αποδοτικά λόγω χαμηλού κόστους και υψηλής μόνωσης.
Lizana et al. (2016)	TOPSIS	Βελτιστοποίηση θέρμανσης/ψύξης	Οι αντλίες θερμότητας ήταν η βέλτιστη επιλογή με βάση το χαμηλό ενεργειακό κόστος και τις χαμηλές εκπομπές CO ₂ .
Motuzienė & Rogoža (2016)	AHP & TOPSIS	Κατάταξη ενεργειακών στρατηγικών	Ο συνδυασμός παθητικών και ενεργητικών τεχνικών είχε τη μεγαλύτερη απόδοση ενεργειακής εξοικονόμησης.
Wang et al. (2020)	PROMETHEE	Σύγκριση ενεργειακών πολιτικών	Η προτεραιότητα δόθηκε στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και την αυτονομία κτιρίων.
Ongpeng et al. (2022)	ELECTRE	Αξιολόγηση βιωσιμότητας κτιρίων	Τα έξυπνα ενεργειακά κτίρια (smart buildings) επιλέχθηκαν ως η βέλτιστη λύση μακροπρόθεσμα.

Αυτές οι μελέτες επιβεβαιώνουν ότι η MCDA είναι ένα ισχυρό εργαλείο για τη βελτιστοποίηση ενεργειακών στρατηγικών στα κτίρια.

2.5.2 Συγκριτική Αξιολόγηση των Μεθόδων MCDA

Από τη συγκριτική μελέτη προκύπτει ότι:

- Το AHP είναι ιδανικό για την ανάλυση βαρών και την προτεραιοποίηση κριτηρίων.
- Το TOPSIS είναι χρήσιμο για την κατάταξη διαφορετικών τεχνολογιών ενεργειακής απόδοσης.
- Το PROMETHEE και το ELECTRE χρησιμοποιούνται περισσότερο σε μακροπρόθεσμες ενεργειακές στρατηγικές και πολιτικές.

Σύμφωνα με τις Mardani et al. (2017) και Karmellos et al. (2015), ο συνδυασμός AHP + TOPSIS προσφέρει πιο ολοκληρωμένα αποτελέσματα για την ανάλυση ενεργειακής απόδοσης κτιρίων.

2.5.3 Συμπεράσματα

Η Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA) αποδεικνύεται εξαιρετικά αποτελεσματική στην ενεργειακή ανάλυση των κτιρίων. Συγκεκριμένα, η μέθοδος AHP είναι χρήσιμη για την ιεράρχηση κριτηρίων, ενώ το TOPSIS προσφέρει μια ξεκάθαρη κατάταξη των επιλογών. Οι πιο σύγχρονες μελέτες δείχνουν ότι οι συνδυασμοί ενεργειακών στρατηγικών (παθητικές τεχνικές + ΑΠΕ) έχουν τη μεγαλύτερη απόδοση.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία της παρούσας μελέτης, εστιάζοντας στο πώς η MCDA εφαρμόζεται στη βελτιστοποίηση του ενεργειακού αποτυπώματος των κτιρίων.

Κεφάλαιο 3

3.1 Γενική Περιγραφή της Μεθοδολογίας

Η παρούσα μελέτη χρησιμοποιεί Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA) για τη βελτιστοποίηση του ενεργειακού αποτυπώματος των κτιρίων. Η ερευνητική προσέγγιση περιλαμβάνει τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων σχετικά με:

- Τα υλικά εξωτερικής θερμομόνωσης
- Τα είδη υαλοπινάκων και κουφωμάτων
- Τα κεντρικά συστήματα θέρμανσης
- Τα κλιματικά δεδομένα διαφόρων περιοχών

Στόχος είναι να αναπτυχθεί ένα εργαλείο απόφασης που επιτρέπει στον χρήστη να επιλέγει την καταλληλότερη ενεργειακή λύση με βάση τη μέθοδο TOPSIS, ενώ τα κριτήρια θα σταθμίζονται μέσω της μεθόδου AHP.

3.1.1 Στάδια της Μεθοδολογίας

Η μεθοδολογία περιλαμβάνει πέντε βασικά στάδια:

Στάδιο 1: Δημιουργία Βάσης Δεδομένων

Στο στάδιο αυτό γίνεται καταγραφή θερμομονωτικών υλικών, κουφωμάτων και συστημάτων θέρμανσης. Επίσης, συλλέγονται κλιματικά δεδομένα από διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας. Τέλος, πραγματοποιείται κατηγοριοποίηση όλων των στοιχείων ανάλογα με την ενεργειακή τους απόδοση.

Στάδιο 2: Υπολογισμός Υφιστάμενης Ενεργειακής Κατανάλωσης

Στη συνέχεια, πρέπει να γίνει ορισμός αρχικών παραμέτρων - χαρακτηριστικών του κτιρίου (π.χ. αριθμός παραθύρων, τύπος θέρμανσης). Το στάδιο τελειώνει με τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας για διαφορετικά σενάρια.

Στάδιο 3: Υπολογισμός Βαρών με AHP

Αφού έχουν οριστεί οι παράμετροι οι οποίες θα εξεταστούν πραγματοποιείται σύγκριση των κριτηρίων κόστους, ενεργειακής απόδοσης και περιβαλλοντικού αντίκτυπου. Δημιουργείται πίνακας συγκρίσεων και υπολογίζονται τα βάρη των κριτηρίων.

Στάδιο 4: Αξιολόγηση Εναλλακτικών με TOPSIS

Εφαρμόζεται η μεθοδολογία TOPSIS, ήτοι υπολογισμός κανονικοποιημένων τιμών για όλα τα σενάρια, ανάλυση της απόστασης κάθε λύσης από την ιδανική λύση και τελική κατάταξη των επιλογών.

Στάδιο 5: Εξαγωγή Βέλτιστης Λύσης & Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού θερμομόνωσης, κουφωμάτων και θέρμανσης και σύγκριση των αποτελεσμάτων με διαφορετικές τιμές κριτηρίων.

3.1.2 Εργαλεία και Πηγές Δεδομένων

Για όλους τους παραπάνω υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Microsoft Excel, με το οποίο έγινε οργάνωση και ανάλυση δεδομένων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε στατιστικό εργαλείο, ενώ μπορεί να υλοποιηθεί και με τη γραφή κώδικα Python ή Matlab.

Κλιματικά δεδομένα συλλέχθηκαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία. Οι τιμές των διαφόρων ενεργειακών υλικών και εξοπλισμών προήλθαν από εμπορικούς καταλόγους και επίσημες εμπορικές ιστοσελίδες, ενώ τα τεχνικά χαρακτηριστικά από τις επίσημες ιστοσελίδες των κατασκευαστών.

Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν δημοσιευμένες έρευνες για την ενεργειακή απόδοση κτιρίων.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι επαναλήψιμη και επεκτάσιμη, επιτρέποντας την προσαρμογή της σε διαφορετικά κτιριακά σενάρια.

3.1.3 Συμπέρασμα

Η προσέγγιση που ακολουθείται επιτρέπει μια ολιστική αξιολόγηση των ενεργειακών επιλογών, εξασφαλίζοντας:

- Αντικειμενική κατάταξη λύσεων με βάση πολλαπλά κριτήρια.
- Προσαρμοσμένη ανάλυση ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες.
- Ενσωμάτωση οικονομικών και περιβαλλοντικών δεδομένων στη διαδικασία λήψης απόφασης.

Το επόμενο υποκεφάλαιο θα παρουσιάσει αναλυτικά τη βάση δεδομένων και τα κριτήρια αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο.

3.2 Οργάνωση Δεδομένων

Η αποτελεσματικότητα της Πολυκριτήριας Ανάλυσης Αποφάσεων (MCDA) εξαρτάται από τη σωστή οργάνωση των δεδομένων και την επιλογή των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι πηγές δεδομένων, η δομή της βάσης δεδομένων και η επιλογή των κριτηρίων που λαμβάνονται υπόψη στη βελτιστοποίηση του ενεργειακού αποτυπώματος των κτιρίων.

3.2.1 Πηγές Δεδομένων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στη μελέτη προέρχονται από διάφορες αξιόπιστες πηγές, όπως αναλύθηκε λεπτομερώς στο τμήμα 3.1.2.

Τα δεδομένα έχουν οργανωθεί σε ένα αρχείο Microsoft Excel dataset, όπου κάθε στοιχείο χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες μετρικές ενεργειακής απόδοσης. Ο χρήστης το μόνο που κάνει, είναι να συμπληρώνει τα χαρακτηριστικά της οικίας (όπως αναλύεται στο τμήμα 3.2.3) που είναι επιθυμητό να αναβαθμιστεί ενεργειακά και μέσω συναρτήσεων του λογισμικού Microsoft Excel υπολογίζεται αυτόματα η υφιστάμενη ενεργειακή κατάσταση της οικίας καθώς και το υπάρχον λειτουργικό κόστος.

3.2.2 Δομή της Βάσης Δεδομένων

Η βάση δεδομένων έχει οργανωθεί σε τέσσερις κύριες κατηγορίες δεδομένων:

1. Δεδομένα Θερμομόνωσης

- Είδη θερμομονωτικών υλικών (π.χ. διογκωμένη πολυστερίνη, πετροβάμβακας).
- Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ($W/m \cdot K$).
- Κόστος ανά τετραγωνικό μέτρο (€).

Πίνακας 2. Είδη εξωτερικής θερμομόνωσης

A/A	Είδος Εξωτερικής Θερμομόνωσης	Εκτιμώμενο Κόστος (€/m ²)	Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (λ) ($W/m \cdot K$)	Συντελεστής Θερμικής Αντίστασης (R) (m ² ·K/W)
1	Χωρίς Θερμομόνωση			
2	Συστήματα Εξωτερικής Θερμοπρόσοψης (ETICS): Με Διογκωμένη Πολυστερίνη (EPS)	33 – 43	0,031 – 0,038	2,63 – 3,23 (για πάχος 0,10 m)
3	Συστήματα Εξωτερικής Θερμοπρόσοψης (ETICS): Με Εξηλασμένη Πολυστερίνη (XPS)	35 – 45	0,029 – 0,036	2,78 – 3,45 (για πάχος 0,10 m)
4	Συστήματα Εξωτερικής Θερμοπρόσοψης (ETICS): Με Πετροβάμβακα	40 – 50	0,035 – 0,040	2,50 – 2,86 (για πάχος 0,10 m)
5	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Αεριζόμενη Πρόσοψη (Πετροβάμβακας)	50 – 70	0,035 – 0,040 (Πετροβάμβακας)	2,50 – 2,86 (για πάχος 0,10 m)
6	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Αεριζόμενη Πρόσοψη (Πολυστερίνη)		0,031 – 0,038 (Πολυστερίνη)	2,63 – 3,23 (για πάχος 0,10 m)
7	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Επένδυση Πέτρας ή Κεραμικών Πλακιδίων (Πετροβάμβακας)	60 – 80	0,035 – 0,040 (Πετροβάμβακας)	2,50 – 2,86 (για πάχος 0,10 m)
8	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Επένδυση Πέτρας ή Κεραμικών Πλακιδίων (Πολυστερίνη)		0,031 – 0,038 (Πολυστερίνη)	2,63 – 3,23 (για πάχος 0,10 m)
9	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Ξύλινη Επένδυση (Πετροβάμβακας)	70 – 90	0,035 – 0,040 (Πετροβάμβακας)	2,50 – 2,86 (για πάχος 0,10 m)
10	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Ξύλινη Επένδυση (Πολυστερίνη)		0,031 – 0,038 (Πολυστερίνη)	2,63 – 3,23 (για πάχος 0,10 m)
11	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Μεταλλική Επένδυση (Πετροβάμβακας)	80 – 100	0,035 – 0,040 (Πετροβάμβακας)	2,50 – 2,86 (για πάχος 0,10 m)
12	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Μεταλλική Επένδυση (Πολυστερίνη)		0,031 – 0,038 (Πολυστερίνη)	2,63 – 3,23 (για πάχος 0,10 m)

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει σύστημα θερμοπρόσοψης χρησιμοποιείται ο συντελεστής θερμικής αντίστασης του συστήματος Εξωτερικός σοβάς – τούβλο – εσωτερικός σοβάς.

