



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



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

**Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων
με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική
ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Κωνσταντίνου Π. Αλεξάκη

Επιβλέπων : Δ. Ασκούνης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2025



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



**Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων
με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική
ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Κωνσταντίνου Π. Αλεξάκη

Επιβλέπων : Δ. Ασκούνης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20^η Φεβρουαρίου 2025.

.....
Δημήτριος Ασκούνης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ευάγγελος Μαρινάκης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2025

.....

Κωνσταντίνος Π. Αλεξιάκης

Διπλωματούχος Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Τεχνο-Οικονομικά Συστήματα» της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright © Κωνσταντίνος Αλεξιάκης 2025

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την εφαρμογή γενετικών αλγορίθμων (ΓΑ) στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων, εστιάζοντας σε μια συστηματική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας και την ανάλυση των ερευνητικών κενών. Οι ΓΑ αποτελούν μια υποσχόμενη προσέγγιση για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων που περιλαμβάνουν αντικρουόμενα κριτήρια, όπως η ελαχιστοποίηση του ενεργειακού κόστους, η μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης, η βελτίωση της θερμικής άνεσης και η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Αρχικά, η εργασία διερευνά το θεωρητικό υπόβαθρο των κτηριακών αναβαθμίσεων, αναλύοντας τις βασικές μεθόδους και τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτηρίων. Παρουσιάζει επίσης τη χρήση των ΓΑ ως μια αποτελεσματική τεχνική βελτιστοποίησης, συγκρίνοντάς την με άλλες εναλλακτικές μεθόδους, όπως ο πολυκριτηριακός προγραμματισμός και οι εξελικτικοί αλγόριθμοι.

Στη συνέχεια, η εργασία περιλαμβάνει μια συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση της εφαρμογής των ΓΑ στην ενεργειακή αναβάθμιση κτηρίων. Μέσα από την ανάλυση των δημοσιευμένων ερευνών της τελευταίας πενταετίας, εντοπίζονται οι βασικές κατευθύνσεις της έρευνας, καθώς και οι κυριότερες ελλείψεις και προκλήσεις. Μεταξύ των βασικών ευρημάτων, διαπιστώνεται ότι οι περισσότερες μελέτες επικεντρώνονται στον αλγόριθμο NSGA-II, ενώ υπάρχει περιορισμένη διερεύνηση των νεότερων προσεγγίσεων, όπως οι κβαντικοί γενετικοί αλγόριθμοι και οι συνδυαστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης.

Από την ανάλυση προκύπτουν σημαντικά ερευνητικά κενά, όπως η έλλειψη ανοιχτών δεδομένων για τη σύγκριση μεθόδων, η υποεκπροσώπηση του μικροκλίματος στην ανάλυση και η ανάγκη για μεγαλύτερη ενσωμάτωση πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων. Επίσης, διαπιστώνεται η απουσία δυναμικών μοντέλων που λαμβάνουν υπόψη χρηματοδοτικά εργαλεία και επενδυτικές στρατηγικές, καθώς και η περιορισμένη ενσωμάτωση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος στις αντικειμενικές συναρτήσεις. Συμπερασματικά, η εργασία προτείνει κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, όπως η αξιοποίηση νέων αλγοριθμικών τεχνικών, η χρήση προσαρμοστικών μεθόδων επιλογής των αντικειμενικών. Η συμβολή της μελέτης έγκειται στη συστηματική χαρτογράφηση της υπάρχουσας έρευνας και στην ανάδειξη τομέων που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

Abstract

This thesis examines the application of genetic algorithms (GAs) in the multi-objective optimization of building retrofitting, focusing on a systematic literature review and the analysis of research gaps. GAs represent a promising approach for solving complex problems that involve conflicting criteria, such as minimizing energy costs, maximizing energy efficiency, improving thermal comfort, and reducing environmental impacts.

Initially, the thesis explores the theoretical background of building retrofits, analyzing the fundamental methods and technologies used to improve the energy efficiency of buildings. It also presents the use of GAs as an effective optimization technique, comparing them with other alternative methods, such as multi-objective programming and evolutionary algorithms.

Subsequently, the thesis includes a systematic literature review on the application of GAs in building energy retrofitting. Through an analysis of published research from the last five years, the key directions of research are identified, along with the main gaps and challenges. Among the key findings, it is observed that most studies focus on the NSGA-II algorithm, while there is limited investigation of newer approaches, such as quantum genetic algorithms and hybrid optimization algorithms.

The analysis reveals significant research gaps, such as the lack of open data for method comparison, the underrepresentation of microclimate in the analysis, and the need for greater integration of multi-objective decision-making methods. Additionally, the absence of dynamic models that consider financial tools and investment strategies is noted, as well as the limited incorporation of indoor environmental quality in the objective functions.

In conclusion, the thesis proposes directions for future research, such as the utilization of new algorithmic techniques and the use of adaptive methods for selecting objective functions. The contribution of this study lies in the systematic mapping of existing research and the identification of areas that require further investigation.

Keywords: Multi-objective optimization, genetic algorithms, building energy retrofit

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	5
Abstract	7
Πίνακας περιεχομένων	9
Κατάλογος Εικόνων	11
1 Εισαγωγή.....	12
1.1. Διερεύνηση Υπάρχουσα Γνώσης.....	12
1.2. Σκοπός και Αντικείμενο της Μελέτης	13
1.3. Δομή της εργασίας.....	13
2 Θεωρητικό υπόβαθρο	14
2.1. Ορισμός Κτηρίου.....	14
2.2. Μέθοδοι Αναβάθμισης Κτηρίου.....	14
2.3. Αναβάθμιση κτηρίων – Ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα	17
2.4. Γενετικοί αλγόριθμοι	19
2.5. Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί των Γενετικών Αλγορίθμων	22
2.6. Εναλλακτικές μέθοδοι	22
2.7. Γιατί υπερέχουν οι Γενετικοί αλγόριθμοι	24
2.8. Υποκατάστατα Μοντέλα (Surrogate Models) στην Αναβάθμιση Κτηρίων	26
2.9. Πολυκριτηριακές Μέθοδοι Λήψης Αποφάσεων στην αναβάθμιση κτηρίων	28
2.10. Ψηφιακά εργαλεία στην αναβάθμιση κτηρίων	30
2.10.1. Εργαλεία Σχεδιασμού και Προσομοίωσης Κτηρίων.....	30
2.10.2. Εργαλεία Βελτιστοποίησης.....	31
3 Μεθοδολογία	33
4 Ανάλυση δεδομένων & ερευνητικά κενά	37
4.1. Δεδομένα.....	38
4.1.1. Ερευνητικά κενά στα Δεδομένα.....	41
4.2. Χρήση ΓΑ.....	42
4.2.1. Ερευνητικά κενά στη χρήση ΓΑ	45
4.3. Μεταβλητές απόφασης & αντικειμενικές συναρτήσεις.....	46
4.3.1. Ερευνητικά κενά στις Μεταβλητές Απόφασης & στις Αντικειμενικές συναρτήσεις	48
4.4. Πολυκριτηριακές μέθοδοι.....	49
4.4.1. Ερευνητικά κενά στις πολυκριτηριακές μεθόδους.....	51

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

4.5.	Ψηφιακά εργαλεία	52
4.5.1.	Ερευνητικά κενά στα Ψηφιακά εργαλεία.....	55
5	Συζήτηση - Συμπεράσματα.....	56
5.1.	Μελλοντικά Βήματα.....	57
	Βιβλιογραφία.....	58

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Μεθοδολογία εργασίας.....	36
Εικόνα 2 Δημοσιεύσεις ανά έτος	37
Εικόνα 3 Τυπολογίες κτηρίων στις υπό ανάλυση μελέτες συγκριτικά με την παλαιότερη βιβλιογραφική ανασκόπηση (κατοικίες - Residential, Δημόσια κτήρια - Public, Επαγγελματικοί χώροι - Commercial, Βιομηχανικοί χώροι - Industrial, Άλλα - Other, Πολιτιστικής κληρονομιάς - Heritage, Μη διαθέσιμα - Not Available)	39
Εικόνα 4 Τύπος μοντέλου κτηρίων	40
Εικόνα 5 Διάφοροι ΓΑ από τη βιβλιογραφία.....	43
Εικόνα 6 Πλήθος αντικειμενικών συναρτήσεων στις μελέτες.....	43
Εικόνα 7 Αντικειμενικές συναρτήσεις ανά κατηγορία.....	46
Εικόνα 8 Μεταβλητές απόφασης (Περίβλημα κτηρίου - Building Envelope, Συστήματα HVAC-System upgrades, Συστήματα Ελέγχου-Building control systems, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας – Renewable Energy Systems).....	48
Εικόνα 9 Πολυκριτηριακές μέθοδοι ταξινόμησης μέτωπου Pareto	50
Εικόνα 10 Εργαλεία σχεδιασμού στις μελέτες.....	52
Εικόνα 11 Εργαλεία προσομοίωσης στις μελέτες.....	53
Εικόνα 12 Εργαλεία βελτιστοποίησης στις μελέτες.....	54

1

Εισαγωγή

1.1. Διερεύνηση Υπάρχουσα Γνώσης

Τα κτήρια παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, καθώς ευθύνονται για περίπου το 40% της συνολικής ενεργειακής χρήσης και το 36% των εκπομπών CO₂ [1]. Στην Ευρώπη, ο υψηλός μέσος όρος ηλικίας των κτηρίων συμβάλλει σημαντικά στη μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση των κτηρίων [2], [3], με το 85% των κτηρίων να έχουν κατασκευαστεί πριν το 2000 και το 75% να παρουσιάζουν χαμηλή ενεργειακή απόδοση [2]. Δεδομένου ότι οι συσκευές για παροχή θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού καταναλώνουν περίπου το 80% της ενέργειας ενός κτηρίου, η ενεργειακή αναβάθμιση των υπάρχοντων κτηρίων αποτελεί βασική στρατηγική για την επίτευξη των παγκόσμιων και ευρωπαϊκών περιβαλλοντικών στόχων. Η αναθεωρημένη Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων (EPBD) [4] προωθεί την αύξηση του ρυθμού ανακαινίσεων, με στόχο την πλήρη απαλλαγή του κτηριακού τομέα από τις εκπομπές άνθρακα έως το 2050.

Η αναβάθμιση των κτηρίων αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, καθώς περιλαμβάνει αντικρουόμενους στόχους [5], όπως η ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης, η μείωση του κόστους, η βελτίωση της εσωτερικής άνεσης και η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος [6], [7]. Αυτοί οι στόχοι συχνά έρχονται σε αντίθεση μεταξύ τους· για παράδειγμα, η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης απαιτεί συνήθως υψηλές αρχικές επενδύσεις, ενώ η προτεραιοποίηση της θερμικής άνεσης μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις. Συνεπώς, η ανάπτυξη βέλτιστων στρατηγικών αναβάθμισης απαιτεί τη χρήση προηγμένων μεθόδων βελτιστοποίησης.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (ΓΑ) έχουν αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης [8], καθώς έχουν τη δυνατότητα να εξερευνούν μεγάλα σύνολα λύσεων και να βρίσκουν πολλαπλά βέλτιστα σενάρια [9], [10]. Οι ΓΑ είναι

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

ιδιαίτερα αποτελεσματικοί στην αντιμετώπιση προβλημάτων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, όπου απαιτείται η ταυτόχρονη ισορροπία μεταξύ αντικρουόμενων κριτηρίων, όπως το κόστος, η ενεργειακή απόδοση και η περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Παρά την αυξανόμενη έρευνα στον τομέα αυτό, παραμένει ένα κενό γνώσης όσον αφορά τη συνολική χαρτογράφηση των εφαρμογών των ΓΑ στη διαδικασία αναβάθμισης κτηρίων [8], [11], [12].

1.2. Σκοπός και Αντικείμενο της Μελέτης

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στη συστηματική ανασκόπηση της εφαρμογής των ΓΑ στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με σκοπό την αναγνώριση ερευνητικών κενών στο εν λόγω πρόβλημα. Διερευνώνται οι βασικές παράμετροι, οι μεθοδολογίες και τα εργαλεία λήψης αποφάσεων που χρησιμοποιούνται στις υπάρχουσες μελέτες, ενώ παράλληλα εντοπίζονται τα υφιστάμενα ερευνητικά κενά και οι πιθανές προοπτικές για μελλοντική έρευνα. Χαρτογραφώντας την εξέλιξη των ΓΑ στον συγκεκριμένο τομέα και αξιολογώντας τις πρακτικές εφαρμογές τους, η μελέτη αυτή συμβάλλει τόσο στη θεωρητική κατανόηση όσο και στη βελτίωση της λήψης αποφάσεων για βιώσιμες αναβαθμίσεις κτηρίων.

1.3. Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 1 (Εισαγωγή), παρουσιάζεται η υπάρχουσα γνώση, ο σκοπός και το αντικείμενο της μελέτης, καθώς και η συνολική δομή της εργασίας. Το Κεφάλαιο 2 (Θεωρητικό Υπόβαθρο) αναλύει τις βασικές έννοιες της ενεργειακής αναβάθμισης κτηρίων, τις μεθόδους πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης και τη χρήση γενετικών αλγορίθμων, καθώς και τα σχετικά ψηφιακά εργαλεία. Το Κεφάλαιο 3 (Μεθοδολογία) περιγράφει την ερευνητική προσέγγιση και τη διαδικασία ανάλυσης των δεδομένων. Στο Κεφάλαιο 4 (Ανάλυση Δεδομένων & Ερευνητικά Κενά) εξετάζονται τα δεδομένα, η χρήση των γενετικών αλγορίθμων, οι μεταβλητές απόφασης και τα πολυκριτηριακά μοντέλα, ενώ εντοπίζονται τα βασικά ερευνητικά κενά. Τέλος, το Κεφάλαιο 5 (Συζήτηση - Συμπεράσματα) συνοψίζει τα κύρια ευρήματα της μελέτης και προτείνει κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

2

Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1. Ορισμός Κτηρίου

Κτήριο ορίζεται ως μια κατασκευή που αποτελείται από τοίχους και στέγη, περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους εσωτερικούς χώρους και ένα σύνολο εγκαταστάσεων, και έχει ως κύριο σκοπό τη βιώσιμη παραμονή των χρηστών του [13].

Τα κύρια δομικά στοιχεία ενός κτηρίου περιλαμβάνουν:

- Θεμέλια, που εξασφαλίζουν τη σταθερότητα και στήριξη του.
- Φέρων οργανισμός, ο οποίος περιλαμβάνει υποστυλώματα, δοκούς και πλάκες.
- Τοίχοι, που διαμορφώνουν τον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο.
- Στέγη, που προστατεύει από τις καιρικές συνθήκες.
- Δάπεδα, που επιτρέπουν τη χρήση και τη διάταξη των χώρων.
- Ανοίγματα, δηλαδή παράθυρα και πόρτες.
- Δομικά υλικά, όπως σκυρόδεμα, ξύλο, τούβλα, χάλυβας και γυψοσανίδα.
- Συστήματα κτηρίου, όπως το υδραυλικό, ηλεκτρολογικό και το σύστημα θέρμανσης/ψύξης.

Τα κτήρια κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη χρήση τους σε κατοικίες, κτήρια εκπαίδευσης, εμπορικά, βιομηχανικά, αποθηκευτικοί χώροι, χώροι υγείας και σωφρονιστικά κτήρια.

2.2. Μέθοδοι Αναβάθμισης Κτηρίου

Η αναβάθμιση ενός κτηρίου αφορά τη διαδικασία βελτίωσης ή προσθήκης χαρακτηριστικών που δεν υπήρχαν κατά την αρχική κατασκευή του. Οι παρεμβάσεις αυτές μπορεί να σχετίζονται με τη θερμική και ενεργειακή απόδοσή του, την ασφάλεια, τη λειτουργικότητα και την αισθητική. Σκοπός της αναβάθμισης είναι η αύξηση της αντοχής και της απόδοσης του κτηρίου, η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και η βελτίωση της ποιότητας διαβίωσης των χρηστών.

Οι ενεργειακές παρεμβάσεις κατηγοριοποιούνται ως εξής [14]:

- Βελτιώσεις στο κτηριακό περίβλημα

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

- Θερμομόνωση εξωτερικών τοίχων και ταράτσας, με υλικά όπως πετροβάμβακας και πολυστερίνη.
- Αντικατάσταση κουφωμάτων και υαλοπινάκων με ενεργειακά αποδοτικά.
- Τοποθέτηση σκιάστρων για μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Αναβάθμιση των μηχανολογικών εγκαταστάσεων
 - Εγκατάσταση αντλιών θερμότητας και φυσικού αερίου.
 - Τοποθέτηση ηλιακών θερμοσιφώνων για μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.
 - Αντικατάσταση φωτισμού με LED για βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας.
- Εφαρμογή Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
 - Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών για μείωση της εξάρτησης από το δίκτυο ηλεκτροδότησης.
 - Χρήση γεωθερμικών συστημάτων για θέρμανση και ψύξη.

Σύμφωνα με την αναφορά [15], οι αναβαθμίσεις μπορούν να διαχωριστούν και ως προς τον τύπο τους σε:

- «Ελαφριές» παρεμβάσεις, όπως αντικατάσταση φωτισμού με LED.
- Μηχανολογικές/ηλεκτρολογικές παρεμβάσεις, όπως εγκατάσταση αντλιών θερμότητας.
- Ολοκληρωμένες αναβαθμίσεις, που περιλαμβάνουν συνολικές αλλαγές στο περίβλημα και τα συστήματα του κτηρίου.

Επιπλέον, η αναβάθμιση των κτηρίων διακρίνεται ως προς την έκταση της σε τρεις βασικές κατηγορίες [16]:

- Συντήρηση – Επιδιορθώσεις και αντικαταστάσεις φθαρμένων στοιχείων.
- Ανακαίνιση – Βελτίωση της λειτουργικότητας του κτηρίου χωρίς μεγάλες δομικές αλλαγές.
- Εκτεταμένη αναβάθμιση – Ριζικές επεμβάσεις, όπως αλλαγές στη δομή και αντικατάσταση κρίσιμων συστημάτων.

Οι κύριοι στόχοι μιας αναβάθμισης είναι [17]:

- Περιβαλλοντικά οφέλη και διατήρηση πόρων, μέσω της μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών άνθρακα.
- Οικονομικά οφέλη, όπως η μείωση των λειτουργικών εξόδων και η αύξηση της αξίας του ακινήτου.

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

- Βελτίωση της ποιότητας ζωής, με την εξασφάλιση καλύτερων συνθηκών διαβίωσης (θερμική άνεση, ποιότητα αέρα, φωτισμός).

Ανάλογα με τον τύπο των παρεμβάσεων, οι μέθοδοι αναβάθμισης διακρίνονται σε παθητικά και ενεργητικά μέτρα.

Τα παθητικά μέτρα στοχεύουν στη μείωση της ενεργειακής ζήτησης μέσω αρχιτεκτονικών και δομικών παρεμβάσεων, χωρίς τη χρήση μηχανικών συστημάτων. Αυτά περιλαμβάνουν [18]:

- Θερμική προστασία:
 - Θερμομόνωση εξωτερικών τοίχων και ταράτσας με υλικά όπως πετροβάμβακας και πολυστερίνη.
 - Αεροστεγανότητα κτηρίου για τη μείωση των θερμικών απωλειών.
- Παθητική ηλιακή αξιοποίηση:
 - Άμεση ηλιακή απολαβή μέσω κατάλληλης διάταξης ανοιγμάτων.
 - Έμμεση ηλιακή απολαβή μέσω θερμοχωρητικών υλικών που αποθηκεύουν και αποδίδουν θερμότητα.
 - Φυσικός φωτισμός για τη μείωση της χρήσης τεχνητού φωτισμού.
- Μείωση υπερθέρμανσης:
 - Έλεγχος ηλιακής ακτινοβολίας με σκίαστρα, περσίδες, παντζούρια και φυτεύσεις.
 - Φυσικός αερισμός για την αποβολή θερμού αέρα και τη βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα.
 - Θερμοχωρητικότητα υλικών για την εξισορρόπηση των εσωτερικών θερμοκρασιών.

Τα ενεργητικά μέτρα περιλαμβάνουν τη χρήση μηχανικών και ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και της λειτουργικότητας του κτηρίου. Αυτά διακρίνονται σε [18]:

- Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας:
 - Ηλεκτροπαραγωγή με φωτοβολταϊκά συστήματα.
 - Θέρμανση με ανανεώσιμες πηγές, όπως βιομάζα και γεωθερμία.
 - Ηλιακά συστήματα (ηλιακοί συλλέκτες) για τη θέρμανση νερού.
- Αποδοτική χρήση ορυκτών καυσίμων:
 - Ανάκτηση θερμότητας μέσω συστημάτων αερισμού.
 - Αποδοτική ψύξη με ηλεκτρικά και θερμικά συστήματα ψύξης.

