



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

**Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση Αναβάθμισης Κτιρίων
με Γενετικούς Αλγορίθμους: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Βασίλειου Μπενέκη

**Επιβλέπων : Δ. Ασκούνης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση Αναβάθμισης Κτιρίων με Γενετικούς Αλγορίθμους: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Βασίλειου Μπενέκη

**Επιβλέπων : Δ. Ασκούνης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή, 29/02/2024.

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

.....
**Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

.....
**Χρυσόστομος Δούκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

.....

Βασίλειος Γ. Μπενέκης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Βασίλειος Μπενέκης, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίστηκε στη σχολαστική ανάλυση επιστημονικών άρθρων που εφαρμόζουν μεθόδους πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (ΠΒ) κάνοντας χρήση γενετικών αλγορίθμων (ΓΑ) για την επίλυση προβλημάτων λήψης αποφάσεων (ΛΑ) αναβάθμισης κτιρίων. Τα τελευταία χρόνια, η υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών που συμβάλλουν στη ελάττωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αποτελεί αδήριτη ανάγκη. Η χαμηλή ενεργειακή αποδοτικότητα των κτιρίων αποτελεί τροχοπέδη στην επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί. Η αναβάθμιση υπαρχόντων κτιρίων, με την εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών, υλικών και συστημάτων, επιτυγχάνει εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση του κόστους λειτουργίας, ενώ επιτρέπει την δημιουργία ευχάριστου περιβάλλοντος για τους κατοίκους. Η ΠΒ κατέχει ρόλο καθοριστικής σημασίας στην αναζήτηση ισορροπημένων λύσεων για την αναβάθμιση κτιρίων, μέσω της εύρεσης του μετώπου μη-κυριαρχούμενων λύσεων Pareto. Σε αυτό το πλαίσιο, οι γενετικοί αλγόριθμοι αναγνωρίζονται ως μια από τις πιο δημοφιλείς και ευέλικτες μεθόδους βελτιστοποίησης. Σε αυτή την εργασία, αναλύονται εκτενώς οι σχετικές δημοσιεύσεις των τελευταίων ετών και δημιουργείται κατάλογος για εύκολη αναζήτηση πληροφοριών. Εξετάζονται ο τύπος και το είδος των κτιρίων, οι μεθοδολογίες βελτιστοποίησης, οι στόχοι και οι περιορισμοί της αναβάθμισης, τα μέσα αναβάθμισης και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της ανάλυσης και προτείνονται θέματα για μελλοντικές μελέτες.

Λέξεις Κλειδιά: Συστηματική ανασκόπηση, Πολυκριτηριακή, Βελτιστοποίηση, Γενετικοί αλγόριθμοι, Αναβάθμιση

Abstract

This thesis was based on the meticulous analysis of scientific articles that apply multi-objective optimization (MOO) methods and genetic algorithms (GA) to solve decision-making problems (DM) of building retrofitting. In recent years, the adoption of sustainable practices that contribute to the reduction of environmental impact has become an urgent need. The low energy efficiency of buildings is an obstacle for the achievement of emission reduction goals. The retrofit of existing buildings, with the application of advanced technologies, materials and systems, achieves energy savings and a reduction in operating costs, while allowing the creation of a pleasant environment for residents. MOO plays a key role in the search for balanced solutions for building upgrades through the non-dominated Pareto front. In this context, genetic algorithms are recognized as one of the most popular and versatile optimization methods. In this paper, relevant publications of recent years are extensively analyzed, and a directory is created for easy information retrieval. The type and model of buildings, optimization methodologies, retrofit objectives and limitations, retrofit measures and tools used are examined. Finally, the conclusions of the analysis are presented and topics for future studies are suggested.

Keywords: Systematic review, Multi-objective, Optimization, Genetic algorithms, Retrofit

Αφιέρωση

*Στην πολυαγαπημένη μου οικογένεια
Για την άνευ όρων υποστήριξη, εμπιστοσύνη και υπομονή
Στην οποία οφείλω όλα όσα είμαι και όσα θα γίνω*

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	10
1.1	Διερεύνηση υπάρχουσας γνώσης.....	11
1.2	Αντικείμενο και στόχοι της διπλωματικής.....	12
1.3	Οργάνωση κειμένου.....	13
2	Μεθοδολογία.....	15
2.1	Μέθοδος αναζήτησης.....	15
2.2	Κριτήρια επιλογής.....	16
2.3	Μέθοδος επιλογής.....	17
2.4	Αποτελέσματα Αναζήτησης.....	19
3	Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	21
3.1	Γενετικοί αλγόριθμοι.....	21
3.2	Γενετικοί αλγόριθμοι στη βελτιστοποίηση.....	23
4	Ανάλυση Βιβλιογραφίας.....	25
4.1	Χαρακτηριστικά κτιρίων.....	25
4.1.1	Λειτουργία Κτιρίου.....	25
4.1.2	Είδος μοντέλου.....	26
4.1.3	Τοποθεσία.....	27
4.2	Τεχνικές βελτιστοποίησης.....	29
4.2.1	Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	29
4.2.2	Εξομοιωτές.....	33
4.2.3	Τεχνικές δειγματοληψίας.....	34
4.2.4	Ανάλυση αβεβαιότητας και ευαισθησίας.....	34
4.2.5	Μέθοδοι κατάταξης μετώπου Pareto.....	36
4.2.6	Ανάλυση κύκλου ζωής.....	37
4.2.7	Αναβάθμιση σε μεγαλύτερες κλίμακες και ανάλυση χρονικότητας.....	39
4.3	Αντικειμενικές συναρτήσεις.....	41

4.3.1	Ενέργεια	42
4.3.2	Κόστος.....	42
4.3.3	Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος.....	43
4.3.4	Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις.....	44
4.3.5	Περιορισμοί.....	45
4.4	Μεταβλητές απόφασης	45
4.4.1	Περίβλημα του κτιρίου	46
4.4.2	Αναβάθμιση συστημάτων.....	47
4.4.3	Συστήματα ελέγχου του κτιρίου.....	47
4.4.4	Συστήματα ΑΠΕ	47
4.4.5	Άλλες μεταβλητές απόφασης.....	48
4.5	Εργαλεία και λογισμικό	48
4.5.1	Εργαλεία σχεδίασης και προσομοίωσης κτιρίων	48
4.5.2	Εργαλεία βελτιστοποίησης.....	51
5	Συμπεράσματα	53
5.1	Συζήτηση.....	53
5.2	Προκλήσεις και περιορισμοί.....	55
5.3	Μελλοντική έρευνα.....	57
6	Βιβλιογραφία.....	60
Παράρτημα Α: Κατάλογος μελετών		1
Παράρτημα Β: Στοιχεία κτιρίων.....		14
Παράρτημα Γ: Αντικειμενικές συναρτήσεις.....		20
Παράρτημα Δ: Μεθοδολογία και λεπτομέρειες.....		31

Κατάλογος Εικόνων και Πινάκων

Εικόνα 1. Μέθοδος επιλογής κύριων μελετών

Εικόνα 2. Έτος δημοσίευσης μελετών

Εικόνα 3. Κατανομή άρθρων σε επιστημονικά περιοδικά

Εικόνα 4. Διάγραμμα ροής γενετικού αλγόριθμου

Εικόνα 5. Το μέτωπο Pareto

Εικόνα 6. Είδος μοντέλου κτιρίων

Εικόνα 7. Χάρτης τοποθεσιών κτιρίων KM

Εικόνα 8. Χάρτης τοποθεσιών κτιρίων KM – Μεγέθυνση: Ευρώπη

Εικόνα 9. Χάρτης τοποθεσιών κτιρίων KM – Μεγέθυνση Ασία

Εικόνα 10. Χάρτης τοποθεσιών κτιρίων KM – Μεγέθυνση Β. Αμερική

Εικόνα 11. Γενετικοί αλγόριθμοι

Εικόνα 12. Παράδειγμα διαγράμματος βασικής δομής ενός MLPANN [105]

Εικόνα 13. Μέθοδοι κατάταξης μετώπου Pareto

Εικόνα 14. Στάδια κύκλου ζωής κτιρίων

Εικόνα 15. Αντικειμενικές συναρτήσεις

Εικόνα 16. Αντικειμενικές συναρτήσεις - Ενέργεια

Εικόνα 17. Αντικειμενικές συναρτήσεις - Κόστος

Εικόνα 18. Αντικειμενικές συναρτήσεις – Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος

Εικόνα 19. Αντικειμενικές συναρτήσεις – Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Εικόνα 20. Μεταβλητές απόφασης

Εικόνα 21. Εργαλεία σχεδίασης

Εικόνα 22. Εργαλεία προσομοίωσης

Εικόνα 23. Εργαλεία Βελτιστοποίησης

Πίνακας 1: Λέξεις-κλειδιά αναζήτησης

Πίνακας 2. Βασικές παράμετροι γενετικών αλγόριθμων

Ακρωνύμια

ΕΜΠ	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο	National Technical University of Athens
ΚΜ	Κύριες Μελέτες	Primary Studies
ΠΒ	Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση	Multi-Objective Optimization
ΓΑ	Γενετικός Αλγόριθμος	Genetic Algorithm
ΛΑ	Λήψη Αποφάσεων	Decision Making
ΘΨΚ	Θέρμανση – Ψύξη – Κλιματισμός	Heating, Ventilation, Air Conditioning
ZNX	Ζεστό Νερό Χρήσης	Domestic Hot Water
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	Renewable Energy Sources
Φ/Β	Φωτοβολταϊκά	Photovoltaic
ΗΣ	Ηλιακός Συλλέκτης	Solar Collector
Α/Γ	Ανεμογεννήτρια	Wind Turbine
ΜΚΟ	Μη Κυβερνητική Οργάνωση	Non-Governmental Organization
NSGA-II	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II	Γενετικός Αλγόριθμος Μη-κυριαρχούμενης Ταξινόμησης II
aNSGA-II	Active Archive Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II	Γενετικός Αλγόριθμος Μη-κυριαρχούμενης Ταξινόμησης II με Ενεργό Αρχείο
NSGA-III	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm III	Γενετικός Αλγόριθμος Μη-κυριαρχούμενης Ταξινόμησης III
GA-TriM	Genetic Algorithm for Multi-modal Multi-objective Problems	Γενετικός Αλγόριθμος για Πολυτροπικά Πολυκριτηριακά Προβλήματα
SPEA 2	Strength Pareto Evolutionary Algorithm	Εξελικτικός Αλγόριθμος Δύναμης Pareto
HypE	Hypervolume Estimation	Εκτίμηση Υπερόγκου
PSO	Particle Swarm Optimization	Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων
NSPSO	Non-dominated Sorting Particle Swarm Optimization	Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων Μη-κυριαρχούμενης Ταξινόμησης
MOPSO	Multi-Objective Particle Swarm Optimization	Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων
IHS	Improved Harmony Search	Βελτιωμένη Αναζήτηση Αρμονίας
MOHS	Multi-Objective Harmony Search	Πολυκριτηριακή Αναζήτηση Αρμονίας
MHACO	Multi-objective Hybrid Ant Colony Optimisation	Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση Υβριδικών Αποικιών Μυρμηγκιών
MOSA	Multi-Objective Simulated Annealing	Πολυκριτηριακή Προσομοίωση Ανόπτησης
ES	Evolutionary Strategy	Εξελικτική Στρατηγική
MOEA/D	Multi-objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition	Πολυκριτηριακός Εξελικτικός Αλγόριθμος βασισμένος στην Αποσύνθεση
HJ	Hooke-Jeeves	Χουκ-Τζιβς
ANN	Artificial Neural Network	Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο
DNN	Deep Neural Network	Βαθύ Νευρωνικό Δίκτυο
MLP	Multilayer Perceptron	Πολυεπίπεδο Αντίληπτρο
PCA	Principal Component Analysis	Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών
NARX	Nonlinear Autoregressive Network with Exogenous Outputs	Μη-γραμμικό Αυτοπαλίνδρομο Δίκτυο με Εξωγενείς Εξόδους
MPC	Model Predictive Control	Μοντέλο Προγνωστικού Ελέγχου
GMDH	Group Method of Data Handling	Ομαδική Μέθοδος Χειρισμού Δεδομένων
MCDM	Multi Criteria Decision Making	Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων

UA	Uncertainty Analysis	Ανάλυση Αβεβαιότητας
SA	Sensitivity Analysis	Ανάλυση Ευαισθησίας
FFD	Full Factorial Design	Πλήρης Παραγοντικός Σχεδιασμός
MLR	Multiple Linear Regression	Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση
SRRC	Standard Rank Regression Coefficient	Συντελεστής Τυπικής Κατάταξης Παλινδρόμησης
DMIM	Delta Moment-Independent Measure	Μέθοδος Δέλτα Ανεξάρτητη της Ροπής
RED-FAST	Random Balance Designs – Fourier Amplitude Sensitivity Test	Σχεδίαση Τυχαίας Ισορροπίας - Δοκιμή Ευαισθησίας Πλάτους Φουριέ
MCA	Monte Carlo Analysis	Ανάλυση Μόντε Κάρλο
WSM	Weighted Sum Method	Μέθοδος Σταθμισμένου Αθροίσματος
AHP	Analytical Hierarchy Process	Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία
EWM	Entropy Weight Method	Μέθοδος Βάρους Εντροπίας
CDF	Composite Desirability Function	Συνάρτηση Σύνθετης Επιθυμητότητας
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal solution	Τεχνική Ταξινόμησης Προτιμήσεων μέσω Ομοιότητας με την Ιδανική Λύση
VIKOR	Multicriteria Optimization and Compromise Solution	Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση και Συμβιβαστική Λύση
LHS	Latin Hypercube Sampling	Δειγματοληψία Λατινικού Υπερκύβου
SSS	Sobol Sequence Sampling	Δειγματοληψία Ακολουθίας Sobol'
BIM	Building Information Modeling	Μοντελοποίηση Κτιριακών Πληροφοριών
LCA	Life Cycle Analysis	Ανάλυση Κύκλου Ζωής
LCCA	Life Cycle Cost Analysis	Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής
VWFG	Vatic Weather File Generator	Γεννήτρια προβλεπτικών αρχείων καιρού
nZEB	nearly-Zero Energy Building	Κτίριο σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας
PCM	Phase Change Material	Υλικό αλλαγής φάσης
WWR	Window-to-wall Ratio	Αναλογία παραθύρου προς τοίχο
DSF	Double Skin Façade	Πρόσοψη διπλού δέρματος
MVS	Mechanical Ventilation System	Μηχανικό Σύστημα Εξαερισμού

1

Εισαγωγή

Το ποσοστό των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που οφείλεται στον τομέα των κτιρίων ποικίλει ανάλογα με την περιοχή και τις ενεργειακές πρακτικές κάθε χώρας. Γενικά, όμως, οι λειτουργίες των κτιρίων αντιπροσωπεύουν το 30% της παγκόσμιας τελικής κατανάλωσης ενέργειας και το 26% των παγκόσμιων εκπομπών που σχετίζονται με την ενέργεια [1]. Αυτό το ποσοστό είναι υψηλό λόγω της χρήσης ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό, εξαερισμό, κλιματισμό και ηλεκτρικές συσκευές. Η ανάληψη δράσεων για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων έχει πλέον καταλυτική σημασία.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, στο πλαίσιο του πακέτου Καθαρής Ενέργειας [2], έχουν οριστεί οι ενεργειακές κοινότητες, στόχος των οποίων είναι τα κοινωνικά και περιβαλλοντικά οφέλη αντί να επικεντρώνονται στα οικονομικά κέρδη. Συνάμα, με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία [3], έχουν τεθεί στόχοι για την υλοποίηση μιας οικονομίας με μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το 2050. Μία ακόμη πρωτοβουλία που στοχεύει στην προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης, της προστασίας του περιβάλλοντος και της παγκόσμιας συνεργασίας για την αντιμετώπιση των κλιματικών αλλαγών είναι η Συμφωνία του Παρισιού [4], που υπεγράφη το 2015. Αποτελεί παγκόσμια πρωτοβουλία με στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για τον περιορισμό της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας κάτω από τους 2 βαθμούς Κελσίου.

Σε αυτό το πλαίσιο, η αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων έχει γίνει προτεραιότητα παγκοσμίως. Σε σύγκριση με την ανοικοδόμηση, η αναβάθμιση υφιστάμενων κτιρίων είναι πιο οικονομική και περιβαλλοντικά βιώσιμη, καθώς αξιοποιεί τις υπάρχουσες δομές και υλικά [5]. Η ενίσχυση της ενεργειακής αποδοτικότητας υπαρχόντων κτιρίων μέσω της αναβάθμισης αναγνωρίζεται ως ουσιώδης για την επίτευξη των στόχων της μείωσης του κλιματικού αντικτύπου. Την ίδια στιγμή, γίνονται μελέτες που εξετάζουν παράλληλα το κόστος της αναβάθμισης κτιρίων και την άνεση των κατοίκων. Με επίκεντρο την

βιωσιμότητα και την καινοτομία, η αναβάθμιση κτιρίων αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό βήμα προς ένα πιο βιώσιμο και ευημερούν περιβάλλον.

Η αναβάθμιση κτιρίων είναι σημαντικό αλλά και προκλητικό έργο. Επιτυχείς αναβαθμίσεις απαιτούν προσεκτική διαχείριση στο στάδιο της σχεδίασης. Περίπλοκα έργα χρειάζονται μια ευαίσθητη ισορροπία διαφορετικών στόχων. Προκλήσεις μπορεί να προκύψουν στη διαχείριση ξεπερασμένων υποδομών, την τεχνολογική ένταξη και την ανάγκη για καινοτόμες λύσεις που ενσωματώνονται αρμονικά με την αρχική αισθητική του κτιρίου. Η αντιμετώπιση αυτών των δυσκολιών απαιτεί συστηματική πολυκριτηριακή προσέγγιση. Μελέτες που προσεγγίζουν το θέμα ολόπλευρα καθιστούν την ΠΒ δημοφιλή επιλογή.

Η ΠΒ είναι καθοριστική στη διαδικασία ΛΑ για την ανακαίνιση κτιρίων, διασφαλίζοντας τη σφαιρική προσέγγιση του προβλήματος. Αυτή η μεθοδολογία επιτρέπει την ολοκληρωμένη αξιολόγηση παραμέτρων όπως η ενεργειακή απόδοση, η οικονομική εφικτότητα, η ποιότητα του περιβάλλοντος των κτιρίων και η περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Επιτρέπει τη διαχείριση περιορισμών όπως ο προϋπολογισμός, ενώ παράλληλα αποδίδει πολλές εναλλακτικές λύσεις μέσω της αναζήτησης των μη-κυριαρχούμενων λύσεων του μετώπου Pareto. Με ευελιξία προσαρμογής σε αλλαγές προτεραιοτήτων και αναγκών, η ΠΒ ενισχύει την αποτελεσματική διαχείριση της πολυπλοκότητας που συνοδεύει την αναβάθμιση κτιρίων.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξημένο ενδιαφέρον για την ΠΒ αναβάθμισης κτιρίων με ΓΑ. Οι ΓΑ παρουσιάζουν πλεονεκτήματα όταν συνδυάζονται με την ΠΒ κτιρίων, καθώς είναι αποτελεσματικοί στην εξερεύνηση μεγάλου χώρου λύσεων, ευέλικτοι σε πολύπλοκα προβλήματα και διαχειρίζονται αποτελεσματικά πολλά κριτήρια, παρέχοντας ισορροπημένες λύσεις. Για αυτό το λόγο, συχνά προτιμώνται έναντι άλλων αλγόριθμων [6].

1.1 Διερεύνηση υπάρχουσας γνώσης

Η διπλωματική εργασία αυτή στηρίζεται στην δομή προηγούμενων συστηματικών βιβλιογραφικών επισκοπήσεων, με βάση αυτή των Costa-Carrapίσο, Raslan και González του 2020 [7], όπου μελετήθηκαν δημοσιεύσεις σχετικές με εφαρμογές μεθόδων ΠΒ με ΓΑ στην αναβάθμιση κτιρίων. Η τελική ανάλυση βασίστηκε σε 57 τέτοιες μελέτες που εκδόθηκαν έως το 2019.

Κατά την διαδικασία αναζήτησης μελετών βρέθηκαν διάφορες συστηματικές ανασκοπήσεις που σχετίζονται στενά με το θέμα της εργασίας. Καμία τους όμως δεν εξετάζει συστηματικά νέες δημοσιεύσεις ΠΒ με ΓΑ στην ανακαίνιση κτιρίων. Οι [8] ανέλυσαν δημοσιεύσεις που αφορούν την ενεργειακή αναβάθμιση υπαρχόντων κτιρίων, μελετώντας τάσεις στις μεθόδους λήψης αποφάσεων, τις μεταβλητές, τους στόχους, το λογισμικό και τον τύπο των κτιρίων. Η [9] παρέχει μια επισκόπηση σύγχρονων μεθοδολογιών αναβάθμισης κτιρίων επικεντρώνοντας

στη διάκριση μεταξύ προσεγγίσεων που χρησιμοποιούν δεδομένα κτιρίων που έχουν συλλεγεί είτε μέσω τοποθέτησης αισθητήρων επί τόπου είτε από εθνικά αποθετήρια δεδομένων. Στην [10] αναλύονται πέντε άξονες καθοριστικής σημασίας για την ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων σε μεγάλες κλίμακες, συγκεκριμένα για ευρωπαϊκά χαρτοφυλάκια ακινήτων. Η [11] είναι μια ανασκόπηση που εξετάζει διάφορες προσεγγίσεις που βασίζονται τόσο σε ντετερμινιστικές μεθόδους όσο και σε μεθόδους που χρησιμοποιούν δεδομένα, με στόχο την ποσοτικοποίηση και επαλήθευση της εξοικονόμησης ενέργειας, καθώς επίσης την πρόβλεψη και σύσταση κατάλληλων στρατηγικών αναβάθμισης κτιρίων. Οι [12] χρησιμοποίησαν το λογισμικό CiteSpace για την οπτική παρουσίαση ανασκόπησης βιβλιογραφίας σχετικά με τη βιώσιμη ανακαίνιση κτιρίων, βασισμένη σε 1090 άρθρα από τη βάση δεδομένων του Web of Science. Η μελέτη αυτή εστιάζει στη συλλογή και ανάλυση των στοιχείων των δημοσιεύσεων, όπως είναι η χώρα προέλευσης και ο αριθμός δημοσιεύσεων. Οι [13] πραγματοποίησαν εξαντλητική έρευνα για την χρήση γενετικών αλγορίθμων και μεθόδων βελτιστοποίησης στην «πράσινη» αρχιτεκτονική κτιρίων. Στην [14] έγινε συστηματική ανασκόπηση μεθόδων ΠΒ για την βελτίωση προσόψεων κτιρίων. Η [15] είναι μια συστηματική ανασκόπηση εφαρμογών ανάλυσης ευαισθησίας στην ανάλυση της απόδοσης κτιρίων. Τέλος, η [16] παρέχει ανασκόπηση 129 μελετών που επικεντρώνεται στην ανάλυση του κόστους ως αντικειμενική συνάρτηση σε προβλήματα ΠΒ κτιρίων που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ως εκ τούτου, δεν σημειώθηκε έρευνα αντίστοιχη με αυτή της παρούσας εργασίας κατά την διάρκεια της αναζήτησης σχετικών δημοσιεύσεων. Λόγω του αυξημένου όγκου δημοσιεύσεων στο ερευνητικό πεδίο αυτό, η ανασκόπηση των πρόσφατων μελετών είναι σκόπιμη.

1.2 Αντικείμενο και στόχοι της διπλωματικής

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

1.3

Οργάνωση κειμένου

Στο **1^ο Κεφάλαιο** της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται μια εισαγωγή που καλύπτει τον γενικό προσανατολισμό της μελέτης. Γίνεται διερεύνηση της υπάρχουσας γνώσης στη βιβλιογραφία και συνοπτική παρουσίαση του θέματος, δίνοντας στον αναγνώστη μια πρώτη ματιά στο πλαίσιο της έρευνας. Αναφέρονται το αντικείμενο της έρευνας, οι στόχοι που έχουν τεθεί και παρουσιάζεται η δομή της εργασίας.

Στο **2^ο Κεφάλαιο** παρουσιάζεται η μέθοδος αναζήτησης και τα κριτήρια επιλογής για τα επιστημονικά άρθρα. Αναλύονται οι όροι της αναζήτησης, οι λέξεις-κλειδιά και τα φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα κριτήρια επιλογής με έμφαση στη συνάφεια με το θέμα, την αξιοπιστία, την ημερομηνία δημοσίευσης και την ποιότητα των μεθοδολογιών.

Στο **3^ο Κεφάλαιο** εξετάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για τους ΓΑ και την ΠΒ. Αναλύονται λεπτομερώς οι διάφορες φάσεις των ΓΑ, όπως η γενετική αναπαραγωγή, η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη, επισημαίνοντας πώς αυτές συνεργάζονται για την εξέλιξη των λύσεων. Παρέχεται λεπτομερής ανάλυση των βασικών αρχών και έννοιών που αποτελούν τη θεωρητική βάση αυτής της μεθοδολογίας. Εξηγείται η έννοια της ΠΒ και η σημασία της αναζήτησης λύσεων που βρίσκονται στο μη-κυριαρχούμενο μέτωπο Pareto. Αναλύονται οι βασικές έννοιες που σχετίζονται με την αξιολόγηση πολλαπλών κριτηρίων και παρουσιάζονται οι κύριες μεθοδολογίες ΠΒ.

Το **4^ο Κεφάλαιο** της διπλωματικής εργασίας αποτελεί το μεγαλύτερο κομμάτι της, αφού επικεντρώνεται στη λεπτομερή ανάλυση της σχετικής βιβλιογραφίας. Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται εκτενώς τα χαρακτηριστικά των κτιρίων που αναλύονται στις μελέτες, οι τεχνικές βελτιστοποίησης που εφαρμόζονται, οι αντικειμενικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των λύσεων, οι μεταβλητές απόφασης που εξετάζονται και τα εργαλεία σχεδίασης, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση των μελετών.

Το **5^ο Κεφάλαιο** συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση της βιβλιογραφίας. Δίνεται έμφαση στα πλεονεκτήματα και τα ελαττώματα της ΠΒ με χρήση ΓΑ στο πλαίσιο της αναβάθμισης κτιρίων. Τέλος, επισημαίνονται ενδεχόμενες ελλείψεις γνώσεων και παρουσιάζονται ευκαιρίες για μελλοντική έρευνα.

Έπειτα, ακολουθούν η βιβλιογραφία και παραρτήματα με τους καταλόγους και πίνακες που είναι το προϊόν της ανάλυσης της εργασίας.

2

Μεθοδολογία

2.1 Μέθοδος αναζήτησης

Η μέθοδος αναζήτησης που χρησιμοποιήθηκε αντιστοιχεί σε αυτή της [7] με ορισμένες τροποποιήσεις. Αρχικά, έγινε αναζήτηση στις βάσεις δεδομένων του Scopus, συγκεκριμένα σε τίτλους, περιλήψεις και λέξεις-κλειδιά άρθρων, πρακτικών συνεδρίων, ανασκοπήσεων και κεφαλαίων βιβλίων. Η αναζήτηση έγινε χωρίς να ληφθεί υπόψη ο δείκτης απήχησης (impact factor), η γλώσσα ή η δυνατότητα πρόσβασης. Υπήρξε περιορισμός χρονικού πλαισίου, καθώς ο στόχος της εργασίας είναι η ανάλυση πρόσφατης βιβλιογραφίας με ημερομηνία δημοσίευσης από το 2019 και έπειτα. Οι λέξεις-κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν καταγράφονται στον πίνακα X. Εκμεταλλευτήκαμε τους λογικούς τελεστές, τον αστερίσκο (*) για όρους με εναλλακτικά τέλη και τον τελεστή προσέγγισης Within (W/n).

Όταν ολοκληρώθηκε η αναζήτηση στο Scopus, έγινε άλλη μια με την μηχανή αναζήτησης Google Scholars. Οι όροι της αναζήτησης ήταν οι εξής: "multi-objective" AND "building retrofit" AND "genetic". Το εύρος της ημερομηνίας δημοσίευσης ήταν από το 2019 έως το 2023. Έγινε ταξινόμηση κατά συνάφεια και συμπεριλήφθηκαν όλοι οι τύποι εγγράφων.

Επιπροσθέτως, εφαρμόστηκε η μέθοδος χιονοστιβάδας (citation snowballing), με σκοπό να εντοπιστούν νέες σχετικές δημοσιεύσεις ανάμεσα στις πηγές των κύριων μελετών (KM).

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

Πίνακας 1: Λέξεις-κλειδιά αναζήτησης

2.2 Κριτήρια επιλογής

Σύμφωνα με τους στόχους αυτής της διπλωματικής εργασίας, για να δημιουργηθεί ένα ενιαίο σύνολο βιβλιογραφίας, εφαρμόστηκαν αντίστοιχα κριτήρια επιλογής με την [7] όσον αφορά στα χαρακτηριστικά των δημοσιεύσεων, όπως το ερευνητικό πεδίο, το αντικείμενο της βελτιστοποίησης, ο χρονικός ορίζοντας, το γεωγραφικό πλαίσιο, η γλώσσα, η τεχνικές βελτιστοποίησης και οι επιστημονικές προδιαγραφές ποιότητας. Με αυτό τον τρόπο επιτεύχθηκε η φυσική συνέχεια της έρευνας με πρόσφατες δημοσιεύσεις αντίστοιχου περιεχομένου.

Συγκεκριμένα, το ερευνητικό πεδίο της εργασίας είναι η ΠΒ της αναβάθμισης κτιρίων με τη χρήση ΓΑ. Ως εκ τούτου, απορρίφθηκαν δημοσιεύσεις ΠΒ με εξελικτικούς αλγόριθμους άλλου είδους ή με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37]. Παρ' αυτά, συμπεριλήφθηκαν άρθρα που μελετούν και συγκρίνουν την επίδοση των ΓΑ σε σχέση με άλλους αλγόριθμους. Επίσης, αγνοήθηκαν μελέτες μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης με ΓΑ [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], καθώς και αυτές που εξετάζουν μόνο το αρχικό στάδιο της σχεδίασης και κατασκευής του κτιρίου [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59].

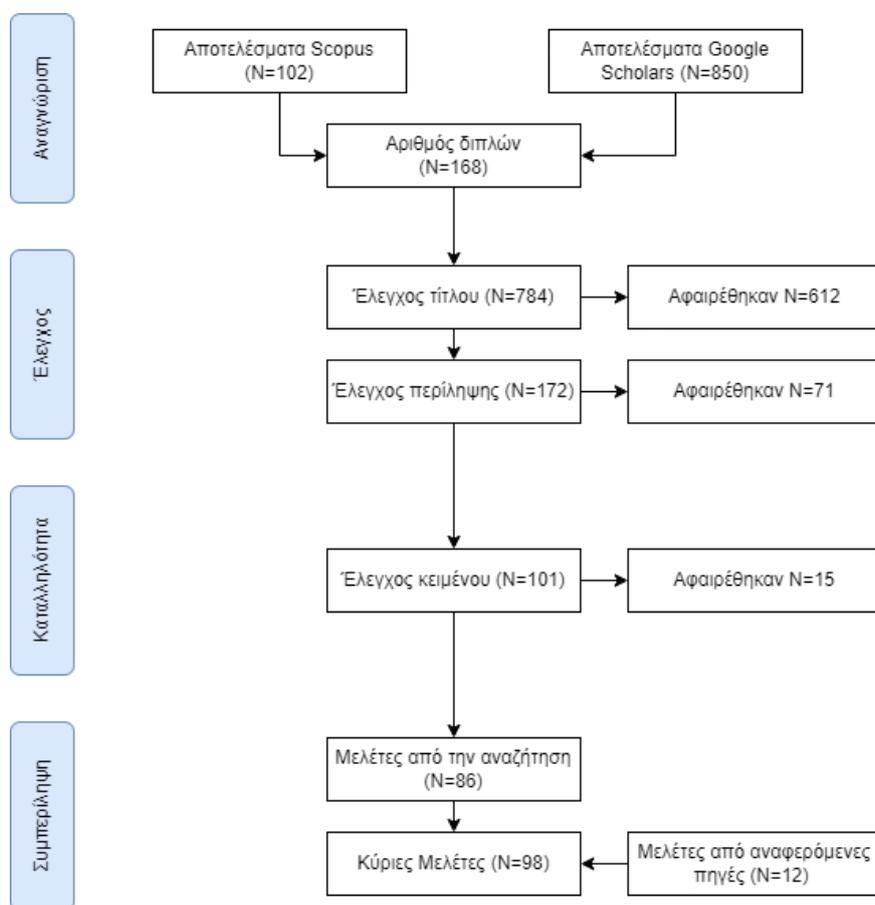
Όσον αφορά το αντικείμενο της βελτιστοποίησης, λήφθηκαν υπόψη δημοσιεύσεις που εξετάζουν το περίβλημα του κτιρίου, τα ενεργειακά και μηχανικά συστήματα, τα συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας, τα συστήματα ελέγχου και άλλες μεταβλητές, όπως οι συμπεριφορές των κατοίκων και η χρονικότητα, που σχετίζονται στενά με τουλάχιστον μία από τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Αγνοήθηκαν δημοσιεύσεις με αντικείμενο την αντισεισμική θωράκιση κτιρίων ή την προστασία έναντι τυφώνων [60], [61], [62], [63], [64], άλλου είδους αναβαθμίσεις στην δομή της κατασκευής του κτιρίου ή την αναβάθμιση μεμονωμένων συστημάτων του κτιρίου που δεν σχετίζονται με όλο το κτίριο [65], [65], [66], [67], [68], [69], [70].

Σχετικά με το χρονικό ορίζοντα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, εστίασαμε σε δημοσιεύσεις που εκδόθηκαν από το 2019 έως και το 2023. Παρ' αυτά, στο στάδιο διερεύνησης των πηγών των ΚΜ με την μέθοδο χιονοστιβάδας (citation snowballing), βρέθηκαν δημοσιεύσεις που είχαν παραληφθεί στην [7], οι οποίες συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση.

Δεν έγινε διάκριση ως προς την τοποθεσία του κτιρίου που μελετήθηκε ή την χώρα προέλευσης των συγγραφέων. Προτιμήθηκαν πλήρεις δημοσιεύσεις σε περιοδικά που δέχονται κριτική από ομότιμους (peer-review).

2.3 Μέθοδος επιλογής

Για την επιλογή των ΚΜ χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση PRISMA με τέσσερα στάδια: α) αναγνώριση (identification), β) έλεγχος (screening), γ) καταλληλότητα (eligibility) και δ) συμπερίληψη (inclusion). Εξετάστηκαν διαδοχικά ο τίτλος των αποτελεσμάτων της αναζήτησης, η περίληψη και οι λέξεις-κλειδιά, τα συμπεράσματα και τελικά ολόκληρο το κείμενο.



Εικόνα 1. Μέθοδος επιλογής κύριων μελετών

Το στάδιο της αναγνώρισης σχετικών δημοσιεύσεων με τις προαναφερθείσες μεθόδους αναζήτησης απέδωσε 952 αποτελέσματα, 102 από τις βάσεις δεδομένων του Scopus και 850 από την μηχανή αναζήτησης Google Scholars, 168 εκ των οποίων ήταν διπλότυπες καταχωρήσεις.

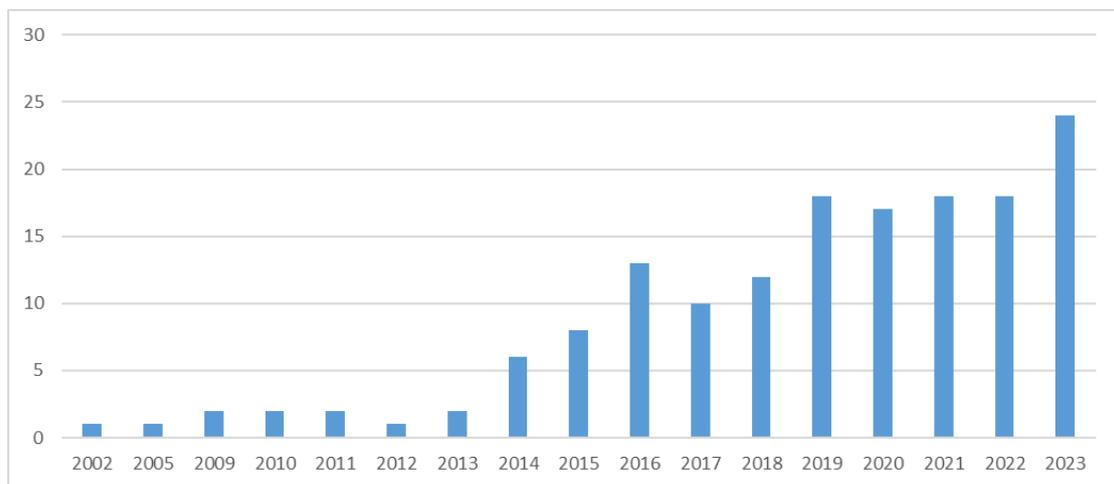
Ακολούθησε ο σταδιακός έλεγχος των δημοσιεύσεων και η εξέταση της καταλληλότητας τους. Αρχικά, αφαιρέθηκαν 612 αποτελέσματα λόγω μικρής συνάφειας του τίτλου με το θέμα. Ύστερα από έλεγχο της περίληψης, των λέξεων-κλειδιών και των συμπερασμάτων, απορρίφθηκαν 71 μελέτες επιπλέον, καθώς δεν πληρούσαν κριτήρια σχετικά με το ερευνητικό πεδίο ή και το αντικείμενο βελτιστοποίησης. Για αντίστοιχους λόγους, αφαιρέθηκαν 15 ακόμη δημοσιεύσεις στο στάδιο εξέτασης της καταλληλότητας ολόκληρου του κειμένου.

Τελικά, η αναζήτηση απέδωσε 86 μελέτες. Κατά την εξέταση των πηγών αυτών των μελετών, αναγνωρίστηκαν 12 επιπλέον σχετικές δημοσιεύσεις, οι οποίες και προστέθηκαν στην τελική ανάλυση.

2.4

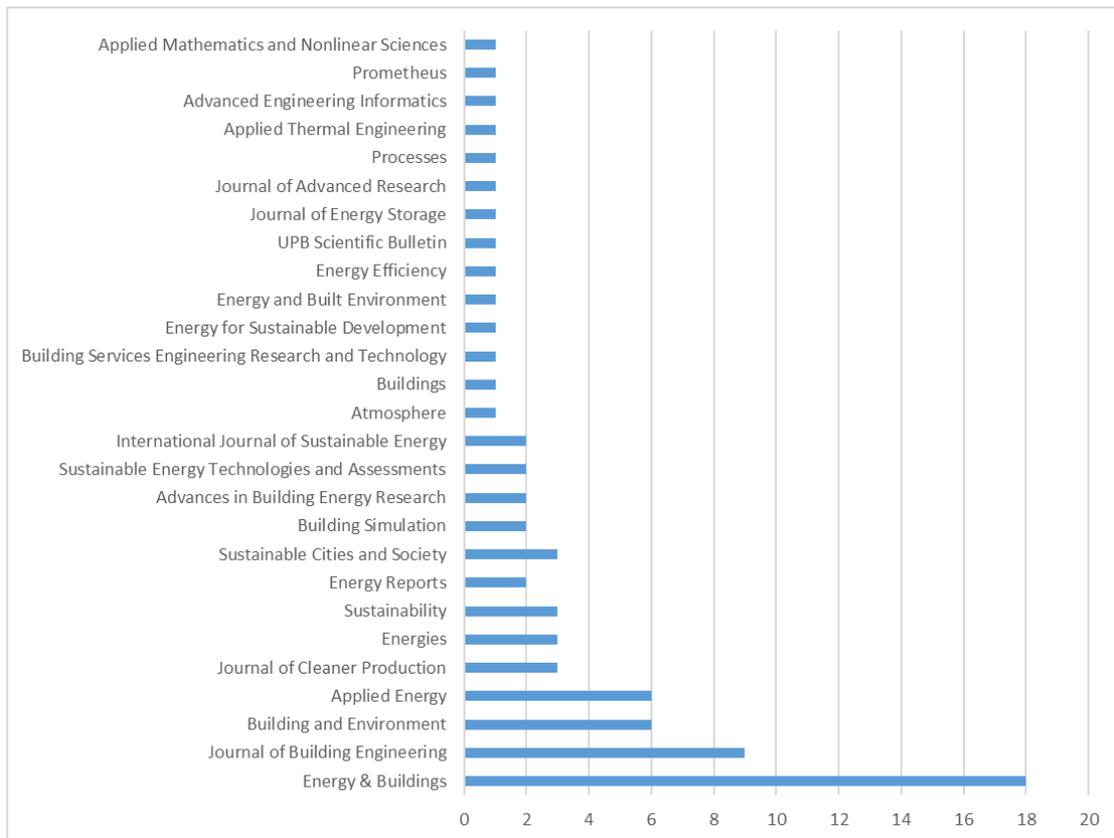
Αποτελέσματα Αναζήτησης

Η αναζήτηση απέδωσε 98 μελέτες στις οποίες βασίστηκε η ανάλυση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Για τους σκοπούς της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, συμπεριλήφθηκαν στους καταλόγους και οι 57 μελέτες της [7] που δημοσιεύθηκαν έως το 2019. Μέσω της μεθόδου χιονοστιβάδας, εντοπίστηκαν 8 έρευνες με ημερομηνία δημοσίευσης πριν το 2019, οι οποίες προστέθηκαν στον κατάλογο. Παρατηρούμε ότι η έρευνες αναβάθμισης κτιρίων με πολυκριτηριακούς ΓΑ συνεχώς αυξάνονται, με περισσότερες δημοσιεύσεις τα τελευταία έτη.



Εικόνα 2. Έτος δημοσίευσης μελετών

Από τις 98 μελέτες που βρέθηκαν, οι πλειοψηφία τους, 75 μελέτες, έχουν δημοσιευθεί σε επιστημονικά περιοδικά, πιο συχνά στο Energy & Buildings. Παρακάτω βλέπουμε την κατανομή των δημοσιεύσεων.



Εικόνα 3. Κατανομή άρθρων σε επιστημονικά περιοδικά

Από τις εναπομένουσες δημοσιεύσεις, οι 21 προέρχονται από πρακτικά συνεδρίων και μόλις 2 αποτελούν κεφάλαια βιβλίου. Σημαντική είναι η συνεισφορά των συνεδρίων της IBPSA με μια δημοσίευση από το 16^ο συνέδριο της IBPSA στην Ρώμη και τρεις δημοσιεύσεις από το 17^ο συνέδριο της IBPSA στη Βρύγη του Βελγίου. Συνάμα, έχουμε μελέτη από το συνέδριο uSim 2020 της IBPSA-Scotland και το συνέδριο eSim 2022 της IBPSA-Canada. Δύο μελέτες προέρχονται από το συνέδριο BuildSim Nordic 2022 και μία από το CLIMA 2019, μέρος του δικτύου συνεδρίων E3S, ενώ άλλες δύο εκδόθηκαν από την IEEE μέσω των συνεδρίων EEEIC και I&CPS Europe. Δύο ακόμη δημοσιεύσεις βρέθηκαν από την σειρά συνεδρίων της IOP Publishing, Earth and Environmental Science. Τέλος, έχουμε μελέτες από τα συνέδρια CONF.ITECH, ICMMS 2022, S.ARCH 2023, SpliTech, Construction Research Congress 2020, SimAUD 2019 και SimAUD 2020.

3

Θεωρητικό Υπόβαθρο

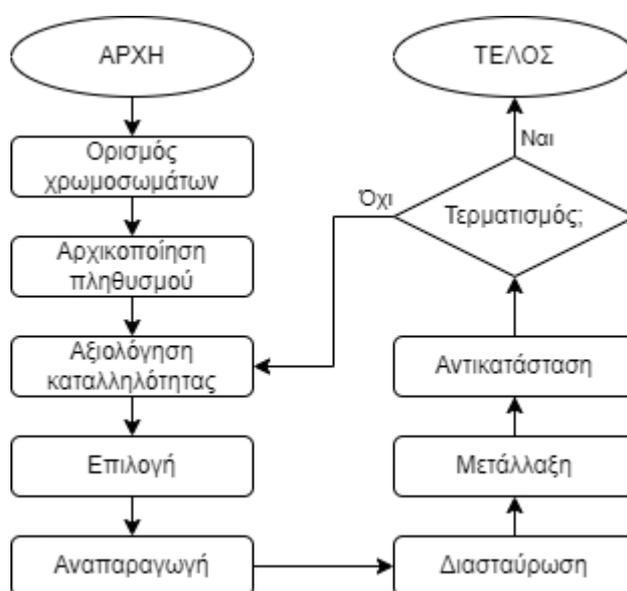
3.1 Γενετικοί αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (ΓΑ) είναι μια κατηγορία εξελικτικών αλγορίθμων που επινοήθηκε από τον John Holland [71]. Οι ΓΑ σχετίζονται στενά με τη θεωρία του Κάρολου Δαρβίνου, η οποία αναφέρεται στη φυσική επιλογή ως μηχανισμό που ωθεί την εξέλιξη των ειδών. Ως εκ τούτου, οι ΓΑ προσομοιώνουν τη διαδικασία της βιολογικής εξέλιξης. Οι ΓΑ κατηγοριοποιούνται ως μέθοδοι τυχαίας βελτιστοποίησης [72] όπου η ικανότητα επιβίωσης καθορίζεται από την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας..