Πίνακας 3. Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας συστήματος εξωτερικός σοβάς - τούβλο - εσωτερικός σοβάς

Υλικό	Πάχος (d) (m)	Συντελεστής k (W/mK)	Αντίσταση R=d/k (m²K/W)
Εξωτερικός Σοβάς	0.02	1.0	0,02
Τούβλο	0.20	0.7	0,286
Εσωτερικός Σοβάς	0.015	0.25	0,06
R_tot for wall =			0,37

2. Δεδομένα Υαλοπινάκων και Παραθύρων

- Τύπος τζαμιού (π.χ. διπλό, τριπλό).
- Συντελεστής θερμοπερατότητας (U-value) (W/m²·K).
- Συντελεστής ηλιακής θερμοπερατότητας.
- Κόστος ανά τετραγωνικό μέτρο (€).

Πίνακας 4. Δεδομένα παραθύρων

A/A	Τύπος Παραθύρου	Συντελεστής Θερμοπερατότητας (U-value) (W/m²·K)	Συντελεστής ηλιακής θερμοπερατότητας	Εκτιμώμενο Κόστος Αγοράς (€/m²)
1	Παράθυρα με Πλαίσιο PVC και Τριπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν	0,8 – 1,0	0,5	400 – 600
2	Παράθυρα με Πλαίσιο Ξύλου και Τριπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν	0,9 – 1,1	0,5	500 – 700
3	Παράθυρα Αλουμινίου με Θερμοδιακοπή και Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν	1,2 – 1,5	0,6	350 – 550
4	Παράθυρα PVC με Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν	1,3 – 1,6	0,6	300 – 500
5	Παράθυρα Ξύλου με Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν	1,4 – 1,7	0,6	400 – 600
6	Παράθυρα Αλουμινίου χωρίς Θερμοδιακοπή και Διπλό Υάλωμα	2,5 – 3,0	0,7	250 – 400
7	Παράθυρα Αλουμινίου χωρίς Θερμοδιακοπή και Μονό Υάλωμα	5,0 – 5,8	0,85	200 – 350

3. Δεδομένα Κεντρικής Θέρμανσης

- Τύπος συστήματος (λέβητας αερίου, αντλία θερμότητας κ.λπ.).
- Είδος καυσίμου.
- Θερμογόνος δύναμη με μονάδες ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου (kWh/lt - kWh/m³ - kWh/kg).
- Αποτύπωμα άνθρακα (kg CO₂/kWh).

Πίνακας 5.Στοιχεία Κεντρικής Θέρμανσης

A/A	Τύπος Κεντρικής Θέρμανσης	Είδος Καυσίμου	θερμογόνος δύναμη (kWh/lt - kWh/m ³ - kWh/kg)	Carbon footprint (kg CO ₂ /kWh)
1	Καυστήρας Πετρελαίου	πετρέλαιο	10	0,29
2	Λέβητας συμπύκνωσης αερίου	φυσικό αέριο	11	0,23
3	Καυστήρας πέλλετ	πέλλετ	4,6	0,05
4	Κλιματιστικό (AC)	ηλεκτρική ενέργεια		0,298
5	Αντλία Θερμότητας (HP)	ηλεκτρική ενέργεια		0,298

4. Δεδομένα Κεντρικής Θέρμανσης για την περίπτωση κλιματιστικού ή αντλίας θερμότητας

- Τύπος συστήματος (κλιματιστικό, αντλία θερμότητας).
- Ενεργειακή κλάση.
- Ονομαστική ισχύς (kW).
- Καλυπτόμενη επιφάνεια (m²)
- SCOP
- SEER
- Τιμή Αγοράς (σε ευρώ)

Πίνακας 6. Στοιχεία απόδοσης και κόστους κλιματιστικών και αντλιών θερμότητας

Central Heating Type	EU Energy class	Ονομαστική Ισχύς (kW)	Καλυπτόμενη επιφάνεια (m ²)	SCOP	SEER	Τιμή Αγοράς (σε ευρώ)
AC	A+++	2,6	18	5,4	9,7	1500
AC	A+++	3,5	25	5,4	9,7	1650
AC	A+++	5,3	40	5,4	9,7	1800
AC	A++	3,5	20	4,9	7,3	1400
AC	A++	5,3	40	4,9	7,3	1600
AC	A++	6,5	55	4,9	7,3	1750
HP	A+++	8	80	5,4	9,7	3077
HP	A+++	11	100	5,4	9,7	5000
HP	A+++	12	120	5,4	9,7	5900
HP	A+++	14	140	5,4	9,7	6600
HP	A+++	16	>140	5,4	9,7	7200

4. Δεδομένα Κεντρικής Θέρμανσης για την περίπτωση καυστήρα

- Τύπος συστήματος (καυστήρας πετρελαίου, καυστήρας φυσικού αερίου, καυστήρας πέλλετ).
- Καλυπτόμενη επιφάνεια (m²)
- Τιμή Αγοράς (σε ευρώ)

5. Κλιματικά Δεδομένα

- Μέση θερμοκρασία ημέρας και νύχτας ανά μήνα (°C), όπως πίνακας.
- Μέση ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα (kWh/m²), όπως πίνακας.
- Μέση διάρκεια ημέρας και νύχτας σε ώρες ανά μήνα (h), όπως πίνακας.

Πίνακας 7.Στοιχεία απόδοσης και κόστους καυστήρων

Central Heating Type	Καλυπτόμενη επιφάνεια (m2)	Τιμή Αγοράς (σε ευρώ)
oil boiler	100	3500
oil boiler	150	3600
oil boiler	200	4500
oil boiler	250	4700
oil boiler	300	4850
ng boiler	100	3500
ng boiler	150	3600
ng boiler	200	3700
ng boiler	250	3800
pellet boiler	100	3300
pellet boiler	150	3400
pellet boiler	200	3700
pellet boiler	250	3800
pellet boiler	300	4000

Πίνακας 8.Μέση θερμοκρασία ημέρας και νύχτας ανά μήνα (°C)

Πόλη	Ιαν (Ημέρα)	Ιαν (Νύχτα)	Φεβ (Ημέρα)	Φεβ (Νύχτα)	Μαρ (Ημέρα)	Μαρ (Νύχτα)	Απρ (Ημέρα)	Απρ (Νύχτα)	Μάι (Ημέρα)	Μάι (Νύχτα)	Ιουν (Ημέρα)	Ιουν (Νύχτα)	Ιουλ (Ημέρα)	Ιουλ (Νύχτα)	Αυγ (Ημέρα)	Αυγ (Νύχτα)	Σεπ (Ημέρα)	Σεπ (Νύχτα)	Οκτ (Ημέρα)	Οκτ (Νύχτα)	Νοε (Ημέρα)	Νοε (Νύχτα)	Δεκ (Ημέρα)	Δεκ (Νύχτα)
Αγρίνιο	12,6	4,0	13,6	4,5	16,0	6,9	20,3	9,9	26,2	14,2	31,4	18,7	33,8	21,3	33,6	21,2	29,2	17,6	23,5	13,8	18,1	10,0	14,1	6,9
Αθήνα - Ανατολικά Προάστια	12,4	5,2	13,4	5,3	15,8	6,7	20,1	9,7	26,0	14,0	31,2	18,5	33,6	21,1	33,4	21,0	29,0	17,4	23,3	13,6	17,9	9,8	13,9	6,7
Αθήνα - Βόρεια Προάστια	12,2	5,0	13,2	5,1	15,6	6,5	19,9	9,5	25,8	13,8	31,0	18,3	33,4	20,9	33,2	20,8	28,8	17,2	23,1	13,4	17,7	9,6	13,7	6,5
Αθήνα - Δυτικά Προάστια	12,4	5,2	13,4	5,3	15,8	6,7	20,1	9,7	26,0	14,0	31,2	18,5	33,6	21,1	33,4	21,0	29,0	17,4	23,3	13,6	17,9	9,8	13,9	6,7
Αθήνα - Κέντρο	12,6	5,4	13,6	5,5	16,0	6,9	20,3	9,9	26,2	14,2	31,4	18,7	33,8	21,3	33,6	21,2	29,2	17,6	23,5	13,8	18,1	10,0	14,1	6,9
Αθήνα - Νότια Προάστια	12,8	5,6	13,8	5,7	16,2	7,1	20,5	10,1	26,4	14,4	31,6	18,9	34,0	21,5	33,8	21,4	29,4	17,8	23,7	14,0	18,3	10,2	14,3	7,1
Αλεξανδρού πολη	8,6	1,4	9,5	1,8	12,0	3,8	16,0	7,0	21,0	11,0	25,5	15,5	28,0	18,0	27,5	17,5	23,5	14,0	18,0	9,5	13,0	5,0	9,5	2,0
Βόλος	9,5	0,0	11,5	1,0	16,0	4,5	21,5	8,5	26,5	13,0	31,0	17,0	33,5	19,5	33,0	19,0	28,5	15,5	23,0	10,5	17,5	5,5	12,5	1,5
Δράμα	8,0	0,5	10,0	1,5	14,0	4,5	19,0	8,5	24,5	13,0	29,0	17,0	31,5	19,5	31,0	19,0	26,5	15,5	20,0	10,5	13,5	5,0	9,5	1,5
Ηράκλειο	15,3	9,1	15,8	9,5	17,0	10,5	19,5	12,5	23,0	16,0	26,5	19,5	28,5	22,0	28,0	21,5	25,5	19,0	22,0	15,5	18,5	12,5	16,5	10,5
Θεσσαλονίκη	8,6	1,4	9,5	1,8	12,0	3,8	16,0	7,0	21,0	11,0	25,5	15,5	28,0	18,0	27,5	17,5	23,5	14,0	18,0	9,5	13,0	5,0	9,5	2,0
Ιωάννινα	9,0	0,2	11,0	1,5	15,0	4,5	20,0	8,5	25,0	13,0	29,0	17,0	31,5	19,5	31,0	19,0	26,5	15,5	20,0	10,5	13,5	5,0	9,5	1,5
Καβάλα	8,6	1,4	9,5	1,8	12,0	3,8	16,0	7,0	21,0	11,0	25,5	15,5	28,0	18,0	27,5	17,5	23,5	14,0	18,0	9,5	13,0	5,0	9,5	2,0
Καλαμάτα	14,7	5,4	15,8	5,9	18,0	7,5	21,5	10,5	26,5	14,5	31,0	19,0	33,5	21,5	33,0	21,0	28,5	17,5	23,0	13,0	17,5	8,5	14,5	6,0
Καρδίτσα	9,5	0,0	11,5	1,0	16,0	4,5	21,5	8,5	26,5	13,0	31,0	17,0	33,5	19,5	33,0	19,0	28,5	15,5	23,0	10,5	17,5	5,5	12,5	1,5
Καστοριά	5,0	-3,0	7,0	-2,0	12,0	1,0	17,0	5,0	22,0	9,5	26,0	13,5	28,5	15,5	28,0	15,0	23,5	11,0	17,5	6,5	10,5	1,5	6,5	-1,5
Κέρκυρα	13,9	5,3	14,5	5,8	16,2	7,2	19,5	10,5	24,0	14,5	28,0	18,5	30,5	21,0	30,0	20,5	26,5	17,5	21,5	13,0	17,0	9,0	14,5	6,5
Κοζάνη	5,0	-3,0	7,0	-2,0	12,0	1,0	17,0	5,0	22,0	9,5	26,0	13,5	28,5	15,5	28,0	15,0	23,5	11,0	17,5	6,5	10,5	1,5	6,5	-1,5
Κομοτηνή	8,6	1,4	9,5	1,8	12,0	3,8	16,0	7,0	21,0	11,0	25,5	15,5	28,0	18,0	27,5	17,5	23,5	14,0	18,0	9,5	13,0	5,0	9,5	2,0
Λαμία	12,6	4,0	13,6	4,5	16,0	6,9	20,3	9,9	26,2	14,2	31,4	18,7	33,8	21,3	33,6	21,2	29,2	17,6	23,5	13,8	18,1	10,0	14,1	6,9
Λάρισα	9,5	0,0	11,5	1,0	16,0	4,5	21,5	8,5	26,5	13,0	31,0	17,0	33,5	19,5	33,0	19,0	28,5	15,5	23,0	10,5	17,5	5,5	12,5	1,5
Λευκάδα	13,9	5,3	14,5	5,8	16,2	7,2	19,5	10,5	24,0	14,5	28,0	18,5	30,5	21,0	30,0	20,5	26,5	17,5	21,5	13,0	17,0	9,0	14,5	6,5
Ναύπλιο	12,6	4,0	13,6	4,5	16,0	6,9	20,3	9,9	26,2	14,2	31,4	18,7	33,8	21,3	33,6	21,2	29,2	17,6	23,5	13,8	18,1	10,0	14,1	6,9
Ξάνθη	8,6	1,4	9,5	1,8	12,0	3,8	16,0	7,0	21,0	11,0	25,5	15,5	28,0	18,0	27,5	17,5	23,5	14,0	18,0	9,5	13,0	5,0	9,5	2,0
Πάτρα	12,6	4,0	13,6	4,5	16,0	6,9	20,3	9,9	26,2	14,2	31,4	18,7	33,8	21,3	33,6	21,2	29,2	17,6	23,5	13,8	18,1	10,0	14,1	6,9
Πρέβεζα	13,9	5,3	14,5	5,8	16,2	7,2	19,5	10,5	24,0	14,5	28,0	18,5	30,5	21,0	30,0	20,5	26,5	17,5	21,5	13,0	17,0	9,0	14,5	6,5