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

- ο Αποδοτική θέρμανση με αντλίες θερμότητας, τηλεθέρμανση και λέβητες υψηλής απόδοσης.

Η επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής αναβάθμισης εξαρτάται από παράγοντες όπως το κλίμα, η ηλικία και η κατάσταση του κτηρίου, το κόστος της επένδυσης και οι στόχοι των χρηστών. Ο συνδυασμός παθητικών και ενεργητικών μέτρων μπορεί να εξασφαλίσει τη μέγιστη ενεργειακή απόδοση και βιωσιμότητα.

2.3. Αναβάθμιση κτηρίων – Ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα

Η αναβάθμιση των κτηρίων αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα βελτιστοποίησης, καθώς περιλαμβάνει πολλαπλά και συχνά αντικρουόμενα κριτήρια, καθιστώντας το ένα τυπικό πολυκριτηριακό πρόβλημα (Multi-Objective Optimisation - MOO) [19]. Ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα αφορά τη βελτιστοποίηση δύο ή περισσότερων αντικειμενικών συναρτήσεων ταυτόχρονα, όπου η βελτίωση μιας διάστασης του προβλήματος συχνά συνεπάγεται την υποβάθμιση μιας άλλης. Στο πλαίσιο της ενεργειακής αναβάθμισης των κτηρίων, οι βασικές διαστάσεις που επηρεάζουν τη διαδικασία περιλαμβάνουν [19]:

- Ενεργειακή απόδοση: Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και η μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης.
- Κόστος αναβάθμισης: Η ελαχιστοποίηση της αρχικής επένδυσης και η συντόμευση της περιόδου αποπληρωμής.
- Άνεση των χρηστών: Η διασφάλιση βέλτιστων θερμικών και εσωτερικών συνθηκών.
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις: Η μείωση των εκπομπών CO₂ και η ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Οι διαφορετικές αυτές παράμετροι συχνά έρχονται σε αντίθεση μεταξύ τους. Για παράδειγμα, η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης μέσω προηγμένων τεχνολογιών μπορεί να αυξήσει το κόστος της αναβάθμισης, ενώ η επίτευξη βέλτιστης θερμικής άνεσης μπορεί να απαιτεί περισσότερη ενέργεια για θέρμανση και ψύξη. Αυτή η σύγκρουση καθιστά αναγκαία τη χρήση προηγμένων μεθόδων βελτιστοποίησης που μπορούν να εξισορροπήσουν τις διάφορες απαιτήσεις και να προσφέρουν ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων αντί για μία μοναδική λύση.

Στο πλαίσιο των πολυκριτηριακών προβλημάτων, οι μεταβλητές απόφασης (decision variables) παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Αυτές είναι οι παράμετροι που μπορούν να ρυθμιστούν ή να προσαρμοστούν για την επίτευξη των

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

επιθυμητών στόχων. Στην αναβάθμιση κτηρίων, οι μεταβλητές απόφασης περιλαμβάνουν τα μέτρα αναβάθμισης, όπως η επιλογή τύπου θερμομόνωσης, η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων ή η αλλαγή των κουφωμάτων. Οι πιθανές λύσεις του προβλήματος δεν είναι γνωστές εκ των προτέρων, αλλά καθορίζονται μέσω ενός συνόλου περιορισμών που οριοθετούν τον χώρο αναζήτησης.

Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των πολυκριτηριακών προβλημάτων, έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις βελτιστοποίησης. Μία από τις πιο διαδεδομένες είναι οι Pareto-based στρατηγικές, οι οποίες δεν περιορίζουν το πρόβλημα σε μία μοναδική βέλτιστη λύση, αλλά δημιουργούν ένα σύνολο λύσεων που αποτελούν το μέτωπο Παρέτο (Pareto front) [20]. Το μέτωπο Παρέτο περιλαμβάνει λύσεις που δεν μπορούν να βελτιωθούν ως προς έναν στόχο χωρίς να χειροτερεύσουν κάποιον άλλο. Αυτό σημαίνει ότι οι λύσεις που ανήκουν στο μέτωπο Παρέτο είναι μη κυριαρχούμενες (non-dominated solutions), δηλαδή καμία δεν είναι απόλυτα καλύτερη από τις άλλες, αλλά κάθε μία αντιπροσωπεύει έναν διαφορετικό συμβιβασμό μεταξύ των αντικρουόμενων στόχων [21].

Η χρήση του μετώπου Παρέτο είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διαδικασία λήψης αποφάσεων στην αναβάθμιση κτηρίων, καθώς επιτρέπει στους ενδιαφερόμενους (μηχανικούς, ιδιοκτήτες, φορείς) να επιλέξουν την καταλληλότερη λύση με βάση τις προτεραιότητές τους. Για παράδειγμα, αν ο κύριος στόχος είναι η μέγιστη ενεργειακή απόδοση, μπορεί να επιλεγεί μια λύση που μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας, ακόμα κι αν έχει υψηλότερο αρχικό κόστος. Αντίθετα, αν η προτεραιότητα είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους, μπορεί να επιλεγεί μια λύση που μειώνει μεν την ενεργειακή κατανάλωση, αλλά με χαμηλότερη επένδυση.

Οι παραδοσιακές μέθοδοι βελτιστοποίησης, όπως η μέθοδος του ζυγισμένου αθροίσματος ή η προσέγγιση ε-constraint, επιχειρούν να μετατρέψουν το πολυκριτηριακό πρόβλημα σε ένα μονοκριτηριακό, συνδυάζοντας όλους τους στόχους σε μία συνάρτηση ή ορίζοντας έναν στόχο ως περιορισμό. Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι συχνά αποτυγχάνουν να αποδώσουν μια ολοκληρωμένη εικόνα των δυνατών συμβιβασμών και απαιτούν εκ των προτέρων γνώση της σημασίας κάθε στόχου, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλιστα αποτελέσματα.

Μια ιδιαίτερα ισχυρή προσέγγιση για την αντιμετώπιση αυτής της πολυπλοκότητας είναι η χρήση των γενετικών αλγορίθμων (Genetic Algorithms - GAs). Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι μέθοδοι υπολογιστικής νοημοσύνης που προσομοιώνουν τη διαδικασία της φυσικής επιλογής και μπορούν να εξερευνήσουν εκτενή και πολύπλοκα σύνολα πιθανών λύσεων. Λόγω της πληθυσμιακής τους φύσης, οι ΓΑ είναι ιδανικοί για την αναζήτηση μετώπων Παρέτο, καθώς μπορούν να εξερευνήσουν πολλαπλές λύσεις ταυτόχρονα, χωρίς να απαιτούν διαδοχικές

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

επαναλήψεις όπως οι συμβατικές μέθοδοι [22]. Έτσι, παρέχουν ένα πλήρες σύνολο εναλλακτικών λύσεων που μπορούν να αξιολογηθούν με βάση τις προτιμήσεις των ενδιαφερομένων.

Μέσω της χρήσης των γενετικών αλγορίθμων, είναι δυνατή η δημιουργία ενός συνόλου εφικτών βέλτιστων λύσεων, οι οποίες μπορούν να αξιολογηθούν με τεχνικές λήψης αποφάσεων, ώστε να επιλεγεί η καταλληλότερη ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε έργου. Επιπλέον, οι ΓΑ μπορούν να συνδυαστούν με άλλες μεθόδους, όπως τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και προσομοιωτικά μοντέλα, για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια στην πρόβλεψη των αποτελεσμάτων μιας αναβάθμισης.

Η εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων στην ενεργειακή αναβάθμιση κτηρίων αποτελεί ένα ερευνητικό πεδίο που συνεχώς επεκτείνεται, με ιδιαίτερη έμφαση στη βελτίωση της αποδοτικότητάς τους, τη μείωση του υπολογιστικού κόστους και τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων τους για κάθε συγκεκριμένη περίπτωση [19]. Παρότι οι τεχνικές βελτιστοποίησης έχουν εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, η χρήση των ΓΑ για τη λήψη αποφάσεων στην ενεργειακή αναβάθμιση των κτηρίων παραμένει ένας τομέας με σημαντικές προοπτικές ανάπτυξης και εφαρμογής.

2.4. Γενετικοί αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (ΓΑ) αποτελούν μια υποκατηγορία των εξελικτικών αλγορίθμων και εισήχθησαν αρχικά από τον John Holland [23]. Βασίζονται στη Δαρβινική θεωρία της φυσικής επιλογής, όπου η εξέλιξη των ειδών καθορίζεται από την επιβίωση των καταλληλότερων. Οι ΓΑ σχεδιάστηκαν για να προσομοιώνουν τη διαδικασία της βιολογικής εξέλιξης και κατατάσσονται στις στοχαστικές μεθόδους βελτιστοποίησης [24], [25].

Στο πλαίσιο αυτό, η επιβίωση μιας λύσης καθορίζεται από μια συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function), η οποία αξιολογεί πόσο αποτελεσματική είναι κάθε υποψήφια λύση εντός του χώρου αναζήτησης.

Κάθε υποψήφια λύση σε έναν γενετικό αλγόριθμο αναφέρεται ως άτομο (individual) και αναπαρίσταται μέσω ενός χρωμοσώματος—μιας ακολουθίας παραμέτρων (γονιδίων) που περιγράφουν τη λύση. Ο τρόπος με τον οποίο κωδικοποιούνται αυτά τα χρωμοσώματα επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του αλγορίθμου.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κωδικοποίησης, οι οποίοι επιλέγονται ανάλογα με το πρόβλημα προς επίλυση [26]:

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

- Δυναδική κωδικοποίηση (Binary Encoding): Κάθε γονίδιο αναπαρίσταται ως δυαδικό ψηφίο (0 ή 1). Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε προβλήματα με διακριτές μεταβλητές απόφασης.
- Ακέραια κωδικοποίηση (Integer Encoding): Χρησιμοποιείται σε προβλήματα ταξινόμησης ή κατάταξης.
- Κωδικοποίηση πραγματικών αριθμών (Real-Number Encoding): Χρησιμοποιείται όταν οι μεταβλητές είναι συνεχείς, π.χ. για την εύρεση βαρών σε ένα νευρωνικό δίκτυο.
- Συμβολική κωδικοποίηση (Symbolic Encoding): Εφαρμόζεται όταν οι παράμετροι είναι κατηγορικές τιμές.

Η επιλογή της κατάλληλης κωδικοποίησης είναι κρίσιμη, καθώς καθορίζει την αποτελεσματικότητα του γενετικού αλγορίθμου στη διερεύνηση του χώρου αναζήτησης.

Μόλις δημιουργηθεί ένας αρχικός πληθυσμός πιθανών λύσεων, οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν τρεις βασικούς τελεστές για την εξέλιξη του πληθυσμού: επιλογή, διασταύρωση και μετάλλαξη.

1. Επιλογή (Selection)

Ο τελεστής επιλογής καθορίζει ποια άτομα θα συμμετάσχουν στην παραγωγή της επόμενης γενιάς. Υπάρχουν διάφορες στρατηγικές επιλογής, με πιο δημοφιλείς [27]:

- Επιλογή τουρνουά (Tournament Selection): Επιλέγεται ένα υποσύνολο ατόμων τυχαία και αναπαράγεται το καλύτερο από αυτά. Είναι μια αποδοτική μέθοδος που ισορροπεί μεταξύ εκμετάλλευσης (exploitation) και εξερεύνησης (exploration).
- Επιλογή ρουλέτας (Roulette Wheel Selection): Η πιθανότητα επιλογής ενός ατόμου είναι ανάλογη της καταλληλότητάς του.
- Τμηματική επιλογή (Truncation Selection): Επιλέγονται μόνο τα κορυφαία άτομα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη σύγκλιση.

2. Διασταύρωση (Crossover)

Ο τελεστής διασταύρωσης προσομοιώνει την ανταλλαγή γενετικού υλικού μεταξύ δύο γονικών ατόμων, δημιουργώντας απογόνους με συνδυαστικά χαρακτηριστικά. Μερικές κοινές τεχνικές περιλαμβάνουν [28]:

- Διασταύρωση ενός σημείου (Single-Point Crossover): Ανταλλαγή γενετικού υλικού σε μία καθορισμένη θέση του χρωμοσώματος.

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

- Διασταύρωση πολλαπλών σημείων (Multi-Point Crossover): Χρησιμοποιούνται πολλαπλά σημεία διασταύρωσης για αυξημένη γενετική ποικιλία.
- Ομοιόμορφη διασταύρωση (Uniform Crossover): Τα γονίδια ανταλλάσσονται τυχαία με καθορισμένη πιθανότητα για κάθε γονίδιο.

Αυτές οι τεχνικές συμβάλλουν στη δημιουργία νέων λύσεων και στη διατήρηση της ποικιλομορφίας στον πληθυσμό.

3. Μετάλλαξη (Mutation)

Η μετάλλαξη είναι η τυχαία τροποποίηση ενός ή περισσότερων γονιδίων ενός ατόμου. Αυτός ο τελεστής είναι κρίσιμος για τη διατήρηση της γενετικής ποικιλομορφίας και αποτρέπει τον αλγόριθμο από το να εγκλωβιστεί σε τοπικά βέλτιστα. Παραδείγματα μεταλλάξεων περιλαμβάνουν [29]:

- Για δυαδική κωδικοποίηση: Αντιστροφή ενός δυαδικού ψηφίου ($0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 0$).
- Για πραγματικούς αριθμούς: Προσθήκη μιας μικρής τυχαίας τιμής στο γονίδιο.

Η σωστή ρύθμιση του ποσοστού μετάλλαξης είναι κρίσιμη [30]:

- Πολύ υψηλό ποσοστό μπορεί να διαταράξει τη σύγκλιση του αλγορίθμου.
- Πολύ χαμηλό ποσοστό μπορεί να οδηγήσει σε στασιμότητα.

Οι τελεστές αυτοί λειτουργούν επαναληπτικά, εξελίσσοντας τον πληθυσμό μέσω πολλαπλών γενεών. Καθώς νέες γενιές δημιουργούνται, οι καλύτερες λύσεις τείνουν να κυριαρχούν, ενώ η ποικιλομορφία διατηρείται μέσω της διασταύρωσης και της μετάλλαξης.

Η εξελικτική διαδικασία συνεχίζεται έως ότου ικανοποιηθεί ένα από τα ακόλουθα κριτήρια τερματισμού [31]:

- Η επίτευξη ενός προκαθορισμένου επιπέδου καταλληλότητας για τη βέλτιστη λύση.
- Ένας μέγιστος αριθμός γενεών.
- Ένας αριθμός γενεών χωρίς βελτίωση της βέλτιστης λύσης.
- Η εκτέλεση του αλγορίθμου για μια καθορισμένη διάρκεια.

Η συνάρτηση καταλληλότητας διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διαδικασία αυτή, αξιολογώντας την ποιότητα των πιθανών λύσεων. Για παράδειγμα, σε ένα πρόβλημα αναβάθμισης κτηρίων, η συνάρτηση καταλληλότητας μπορεί να βασίζεται στην κατανάλωση ενέργειας, στη θερμική άνεση ή στο κόστος αναβάθμισης.

2.5. Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί των Γενετικών Αλγορίθμων

Τα πλεονεκτήματα των ΓΑ παρουσιάζονται παρακάτω [25]:

- **Ευελιξία:** Οι ΓΑ μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων βελτιστοποίησης [32].
- **Ανθεκτικότητα:** Είναι ανθεκτικοί σε αβέβαια ή θορυβώδη δεδομένα και μπορούν να προσαρμοστούν σε δυναμικά περιβάλλοντα [33].
- **Αποδοτικότητα:** Υπερτερούν έναντι κλασικών μεθόδων σε μη γραμμικά, πολυτροπικά ή ασυνεχή προβλήματα [25].
- **Δυνατότητα συνδυασμού:** Μπορούν να συνδυαστούν με άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης (π.χ. τοπική αναζήτηση)[34].

Οι περιορισμοί των ΓΑ παρουσιάζονται στην παρακάτω λίστα [25]:

- **Χρόνος σύγκλισης:** Μπορεί να απαιτήσουν μεγάλο αριθμό επαναλήψεων [35].
- **Ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες:** Μια ακατάλληλη αρχικοποίηση μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη σύγκλιση [36].
- **Ρύθμιση παραμέτρων:** Η βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων (πληθυσμός, ρυθμός μετάλλαξης, ποσοστό διασταύρωσης) απαιτεί προσεκτική ρύθμιση [35].

Παρά τις προκλήσεις τους, οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν μια ισχυρή και ευέλικτη προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση σύνθετων προβλημάτων, όπως η αναβάθμιση κτηρίων.

2.6. Εναλλακτικές μέθοδοι

Η αναβάθμιση των κτηρίων αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα βελτιστοποίησης που απαιτεί προηγμένες υπολογιστικές τεχνικές για την εύρεση βέλτιστων λύσεων. Αν και οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικοί, υπάρχουν αρκετές εναλλακτικές μέθοδοι που έχουν εφαρμοστεί στη βιβλιογραφία, καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Οι μέθοδοι αυτές περιλαμβάνουν τον γραμμικό προγραμματισμό, τις τεχνικές αναζήτησης, την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων, τη μέθοδο Monte Carlo, τη μέθοδο ζυγισμένου αθροίσματος, την προσέγγιση ε-constraint και διάφορες άλλες προσεγγίσεις, συχνά συνδυασμένες με μηχανική μάθηση ή άλλες υβριδικές τεχνικές.

Ο γραμμικός προγραμματισμός (Linear Programming - LP) [37] αποτελεί μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές βελτιστοποίησης στην αναβάθμιση κτηρίων, ειδικά όταν το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί μέσω γραμμικών σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών απόφασης. Μια πιο σύνθετη εκδοχή του, ο Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

(Mixed Integer Linear Programming - MILP) [38], επιτρέπει τη χρήση τόσο συνεχών όσο και ακεραίων μεταβλητών, καθιστώντας τον κατάλληλο για προβλήματα που περιλαμβάνουν επιλογές όπως ο αριθμός των αναβαθμίσεων ή η επιλογή τεχνολογιών. Παρόλο που αυτές οι μέθοδοι είναι εξαιρετικά ισχυρές όταν το πρόβλημα είναι γραμμικό, συχνά αδυνατούν να διαχειριστούν μη γραμμικές ή στοχαστικές σχέσεις, γεγονός που περιορίζει την εφαρμογή τους σε πιο περίπλοκα συστήματα.

Μια άλλη κατηγορία τεχνικών περιλαμβάνει τους αλγορίθμους αναζήτησης, όπως η διαδοχική αναζήτηση (Sequential Search) [39] και η εξαντλητική αναζήτηση (Exhaustive Search) [40]. Στην πρώτη περίπτωση, οι λύσεις εξετάζονται μία προς μία μέχρι να εντοπιστεί η βέλτιστη, ενώ στη δεύτερη, όλες οι πιθανές λύσεις του προβλήματος εξετάζονται πλήρως. Αυτές οι μέθοδοι είναι χρήσιμες για μικρής κλίμακας προβλήματα, αλλά γίνονται υπολογιστικά ανεφάρμοστες σε μεγάλα σύνολα δεδομένων ή όταν το πρόβλημα έχει υψηλή πολυπλοκότητα.

Ο αλγόριθμος Πολυκριτηριακής Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Multi-Objective Particle Swarm Optimization - MOPSO) [41] είναι μια εξελικτική προσέγγιση εμπνευσμένη από τη συλλογική συμπεριφορά των σμηνών ζώων. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, μια ομάδα λύσεων (σωματίδια) κινείται στον χώρο αναζήτησης, ακολουθώντας κανόνες βασισμένους στην ταχύτητα και την προηγούμενη εμπειρία κάθε σωματιδίου. Ο MOPSO είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, όπου διαφορετικοί αντικειμενικοί στόχοι, όπως το κόστος και η ενεργειακή απόδοση, πρέπει να ισορροπηθούν. Παρόλα αυτά, ο αλγόριθμος μπορεί να αντιμετωπίσει δυσκολίες στη διατήρηση της ποικιλομορφίας του πληθυσμού και στην αποφυγή παγίδευσης σε τοπικά βέλτιστα.

