



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



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

**Βιβλιογραφική ανασκόπηση στις μεθόδους
πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης στην αναβάθμιση
κτηρίων**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
της
Κυριακής Μ. Σούκα

Επιβλέπων : Δ. Ασκούνης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2024



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



**Βιβλιογραφική ανασκόπηση στις μεθόδους
πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης στην αναβάθμιση
κτηρίων**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Κυριακής Μ. Σούκα

Επιβλέπων : Δ. Ασκούνης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25^η Ιουνίου 2024

Δ. Ασκούνης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ι. Ψαρράς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ε. Μαρινάκης

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2024

.....
Κυριακή Μ. Σούκα

Διπλωματούχος μεταπτυχιακού προγράμματος «Τεχνο-οικονομικά Συστήματα» της σχολής
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Copyright © Κυριακή Σούκα 2024

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.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση της επιστημονικής βιβλιογραφίας που ασχολείται με τη χρήση αλγορίθμων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης για την αναβάθμιση κτηρίων. Στη σύγχρονη εποχή, η ανάγκη για την εφαρμογή βιώσιμων πρακτικών που μειώνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι αδιαμφισβήτητη. Ο τομέας των κτηρίων αποτελεί σημαντικό παράγοντα επιβάρυνσης του περιβάλλοντος, ωστόσο μέσω της κατάλληλης αναβάθμισης των υφιστάμενων κτηρίων μπορούν να επιτευχθούν σημαντικές μειώσεις στην κατανάλωση ενέργειας και το κόστος λειτουργίας, παράλληλα με τη δημιουργία ευχάριστου και υγιεινού περιβάλλοντος για τους κατοίκους. Η αναβάθμιση κτηρίων απαιτεί την ταυτόχρονη αξιολόγηση και εξισορρόπηση πολλών αντικρουόμενων παραμέτρων, όπως η ενεργειακή απόδοση, το κόστος, η άνεση και η περιβαλλοντική επίπτωση. Επιπλέον, οι αλληλεξαρτήσεις των τεχνολογιών και των συστημάτων του κτηρίου, σε συνδυασμό με τη συνεργασία πολλών εμπλεκόμενων με διαφορετικές προτεραιότητες, προσθέτουν στην πολυπλοκότητα της διαδικασίας. Η αναβάθμιση κτηρίων αποτελεί, επομένως, ένα σύνθετο πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, το οποίο απαιτεί σύγχρονες μεθοδολογίες και εργαλεία. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, πραγματοποιείται εκτενής ανάλυση της σχετικής βιβλιογραφίας των τελευταίων ετών σχετικά με τις εναλλακτικές μεθόδους βελτιστοποίησης ανακαίνισης, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν οι μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης, ενώ δημιουργείται ένας κατάλογος που επιτρέπει την εύκολη πρόσβαση στις πληροφορίες. Επιπλέον, εξετάζονται οι διάφοροι τύποι και είδη κτηρίων και οι μεθοδολογίες βελτιστοποίησης που εφαρμόζονται για την αναβάθμισή τους. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της ανάλυσης και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντικές ερευνητικές εργασίες.

Abstract

This thesis focuses on analyzing scientific articles that employ multi-criteria optimization algorithms for decision-making regarding building retrofits. In recent years, the adoption of sustainable practices that contribute to reducing environmental impacts has become an imperative need. The building sector constitutes a significant burden on the environment; however, through the appropriate retrofit of existing buildings, substantial reductions in energy consumption and operating costs can be achieved, along with the creation of a pleasant and healthy environment for residents. Building upgrades require the simultaneous evaluation and balancing of many conflicting parameters, such as energy efficiency, cost, comfort, and environmental impact. Additionally, the interdependencies of building technologies and systems, combined with the collaboration of many stakeholders with different priorities, add to the complexity of the process. Therefore, building retrofit poses a complex multi-criteria optimization problem, requiring modern methodologies and tools. Within the scope of this work, an extensive analysis of relevant literature on alternative retrofit optimization methods from recent years is conducted, excluding artificial intelligence methods, while a catalog is created to facilitate easy access to information. Additionally, various types and categories of buildings are examined, along with the optimization methodologies applied in the retrofitting process. Finally, the conclusions of the analysis are presented, and suggestions for future research endeavors are outlined.

Keywords: Multi-objective optimization, Building retrofit, Alternative Optimization Methods

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	5
Abstract	7
Πίνακας περιεχομένων.....	9
Κατάλογος Εικόνων και Πινάκων	12
1 Εισαγωγή.....	13
1.1. Διερεύνηση Υπάρχουσα Γνώσης	13
1.2. Σκοπός και Αντικείμενο της Μελέτης.....	14
1.3. Δομή της εργασίας.....	15
2 Θεωρητικό υπόβαθρο.....	16
2.1. Μέθοδοι πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης	16
2.2. Αναβάθμιση κτηρίων.....	16
2.2.1. Βιωσιμότητα και ενεργειακή απόδοση	17
2.2.2. Κοινωνική και οικονομική αποδοτικότητα.....	17
3 Μεθοδολογία.....	19
3.1. Μεθοδολογία Αναζήτησης Βιβλιογραφίας	19
3.1.1. Βάσεις Δεδομένων και Πηγές Πληροφόρησης.....	19
3.1.2. Λέξεις-κλειδιά και Στρατηγικές Αναζήτησης.....	19
3.2. Κριτήρια Επιλογής Μελετών.....	20
3.2.1. Κριτήρια Ένταξης και Αποκλεισμού.....	20
3.2.2. Διαδικασία Αξιολόγησης και Επιλογής.....	21
3.2.3. Αποτελέσματα Αναζήτησης	23
3.3. Μέθοδος Καταγραφής Αποτελεσμάτων.....	24
4 Ανάλυση Βιβλιογραφίας	27
4.1. Χαρακτηριστικά κτηρίων	27
4.1.1. Λειτουργία κτηρίου	27
4.1.2. Είδος μοντέλου	28
4.1.3. Τοποθεσία	28
4.2. Τεχνικές βελτιστοποίησης.....	29
4.2.1. Γραμμικός Προγραμματισμός	30
4.2.2. Αλγόριθμοι Αναζήτησης.....	30
4.2.3. Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Multi-Objective Particle Swarm Optimization – MOPSO)	31
4.2.4. Μέθοδος Monte Carlo (MC).....	31

4.2.5.	Μέθοδος Ζυγισμένου Αθροίσματος (Weighted Sum Method – WSM).....	32
4.2.6.	Μέθοδος ε-constraint	32
4.2.7.	Διάφορες Τεχνικές	32
4.3.	Αντικειμενικές συναρτήσεις.....	33
4.3.1.	Ενέργεια.....	34
4.3.2.	Κόστος	34
4.3.3.	Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος.....	35
4.3.4.	Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις.....	36
4.3.5.	Περιορισμοί	37
4.4.	Μεταβλητές απόφασης.....	37
4.4.1.	Περίβλημα του κτηρίου	38
4.4.2.	Αναβάθμιση συστημάτων.....	39
4.4.3.	Συστήματα ελέγχου του κτηρίου	39
4.4.4.	Συστήματα ΑΠΕ	39
4.4.5.	Άλλες μεταβλητές απόφασης.....	39
4.5.	Εργαλεία και λογισμικό.....	39
4.5.1.	Εργαλεία σχεδίασης και προσομοίωσης κτηρίων.....	39
4.5.2.	Εργαλεία βελτιστοποίησης	41
5	Συμπεράσματα.....	43
5.1.	Συζήτηση	43
5.2.	Προκλήσεις και περιορισμοί	44
5.3.	Μελλοντική έρευνα	45
	Βιβλιογραφία	47
	Παράρτημα Α: Κατάλογος μελετών	55
	Παράρτημα Β: Στοιχεία κτηρίων	60
	Παράρτημα Γ: Αντικειμενικές Συναρτήσεις.....	65
	Παράρτημα Δ: Μέθοδοι & Εργαλεία.....	68

Κατάλογος Εικόνων και Πινάκων

Εικόνα 1: Μέθοδος επιλογής κύριων μελετών	22
Εικόνα 2: Πλήθος δημοσίευσης μελετών ανά έτος	23
Εικόνα 3:Κατανομή Άρθρων σε Επιστημονικά Περιοδικά	24
Εικόνα 4: Είδος λειτουργίας κτηρίου.....	27
Εικόνα 5: Είδος μοντέλου κτηρίου	28
Εικόνα 6: Χάρτης τοποθεσιών κτηρίων κύριων μελετών.....	29
Εικόνα 7: Κατανομή Τεχνικών Βελτιστοποίησης στις Κύριες Μελέτες.....	30
Εικόνα 8:Αντικειμενικές Συναρτήσεις.....	33
Εικόνα 9: Κατανομή συναρτήσεων ενέργειας.....	34
Εικόνα 10: Κατανομή συναρτήσεων κόστους.....	35
Εικόνα 11: Κατανομή συναρτήσεων Ποιότητας Εσωτερικού Περιβάλλοντος.....	36
Εικόνα 12: Κατανομή συναρτήσεων σχετικών με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις	37
Εικόνα 13:Μεταβλητές απόφασης.....	38
Εικόνα 14: Εργαλεία Σχεδίασης	40
Εικόνα 15: Εργαλεία προσομοίωσης.....	41
Εικόνα 16: Εργαλεία βελτιστοποίησης.....	42

1

Εισαγωγή

Η αναβάθμιση κτηρίων αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους τομείς της σύγχρονης αρχιτεκτονικής και μηχανικής. Σύμφωνα με την έκθεση του Περιβαλλοντικού Προγράμματος των Ηνωμένων Εθνών (United Nations Environment Programme – UNEP) [1], το 2022 ο τομέας των κτηρίων και της κατασκευής αντιπροσώπευε το 37% των παγκόσμιων εκπομπών CO² από την κατανάλωση ενέργειας και τις σχετικές διαδικασίες. Με την αύξηση της ευαισθητοποίησης γύρω από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την ανάγκη για βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, οι κτηριακές αναβαθμίσεις έχουν καταστεί απαραίτητες. Με τις ενεργειακές αναβαθμίσεις, όχι μόνο μειώνονται οι εκπομπές άνθρακα και η κατανάλωση ενέργειας, αλλά και βελτιώνεται η ποιότητα του αέρα και η άνεση των εσωτερικών χώρων και μειώνονται τα έξοδα ενέργειας για τους κατοίκους και τις επιχειρήσεις [2]. Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση (ΠΒ) [3] είναι μια από τις πιο σημαντικές μεθόδους για τη βελτίωση των αποφάσεων σε αυτόν τον τομέα, καθώς επιτρέπει την ταυτόχρονη εξέταση και αξιολόγηση πολλαπλών, συχνά αντικρουόμενων, κριτηρίων όπως το κόστος, η ενεργειακή απόδοση, η περιβαλλοντική επίπτωση και η άνεση των ενοίκων [4].

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, εστιάζουμε στις μεθόδους πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης που εφαρμόζονται στην αναβάθμιση κτηρίων, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση σε αλγόριθμους βελτιστοποίησης, όπως οι αλγόριθμοι γραμμικού προγραμματισμού, οι αλγόριθμοι αναζήτησης και οι αλγόριθμοι σμήνους σωματιδίων, οι οποίοι έχουν δείξει σημαντική αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα στην επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων [5] [6].

1.1. Διερεύνηση Υπάρχουσα Γνώσης

Η διπλωματική εργασία αυτή στηρίζεται στην δομή προηγούμενων συστηματικών βιβλιογραφικών ανασκοπήσεων, με βάση αυτή των Hashempour, Taherkhani και Mahdikhani του 2019 [7], η οποία αποτελεί μία εκτενή ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης υφιστάμενων κτηρίων. Η τελική ανάλυση βασίστηκε σε 153 τέτοιες μελέτες που εκδόθηκαν έως το 2019.

Κατά την διαδικασία αναζήτησης μελετών βρέθηκαν διάφορες συστηματικές ανασκοπήσεις που σχετίζονται στενά με το θέμα της εργασίας. Καμία τους όμως δεν εξετάζει συστηματικά νέες δημοσιεύσεις ΠΒ με Εναλλακτικές Μεθόδους Βελτιστοποίησης στην ανακαίνιση κτηρίων. Η [8] είναι

μια επισκόπηση σύγχρονων μεθοδολογιών αναβάθμισης κτηρίων που επικεντρώνεται στη διάκριση μεταξύ προσεγγίσεων που χρησιμοποιούν δεδομένα κτηρίων που έχουν συλλεγεί είτε μέσω τοποθέτησης αισθητήρων επί τόπου είτε από εθνικά αποθετήρια δεδομένων. Η μελέτη [9] αναλύει πέντε κρίσιμους άξονες για την ενεργειακή αναβάθμιση κτηρίων σε μεγάλη κλίμακα, ειδικά για ευρωπαϊκά χαρτοφυλάκια ακινήτων. Στην [10] γίνεται μια συστηματική ανασκόπηση εφαρμογών ανάλυσης ευαισθησίας της απόδοσης κτηρίων. Τέλος, η [11] παρέχει μια συστηματική ανασκόπηση μεθόδων ΠΒ για την βελτίωση προσόψεων κτηρίων. Συνεπώς, κατά την αναζήτηση σχετικών δημοσιεύσεων, δεν εντοπίστηκε έρευνα παρόμοια με αυτή της παρούσας μελέτης. Λόγω του μεγάλου όγκου δημοσιεύσεων σε αυτό το ερευνητικό πεδίο, η ανασκόπηση των πιο πρόσφατων μελετών κρίνεται απαραίτητη.

1.2. Σκοπός και Αντικείμενο της Μελέτης

Η ενεργειακή αναβάθμιση και η ανακαίνιση υφιστάμενων κτηρίων αποτελεί έναν κρίσιμο ζήτημα στον τομέα της αρχιτεκτονικής και της μηχανικής, με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, της λειτουργικότητας και της βιωσιμότητας των κατασκευών [12]. Η συνεχής αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και η ανάγκη για μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα έχουν καταστήσει επιτακτική την υιοθέτηση βέλτιστων πρακτικών και τεχνολογιών αναβάθμισης. Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση προσφέρει ένα ισχυρό εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων, επιτρέποντας την αξιολόγηση πολλαπλών κριτηρίων ταυτόχρονα .

Αυτή η μελέτη επικεντρώνεται στις Εναλλακτικές Μεθόδους Βελτιστοποίησης (EMB), που χρησιμοποιούνται για την αναβάθμιση κτηρίων. Τέτοιες μέθοδοι χρησιμοποιούν αλγορίθμους βελτιστοποίησης, όπως είναι οι αλγόριθμοι γραμμικού προγραμματισμού, οι αλγόριθμοι αναζήτησης και οι αλγόριθμοι σμήνους σωματιδίων και προσφέρουν αξιόπιστες και αποτελεσματικές λύσεις σε πολυκριτηριακά προβλήματα [13].

Το αντικείμενο της εργασίας είναι η συστηματική αναζήτηση, μελέτη και ανάλυση της βιβλιογραφίας που αφορά την αναβάθμιση κτηρίων με εναλλακτικές μεθόδους πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Στόχος είναι η φυσική συνέχεια της έρευνας που έγινε στην [7]. Πραγματοποιείται λεπτομερής ανάλυση των αναφορών που έχουν δημοσιευθεί τα τελευταία χρόνια. Σχηματίζονται εκτεταμένοι κατάλογοι με δεδομένα όπως το είδος των κτηρίων, οι μεθοδολογίες βελτιστοποίησης, οι αντικειμενικές συναρτήσεις και οι περιορισμοί τους, οι μεταβλητές απόφασης και το λογισμικό. Η έρευνα εστιάζει στον εμπλουτισμό της κατανόησης των μεθόδων αναβάθμισης κτηρίων και την εύκολη πρόσβαση σε πληροφορίες.

1.3. Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική οργανώνεται ως εξής:

Το **Κεφάλαιο 1** αποτελεί την εισαγωγή της εργασίας και παρουσιάζει το σκοπό και το αντικείμενο καθώς και τη δομή της εργασίας.

Το **Κεφάλαιο 2** αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο, δηλαδή ανάλυση των βασικών εννοιών και των μεθόδων της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης.

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται η μεθοδολογία αναζήτησης της βιβλιογραφίας, οι βάσεις δεδομένων και οι πηγές πληροφόρησης, καθώς και τα κριτήρια επιλογής των μελετών.

Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται λεπτομερής ανάλυση της σχετικής βιβλιογραφίας, παρουσιάζονται εκτενώς τα χαρακτηριστικά των κτηρίων που αναλύονται στις μελέτες, οι τεχνικές βελτιστοποίησης που εφαρμόζονται, οι αντικειμενικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των λύσεων, οι μεταβλητές απόφασης που εξετάζονται και τα εργαλεία σχεδίασης, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση των μελετών.

Στο **Κεφάλαιο 5** συνοψίζονται τα κύρια ευρήματα, αναφέρονται τα ερευνητικά κενά και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρατίθενται όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη και έπειτα, ακολουθούν τα παραρτήματα με τους καταλόγους και πίνακες που είναι το προϊόν της ανάλυσης της εργασίας.

2

Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1. Μέθοδοι πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης

Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση επικεντρώνεται στην επίλυση προβλημάτων όπου η αξιολόγηση της απόδοσης μιας λύσης γίνεται βάσει πολλών και συχνά αντικρουόμενων κριτηρίων. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μονοκριτηριακές μεθόδους, όπου υπάρχει μόνο ένας στόχος βελτιστοποίησης, η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αντιμετωπίζει την πολυπλοκότητα προσεγγίζοντας την αναζήτηση ισορροπημένων λύσεων που καλύπτουν τις αντικρουόμενες απαιτήσεις του προβλήματος. Οι εναλλακτικές μέθοδοι πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης παρέχουν ποικιλία εργαλείων για την αντιμετώπιση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Μερικές από αυτές τις μεθόδους περιλαμβάνουν αλγόριθμους γραμμικού προγραμματισμού, αλγόριθμους αναζήτησης, τη μέθοδο πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, τη μέθοδο Monte Carlo, τη μέθοδο ε-constraint, τη μέθοδο ζυγισμένου αθροίσματος και άλλες μεθόδους. Καθεμιά από αυτές τις προσεγγίσεις προσφέρει μοναδικούς τρόπους επίλυσης και αντιμετώπισης της πολυπλοκότητας των προβλημάτων βελτιστοποίησης, επιτρέποντας την εύρεση ισορροπημένων λύσεων που αντιπροσωπεύουν την καλύτερη δυνατή συνολική απόδοση βάσει των διαφορετικών κριτηρίων.

Η ανάπτυξη των τεχνολογιών και η συνεχής εξέλιξη των αλγορίθμων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης έχει ενισχύσει την εφαρμογή τους σε ποικίλες εφαρμογές, όπως η αναβάθμιση κτηρίων για βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, η βιομηχανική διαδικασία, η σχεδίαση προϊόντων, και άλλες. Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναδεικνύεται ουσιαστική για την αντιμετώπιση της πρόκλησης της πολυπλοκότητας σε σύγχρονες εφαρμογές, προσφέροντας εξατομικευμένες και βελτιωμένες λύσεις που ανταποκρίνονται στις σύγχρονες απαιτήσεις της κοινωνίας και του περιβάλλοντος.

2.2. Αναβάθμιση κτηρίων

Η αναβάθμιση κτηρίων αποτελεί διαδικασία που στοχεύει στη βελτίωση της λειτουργικότητας, της αισθητικής και της αποδοτικότητας των κτηρίων. Αυτή η διαδικασία είναι κρίσιμης σημασίας για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ενοίκων και την προσαρμογή σε νέες περιβαλλοντικές προκλήσεις και τεχνολογίες. Η αναβάθμιση κτηρίων

περιλαμβάνει την εφαρμογή τεχνολογικών και οικονομικών καινοτομιών με σκοπό την ενίσχυση της βιωσιμότητας των κτηρίων, τη μείωση του κόστους λειτουργίας και τη βελτίωση της αποδοτικότητάς τους. Από τις εργασίες που μελετήθηκαν, φαίνεται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των αναβαθμίσεων αφορά το περίβλημα του κτηρίων, τη μόνωση της στέγης και των εξωτερικών τοίχων καθώς και την αντικατάσταση των παραθύρων που συνδυαστικά οδηγούν σε μείωση των εκπομπών άνθρακα και της κατανάλωσης ενέργειας, και ως αποτέλεσμα στη μείωση των εξόδων ενέργειας για τους ενοίκους. Για να κατανοήσουμε πλήρως την αναβάθμιση κτηρίων, είναι σημαντικό να διερευνήσουμε το θεωρητικό υπόβαθρο που υποστηρίζει αυτήν τη διαδικασία. Κεντρικά θέματα περιλαμβάνουν τη βιωσιμότητα, την ενεργειακή απόδοση, την αντοχή στις κλιματικές μεταβολές και την τεχνολογική καινοτομία. Η ενσωμάτωση αυτών των παραγόντων στην αναβάθμιση κτηρίων συμβάλλει στη δημιουργία βιώσιμων και αποδοτικών κτηρίων που ανταποκρίνονται στις σύγχρονες ανάγκες της κοινωνίας.