Πόλη	Ιαν (Ημέρα)	Ιαν (Νύχτα)	Φεβ (Ημέρα)	Φεβ (Νύχτα)	Μαρ (Ημέρα)	Μαρ (Νύχτα)	Απρ (Ημέρα)	Απρ (Νύχτα)	Μάι (Ημέρα)	Μάι (Νύχτα)	Ιουν (Ημέρα)	Ιουν (Νύχτα)	Ιουλ (Ημέρα)	Ιουλ (Νύχτα)	Αυγ (Ημέρα)	Αυγ (Νύχτα)	Σεπτ (Ημέρα)	Σεπτ (Νύχτα)	Οκτ (Ημέρα)	Οκτ (Νύχτα)	Νοε (Ημέρα)	Νοε (Νύχτα)	Δεκ (Ημέρα)	Δεκ (Νύχτα)
Πύργος	12,6	4,0	13,6	4,5	16,0	6,9	20,3	9,9	26,2	14,2	31,4	18,7	33,8	21,3	33,6	21,2	29,2	17,6	23,5	13,8	18,1	10,0	14,1	6,9
Ρόδος	15,3	9,1	15,8	9,5	17,0	10,5	19,5	12,5	23,0	16,0	26,5	19,5	28,5	22,0	28,0	21,5	25,5	19,0	22,0	15,5	18,5	12,5	16,5	10,5
Σέρρες	8,0	0,5	10,0	1,5	14,0	4,5	19,0	8,5	24,5	13,0	29,0	17,0	31,5	19,5	31,0	19,0	26,5	15,5	20,0	10,5	13,5	5,0	9,5	1,5
Σπάρτη	12,6	4,0	13,6	4,5	16,0	6,9	20,3	9,9	26,2	14,2	31,4	18,7	33,8	21,3	33,6	21,2	29,2	17,6	23,5	13,8	18,1	10,0	14,1	6,9
Τρίκαλα	9,5	0,0	11,5	1,0	16,0	4,5	21,5	8,5	26,5	13,0	31,0	17,0	33,5	19,5	33,0	19,0	28,5	15,5	23,0	10,5	17,5	5,5	12,5	1,5
Φλώρινα	5,0	-3,0	7,0	-2,0	12,0	1,0	17,0	5,0	22,0	9,5	26,0	13,5	28,5	15,5	28,0	15,0	23,5	11,0	17,5	6,5	10,5	1,5	6,5	-1,5
Χανιά	14,4	7,9	15,2	8,5	16,7	9,8	19,5	12,0	23,5	15,5	27,5	19,0	29,5	21,0	29,0	20,5	26,0	18,0	22,0	14,5	18,0	11,0	15,0	8,5

Πίνακας 9. Μέση ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα (kWh/m²).

Πόλη	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Αγρίνιο	2,1	2,9	4,1	5,5	6,7	7,5	7,8	7	5,5	4	2,5	1,9
Αθήνα - Ανατολικά Προάστια	2,3	3,1	4,3	5,7	6,9	7,7	8	7,2	5,7	4,2	2,7	2,1
Αθήνα - Βόρεια Προάστια	2,2	3	4,2	5,6	6,8	7,6	7,9	7,1	5,6	4,1	2,6	2
Αθήνα - Δυτικά Προάστια	2,2	3	4,2	5,6	6,8	7,6	7,9	7,1	5,6	4,1	2,6	2
Αθήνα - Κέντρο	2,3	3,1	4,3	5,7	6,9	7,7	8	7,2	5,7	4,2	2,7	2,1
Αθήνα - Νότια Προάστια	2,3	3,1	4,3	5,7	6,9	7,7	8	7,2	5,7	4,2	2,7	2,1
Αλεξανδρούπολη	1,8	2,6	3,8	5,2	6,5	7,3	7,6	6,8	5,3	3,8	2,3	1,7
Βόλος	1,9	2,7	3,9	5,3	6,6	7,4	7,7	6,9	5,4	3,9	2,4	1,8
Δράμα	1,7	2,5	3,7	5,1	6,4	7,2	7,5	6,7	5,2	3,7	2,2	1,6
Ηράκλειο	2,4	3,2	4,4	5,8	7	7,8	8,1	7,3	5,8	4,3	2,8	2,2
Θεσσαλονίκη	1,8	2,6	3,8	5,2	6,5	7,3	7,6	6,8	5,3	3,8	2,3	1,7
Ιωάννινα	1,6	2,4	3,6	5	6,3	7,1	7,4	6,6	5,1	3,6	2,1	1,5
Καβάλα	1,8	2,6	3,8	5,2	6,5	7,3	7,6	6,8	5,3	3,8	2,3	1,7
Καλαμάτα	2,3	3,1	4,3	5,7	6,9	7,7	8	7,2	5,7	4,2	2,7	2,1
Καρδίτσα	1,8	2,6	3,8	5,2	6,5	7,3	7,6	6,8	5,3	3,8	2,3	1,7
Καστοριά	1,6	2,4	3,6	5	6,3	7,1	7,4	6,6	5,1	3,6	2,1	1,5
Κέρκυρα	1,9	2,7	3,9	5,3	6,6	7,4	7,7	6,9	5,4	3,9	2,4	1,8
Κοζάνη	1,6	2,4	3,6	5	6,3	7,1	7,4	6,6	5,1	3,6	2,1	1,5
Κομοτηνή	1,8	2,6	3,8	5,2	6,5	7,3	7,6	6,8	5,3	3,8	2,3	1,7
Λαμία	2	2,8	4	5,4	6,7	7,5	7,8	7	5,5	4	2,5	1,9
Λάρισα	1,8	2,6	3,8	5,2	6,5	7,3	7,6	6,8	5,3	3,8	2,3	1,7
Λευκάδα	2,1	2,9	4,1	5,5	6,7	7,5	7,8	7	5,5	4	2,5	1,9
Ναύπλιο	2,3	3,1	4,3	5,7	6,9	7,7	8	7,2	5,7	4,2	2,7	2,1
Ξάνθη	1,7	2,5	3,7	5,1	6,4	7,2	7,5	6,7	5,2	3,7	2,2	1,6
Πάτρα	2,2	3	4,2	5,6	6,8	7,6	7,9	7,1	5,6	4,1	2,6	2
Πρέβεζα	2,1	2,9	4,1	5,5	6,7	7,5	7,8	7	5,5	4	2,5	1,9
Πύργος	2,2	3	4,2	5,6	6,8	7,6	7,9	7,1	5,6	4,1	2,6	2

Πόλη	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Ρόδος	2,5	3,3	4,5	5,9	7,1	7,9	8,2	7,4	5,9	4,4	2,9	2,3
Σέρρες	1,7	2,5	3,7	5,1	6,4	7,2	7,5	6,7	5,2	3,7	2,2	1,6
Σπάρτη	2,3	3,1	4,3	5,7	6,9	7,7	8	7,2	5,7	4,2	2,7	2,1
Τρίκαλα	1,8	2,6	3,8	5,2	6,5	7,3	7,6	6,8	5,3	3,8	2,3	1,7
Φλώρινα	1,5	2,3	3,5	4,9	6,2	7	7,3	6,5	5	3,5	2	1,4
Χανιά	2,5	3,3	4,5	5,9	7,1	7,9	8,2	7,4	5,9	4,4	2,9	2,3

Πίνακας 10. Μέση διάρκεια ημέρας και νύχτας σε ώρες ανά μήνα (h).