Η μέθοδος Monte Carlo (MC) [42] είναι μια στοχαστική τεχνική που χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάλυση αβεβαιότητας σε προβλήματα αναβάθμισης κτηρίων. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στη δημιουργία μεγάλου αριθμού τυχαίων προσομοιώσεων, όπου διαφορετικές τιμές μεταβλητών επιλέγονται βάσει καθορισμένων πιθανοτήτων. Η MC είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την εκτίμηση οικονομικών κινδύνων, όπως η ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Costing - LCC), ωστόσο μπορεί να απαιτεί σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους για να επιτευχθεί ικανοποιητική ακρίβεια.

Η μέθοδος ζυγισμένου αθροίσματος (Weighted Sum Method - WSM) [43] αποτελεί μία από τις πιο απλές τεχνικές πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, όπου οι διαφορετικοί στόχοι ενός προβλήματος συνδυάζονται σε μία μοναδική αντικειμενική συνάρτηση με τη χρήση προκαθορισμένων βαρών. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε μελέτες όπου απαιτείται μια σαφής ιεράρχηση των στόχων, όπως η εξισορρόπηση μεταξύ κόστους και ενεργειακής

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

απόδοσης σε ανακαινίσεις κτηρίων. Παρόλο που είναι εύκολη στην εφαρμογή, η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται από την ορθή επιλογή των βαρών, κάτι που μπορεί να απαιτεί προηγούμενη γνώση του προβλήματος.

Η μέθοδος ε-constraint [44] είναι μια ακόμη τεχνική πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, όπου ένας από τους στόχους του προβλήματος βελτιστοποιείται, ενώ οι υπόλοιποι μετατρέπονται σε περιορισμούς με καθορισμένα ανώτατα όρια (ϵ). Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία σε σχέση με τη WSM, καθώς δεν απαιτεί προκαθορισμένα βάρη για κάθε στόχο. Παρόλα αυτά, μπορεί να είναι δύσκολη η επιλογή των ορίων για κάθε περιορισμό, γεγονός που επηρεάζει την αποδοτικότητα της μεθόδου.

Πέρα από τις παραπάνω μεθόδους, διάφορες εναλλακτικές τεχνικές έχουν εφαρμοστεί στην αναβάθμιση κτηρίων, όπως ο αλγόριθμος Διαφορικής Εξέλιξης με Μη-Κυριαρχούμενη Ταξινόμηση (Non-dominated Sorting Differential Evolution Algorithm - NSDE), η Μέθοδος Επιφανειών Απόκρισης (Response Surface Method - RSM) και η Βελτιστοποίηση Σμήνους Χαμαιλέοντα (Chameleon Swarm Optimization - CSO). Επιπλέον, ο συνδυασμός διαφορετικών τεχνικών, όπως η Στρατηγική Εξέλιξης με Προσαρμογή Πίνακα Συνδιακύμανσης (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy - CMA-ES) και η Υβριδική Διαφορική Εξέλιξη (Hybrid Differential Evolution - HDE), έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποδοτικός για την εξεύρεση βέλτιστων λύσεων σε πολύπλοκα συστήματα. Μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα προσέγγιση είναι η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση βασισμένη σε προσομοιώσεις (Simulation-Based Multi-Objective Optimization - SBMO), όπου χρησιμοποιούνται Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks - ANNs) ως υποκατάστατα μοντέλα. Αυτή η τεχνική επιτρέπει την πιο αποδοτική εκτίμηση των ενεργειακών και οικονομικών επιπτώσεων μιας ανακαίνισης, εξοικονομώντας πολύτιμους υπολογιστικούς πόρους.

2.7. Γιατί υπερέχουν οι Γενετικοί αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν μια ισχυρή μέθοδο βελτιστοποίησης που υπερέχει έναντι εναλλακτικών τεχνικών, κυρίως λόγω της ικανότητάς τους να αντιμετωπίζουν πολύπλοκα, πολυκριτηριακά και μη γραμμικά προβλήματα. Η αναβάθμιση κτηρίων είναι ένα τέτοιο πρόβλημα, όπου απαιτείται η εξισορρόπηση αντικρουόμενων στόχων, όπως η ενεργειακή απόδοση, το κόστος επένδυσης και η θερμική άνεση. Οι ΓΑ διακρίνονται για την ικανότητά τους να διαχειρίζονται μεγάλους και πολυδιάστατους χώρους αναζήτησης, προσφέροντας λύσεις που δεν είναι εφικτές με πιο παραδοσιακές μεθόδους.

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των ΓΑ είναι η ικανότητά τους να διαχειρίζονται μη γραμμικά και πολύπλοκα προβλήματα, σε αντίθεση με μεθόδους όπως ο Γραμμικός Προγραμματισμός (LP) και ο Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP), οι οποίοι απαιτούν η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί να είναι γραμμικοί. Στην πράξη, τα προβλήματα ενεργειακής αναβάθμισης περιλαμβάνουν μη γραμμικές σχέσεις, όπως η αλληλεπίδραση των θερμομονωτικών υλικών με το κλίμα ή η επίδραση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ενεργειακή κατανάλωση του κτηρίου. Οι ΓΑ ως στοχαστικές τεχνικές βελτιστοποίησης, δεν έχουν τέτοιους περιορισμούς και μπορούν να διαχειριστούν πολύπλοκες, μη γραμμικές και ασυνεχείς σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών.

Επιπλέον, οι ΓΑ διακρίνονται στην αναζήτηση λύσεων σε μεγάλα και πολυδιάστατα προβλήματα, σε αντίθεση με μεθόδους όπως η Εξαντλητική Αναζήτηση (Exhaustive Search), η οποία, παρότι εξασφαλίζει την εύρεση της βέλτιστης λύσης, γίνεται υπολογιστικά ανεφάρμοστη όταν το πλήθος των πιθανών συνδυασμών αυξάνεται εκθετικά. Οι ΓΑ χρησιμοποιούν πληθυσμιακή αναζήτηση, δηλαδή εξετάζουν πολλές πιθανές λύσεις παράλληλα, επιτρέποντας την ταχύτερη διερεύνηση του χώρου αναζήτησης χωρίς να απαιτείται εξαντλητικός έλεγχος όλων των επιλογών.

Ένα ακόμη κρίσιμο πλεονέκτημα των ΓΑ είναι η αποτελεσματική διαχείριση αντικρουόμενων αντικειμενικών συναρτήσεων, όπως η εξισορρόπηση μεταξύ ενεργειακής απόδοσης, κόστους και θερμικής άνεσης. Μεθόδοι όπως η Μέθοδος Ζυγισμένου Αθροίσματος (WSM) μετατρέπουν ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα σε μία μοναδική συνάρτηση βελτιστοποίησης με τη χρήση προκαθορισμένων βαρών, γεγονός που συχνά οδηγεί σε λύσεις που ευνοούν μία από τις μεταβλητές εις βάρος των άλλων. Αντίθετα, οι ΓΑ χρησιμοποιούν Παρέτο-βέλτιστη βελτιστοποίηση, επιτρέποντας την παραγωγή πολλαπλών εναλλακτικών λύσεων που ανταποκρίνονται σε διαφορετικά επίπεδα προτεραιοτήτων, δίνοντας στους λήπτες αποφάσεων τη δυνατότητα να επιλέξουν την καταλληλότερη.

Οι ΓΑ προσφέρουν επίσης σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την ανθεκτικότητα σε τοπικά βέλτιστα. Παραδοσιακές μέθοδοι, όπως ο Γραμμικός Προγραμματισμός ή η Μέθοδος Monte Carlo, συχνά καταλήγουν σε τοπικά βέλτιστες λύσεις, αδυνατώντας να εξερευνήσουν ευρύτερα τον χώρο αναζήτησης. Οι ΓΑ, μέσω των μηχανισμών διασταύρωσης και μετάλλαξης, διαθέτουν εργαλεία εξερεύνησης που επιτρέπουν την αποφυγή αυτής της παγίδας και την εύρεση λύσεων με καλύτερη συνολική απόδοση.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα των ΓΑ είναι η ευκολία ενσωμάτωσής τους με προσομοιωτικά εργαλεία, όπως τα EnergyPlus, TRNSYS και DesignBuilder, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση με βάση προσομοιωμένες αποδόσεις του κτηρίου. Αυτή η δυνατότητα είναι

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

ιδιαίτερα σημαντική όταν η αξιολόγηση της αντικειμενικής συνάρτησης δεν μπορεί να γίνει με αναλυτικές εξισώσεις, κάτι που περιορίζει την αποτελεσματικότητα μεθόδων όπως η Μέθοδος ε-constraint ή ο MILP.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι ΓΑ είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί στην αντιμετώπιση της αβεβαιότητας και των στοχαστικών δεδομένων [32]. Σε προβλήματα αναβάθμισης κτηρίων, πολλές μεταβλητές υπόκεινται σε αβεβαιότητα, όπως η μελλοντική κατανάλωση ενέργειας ή η απόδοση των μονωτικών υλικών υπό μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες. Ενώ η Μέθοδος Monte Carlo μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση τέτοιων αβεβαιοτήτων, οι ΓΑ ενσωματώνουν τη στοχαστικότητα στη διαδικασία αναζήτησης, προσαρμόζοντας δυναμικά τον πληθυσμό τους και προσφέροντας πιο αξιόπιστες λύσεις σε αβέβαια περιβάλλοντα.

Τέλος, οι ΓΑ έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να συνδυαστούν με άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης, δημιουργώντας υβριδικές προσεγγίσεις που εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα διαφορετικών μεθόδων. Για παράδειγμα, μπορούν να συνδυαστούν με τοπική αναζήτηση για βελτίωση της ακρίβειας των λύσεων, με Γραμμικό Προγραμματισμό για την ανάλυση υποπροβλημάτων ή με Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ANNs) για την πρόβλεψη της απόδοσης ενεργειακών μέτρων. Αυτός ο συνδυασμός καθιστά τους ΓΑ ιδιαίτερα ισχυρούς σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας, όπου απαιτείται ένας αποδοτικός μηχανισμός εξερεύνησης.

Συμπερασματικά, οι γενετικοί αλγόριθμοι διακρίνονται για την ευελιξία, την προσαρμοστικότητα και την ικανότητά τους να αντιμετωπίζουν πολύπλοκα προβλήματα με πολλαπλά και αντικρουόμενα κριτήρια. Παρότι κάποιες εναλλακτικές μέθοδοι είναι πιο αποδοτικές σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, οι ΓΑ αποτελούν μια από τις πιο ολοκληρωμένες προσεγγίσεις για την ενεργειακή αναβάθμιση κτηρίων, καθώς επιτρέπουν την εξερεύνηση μεγάλων και μη γραμμικών χώρων αναζήτησης, την εύρεση Παρέτο-βέλτιστων λύσεων και την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας. Για όλους τους παραπάνω λόγους η παρούσα εργασία θα ασχοληθεί αποκλειστικά με τους ΓΑ στο πρόβλημα της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης κτηρίων.

2.8. Υποκατάστατα Μοντέλα (Surrogate Models) στην Αναβάθμιση Κτηρίων

Τα υποκατάστατα μοντέλα (surrogate models), γνωστά και ως μετα-μοντέλα (meta-models), είναι προσεγγιστικές μέθοδοι μοντελοποίησης που στοχεύουν στην αναπαραγωγή της σχέσης εισόδου-εξόδου ενός πιο πολύπλοκου μοντέλου. Ο κύριος σκοπός τους είναι η μείωση του

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

υπολογιστικού κόστους που απαιτείται για τη διαδικασία βελτιστοποίησης, επιτρέποντας την ταχύτερη διερεύνηση διαφορετικών σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης κτηρίων.

Στον τομέα της ενεργειακής αναβάθμισης, η χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (Artificial Neural Networks - ANNs) αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες προσεγγίσεις. Ιδιαίτερα, τα πολυεπίπεδα προσαγωγικά νευρωνικά δίκτυα (Multi-Layer Perceptron - MLP) χρησιμοποιούνται εκτενώς για την προσομοίωση της συμπεριφοράς μη γραμμικών συστημάτων [45]. Η διαδικασία ανάπτυξης ενός νευρωνικού δικτύου περιλαμβάνει τέσσερα στάδια [46]:

1. Προεπεξεργασία και κανονικοποίηση δεδομένων
2. Επιλογή της δομής και του σχεδιασμού του μοντέλου
3. Εκπαίδευση του δικτύου με χρήση κατάλληλων αλγορίθμων
4. Αξιολόγηση της απόδοσης και της ακρίβειας των προβλέψεων

Τα ANNs παίζουν κρίσιμο ρόλο στην πρόβλεψη της ενεργειακής κατανάλωσης, των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και των θερμικών συνθηκών άνεσης. Χάρη στη χρήση τους, οι χρόνοι προσομοίωσης μειώνονται σημαντικά, ενώ βελτιώνεται η ακρίβεια των εκτιμήσεων. Ενδεικτικά, η μελέτη [47] έδειξε ότι η εφαρμογή MLP-ANN μπορεί να επιταχύνει τις προσομοιώσεις έως και 38 φορές συγκριτικά με τις κλασικές μεθόδους.

Όταν τα ANNs συνδυάζονται με γενετικούς αλγορίθμους (GAs), αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής αναβάθμισης κτηρίων, καθώς επιτρέπουν την ταχεία διερεύνηση του βέλτιστου συνδυασμού παρεμβάσεων. Εκτός από τα νευρωνικά δίκτυα, άλλες τεχνικές υποκατάστατων μοντέλων που εφαρμόζονται στη βελτιστοποίηση των κτηρίων περιλαμβάνουν:

- Kriging interpolation, που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης με υψηλή ακρίβεια.
- Random Forest, μια μέθοδος μηχανικής μάθησης που βασίζεται σε πολλαπλά δέντρα απόφασης για την πρόβλεψη ενεργειακών επιδόσεων.
- Gradient Boosting, μια ισχυρή τεχνική βελτίωσης μοντέλων που ενισχύει την ακρίβεια των προβλέψεων μέσω διαδοχικών προσαρμογών.

Η ενσωμάτωση των υποκατάστατων μοντέλων στην ανάλυση της ενεργειακής αναβάθμισης των κτηρίων επιτρέπει τη βελτιστοποίηση λύσεων με σημαντικά μειωμένη υπολογιστική επιβάρυνση, καθιστώντας δυνατή την ανάλυση μεγάλου εύρους σεναρίων μέσα σε εύλογο χρονικό διάστημα.

2.9. Πολυκριτηριακές Μέθοδοι Λήψης Αποφάσεων στην αναβάθμιση κτηρίων

Η χρήση των γενετικών αλγορίθμων σε ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα, όπως η βέλτιστη επιλογή σεναρίου αναβάθμισης κτηρίου, συνεπάγεται την ταυτόχρονη αντιμετώπιση πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων και περιορισμών. Όπως αναλύθηκε προηγουμένως, η διαδικασία αυτή οδηγεί στην παραγωγή ενός συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων, γνωστού ως μέτωπο Pareto, όπου καμία λύση δεν υπερέχει απολύτως των υπολοίπων σε όλα τα κριτήρια. Για την ιεράρχηση ή την τελική επιλογή μιας ή περισσότερων λύσεων από το μέτωπο Pareto, εφαρμόζονται πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης αποφάσεων, οι οποίες επιτρέπουν τη συστηματική σύγκριση των διαθέσιμων επιλογών βάσει των προκαθορισμένων κριτηρίων.

Οι πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Making - MCDM) αποτελούν ένα σύνολο τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση και επιλογή της βέλτιστης λύσης μεταξύ διαφορετικών εναλλακτικών, λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλά και συχνά αντικρουόμενα κριτήρια [48]. Οι μέθοδοι αυτές βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορους τομείς, όπως η μηχανική, η περιβαλλοντική διαχείριση, η οικονομία και ο ενεργειακός σχεδιασμός, καθώς επιτρέπουν τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων που ενσωματώνουν όλες τις σχετικές διαστάσεις ενός προβλήματος.

Η διαδικασία λήψης απόφασης σε ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια: τον καθορισμό των εναλλακτικών λύσεων και των κριτηρίων αξιολόγησης, τον προσδιορισμό των βαρών των κριτηρίων με βάση τη σχετική τους σημασία και, τέλος, την κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων με βάση τη συνολική τους απόδοση. Οι μέθοδοι MCDM επιτρέπουν την ορθολογική επιλογή λύσεων, εξασφαλίζοντας ότι κανένα κριτήριο δεν κυριαρχεί αδικαιολόγητα στις αποφάσεις και αποτρέποντας την αυθαίρετη αξιολόγηση των επιλογών.

Μία από τις πλέον χρησιμοποιούμενες μεθόδους είναι η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP) [49], η οποία αναπτύχθηκε για την ποσοτικοποίηση της σχετικής σημασίας διαφορετικών κριτηρίων και εναλλακτικών μέσω συγκρίσεων κατά ζεύγη. Η AHP βασίζεται στην κλίμακα εννέα σημείων του Saaty, όπου κάθε κριτήριο συγκρίνεται με τα υπόλοιπα και από αυτές τις συγκρίσεις προκύπτει ένας σταθμισμένος πίνακας προτιμήσεων, ο οποίος κανονικοποιείται για την εξαγωγή των βαρών των κριτηρίων. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τη συστηματική ιεράρχηση των επιλογών με βάση την προτεραιότητα που τους αποδίδεται, εξασφαλίζοντας συνέπεια στις προτιμήσεις.

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

Η Τεχνική Προτίμησης με Ομοιότητα προς την Ιδανική Λύση (TOPSIS) [49] είναι μια μέθοδος που στοχεύει στον προσδιορισμό της λύσης που βρίσκεται πιο κοντά στην ιδανική λύση και ταυτόχρονα πιο μακριά από τη λιγότερο επιθυμητή λύση. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι η καλύτερη εναλλακτική πρέπει να έχει τη μικρότερη δυνατή απόσταση από την ιδανική λύση και τη μεγαλύτερη απόσταση από την αρνητική-ιδανική λύση. Το πρώτο βήμα της TOPSIS είναι η κανονικοποίηση του πίνακα αποφάσεων ώστε τα κριτήρια να γίνουν συγκρίσιμα. Στη συνέχεια, τα βάρη των κριτηρίων εφαρμόζονται στον κανονικοποιημένο πίνακα και υπολογίζονται οι ιδανικές και αρνητικές-ιδανικές λύσεις. Τέλος, κάθε εναλλακτική λύση αξιολογείται με βάση την απόστασή της από αυτές τις δύο λύσεις και κατατάσσεται ανάλογα. Η TOPSIS είναι μια δημοφιλής μέθοδος που εφαρμόζεται ευρέως σε ενεργειακά και μηχανολογικά προβλήματα λόγω της απλότητας και της σαφήνειας που παρέχει στην επιλογή των λύσεων. Τέλος, ο συνδυασμός της με την AHP έχει διαπιστωθεί πως είναι αρκετά αποτελεσματική [49].

Μια άλλη σημαντική μέθοδος είναι η VIKOR [50], η οποία επικεντρώνεται στον προσδιορισμό μιας συμβιβαστικής λύσης όταν υπάρχουν αντικρουόμενα κριτήρια. Αντί να επιλέγει αυστηρά την καλύτερη λύση, η VIKOR βρίσκει τη λύση που βρίσκεται πιο κοντά στο βέλτιστο δυνατό συμβιβασμό, λαμβάνοντας υπόψη την ομαδική και ατομική χρησιμότητα κάθε εναλλακτικής. Η μέθοδος αυτή υπολογίζει αρχικά τις αποστάσεις των εναλλακτικών λύσεων από τις καλύτερες και χειρότερες δυνατές τιμές κάθε κριτηρίου, και στη συνέχεια συνδυάζει αυτές τις αποστάσεις για να καταλήξει σε έναν συνολικό δείκτη απόδοσης. Η εναλλακτική λύση με τη μικρότερη τιμή σε αυτόν τον δείκτη θεωρείται η βέλτιστη συμβιβαστική λύση, υπό την προϋπόθεση ότι πληρούνται συγκεκριμένα κριτήρια αποδεκτής διαφοράς από τις υπόλοιπες εναλλακτικές. Η VIKOR είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν απαιτείται ένας συμβιβασμός μεταξύ πολλών αντικρουόμενων στόχων, όπως η ενεργειακή απόδοση και το κόστος μιας αναβάθμισης κτηρίου.