Κάθε άτομο αποτελείται από το χρωμόσωμα, δηλαδή το σύνολο των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται ως γονίδια, και την καταλληλότητά του (fitness value) η οποία αξιολογείται για ένα ορισμένο περιβάλλον. Το σύνολο των συμβόλων που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση του ΓΑ, δηλαδή για την αναπαράσταση σταθερών, μεταβλητών και συναρτήσεων, λέγεται αλφάβητος. Τα γονίδια μπορεί να είναι συνεχείς ή διακριτές μεταβλητές, ακέραιοι, πραγματικοί ή δυαδικοί αριθμοί και οποιαδήποτε άλλη δομή.

Καταρχάς, ορίζονται τα χρωμοσώματα και δημιουργείται ένας πληθυσμός πιθανών λύσεων. Ο ΓΑ περιλαμβάνει τρεις βασικούς τελεστές: επιλογή, διασταύρωση και μετάλλαξη. Πρώτα γίνεται η επιλογή των ατόμων που θα προχωρήσουν στο στάδιο της αναπαραγωγής. Η επιλογή αυτή μπορεί να γίνει με διάφορες τεχνικές, όπως η επιλογή αποκοπής, η επιλογή βάση της κατάταξης, η επιλογή τύπου ρουλέτας και η επιλογή τύπου τουρνουά. Οι μηχανισμοί της αναπαραγωγής, η διασταύρωση και η μετάλλαξη, επιτρέπουν την προσαρμογή των ατόμων σε διαφορετικές εξελικτικές πιέσεις. Η διασταύρωση

αντιπροσωπεύει τη διαδικασία συνδυασμού γενετικού υλικού από δύο γονείς για τη δημιουργία νέων ατόμων, ενώ η μετάλλαξη δίνει τη δυνατότητα τυχαίας τροποποίησης ενός ή περισσότερων γονιδίων, κάτι που βοηθά τον αλγόριθμο να αποφύγει τα τοπικά ελάχιστα [73]. Οι εν λόγω τελεστές ενθαρρύνουν τον εντοπισμό νέων ατόμων του πληθυσμού. Έτσι, διαφυλάσσεται η ποικιλομορφία των λύσεων χωρίς να μειώνεται η καταλληλότητά τους. Η υπάρχουσα γενιά αντικαθίσταται από την επόμενη και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Αυτό συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί ένα από τα κριτήρια τερματισμού του αλγορίθμου. Υπάρχουν διάφορα κριτήρια τερματισμού, όπως η επίτευξη ενός συγκεκριμένου επιπέδου ακρίβειας για την καλύτερη λύση, ο αριθμός γενεών, ο αριθμός γενεών χωρίς βελτίωση της λύσης και ο χρόνος λειτουργίας. Με αυτήν την μέθοδο, εντοπίζουμε λύσεις που παρουσιάζουν συνεχή εξέλιξη προς υψηλότερες επιδόσεις.



Εικόνα 4. Διάγραμμα ροής γενετικού αλγορίθμου

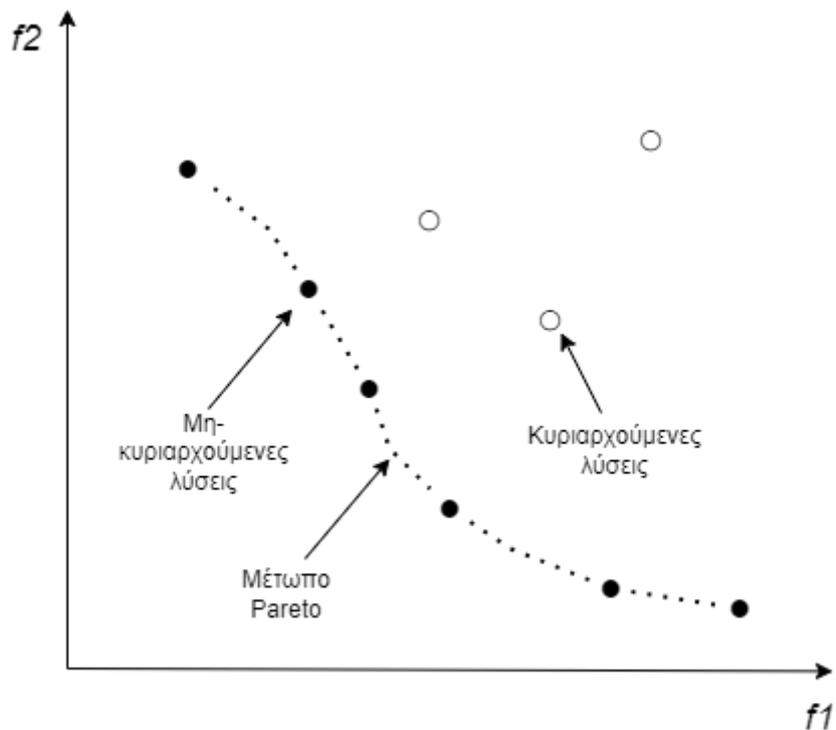
Οι ΓΑ διαθέτουν αρκετά θετικά χαρακτηριστικά. Καταρχάς, εφαρμόζονται σε οποιοδήποτε πρόβλημα, ενώ υποστηρίζουν ΠΒ. Είναι ανθεκτικοί στο θόρυβο και την αβεβαιότητα, παρέχοντας πάντα μια απάντηση που βελτιώνεται με το πέρασμα του χρόνου. Επιπλέον, μπορούν να αντιμετωπίσουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα, συνδέονται εύκολα με υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα, είναι επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι με ευκολία, μπορούν να συνδυαστούν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους και είναι κατάλληλοι για παράλληλη υλοποίηση.

Παρότι οι ΓΑ παρουσιάζουν πολλά θετικά, υπάρχουν και ορισμένα αρνητικά στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Συγκεκριμένα, μπορεί να χρειαστούν περισσότερο χρόνο για

σύγκλιση σε βέλτιστες λύσεις, ενώ η παραμετροποίησή τους μπορεί να απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις. Επίσης, είναι ευαίσθητοι στις αρχικές συνθήκες και υπάρχει κίνδυνος εγκλωβισμού σε τοπικά βέλτιστα. Δεν υπάρχει καμία σιγουριά ότι η τελική λύση θα είναι η βέλτιστη. Παρ' όλα αυτά, η απόδοσή τους εξαρτάται σημαντικά από τον τύπο και τις παραμέτρους του προβλήματος και παραμένουν ισχυρό εργαλείο για την επίλυση ποικίλων προβλημάτων βελτιστοποίησης.

3.2 Γενετικοί αλγόριθμοι στη βελτιστοποίηση

Η ΠΒ αποτελεί σημαντικό εργαλείο όταν επιδιώκεται η επίτευξη πολλών διαφορετικών, συχνά αντίρροπων στόχων. Οι δύο βασικές μέθοδοι ΠΒ είναι η εύρεση του μετώπου Pareto και συγκεντρωτικές μέθοδοι, όπως η WSM, που δίνουν διαφορετικά βάρη σε κάθε στόχο για την εύρεση βέλτιστης λύσης. Μεγαλύτερο ενδιαφέρον έχει η εύρεση του συνόλου μη-κυριαρχούμενων λύσεων, γνωστό και ως μέτωπο Pareto. Ένα σημείο είναι βέλτιστο κατά Pareto αν η μείωση της τιμής μιας αντικειμενικής συνάρτησης προκαλεί την αύξηση της τιμής σε μία τουλάχιστον άλλη συνάρτηση. Η μελέτη του μετώπου δίνει πληροφορίες για το εύρος των εναλλακτικών αναβαθμίσεων που μπορεί να υλοποιηθούν. Σε προβλήματα ΠΒ, οι ΓΑ αποτελούν ισχυρό εργαλείο για την εξερεύνηση του μετώπου Pareto. Οι ΓΑ είναι ιδιαίτερα ικανοί σε σενάρια υψηλών διαστάσεων, όπου οι παραδοσιακές μέθοδοι αντιμετωπίζουν προκλήσεις στον υπολογιστικό τομέα [74]. Αλγόριθμοι που εμπεριέχουν στοιχεία ελιτισμού αποτρέπουν την απώλεια της ποικιλομορφίας και εξασφαλίζουν την αποτελεσματική μελέτη του συνόλου των λύσεων.



Εικόνα 5. Το μέτωπο Pareto

Οι αντικειμενικές συναρτήσεις παίζουν το ρόλο του περιβάλλοντος, είναι δηλαδή τα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία καθορίζεται η επιτυχία της λύσης. Οι συναρτήσεις δέχονται ως είσοδο συμβολοσειρές και επιστρέφουν μία τιμή που αξιολογεί την καταλληλότητα του ατόμου. Με την επαναλαμβανόμενη εφαρμογή αυτών των βασικών βημάτων, οι ΓΑ συνιστούν ένα ισχυρό εργαλείο για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων βελτιστοποίησης και αναζήτησης.

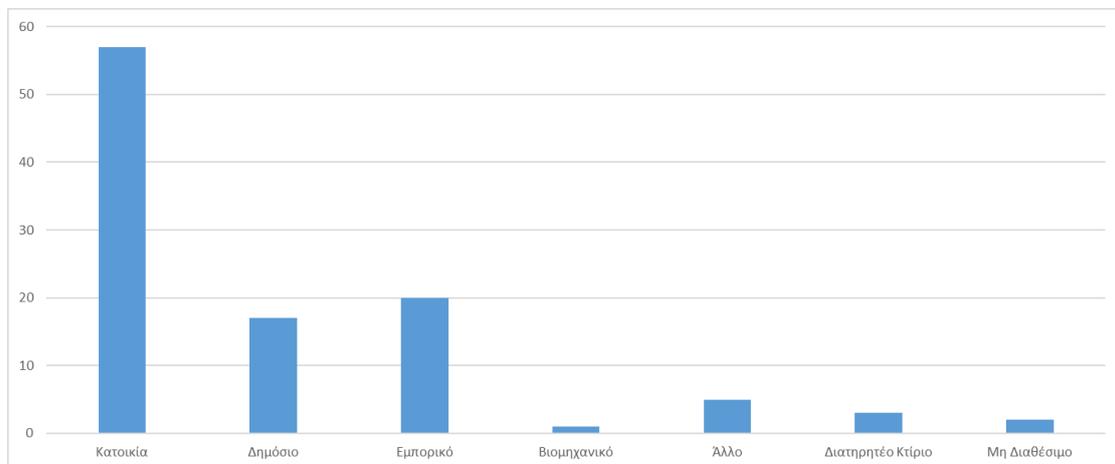
4

Ανάλυση Βιβλιογραφίας

4.1 Χαρακτηριστικά κτιρίων

4.1.1 Λειτουργία Κτιρίου

Η πλειοψηφία των ΚΜ αφορά κατοικίες, όπως μονοκατοικίες, διαμερίσματα και πολυώροφα κτίρια, με περισσότερες από τις μισές μελέτες να αφορούν αυτή την κατηγορία. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς υπάρχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την αναβάθμιση αυτών των κτιρίων και τον αντίκτυπο που έχουν στο περιβάλλον σε εθνικό επίπεδο. Παρ' αυτά, υπάρχει μεγάλο πλήθος δημοσιεύσεων τόσο για εμπορικά κτίρια, όπως γραφεία και καταστήματα, όσο και για δημόσια κτίρια, επί το πλείστον σχολεία, υγειονομικές εγκαταστάσεις και κτίρια κοινωνικών υπηρεσιών.

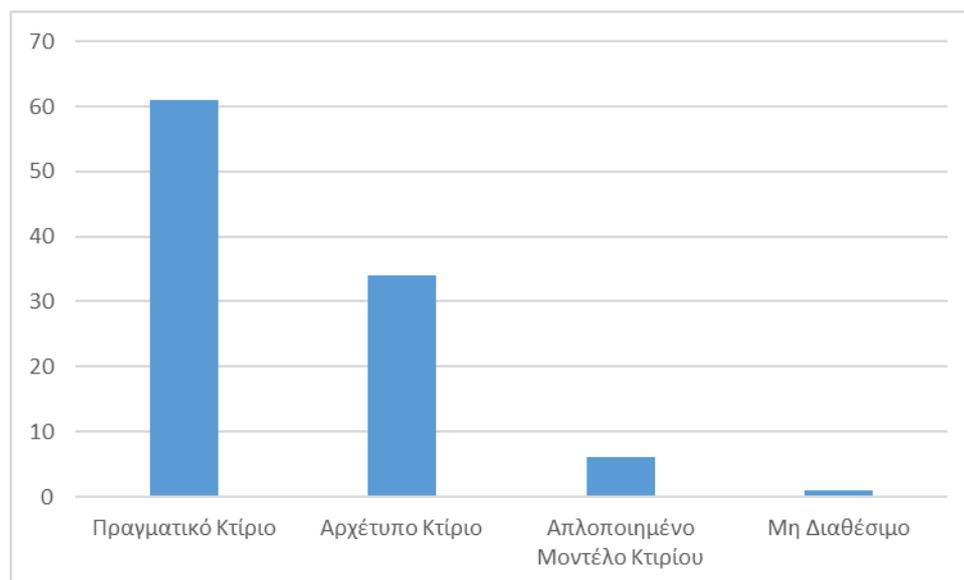


Εικόνα 6. Είδος λειτουργίας κτιρίων

Μόνο μια μελέτη αφορά βιομηχανικό κτίριο, αυτή των [75] για την αναβάθμιση εργοστασίου επεξεργασίας ψαριών στην Αλμπέρτα με την προσθήκη υβριδικού συστήματος υδροπονικής καλλιέργειας και υποστήριξη από ανανεώσιμη ενέργεια για την παραγωγή φρέσκων τροφίμων. Παρατηρήθηκαν τρεις μελέτες για διατηρητέα κτίρια ή κτίρια πολιτιστικής κληρονομιάς. Οι [76] εστίασαν την μελέτη τους στην αναβάθμιση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος του κτιρίου Ίνγκλις στο Λονδίνο, κτισμένο μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Δυο μελέτες έγιναν από τους [77], [78] για την αναβάθμιση παλατιού στο Κάιρο, κτισμένο το 18^ο αιώνα, με φεγγίτη και νέους υαλοπίνακες. Μελέτες σε άλλες κατηγορίες είναι σπάνιες, όπως αυτή των [79] για μια εσωτερική αθλητική εγκατάσταση, των [80] για ένα τουριστικό κέντρο και οι μελέτες των [81], [82], [83] για νέο κτίριο σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας (nearly Zero Energy Building, nZEB).

4.1.2 Είδος μοντέλου

Η μελέτη πραγματικών κτιρίων με επί τόπου μετρήσεις είναι αυτή που προτιμάται στις περισσότερες μελέτες. Αυτό επιφέρει πλεονεκτήματα στην διαδικασία σχεδίασης του κτιρίου και προσομοίωσης της λειτουργίας του, ενώ αποδίδει αποτελέσματα που δύνανται να χρησιμοποιηθούν άμεσα για την αναβάθμιση των κτιρίων [9]. Από την άλλη, οι μελέτες με αρχέτυπα κτιρίων δεν είναι σπάνιες, καθώς μία στις τρεις δημοσιεύσεις χρησιμοποιεί τέτοιου είδους μοντέλα κτιρίων, συνήθως με την βοήθεια δεδομένων από εθνικές έρευνες [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91]. Σε λιγότερες μελέτες χρησιμοποιούνται απλοποιημένα μοντέλα κτιρίων.



Εικόνα 6. Είδος μοντέλου κτιρίων

4.1.3 Τοποθεσία

Παρακάτω παρατίθενται χάρτες των τοποθεσιών των κτιρίων στις ΚΜ. Παρατηρούμε ότι πλειοψηφία των μελετών αφορά κτίρια στην Ευρώπη και τη Β. Αμερική. Λίγες μελέτες αφορούν αναπτυσσόμενες ή λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες της Αφρικής, της Ασίας, της Ωκεανίας, της Κεντρικής και της Νότιας Αμερικής, όπως αυτές ορίζονται από το Διεθνές Νομισματικό Ταμείο [92].



Εικόνα 7. Χάρτης τοποθεσιών κτιρίων ΚΜ



Εικόνα 8. Χάρτης τοποθεσιών κτιρίων KM – Μεγέθυνση: Ευρώπη



Εικόνα 9. Χάρτης τοποθεσιών κτιρίων KM – Μεγέθυνση: Ασία



Εικόνα 10. Χάρτης τοποθεσιών κτιρίων KM – Μεγέθυνση Β. Αμερική

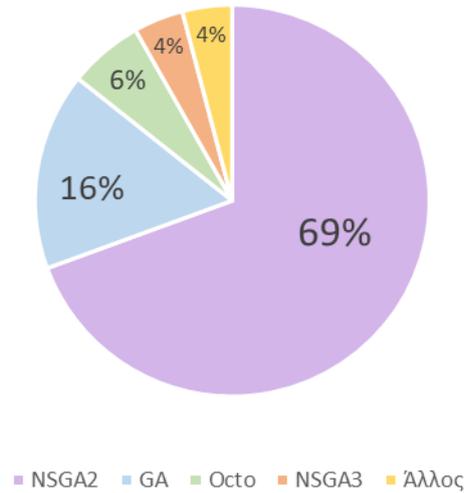
4.2 Τεχνικές βελτιστοποίησης

4.2.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι

4.2.1.1 Γενετικοί αλγόριθμοι

Από τις 98 μελέτες που εξετάστηκαν, παρατηρήθηκε ότι στην πλειοψηφία τους (68 μελέτες) γίνεται χρήση του Γενετικού Αλγόριθμου Μη-κυριαρχούμενης Ταξινόμησης II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II) [93]. Συχνά, επιλέγονται παραλλαγές του NSGA-II, όπως ο αλγόριθμος aNSGA-II με ενεργό αρχείο αποθήκευσης. Άλλες φορές, χρησιμοποιείται παραλλαγή του NSGA-II που υποστηρίζει παράλληλο προγραμματισμό. 17 μελέτες αναφέρουν την χρήση ΓΑ χωρίς να παραθέτουν συγκεκριμένο αλγόριθμο. 6 μελέτες χρησιμοποιούν τον συνδυασμό Εξελικτικού Αλγόριθμου Δύναμης Pareto (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2, SPEA2) με Εκτίμηση Υπερόγκου (Hyper Estimation, HypE) που προσφέρει το πρόσθετο Octopus του Rhino-Grasshopper [94]. Παρά τις δυνατότητές του, οι ερευνητές έχουν παραβλέψει τον NSGA-III, μια επέκταση του NSGA-II που παρουσιάστηκε από τους Deb και Jain το 2013 [95]. Ο NSGA-III αντιμετωπίζει τους περιορισμούς, ενισχύει την αποδοτικότητα και διατηρεί τους ευνοϊκούς μηχανισμούς του προκατόχου του,

επιτυγχάνοντας βελτιωμένη διαχείριση πολλών στόχων και πιο ισορροπημένη κατανομή λύσεων κάνοντας χρήση σημείων αναφοράς, αντί της απόστασης συγχρωτισμού [96]. Μόλις 4 μελέτες εφαρμόζουν τον αλγόριθμο NSGA-III.



Εικόνα 11. Γενετικοί αλγόριθμοι

Οι [97] εκμεταλλεύτηκαν τον Γενετικό Αλγόριθμο για Πολυτροπικά Πολυκριτηριακά Προβλήματα GA-TriM. Στην [98] εφαρμόζεται μικρο-γενετικός αλγόριθμος που δεν συναντάται αλλού στην βιβλιογραφία. Στην [99] η λύση του προβλήματος γίνεται με ένα υβριδικό συνδυασμό ΓΑ με αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (PSO).

4.2.1.2 Παράμετροι γενετικών αλγόριθμων

Στις μελέτες παρατηρήθηκε μεγάλη ποικιλία παραμέτρων που αφορούν τους ΓΑ. Οι παράμετροι που αναφέρονται, όπως και οι τιμές τους, διαφέρουν από μελέτη σε μελέτη. Συχνά χρησιμοποιούνται προεπιλεγμένες ρυθμίσεις των λογισμικών. Άλλες φορές εφαρμόζονται τιμές που προτείνονται από προηγούμενες μελέτες.

	Πληθυσμός	Ελιτισμός	Πιθανότητα Διασταύρωσης	Ρυθμός Διασταύρωσης	Πιθανότητα Μετάλλαξης	Ρυθμός Μετάλλαξης
Μέσος όρος	91,10294118	0,45	0,807222222	0,75	0,124703704	0,273534483
Ελάχιστη τιμή	5	0,05	0,01	0,2	0,01	0,0125
Μέγιστη τιμή	500	0,5	1	1	0,5	0,9
Πιο συχνή τιμή	100	0,5	0,9	0,8	0,1	0,2

Πίνακας 2. Βασικές παράμετροι γενετικών αλγόριθμων

Βασικές παράμετροι που αναφέρονται στις περισσότερες περιπτώσεις είναι οι εξής:

α) Μέγεθος πληθυσμού: Είναι η πιο συχνά αναφερόμενη παράμετρος. Μαζί τις μέγιστες επιτρεπόμενες γενιές, αποτελούν τις παραμέτρους που έχουν την μεγαλύτερη επίδραση στην σύγκλιση και τον χρόνο υπολογισμού. Σε γενικές γραμμές, ο πληθυσμός πρέπει να είναι 2 έως 6 φορές το πλήθος των γονιδίων, δηλαδή των μεταβλητών απόφασης [100]. Στην βιβλιογραφία παρατηρούνται τιμές από 5 έως και 500 άτομα. Η μέση τιμή είναι 85, ενώ η πιο συχνή τιμή είναι 100 άτομα ανά πληθυσμό. Ξεχωριστή είναι η περίπτωση της [98], όπου χρησιμοποιείται μικρο-γενετικός αλγόριθμος με μικρότερα μεγέθη πληθυσμών, περίπου 5 ατόμων. Ο αλγόριθμος εφαρμόζει τις διαδικασίες διασταύρωσης και μετάλλαξης και ενημερώνει τον πληθυσμό μέσω επαναλαμβανόμενων εσωτερικών και εξωτερικών βρόγχων.

β) Πιθανότητα και ρυθμός διασταύρωσης: Οι όροι αυτοί αφορούν τον έλεγχο της κληρονομικότητας γονιδίων από την προηγούμενη γενιά. Η πιθανότητα διασταύρωσης αναφέρεται σε ένα ζευγάρι ατόμων κατά τη διαδικασία αναπαραγωγής, ενώ ο ρυθμός διασταύρωσης αναφέρεται στο σύνολο του πληθυσμού μίας γενιάς. Συχνά χρησιμοποιούνται εναλλάξ, για αυτό είναι σημαντικό να ελέγχουμε το περιεχόμενο, καθώς διάφορες πηγές μπορεί να χρησιμοποιούν τους όρους με ελαφρώς διαφορετικό τρόπο. Για παράδειγμα, ρυθμός διασταύρωσης 0,8 σημαίνει πως 80% των συμβάντων αναπαραγωγής περιλαμβάνει διασταύρωση. Ο συνιστώμενος ρυθμός διασταύρωσης κυμαίνεται από 0,4 έως 0,99 [101]. Στην βιβλιογραφία παρατηρούμε εύρος τιμών από 0,01 έως 1 με μέση τιμή 0,8 και πιο συχνή τιμή 0,9 για την πιθανότητα διασταύρωσης. Ο ρυθμός διασταύρωσης από την άλλη έχει εύρος τιμών από 20% έως 100% με μέση τιμή 75% και πιο συχνή τιμή 80%.

γ) Πιθανότητα και ρυθμός μετάλλαξης: Οι όροι αυτοί αφορούν των έλεγχο την μετάλλαξη γονιδίων. Όπως και για την διασταύρωση, η πιθανότητα μετάλλαξης αφορά ένα μόνο γονίδιο, ενώ ο ρυθμός μετάλλαξης αφορά όλο τον πληθυσμό. Στην βιβλιογραφία παρατηρούμε εύρος τιμών από 0,01 έως 0,5 με μέση τιμή 0,125 και πιο συχνή τιμή 0,1 για την πιθανότητα μετάλλαξης. Ο ρυθμός μετάλλαξης από την άλλη έχει εύρος τιμών από 1,25% έως 90% με μέση τιμή 27,35% και πιο συχνή τιμή 20%. Ξεχωρίζει η μελέτη [102] όπου χρησιμοποιείτε μη-ομοιόμορφη μετάλλαξη με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 0,5.

γ) Ελιτισμός: Ο ελιτισμός αφορά το ποσοστό των κορυφαίων λύσεων που θα μεταβεί αυτούσιο στην επόμενη γενιά. Κάποιες φορές αναγράφεται το πλήθος των ατόμων που θα παραμείνουν, αλλά συνήθως χρησιμοποιείται ποσοστό ως κλάσμα του πληθυσμού. Σε όλες τις μελέτες όπου καταγράφεται, ο ελιτισμός έχει τιμή 0,5, δηλαδή το καταλληλότερο μισό του πληθυσμού μεταβαίνει στην επόμενη γενιά. Εξαιρεση αποτελεί η [103] όπου εφαρμόζεται ελιτισμός 0,05.

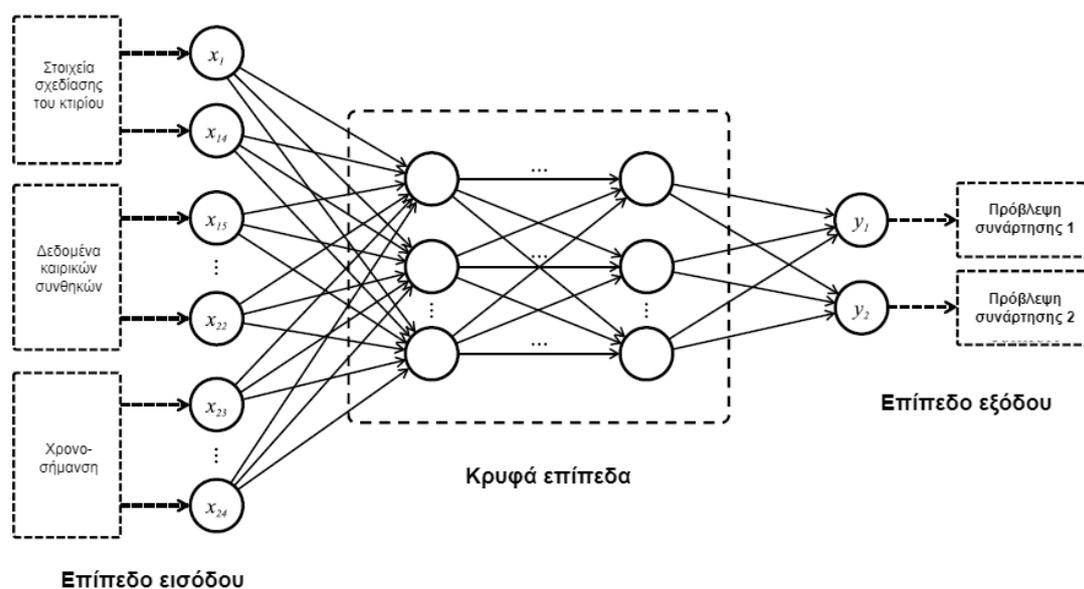
δ) Τρόπος επιλογής: Ο τρόπος επιλογής αφορά τον τρόπο που επιλέγονται τα άτομα τις νέας γενιάς. Πιο συχνή μέθοδος είναι αυτή της επιλογής μέσω τουρνουά μεγέθους 2, δηλαδή συγκρίσεις μεταξύ δύο ατόμων του πληθυσμού. Πιο σπάνια χρησιμοποιείται η επιλογή τύπου ρουλέτας.

Άλλες παράμετροι που καταγράφονται λιγότερα συχνά είναι οι εξής: κλάσμα πληθυσμού μετώπου Pareto, είδος διασταύρωσης (διασταύρωση σημείου, ενδιάμεση, τυχαίο ανακάτεμα) και μετάλλαξης (ομοιόμορφη, πολυωνυμική), σημεία αναφοράς για την NSGA-III, μέγεθος αρχικού πληθυσμού, δείκτες κατανομής διασταύρωσης και μετάλλαξης, η κατεύθυνση, το διάστημα και το κλάσμα μετανάστευσης για κατανεμημένους ΓΑ.

Τα κριτήρια διακοπής ενός ΓΑ καθορίζουν πότε ο αλγόριθμος θα σταματήσει την εξέλιξή του. Τα κριτήρια αυτά μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το πρόβλημα και τις απαιτήσεις της εφαρμογής, όμως τα πιο συχνά στις ΚΜ είναι ο μέγιστος αριθμός γενεών και η σύγκλιση. Στις δημοσιεύσεις που μελετήθηκαν, ο μέγιστος αριθμός γενεών έχει εύρος από 15 έως 200.000 γενιές με πιο συχνή τιμή τις 100 γενιές. Όσον αφορά την σύγκλιση, καταγράφεται συνήθως το κλάσμα ανοχής της, συνήθως με τιμή 1/1000, ενώ λιγότερο συχνά το είδος της και ο αριθμός γενεών χωρίς αλλαγή. Άλλα κριτήρια που χρησιμοποιούνται είναι ο χρόνος στάσης, χρονικά όρια, στόχοι καταλληλότητας και ο αριθμός επαναλήψεων.

4.2.2 Εξομοιωτές

Οι εξομοιωτές ή υποκατάστατα μοντέλα είναι προσεγγιστικές μέθοδοι μοντελοποίησης που περιλαμβάνουν την κατασκευή ενός μοντέλου που προσεγγίζει τη συμπεριφορά εισόδου-εξόδου ενός άλλου μοντέλου, γι' αυτό λέγονται και μετα-μοντέλα. Επιτρέπουν την μείωση των επαναλήψεων που απαιτούνται για την βελτιστοποίηση, μειώνοντας το υπολογιστικό κόστος. Στις ΚΜ, συχνή είναι η χρήση ANN, ειδικά αυτή των MLP ευθείας προώθησης που προσομοιώνουν αποτελεσματικά την συμπεριφορά μη γραμμικών συστημάτων. Σύμφωνα με τους [104], η υλοποίηση των ANN αποτελείται από τέσσερα στάδια: α) την προ-επεξεργασία και κανονικοποίηση των δεδομένων, β) την επιλογή της δομής και σχεδίαση του μοντέλου, γ) την εκπαίδευση του δικτύου και δ) την αξιολόγηση του αποτελέσματος. Τα ANN παίζουν κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της κατανάλωσης ενέργειας, των εκπομπών αερίων και της θερμικής άνεσης. Προσφέρουν επίσης σημαντικά οφέλη για την αύξηση της ταχύτητας υπολογισμού προσομοιώσεων και καλύτερη ακρίβεια. Για παράδειγμα, οι [105] πέτυχαν 38 φορές ταχύτερη προσομοίωση με την εφαρμογή MLPANN. Σε συνδυασμό με τους ΓΑ, αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο για την αποδοτική βελτιστοποίηση της αναβάθμισης κτιρίων. Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι εκπαίδευσης των ANN. Πιο συχνά εφαρμόζεται ο αλγόριθμος Levenberg–Marquardt ή ΓΑ. Άλλα μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι η παρεμβολή Kriging, η μέθοδος Random Forrest και η μέθοδος Gradient Boosting.



Εικόνα 12. Παράδειγμα διαγράμματος βασικής δομής ενός MLPANN [105]

4.2.3 Τεχνικές δειγματοληψίας

Η δειγματοληψία είναι κρίσιμη για την επιτυχημένη διαδικασία βελτιστοποίησης αναβάθμισης κτιρίων και εφαρμόζεται σε διάφορες πτυχές της διαδικασίας. Τεχνικές δειγματοληψίας, πιο συχνά η LHS, χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων που απαιτούνται για την ανάπτυξη και εκπαίδευση των υποκατάστατων μοντέλων. Ορισμένες μέθοδοι ανάλυσης ευαισθησίας απαιτούν την εκτέλεση πολλών δοκιμών. Η αξιοποίηση δειγμάτων είναι βασικό στοιχείο της ανάλυσης ευαισθησίας με βάση την διακύμανση, όπου εφαρμόζεται συχνά η δειγματοληψία Sobol' και η ανάλυση Μόντε Κάρλο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η δειγματοληψία χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του αρχικού πληθυσμού στο ΓΑ. Αυτό εξασφαλίζει την ποικιλία των λύσεων που είναι σημαντικός παράγοντας για την επιτυχία του αλγορίθμου.

4.2.4 Ανάλυση αβεβαιότητας και ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας μελετά πώς η αβεβαιότητα στα αποτελέσματα ενός μαθηματικού μοντέλου ή συστήματος συνδέεται με διάφορες πηγές αβεβαιότητας στις εισόδους του [15]. Αυτές οι μέθοδοι επιτρέπουν την ανάπτυξη μοντέλων που αφορούν μόνο τους πιο σημαντικούς παράγοντες για την βελτιστοποίηση της αναβάθμισης του κτιρίου, μειώνοντας έτσι το χρόνο που απαιτείται για τους υπολογισμούς και αποφεύγοντας χρονοβόρες προσομοιώσεις.

Χρησιμοποιούνται μέθοδοι τοπικής και συνολικής ανάλυσης της ευαισθησίας. Οι τοπικές μέθοδοι εξετάζουν την επιρροή μιας συγκεκριμένης περιοχής του συνόλου των εισόδων ή μιας μόνο μεταβλητής. Αντιθέτως, οι συνολική ανάλυση ευαισθησίας αναδεικνύει ποιες μεταβλητές έχουν την μεγαλύτερη επιρροή στην αβεβαιότητα της εξόδου εξετάζοντας την ευαισθησία του μοντέλου για όλο το εύρος τιμών των παραμέτρων εισόδου. Εάν το πλήθος των μεταβλητών είναι μικρό ή χρειάζεται πλήρης ανάλυση, τότε προτιμάται η συνολική ανάλυση της ευαισθησίας. Όταν οι μεταβλητές είναι πολλές, επιλέγονται τοπικές και κλασματικές μέθοδοι ανάλυσης που απαιτούν λιγότερο χρόνο για να εκτελεστούν.

Μακράν η πιο συχνή μέθοδος ανάλυσης αβεβαιότητας είναι η εξέταση διαφορετικών σεναρίων και διαφορετικών τιμών παραμέτρων και η αξιολόγηση της επιρροής τους. Πιο συχνά εξετάζονται μεταβολές στο κλίμα, την τοποθεσία του κτιρίου και τις καιρικές συνθήκες. Αξιοσημείωτη είναι η αύξηση των μελετών που εξετάζουν σενάρια μελλοντικής κλιματικής αλλαγής και αναπτύσσουν μοντέλα πρόβλεψης του καιρού. Άλλες παράμετροι που εξετάζονται είναι το κόστος της ενέργειας και άλλων υπηρεσιών, χαρακτηριστικά των μεταβλητών απόφασης όπως οι ιδιότητες των υλικών, στοιχεία της γεωμετρίας του κτιρίου και διαφορετικές μέθοδοι μοντελοποίησης, μεταβολές στα επίπεδα εκπομπών αερίων

θερμοκηπίου, ανακρίβεια μετρήσεων, διαφορετικοί προϋπολογισμοί και αλλαγές στη νομοθεσία.

Μια ποιοτική μέθοδος ανάλυσης της ευαισθησίας είναι η εξέταση και διαλογή (screening) των παραμέτρων που έχουν την μεγαλύτερη επιρροή. Πιο δημοφιλής του είδους είναι η μέθοδος Μόρις (Morris method), γνωστή και ως μέθοδος Στοιχειωδών Επιδράσεων (Elementary Effects, EE), μια μέθοδος συνολικής ανάλυσης ευαισθησίας που εξετάζει μία παράμετρο σε κάθε βήμα. Προτιμάται όταν έχουμε πολύπλοκα μοντέλα με μεγάλο υπολογιστικό κόστος.

Σημαντικό εργαλείο για την ανάλυση της ευαισθησίας σε αρκετές μελέτες αποτελούν οι μέθοδοι παλινδρόμησης. Συχνή είναι η χρήση Κανονικοποιημένων Συντελεστών Παλινδρόμησης (Standardized Regression Coefficients, SRC), οι οποίοι επιτρέπουν την κανονικοποίηση όλων των συντελεστών των μεταβλητών σε κοινή βάση (με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1) ώστε να διευκολύνεται η σύγκρισή και η κατάταξη τους στα πλαίσια της ανάλυσης ευαισθησίας. Οι Asadi κ.α. [106] αναφέρουν τη Μεθοδολογία Απόκρισης Επιφάνειας (Response Surface Methodology, RSM), μια μέθοδο στατιστικής παλινδρόμησης που μιμείται την συμπεριφορά του κτιρίου και μειώνει το υπολογιστικό κόστος. Στην [96], χρησιμοποιείται Πλήρης Παραγοντικός Σχεδιασμός (Full Factorial Design, FFD) για την πρόβλεψη της σχέσης μεταξύ μεταβλητών και αντικειμενικών συναρτήσεων. Η FFD προτιμήθηκε επί της RSM, καθώς χρειάζεται λιγότερες επαναλήψεις προσομοίωσης και αποδίδει μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης. Οι Aghamolaei και Ghaani [107] εφάρμοσαν μικτό κλασματικό παραγοντικό σχεδιασμό, μειώνοντας τον χρόνο που απαιτείται για τους σκοπούς της ανάλυσης ευαισθησίας. Οι Yu κ. α. [76] εφάρμοσαν μεταξύ άλλων και ανάλυση συσχέτισης Pearson.

Συχνή είναι η ανάλυση της ευαισθησίας που βασίζεται στην διακύμανση της αβεβαιότητας των παραμέτρων. Γνωστή και ως μέθοδος Σομπόλ (Sobol' method), αφορά την ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων ως κατανομές πιθανότητας και την εξέταση της επίδρασης κάθε μεταβλητής εισόδου και συνδυασμού αυτών στη διακύμανση της εξόδου. Συνήθως εφαρμόζεται η μέθοδος Μόντε Κάρλο (Monte Carlo Analysis) και η ανάλυση διακύμανσης ANOVA. Όταν το υπολογιστικό κόστος δεν είναι απαγορευτικό, προτιμώνται ως μέθοδοι ανάλυσης ευαισθησίας, καθώς αποδίδουν μια πλήρη ανάλυση χωρίς να περιορίζονται από την γραμμικότητα ή την μονοτονία του μοντέλου [108].

Αντίστοιχα πλεονεκτήματα έχει η ανάλυση ευαισθησίας που βασίζεται στην πυκνότητα. Τέτοια είναι η DMIM που χρησιμοποίησαν οι Song κ.α. [108]. Στην ίδια μελέτη χρησιμοποιήθηκε επίσης η μέθοδος RED-FAST, μια βελτίωση του Τεστ Ευαισθησίας Πλάτους Φουριέ.

4.2.5 Μέθοδοι κατάταξης μετώπου Pareto

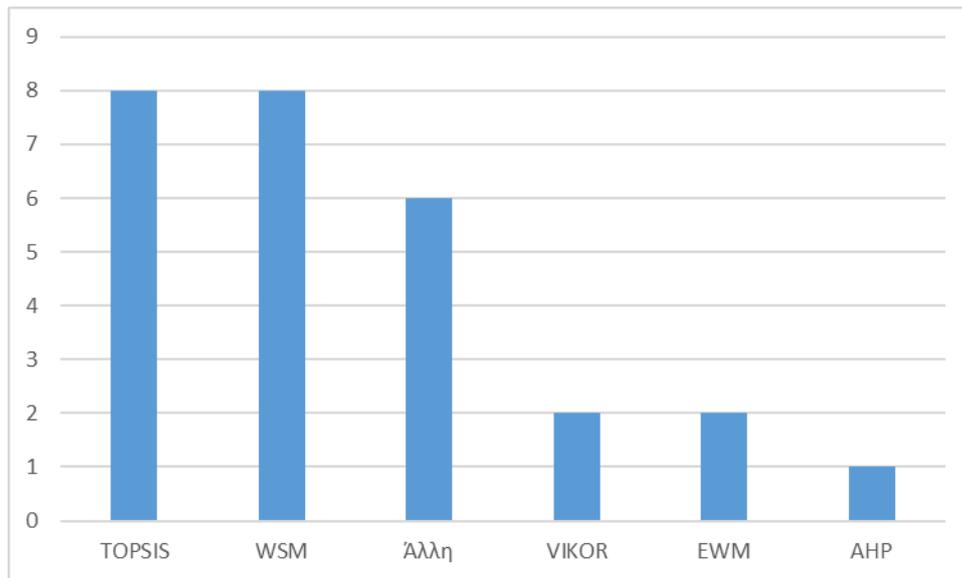
Η πλειοψηφία των μελετών χρησιμοποιεί το μέτωπο Pareto για την εύρεση βέλτιστων λύσεων. Μόλις σε 3 από τις 98 δημοσιεύσεις υπό μελέτη δεν αναφέρεται άμεσα η χρήση του μετώπου Pareto. Στις περισσότερες περιπτώσεις το πλήθος των λύσεων του μετώπου Pareto είναι μεγάλο και χρειάζεται να ληφθεί απόφαση για την τελική λύση που θα εφαρμοστεί.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την επιλογή του βέλτιστου αποτελέσματος από το μέτωπο Pareto. Συχνά, η λύση επιλέγεται με επίβλεψη από τον μελετητή, συνήθως μετά από ανάλυση βέλτιστου κόστους [75], [109], [110]. Από την άλλη, η MCDA παρέχει μια συστηματική προσέγγιση στο πρόβλημα και εφαρμόζεται συχνά.

Οι συγκεντρωτικές μέθοδοι προσφέρουν μια λύση από το άθροισμα πολλών κριτηρίων με διαφορετικά βάρη. Πιο συχνή είναι η χρήση της WSM. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει τον καθορισμό βαρών για κάθε κριτήριο με βάση τη σημασία του και στη συνέχεια τον πολλαπλασιασμό των τιμών του κριτηρίου με τα αντίστοιχα βάρη πριν από το άθροισμα τους. Χρησιμοποιείται σε 8 από τις μελέτες. Σε μερικές περιπτώσεις, εφαρμόζεται η EWM για τον καθορισμό των βαρών των κριτηρίων, αναθέτοντας βάρη με βάση την έννοια της εντροπίας και λαμβάνοντας υπόψη το επίπεδο αβεβαιότητας ή αταξίας στα δεδομένα που σχετίζονται με κάθε κριτήριο [111], [112]. Η AHP αναλύει το πρόβλημα λήψης αποφάσεων σε μια ιεραρχία κριτηρίων και εναλλακτικών, περιλαμβάνοντας συγκρίσεις για τον καθορισμό της σχετικής σημασίας των κριτηρίων και των εναλλακτικών [113].

Σε 8 μελέτες χρησιμοποιείται η μέθοδος TOPSIS. Αυτή η μέθοδος εντοπίζει την καλύτερη εναλλακτική λύση υπολογίζοντας τη γεωμετρική απόσταση κάθε εναλλακτικής από την ιδανική και την χειρίστη λύση. Η εναλλακτική που είναι πιο κοντά στην ιδανική λύση και πιο μακριά από τη χειρίστη λύση θεωρείται η καλύτερη. Μια ακόμη μέθοδος για την επίλυση προβλημάτων λήψης αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια είναι η VIKOR, ο στόχος της οποίας είναι να εντοπίσει μια συμβιβαστική λύση που επιτυγχάνει ισορροπία μεταξύ του μέγιστου οφέλους και του ελάχιστου κόστους. Η VIKOR συνδυάζει στοιχεία από τις μεθόδους TOPSIS και WSM, λαμβάνοντας υπόψη τις καλύτερες και χειρότερες επιδόσεις.

Άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν σπάνια στις KM είναι η Έξυπνη Αναζήτηση (Smart Search) για την εύρεση της βέλτιστης λύσης, στατιστική ανάλυση και ανάλυση πιθανοτήτων, σταδιακό φιλτράρισμα των λύσεων του συνόλου Pareto, η συνάρτηση επιθυμητότητας και η μέθοδος ασαφούς λήψης αποφάσεων (fuzzy DM).