2.2.1. Βιωσιμότητα και ενεργειακή απόδοση

Η βιωσιμότητα και η ενεργειακή απόδοση αποτελούν κρίσιμους παράγοντες στην αναβάθμιση κτηρίων, καθώς οι προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής και η ανάγκη για ενεργειακή αυτονομία γίνονται ολοένα και πιο επείγουσες. Η εφαρμογή προηγμένων τεχνικών μόνωσης και η χρήση υλικών χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης βελτιώνουν σημαντικά την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων. [14]. Η εγκατάσταση συστημάτων θέρμανσης και ψύξης που λειτουργούν με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, όπως οι θερμοαντλίες και οι εξοικονομητές θερμότητας, ενισχύουν την οικολογική αποδοτικότητα των κτηρίων ενώ περιορίζουν τις εκπομπές CO₂ [15].

Επιπλέον, η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης από τις παραδοσιακές ενεργειακές πηγές και προωθεί τη βιώσιμη ανάπτυξη. Η ενεργειακή απόδοση των κτηρίων είναι στενά συνδεδεμένη με την οικονομική αποδοτικότητα, καθώς η μείωση των λειτουργικών εξόδων μέσω ενεργειακά αποδοτικών λύσεων οδηγεί σε οικονομικά οφέλη για τους ιδιοκτήτες και τους ενοίκους των κτηρίων [16]. Η συνειδητοποίηση των οφελών από τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την εφαρμογή βιώσιμων πρακτικών αποτελεί κινητήρια δύναμη για την ανάπτυξη κτηρίων που είναι ταυτόχρονα φιλικά προς το περιβάλλον και οικονομικά βιώσιμα.

2.2.2. Κοινωνική και οικονομική αποδοτικότητα

Η κοινωνική και οικονομική αποδοτικότητα στην αναβάθμιση κτηρίων επιτυγχάνεται μέσω ποικίλων μέτρων που εστιάζουν στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων και την οικονομική αποδοτικότητα των κτηριακών εγκαταστάσεων. Η υιοθέτηση τεχνολογιών έξυπνου κτηρίου, όπως η αυτοματοποίηση των συστημάτων φωτισμού και κλιματισμού, βελτιώνει την εργασιακή

περιβαλλοντική άνεση και την απόδοση των εργαζομένων [17]. Ταυτόχρονα, η ενίσχυση της κοινωνικής συνοχής μέσω της αναβάθμισης κοινόχρηστων χώρων και των υποδομών για την προώθηση της υγείας και της ευεξίας των κατοίκων συμβάλλει στη δημιουργία βιώσιμων κοινοτήτων. Επιπλέον, η οικονομική αποδοτικότητα επιτυγχάνεται μέσω της μείωσης των λειτουργικών εξόδων μέσω μέτρων εξοικονόμησης, όπως η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και η εγκατάσταση συστημάτων ελέγχου [18]. Οι επενδύσεις σε τεχνολογίες και υποδομές που βελτιώνουν την αποδοτικότητα των κτηριακών εγκαταστάσεων οδηγούν σε μακροπρόθεσμα οικονομικά οφέλη και αύξηση της αξίας των ακινήτων. Η αποτελεσματική διαχείριση των πόρων και η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης δημιουργούν ένα περιβάλλον οικονομικής βιωσιμότητας και κοινωνικής ευημερίας για τους χρήστες και τις κοινότητες που ζουν και εργάζονται σε αυτά τα βελτιωμένα κτήρια [19].

3

Μεθοδολογία

3.1. Μεθοδολογία Αναζήτησης Βιβλιογραφίας

Η αναζήτηση βιβλιογραφίας είναι μια κρίσιμη διαδικασία για την εξασφάλιση της ποιότητας και της πληρότητας της έρευνας. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την επιλογή κατάλληλων βάσεων δεδομένων, τη χρήση κατάλληλων λέξεων-κλειδιών και στρατηγικών αναζήτησης, και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

3.1.1. Βάσεις Δεδομένων και Πηγές Πληροφόρησης

Για την αναζήτηση της βιβλιογραφίας χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες βάσεις δεδομένων και πηγές πληροφόρησης:

Scopus¹: Μία από τις μεγαλύτερες βάσεις δεδομένων για επιστημονικά άρθρα, που καλύπτει ευρύ φάσμα επιστημονικών πεδίων.

Google Scholar²: Ελεύθερα προσβάσιμη μηχανή αναζήτησης που παρέχει συνδέσμους σε πλήρη κείμενα επιστημονικών άρθρων από πολλούς εκδότες.

IEEE Xplore³: Βάση δεδομένων που επικεντρώνεται σε τεχνικά και επιστημονικά άρθρα, ιδιαίτερα στους τομείς της μηχανικής και της πληροφορικής.

ScienceDirect⁴: Παρέχει πρόσβαση σε μια μεγάλη συλλογή επιστημονικών άρθρων από πολλούς εκδότες.

3.1.2. Λέξεις-κλειδιά και Στρατηγικές Αναζήτησης

Η επιλογή των λέξεων-κλειδιών και των στρατηγικών αναζήτησης είναι ζωτικής σημασίας για την εύρεση σχετικών μελετών. Οι λέξεις-κλειδιά επιλέχθηκαν με βάση το θέμα της έρευνας και περιλάμβαναν τους ακόλουθους όρους:

- "multi-objective optimization"

¹ <https://www.scopus.com/home.uri>

² <https://scholar.google.com/>

³ <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>

⁴ <https://www.sciencedirect.com/>

- "building retrofit"
- "linear programming"
- "brute force"
- "exhaustive search"
- "particle swarm optimization"

Η στρατηγική αναζήτησης περιλάμβανε τη χρήση συνδυασμών αυτών των λέξεων-κλειδιών και την εφαρμογή φίλτρων για τον περιορισμό των αποτελεσμάτων σε πρόσφατες και σχετικές μελέτες (από το 2014 μέχρι σήμερα). Επιπροσθέτως, εφαρμόστηκε η μέθοδος χιονοστιβάδας (citation snowballing), με σκοπό να εντοπιστούν νέες σχετικές δημοσιεύσεις ανάμεσα στις πηγές των κύριων μελετών.

3.2. Κριτήρια Επιλογής Μελετών

Η επιλογή των μελετών βασίστηκε σε συγκεκριμένα κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού. Αυτά τα κριτήρια διασφάλισαν ότι οι επιλεγμένες μελέτες ήταν σχετικές, ποιοτικές και αντιπροσωπευτικές του αντικείμενου της έρευνας.

3.2.1. Κριτήρια Ένταξης και Αποκλεισμού

Στόχος αυτής της εργασίας είναι να παρέχει μια επισκόπηση της προηγούμενης βιβλιογραφίας σχετικά με την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση της αναβάθμισης κτηρίων με εναλλακτικές μεθόδους βελτιστοποίησης, σαν φυσική συνέχεια της [7], προκειμένου να καθοδηγήσει μελλοντικές μελέτες. Ως εκ τούτου, απορρίφθηκαν δημοσιεύσεις πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης που εστιάζουν αποκλειστικά σε γενετικούς αλγορίθμους [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27]. Επίσης, αγνοήθηκαν μελέτες μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης [28], [29], [30], [31], [32] καθώς και αυτές που εξετάζουν μόνο το αρχικό στάδιο της σχεδίασης και κατασκευής του κτηρίου [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42].

Όσον αφορά το αντικείμενο της βελτιστοποίησης, λήφθηκαν υπόψη δημοσιεύσεις που εξετάζουν το περίβλημα του κτηρίου, τα ενεργειακά και μηχανικά συστήματα, τα συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας, τα συστήματα ελέγχου και άλλες μεταβλητές, όπως οι συμπεριφορές των κατοίκων και η χρονικότητα, που σχετίζονται στενά με τουλάχιστον μία από τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Αγνοήθηκαν δημοσιεύσεις με αντικείμενο την αντισεισμική θωράκιση κτηρίων ή την προστασία έναντι τυφώνων [43], [44], [45], [46], [47] άλλου είδους αναβαθμίσεις στην δομή της κατασκευής του κτηρίου ή την αναβάθμιση μεμονωμένων συστημάτων του κτηρίου που δεν σχετίζονται με όλο το κτήριο [48], [49], [50], [51], [52].

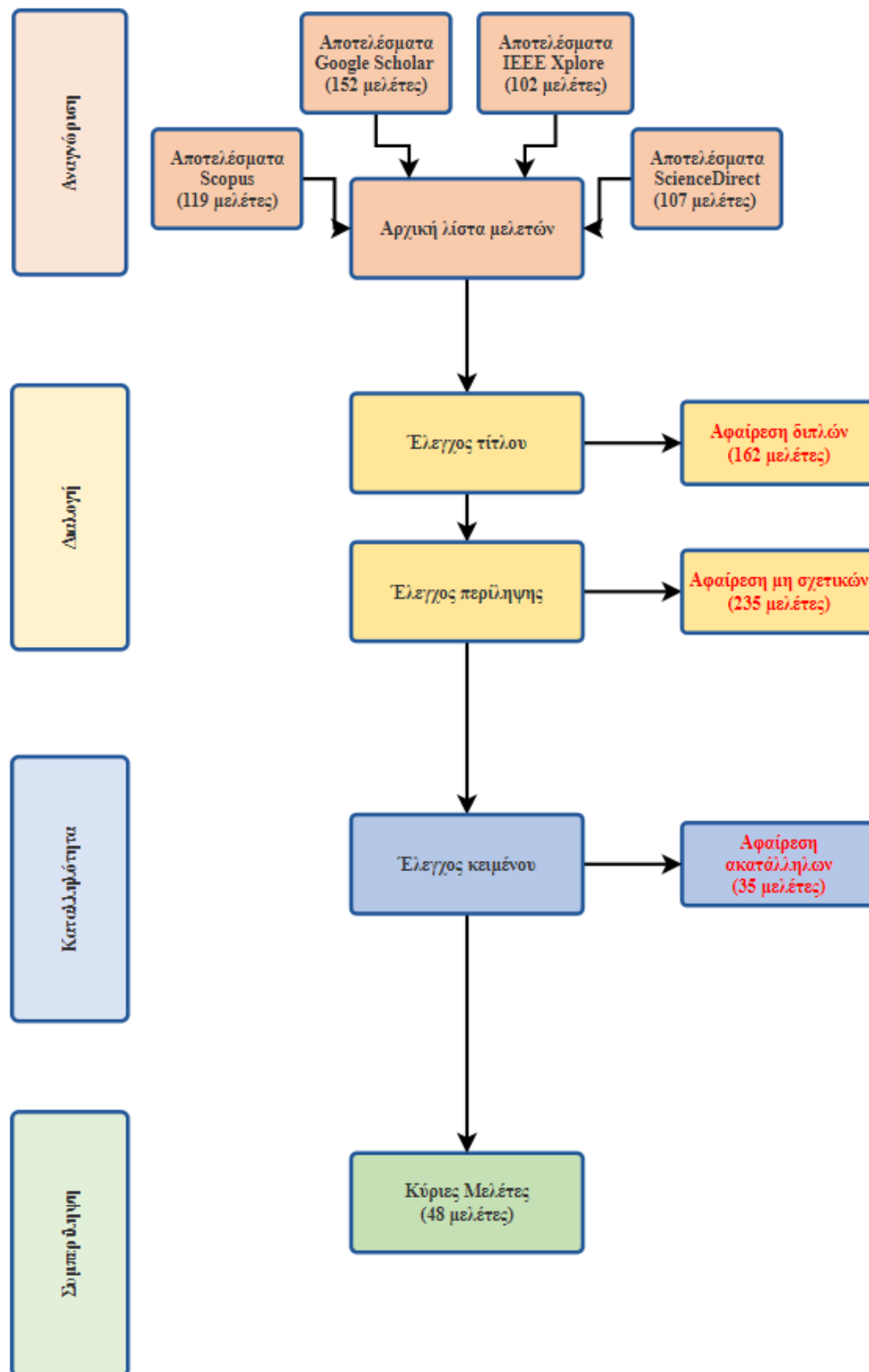
Δεν έγινε διάκριση ως προς την τοποθεσία του κτηρίου που μελετήθηκε ή την χώρα προέλευσης των συγγραφέων. Προτιμήθηκαν πλήρεις δημοσιεύσεις σε περιοδικά που δέχονται κριτική από ομότιμους

(peer-review). Τέλος, σχετικά με το χρονικό ορίζοντα, συμπεριλήφθηκαν μόνο δημοσιεύσεις που εκδόθηκαν την τελευταία δεκαετία δηλαδή από το 2014 μέχρι και το πρώτο τρίμηνο του 2024. Καθώς μέχρι το 2019 υπήρχε ήδη η δουλειά που είχε γίνει στη [7], δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στην αναζήτηση μελετών μετά το 2019.

3.2.2. Διαδικασία Αξιολόγησης και Επιλογής

Για την επιλογή των κύριων μελετών χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Η μέθοδος PRISMA είναι δομημένη σε τέσσερα στάδια: αναγνώριση, διαλογή, καταλληλότητα και συμπερίληψη, προσφέροντας μια διαφανή διαδικασία για την αξιολόγηση και την επιλογή των σχετικών μελετών (Εικόνα 1).

1. **Αναγνώριση (Identification):** Σε αυτό το στάδιο, πραγματοποιήθηκε μια εκτενής αναζήτηση σε πολλαπλές βάσεις δεδομένων, όπως το Scopus, το Google Scholar, το IEEE Xplore και το ScienceDirect χρησιμοποιώντας προκαθορισμένες λέξεις-κλειδιά και φράσεις που σχετίζονται με το αντικείμενο της έρευνας. Η αναζήτηση περιλάμβανε δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά, βιβλία και συνεδριακές εργασίες. Συλλέχθηκαν όλες οι σχετικές αναφορές, δημιουργώντας μια αρχική λίστα που περιλάμβανε 480 μελέτες.
2. **Διαλογή (Screening):** Από την αρχική λίστα, απομακρύνθηκαν τα διπλότυπα (162 μελέτες) και έγινε αξιολόγηση των τίτλων και των περιλήψεων των μελετών. Σε αυτή τη φάση, αποκλείστηκαν οι μελέτες που ήταν φανερά άσχετες με το θέμα της ανασκόπησης (235 μελέτες). Χρησιμοποιώντας τα κριτήρια συμπερίληψης και αποκλεισμού που αναφέρθηκαν παραπάνω 3.2.1, περιορίστηκε το πλήθος των μελετών σε έναν πιο διαχειρίσιμο αριθμό (83 μελέτες).
3. **Καταλληλότητα (Eligibility):** Στο στάδιο αυτό, αξιολογήθηκε το πλήρες κείμενο των μελετών που πέρασαν από το στάδιο της διαλογής. Εξετάστηκαν οι μεθοδολογίες, τα δείγματα, οι αναλύσεις και τα αποτελέσματα για να επιβεβαιωθεί η καταλληλότητά τους. Οι μελέτες που δεν πληρούσαν τα αυστηρά κριτήρια ποιότητας και σχετικότητας αποκλείστηκαν (35 μελέτες). Σε αυτό το σημείο, η λίστα περιλάμβανε μόνο τις μελέτες που ήταν απολύτως απαραίτητες και σχετικές με το θέμα (48 μελέτες).
4. **Συμπερίληψη (Inclusion):** Τέλος, οι 48 μελέτες που πέρασαν τα προηγούμενα στάδια συμπεριλήφθηκαν στην τελική βιβλιογραφική ανασκόπηση. Καταγράφηκαν τα βασικά ευρήματα, οι μεθοδολογικές προσεγγίσεις και οι συμπεράσματα κάθε μελέτης. Η διαδικασία αυτή εξασφάλισε ότι η ανασκόπηση βασίζεται σε αξιόπιστα και σχετικά δεδομένα, παρέχοντας μια σφαιρική εικόνα του ερευνητικού πεδίου.

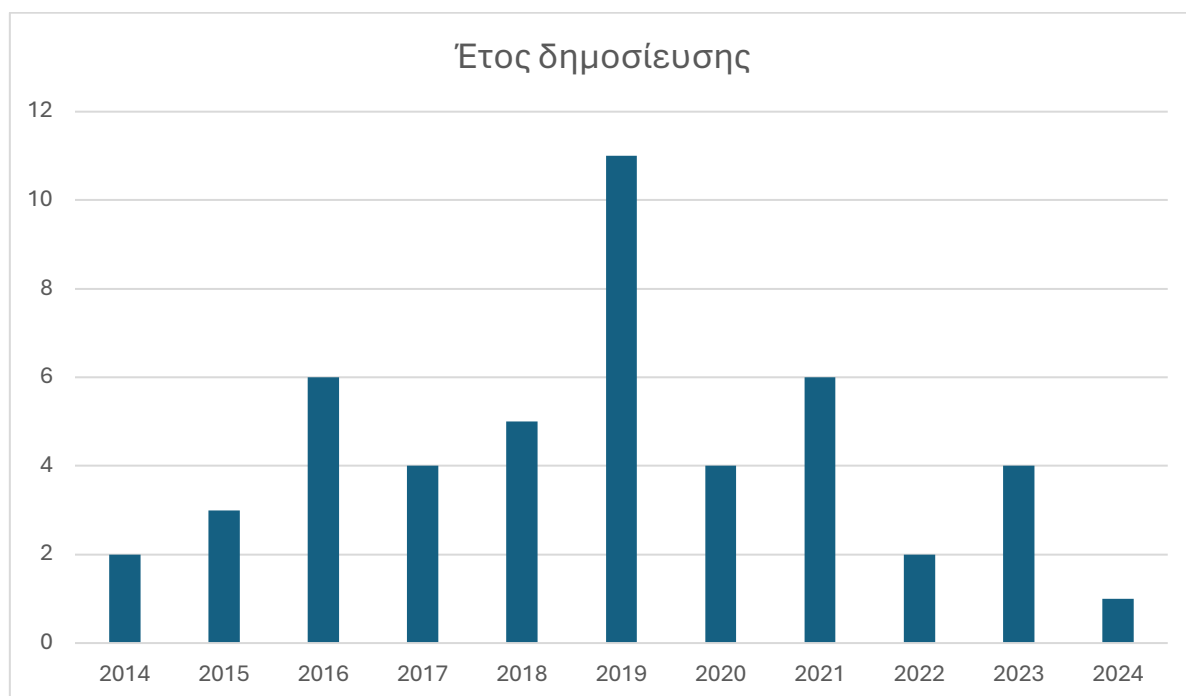


Εικόνα 1: Μέθοδος επιλογής κύριων μελετών

Η χρήση της προσέγγισης PRISMA διασφάλισε ότι η επιλογή των μελετών ήταν συστηματική, διαφανής και αμερόληπτη, αυξάνοντας την αξιοπιστία και την εγκυρότητα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης της διπλωματικής εργασίας.