Μήνας	Διάρκεια (ώρες)
Ιαν (Ημέρα)	9
Ιαν (Νύχτα)	15
Φεβ (Ημέρα)	10
Φεβ (Νύχτα)	14
Μαρ (Ημέρα)	11
Μαρ (Νύχτα)	13
Απρ (Ημέρα)	13
Απρ (Νύχτα)	11
Μάι (Ημέρα)	14
Μάι (Νύχτα)	10
Ιουν (Ημέρα)	15
Ιουν (Νύχτα)	9
Ιουλ (Ημέρα)	15
Ιουλ (Νύχτα)	9
Αυγ (Ημέρα)	14
Αυγ (Νύχτα)	10
Σεπ (Ημέρα)	12
Σεπ (Νύχτα)	12
Οκτ (Ημέρα)	11
Οκτ (Νύχτα)	13
Νοε (Ημέρα)	10
Νοε (Νύχτα)	14
Δεκ (Ημέρα)	9
Δεκ (Νύχτα)	15

3.2.3 Εισαγωγή Δεδομένων από τον Χρήστη στο Αρχείο Excel

Για την εύρεση της βέλτιστης ενεργειακής λύσης, το αρχείο Excel έχει σχεδιαστεί με τρόπο που επιτρέπει στον χρήστη να εισάγει τα βασικά χαρακτηριστικά της οικίας του. Η σωστή συμπλήρωση αυτών των δεδομένων εξασφαλίζει ότι οι υπολογισμοί θα είναι ακριβείς και θα παράγουν ρεαλιστικά αποτελέσματα για την ενεργειακή απόδοση της κατοικίας.

Ο χρήστης πρέπει να συμπληρώσει τα εξής πεδία στην ειδικά διαμορφωμένη καρτέλα του Excel:

1. Επιλογή Τοποθεσίας Οικίας

Ο χρήστης επιλέγει την περιοχή στην οποία βρίσκεται η οικία από μια προκαθορισμένη λίστα (drop-down menu). Με βάση αυτήν την επιλογή, το αρχείο αυτόματα αντλεί τα κλιματικά δεδομένα της συγκεκριμένης περιοχής, όπως:

- Μέση θερμοκρασία ημέρας και νύχτας ανά μήνα.
- Μέση ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα.
- Μέση διάρκεια ημέρας και νύχτας ανά μήνα.

Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της συνάρτησης VLOOKUP, η οποία εντοπίζει τα αντίστοιχα δεδομένα από μια προ-εισαχθείσα βάση κλιματικών δεδομένων.

2. Γενικά Χαρακτηριστικά Οικίας

Ο χρήστης εισάγει:

- Το συνολικό εμβαδόν της οικίας (m²).
- Το συνολικό εμβαδόν της εξωτερικής τοιχοποιίας (m²).
- Τον αριθμό των παραθύρων.
- Το συνολικό εμβαδόν των παραθύρων (m²).

Αυτά τα δεδομένα είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό των θερμικών απωλειών από τους τοίχους και τα παράθυρα.

3. Επιλογές Υλικών Θερμοπρόσοψης & Παραθύρων

Ο χρήστης επιλέγει:

- Το υπάρχον υλικό της θερμοπρόσοψης.

- Το υπάρχον υλικό των παραθύρων (π.χ. μονά τζάμια, διπλά τζάμια Low-E, τριπλά τζάμια).

Με τη συνάρτηση VLOOKUP, το Excel εντοπίζει τον συντελεστή θερμικής αντίστασης για το επιλεγμένο υλικό και τον προσθέτει στη συνολική θερμική αντίσταση του συστήματος εξωτερικός σοβάς - τούβλο - εσωτερικός σοβάς.

Εμβαδόν οικίας:	117	m2
Εμβαδόν εξωτερικής τοιχοποιίας:	80	m2
υλικό εξωτερικής θερμομόνωσης:	Χωρίς Θερμομόνωση	
αριθμός παραθύρων:	9	τμχ
τύπος παραθύρου:	Παράθυρα Αλουμινίου χωρίς Θερμοδιακοπή και Μονό Υάλωμα	
Συνολικό εμβαδόν παραθύρων:	30	m2

Εικόνα 1

4. Επιλογή Συστήματος Κεντρικής Θέρμανσης & Ψύξης

Ο χρήστης επιλέγει το υφιστάμενο σύστημα θέρμανσης και ψύξης, το οποίο μπορεί να είναι:

- Λέβητας πετρελαίου.
- Λέβητας φυσικού αερίου.
- Αντλία θερμότητας.
- Σύστημα θέρμανσης με πέλλετ.
- Ηλεκτρικός λέβητας.

Το Excel ανακτά τα χαρακτηριστικά απόδοσης του επιλεγμένου συστήματος και τα χρησιμοποιεί στους ενεργειακούς υπολογισμούς.

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ/ΨΥΞΗΣ				
			θερμογόνος δύναμη	απόδοση
Τύπος Κεντρικής Θέρμανσης:	Καυστήρας Πετρελαίου	-	10	85%
			SEER	SCOP
Ενεργειακή Κλάση Κλιματιστικού:	D		3,9	2,7
Αριθμός Κλιματιστικών:	2	τμχ		
			SEER	SCOP
Τύπος Αντλίας Θερμότητας:	A++		7,3	4,9

Εικόνα 2

5. Κόστη Ενέργειας & Καυσίμων

Ο χρήστης εισάγει τις τρέχουσες τιμές των ενεργειακών πηγών:

- Κόστος kWh ηλεκτρικής ενέργειας (€).
- Κόστος λίτρου πετρελαίου (€).
- Κόστος m³ φυσικού αερίου (€).
- Κόστος κιλού πέλλετ (€).

Αυτά τα δεδομένα είναι απαραίτητα για την κοστολόγηση των ενεργειακών απωλειών και τον υπολογισμό του κόστους λειτουργίας του κτιρίου.

κόστος kWh:	0,16	€
κόστος lt πετρελαίου:	1,3	€
κόστος m ³ ΦΑ:	0,6	€
κόστος kg πέλλετ:	0,42	€

Εικόνα 3

3.2.4 Υπολογισμοί Ενεργειακών Απωλειών και Κατανάλωσης

Αφού ο χρήστης εισαγάγει τα χαρακτηριστικά της οικίας του, το αρχείο Excel προχωρά στους απαραίτητους υπολογισμούς ενεργειακής κατανάλωσης. Το σύστημα χρησιμοποιεί θερμοδυναμικές εξισώσεις και συναρτήσεις αναζήτησης (VLOOKUP) για να προσδιορίσει:

- Την ενέργεια που χάνεται από την τοιχοποιία και τα παράθυρα.
- Την απαιτούμενη ενέργεια για τη θέρμανση ή την ψύξη της οικίας.
- Το κόστος λειτουργίας του συστήματος κεντρικής θέρμανσης και ψύξης.

1. Υπολογισμός Θερμοκρασιακών Διαφορών

Η επιθυμητή θερμοκρασία στο εσωτερικό της οικίας έχει οριστεί ως εξής:

- 22°C για τους κρύους μήνες (χειμώνας – θέρμανση).
- 26°C για τους ζεστούς μήνες (καλοκαίρι – ψύξη).

Το Excel υπολογίζει τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος για κάθε μήνα, ξεχωριστά για ημέρα και νύχτα, ως εξής:

$$\Delta T_{\mu\epsilon\rho\alpha} = T_{\epsilon\sigma\omega\tau\epsilon\rho\iota\kappa\acute{\eta}} - T_{\epsilon\zeta\omega\tau\epsilon\rho\iota\kappa\acute{\eta},\mu\epsilon\rho\alpha}$$
$$\Delta T_{\nu\acute{\upsilon}\chi\tau\alpha} = T_{\epsilon\sigma\omega\tau\epsilon\rho\iota\kappa\acute{\eta}} - T_{\epsilon\zeta\omega\tau\epsilon\rho\iota\kappa\acute{\eta},\nu\acute{\upsilon}\chi\tau\alpha}$$

Αυτοί οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται για όλους τους μήνες του έτους, με βάση τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής που έχει επιλέξει ο χρήστης.

2. Υπολογισμός Απωλειών Ενέργειας από την Τοιχοποιία

Με τη βοήθεια της συνάρτησης VLOOKUP, το Excel εντοπίζει τον συντελεστή θερμικής αντίστασης (R) του υλικού θερμοπρόσοψης που έχει επιλέξει ο χρήστης.

Η ολική θερμική αντίσταση του τοίχου προκύπτει ως το άθροισμα των αντιστάσεων του συστήματος σοβά-τούβλου-σοβά και θερμοπρόσοψης:

$$R_{ολικό} = R_{\epsilon\zeta.σοβά} + R_{\tauούβλο} + R_{\epsilon\sigma.σοβά} + R_{\theta\epsilon\rho\mu\omicron\rho\rho\sigma\omicron\psi\eta}$$

Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με αγωγή για τον υπολογισμό της ενέργειας που χάνεται από τους τοίχους:

$$Q_{\text{τοιχοποιίας}} = \frac{\Delta T * A_{\text{τοιχοποιίας}}}{R_{\text{ολικό}}}$$

όπου:

- ΔT είναι η διαφορά θερμοκρασίας (ημέρας ή νύχτας).
- $A_{\text{τοιχοποιίας}}$ είναι το συνολικό εμβαδόν των εξωτερικών τοίχων της οικίας.
- $R_{\text{ολικό}}$ είναι η συνολική θερμική αντίσταση του τοίχου.

Οι υπολογισμοί αυτοί επαναλαμβάνονται για κάθε μήνα, ημέρα και νύχτα.

3. Υπολογισμός Απωλειών Ενέργειας από τα Παράθυρα

Για τα παράθυρα, η διαδικασία είναι παρόμοια. Το Excel ανακτά, μέσω VLOOKUP, τον συντελεστή θερμικής αντίστασης του υλικού των παραθύρων. Χρησιμοποιεί τη συνάρτηση μεταφοράς θερμότητας με αγωγή για να υπολογίσει την ενεργειακή απώλεια μέσω των παραθύρων:

$$Q_{\text{παράθυρα}} = \frac{\Delta T * A_{\text{παράθυρα}}}{R_{\text{παραθύρων}}}$$

όπου:

- $A_{\text{παράθυρα}}$ είναι το συνολικό εμβαδόν των παραθύρων της οικίας.
- $R_{\text{παραθύρων}}$ είναι η θερμική αντίσταση του τύπου παραθύρου που έχει επιλεγεί.

4. Υπολογισμός Θερμότητας από Ηλιακή Ακτινοβολία στα Παράθυρα

Η ενέργεια που κερδίζεται ή χάνεται μέσω των παραθύρων λόγω ηλιακής ακτινοβολίας υπολογίζεται με την εξίσωση:

$$Q_{\text{ήλιος}} = A_{\text{παράθυρα}} * GHI * g$$

όπου:

- GHI είναι η μέση ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2), που λαμβάνεται από την κλιματική βάση δεδομένων του Excel.
- g είναι ο συντελεστής ηλιακής θερμοπερατότητας.

Το Excel χρησιμοποιεί VLOOKUP για να βρει τις κατάλληλες τιμές GHI και g με βάση την περιοχή και τον τύπο παραθύρων που έχει επιλεγεί.

5. Υπολογισμός Απαιτούμενης Ενέργειας για Θέρμανση & Ψύξη

Αφού υπολογιστεί η συνολική ενέργεια που χάνεται, το Excel την αντιστοιχεί στην ενέργεια που πρέπει να παραχθεί από το υφιστάμενο σύστημα θέρμανσης/ψύξης, όπως παρακάτω:

$$Q_{\text{απαίτηση}} = Q_{\text{τοιχοποιίας}} + Q_{\text{παράθυρα}} - Q_{\text{ήλιος}}$$

Αυτό σημαίνει ότι αν η ηλιακή ακτινοβολία παρέχει θερμότητα, μειώνει την απαίτηση για θέρμανση. Αντίθετα, αν το καλοκαίρι υπερθερμαίνει το κτίριο, αυξάνει την ανάγκη για ψύξη.