Οι πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης απόφασης παρέχουν ένα ισχυρό πλαίσιο για την ανάλυση σύνθετων προβλημάτων όπου απαιτείται συνεκτίμηση πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων. Η χρήση τους σε συνδυασμό με αλγορίθμους βελτιστοποίησης, όπως οι Γενετικοί Αλγόριθμοι, επιτρέπει την αναγνώριση ισορροπημένων και αποδοτικών λύσεων σε προβλήματα όπως η ενεργειακή αναβάθμιση κτηρίων, όπου η βελτιστοποίηση δεν αφορά μόνο την ενεργειακή απόδοση, αλλά και το κόστος, την άνεση των χρηστών και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

2.10. Ψηφιακά εργαλεία στην αναβάθμιση κτηρίων

Η ενεργειακή αναβάθμιση των κτηρίων βασίζεται σε προσομοιώσεις και ανάλυση δεδομένων, ώστε να εντοπιστούν οι βέλτιστες παρεμβάσεις που βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση, μειώνουν το κόστος και αυξάνουν την άνεση των χρηστών. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται ψηφιακά εργαλεία προσομοίωσης, σχεδιασμού και βελτιστοποίησης, τα οποία επιτρέπουν τη μοντελοποίηση και την ανάλυση διαφορετικών σεναρίων αναβάθμισης.

2.10.1. Εργαλεία Σχεδιασμού και Προσομοίωσης

Κτηρίων

Τα εργαλεία σχεδιασμού και προσομοίωσης παρέχουν τη δυνατότητα ανάλυσης της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτηρίων, επιτρέποντας στους μηχανικούς να αξιολογήσουν διαφορετικά μέτρα αναβάθμισης. Αυτά τα εργαλεία λαμβάνουν υπόψη παραμέτρους όπως τη γεωμετρία του κτηρίου, τα συστήματα HVAC, τις καιρικές συνθήκες, τις ρυθμίσεις φωτισμού και τα φορτία ηλεκτρικών συσκευών. Η χρήση εργαλείων προσομοίωσης συμβάλλει στη δυναμική ανάλυση της κατανάλωσης ενέργειας και της θερμικής συμπεριφοράς των χώρων, είτε σε επίπεδο κτηρίου είτε σε επιμέρους θερμικές ζώνες.

Το EnergyPlus αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα προγράμματα προσομοίωσης, το οποίο αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ. Είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας σε κτήρια, επιτρέποντας την προσομοίωση παραμέτρων όπως θέρμανση, ψύξη, αερισμός, φωτισμός και ηλεκτρικά φορτία. Το EnergyPlus βασίζεται στη μέθοδο θερμικής ισορροπίας για την ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς των επιφανειών και στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για την προσομοίωση της θερμικής αγωγιμότητας δομικών στοιχείων, όπως τοίχοι και οροφές. Παράλληλα, επιτρέπει την προσομοίωση συστημάτων HVAC και τη μοντελοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας, προσφέροντας ακριβείς εκτιμήσεις για τις θερμικές απώλειες και τα ενεργειακά κέρδη από τα ανοίγματα του κτηρίου.

Άλλα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό και την προσομοίωση κτηρίων περιλαμβάνουν:

- DesignBuilder¹: Παρέχει γραφικό περιβάλλον για την ανάλυση ενεργειακών προσομοιώσεων βασισμένων στο EnergyPlus.

¹ <https://designbuilder.co.uk/>

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

- SketchUp²: Χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το πρόσθετο OpenStudio για την τρισδιάστατη απεικόνιση και τροποποίηση μοντέλων κτηρίων.
- AutoDESK Revit³: Επιτρέπει την κατασκευή BIM μοντέλων και ενσωματώνει ενεργειακές αναλύσεις.
- HOT2000⁴: Εργαλείο για στατικές ενεργειακές αναλύσεις.
- RADIANCE-DAYSIM⁵: Χρησιμοποιείται για προσομοιώσεις φωτισμού και φυσικού φωτισμού.
- Be18⁶ και Vertical City Weather Generator⁷: Εργαλεία για προσομοιώσεις θερμικών φορτίων και ανάλυση κλιματικών δεδομένων.

Παρότι τα εργαλεία προσομοίωσης, όπως το EnergyPlus⁸, είναι ιδιαίτερα ισχυρά, έχουν υψηλές απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος, ειδικά όταν πρόκειται για πολύπλοκα μοντέλα με λεπτομερείς προσομοιώσεις θερμικής συμπεριφοράς και ροών αέρα. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η πρόκληση, πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν προσεγγίσεις όπως η μείωση των υπολογιστικών απαιτήσεων μέσω υποκατάστατων μοντέλων (surrogate models) ή η απλοποίηση των μοντέλων προσομοίωσης. Παρόλο που αυτές οι τεχνικές μειώνουν τον απαιτούμενο χρόνο προσομοίωσης, ενδέχεται να περιορίζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

2.10.2. Εργαλεία Βελτιστοποίησης

Τα εργαλεία βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή αλγορίθμων και τεχνικών που επιτρέπουν την εύρεση των βέλτιστων λύσεων σε προβλήματα ενεργειακής αναβάθμισης. Αυτά τα εργαλεία ενσωματώνουν αλγορίθμους όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι και επιτρέπουν τη διερεύνηση διαφορετικών λύσεων. Ορισμένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία περιλαμβάνουν:

- MATLAB: Χρησιμοποιείται ευρέως για προγραμματισμό βελτιστοποίησης, ανάλυση δεδομένων και επεξεργασία σημάτων.
- Python: Περιλαμβάνει βιβλιοθήκες όπως:
 - PyTorch, TensorFlow, scikit-learn για εφαρμογές μηχανικής μάθησης.

² <https://www.sketchup.com/en>

³ <https://www.autodesk.com/in>

⁴ <https://emi-ime.ca/inventory-model/hot2000/>

⁵ <https://www.radiance-online.org/community/mailling-lists/archives/radiance-daysim>

⁶ <https://be18.sbi.dk/be/>

⁷ <https://gmd.copernicus.org/articles/14/961/2021/>

⁸ <https://energyplus.net/>

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

- eppy για την επεξεργασία αρχείων EnergyPlus IDF.
- Platypus, DEAP, Geatpy για εξελικτικούς αλγορίθμους και γενετικούς αλγορίθμους.
- SALib για ανάλυση ευαισθησίας.
- jEPlus και jEPlus+EA: Εργαλεία για την εκτέλεση παραμετρικών αναλύσεων και βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με το EnergyPlus.
- MOBO: Ένα ευέλικτο εργαλείο για πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση.
- Octopus (plugin για Grasshopper): Εκτελεί εξελικτικούς αλγορίθμους και συνδυάζεται με το Rhino-Grasshopper.
- Wallacei: Ένας εξελικτικός επιλυτής για προσομοιώσεις στο Grasshopper.
- DAKOTA και modeFRONTIER: Χρησιμοποιούνται για βελτιστοποίηση σχεδιασμού.
- EnergyPLAN: Εργαλείο ανάλυσης ενεργειακών συστημάτων.
- PVWatts: Υπολογίζει την παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα.

Επιπλέον, εργαλεία όπως το MS Excel χρησιμοποιούνται για στατιστικές αναλύσεις και οπτικοποίηση δεδομένων, ενώ εργαλεία όπως το IBM SPSS και το SimLab διευκολύνουν την ανάλυση ευαισθησίας. Το Colibri plugin του Rhino-Grasshopper επιτρέπει την εκτέλεση επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων για την ανάλυση διαφορετικών συνδυασμών παραμέτρων.

3

Μεθοδολογία

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη διερεύνηση της πολυκριτηριακής αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων και την ανάδειξη των ερευνητικών κενών που σχετίζονται με το συγκεκριμένο ζήτημα.

Η παρούσα μελέτη ακολούθησε μια συστηματική προσέγγιση, η οποία αναλύεται στα εξής στάδια:

- **Βήμα 1 – Συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση:**

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση βασίστηκε αρχικά στην εργασία [5], που δημοσιεύτηκε το 2019 και παρουσιάζει εκτενώς την κατάσταση στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε από πλευράς μας αντίστοιχη συστηματική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας μέσω των βάσεων δεδομένων Scopus και Google Scholar για το διάστημα 2019-2024. Στην περίπτωση του Scopus, η αναζήτηση πραγματοποιήθηκε σε τίτλους, περιλήψεις και λέξεις-κλειδιά δημοσιεύσεων, συνεδριακών πρακτικών, βιβλιογραφικών ανασκοπήσεων και κεφαλαίων βιβλίων, χωρίς περιορισμούς σχετικά με τον δείκτη απήχησης (impact factor), τη γλώσσα ή την πρόσβαση στις εργασίες. Παρόλα αυτά, επιβλήθηκε χρονικός περιορισμός, καθώς η μελέτη επικεντρώνεται σε πρόσφατες έρευνες με ημερομηνία δημοσίευσης από το 2019 και μετά. Οι όροι αναζήτησης που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, εφαρμόστηκαν λογικοί τελεστές, όπως ο αστερίσκος (*) για την εύρεση παραλλαγών των όρων και ο τελεστής προσέγγισης Within (W/n).

Μετά την ολοκλήρωση της αναζήτησης στο Scopus, πραγματοποιήθηκε συμπληρωματική έρευνα στο Google Scholar. Χρησιμοποιήθηκαν οι όροι αναζήτησης: "multi-objective" AND "building retrofit" AND "genetic", με χρονικό περιορισμό δημοσίευσης από το 2019 έως το 2024 και ταξινόμηση των αποτελεσμάτων με βάση τη συνάφεια. Δεν αποκλείστηκε κανένας τύπος δημοσιεύσεων.

Επιπλέον, εφαρμόστηκε η μέθοδος χιονοστιβάδας (citation snowballing), με στόχο τον εντοπισμό πρόσθετων σχετικών εργασιών μέσω των βιβλιογραφικών αναφορών των κύριων μελετών. Οι βασικοί συνδυασμοί όρων αναζήτησης ήταν οι εξής:

A/A	Λέξεις κλειδιά αναζήτησης
1	genetic AND algorithm AND building AND retrofit
2	"multi-objective optimization" AND "genetic algorithm" AND "building retrofit"
3	"optimiz*" AND "genetic algorithm" AND "building retrofit*"
4	"multi-objective optimization building retrofit" AND "genetic algorithm"
5	multi-objective W/1 optimization W/5 building retrofit
6	multi-objective W/1 optimization W/5 building retrofit AND genetic algorithm

Δεδομένου ότι το επίκεντρο της έρευνας είναι η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση της αναβάθμισης κτηρίων με τη χρήση ΓΑ, αποκλείστηκαν μελέτες που αφορούν:

- ο Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με άλλους εξελικτικούς αλγορίθμους ή διαφορετικές προσεγγίσεις βελτιστοποίησης.
- ο Μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση με ΓΑ.
- ο Μελέτες που επικεντρώνονται αποκλειστικά στο αρχικό στάδιο σχεδιασμού και κατασκευής των κτηρίων.

Αντίθετα, συμπεριλήφθηκαν δημοσιεύσεις που εξετάζουν την απόδοση των ΓΑ σε σχέση με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης.

Αναφορικά με το αντικείμενο της βελτιστοποίησης, ελήφθησαν υπόψη μελέτες που εξετάζουν:

- ο Το περίβλημα των κτηρίων.
- ο Τα ενεργειακά και μηχανικά συστήματα.
- ο Τα συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας και ελέγχου.
- ο Συμπεριφορές χρηστών και η χρονικότητα, εφόσον σχετίζονται άμεσα με τουλάχιστον μία από τις αντικειμενικές συναρτήσεις.

Αντιθέτως, αποκλείστηκαν εργασίες που εστιάζουν:

- ο Στην αντισεισμική θωράκιση ή την προστασία από ακραία καιρικά φαινόμενα.
- ο Σε δομικές βελτιώσεις ή σε αναβαθμίσεις μεμονωμένων συστημάτων που δεν σχετίζονται με το σύνολο του κτηρίου.

Σε ό,τι αφορά τον χρονικό ορίζοντα, δόθηκε προτεραιότητα στις δημοσιεύσεις μεταξύ 2019-2024. Ωστόσο, κατά την εφαρμογή της μεθόδου citation snowballing,

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

εντοπίστηκαν παλαιότερες εργασίες που είχαν παραλειφθεί από την αρχική αναζήτηση και κρίθηκαν σχετικές για την ανάλυση.

Δεν υπήρξε γεωγραφικός περιορισμός ως προς την τοποθεσία των μελετώμενων κτηρίων ή τη χώρα προέλευσης των μελετών. Παράλληλα, δόθηκε προτεραιότητα σε πλήρεις δημοσιεύσεις σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά με διαδικασία ομότιμης αξιολόγησης (peer review). Η παραπάνω διαδικασία οδήγησε στη δημοσίευση [19], που παρουσιάζει αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω από 1000 μελετών, αλλά και τα ευρήματα-αποτελέσματα της.

- **Βήμα 2 – Ανάλυση αποτελεσμάτων Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης**

Το επόμενο βήμα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση περιλαμβάνει την ανάλυση των αποτελεσμάτων της Βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι η ανάδειξη των ερευνητικών κενών που υπάρχουν στο πρόβλημα της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης αναβάθμισης κτηρίων με χρήση ΓΑ. Για να επιτευχθεί αυτό, η ανάλυση εστίασε στους παρακάτω άξονες:

- Δεδομένα που χρησιμοποιούνται στις εργασίες, με έμφαση στα κτηριακά δεδομένα και στα δεδομένα καιρού
- Γενετικοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται
- Μεταβλητές απόφασης & αντικειμενικές συναρτήσεις
- Πολυκριτήριες μέθοδοι που εφαρμόζονται
- Ψηφιακά εργαλεία που χρησιμοποιούνται

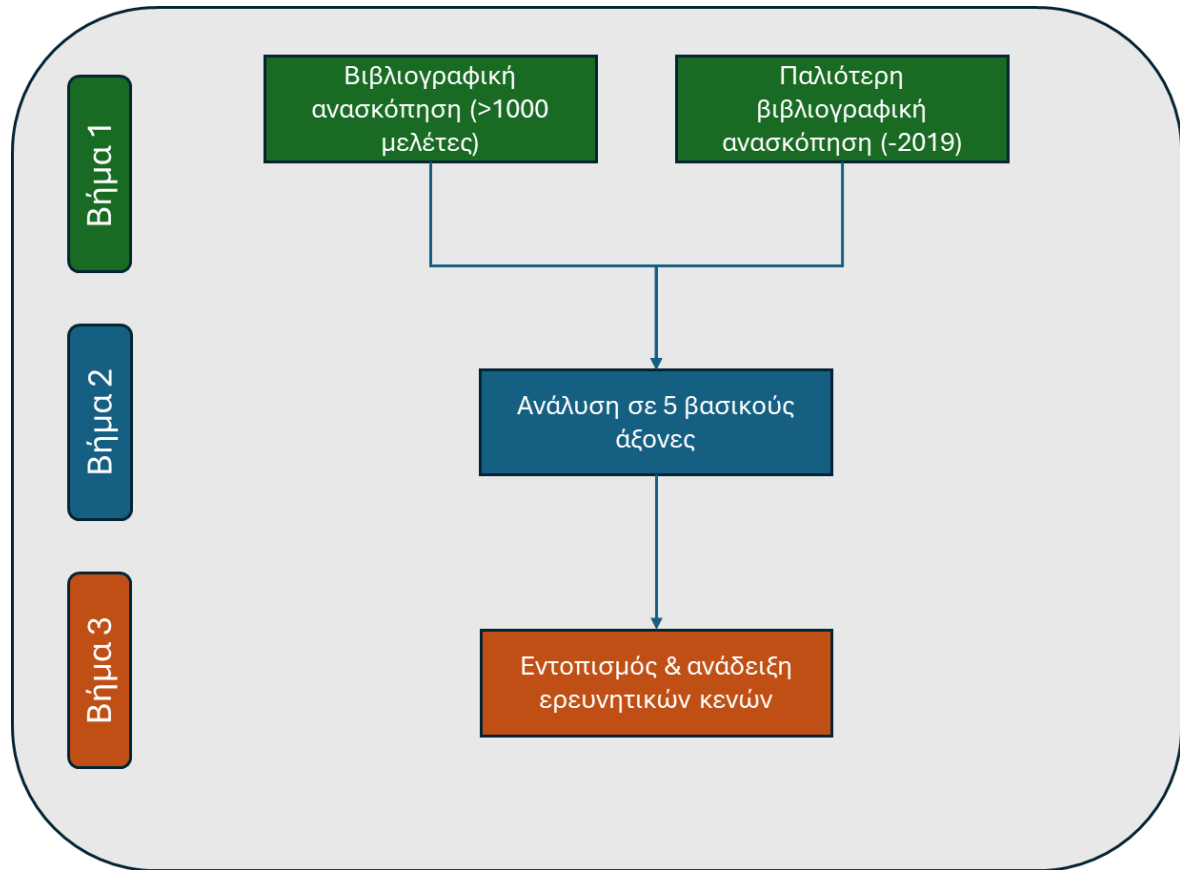
Η ανάλυση οδήγησε σε πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα, αλλά και κενά που εντοπίστηκαν και αναδεικνύονται στο επόμενο βήμα.

- **Βήμα 3 – Εντοπισμός ερευνητικών κενών**

Στο επόμενο βήμα, εστιάζουμε στην αναγνώριση των ερευνητικών κενών που προέκυψαν από την ανάλυση, ενώ γίνεται προσπάθεια να ερμηνευτούν αυτά τα κενά και να προτείνουμε τρόπους που αυτά μπορούν να καλυφθούν.

Τα παραπάνω βήματα αποτυπώνονται και στο επόμενο σχήμα:

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών



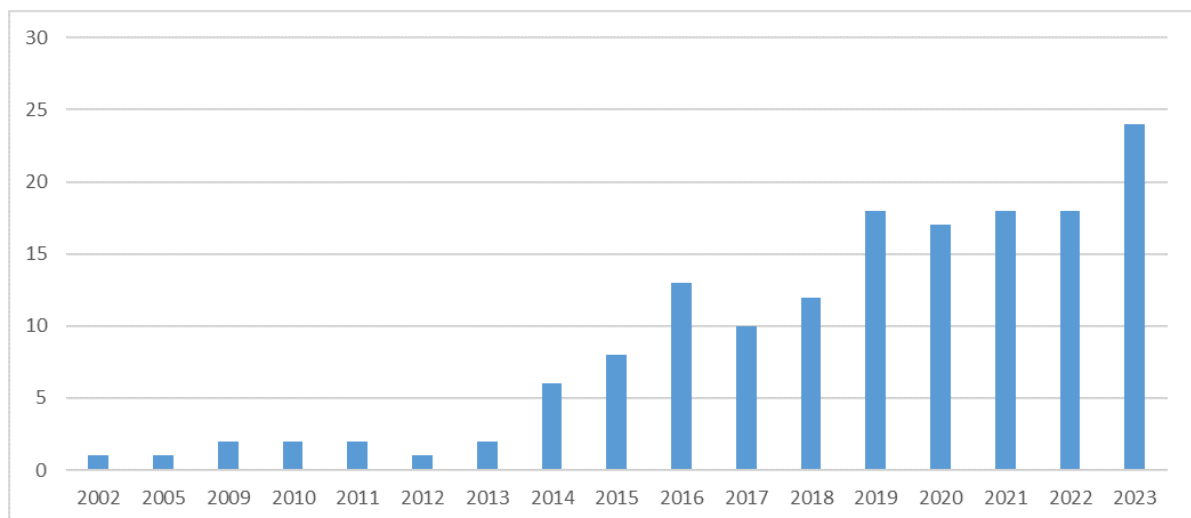
Εικόνα 1 Μεθοδολογία εργασίας

4

Ανάλυση δεδομένων & ερευνητικά κενά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά την διαδικασία της συστημικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Μέσα από αυτή την ανάλυση γίνεται προσπάθεια να εντοπιστούν ερευνητικά κενά που υπάρχουν στην υπάρχουσα βιβλιογραφία και αφήνουν χώρο για μελλοντική έρευνα.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα, το συγκεκριμένο θέμα συγκεντρώνει ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια με όλο και περισσότερες μελέτες να δημοσιεύονται κάθε χρόνο. Η συγκεκριμένη τάση αποδεικνύει το τεράστιο ενδιαφέρον των ερευνητών να δώσουν λύσεις στο πρόβλημα της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης αναβάθμισης κτηρίων με χρήση ΓΑ.