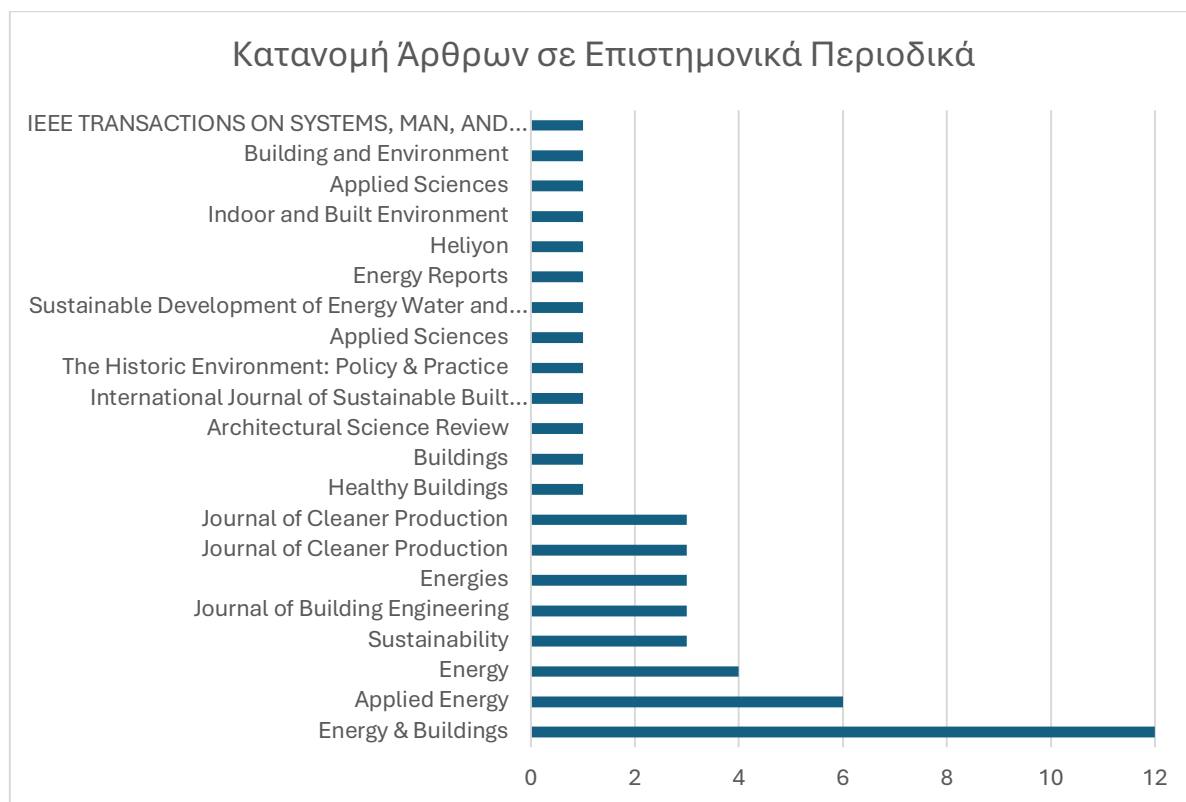
3.2.3. Αποτελέσματα Αναζήτησης

Η αναζήτηση απέδωσε 48 μελέτες στις οποίες βασίστηκε η ανάλυση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Από αυτές, οι 28 μελέτες περιλαμβάνονται και στους καταλόγους της [7] ενώ οι 20 είναι καινούργιες. Μέσω της μεθόδου χιονοστιβάδας, εντοπίστηκαν 3 έρευνες με ημερομηνία δημοσίευσης πριν το 2019, οι οποίες προστέθηκαν στον κατάλογο. Παρατηρούμε μέχρι το 2019 υπάρχει μια αυξανόμενη τάση χρήσης εναλλακτικών μεθόδων βελτιστοποίησης, ωστόσο έκτοτε υπάρχει πτωτική τάση.



Εικόνα 2: Πλήθος δημοσίευσης μελετών ανά έτος

Από τις 48 μελέτες που βρέθηκαν, οι πλειονότητά τους, 43 μελέτες, έχουν δημοσιευθεί σε επιστημονικά περιοδικά, πιο συχνά στο Energy & Buildings. Παρακάτω βλέπουμε την κατανομή των δημοσιεύσεων.



Εικόνα 3: Κατανομή Άρθρων σε Επιστημονικά Περιοδικά

Από τις εναπομένουσες, η [53] προέρχεται από τα πρακτικά του συνέδριου IEEE/SICE International Symposium on System Integration, που διεξήχθη στο Τόκιο της Ιαπωνίας το Δεκέμβρη του 2014 και η [54] αποτελεί κεφάλαιο του βιβλίου «Lecture Notes in Electrical Engineering».

3.3. Μέθοδος Καταγραφής Αποτελεσμάτων

Για τους σκοπούς αυτής τη διπλωματικής δημιουργήθηκαν οι πίνακες που παρουσιάζονται στο Παραρτήματα της εργασίας. Στο παραρτήματα της εργασίας οι πίνακες είναι συμπληρωμένοι με τις αντίστοιχες τιμές όπως αυτές αναφέρονται στις Κύριες Μελέτες.

Οι πίνακες και οι αντίστοιχες κολόνες είναι οι εξής:

- Πίνακας «Κατάλογος μελετών»

<i>ID</i>	<i>DOI</i>	<i>Τίτλος</i>	<i>Τύπος</i>	<i>Συγγραφέας</i>	<i>Έτος</i>

- ID: Ο Αύξων Αριθμός της Μελέτης για λόγους αναφοράς και εύκολης αναζήτησης
- DOI: Το μοναδικό αναγνωριστικό κάθε μελέτης
- Τίτλος: Ο τίτλος της μελέτης
- Τύπος: Ο τύπος της μελέτης (π.χ. άρθρος, κεφάλαιο βιβλίου, κλπ)
- Συγγραφέας: Το ονοματεπώνυμο του κύριου συγγραφέα της μελέτης
- Έτος: Το έτος δημοσίευσης της μελέτης

- Πίνακας «Στοιχεία κτηρίων»

<i>ID</i>	<i>Λειτουργία κτηρίου</i>	<i>Είδος μοντέλου</i>	<i>Τοποθεσία</i>	<i>Έτος Κατασκευής</i>

- ID: Ο Αύξων Αριθμός της Μελέτης για λόγους αναφοράς και εύκολης αναζήτησης
- Λειτουργία κτηρίου: Ο τρόπος χρήσης του κτηρίου
- Είδος μοντέλου: Το είδος του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη
- Τοποθεσία: Η τοποθεσία διεξαγωγής της μελέτης
- Έτος: Το έτος κατασκευής του/των υπό μελέτη κτηρίου/κτηρίων

- Πίνακας «Αντικειμενικές συναρτήσεις»

<i>ID</i>	<i>Ενέργεια</i>	<i>Κόστος</i>	<i>ΠΕΠ</i>	<i>Περιβάλλον</i>

- ID: Ο Αύξων Αριθμός της Μελέτης για λόγους αναφοράς και εύκολης αναζήτησης
- Ενέργεια: Αντικειμενικές συναρτήσεις που σχετίζονται με την ενέργεια
- Κόστος: Αντικειμενικές συναρτήσεις που σχετίζονται με το κόστος
- ΠΕΠ: Αντικειμενικές συναρτήσεις που σχετίζονται με την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος
- Περιβάλλον: Αντικειμενικές συναρτήσεις που σχετίζονται με περιβαλλοντικές επιπτώσεις

- Πίνακας «Μέθοδοι & Εργαλεία»

<i>ID</i>	<i>Μέθοδος Βελτιστοποίησης</i>	<i>Μεταβλητές Απόφασης</i>	<i>Περιορισμοί</i>	<i>Εργαλεία</i>

- ID: Ο Αύξων Αριθμός της Μελέτης για λόγους αναφοράς και εύκολης αναζήτησης
- Μέθοδος Βελτιστοποίησης: Η μέθοδος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε για αναβάθμιση κτηρίου.
- Μεταβλητές απόφασης: Οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος αναβάθμισης.
- Περιορισμοί: Οι περιορισμοί που τέθηκαν.
- Εργαλεία: Τα εργαλεία σχεδίασης, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν.

4

Ανάλυση Βιβλιογραφίας

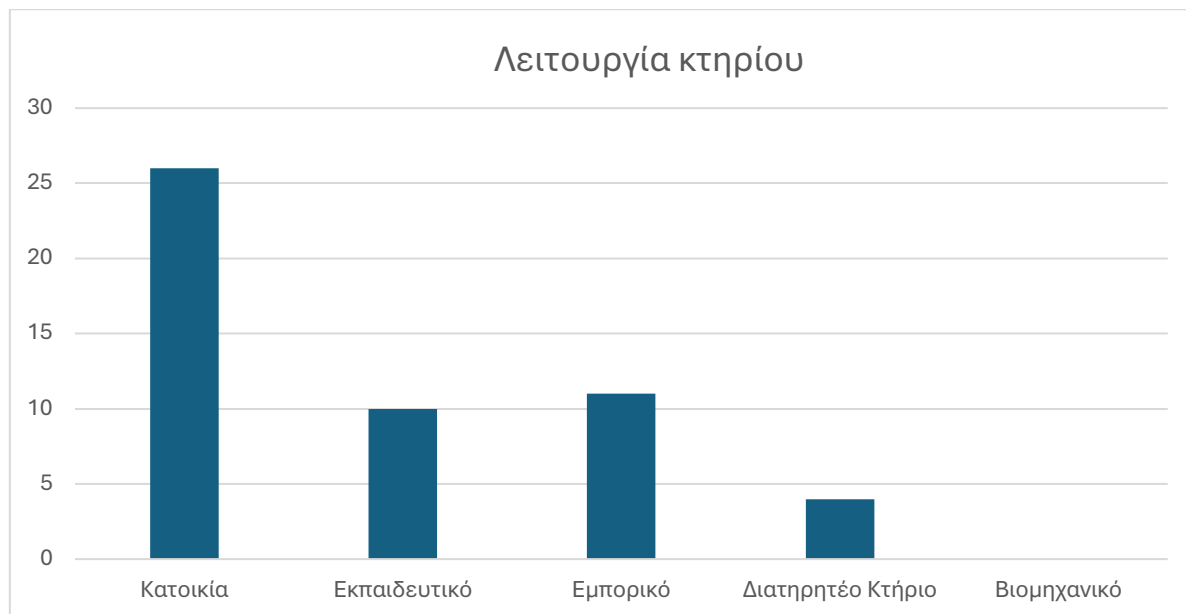
4.1. Χαρακτηριστικά κτηρίων

4.1.1. Λειτουργία κτηρίου

Η πλειονότητα των κύριων μελετών αφορά κατοικίες, όπως μονοκατοικίες, διαμερίσματα και πολυώροφα κτήρια. Υπάρχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την αναβάθμιση αυτών των κτηρίων λόγω του αντίκτυπου που έχουν στην ποιότητα ζωής των πολιτών καθώς και στο περιβάλλον σε εθνικό επίπεδο. Ωστόσο, υπάρχει επίσης σημαντικός αριθμός μελετών που αφορούν σχολεία και πανεπιστήμια καθώς και εμπορικά κτήρια, όπως γραφεία και καταστήματα.

Τέσσερις μελέτες αφορούν διατηρητέα κτήρια ή κτήρια πολιτιστικής κληρονομιάς. Οι [55] , οι [56] και οι [57] προσπαθούν να εντοπίσουν την βέλτιστη από πλευράς κόστους ενεργειακή ανακαίνιση ιστορικών κτηρίων στη Σουηδία, ενώ οι [58] προτείνουν μία μέθοδο για την ενεργειακή αποκατάσταση κτηρίων που ανήκουν στην ιστορική κληρονομιά των πόλεων όπου βρίσκονται εφαρμόζοντάς την σε ένα τέτοιο κτήριο στην πόλη Καντίθ της Ισπανίας.

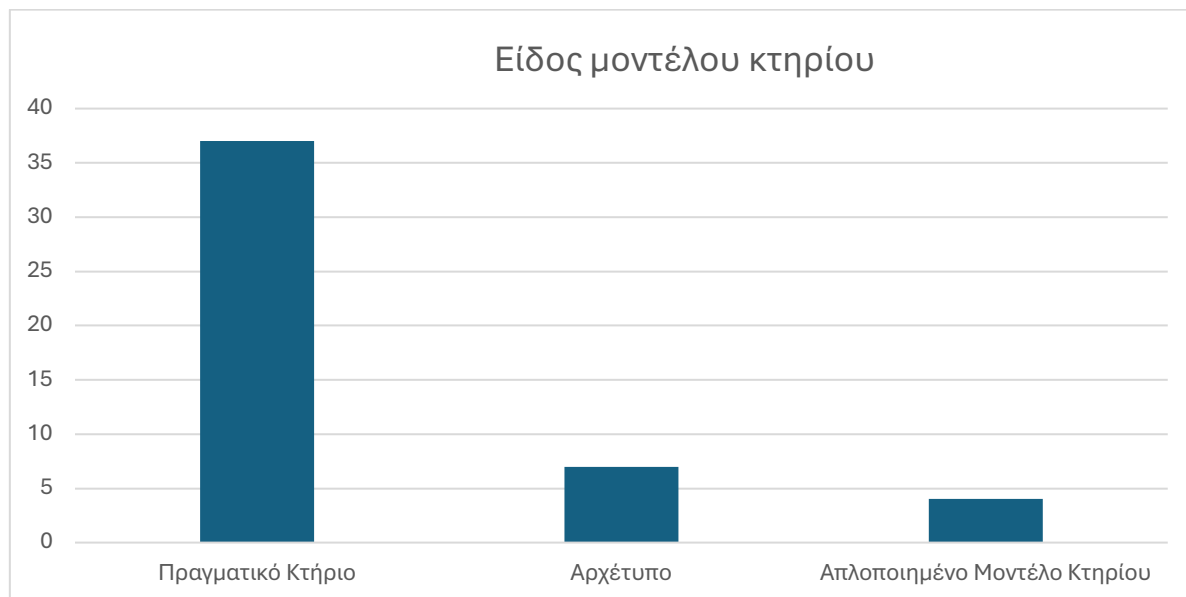
Δεν βρέθηκε καμία μελέτη που να αφορά βιομηχανικό κτήριο ή κάποια άλλη κατηγορία.



Εικόνα 4: Είδος λειτουργίας κτηρίου

4.1.2. Είδος μοντέλου

Στις περισσότερες έρευνες μελετώνται πραγματικά κτήρια με επί τόπου μετρήσεις που παρέχουν αποτελέσματα που δύναται να χρησιμοποιηθούν άμεσα για την αναβάθμιση των κτηρίων. Σε 7 μελέτες χρησιμοποιούνται αρχέτυπα κτηρίων [57], [59], [60], [61], [62], [63], [64], ενώ μόλις 4 μελέτες διεξάγονται με τη χρήση απλοποιημένων μοντέλων κτηρίων [65], [66], [67], [68].



Εικόνα 5: Είδος μοντέλου κτηρίου

4.1.3. Τοποθεσία

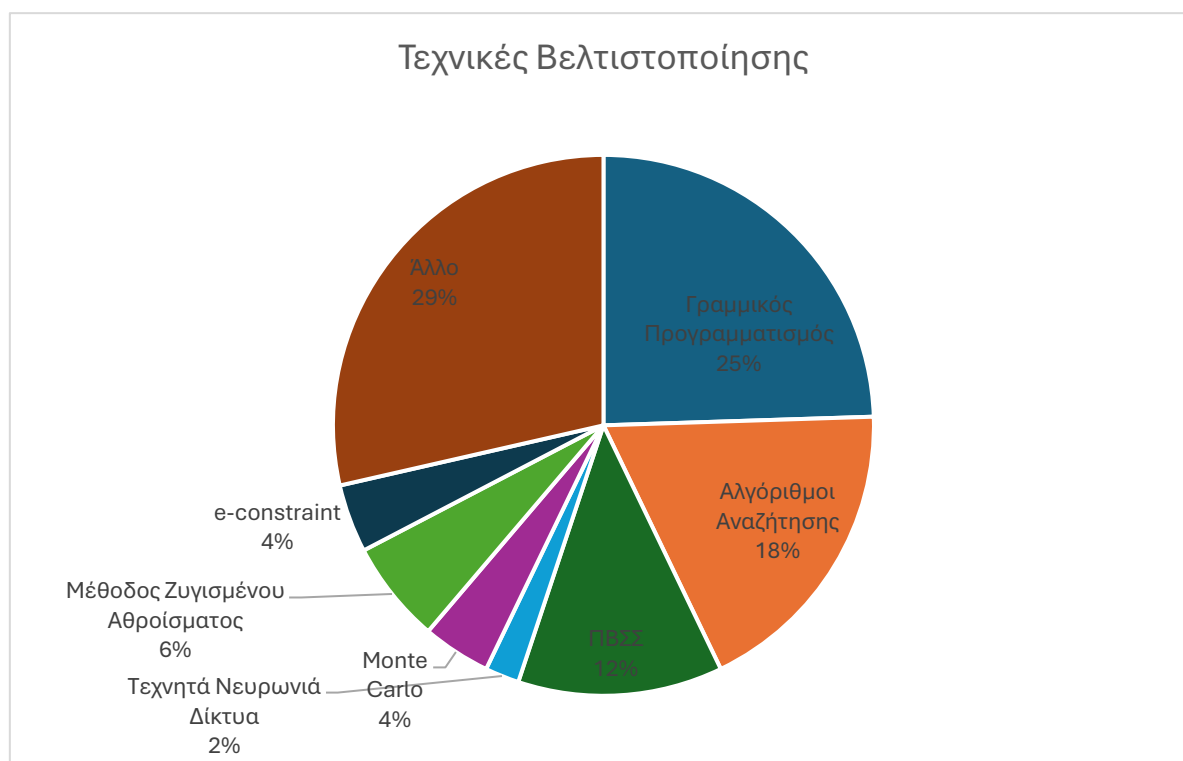
Παρακάτω παρατίθεται ο χάρτης των τοποθεσιών των κτηρίων στις κύριες μελέτες. Παρατηρούμε ότι πλειονότητα των μελετών αφορά κτήρια στην Ευρώπη και τη Β. Αμερική. Λίγες μελέτες αφορούν αναπτυσσόμενες ή λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες της Αφρικής, της Ασίας και της Νότιας Αμερικής.



Εικόνα 6: Χάρτης τοποθεσιών κτηρίων κύριων μελετών

4.2. Τεχνικές βελτιστοποίησης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστούν διεξοδικά οι κυριότερες τεχνικές βελτιστοποίησης που έχουν εφαρμοστεί στην αναβάθμιση κτηρίων, όπως αναδεικνύονται στη σχετική βιβλιογραφία. Σκοπός του κεφαλαίου είναι να προσφέρει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των διαθέσιμων αλγορίθμων βελτιστοποίησης και να αναδείξει τα εργαλεία και τις μεθόδους που μπορούν να συμβάλλουν στην αποτελεσματική αναβάθμιση κτηρίων όπως αυτές εντοπίστηκαν μέσω την ανάλυσης των Κύριων Μελετών. Στην Εικόνα 7 φαίνεται πώς κατανέμεται το πλήθος των τεχνικών βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται στις Κύριες Μελέτες και στις επόμενες ενότητες αναλύονται με λεπτομέρεια τα ευρήματα που καταγράφονται στα Παραρτήματα.



Εικόνα 7: Κατανομή Τεχνικών Βελτιστοποίησης στις Κύριες Μελέτες

4.2.1. Γραμμικός Προγραμματισμός

Από τις 48 μελέτες που εξετάστηκαν, παρατηρήθηκε ότι σε πολύ μεγάλο ποσοστό (25% - 12 μελέτες) γίνεται χρήση αλγορίθμου Γραμμικού Προγραμματισμού (Linear Programming) καθώς και μια επέκτασή του, ο αλγόριθμος Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (MILP - Mixed Integer Linear Programming). Στους αλγορίθμους Γραμμικού Προγραμματισμού η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί πρέπει να είναι γραμμικοί και οι μεταβλητές απόφασης περιλαμβάνουν μόνο γραμμικές σχέσεις, ενώ σ' αυτούς του Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί πρέπει να είναι γραμμικοί αλλά μερικές από τις μεταβλητές απόφασης πρέπει να λαμβάνουν ακέραιες τιμές.

4.2.2. Αλγόριθμοι Αναζήτησης

Η επόμενη πιο συχνά χρησιμοποιούμενη κατηγορία αλγορίθμων βελτιστοποίησης είναι αυτή των αλγορίθμων αναζήτησης που χρησιμοποιούνται σε 9 μελέτες.

Πιο συγκεκριμένα, σε 3 μελέτες ([65], [67], [69]) γίνεται χρήση του αλγορίθμου Διαδοχικής Αναζήτησης (Sequential Search) και στις υπόλοιπες του αλγορίθμου Εξαντλητικής Αναζήτησης (Exhaustive Search). Ο αλγόριθμος Διαδοχικής Αναζήτησης (Sequential Search) είναι μια απλή μέθοδο αναζήτησης όπου εξετάζονται διαδοχικά όλες οι δυνατές λύσεις μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη

λύση ενώ ο αλγόριθμος Βίαιης Δύναμης (Brute Force) ή Εξαντλητικής Αναζήτησης (Exhaustive Search) εξετάζει όλες τις πιθανές λύσεις ενός προβλήματος για να βρει τη βέλτιστη λύση.

4.2.3. Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Multi-Objective Particle Swarm Optimization – MOPSO)

Σε 6 μελέτες χρησιμοποιείται ο Particle Swarm Optimization (PSO) που είναι ένας πληθυσμιακός αλγόριθμος εμπνευσμένος από τη συμπεριφορά των σμηνών ή των ζώων που κινούνται σε ομάδες προς κατευθύνσεις που οδηγούν σε καλύτερες λύσεις. Ο αλγόριθμος διατηρεί μια ομάδα (ή σμήνος) από σωματίδια, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση του προβλήματος. Τα σωματίδια κινούνται στο χώρο αναζήτησης λύσεων χρησιμοποιώντας κανόνες που είναι βασισμένοι σε ταχύτητες και κατευθύνσεις που προσαρμόζονται με βάση την απόδοση της κάθε λύσης [68]. Ο αλγόριθμος Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) επεκτείνει τον κλασικό PSO για να αντιμετωπίσει προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, όπου υπάρχουν πολλαπλοί στόχοι που πρέπει να βελτιστοποιηθούν ταυτόχρονα και συχνά είναι αντικρουόμενοι μεταξύ τους και χρησιμοποιείται σε 2 μελέτες [58], [70].