6. Υπολογισμός Καυσίμου ή Ηλεκτρικής Ενέργειας για Θέρμανση

Με βάση το υφιστάμενο σύστημα θέρμανσης/ψύξης που έχει επιλέξει ο χρήστης, το Excel χρησιμοποιεί VLOOKUP για να ανακτήσει την απόδοση του συστήματος (SEER/SCOP ή απόδοση καυστήρα).

Για ηλεκτρικά συστήματα (π.χ. αντλία θερμότητας, κλιματιστικό):

$$E_{\text{ηλεκτρική}} = \frac{Q_{\text{απαίτηση}}}{SEER}$$

ή

$$E_{\text{ηλεκτρική}} = \frac{Q_{\text{απαίτηση}}}{SCOP}$$

όπου:

- $SEER/SCOP$ είναι ο συντελεστής απόδοσης του συστήματος ανάλογα αν πρόκειται για ψύξη ή θέρμανση.

Για καυστήρες (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, πέλλετ):

$$Q_{\text{καύσιμο}} = \frac{Q_{\text{απαίτηση}}}{\text{απόδοση}}$$

όπου:

- Απόδοση είναι το ποσοστό (%) της παραγόμενης ενέργειας που αξιοποιείται – λαμβάνεται ίση με 85%.

- $Q_{\text{καύσιμο}}$ είναι η ποσότητα καυσίμου (πετρέλαιο ή φυσικό αέριο ή πέλλετ) που απαιτείται (σε lt ή m^3 ή kg αντίστοιχα).

3.2.5 Υπολογισμός Κόστους Θέρμανσης & Ψύξης

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η κοστολόγηση της κατανάλωσης ενέργειας.

- Για ηλεκτρική ενέργεια:

$$Κόστος_{\eta\lambda} = E_{\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\iota\kappa\eta} * Τιμή_{kWh}$$

- Για πετρέλαιο, φυσικό αέριο, πέλλετ:

$$Κόστος = Q_{\text{καύσιμο}} * Τιμή_{\text{καυσίμου}}$$

Συμπέρασμα

- Το αρχείο Microsoft Excel έχει προγραμματιστεί με τις απαραίτητες συναρτήσεις ώστε να υπολογίζει με ακρίβεια τις ενεργειακές ανάγκες και το κόστος λειτουργίας κάθε οικίας.

- Οι τύποι λαμβάνουν υπόψη τη μόνωση, τον τύπο κουφωμάτων και το κλίμα της περιοχής.
- Η κατανάλωση ενέργειας μετατρέπεται σε πραγματικό κόστος, επιτρέποντας συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών σεναρίων.

3.3 Επιλογή Κριτηρίων

3.3.1 Επιλογή Κριτηρίων για τη MCDA

Η επιλογή των σωστών κριτηρίων αξιολόγησης είναι κρίσιμη για την αξιοπιστία της μεθόδου MCDA.

Μερικά από τα κριτήρια που δύνανται να εξεταστούν για την ανάλυση είναι τα παρακάτω:

- Κατανάλωση ενέργειας (kWh/m^2): Αντιπροσωπεύει τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου.
- Θερμικές απώλειες ($\text{W/m}^2\text{K}$): Εξαρτάται από τη θερμομόνωση και τα κουφώματα.
- Αυτονομία από ανανεώσιμες πηγές (%): Μετρά την εξάρτηση του κτιρίου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Κόστος εγκατάστασης (€): Περιλαμβάνει το αρχικό κόστος των υλικών και των συστημάτων θέρμανσης.
- Ετήσιο κόστος λειτουργίας (€ ανά m^2): Περιλαμβάνει έξοδα θέρμανσης και ψύξης.
- Χρόνος απόσβεσης (έτη): Υπολογίζει σε πόσα χρόνια η επένδυση γίνεται οικονομικά βιώσιμη.
- Αποτύπωμα άνθρακα (carbon footprint).

Τα κριτήρια που έχουν επιλεγεί για τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι το αποτύπωμα άνθρακα, το κόστος εγκατάστασης και το ετήσιο κόστος λειτουργίας.

3.3.2 Βάρη Κριτηρίων μέσω AHP

Η Αναλυτική Ιεραρχική Μέθοδος (Analytic Hierarchy Process - AHP) είναι μια πολυκριτήρια μέθοδος υποστήριξης αποφάσεων που αναπτύχθηκε από τον Saaty (1980). Χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό βαρών κριτηρίων,

επιτρέποντας την ιεράρχηση και τη συστηματική σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων σε σύνθετα προβλήματα απόφασης.

Η AHP βασίζεται στην ανάλυση ζευγών κριτηρίων (pairwise comparisons), όπου κάθε κριτήριο συγκρίνεται με όλα τα υπόλοιπα, καταλήγοντας σε μια βαθμολογική εκτίμηση της σχετικής σπουδαιότητάς τους.

3.3.2.1 Θεμελιώδεις Αρχές της AHP

Η μέθοδος AHP οργανώνει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων σε τρία βασικά στάδια:

Στάδιο 1. Δημιουργία Ιεραρχίας:

- Ορίζονται τα κριτήρια που επηρεάζουν την απόφαση.
- Διαμορφώνεται μια ιεραρχική δομή, όπου τα κριτήρια ταξινομούνται σε επίπεδα.

Στάδιο 2. Προσδιορισμός Προτεραιοτήτων μέσω Συγκρίσεων Ζευγών:

- Τα κριτήρια συγκρίνονται ανά ζεύγη χρησιμοποιώντας μια αριθμητική κλίμακα σχετικής σημαντικότητας (Saaty scale, 1-9).
- Δημιουργείται ένας τετραγωνικός πίνακας σύγκρισης κριτηρίων, όπου κάθε στοιχείο εκφράζει την προτίμηση ενός κριτηρίου έναντι κάποιου άλλου.

Στάδιο 3. Υπολογισμός Συνέπειας των Συγκρίσεων:

- Ελέγχεται η συνέπεια των απαντήσεων μέσω του Consistency Ratio (CR).
- Αν το $CR > 0.10$, τότε οι συγκρίσεις θεωρούνται ασυνεπείς και επαναλαμβάνονται.

3.3.2.2 Κλίμακα Σύγκρισης Κριτηρίων στην AHP

Η μέθοδος AHP χρησιμοποιεί την ακόλουθη κλίμακα σύγκρισης για την απόδοση βαθμών στη σχετική σημασία των κριτηρίων:

Πίνακας 11. Ένταση σχετικής σημασίας των κριτηρίων

Ένταση Σχετικής Σημασίας	Ορισμός
1	Ίσης σημασίας
3	Μέτριας σημασίας
5	Σημαντική προτεραιότητα
7	Πολύ ισχυρή προτεραιότητα
9	Απόλυτη προτεραιότητα
2, 4, 6, 8	Ενδιάμεσες τιμές για συμβιβασμούς

Όταν ένα κριτήριο A έχει προτεραιότητα έναντι του B με τιμή X, τότε το B έχει την αντίστροφη τιμή ($1/X$) σε σχέση με το A.

3.3.2.3 Διαδικασία Υπολογισμού Βαρών με AHP

Η διαδικασία προσδιορισμού των βαρών των κριτηρίων στην AHP αποτελείται από τα εξής βήματα:

- Βήμα 1: Δημιουργία του Πίνακα Σύγκρισης Ζευγών

Ο πίνακας συγκρίσεων έχει τη μορφή:

Πίνακας 12. Συγκρίσεων

Κριτήρια	C_1	C_2	C_3	...	C_n
C_1	1	X_{12}	X_{13}	...	X_{1n}
C_2	$1/X_{12}$	1	X_{23}	...	X_{2n}
C_3	$1/X_{13}$	$1/X_{23}$	1	...	X_{3n}
...	...	...	...	...	...
C_n	$1/X_{1n}$	$1/X_{2n}$	$1/X_{3n}$	...	1

Κάθε κελί του πίνακα εκφράζει πόσο πιο σημαντικό είναι το ένα κριτήριο σε σχέση με το άλλο.

- Βήμα 2: Κανονικοποίηση του Πίνακα Σύγκρισης

Για να εξαχθούν τα βάρη των κριτηρίων, πρώτα κανονικοποιούμε τον πίνακα, διαιρώντας κάθε στοιχείο με το συνολικό άθροισμα της αντίστοιχης στήλης.

$$N_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{i=1}^n A_{ij}}$$

όπου A_{ij} είναι το στοιχείο του πίνακα σύγκρισης στη θέση (i, j).

- Βήμα 3: Υπολογισμός των Βαρών

Τα βάρη των κριτηρίων προκύπτουν ως ο μέσος όρος των στοιχείων κάθε γραμμής του κανονικοποιημένου πίνακα:

$$w_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{ij}$$

όπου w_{ij} είναι το βάρος του κριτηρίου C_i .

- Βήμα 4: Έλεγχος Συνέπειας των Συγκρίσεων

Για να εξασφαλιστεί ότι οι συγκρίσεις είναι λογικές, υπολογίζεται το Consistency Ratio (CR), το οποίο δείχνει πόσο συνεπείς ήταν οι συγκρίσεις μεταξύ των κριτηρίων.

Δείκτης Συνέπειας (Consistency Index - CI):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

όπου λ_{max} είναι η μέγιστη ιδιοτιμή του πίνακα.

Λόγος Συνέπειας (Consistency Ratio - CR):

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

όπου RI είναι ο τυχαίος δείκτης συνέπειας, ο οποίος εξαρτάται από το πλήθος των κριτηρίων.

Πίνακας 13. Τιμές RI .

Πλήθος Κριτηρίων (n)	RI
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45

Αν $CR < 0.10$, τότε οι συγκρίσεις θεωρούνται αποδεκτές.

Αν $CR > 0.10$, τότε πρέπει να διορθωθούν οι συγκρίσεις, καθώς περιέχουν μεγάλη υποκειμενικότητα ή λάθη.

3.3.3 Συμπέρασμα

Η σωστή οργάνωση των δεδομένων και η επιλογή κριτηρίων είναι κρίσιμη για την επιτυχία της MCDA. Τα δεδομένα, όπως αναλύθηκε, προέρχονται από αξιόπιστες πηγές, ενώ η μέθοδος AHP χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των βαρών. Η ταξινόμηση των εναλλακτικών επιλογών θα γίνει μέσω της μεθόδου TOPSIS.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου TOPSIS στη λήψη απόφασης για τη βέλτιστη ενεργειακή στρατηγική κτιρίων.

3.4 Εφαρμογή της Μεθόδου TOPSIS

3.4.1 Εισαγωγή στη Μέθοδο TOPSIS

Η μέθοδος TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) είναι μια πολυκριτήρια μέθοδος λήψης αποφάσεων, η οποία χρησιμοποιείται για την κατάταξη εναλλακτικών λύσεων με βάση την ομοιότητά τους προς την ιδανική λύση. Αναπτύχθηκε από τους Hwang και Yoon (1981) και βασίζεται στην υπόθεση ότι η βέλτιστη εναλλακτική θα πρέπει να βρίσκεται πιο κοντά στη θετική ιδεατή λύση και ταυτόχρονα πιο μακριά από την αρνητική ιδεατή λύση.