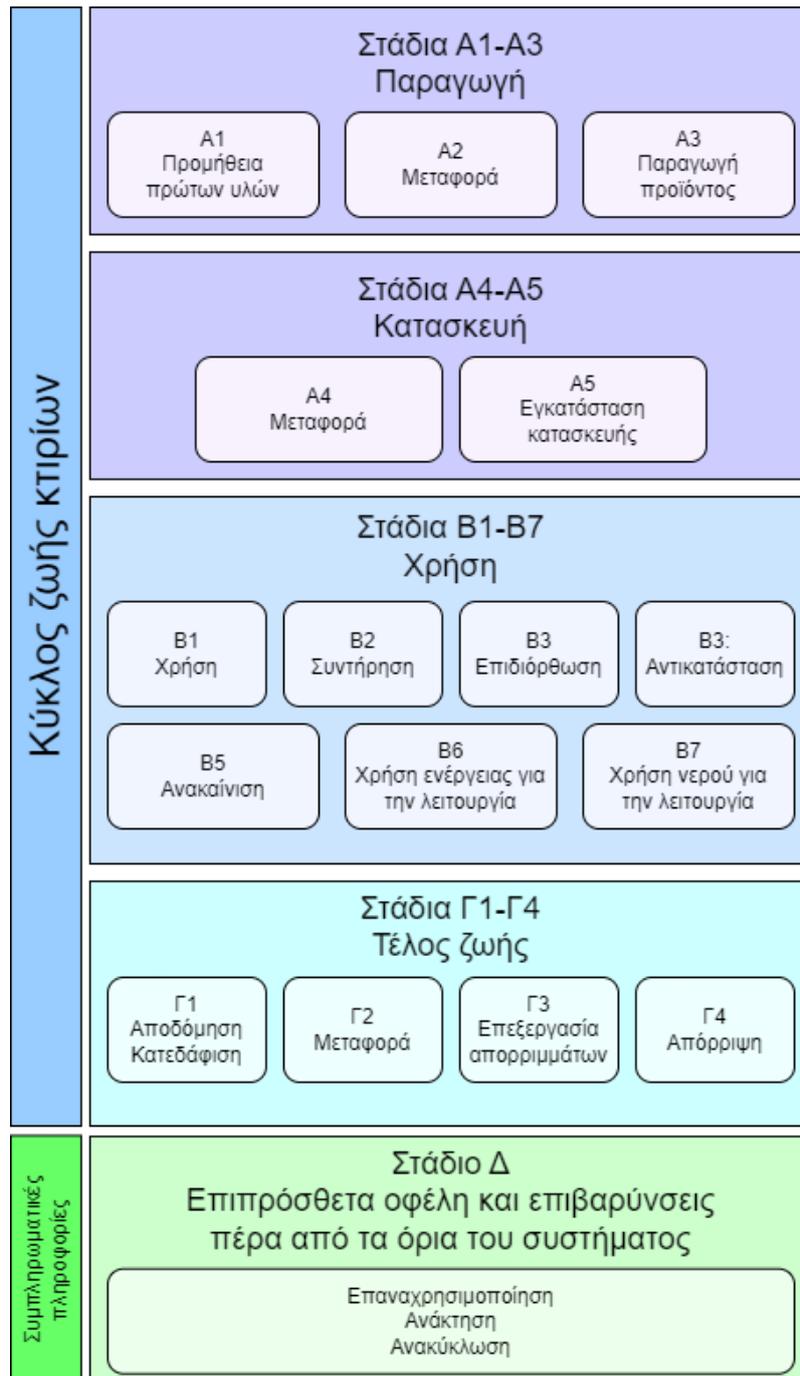


Εικόνα 13. Μέθοδοι κατάταξης μετώπου Pareto

4.2.6 Ανάλυση κύκλου ζωής

Παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση των μελετών που εφαρμόζουν μεθόδους ανάλυσης του κύκλου ζωής. Μεταξύ των ΚΜ βρίσκονται 6 μελέτες που εξετάζουν την ενέργεια σε διαφορετικά στάδια του κύκλου ζωής, 28 μελέτες που υπολογίζουν το κόστος κύκλου ζωής και 16 μελέτες που συμπεριλαμβάνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κύκλου ζωής ως στόχους της βελτιστοποίησης. Σχετικές συναρτήσεις που μελετώνται είναι η ενσωματωμένη ενέργεια και η ενέργεια κύκλου ζωής, οι αντίστοιχες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, ο δείκτης υπερθέρμανσης του πλανήτη, το αποτύπωμα άνθρακα κύκλου ζωής και άλλοι δείκτες όπως το κόστος φυσικών πόρων, η οικοτοξικότητα, η δημιουργία αιθαλομίχλης, η οξύνιση και ο ευτροφισμός. Η ενσωματωμένη ενέργεια αναφέρεται στη συνολική ενέργεια που παράγεται κατά την παραγωγή, μεταφορά και συναρμολόγηση ενός προϊόντος ή συστήματος. Περιλαμβάνει την ενέργεια που καταναλώνεται στην εξόρυξη πρώτων υλών, την κατασκευή και άλλες διαδικασίες που δεν σχετίζονται άμεσα με την λειτουργία του κτιρίου. Αντίστοιχα, οι ενσωματωμένες εκπομπές αερίων αντιπροσωπεύουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά την διάρκεια αυτών των διαδικασιών. Φυσικά μελετώνται κόστη διαφορετικών σταδίων του κύκλου ζωής, όπως το αρχικό κόστος επένδυσης, το λειτουργικό κόστος, το κόστος συντήρησης, το κόστος αντικατάστασης και η αξία υπολοίπου. Διαφορετικοί συνδυασμοί αυτών μπορεί να συμμετέχουν στον υπολογισμό του κόστους κύκλου ζωής ή άλλου συνολικού κόστους, συνήθως με εφαρμογή της μεθόδου καθαρής παρούσας αξίας.

Πιο συγκεκριμένα, τα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής ενός κτιρίου φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 14. Στάδια κύκλου ζωής κτιρίων

Σύμφωνα με τους Ascione κ.α. [109], το ενδιαφέρον για διαφορετικές φάσεις του κύκλου ζωής αυξάνεται καθώς εφαρμόζονται περισσότερες ενεργειακές αναβαθμίσεις κτιρίων που μειώνουν τις ανάγκες κατανάλωσης ενέργειας λειτουργίας και άρα αυξάνουν το μερίδιο της ενσωματωμένης ενέργειας,

4.2.7 Αναβάθμιση σε μεγαλύτερες κλίμακες και ανάλυση χρονικότητας

Σε γενικές γραμμές, η μελέτη, ανάλυση και υλοποίηση αναβαθμίσεων κτιρίων σε μεγάλες κλίμακες είναι δύσκολη, ειδικά σε αναπτυσσόμενες χώρες όπου οικονομικοί περιορισμοί συχνά αποτελούν τροχοπέδη. Παρ' αυτά, σημειώθηκε αύξηση αυτών των μελετών τα τελευταία χρόνια. Οι [114] παρουσιάζουν μια μεθοδολογία για την αξιολόγηση προγραμμάτων ενεργειακής ανακαίνισης μεγάλης κλίμακας στην Ιταλία, συμπεριλαμβάνοντας οικονομικά βέλτιστα μέτρα αναβάθμισης και φωτοβολταϊκά συστήματα με σκοπό την επίτευξη κτιρίων μηδενικής κατανάλωσης. Έλαβαν υπόψη την ποικιλομορφία των κτιρίων όσον αφορά το μέγεθος, την ηλικία και την τοποθεσία τους. Το συμπέρασμα τους ήταν ότι τα προγράμματα αναβάθμισης μεγάλης κλίμακας απαιτούν σημαντικές επενδύσεις, τη συμμετοχή της κυβέρνησης και ευνοϊκές πολιτικές για την ενθάρρυνση προγραμμάτων ενεργειακής αποδοτικότητας. Η μελέτη [99] επικεντρώνεται σε 27 κτίρια ΜΚΟ στο Ντελαγουέρ των ΗΠΑ, για τα οποία αναπτύσσει ένα έξυπνο σύστημα για την λήψη αποφάσεων επενδύσεων προς την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, λαμβάνοντας υπόψη οικονομικούς περιορισμούς. Αναλύονται τρεις περιπτώσεις με διαφορετικές προτιμήσεις στόχων, αποκαλύπτοντας βέλτιστες στρατηγικές ανακαίνισης για τις περισσότερες ΜΚΟ. Οι Manjarres κ. α. [115] εξέτασαν αρχικά την αναβάθμιση με στόχο την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και του κόστους επένδυσης μεμονωμένων κτιρίων. Ύστερα, έκαναν βελτιστοποίηση σε επίπεδο συνοικίας, με στόχο την μείωση του δείκτη υπερθέρμανσης και της περιόδου αποπληρωμής. Σημειώνεται όμως ότι μόνο η πρώτη βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε με ΓΑ, ενώ η δεύτερη έγινε με χρήση του αλγόριθμου MOHS. Οι Pannier κ.α. [116] πραγματοποίησαν ανάλυση σε ένα εικονικό χαρτοφυλάκιο κοινωνικής στέγασης στην περιοχή του Παρισιού. Η αναβάθμιση αφορούσε το περίβλημα και τα συστήματα εφτά κτιρίων με διαφορετική μορφολογία και ενεργειακή κλάση.

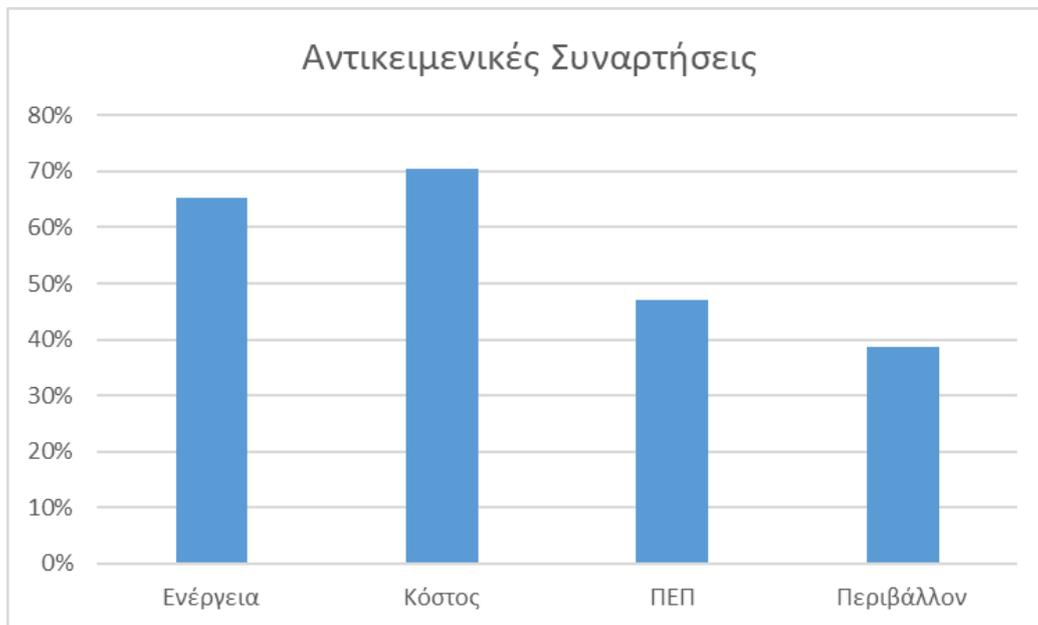
Νέα τάση που παρατηρήθηκε στις ΚΜ είναι η ανάλυση της χρονικότητας. Στην ίδια μελέτη [116], αν και δεν χρησιμοποιούνται μεταβλητές απόφασης σχετικές με την χρονικότητα, παρέχεται μια ευέλικτη μέθοδος, για ιδιοκτήτες χαρτοφυλακίου ακινήτων με μακροπρόθεσμους περιορισμούς χρηματοδότησης αναβάθμισης, που επιτρέπει να καθορίζονται ο τύπος δράσης προς εκτέλεση, ο τύπος κτιρίου προς αναβάθμιση και ο χρονικός σχεδιασμός. Η στατιστική ανάλυση των βέλτιστων λύσεων υποδεικνύει τις δράσεις με μεγαλύτερη προτεραιότητα. Οι Merlet κ.α. [117] υποστηρίζουν πως η σταδιοποίηση των εργασιών στις στρατηγικές αναβάθμισης πολλαπλών κτιρίων έχει ως στόχο να πλησιάσει την πρακτική του πραγματικού κόσμου. Εφάρμοσαν μια στρατηγική σταδιακής αναβάθμισης σε μια μικρή ομάδα τριών συγκροτημάτων κοινωνικής στέγασης στο Παρίσι. Συγκεκριμένα εξέτασαν τόσο την στρατηγική αναβάθμισης με σειριακή μέθοδο (sequencing), όπου μία

εργασία εκτελείτε ανά περίοδο, όσο και την κατανομή τους σε φάσεις (phasing), όπου πάνω από μία εργασία μπορεί να εκτελεστεί ανά περίοδο. Ανακάλυψαν ότι η σταδιοποίηση οδηγεί σε διαφορετικές βέλτιστες στρατηγικές σε σύγκριση με τη βασική αναβάθμιση, με τις στρατηγικές αναβάθμισης στη σταδιακή βελτιστοποίηση συνήθως να επιτυγχάνουν καλύτερη απόδοση όσον αφορά την υπερθέρμανση, αλλά χειρότερα αποτελέσματα κατά μέσο όρο στο κόστος και τις ανάγκες θέρμανσης. Εντός του ίδιου πλαισίου, οι Zuhair και Goggins [118] βρήκαν ότι σταδιακές αναβαθμίσεις δεν μπόρεσαν να επιτύχουν το επιθυμητό αποτέλεσμα κτιρίου nZEB και ότι η αναβάθμιση ενός σταδίου οδήγησε σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 60% και αύξηση του επιπέδου θερμικής άνεσης κατά 38% σε σύγκριση με την αναβάθμιση σε δύο στάδια.

4.3

Αντικειμενικές συναρτήσεις

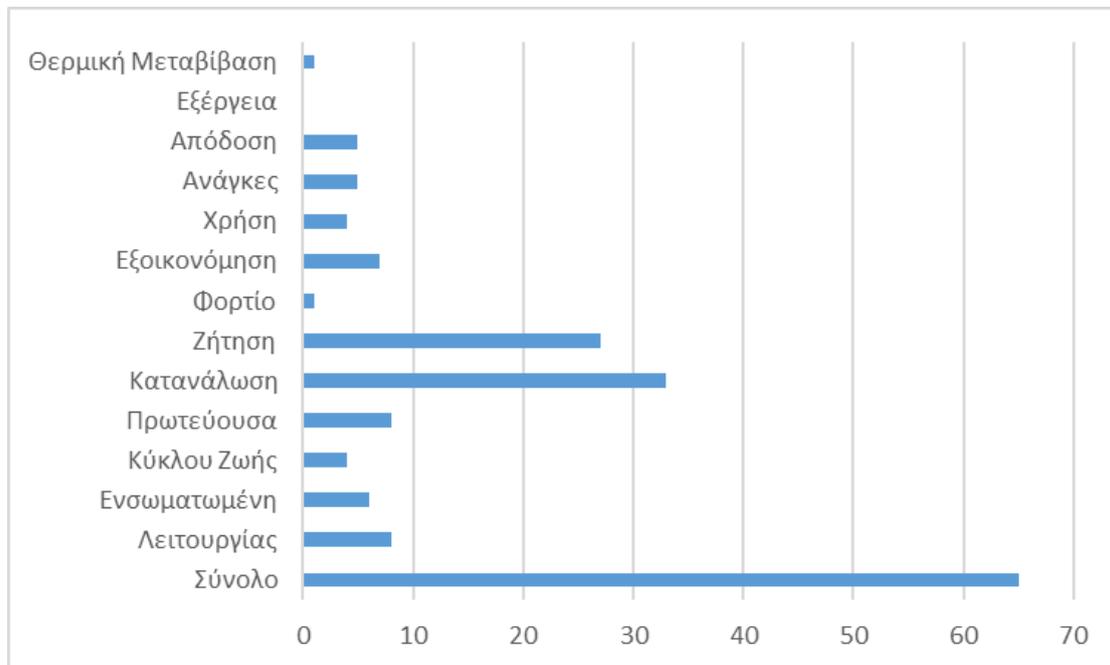
Οι αντικειμενικές συναρτήσεις είναι τα κριτήρια τα οποία επιδιώκουμε να βελτιστοποιήσουμε με τον αλγόριθμο. Στις μελέτες που ερευνήθηκαν βρέθηκαν αντικειμενικές συναρτήσεις που ανήκουν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες, όπως φαίνεται παρακάτω. Οι συναρτήσεις σχετικές με την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος της ανακαίνισης είναι οι πιο συχνές, με αυτές που αφορούν την ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος και τις επιπτώσεις στο περιβάλλον να ακολουθούν.



Εικόνα 15. Αντικειμενικές συναρτήσεις

4.3.1 Ενέργεια

Αντικειμενικές συναρτήσεις που αφορούν την ενέργεια είναι από τις πιο συνήθεις στη βιβλιογραφία, καθώς παρατηρούνται στο 65% των μελετών. Συνήθως γίνεται αναφορά σε έναν από τους παρακάτω όρους: Κατανάλωση Ενέργειας, Ζήτηση Ενέργειας, Ενεργειακό Φορτίο, Εξοικονόμηση Ενέργειας, Χρήση Ενέργειας, Ενεργειακές Ανάγκες και Ενεργειακή Απόδοση. Σε λίγες περιπτώσεις, γίνεται ο διαχωρισμός σε Ενέργεια Λειτουργίας ή Ενσωματωμένη Ενέργεια, συνήθως στα πλαίσια Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Η Ενέργεια Κύκλου Ζωής χρησιμοποιείται σε μόλις τρεις μελέτες, ενώ η Πρωτογενής Ενέργεια συναντιέται σε οχτώ. Τέλος, σε μία μελέτη χρησιμοποιείται ο Συντελεστής Ολικής Θερμικής Μεταβίβασης ως κριτήριο βελτιστοποίησης.

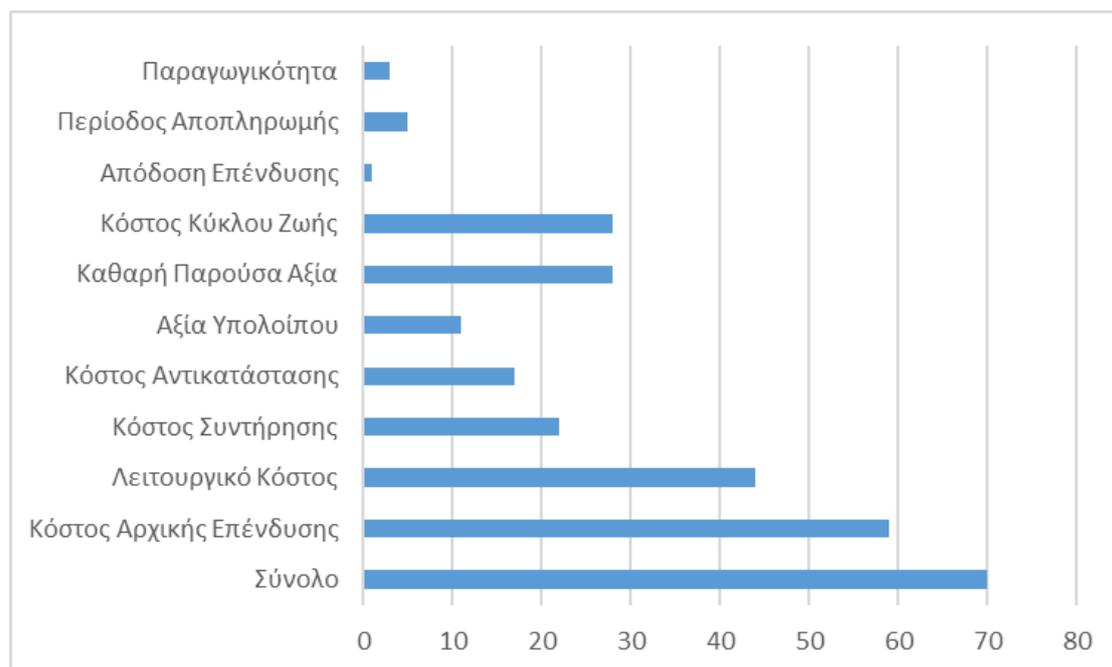


Εικόνα 16. Αντικειμενικές συναρτήσεις - Ενέργεια

4.3.2 Κόστος

Το κόστος της ανακαίνισης είναι η πιο συνηθισμένη κατηγορία αντικειμενικών συναρτήσεων με 70% των μελετών να έχουν κάποιο από τα παρακάτω οικονομικά κριτήρια. Η σημασία της επίτευξης οικονομικά εφικτών λύσεων για την αναβάθμιση κτιρίων είναι εμφανής. Συγκεκριμένα, το πιο σύνηθες κριτήριο είναι το Κόστος Αρχικής Επένδυσης, με το Λειτουργικό Κόστος να ακολουθεί. Συχνά, χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με το Κόστος Συντήρησης, το Κόστος Αντικατάστασης ή και την Αξία Υπολοίπου για τον υπολογισμό του αθροίσματος του Κόστους Κύκλου Ζωής ή άλλου συνολικού κόστους. Σύμφωνα με τους

Aliabadi κ.α. [98], η χρονική αξία του χρήματος μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας τρεις δείκτες: την παρούσα αξία του κόστους με συντελεστές έκπτωσης μελλοντικών δαπανών, το κόστος με αναγωγή σε ετήσια βάση και την περίοδο αποπληρωμής, δηλαδή τα έτη για τον εξόφληση του αρχικού κόστους ανακαίνισης του κτιρίου από τα ετήσια κέρδη λόγω εξοικονόμησης καυσίμων και ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συχνή είναι η χρήση της μεθόδου της Καθαρής Παρούσας Αξίας, ενώ πιο σπάνια συναντάμε τα κριτήρια της Περιόδου Αποπληρωμής, της Απόδοσης Επένδυσης και της Παραγωγικότητας.



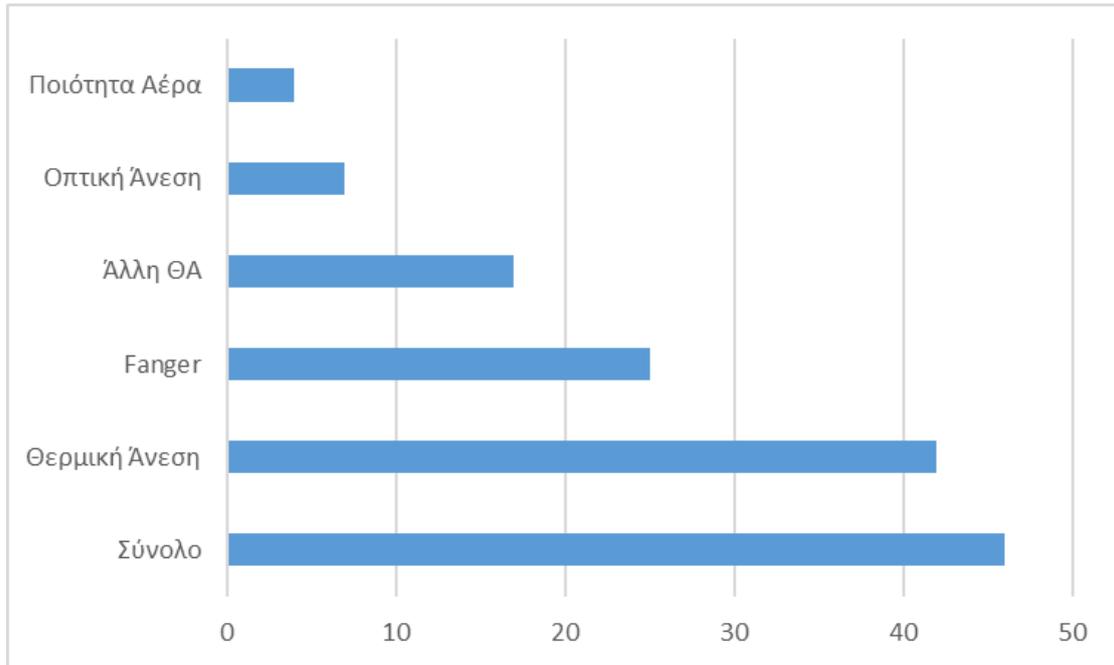
Εικόνα 17. Αντικειμενικές συναρτήσεις - Κόστος

4.3.3 Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος

Η ΠΕΠ των κατοίκων του κτιρίου αξιολογείτε στο 47% των μελετών.

43% χρησιμοποιούν την Θερμική Άνεση ως αντικειμενική συνάρτηση. Οι πλειοψηφία αυτών των μελετών εφαρμόζουν το μοντέλο του Fanger για τον υπολογισμό της Θερμικής Άνεσης, κάνοντας χρήση των δεικτών PMV και PPD, ενώ σε λιγότερες γίνεται χρήση της προσαρμοστικής άνεσης, του δείκτη θερινής άνεσης Isum, της σταθερότητας θερμοκρασίας ή υπολογισμός βαθμοημερών υπερθέρμανσης.

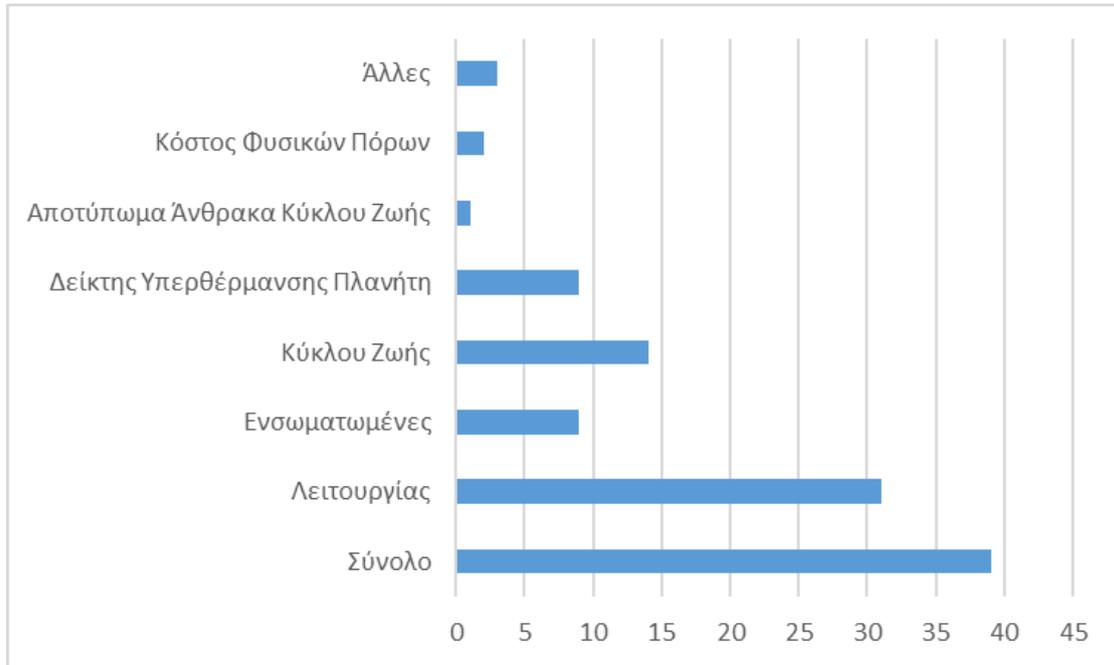
Άλλοι δείκτες της ΠΕΠ που διερευνώνται σε λιγότερες μελέτες είναι η Οπτική Άνεση και η Ποιότητα Αέρα με βάση την συγκέντρωση CO₂.



Εικόνα 18. Αντικειμενικές συναρτήσεις – Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος

4.3.4 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις χρησιμοποιούνται άμεσα ως κριτήριο της βελτιστοποίησης στο 39% των μελετών. Παρ' όλα αυτά, δεν μπορούμε να αγνοήσουμε το γεγονός ότι η εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την ενέργεια που καταναλώνετε κατά την λειτουργία του κτιρίου. Για αυτό τον λόγο, οι ερευνητές αποφεύγουν την παράλληλη χρήση των συναρτήσεων αυτών. Συνήθως, υπολογίζονται οι Εκπομπές Λειτουργίας, αλλά σε αρκετές μελέτες έχουμε Ανάλυση Κύκλου Ζωής. Σχετικές συναρτήσεις είναι οι Εκπομπές Κύκλου Ζωής, οι Ενσωματωμένες Εκπομπές, ο Δείκτης Υπερθέρμανσης του Πλανήτη και το Αποτύπωμα Άνθρακα Κύκλου Ζωής. Δείκτες που δεν αφορούν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου εξετάζονται με μικρότερη συχνότητα: Το Κόστος Φυσικών Πόρων, συγκεκριμένα η εξοικονόμηση νερού χρησιμοποιείται σε δύο μελέτες. Οι [113] Mostafazadeh κ.α. χρησιμοποίησαν μία συνάρτηση, για την περιβαλλοντική απόδοση του κτιρίου, που αποτελείται από ένα σταθμισμένο άθροισμα δύο δεικτών, έναν για τις εκπομπές διοξειδίου και έναν για την κατανάλωση νερού. Οι [119] Motaghian κ.α. μελέτησαν την κατανάλωση νερού στις μονάδες ψύξης σε συνδυασμό με την απαιτούμενη περίοδο αποπληρωμής. Τρεις μελέτες διερευνούν συνδυασμό διάφορων περιβαλλοντικών δεικτών.



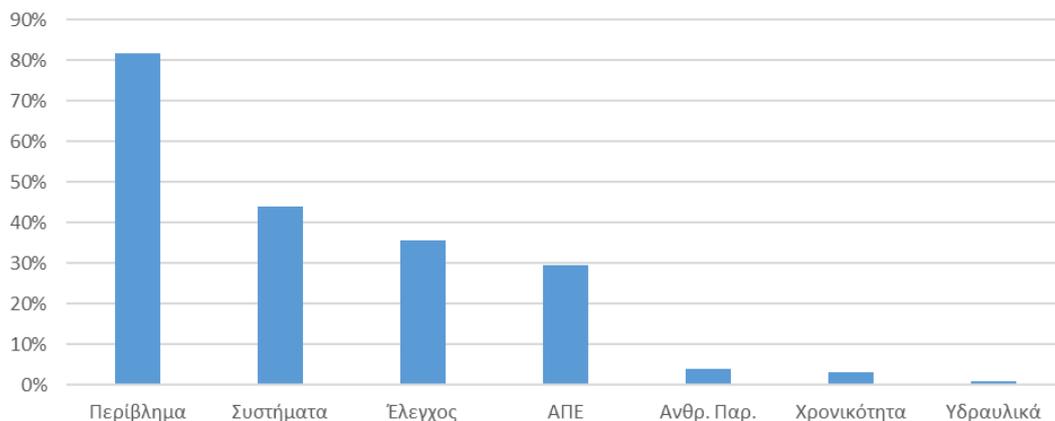
Εικόνα 19. Αντικειμενικές συναρτήσεις – Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

4.3.5 Περιορισμοί

Οι περιορισμοί που καταγράφηκαν αφορούν κριτήρια και στόχους όπως οι αντικειμενικές συναρτήσεις. Θεωρήθηκε σκόπιμο για οικονομία χώρου να μην συμπεριληφθούν οι περιορισμοί μεταβλητών απόφασης στους καταλόγους. Ως εκ τούτου, οι περισσότερες μελέτες δεν εφαρμόζουν βελτιστοποίηση με περιορισμούς. Οι περισσότεροι περιορισμοί αφορούν οικονομικούς παράγοντες, όπως ο προϋπολογισμός. Ακολουθούν περιορισμοί που αφορούν την ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος, κυρίως στόχους θερμικής άνεσης, περιορισμοί ενεργειακής κατανάλωσης ή εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και σπανιότερα την συντήρηση διατηρητέων κτιρίων

4.4 Μεταβλητές απόφασης

Οι μεταβλητές απόφασης είναι τα μέτρα που εξετάζονται για την αναβάθμιση των κτιρίων. Εισάγονται στον ΓΑ ως γονίδια, δηλαδή μεταβλητές οι συνδυασμοί των οποίων αποτελούν τις λύσεις του προβλήματος της βελτιστοποίησης. Οι κατηγορίες μεταβλητών που παρατηρήθηκαν στις ΚΜ παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 20. Μεταβλητές απόφασης

4.4.1 *Περιβλημα του κτιρίου*

Μεταβλητές που σχετίζονται με το περίβλημα του κτιρίου χρησιμοποιούνται στην πλειοψηφία των μελετών (82%).

Συγκεκριμένα, παρατηρούνται διάφορες μεταβλητές για τα αδιαφανή τμήματα του περιβλήματος, όπως οι εξωτερικοί και οι εσωτερικοί τοίχοι, οι προσόψεις, η στέγη, τα ταβάνια, τα πατώματα, το υπόγειο και η πλάκα, αλλά και για σοφίτες, κοιλότητες ανάμεσα σε τοίχους και χώρους αποθήκευσης. Τέτοιες μεταβλητές συχνά αφορούν το υλικό, το πάχος, το πλάτος, την τιμή της θερμοπερατότητας ή της θερμικής αντίστασης της μόνωσης. Άλλες μεταβλητές αφορούν τις στρώσεις φινιρίσματος, συνήθως της οροφής, την εσωτερική ή εξωτερική επένδυση και την βαφή τοίχων που επηρεάζουν την απορροφητικότητα, την ανακλαστικότητα, το συντελεστή εκπομπής και τη λευκαύγεια. Σπάνια, εξετάζεται η τοποθέτηση επιπλέον στρωμάτων από σκυρόδεμα, κούφιο τούβλο ή ξύλο και η αντικατάσταση πορτών.

Όσον αφορά τα διαφανή τμήματα του κτιρίου, εξετάζονται συνήθως τα παράθυρα, το υλικό του πλαισίου, ο τύπος υαλοπίνακα, ο αριθμός τζαμιών, το αέριο κενού και η επίστρωση χαμηλής εκπομπής, γενικότερα η θερμοπερατότητα, ο συντελεστής σκίασης, ο συντελεστής θερμικού κέρδους και ο ηλιακός συντελεστής. Συχνά βλέπουμε μεταβλητές σχετικές με το μέγεθος του παράθυρου και την αναλογία παράθυρου προς τοίχου (Wall-Window Ratio, WWR). Λίγες μελέτες ελέγχουν υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials, PCM) και παράθυρα με βιοαντιδραστήρα μικροφύκων.

Επίσης, παρατηρούνται συχνά μεταβλητές που αφορούν την σφράγιση του κτιρίου, όπως η αεροστεγανότητα και ο ρυθμός διείσδυσης αέρα. Σε αρκετές μελέτες εξετάζεται η σκίαση του

κτιρίου με κουρτίνες (εσωτερικές και εξωτερικές), ρολά, προεξοχές, πτερύγια, brise-soleil, ηλιακά ράφια ή πρόσδεγα.

Σε λιγότερες μελέτες ερευνώνται μεταβλητές όπως το κλείσιμο ανοικτών χώρων, τα χαρακτηριστικά του φεγγίτη και ειδικές προσόψεις (πρόσοψη διπλού δέρματος, αεριζόμενη πρόσοψη).

4.4.2 Αναβάθμιση συστημάτων

Μεταβλητές που σχετίζονται με την αναβάθμιση συστημάτων του κτιρίου παρατηρούνται στο 44% των μελετών. Είναι λογικό να εξετάζονται λιγότερα συχνά από μεταβλητές σχετικές με το περιβάλλον του κτιρίου, καθώς μπορούν να αντικατασταθούν με μεγαλύτερη ευκολία [100]. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αφορούν την αναβάθμιση του συστήματος ΘΨΚ με επένδυση σε πιο αποδοτικές εναλλακτικές όπως καλύτερης απόδοσης αντλίες θερμότητας και λέβητες, καλύτερο σύστημα ψύξης, βελτίωση του συστήματος εξαερισμού και ανάκτησης θερμότητας. Συνάμα, εξετάζονται μεταβλητές σχετικές με το σύστημα ZNX και η αποδοτικότητα του συστήματος φωτισμού και λοιπών ηλεκτρικών συσκευών.

4.4.3 Συστήματα ελέγχου του κτιρίου

Μεταβλητές σχετικές με συστήματα ελέγχου του κτιρίου παρατηρούνται στο 36% των μελετών. Συνήθως αφορούν μεταβλητές ελέγχου του συστήματος ΘΨΚ του κτιρίου, όπως τα σημεία ρύθμισης της θερμοκρασίας για την θέρμανση και την ψύξη, οι περίοδοι προθέρμανσης-πρόψυξης, η ζώνη αδρανείας και τα σημεία ρύθμισης αφύγρανσης. Επίσης, για τον έλεγχο του εξαερισμού εξετάζεται ο ρυθμός αλλαγής του αέρα και τα προγράμματα νυχτερινού εξαερισμού. Άλλες μεταβλητές αφορούν τον έλεγχο του συστήματος φωτισμού και τον έλεγχο του συστήματος σκίασης. Σε μία περίπτωση εξετάζεται ο έλεγχος του φορτίου.

4.4.4 Συστήματα ΑΠΕ

Μεταβλητές σχετικές με συστήματα ΑΠΕ εξετάζονται στο 30% των περιπτώσεων. Συνήθως, αφορούν την επένδυση σε συστήματα φωτοβολταϊκών και ηλιακών συλλεκτών, με μεταβλητές για τον αριθμό, το μέγεθος, τον τύπο και την κλίση των πάνελ. Μόνο δύο μελέτες ερευνούν την εφαρμογή ανεμογεννήτριας.

4.4.5 Άλλες μεταβλητές απόφασης

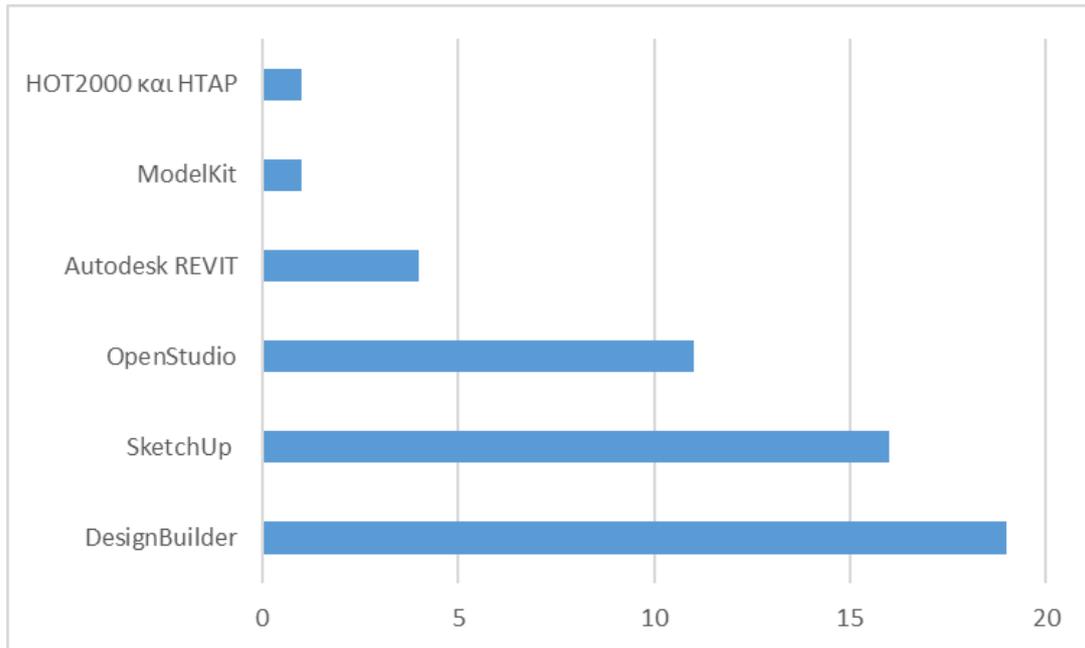
Υπάρχουν ακόμα τρεις κατηγορίες μεταβλητών οι οποίες παρατηρούνται λίγες φορές στην βιβλιογραφία. Σε τρεις μελέτες έχουμε μεταβλητές που αφορούν τον ανθρώπινο παράγοντα, συμπεριφορές όπως το άνοιγμα και κλείσιμο παράθυρων και πορτών, το επίπεδο δραστηριότητας των κατοίκων και το επίπεδο ενδυμασίας. Επίσης, στην [120] εξετάστηκαν τρία διαφορετικά μοντέλα συμπεριφοράς κατοίκων: ένα στατικό, ένα πιθανολογικό και ένα προσαρμοστικό. Σε τρεις μελέτες [116], [117], [118] εξετάζεται η χρονικότητα, δηλαδή οι φάσεις επενδύσεων και η σειρά που ολοκληρώνονται η αναβαθμίσεις του κτιρίου. Τέλος, σε μία μελέτη [113] έχουμε μεταβλητές που αφορούν τα υδραυλικά, συγκεκριμένα την αντικατάσταση των βρυσών της τουαλέτας, του μπάνιου και της κουζίνας για μεγαλύτερη εξοικονόμηση νερού.

4.5 Εργαλεία και λογισμικό

4.5.1 Εργαλεία σχεδίασης και προσομοίωσης κτιρίων

Τα εργαλεία σχεδίασης και προσομοίωσης κτιρίων είναι μέσα που επιτρέπουν στους μελετητές να εξερευνήσουν και να αξιολογήσουν διάφορες επιλογές για την αναβάθμιση των κτιρίων. Επιτρέπουν την προσομοίωση της απόδοσης του κτιρίου, προσφέροντας ένα εικονικό περιβάλλον για ανάλυση και αξιολόγηση. Η προσομοίωση δίνει την δυνατότητα δυναμικής ανάλυσης της κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου, του συστήματος ΘΨΚ και της θερμικής άνεσης των κατοίκων. Σημαντική είναι η δυνατότητα διαχωρισμού των χώρων του κτιρίου σε διαφορετικές θερμικές ζώνες για την ικανοποιητική μελέτη της συμπεριφοράς των εξεταζόμενων αλλαγών. Παράμετροι που καθορίζονται στο στάδιο της προσομοίωσης είναι τα γεωμετρικά στοιχεία του κτιρίου, τα χαρακτηριστικά των συστημάτων του, το κλίμα που επικρατεί, η θερμοκρασία κάθε ζώνης του κτιρίου, ο αριθμός των κατοίκων, το ποσοστό πληρότητας, το χρονοδιάγραμμα συστημάτων, το φορτίο του ηλεκτρικού εξοπλισμού και άλλα στοιχεία για την επικύρωση του μοντέλου, όπως η τελική κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη. Παρακάτω βλέπουμε τα εργαλεία σχεδίασης και προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται στις ΚΜ:

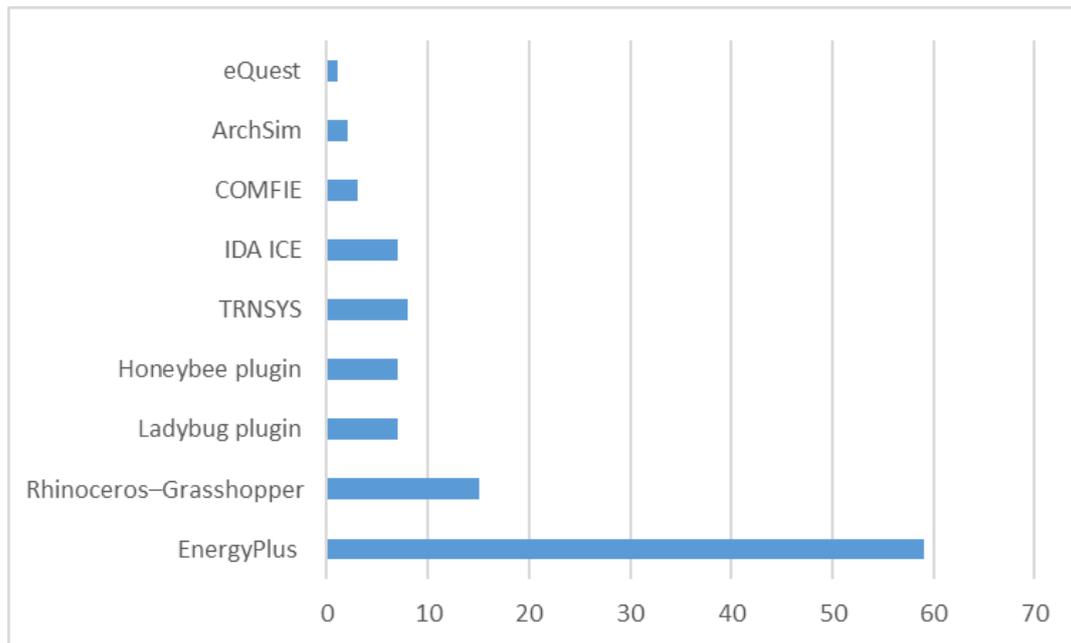
4.5.1.1 Εργαλεία σχεδίασης



Εικόνα 21. Εργαλεία σχεδίασης

- DesignBuilder (19 μελέτες)
- SketchUp (16) σε συνδυασμό με το plugin του OpenStudio (11) για προβολή και επεξεργασία 3D μοντέλων
- Autodesk REVIT (4)
- ModelKit (1)
- HOT2000 και HTAP (1)

4.5.1.2 Εργαλεία προσομοίωσης



Εικόνα 22. Εργαλεία προσομοίωσης

- EnergyPlus (59)
- Grasshopper σε συνδυασμό με το Rhinoceros 3D (15) και τα plugins Honeybee (7) και Ladybug (7). Συνδέεται με το EnergyPlus απευθείας ή μέσω του OpenStudio.
- TRNSYS (8)
- IDA ICE (7)
- COMFIE (3)
- ArchSim (2)
- eQuest (1)

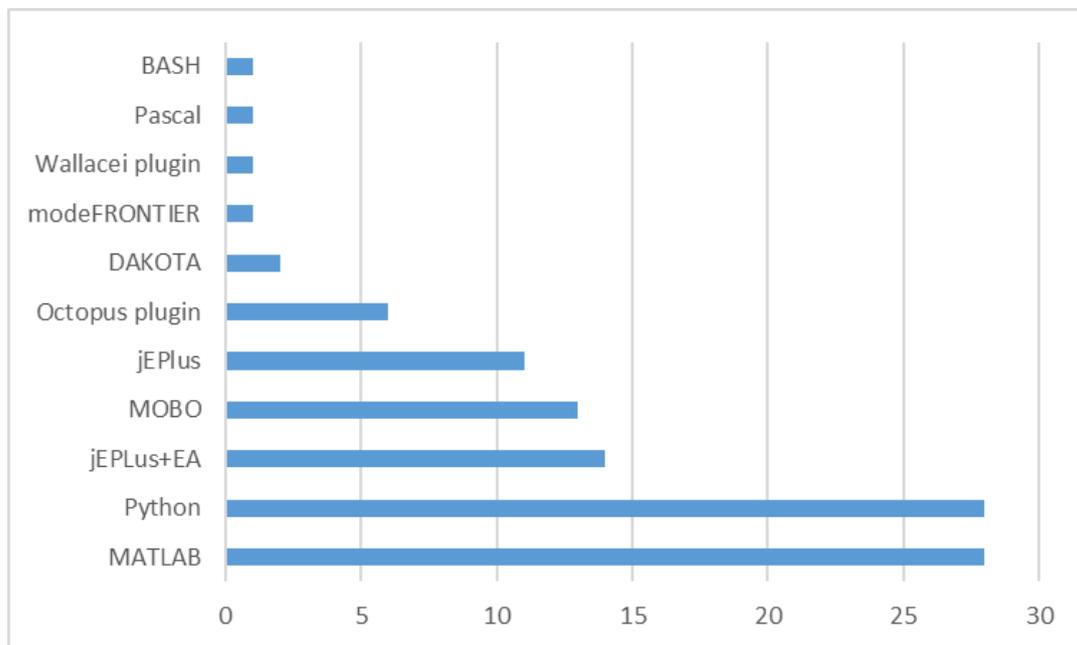
Μόνο τρεις μελέτες κάνουν χρήση στατικής προσομοίωσης, συγκεκριμένα οι Montana κ.α. [121] με το εργαλείο Be18 σε συνδυασμό με πρόγραμμα Python και οι Galimshina κ.α. [122], [123] με ημιστατικό υπολογισμό της θερμικής ζήτησης. Από την άλλη, οι Mohtashami κ.α. [124] εφάρμοσαν ένα δυναμικό μοντέλο αντίστασης-χωρητικότητας.