4.2.4. Μέθοδος Monte Carlo (MC)

Σε 2 μελέτες συναντάται η μέθοδος Monte Carlo ([71], [72]). Η μέθοδος Monte Carlo είναι μια στοχαστική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, ιδίως όταν η ανάλυση του προβλήματος είναι δύσκολη ή αδύνατη με αναλυτικές μεθόδους.

Βασικές ιδέες της μεθόδου Monte Carlo είναι η τυχαιότητα και η επανάληψη:

1. Τυχαιότητα: Οι τιμές των μεταβλητών εισόδου (παραμέτρων) στο πρόβλημα βελτιστοποίησης παράγονται τυχαία, σύμφωνα με μια κατανομή που καθορίζεται.
2. Επανάληψη: Η μέθοδος Monte Carlo επαναλαμβάνει τον υπολογισμό των αντικειμενικών συναρτήσεων για κάθε σετ τυχαίων τιμών των μεταβλητών εισόδου.

Στις παραπάνω μελέτες, χρησιμοποιείται η ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Costing – LCC) για την αξιολόγηση των οικονομικών πτυχών των ενεργειακών αναβαθμίσεων σε κτήρια, ενσωματώνοντας παράλληλα την αβεβαιότητα μέσω της μεθόδου Monte Carlo.

4.2.5. Μέθοδος Ζυγισμένου Αθροίσματος (Weighted Sum Method – WSM)

Στη μέθοδο ζυγισμένου αθροίσματος (ή weighted sum method, WSM) οι πολλαπλοί στόχοι του προβλήματος μετατρέπονται σε μία μοναδική συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function) με τη χρήση βαρών (weights). Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε 2 μόλις μελέτες οι οποίες αξιοποιούν προηγμένες τεχνικές πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης για την ενεργειακή αναβάθμιση κτηρίων. Η πρώτη μελέτη [73] χρησιμοποιεί το πλαίσιο Motivation-Objective-Criteria (MOC) και τη μέθοδο Weighted Sum Method (WSM) για να συνδυάσει ενεργειακή απόδοση, κόστος και προτιμήσεις των ιδιοκτητών σε μια ολοκληρωμένη αντικειμενική συνάρτηση, προωθώντας χαμηλής ενεργειακής ανακαίνισης μέσω της συμμετοχής των ιδιοκτητών. Η δεύτερη μελέτη [74] εφαρμόζει επίσης τη μέθοδο Weighted Sum Method (WSM) για τη βελτιστοποίηση της θερμικής απόδοσης πολυκατοικιών, εστιάζοντας στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, της πρωτογενούς ενεργειακής χρήσης και των εκπομπών CO₂, εξετάζοντας διάφορα υλικά μόνωσης και συστήματα αερισμού. Και οι δύο μελέτες ενσωματώνουν πολυκριτηριακή ανάλυση και βελτιστοποίηση για να επιτύχουν ενεργειακά αποδοτικές λύσεις, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικές και οικονομικές παραμέτρους.

4.2.6. Μέθοδος ε-constraint

Η μέθοδος ε-Constraint (μελέτη [75]) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Στη μέθοδο αυτή, ένα από τα κριτήρια βελτιστοποιείται ως η κύρια συνάρτηση στόχου, ενώ τα υπόλοιπα κριτήρια μετατρέπονται σε περιορισμούς με ανώτατα όρια (ϵ). Στη μελέτη [76] χρησιμοποιείται η Απλή Ενισχυμένη Μέθοδος ε-constraint (SAUGMECON – Simple Augmented ε-Constraint Method) που είναι μια βελτιωμένη έκδοση της παραδοσιακής μεθόδου ε-Constraint. Η κύρια διαφορά είναι ότι η μέθοδος SAUGMECON προσθέτει επιπλέον όρους στο πρόβλημα για να βελτιώσει τη διαδικασία βελτιστοποίησης και να εξασφαλίσει καλύτερη εξερεύνηση του χώρου λύσεων.

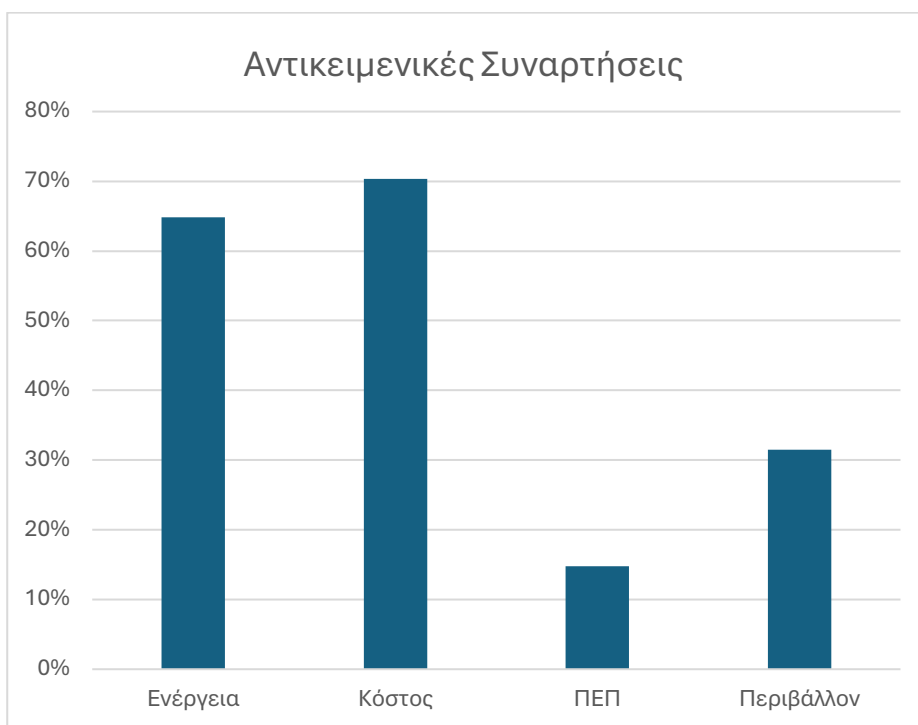
4.2.7. Διάφορες Τεχνικές

Το μεγαλύτερο ποσοστό των μελετών χρησιμοποιούν κάποια μέθοδο βελτιστοποίησης που δεν έχει χρησιμοποιηθεί σε κάποια άλλη μελέτη. Παραδείγματα αυτό είναι ο Αλγόριθμος Διαφορικής Εξέλιξης με Μη-Κυριαρχούμενη Ταξινόμηση (Non-dominated Sorting Differential Evolution Algorithm – NSDE) [62], η Μέθοδος Επιφανειών Απόκρισης (Response Surface Method – RSM) [77] και η Βελτιστοποίηση Σμήνους Χαμαιλέοντα (Chameleon Swarm Optimization CSO) [54] ή πολλαπλές μέθοδοι συνδυαστικά όπως κάνουν οι [63] που συνδυάζουν τη Στρατηγική Εξέλιξης με Προσαρμογή Πίνακα Συνδιακύμανσης (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy – CMA-

ES) με Υβριδική Διαφορική Εξέλιξη (Hybrid Differential Evolution – HDE). Αξίζει να σημειωθεί η μελέτη [78] που χρησιμοποιεί μια προσέγγιση πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης βασισμένης σε προσομοιώσεις (Simulation-Based Multi-Objective Optimization - SBMO) σε συνδυασμό με Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks - ANNs) ως υποκατάστατα μοντέλα. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει τη βελτιστοποίηση στρατηγικών ανακαίνισης κτηρίων λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση ενέργειας, το κόστος κύκλου ζωής (LCC) και την αξιολόγηση κύκλου ζωής (LCA). Τα ANNs προσομοιώνουν τα υπολογιστικά εντατικά μοντέλα SBMO, διευκολύνοντας ταχύτερες και ακριβείς προβλέψεις, κρίσιμες για την αξιολόγηση και επιλογή των βέλτιστων σεναρίων ανακαίνισης.

4.3. Αντικειμενικές συναρτήσεις

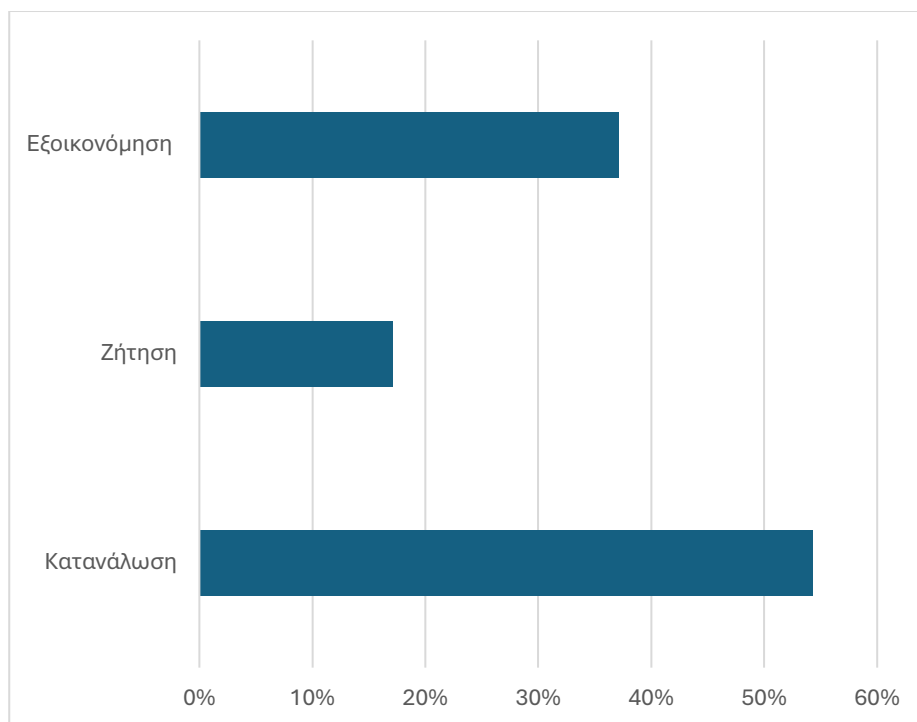
Στις διαδικασίες βελτιστοποίησης, οι αντικειμενικές συναρτήσεις εκφράζουν το στόχο που θέλουμε να επιτύχουμε και τα κριτήρια τα οποία επιδιώκουμε να βελτιστοποιήσουμε με τον αλγόριθμο. Στις μελέτες που εξετάστηκαν, οι αντικειμενικές συναρτήσεις κατατάχθηκαν σε τέσσερις κύριες κατηγορίες. Οι πιο κοινές συναρτήσεις επικεντρώνονται στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και στο κόστος ανακαίνισης, ενώ οι συναρτήσεις που σχετίζονται με τη βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι επίσης σημαντικές, αλλά λιγότερο συχνές.



Εικόνα 8: Αντικειμενικές Συναρτήσεις

4.3.1. Ενέργεια

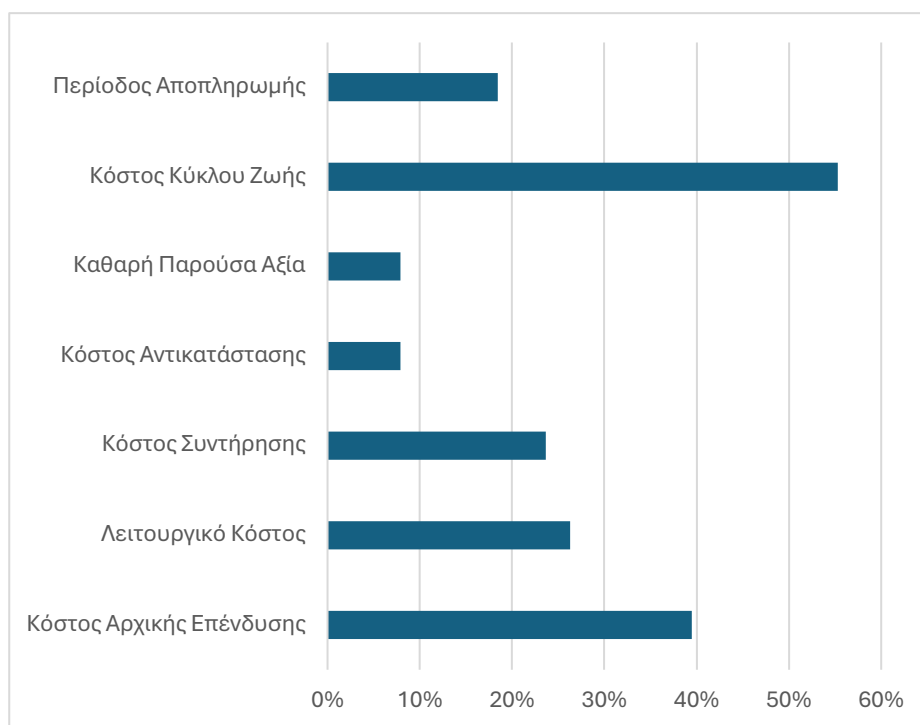
Αντικειμενικές συναρτήσεις που σχετίζονται με την ενέργεια είναι από τις πιο συχνές στη βιβλιογραφία, καθώς εμφανίζονται στο 65% των μελετών. Από αυτές, το 54% εξετάζουν την μείωση κατανάλωσης ενέργειας, και έπειτα ακολουθούν η εξοικονόμηση ενέργειας και η μείωση της ζήτησης με χαμηλότερη συχνότητα εμφάνισης στη βιβλιογραφία.



Εικόνα 9: Κατανομή συναρτήσεων ενέργειας

4.3.2. Κόστος

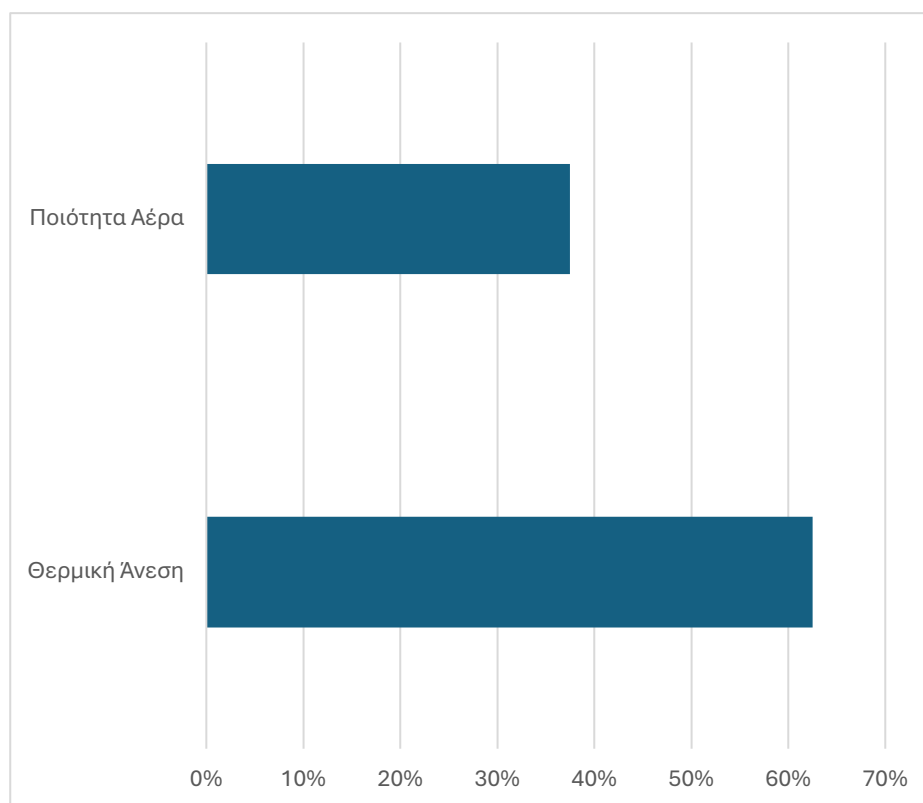
Οι αντικειμενικές συναρτήσεις που αφορούν το κόστος ανακαίνισης είναι οι πιο συνηθισμένες, με το 70% των μελετών να περιλαμβάνουν κάποια οικονομικά κριτήρια. Η ανάγκη για οικονομικά βιώσιμες λύσεις στην αναβάθμιση των κτηρίων είναι προφανής. Το πιο συνηθισμένο κριτήριο είναι το Συνολικό Κόστος Κύκλου Ζωής που περιλαμβάνει συνήθως και το Κόστος Συντήρησης και το Κόστος Αντικατάστασης τα οποία βέβαια συναντώνται και ανεξάρτητα αλλά με μικρότερη συχνότητα. Το Κόστος Αρχικής Επένδυσης είναι το επόμενο πιο συχνό κριτήριο, ακολουθούμενο από το Λειτουργικό Κόστος. Άλλα κριτήρια που εμφανίζονται στις Κύριες Μελέτες είναι η Περίοδος Αποπληρωμής, δηλαδή τα έτη που απαιτούνται για την εξόφληση του αρχικού κόστους ανακαίνισης από τα ετήσια κέρδη λόγω εξοικονόμησης καυσίμων και ηλεκτρικής ενέργειας, και η Καθαρή Παρούσα Αξία.



Εικόνα 10: Κατανομή συναρτήσεων κόστους

4.3.3. Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος

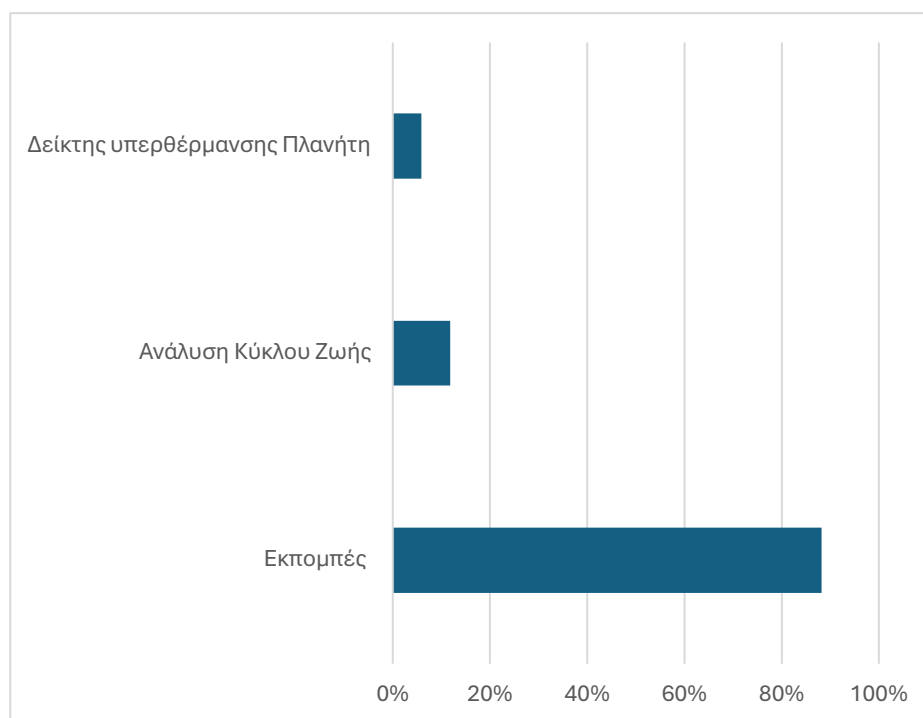
Στο 15% των Κύριων Μελετών αξιολογείται η Ποιότητα του Εσωτερικού Περιβάλλοντος των κατοίκων του κτηρίου εκ των οποίων το 63% τη Θερμική Άνεση ως αντικειμενική συνάρτηση. Οι υπόλοιπες μελέτες διερευνούν την Ποιότητα Αέρα με βάση την συγκέντρωση CO₂.



Εικόνα 11: Κατανομή συναρτήσεων Ποιότητας Εσωτερικού Περιβάλλοντος

4.3.4. Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις χρησιμοποιούνται άμεσα ως κριτήριο της βελτιστοποίησης στο 31% των μελετών. Παρ' όλα αυτά, δεν μπορούμε να αγνοήσουμε το γεγονός ότι η εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την ενέργεια που καταναλώνετε κατά την λειτουργία του κτηρίου. Για αυτό τον λόγο, οι ερευνητές αποφεύγουν την παράλληλη χρήση των συναρτήσεων αυτών. Συνήθως, υπολογίζονται οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, αλλά σε αρκετές μελέτες έχουμε και Ανάλυση Κύκλου Ζωής. Σχετική συνάρτηση είναι ο Δείκτης Υπερθέρμανσης του Πλανήτη που συναντάται σε μόλις μία μελέτη [79].