Εικόνα 2 Δημοσιεύσεις ανά έτος

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας, η ανάλυση θα γίνει στους ακόλουθους 5 άξονες:

- Δεδομένα που χρησιμοποιούνται στις μελέτες
- Χρήση ΓΑ
- Μεταβλητές απόφασης & αντικειμενικές συναρτήσεις

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

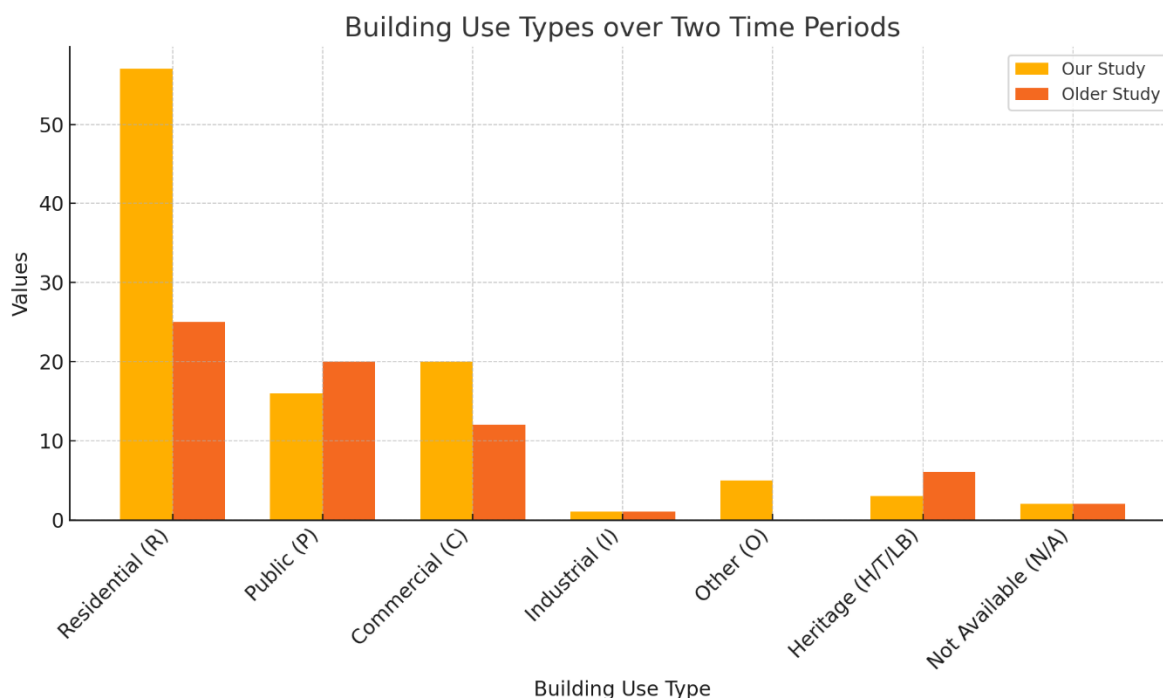
- Πολυκριτηριακές μέθοδοι που εφαρμόζονται
- Ψηφιακά εργαλεία που χρησιμοποιούνται

Η παραπάνω προσέγγιση επιλέχτηκε για να αναλυθούν όλες οι πτυχές και παράμετροι του προβλήματος της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης αναβάθμισης κτηρίων. Επιπλέον, η ανάλυση βασίστηκε κατά κύριο λόγο στη συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση που διεξήχθη στις μελέτες από το 2019 και μετά. Στα παρακάτω υποκεφάλαια γίνεται η παρουσίαση και η ανάλυση των ευρημάτων.

4.1. Δεδομένα

Οι μελέτες που αναλύθηκαν χρησιμοποίησαν ως δεδομένα εισόδου στα μοντέλα τους αρχεία, που περιέχουν την περιγραφή της κατάστασης των κτηρίων, τα καιρικά δεδομένα της περιοχής και τα υλικά που είναι διαθέσιμα να χρησιμοποιηθούν στην αναβάθμιση του κτηρίου (μεταβλητές απόφασης για το συγκεκριμένο πρόβλημα).

Η πλειονότητα των μελετών επικεντρώνεται σε κατοικίες, συμπεριλαμβανομένων μονοκατοικιών, διαμερισμάτων και πολυώροφων κτηρίων. Η εστίαση στους συγκεκριμένους τύπους κατοικιών είναι δικαιολογημένη, καθώς περίπου το 90% του κτηριακού αποθέματος στην Ευρωπαϊκή Ένωση αποτελείται από κατοικίες, γεγονός που αντικατοπτρίζει τη σημαντική συμμετοχή τους στο αστικό περιβάλλον και την κατανάλωση ενέργειας στην περιοχή. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται οι διαφορετικές τυπολογίες χρήσης κτηρίων που εξετάζονται στις υπό ανάλυση μελέτες. Από την αντίστοιχη ανάλυση προκύπτει ότι ο αριθμός των μελετών που επικεντρώνονται σε κατοικίες έχει διπλασιαστεί τα τελευταία πέντε χρόνια, ενώ ο αριθμός των δημοσιεύσεων που αφορούν άλλες τυπολογίες χρήσης κτηρίων έχει παραμείνει σχετικά σταθερός.



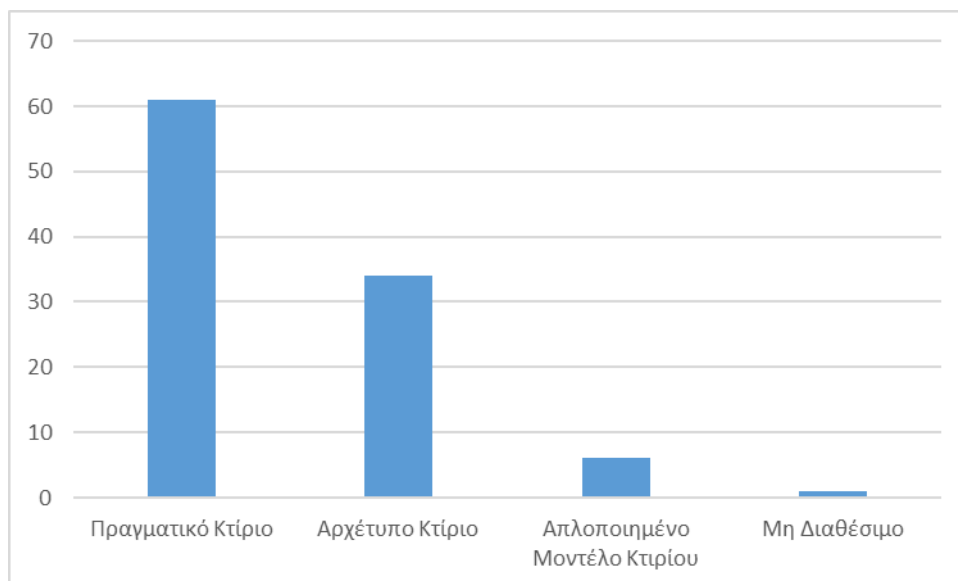
Εικόνα 3 Τυπολογίες κτηρίων στις υπό ανάλυση μελέτες συγκριτικά με την παλαιότερη βιβλιογραφική ανασκόπηση (κατοικίες - Residential, Δημόσια κτήρια - Public, Επαγγελματικοί χώροι - Commercial, Βιομηχανικοί χώροι - Industrial, Άλλα - Other, Πολιτιστικής κληρονομιάς - Heritage, Μη διαθέσιμα - Not Available)

Επιπλέον, πάνω από τις μισές από τις υπό ανάλυση μελέτες εστιάζουν σε κατοικίες, γεγονός που δεν προκαλεί έκπληξη, δεδομένου του αυξανόμενου ενδιαφέροντος για την αναβάθμιση αυτών των κτηρίων λόγω του σημαντικού περιβαλλοντικού τους αντίκτυπου σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο. Αυτή η τάση συνάδει με τις πρωτοβουλίες της ΕΕ, όπως το πρόγραμμα Renovation Wave [51], [52], το οποίο στοχεύει στην επιτάχυνση του ρυθμού ανακαινίσεων. Παράλληλα, ένας σημαντικός αριθμός δημοσιεύσεων εξετάζει και εμπορικά κτήρια, όπως γραφεία και καταστήματα, καθώς και δημόσια κτήρια, όπως σχολεία, εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης και κέντρα κοινωνικών υπηρεσιών.

Αντίθετα, η μελέτη βιομηχανικών κτηρίων είναι εξαιρετικά περιορισμένη. Τα τελευταία πέντε χρόνια, μόνο μία μελέτη [53] ασχολήθηκε με ένα βιομηχανικό κτήριο, συγκεκριμένα με την αναβάθμιση μιας εγκατάστασης επεξεργασίας ψαριών στην Αλμπέρτα, όπου προστέθηκε ένα υβριδικό σύστημα υδατοκαλλιέργειας, υποστηριζόμενο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, για την παραγωγή φρέσκων τροφίμων. Επιπλέον, τρεις μελέτες επικεντρώθηκαν σε κτήρια πολιτιστικής κληρονομιάς. Μία [54] από αυτές αφορούσε τη βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος στο κτήριο Inglis στο Λονδίνο, το οποίο κατασκευάστηκε μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, ενώ δύο άλλες μελέτες [55], [56] εξέτασαν την αναβάθμιση ενός παλατιού του 18ου αιώνα στο Κάιρο, όπου τοποθετήθηκε φεγγίτης και νέα υαλοπετάσματα.

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

Λιγότερο συνηθισμένες είναι οι μελέτες που αφορούν άλλους τύπους κτηρίων, όπως ένα κλειστό αθλητικό κέντρο, ένα τουριστικό κέντρο, καθώς και κτήρια σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης (nZEB).



Εικόνα 4 Τύπος μοντέλου κτηρίων

Αναφορικά με τα μοντέλα κτηρίων που χρησιμοποιούνται στις μελέτες, η πλειονότητα των δημοσιεύσεων επιλέγει την ανάλυση πραγματικών κτηρίων με επί τόπου μετρήσεις. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στον σχεδιασμό και την επιχειρησιακή προσομοίωση των κτηρίων, επιτρέποντας την εξαγωγή αποτελεσμάτων που μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα στις διαδικασίες αναβάθμισης. Ωστόσο, αρκετές μελέτες κάνουν χρήση αρχέτυπων κτηρίων (περίπου το ένα τρίτο των δημοσιεύσεων να αξιοποιεί τέτοια μοντέλα), τα οποία βασίζονται συχνά σε δεδομένα από εθνικές έρευνες. Αντίθετα, τα απλουστευμένα κτηριακά μοντέλα συναντώνται σπανιότερα στη βιβλιογραφία. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται οι τύποι κτηριακών μοντέλων όπως αυτοί προέκυψαν από την εκτενή συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Η κατανομή των δημοσιεύσεων ανά περιοχή παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω:

- Ευρώπη (56 μελέτες)

Ιταλία (12), Γαλλία (7), Φινλανδία (6), Ισπανία (6), Ελλάδα (6), Ηνωμένο Βασίλειο (3), Ελβετία (3), Πορτογαλία (3), Γερμανία (3), Σουηδία (2), Δανία (2), Ρουμανία (1), Πολωνία (1), Βουλγαρία (1).

- Ασία (41 μελέτες)

Κίνα (23), Ιράν (9), Νότια Κορέα (2), Τουρκία (1), Σαουδική Αραβία (1), Ιαπωνία (1), Μαλαισία (1), Ινδονησία (1), Μογγολία (1), Ταϊλάνδη (1).

- Βόρεια Αμερική (14 μελέτες)

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

Ηνωμένες Πολιτείες (8), Καναδάς (6).

- Αυστραλία και Ωκεανία (2 μελέτες)

Αυστραλία (2).

- Μέση Ανατολή και Βόρεια Αφρική (MENA) (1 μελέτη)

Μαρόκο (1).

- Νότια Αμερική (1 μελέτη)

Χιλή (1).

Η πλειονότητα των μελετών επικεντρώνεται σε κτήρια που βρίσκονται στην Ευρώπη και την Ασία, ενώ παρατηρείται περιορισμένο ερευνητικό ενδιαφέρον για κτήρια σε αναπτυσσόμενες ή λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες σύμφωνα με τον ορισμό του Διεθνούς Νομισματικού Ταμείου, όπως είναι της Αφρικής, της Ωκεανίας, της Κεντρικής και της Νότιας Αμερικής.

Αναφορικά με τα δεδομένα καιρού, η πλειονότητα των εργασιών χρησιμοποίησε δεδομένα καιρού από εργαλεία ανοιχτού κώδικα ή εργαλεία προσομοίωσης καιρού όπως τα METEONORM, CCWorldWeatherGen και Vertical City Weather Generator.

4.1.1. Ερευνητικά κενά στα Δεδομένα

Από την ανάλυση των δεδομένων που χρησιμοποιούνται στις μελέτες προκύπτουν τα παρακάτω ενδιαφέροντα ερευνητικά κενά:

- Απουσία ανοιχτών κτηριακών δεδομένων για τη σύγκριση πολυκριτηριακών μεθόδων αναβάθμισης κτηρίων. Σχεδόν όλες οι εργασίες αναφέρουν ότι τα δεδομένα μπορούν να γίνουν διαθέσιμα μετά από αίτημα στους συγγραφείς της εκάστοτε μελέτης, όμως σπανίως, αν όχι καθόλου, γίνεται διαμοιρασμός των δεδομένων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην μπορεί να γίνει σύγκριση των διαφορετικών μεθόδων, αλλά και αξιολόγηση των μεθόδων αυτών, καθώς τα πειράματα από τις μελέτες τρέχουν σε διαφορετικά δεδομένα, τόσο κτηριακά, όσο και δεδομένα καιρού. Τέλος, η διαθεσιμότητα ανοιχτών δεδομένων θα βοηθούσε ώστε περισσότεροι ερευνητές να ασχοληθούν με το συγκεκριμένο πρόβλημα και να παραχθούν καλύτερες λύσεις.
- Όσον αφορά τα δεδομένα καιρού, παρατηρούνται δύο σημαντικά ερευνητικά κενά που θα μπορούσαν να απασχολήσουν την ερευνητική κοινότητα. Το πρώτο είναι ότι δεν λαμβάνονται υπόψη τα τοπικά καιρικά δεδομένα του πειράματος με τη μεγαλύτερη δυνατή λεπτομέρεια. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνονται υπόψη καιρικά δεδομένα της ευρύτερης περιοχής και όχι δεδομένα μικροκλίματος, δηλαδή καιρικά δεδομένα σε επίπεδα γειτονιάς. Για να γίνει αυτό πιο κατανοητό, αρκεί κανείς να

αναλογιστεί ότι 2 περιοχές της Αθήνας, οι οποίες βρίσκονται στα νότια προάστια και στα βόρεια προάστια αντίστοιχα, παρουσιάζουν σημαντική διαφορά θερμοκρασίας. Επομένως, θα είχε ενδιαφέρον να μελετηθεί η επίδραση του μικροκλίματος στο πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης αναβάθμισης κτηρίων με χρήση εργαλείων, όπως το *envi-met*⁹ και το *weather urban generator*¹⁰, που ενσωματώνουν την παράμετρο του μικροκλίματος στα καιρικά δεδομένα. Το δεύτερο είναι ότι δεν υπάρχουν αρκετές μελέτες που να λαμβάνουν υπόψη τα διάφορα ενδεχόμενα κλιματικής αλλαγής σε κάθε περιοχή. Οι περισσότερες εργασίες εστιάζουν σε παρελθοντικά καιρικά δεδομένα, όμως η αναβάθμιση ενός κτηρίου θα πρέπει να συνυπολογίζει τις ενδεχόμενες αλλαγές στα καιρικά δεδομένα της περιοχής τα επόμενα χρόνια. Θα είχε ενδιαφέρον λοιπόν, μια ανάλυση στο πώς διαφοροποιούνται οι αποφάσεις για την ενεργειακή αναβάθμιση ενός κτηρίου με βάση τα διαφορετικά ενδεχόμενα κλιματικής αλλαγής.

4.2. Χρήση ΓΑ

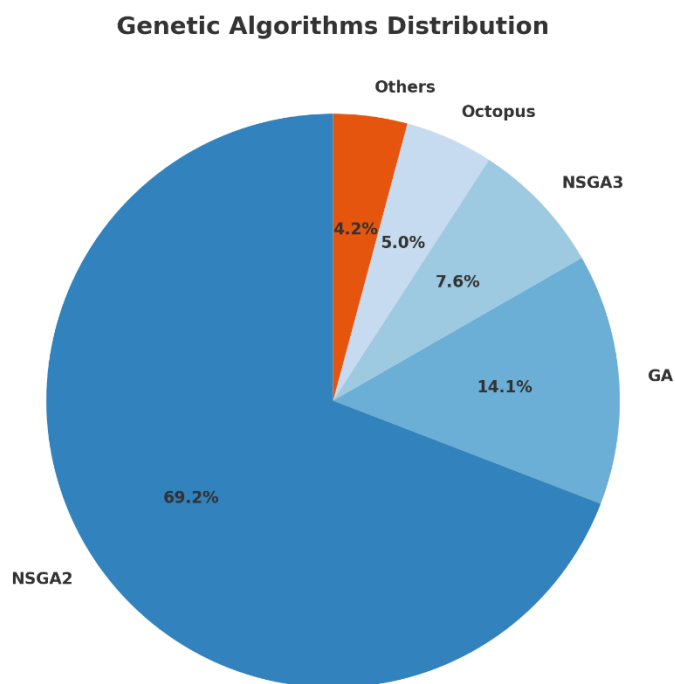
Από τις 118 μελέτες που εξετάστηκαν, η πλειονότητα (82 μελέτες) χρησιμοποίησε τον Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II). Επιπλέον, αρκετές μελέτες υιοθέτησαν παραλλαγές του NSGA-II, όπως ο aNSGA-II, ο οποίος διαθέτει έναν ενεργό αποθηκευτικό αρχείο (active storage archive), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε μια έκδοση του NSGA-II που υποστηρίζει παράλληλο προγραμματισμό.

Δεκαεπτά μελέτες αναφέρουν τη χρήση γενετικών αλγορίθμων χωρίς να διευκρινίζουν ποιον ακριβώς αλγόριθμο χρησιμοποίησαν. Επιπλέον, έξι μελέτες συνδύασαν τον Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 (SPEA2) με το Hyper Estimation (HypE), ένα χαρακτηριστικό που προσφέρει το πρόσθετο Octopus για Rhino-Grasshopper.

Παρά τις δυνατότητές του, ο NSGA-III, μια επέκταση του NSGA-II που εισήχθη από τους Deb και Jain το 2013 [57], έχει αγνοηθεί σε μεγάλο βαθμό από την ερευνητική κοινότητα. Ο NSGA-III σχεδιάστηκε για να αντιμετωπίσει τους περιορισμούς του NSGA-II, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα και διατηρώντας ευνοϊκούς μηχανισμούς, ενώ προσφέρει καλύτερη διαχείριση πολυκριτηριακών προβλημάτων και πιο ισορροπημένη κατανομή λύσεων, χρησιμοποιώντας σημεία αναφοράς αντί για απόσταση συγχρωτισμού (crowding distance). Παρόλα αυτά, μόνο τέσσερις μελέτες εφάρμοσαν τον NSGA-III.