Για την προσομοίωση του φωτισμού χρησιμοποιείτε συνήθως το λογισμικό RADIANCE – DAYSIM και το πρόσθετο DIVA-for-Rhino για το Rhino-Grasshopper, που εκτελεί θερμικές, ημερήσιες, προσομοιώσεις ηλιακής ακτινοβολίας και λάμψης.

Για την προσομοίωση καιρικών φαινομένων αναφέρεται η χρήση των εργαλείων METEONORM, CCWorldWeatherGen και Vertical City Weather Generator.

4.5.2 Εργαλεία βελτιστοποίησης

Τα εργαλεία βελτιστοποίησης επιτρέπουν την εφαρμογή αλγορίθμων και τεχνικών για την αποδοτική διερεύνηση και ισορροπημένη επιλογή λύσεων σε προβλήματα αναβάθμισης κτιρίων. Με αυτά υλοποιούνται ο ΓΑ, οι εξομοιωτές, διεπαφές με τα εργαλεία σχεδίασης και προσωμοίωσης, ανάλυση ευαισθησίας, ανάλυση δεδομένων και άλλου είδους αναλύσεις και βελτιστοποιήσεις. Παράμετροι που καθορίζονται στο στάδιο αυτό είναι οι παράμετροι του αλγόριθμου και του εξομοιωτή, οι μεταβλητές απόφασης, οι αντικειμενικές συναρτήσεις και οι περιορισμοί τους. Παρακάτω βλέπουμε τα εργαλεία βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται στις ΚΜ:



Εικόνα 23. Εργαλεία Βελτιστοποίησης

- MATLAB (28)
- Python (28) με εφαρμογές σε διάφορα στάδια της βελτιστοποίησης μέσω διαφορετικών πακέτων βιβλιοθήκης:
 - PyTorch, scikit-learn και TensorFlow για Μηχανική Μάθηση
 - KerasTuner για βελτιστοποίηση υπερπαραμέτρων, rygmo για μεγάλης κλίμακας παράλληλη βελτιστοποίηση
 - eppy ως γλώσσα σεναρίων για αρχεία idf του EnergyPlus
 - Platypus και DEAP για εξελικτικούς αλγόριθμους, Geatpy για ΓΑ
 - pandas για ανάλυση δεδομένων
 - NumPy για υποστήριξη μεγάλων πολυδιάστατων πινάκων
 - allpairs για την δημιουργία συνδυασμών

- SALib για ανάλυση ευαισθησίας
- jEPlus (11) και jEPlus+EA (14)
- MOBO (13)
- Το πρόσθετο Octopus του Grasshopper για την εκτέλεση ΓΑ με SPEA2 + HyrE (6), και το Wallacei που λειτουργεί ως εξελικτική γεννήτρια (1)
- DAKOTA (2)
- modeFRONTIER (1)
- Άλλες γλώσσες προγραμματισμού χρησιμοποιούνται λιγότερο συχνά, όπως η Pascal (1) και η BASH (1).

Ακολουθούν άλλα εργαλεία η χρήση των οποίων σημειώθηκε. Σε 7 μελέτες χρησιμοποιείται το MS Excel για οπτικό προγραμματισμό, στατιστική ανάλυση και μετα-επεξεργασία. Σε μια μελέτη επίσης εφαρμόζεται το IBM SPSS για στατιστική. Τρεις μελέτες χρησιμοποιούν το λογισμικό SimLab για την εκτέλεση της ανάλυσης ευαισθησίας. Στην [96] χρησιμοποιήθηκε το πακέτο στατιστικού λογισμικού Design-Expert για την υλοποίηση του μοντέλου πρόβλεψης της τελικής κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών του κτιρίου. Το πρόσθετο Colibri του Toolbox του Rhino-Grasshopper βοηθά την επανάληψη για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μιας σειράς εισόδων και συγκεντρώνει τα αποτελέσματα σε ένα CSV αρχείο με τις τιμές των εισόδων και εξόδων για κάθε επανάληψη. Στην [125] εφαρμόζεται το εργαλείο ανάλυσης ενεργειακών συστημάτων EnergyPLAN . Για την ανάλυση κύκλου ζωής, χρησιμοποιούνται τα εργαλεία LCAbyg, EQUER του Pleiades και Athena Impact Estimator. Για τον υπολογισμό της παραγωγής ενέργειας συστήματος φωτοβολταϊκών χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο PVWatts. Για την πρόβλεψη της ικανότητας ηχομόνωσης σύνθετων στοιχείων κτιρίου, οι Najj κ.α. [126] εκμεταλλεύτηκαν το λογισμικό INSUL.

5

Συμπεράσματα

5.1 Συζήτηση

Στην τρέχουσα εποχή, η επικείμενη ανάγκη για υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών που ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις έχει καταστεί αδιαμφισβήτητη. Το κλειδί στην επίτευξη αυτών των στόχων είναι η αναβάθμιση των υφιστάμενων κτιρίων, χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνολογίες και υλικά. Η χαμηλή ενεργειακή αποδοτικότητα των κτιρίων αποτελεί εμπόδιο στην επίτευξη αυτών των στόχων, αλλά η αποτελεσματική αναβάθμιση μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση ενέργειας, μείωση του κόστους λειτουργίας και βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος. Στο πλαίσιο αυτό, η ενδεδειγμένη ανάλυση των πρόσφατων δημοσιεύσεων που διεξήχθη σε αυτή την εργασία παρέχει ολόπλευρη εικόνα των τεχνολογιών και μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται για την αναβάθμιση κτιρίων, ενώ παράλληλα αποκαλύπτει νέες τάσεις.

Βασικός στόχος ήταν η ανάδειξη του καίριου ρόλου της ΠΒ στην εξεύρεση ισορροπημένων λύσεων για την αναβάθμιση κτιρίων και η εφαρμογή των ΓΑ ως μια ευέλικτη και αποτελεσματική μέθοδος βελτιστοποίησης. Σε τελική ανάλυση, 98 δημοσιεύσεις μελετήθηκαν και τα δεδομένα τους συμπεριλήφθηκαν σε καταλόγους, μαζί με αυτά της συστηματικής ανασκόπησης [7], για εύκολη αναζήτηση στο μέλλον. Ακολουθεί παρουσίαση των βασικών ευρημάτων της εργασίας.

Οι περισσότερες μελέτες αφορούν κατοικίες, ενώ λιγότερες μελέτες αφορούν εμπορικά και δημόσια κτίρια και πολύ λίγες κτίρια άλλης λειτουργίας. Πιο συχνά δημιουργούνται μοντέλα πραγματικών κτιρίων, αλλά η χρήση αρχέτυπων δεν είναι σπάνια, σε αντίθεση με τα απλοποιημένα μοντέλα κτιρίων. Κτίρια σε αναπτυσσόμενες χώρες εξετάζονται σπάνια, αφού το μεγαλύτερο ποσοστό των δημοσιεύσεων αφορά κτίρια σε οικονομικά ανεπτυγμένες χώρες.

Ο ΓΑ που χρησιμοποιείτε πιο συχνά συνεχίζει να είναι ο NSGA-II, είτε ως έχει είτε με παραλλαγές με ενεργό αρχείο ή και παράλληλο προγραμματισμό. Ο πληθυσμός του ΓΑ είναι συνήθως 100 άτομα. Χρησιμοποιείται συνήθως μεγάλος ρυθμός διασταύρωσης και μικρός ρυθμός μετάλλαξης. Η επιλογή γίνεται κυρίως μέσω τουρνουά και το πιο σύνηθες κριτήριο τερματισμού είναι ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός γενεών, πιο συχνά στις 100 γενιές. Συχνά χρησιμοποιούνται εξομοιωτές, όπως οι ANN και Kriging, σε συνδυασμό με τον ΓΑ, ειδικά σε προβλήματα που απαιτούν πολλούς υπολογισμούς και προσομοιώσεις. Συνάμα, εφαρμόζονται συχνά διάφορες μέθοδοι ανάλυσης ευαισθησίας και αβεβαιότητας για ποικίλες παραμέτρους, συνήθως για διαφορετικές καιρικές συνθήκες. Χρησιμοποιούνται τεχνικές δειγματοληψίας, όπως η LHS και η SSS, για την ανάπτυξη των υποκατάστατων μοντέλων, για ορισμένες μεθόδους ανάλυσης ευαισθησίας, καθώς και, κατά καιρούς, για τη δημιουργία του αρχικού πληθυσμού των ΓΑ. Η συντριπτική πλειοψηφία των μελετών εκμεταλλεύεται το μέτωπο Pareto. Για την κατάταξη των λύσεων που ανήκουν σε αυτό εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι, με πιο συχνή τη χρήση της συγκεντρωτικής μεθόδου σταθμισμένων αθροισμάτων ή της μεθόδου TOPSIS. Σημειώνονται νέες τάσεις στις πρόσφατες δημοσιεύσεις, όπως η αύξηση των μελετών που εφαρμόζουν ανάλυση κύκλου ζωής, η ανάπτυξη μοντέλων αναβάθμισης κτιρίων για μεγάλες κλίμακες και η μελέτη της χρονικότητας των αναβαθμίσεων.

Όσον αφορά τις αντικειμενικές συναρτήσεις, πιο συχνά μελετιέται το κόστος των επενδύσεων, συνήθως το αρχικό κόστος ή το κόστος λειτουργίας, και ύστερα κριτήρια που αφορούν την κατανάλωση ενέργειας. Πιο σπάνιοι είναι οι στόχοι σχετικοί με την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι μεταβλητές απόφασης που συμμετέχουν πιο συχνά είναι αυτές που αφορούν το περίβλημα του κτιρίου. Σημαντική είναι επίσης η παρουσία μεταβλητών για τα μηχανικά και ενεργειακά συστήματα, τα συστήματα ελέγχου και τα συστήματα ΑΠΕ. Με μικρή συχνότητα, μελετώνται μεταβλητές χρονικότητας, ανθρώπινων παραγόντων και υδραυλικών.

Η δυναμική προσομοίωση είναι η πιο συχνή μέθοδος αξιολόγησης της συμπεριφοράς των κτιρίων. Το λογισμικό EnergyPlus συνεχίζει να χρησιμοποιείται σε συχνή βάση, συνήθως σε συνδυασμό με το εργαλείο σχεδίασης DesignBuilder. Σημαντική είναι η αυξημένη χρήση του λογισμικού Rhinoceros-Grasshopper και των πρόσθετών του τα τελευταία έτη. Όσον αφορά τα εργαλεία βελτιστοποίησης, εξίσου συχνή είναι η ανάπτυξη αλγορίθμων με MATLAB και η χρήση προγραμμάτων Python, με τα jEPlus, jEPlus+EA και MOBO να ακολουθούν. Λίγες μελέτες εφαρμόζουν στατική μέθοδο προσομοίωσης.

Σε γενικές γραμμές, οι δημοσιεύσεις που εξετάστηκαν συμφωνούν ως προς τα πλεονεκτήματα και τις ευεργετικές δυνατότητες των ΓΑ στην βελτιστοποίηση της αναβάθμισης κτιρίων. Εστιάζουμε σε δύο μελέτες [80], [127] όπου γίνεται συστηματική

σύγκριση των ΓΑ και άλλων αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Οι Hernández-Moral κ.α. [127] ανέλυσαν την απόδοση τεσσάρων διαφορετικών εξελικτικών αλγορίθμων (NSGA-II, IHS, MHACO, NSPSO) στην ΠΒ, με βάση τον χρόνο εκτέλεσης, το πλήθος διαφορετικών και βέλτιστων λύσεων και τον υπερ-όγκο του μετώπου Pareto κάθε περίπτωσης. Πραγματοποίησαν βελτιστοποιήσεις με διάφορες τιμές πληθυσμού και γενεών για κάθε αλγόριθμο. Η τελική ανάλυση ανέδειξε τη σπουδαιότητα του NSGA-II για εφαρμογές βελτιστοποίησης: Ο υπερ-όγκος του ήταν πάντα ο μεγαλύτερος, βρίσκει τις περισσότερες βέλτιστες λύσεις και το πλήθος των διαφορετικών λύσεων ήταν υψηλό. Στην [80], αναλύθηκε η απόδοση τεσσάρων στοχαστικών αλγορίθμων ΠΒ που βασίζονται σε πληθυσμούς (NSGA-II, MOPSO, MOSA, ES). Έγιναν 10 διαφορετικές δοκιμές με διαφορετικές τιμές πληθυσμού και γενεών, αλλά σταθερό γινόμενο των δύο για σταθερό αριθμό προσομοιώσεων, συγκεκριμένα 1800 προσομοιώσεις ανά δοκιμή. Έπειτα εξετάστηκαν το μέγεθος του μετώπου Pareto, η ποικιλομορφία των βέλτιστων λύσεων, η εγγύτητα προς το πραγματικό μέτωπο Pareto, η ποιότητα της βέλτιστης λύσης και ο ρυθμός σύγκλισης. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως ο NSGA-II ήταν καλύτερος σε όλους αυτούς τους δείκτες απόδοσης, αλλά ήταν σχετικά πιο ευαίσθητος στις τιμές των παραμέτρων.

Μερικές μελέτες χρησιμοποιούν τόσο μονοκριτηριακές όσο και πολυκριτηριακές μεθόδους βελτιστοποίησης σε διαφορετικά στάδια. Η [106] εφαρμόζει αρχικά μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση για την εξερεύνηση της επίδρασης ακραίων λύσεων και ύστερα ΠΒ για την εύρεση ισορροπημένων λύσεων. Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν περισσότεροι περιορισμοί στην εύρεση ικανοποιητικών λύσεων για διαφορετικούς στόχους με τη μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση. Με την ΠΒ, τα οφέλη του μετώπου Pareto είναι πολλά και η διαδικασία λήψης αποφάσεων διευκολύνεται. Οι μέθοδοι κατάταξης του Pareto προσφέρουν συστηματική διερεύνηση των επιλογών και επίτευξη ικανοποιητικών λύσεων, ειδικά όταν υπάρχουν οικονομικοί περιορισμοί.

5.2 Προκλήσεις και περιορισμοί

Παρακάτω σημειώνονται οι βασικές προκλήσεις και περιορισμοί που παρατηρήθηκαν στις ΚΜ:

- Σημαντικό μειονέκτημα των συμβατικών μεθόδων βελτιστοποίησης με ΓΑ είναι ο παρατεταμένος χρόνος βελτιστοποίησης λόγω μεγάλης διάρκειας προσομοίωσης με μοντέλα βασισμένα στην φυσική, ειδικά όταν οι μεταβλητές είναι πολλές. Αυτό καθιστά τα υποκατάστατα μοντέλα αναγκαία προσθήκη, σε πολύπλοκες αναβαθμίσεις, για την μείωση του υπολογιστικού κόστους.

- Χρειάζεται μεγαλύτερος βαθμός ενσωμάτωσης και αυτοματοποίησης της διαδικασίας για εύκολη χρήση. Να μειωθεί η εξάρτηση στον ανθρώπινο παράγοντα και η ανάγκη για υψηλού επιπέδου γνώσεις για την εφαρμογή της βελτιστοποίησης. Αυτό θα οδηγήσει σε λιγότερα λάθη και αποδοτικότερη υλοποίηση [128]. Υπάρχει ανάγκη για εύχρηστη διεπαφή για το χρήστη. Να μεταφράζονται άμεσα διαφορετικές ανάγκες και προτεραιότητες σε διαφορετικές επιλογές αναβάθμισης.
- Συχνά, οι προτεραιότητες των κατοίκων, δημόσιων φορέων και ιδιωτών έρχονται σε αντιπαράθεση [129]. Το κόστος ή η περίοδος αποπληρωμής των βέλτιστων και πιο αποτελεσματικών λύσεων συχνά είναι απαγορευτικά [130]. Όμως, η διαδικασία της αναβάθμισης οφείλει να οδηγεί σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, αλλιώς το κτίριο θα έχει ανεπαρκή ενεργειακή απόδοση μέχρι την επόμενη ανακαίνιση [116]. Η ουσιαστική βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης συνεπάγεται μεγαλύτερα έξοδα. Δεν υπάρχουν όμως κίνητρα για αναβαθμίσεις με μακροπρόθεσμα οφέλη ώστε να εξισορροπηθεί το αυξημένο ρίσκο για τους ιδιοκτήτες των κτιρίων. Συνάμα, υπό την παρουσία υψηλών ενεργειακών επιδοτήσεων, τα οικονομικά οφέλη των αποδοτικών αναβαθμίσεων ενδέχεται να μην είναι εμφανή ή σημαντικά από την οπτική γωνία του καταναλωτή. Υπάρχουν όμως μελέτες, όπως αυτή των Tavakolan κ.α. [128], που έδειξαν ότι η σχέση μεταξύ της καθαρής παρούσας αξίας και της πρωτεύουσας κατανάλωσης ενέργειας δεν είναι απαραίτητα αντιστρόφως ανάλογη, υπογραμμίζοντας τη σημασία της χρήσης της εκπτωτικής περιόδου αποπληρωμής, σε συνδυασμό με την καθαρή παρούσα αξία, για πιο ισορροπημένη αξιολόγηση.
- Οι προτιμήσεις των κατοίκων δεν λαμβάνονται συχνά υπόψη. Αυτό φαίνεται από την χαμηλή συμμετοχή στόχων ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος και υγείας, όπως επίσης από την απουσία κινήτρων και οικονομικής υποστήριξης για αυτούς [118].
- Η ακρίβεια των μοντέλων περιορίζεται από την ποιότητα των δεδομένων. Διαφορετικά δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας και διαφορετικά συστήματα παροχής ενέργειας επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Η ευαισθησία του μοντέλου στις κλιματικές συνθήκες που μελετώνται επηρεάζει την αξιολόγησή του. Η κλιματική αλλαγή μπορεί να οδηγήσει σε μη αποτελεσματικές λύσεις σε βάθος χρόνου. Η ακρίβεια των υποκατάστατων μοντέλων επηρεάζεται από την ακρίβεια των δεδομένων. Παράμετροι όπως η οριοθέτηση του συστήματος, η διάρκεια ζωής του κτιρίου μετά την αναβάθμιση, η επιδείνωση της ποιότητας της κατασκευής, μεταβολές στην διαρροή αέρα σε βάθος χρόνου και τα δεδομένα για την ενσωματωμένη ενέργεια διαφορετικών υλικών μπορούν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα της ανάλυσης κύκλου ζωής. Λόγω της ετερογένειας διαφορετικών συνοικιών μέσα στην ίδια πόλη υπάρχουν προκλήσεις για την ανάπτυξη μοντέλου για μεγάλες κλίμακες σε αστικό

περιβάλλον. Συνάμα, η ευαισθησία των μοντέλων σε διάφορες παραμέτρους αποτρέπει την σύγκριση των αποτελεσμάτων με προηγούμενες μελέτες [131].

- Αρκετές μελέτες υποστηρίζουν ότι η μεθοδολογία που εφάρμοσαν μπορεί να αναπαραχθεί με ευκολία για κτίρια σε αντίστοιχες συνθήκες [119], [129], [131]. Όμως, τα αποτελέσματα συνήθως περιορίζονται σε συγκεκριμένο τύπο κτιρίου και καιρικές συνθήκες [128], [130]. Η έλλειψη δεδομένων εμποδίζει την επέκταση της μεθοδολογίας. Αντίστοιχα, η εφαρμογή νευρωνικών δικτύων συχνά αφορά την εκάστοτε περίπτωση και δεν μεταφράζεται σε άλλες συνθήκες.
- Υπάρχει έλλειψη ρυθμιστικού πλαισίου σε ορισμένες χώρες για βιώσιμες πρακτικές αναβάθμισης κτιρίων, για παράδειγμα στην Τουρκία [132]. Ανάγκη για ευρύτερη επαγγελματική υιοθέτηση πρακτικών βιώσιμων κτιρίων, κάτι που θα διευκολύνει τη διάδοση της γνώσης, την τυποποίηση, τη διεύρυνση της αγοράς, τη μείωση του κόστους, την ενίσχυση των περιβαλλοντικών οφελών, τη ρυθμιστική υποστήριξη, την επένδυση στην έρευνα και ανάπτυξη, τη δημόσια ευαισθητοποίηση, τη διεθνή συνεργασία και συμβάλλει σε ένα ανθεκτικό και παγκοσμίως συνεργατικό κλάδο.
- Υπάρχει έλλειψη ανοικτών δεδομένων για αναβαθμίσεις κτιρίων, ώστε να μπορούν περισσότεροι ερευνητές να βοηθήσουν στο σχεδιασμό λύσεων που βοηθούν στον σχεδιασμό αποδοτικότερων ανακαινίσεων. Πολλές μελέτες αναφέρουν έλλειψη λεπτομερών στατιστικών δεδομένων για την αξιολόγηση της ποικιλομορφίας των κτιρίων, κάτι που αποτελεί εμπόδιο για τη διεξαγωγή αναλύσεων από τη βάση προς τα πάνω και επιβραδύνει την ανάπτυξη αποδοτικότερων λύσεων για αναβαθμίσεις μέσω της συνεργασίας των ερευνητών [114]. Για παράδειγμα, υπάρχει έλλειψη δεδομένων για κτίρια σε υποαρκτικές κλιματικές ζώνες [133]. Διαφορετικά μοντέλα σχεδίασης μπορεί να οδηγήσουν σε υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση. Ανάγκη για προσαρμογή και καλιμπράρισμα των μοντέλων.
- Η προσαρμοστικότητα των χρηστών συχνά απουσιάζει ως παράγοντας για τη θερμική άνεση. Ανάγκη για καλύτερη αναπαράσταση της προσαρμοστικής συμπεριφοράς των κατοίκων (άνοιγμα παράθυρων, επίπεδο δραστηριότητας, επίπεδο ενδυμασίας) προκειμένου να προβλέπονται πιο ακριβή αποτελέσματα για τη σχεδίαση βιώσιμων περιβαλλόντων που εξυπηρετούν τον χρήστη.

5.3 *Μελλοντική έρευνα*

Οι πολύπλοκες προκλήσεις της αναβάθμισης κτιρίων απαιτούν διατμηματική έρευνα και συνεχή βελτίωση των στρατηγικών. Ακολουθούν μερικές προτάσεις μελλοντικής έρευνας που συγκεντρώθηκαν από την βιβλιογραφία ή απορρέουν από την τελική ανάλυση της.

Στόχος είναι η αντιμετώπιση των προκλήσεων και η περαιτέρω ανάπτυξη της επιστήμης και της πρακτικής της πολυκριτηριακής αναβάθμισης κτιρίων με ΓΑ:

- Ανάπτυξη φιλικών προς το χρήστη διεπαφών και εργαλείων για να διευκολυνθεί η επαγγελματική υιοθέτηση των μεθόδων.
- Περισσότερες μελέτες για εγκαταστάσεις ιατροφαρμακευτικής περίθαλψης, βιομηχανικά κτίρια, αποθήκες και κτίρια συναθροίσεων.
- Οι περισσότερες μελέτες εξετάζουν μόνο παραδοσιακά μέσα αναβάθμισης. Ανάγκη για διερεύνηση μεγαλύτερης ποικιλίας μεταβλητών και μελέτη ανερχόμενων τεχνολογιών και υλικών, όπως διαφορετικά είδη πρόσοψης, μόνωσης και άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Μελέτες σε αναπτυσσόμενες χώρες, με διαφορετικές ανάγκες, διαφορετικό ενεργειακό μείγμα, διαφορετικά υλικά και επιλογές μόνωσης όπως πλινθος, πεπεισμένη γη, οικολογικές μονώσεις για κατακράτηση άνθρακα, μπαμπού, καλάμια, αχυροσκεπές, ίνες κοκοφοίνικα, πάνδανος, διαφορετικά υλικά για απορρόφηση θερμότητας και ανακλαστικότητα σκεπών, διαφορετικές μέθοδοι θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού π.χ. υπόγειοι σωλήνες για εξαερισμό.
- Πιο συχνή χρήση του αλγόριθμου NSGA-III και εκμετάλλευση των θετικών του χαρακτηριστικών για ΠΒ.
- Βελτίωση αλγορίθμων και εξερεύνηση νέων. Περισσότερες έρευνες που συγκρίνουν άμεσα ΓΑ με άλλους αλγόριθμους.
- Πιο συχνή εφαρμογή εξομοιωτών για βελτίωση την απόδοσης.
- Έρευνες με συμμετοχή περισσότερων σταδίων του κύκλου ζωής στην ανάλυση τους και με περισσότερους σχετικούς δείκτες, όπως η τοξικότητα και η δημιουργία νεφών.
- Ανάλυση της επίδρασης διαφορετικών συστημάτων παροχής ενέργειας (τηλεθέρμανση, διαφόρων ειδών λέβητες και αντλίες θερμότητας, εναλλάκτες θερμότητας γεωτρήσεων κ.α.).
- Ανάλυση χρονικότητας σε μεγαλύτερο βάθος, με διαφορετικές συνθήκες και με διαφορετικούς αλγόριθμους.
- Όσον αφορά τις αντικειμενικές συναρτήσεις, να συμμετέχουν στη βελτιστοποίηση πιο συχνά η ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος πέραν της θερμικής άνεσης, δείκτες σχετικοί με την υγεία των κατοίκων, η εκπρωτική περίοδος αποπληρωμής, περιβαλλοντικοί παράγοντες πέραν των εκπομπών, η συντήρηση διατηρητέων κτιρίων, στόχοι αισθητικής και ελκυστικότητας των κατοικιών και αιτήματα από τους ενοίκους.

- Μελέτες που χρησιμοποιούν στοιχεία από μελέτες για την δημιουργία αρχέτυπων κτιρίων σε συνδυασμό με επί τόπου μετρήσεις για επικύρωση του μοντέλου. Μελέτες που εφαρμόζουν την μέθοδο βελτιστοποίησης σε διαφορετικά είδη κτιρίων.
- Να ερευνηθεί περισσότερο η επίδραση του επιπέδου ακρίβειας των δεδομένων, των εποχικών διακυμάνσεων και ακραίων καιρικών φαινομένων και άλλων παραμέτρων που επηρεάζουν την αξιολόγηση του μοντέλου.
- Συλλογή δεδομένων και ανάπτυξη καλύτερων βάσεων για βελτίωση της ακρίβειας των μοντέλων.
- Εφαρμογή βελτιστοποίησης σε μεγαλύτερες κλίμακες. Εφαρμογή μεθόδου συσταδοποίησης (clustering approach) για την δημιουργία μοντέλων χαρτοφυλάκιων κτιρίων με μεγαλύτερη ακρίβεια.
- Εφαρμογή MCDM για την εύρεση ικανοποιητικών και ισορροπημένων λύσεων.
- Εφαρμογή νέων εργαλείων σχεδίασης, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης.

Βιβλιογραφία

- [1] ‘Buildings - Energy System’, IEA. Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.iea.org/energy-system/buildings>
- [2] ‘Καθαρή ενέργεια για όλους τους Ευρωπαίους – Ελευθερώνοντας το αναπτυξιακό δυναμικό της Ευρώπης’, European Commission - European Commission. Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/el/IP_16_4009
- [3] ‘Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία - Consilium’. Ημερομηνία πρόσβασης: 18 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/green-deal/>
- [4] ‘Συμφωνία του Παρισιού για την κλιματική αλλαγή’. Ημερομηνία πρόσβασης: 18 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/climate-change/paris-agreement/>
- [5] Y. Schwartz, R. Raslan, και D. Mumovic, ‘Implementing multi objective genetic algorithm for life cycle carbon footprint and life cycle cost minimisation: A building refurbishment case study’, *Energy*, τ. 97, σσ. 58–68, Φεβρουαρίου 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.11.056.
- [6] A.-T. Nguyen, S. Reiter, και P. Rigo, ‘A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis’, *Appl. Energy*, τ. 113, σσ. 1043–1058, Ιανουαρίου 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.08.061.
- [7] I. Costa-Carrapiço, R. Raslan, και J. N. González, ‘A systematic review of genetic algorithm-based multi-objective optimisation for building retrofitting strategies towards energy efficiency’, *Energy Build.*, τ. 210, σ. 109690, Μαρτίου 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109690.
- [8] N. Hashempour, R. Taherkhani, και M. Mahdikhani, ‘Energy performance optimization of existing buildings: A literature review’, *Sustain. Cities Soc.*, τ. 54, σ. 101967, Μαρτίου 2020, doi: 10.1016/j.scs.2019.101967.

- [9] C. Deb και A. Schlueter, 'Review of data-driven energy modelling techniques for building retrofit', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, τ. 144, σ. 110990, Ιουλίου 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110990.
- [10] A. G. Ruggeri, L. Gabrielli, και M. Scarpa, 'Energy Retrofit in European Building Portfolios: A Review of Five Key Aspects', *Sustainability*, τ. 12, τχ. 18, Art. τχ. 18, Ιανουαρίου 2020, doi: 10.3390/su12187465.
- [11] B. Grillone, S. Danov, A. Sumper, J. Cipriano, και G. Mor, 'A review of deterministic and data-driven methods to quantify energy efficiency savings and to predict retrofiting scenarios in buildings', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, τ. 131, σ. 110027, Οκτωβρίου 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110027.
- [12] C. He, Y. Hou, L. Ding, και P. Li, 'Visualized literature review on sustainable building renovation', *J. Build. Eng.*, τ. 44, σ. 102622, Δεκεμβρίου 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102622.
- [13] G. Elshafei, S. Vilčeková, M. Zeleňáková, και A. M. Negm, 'An Extensive Study for a Wide Utilization of Green Architecture Parameters in Built Environment Based on Genetic Schemes', *Buildings*, τ. 11, τχ. 11, Art. τχ. 11, Νοεμβρίου 2021, doi: 10.3390/buildings11110507.
- [14] R. Shan και L. Junghans, 'Multi-Objective Optimization for High-Performance Building Facade Design: A Systematic Literature Review', *Sustainability*, τ. 15, τχ. 21, Art. τχ. 21, Ιανουαρίου 2023, doi: 10.3390/su152115596.
- [15] Z. Pang, Z. O'Neill, Y. Li, και F. Niu, 'The role of sensitivity analysis in the building performance analysis: A critical review', *Energy Build.*, τ. 209, σ. 109659, Φεβρουαρίου 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109659.
- [16] A. Auza, E. Asadi, B. Chenari, και M. Gameiro da Silva, 'Review of cost objective functions in multi-objective optimisation analysis of buildings', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, τ. 191, σ. 114101, Μαρτίου 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.114101.
- [17] S. Abdolhosseinzadeh και S. N. Gollo, 'A Chameleon Swarm Optimization Model for the Optimal Adjustment of Retrofit Values in Spanish Houses', στο *Metaheuristics and Optimization in Computer and Electrical Engineering: Volume 2: Hybrid and Improved Algorithms*, N. Razmjoooy, N. Ghadimi, και V. Rajinikanth, Επιμ., στο *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Cham: Springer International Publishing, 2023, σσ. 315–343. doi: 10.1007/978-3-031-42685-8_9.
- [18] M. Pazouki, K. Rezaie, και A. Bozorgi-Amiri, 'A fuzzy robust multi-objective optimization model for building energy retrofit considering utility function: A university

building case study', *Energy Build.*, τ. 241, σ. 110933, Ιουνίου 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110933.

[19] E. Bonamente κ.ά., 'A life-cycle approach for multi-objective optimisation in building design: methodology and application to a case study', *Civ. Eng. Environ. Syst.*, τ. 35, τχ. 1–4, σσ. 158–179, Οκτωβρίου 2018, doi: 10.1080/10286608.2019.1576646.

[20] E. Thrampoulidis, G. Mavromatidis, A. Lucchi, και K. Orehounig, 'A machine learning-based surrogate model to approximate optimal building retrofit solutions', *Appl. Energy*, τ. 281, σ. 116024, Ιανουαρίου 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116024.

[21] M. Baghoolizadeh, R. Rostamzadeh-Renani, M. Rostamzadeh-Renani, και D. Toghraie, 'A multi-objective optimization of a building's total heating and cooling loads and total costs in various climatic situations using response surface methodology', *Energy Rep.*, τ. 7, σσ. 7520–7538, Νοεμβρίου 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.10.092.

[22] F. Ascione κ.ά., 'A real industrial building: Modeling, calibration and Pareto optimization of energy retrofit', *J. Build. Eng.*, τ. 29, σ. 101186, Μαΐου 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101186.

[23] R. Zhang, X. Xu, P. Zhai, K. Liu, L. Kong, και W. Wang, 'Agile and integrated workflow proposal for optimising energy use, solar and wind energy potential, and structural stability of high-rise buildings in early design decisions', *Energy Build.*, τ. 300, σ. 113692, Δεκεμβρίου 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113692.

[24] Y. Wang, K. Qu, X. Chen, G. Gan, και S. Riffat, 'An innovative retrofit Motivation-Objective-Criteria (MOC) approach integrating homeowners' engagement to unlocking low-energy retrofit in residential buildings', *Energy Build.*, τ. 259, σ. 111834, Μαρτίου 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.111834.

[25] F. Haneef, G. Pernigotto, A. Gasparella, και J. H. Kämpf, 'Application of Urban Scale Energy Modelling and Multi-Objective Optimization Techniques for Building Energy Renovation at District Scale', *Sustainability*, τ. 13, τχ. 20, Art. τχ. 20, Ιανουαρίου 2021, doi: 10.3390/su132011554.

[26] M. Basińska, D. Kaczorek, και H. Koczyk, 'Building Thermo-Modernisation Solution Based on the Multi-Objective Optimisation Method', *Energies*, τ. 13, τχ. 6, Art. τχ. 6, Ιανουαρίου 2020, doi: 10.3390/en13061433.

[27] N. Amani και E. Kiaee, 'Developing a two-criteria framework to rank thermal insulation materials in nearly zero energy buildings using multi-objective optimization approach', *J. Clean. Prod.*, τ. 276, σ. 122592, Δεκεμβρίου 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122592.

- [28] F. Battini, G. Pernigotto, και A. Gasparella, ‘Evaluating the capabilities of a simplification algorithm for Urban Building Energy Modeling in performing building-level Multi-Objective Optimizations at district scale’, *J. Phys. Conf. Ser.*, τ. 2600, τχ. 8, σ. 082015, Νοεμβρίου 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2600/8/082015.
- [29] Q. Li κ.ά., ‘Evaluation of energy-saving retrofits for sunspace of rural residential buildings based on orthogonal experiment and entropy weight method’, *Energy Sustain. Dev.*, τ. 70, σσ. 569–580, Οκτωβρίου 2022, doi: 10.1016/j.esd.2022.09.007.
- [30] W. Cao, L. Yang, Q. Zhang, L. Chen, και W. Wu, ‘Evaluation of Rural Dwellings’ Energy-Saving Retrofit with Adaptive Thermal Comfort Theory’, *Sustainability*, τ. 13, τχ. 10, Art. τχ. 10, Ιανουαρίου 2021, doi: 10.3390/su13105350.
- [31] B. Liu και S. Pouramini, ‘Multi-objective optimization for thermal comfort enhancement and greenhouse gas emission reduction in residential buildings applying retrofitting measures by an Enhanced Water Strider Optimization Algorithm: A case study’, *Energy Rep.*, τ. 7, σσ. 1915–1929, Νοεμβρίου 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.03.044.
- [32] M. Sim, D. Suh, και M.-O. Otto, ‘Multi-Objective Particle Swarm Optimization-Based Decision Support Model for Integrating Renewable Energy Systems in a Korean Campus Building’, *Sustainability*, τ. 13, τχ. 15, Art. τχ. 15, Ιανουαρίου 2021, doi: 10.3390/su13158660.
- [33] Q. Li, L. Zhang, L. Zhang, και X. Wu, ‘Optimizing energy efficiency and thermal comfort in building green retrofit’, *Energy*, τ. 237, τχ. C, 2021, Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v237y2021ics0360544221017576.html>
- [34] G. Aruta, F. Ascione, N. Bianco, T. Iovane, M. Mastellone, και G. Maria Mauro, ‘Optimizing the energy transition of social housing to renewable nearly zero-energy community: The goal of sustainability’, *Energy Build.*, τ. 282, σ. 112798, Μαρτίου 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.112798.
- [35] E. S. Pinto και B. Amante, ‘Polygeneration system optimization for building energy system retrofit: A case of study for TR5 building of UPC-Terrassa’, *Energy Build.*, τ. 273, σ. 112375, Οκτωβρίου 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112375.
- [36] W. Jiang κ.ά., ‘Protective energy-saving retrofits of rammed earth heritage buildings using multi-objective optimization’, *Case Stud. Therm. Eng.*, τ. 38, σ. 102343, Οκτωβρίου 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.102343.
- [37] P. Shen, W. Braham, Y. Yi, και E. Eaton, ‘Rapid multi-objective optimization with multi-year future weather condition and decision-making support for building retrofit’, *Energy*, τ. 172, σσ. 892–912, Απριλίου 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.01.164.

- [38] S. Yigit, ‘A machine-learning-based method for thermal design optimization of residential buildings in highly urbanized areas of Turkey’, *J. Build. Eng.*, τ. 38, σ. 102225, Ιουνίου 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102225.
- [39] A. Jafari και V. Valentin, ‘An optimization framework for building energy retrofits decision-making’, *Build. Environ.*, τ. 115, σσ. 118–129, Απριλίου 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.01.020.
- [40] P. Saikia, M. Pancholi, D. Sood, και D. Rakshit, ‘Dynamic optimization of multi-retrofit building envelope for enhanced energy performance with a case study in hot Indian climate’, *Energy*, τ. 197, σ. 117263, Απριλίου 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117263.
- [41] E. Jahani και K. Cetin, ‘Energy savings and retrofit assessment for city-scale residential building stock during extreme heatwave events using genetic algorithm-numerical moment matching’, *Clean Technol. Environ. Policy*, τ. 24, τχ. 7, σσ. 2081–2098, Σεπτεμβρίου 2022, doi: 10.1007/s10098-022-02299-w.
- [42] X. J. Luo και L. O. Oyedele, ‘Life cycle optimisation of building retrofitting considering climate change effects’, *Energy Build.*, τ. 258, Ιανουαρίου 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.111830.
- [43] Z. Dou, L. Jin, Y. Chen, και Z. Huang, ‘Optimization of Cost–Carbon Reduction–Technology Solution for Existing Office Parks Based on Genetic Algorithm’, *Processes*, τ. 11, τχ. 8, Art. τχ. 8, Αυγούστου 2023, doi: 10.3390/pr11082452.
- [44] A. Yeretizian και J. Karam, ‘Optimizing the use of natural ventilation while reducing energy cost_case study for retrofitting an old residential apartment in a Mediterranean city’, *Energy Build.*, τ. 296, σ. 113371, Οκτωβρίου 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113371.
- [45] S. Lu, J. Li, και B. Lin, ‘Reliability analysis of an energy-based form optimization of office buildings under uncertainties in envelope and occupant parameters’, *Energy Build.*, τ. 209, σ. 109707, Φεβρουαρίου 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109707.
- [46] X. He, J. Huang, Z. Liu, J. Lin, R. Jing, και Y. Zhao, ‘Topology optimization of thermally activated building system in high-rise building’, *Energy*, τ. 284, σ. 128637, Δεκεμβρίου 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.128637.
- [47] R. Chen, Y.-S. Tsay, και T. Zhang, ‘A multi-objective optimization strategy for building carbon emission from the whole life cycle perspective’, *Energy*, τ. 262, σ. 125373, Ιανουαρίου 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.125373.
- [48] R. Wang, S. Lu, και W. Feng, ‘A three-stage optimization methodology for envelope design of passive house considering energy demand, thermal comfort and cost’, *Energy*, τ. 192, σ. 116723, Φεβρουαρίου 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116723.

- [49] M. Rabani, H. Bayera Madessa, και N. Nord, ‘Achieving zero-energy building performance with thermal and visual comfort enhancement through optimization of fenestration, envelope, shading device, and energy supply system’, *Sustain. Energy Technol. Assess.*, τ. 44, σ. 101020, Απριλίου 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101020.
- [50] F. Ascione, N. Bianco, G. Maria Mauro, και D. F. Napolitano, ‘Building envelope design: Multi-objective optimization to minimize energy consumption, global cost and thermal discomfort. Application to different Italian climatic zones’, *Energy*, τ. 174, σσ. 359–374, Μαΐου 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.02.182.
- [51] Y. Liu, T. Li, W. Xu, Q. Wang, H. Huang, και B.-J. He, ‘Building information modelling-enabled multi-objective optimization for energy consumption parametric analysis in green buildings design using hybrid machine learning algorithms’, *Energy Build.*, τ. 300, σ. 113665, Δεκεμβρίου 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113665.
- [52] M. K. Trivedi και K. Sharma, ‘Construction time–cost–resources–quality trade-off optimization using NSGA-III’, *Asian J. Civ. Eng.*, τ. 24, τχ. 8, σσ. 3543–3555, Δεκεμβρίου 2023, doi: 10.1007/s42107-023-00731-0.
- [53] Y. Wang και C. Wei, ‘Design optimization of office building envelope based on quantum genetic algorithm for energy conservation’, *J. Build. Eng.*, τ. 35, σ. 102048, Μαρτίου 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2020.102048.
- [54] Y. Lin, S. Zhong, W. Yang, X. Hao, και C.-Q. Li, ‘Multi-objective design optimization on building integrated photovoltaic with Trombe wall and phase change material based on life cycle cost and thermal comfort’, *Sustain. Energy Technol. Assess.*, τ. 46, σ. 101277, Αυγούστου 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101277.
- [55] S. Carlucci, G. Cattarin, F. Causone, και L. Pagliano, ‘Multi-objective optimization of a nearly zero-energy building based on thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)’, *Energy Build.*, τ. 104, σσ. 378–394, Οκτωβρίου 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.06.064.
- [56] U. Acar, O. Kaska, και N. Tokgoz, ‘Multi-objective optimization of building envelope components at the preliminary design stage for residential buildings in Turkey’, *J. Build. Eng.*, τ. 42, σ. 102499, Οκτωβρίου 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102499.
- [57] C. A. Konstantinidou, W. Lang, και A. M. Papadopoulos, ‘Multiobjective optimization of a building envelope with the use of phase change materials (PCMs) in Mediterranean climates’, *Int. J. Energy Res.*, τ. 42, τχ. 9, σσ. 3030–3047, 2018, doi: 10.1002/er.3969.

- [58] E. L. S. Gonçalves κ.ά., ‘Multiscale modeling to optimize thermal performance design for urban social housing: A case study’, *Appl. Therm. Eng.*, τ. 236, σ. 121379, Ιανουαρίου 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121379.
- [59] Z. Li, P. V. Genovese, και Y. Zhao, ‘Study on Multi-Objective Optimization-Based Climate Responsive Design of Residential Building’, *Algorithms*, τ. 13, τχ. 9, Art. τχ. 9, Σεπτεμβρίου 2020, doi: 10.3390/a13090238.
- [60] P. Omidian και N. Khaji, ‘A multi-objective optimization framework for seismic resilience enhancement of typical existing RC buildings’, *J. Build. Eng.*, τ. 52, 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104361.
- [61] M. Nouredin, A. Ali, S. Memon, και J. Kim, ‘Fragility-based framework for optimal damper placement in low-rise moment-frame buildings using machine learning and genetic algorithm’, *J. Build. Eng.*, τ. 54, 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104641.
- [62] W. Hughes, W. Zhang, και Z. Ding, ‘Multiobjective Optimization for Hurricane Retrofit to Improve Coastal Community Structural and Socioeconomic Resilience’, *Nat. Hazards Rev.*, τ. 23, τχ. 4, 2022, doi: 10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000590.
- [63] F. Nigro, R. Falcone, και E. Martinelli, ‘Recent Developments of an Optimisation Procedure for Seismic Retrofit of RC Frames’, *Lect. Notes Civ. Eng.*, τ. 435 LNCE, σσ. 260–273, 2024, doi: 10.1007/978-3-031-43102-9_21.
- [64] M. Nouredin, S. Ahmed, και J. Kim, ‘Self-centering steel slotted friction device for seismic retrofit of beam-column joints’, *Steel Compos. Struct.*, τ. 41, τχ. 1, σσ. 13–30, 2021, doi: 10.12989/scs.2021.41.1.013.
- [65] N. Ismail και D. Ouahrani, ‘A comprehensive optimization study of personal cooling radiant desks integrated to HVAC system for energy efficiency and thermal comfort in office buildings’, *Int. J. Refrig.*, τ. 156, σσ. 54–71, Δεκεμβρίου 2023, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2023.09.023.
- [66] J. A. Stampfli, B. H. Y. Ong, D. G. Olsen, B. Wellig, και R. Hofmann, ‘Multi-objective evolutionary optimization for multi-period heat exchanger network retrofit’, *Energy*, τ. 281, σ. 128175, Οκτωβρίου 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.128175.
- [67] S. Bougrine και L. Gosselin, ‘Multi-objective optimization of ceiling-to-floor systems in timber buildings taking into account structural and HVAC related objectives’, *J. Build. Eng.*, τ. 70, σ. 106410, Ιουλίου 2023, doi: 10.1016/j.jobbe.2023.106410.
- [68] K. Cant και R. Evins, ‘Optimizing VAV Terminal Box Minimum Positions using Dynamic Simulations to Improve Energy and Ventilation Performance’, παρουσιάστηκε στο Building Simulation 2021, στο Building Simulation, vol. 17. IBPSA, 2021, σσ. 2507–2514. doi: 10.26868/25222708.2021.30439.