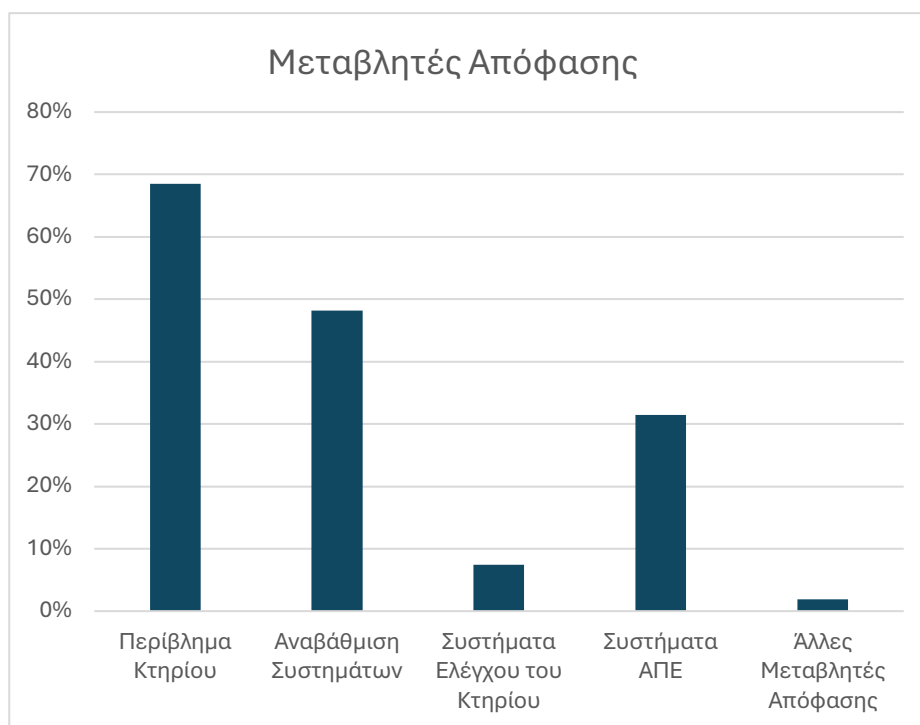
Εικόνα 12: Κατανομή συναρτήσεων σχετικών με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις

4.3.5. Περιορισμοί

Οι καταγεγραμμένοι περιορισμοί σχετίζονται με κριτήρια και στόχους παρόμοια με τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα οι περισσότερες μελέτες να μην εφαρμόζουν βελτιστοποίηση με περιορισμούς. Για λόγους οικονομίας χώρου, οι περιορισμοί που αφορούν τις μεταβλητές απόφασης δεν συμπεριλήφθηκαν στους καταλόγους. Οι περιορισμοί που επικρατούν περισσότερο αφορούν οικονομικούς παράγοντες, όπως ο προϋπολογισμός. Ακολουθούν οι περιορισμοί που σχετίζονται με την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος, με κύρια έμφαση στη θερμική άνεση, καθώς και περιορισμοί που αφορούν την ενεργειακή κατανάλωση ή τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Σπανιότερα, εξετάζονται περιορισμοί σχετικά με τη συντήρηση διατηρητέων κτηρίων.

4.4. Μεταβλητές απόφασης

Οι μεταβλητές απόφασης είναι οι παράγοντες ή οι παράμετροι που μπορούν να προσαρμοστούν ή να ρυθμιστούν σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της βελτιστοποίησης. Αυτές οι μεταβλητές αντιπροσωπεύουν τις επιλογές ή τις αποφάσεις που μπορούν να ληφθούν και η τιμή τους επηρεάζει την απόδοση της αντικειμενικής συνάρτησης [80]. Οι κατηγορίες μεταβλητών που παρατηρήθηκαν στις Κύριες Μελέτες παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 13:Μεταβλητές απόφασης

4.4.1. Περίβλημα του κτηρίου

Στο 69% των Κύριων Μελετών, οι μεταβλητές απόφασης σχετίζονται με το περίβλημα του κτηρίου. Συγκεκριμένα, παρατηρούνται διάφορες μεταβλητές για τα αδιαφανή τμήματα του περιβλήματος όπως οι εξωτερικοί και οι εσωτερικοί τοίχοι, οι προσόψεις, η στέγη, τα ταβάνια, τα πατώματα, το υπόγειο και σοφίτες, που αφορούν το υλικό, το πάχος, το πλάτος, την τιμή της θερμοπερατότητας ή της θερμικής αντίστασης της μόνωσης. Άλλες μεταβλητές αφορούν τις στρώσεις φινιρίσματος, συνήθως της οροφής, την εσωτερική ή εξωτερική επένδυση και την βαφή τοίχων που επηρεάζουν την απορροφητικότητα, την ανακλαστικότητα, το συντελεστή εκπομπής και τη λευκαύγεια. Σπάνια, εξετάζεται η τοποθέτηση επιπλέον στρωμάτων από σκυρόδεμα, κούφιο τούβλο ή ξύλο και η αντικατάσταση πορτών.

Όσον αφορά τα διαφανή τμήματα του κτηρίου, δηλαδή τα παράθυρα, συχνά εξετάζονται το υλικό του πλαισίου, ο τύπος υαλοπίνακα, ο αριθμός τζαμιών, το αέριο κενού και η επίστρωση χαμηλής εκπομπής, γενικότερα η θερμοπερατότητα, ο συντελεστής σκίασης, ο συντελεστής θερμικού κέρδους και ο ηλιακός συντελεστής. Επίσης συχνά γίνεται αναφορά σε μεταβλητές σχετικές με το μέγεθος του παράθυρου και την αναλογία παράθυρου προς τοίχου (Wall-Window Ratio, WWR).

Επιπλέον, δεν είναι λίγες οι μελέτες που περιλαμβάνουν μεταβλητές που αφορούν την σφράγιση του κτηρίου, όπως η αεροστεγανότητα και ο ρυθμός διείσδυσης αέρα. Σε αρκετές μελέτες εξετάζεται η σκίαση του κτηρίου με κουρτίνες (εσωτερικές και εξωτερικές), ρολά, προεξοχές, περύγια ή πρόστεγα.

4.4.2. Αναβάθμιση συστημάτων

Στο 48% των Κύριων Μελετών, οι μεταβλητές απόφασης σχετίζονται με την αναβάθμιση των συστημάτων του κτηρίου. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτές οι μεταβλητές σχετίζονται με τη βελτίωση του συστήματος Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού (HVAC), με επενδύσεις σε πιο αποδοτικές επιλογές, όπως αντλίες θερμότητας υψηλής απόδοσης και σύγχρονους λέβητες, καλύτερα συστήματα ψύξης, καθώς και βελτιώσεις στο σύστημα εξαερισμού και ανάκτησης θερμότητας. Επιπλέον, εξετάζονται μεταβλητές που αφορούν το σύστημα παροχής ζεστού νερού χρήσης, την αποδοτικότητα του συστήματος φωτισμού και την απόδοση των ηλεκτρικών συσκευών.

4.4.3. Συστήματα ελέγχου του κτηρίου

Μεταβλητές απόφασης που σχετίζονται με τα συστήματα ελέγχου του κτηρίου παρατηρούνται μόλις 7% των Κύριων Μελετών. Συνήθως, αυτές οι μεταβλητές αφορούν τη ρύθμιση της θερμοκρασίας για θέρμανση και ψύξη, τις περιόδους προθέρμανσης-πρόψυξης, τις ζώνες αδρανείας και τη ρύθμιση της αφύγρανσης. Επίσης, εξετάζεται ο έλεγχος του εξαερισμού, συμπεριλαμβανομένου του ρυθμού αλλαγής του αέρα και των προγραμμάτων νυχτερινού εξαερισμού. Άλλες μεταβλητές περιλαμβάνουν τον έλεγχο του φωτισμού και του συστήματος σκίασης.

4.4.4. Συστήματα ΑΠΕ

Στο 31% των Κύριων Μελετών εξετάζονται μεταβλητές που σχετίζονται με συστήματα ΑΠΕ. Συνήθως, αυτές οι μεταβλητές αφορούν την επένδυση σε φωτοβολταϊκά και ηλιακούς συλλέκτες, με παραμέτρους όπως ο αριθμός, το μέγεθος, ο τύπος και η κλίση των πάνελ.

4.4.5. Άλλες μεταβλητές απόφασης

Σε μία μόλις Κύρια Μελέτη [53] εντοπίζεται μία άλλη μεταβλητή απόφασης και αυτή αφορά τον ανθρώπινο παράγοντα, κυρίως το επίπεδο δραστηριότητας των κατοίκων και το επίπεδο ενδυμασίας.

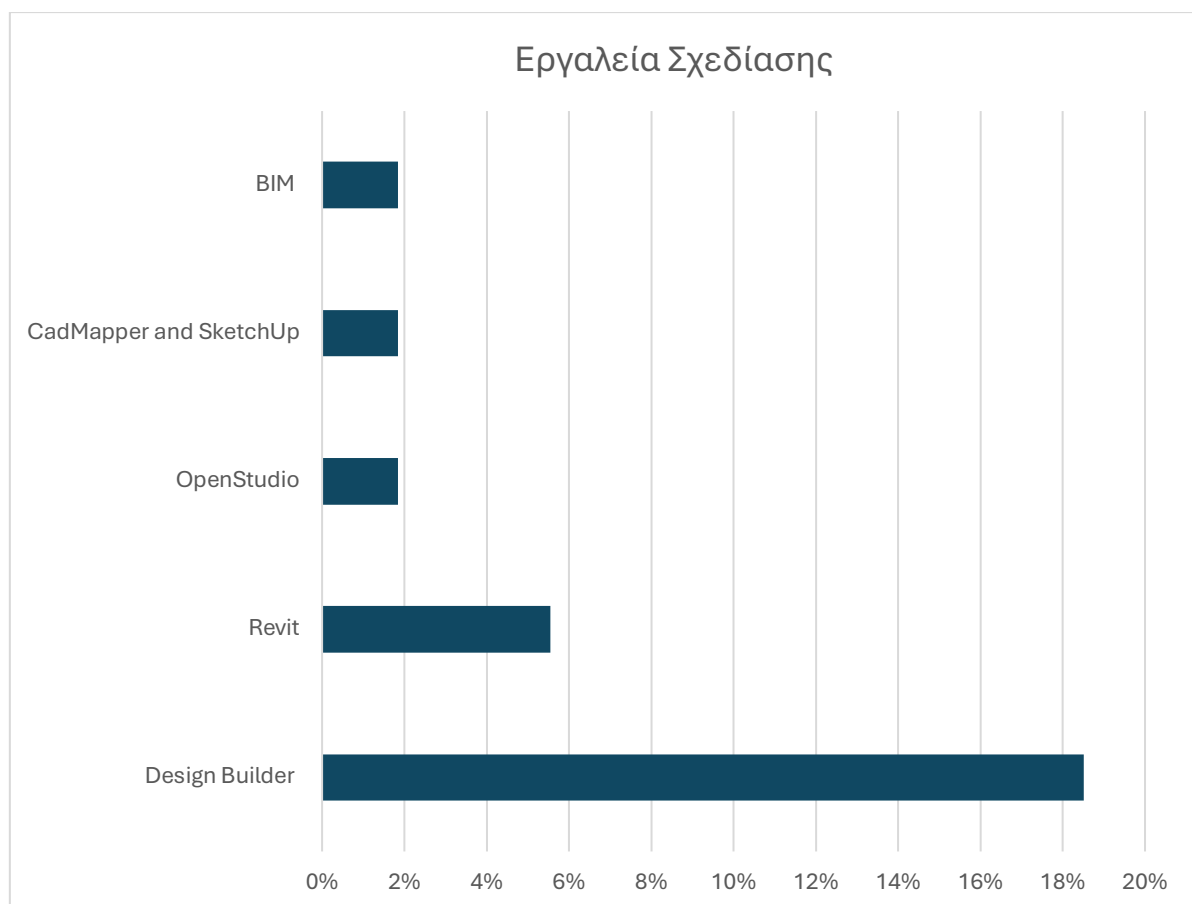
4.5. Εργαλεία και λογισμικό

4.5.1. Εργαλεία σχεδίασης και προσομοίωσης κτηρίων

Τα εργαλεία σχεδίασης και προσομοίωσης κτηρίων διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη μελέτη βελτιστοποίησης αναβάθμισης ενός κτηρίου. Αυτά τα εργαλεία επιτρέπουν στους μελετητές να εξερευνήσουν διάφορες επιλογές για την αναβάθμιση, προσφέροντας ένα εικονικό περιβάλλον για την ανάλυση και αξιολόγηση των ενδεχομένων βελτιώσεων. Η προσομοίωση δίνει τη δυνατότητα δυναμικής ανάλυσης της ενεργειακής κατανάλωσης του κτηρίου, του συστήματος Θέρμανσης-

Ψύξης-Κλιματισμού και της θερμικής άνεσης των κατοίκων. Επιπλέον, επιτρέπουν τον διαχωρισμό των χώρων του κτηρίου σε διαφορετικές θερμικές ζώνες για την εξαντλητική μελέτη των προτεινόμενων αλλαγών. Κρίσιμες παράμετροι που προσδιορίζονται στη διαδικασία της προσομοίωσης είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κτηρίου, τα χαρακτηριστικά των συστημάτων, το κλίμα, η θερμοκρασία κάθε ζώνης, ο αριθμός κατοίκων, το χρονοδιάγραμμα των συστημάτων, το φορτίο του ηλεκτρικού εξοπλισμού και άλλα στοιχεία που βοηθούν στην επικύρωση του μοντέλου, όπως η τελική κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη. Παρακάτω βλέπουμε τα εργαλεία σχεδίασης και προσομοίωσης που αναφέρονται στις Κύριες Μελέτες:

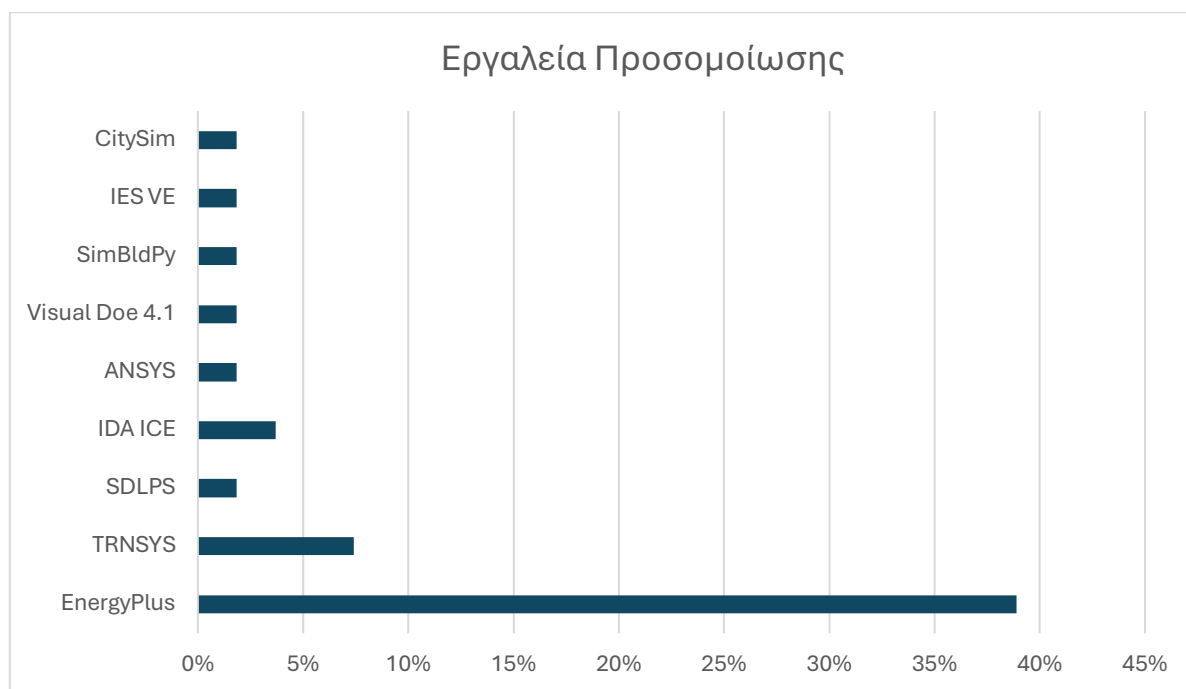
4.5.1.1. Εργαλεία σχεδίασης



Εικόνα 14: Εργαλεία Σχεδίασης

- DesignBuilder (10 μελέτες)
- Revit (3 μελέτες)
- BIM (1 μελέτη)
- CadMapper & SketchUp (1 μελέτη)
- OpenStudio (1 μελέτη)

4.5.1.2. Εργαλεία προσομοίωσης



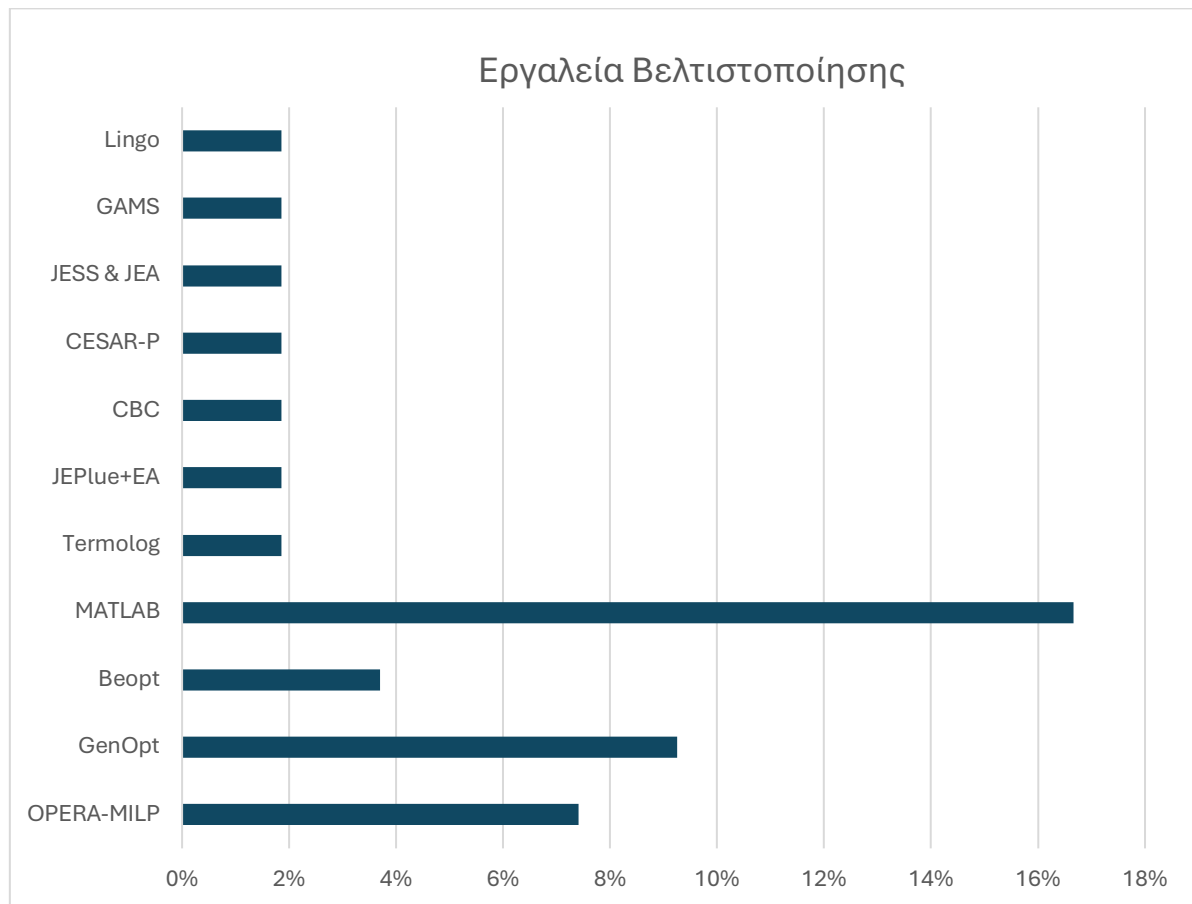
Εικόνα 15: Εργαλεία προσομοίωσης

- EnergyPlus (21 μελέτες)
- TRNSYS (4 μελέτες)
- IDA ICE (2 μελέτες)
- ANSYS (1 μελέτη)
- CitySim (1 μελέτη)
- IES VE (1 μελέτη)
- SimBldPy (1 μελέτη)
- Visual Doe 4.1 (1 μελέτη)
- SDLPS (1 μελέτη)

4.5.2. Εργαλεία βελτιστοποίησης

Τα εργαλεία βελτιστοποίησης δίνουν τη δυνατότητα εφαρμογής αλγορίθμων και τεχνικών για την αποτελεσματική διερεύνηση και επιλογή λύσεων σε προβλήματα αναβάθμισης κτηρίων. Αυτά τα εργαλεία περιλαμβάνουν αλγόριθμους, εξομοιωτές, διεπαφές με σχεδιαστικά και προσομοιωτικά εργαλεία, αναλύσεις ευαισθησίας και δεδομένων, καθώς και άλλες μορφές ανάλυσης και βελτιστοποίησης. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου, καθορίζονται παράμετροι όπως οι ρυθμίσεις του αλγορίθμου, οι μεταβλητές απόφασης, οι αντικειμενικές συναρτήσεις και οι περιορισμοί.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα εργαλεία βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται στις Κύριες Μελέτες:



Εικόνα 16: Εργαλεία βελτιστοποίησης

- Matlab (9 μελέτες)
- GenOpt (5 μελέτες)
- OPERA-MILP (4 μελέτες)
- BeOpt (2 μελέτες)
- Lingo (1 μελέτη)
- GAMS (1 μελέτη)
- JESS & JEA (1 μελέτη)
- CESAR-P (1 μελέτη)
- CBC (1 μελέτη)
- JERPlue+EA (1 μελέτη)
- Termolog (1 μελέτη)

5

Συμπεράσματα

5.1. Συζήτηση

Στη σύγχρονη εποχή, η ανάγκη για βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων είναι πιο επιτακτική από ποτέ. Η αναβάθμιση των υφιστάμενων κτηρίων με στόχο τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αποτελεί βασικό πυλώνα για την επίτευξη βιώσιμης ανάπτυξης. Η χρήση καινοτόμων τεχνολογιών και υλικών υψηλής απόδοσης είναι το κλειδί για την επίτευξη αυτών των στόχων. Οι αναβαθμίσεις στα κτήρια δεν συμβάλλουν μόνο στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, αλλά και στη βελτίωση της άνεσης και της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος για τους κατοίκους. Η ενδελεχής ανάλυση των πρόσφατων μελετών που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία προσφέρει μια ολοκληρωμένη εικόνα των μεθοδολογιών και τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για την αναβάθμιση των κτηρίων, ενώ παράλληλα αναδεικνύει τις νέες τάσεις και τις μελλοντικές προοπτικές στον τομέα.