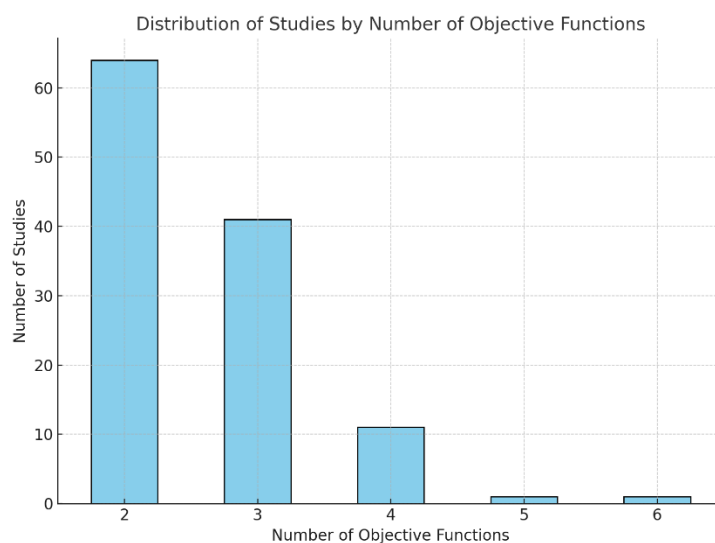
⁹ <https://envi-met.com/>

¹⁰ <https://urbanmicroclimate.scripts.mit.edu/uwg.php>



Εικόνα 5 Διάφοροι ΓΑ από τη βιβλιογραφία

Ο NSGA-II χρησιμοποιείται δέκα φορές συχνότερα από τον NSGA-III, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Αυτή η διαφορά μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι ο NSGA-II επιδεικνύει ανώτερη απόδοση στην επίλυση προβλημάτων με δύο ή τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις, ενώ ο NSGA-III είναι πιο κατάλληλος για προβλήματα που περιλαμβάνουν περισσότερους από τρεις στόχους. Δεδομένου ότι η πλειονότητα των εξεταζόμενων περιπτώσεων επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση δύο ή τριών αντικειμενικών συναρτήσεων, η προτίμηση προς τον NSGA-II καθίσταται προφανής, όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6 Πλήθος αντικειμενικών συναρτήσεων στις μελέτες

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

Στις υπό ανάλυση μελέτες, αναφέρονται συχνά ορισμένες βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τη διαδικασία της εξέλιξης και τη σύγκλιση των γενετικών αλγορίθμων. Οι πιο σημαντικές από αυτές περιλαμβάνουν:

- Μέγεθος Πληθυσμού (Population Size):

Αυτή είναι η συχνότερα αναφερόμενη παράμετρος. Μαζί με τον μέγιστο αριθμό γενεών (maximum number of generations), έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στη σύγκλιση και τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο. Συνήθως, το μέγεθος του πληθυσμού προτείνεται να είναι 2 έως 6 φορές μεγαλύτερο από τον αριθμό των γονιδίων, δηλαδή των μεταβλητών απόφασης. Στη βιβλιογραφία, παρατηρούνται τιμές που κυμαίνονται από 5 έως 500 άτομα ανά πληθυσμό, με μέσο όρο 93,2 και τη συχνότερη τιμή να είναι 100. Μια εξαίρεση αποτελεί μελέτη που χρησιμοποίησε μικρογενετικό αλγόριθμο (micro-genetic algorithm) με μικρότερο πληθυσμό, περίπου 5 άτομα, όπου εφαρμόστηκαν διαδικασίες διασταύρωσης και μετάλλαξης, με την ανανέωση του πληθυσμού να πραγματοποιείται μέσω επαναλαμβανόμενων εσωτερικών και εξωτερικών βρόχων.

- Πιθανότητα και Ρυθμός Διασταύρωσης (Crossover Probability and Rate):

Αυτοί οι όροι αναφέρονται στον έλεγχο της κληρονομικότητας των γονιδίων από την προηγούμενη γενιά. Η πιθανότητα διασταύρωσης (crossover probability) αφορά ένα ζευγάρι ατόμων κατά την αναπαραγωγή, ενώ ο ρυθμός διασταύρωσης (crossover rate) αναφέρεται στο σύνολο του πληθυσμού μιας γενιάς. Ο προτεινόμενος ρυθμός διασταύρωσης κυμαίνεται από 0,4 έως 0,99, ενώ στη βιβλιογραφία εμφανίζονται τιμές μεταξύ 0,01 και 1, με μέσο όρο 0,82 και συχνότερη τιμή 0,9. Ο ρυθμός διασταύρωσης κυμαίνεται από 20 % έως 100 %, με μέσο όρο 77 % και τη συνηθέστερη τιμή να είναι 80 %.

- Πιθανότητα και Ρυθμός Μετάλλαξης (Mutation Probability and Rate):

Παρόμοια με τη διασταύρωση, η πιθανότητα μετάλλαξης (mutation probability) αφορά ένα μεμονωμένο γονίδιο, ενώ ο ρυθμός μετάλλαξης (mutation rate) αναφέρεται στο σύνολο του πληθυσμού. Στη βιβλιογραφία, οι πιθανότητες μετάλλαξης κυμαίνονται από 0,01 έως 0,5, με μέσο όρο 0,132 και συχνότερη τιμή 0,1. Οι ρυθμοί μετάλλαξης κυμαίνονται από 1,25 % έως 90 %, με μέσο όρο 28,7 % και συχνότερη τιμή 20 %. Μια ιδιαίτερη περίπτωση αποτελεί μελέτη που χρησιμοποίησε μη ομοιόμορφη μετάλλαξη (non-uniform mutation), με μέσο όρο 0 και τυπική απόκλιση 0,5.

- Ελιτισμός (Elitism):

Ο ελιτισμός αφορά το ποσοστό των καλύτερων λύσεων που μεταφέρονται αμετάβλητες στην επόμενη γενιά. Στις περισσότερες μελέτες, η τιμή αυτή είναι 0,5, δηλαδή το πιο προσαρμοσμένο 50 % του πληθυσμού προχωρά στην επόμενη γενιά. Ωστόσο, σε μια συγκεκριμένη μελέτη εφαρμόστηκε πολύ χαμηλός ρυθμός ελιτισμού, της τάξης του 0,05.

- Μέθοδος Επιλογής (Selection Method):

Η μέθοδος επιλογής καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο επιλέγονται τα άτομα για την επόμενη γενιά. Η συνηθέστερη μέθοδος είναι η επιλογή τουρνουά (tournament selection), όπου τα άτομα συγκρίνονται ανά ζεύγη και επιλέγεται το καλύτερο. Η μέθοδος ρουλέτας (roulette wheel selection) χρησιμοποιείται λιγότερο συχνά.

4.2.1. Ερευνητικά κενά στη χρήση ΓΑ

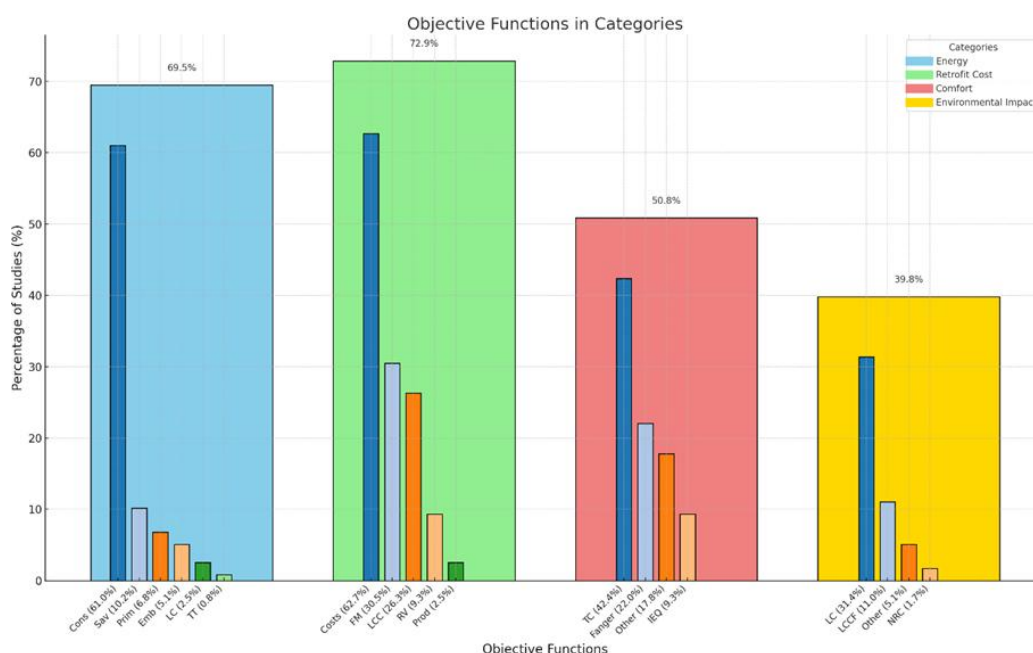
Από την ανάλυση των μελετών είναι εμφανές ότι οι ερευνητές έχουν καταλήξει να χρησιμοποιούν ως επί τω πλείστων, τη μέθοδο NSGA-II, καθώς οι περισσότερες εργασίες χρησιμοποιούν μέχρι 3 αντικειμενικές συναρτήσεις. Ωστόσο, υπάρχουν ερευνητικά κενά που προκύπτουν και θα είχαν ενδιαφέρον να διερευνηθούν και παρουσιάζονται παρακάτω:

- Αρχικά, υπάρχει μόνο μια μελέτη που χρησιμοποιεί μια παραλλαγή γενετικών αλγορίθμων με χρήση των κβαντικών αρχών. Θα είχε ενδιαφέρον, η χρήση τέτοιων αλγορίθμων παραπάνω και να συγκρίνουμε την ταχύτητα σύγκλισης με τις παραδοσιακές μεθόδους. Οι αρχές των κβαντικών υπολογιστών είναι αρκετά υποσχόμενες και μπορούν να βοηθήσουν στην εξέλιξη και πρόοδο των παραδοσιακών μεθόδων γενετικών αλγορίθμων.
- Επιπλέον, πολλές μελέτες χρησιμοποιούν τις προκαθορισμένες παραμέτρους των γενετικών αλγορίθμων και δεν πειραματίζονται με διαφορετικές τιμές. Θα είχε ενδιαφέρον, η σύγκριση πειραμάτων με τις προκαθορισμένες τιμές παραμέτρων και με τις βέλτιστες σε αρκετά πειράματα, ώστε να αναδειχθεί η βαρύτητα και η αξία των παραμέτρων των αλγορίθμων.
- Τέλος, υπάρχει αρκετό περιθώριο πειραματισμού με συνδυασμούς των διάφορων γενετικών αλγορίθμων. Μόνο λίγες μελέτες έχουν συνδυάσει διαφορετικούς αλγορίθμους. Θα είχε ενδιαφέρον η σύγκριση διαφορετικών γενετικών αλγορίθμων και συνδυασμούς αυτών σε διαφορετικά πειράματα, ώστε να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα συνδυασμών μεθόδων.

4.3. Μεταβλητές απόφασης & αντικειμενικές συναρτήσεις

Οι μεταβλητές απόφασης αντιπροσωπεύουν τα μέτρα που εξετάζονται για την αναβάθμιση των κτιρίων και εισάγονται στους γενετικούς αλγορίθμους ως γονίδια. Οι κύριες κατηγορίες μεταβλητών που εντοπίστηκαν στις μελέτες είναι:

- **Ενεργειακή Απόδοση:** Περιλαμβάνει την κατανάλωση λειτουργικής ενέργειας, την πρωτογενή ενέργεια, τη συνολική ενέργεια κύκλου ζωής και τη θερμική ροή μέσω του περιβλήματος (U-value).
- **Κόστος Αναβάθμισης:** Αφορά το συνολικό κόστος επένδυσης, το κόστος κύκλου ζωής (LCC) και μετρικές αποδοτικότητας, όπως η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) και η Απόδοση Επένδυσης (ROI).
- **Άνεση Εσωτερικού Περιβάλλοντος (IEQ):** Εξετάζει τη θερμική άνεση, χρησιμοποιώντας δείκτες όπως το PMV (Predicted Mean Vote) και το PPD (Percentage of People Dissatisfied), καθώς και άλλες παραμέτρους όπως η ποιότητα αέρα και οπτική άνεση.
- **Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις:** Περιλαμβάνει τις εκπομπές CO₂ καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του κτιρίου, το αποτύπωμα άνθρακα και την κατανάλωση φυσικών πόρων.



Εικόνα 7 Αντικειμενικές συναρτήσεις ανά κατηγορία

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες αντικειμενικές συναρτήσεις σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση (69,5% των μελετών) και το κόστος αναβάθμισης (72,9% των μελετών), αντικατοπτρίζοντας την προτεραιότητα που δίνεται στην οικονομική και ενεργειακή βιωσιμότητα των αναβαθμίσεων. Η άνεση εσωτερικού περιβάλλοντος (47% των μελετών)

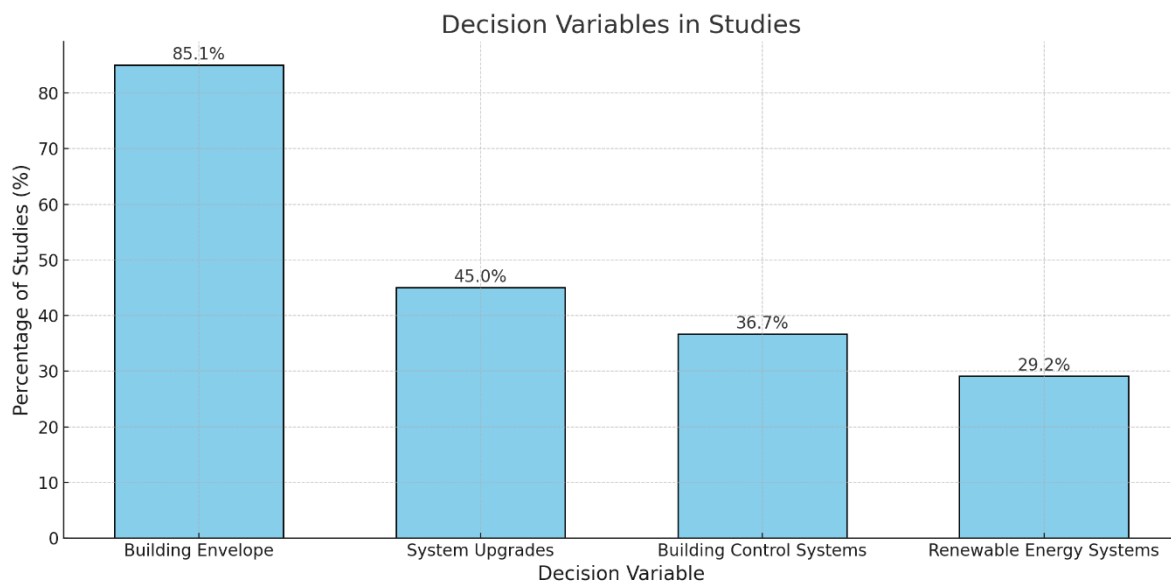
Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις (39%) χρησιμοποιούνται λιγότερο συχνά. Οι πιο πολύπλοκες συναρτήσεις, όπως η ενσωματωμένη ενέργεια (Embodied Energy) και η υπολειμματική αξία (Residual Value), εμφανίζονται σε λιγότερο από 10% των μελετών, γεγονός που οφείλεται στη δυσκολία υπολογισμού τους.

Από την άλλη, οι μεταβλητές απόφασης αναφέρονται στα μέτρα αναβάθμισης που εξετάζονται και εισάγονται στους γενετικούς αλγορίθμους ως γονίδια. Οι βασικές κατηγορίες μεταβλητών που εντοπίστηκαν είναι:

- Περίβλημα κτηρίου (85,1% των μελετών): Οι πιο συχνές μεταβλητές αφορούν τοίχους, οροφές, δάπεδα, παράθυρα και μονωτικά υλικά, με χαρακτηριστικά όπως το U-value, η θερμική αντίσταση και η απορροφητικότητα.
- Συστήματα HVAC (45% των μελετών): Περιλαμβάνει αναβαθμίσεις σε αντλίες θερμότητας, λέβητες, κλιματιστικά και συστήματα ανάκτησης θερμότητας.
- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (29,2% των μελετών): Επενδύσεις σε φωτοβολταϊκά (PV) και ηλιακούς συλλέκτες, με μεταβλητές όπως η κλίση και ο αριθμός των πάνελ.
- Συστήματα ελέγχου (36,7% των μελετών): Περιλαμβάνει ρυθμίσεις HVAC, αερισμό, σκίαση και έξυπνα ενεργειακά συστήματα.
- Αλληλεπίδραση χρηστών & χρονοπρογραμματισμός αναβαθμίσεων: Λιγότερο κοινές μεταβλητές που αφορούν τη συμπεριφορά των χρηστών, όπως ανοιγοκλείσιμο παραθύρων και ρύθμιση θερμοκρασιών, καθώς και τη φάση υλοποίησης των αναβαθμίσεων.

Τα παραπάνω αποτυπώνονται στο παρακάτω γράφημα, που παρουσιάζονται τα ποσοστά εμφάνισης των αντικειμενικών συναρτήσεων ανά κατηγορία.



Εικόνα 8 Μεταβλητές απόφασης (Περίβλημα κτηρίου - Building Envelope, Συστήματα HVAC-System upgrades, Συστήματα Ελέγχου-Building control systems, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας – Renewable Energy Systems)

Το περίβλημα του κτηρίου, όπως φαίνεται στο σχήμα, αποτελεί το κυρίαρχο αντικείμενο βελτιστοποίησης λόγω της άμεσης επίδρασής του στη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων, ενώ οι ανανεώσιμες πηγές και τα συστήματα HVAC εμφανίζονται λιγότερο συχνά, πιθανώς λόγω της εξάρτησής τους από τοπικές κλιματικές και οικονομικές συνθήκες.

4.3.1. Ερευνητικά κενά στις Μεταβλητές Απόφασης & στις Αντικειμενικές συναρτήσεις

Από την εκτενή ανάλυση των μελετών πάνω στον άξονα των μεταβλητών απόφασης και των αντικειμενικών συναρτήσεων, είναι εμφανές ότι προκύπτουν ενδιαφέροντα για μελλοντική έρευνα ερευνητικά κενά, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η αναβάθμιση ενός κτηρίου είναι ένα πρόβλημα-έργο που ενδιαφέρει πολλούς εμπλεκόμενους, όπως τους ιδιοκτήτες του κτηρίου, τους μηχανικούς που θα υλοποιήσουν την υλοποίηση, τους τεχνικούς συμβούλους που σχεδιάζουν την αναβάθμιση του κτηρίου, τους κατοίκους του κτηρίου (αν μιλάμε για κατοικίες), αλλά και τις δημόσιες αρχές. Όλοι οι εμπλεκόμενοι έχουν διαφορετικές προτεραιότητες και ανάγκες, με τις περισσότερες φορές αυτές οι προτεραιότητες να είναι αντικρουόμενες. Για παράδειγμα, οι ιδιοκτήτες του κτηρίου θα θέσουν ως προτεραιότητα το χαμηλό κόστος αναβάθμισης, ενώ οι κάτοικοι θα μπορούσαν να έχουν ως προτεραιότητα τη θερμική άνεση ή τη μείωση ενεργειακής κατανάλωσης. Στο ίδιο παράδειγμα, οι δημόσιες αρχές θα μπορούσαν να θέσουν ως προτεραιότητα την ελαχιστοποίηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Αυτές οι αντικρουόμενες προτεραιότητες οδηγούν

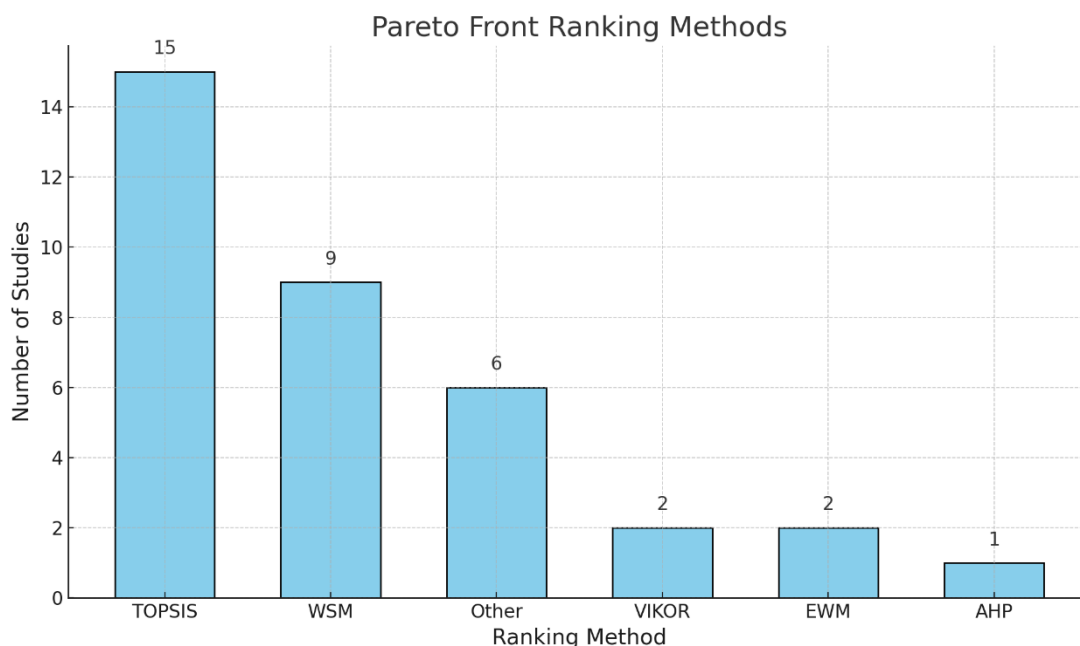
συχνά στο να παραβλέπονται οι ανάγκες και προτεραιότητες των κατοίκων. Θα είχε ενδιαφέρον μελέτη πάνω στο συγκεκριμένο θέμα λαμβάνοντας ως είσοδο τις διαφορετικές προτιμήσεις από τους εμπλεκόμενους και να συγκρίνουμε τα διαφορετικά αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις.

- Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι απουσίαζε από τις περισσότερες μελέτες η ενσωμάτωση εργαλείων χρηματοδότησης και επενδύσεων από εθνικά και ευρωπαϊκά κονδύλια. Τα περισσότερα κράτη διαθέτουν κατά καιρούς μηχανισμούς χρηματοδότησης αναβάθμισης κτηρίων. Οι χρηματοδοτήσεις αυτές έρχονται να κάνουν πιο ελκυστικές τις αναβαθμίσεις κτηρίων, καθώς η υψηλή αρχική επένδυση που απαιτείται για ουσιαστικές βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση αποθαρρύνει τους ιδιοκτήτες από την υιοθέτηση αποδοτικών λύσεων. Θα είχε ενδιαφέρον λοιπόν, οι μελέτες και τα εργαλεία που αναπτύσσονται να είναι πιο δυναμικά και να περιέχουν μέσα χρηματοδοτικά εργαλεία. Αυτό ενδεχομένως να μπορούσε να βοηθήσει και τους δημιουργούς πολιτικών να σχεδιάσουν πιο αποδοτικά χρηματοδοτικά σχήματα.
- Τέλος, παρατηρείται περιορισμένη ενσωμάτωση της ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος στις αντικειμενικές συναρτήσεις. Παρά τη σημασία της θερμικής άνεσης και της υγείας των ενοίκων, οι παράγοντες αυτοί συχνά παραβλέπονται, με αποτέλεσμα την έλλειψη μιας ολοκληρωμένης και ισορροπημένης στρατηγικής αναβάθμισης. Θα είχε ενδιαφέρον να ερευνηθεί πώς η βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος θα επηρέαζε το κόστος, αλλά και τις τελικές λύσεις που επιλέγονται σε έργα αναβάθμισης κτηρίων.

4.4. Πολυκριτηριακές μέθοδοι

Η πλειονότητα των μελετών που εξετάστηκαν χρησιμοποιεί το μέτωπο Pareto για την αναζήτηση βέλτιστων λύσεων. Από τις 118 δημοσιεύσεις που περιλαμβάνονται στη συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση, μόνο τρεις δεν αναφέρουν ρητά τη χρήση του μετώπου Pareto. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το πλήθος των λύσεων που βρίσκονται στο μέτωπο Pareto είναι μεγάλο, απαιτώντας τη χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων για την επιλογή της τελικής λύσης που θα εφαρμοστεί.

Για την επιλογή της βέλτιστης λύσης από το μέτωπο Pareto, υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις. Σε αρκετές μελέτες, η τελική επιλογή γίνεται υπό την επίβλεψη των ερευνητών, συχνά μετά από ανάλυση κόστους-οφέλους. Ωστόσο, η Πολυκριτηριακή Ανάλυση Απόφασης (MCDA) προσφέρει μια πιο δομημένη και αντικειμενική προσέγγιση, επιτρέποντας τη λήψη απόφασης βάσει διαφανούς και συστηματικής διαδικασίας.



Εικόνα 9 Πολυκριτηριακές μέθοδοι ταξινόμησης μέτωπου Pareto

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες πολυκριτηριακές μέθοδοι, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία περιλαμβάνουν:

- **Μέθοδοι Συγκεντρωτικής Αξιολόγησης (Aggregated Methods-WSM)**

Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην άθροιση πολλαπλών κριτηρίων με διαφορετικά βάρη. Η πιο κοινή είναι η Weighted Sum Method (WSM), η οποία εφαρμόζεται σε 8 μελέτες. Σε αυτήν τη μέθοδο, κάθε κριτήριο λαμβάνει ένα βάρος ανάλογα με τη σημασία του, και η συνολική αξία κάθε εναλλακτικής προκύπτει ως το σταθμισμένο άθροισμα των τιμών των κριτηρίων.

Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις εφαρμόζεται η Entropy Weight Method (EWM), η οποία καθορίζει τα βάρη των κριτηρίων με βάση την έννοια της εντροπίας, λαμβάνοντας υπόψη το επίπεδο αβεβαιότητας ή αταξίας στα δεδομένα κάθε κριτηρίου.

- **Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP)**

Η μέθοδος AHP επιτρέπει την ιεραρχική ανάλυση του προβλήματος λήψης αποφάσεων, διαχωρίζοντάς το σε επιμέρους κριτήρια και εναλλακτικές. Μέσω συγκριτικών αξιολογήσεων, καθορίζεται η σχετική σημαντικότητα των κριτηρίων και των επιλογών, διευκολύνοντας τη λήψη απόφασης.

- **Τεχνική Προτίμησης με Ομοιότητα προς την Ιδανική Λύση (TOPSIS)**

Η μέθοδος TOPSIS χρησιμοποιείται σε 8 μελέτες. Βασική αρχή της είναι ότι η καλύτερη εναλλακτική πρέπει να έχει τη μικρότερη απόσταση από την ιδανική λύση και τη μεγαλύτερη απόσταση από τη χειρότερη δυνατή λύση. Για τον υπολογισμό της,

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

χρησιμοποιείται η γεωμετρική απόσταση κάθε εναλλακτικής από τις δύο ακραίες λύσεις.

- **Βελτιστοποίηση Πολλαπλών Κριτηρίων με Συμβιβαστική Λύση (VIKOR)**

Η μέθοδος VIKOR αποτελεί μια τεχνική συμβιβαστικής κατάταξης, η οποία συνδυάζει στοιχεία των TOPSIS και WSM, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την καλύτερη όσο και τη χειρότερη δυνατή απόδοση κάθε εναλλακτικής λύσης. Η μέθοδος αυτή στοχεύει στην εξεύρεση μιας ισορροπημένης λύσης που επιτυγχάνει τον βέλτιστο συμβιβασμό μεταξύ των αντικρουόμενων κριτηρίων.

- **Λιγότερο Συχνά Χρησιμοποιούμενες Μέθοδοι**

Επιπλέον των προαναφερθέντων, ορισμένες μελέτες εφαρμόζουν πιο εξειδικευμένες τεχνικές, όπως:

- Smart Search για τον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης.
- Στατιστική και πιθανοτική ανάλυση για την αξιολόγηση των πιθανών εκβάσεων.
- Διαδοχικό φιλτράρισμα του συνόλου λύσεων Pareto για τη σταδιακή μείωση των διαθέσιμων επιλογών.
- Συναρτήσεις επιθυμητότητας (Desirability Functions) για τη μοντελοποίηση της προτίμησης του λήπτη αποφάσεων.
- Ασαφείς (Fuzzy) μέθοδοι λήψης αποφάσεων, οι οποίες επιτρέπουν την αντιμετώπιση αβεβαιοτήτων στα δεδομένα και τις προτιμήσεις.

4.4.1. Ερευνητικά κενά στις πολυκριτηριακές μεθόδους

Από την ανάλυση της χρήσης πολυκριτηριακών μεθόδων στις υπό εξέταση μελέτες, προκύπτουν σημαντικά ερευνητικά κενά που αξίζει να διερευνηθούν στο μέλλον. Συγκεκριμένα, τα βασικότερα ερευνητικά κενά είναι τα εξής:

- Η πλειονότητα των μελετών εφαρμόζει μία μόνο πολυκριτηριακή μέθοδο για την επιλογή της βέλτιστης λύσης από το μέτωπο Pareto, χωρίς να πραγματοποιεί σύγκριση με άλλες τεχνικές. Αυτό δημιουργεί ένα σημαντικό ερευνητικό κενό, καθώς δεν επιτρέπει την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας κάθε μεθόδου για διαφορετικούς τύπους προβλημάτων. Η έλλειψη συστηματικής συγκριτικής ανάλυσης καθιστά δύσκολη την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ακρίβεια, την ευρωστία και την αποτελεσματικότητα των μεθόδων σε διαφορετικά σενάρια αναβάθμισης κτηρίων. Θα είχε ενδιαφέρον η εκτενέστερη σύγκριση μεταξύ μεθόδων, όπως η TOPSIS, η VIKOR, η AHP, καθώς και νεότερων υβριδικών

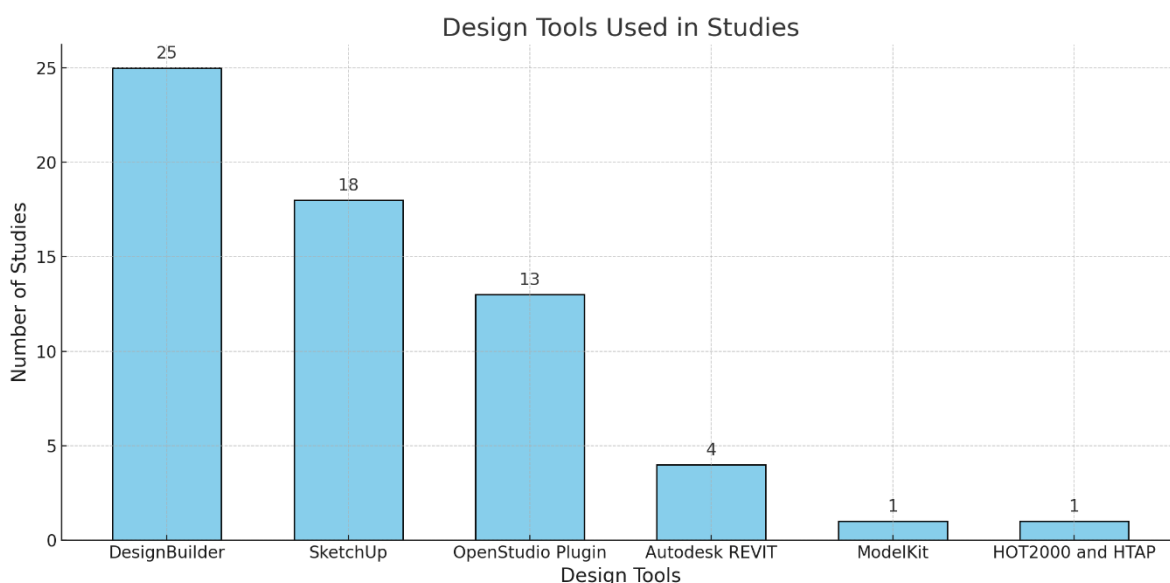
Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

προσεγγίσεων, ώστε να διερευνηθεί ποια τεχνική αποδίδει καλύτερα υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

- Επιπλέον, θα είχε ενδιαφέρον η διερεύνηση περισσότερων υβριδικών ή συνδυαστικών πολυκριτηριακών μεθόδων και η σύγκριση τους με τις υπάρχουσες. Επίσης, σε αυτό θα βοηθούσε και η διερεύνηση μηχανισμών για το πώς θα μπορούσαν να επιλέγονται τα βάρη σε πολλές από αυτές τις μεθόδους, λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά θέλω και τις προτεραιότητες των διάφορων εμπλεκομένων.

4.5. Ψηφιακά εργαλεία

Τα ψηφιακά εργαλεία παίζουν κρίσιμο ρόλο στο πρόβλημα της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης της αναβάθμισης κτηρίων, επιτρέποντας την προσομοίωση της ενεργειακής τους συμπεριφοράς, τη δυναμική ανάλυση του εσωτερικού περιβάλλοντος και την εφαρμογή αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Από την ανάλυση των μελετών προκύπτει ότι τα εργαλεία αυτά μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες: εργαλεία σχεδιασμού, εργαλεία προσομοίωσης και εργαλεία βελτιστοποίησης.



Εικόνα 10 Εργαλεία σχεδιασμού στις μελέτες

Τα εργαλεία σχεδιασμού επιτρέπουν τη δημιουργία τρισδιάστατων (3D) μοντέλων κτηρίων, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται ως βάση για προσομοιώσεις και βελτιστοποίηση. Σύμφωνα με την ανάλυση των μελετών, τα πιο διαδεδομένα εργαλεία, όπως παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα, είναι:

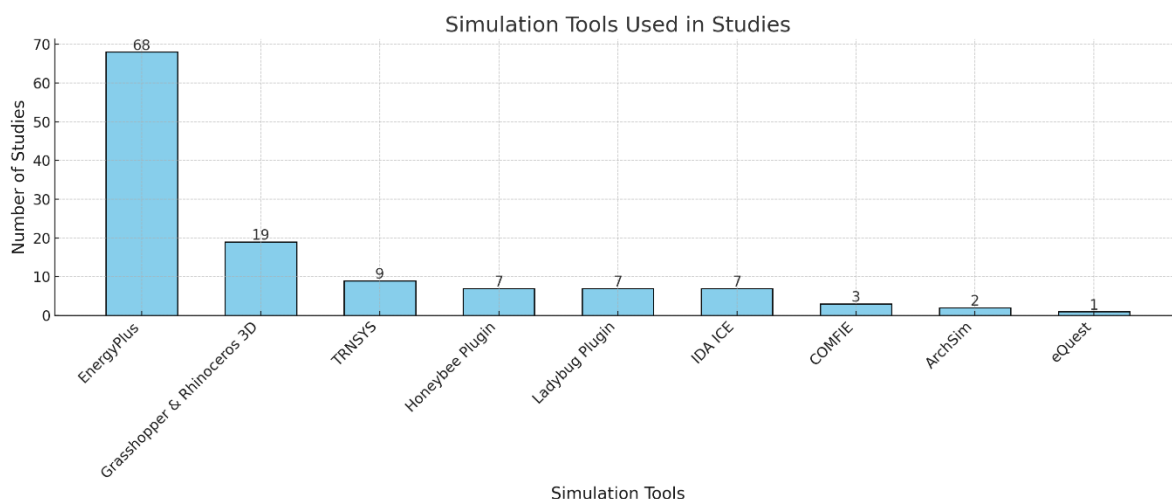
- DesignBuilder και SketchUp, τα οποία συχνά χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με το OpenStudio για επεξεργασία μοντέλων.

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

- Λιγότερο συχνά συναντώνται το AutoDESK REVIT, το ModelKit, το HOT2000 και το HTAP.

Από την άλλη, τα εργαλεία προσομοίωσης επιτρέπουν τη δυναμική ανάλυση των ενεργειακών καταναλώσεων, των συστημάτων HVAC και της θερμικής άνεσης των χρηστών. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη περιλαμβάνουν:

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κτηρίου.
- Κλιματικές συνθήκες (τοπικά δεδομένα θερμοκρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας, ανέμου).
- Χαρακτηριστικά συστημάτων (θέρμανσης, ψύξης, αερισμού, φωτισμού).
- Ρυθμίσεις χρήσης (π.χ. προγράμματα λειτουργίας, αριθμός ενοίκων, φορτία ηλεκτρικών συσκευών).



Εικόνα 11 Εργαλεία προσομοίωσης στις μελέτες

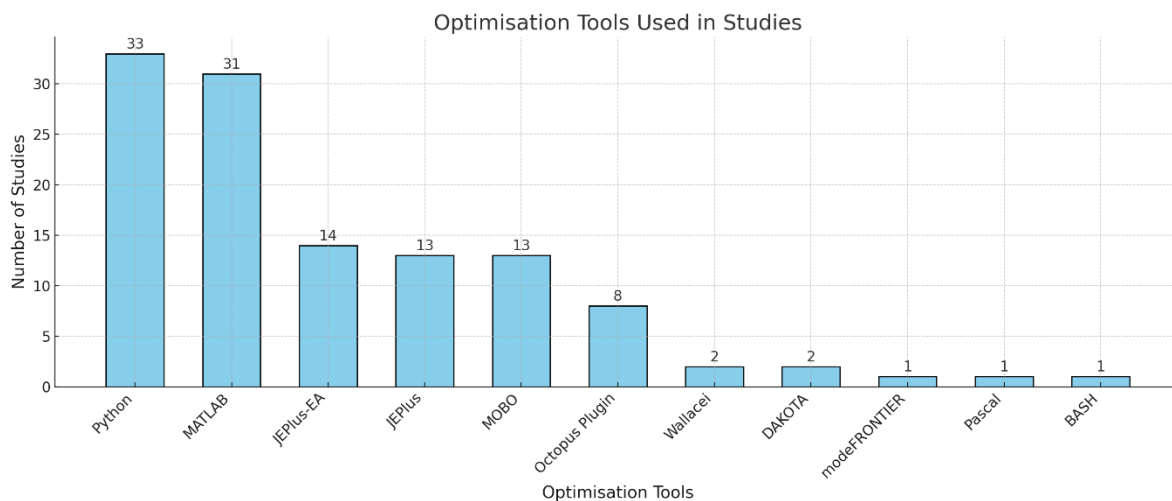
Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα εργαλεία προσομοίωσης, όπως αποτυπώνονται στο παραπάνω σχήμα, είναι:

- EnergyPlus, το οποίο αποτελεί το πιο διαδεδομένο εργαλείο προσομοίωσης ενεργειακής απόδοσης.
- RADIANCE-DAYSIM και DIVA-for-Rhino, τα οποία χρησιμοποιούνται για προσομοιώσεις φωτισμού, ηλιακής ακτινοβολίας και ανάλυσης θάμβωσης.
- Be18, το οποίο χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με Python για στατικές προσομοιώσεις ενεργειακής ζήτησης.
- METEONORM, CCWorldWeatherGen και Vertical City Weather Generator, που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μετεωρολογικών δεδομένων προσαρμοσμένων στις τοπικές κλιματικές συνθήκες.

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

Ωστόσο, τα εργαλεία προσομοίωσης, ιδιαίτερα το EnergyPlus, έχουν υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις, γεγονός που μπορεί να καταστήσει δύσκολη την εφαρμογή τους σε προβλήματα με μεγάλο αριθμό σεναρίων και πολύπλοκες προσομοιώσεις. Για τον λόγο αυτό, πολλές μελέτες χρησιμοποιούν απλοποιημένα μοντέλα ή υποκατάστατα μοντέλα (surrogate models) ώστε να μειώσουν τον χρόνο εκτέλεσης, αν και αυτό συχνά συνεπάγεται απώλεια ακρίβειας. Επίσης, υπάρχουν τα εργαλεία βελτιστοποίησης που επιτρέπουν την εφαρμογή γενετικών αλγορίθμων (GA) και άλλων τεχνικών βελτιστοποίησης για την αναζήτηση των βέλτιστων λύσεων στα προβλήματα αναβάθμισης κτηρίων. Οι κύριες λειτουργίες που υποστηρίζουν περιλαμβάνουν:

- Υλοποίηση γενετικών αλγορίθμων και άλλων εξελικτικών τεχνικών.
- Διασύνδεση με εργαλεία προσομοίωσης (EnergyPlus, Radiance κ.ά.).
- Ανάλυση ευαισθησίας και μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 12 Εργαλεία βελτιστοποίησης στις μελέτες

Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα εργαλεία βελτιστοποίησης, όπως αποτυπώνονται στο παραπάνω σχήμα, είναι:

- Python (33 μελέτες): Χρησιμοποιείται εκτενώς με βιβλιοθήκες όπως Platypus, DEAP, Geatpy για γενετικούς αλγορίθμους, PyTorch, scikit-learn και TensorFlow για μηχανική μάθηση, καθώς και SALib για ανάλυση ευαισθησίας.
- MATLAB (31 μελέτες): Ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα εργαλεία για μαθηματική μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση.
- jEPlus (13) και jEPlus+EA (14): Συνδυάζουν το EnergyPlus με γενετικούς αλγορίθμους για τη διερεύνηση διαφόρων σεναρίων.
- MOBO (13 μελέτες): Χρησιμοποιείται για βελτιστοποίηση παραμέτρων σε ενεργειακές προσομοιώσεις.

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με χρήση γενετικών αλγορίθμων: Συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση ερευνητικών κενών

- Octopus και Wallacei (Rhino-Grasshopper): Χρησιμοποιούνται σε παραμετρικά μοντέλα για εξελικτική βελτιστοποίηση, κυρίως με SPEA2 + HypE.
- DAKOTA και modeFRONTIER, που επιτρέπουν πολύπλοκες πολυκριτηριακές βελτιστοποιήσεις.

Εκτός από τα παραπάνω, εργαλεία όπως το MS Excel χρησιμοποιούνται σε αρκετές μελέτες για ανάλυση δεδομένων και στατιστική επεξεργασία, ενώ ορισμένες μελέτες αξιοποιούν λογισμικά όπως IBM SPSS και SimLab για ανάλυση αβεβαιότητας. Επιπλέον, το Colibri (Rhino-Grasshopper) επιτρέπει τη δημιουργία και την επεξεργασία μαζικών σεναρίων προσομοίωσης.