- [69] J. Shin και S. Park, 'Optimum retrofit strategy of FRP column jacketing system for non-ductile RC building frames using artificial neural network and genetic algorithm hybrid approach', *J. Build. Eng.*, τ. 57, σ. 104919, Οκτωβρίου 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.104919.
- [70] J. F. Chen, L. Zhang, και Y. J. Dai, 'Performance analysis and multi-objective optimization of a hybrid photovoltaic/thermal collector for domestic hot water application', *Energy*, τ. 143, σσ. 500–516, Ιανουαρίου 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.10.143.
- [71] 'Adaptation in Natural and Artificial Systems', MIT Press. Ημερομηνία πρόσβασης: 18 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://mitpress.mit.edu/9780262581110/adaptation-in-natural-and-artificial-systems/>
- [72] D. E. Goldberg και J. H. Holland, 'Genetic Algorithms and Machine Learning', *Mach. Learn.*, τ. 3, τχ. 2, σσ. 95–99, Οκτωβρίου 1988, doi: 10.1023/A:1022602019183.
- [73] R. L. Haupt και S. E. Haupt, *Practical Guide to Genetic Algorithms*, 2nd ed. Hoboken, N.J: John Wiley, 2004.
- [74] L. Azevedo, R. Gomes, και 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.*, τ. 15, τχ. 5, σσ. 630–661, Σεπτεμβρίου 2021, doi: 10.1080/17512549.2019.1654916.
- [75] A. Udovichenko, B. A. Fleck, T. Weis, και 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.*, τ. 37, σ. 102160, Μαΐου 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102160.
- [76] C.-R. Yu, X. Liu, Q.-C. Wang, και D. Yang, 'Solving the comfort-retrofit conundrum through post-occupancy evaluation and multi-objective optimisation', *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, τ. 44, τχ. 4, σσ. 381–403, Ιουλίου 2023, doi: 10.1177/01436244231174354.
- [77] M. Marzouk, M. ElSharkawy, και A. Mahmoud, 'Optimizing daylight utilization of flat skylights in heritage buildings', *J. Adv. Res.*, τ. 37, σσ. 133–145, Μαρτίου 2022, doi: 10.1016/j.jare.2021.06.005.
- [78] M. Marzouk, M. ElSharkawy, και A. Eissa, 'Optimizing thermal and visual efficiency using parametric configuration of skylights in heritage buildings', *J. Build. Eng.*, τ. 31, σ. 101385, Σεπτεμβρίου 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101385.
- [79] N. Yue, L. Li, A. Morandi, και Y. Zhao, 'A metamodel-based multi-objective optimization method to balance thermal comfort and energy efficiency in a campus gymnasium', *Energy Build.*, τ. 253, σ. 111513, Δεκεμβρίου 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111513.

- [80] B. Si, J. Wang, X. Yao, X. Shi, X. Jin, και X. Zhou, ‘Multi-objective optimization design of a complex building based on an artificial neural network and performance evaluation of algorithms’, *Adv. Eng. Inform.*, τ. 40, σσ. 93–109, Απριλίου 2019, doi: 10.1016/j.aei.2019.03.006.
- [81] G. Aruta, F. Ascione, N. Bianco, R. F. De Masi, G. M. Mauro, και G. P. Vanoli, ‘Model predictive control based on genetic algorithm and neural networks to optimize heating operation of a real low-energy building’, στο *2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, Ιουλίου 2022, σσ. 1–6. doi: 10.23919/SpliTech55088.2022.9854312.
- [82] G. Aruta, F. Ascione, N. Bianco, G. M. Mauro, και G. P. Vanoli, ‘Optimizing heating operation via GA- and ANN-based model predictive control: Concept for a real nearly-zero energy building’, *Energy Build.*, τ. 292, σ. 113139, Αυγούστου 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113139.
- [83] F. Ascione, R. F. De Masi, V. Festa, G. M. Mauro, και G. P. Vanoli, ‘Optimizing space cooling of a nearly zero energy building via model predictive control: Energy cost vs comfort’, *Energy Build.*, τ. 278, σ. 112664, Ιανουαρίου 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112664.
- [84] ‘ADENE Eng’. Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.adene.pt/adene-eng/>
- [85] ‘Building and dwelling production: documentation of statistics - Statistics Finland’. Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.stat.fi/en/statistics/documentation/ras>
- [86] ‘English Housing Survey’, GOV.UK. Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.gov.uk/government/collections/english-housing-survey>
- [87] ‘- eREN Energie et rénovation’. Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.smartlivinglab.ch/fr/projects/eren-energie-et-renovation/>
- [88] ‘NBR 15575-2021 - Desempenho térmico | Laboratório de Eficiência Energética em Edificações’. Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://labeee.ufsc.br/NBR15575-2020>
- [89] ‘Prototype Building Models | Building Energy Codes Program’. Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.energycodes.gov/prototype-building-models>

- [90] ‘SusC ity: Urban data driven models for creative and resourceful urban transitions’, INESC TEC. Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.inesctec.pt/en/projects/suscitcity>
- [91] ‘TABULA WebTool’. Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://webtool.building-typology.eu/?c=be#bm>
- [92] ‘World Economic Outlook Database April 2022 -- WEO Groups and Aggregates Information’. Ημερομηνία πρόσβασης: 18 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2022/01/weodata/groups.htm>
- [93] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, και T. Meyarivan, ‘A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II’, *IEEE Trans. Evol. Comput.*, τ. 6, τχ. 2, σσ. 182–197, Απριλίου 2002, doi: 10.1109/4235.996017.
- [94] E. Zitzler, M. Laumanns, και L. Thiele, ‘SPEA2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm’, ETH Zurich, Report, Μαΐου 2001. doi: 10.3929/ethz-a-004284029.
- [95] K. Deb και 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.*, τ. 18, τχ. 4, σσ. 577–601, Αυγούστου 2014, doi: 10.1109/TEVC.2013.2281535.
- [96] D. Kadrić, A. Aganović, και E. Kadrić, ‘Multi-objective optimization of energy-efficient retrofitting strategies for single-family residential homes: Minimizing energy consumption, CO2 emissions and retrofit costs’, *Energy Rep.*, τ. 10, σσ. 1968–1981, Νοεμβρίου 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.08.086.
- [97] M. Pal και S. Bandyopadhyay, ‘Occupant Actions Selection Strategies Based on Pareto-Optimal Schedules and Daily Schedule for Energy Management in Buildings’, στο *Towards Energy Smart Homes: Algorithms, Technologies, and Applications*, S. Ploix, M. Amayri, και N. Bouguila, Επιμ., Cham: Springer International Publishing, 2021, σσ. 249–270. doi: 10.1007/978-3-030-76477-7_8.
- [98] A. A. Aliabadi, X. Chen, J. Yang, A. Madadzadeh, και K. Siddiqui, ‘Retrofit optimization of building systems for future climates using an urban physics model’, *Build. Environ.*, τ. 243, σ. 110655, Σεπτεμβρίου 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110655.
- [99] Y. He, N. Liao, J. Bi, και L. Guo, ‘Investment decision-making optimization of energy efficiency retrofit measures in multiple buildings under financing budgetary restraint’, *J. Clean. Prod.*, τ. 215, σσ. 1078–1094, Απριλίου 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.119.
- [100] F. Ascione, N. Bianco, G. M. Mauro, και G. P. Vanoli, ‘A new comprehensive framework for the multi-objective optimization of building energy design: Harlequin’, *Appl. Energy*, τ. 241, σσ. 331–361, Μαΐου 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.028.

- [101] Lei Y. J., Zhang S. W., και Li X. B., *MATLAB genetic algorithm toolbox and application*. Xi'an: Xidian University Press, 2005. Ημερομηνία πρόσβασης: 18 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://wread.qq.com/web/bookDetail/3e332b30811e1b89eg017522>
- [102] A.-E. Nicolae, H. Necula, και M.-B. Carutasiu, 'Optimization of energy rehabilitation processes of existing buildings'.
- [103] M. Sim και D. Suh, 'A heuristic solution and multi-objective optimization model for life-cycle cost analysis of solar PV/GSHP system: A case study of campus residential building in Korea', *Sustain. Energy Technol. Assess.*, τ. 47, σ. 101490, Οκτωβρίου 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101490.
- [104] H. Zhang, H. Feng, K. Hewage, και M. Arashpour, 'Artificial Neural Network for Predicting Building Energy Performance: A Surrogate Energy Retrofits Decision Support Framework', *Buildings*, τ. 12, τχ. 6, Art. τχ. 6, Ιουνίου 2022, doi: 10.3390/buildings12060829.
- [105] J. Zhan, W. He, και J. Huang, 'Dual-objective building retrofit optimization under competing priorities using Artificial Neural Network', *J. Build. Eng.*, τ. 70, σ. 106376, Ιουλίου 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.106376.
- [106] E. Asadi, B. Chenari, A. R. Gaspar, και M. Gameiro da Silva, 'Development of an optimization model for decision-making in building retrofit projects using RETROSIM', *Adv. Build. Energy Res.*, τ. 17, τχ. 3, σσ. 324–344, Μαΐου 2023, doi: 10.1080/17512549.2023.2204872.
- [107] R. Aghamolaei και M. R. Ghaani, 'Balancing the impacts of energy efficiency strategies on comfort quality of interior places: Application of optimization algorithms in domestic housing', *J. Build. Eng.*, τ. 29, σ. 101174, Μαΐου 2020, doi: 10.1016/j.jobe.2020.101174.
- [108] J. Song, W. Wang, P. Ni, H. Zheng, Z. Zhang, και Y. Zhou, 'Framework on low-carbon retrofit of rural residential buildings in arid areas of northwest China: A case study of Turpan residential buildings', *Build. Simul.*, τ. 16, τχ. 2, σσ. 279–297, Φεβρουαρίου 2023, doi: 10.1007/s12273-022-0941-9.
- [109] F. Ascione κ.ά., 'The Cost-Optimal Optimization of public buildings in cold and warm climates: two case-studies in Germany and Italy', *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, τ. 1078, τχ. 1, σ. 012044, Σεπτεμβρίου 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1078/1/012044.
- [110] A. Tapia-Calderón, D. Boer, C. Salinas-Lira, και D. A. Vasco, 'Optimized thermal envelope of low-income dwellings in Santiago de Chile incorporating *Pinus radiata* wood

impregnated with phase change materials’, *J. Energy Storage*, τ. 60, σ. 106665, Απριλίου 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.106665.

[111] W. Cui, J. Hong, G. Liu, L. Zhang, και L. Wei, ‘A Multi-Stage Decision Framework for Optimal Energy Efficiency Measures of Educational Buildings: A Case Study of Chongqing’, *Processes*, τ. 11, τχ. 6, Art. τχ. 6, Ιουνίου 2023, doi: 10.3390/pr11061633.

[112] X. Zhang, ‘Process Exploration of New Materials for Building Decoration Engineering Based on Multi-Objective Planning Modeling’, *Appl. Math. Nonlinear Sci.*, τ. 9, τχ. 1, Ιανουαρίου 2024, Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://sciendo.com/article/10.2478/amns.2023.2.01226>

[113] F. Mostafazadeh, S. J. Eirdmousa, και M. Tavakolan, ‘Energy, economic and comfort optimization of building retrofits considering climate change: A simulation-based NSGA-III approach’, *Energy Build.*, τ. 280, σ. 112721, Φεβρουαρίου 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112721.

[114] G. Luddeni, M. Krarti, G. Pernigotto, και A. Gasparella, ‘An analysis methodology for large-scale deep energy retrofits of existing building stocks: Case study of the Italian office building’, *Sustain. Cities Soc.*, τ. 41, σσ. 296–311, Αυγούστου 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.05.038.

[115] D. Manjarres, L. Mabe, X. Oregi, και I. Landa-Torres, ‘Two-Stage Multi-Objective Meta-Heuristics for Environmental and Cost-Optimal Energy Refurbishment at District Level’, *Sustainability*, τ. 11, τχ. 5, Art. τχ. 5, Ιανουαρίου 2019, doi: 10.3390/su11051495.

[116] M.-L. Pannier, T. Recht, M. Robillart, P. Schalbart, B. Peuportier, και L. Mora, ‘Identifying optimal renovation schedules for building portfolios: Application in a social housing context under multi-year funding constraints’, *Energy Build.*, τ. 250, σ. 111290, Νοεμβρίου 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111290.

[117] Y. Merlet, S. Rouchier, A. Jay, N. Cellier, και M. Woloszyn, ‘Integration of phasing on multi-objective optimization of building stock energy retrofit’, *Energy Build.*, τ. 257, σ. 111776, Φεβρουαρίου 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111776.

[118] S. Zuhaib και J. Goggins, ‘Assessing evidence-based single-step and staged deep retrofit towards nearly zero-energy buildings (nZEB) using multi-objective optimisation’, *Energy Effic.*, τ. 12, τχ. 7, σσ. 1891–1920, Οκτωβρίου 2019, doi: 10.1007/s12053-019-09812-z.

[119] S. Motaghian, M. H. Monajati Saharkhiz, S. Rayegan, H. Pasharshahri, P. Ahmadi, και M. A. Rosen, ‘Techno-economic multi-objective optimization of detailed external wall insulation scenarios for buildings in moderate-dry regions’, *Sustain. Energy Technol. Assess.*, τ. 46, σ. 101256, Αυγούστου 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101256.

- [120] J. Donges, A. Prada, F. Cappelletti, και A. Gasparella, 'Impact of occupant behavior on performance optimized building retrofits', παρουσιάστηκε στο Building Simulation 2021, στο Building Simulation, vol. 17. IBPSA, 2021, σσ. 3686–3693. doi: 10.26868/25222708.2021.30965.
- [121] F. Montana κ.ά., 'Multi-Objective Optimization of Building Life Cycle Performance. A Housing Renovation Case Study in Northern Europe', *Sustainability*, τ. 12, τχ. 18, Art. τχ. 18, Ιανουαρίου 2020, doi: 10.3390/su12187807.
- [122] A. Galimshina κ.ά., 'Bio-based materials as a robust solution for building renovation: A case study', *Appl. Energy*, τ. 316, σ. 119102, Ιουνίου 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119102.
- [123] A. Galimshina κ.ά., 'What is the optimal robust environmental and cost-effective solution for building renovation? Not the usual one', *Energy Build.*, τ. 251, σ. 111329, Νοεμβρίου 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111329.
- [124] N. Mohtashami, R. Streblow, L. Hildebrand, και D. Müller, 'Carbon-cost efficient retrofit of passive and active systems in residential buildings using genetic algorithm', παρουσιάστηκε στο Building Simulation 2021, στο Building Simulation, vol. 17. IBPSA, 2021, σσ. 2300–2306. doi: 10.26868/25222708.2021.31110.
- [125] A. Ciardiello, J. Dell'Olmo, M. Ferrero, L. M. Pastore, F. Rosso, και F. Salata, 'Energy Retrofit Optimization by Means of Genetic Algorithms as an Answer to Fuel Poverty Mitigation in Social Housing Buildings', *Atmosphere*, τ. 14, τχ. 1, Art. τχ. 1, Ιανουαρίου 2023, doi: 10.3390/atmos14010001.
- [126] S. Naji, L. Aye, και M. Noguchi, 'Multi-objective optimisations of envelope components for a prefabricated house in six climate zones', *Appl. Energy*, τ. 282, σ. 116012, Ιανουαρίου 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116012.
- [127] G. Hernández-Moral, V. I. Serna-González, A. M. Crespo, και S. S. Rodil, 'Multi-objective optimization algorithms applied to residential building retrofitting at district scale: BRIOTOOL', *E3S Web Conf.*, τ. 362, σ. 03002, 2022, doi: 10.1051/e3sconf/202236203002.
- [128] M. Tavakolan, F. Mostafazadeh, S. Jalilzadeh Eirdmoussa, A. Safari, και K. Mirzaei, 'A parallel computing simulation-based multi-objective optimization framework for economic analysis of building energy retrofit: A case study in Iran', *J. Build. Eng.*, τ. 45, σ. 103485, Ιανουαρίου 2022, doi: 10.1016/j.job.2021.103485.
- [129] G. R. Araújo, R. Gomes, P. Ferrão, και M. G. Gomes, 'Optimizing building retrofit through data analytics: A study of multi-objective optimization and surrogate models derived from energy performance certificates', *Energy Built Environ.*, Ιουλίου 2023, doi: 10.1016/j.enbenv.2023.07.002.

- [130] S. Chang, D. Castro-Lacouture, και Y. Yamagata, ‘Decision support for retrofitting building envelopes using multi-objective optimization under uncertainties’, *J. Build. Eng.*, τ. 32, σ. 101413, Νοεμβρίου 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101413.
- [131] M. Panagiotidou, L. Aye, και B. Rismanchi, ‘Optimisation of multi-residential building retrofit, cost-optimal and net-zero emission targets’, *Energy Build.*, τ. 252, σ. 111385, Δεκεμβρίου 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111385.
- [132] A. S. Çıldır, G. Köktürk, και A. Tokuç, ‘Design approaches for retrofitting offices to reach nearly zero energy: A case study in the Mediterranean climate’, *Energy Sustain. Dev.*, τ. 58, σσ. 167–181, Οκτωβρίου 2020, doi: 10.1016/j.esd.2020.08.004.
- [133] F. Shadram, S. Bhattacharjee, S. Lidelöw, J. Mukkavaara, και T. Olofsson, ‘Exploring the trade-off in life cycle energy of building retrofit through optimization’, *Appl. Energy*, τ. 269, σ. 115083, Ιουλίου 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115083.
- [134] J. A. Wright, H. A. Loosemore, και R. Farmani, ‘Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm’, *Energy Build.*, τ. 34, τχ. 9, σσ. 959–972, Οκτωβρίου 2002, doi: 10.1016/S0378-7788(02)00071-3.
- [135] N. Nassif, S. Kajl, και R. Sabourin, ‘Optimization of HVAC Control System Strategy Using Two-Objective Genetic Algorithm’, *HVACR Res.*, τ. 11, τχ. 3, σσ. 459–486, Ιουλίου 2005, doi: 10.1080/10789669.2005.10391148.
- [136] Y.-K. Juan, J. H. Kim, K. Roper, και D. Castro-Lacouture, ‘GA-based decision support system for housing condition assessment and refurbishment strategies’, *Autom. Constr.*, τ. 18, τχ. 4, σσ. 394–401, Ιουλίου 2009, doi: 10.1016/j.autcon.2008.10.006.
- [137] F. Pernodet, H. Lahmidi, και P. Michel, ‘Use of genetic algorithms for multicriteria optimization of building refurbishment’.
- [138] Y.-K. Juan, P. Gao, και J. Wang, ‘A hybrid decision support system for sustainable office building renovation and energy performance improvement’, *Energy Build.*, τ. 42, τχ. 3, σσ. 290–297, Μαρτίου 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.09.006.
- [139] L. Magnier και F. Haghghat, ‘Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network’, *Build. Environ.*, τ. 45, τχ. 3, σσ. 739–746, Μαρτίου 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.08.016.
- [140] F. P. Chantrelle, H. Lahmidi, W. Keilholz, M. E. Mankibi, και P. Michel, ‘Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings’, *Appl. Energy*, τ. 88, τχ. 4, σσ. 1386–1394, Απριλίου 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.10.002.
- [141] V. Siddharth, P. V. Ramakrishna, T. Geetha, και A. Sivasubramaniam, ‘Automatic generation of energy conservation measures in buildings using genetic algorithms’, *Energy Build.*, τ. 43, τχ. 10, σσ. 2718–2726, Οκτωβρίου 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.06.028.

- [142] Q. Jin και M. Overend, 'Facade Renovation for a Public Building Based on a Whole-Life Value Approach', παρουσιάστηκε στο BSO Conference 2012, στο BSO Conference, vol. 1. IBPSA-England, 2012, σσ. 378–385. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bsc2012_6A2
- [143] D. Gossard, B. Lartigue, και F. Thellier, 'Multi-objective optimization of a building envelope for thermal performance using genetic algorithms and artificial neural network', *Energy Build.*, τ. 67, σσ. 253–260, Δεκεμβρίου 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.08.026.
- [144] E. M. Malatji, J. Zhang, και X. Xia, 'A multiple objective optimisation model for building energy efficiency investment decision', *Energy Build.*, τ. 61, σσ. 81–87, Ιουνίου 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.01.042.
- [145] E. Asadi, M. G. da Silva, C. H. Antunes, L. Dias, και L. Glicksman, 'Multi-objective optimization for building retrofit: A model using genetic algorithm and artificial neural network and an application', *Energy Build.*, τ. 81, σσ. 444–456, Οκτωβρίου 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.06.009.
- [146] P. Das, E. Nix, Z. Chalabi, M. Davies, C. Shrubsole, και J. Taylor, 'Exploring the health/energy Pareto-optimal front for adapting a case-study dwelling in the Delhi environment', Ιουνίου 2014.
- [147] H. Huws και L. Jankovic, 'A Method for Zero Carbon Design Using Multi-objective Optimisation', Ιανουαρίου 2014.
- [148] S. N. Murray, B. P. Walsh, D. Kelliher, και D. T. J. O'Sullivan, 'Multi-variable optimization of thermal energy efficiency retrofitting of buildings using static modelling and genetic algorithms – A case study', *Build. Environ.*, τ. 75, σσ. 98–107, Μαΐου 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.01.011.
- [149] Y. Shao, P. Geyer, και W. Lang, 'Integrating requirement analysis and multi-objective optimization for office building energy retrofit strategies', *Energy Build.*, τ. 82, σσ. 356–368, Οκτωβρίου 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.07.030.
- [150] M. Wang, J. Wright, A. E. I. Brownlee, και R. Buswell, 'Applying global and local SA in identification of variables importance with the use of multi-objective optimization', Ιανουαρίου 2014, Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://repository.lboro.ac.uk/articles/conference_contribution/Applying_global_and_local_SA_in_identification_of_variables_importance_with_the_use_of_multi-objective_optimization/9437708/1

- [151] F. Ascione, N. Bianco, C. De Stasio, G. M. Mauro, και G. P. Vanoli, 'A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance', *Energy Build.*, τ. 88, σσ. 78–90, Φεβρουαρίου 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.11.058.
- [152] J. Carreras, D. Boer, G. Guillén-Gosálbez, L. F. Cabeza, M. Medrano, και L. Jiménez, 'Multi-objective optimization of thermal modelled cubicles considering the total cost and life cycle environmental impact', *Energy Build.*, τ. 88, σσ. 335–346, Φεβρουαρίου 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.12.007.
- [153] M. He, A. Brownlee, T. Lee, J. Wright, και S. Taylor, 'Multi-objective Optimization for a Large Scale Retrofit Program for the Housing Stock in the North East of England', *Energy Procedia*, τ. 78, σσ. 854–859, Νοεμβρίου 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.007.
- [154] C. Monteiro, J. Sousa, A. Pina, και P. Ferrão, 'Optimizing retrofitting strategies in a building using multiobjective genetic algorithms.', παρουσιάστηκε στο Energy for Sustainability 2015 - Sustainable Cities: Designing for People and the Planet, Coimbra, Μαΐου 2015.
- [155] E. Nix, J. Taylor, και M. Davies, 'Employing A Multi-Objective Robust Optimisation Method for Healthy And Low-Energy Dwelling Design in Delhi, India', παρουσιάστηκε στο Building Simulation 2015, στο Building Simulation, vol. 14. Hyderabad, India: IBPSA, 2015, σσ. 2093–2100. doi: 10.26868/25222708.2015.2654.
- [156] P. Penna, A. Prada, F. Cappelletti, και A. Gasparella, 'Multi-objectives optimization of Energy Efficiency Measures in existing buildings', *Energy Build.*, τ. 95, σσ. 57–69, Μαΐου 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.11.003.
- [157] P. Penna, A. Prada, F. Cappelletti, και A. Gasparella, 'Multi-objective optimization for existing buildings retrofitting under government subsidization', *Sci. Technol. Built Environ.*, τ. 21, τχ. 6, σσ. 847–861, Αυγούστου 2015, doi: 10.1080/23744731.2015.1028867.
- [158] G. Pernigotto, A. Prada, F. Cappelletti, και A. Gasparella, 'Influence of the Representativeness of Reference Weather Data in Multi-Objective Optimization of Building Refurbishment', παρουσιάστηκε στο Building Simulation 2015, στο Building Simulation, vol. 14. IBPSA, 2015, σσ. 2857–2864. doi: 10.26868/25222708.2015.2395.
- [159] M. Abdallah και K. El-Rayes, 'Multiobjective Optimization Model for Maximizing Sustainability of Existing Buildings', *J. Manag. Eng.*, τ. 32, τχ. 4, σ. 04016003, Ιουλίου 2016, doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000425.
- [160] R. M. S. F. Almeida και V. P. D. Freitas, 'An insulation thickness optimization methodology for school buildings rehabilitation combining artificial neural networks and life

cycle cost', *J. Civ. Eng. Manag.*, τ. 22, τχ. 7, Art. τχ. 7, Ιουλίου 2016, doi: 10.3846/13923730.2014.928364.

[161] F. Ascione, N. Bianco, C. De Stasio, G. M. Mauro, και G. P. Vanoli, 'Multi-stage and multi-objective optimization for energy retrofitting a developed hospital reference building: A new approach to assess cost-optimality', *Appl. Energy*, τ. 174, σσ. 37–68, Ιουλίου 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.04.078.

[162] R. Azari, S. Garshasbi, P. Amini, H. Rashed-Ali, και Y. Mohammadi, 'Multi-objective optimization of building envelope design for life cycle environmental performance', *Energy Build.*, τ. 126, σσ. 524–534, Αυγούστου 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.05.054.

[163] C. Brunelli, F. Castellani, A. Garinei, L. Biondi, και M. Marconi, 'A Procedure to Perform Multi-Objective Optimization for Sustainable Design of Buildings', *Energies*, τ. 9, τχ. 11, Art. τχ. 11, Νοεμβρίου 2016, doi: 10.3390/en9110915.

[164] R. Fresco Contreras, J. Moyano, και F. Rico, 'Genetic algorithm-based approach for optimizing the energy rating on existing buildings', *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, τ. 37, τχ. 6, σσ. 664–681, Νοεμβρίου 2016, doi: 10.1177/0143624416644484.

[165] I. García Kerdan, R. Raslan, και P. Ruyssevelt, 'An exergy-based multi-objective optimisation model for energy retrofit strategies in non-domestic buildings', *Energy*, τ. 117, σσ. 506–522, Δεκεμβρίου 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.06.041.

[166] T. Niemelä, R. Kosonen, και J. Jokisalo, 'Cost-effectiveness of energy performance renovation measures in Finnish brick apartment buildings', *Energy Build.*, τ. 137, σσ. 60–75, Φεβρουαρίου 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.031.

[167] T. Niemelä, R. Kosonen, και J. Jokisalo, 'Cost-optimal energy performance renovation measures of educational buildings in cold climate', *Appl. Energy*, τ. 183, σσ. 1005–1020, Δεκεμβρίου 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.09.044.

[168] S. Papadopoulos και E. Azar, 'Optimizing HVAC operation in commercial buildings: A genetic algorithm multi-objective optimization framework', στο *2016 Winter Simulation Conference (WSC)*, Δεκεμβρίου 2016, σσ. 1725–1735. doi: 10.1109/WSC.2016.7822220.

[169] H. Son και C. Kim, 'Evolutionary Multi-objective Optimization in Building Retrofit Planning Problem', *Procedia Eng.*, τ. 145, σσ. 565–570, Ιανουαρίου 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.04.045.

[170] S. F. Tadeu, R. F. Alexandre, A. J. B. Tadeu, C. H. Antunes, N. A. V. Simões, και P. P. da Silva, 'A comparison between cost optimality and return on investment for energy retrofit in buildings-A real options perspective', *Sustain. Cities Soc.*, τ. 21, σσ. 12–25, Φεβρουαρίου 2016, doi: 10.1016/j.scs.2015.11.002.

- [171] F. Ascione, N. Bianco, C. De Stasio, G. M. Mauro, και G. P. Vanoli, ‘CASA, cost-optimal analysis by multi-objective optimisation and artificial neural networks: A new framework for the robust assessment of cost-optimal energy retrofit, feasible for any building’, *Energy Build.*, τ. 146, σσ. 200–219, Ιουλίου 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.04.069.
- [172] F. Ascione, N. Bianco, R. F. De Masi, G. M. Mauro, και G. P. Vanoli, ‘Energy retrofit of educational buildings: Transient energy simulations, model calibration and multi-objective optimization towards nearly zero-energy performance’, *Energy Build.*, τ. 144, σσ. 303–319, Ιουνίου 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.03.056.
- [173] F. Ascione, N. Bianco, R. F. De Masi, G. M. Mauro, και G. P. Vanoli, ‘Resilience of robust cost-optimal energy retrofit of buildings to global warming: A multi-stage, multi-objective approach’, *Energy Build.*, τ. 153, σσ. 150–167, Οκτωβρίου 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.08.004.
- [174] M. M. Eskander, M. Sandoval-Reyes, C. A. Silva, S. M. Vieira, και J. M. C. Sousa, ‘Assessment of energy efficiency measures using multi-objective optimization in Portuguese households’, *Sustain. Cities Soc.*, τ. 35, σσ. 764–773, Νοεμβρίου 2017, doi: 10.1016/j.scs.2017.09.032.
- [175] Y. Fan και X. Xia, ‘A multi-objective optimization model for energy-efficiency building envelope retrofitting plan with rooftop PV system installation and maintenance’, *Appl. Energy*, τ. 189, σσ. 327–335, Μαρτίου 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.12.077.
- [176] I. García Kerdan, R. Raslan, P. Ruyssevelt, και D. Morillón Gálvez, ‘ExRET-Opt: An automated exergy/exergoeconomic simulation framework for building energy retrofit analysis and design optimisation’, *Appl. Energy*, τ. 192, σσ. 33–58, Απριλίου 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.02.006.
- [177] I. García Kerdan, R. Raslan, P. Ruyssevelt, και D. Morillón Gálvez, ‘A comparison of an energy/economic-based against an exergoeconomic-based multi-objective optimisation for low carbon building energy design’, *Energy*, τ. 128, σσ. 244–263, Ιουνίου 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.03.142.
- [178] G. M. Mauro κ.ά., ‘A Multi-Step Approach to Assess the Lifecycle Economic Impact of Seismic Risk on Optimal Energy Retrofit’, *Sustainability*, τ. 9, τχ. 6, Art. τχ. 6, Ιουνίου 2017, doi: 10.3390/su9060989.
- [179] T. Niemelä, K. Levy, R. Kosonen, και J. Jokisalo, ‘Cost-optimal renovation solutions to maximize environmental performance, indoor thermal conditions and productivity of office buildings in cold climate’, *Sustain. Cities Soc.*, τ. 32, σσ. 417–434, Ιουλίου 2017, doi: 10.1016/j.scs.2017.04.009.

- [180] F. Roberti, U. F. Oberegger, E. Lucchi, και A. Troi, 'Energy retrofit and conservation of a historic building using multi-objective optimization and an analytic hierarchy process', *Energy Build.*, τ. 138, σσ. 1–10, Μαρτίου 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.028.
- [181] F. Ascione, N. Bianco, G. M. Mauro, D. F. Napolitano, και G. P. Vanoli, 'A Multi-Criteria Approach to Achieve Constrained Cost-Optimal Energy Retrofits of Buildings by Mitigating Climate Change and Urban Overheating', *Climate*, τ. 6, τχ. 2, Art. τχ. 2, Ιουνίου 2018, doi: 10.3390/cli6020037.
- [182] F. Bosco, M. Lauria, V. A. Puggioni, και C. Cornaro, 'A Full Automatic Procedure for the Evaluation of Retrofit Solutions of an Office Building Towards NZEB', στο *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Ιουνίου 2018, σσ. 1–6. doi: 10.1109/EEEIC.2018.8493639.
- [183] C. Fernández Bandera, A. F. Muñoz Mardones, H. Du, J. Echevarría Trueba, και G. Ramos Ruiz, 'Exergy As a Measure of Sustainable Retrofitting of Buildings', *Energies*, τ. 11, τχ. 11, Art. τχ. 11, Νοεμβρίου 2018, doi: 10.3390/en11113139.
- [184] Y. Cascone, A. Capozzoli, και M. Perino, 'Optimisation analysis of PCM-enhanced opaque building envelope components for the energy retrofitting of office buildings in Mediterranean climates', *Appl. Energy*, τ. 211, σσ. 929–953, Φεβρουαρίου 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.11.081.
- [185] Y. Fan και X. Xia, 'Energy-efficiency building retrofit planning for green building compliance', *Build. Environ.*, τ. 136, σσ. 312–321, Μαΐου 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.03.044.
- [186] Y. Fan και X. Xia, 'Building retrofit optimization models using notch test data considering energy performance certificate compliance', *Appl. Energy*, τ. 228, σσ. 2140–2152, Οκτωβρίου 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.043.
- [187] J. Hirvonen, J. Jokisalo, J. Heljo, και R. Kosonen, 'Towards the EU emissions targets of 2050: optimal energy renovation measures of Finnish apartment buildings', *Int. J. Sustain. Energy*, τ. 38, τχ. 7, σσ. 649–672, Αυγούστου 2019, doi: 10.1080/14786451.2018.1559164.
- [188] L. Jankovic, 'Designing Resilience of the Built Environment to Extreme Weather Events', *Sustainability*, τ. 10, τχ. 1, Art. τχ. 1, Ιανουαρίου 2018, doi: 10.3390/su10010141.
- [189] S. Miglani, K. Orehounig, και J. Carmeliet, 'Integrating a thermal model of ground source heat pumps and solar regeneration within building energy system optimization', *Appl. Energy*, τ. 218, σσ. 78–94, Μαΐου 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.02.173.

- [190] P. Sankelo, J. Jokisalo, J. Nyman, J. Vinha, και K. Sirén, ‘Cost-optimal energy performance measures in a new daycare building in cold climate’, *Int. J. Sustain. Energy*, τ. 38, τχ. 2, σσ. 104–122, Φεβρουαρίου 2019, doi: 10.1080/14786451.2018.1448398.
- [191] H. Son και C. Kim, ‘Evolutionary many-objective optimization for retrofit planning in public buildings: A comparative study’, *J. Clean. Prod.*, τ. 190, σσ. 403–410, Ιουλίου 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.102.
- [192] A. N. Aijazi και L. R. Glicksman, ‘Application of surrogate modeling to multi-objective optimization for residential retrofit design’, στο *Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design*, στο SIMAUD ’19. San Diego, CA, USA: Society for Computer Simulation International, abril 2019, σσ. 1–7.
- [193] F. Ascione, N. Bianco, G. M. Mauro, D. F. Napolitano, και G. P. Vanoli, ‘Weather-data-based control of space heating operation via multi-objective optimization: Application to Italian residential buildings’, *Appl. Therm. Eng.*, τ. 163, σ. 114384, Δεκεμβρίου 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114384.
- [194] F. Ascione, N. Bianco, G. M. Mauro, και D. F. Napolitano, ‘Retrofit of villas on Mediterranean coastlines: Pareto optimization with a view to energy-efficiency and cost-effectiveness’, *Appl. Energy*, τ. 254, σ. 113705, Νοεμβρίου 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113705.
- [195] F. Ascione, N. Bianco, G. M. Mauro, και D. F. Napolitano, ‘Villas on Islands: cost-effective energy refurbishment in Mediterranean coastline houses’, *Energy Procedia*, τ. 159, σσ. 192–200, Φεβρουαρίου 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2018.12.050.
- [196] M. Cellura, S. Longo, F. Montana, και E. R. Sanseverino, ‘Multi-Objective Building Envelope Optimization through a Life Cycle Assessment Approach’, στο *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Ιουνίου 2019, σσ. 1–6. doi: 10.1109/EEEIC.2019.8783807.
- [197] J. Hirvonen, J. Jokisalo, J. Heljo, και R. Kosonen, ‘Towards the EU Emission Targets of 2050: Cost-Effective Emission Reduction in Finnish Detached Houses’, *Energies*, τ. 12, τχ. 22, Art. τχ. 22, Ιανουαρίου 2019, doi: 10.3390/en12224395.
- [198] K. Jeong, T. Hong, J. Kim, και K. Cho, ‘Development of a multi-objective optimization model for determining the optimal CO₂ emissions reduction strategies for a multi-family housing complex’, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, τ. 110, σσ. 118–131, Αυγούστου 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.04.068.

- [199] J. Jokisalo, P. Sankelo, J. Vinha, K. Sirén, και R. Kosonen, 'Cost optimal energy performance renovation measures in a municipal service building in a cold climate', *E3S Web Conf.*, τ. 111, σ. 03022, 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201911103022.
- [200] M.-L. Pannier, H. Boileau, και C. Buhé, 'Identification Of Energy, Environmental And Economical Optimal Refurbishment Scenarios For Hotels In The Alps', παρουσιάστηκε στο Building Simulation 2019, στο Building Simulation, vol. 16. IBPSA, 2019, σσ. 2894–2901. doi: 10.26868/25222708.2019.210610.
- [201] S. Papadopoulos, C. E. Kontokosta, A. Vlachokostas, και E. Azar, 'Rethinking HVAC temperature setpoints in commercial buildings: The potential for zero-cost energy savings and comfort improvement in different climates', *Build. Environ.*, τ. 155, σσ. 350–359, Μαΐου 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.03.062.
- [202] S. A. Sharif και A. Hammad, 'Developing surrogate ANN for selecting near-optimal building energy renovation methods considering energy consumption, LCC and LCA', *J. Build. Eng.*, τ. 25, σ. 100790, Σεπτεμβρίου 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2019.100790.
- [203] S. A. Sharif και A. Hammad, 'Simulation-Based Multi-Objective Optimization of institutional building renovation considering energy consumption, Life-Cycle Cost and Life-Cycle Assessment', *J. Build. Eng.*, τ. 21, σσ. 429–445, Ιανουαρίου 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2018.11.006.
- [204] K. Song, Y. Ahn, J. Ahn, και N. Kwon, 'Development of an Energy Saving Strategy Model for Retrofitting Existing Buildings: A Korean Case Study', *Energies*, τ. 12, τχ. 9, Art. τχ. 9, Ιανουαρίου 2019, doi: 10.3390/en12091626.
- [205] Ş. Akın, O. K. İşeri, Ç. M. Akgül, B. Erdoğan, και İ. G. Dino, 'Climate Change Impact on Multi-Objective Optimization: A Case Study on Educational Buildings'.
- [206] A. Ciardiello, F. Rosso, J. Dell'Olmo, V. Ciancio, M. Ferrero, και F. Salata, 'Multi-objective approach to the optimization of shape and envelope in building energy design', *Appl. Energy*, τ. 280, σ. 115984, Δεκεμβρίου 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115984.
- [207] M. Frossard, P. Schalbart, και B. Peuportier, 'Dynamic and consequential LCA aspects in multi-objective optimisation for NZEB design', *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, τ. 588, τχ. 3, σ. 032031, Νοεμβρίου 2020, doi: 10.1088/1755-1315/588/3/032031.
- [208] R. Guo, P. Heiselberg, Y. Hu, C. Zhang, και S. Vasilevskis, 'Optimization of night ventilation performance in office buildings in a cold climate', *Energy Build.*, τ. 225, σ. 110319, Οκτωβρίου 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110319.
- [209] K. Mirzaei, A. Safari, S. Jalilzadeh, F. Mostafazadeh, M. Tavakolan, και M. Safari, 'Environmental, Social, and Economic Benefits of Buildings Energy Retrofit Projects: A Case

Study in Iran's Construction Industry', σσ. 693–701, Νοεμβρίου 2020, doi: 10.1061/9780784482858.075.

[210] S. Mirzaie, M. Taheri, S. Oliver, F. Gielow, και A. Wegienka, 'The efforts towards development of an energy optimization dynamic simulation tool', παρουσιάστηκε στο uSim Conference 2020, στο uSim Conference, vol. 2. IBPSA-Scotland, 2020, σσ. 181–187. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=usim2020_B3_1_Mirzaie

[211] M. Mohit, E. H. Alavy, M. D. Saghaf, και B. M. Kari, 'Cost-Effective, Energy-Efficient Solutions for Building Envelope: A Multi-Objective Optimization Case Study', *Prometheus*, τ. 4, σσ. 106–109, Μαΐου 2020.

[212] E. Naderi, B. Sajadi, M. A. Behabadi, και E. Naderi, 'Multi-objective simulation-based optimization of controlled blind specifications to reduce energy consumption, and thermal and visual discomfort: Case studies in Iran', *Build. Environ.*, τ. 169, σ. 106570, Φεβρουαρίου 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106570.

[213] F. Rosso, V. Ciancio, J. Dell'Olmo, και F. Salata, 'Multi-objective optimization of building retrofit in the Mediterranean climate by means of genetic algorithm application', *Energy Build.*, τ. 216, σ. 109945, Ιουνίου 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109945.

[214] F. Salata, V. Ciancio, J. Dell'Olmo, I. Golasi, O. Palusci, και M. Coppi, 'Effects of local conditions on the multi-variable and multi-objective energy optimization of residential buildings using genetic algorithms', *Appl. Energy*, τ. 260, σ. 114289, Φεβρουαρίου 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114289.

[215] N. Abdou, Y. EL Mghouchi, S. Hamdaoui, N. EL Asri, και M. Mouqallid, 'Multi-objective optimization of passive energy efficiency measures for net-zero energy building in Morocco', *Build. Environ.*, τ. 204, σ. 108141, Οκτωβρίου 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108141.

[216] M. Belhous, H. Mastouri, H. Radoine, S. I. Kaitouni, και B. Benhamou, 'Multi-objective Optimization of the Thickness of the Thermal Insulation and the Windows Area of a House in Benguerir, Morocco', στο *2021 9th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Νοεμβρίου 2021, σσ. 1–6. doi: 10.1109/IRSEC53969.2021.9741150.

[217] Y. Jung, Y. Heo, και H. Lee, 'Multi-objective optimization of the multi-story residential building with passive design strategy in South Korea', *Build. Environ.*, τ. 203, σ. 108061, Οκτωβρίου 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108061.

- [218] J. Mukkavaara και F. Shadram, ‘An integrated optimization and sensitivity analysis approach to support the life cycle energy trade-off in building design’, *Energy Build.*, τ. 253, σ. 111529, Δεκεμβρίου 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111529.
- [219] S. Papadopoulos και E. Azar, ‘Multi-objective Genetic Algorithm Optimization of HVAC Operation: Integrating Energy Consumption, Thermal Comfort, and Productivity’, στο *Energy Systems Evaluation (Volume 2)*, J. Ren, Επιμ., στο Green Energy and Technology. Cham: Springer International Publishing, 2021, σσ. 261–278. doi: 10.1007/978-3-030-67376-5_11.
- [220] T. E. Seghier, Y.-W. Lim, M. F. Harun, M. H. Ahmad, A. A. Samah, και H. A. Majid, ‘BIM-based retrofit method (RBIM) for building envelope thermal performance optimization’, *Energy Build.*, τ. 256, σ. 111693, Φεβρουαρίου 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111693.
- [221] M. Talaei, M. Mahdavejad, R. Azari, A. Prieto, και H. Sangin, ‘Multi-objective optimization of building-integrated microalgae photobioreactors for energy and daylighting performance’, *J. Build. Eng.*, τ. 42, σ. 102832, Οκτωβρίου 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102832.
- [222] K. Aram, R. Taherkhani, και A. Šimelytė, ‘Multistage Optimization toward a Nearly Net Zero Energy Building Due to Climate Change’, *Energies*, τ. 15, τχ. 3, Art. τχ. 3, Ιανουαρίου 2022, doi: 10.3390/en15030983.
- [223] M. Baghoolizadeh, M. Rostamzadeh-Renani, S. A. H. H. Dehkordi, R. Rostamzadeh-Renani, και D. Toghraie, ‘A prediction model for CO₂ concentration and multi-objective optimization of CO₂ concentration and annual electricity consumption cost in residential buildings using ANN and GA’, *J. Clean. Prod.*, τ. 379, σ. 134753, Δεκεμβρίου 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134753.
- [224] C. Calama-González, R. Suárez, και Á. Luis León-Rodríguez, ‘Mitigation of climate change in Mediterranean existing social dwellings through numerical optimization of building stock models’, *Energy Build.*, τ. 266, σ. 112109, Ιουλίου 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112109.
- [225] C. M. Calama-González, P. Symonds, Á. L. León-Rodríguez, και R. Suárez, ‘Optimal retrofit solutions considering thermal comfort and intervention costs for the Mediterranean social housing stock’, *Energy Build.*, τ. 259, σ. 111915, Μαρτίου 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.111915.
- [226] M. Derakhti, W. O’Brien, και S. Bucking, ‘Multi-objective optimization of building retrofit strategies using staged GHG emission targets’, παρουσιάστηκε στο eSim 2022, στο eSim, vol. 12. IBPSA-Canada, 2022, σσ. 0–0. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος

2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=esim2022_262

[227] V. Rossi, B. Howard, και J. Wright, ‘Evaluating the regional implications of income-aware building stock retrofit strategies through constrained multi-objective optimization’, παρουσιάστηκε στο Building Simulation 2021, στο Building Simulation, vol. 17. IBPSA, 2021, σσ. 159–166. doi: 10.26868/25222708.2021.30375.