3.4.2 Βασικές Αρχές της TOPSIS

Η λογική της μεθόδου βασίζεται στα εξής:

- Θετική Ιδεατή Λύση (P^+): Η ιδανική εναλλακτική που μεγιστοποιεί τα ωφέλιμα κριτήρια και ελαχιστοποιεί τα κριτήρια κόστους.
- Αρνητική Ιδεατή Λύση (P^-): Η λιγότερο επιθυμητή εναλλακτική, η οποία έχει τη χειρότερη επίδοση σε όλα τα κριτήρια.
- Απόσταση από τις ιδεατές λύσεις: Κάθε εναλλακτική λύση υπολογίζεται βάσει της απόστασής της από το P^+ και P^- .
- Σχετική εγγύτητα προς την ιδεατή λύση: Η τελική κατάταξη προκύπτει από τον λόγο των αποστάσεων αυτών.

3.4.3 Βήματα Εφαρμογής της TOPSIS

Η μέθοδος TOPSIS περιλαμβάνει έξι στάδια υπολογισμού:

Στάδιο 1: Δημιουργία Πίνακα Απόφασης

Ορίζεται ένας πίνακας απόφασης, όπου καταγράφονται οι αξιολογήσεις κάθε εναλλακτικής ως προς τα κριτήρια.

$$A = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix}$$

Όπου:

- A_i είναι οι εναλλακτικές λύσεις.
- C_j είναι τα κριτήρια αξιολόγησης.
- x_{ij} είναι η επίδοση της εναλλακτικής A_i ως προς το κριτήριο C_j .

Στάδιο 2: Κανονικοποίηση του Πίνακα Απόφασης

Η κανονικοποίηση διασφαλίζει ότι όλα τα δεδομένα βρίσκονται σε μια κοινή κλίμακα. Ο κανονικοποιημένος πίνακας R υπολογίζεται ως:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

Αυτό επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών κριτηρίων, ανεξάρτητα από τις μονάδες μέτρησής τους.

Στάδιο 3: Σταθμισμό των Κανονικοποιημένων Τιμών

Κάθε κανονικοποιημένη τιμή πολλαπλασιάζεται με το αντίστοιχο βάρος κριτηρίου (w_j) για να ληφθεί ο σταθμισμένος πίνακας απόφασης:

$$p_{ij} = w_j * r_{ij}$$

Όπου τα βάρη των κριτηρίων έχουν υπολογιστεί μέσω της μεθόδου ΑΗΡ (όπως περιγράφεται στο 6.3.2).

Στάδιο 4: Προσδιορισμός των Ιδεατών Λύσεων

Οι ιδεατές λύσεις είναι οι θεωρητικά καλύτερες και χειρότερες επιλογές για κάθε κριτήριο:

$$P^+ = (p_1^+, p_2^+, \dots, p_n^+)$$

$$P^- = (p_1^-, p_2^-, \dots, p_n^-)$$

Για τα κριτήρια ωφέλειας (όσο μεγαλύτερη τιμή, τόσο καλύτερη):

- Θετική ιδεατή λύση: $p_j^+ = \max (p_{ij})$
- Αρνητική ιδεατή λύση: $p_j^- = \min (p_{ij})$

Για τα κριτήρια κόστους (όσο μικρότερη τιμή, τόσο καλύτερη):

- Θετική ιδεατή λύση: $p_j^+ = \min (p_{ij})$
- Αρνητική ιδεατή λύση: $p_j^- = \max (p_{ij})$

Στάδιο 5: Υπολογισμός Αποστάσεων από τις Ιδεατές Λύσεις

Οι αποστάσεις κάθε εναλλακτικής από τις ιδεατές λύσεις υπολογίζονται μέσω του Ευκλείδειου μέτρου απόστασης:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=0}^n (p_{ij} - p_j^+)^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=0}^n (p_{ij} - p_j^-)^2}$$

Όπου:

- D_i^+ είναι η απόσταση της εναλλακτικής A_i από την ιδανική λύση.
- D_i^- είναι η απόσταση της εναλλακτικής A_i από την αρνητική λύση.

Στάδιο 6: Υπολογισμός Σχετικής Εγγύτητας και Κατάταξη

Η σχετική εγγύτητα μιας εναλλακτικής ως προς την ιδεατή λύση υπολογίζεται ως εξής:

$$RC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

Όπου:

- RC_i είναι ο δείκτης εγγύτητας της εναλλακτικής A_i προς την ιδεατή λύση.
- Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει το RC_i (κοντά στο 1), τόσο καλύτερη είναι η εναλλακτική.

Οι εναλλακτικές κατατάσσονται με φθίνουσα σειρά βάσει της τιμής του RC_i .

Κεφάλαιο 4

4.1 Υπολογισμός βαρών κριτηρίων μέσω της ΑΗΡ

Η Μέθοδος ΑΗΡ χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των βαρών των κριτηρίων.

Τα βάρη καθορίζονται σύμφωνα με τη μεθοδολογία προσδιορισμού των βαρών που έχει αναλυθεί στο τμήμα 6.3 και φαίνεται σε βήματα παρακάτω:

Προσδιορισμός των κριτηρίων που θα εξεταστούν:

g1	ανθρακικό αποτύπωμα
g2	αρχικό κόστος
g3	λειτουργικό κόστος

Δηλαδή, $n = 3$, όπου n ο αριθμός των κριτηρίων.

Βήμα 1

	g1	g2	g3
g1	1	3	5
g2	0,33	1	4
g3	0,2	0,25	1
S_j	1,53	4,25	10,00

Ο χρήστης εισάγει την ένταση της σχετικής σημασίας του κάθε κριτηρίου σε σχέση με ένα άλλο. Προσοχή πρέπει να δοθεί καθώς το γινόμενο των εντάσεων δύο κριτηρίων πρέπει να είναι ίσο με ένα. Ο χρήστης συγκεκριμένα εισάγει τα νούμερα μόνο στα πράσινα κελιά καθώς τα υπόλοιπα συμπληρώνονται αυτόματα. Επίσης, αυτόματα υπολογίζονται τα αθροίσματα της κάθε στήλης.

Βήμα 2

Κάθε στοιχείο κάθε στήλης του πίνακα διαιρείται με το άθροισμα της κάθε στήλης και προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

	g1	g2	g3	S' i
g1	0,65	0,71	0,50	1,86
g2	0,22	0,24	0,40	0,85
g3	0,13	0,06	0,10	0,29

Στον πίνακα που προέκυψε υπολογίζονται τα αθροίσματα της κάθε γραμμής.

Βήμα 3

Τα βάρη κάθε κριτηρίου προλύπτουν από το λόγο το αθροίσματος της κάθε γραμμής του πίνακα του βήματος 2 με το συνολικό αριθμό των κριτηρίων n (στην περίπτωση μας 3).

	w
w1	0,62
w2	0,28
w3	0,10

Βήμα 4

Υπολογισμός του λ_{max} . Συγκεκριμένα, πολλαπλασιασμός του κάθε στοιχείου της κάθε στήλης με το βάρος του κριτηρίου που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα. Στη συνέχεια, το άθροισμα της κάθε γραμμής διαιρείται με το στοιχείο της κεντρικής διαγωνίου όπου ισχύει $i = j$.

Το λ_{max} προκύπτει από το άθροισμα των παραπάνω λόγων προς τον αριθμό των κριτηρίων ($n = 3$).

	g1	g2	g3	Σi	Σi/wiPij (για i=j)
g1	0,62	0,85	0,48	1,95	3,16
g2	0,21	0,28	0,39	0,88	3,08
g3	0,12	0,07	0,10	0,29	3,02
				Σ =	9,26
	λmax =	3,09			

Παρατήρηση: Όπως αναλύθηκε στο βήμα 1, στα πράσινα πλαίσια του πίνακα ο χρήστης ορίζει τη σπουδαιότητα του κάθε κριτηρίου συγκρινόμενο με το άλλο. Στην περίπτωση μας έχει καθοριστεί ότι το σπουδαιότερο κριτήριο είναι το αποτύπωμα άνθρακα, στη συνέχεια το κόστος εγκατάστασης και τέλος το κόστος λειτουργίας. Στην περίπτωση που η ενεργειακή αναβάθμιση της οικίας θα επιχορηγούνταν από κάποιο πρόγραμμα (π.χ. Εξοικονομώ) θα μπορούσε η σπουδαιότητα των δύο τελευταίων κριτηρίων να αναστραφεί καθώς το λειτουργικό κόστος θα ήταν σημαντικότερο από το κόστος εγκατάστασης.

4.2 Εφαρμογή της μεθόδου TOPSIS

4.2.1 Διαμόρφωση των Εναλλακτικών Λύσεων

Για την αξιολόγηση της βέλτιστης ενεργειακής λύσης, δημιουργήθηκε ένας πίνακας εναλλακτικών επιλογών, ο οποίος προέκυψε από τον συνδυασμό των εξής παραμέτρων:

- Σύστημα εξωτερικής θερμομόνωσης.
- Τύπος παραθύρων και υαλοπινάκων.
- Σύστημα κεντρικής θέρμανσης και ψύξης.

Οι διαθέσιμες επιλογές κάθε παραμέτρου φαίνονται στον Πίνακα 14. Ο συνδυασμός όλων των πιθανών επιλογών οδήγησε στη δημιουργία 420 εναλλακτικών σεναρίων, κάθε ένα από τα οποία αποτελεί μια πιθανή ενεργειακή διαμόρφωση του κτιρίου.

Πίνακας 14. Παράμετροι δημιουργίας εναλλακτικών.

Σύστημα εξωτερικής θερμομόνωσης	Τύπος παραθύρων και υαλοπινάκων	Σύστημα κεντρικής θέρμανσης και ψύξης
Χωρίς Θερμομόνωση	Παράθυρα με Πλαίσιο PVC και Τριπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν	Καυστήρας Πετρελαίου
Συστήματα Εξωτερικής Θερμοπρόσοψης (ETICS): Με Διογκωμένη Πολυστερίνη (EPS)	Παράθυρα με Πλαίσιο Ξύλου και Τριπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν	Λέβητας συμπύκνωσης αερίου
Συστήματα Εξωτερικής Θερμοπρόσοψης (ETICS): Με Εξηλασμένη Πολυστερίνη (XPS)	Παράθυρα Αλουμινίου με Θερμοδιακοπή και Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν	Καυστήρας πέλλετ
Συστήματα Εξωτερικής Θερμοπρόσοψης (ETICS): Με Πετροβάμβακα	Παράθυρα PVC με Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν	AC
Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Αεριζόμενη Πρόσοψη (Πετροβάμβακας)	Παράθυρα Ξύλου με Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν	HP
Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Αεριζόμενη Πρόσοψη (Πολυστερίνη)	Παράθυρα Αλουμινίου χωρίς Θερμοδιακοπή και Διπλό Υάλωμα	
Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Επένδυση Πέτρας ή Κεραμικών Πλακιδίων (Πετροβάμβακας)	Παράθυρα Αλουμινίου χωρίς Θερμοδιακοπή και Μονό Υάλωμα	
Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Επένδυση Πέτρας ή Κεραμικών Πλακιδίων (Πολυστερίνη)		
Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Ξύλινη Επένδυση (Πετροβάμβακας)		
Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Ξύλινη Επένδυση (Πολυστερίνη)		
Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Μεταλλική Επένδυση (Πετροβάμβακας)		
Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Μεταλλική Επένδυση (Πολυστερίνη)		

4.2.2 Διαδικασία Εφαρμογής της Μεθόδου TOPSIS

Για την κατάταξη των 420 εναλλακτικών ενεργειακών λύσεων, εφαρμόστηκε η Μέθοδος TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution). Η διαδικασία ακολουθήθηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.4, και περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1: Δημιουργία Πίνακα Απόφασης

Δημιουργήθηκε ένας πίνακας απόφασης, στον οποίο κάθε εναλλακτική λύση αξιολογείται ως προς πολλαπλά κριτήρια, που περιλαμβάνουν:

- Ενεργειακή κατανάλωση (kWh/m²).
- Κόστος εγκατάστασης (€).
- Συνολικό κόστος λειτουργίας (€ ανά έτος).