Κύριος στόχος της παρούσας μελέτης ήταν να αναδείξει τη σημαντική συμβολή της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης στην εξεύρεση ισορροπημένων λύσεων για την αναβάθμιση κτηρίων, καθώς και την εφαρμογή εναλλακτικών μεθόδων βελτιστοποίησης ως μια ευέλικτη και αποτελεσματική προσέγγιση. Συνολικά, εξετάστηκαν 48 δημοσιεύσεις, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που εστίαζαν σε εναλλακτικές μεθόδους βελτιστοποίησης στο πλαίσιο της συστηματικής ανάλυσης [7]. Δημιουργήθηκε ένας ενιαίος κατάλογος των μελετών για μελλοντική αναφορά και εύκολη πρόσβαση. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα βασικά ευρήματα της εργασίας.

Οι περισσότερες μελέτες αφορούν κατοικίες, ενώ λιγότερες μελέτες επικεντρώνονται εμπορικά και δημόσια κτήρια και πολύ λίγες κτήρια άλλης λειτουργίας. Συνήθως δημιουργούνται μοντέλα πραγματικών κτηρίων, ενώ η χρήση αρχέτυπων και απλοποιημένων μοντέλων κτηρίων είναι σπάνια. Οι μελέτες που αφορούν κτήρια σε αναπτυσσόμενες χώρες είναι περιορισμένες, καθώς το μεγαλύτερο μέρος των δημοσιεύσεων αφορά κτήρια σε οικονομικά ανεπτυγμένες χώρες.

Οι τεχνικές βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται στις μελέτες είναι ποικίλες, με το μεγαλύτερο ποσοστό να χρησιμοποιεί αλγορίθμους Γραμμικού Προγραμματισμού και Αλγορίθμους Αναζήτησης λόγω της ικανότητάς τους να αντιμετωπίζουν την πολυπλοκότητα και την πολυδιάστατη φύση των προβλημάτων αναβάθμισης κτηρίων, προσφέροντας ταυτόχρονα ευελιξία και ακρίβεια. Συχνή είναι και η χρήση της μεθόδου Σμήνους Σωματιδίων όπως επίσης και της μεθόδου Ζυγισμένου Αθροίσματος. Επιπλέον, σε μικρό αριθμό μελετών γίνεται χρήση της μεθόδου Monte Carlo όπως και

της μεθόδους ε-constraint. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό καταλαμβάνουν μελέτες που χρησιμοποιούν κάποια πρωτότυπη μέθοδο βελτιστοποίησης που δεν συναντάται σε άλλη μελέτη.

Όσον αφορά τις αντικειμενικές συναρτήσεις, πιο συχνά εξετάζεται το κόστος των επενδύσεων, κατά κανόνα το αρχικό ή το κόστος λειτουργίας, και στη συνέχεια κριτήρια που σχετίζονται με την ενεργειακή κατανάλωση. Λιγότερο συχνοί είναι οι στόχοι που αφορούν την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι μεταβλητές απόφασης που συχνότερα συμμετέχουν αφορούν το περίβλημα του κτηρίου. Επίσης, σημαντική είναι η παρουσία μεταβλητών για τα μηχανικά και ενεργειακά συστήματα, καθώς και για τα συστήματα ΑΠΕ. Με μικρότερη συχνότητα, μελετώνται τα συστήματα ελέγχου, καθώς και μεταβλητές χρονικότητας, ανθρώπινων παραγόντων και υδραυλικών.

Η δυναμική προσομοίωση είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των κτηρίων. Το λογισμικό EnergyPlus χρησιμοποιείται ευρέως, συνήθως σε συνδυασμό με το εργαλείο σχεδίασης DesignBuilder. Όσον αφορά τα εργαλεία βελτιστοποίησης, είναι συνήθης η ανάπτυξη αλγορίθμων σε MATLAB και η χρήση προγραμμάτων όπως το GenOpt, με τα OPERA-MILP και το BeOpt να ακολουθούν στην προτίμηση.

5.2. Προκλήσεις και περιορισμοί

Παρακάτω σημειώνονται οι βασικές προκλήσεις και περιορισμοί που παρατηρήθηκαν στις κύριες μελέτες:

- Ένας από τους κύριους περιορισμούς είναι η ανάγκη για βελτίωση της απόδοσης των μεθόδων και εργαλείων που χρησιμοποιούνται. Αλλαγές στην αρχιτεκτονική των μοντέλων και η χρήση προηγμένων τεχνικών για τον καθορισμό της δομής τους μπορούν να συμβάλουν σε αυτή την κατεύθυνση. Επιπλέον, η αξιοποίηση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και την εύκολη ερμηνεία τους. Η έλλειψη επαρκών δεδομένων αποτελεί επίσης σημαντικό εμπόδιο, καθώς περιορίζει τη δυνατότητα επέκτασης και γενίκευσης των μεθόδων. Επιπρόσθετα, η αξιοπιστία των προβλέψεων αποτελεί σημαντική πρόκληση, ιδιαίτερα όταν αντιμετωπίζονται ακραίες τιμές ή ασυνήθιστες περιπτώσεις [81].
- Οι περισσότερες μελέτες υποστηρίζουν ότι η μεθοδολογία που εφαρμόσαν μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία σε παρόμοια κτήρια [82], [83], [84]. Ωστόσο, τα αποτελέσματα συνήθως περιορίζονται σε συγκεκριμένο τύπο κτηρίου και κλιματικές συνθήκες. Η έλλειψη δεδομένων αποτελεί εμπόδιο στην επέκταση της μεθοδολογίας και τη γενίκευση των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, η εφαρμογή τεχνικών όπως τα νευρωνικά δίκτυα συνήθως απαιτεί προσαρμογή στην εκάστοτε περίπτωση και δεν μεταφράζεται εύκολα σε άλλες συνθήκες.

- Είναι απαραίτητο να επιτευχθεί μεγαλύτερος βαθμός ενσωμάτωσης και αυτοματοποίησης στη διαδικασία, ώστε να γίνει πιο εύχρηστη. Η μείωση της εξάρτησης από τον ανθρώπινο παράγοντα και η μείωση της ανάγκης για εξειδικευμένες γνώσεις στην εφαρμογή της βελτιστοποίησης είναι κρίσιμες. Αυτό θα οδηγήσει σε λιγότερα σφάλματα και πιο αποδοτική εφαρμογή. Απαιτείται μια εύχρηστη διεπαφή για τους χρήστες, που θα επιτρέπει την άμεση μετάφραση διαφορετικών αναγκών και προτεραιοτήτων σε συγκεκριμένες επιλογές αναβάθμισης.
- Οι στόχοι ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος και υγείας σπάνια λαμβάνονται υπόψη, αντανακλώντας την έλλειψη προτιμήσεων των κατοίκων. Επιπλέον, η απουσία κινήτρων και οικονομικής υποστήριξης περιορίζει την ενεργό συμμετοχή τους στις διαδικασίες αναβάθμισης [85].
- Ο στόχος της βιωσιμότητας θα πρέπει να περιλαμβάνει τις πτυχές της οικονομίας, του περιβάλλοντος και της κοινωνίας. Δεδομένου ότι ο στόχος του κοινωνικού οφέλους είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί, οι περισσότερες μελέτες εξετάζουν απλώς το οικονομικό και περιβαλλοντικοί κομμάτι [86].

5.3. Μελλοντική έρευνα

Η μελλοντική έρευνα στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση για την αναβάθμιση κτηρίων μπορεί να προσανατολιστεί σε διάφορες κατευθύνσεις για την περαιτέρω βελτίωση και εφαρμογή των μεθόδων.

- Μια σημαντική κατεύθυνση είναι ο έλεγχος της εμπιστοσύνης των μεθόδων, ώστε οι προβλέψεις να απορρίπτονται σε περιπτώσεις ακραίων ή ασυνήθιστων κτηρίων. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα επέκτασης των μεθόδων για ευρύτερες εφαρμογές, όπως η ανάλυση αναβάθμισης σε επίπεδο γειτονιάς, πόλης ή κοινότητας [81].
- Συνδυαστική χρήση αλγορίθμων γραμμικού προγραμματισμού και αλγορίθμων αναζήτησης μπορεί να οδηγήσει σε πιο ολοκληρωμένες και αποτελεσματικές λύσεις για την αναβάθμιση των κτηρίων, λαμβάνοντας υπόψη διάφορους περιορισμούς και κριτήρια.
- Επιπλέον, η συνδυασμένη χρήση υποκατάστατων μοντέλων με τη μέθοδο μικτής προσομοίωσης και βελτιστοποίησης μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη [64]. Τα υποκατάστατα μοντέλα είναι ικανά να προβλέπουν λύσεις αναβάθμισης σε επίπεδο κτηρίου σε σύντομο χρονικό διάστημα, ενώ η μικτή προσομοίωση και βελτιστοποίηση εξασφαλίζει τη βέλτιστη απόδοση των αποτελεσμάτων και μπορεί να παρέχει λύσεις σε επίπεδο περιοχής. Ο συνδυασμός αυτών των δύο προσεγγίσεων στην ανάλυση αναβάθμισης για μεγάλες περιοχές θα ήταν εξαιρετικά επωφελής.

- Μια καλή ιδέα, επίσης, θα μπορούσε να είναι η δημιουργία και βελτίωση μεταμοντέλων (meta-models) που συνδυάζουν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα με φυσικές προσομοιώσεις, για να παρέχουν ακριβή αποτελέσματα με λιγότερες προσομοιώσεις [87].
- Σημαντική είναι και η ανάγκη για περαιτέρω μελέτες σε διαφορετικά γεωγραφικά μέρη και σε περισσότερα κτήρια για να εξεταστούν οι διαφορές ανάμεσα στις περιοχές και να γίνουν πιο γενικεύσιμα τα αποτελέσματα [85].

Βιβλιογραφία

- [1] «United Nations Environment Programme,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/not-yet-built-purpose-global-building-sector-emissions-still-high>.
- [2] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.archdaily.com/999955/the-power-of-energy-efficient-renovations-why-building-upgrades-are-key-to-fighting-climate-change>.
- [3] K. Alanne, «Selection of renovation actions using multi-criteria “knapsack” model,» *Automation in Construction*, τόμ. 11, αρ. 4, pp. 377-391, May 2004.
- [4] A. Fabrizio, R. F. De Masi, F. de Rossi και S. , «Optimization of building envelope design for nZEBs in Mediterranean climate: Performance analysis of residential case study,» *Applied Energy*, τόμ. 183, pp. 93-957, 2016.
- [5] C. Diakaki, E. Grigoroudis και D. Kolokotsa, «Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings,» *Energy and Buildings*, τόμ. 40, αρ. 0, pp. 1747-1754, 2008.
- [6] D. K, A. Pratap, S. Agarwal και T. Meyarivan, «A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II,» *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, τόμ. 6, αρ. 2, pp. 182-197, April 2002.
- [7] N. Hashempour, R. Taherkhani και M. Mahdikhani, «Energy Performance Optimization of Existing Buildings: A Literature Review,» *Sustainable Cities and Society*, 2019.
- [8] C. Deb και A. Schlueter, «Review of data-driven energy modelling techniques for building retrofit,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021.
- [9] A. G. Ruggeri, L. Gabrielli και M. Scarpa , «Energy Retrofit in European Building Portfolios: A Review of Five Key Aspects,» *sustainability*, 2020.
- [10] Z. Pang, Z. O'Neill , Y. Li και F. Niu, «The Role of Sensitivity Analysis in the Building Performance Analysis: A Critical Review,» *Energy & Buildings*, 2019.
- [11] R. Shan και L. Junghans, «Multi-Objective Optimization for High-Performance Building Facade Design: A Systematic Literature Review,» *Sustainability*, αρ. 21, 2023.
- [12] C. C. Coello, «Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field,» *IEEE Computational Intelligence Magazine*, τόμ. 1, αρ. 1, pp. 28-36, Feb 2006.

- [13] J.-J. Wang, . Y.-Y. Jing, C.-F. Zhang και J.-H. Zhao, «Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, τόμ. 13, αρ. 9, pp. 2263-2278, Dec 2009.
- [14] s. a. a. e. f. E. c. a. b. elivering secure, «Energy, Climate change, Environment,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://energy.ec.europa.eu>.
- [15] «World Green Building Council,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://worldgbc.org/>.
- [16] «iea50,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/buildings>.
- [17] R. Ries, M. M. Bilec, N. M. Gokhan και . K. Needy, «The Economic Benefits of Green Buildings: A Comprehensive Case Study,» *The Engineering Economist*, 2006.
- [18] B. A. Hamilton, «Green Building Economic Impact Study,» 2015 .
- [19] «THE GREEN THREAD,» EUROPEAN INVESTMENT BANK, 2019.
- [20] A. Ciardiello, F. Rosso, J. Dell’Olmo , V. Ciancio, M. Ferrero και F. Salata, «Multi-objective approach to the optimization of shape and envelope in,» *Applied Energy*, 2020.
- [21] M. Frossard, P. Schalbart και B. Peuportier, «Dynamic and consequential LCA aspects in multiobjective optimisation for NZEB design,» σε *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Paris, France, 2020.
- [22] M. Marzouk, M. ElSharkawy και A. Eissa, «Optimizing thermal and visual efficiency using parametric configuration of,» *Journal of Building Engineering*, 2020.
- [23] N. Abdou, Y. EL Mghouchi, S. Hamdaoui, N. El Asri και M. Mouqallis, «Multi-objective optimization of passive energy efficiency measures for,» *10.1016/j.buildenv.2021.108141*, 2021.
- [24] A. Galimshina, M. Moustapha, A. Hollberg, P. Padey, S. Lasvaux , B. Sudret και G. Habert, «What is the optimal robust environmental and cost-effective solution for,» *Energy & Buildings*, 2021.
- [25] M. Talaei, M. Mahdavejad, R. Azari, A. Prieto και S. Hamed , «Multi-objective optimization of building-integrated microalgae,» *Journal of Building Engineering*, 2021.
- [26] M. Marzouk, M. ElSharkawy και A. Mahmoud, «Optimizing daylight utilization of flat skylights in heritage buildings,» *Journal of Advanced Research*, 2022.
- [27] Q. Xue, Z. Wang και Q. Che, «Multi-objective optimization of building design for life cycle cost and CO2 emissions: A case study of a low-energy residential building in a severe cold climate,» 2022.
- [28] S. Yigit, «A machine-learning-based method for thermal design optimization of,» *Journal of Building Engineering*, τόμ. 38, p. 102225, 2021.
- [29] A. Jafari και V. Valentin, «10.1016/j.buildenv.2017.01.020,» *Building and Environment*, 2017.

- [30] P. Saikia, M. Pancholi, D. Sood και D. Rakshit, «Dynamic optimization of multi-retrofit building envelope for», *Energy*, 2020.
- [31] K. C. E. Jahani, «Energy savings and retrofit assessment for city-scale residential building stock during extreme heatwave events using genetic algorithm-numerical moment matching», *Clean Technol. Environ. Policy*, τόμ. 24, αρ. 7, p. 2081–2098, 2022.
- [32] S. Lu, J. Li και B. Lin, «10.1016/j.enbuild.2019.109707», *Energy & Buildings*, 2019.
- [33] R. Chen, Y.-S. Tsay και T. Zhang, «A multi-objective optimization strategy for building carbon emission from the whole life cycle perspective», *Energy*, αρ. 262, p. 125373, 2023.
- [34] R. Wang, S. Lu και W. Feng, «A three-stage optimization methodology for envelope design of passive building considering energy demand, thermal comfort and cost», *Energy*, 2019.
- [35] M. Rabani , H. Bayera Madessa και N. Nord, «Achieving zero-energy building performance with thermal and visual comfort enhancement through optimization of fenestration, envelope, shading device, and energy supply system», *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021.
- [36] F. Ascione, N. Bianco, G. M. Mauro και D. F. Napolitano, «Building envelope design: Multi-objective optimization to minimize energy consumption, global cost and thermal discomfort. Application to different Italian climatic zones», *Energy*, 2019.
- [37] Y. Wang και C. Wei, «Design optimization of office building envelope based on quantum genetic algorithm for energy conservation», 2020.
- [38] Y. Lin, S. Zhong, W. Yang, X. Hao και C.-Q. Li, «Multi-objective design optimization on building integrated photovoltaic with Trombe wall and phase change material based on life cycle cost and thermal comfort», *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021.
- [39] S. Carlucci , G. Cattarin , F. Causone και L. Pagliano, «Multi-objective optimization of a nearly zero-energy building based on thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)», *Energy & Buildings*, 2015.
- [40] U. Acar, O. Kaska και N. Tokgoz, «Multi-objective optimization of building envelope components at the preliminary design stage for residential buildings in Turkey», *Journal of Building Engineering*, 2021.
- [41] C. A. Konstantinidou, W. Lang και A. Papadopoulos, «Multiobjective optimization of a building envelope with the use of phase change materials (PCMs) in Mediterranean climates», *International Journal of Energy Research*.
- [42] Z. Li, P. Vincenzo Genovese και Y. Zhao, «Study on Multi-Objective Optimization-Based Climate Responsive Design of Residential Building», 2020.