[228] S. Ruggiero κ.ά., ‘Multi-Objective Optimization for Cooling and Interior Natural Lighting in Buildings for Sustainable Renovation’, *Sustainability*, τ. 14, τχ. 13, Art. τχ. 13, Ιανουαρίου 2022, doi: 10.3390/su14138001.

[229] N. Swedberg, ‘Robust Optimisation of Building Retrofits for Present versus Future Climate Scenarios in Humid Continental Climates (Dfb subtype) to Reduce Heating Demand and Mitigate Future Overheating Risk’, *E3S Web Conf.*, τ. 362, σ. 11002, 2022, doi: 10.1051/e3sconf/202236211002.

[230] Q. Xue, Z. Wang, και Q. Chen, ‘Multi-objective optimization of building design for life cycle cost and CO2 emissions: A case study of a low-energy residential building in a severe cold climate’, *Build. Simul.*, τ. 15, τχ. 1, σσ. 83–98, Ιανουαρίου 2022, doi: 10.1007/s12273-021-0796-5.

[231] N. Ardiani, S. Sharples, και H. Mohammadpourkarbasi, ‘Multi-objective optimisation of energy retrofit in hot-humid climates’ office building’, παρουσιάστηκε στο S.ARCH Berlin, 10th International Conference on Architecture and Built Environment, Berlin, Απριλίου 2023. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://livrepository.liverpool.ac.uk/3169530>

[232] F. M. Baba, H. Ge, R. Zmeureanu, και L. (Leon) Wang, ‘Optimizing overheating, lighting, and heating energy performances in Canadian school for climate change adaptation: Sensitivity analysis and multi-objective optimization methodology’, *Build. Environ.*, τ. 237, σ. 110336, Ιουνίου 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110336.

[233] M. Baghoolizadeh, M. Rostamzadeh-Renani, M. Hakimazari, και R. Rostamzadeh-Renani, ‘Improving CO2 concentration, CO2 pollutant and occupants’ thermal comfort in a residential building using genetic algorithm optimization’, *Energy Build.*, τ. 291, σ. 113109, Ιουλίου 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113109.

[234] A. Ciardiello, J. Dell’Olmo, F. Rosso, L. M. Pastore, M. Ferrero, και F. Salata, ‘An Innovative Multi-objective Optimization Digital Workflow for Social Housing Deep Energy Renovation Design Process’, στο *Technological Imagination in the Green and Digital Transition*, E. Arbizzani, E. Cangelli, C. Clemente, F. Cumo, F. Giofrè, A. M. Giovenale, M.

Palme, και S. Paris, Επιμ., στο The Urban Book Series. Cham: Springer International Publishing, 2023, σσ. 111–121. doi: 10.1007/978-3-031-29515-7_11.

[235] B. Gao, X. Zhu, J. Ren, J. Ran, M. K. Kim, και J. Liu, ‘Multi-objective optimization of energy-saving measures and operation parameters for a newly retrofitted building in future climate conditions: A case study of an office building in Chengdu’, *Energy Rep.*, τ. 9, σσ. 2269–2285, Δεκεμβρίου 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.01.049.

[236] Y. Gao, S. Luo, J. Jiang, και Y. Rong, ‘Environmental-thermal-economic performance trade-off for rural residence retrofitting in the Beijing–Tianjin–Hebei region, Northern China: A multi-objective optimisation framework under different scenarios’, *Energy Build.*, τ. 286, σ. 112910, Μαΐου 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.112910.

[237] H. Jain, A. Thomas, και T. S. Rajput, ‘A Multi-objective Optimization Framework for Sustainable Retrofit of Indian Buildings’, στο *Recent Advances in Materials, Mechanics and Structures*, S. Saha, A. S. Sajith, D. R. Sahoo, και P. Sarkar, Επιμ., στο Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore: Springer Nature, 2023, σσ. 73–83. doi: 10.1007/978-981-19-3371-4_7.

[238] M. A. Kamazani και M. K. Dixit, ‘Multi-objective optimization of embodied and operational energy and carbon emission of a building envelope’, *J. Clean. Prod.*, τ. 428, σ. 139510, Νοεμβρίου 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139510.

[239] S. Liu, Y. Wang, X. Liu, L. Yang, Y. Zhang, και J. He, ‘How does future climatic uncertainty affect multi-objective building energy retrofit decisions? Evidence from residential buildings in subtropical Hong Kong’, *Sustain. Cities Soc.*, τ. 92, σ. 104482, Μαΐου 2023, doi: 10.1016/j.scs.2023.104482.

[240] S. Nateghi και J. Kaczmarczyk, ‘Multi-objective optimization of window opening and thermostat control for enhanced indoor environment quality and energy efficiency in contrasting climates’, *J. Build. Eng.*, τ. 78, σ. 107617, Νοεμβρίου 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.107617.

[241] X. Yang, Z. Chen, Y. Zou, και F. Wan, ‘Improving the Energy Performance and Economic Benefits of Aged Residential Buildings by Retrofitting in Hot–Humid Regions of China’, *Energies*, τ. 16, τχ. 13, Art. τχ. 13, Ιανουαρίου 2023, doi: 10.3390/en16134981.

Παράρτημα Α: Κατάλογος μελετών

ID	DOI	Τίτλος	Τύπος	Συγγραφέας	Έτος
[134]	doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00071-3	Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm	Άρθρο	Wright κ. α.	2002
[135]	doi.org/10.1080/10789669.2005.10391148	Optimization of HVAC Control System Strategy Using Two-Objective Genetic Algorithm	Άρθρο	Nassif κ. α.	2005
[136]	doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.006	GA-based decision support system for housing condition assessment and refurbishment strategies	Άρθρο	Juan κ. α.	2009
[137]	N/A	Use of genetic algorithms for multicriteria optimization of building refurbishment	Έγγραφο Συνεδρίου	Pernodet κ. α.	2009
[138]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.006	A hybrid decision support system for sustainable office building renovation and energy performance improvement	Άρθρο	Juan κ. α.	2010
[139]	doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.016	Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network	Άρθρο	Magnier και Haghghat	2010
[140]	doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.002	Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings	Άρθρο	Chantrelle κ. α.	2011
[141]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.028	Automatic generation of energy conservation measures in buildings	Άρθρο	Siddharth κ. α.	2011

ID	DOI	Τίτλος	Τύπος	Συγγραφέας	Έτος
		using genetic algorithms			
[142]	N/A	Facade renovation for a public building based on a whole-life value approach	Έγγραφο Συνεδρίου	Jin και Overend	2012
[143]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.026	Multi-objective optimization of a building envelope for thermal performance using genetic algorithms and artificial neural network	Άρθρο	Gossard κ. α.	2013
[144]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.042	A multiple objective optimisation model for building energy efficiency investment decision	Άρθρο	Malatji κ. α.	2013
[145]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.009	Multi-objective optimization for building retrofit: A model using genetic algorithm and artificial neural network and an application	Άρθρο	Asadi κ. α.	2014
[146]	doi.org/N/A	Exploring the health/energy Pareto-optimal front for adapting a case-study dwelling in the Delhi environment	Έγγραφο Συνεδρίου	Das κ. α.	2014
[147]	doi.org/N/A	A Method for Zero Carbon Design Using Multi-objective Optimisation	Έγγραφο Συνεδρίου	Huws και Jankovic	2014
[148]	doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.011	Multi-variable optimization of thermal energy efficiency retrofitting of buildings using static modelling and genetic algorithms – A case study	Άρθρο	Murray κ. α.	2014
[149]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.030	Integrating requirement analysis and multi-objective optimization for office building energy retrofit strategies	Άρθρο	Shao κ. α.	2014
[150]	N/A	Applying global and local SA in identification of variables importance with the use of multi-objective optimization	Έγγραφο Συνεδρίου	Wang κ. α.	2014
[151]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.058	A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance	Άρθρο	Ascione κ. α.	2015
[152]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.007	Multi-objective optimization of thermal modelled cubicles considering the total cost and life cycle environmental impact	Άρθρο	Carreras κ. α.	2015
[153]	doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.007	Multi-objective optimization for a large scale retrofit program for the housing stock in the North East of England	Άρθρο	He κ. α.	2015

ID	DOI	Τίτλος	Τύπος	Συγγραφέας	Έτος
[154]	N/A	Optimizing retrofitting strategies in a building using multiobjective genetic algorithms.	Έγγραφο Συνεδρίου	Monteiro κ. α.	2015
[155]	doi.org/10.26868/25222708.2015.2654	Employing A Multi-Objective Robust Optimisation Method for Healthy And Low-Energy Dwelling Design in Delhi, India	Έγγραφο Συνεδρίου	Nix κ. α.	2015
[156]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.003	Multi-objectives optimization of Energy Efficiency Measures in existing buildings	Άρθρο	Penna κ. α.	2015
[157]	doi.org/10.1080/23744731.2015.1028867	Multi-objective optimization for existing buildings retrofitting under government subsidization	Άρθρο	Penna κ. α.	2015
[158]	doi.org/10.26868/25222708.2015.2395	Influence of the Representativeness of Reference Weather Data in Multi-Objective Optimization of Building Refurbishment	Έγγραφο Συνεδρίου	Pernigotto κ. α.	2015
[159]	doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000425.	Multiobjective Optimization Model for Maximizing Sustainability of Existing Buildings	Άρθρο	Abdallah και El-Rayes	2016
[160]	doi.org/10.3846/13923730.2014.928364	An insulation thickness optimization methodology for school buildings rehabilitation combining artificial neural networks and life cycle cost	Άρθρο	Almeida και Freitas	2016
[161]	doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.078	Multi-stage and multi-objective optimization for energy retrofitting a developed hospital reference building: A new approach to assess cost-optimality	Άρθρο	Ascione κ. α.	2016
[162]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.054	Multi-objective optimization of building envelope design for life cycle environmental performance	Άρθρο	Azari κ. α.	2016
[163]	doi.org/10.3390/en9110915	A Procedure to Perform Multi-Objective Optimization for Sustainable Design of Buildings	Άρθρο	Brunelli κ. α.	2016
[164]	doi.org/10.1177/0143624416644484	Genetic algorithm-based approach for optimizing the energy rating on existing buildings	Άρθρο	Contreras κ. α.	2016
[165]	doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.041	An exergy-based multi-objective optimisation model for energy retrofit strategies in non-domestic buildings	Άρθρο	García Kerdan κ. α.	2016
[166]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.031	Cost-effectiveness of energy performance renovation measures in Finnish brick apartment buildings	Άρθρο	Niemelä κ. α.	2016
[167]	doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.044	Cost-optimal energy performance renovation measures of educational buildings in cold climate	Άρθρο	Niemelä κ. α.	2016

ID	DOI	Τίτλος	Τύπος	Συγγραφέας	Έτος
[168]	doi.org/10.1109/WSC.2016.7822220	Optimizing HVAC operation in commercial buildings: A genetic algorithm multi-objective optimization framework	Έγγραφο Συνεδρίου	Papadopoulos και Azar	2016
[5]	doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.056	Implementing multi objective genetic algorithm for life cycle carbon footprint and life cycle cost minimisation: A building refurbishment case study	Άρθρο	Schwartz κ. α.	2016
[169]	doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.045	Evolutionary Multi-objective Optimization in Building Retrofit Planning Problem	Άρθρο	Son και Kim	2016
[170]	doi.org/10.1016/j.scs.2015.11.002	A comparison between cost optimality and return on investment forenergy retrofit in buildings-A real options perspective	Άρθρο	Tadeu κ. α.	2016
[171]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.069	CASA, cost-optimal analysis by multi-objective optimisation and artificial neural networks: A new framework for the robust assessment of cost-optimal energy retrofit, feasible for any building	Άρθρο	Ascione κ. α.	2017
[172]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.056	Energy retrofit of educational buildings: Transient energy simulations, model calibration and multi-objective optimization towards nearly zero-energy performance	Άρθρο	Ascione κ. α.	2017
[173]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.004	Resilience of robust cost-optimal energy retrofit of buildings to global warming: A multi-stage, multi-objective approach	Άρθρο	Ascione κ. α.	2017
[174]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.004	Assessment of energy efficiency measures using multi-objective optimization in Portuguese households	Άρθρο	Eskκαter κ. α.	2017
[175]	doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.077	A multi-objective optimization model for energy-efficiency building envelope retrofitting plan with rooftop PV system installation and maintenance	Άρθρο	Fan και Xia	2017
[176]	doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.006	ExRET-Opt: An automated exergy/exergoeconomic simulation framework for building energy retrofit analysis and design optimisation	Άρθρο	García Kerdan κ. α.	2017
[177]	doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.142	A comparison of an energy/economic-based against an exergoeconomic-based multi-objective optimisation for low carbon building energy design	Άρθρο	García Kerdan κ. α.	2017
[178]	doi.org/10.3390/su9060989	A Multi-Step Approach to Assess the Lifecycle Economic Impact of Seismic Risk on Optimal Energy Retrofit	Άρθρο	Mauro κ. α.	2017

ID	DOI	Τίτλος	Τύπος	Συγγραφέας	Έτος
[179]	doi.org/10.1016/j.scs.2017.04.009	Cost-optimal renovation solutions to maximize environmental performance, indoor thermal conditions and productivity of office buildings in cold climate	Άρθρο	Niemelä κ. α.	2017
[180]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.028	Energy retrofit and conservation of a historic building using multi-objective optimization and an analytic hierarchy process	Άρθρο	Roberti κ. α.	2017
[181]	doi.org/10.3390/cli6020037	A Multi-Criteria Approach to Achieve Constrained Cost-Optimal Energy Retrofits of Buildings by Mitigating Climate Change and Urban Overheating	Άρθρο	Ascione κ. α.	2018
[182]	doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8493639	A Full Automatic Procedure for the Evaluation of Retrofit Solutions of an Office Building Towards NZEB	Έγγραφο Συνεδρίου	Bosco κ. α.	2018
[183]	doi.org/10.3390/en11113139	Exergy As a Measure of Sustainable Retrofitting of Buildings	Άρθρο	Bandera κ. α.	2018
[184]	doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.081	Optimisation analysis of PCM-enhanced opaque building envelope components for the energy retrofitting of office buildings in Mediterranean climates	Άρθρο	Cascone κ. α.	2018
[185]	doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.044	Energy-efficiency building retrofit planning for green building compliance	Άρθρο	Fan και Xia	2018
[186]	doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.043	Building retrofit optimization models using notch test data considering energy performance certificate compliance	Άρθρο	Fan και Xia	2018
[187]	doi.org/10.1080/14786451.2018.1559164	Towards the EU emissions targets of 2050: optimal energy renovation measures of Finnish apartment buildings	Άρθρο	Hirvonen κ. α.	2018
[188]	doi.org/10.3390/su10010141	Designing Resilience of the Built Environment to Extreme Weather Events	Άρθρο	Jankovic	2018
[114]	doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.038	An analysis methodology for large-scale deep energy retrofits of existing building stocks: Case study of the Italian office building	Άρθρο	Luddeni κ. α.	2018
[189]	doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.173	Integrating a thermal model of ground source heat pumps and solar regeneration within building energy system optimization	Άρθρο	Miglani κ. α.	2018
[190]	doi.org/10.1080/14786451.2018.1448398	Cost-optimal energy performance measures in a new daycare building in cold climate	Άρθρο	Sankelo κ. α.	2018

ID	DOI	Τίτλος	Τύπος	Συγγραφέας	Έτος
[191]	doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.102	Evolutionary many-objective optimization for retrofit planning in public buildings: A comparative study	Άρθρο	Son και Kim	2018
[192]	N/A	Application of Surrogate Modeling to Multi-Objective Optimization for Residential Retrofit Design	Έγγραφο Συνεδρίου	Aijazi και Glicksman	2019
[193]	doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114384	Weather-data-based control of space heating operation via multi-objective optimization: Application to Italian residential buildings	Άρθρο	Ascione κ. α.	2019
[194]	doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113705	Retrofit of villas on Mediterranean coastlines: Pareto optimization with a view to energy-efficiency and cost-effectiveness	Άρθρο	Ascione κ. α.	2019
[195]	doi.org/10.1016/j.egypro.2018.12.050	Villas on Islands: cost-effective energy refurbishment in Mediterranean coastline houses	Άρθρο	Ascione κ. α.	2019
[74]	doi.org/10.1080/17512549.2019.165491	Influence of model calibration and optimization techniques on the evaluation of thermal comfort and retrofit measures of a Lisbon household using building energy simulation	Άρθρο	Azevedo κ. α.	2019
[196]	doi.org/10.1109/EEEIC.2019.8783807	Multi-Objective Building Envelope Optimization through a Life Cycle Assessment Approach	Έγγραφο Συνεδρίου	Cellura κ. α.	2019
[99]	doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.119	Investment decision-making optimization of energy efficiency retrofit measures in multiple buildings under financing budgetary restraint	Άρθρο	He κ. α.	2019
[197]	doi.org/10.3390/en12224395	Towards the EU Emission Targets of 2050: Cost-effective Emission Reduction in Finnish Detached Houses	Άρθρο	Hirvonen κ. α.	2019
[198]	doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.068	Development of a multi-objective optimization model for determining the optimal CO2 emissions reduction strategies for a multi-family housing complex	Άρθρο	Jeong κ. α.	2019
[199]	doi.org/10.1051/e3sconf/201911103022	Cost optimal energy performance renovation measures in a municipal service building in a cold climate	Έγγραφο Συνεδρίου	Jokisalo κ. α.	2019
[115]	doi.org/10.3390/su11051495	Two-Stage Multi-Objective Meta-Heuristics for Environmental and Cost-Optimal Energy Refurbishment at District Level	Άρθρο	Manjarres κ. α.	2019
[200]	doi.org/10.26868/25222708.2019.210610	Identification of energy, environmental and economical optimal refurbishment scenarios for hotels in the Alps	Έγγραφο Συνεδρίου	Pannier κ. α.	2019

ID	DOI	Τίτλος	Τύπος	Συγγραφέας	Έτος
[201]	doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.062	Rethinking HVAC temperature setpoints in commercial buildings: The potential for zero-cost energy savings and comfort improvement in different climates	Άρθρο	Papadopoulos κ. α.	2019
[202]	doi.org/10.1016/j.job.2019.100790	Developing surrogate ANN for selecting near-optimal building energy renovation methods considering energy consumption, LCC and LCA	Άρθρο	Sharif και Hammad	2019
[203]	doi.org/10.1016/j.job.2018.11.006	Simulation-Based Multi-Objective Optimization of institutional building renovation considering energy consumption, Life-Cycle Cost and Life-Cycle Assessment	Άρθρο	Sharif και Hammad	2019
[80]	doi.org/10.1016/j.aei.2019.03.006	Multi-objective optimization design of a complex building based on an artificial neural network and performance evaluation of algorithms	Άρθρο	Si κ. α.	2019
[204]	doi.org/10.3390/en12091626	Development of an Energy Saving Strategy Model for Retrofitting Existing Buildings: A Korean Case Study	Άρθρο	Song κ. α.	2019
[118]	doi.org/10.1007/s12053-019-09812-z	Assessing evidence-based single-step and staged deep retrofit towards nearly zero-energy buildings (nZEB) using multi-objective optimisation	Άρθρο	Zuhaib και Goggins	2019
[107]	doi.org/10.1016/j.job.2020.101174	Balancing the impacts of energy efficiency strategies on comfort quality of interior places: Application of optimization algorithms in domestic housing	Άρθρο	Aghamolaei και Ghaani	2020
[205]	N/A	Climate Change Impact on Multi-Objective Optimization: A Case Study on Educational Buildings	Έγγραφο Συνεδρίου	Akin κ. α.	2020
[130]	doi.org/10.1016/j.job.2020.101413	Decision support for retrofitting building envelopes using multi-objective optimization under uncertainties	Άρθρο	Chang κ. α.	2020
[206]	doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115984	Multi-objective approach to the optimization of shape and envelope in building energy design	Άρθρο	Ciardiello κ. α.	2020
[132]	doi.org/10.1016/j.esd.2020.08.004	Design approaches for retrofitting offices to reach nearly zero energy: A case study in the Mediterranean climate	Άρθρο	Çıldır κ. α.	2020
[207]	doi.org/10.1088/1755-1315/588/3/032031	Dynamic and consequential LCA aspects in multi-objective optimisation for NZEB design	Έγγραφο Συνεδρίου	Frossard κ. α.	2020
[208]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110319	Optimization of night ventilation performance in office buildings in a cold climate	Άρθρο	Guo κ. α.	2020

ID	DOI	Τίτλος	Τύπος	Συγγραφέας	Έτος
[78]	doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101385	Optimizing thermal and visual efficiency using parametric configuration of skylights in heritage buildings	Άρθρο	Marzouk κ. α.	2020
[209]	doi.org/10.1061/9780784482858.075	Environmental, Social, and Economic Benefits of Buildings Energy Retrofit Projects: A Case Study in Iran's Construction Industry	Έγγραφο Συνεδρίου	Mirzaei κ. α.	2020
[210]	N/A	The Efforts Towards Development of an Energy Optimization Dynamic Simulation Tool	Έγγραφο Συνεδρίου	Mirzaie κ. α.	2020
[211]	N/A	Cost-Effective, Energy-Efficient Solutions for Building Envelope: A Multi-Objective Optimization Case Study	Άρθρο	Mohit κ. α.	2020
[121]	doi.org/10.3390/su12187807	Multi-Objective Optimization of Building Life Cycle Performance. A Housing Renovation Case Study in Northern Europe	Άρθρο	Montana κ. α.	2020
[212]	doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106570	Multi-objective simulation-based optimization of controlled blind specifications to reduce energy consumption, and thermal and visual discomfort: Case studies in Iran	Άρθρο	Naderi κ. α.	2020
[126]	doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116012	Multi-objective optimisations of envelope components for a prefabricated house in six climate zones	Άρθρο	Naji κ. α.	2020
[213]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109945	Multi-objective optimization of building retrofit in the Mediterranean climate by means of genetic algorithm application	Άρθρο	Rosso κ. α.	2020
[214]	doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114289	Effects of local conditions on the multi-variable and multi-objective energy optimization of residential buildings using genetic algorithms	Άρθρο	Salata κ. α.	2020
[133]	doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115083	Exploring the trade-off in life cycle energy of building retrofit through optimization	Άρθρο	Shadram κ. α.	2020
[215]	doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108141	Multi-objective optimization of passive energy efficiency measures for net-zero energy building in Morocco	Άρθρο	Abdou κ. α.	2021
[216]	doi.org/10.1109/IRSEC53969.2021.9741150	Multi-objective Optimization of the Thickness of the Thermal Insulation and the Windows Area of a House in Benguerir, Morocco	Έγγραφο Συνεδρίου	Belhous κ. α.	2021
[120]	doi.org/10.26868/25222708.2021.30965	Impact of Occupant Behaviour on Performance Optimized Building Retrofits	Έγγραφο Συνεδρίου	Donges κ. α.	2021

ID	DOI	Τίτλος	Τύπος	Συγγραφέας	Έτος
[123]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111329	What is the optimal robust environmental and cost-effective solution for building renovation? Not the usual one	Άρθρο	Galimshina κ. α.	2021
[217]	doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108061	Multi-objective optimization of the multi-story residential building with passive design strategy in South Korea	Άρθρο	Jung κ. α.	2021
[117]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111776	Integration of phasing on multi-objective optimization of building stock energy retrofit	Άρθρο	Merlet κ. α.	2021
[119]	doi.org/10.1016/j.seta.2021.101256	Techno-economic multi-objective optimization of detailed external wall Insulation scenarios for buildings in moderate-dry regions	Άρθρο	Motaghian κ. α.	2021
[218]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111529	An integrated optimization and sensitivity analysis approach to support the life cycle energy trade-off in building design	Άρθρο	Mukkavaara και Shadram	2021
[97]	doi.org/10.1007/978-3-030-76477-7_8	Occupant Actions Selection Strategies Based on Pareto-Optimal Schedules and Daily Schedule for Energy Management in Buildings	Κεφάλαιο Βιβλίου	Pal και Bandyopadhyay	2021
[131]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111385	Optimisation of multi-residential building retrofit, cost-optimal and net-zero emission targets	Άρθρο	Panagiotidou κ. α.	2021
[116]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111290	Identifying optimal renovation schedules for building portfolios: Application in a social housing context under multi-year funding constraints	Άρθρο	Pannier κ. α.	2021
[219]	doi.org/10.1007/978-3-030-67376-5_11	Multi-objective Genetic Algorithm Optimization of HVAC Operation: Integrating Energy Consumption, Thermal Comfort, and Productivity	Κεφάλαιο Βιβλίου	Papadopoulos και Azar	2021
[220]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111693	BIM-based retrofit method (RBIM) for building envelope thermal performance optimization	Άρθρο	Seghier κ. α.	2021
[103]	doi.org/10.1016/j.seta.2021.101490	A heuristic solution and multi-objective optimization model for life-cycle cost analysis of solar PV/GSHP system: A case study of campus residential building in Korea	Άρθρο	Sim και Suh	2021
[221]	doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102832	Multi-objective optimization of building-integrated microalgae photobioreactors for energy and daylighting performance	Άρθρο	Talaei κ. α.	2021

ID	DOI	Τίτλος	Τύπος	Συγγραφέας	Έτος
[128]	doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103485	A parallel computing simulation-based multi-objective optimization framework for economic analysis of building energy retrofit: A case study in Iran	Άρθρο	Tavakolan κ. α.	2021
[75]	doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102160	Framework for design and optimization of a retrofitted light industrial space with a renewable energy-assisted hydroponics facility in a rural northern canadian community	Άρθρο	Udovichenko κ. α.	2021
[79]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111513	A metamodel-based multi-objective optimization method to balance thermal comfort and energy efficiency in a campus gymnasium	Άρθρο	Yue κ. α.	2021
[222]	doi.org/10.3390/en15030983	Multistage Optimization toward a Nearly Net Zero Energy Building Due to Climate Change	Άρθρο	Aram κ. α.	2022
[81]	doi.org/10.23919/SpliTech55088.2022.9854312	Model predictive control based on genetic algorithm and neural networks to optimize heating operation of a real low-energy building	Έγγραφο Συνεδρίου	Aruta κ. α.	2022
[109]	doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012044	The Cost-Optimal Optimization of public buildings in cold and warm climates: two case-studies in Germany and Italy	Έγγραφο Συνεδρίου	Ascione κ. α.	2022
[83]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112664	Optimizing space cooling of a nearly zero energy building via model predictive control: Energy cost vs comfort	Άρθρο	Ascione κ. α.	2022
[223]	doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134753	A prediction model for CO2 concentration and multi-objective optimization of CO2 concentration and annual electricity consumption cost in residential buildings using ANN and GA	Άρθρο	Baghoolizadeh κ. α.	2022
[224]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112109	Mitigation of climate change in Mediterranean existing social dwellings through numerical optimization of building stock models	Άρθρο	Calama-González κ. α.	2022
[225]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111915	Optimal retrofit solutions considering thermal comfort and intervention costs for the Mediterranean social housing stock	Άρθρο	Calama-González κ. α.	2022
[226]	N/A	Multi-objective optimization of building retrofit strategies using staged GHG emission targets	Έγγραφο Συνεδρίου	Derakhti κ. α.	2022
[122]	doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119102	Bio-based materials as a robust solution for building renovation: A case study	Άρθρο	Galimshina κ. α.	2022

ID	DOI	Τίτλος	Τύπος	Συγγραφέας	Έτος
[127]	doi.org/10.1051/e3sconf/202236203002	Multi-objective optimization algorithms applied to residential building retrofitting at district scale: BRIOTOOL	Έγγραφο Συνεδρίου	Hernández-Moral κ. α.	2022
[77]	doi.org/10.1016/j.jare.2021.06.005	Optimizing daylight utilization of flat skylights in heritage buildings	Άρθρο	Marzouk κ. α.	2022
[124]	doi.org/10.26868/25222708.2021.31110	Carbon-cost efficient retrofit of passive and active systems in residential buildings using genetic algorithm	Έγγραφο Συνεδρίου	Mohtashami κ. α.	2022
[113]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112721	Energy, economic and comfort optimization of building retrofits considering climate change: A simulation-based NSGA-III approach	Άρθρο	Mostafazadeh κ. α.	2022
[227]	doi.org/10.26868/25222708.2021.30375	Evaluating the regional implications of income-aware building stock retrofit strategies through constrained multi-objective optimization	Έγγραφο Συνεδρίου	Rossi κ. α.	2022
[228]	doi.org/10.3390/su14138001	Multi-Objective Optimization for Cooling and Interior Natural Lighting in Buildings for Sustainable Renovation	Άρθρο	Ruggiero κ. α.	2022
[229]	doi.org/10.1051/e3sconf/202236211002	Robust Optimisation of Building Retrofits for Present versus Future Climate Scenarios in Humid Continental Climates (Dfb subtype) to Reduce Heating Demand and Mitigate Future Overheating Risk	Έγγραφο Συνεδρίου	Swedberg	2022
[230]	doi.org/10.1007/s12273-021-0796-5	Multi-objective optimization of building design for life cycle cost and CO2 emissions: A case study of a low-energy residential building in a severe cold climate	Άρθρο	Xue κ. α.	2022
[104]	doi.org/10.3390/buildings12060829	Artificial Neural Network for Predicting Building Energy Performance: A Surrogate Energy Retrofits Decision Support Framework	Άρθρο	Zhang κ. α.	2022
[98]	doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110655	Retrofit optimization of building systems for future climates using an urban physics model	Άρθρο	Aliabadi κ. α.	2023
[129]	doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.07.002	Optimizing building retrofit through data analytics: A study of multi-objective optimization and surrogate models derived from energy performance certificates	Άρθρο	Araújo κ. α.	2023
[231]	N/A	Multi-objective optimisation of energy retrofit in hot-humid climates' office building	Έγγραφο Συνεδρίου	Ardiani κ. α.	2023
[82]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113139	Optimizing heating operation via GA- and ANN-based model predictive control: Concept for a real nearly-	Άρθρο	Aruta κ. α.	2023

ID	DOI	Τίτλος	Τύπος	Συγγραφέας	Έτος
		zero energy building			
[106]	doi.org/10.1080/17512549.2023.2204872	Development of an optimization model for decision-making in building retrofit projects using RETROSIM	Άρθρο	Asadi κ. α.	2023
[232]	doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110336	Optimizing overheating, lighting, and heating energy performances in Canadian school for climate change adaptation: Sensitivity analysis and multi-objective optimization methodology	Άρθρο	Baba κ. α.	2023
[233]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113109	Improving CO2 concentration, CO2 pollutant and occupants' thermal comfort in a residential building using genetic algorithm optimization	Άρθρο	Baghoolizadeh κ. α.	2023
[125]	doi.org/10.3390/atmos14010001	Energy Retrofit Optimization by Means of Genetic Algorithms as an Answer to Fuel Poverty Mitigation in Social Housing Buildings	Άρθρο	Ciardello κ. α.	2023
[234]	doi.org/10.1007/978-3-031-29515-7_11	An Innovative Multi-objective Optimization Digital Workflow for Social Housing Deep Energy Renovation Design Process	Έγγραφο Συνεδρίου	Ciardello κ. α.	2023
[111]	doi.org/10.3390/pr11061633	A Multi-Stage Decision Framework for Optimal Energy Efficiency Measures of Educational Buildings: A Case Study of Chongqing	Άρθρο	Cui κ. α.	2023
[235]	doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.049	Multi-objective optimization of energy-saving measures and operation parameters for a newly retrofitted building in future climate conditions: A case study of an office building in Chengdu	Άρθρο	Gao κ. α.	2023
[236]	doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112910	Environmental-thermal-economic performance trade-off for rural residence retrofitting in the Beijing–Tianjin–Hebei region, Northern China: A multi-objective optimisation framework under different scenarios	Άρθρο	Gao κ. α.	2023
[237]	doi.org/10.1007/978-981-19-3371-4_7	A Multi-objective Optimization Framework for Sustainable Retrofit of Indian Buildings	Έγγραφο Συνεδρίου	Jain κ. α.	2023
[96]	doi.org/10.1016/j.egy.2023.08.086	Multi-objective optimization of energy-efficient retrofitting strategies for single-family residential homes: Minimizing energy consumption, CO2 emissions and retrofit costs	Άρθρο	Kadrić κ. α.	2023
[238]	doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139510	Multi-objective optimization of embodied and	Άρθρο	Kamazani και Dixit	2023

ID	DOI	Τίτλος	Τύπος	Συγγραφέας	Έτος
		operational energy and carbon emission of a building envelope			
[239]	doi.org/10.1016/j.scs.2023.104482	How does future climatic uncertainty affect multi-objective building energy retrofit decisions? Evidence from residential buildings in subtropical Hong Kong	Άρθρο	Liu κ. α.	2023
[240]	doi.org/10.1016/j.job.2023.107617	Multi-objective optimization of window opening and thermostat control for enhanced indoor environment quality and energy efficiency in contrasting climates	Άρθρο	Nateghi και Kaczmarczyk	2023
[102]	N/A	Optimization of energy rehabilitation processes of existing buildings	Άρθρο	Nicolae κ. α.	2023
[108]	doi.org/10.1007/s12273-022-0941-9	Framework on low-carbon retrofit of rural residential buildings in arid areas of northwest China: A case study of Turpan residential buildings	Άρθρο	Song κ. α.	2023
[110]	doi.org/10.1016/j.est.2023.106665	Optimized thermal envelope of low-income dwellings in Santiago de Chile incorporating Pinus radiata wood impregnated with phase change materials	Άρθρο	Tapia-Calderón κ. α.	2023
[241]	doi.org/10.3390/en16134981	Improving the Energy Performance and Economic Benefits of Aged Residential Buildings by Retrofitting in Hot–Humid Regions of China	Άρθρο	Yang κ. α.	2023
[76]	doi.org/10.1177/01436244231174354	Solving the comfort-retrofit conundrum through post-occupancy evaluation and multi-objective optimisation.	Άρθρο	Yu κ. α.	2023
[105]	doi.org/10.1016/j.job.2023.106376	Dual-objective building retrofit optimization under competing priorities using Artificial Neural Network	Άρθρο	Zhan κ. α.	2023
[112]	doi.org/10.2478/amns.2023.2.01226	Process Exploration of New Materials for Building Decoration Engineering Based on Multi-Objective Planning Modeling	Άρθρο	Zhang	2023

Παράρτημα Β: Στοιχεία κτιρίων

ID	Λειτουργία Κτιρίου							Είδος Μοντέλου				Τοποθεσία Μελέτης	Έτος Κατασκευής
	K	Δ	E	B	A	Δ	M/Δ	ΠΚ	ΑΚ	ΑΜΚ	M/Δ		
[134]							X			X		N/A	M/Δ
[135]		X						X		X		Πανεπιστήμιο ÉTS, Μόντρεαλ, Καναδάς	M/Δ
[136]	X									X		Ταϊπέι, Ταϊβάν	2001
[137]		X							X			Αζάν - Τραπ, Γαλλία	M/Δ
[138]			X	X		X		X				Ταϊβάν	1979
[139]	X							X				Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Οττάβα, Καναδάς	M/Δ
[140]		X						X				Νίκαια, Γαλλία	M/Δ
[141]			X							X		Ταμίλ Ναντού, Ινδία MD – ΑΚ, ΗΠΑ	M/Δ
[142]		X				X		X				Κτίριο Inglis, Πανεπιστήμιο του Κέιμπριτζ, Ηνωμένο Βασίλειο	1945, 1964
[143]	X										X	Νανσί - Νίκαια, Γαλλία	M/Δ
[144]							X				X	N/A	M/Δ
[145]		X						X				Κοΐμπρα, Πορτογαλία	1983
[146]	X							X				Δελχί, Ινδία	M/Δ
[147]	X									X		Μπέρμινγχαμ, Ηνωμένο Βασίλειο	M/Δ
[148]		X				X		X				Πανεπιστημιακό Κολέγιο Κορκ, Ιρλανδία	1910 (2009, 2013)

ID	Λειτουργία Κτιρίου							Είδος Μοντέλου				Τοποθεσία Μελέτης	Έτος Κατασκευής
	K	Δ	E	B	A	Δ	M/Δ	ΠΚ	ΑΚ	ΑΜΚ	M/Δ		
[149]			X			X		X				Άαχεν, Γερμανία	1900
[150]			X							X		Μπέρμινχαμ, Αγγλία	M/Δ
[151]	X								X			Νάπολη, Ιταλία	M/Δ
[152]	X									X		Λέριδα, Ισπανία	M/Δ
[153]	X								X			Βορειοανατολική Αγγλία	M/Δ
[154]		X						X				Λισαβόνα, Πορτογαλία	M/Δ
[155]	X								X			Δελχί, Ινδία	M/Δ
[156]	X									X		Μιλάνο - Μεσσήνη, Ιταλία	M/Δ
[157]	X									X		Μιλάνο - Μεσσήνη, Ιταλία	M/Δ
[158]	X									X		Τρέντο, Ιταλία	M/Δ
[159]		X						X				N/A	1989 (1992)
[160]		X						X	X			Πόρτο, Πορτογαλία	M/Δ
[161]		X							X			Νάπολη, Ιταλία	1991–2005
[162]			X						X			Σιάτλ, ΗΠΑ	M/Δ
[163]		X						X				Πανεπιστήμιο της Περούτζια, Ιταλία	M/Δ
[164]	X							X				Σεβίλλη, Ισπανία	1960
[165]		X	X						X			Λονδίνο - Γκάτγουικ, Ηνωμένο Βασίλειο	Δεκαετία '80
[166]	X							X				Βάνταα, Φινλανδία	1960-1964
[167]		X						X				Πανεπιστήμιο LUT, Φινλανδία	1960–1979
[168]			X						X			Βαλτιμόρη, MD, Η.Π.Α	Μετά το 1980
[5]	X					X		X				Σέφιλντ, Ηνωμένο Βασίλειο	Δεκαετία '50
[169]		X						X				Σεούλ, Νότια Κορέα	M/Δ
[170]	X								X			Αμαράντε, Πορτογαλία	Πριν το 1960
[171]			X						X			Νάπολη, Ιταλία	1920–1970
[172]		X						X				Μπενεβέντο, Ιταλία	Δεκαετία '90
[173]	X								X			Νάπολη, Ιταλία	1945–1999
[174]	X								X			Λισαβόνα - Εβόρα - Πόρτο - Μπραγκάντσα, Πορτογαλία	1970–1989
[175]	X							X				Νότια Αφρική	1967
[176]		X						X				Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο	Δεκαετία '60
[177]		X						X				Δήμος Ίσλινγκτον, Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο	Δεκαετία 1890 (2011)

ID	Λειτουργία Κτιρίου							Είδος Μοντέλου				Τοποθεσία Μελέτης	Έτος Κατασκευής
	K	Δ	E	B	A	Δ	M/Δ	ΠΚ	ΑΚ	ΑΜΚ	M/Δ		
[178]	X								X			Μιλάνο - Νόρτσα, Ιταλία	Δεκαετία '70
[179]			X					X				Λάχτι, Φινλανδία	Δεκαετίες '70, '80
[180]	X		X			X		X				Bolzano, Ιταλία	12ος αιώνας
[181]			X						X			Νάπολη, Ιταλία	1970
[182]			X					X				Ρώμη, Ιταλία	Δεκαετία '60
[183]		X						X				Πανεπιστήμιο της Ναβάρρα, Παμπλόνα, Ισπανία	1975
[184]			X						X			Παλέρμο - Τορίνο, Ιταλία	1946–1970
[185]			X					X				Πρετόρια, Νότια Αφρική	M/Δ
[186]			X					X				Νότια Αφρική	M/Δ
[187]	X								X			Φινλανδία	4 κατηγορίες
[188]	X							X				Μπέρμινγχαμ, Ηνωμένο Βασίλειο	Μετά το 1945
[114]			X						X			Μπολτσάνο – Μιλάνο – Ρώμη – Μπάρτι – Παλέρμο, Ιταλία	Πριν το 1976/ Μετά το 1976
[189]	X							X				Ζυρίχη, Ελβετία	M/Δ
[190]		X						X				Παιδικός σταθμός Luhta, Τάμπερε, Φινλανδία	2012
[191]		X						X				Πανεπιστήμιο Chung-Ang, Σεούλ, Νότια Κορέα	Δεκαετία '60
[192]	X								X			Λισαβόνα, Πορτογαλία	M/Δ
[193]	X								X			Παλέρμο - Νάπολη - Φλωρεντία - Μιλάνο, Ιταλία	1961–1975
[194]	X								X			Αθήνα, Ελλάδα Νάπολη, Ιταλία	M/Δ
[195]	X								X			Αθήνα, Ελλάδα Νάπολη, Ιταλία	M/Δ
[74]	X							X				Ολιβιάς, Λισαβόνα, Πορτογαλία	1971
[196]							X			X		Παλέρμο, Ιταλία Κοπεγχάγη, Δανία	M/Δ
[99]		X	X					X				Ντέλαγουερ, ΗΠΑ	M/Δ
[197]	X								X			Φινλανδία	4 κατηγορίες
[198]	X							X				Σεούλ, Νότια Κορέα	2000
[199]		X						X				Κτήριο Jukoia, Τάμπερε, Φινλανδία	1955 (2011–2013)
[115]	X								X			Σαν Σεμασιάν - Ντονόστια, Ισπανία	M/Δ
[200]			X					X				Ζινάλ, Βαλαί, Ελβετία	Δεκαετία '20 ('70, '90, '00)

ID	Λειτουργία Κτιρίου							Είδος Μοντέλου				Τοποθεσία Μελέτης	Έτος Κατασκευής
	K	Δ	E	B	A	Δ	M/Δ	ΠΚ	ΑΚ	ΑΜΚ	M/Δ		
[201]			X						X			Διάφορες πόλεις στις Η.Π.Α.	Μετά το 1980
[202]	X							X				Πανεπιστήμιο Κονκόρντια, Μόντρεαλ, Καναδάς	M/Δ
[203]		X						X				Πανεπιστήμιο Κονκόρντια, Μόντρεαλ, Καναδάς	M/Δ
[80]			X		X			X				Τουριστικό κέντρο Νιushou, Ναντσίνγκ, Κίνα	M/Δ
[204]		X						X				Σεούλ, Νότια Κορέα	1974
[118]		X						X				Πανεπιστήμιο του Γκάλγουεϊ, Ιρλανδία	1975 (2005)
[107]	X								X			Γιαζντ, Ιράν	Πριν το 1993
[205]		X						X				Τεχνικό Πανεπιστήμιο της Μέσης Ανατολής, Άγκυρα, Τουρκία	M/Δ
[130]	X							X				Σουμίντα, Τόκιο, Ιαπωνία	M/Δ
[206]	X								X			Ρώμη, Ιταλία	M/Δ
[132]			X					X				Σμύρνη, Τουρκία	M/Δ
[207]	X							X				Βουλγαρία, το μοντέλο τοποθετήθηκε στη Γαλλία	M/Δ
[208]			X					X				Άαργους, Δανία	M/Δ
[78]						X		X				Παλάτι Tossou, Κάιρο, Αίγυπτος	18ος αιώνας
[209]	X							X				Τεχεράνη, Ιράν	1966
[210]		X	X						X			N/A	M/Δ
[211]		X								X		Γιαζντ - Αρνταμπίλ - Μπαντάρ Αμπάς - Τεχεράνη, Ιράν	M/Δ
[121]	X							X				Χβάλσο, Δανία	1969 (2011)
[122]			X						X			Ιράν	M/Δ
[126]	X							X				Μελβούρνη, Αυστραλία	M/Δ
[213]	X								X			Ρώμη, Ιταλία	M/Δ
[214]	X								X			19 ευρωπαϊκές πόλεις	Αρχές δεκαετίας '00
[133]	X							X				Πιτεό, Σουηδία	Δεκαετία '1980
[215]	X								X			Μαρόκο	M/Δ
[216]	X							X				Μπεν Γκερίρ, Μαρόκο	M/Δ
[120]	X									X		Μιλάνο - Μεσσήνη, Ιταλία	1979-1991
[123]	X								X			Δυτική Ελβετία	1911, 1972
[217]	X									X		Νότια Κορέα	M/Δ
[117]	X							X				Παρίσι, Γαλλία	Πριν το 1979
[119]	X								X			Τεχεράνη, Ιράν	M/Δ