4.5.1. Ερευνητικά κενά στα Ψηφιακά εργαλεία

Από την ανάλυση των μελετών, προκύπτει ένα τουλάχιστον σημαντικό ερευνητικό κενό που αφορά τη χρήση των ψηφιακών εργαλείων στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων. Αυτό το ερευνητικό κενό είναι το υψηλό υπολογιστικό κόστος και συνεπώς ο χρόνος εκτέλεσης των προσομοιώσεων. Τα πιο διαδεδομένα εργαλεία προσομοίωσης, όπως το EnergyPlus, έχουν πάρα πολύ υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις, ιδιαίτερα όταν εφαρμόζονται λεπτομερείς προσομοιώσεις με μικρά χρονικά βήματα (π.χ. ωριαία ανάλυση). Το ερευνητικό κενό που προκύπτει είναι πώς θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί το παραπάνω πρόβλημα. Θα είχε ενδιαφέρον να δοκιμαστούν τεχνικές προσωρινής αποθήκευσης των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, ώστε να μην χρειάζεται να υπολογιστούν ξανά οι προσομοιώσεις. Επιπλέον, θα είχε ενδιαφέρον να δοκιμαστούν τεχνικές παράλληλου προγραμματισμού με νήματα και διαφορετικούς πυρήνες ώστε να υπολογίζονται παράλληλα οι προσομοιώσεις.

5

Συζήτηση - Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία πραγματοποίησε μια εκτενή και συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναβάθμισης κτηρίων με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων (ΓΑ). Εξετάστηκαν 118 σχετικές μελέτες που δημοσιεύθηκαν την τελευταία πενταετία (2019-2024), αναλύοντας πέντε βασικούς άξονες: τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται, τις προσεγγίσεις των ΓΑ, τις μεταβλητές απόφασης και τις αντικειμενικές συναρτήσεις, τις πολυκριτηριακές μεθόδους λήψης αποφάσεων και τα ψηφιακά εργαλεία που υποστηρίζουν τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Από την ανάλυση προέκυψαν σημαντικές τάσεις και ερευνητικά κενά που απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε έντονη χρήση του NSGA-II ως βασική μεθοδολογία, με ελάχιστες εφαρμογές πιο πρόσφατων ή εναλλακτικών εξελικτικών τεχνικών, όπως οι κβαντικοί γενετικοί αλγόριθμοι. Επίσης, ενώ οι περισσότερες μελέτες επικεντρώνονται στην ενεργειακή απόδοση και το κόστος αναβάθμισης, η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος και οι προτιμήσεις των εμπλεκομένων (stakeholders) δεν λαμβάνονται επαρκώς υπόψη. Παράλληλα, η χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων είναι συχνά περιορισμένη σε μία μόνο τεχνική, χωρίς συγκριτικές αναλύσεις. Τέλος, τα ψηφιακά εργαλεία παρουσιάζουν υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις, καθιστώντας την ανάγκη για πιο αποδοτικές προσεγγίσεις, όπως η ενσωμάτωση υποκατάστατων μοντέλων και η αξιοποίηση τεχνικών παράλληλης επεξεργασίας, ιδιαίτερα επιτακτική.

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα βασικά ερευνητικά κενά που εντοπίστηκαν ανά άξονα ανάλυσης:

Άξονας	Ερευνητικά κενά
Δεδομένα	• Απουσία ανοιχτών κτηριακών δεδομένων, • έλλειψη μικροκλιματικών δεδομένων, • μη ενσωμάτωση μελλοντικών κλιματικών αλλαγών.
Χρήση ΓΑ	• Ελλιπής χρήση κβαντικών γενετικών αλγορίθμων, • προκαθορισμένες τιμές παραμέτρων χωρίς πειραματισμό, • περιορισμένη σύγκριση συνδυαστικών μεθόδων.

Μεταβλητές απόφασης & Αντικειμενικές συναρτήσεις	• Απουσία ανάλυσης προτιμήσεων διαφορετικών εμπλεκομένων, • έλλειψη εργαλείων χρηματοδότησης, • περιορισμένη ενσωμάτωση ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος.
Πολυκριτηριακές μέθοδοι	• Έλλειψη συγκριτικής ανάλυσης πολυκριτηριακών μεθόδων, • περιορισμένη χρήση υβριδικών μεθόδων και δυναμικής επιλογής βαρών.
Ψηφιακά εργαλεία	• Υψηλό υπολογιστικό κόστος προσομοιώσεων, • έλλειψη τεχνικών προσωρινής αποθήκευσης και παράλληλη εκτέλεση προσομοιώσεων.

5.1. Μέλλοντικά Βήματα

Με βάση τα ερευνητικά κενά που αναδείχθηκαν, τα επόμενα βήματα της έρευνας θα μπορούσαν να επικεντρωθούν στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου εργαλείου που θα συνδυάζει πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με γενετικούς αλγορίθμους και προηγμένες τεχνικές προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, θα μπορούσε να φτιαχτεί ένα εργαλείο που επιλέγεται δυναμικά ο γενετικός αλγόριθμος που θα εφαρμοστεί, καθώς και ένα σύνολο πολυκριτηριακών μεθόδων που θα εφαρμοστούν στο μέτωπο Pareto. Το εργαλείο αυτό μπορεί να δέχεται ως είσοδο, το αρχείο κτηρίου, τα καιρικά δεδομένα προσαρμοσμένα σε επίπεδο γειτονιάς (μικροκλίμα) και παράλληλα τους στόχους-προτεραιότητες του χρήστη που τρέχει την προσομοίωση. Παράλληλα, η δημιουργία μιας ανοικτής βάσης δεδομένων με πραγματικά κτηριακά και κλιματικά δεδομένα θα επιτρέψει τη σύγκριση διαφορετικών μεθόδων και τη βελτίωση της αξιοπιστίας των προσομοιώσεων. Επιπλέον, η διερεύνηση υβριδικών προσεγγίσεων, όπως η χρήση κβαντικών γενετικών αλγορίθμων και η εφαρμογή τεχνικών παράλληλου προγραμματισμού θα βοηθούσε την ταχύτερη εκτέλεση των υπολογισμών και έτσι θα μπορούσε να συμβάλει στην αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση του προβλήματος της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης στην αναβάθμιση κτηρίων.

Βιβλιογραφία

- [1] A. R. Pearce and Y. H. Ahn, “Sustainable buildings and infrastructure: Paths to the future,” *Sustain. Build. Infrastruct. Paths to Futur.*, pp. 1–482, Jul. 2013, doi: 10.4324/9780203130841.
- [2] “Energy Performance of Buildings Directive.” https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (accessed Oct. 08, 2024).
- [3] A. Allouhi, Y. El Fouih, T. Kousksou, A. Jamil, Y. Zeraouli, and Y. Mourad, “Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends,” *J. Clean. Prod.*, vol. 109, pp. 118–130, Dec. 2015, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2015.05.139.
- [4] “Revised Energy Performance of Buildings Directive (EPBD).” https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_24_1966 (accessed Oct. 08, 2024).
- [5] I. Costa-Carrapiço, R. Raslan, and J. N. González, “A systematic review of genetic algorithm-based multi-objective optimisation for building retrofitting strategies towards energy efficiency,” *Energy Build.*, vol. 210, p. 109690, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2019.109690.
- [6] Y. K. Juan, Y. H. Perng, D. Castro-Lacouture, and K. S. Lu, “Housing refurbishment contractors selection based on a hybrid fuzzy-QFD approach,” *Autom. Constr.*, vol. 18, no. 2, pp. 139–144, Mar. 2009, doi: 10.1016/J.AUTCON.2008.06.001.
- [7] Y. K. Juan, “A hybrid approach using data envelopment analysis and case-based reasoning for housing refurbishment contractors selection and performance improvement,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 3, pp. 5702–5710, Apr. 2009, doi: 10.1016/J.ESWA.2008.06.053.
- [8] Y. Schwartz, R. Raslan, and D. Mumovic, “Implementing multi objective genetic algorithm for life cycle carbon footprint and life cycle cost minimisation: A building refurbishment case study,” *Energy*, vol. 97, pp. 58–68, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.ENERGY.2015.11.056.
- [9] A. Konak, D. W. Coit, and A. E. Smith, “Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 91, no. 9, pp. 992–1007, Sep. 2006, doi: 10.1016/J.RESS.2005.11.018.
- [10] M. Fadaee and M. A. M. Radzi, “Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 3364–3369, Jun. 2012, doi: 10.1016/J.RSER.2012.02.071.
- [11] Y. K. Juan, J. H. Kim, K. Roper, and D. Castro-Lacouture, “GA-based decision support system for housing condition assessment and refurbishment strategies,” *Autom. Constr.*, vol. 18, no. 4, pp. 394–401, Jul. 2009, doi: 10.1016/J.AUTCON.2008.10.006.

- [12] P. Penna, A. Prada, F. Cappelletti, and A. Gasparella, “Multi-objective optimization for existing buildings retrofitting under government subsidization,” *Sci. Technol. Built Environ.*, vol. 21, no. 6, pp. 847–861, Aug. 2015, doi: 10.1080/23744731.2015.1028867.
- [13] “BUILDING Definition & Meaning | Dictionary.com.” <https://www.dictionary.com/browse/building> (accessed Feb. 14, 2025).
- [14] “12 κινήσεις για ενεργειακή αναβάθμιση.” <https://energyculture.gr/index.php/simvoules-eksoikonomisis-2/140-12-kiniseis-gia-energeiaki-anavathmisi> (accessed Feb. 14, 2025).
- [15] “Retrofitting Buildings to be Future-Fit,” 2022, Accessed: Feb. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.imf.org/en/Blogs/Articles/2022/10/05/further-delaying-climate-policies-will-hurt-economic-growth>.
- [16] G. Giebeler, “Refurbishment manual : maintenance, conversions, extensions,” p. 279, 2009.
- [17] R. Gupta, M. Gregg, S. Passmore, and G. Stevens, “Intent and outcomes from the Retrofit for the Future programme: key lessons,” *Build. Res. Inf.*, vol. 43, no. 4, pp. 435–451, Jul. 2015, doi: 10.1080/09613218.2015.1024042.
- [18] M. Perino, M. Andersen, F. Causone, and G. Chinazzo, “Refurbishment of Existing Envelopes in Residential Buildings: assessing robust solutions for future climate change,” 2014, Accessed: Feb. 14, 2025. [Online]. Available: <https://infoscience.epfl.ch/record/203438>.
- [19] K. Alexakis, V. Benekis, P. Kokkinakos, and D. Askounis, “Genetic algorithm-based multi-objective optimisation for energy-efficient building retrofitting: A systematic review,” *Energy Build.*, vol. 328, p. 115216, Feb. 2025, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2024.115216.
- [20] S. Petchrompo, D. W. Coit, A. Brintrup, A. Wannakrairot, and A. K. Parlikad, “A review of Pareto pruning methods for multi-objective optimization,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 167, p. 108022, May 2022, doi: 10.1016/J.CIE.2022.108022.
- [21] L. Azevedo, R. Gomes, and C. Silva, “Influence of model calibration and optimization techniques on the evaluation of thermal comfort and retrofit measures of a Lisbon household using building energy simulation,” *Adv. Build. Energy Res.*, vol. 15, no. 5, pp. 630–661, Aug. 2019, doi: 10.1080/17512549.2019.1654916.
- [22] M. Mohammed, M. Khanapi, ... A. G.-... of E. and, and undefined 2017, “A review of genetic algorithm application in examination timetabling problem,” *Res. Mohammed, M Khanapi, A Ghani, OI Obaid, S Most. Eng. Appl. Sci. 2017•researchgate.net*, Accessed: Dec. 08, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Mazin-Mohammed/publication/321308752_A_Review_of_Genetic_Algorithm_Application_in_Examination_Timetabling_Problem/links/5f662a1fa6fdcc00862d89f2/A-Review-of-Genetic-Algorithm-Application-in-Examination-Timetabling-Problem.pdf.
- [23] J. H. Holland, “Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence,” *Adapt. Nat. Artif. Syst.*, Apr. 1992, doi: 10.7551/MITPRESS/1090.001.0001.

- [24] D. E. Goldberg and J. H. Holland, “Genetic Algorithms and Machine Learning,” *Mach. Learn.*, vol. 3, no. 2, pp. 95–99, 1988, doi: 10.1023/A:1022602019183/METRICS.
- [25] S. Katoch, S. S. Chauhan, and V. Kumar, “A review on genetic algorithm: past, present, and future,” *Multimed. Tools Appl.*, vol. 80, no. 5, pp. 8091–8126, Feb. 2021, doi: 10.1007/S11042-020-10139-6/FIGURES/8.
- [26] A. K.-I. J. of A. R. in I. and and undefined 2013, “Encoding schemes in genetic algorithm,” *Acad. KumarInternational J. Adv. Res. IT Eng. 2013•academia.edu*, Accessed: Dec. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.academia.edu/download/32523380/1.pdf>.
- [27] K. Jebari, M. M.-I. J. of E. Sciences, and undefined 2013, “Selection methods for genetic algorithms,” *researchgate.net*, Accessed: Dec. 08, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Khalid-Jebari/publication/259461147_Selection_Methods_for_Genetic_Algorithms/links/5480d9100cf22525dcb60519/Selection-Methods-for-Genetic-Algorithms.pdf.
- [28] P. Kora, P. Y.-I. J. of Computer, and undefined 2017, “Crossover operators in genetic algorithms: A review,” *researchgate.net*, Accessed: Dec. 08, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Padmavathi-Kora-2/publication/315175882_Crossover_Operators_in_Genetic_Algorithms_A_Review/links/59c6105d458515548f2f3b5f/Crossover-Operators-in-Genetic-Algorithms-A-Review.pdf.
- [29] MR, “Practical Genetic Algorithms, Second Edition with CD-ROM,” 2004, Accessed: Oct. 08, 2024. [Online]. Available: www.MatlabSite.com.
- [30] A. Hassanat, K. Almohammadi, E. A.- Information, and undefined 2019, “Choosing mutation and crossover ratios for genetic algorithms—a review with a new dynamic approach,” *mdpi.com*, Accessed: Dec. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2078-2489/10/12/390>.
- [31] Y. Liu, A. Zhou, and H. Zhang, “Termination detection strategies in evolutionary algorithms: A survey,” *GECCO 2018 - Proc. 2018 Genet. Evol. Comput. Conf.*, pp. 1063–1070, Jul. 2018, doi: 10.1145/3205455.3205466.
- [32] T. Alam, S. Qamar, A. Dixit, and M. Benaida, “Genetic Algorithm: Reviews, Implementations, and Applications,” *Int. J. Eng. Pedagog.*, vol. 10, no. 6, pp. 57–77, Jun. 2020, doi: 10.3991/IJEP.V10I6.14567.
- [33] E. Wirsansky, *Hands-on genetic algorithms with Python: applying genetic algorithms to solve real-world deep learning and artificial intelligence problems*. 2020.
- [34] T. El-Mihoub, A. Hopgood, L. Nolle, A. B.-E. Lett., and undefined 2006, “Hybrid Genetic Algorithms: A Review,” *Citeseer*, Accessed: Dec. 08, 2024. [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=340b165fd2108f29e9b03629c1e1373cd4163ecf>.
- [35] M. Angelova and T. Pencheva, “Tuning genetic algorithm parameters to improve convergence

- time,” *Int. J. Chem. Eng.*, 2011, doi: 10.1155/2011/646917.
- [36] V. Toğan, A. D.-C. & Structures, and undefined 2008, “An improved genetic algorithm with initial population strategy and self-adaptive member grouping,” *Elsevier*, Accessed: Dec. 08, 2024. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004579490700301X?casa_token=k9a97F_ZsccAAAAA:JTt6MiaOu4jwElrVdN7qWAtbK6nbsgOTbm4YC2IUoidmYIahHjHV7vRi1Um4VCkCoGy_AS9N.
- [37] G. B. Dantzig, “Linear Programming,” <https://doi.org/10.1287/opre.50.1.42.17798>, vol. 50, no. 1, pp. 42–47, Feb. 2002, doi: 10.1287/OPRE.50.1.42.17798.
- [38] M. Benichou, J. M. Gauthier, P. Girodet, G. Hentges, G. Ribiere, and O. Vincent, “Experiments in mixed-integer linear programming,” *Math. Program.*, vol. 1, no. 1, pp. 76–94, Dec. 1971, doi: 10.1007/BF01584074/METRICS.
- [39] H. Hao, C.-L. Liu, and H. Sako, “Comparison of Genetic Algorithm and Sequential Search Methods for Classifier Subset Selection,” 2003.
- [40] M. H. M. Camillo *et al.*, “Combining exhaustive search and multi-objective evolutionary algorithm for service restoration in large-scale distribution systems,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 134, pp. 1–8, May 2016, doi: 10.1016/J.EPSR.2015.12.003.
- [41] C. A. Coello Coello and M. S. Lechuga, “MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization,” *Proc. 2002 Congr. Evol. Comput. CEC 2002*, vol. 2, pp. 1051–1056, 2002, doi: 10.1109/CEC.2002.1004388.
- [42] D. P. Kroese and R. Y. Rubinstein, “Monte Carlo methods,” *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.*, vol. 4, no. 1, pp. 48–58, Jan. 2012, doi: 10.1002/WICS.194.
- [43] R. T. Marler and J. S. Arora, “The weighted sum method for multi-objective optimization: New insights,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 41, no. 6, pp. 853–862, Jun. 2010, doi: 10.1007/S00158-009-0460-7/METRICS.
- [44] G. Mavrotas, “Effective implementation of the ϵ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 213, no. 2, pp. 455–465, Jul. 2009, doi: 10.1016/J.AMC.2009.03.037.
- [45] P. Westermann and R. Evins, “Surrogate modelling for sustainable building design – A review,” *Energy Build.*, vol. 198, pp. 170–186, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2019.05.057.
- [46] N. Yue, L. Li, A. Morandi, and Y. Zhao, “A metamodel-based multi-objective optimization method to balance thermal comfort and energy efficiency in a campus gymnasium,” *Energy Build.*, vol. 253, p. 111513, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111513.
- [47] J. Zhan, W. He, and J. Huang, “Dual-objective building retrofit optimization under competing priorities using Artificial Neural Network,” *J. Build. Eng.*, vol. 70, p. 106376, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.106376.

- [48] H. Kashan *et al.*, “A Hybrid Multi-Criteria-Decision-Making Aggregation Method and Geographic Information System for Selecting Optimal Solar Power Plants in Iran,” *Energies* 2022, Vol. 15, Page 2801, vol. 15, no. 8, p. 2801, Apr. 2022, doi: 10.3390/EN15082801.
- [49] S. Sindhu, V. Nehra, and S. Luthra, “Investigation of feasibility study of solar farms deployment using hybrid AHP-TOPSIS analysis: Case study of India,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 73, pp. 496–511, Jun. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2017.01.135.
- [50] A. Mardani, E. K. Zavadskas, K. Govindan, A. A. Senin, and A. Jusoh, “VIKOR Technique: A Systematic Review of the State of the Art Literature on Methodologies and Applications,” *Sustain.* 2016, Vol. 8, Page 37, vol. 8, no. 1, p. 37, Jan. 2016, doi: 10.3390/SU8010037.
- [51] “Accelerating the energy efficiency renovation of residential buildings: a behavioural approach,” 2023.
- [52] “Renovation wave.” https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en (accessed Oct. 08, 2024).
- [53] A. Udovichenko, B. A. Fleck, T. Weis, and L. Zhong, “Framework for design and optimization of a retrofitted light industrial space with a renewable energy-assisted hydroponics facility in a rural northern canadian community,” *J. Build. Eng.*, vol. 37, p. 102160, May 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102160.
- [54] C.-R. Yu, X. Liu, Q.-C. Wang, and D. Yang, “Solving the comfort-retrofit conundrum through post-occupancy evaluation and multi-objective optimisation,” *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, vol. 44, no. 4, pp. 381–403, May 2023, doi: 10.1177/01436244231174354.
- [55] M. Marzouk, M. ElSharkawy, and A. Eissa, “Optimizing thermal and visual efficiency using parametric configuration of skylights in heritage buildings,” *J. Build. Eng.*, vol. 31, p. 101385, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jobe.2020.101385.
- [56] M. Marzouk, M. ElSharkawy, and A. Mahmoud, “Optimizing daylight utilization of flat skylights in heritage buildings,” *J. Adv. Res.*, vol. 37, pp. 133–145, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.jare.2021.06.005.
- [57] K. Deb and H. Jain, “An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 18, no. 4, pp. 577–601, Aug. 2014, doi: 10.1109/tevc.2013.2281535.