- [43] P. Omidian και N. Khaji, «A multi-objective optimization framework for seismic resilience enhancement of typical existing RC buildings,» *J. Build. Eng.*, 2022.
- [44] M. Noureldin, A. Ali, S. Memon και J. Kim, «Fragility-based framework for optimal damper placement in low-rise moment-frame buildings using machine learning and genetic algorithm,» *J. Build. Eng.*, αρ. 54, 2022.
- [45] W. Hughes , W. Zhang και Z. Ding, «Multiobjective Optimization for Hurricane Retrofit to Improve Coastal Community Structural and Socioeconomic Resilience,» *Nat. Hazards Rev.*, 2022.
- [46] F. Nigro, R. Falcone και E. Martinelli, «Recent Developments of an Optimisation Procedure for Seismic Retrofit of RC Frames,» *Lect. Notes Civ. Eng.*, αρ. 435 LNCE, p. 260–273, 2024.
- [47] M. Noureldin , S. Ahmed και J. Kim, «Self-centering steel slotted friction device for seismic retrofit of beam-column joints,» *Steel Compos. Struct.*, τόμ. 41, αρ. 1, p. 13–30, 2021.
- [48] N. Ismail και D. Ouahrani, «A comprehensive optimization study of personal cooling radiant desks integrated to HVAC system for energy efficiency and thermal comfort in office buildings,» *Int. J. Refrig*, αρ. 156, p. 54–71, 2023.
- [49] J. A. Stampfli, B. H. Y. Ong, D. G. Olsen και B. Well, «Multi-objective evolutionary optimization for multi-period heat exchanger network retrofit,» *Energy*, τόμ. 281, p. 128175, 2023.
- [50] S. Bougrine και L. Gosselin, «Multi-objective optimization of ceiling-to-floor systems in timber buildings taking into account structural and HVAC related objectives,» *J. Build. Eng.*, τόμ. 70, p. 106410, 2023.
- [51] J. Shin και S. Park, «Optimum retrofit strategy of FRP column jacketing system for non-ductile RC building frames using artificial neural network and genetic algorithm hybrid approach,» *J. Build. Eng.*, τόμ. 57, p. 104919, 2022.
- [52] J. F. Chen, L. Zhang και Y. J. Dai, «Performance analysis and multi-objective optimization of a hybrid photovoltaic/thermal collector for domestic hot water application,» *Energy*, τόμ. 143, p. 500–516, 2018.
- [53] E. Bánóczy και P. T. Szemes, «Simulation-based optimization in energy efficiency retrofit for office building,» σε *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, Chuo University, Tokyo, Japan, December 13-15, 2014.
- [54] S. Abdolhosseinzadeh και S. N. Gollo, «A Chameleon Swarm Optimization Model for the Optimal Adjustment of Retrofit Values in Spanish Houses,» σε *Lecture Notes in Electrical Engineering*, τόμ. 1077, 2023.

- [55] V. Milić, K. Ekelöw και B. Moshfegh, «On the performance of LCC optimization software OPERA-MILP by comparison with building energy simulation software IDA ICE,» *Building and Environment*, 2017.
- [56] V. Milic' , K. Ekelöw, M. Andersson και B. Moshfegh, «Evaluation of energy renovation strategies for 12 historic building types using LCC optimization,» *Energy & Buildings*, 2019.
- [57] T. Broström, P. Eriksson, L. Liu, P. Rohdin, F. Ståhl και B. Moshfegh, «A Method to Assess the Potential for and Consequences of Energy Retrofits in Swedish Historic Buildings,» *the historic environment*, τόμ. 5, αρ. 2, 2014.
- [58] J. S. Ramos, S. Á. Domínguez, M. P. Moreno, M. G. Delgado , L. R. Rodríguez και J. A. Tenorio Ríos, «Design of the Refurbishment of Historic Buildings with a Cost-Optimal Methodology: A Case Study,» *Applied Sciences*, 2019.
- [59] D. Jermyn και R. Richman, «A process for developing deep energy retrofit strategies for single-family housing typologies: Three Toronto case studies,» *Energy & Buildings*, 2016.
- [60] K. Bamdad, «Building energy retrofits using ant colony optimisation,» *Healthy Buildings*, 2017.
- [61] R. Wu, «Multiobjective optimisation of energy systems and building envelope retrofit in a residential community,» *Applied Energy*, 2016.
- [62] P. Shen , B. William , . Y. Yi και E. Eaton, «Rapid multi-objective optimization with multi-year future weather condition and decision-making support for building retrofit,» *Energy*, 2019.
- [63] F. Haneef, G. Pernigotto , A. Gasparella και J. H. Kämpf, «Application of Urban Scale Energy Modelling and Multi-Objective Optimization Techniques for Building Energy Renovation at District Scale,» 2021.
- [64] E. Thrampoulidis , G. Hug και K. Orehounig , «Approximating optimal building retrofit solutions for large-scale retrofit analysis,» *Applied Energy*, 2023.
- [65] H. A. Leinartas και B. Stephens, «Optimizing Whole House Deep Energy Retrofit Packages: A Case Study of Existing Chicago-Area Homes,» *buildings*, 2015.
- [66] A. F. Casas, N. Garrido, J. E. Salom και P. F. i. Casas, «Optimization of energy renovation of residential sector in catalonia based on Comfort, Energy and Costs,» 2015.
- [67] M. Krarti, F. Ali, A. Alaidroos και M. Houchati, «Macro-Economic Benefit Analysis of Large Scale Building Energy Efficiency Programs in Qatar,» *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2017.
- [68] Y. Yılmaz και G. K. Oral, «An approach for an educational building stock energy retrofits through life-cycle cost,» *Architectural Science Review*, 2018.

- [69] K. Bataineh και A. Alrabee, «Design Optimization of Energy Efficient Residential Buildings in Mediterranean Region,» *Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*, 2021.
- [70] M. Sim, D. Suh και M.-O. Otto, «Multi-Objective Particle Swarm Optimization-Based Decision Support Model for Integrating Renewable Energy Systems in a,» *sustainability*, 2021.
- [71] S. Copiello, L. Gabrielli και P. Bonifaci, «Evaluation of energy retrofit in buildings under conditions of uncertainty: The prominence of the discount rate,» *Energy*, 2017.
- [72] D. Zheng , L. Yu , L. Wang και J. Tao, «A screening methodology for building multiple energy retrofit measures package considering economic and risk aspect,» *Journal of Cleaner Production*, 2018.
- [73] Y. Wang , K. Qu, X. Chen , G. Gan και S. Riffat, «An innovative retrofit Motivation-Objective-Criteria (MOC) approach integrating homeowners' engagement to unlocking low-energy retrofit,» *Energy & Buildings*, 2022.
- [74] M. Basinska , D. Kaczorek και H. Koczyk, «Building Thermo-Modernisation Solution Based on the Multi-Objective Optimisation Method,» *energies*, 2020.
- [75] E. S. Pinto και B. Amante, «Polygeneration system optimization for building energy system retrofit: A case of study for TR5 building of UPC-Terrassa,» *Energy & Buildings*, 2022.
- [76] R. Carli, . M. Dotoli, R. Pellegrino και L. Ranieri, «A Decision Making Technique to Optimize a Buildings' Stock Energy Efficiency,» *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS: SYSTEMS*, 2016.
- [77] Q. Li, L. Zhang , L. Zhang και X. Wu, «Optimizing energy efficiency and thermal comfort in building green retrofit,» *Energy*, 2021.
- [78] S. A. Sharifa και A. Hammad, «Developing surrogate ANN for selecting near-optimal building energy renovation methods considering energy consumption, LCC and LCA.,» *Journal of Building Engineering*, 2019.
- [79] D. Manjarres, L. Mabe , X. Oregi και I. . Landa-Torres, «Two-Stage Multi-Objective Meta-Heuristics for Environmental and Cost-Optimal Energy Refurbishment at District Level,» *Sustainability*, 2019.
- [80] F. S. HILLIER και G. J. LIEBERMAN, INTRODUCTION TO OPERATIONS RESEARCH, McGraw-Hill, 2001.
- [81] E. Thrampoulidis , G. Mavromatidis, A. Lucchi και K. Orehounig, «A machine learning-based surrogate model to approximate optimal building retrofit solutions,» *Applied Energy*, 2020.

- [82] B. Liu και S. Pouramini, «Multi-objective optimization for thermal comfort enhancement and greenhouse gas emission reduction in residential buildings applying retrofitting measures by an Enhanced Water Strider Optimization Algorithm: A case study,» *Energy Reports*, 2021.
- [83] M. Pazouki , K. Rezaie και A. Bozorgi-Amiri, «A fuzzy robust multi-objective optimization model for building energy retrofit considering utility function: A university building case study,» *Energy & Buildings*, 2021.
- [84] A. S. Solmaz, F. H. Halicioglu και S. Gunhan, «An approach for making optimal decisions in building energy efficiency retrofit projects,» *Indoor and Built Environment*, 2016.
- [85] V. Eloranta, A. Grönman και A. Woszczek, «Case Study and Feasibility Analysis of Multi-Objective Life Cycle Energy System Optimization in a Nordic Campus Building,» *energies*, 2021.
- [86] Y. He, N. Liao , . J. Bi και L. Guo, «Investment decision-making optimization of energy efficiency retrofit measures in multiple buildings under financing budgetary restraint,» *Journal of Cleaner Production*, 2019.
- [87] X. You , G. Yan και M. Thwin, «Applying modified coot optimization algorithm with artificial neural network meta-model for building energy performance,» *Heliyon*, 2023.
- [88] L. D. Pillaa και G. Desogusa, «Optimizing the distribution of Italian building energy retrofit incentives with Linear Programming,» *Energy and Buildings*, 2015.
- [89] L. Liu, P. Rohdina και B. Moshfegha, «LCC assessments and environmental impacts on the energy renovation of a multi-family building from the 1890s,» *Energy and Buildings*, 2016.
- [90] E. Iturriaga, «Optimal renovation of buildings towards the nearly Zero Energy Building standard,» *Energy*.
- [91] P. Shen, «The feasibility and importance of considering climate change impacts in building retrofit analysis,» *Applied Energy*, 2018.
- [92] S. A. Sharif, «Developing surrogate ANN for selecting near-optimal building energy renovation methods considering energy consumption, LCC and LCA.,» *Journal of Building Engineering*, 2019.
- [93] S. Tadeu, «Procedure to select combined heating and hot water systems: An expeditious cost optimality approach,» *Journal of Building Engineering*, 2019.
- [94] L. L. Fleur, «Energy Renovation versus Demolition and Construction of a New Building—A Comparative Analysis of a,» *Energies*, 2019.
- [95] M. Ferrara, «EDeSSOpt—Energy Demand and Supply Simultaneous Optimization for cost-optimized design: Application to a multi-family building,» *Applied Energy*, 2018.

- [96] M. Pal, A. A. Alyaf, S. Ploix, P. Reignier και S. Bandyopadhyay, «Unmasking the causal relationships latent in the interplay between occupant's actions and indoor ambience: A building energy management outlook,» *Applied Energy*, 2019.
- [97] L. Jankovic, «Lessons learnt from design, off-site construction and performance analysis of deep energy retrofit of residential buildings,» *Energy & Buildings*, 2019.
- [98] S. S. Castro, «Decision matrix methodology for retrofitting techniques of existing buildings,» *Journal of Cleaner Production*, 2019.
- [99] G. Aruta, F. Ascione , N. Bianco, T. Iovane και M. Mastellone, «Optimizing the energy transition of social housing to renewable nearly zero-energy community: The goal of sustainability,» *Energy & Buildings*, 2023.
- [100] F. Ascione, N. Bianco, T. Iovane , G. M. Mauro, D. F. Napolitano, A. Ruggiano και I. Viscido, «A real industrial building: Modeling, calibration and Pareto optimization of energy retrofit,» *Journal of Building Engineering*, 2020.
- [101] F. Ascione, N. Bianco, G. M. Mauro, D. F. Napolitano και G. P. Vanoli, «Optimization of solar energy exploitation for a neighborhood towards nearly zero energy buildings,» 2020.
- [102] F. Z. Benaddi, «Multi-objective optimization of building envelope components based on economic, environmental, and thermal comfort criteria,» *Energy & Buildings*, 2024.
- [103] C. Blum και A. Roli, «Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison.,» *ACM Computing Surveys* , τόμ. 35, pp. 268-308, January 2001.
- [104] H. H. Hoos και T. Stützle, «Stochastic local search: Foundations and applications,» *Elsevier*, 2004.
- [105] Z. Michalewicz και . D. B. Fogel, «How to solve it: Modern heuristics,» *Springer Science & Business Media.*, 2004.
- [106] F. Ascione , N. Bianco, T. Iovane, G. M. Mauro, D. F. Napolitano, A. Ruggiano και L. Viscido, «A real industrial building: Modeling, calibration and Pareto optimization of energy retrofit,» *Journal of Building Engineering*, 2020.
- [107] T. Niemelä , R. Kosonen και J. Jokisalo, «Cost-optimal energy performance renovation measures of educational buildings in cold climate,» *Applied Energy*, 2016.

Παράρτημα Α: Κατάλογος μελετών

<i>ID</i>	<i>DOI</i>	<i>Τίτλος</i>	<i>Τύπος</i>	<i>Συγγραφέας</i>	<i>Έτος</i>
[57]	10.1179/1756750514Z.00000000055	A method to assess the potential for and consequences of energy retrofits in Swedish historic buildings	Άρθρο	Tor Broström	2014
[53]	10.1109/SII.2014.7028041	Simulation-based optimization in energy efficiency retrofit for office building	Έγγραφο συνεδρίου	Emese Bánóczy	2014
[65]	10.3390/buildings5020323	Optimizing Whole House Deep Energy Retrofit Packages: A Case Study of Existing Chicago-Area Homes	Άρθρο	Honnie Aguilar Leinartas	2015
[66]	10.26868/25222708.2015.2908	Optimization of energy renovation of residential sector in catalonia based on comfort, energy and costs	Έγγραφο συνεδρίου	Joana Ortiz	2015
[59]	10.1016/j.enbuild.2016.01.022	A process for developing deep energy retrofit strategies for single-family housing typologies: Three Toronto case studies	Άρθρο	Denver Jermyn Russell Richman	2016
[88]	10.1016/j.enbuild.2015.11.050	Optimizing the distribution of Italian building energy retrofit incentives with Linear Programming	Άρθρο	L. Di Pilla	2015
[89]	10.1016/j.enbuild.2016.10.040	LCC assessments and environmental impacts on the energy renovation of a multi-family building from the 1890s	Άρθρο	Linn Liu	2016
[76]	10.1109/TSMC.2016.2521836	A Decision Making Technique to Optimize a Buildings' Stock Energy Efficiency	Άρθρο	Raffaele Carli	2016
[71]	10.1016/j.energy.2017.06.159	Evaluation of energy retrofit in buildings under conditions of uncertainty: The prominence of the discount rate	Άρθρο	Sergio Copiello	2017

<i>ID</i>	<i>DOI</i>	<i>Τίτλος</i>	<i>Τύπος</i>	<i>Συγγραφέας</i>	<i>Έτος</i>
[60]	M/Δ	Building energy retrofits using ant colony optimisation	Άρθρο	Keivan Bamdad	2017
[67]	10.1016/j.ijbe.2017.12.006	Macro-Economic Benefit Analysis of Large Scale Building Energy Efficiency Programs in Qatar	Άρθρο	Moncef Krarti	2017
[61]	10.1016/j.apenergy.2016.12.161	Multiobjective optimisation of energy systems and building envelope retrofit in a residential community	Άρθρο	Raphael Wu	2016
[72]	10.1016/j.jclepro.2018.10.196	A screening methodology for building multiple energy retrofit measures package considering economic and risk aspects	Άρθρο	Donglin Zheng	2018
[55]	10.1016/j.buildenv.2017.11.012	On the performance of LCC optimization software OPERA-MILP by comparison with building energy simulation software IDA ICE	Άρθρο	Vlatko Milić	2017
[68]	10.1080/00038628.2018.1447438	An approach for an educational building stock energy retrofits through life-cycle cost optimization	Άρθρο	Yiğit Yılmaz	2018
[90]	10.1016/j.energy.2018.07.023	Optimal renovation of buildings towards the nearly Zero Energy Building standard	Άρθρο	E. Iturriaga	2018
[91]	10.1016/j.apenergy.2018.10.041	The feasibility and importance of considering climate change impacts in building retrofit analysis	Άρθρο	Pengyuan Shen	2018
[79]	10.3390/su11051495	Two-Stage Multi-Objective Meta-Heuristics for Environmental and Cost-Optimal Energy Refurbishment at District Level	Άρθρο	Diana Manjarres	2019
[92]	10.1016/j.jobe.2019.10.0790	Developing surrogate ANN for selecting near-optimal building energy renovation methods considering energy consumption, LCC and LCA.	Άρθρο	Sayed Amirhosain Sharif	2019
[93]	10.1016/j.jobe.2019.10.0838	Procedure to select combined heating and hot water systems: An	Άρθρο	Sérgio Tadeu	2019

<i>ID</i>	<i>DOI</i>	<i>Τίτλος</i>	<i>Τύπος</i>	<i>Συγγραφέας</i>	<i>Έτος</i>
		expeditious cost optimality approach			
[56]	10.1016/j.enbuild.2019.05.017	Evaluation of energy renovation strategies for 12 historic building types using LCC optimization.	Άρθρο	Vlatko Milic	2019
[58]	10.3390/app9153104	Design of the Refurbishment of Historic Buildings with a Cost-Optimal Methodology: A Case Study.	Άρθρο	José Sánchez Ramos	2019
[94]	10.3390/en12112218	Energy Renovation versus Demolition and Construction of a New Building—A Comparative Analysis of a Swedish Multi-Family Building	Άρθρο	Lina La Fleur	2019
[95]	10.1016/j.apenergy.2018.12.043	EDeSSOpt—Energy Demand and Supply Simultaneous Optimization for cost-optimized design: Application to a multi-family building	Άρθρο	Maria Ferrara	2018
[96]	10.1016/j.apenergy.2019.01.118	Unmasking the causal relationships latent in the interplay between occupant's actions and indoor ambience: A building energy management outlook	Άρθρο	Monalisa Pal	2019
[97]	10.1016/j.enbuild.2019.01.011	Lessons learnt from design, off-site construction and performance analysis of deep energy retrofit of residential buildings	Άρθρο	Ljubomir Jankovic	2019
[98]	10.1016/j.jclepro.2019.118153	Decision matrix methodology for retrofitting techniques of existing buildings	Άρθρο	Silvia Soutullo Castro	2019
[69]	10.13044/j.sdewes.d9.0385	Design Optimization of Energy Efficient Residential Buildings in Mediterranean Region	Άρθρο	Khaled Bataineh	2016
[63]	10.3390/su132011554	Application of Urban Scale Energy Modelling and Multi-Objective Optimization Techniques for Building Energy Renovation at District Scale	Άρθρο	Fahad Haneef	2021
[99]	10.1016/j.enbuild.2023.112798	Optimizing the energy transition of social housing to renewable nearly zero-energy community: The goal of sustainability	Άρθρο	Giuseppe Aruta	2023

<i>ID</i>	<i>DOI</i>	<i>Τίτλος</i>	<i>Τύπος</i>	<i>Συγγραφέας</i>	<i>Έτος</i>
[75]	10.1016/j.enbuild.2022.112375	Polygeneration system optimization for building energy system retrofit: A case of study for TR5 building of UPC-Terrassa	Άρθρο	Edwin S. Pinto	2022
[73]	10.1016/j.enbuild.2022.111834	An innovative retrofit Motivation-Objective-Criteria (MOC) approach integrating homeowners' engagement to unlocking low-energy retrofit in residential buildings	Άρθρο	Yuhao Wang	2022
[91]	10.1016/j.energy.2019.01.164	Rapid multi-objective optimization with multi-year future weather condition and decision-making support for building retrofit	Άρθρο	Pengyuan Shen	2019
[83]	10.1016/j.enbuild.2021.110933	A fuzzy robust multi-objective optimization model for building energy retrofit considering utility function: A university building case study	Άρθρο	Mohammad Pazouki	2021
[82]	10.1016/j.egy.2021.03.044	Multi-objective optimization for thermal comfort enhancement and greenhouse gas emission reduction in residential buildings applying retrofitting measures by an Enhanced Water Strider Optimization Algorithm: A case study	Άρθρο	Bo Liu	2021
[77]	10.1016/j.energy.2021.121509	Optimizing energy efficiency and thermal comfort in building green retrofit	Άρθρο	Qing Li	2021
[74]	10.3390/en13061433	Building Thermo-Modernisation Solution Based on the Multi-Objective Optimisation Method	Άρθρο	Małgorzata Basinska	2020
[100]	10.1016/j.jobe.2020.101186	A real industrial building: Modeling, calibration and Pareto optimization of energy retrofit	Άρθρο	Fabrizio Ascione	2020
[101]	M/Δ	Optimization of solar energy exploitation for a neighborhood towards nearly zero energy buildings	Άρθρο	Fabrizio Ascione	2020