ID	Λειτουργία Κτιρίου							Είδος Μοντέλου				Τοποθεσία Μελέτης	Έτος Κατασκευής
	K	Δ	E	B	A	Δ	M/Δ	ΠΚ	ΑΚ	ΑΜΚ	M/Δ		
[218]	X							X				Βίντελν, Σουηδία	M/Δ
[97]		X						X				Πολυτεχνείο Γκρενόμπλ, Γαλλία	M/Δ
[131]	X							X				Ηράκλειο – Αθήνα – Θεσσαλονίκη – Φλώρινα, Ελλάδα	1961
[116]	X							X	X			Μοντρέγ, Παρίσι, Γαλλία	1957, 1964
[219]			X						X			Διάφορες πόλεις στις Η.Π.Α.	Μετά το 1980
[220]		X						X				Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο της Μαλαισίας, Μαλαισία	M/Δ
[103]	X							X				Γκεονγκσανγκμπούκ-ντο, Νότια Κορέα	M/Δ
[221]			X						X			Μασχάντ, Ιράν	M/Δ
[128]	X							X				Τεχεράνη, Ιράν	1970
[75]				X				X				Φορτ Γσιπ, Αλμπέρτα, Καναδάς	M/Δ
[79]					X			X				Γυμνάσιο QUT, Κίνα	M/Δ
[222]		X						X				Τεχεράνη, Ιράν	2008
[81]	X				X			X				Πανεπιστήμιο του Σάνιο. Μπενεβέντο, Ιταλία	M/Δ
[109]			X						X			Βερολίνο, Γερμανία Νάπολη, Ιταλία	Δεκαετία '1960
[83]	X				X			X				Πανεπιστήμιο του Σάνιο. Μπενεβέντο, Ιταλία	M/Δ
[223]	X							X				Διάφορες πόλεις στις Η.Π.Α.	M/Δ
[224]	X							X	X			Σεβίλλη (Καντίθ, Γρανάδα, Αλμερία), Ισπανία	1973
[225]	X							X	X			Σεβίλλη (Καντίθ, Γρανάδα, Αλμερία), Ισπανία	1973
[226]			X					X				Οντάριο, Καναδάς	M/Δ
[122]	X								X			Δυτική Ελβετία	1972
[127]	X							X				Βαγιαδολίδ, Ισπανία	1960
[77]						X		X				Παλάτι Tosson, Κάιρο, Αίγυπτος	18ος αιώνας
[124]	X									X		Γερμανία	1969-1978
[113]	X							X				Τεχεράνη, Ιράν	1991
[227]	X								X			Μίντλαντς και Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο	9 κατηγορίες
[228]	X							X				Πανεπιστημιούπολη ΕΚΠΑ, Αθήνα, Ελλάδα	1986
[229]	X								X			Διαφόρες περιοχές σε κλίμα Dfb	M/Δ
[230]	X							X				Χαρμπίν, Κίνα	M/Δ
[104]	X							X				Βρετανική Κολομβία, Καναδάς	M/Δ

ID	Λειτουργία Κτιρίου							Είδος Μοντέλου				Τοποθεσία Μελέτης	Έτος Κατασκευής	
	K	Δ	E	B	A	Δ	M/Δ	ΠΚ	ΑΚ	ΑΜΚ	M/Δ			
[98]	X								X				Τορόντο, Καναδάς	M/Δ
[129]	X							X					Έβρα, Πορτογαλία	1996–2000
[231]			X					X					Κτήριο PUPR, Τζακάρτα, Ινδονησία	M/Δ
[82]	X				X			X					Πανεπιστήμιο του Σάνιο, Μπενεβέντο, Ιταλία	M/Δ
[106]		X						X					Κοΐμπρα, Πορτογαλία	1983
[232]		X						X					Μόντρεαλ, Καναδάς	1958
[233]	X							X	X				Διάφορες πόλεις στις Η.Π.Α.	M/Δ
[125]	X							X					Ρώμη, Ιταλία	Τέλη δεκαετίας '70
[234]	X							X					Ρώμη, Ιταλία	Τέλη δεκαετίας '70
[111]		X						X					Τσονγκίνγκ, Κίνα	M/Δ
[235]			X					X					Τσεγκντού, Κίνα	1989 (2017)
[236]	X							X					Σιγιαζουάνγκ, Χεμπέι, Βόρεια Κίνα	M/Δ
[237]	X								X				Ινδία	M/Δ
[96]	X								X				Βοσνία και Ερζεγοβίνη	1971–1980
[238]			X						X				Κόλετζ Στέισον, Τέξας, ΗΠΑ	M/Δ
[239]	X								X				Χονγκ Κονγκ, Κίνα	M/Δ
[240]		X								X			Βαρσοβία, Πολωνία Μπανγκόκ, Ταϊλάνδη	M/Δ
[102]							X				X		Βουκουρέστι, Ρουμανία	M/Δ
[108]	X							X					Τουρφάν, Κίνα	M/Δ
[110]	X								X				Σαντιάγο, Χιλή	Pre-2000
[241]	X							X					Κουανγκτσόου, Κίνα	Δεκαετία '80
[76]			X			X		X					Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο	Μετά το Β' ΠΠ
[105]		X						X					Τζινάν, Κίνα	M/Δ
[112]		X						X					Γκουανγκτζόου, Κίνα	1994

K: Κατοικία, Δ: Δημόσιο, E: Εμπορικό, B: Βιομηχανικό, A: Άλλο, Δ: Διατηρητέο Κτίριο, M/Δ: Μη Διαθέσιμο, ΠΚ: Πραγματικό Κτίριο, ΑΚ: Αρχέτυπο Κτίριο, ΑΜΚ: Απλοποιημένο Μοντέλο Κτιρίου

ID	Ενέργεια													Κόστος Αναβάθμισης										
	Λ	Ε	ΚΖ	Πρωτ	Κατ	Ζήτ	Φορτ	Εξοικ	Χρήση	Ανάγ	Απόδ	Εξέρ	Θερμ	ΚΑΕ	ΔΚ	ΚΣ	ΚΑ	ΑΥ	ΚΠΑ	ΚΚΖ	ΔΕ	ΠΑ	Παρ	
[152]														X	X	X								
[153]	X					X								X	X									
[154]	X													X	X									
[155]	X				X																			
[156]	X										X			X	X	X	X	X	X	X				
[157]	X									X				X	X	X	X	X	X	X				
[158]	X			X		X								X	X	X	X	X	X	X				
[159]														X	X									
[160]	X					X	X							X	X	X						X		
[161]	X					X																		
[162]	X	X																						
[163]	X				X									X					X					
[164]	X					X		X						X	X									
[165]	X								X			X												
[166]	X			X										X	X	X	X	X	X	X	X			
[167]	X			X	X									X	X	X	X	X		X	X			
[168]	X				X																			X
[5]	X				X									X	X	X	X				X			
[169]	X				X									X	X									
[170]	X			X						X				X	X	X	X	X	X			X		
[171]	X			X	X									X	X	X		X						
[172]	X					X																		
[173]	X					X																		
[174]	X							X						X	X									
[175]	X							X						X	X	X	X			X			X	
[176]	X											X		X	X	X		X	X					
[177]	X								X			X		X	X	X		X	X					
[178]	X					X																		
[179]														X	X	X	X	X		X	X			X
[180]	X					X	X	X		X														
[181]	X					X																		
[182]	X				X									X	X									
[183]	X					X						X												
[184]	X			X	X					X				X	X	X			X					

ID	Ενέργεια													Κόστος Αναβάθμισης										
	Λ	Ε	ΚΖ	Πρωτ	Κατ	Ζήτ	Φορτ	Εξοικ	Χρήση	Ανάγ	Απόδ	Εξέρ	Θερμ	ΚΑΕ	ΛΚ	ΚΣ	ΚΑ	ΑΥ	ΚΠΑ	ΚΚΖ	ΑΕ	ΠΑ	Παρ	
[112]	X				X									X	X									

Λ: Λειτουργίας, Ε: Ενσωματωμένη, ΚΖ: Κύκλου Ζωής, Πρωτ: Πρωτογενής Ενέργεια, Κατ: Κατανάλωση Ενέργειας, Ζήτ: Ζήτηση Ενέργειας, Φορτ: Ενεργειακό Φορτίο, Εξοικ: Εξοικονόμηση Ενέργειας, Ανάγ: Ενεργειακές Ανάγκες, Απόδ: Ενεργειακή Απόδοση, Εξέρ: Εξέργεια, Θερμ: Συντελεστής Ολικής Θερμικής Μεταβίβασης, ΚΑΕ: Κόστος Αρχικής Επένδυσης, ΛΚ: Λειτουργικό Κόστος, ΚΣ: Κόστος Συντήρησης, ΚΑ: Κόστος Αντικατάστασης, ΑΥ: Αξία Υπολοίπου, ΚΠΑ: Καθαρή Παρούσα Αξία, ΚΚΖ: Κόστος Κύκλου Ζωής, ΑΕ: Απόδοση Επένδυσης, ΠΑ: Περίοδος Αποπληρωμής, Παρ: Παραγωγικότητα

ID	Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος					Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις								
		ΘΑ	Fanger	Άλλη ΘΑ	ΟΑ	ΠΑ		Λ	Ε	ΚΖ	ΔΥΠ	ΑΑΚΖ	ΚΦΠ	Άλλη
[166]														
[167]														
[168]	X	X	X											
[5]							X	X	X	X		X		
[169]	X	X					X		X					
[170]														
[171]	X	X	X											
[172]	X	X												
[173]														
[174]														
[175]														
[176]	X	X	X											
[177]	X	X	X											
[178]	X	X	X											
[179]	X	X	X				X	X						
[180]	X	X	X											
[181]	X	X	X											
[182]	X	X	X											
[183]														
[184]														
[185]														
[186]														
[187]							X	X						
[188]	X	X					X	X						
[114]														
[189]							X	X	X					
[190]														
[191]	X	X	X				X	X						
[192]														
[193]	X	X	X											
[194]														
[195]														
[74]	X	X	X	X										
[196]							X			X	X			

ID	Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος					Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις								
		ΘΑ	Fanger	Άλλη ΘΑ	ΟΑ	ΠΑ		Λ	E	KZ	ΔΥΠ	ΑΑΚΖ	ΚΦΠ	Άλλη
[99]							X	X						
[197]							X	X						
[198]							X	X						
[199]														
[115]														
[200]							X			X	X			X
[201]	X	X	X											
[202]							X			X				
[203]							X	X	X	X	X			
[80]	X	X	X											
[204]														
[118]	X	X												
[107]	X	X	X				X	X						
[205]	X	X		X										
[130]	X	X	X				X	X	X	X				
[206]							X	X						
[132]	X	X	X				X	X						
[207]							X	X		X				
[208]	X	X	X											
[78]	X				X									
[209]	X	X		X										
[210]														
[211]														
[121]							X	X	X	X	X			
[212]	X	X	X		X									
[126]	X	X	X		X									
[213]							X	X						
[214]							X	X						
[133]							X							
[215]	X	X	X											
[216]														
[120]														
[123]							X	X	X	X	X			
[217]							X			X	X			X

ID	Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος						Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις							
		ΘΑ	Fanger	Άλλη ΘΑ	ΟΑ	ΠΑ		Λ	E	KZ	ΔΥΠ	ΑΑΚΖ	ΚΦΠ	Άλλη
[82]	X	X		X										
[106]	X	X	X											
[232]	X	X		X										
[233]	X	X	X			X	X	X						
[125]														
[234]							X	X						
[111]														
[235]	X	X	X				X	X						
[236]	X	X	X				X	X	X	X				
[237]														
[96]							X	X						
[238]							X	X	X					
[239]							X	X	X	X				
[240]	X	X	X			X								
[102]														
[108]	X	X		X			X	X	X		X			
[110]	X	X		X										
[241]														
[76]	X	X	X	X	X									
[105]	X	X	X	X										
[112]	X	X		X										

ΘΑ: Θερμική Άνεση, ΟΑ: Οπτική Άνεση, ΠΑ: Ποιότητα Αέρα, Λ: Λειτουργίας, E: Ενσωματωμένη, KZ: Κύκλου Ζωής, ΔΥΠ: Δείκτης Υπερθέρμανσης του Πλανήτη, ΑΑΚΖ: Αποτύπωμα Άνθρακα Κύκλου Ζωής, ΚΦΠ: Κόστος Φυσικών Πόρων

Παράρτημα Δ: Μεθοδολογία και λεπτομέρειες

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[134]	<ul style="list-style-type: none"> • MOGA (απλός αλγόριθμος) • Μέτωπο Pareto • Μέθοδος συγκέντρωσης περιορισμών 	<ul style="list-style-type: none"> • Λειτουργικό κόστος • Θερμική δυσφορία • Εφικτότητα 	Μέγεθος συστήματος ΘΨΚ και ρυθμίσεις ελέγχου	Σχεδιασμός πηνίου, απόδοση ανεμιστήρα τροφοδοσίας, χωρητικότητα συστήματος	Συγκεντρωτικό μοντέλο χωρητικότητας
[135]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Περιορισμός ποιότητας 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Θερμική δυσφορία 	Έλεγχος ΘΨΚ: θερμοκρασία αέρα, στατική πίεση αγωγού, θερμοκρασία κρύου νερού, ελάχιστος εξαερισμός και αναθέρμανση εξωτερικού χώρου, θερμοκρασίες ζώνης αέρα	Ρυθμός ροής αέρα ανεμιστήρα, ρυθμός ροής αέρα ζώνης, PPD κάθε ζώνης	Στατικό μοντέλο συστήματος ΘΨΚ
[136]	<ul style="list-style-type: none"> • Pareto GA • AHP 	<ul style="list-style-type: none"> • Κόστος κύκλου ζωής • Ποιότητα αναβάθμισης 	<ul style="list-style-type: none"> • Επισκευή περιβλήματος κτιρίου και στεγάνωση στέγης • Εγκατάσταση απορροφητήρα και αντικατάσταση υδραυλικών εγκαταστάσεων • Στεγανότητα περιβλήματος • Ηχομόνωση τοίχων και παραθύρων • Αποτελεσματικό σύστημα διαχείρισης νερού • Ανακυκλώσιμα υλικά • Λειτουργίες και συσκευές ασφαλείας 	Ποιότητα Προϋπολογισμού	Java Server Pages (JSP) Περιβάλλον Java Apache Tomcat Βάση δεδομένων MySQL

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[137]	<ul style="list-style-type: none"> GA (GenetikSolver V4.1) Μέτωπο Pareto Μέθοδος WSM + ε-περιορισμοί Περιορισμός ποιής 	<ul style="list-style-type: none"> Κατανάλωση ενέργειας Κόστος αρχικής επένδυσης Ολικό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> Θερμοπερατότητα τοίχου, οροφής και παράθυρων Ηλιακός συντελεστής παράθυρων Μέγεθος υαλοπινάκων Στεγανότητα Ισχύς τεχνητού φωτισμού Ρύθμιση φωτισμού 	Κόστος ανακαίνισης Κατανάλωση ενέργειας	Πολυωνυμική εξίσωση Real-Coded GA GenetikSolver V4.1
[138]	<ul style="list-style-type: none"> GAA*: GA + Αναζήτηση γραφήματος A* 0-1 προγραμματισμός (ZOGP) 	<ul style="list-style-type: none"> Κόστος ανακαίνισης Ποιότητα ανακαίνισης Περιβαλλοντικές επιπτώσεις 	<ul style="list-style-type: none"> Τύπος οροφής: ταράτσα/στέγη με βλάστηση Εξωτερικό πεζοδρόμιο και προσαρμοσμένες στρατηγικές σχεδιασμού Τύπος συστήματος ΘΨΚ: ενεργειακή απόδοση Τύπος παράθυρου: μόνωση, επίστρωση και σκίαση Μόνωση δομών κτιρίου Φως ημέρας και τεχνητός φωτισμός Σύστημα διαχείρισης ενέργειας, νερού και απορριμμάτων Ανακυκλώσιμα υλικά 	M/Δ	Design Advisor
[139]	<ul style="list-style-type: none"> NSGA-II + ANN, LHS για δειγματοληψία Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> Κατανάλωση ενέργειας Θερμική άνεση 	<ul style="list-style-type: none"> Ρυθμίσεις συστήματος ΘΨΚ: Σημεία ρύθμισης θερμοκρασίας και υγρασίας, ρυθμοί παροχής αέρα, καθυστερήσεις θερμοστάτη Περιβλημα κτιρίου: παθητικός ηλιακός σχεδιασμός, μεγέθη παράθυρων 	Ωρες θερμικής δυσφορίας	TRNSYS GenOpt
[140]	<ul style="list-style-type: none"> NSGA-II Μέτωπα Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> Κατανάλωση ενέργειας Κόστος αρχικής επένδυσης Θερμική άνεση Ισοδύναμο CO2 κύκλου ζωής 	<ul style="list-style-type: none"> Τύπος τοίχων οροφής, ισόγειου, ενδιάμεσου ορόφου, διαχωριστικού τοίχου και παράθυρων Έλεγχος σκίασης: Κατώφλι φωτισμού και νεκρή ζώνη ελεγκτή 	M/Δ	MultiOpt: TRNSYS + COMIS + NSGA-II + οικονομικές και περιβαλλοντικές βάσεις δεδομένων
[141]	<ul style="list-style-type: none"> GA + στατιστική προσέγγιση Πολλαπλή μη γραμμική παλινδρόμηση για τα δημιουργούμενα σύνολα δεδομένων Διάφορες τοποθεσίες/κλίματα 	<ul style="list-style-type: none"> Κατανάλωση Ενέργειας Θερμική άνεση 	<ul style="list-style-type: none"> Περιοχή ανά άτομο Κυκλοφοριακή και εξωτερική ροή αέρα Ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία παροχής Συντελεστής παράκαμψης πηνίου DX Αναλογία ηλεκτρικής εισόδου ψυγείου Απόδοση ανεμιστήρα τροφοδοσίας Όριο εξοικονομητή 	Όρια θερμοκρασίας άνεσης	DOE 2.2

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[142]	• NSGA-II • Μέτωπο Pareto	<ul style="list-style-type: none"> • Περίοδος αποπληρωμής κόστους • Θερμική άνεση: PPD και IEQ • Περίοδος αποπληρωμής άνθρακα 	<ul style="list-style-type: none"> • WWR • Τύπος υαλοπινάκων • Τύπος μόνωσης εσωτερικού τοίχου και πλάκας εδάφους 	Περίοδος αποπληρωμής μετρητών Περίοδος αποπληρωμής άνθρακα	EnergyPlus MATLAB
[143]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + ANN • Μέτωπο Pareto • Συγκεντρωτικές και ποινικές μέθοδοι για σύγκριση MOO με μονοκριτηριακή • Πολλαπλά κλίματα 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Δείκτης άνεσης Isum 	Θερμοφυσικές ιδιότητες εξωτερικών τοίχων και στέγης: θερμική αγωγιμότητα και ογκομετρική ειδική θερμότητα	Isum	TRNSYS GenOpt
[144]	<ul style="list-style-type: none"> • GA + Εξαντλητική αναζήτηση • WSM • Ανάλυση ευαισθησίας • Περιορισμός ποινής 	<ul style="list-style-type: none"> • Εξοικονόμηση ενέργειας • Περίοδος αποπληρωμής 	<ul style="list-style-type: none"> • Φωτισμός: Αισθητήρες κίνησης, ballast, σωλήνες, λάμπες • Νέο ψυκτικό σύστημα • Διόρθωση συντελεστή ισχύος • Αντλίες θερμότητας • Εξοικονόμηση νερού • Περιτύλιγμα θέρμανσης • Θερμικές παγίδες • Έλεγχος ενέργειας 	Ενεργειακός στόχος Αρχική επένδυση Καθαρή παρούσα αξία Περίοδος αποπληρωμής	M/Δ
[145]	<ul style="list-style-type: none"> • Παραλλαγή NSGA-II + ANN, LHS για εκπαίδευση • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Κόστος ανακαίνισης • Θερμική δυσφορία 	<ul style="list-style-type: none"> • Μονωτικά υλικά εξωτ. τοίχων και στέγης • Τύπος παράθυρων • Τύπος ηλιακού συλλέκτη • Συστήματα ΘΨΚ 	M/Δ	TRNSYS GenOpt MATLAB
[146]	• NSGA-II • Μέτωπο Pareto	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Επιπτώσεις στην υγεία: Έκθεση σε ζέστη, κρύο και PM2.5 	<ul style="list-style-type: none"> • Πυκνότητα και αγωγιμότητα μόνωσης ταράτσας και τοίχων • Συντελεστής απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας από σοβά στέγης • Σκίαση • Απορροφητήρας • Στεγανότητα 	M/Δ	EnergyPlus MATLAB
[147]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Κλίμα για παρόν και μέλλον 	<ul style="list-style-type: none"> • Εκπομπές άνθρακα • Κόστος ανακαίνισης • Θερμική άνεση 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατασκευή εξωτερικού τοίχου • Εξωτερικά τζάμια • WWR • Διείσδυση • Σκίαση • Θερμική μάζα εδάφους • Σημείο ρύθμισης θέρμανσης • Σύστημα θέρμανσης • Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας 	M/Δ	DesignBuilder EnergyPlus jEPlus
[148]	• GA + Απλοποιημένη μέθοδος βαθμομέρων	<ul style="list-style-type: none"> • Εκπομπές άνθρακα • Κόστος ενέργειας • Απλή αποπληρωμή 	<ul style="list-style-type: none"> • Θερμοπερατότητα σοφίτας, εξωτ. τοίχων και παράθυρων • Τύπος λέβητα • Ρυθμός διείσδυσης 	M/Δ	M/Δ

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[149]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto: Θεωρία Πολυκριτήριας Αξίας • AHP • Ανάπτυξη συνάρτησης ποιότητας 	<ul style="list-style-type: none"> • Λειτουργική κατανάλωση ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης • Δείκτης υπερθέρμανσης του πλανήτη 	<ul style="list-style-type: none"> • Τύπος μόνωσης εξωτερικών τοίχων, οροφής και δαπέδου • Τύποι παράθυρων • Στεγανότητα κτιρίου • Σύστημα θέρμανσης 	<p>Φυσικές τιμές περιβλήματος, ετήσια κατανάλωση ενέργειας, διαρροή αέρα περιορισμένη από το EnEV 2009, ποιότητα αέρα εσωτερικού χώρου, κλίμα</p>	MS Excel VBA
[150]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Ανάλυση ευαισθησίας τοπική και παγκόσμια 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας • Κόστος κεφαλαίου 	<ul style="list-style-type: none"> • Σημείο ρύθμισης θέρμανσης • Νεκρή ζώνη • Προσανατολισμός • WWR • Χειμερινοί και καλοκαιρινοί χρόνοι έναρξης και διακοπής • Τύπος εσωτ. και εξωτ. τοίχου, οροφής και παράθυρου 	Θερμική άνεση	EnergyPlus Στατιστικό λογισμικό R
[151]	<ul style="list-style-type: none"> • Παραλλαγή NSGA-II • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας • Θερμική δυσφορία 	<ul style="list-style-type: none"> • Συντελεστής απορρόφησης στέγης • Πάχος μόνωσης στέγης και κατακόρυφου τοίχου • MVS • Σημεία ρύθμισης θερμοκρασίας • Τζάμια παράθυρων • Λέβητας • Ψυγείο 	Ολικό κόστος Προϋπολογισμός	DesignBuilder EnergyPlus MATLAB
[152]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Συνολικό κόστος • Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κύκλου ζωής 	<ul style="list-style-type: none"> • Πάχος μόνωσης τοίχου (ομογενείς και ετερογενείς περιπτώσεις παραλλαγών) 	M/Δ	EnergyPlus jEPlus+EA
[153]	<ul style="list-style-type: none"> • Εξαντλητική αναζήτηση και μετά NSGA-II • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση σοφίτας • Μόνωση κουλοτήτων • Μόνωση συμπαγούς τοίχου • Διπλά τζάμια 	Κίνδυνος υπερθέρμανσης	EnergyPlus Building Generation Tool jEPlus
[154]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Ενεργειακές ανάγκες • Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση ταράτσας και τοίχου • Τύπος παράθυρου • Σκίαση • WWR 	M/Δ	M/Δ
[155]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + LHS + ANN • Μέτωπο Pareto • Ανάλυση ευαισθησίας • UA: αριθμός κατοίκων, σημεία ρύθμισης θερμοκρασίας για AC και περσίδες, μεταβλητότητα PM2.5 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Επιπτώσεις στην υγεία: Έκθεση σε ζέστη, κρύο και PM2.5 	<ul style="list-style-type: none"> • Αγωγιμότητα μόνωσης εξωτ. τοίχων και στέγης • Πάχος μόνωσης οροφής • Προεξοχή σκίασης • Εμβαδό δαπέδου • Διαπερατότητα κατοικίας • Ηλιακή απορρόφηση εξωτερικού σοβά • Μέγεθος παράθυρου • Απορροφητήρας 	M/Δ	EnergyPlus MATLAB
[156]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + SSS • Μέτωπο Pareto • Διαφορετικά κλίματα και κίνητρα 	<ul style="list-style-type: none"> • Ενεργειακή απόδοση • Καθαρή παρούσα αξία • Σταθμισμένος χρόνος δυσφορίας 	<ul style="list-style-type: none"> • Πάχος μόνωσης εξωτερικού τοίχου, οροφής και δαπέδου • Τζάμια και πλαίσια παράθυρων • Τύπος λέβητα • MVS 	M/Δ	TRNSYS MATLAB

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[157]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + SSS • Μέτωπο Pareto • Διαφορετικά κλίματα και κίνητρα 	<ul style="list-style-type: none"> • Ενεργειακή απόδοση • Καθαρή παρούσα αξία • Σταθμισμένος χρόνος δυσφορίας 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση αδιαφανούς περιβλήματος • Τζάμια παράθρων • Τύπος λέβητα • MVS 	M/Δ	TRNSYS MATLAB
[158]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + SSS • Μέτωπο Pareto • UA: Αρχείο καιρού 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας • Καθαρή παρούσα αξία 	<ul style="list-style-type: none"> • Εξωτερική μόνωση τοίχου, οροφής και δαπέδου • Τζάμια και πλαίσια παράθρων • Τύπος λέβητα • MVS 	M/Δ	TRNSYS MATLAB
[159]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Περιβαλλοντικές επιπτώσεις: εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, επιπτώσεις ψυκτικού, εκπομπές ατμών υδραργύρου, φωτορύπανση, κατανάλωση νερού • Κόστος ανακαίνισης • Πόντοι LEED-EB 	<p>Πιστωτικές περιοχές LEED-EB: • Βιώσιμες τοποθεσίες • Απόδοση νερού: τουαλέτες, ουρητήρια, βρύσες</p> <p>• Ενέργεια και ατμόσφαιρα: κατανάλωσης ενέργειας φωτιστικών, αισθητήρες κίνησης, σύστημα ΘΨΚ, θερμοσίφωνες, μηχανήματα αυτόματης πώλησης, στεγνωτήρια χεριών, ηλιακοί συλλέκτες, ηλιακοί αντιστροφείς και άλλες συσκευές (ψυγεία) • Υλικά και πόροι: διαχείριση στερεών αποβλήτων • Ποιότητα περιβάλλοντος • Καινοτομία στη λειτουργία</p>	Φωτεινότητα φωτισμού, θέρμανση και ψύξη χώρων, θέρμανση νερού, φωτοβολταϊκά συστήματα	eQuest
[160]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + ANN με εκπαίδευση LHS • Μέτωπο Pareto: βέλτιστο κόστος • Διάφορα μοντέλα κτιρίων, τοποθεσίες και προσανατολισμός 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας θέρμανσης • Θερμική δυσφορία • Κόστος κύκλου ζωής 	<ul style="list-style-type: none"> • Θερμοπερατότητα τοίχου, οροφής και παράθρου • Ηλιακός συντελεστής παράθρου • Ρυθμός αλλαγής αέρα 	M/Δ	EnergyPlus DesignBuilder MATLAB MS Excel VBA
[161]	<ul style="list-style-type: none"> • LHS Monte Carlo, SA με SRRC • NSGA-II, Pareto δύο στόχων • Έξυπνη εξαντλητική δειγματοληψία, Pareto τριών στόχων 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας για θέρμανση • Ζήτηση ενέργειας για ψύξη 	<ul style="list-style-type: none"> • Σύστημα ανάκτησης θερμότητας • Σύστημα σκίασης • Σοβάτισμα οροφής 	M/Δ	DesignBuilder EnergyPlus MATLAB

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[162]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + ANN (εκπαίδευση με ΓΑ) • Σύνθετο μέτωπο Pareto από 6 βελτιστοποιήσεις 	<ul style="list-style-type: none"> • Λειτουργική ενέργεια • Δείκτης υπερθέρμανσης του πλανήτη <ul style="list-style-type: none"> • Οξίνιση • Καταστροφή του όζοντος <ul style="list-style-type: none"> • Ευτροφισμός • Σχηματισμός αιθαλομίχλης 	<ul style="list-style-type: none"> • Μονωτικό υλικό • Υλικό πλαισίου παράθυρου • Τιμή R τοίχου • WWR για βόρεια και νότια πρόσοψη • Τύπος υαλοπινάκων 	M/Δ	eQuest Athena IE Pascal
[163]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • UA με Monte Carlo: καλιμπράρισμα μοντέλου, κλιματικά δεδομένα, σταθερές παράμετροι 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση • Κατανάλωση ενέργειας για ηλεκτρισμό • Καθαρή παρούσα αξία • Θερμική άνεση <ul style="list-style-type: none"> • Εκπομπές CO2 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση κτιρίου και παράθυρα • Σύστημα ΘΨΚ • Μόνωση σωλήνων • Συσκευές • Σύστημα ελέγχου αυτοματισμού κτιρίου • Φ/Β και ΗΣ • Ηλεκτρικό σύστημα 	Νομικοί περιορισμοί Διαθέσιμος χώρος	M/Δ
[164]	<ul style="list-style-type: none"> • GA + προγραμματισμός MS Excel 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη • Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση προσόψεων και ταράτσας • Τζάμια και πλαίσια παράθυρων • Σκίαση 	Δείκτες ενέργειας θέρμανσης και ψύξης	MS Excel Solver Tool
[165]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • UA + SA για καλιμπράρισμα μοντέλου με LHS και Monte Carlo 	<ul style="list-style-type: none"> • Χρήση ενέργειας <ul style="list-style-type: none"> • Εξέργεια • Θερμική δυσφορία 	<ul style="list-style-type: none"> • Σύστημα ΘΨΚ • Μόνωση τοίχου, οροφής και δαπέδου • Στεγανότητα • Τζάμια • Ρυθμίσεις • Φωτισμός • Ηλεκτρικός εξοπλισμός 	M/Δ	EnergyPlus jEPlus, jEPlus+EA Python SimLab 2.2
[166]	<ul style="list-style-type: none"> • Pareto-Archive NSGA-II • Μέτωπο Pareto • SA 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας • Κόστος κύκλου ζωής / Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Σύστημα θέρμανσης • Ισχύς συστήματος αντλίας θερμότητας • Μόνωση εξωτερικών τοίχων και οροφής • Παράθυρα • Σύστημα εξαερισμού • Εμβασό Φ/Β και ΗΣ 	M/Δ	IDA ICE (ESBO Plant) MOBO
[167]	<ul style="list-style-type: none"> • Pareto-Archive NSGA-II • Μέτωπο Pareto • SA: Κλιμάκωση κόστους 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας • Κόστος κύκλου ζωής 	<ul style="list-style-type: none"> • Σύστημα θέρμανσης • Μόνωση τοίχων και στέγης • Παράθυρα • Φ/Β πάνελ • Σύστημα εξαερισμού 	M/Δ	IDA ICE MOBO
[168]	<ul style="list-style-type: none"> • Παραλλαγή NSGA-II • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Θερμική άνεση / Απώλεια παραγωγικότητας 	<ul style="list-style-type: none"> • Σημεία ρύθμισης θερμοκρασίας θέρμανσης/ψύξης 	M/Δ	EnergyPlus MATLAB

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[5]	• NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Δύο συστήματα θέρμανσης	<ul style="list-style-type: none"> • Ενσωματωμένο CO2 έναντι λειτουργίας • Κόστος έναντι αποτύπωματος άνθρακα • Κατανάλωση ενέργειας έναντι κόστους ενέργειας 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση πάνελ και δρόμων • Εξωτερική μόνωση • Τούβλα • Μόνωση θερμογεφυρών • WWR 	M/Δ	Sketchup (Legay Open Studio) EnergyPlus jEPlus, jEPlus+EA
[169]	• NSGA-III • Μέτωπο Pareto	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης • Θερμική άνεση • Εκπομπές CO2 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση τοίχου, δαπέδου, ταβανιού και οροφής • Τύπος παράθυρου • Σύστημα ΘΨΚ 	M/Δ	EnergyPlus
[170]	• Παραλλαγή NSGA-II + εξαντλητική μέθοδος • Μέτωπο Pareto	<ul style="list-style-type: none"> • Πρωτογενής ενεργειακή ανάγκη έναντι ολικού κόστους • Απόδοση επένδυσης έναντι ολικού κόστους 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση ταράτσας, εξωτερικών τοίχων και ισογείου • Παράθυρα • Σύστημα θέρμανσης και ΖΝΧ • ΑΠΕ 	Εθνικές απαιτήσεις πρωτογενούς ενέργειας	Εποχική στατική μέθοδος
[171]	• Παραλλαγή NSGA-II + MLPANN • Μέτωπο Pareto	<ul style="list-style-type: none"> • Πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας • Ολικό κόστος • Θερμική δυσφορία 	<ul style="list-style-type: none"> • Σοβάτισμα και μόνωση στέγης και εξωτερικού τοίχου • Παράθυρα • Σκίαση • MVS • Σημεία ρύθμισης θερμοκρασίας • Σύστημα ΘΨΚ • Φ/B σύστημα 	Προϋπολογισμός	DesignBuilder EnergyPlus MATLAB
[172]	• NSGA-II • Μέτωπο Pareto: Εξαντλητική αναζήτηση, κόστος έναντι πρωτογενούς ενέργειας • UA: Ποσοστά έκπτωσης	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας για θέρμανση • Ζήτηση ενέργειας για ψύξη • Θερμική άνεση 	<ul style="list-style-type: none"> • Σημεία ρύθμισης θερμοκρασίας • Θερμική εκπομπή, ηλιακή απορρόφηση και πάχος μόνωσης εξωτερικού τοίχου και οροφής • Μόνωση εξωτ. δαπέδου • Τύπος παράθυρου 	Ωρες δυσφορίας	DesignBuilder EnergyPlus MATLAB
[173]	• NSGA-II • Μέτωπο Pareto: Εξαντλητική αναζήτηση και MCDM • UA: υπερθέρμανση του πλανήτη, ποσοστά έκπτωσης	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας για θέρμανση • Ζήτηση ενέργειας για ψύξη 	<ul style="list-style-type: none"> • Σοβάτισμα και μόνωση ταράτσας και εξωτερικών τοίχων • Παράθυρα • Σύστημα ΘΨΚ 	M/Δ	DesignBuilder EnergyPlus MATLAB
[174]	• NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Διάφορες τοποθεσίες	<ul style="list-style-type: none"> • Εξοικονόμηση ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Φ/B πάνελ • Μόνωση εξωτ. τοίχου • Παράθυρα • Φωτισμός • Ψυγείο • Σύστημα ΘΨΚ 	M/Δ	REVIT EnergyPlus MATLAB
[175]	• GA • Μέτωπο Pareto: WSM • Διάφοροι προϋπολογισμοί, εκπτώσεις	<ul style="list-style-type: none"> • Εξοικονόμηση ενέργειας • Καθαρή παρούσα αξία • Περίοδος αποπληρωμής 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση εξωτ. τοίχου • Παράθυρα • Μόνωση ταράτσας • Φ/B πάνελ 	Προϋπολογισμός	M/Δ

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[176]	• NSGA-II • Μέτωπο Pareto: MCDM συμβιβαστικής λύσης • UA + SA με Monte Carlo και LHS	• Εξέργεια • Θερμική δυσφορία • Καθαρή παρούσα αξία	• Σύστημα ΘΨΚ • Μόνωση τοίχων, ταράτσας και δαπέδου • Στεγανοποίηση • Τζάμια • Σημεία ρύθμισης • Φωτισμός • ΑΠΕ	Ωρες δυσφορίας Αποπληρωμή Προϋπολογισμός	ExRET-Opt: EnergyPlus, jEPlus, jEPlus+EA, Python, SimLab
[177]	• NSGA-II • Μέτωπο Pareto: Ανεξάρτητο t-test δύο δειγμάτων	• Χρήση ενέργειας – Θερμικής δυσφορία – Καθαρή παρούσα αξία • Εξέργεια – Θερμική δυσφορία – εξεργοοικονομικό κόστος-όφελος	• Σύστημα ΘΨΚ • Μόνωση τοίχου, οροφής, ισογείου και υπογείου • Στεγανοποίηση • Τζάμια • Σημεία ρύθμισης • Φωτισμός • ΑΠΕ	Ωρες δυσφορίας Αποπληρωμή Προϋπολογισμός	ExRET-Opt: EnergyPlus, jEPlus, jEPlus+EA, Python, SimLab
[178]	• NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Έξυπνη δειγματοληψία για λήψη αποφάσεων για ενεργειακά συστήματα (ΘΨΚ, ZNX, ΑΠΕ)	• Ζήτηση θερμικής ενέργειας • Θερμική δυσφορία	• Σημεία ρύθμισης θερμοκρασίας • Θερμική εκπομπή, απορρόφηση και μόνωση εξωτ. τοίχων και στέγης • Τύπος παράθυρου	Ωρες δυσφορίας	EnergyPlus MATLAB
[179]	• Pareto-Archive NSGA-II • Μέτωπο Pareto • SA: Παράμετροι LCC	• Κόστος αρχικής επένδυσης • Κόστος κύκλου ζωής • Θερμική άνεση • Εκπομπές CO2	• Σύστημα ΘΨΚ • Μόνωση για τοίχους και στέγες • Νέα παράθυρα και σκίαση • Αποδοτικότητα και έλεγχος συστήματος φωτισμού • Φ/B πάνελ	M/Δ	IDA ICE MOBO
[180]	• NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Συμβατότητα συντήρησης με AHP και κρίση ειδικών	• Ζήτηση θέρμανσης και ψύξης • Θερμική άνεση • Συμβατότητα συντήρησης	• Πλήρης ή μερική εφαρμογή μόνωσης • Τζάμια με/ή χωρίς αντικατάσταση πλαισίου • Σφράγιση παράθυρων • Φυσικός αερισμός	M/Δ	EnergyPlus Προγραμματισμός με C
[181]	• NSGA-II • Μέτωπο Pareto: Έξυπνη εξαντλητική δειγματοληψία	• Ζήτηση ενέργειας για θέρμανση • Ζήτηση ενέργειας για ψύξη • Θερμική δυσφορία	• Σημεία ρύθμισης θερμοκρασίας • Θερμική εκπομπή, ηλιακή απορρόφηση και πάχος μόνωσης εξωτ. τοίχου και οροφής • Τύπος παράθυρου • Τύπος και θέση σκίασης	Ωρες δυσφορίας	DesignBuilder EnergyPlus MATLAB
[182]	• NSGA-II • SA: Elementary Effect, τυχαία δειγματοληψία Morris, αλγόριθμος PSO-HJ	• Κατανάλωση ενέργειας • Θερμική δυσφορία • Κόστος αρχικής επένδυσης	• Πάχος μόνωσης τοίχου και στέγης • Τύπος παράθυρου	M/Δ	IDA ICE MOBO GenOpt MATLAB
[183]	• NSGA-II • Διαφορετικά περιβάλλοντα	• Ζήτηση ενέργειας για θέρμανση έναντι ψύξης • Απαιτούμενη εξέργεια έναντι διαθέσιμης	• Μόνωση προσόψεων και στέγης • Παράθυρα και φεγγίτης	M/Δ	EnergyPlus jEPlus, jEPlus+EA

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[184]	• NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Διάφορες κλιματικές ζώνες	• Ανάγκη ενέργειας για θέρμανση έναντι ψύξης έναντι αρχικού κόστους επένδυσης • Πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας έναντι ολικού κόστους	• Εξωτ. ή εσωτ. μόνωση τοίχου και PCM • Παράθυρα • Εξωτερική σκίαση • MVS • Σύστημα ΘΨΚ • Έλεγχος φωτισμού	M/Δ	EnergyPlus Python
[185]	• GA • WSM	• Εξοικονόμηση ενέργειας • Περίοδος αποπληρωμής	• Παράθυρα • Μόνωση τοίχων • Μόνωση ταράτσας • Φ/Β πάνελ • Αντλίες θερμότητας • Ψυκτικά συστήματα • Φωτισμός	Βαθμολογία ενεργειακής απόδοσης Προϋπολογισμός Φυσικά όρια	M/Δ
[186]	• GA • WSM • Σύγκριση αναβάθμισης ολόκληρου κτιρίου έναντι μεμονωμένων ορόφων	• Εξοικονόμηση ενέργειας • Περίοδος αποπληρωμής	• Παράθυρα • Μόνωση τοίχων • Μόνωση ταράτσας • Φ/Β πάνελ • Αντλίες θερμότητας • Ψυκτικά συστήματα • Φωτισμός	Βαθμολογία ενεργειακής απόδοσης Προϋπολογισμός Φυσικά όρια	M/Δ
[187]	• NSGA-II + παράλληλος προγραμματισμός • Μέτωπο Pareto • Διάφοροι τύποι κτιρίων: ηλικία, μέγεθος	• Κόστος κύκλου ζωής • Εκπομπές CO2	• Σύστημα θέρμανσης • Μόνωση τοίχων και στέγης • Νέες πόρτες και παράθυρα • Σύστημα εξαερισμού • Θερμοκρασία καλοριφέρ • Ανάκτηση θερμότητας λυμάτων • Φ/Β & ΗΣ	M/Δ	IDA ICE MATLAB MOBO
[188]	• NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Παρόντα και μελλοντικά αρχεία καιρού	• Εκπομπές CO2 • Θερμική δυσφορία	• Πάχος μόνωσης τοίχου • Διείσδυση • Τύπος καυσίμου • Φωτισμός • Φ/Β πάνελ • Ρύθμιση θερμοκρασίας • Επίπεδο ενδυμασίας	Ωρες δυσφορίας	EnergyPlus jEPlus+EA
[114]	• GA • Μέτωπο Pareto • 30 κτίρια αναφοράς (ηλικία, μέγεθος, τοποθεσία) • Ανάλυση ευαισθησίας • Αβεβαιότητα: Οικονομικές παράμετροι	• Κόστος κύκλου ζωής: ΠC, OC • Εξοικονόμηση ενέργειας	• Πάχος μόνωσης τοίχων και οροφής • Τύπος υαλοπινάκων • Εξοπλισμός γραφείου • Τύπος φωτισμού • Χειρισμός φωτισμού • Απόδοση λέβητα • Αναβάθμιση κλιματισμού • (Φ/Β)	M/Δ	EnergyPlus jEPlus jEPlus+EA
[189]	• GA • Μέτωπο Pareto	• Συνολικό κόστος • Εκπομπές CO2: Λειτουργικές, Ενσωματωμένες	• Μόνωση τοίχου, δαπέδου και στέγης • Αντικατάσταση παράθυρου • Αντλία θερμότητας και χωρητικότητα λέβητα • Μήκος και χωρητικότητα γεωθερμικού συστήματος • Φ/Β και ΗΣ	M/Δ	3D CAD EnergyPlus

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[190]	<ul style="list-style-type: none"> • Pareto-Archive NSGA-II • Μέτωπο Pareto • SA: Παράμετροι 	<ul style="list-style-type: none"> • Χρήση ενέργειας • Κόστος κύκλου ζωής 	<ul style="list-style-type: none"> • Σύστημα θέρμανσης • Φ/Β και ΗΣ • Μόνωση τοίχων, ταράτσας και δαπέδου • Παράθυρα • Σύστημα εξαερισμού • Σύστημα ελέγχου φωτισμού 	M/Δ	IDA ICE MOBO
[191]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II έναντι NSGA-III, MOPSO και MOEA/D • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης • Θερμική άνεση • Ενσωματωμένες εκπομπές CO2 	<ul style="list-style-type: none"> • Εξωτ. και εσωτ. μόνωση τοίχου, ενδιάμεσου τοίχου και ισογείου, στέγης και οροφής • Τύπος παράθυρου • Σύστημα ΘΨΚ 	M/Δ	EnergyPlus
[192]	<ul style="list-style-type: none"> • GA + ANN Kriging, LHS • Μέτωπο Pareto • Προσωμοίωση με υποκατάστατα έναντι λεπτομερούς 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Τύπος υαλοπινάκων • Αεροστεγανότητα • Μόνωση τοίχων, δαπέδου και στέγης • Φωτισμός 	M/Δ	OpenStudio, SketchUp EnergyPlus, MATLAB Gerador de Precos
[193]	<ul style="list-style-type: none"> • GA • Μέτωπο Pareto: έξυπνη αναζήτηση • Τέσσερις κλιματικές ζώνες, μέθοδος χαρακτηριστικών ημερών 	<ul style="list-style-type: none"> • Λειτουργικό κόστος θέρμανσης • Θερμική δυσφορία 	<ul style="list-style-type: none"> • Ωριαίος προγραμματισμός των σημείων ρύθμισης θερμοκρασιών του συστήματος ΘΨΚ 	M/Δ	DesignBuilder, EnergyPlus MATLAB
[194]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto: Ελάχιστο κόστος, nZEB • Δύο σενάρια κινήτρων, δύο τοποθεσίες 	<ul style="list-style-type: none"> • Πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας • Ολικό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση στέγης και εξωτ. τοίχου • Σοβάτισμα στέγης • Παράθυρα • Σκίαση • Σύστημα ΘΨΚ • Φ/Β σύστημα 	M/Δ	DesignBuilder EnergyPlus MATLAB
[195]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto: Βέλτιστο κόστος, nZEB • Δύο σενάρια κινήτρων, δύο τοποθεσίες 	<ul style="list-style-type: none"> • Πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας • Ολικό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση στέγης και εξωτ. τοίχου • Σοβάτισμα στέγης • Παράθυρα • Σκίαση • Σύστημα ΘΨΚ • Φ/Β σύστημα 	M/Δ	DesignBuilder EnergyPlus MATLAB
[74]	<ul style="list-style-type: none"> • GA + MLPANN + LHS • Pareto: Βασικό, λεπτομερές και καλιμπραρισμένο μοντέλο • UA και SA: Morris, LHS, κατανομές πιθανότητας • Περιορισμός penalty 	<ul style="list-style-type: none"> • Κόστος αρχικής επένδυσης έναντι κόστους ενέργειας • Θερμική δυσφορία έναντι κόστους ενέργειας 	<ul style="list-style-type: none"> • Πάχος μόνωσης εξωτερικού τοίχου • Τύπος παράθυρου • Περίοδος προθέρμανσης και προψύξης • Σημεία ρύθμισης θερμοκρασίας και αφύγρανσης και νεκρές ζώνες για θέρμανση και ψύξη • Φωτισμός • Τύπος συστήματος ΘΨΚ • Σύστημα ZNX 	Ωρες θερμικής δυσφορίας	EnergyPlus MATLAB