Κάθε κριτήριο είχε διαφορετικό συντελεστή βαρύτητας, όπως υπολογίστηκε μέσω της μεθόδου AHP στην ενότητα 4.1.

Βήμα 2: Κανονικοποίηση του Πίνακα Απόφασης

Λόγω των διαφορετικών μονάδων μέτρησης μεταξύ των κριτηρίων, εφαρμόστηκε κανονικοποίηση με τη χρήση της εξίσωσης:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

Έτσι, όλες οι τιμές των κριτηρίων μετατράπηκαν σε συγκρίσιμη κλίμακα.

Βήμα 3: Στάθμιση των Κανονικοποιημένων Τιμών

Ο σταθμισμένος πίνακας απόφασης προέκυψε πολλαπλασιάζοντας κάθε κανονικοποιημένη τιμή με το βάρος του αντίστοιχου κριτηρίου:

$$p_{ij} = w_j * r_{ij}$$

όπου w_j είναι το βάρος του κάθε κριτηρίου.

Βήμα 4: Προσδιορισμός Θετικών και Αρνητικών Ιδεατών Λύσεων

Η θετική ιδεατή λύση (P^+) και η αρνητική ιδεατή λύση (P^-) προσδιορίστηκαν με βάση τις εξής σχέσεις:

$$P^+ = (p_1^+, p_2^+, \dots, p_n^+)$$

$$P^- = (p_1^-, p_2^-, \dots, p_n^-)$$

- Για κριτήρια ωφέλειας (π.χ. ενεργειακή απόδοση), η ιδεατή τιμή είναι η μέγιστη και η αρνητική είναι η ελάχιστη.

- Για κριτήρια κόστους (π.χ. κόστος λειτουργίας, εκπομπές CO₂), η ιδεατή τιμή είναι η ελάχιστη και η αρνητική είναι η μέγιστη.

Βήμα 5: Υπολογισμός Αποστάσεων από τις Ιδεατές Λύσεις

Οι αποστάσεις κάθε εναλλακτικής από τις ιδεατές λύσεις υπολογίστηκαν μέσω των εξισώσεων:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=0}^n (p_{ij} - p_j^+)^2}$$
$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=0}^n (p_{ij} - p_j^-)^2}$$

Βήμα 6: Υπολογισμός Σχετικής Εγγύτητας και Κατάταξη

Η τελική κατάταξη των 420 εναλλακτικών προέκυψε από τον δείκτη σχετικής εγγύτητας:

$$RC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

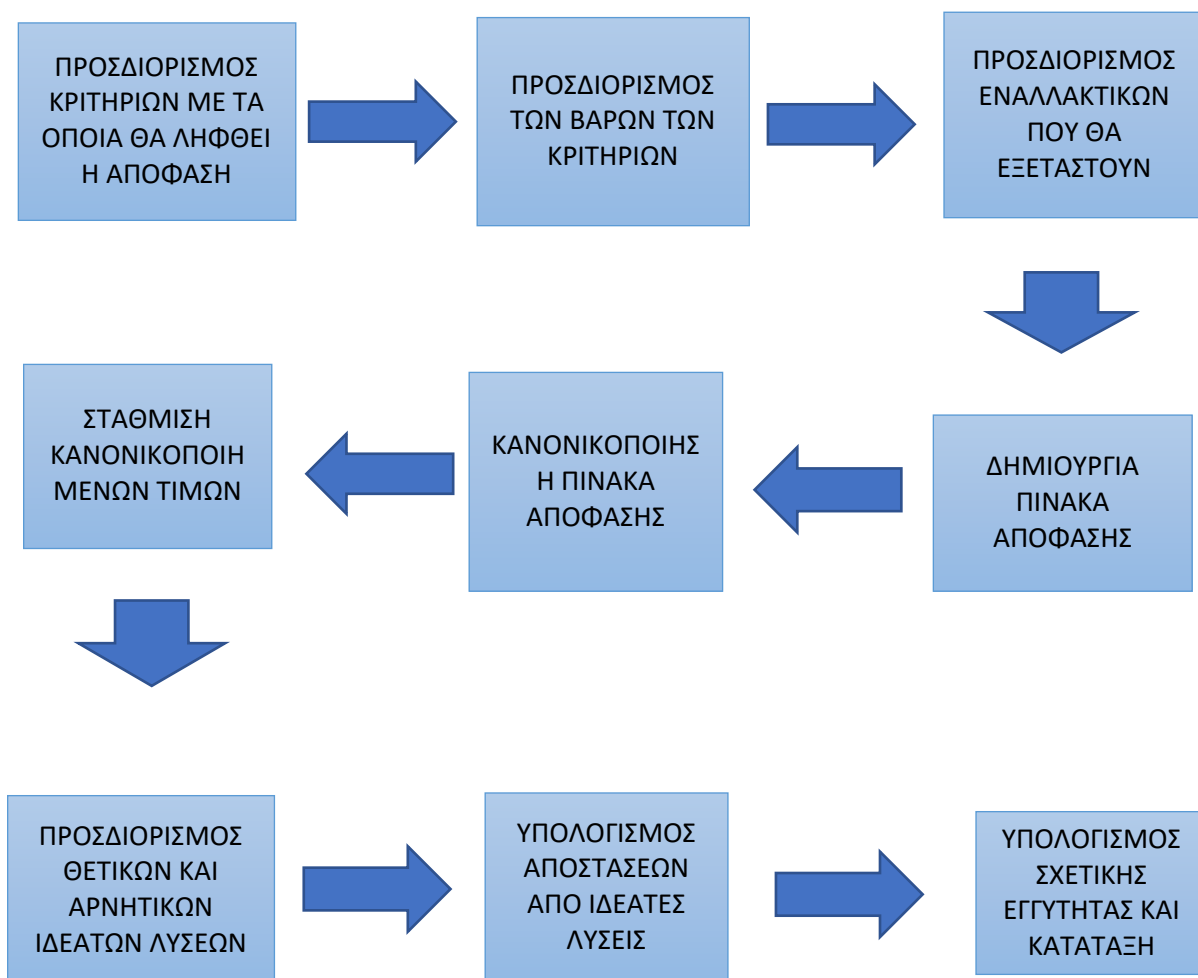
Οι εναλλακτικές με την υψηλότερη τιμή RC_i κατατάχθηκαν ως οι βέλτιστες ενεργειακές λύσεις.

4.2.3 Παρουσίαση των 20 Καλύτερων Εναλλακτικών

Από την ανάλυση των 420 εναλλακτικών, οι 20 κορυφαίες κατατάχθηκαν βάσει του RC_i , δείχνοντας τους καλύτερους συνδυασμούς θερμομόνωσης, τύπων παραθύρων και συστημάτων θέρμανσης.

Πίνακας 15.Οι 20 Καλύτερες Εναλλακτικές.

A/A	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ	εγγύτητα	κατάταξη
404	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Μεταλλική Επένδυση (Πολυστερίνη) - Παράθυρα PVC με Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,973	1
334	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Ξύλινη Επένδυση (Πολυστερίνη) - Παράθυρα PVC με Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,973	2
264	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Επένδυση Πέτρας ή Κεραμικών Πλακιδίων (Πολυστερίνη) - Παράθυρα PVC με Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,973	3
194	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Αεριζόμενη Πρόσοψη (Πολυστερίνη) - Παράθυρα PVC με Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,973	4
399	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Μεταλλική Επένδυση (Πολυστερίνη) - Παράθυρα Αλουμινίου με Θερμοδιακοπή και Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,970	5
329	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Ξύλινη Επένδυση (Πολυστερίνη) - Παράθυρα Αλουμινίου με Θερμοδιακοπή και Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,970	6
259	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Επένδυση Πέτρας ή Κεραμικών Πλακιδίων (Πολυστερίνη) - Παράθυρα Αλουμινίου με Θερμοδιακοπή και Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,970	7
189	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Αεριζόμενη Πρόσοψη (Πολυστερίνη) - Παράθυρα Αλουμινίου με Θερμοδιακοπή και Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,970	8
389	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Μεταλλική Επένδυση (Πολυστερίνη) - Παράθυρα με Πλαίσιο PVC και Τριπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,968	9
319	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Ξύλινη Επένδυση (Πολυστερίνη) - Παράθυρα με Πλαίσιο PVC και Τριπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,968	10
249	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Επένδυση Πέτρας ή Κεραμικών Πλακιδίων (Πολυστερίνη) - Παράθυρα με Πλαίσιο PVC και Τριπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,968	11
179	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Αεριζόμενη Πρόσοψη (Πολυστερίνη) - Παράθυρα με Πλαίσιο PVC και Τριπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,968	12
54	Συστήματα Εξωτερικής Θερμοπρόσοψης (ETICS): Με Διογκωμένη Πολυστερίνη (EPS) - Παράθυρα PVC με Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,968	13
64	Συστήματα Εξωτερικής Θερμοπρόσοψης (ETICS): Με Διογκωμένη Πολυστερίνη (EPS) - Παράθυρα Αλουμινίου χωρίς Θερμοδιακοπή και Διπλό Υάλωμα - AC	0,965	14
89	Συστήματα Εξωτερικής Θερμοπρόσοψης (ETICS): Με Εξηλασμένη Πολυστερίνη (XPS) - Παράθυρα PVC με Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,963	15
49	Συστήματα Εξωτερικής Θερμοπρόσοψης (ETICS): Με Διογκωμένη Πολυστερίνη (EPS) - Παράθυρα Αλουμινίου με Θερμοδιακοπή και Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,962	16
409	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Μεταλλική Επένδυση (Πολυστερίνη) - Παράθυρα Ξύλου με Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,962	17
339	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Ξύλινη Επένδυση (Πολυστερίνη) - Παράθυρα Ξύλου με Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,962	18
269	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Επένδυση Πέτρας ή Κεραμικών Πλακιδίων (Πολυστερίνη) - Παράθυρα Ξύλου με Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,962	19
199	Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης με Αεριζόμενη Πρόσοψη (Πολυστερίνη) - Παράθυρα Ξύλου με Διπλό Υάλωμα με Low-E και Αέριο Αργόν - AC	0,962	20



Εικόνα 4. Συνολικό Διάγραμμα Ροής

Κεφάλαιο 5

5.1 Ανάλυση των Αποτελεσμάτων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι 20 καλύτερες εναλλακτικές ενεργειακές διαμορφώσεις που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου TOPSIS. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων παρατηρήθηκε ότι οι εναλλακτικές με σύστημα θέρμανσης μέσω κλιματιστικού (AC) κατέλαβαν τις πρώτες θέσεις στη σχετική κατάταξη.