<i>ID</i>	<i>DOI</i>	<i>Τίτλος</i>	<i>Τύπος</i>	<i>Συγγραφέας</i>	<i>Έτος</i>
[54]	10.1007/978-3-031-42685-8_9	A Chameleon Swarm Optimization Model for the Optimal Adjustment of Retrofit Values in Spanish Houses	Κεφάλαιο βιβλίου	Sama Abdolhosseinzadeh	2023
[81]	10.1016/j.apenergy.2020.116024	A machine learning-based surrogate model to approximate optimal building retrofit solutions	Άρθρο	Emmanouil Thrampoulidis	2020
[102]	10.1016/j.enbuild.2024.113909	Multi-objective optimization of building envelope components based on economic, environmental, and thermal comfort criteria	Άρθρο	Fatima Zahra Benaddi	2024
[64]	10.1016/j.apenergy.2022.120566	Approximating optimal building retrofit solutions for large-scale retrofit analysis	Άρθρο	Emmanouil Thrampoulidis	2023
[87]	10.1016/j.heliyon.2023.e16593	Applying modified coot optimization algorithm with artificial neural network meta-model for building energy performance optimization: A case study	Άρθρο	Xiaoming You	2023
[86]	10.1016/j.jclepro.2019.01.119	Investment decision-making optimization of energy efficiency retrofit measures in multiple buildings under financing budgetary restraint	Άρθρο	Yong He	2019
[84]	10.1177/1420326X16674764	An approach for making optimal decisions in building energy efficiency retrofit projects	Άρθρο	Aslihan Senel Solmaz	2016
[85]	10.3390/en14227742	Case Study and Feasibility Analysis of Multi-Objective Life Cycle Energy System Optimization in a Nordic Campus Building	Άρθρο	Vilppu Eloranta	2021
[70]	10.3390/su13158660	Multi-Objective Particle Swarm Optimization-Based Decision Support Model for Integrating Renewable Energy Systems in a Korean Campus Building	Άρθρο	Minjeong Sim	2021

Παράρτημα Β: Στοιχεία κτηρίων

<i>ID</i>	<i>Λειτουργία κτηρίου</i>							<i>Είδος μοντέλου</i>			<i>Τοποθεσία</i>	<i>Έτος Κατασκευής</i>
	<i>K</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>A</i>	<i>AK</i>	<i>B</i>	<i>M/A</i>	<i>ΠK</i>	<i>AK</i>	<i>AMK</i>		
[57]					X				X		Σουηδία	1920
[53]			X					X			M/Δ	M/Δ
[65]	X									X	Σικάγο, ΗΠΑ	μέχρι 1978
[66]	X		X							X	Βασκελώνη, Ισπανία	1950-1980
[59]	X								X		Τορόντο, Καναδάς	M/Δ
[88]	X							X			Ιταλία	M/Δ
[89]	X							X			Στοκχόλμη, Σουηδία	1980s
[76]		X						X			Μπάρι, Ιταλία	M/Δ
[71]	X							X			Μπολόνια, Ιταλία	M/Δ
[60]			X						X		Μελβούρνη, Αυστραλία	M/Δ

<i>ID</i>	<i>Λειτουργία κτηρίου</i>							<i>Είδος μοντέλου</i>			<i>Τοποθεσία</i>	<i>Έτος Κατασκευής</i>
	<i>K</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>A</i>	<i>AK</i>	<i>B</i>	<i>M/A</i>	<i>ΠK</i>	<i>AK</i>	<i>AMK</i>		
[67]	X		X							X	M/Δ	M/Δ
[61]	X								X		Νοτιοανατολική Ελβετία	M/Δ
[72]			X					X			Σαγκάη, Κίνα	1999
[55]					X			X			ΝΑ Σουηδία	before 1945
[68]		X								X	Κωνσταντινούπολη, Τουρκία	M/Δ
[90]	X		X					X			Μπιλμπάο, Ισπανία	1959-1961
[91]	X		X						X		Σαν Φρανσίσκο και Φιλαδέλφεια	M/Δ
[79]	X							X			Σαν Σεμπασιτιάν, Ισπανία	M/Δ
[92]		X						X			Μόντρεαλ, Καναδάς	M/Δ
[93]	X							X			Προτογαλία	μεταξύ 1960 και 1990
[56]	X				X			X			Βίσμπι, Σουηδία	πριν 1945

<i>ID</i>	<i>Λειτουργία κτηρίου</i>							<i>Είδος μοντέλου</i>			<i>Τοποθεσία</i>	<i>Έτος Κατασκευής</i>
	<i>K</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>A</i>	<i>AK</i>	<i>B</i>	<i>M/A</i>	<i>ΠK</i>	<i>AK</i>	<i>AMK</i>		
[58]					X			X			Καντιθ, Ισπανία	18ος αιώνας
[94]	X							X			Σουηδία	1960
[95]	X							X			Βόρεια Ιταλία	2014
[96]			X					X			Γαλλία	M/Δ
[97]	X							X			Μπέρμινγχαμ, Ηνωμένο Βασίλειο	1940-1950
[98]		X						X			Τζιζόν, Ισπανία	M/Δ
[69]	X							X			Ιορδανία	M/Δ
[63]	X								X		Μπολζάνο, Ιταλία	1990
[99]	X							X			Νάπολη, Ιταλία	1984
[75]		X						X			Βαρκελώνη, Ισπανία	1962

<i>ID</i>	<i>Λειτουργία κτηρίου</i>							<i>Είδος μοντέλου</i>			<i>Τοποθεσία</i>	<i>Έτος Κατασκευής</i>
	<i>K</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>A</i>	<i>AK</i>	<i>B</i>	<i>M/A</i>	<i>PK</i>	<i>AK</i>	<i>AMK</i>		
[73]	X							X			Ηνωμένο Βασίλειο	Between 1961 and 1975
[91]		X						X			Πενσυλβάνια, ΗΠΑ	M/Δ
[83]		X						X			Τεχεράνη, Ιράν	M/Δ
[82]	X							X			Κερμαν, Ιράν	1990
[77]		X						X			Γιουχάν, Κίνα	M/Δ
[74]	X							X			Ποζνάν, Πολωνία	2002
[100]			X					X			Νότια Ιταλία	2014
[101]	X		X					X			Νάπολη, Ιταλία	M/Δ
[54]	X							X			Ισπανία	M/Δ
[81]	X							X			Ζυρίχη, Ελβετία	M/Δ

<i>ID</i>	<i>Λειτουργία κτηρίου</i>							<i>Είδος μοντέλου</i>			<i>Τοποθεσία</i>	<i>Έτος Κατασκευής</i>
	<i>K</i>	<i>Δ</i>	<i>E</i>	<i>A</i>	<i>ΔK</i>	<i>B</i>	<i>M/Δ</i>	<i>ΠK</i>	<i>AK</i>	<i>AMK</i>		
[102]		X						X			Μαρόκο	M/Δ
[64]	X								X		Ελβετία	M/Δ
[87]	X							X			Πόρτο Αλέγρε, Βραζιλία	M/Δ
[86]			X					X			Ντελαγουέρ, ΗΠΑ	M/Δ
[84]		X						X			Ισμίρ, Τουρκία	1992
[85]			X					X			Λάχτι, Φινλανδία	1950
[70]			X					X			Κορέα	M/Δ

K: Κατοικία, Δ: Δημόσιο, E: Εμπορικό, A: Άλλο, B: Βιομηχανικό, ΔK: Διατηρητέο Κτήριο, M/Δ: Μη Διαθέσιμο, ΠK: Πραγματικό Κτήριο, AK: Αρχέτυπο Κτήριο, AMK: Απλοποιημένο Μοντέλο Κτηρίου

Παράρτημα Γ: Αντικειμενικές Συναρτήσεις

ID	Ενέργεια						Κόστος							
		K	Z	E	EΦ	EΞ		KAΕ	ΛΚ	ΚΣ	ΚΑ	ΚΠΑ	ΚΚΖ	ΠΑ
[57]							X						X	
[53]	X	X												
[65]	X			X										
[66]	X			X			X						X	
[59]	X	X												
[88]	X			X			X	X	X	X				
[89]							X						X	
[76]	X	X												
[71]							X	X	X	X			X	
[60]	X	X												
[67]	X	X	X	X			X						X	
[61]							X						X	
[72]	X	X					X	X	X	X				
[55]							X	X	X	X			X	
[68]							X						X	
[90]							X		X					
[91]	X	X					X					X		
[79]	X	X					X	X						X
[92]	X	X					X						X	
[93]	X	X					X						X	
[56]	X	X					X	X	X	X			X	
[58]	X		X				X						X	
[94]	X			X			X						X	
[95]	X		X				X	X	X	X	X			
[96]	X	X												
[97]	X	X		X			X							X
[98]	X	X					X	X	X					X
[69]	X	X					X	X					X	
[63]	X		X											
[99]	X			X			X	X						
[75]							X					X		
[73]	X	X					X	X					X	X
[91]	X			X			X	X		X				
[83]	X			X			X							X
[82]														
[77]	X		X											
[74]	X	X					X						X	

<i>ID</i>	Ενέργεια						Κόστος							
		<i>K</i>	<i>Z</i>	<i>E</i>	<i>ΕΦ</i>	<i>ΕΞ</i>		<i>ΚΑΕ</i>	<i>ΛΚ</i>	<i>ΚΣ</i>	<i>ΚΑ</i>	<i>ΚΠΑ</i>	<i>ΚΚΖ</i>	<i>ΠΑ</i>
[100]	X	X					X						X	
[101]	X	X					X				X			
[54]	X			X			X	X						
[81]							X	X	X	X				
[102]							X						X	
[64]							X						X	
[87]	X		X											
[86]	X			X			X					X		X
[84]	X			X			X							X
[85]							X						X	
[70]	X			X			X	X	X	X	X		X	

K: Κατανάλωση, Z: Ζήτηση, E: Εξοικονόμηση, ΕΦ: Ενεργειακό Φορτίο, ΕΞ: Εξέργεια, ΚΑΕ: Κόστος Αρχικής Επένδυσης, ΛΚ: Λειτουργικό Κόστος, ΚΣ: Κόστος Συντήρησης, ΚΑ: Κόστος Αντικατάστασης, ΚΠΑ: Καθαρή Παρούσα Αξία, ΚΚΖ: Κόστος Κύκλου Ζωής, ΠΑ: Περίοδος Αποπληρωμής

<i>ID</i>	ΠΕΠ			Περιβάλλον				
		<i>ΘΑ</i>	<i>ΠΑ</i>		<i>Εκ</i>	<i>ΚΦΠ</i>	<i>ΑΚΖ</i>	<i>ΔΥΠ</i>
[57]								
[53]								
[65]								
[66]	X		X					
[59]								
[88]								
[89]								
[76]								
[71]								
[60]								
[67]				X	X			
[61]				X	X			
[72]								
[55]								
[68]								
[90]								
[91]								
[79]				X				X
[92]				X			X	
[93]								
[56]								

<i>ID</i>	ΠΕΠ			Περιβάλλον				
		<i>ΘΑ</i>	<i>ΠΑ</i>		<i>Εκ</i>	<i>ΚΦΠ</i>	<i>ΑΚΖ</i>	<i>ΔΥΠ</i>
[58]								
[94]								
[95]								
[96]	X	X						
[97]	X		X	X	X			
[98]								
[69]								
[63]				X	X			
[99]				X	X			
[75]				X	X			
[73]				X	X			
[91]	X	X						
[83]								
[82]	X	X		X	X			
[77]	X		X					
[74]				X	X			
[100]								
[101]				X	X			
[54]								
[81]				X	X		X	
[102]	X	X		X	X			
[64]				X	X			
[87]	X	X						
[86]				X	X			
[84]								
[85]				X	X			
[70]								

ΠΕΠ: Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος, ΘΑ: Θερμική Άνεση, ΠΑ: Ποιότητα Αέρα, Εκ: Εκπομπές, ΚΦΠ: Κόστος Φυσικών Πόρων, ΑΚΖ: Ανάλυση Κύκλου Ζωής, ΔΥΠ: Δείκτης Υπερθέρμανσης Πλανήτη

Παράρτημα Δ: Μέθοδοι & Εργαλεία

ID	Μέθοδος Βελτιστοποίησης	Μεταβλητές Απόφασης					Περιορισμοί	Εργαλεία
		<i>Π Κ</i>	<i>Α Σ</i>	<i>ΣΕ Κ</i>	<i>ΣΑΠ Ε</i>	<i>ΑΜ Α</i>		
[57]	Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμο ύ	X					M/Δ	OPERA-MILP
[53]	Hooke-Jeeves		X			X	M/Δ	•GenOpt •EnergyPlus
[65]	Διαδοχικής Αναζήτησης		X				M/Δ	EnergyPlus Beopt
[66]	Εξαντλητικής Αναζήτησης	X	X				M/Δ	TRNSYS SDLPS is a general purpose simulation software infrastructure
[59]	Εξαντλητικής Αναζήτησης	X	X				M/Δ	EnergyPlus
[88]	Γραμμικού Προγραμματισμο ύ	X			X		M/Δ	M/Δ
[89]	Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμο ύ	X	X				M/Δ	OPERA-MILP
[76]	Απλή Ενισχυμένη Μέθοδος ε- constraint	X	X				M/Δ	MATLAB
[71]	Monte Carlo						M/Δ	Termolog
[60]	Βελτιστοποίηση μέσω Αποικίας Μυρμηγκιών για Μικτές Μεταβλητές (ACOMV)	X					M/Δ	MATLAB & EnergyPlus
[67]	Διαδοχικής Αναζήτησης	X	X	X			M/Δ	EnergyPlus

ID	Μέθοδος Βελτιστοποίησης	Μεταβλητές Απόφασης					Περιορισμοί	Εργαλεία
		<i>Π Κ</i>	<i>Α Σ</i>	<i>ΣΕ Κ</i>	<i>ΣΑΠ Ε</i>	<i>ΑΜ Α</i>		
[61]	Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού	X			X		•το αρχικό σύστημα θέρμανσης •η ηλικία του κτηρίου •το μέγεθος του κτηρίου	EnergyPlus
[72]	Κόστος Κύκλου Ζωής - Monte Carlo	X	X				M/Δ	N/A
[55]	Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού	X	X	X			M/Δ	•OPERA-MILP •IDA-ICE
[68]	Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων	X	X				M/Δ	•GenOpt •EnergyPlus
[90]	Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού	X	X		X		•Περιορισμοί συστήματος παροχής ενέργειας •Περιορισμοί τεχνολογικού ενεργειακού ισοζυγίου •Περιορισμοί εξοικονόμησης ενέργειας	TRNSYS model
[91]	Αλγόριθμος Μέγιστης Κοινής Αμοιβαίας Πληροφορίας	X	X				M/Δ	EnergyPlus
[79]	Συνδυαστική μέθοδος αποτελούμενη από Μη Κυριαρχημένη Γενετική Ταξινόμηση Αλγόριθμος (NSGA-II) και τον αλγόριθμο Αναζήτησης Αρμονίας	X			X		η ταυτόχρονη εφαρμογή στρατηγικών ανακαίνισης	Energyplus

ID	Μέθοδος Βελτιστοποίησης	Μεταβλητές Απόφασης					Περιορισμοί	Εργαλεία
		Π_K	A_Σ	ΣE_K	$\Sigma \Pi E$	AM_A		
	Πολλαπλών Κριτηρίων (MOHS)							
[92]	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα	X	X				μέγιστες αποδεκτές τιμές για TEC και LCC	•Revit •DesignBuilder •Matlab
[93]	Εξαντλητικής Αναζήτησης	X	X				M/Δ	N/A
[56]	Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού	X					M/Δ	OPTimal Energy Retrofit Advisory-Mixed Integer Linear Program (OPERA-MILP)
[58]	Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων	X		X			M/Δ	•REVIT •EnergyPlus •DesignBuilder •ANSYS Computational Fluid Dynamics
[94]	Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού						•πάχος μόνωσης •μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος	IDA ICE
[95]	Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων	X			X		M/Δ	•GenOpt •TRNSYS
[96]	Αλγόριθμος Εξελικτικής Πολυκριτηριακής Βελτιστοποίησης Καθοδηγούμενος						M/Δ	N/A

ID	Μέθοδος Βελτιστοποίησης	Μεταβλητές Απόφασης					Περιορισμοί	Εργαλεία
		Π Κ	Α Σ	ΣΕ Κ	ΣΑΠ Ε	ΑΜ Α		
	από Προσεγγίσεις (AGE-II)							
[97]	Συνδυαστική μέθοδος αποτελούμενη από τον αλγόριθμο Nelder-Mead και Γενετικό Αλγόριθμο	X			X		M/Δ	•JEPlus+EA •EnergyPlus •DesignBuilder
[98]	μέθοδο ζυγισμένου αθροίσματος (WSM)	X					M/Δ	Visual Doe 4.1
[69]	Διαδοχικής Αναζήτησης	X	X				M/Δ	DesignBuilder (EnergyPlus Beopt)
[63]	Μέθοδος υβριδικού εξελικτικού αλγορίθμου βασισμένη σε στρατηγικές προσαρμογής πίνακα συνδιακύμανσης (CMA-ES) και υβριδικού εξελικτικού αλγορίθμου διαφοροποίησης (HDE)	X					θερμικές μεταδόσεις μικρότερες από συγκεκριμένες τιμές	•QGIS •Google 3D •Open Street Maps •CitySim
[99]	Εξαντλητικής Αναζήτησης				X		•ελάχιστο επίπεδο βιωσιμότητας 85% •η καλύτερη δυνατή κατάσταση τόσο των συστημάτων όσο και της πρόσοψης	•DesignBuilder •EnergyPlus •Matlab

ID	Μέθοδος Βελτιστοποίησης	Μεταβλητές Απόφασης					Περιορισμοί	Εργαλεία
		<i>Π Κ</i>	<i>Α Σ</i>	<i>ΣΕ Κ</i>	<i>ΣΑΠ Ε</i>	<i>ΑΜ Α</i>		
[75]	Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμο ύ & e-constraint		X	X	X		M/Δ	Lingo
[73]	μέθοδο ζυγισμένου αθροίσματος (WSM)	X	X		X		περιορισμένο κεφάλαιο	•IES VE •Energy Plus
[91]	Αλγόριθμος Διαφορικής Εξέλιξης με Μη Κυριαρχούμενη Ταξινόμηση (NSDE)	X	X		X		M/Δ	•SimBldPy
[83]	Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμο ύ	X			X		M/Δ	•Design- Builder •GAMS •
[82]	Βελτιωμένος Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης του Υδροβάτη (EWSOA)	X	X				M/Δ	•EnergyPlus •JESS •JESS & JEA
[77]	Μέθοδος Επιφάνειας Απόκρισης (RSM)	X	X				M/Δ	•EnergyPlus •DesignBuilde r •BIM architectural software
[74]	μέθοδο ζυγισμένου αθροίσματος (WSM)	X					M/Δ	N/A
[100]	Εξαντλητικής Αναζήτησης	X	X		X		M/Δ	•EnergyPlus •DesignBuilde r •MATLAB
[101]	Εξαντλητικής Αναζήτησης	X			X		M/Δ	•EnergyPlus •DesignBuilde r •MATLAB •CadMapper and SketchUp

ID	Μέθοδος Βελτιστοποίησης	Μεταβλητές Απόφασης					Περιορισμοί	Εργαλεία
		Π_K	A_Σ	ΣE_K	$\Sigma \Pi E$	AM_A		
[54]	Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Χαμαιλέοντα	X	X		X		M/Δ	•MATLAB •EnergyPlus •DesignBuilder •REVIT
[81]	Υποκαταστάτη μοντέλο: Αναπτύχθηκαν 2 υπο-μοντέλα Μηχανικής Μάθησης (TNN)· ένα για τις βέλτιστες λύσεις CO2 και ένα για τις υπόλοιπες λύσεις στο Pareto front		X		X		M/Δ	N/A
[102]	Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων	X					M/Δ	•GENOPT •TRNSYS
[64]	Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού	X	X		X		M/Δ	CESAR-P
[87]	Τροποποιημένος Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Coot (MCOA) δυναμικά συνδυασμένος με τα μεταμοντέλα τεχνητού νευρωνικού δικτύου (ANN-MM)	X					M/Δ	EnergyPlus

ID	Μέθοδος Βελτιστοποίησης	Μεταβλητές Απόφασης					Περιορισμοί	Εργαλεία
		Π Κ	Α Σ	ΣΕ Κ	ΣΑΠ Ε	ΑΜ Α		
[86]	Συνδυαστική μέθοδος Σμήνους Σωματιδίων και Γενετικού Αλγορίθμου						•περιορισμός επενδυτικών κεφαλαίων •η επιδότηση από την SEU και το GOV πρέπει να ξεπερνά μία δεδομένη τιμή •ο ποσοστό του ποσού της επένδυσης από τη SEU στη συνολική επένδυση θα πρέπει να είναι εντός του δεδομένου χρονικού διαστήματος •το συνολικό ποσό της επένδυσης ισούται με το άθροισμα κονδυλίων από GOV και SEU	•MATLAB
[84]	Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων	X					M/Δ	•OpenStudio •GenOpt •EnergyPlus
[85]	Γραμμικού Προγραμματισμού		X		X		M/Δ	COIN-OR Branch-and-Cut (CBC)
[70]	Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων		X				M/Δ	MATLAB

ΠΚ: Περίβλημα Κτηρίου, ΑΣ: Αναβάθμιση Συστημάτων, ΣΕΚ: Συστήματα Ελέγχου του Κτηρίου, ΣΑΠΕ: Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ΑΜ: Άλλες Μεταβλητές Απόφασης