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[196]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Διάφορα αρχεία καιρού 	<ul style="list-style-type: none"> • Λειτουργική κατανάλωση ενέργειας • Ενσωματωμένη ενέργεια • Δείκτης υπερθέρμανσης του πλανήτη • Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση εξωτερικών τοίχων και στέγης • Πρόσθετες στρώσεις σκυροδέματος/κούφιου τούβλου 	M/Δ	Sketchup EnergyPlus MOBO
[99]	<ul style="list-style-type: none"> • PSO-GA • Μέτωπο Pareto • Στρατηγική χρηματοδότησης κτιρίων για 27 MKO 	<ul style="list-style-type: none"> • Καθαρή παρούσα αξία • Περίοδος αποπληρωμής • Εξοικονόμηση ενέργειας • Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου 	<ul style="list-style-type: none"> • Δράσεις αναβάθμισης σε κάθε MKO • Επενδυτικό κεφάλαιο από SEU & GOV 	Προϋπολογισμός	MATLAB
[197]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Διάφοροι τύποι κτιρίων: ηλικία, σύστημα θέρμανσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Κόστος κύκλου ζωής • Εκπομπές CO2 	<ul style="list-style-type: none"> • Σύστημα θέρμανσης • Μόνωση για τοίχους και στέγη • Νέες πόρτες και παράθυρα • Σύστημα εξαερισμού • Θερμοκρασία καλοριφέρ • Φ/Β και Η/Σ 	M/Δ	IDA ICE MATLAB MOBO
[198]	<ul style="list-style-type: none"> • Ανάπτυξη μοντέλου GA iMOO • Μέτωπο Pareto • WSM 	<ul style="list-style-type: none"> • Κόστος αρχικής επένδυσης • Κόστος κύκλου ζωής • Αναλογία αποταμίευσης προς επένδυση • Μείωση εκπομπών CO2 • Οριακό κόστος μείωσης επιπτώσεων 	<ul style="list-style-type: none"> • Τύπος μόνωσης • Τύπος παράθυρου • Φωτισμός • Σκίαση 	Μείωση εκπομπών CO2	DesignBuilder EnergyPlus MS Excel VBA
[199]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Κόστος κύκλου ζωής 	<ul style="list-style-type: none"> • Σύστημα θέρμανσης • Μόνωση τοίχων και στέγης • Παράθυρα • Σύστημα εξαερισμού • Σύστημα ελέγχου φωτισμού • Εμβαδό Φ/Β και ΗΣ 	M/Δ	IDA ICE MOBO
[115]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + MOHS • Μέτωπο Pareto • Διάφορα κτίρια: Ενεργειακές αξιολογήσεις • Βελτιστοποίηση σε επίπεδο συννοικίας με MOHS 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Σύστημα αεριζόμενης πρόσοψης • Θερμική βελτίωση εσωτερικών χώρων • Μόνωση αεροθαλάμου • Αντικατάσταση παράθυρου • Σύστημα ΗΣ και Φ/Β • Σύστημα ΘΨΚ 	M/Δ	EnergyPlus

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[200]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-III • Μέτωπο Pareto • Διάφορα αρχεία καιρού 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας • Δείκτης κλιματικής αλλαγής • Δείκτης οικοτοξικότητας • Συνολικό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> • Μονωτικό υλικό εξωτερικού τοίχου, στέγης και πρώτου ορόφου, επίστρωση/επένδυση και θερμοπερατότητα • Πλαίσιο παράθυρου και τζάμια • Αντικατάσταση λέβητα 	M/Δ	COMFIE Pleiades ACV
[201]	<ul style="list-style-type: none"> • Παραλλαγή NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Διάφορα αρχεία καιρού 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Θερμική άνεση 	<ul style="list-style-type: none"> • Σημεία ρύθμισης θερμοκρασίας θέρμανσης/ψύξης 	M/Δ	EnergyPlus MATLAB
[202]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + MPLANN (LM) • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Κόστος κύκλου ζωής • Εκπομπές κύκλου ζωής 	<ul style="list-style-type: none"> • Σύστημα ΘΨΚ • Προγράμματα λειτουργίας ψύξης και θέρμανσης • Φωτισμός • Τύπος εξωτ. Τοίχου, οροφής και πρόσοψης • Φωτισμός • WWR • Άνοιγμα εξωτ. Παράθυρου 	M/Δ	Revit DesignBuilder MATLAB ATHENA Impact Estimator
[203]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Κόστος κύκλου ζωής • Εκπομπές κύκλου ζωής 	<ul style="list-style-type: none"> • Οροφή • Εξωτερικός τοίχος • Τύπος πρόσοψης • Τζάμια και πλαίσιο • WWR • Τύπος ΘΨΚ • Έλεγχος ΘΨΚ • Φωτισμός • Έλεγχος περιοχής 	Κόστος κύκλου ζωής Κατανάλωση ενέργειας	Revit 2017 DesignBuilder ATHENA Impact Estimator
[80]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II έναντι MOPSO, MOSA, ES • ANN (LM), LHS • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας • Θερμική δυσφορία 	<ul style="list-style-type: none"> • Βάθος πρόστεγου • Πάχος μόνωσης και θερμοπερατότητα εξωτερικού τοίχου και στέγης • Τύπος παράθυρου • Σημεία ρύθμισης θερμοστάτη 	M/Δ	OpenStudio, SketchUp EnergyPlus modeFRONTIER MATLAB
[204]	<ul style="list-style-type: none"> • Μοντέλο Στρατηγικής Εξοικονόμησης Ενέργειας GA 	<ul style="list-style-type: none"> • Εξοικονόμηση ενέργειας • Κόστος κύκλου ζωής 	<ul style="list-style-type: none"> • Εξωτ. και εσωτ. μόνωση • Τζάμια • Λαμπτήρες LED • Φωτισμός εξόδου • Μετασχηματιστής • Ηλεκτρική αντλία θερμότητας • Φ/Β σύστημα 	Προϋπολογισμός	MS Excel
[118]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Χρονικότητα: 3 σενάρια 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας • Κόστος κύκλου ζωής • Θερμική δυσφορία 	<ul style="list-style-type: none"> • Διπλά τζάμια • Μόνωση τοίχων και οροφής • Στεγανότητα • Απόδοση φωτισμού και αισθητήρες • Σημεία ρύθμισης θέρμανσης • Εξαερισμός και ανάκτηση θερμότητας • Φ/Β πάνελ 	M/Δ	OpenStudio EnergyPlus jEPlus+EA.
[107]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Pareto: WSM • SA με FFD 	<ul style="list-style-type: none"> • Θερμική δυσφορία • Εκπομπές CO2 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση εξωτερική τοίχου, οροφής και δαπέδου • Αεροστεγανότητα 	M/Δ	EnergyPlus DesignBuilder jEPlus, jEPlus+EA

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[205]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto: Υπερόγκος, στατιστική • Μοντέλο καιρού για παρόν και μέλλον 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας • Θερμική δυσφορία 	<ul style="list-style-type: none"> • Ποσοστό ανοίγματος παράθυρων • Στεγανότητα • Τύπος υαλοπινάκων και πλαίσια • Σκίαση • Μόνωση ταράτσας και τοίχου 	M/Δ	DesignBuilder
[130]	<ul style="list-style-type: none"> • GA • Μέτωπο Pareto • Αβεβαιότητα: Παραμετρική μοντελοποίηση, πολυεπίπεδη μοντελοποίηση Bayes 	<ul style="list-style-type: none"> • Ενεργειακή Απόδοση: Ζήτηση/Παραγωγή • Θερμική δυσφορία • Εκπομπές CO2 κύκλου ζωής • Περίοδος αποπληρωμής 	<ul style="list-style-type: none"> • Τύπος κάθετης πρόσοψης • Τύπος στέγης • Φ/B σύστημα 	M/Δ	Rhino-Grasshopper: Honeybee EnergyPlus MATLAB
[206]	<ul style="list-style-type: none"> • Βελτιστοποίηση γεωμετρίας • MOO με NSGA-II και Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας • Κόστος ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης • Εκπομπές CO2 	<ul style="list-style-type: none"> • Σύστημα υαλοπινάκων • Μόνωση τοίχου, δαπέδου, οροφής • Ηλιακή ανακλαστικότητα τοίχου • Brise-soleil, ηλιακοί χώροι, θερμοκήπια • Αριθμός πάνελ και κλίση Φ/B και ΗΣ 	M/Δ	SketchUp Open Studio EnergyPlus Python
[132]	<ul style="list-style-type: none"> • Μεμονωμένα σενάρια βελτιστοποίησης DSF • MOO με GA και μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Εκπομπές CO2 / Κατανάλωση Ενέργειας • Θερμική δυσφορία 	<ul style="list-style-type: none"> • WWR • Είδος τζαμιών 	M/Δ	EnergyPlus DesignBuilder
[207]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Τρεις μέθοδοι LCA 	<ul style="list-style-type: none"> • Κόστος κατασκευής • Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κύκλου ζωής 	<ul style="list-style-type: none"> • Πάχος μόνωσης σε τοίχους, σοφίτα, προσόψεις, στέγη και δάπεδα • Τύπος και εμβαδό υαλοπινάκων • Εμβαδό Φ/B πάνελ 	Καθαρό Ισοζύγιο Ηλεκτρικής Ενέργειας	COMFIE EQUER
[208]	<ul style="list-style-type: none"> • Παραλλαγή NSGA-II • Pareto • Global SA, SRRC, LHS, MCA 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας για ψύξη • Θερμική δυσφορία 	<ul style="list-style-type: none"> • Διάρκεια νυχτερινού αερισμού • Σημείο ρύθμισης ελάχιστης θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου • Σημείο ρύθμισης ρυθμού αλλαγής αέρα • Θερμικής μάζα εσωτερικού χώρου • Θερμοκρασία κατωφλίου • Ειδική ισχύς ανεμιστήρα 	M/Δ	SketchUp EnergyPlus jEPlus MOBO Omni-Optimizer SimLab
[78]	<ul style="list-style-type: none"> • SPEA-2 + HypE • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργεια για ψύξη • Χρήσιμος φωτισμός (ισόγειο, πρώτος όροφος) 	<ul style="list-style-type: none"> • Προσανατολισμός φεγγίτη • Αναλογία φεγγίτη προς δάπεδο σύμφωνα με τη μετατόπιση της κορυφής 	M/Δ	Rhino/GH ArchSim, Diva and Octopus plugins, Radiance
[209]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας • Κόστος κύκλου ζωής • Θερμική δυσφορία 	<ul style="list-style-type: none"> • Τζάμια παράθυρων • Μόνωση τοίχων • Σύστημα ψύξης 	Αρχικό κόστος επένδυσης	EnergyPlus MATLAB

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[210]	• GA • Μέτωπο Pareto • Διάφοροι τύποι κτιρίων	• Κατανάλωση ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης	• Μόνωση ταράτσας και τοίχων • Παράθυρα • Φωτισμός • Σύστημα θέρμανσης	M/Δ	EnergyPlus DAKOTA Python Eppy
[211]	• GA • Μέτωπο Pareto • SA: Sobol • Τέσσερις κλιματικές ζώνες	• Κατανάλωση ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης	• Μέγεθος παράθυρου και τύπος υαλοπινάκων • Προσανατολισμός κτιρίου • Πάχος μόνωσης τοίχων και στέγης	M/Δ	SketchUp, EnergyPlus jEPlus, Python SimLab
[121]	• Omni-Optimizer GA • Μέτωπο Pareto	• Χρήση πρωτογενούς ενέργειας: Τελική κατανάλωση και ενσωματωμένη • Κόστος κύκλου ζωής • Δείκτης υπερθέρμανσης του πλανήτη: λειτουργικός και ενσωματωμένος	• Υλικό και πάχος μόνωσης για τοίχους, οροφή και υπόγειο • Επένδυση εξωτερικών τοίχων και οροφής • Τζάμια παράθυρων και πλαίσιο • Εμβαδό Φ/Β και ΗΣ • Σύστημα θέρμανσης	M/Δ	Be18 (Στατικό) + Python LCAbyg MOBO
[212]	• NSGA-II • Pareto: WSM • Έξι κλιματικές ζώνες, 4 προσανατολισμοί παράθυρων	• Κατανάλωση ενέργειας • Θερμική άνεση • Οπτική άνεση	• Στρατηγική ελέγχου σκίασης • Σημεία ρύθμισης θερμοκρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας και φορτίου • Θέση, διαστάσεις, γωνία και υλικό σκίασης • Απόσταση από στόρι ως τζάμι	M/Δ	EnergyPlus jEPlus, jEPlus+EA
[126]	• NSGA-II • Μέτωπο Pareto • SA: Μέτρα αναβάθμισης • Διάφορες τοποθεσίες και κλίματα	• Κόστος κύκλου ζωής • Ωρες θερμικής δυσφορίας • Ωρες μη-ικανοποίησης με φως ημέρας	• Μόνωση εξωτ. τοίχου και στέγης • Εσωτερική επένδυση εξωτ. τοίχου • Τζάμια • Μέγεθος παράθυρου • Συντελεστής σκίασης	Μετάδοση ήχου Ολικές πτητικές οργανικές ενώσεις	TRNSYS jEPlus+EA, Python DAYSIM, INSUL
[213]	• aNSGA-II • Pareto	• Ζήτηση ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης • Κόστος ενέργειας • Εκπομπές CO2	• Τζάμια περιβλήματος • Πλάτος μόνωσης και στρώση φινιρίσματος περιβλήματος • Εξωτερικές κουρτίνες • Τζαμαρίες σε αίθριο, αυλή και ισόγειο • Εμβαδό και κλίση Φ/Β και ΗΣ	M/Δ	SketchUp Open Studio EnergyPlus Python (Eppy)
[214]	• aNSGA-II • Μέτωπο Pareto • Πολλές κλιματικές ζώνες, τιμές ενέργειας, ένταση άνθρακα	• Ζήτηση ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης • Λειτουργικό κόστος • Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου	• Τζάμια παράθυρων • Πάχος μόνωσης περιβλήματος • Φινίρισμα προσόψεων • Περισίδες/κουρτίνες • Κλείσιμο μπαλκονιού, αίθριου και πιλοτής • Εμβαδό και κλίση πάνελ Φ/Β και ΗΣ	M/Δ	SketchUp, OpenStudio EnergyPlus BASH, Python (Eppy)

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[133]	<ul style="list-style-type: none"> • SPEA-2 + HypE • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Λειτουργική ενέργεια • Ενσωματωμένη ενέργεια 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση τοίχων, δαπέδου, οροφής • Τύπος παράθυρου • Σύστημα εξαερισμού/ανάκτησης θερμότητας 	Σουηδικός Οικοδομικός Κώδικας Σουηδικά Ενεργειακά Πρότυπα Κτιρίων	Rhino-Grasshopper: Honeybee, Octopus EnergyPlus
[215]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II με αρχείο Pareto • Μέτωπο Pareto: WSM • Έξι κλιματικές ζώνες 	<ul style="list-style-type: none"> • Απαίτηση ενέργειας • Κόστος κύκλου ζωής • Θερμική άνεση 	<ul style="list-style-type: none"> • Προσανατολισμός κτιρίου • Τύπος παράθυρων • WWR • Μόνωση τοίχων και ταράτσας • Ρυθμός διείσδυσης • Φ/Β, ΗΣ και ΑΓ 	M/Δ	SketchUp, TRNSYS MOBO METEONORM
[216]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας για θέρμανση, ψύξη • Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Πάχος μόνωσης τοίχων και στέγης • Μέγεθος παράθυρων 	M/Δ	TRNSYS MOBO
[120]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto: Ανάλυση ενέργειας, κόστους και σταθμισμένης δυσφορίας • Τρία μοντέλα συμπεριφοράς κατοίκων: Στατικό, Πιθανολογικό, Προσαρμοστικό • Δύο κλιματικές ζώνες 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας • Καθαρή παρούσα αξία 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση ταράτσας, δαπέδου και τοίχων • Τζάμια και πλαίσια • Αντικατάσταση λέβητα • MVS με ανάκτηση θερμότητας 	Ρυθμός αερισμού	TRNSYS MS Excel MATLAB
[123]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + μοντέλο Kriging • Μέτωπο Pareto: Ανάλυση πιθανοτήτων • UA: κλίμα, λειτουργικό κόστος και περιβαλλοντικές επιπτώσεις • SA με δείκτες Sobol 	<ul style="list-style-type: none"> • Κόστος κύκλου ζωής • Δείκτης υπερθέρμανσης του πλανήτη 	<ul style="list-style-type: none"> • Πλαίσια και τζάμια παράθυρων • Μόνωση εξωτερικών τοίχων, οροφής, δαπέδου, αποθήκης • Σύστημα ΘΨΚ 	M/Δ	Ημιστατικός υπολογισμός θερμικής ζήτησης Python
[217]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Pareto: TOPSIS • Απλοποίηση μοντέλου • LHS, Kriging, ANN • SA/UA: Κόστος υπηρεσιών κοινής ωφέλειας, απόδοση θέρμανσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας • Κόστος κύκλου ζωής • Δείκτες αξιολόγησης κύκλου ζωής 	<ul style="list-style-type: none"> • Αεροστεγανότητα • Θερμοπερατότητα οροφής και τοίχων • Ιδιότητες υαλοπινάκων • WWR 	M/Δ	SketcUp TRNSYS MATLAB MS Excel VBA

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[117]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Ανάλυση χρονικότητας 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση θέρμανσης • Κόστος αρχικής επένδυσης • Βαθμώρες υπερθέρμανσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Υλικό μόνωσης τοίχου • Παράθυρα • Χρονικότητα: Ακολουθία/φάσεις ενεργειών 	Προϋπολογισμός	EnergyPlus DesignBuilder Python
[119]	<ul style="list-style-type: none"> • GA • Μέτωπο Pareto • Διαφορετικές στρατηγικές τιμολόγησης 	<ul style="list-style-type: none"> • Εξοικονόμηση νερού • Περίοδος αποπληρωμής 	<ul style="list-style-type: none"> • Πάχος μόνωσης περιβλήματος 	M/Δ	EnergyPlus MATLAB
[218]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • SA: Morris, Elementary Effects 	<ul style="list-style-type: none"> • Ενσωματωμένη ενέργεια • Λειτουργική Ενέργεια 	<ul style="list-style-type: none"> • Παράθυρα • Τύπος και πάχος μόνωσης εξωτ. Δαπέδου, εξωτ. τοίχου και οροφής 	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας Ετήσια πρωτογενής ενέργεια Θερμοκρασία λειτουργίας	EnergyPlus Python (pymoo)
[97]	<ul style="list-style-type: none"> • GA: GA-TriM • Pareto: Ελάχιστη απόκλιση από το ιστορικό χρονοδιάγραμμα 	<ul style="list-style-type: none"> • Θερμική δυσaráσκεια • Ποιότητα αέρα με βάση το CO2 	<ul style="list-style-type: none"> • Συμπεριφορά των κατοίκων 	M/Δ	Python
[131]	<ul style="list-style-type: none"> • GA • Μέτωπο Pareto • 4 κλιματικές ζώνες 	<ul style="list-style-type: none"> • Κόστος κύκλου Ζωής • Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση εξωτερικών τοίχων, στέγης, δαπέδου και οροφής υπογείου • Τζάμια παράθρων • Σκίαση • Αντικατάσταση και έλεγχος συστήματος ΘΨΚ • Σύστημα ZNX • ΑΠΕ 	M/Δ	Rhino-Grasshopper: Ladybug, TRNSYS, Radiance-Daysim, DAKOTA, Python
[116]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Ανάλυση χρονικότητας • Εικονικό χαρτοφυλάκιο 7 κτιρίων αναφοράς (τύπος, προσανατολισμός) 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Ανακαίνιση πρόσοψης: μόνωση τοίχων, επενδύσεις τοίχων, αντικατάσταση παράθρων και αντικατάσταση αερισμού • Μόνωση σοφίτας • Μόνωση κοιλοτήτων • Σύστημα θέρμανσης και ZNX 	Προϋπολογισμός Συνολική Επένδυση	COMFIE (Pleiades)
[219]	<ul style="list-style-type: none"> • Παραλλαγή NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Διάφορα αρχεία καιρού 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Θερμική άνεση / Απώλεια παραγωγικότητας 	<ul style="list-style-type: none"> • Σημεία ρύθμισης θερμοκρασίας θέρμανσης/ψύξης 	M/Δ	EnergyPlus MATLAB

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[220]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • 3D BIM + Οπτικός Προγραμματισμός 	<ul style="list-style-type: none"> • Συντελεστής ολικής θερμικής μεταβίβασης • Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Συντελεστής ηλιακού προσανατολισμού • Θερμοπερατότητα και ηλιακή απορροφητικότητα τοίχου • Εμβαδόν παράθυρου, θερμοπερατότητα και συντελεστής σκίασης 	Κόστος Συντελεστής ολικής θερμικής μεταβίβασης	Autodesk REVIT Dynamo MATLAB MS Excel
[103]	<ul style="list-style-type: none"> • GA • Μέτωπο Pareto • LCCA, σενάρια συμβολαίων, νομικοί παράγοντες 	<ul style="list-style-type: none"> • Εξοικονόμηση ενέργειας • Κόστος κύκλου ζωής 	<ul style="list-style-type: none"> • Χωρητικότητα και απόδοση συστημάτων Φ/Β και γεωθεμικής αντλίας • Έτη εφαρμογής (Σενάριο σύμβασης) 	M/Δ	DesignBuilder EnergyPlus MATLAB
[221]	<ul style="list-style-type: none"> • SPEA 2 + HyPE, Monte Carlo • Μέτωπο Pareto • SA με MLR: Μέτρα αναβάθμισης • 2 κλίματα, 4 προσανατολισμοί 	<ul style="list-style-type: none"> • Ένταση χρήσης ενέργειας • Χρήσιμος φωτισμός ημέρας 	<ul style="list-style-type: none"> Παράθυρα με βιοαντιδραστήρα μικροφύκων έναντι μονού τζαμιού, διπλού τζαμιού και παράθυρων νερού • Μέγεθος παράθυρου/WWR • Πυκνότητα φυκών 	M/Δ	EnergyPlus, OpenStudio, Radiance, Daysim, Rhino–GH: Ladybug, Honeybee, Octopus για GA TT Toolbox, Colibri και Design Explorer για εξαντλητική αναζήτηση
[128]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Σενάρια για την τιμή της ενέργειας, τον προϋπολογισμό, τις προτεραιότητες • Ανάλυση μετώπου Pareto: κόστος και ενεργειακή απόδοση 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας • Καθαρή παρούσα αξία • Περίοδος αποπληρωμής 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση τοίχων και στέγης • Τζάμια παράθυρων • Σύστημα ΘΨΚ • Αεροστεγανότητα • Φ/Β πάνελ 	Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας Κόστος αρχικής επένδυσης Περίοδος αποπληρωμής	DesignBuilder EnergyPlus MATLAB
[75]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • LCCA και ανάλυση τροφίμων μιλίων 	<ul style="list-style-type: none"> • Κόστος λειτουργίας • Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου 	<ul style="list-style-type: none"> • Ρυθμός ροής εξαερισμού • Ενεργειακά κλάσματα κλίβανου προπανίου, λέβητα ξύλου και γεωθεμικής αντλίας 	M/Δ	PVWatts MS Excel MATLAB
[79]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + MLPANN (LM) • LHS & PCA • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Θερμική άνεση 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση τοίχων και στέγης • Τύπος παράθυρου και WWR • Φωτισμός • Σύστημα ΘΨΚ και έλεγχος 	M/Δ	EnergyPlus Python (Eppy) MATLAB
[222]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Pareto: TOPSIS • Αρχεία καιρού για παρόν και μέλλον 	<ul style="list-style-type: none"> • Φορτίο ψύξης, Φορτίο θέρμανσης, κόστος αρχικής επένδυσης • Κατανάλωση ενέργειας, θερμική άνεση, κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Τύπος υαλοπινάκων • Υλικό μόνωσης και πάχος • Τύπος ΘΨΚ • (Φ/Β πάνελ) 	M/Δ	DesignBuilder, EnergyPlus jEPlus, jEPlus+EA MS Excel CCWorldWeatherGen METEONORM

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[81]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + ANN (NARX) για MPC • Μέτωπο Pareto • Δύο περιπτώσεις τιμών ρεύματος 	<ul style="list-style-type: none"> • Λειτουργικό κόστος • Θερμική δυσφορία 	Ωριαία ρύθμιση θερμοκρασίας για κάθε μέρα	Θερμική δυσφορία	DesignBuilder EnergyPlus MATLAB
[109]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Ανάλυση βέλτιστου κόστους • Προτεραιότητες δημόσιου έναντι ιδιωτικού τομέα 	<ul style="list-style-type: none"> • Θερμική δυσφορία • Εκπομπές CO2 έναντι λειτουργικού κόστους • Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Πάχος μόνωσης τοίχων και στέγης • Τζάμια παράθυρων • Σύστημα σκίασης • Ισχύς συστήματος φωτισμού • Σύστημα ΘΨΚ (μόνο για Νάπολη) 	M/Δ	EnergyPlus DesignBuilder
[83]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + MPC • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Λειτουργικό κόστος • Θερμική δυσφορία 	Ωριαία ρύθμιση θερμοκρασίας για κάθε μέρα	Θερμική δυσφορία	DesignBuilder EnergyPlus MATLAB
[223]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto: WSM • GMDH ANN για προβλέψεις • Morris SA: Μέτρα αναβάθμισης • Διάφορα αρχεία καιρού 	<ul style="list-style-type: none"> • Κόστος ενέργειας • Θερμική άνεση • Συγκέντρωση CO2 	<ul style="list-style-type: none"> • Σημεία ρύθμισης θερμοστάτη • Ενδυμασία • Ρυθμός αλλαγής αέρα 	M/Δ	SketchUp, OpenStudio EnergyPlus jEPlus, jEPlus+EA
[224]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + LHS • Μέτωπο Pareto • Αρχεία καιρού για παρόν και μέλλον • Τέσσερις κλιματικές ζώνες • SA: SRRC 	<ul style="list-style-type: none"> • Υπερθέρμανση • Υποψύξη • Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Υλικό, θέση και πάχος μόνωσης τοίχων • Υλικό, θέση και πάχος μόνωσης οροφής και δάπεδο οροφής • Τζάμια και πλαίσιο παράθυρων • Πρόγραμμα φυσικού αερισμού και ανοίγματος περσίδων • Ανεμιστήρες εξαερισμού • (Προσανατολισμός, Φ/Β) 	M/Δ	EnergyPlus jEPlus+EA
[225]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + LHS • Μέτωπο Pareto • Τέσσερις κλιματικές ζώνες • SA: SRRC 	<ul style="list-style-type: none"> • Υπερθέρμανση • Υποψύξη • Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Υλικό, θέση και πάχος μόνωσης τοίχων • Υλικό, θέση και πάχος μόνωσης οροφής και δάπεδο οροφής • Τζάμια παράθυρων και πλαίσιο • Πρόγραμμα φυσικού αερισμού και ανοίγματος περσίδων • Ανεμιστήρες εξαερισμού 	M/Δ	EnergyPlus jEPlus+EA
[226]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • GA για καλιμπράρισμα μοντέλου 	<ul style="list-style-type: none"> • Κόστος κύκλου ζωής • Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου 	<ul style="list-style-type: none"> • Παράθυρα • Φωτισμός • Στεγανότητα • Σύστημα ΘΨΚ • Ρύθμιση θερμοκρασίας 	Στόχος απανθρακοποίησης	SketchUp (Euclid) ModelKit, EnergyPlus Python (Platypus)

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[122]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + Kriging • Pareto • UA: κλίμα, λειτουργικό κόστος και περιβαλλοντικές επιπτώσεις • SA με δείκτες Sobol 	<ul style="list-style-type: none"> • Κόστος κύκλου ζωής • Δείκτης υπερθέρμανσης του πλανήτη 	<ul style="list-style-type: none"> • Τύπος μόνωσης τοίχων, οροφής και δαπέδου • Τύπος και απόδοση συστήματος ΘΨΚ 	M/Δ	Ημιστατικός υπολογισμός θερμικής ζήτησης Python
[127]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II έναντι IHS, MHACO, NSPSO. • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Εξοικονόμηση ζήτησης ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Πάχος εξωτερικής μόνωσης • Τύπος παράθυρου και πλαίσιου 	M/Δ	BRIOTOOL
[77]	<ul style="list-style-type: none"> • SPEA-2 + HypE • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Αυτονομία χώρου από το φως της ημέρας (ισόγειο, πρώτος όροφος) • Ετήσια έκθεση στον ήλιο (ισόγειο, πρώτος όροφος) 	<ul style="list-style-type: none"> • Πάχος, βάθος και αριθμός διαχωριστικών τζαμιών • Ιδιότητες υαλοπίνακα 	M/Δ	Rhino/GH ArchSim, Diva, Octopus Radiance, Daysim
[124]	<ul style="list-style-type: none"> • GA • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Κόστος κύκλου ζωής • Αποτύπωμα άνθρακα κύκλου ζωής 	<ul style="list-style-type: none"> • Ύπαρξη Φ/Β ή/και ΗΣ • Χωρητικότητα αποθήκευσης ζεστού νερού • Σύστημα θέρμανσης • Θερμοπερατότητα παράθυρου • Πάχος και τύπος μονωτικού υλικού 	M/Δ	Python (DEAP) Δυναμικό μοντέλο αντίστασης-χωρητικότητας
[113]	<ul style="list-style-type: none"> • prNSGA-III • Pareto: TOPSIS • AHP • UA: κλίμα, κόστος ενέργειας 	<ul style="list-style-type: none"> • Περιβαλλοντική απόδοση: δείκτης αερίων θερμοκηπίων + δείκτης νερού • Κόστος κύκλου ζωής • Θερμική δυσφορία 	<ul style="list-style-type: none"> • Υπαρξη Φ/Β ή/και ΗΣ • Χωρητικότητα αποθήκευσης ζεστού νερού • Σύστημα θέρμανσης • Θερμοπερατότητα παράθυρου • Πάχος και τύπος μονωτικού υλικού 	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις Θερμική δυσφορία	EnergyPlus DesignBuilder MATLAB
[227]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Διάφορες περιοχές και αρχέτυπα 	<ul style="list-style-type: none"> • Κόστος αρχικής επένδυσης + Λειτουργικό Κόστος • Φορτίο εκπομπών CO2 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση τοίχων • Τζάμια παράθυρων • Σύστημα θέρμανσης 	Ετήσιο εισόδημα	Rhino/GH Ladybug EnergyPlus
[228]	<ul style="list-style-type: none"> • GA • Μέτωπο Pareto • Μέθοδος SplitFlux για φυσικό φωτισμό 	<ul style="list-style-type: none"> • Επίπεδο φωτισμού • Ζήτηση ενέργειας για νύξη 	<ul style="list-style-type: none"> • Γεωμετρία, πάχος, υλικά και φινιρίσματα συστήματος ηλεκτρικών ραφιών • Τύπος υαλοπινάκων • Φινιρίσματα εσωτερικού περιβάλλοντος χώρου 	Ωρες θερμικής δυσφορίας	Autodesk REVIT DesignBuilder, EnergyPlus jEPlus+EA
[229]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Pareto: WSM • Συγκεντρωτικά δεδομένα καιρού 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση θέρμανσης • Βαθμώρες υπερθέρμανσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Θερμοπερατότητα εξωτερικού τοίχου, πλάκας και οροφής • Αεροστεγανότητα 	M/Δ	EnergyPlus jEPlus jEPlus+EA

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
			• Υαλοπίνακες • Σκίαση		
[230]	• NSGA-II + ANN (Κανονικοποίηση Bayes) + LHS • Μέτωπο Pareto	• Κόστος κύκλου ζωής • Εκπομπές CO2 κύκλου ζωής	• Τύπος μόνωσης τοίχου και στέγης • Τύπος εξωτ. παράθυρου • WWR • Βάθος προεξοχής • Προσανατολισμός • (Έλεγχος υβριδικού αερισμού, έλεγχος φωτισμού)	M/Δ	SketchUp EnergyPlus jEPlus MATLAB
[104]	• GA + MLPANN • Pareto: TOPSIS	• Κόστος κύκλου ζωής • Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου	• Εξοπλισμός θέρμανσης χώρου και νερού • Στεγανότητα • Μόνωση τοίχων και οροφής • Παράθυρα • Εξωτερική πόρτα	M/Δ	HOT2000, HTAP Python (TensorFlow, Scikit-learn, Numpy, Pandas)
[98]	• Μικρογενετικός αλγόριθμος • WSM • Μοντελοποίηση αστικού περιβάλλοντος • Μελλοντικά αρχεία καιρού με VWFG	• Μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου • Οριακό ετήσιο κόστος	• Θερμική αντίσταση τοίχου και οροφής • Ρυθμός διείσδυσης • Ρυθμός εξαερισμού • Μέγεθος υαλοπινάκων • Συντελεστής θερμικού κέρδους • Λευκαύγεια οροφής • Ρυθμός ροής αέρα, ρυθμός ροής ρευστού και εμβαδό ΗΣ • Εμβαδό Φ/Β • Περιοχή σάρωσης Α/Γ • Αποθήκευση ενέργειας • Όγκος PCM και θερμοκρασία τήξης	M/Δ	Vertical City Weather Generator
[129]	• NSGA-II • Pareto • Extra Trees, MLPANN και Gradient Boosting για μοντελοποίηση • Ανάπτυξη UI	• Πρωτογενής ενεργειακή ανάγκη • Κόστος αρχικής επένδυσης • Απόδοση επένδυσης	• Μόνωση τοίχων, δαπέδων και στέγης • Πλαίσιο παραθύρων • Σύστημα ZNX • Σύστημα ΘΨΚ • Φ/Β πάνελ	Προϋπολογισμός	Python (Scikit-Learn)
[231]	• NSGA-II • Μέτωπο Pareto	• Ενεργειακή ανάγκη για ψύξη • Θερμική δυσφορία	• Τύπος υαλοπινάκων • Σημείο ρύθμισης θερμοκρασίας για ψύξη • Τοπική σκίαση • WWR • Τύπος πρόσοψης • Σύστημα ΘΨΚ	M/Δ	DesignBuilder Meteonorm
[82]	• NSGA-II + ANN (NARX) + MPC • Μέτωπο Pareto • Δύο περιπτώσεις τιμών ρεύματος	• Λειτουργικό κόστος • Θερμική δυσφορία	Ωριαία ρύθμιση θερμοκρασίας για κάθε μέρα	Θερμική δυσφορία	DesignBuilder EnergyPlus MATLAB

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[106]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας • Κόστος κύκλου ζωής • Θερμική δυσφορία 	<ul style="list-style-type: none"> • Υλικό και πάχος μόνωσης εξωτερικού τοίχου και στέγης • Τύπος παράθυρου • ΗΣ • Σύστημα ΘΥΚ 	M/Δ	RETROSIM: TRNSYS, MATLAB
[232]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Τρέχον και μελλοντικό κλίμα • Παγκόσμια και τοπική SA, Monte Carlo 	<ul style="list-style-type: none"> • Θερμική άνεση • Χρήση ενέργειας για θέρμανση • Χρήση ενέργειας για φωτισμό 	<ul style="list-style-type: none"> • Θερμοπερατότητα τοίχου, στέγης και παράθυρου • WWR • Διείσδυση • Νυχτερινός αερισμός • Ανακλαστικότητα στέγης • Ποσοστό ανοίγματος παράθυρων • Εσωτερική και εξωτερική σκίαση 	<ul style="list-style-type: none"> Θερμική Άνεση Χρήση ενέργειας για θέρμανση Χρήση ενέργειας για φωτισμό 	DesignBuilder, EnergyPlus jEPlus, jEPlus+EA Python SimLab
[233]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto: WSM • SA: Morris • Διάφορες πόλεις 	<ul style="list-style-type: none"> • Θερμική άνεση • Συγκέντρωση CO2 • Επίπεδα ρύπανσης CO2 	<ul style="list-style-type: none"> • Επίπεδο ρουχισμού • Ταχύτητα αέρα • Σημεία ρύθμισης θερμοστάτη • Όγκος καθαρού αέρα από το σύστημα εξαερισμού • Διαπερατότητα απορροφητικότητα για στέγη και εξωτερικό τοίχο • Ιδιότητες παράθυρου • Επίπεδο δραστηριότητας 	M/Δ	EnergyPlus jEPlus jEPlus+EA
[125]	<ul style="list-style-type: none"> • aNSGA-II • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση εσωτερικών τοίχων και διάκενου αέρα εξωτερικών τοίχων • Λότζια: εσωτερική μόνωση • Εξωτερική μόνωση ταράτσας • Φινίρισμα ταράτσας για ηλιακή ανάκλαση • Παράθυρα • Κλείσιμο λότζια με τζάμι και προσθήκη σκίαστρου • Κλείσιμο ισογείου με τζάμια • (Αντλία θερμότητας αέρος/νερού, Φ/Β) 	M/Δ	Rhino-Grasshopper: Honeybee OpenStudio EnergyPlus EnergyPLAN Python (Eppy)
[234]	<ul style="list-style-type: none"> • aNSGA-II • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας • Εκπομπές CO₂ • Κόστος αρχικής επένδυσης • Κόστος ενέργειας 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση εσωτερικών τοίχων και διάκενου αέρα εξωτερικών τοίχων • Λότζια: εσωτερική μόνωση • Εξωτερική μόνωση ταράτσας • Φινίρισμα ταράτσας για ηλιακή ανάκλαση • Παράθυρα • Κλείσιμο λότζια με τζάμι και προσθήκη σκίαστρου • Κλείσιμο ισογείου με τζάμια 	M/Δ	Rhino-Grasshopper EnergyPlus Python (Eppy)

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[111]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-III • Μέτωπο Pareto: EWM + ιδανικό σημείο 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Υλικό και πάχος μόνωσης εξωτερικού τοίχου και στέγης • Τύπος παράθυρου • WWR 	M/Δ	SketchUp, Open Studio EnergyPlus Python (Pymoo)
[235]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Ανάλυση ευαισθησίας • Μελλοντικά αρχεία καιρού: μέθοδος μορφοποίησης 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας / Εκπομπές CO2 • Θερμική δυσφορία 	<ul style="list-style-type: none"> • Σημεία ρύθμισης θερμοκρασίας ψύξης/θέρμανσης • Σημεία ρύθμισης αντλίας θερμότητας για καλοκαίρι και χειμώνα • Ρυθμίσεις εξαερισμού • Εμβαδό και κλίση Φ/Β 	Εκπομπές CO2 Ωρες θερμικής δυσφορίας	TRNSYS jEPlus+EA
[236]	<ul style="list-style-type: none"> • SPEA2 + HypE • Μέτωπο Pareto • SA με LHS 	<ul style="list-style-type: none"> • Ολικό κόστος • Θερμική δυσφορία • Εκπομπές CO2 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση και επένδυση εξωτ. τοίχων και στέγης • Τύπος παράθυρου και σκίαση • Βόρειο παράθυρο • Προεξοχή βεράντας • Αίθριο με τζαμαρία • Φ/Β πάνελ • (Σύστημα ΘΨΚ) 	M/Δ	EnergyPlus Rhino/GH Octopus Python
[237]	<ul style="list-style-type: none"> • GA • Μέτωπο Pareto 	<ul style="list-style-type: none"> • Κόστος αρχικής επένδυσης • Ενσωματωμένη ενέργεια 	<ul style="list-style-type: none"> • Σοβάτισμα τοίχων • Δάπεδα • Παράθυρα • Εσωτερική βαφή τοίχων 	Προϋπολογισμός	Autodesk REVIT MATLAB
[96]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-III • Παλινδρόμηση FFD • ANOVA • Pareto: Σύνθετη συνάρτηση επιθυμητότητα • Ανάλυση κόστους λύσεων 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης • Εκπομπές CO2 	<ul style="list-style-type: none"> • Θερμοπερατότητα εξωτερικού τοίχου, παράθυρων και οροφής • Συνολική απόδοση συστήματος με βάση τον συντελεστή εκπομπών των καυσίμων 	M/Δ	DesignBuilder EnergyPlus DesignExpert
[238]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto: Ασαφής DM 	<ul style="list-style-type: none"> • Λειτουργική ενέργεια • Ενσωματωμένη ενέργεια • Λειτουργικός άνθρακας • Ενσωματωμένος άνθρακας 	<ul style="list-style-type: none"> • WWR • Προσανατολισμός κτιρίου • Υαλοπίνακες • Επένδυση, επικάλυψη και μόνωση τοίχων 	M/Δ	SketchUp EnergyPlus Python MS Excel
[239]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto • Μελλοντική κλιματική αβεβαιότητα 	<ul style="list-style-type: none"> • Λειτουργική ζήτηση ενέργειας • Εκπομπές CO2 κύκλου ζωής • Κόστος κύκλου ζωής 	<ul style="list-style-type: none"> • Μόνωση εξωτ. τοίχου και δαπέδου • Σκίαση • Τζάμα • Αεροστεγανότητα • WWR 	M/Δ	EnergyPlus Rhino/GH Honeybee Python
[240]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto: WSM • Δύο διαφορετικά κλίματα 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας • Συγκέντρωση CO2 • Θερμική δυσφορία 	<ul style="list-style-type: none"> • Σημεία ρύθμισης θερμοκρασίας για έλεγχο ανοιγμάτων • Σημεία ρύθμισης θερμοστάτη • Εμβαδό ανοίγματος παράθυρου 	M/Δ	SketchUp EnergyPlus jEPlus+EA

ID	Μεθοδολογία	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Εργαλεία
[102]	• GA	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Πάχος μόνωσης εξωτερικού τοίχου και θερμοπερατότητα • Πάχος μόνωσης στέγης και θερμοπερατότητα 	M/Δ	Python (PyCharm IDE)
[108]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + DNN • Μέτωπο Pareto: TOPSIS • LHS για μοντελοποίηση και εκπαίδευση DNN • SA για παραμέτρους με DMIM και RED-FAST 	<ul style="list-style-type: none"> • Κόστος κύκλου ζωής • Δείκτης υπερθέρμανσης του πλανήτη • Ώρες θερμικής δυσφορίας 	<ul style="list-style-type: none"> • Τύπος και πάχος μόνωσης ταράτσας και τοίχου • Τύπος εξωτ. παράθυρου • WWR • Βάθος προεξοχής • Προσανατολισμός 	M/Δ	EnergyPlus, Radiance Rhino-GH Ladybug και Colibri Python (PyTorch)
[110]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto: Οικονομική ανάλυση 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Θερμική άνεση 	<ul style="list-style-type: none"> • Τζάμια παράθυρων • Τύπος και πάχος μόνωσης οροφής • Τύπος & πάχος μόνωσης εξωτερικών τοίχων, τύπος PCM και πάχος στρώσης ξύλου 	M/Δ	DesignBuilder
[241]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Pareto: TOPSIS και VIKOR 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Αρχική επένδυση + λειτουργικό κόστος • Περίοδος αποπληρωμής 	<ul style="list-style-type: none"> • Πάχος και ηλιακή απορροφητικότητα μόνωσης εξωτερικού τοίχου και στέγης • Τύπος παράθυρου και προεξοχή • Εμβαδό και τύπος Φ/Β 	M/Δ	Rhino-Grasshopper: Ladybug, Honeybee, Wallacei EnergyPlus
[76]	<ul style="list-style-type: none"> • SPEA 2 + HypE (Octopus) • Pareto: Προοδευτικό φιλτράρισμα • Ερωτηματολόγια αξιολόγησης • SA: Ποιοτική ανάλυση, ανάλυση συσχέτισης Pearson, ANOVA 	<ul style="list-style-type: none"> • Θερμική άνεση • Σταθερότητα θερμοκρασίας • Ορατότητα 	<ul style="list-style-type: none"> • Αναλογία παράθυρου προς τοίχο κάθε πρόσογης (WWR) • Βάθος κάθετων πτερυγίων σκίασης • Τύπος τζαμιού 	Εξωτερική θέα Συντήρηση	Rhino-Grasshopper: Ladybug, Honeybee, Octopus EnergyPlus, Daysim Excel, SPSS
[105]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II + MLPANN + Hyperband • Pareto: VIKOR & TOPSIS • Γενική SA: Sobol, Morris 	<ul style="list-style-type: none"> • Ζήτηση ενέργειας • Θερμική δυσφορία 	<ul style="list-style-type: none"> • Θερμοπερατότητα και ηλιακή απορροφητικότητα τοίχου και στέγης • Θερμοπερατότητα πλάκας εδάφους • Παράθυρα • WWR • Σημεία ρύθμισης θερμοκρασίας 	M/Δ	EnergyPlus Rhino-Grasshopper Ladybug Python (Tensor-Flow, Keras-tuner, Geatry, Allpairs, SALib)
[112]	<ul style="list-style-type: none"> • NSGA-II • Μέτωπο Pareto: EWM 	<ul style="list-style-type: none"> • Κατανάλωση ενέργειας • Κόστος αρχικής επένδυσης • Θερμική δυσφορία 	<ul style="list-style-type: none"> • Υλικό και πάχος μόνωσης εξωτ. τοίχων και στέγης • Τύπος παράθυρου • WWR • Σύστημα ΘΨΚ 	Χρονοδιάγραμμα Κόστος Εκπομπές άνθρακα	EnergyPlus OpenStudio