Αυτό συνέβη επειδή στον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές απόδοσης SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) και SCOP (Seasonal Coefficient of Performance), θεωρώντας ότι το σύστημα θέρμανσης λειτουργεί 24 ώρες το 24ωρο. Αυτή η παραδοχή οδήγησε σε ένα υπολογιστικό σφάλμα, καθώς τα κλιματιστικά δεν λειτουργούν συνήθως συνεχώς και έχουν χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών σε σύγκριση με τις αντλίες θερμότητας.

5.1.1 Περιορισμοί της Παρούσας Μεθόδου Υπολογισμού

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία παρουσιάζει τους ακόλουθους περιορισμούς, οι οποίοι επηρέασαν τα τελικά αποτελέσματα της κατάταξης:

1. Λάθος παραδοχή συνεχούς λειτουργίας των κλιματιστικών. Τα κλιματιστικά στην πραγματικότητα λειτουργούν διακοπτόμενα, συνήθως για λίγες ώρες την ημέρα, αντίθετα οι αντλίες θερμότητας είναι σχεδιασμένες για συνεχή λειτουργία, επιτυγχάνοντας υψηλότερη ενεργειακή απόδοση σε βάθος χρόνου.

2. Χαμηλή απόδοση των κλιματιστικών σε ακραίες θερμοκρασίες. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η απόδοση των κλιματιστικών μειώνεται σημαντικά όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι κάτω από 5°C. Αντίθετα, οι αντλίες θερμότητας έχουν βελτιωμένη απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες, καθώς χρησιμοποιούν θερμοδυναμικές διεργασίες για εξαγωγή θερμότητας από τον εξωτερικό αέρα [Wang et al., 2011].

3. Υψηλότερη συνολική κατανάλωση ενέργειας από τα κλιματιστικά. Σε μελέτες ενεργειακής απόδοσης διαπιστώθηκε ότι τα κλιματιστικά καταναλώνουν 18% - 25% περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από τις αντλίες θερμότητας για την ίδια παρεχόμενη θερμότητα [Moreno et al., 2014]. Αυτό συμβαίνει επειδή οι αντλίες θερμότητας μπορούν να λειτουργούν με COP (Coefficient of Performance) πάνω από 4.0, ενώ τα περισσότερα κλιματιστικά κυμαίνονται μεταξύ 2.5 - 3.5 [Winkler et al., 2020].

4. Έλλειψη ενσωμάτωσης δυναμικών κλιματικών δεδομένων. Το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη την εποχιακή μεταβολή των θερμοκρασιών και τις πραγματικές ανάγκες θέρμανσης και ψύξης. Η χρήση δυναμικών κλιματικών δεδομένων θα μπορούσε να βελτιώσει την ακρίβεια των υπολογισμών [Franco et al., 2021].

5.2 Βελτιώσεις για Μελλοντική Έρευνα

Για τη βελτίωση της μεθοδολογίας και την αποφυγή των προαναφερθέντων σφαλμάτων, προτείνονται οι εξής μελλοντικές βελτιώσεις:

5.2.1 Αναθεώρηση της Μεθοδολογίας Υπολογισμού της Ενεργειακής Κατανάλωσης

Η χρήση δυναμικού μοντέλου υπολογισμού κατανάλωσης. Συγκεκριμένα, αντί να θεωρείται σταθερή ημερήσια λειτουργία, η ενεργειακή κατανάλωση θα μπορούσε να βασιστεί σε δυναμικές προσομοιώσεις, όπου τα κλιματιστικά λειτουργούν για 6-8 ώρες ημερησίως αντί για 24 ώρες. Αντίθετα, οι αντλίες θερμότητας λειτουργούν συνεχώς με προσαρμογή ισχύος, προσφέροντας σταθερή θερμική απόδοση. Συγχρόνως να λαμβάνονται υπόψη ημερήσιες και εποχικές διακυμάνσεις θερμοκρασίας.

Εφαρμογή πραγματικών δεδομένων χρήσης. Αντί για θεωρητικά SEER και SCOP, μπορεί να ενσωματωθεί μετρημένη κατανάλωση από πραγματικές κατοικίες [Han et al., 2014].

5.2.2 Ενσωμάτωση Νέων Κριτηρίων Αξιολόγησης

Η υπάρχουσα ανάλυση βασίστηκε σε ενεργειακά και οικονομικά κριτήρια. Ωστόσο, η μεθοδολογία θα μπορούσε να εμπλουτιστεί με περισσότερους παράγοντες, όπως:

- Συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατοικίας. Να λαμβάνεται υπόψη η κατανάλωση ηλεκτρικών συσκευών και λαμπτήρων, προσφέροντας έτσι, μία ολοκληρωμένη εκτίμηση των ενεργειακών αναγκών ενός νοικοκυριού.

- Ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πάνελ στο ενεργειακό μοντέλο, καθώς πλέον έχουν ενταχθεί στην αγορά και ήδη υλοποιείται η εγκατάστασή τους σε οικίες. Συνεπώς θα γίνεται εκτίμηση του βαθμού αυτοκατανάλωσης και της μείωσης εξάρτησης από το δίκτυο [Lu & Ziviani, 2022].

- Θερμική άνεση και ποιότητα αέρα. Τα συστήματα αντλιών θερμότητας διατηρούν πιο σταθερή εσωτερική θερμοκρασία από τα κλιματιστικά γεγονός που προσφέρει καλύτερη θερμική άνεση. Επίσης η λήψη υπόψη κριτηρίων ποιότητας αέρα όπως η υγρασία και οι συγκεντρώσεις CO₂, θα προσφέρουν περισσότερες πληροφορίες στο κριτήριο της θερμικής άνεσης.

5.3 Συμπέρασμα

Η παρούσα μελέτη παρουσίασε τη χρήση πολυκριτήριων μεθόδων για την ενεργειακή βελτιστοποίηση κτιρίων, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο AHP για τον καθορισμό των βαρών των κριτηρίων και τη μέθοδο TOPSIS για την κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων.

Ωστόσο, η παραδοχή συνεχούς λειτουργίας των κλιματιστικών επηρέασε τα αποτελέσματα, οδηγώντας σε μία λανθασμένη προτίμηση προς αυτά έναντι των αντλιών θερμότητας, οι οποίες σε πραγματικές συνθήκες είναι ενεργειακά αποδοτικότερες.

Μελλοντικές βελτιώσεις όπως η χρήση δυναμικών κλιματικών δεδομένων, η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών και η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας θα μπορούσαν να κάνουν το μοντέλο ακόμα πιο ακριβές και εφαρμόσιμο σε πραγματικά σενάρια ενεργειακής αναβάθμισης κατοικιών.

Βιβλιογραφία

- [1] Wang, W., Zhang, J., Jiang, W., & Liu, B. (2011). *Energy performance comparison of heating and air-conditioning systems for multi-family residential buildings*. HVAC&R Research, Taylor & Francis.
- [2] Moreno, P., Solé, C., Castell, A., & Cabeza, L. F. (2014). *The use of phase change materials in domestic heat pump and air-conditioning systems for short term storage: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier.
- [3] Winkler, J., Das, S., Earle, L., Burkett, L., & Robertson, J. (2020). *Impact of installation faults in air conditioners and heat pumps in single-family homes on US energy usage*. Applied Energy, Elsevier.
- [4] Franco, A., Misserocchi, L., & Testi, D. (2021). *A method for optimal operation of HVAC with heat pumps for reducing the energy demand of large-scale non-residential buildings*. Journal of Building Engineering, Elsevier.
- [5] Han, X., Chen, J., Huang, C., Weng, W. (2014). *Energy audit and air-conditioning system renovation analysis on office buildings using air-source heat pump in Shanghai*. Building Services Engineering Research and Technology, SAGE Journals.
- [6] Lu, Z., & Ziviani, D. (2022). *Operating cost comparison of state-of-the-art heat pumps in residential buildings across the United States*. Energy and Buildings, Elsevier.
- [7] Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.
- [8] Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer.
- [9] Chua, K. J., Chou, S. K., Yang, W. M., & Yan, J. (2013). *Achieving better energy-efficient air conditioning—a review of technologies and strategies*. Applied Energy, Elsevier.
- [10] Nižetić, S., Papadopoulos, A. M., Tina, G. M. (2017). *Hybrid energy scenarios for residential applications based on the heat pump split air-conditioning units for operation in the Mediterranean climate conditions*. Energy and Buildings, Elsevier.

- [11] Economidou, M., Todeschi, V., Bertoldi, P., D'Agostino, D., Zangheri, P., & Castellazzi, L. (2020). Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings. *Energy and Buildings*, 225, 110322.
- [12] Belussi, L., Barozzi, B., Bellazzi, A., Danza, L., Devitofrancesco, A., Fanciulli, C., & Salamone, F. (2019). A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. *Journal of Building Engineering*, 25, 100772.
- [13] Kern, F., Kivimaa, P., & Martiskainen, M. (2017). Policy packaging or policy patching? The development of complex energy efficiency policy mixes. *Energy Research & Social Science*, 23, 11-25.
- [14] Allouhi, A., El Fouih, Y., Kousksou, T., Jamil, A., Zeraouli, Y., & Mourad, Y. (2015). Energy consumption and efficiency in buildings: Current status and future trends. *Journal of Cleaner Production*, 109, 118-130.
- [15] Santamouris, M. (2016). Innovating to zero the building sector in Europe: Minimising the energy consumption, eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change. *Solar Energy*, 128, 61-94.
- [16] Mardani, A., Zavadskas, E. K., Streimikiene, D., & Jusoh, A. (2016). Using fuzzy multiple criteria decision making approaches for evaluating energy saving technologies and solutions in five-star hotels: A new hierarchical framework. *Energy*, Elsevier.
- [17] Lizana, P., Mostafazadeh, F., Eirdmoussa, S. J., & Tavakolan, M. (2023). Energy, economic and comfort optimization of building retrofits considering climate change: A simulation-based NSGA-III approach. *Energy and Buildings*, Elsevier.
- [18] Motuzienė, V., & Rogoža, A. (2016). A decision support system methodology for selecting wind farm installation locations using AHP and TOPSIS: A case study in Eastern Macedonia and Thrace region, Greece. *International Journal of Strategic Property Management*.
- [19] Wang, Y., Chen, T., Li, L., & Cheng, P. F. (2020). Multistage decision framework for the selection of renewable energy sources based on prospect theory and PROMETHEE. *International Journal of Fuzzy Systems*, Springer.
- [20] Ongpeng, J. M. C., Razon, L. F., Aviso, K. B., & Tan, R. R. (2022). A multicriterion decision analysis framework for sustainable energy retrofit in buildings. *Energy*, Elsevier.