



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

**Αξιολόγηση ελάχιστων προτύπων ενεργειακής
απόδοσης κτιρίων στην Ελλάδα με χρήση
πολυστοχικού προγραμματισμού**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Κωνσταντίνος Α. Αργυρόπουλος

Επιβλέπων : Χρυσόστομος (Χάρης) Δούκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Αξιολόγηση ελάχιστων προτύπων ενεργειακής απόδοσης κτιρίων στην Ελλάδα με χρήση πολυστοχικού προγραμματισμού

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Κωνσταντίνος Α. Αργυρόπουλος

Επιβλέπων : Χρυσόστομος (Χάρης) Δούκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Οκτωβρίου 2024.

.....
Χρυσόστομος (Χάρης) Δούκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

.....

Δημήτριος Κωνσταντίνος Α. Αργυρόπουλος

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

Copyright © ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Α. ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΣ, 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 ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων αποτελεί έναν από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στην Ελλάδα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, διερευνάται η αξιολόγηση και η εφαρμογή των ελάχιστων προτύπων ενεργειακής απόδοσης (MEPS) στον κτιριακό τομέα, με χρήση πολυστοχικού προγραμματισμού. Στόχος της έρευνας είναι η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων μέσω καινοτόμων μεθόδων ανάλυσης, όπως η πολυκριτήρια ανάλυση και η βελτιστοποίηση μέσω της μεθόδου AUGMECON-Py, σε συνδυασμό με την ανάλυση ευαισθησίας Monte Carlo. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την προσομοίωση διαφόρων σεναρίων ενεργειακής αναβάθμισης για τα κτίρια του οικιακού και τριτογενούς τομέα, αξιολογώντας την αποτελεσματικότητα διαφορετικών μέτρων, όπως η μόνωση τοίχων, η χρήση αποδοτικών συστημάτων θέρμανσης και η εγκατάσταση διπλών τζαμιών. Εξετάζεται η οικονομική βιωσιμότητα αυτών των μέτρων και η δυνατότητά τους να επιτύχουν τους εθνικούς και ευρωπαϊκούς στόχους ενεργειακής απόδοσης, καθώς και η ανθεκτικότητα των λύσεων αυτών υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Τα αποτελέσματα της έρευνας αποκαλύπτουν ότι η εφαρμογή των MEPS μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και του λειτουργικού κόστους, ενώ ταυτόχρονα προωθεί τη βιώσιμη ανάπτυξη. Η ενσωμάτωση αυτών των προτύπων στην ενεργειακή πολιτική της Ελλάδας μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στη μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο και αποδοτικό ενεργειακό μέλλον, υπό την προϋπόθεση ότι θα υπάρξει σωστή στρατηγική εφαρμογή και επαρκής χρηματοδότηση. Η εργασία αυτή παρέχει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την ανάπτυξη πιο αποδοτικών και οικονομικά βιώσιμων πολιτικών ενεργειακής απόδοσης, δίνοντας έμφαση στην ανάγκη για καινοτόμες λύσεις και στρατηγικές που θα υποστηρίξουν τους εθνικούς και ευρωπαϊκούς στόχους βιωσιμότητας.

Λέξεις-κλειδιά: ενεργειακή απόδοση, MEPS, πολυστοχικός προγραμματισμός, ανάλυση ευαισθησίας Monte Carlo, AUGMECON-Py, ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων, βελτιστοποίηση προϋπολογισμού.

Abstract

Improving the energy efficiency of buildings is one of the most effective ways to reduce energy consumption and enhance sustainability in Greece. This thesis examines the assessment and implementation of Minimum Energy Performance Standards (MEPS) in the building sector, through multi-objective programming. The objective of the research is to optimize the energy efficiency of buildings using innovative analytical methods, such as multi-criteria analysis and optimization through the AUGMECON-Py method, combined with Monte Carlo sensitivity analysis. This approach allows for the simulation of various energy upgrade scenarios for residential and tertiary sector buildings, evaluating the effectiveness of different measures, such as wall insulation, the use of efficient heating systems, and the installation of double-glazed windows. The study assesses the economic viability of these measures and their potential to achieve national and European energy efficiency targets, as well as the robustness of these solutions under conditions of uncertainty. The findings of this research reveal that the implementation of MEPS can lead to significant reductions in energy consumption and operational costs while promoting sustainable development. Integrating these standards into Greece's energy policy could play a crucial role in the transition to a more sustainable and efficient energy future, provided that there is proper strategic implementation and adequate funding. This thesis provides a comprehensive framework for developing more efficient and economically viable energy efficiency policies, emphasizing the need for innovative solutions and strategies that support national and European sustainability goals.

Keywords: energy performance, MEPS, multi-objective programming, Monte Carlo sensitivity analysis, AUGMECON-Py, building energy upgrade, budget optimization.

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε κατά την περίοδο 2022-2024 στο Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες, στον καθηγητή κ. Χάρη Δούκα για την εμπιστοσύνη και την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος και απαιτητικού θέματος. Επιπλέον, ευχαριστώ ιδιαίτερα την κ. Νατάσα Φριλίγγου για την πολύτιμη βοήθεια, την υποστήριξη και την καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω και στον κ. Κωνσταντίνο Κοασίδη, για την καθοδήγηση και την εις βάθος ανάλυση των μεθόδων που εφαρμόστηκαν στην εργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, που υπήρξαν ακούραστοι υποστηρικτές και στάθηκαν δίπλα μου σε όλη αυτή την πορεία, καθώς και τη σύντροφό μου, η οποία υπήρξε αρωγός και συμπαράστατης καθ' όλη την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Δημήτριος Αργυρόπουλος, Αθήνα, Οκτώβριος, 2024

Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων	11
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	16
1.1 Αντικείμενο – Στόχος	16
1.2 Υλοποίηση	18
1.3 Διάρθρωση	18
2 ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	19
2.1 Νομοθετικό πλαίσιο	19
2.1.1 Η Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (EPBD)	19
2.1.2 Στην Ελλάδα κατά ΚΕΝΑΚ	21
2.2 Ο κτιριακός τομέας στην Ελλάδα	29
2.2.1 Απογραφή κατοικιών και ενεργειακές κλάσεις	29
2.2.2 Αναδιανομή ενεργειακών κλάσεων	33
3 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ	36
3.1 Εισαγωγή	36
3.2 Η μέθοδος AUGMECON-Py	36
3.2.1 Εισαγωγή	36
3.2.2 Τροποποιήσεις και βελτιώσεις της μεθόδου	38
3.2.3 Η χρήση της μεθόδου στην παρούσα διπλωματική	39
4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	41
4.1 Διάρθρωση του προβλήματος	41
4.2 Υπολογισμός μείωσης τελικής ενεργειακής κατανάλωσης και εξοικονόμησης κόστους διαφορετικών μέτρων εφαρμογής σε κτίρια κλάσης Η	42
4.3 Υπολογισμός κόστους εφαρμογής μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια ενεργειακής κλάσης Η	46
4.4 Δημιουργία υπολογιστικών φύλλων εισαγωγής δεδομένων	47
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	51
5.1 Οικιακού τομέα.....	51
5.1.1 Ανάλυση κόστους και εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από ενεργειακή κλάση Η σε Ε.	51
5.1.2 Ανάλυση κόστους και εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους για μετάβαση από ενεργειακή κλάση Η σε Ε.....	54

5.1.3 Ανάλυση κόστους εξοικονόμησης ενέργειας και εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους για μετάβαση από ενεργειακή κλάση Η σε Δ.	57
5.2 Τριτογενούς τομέα	60
5.2.1 Ανάλυση κόστους και εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από ενεργειακή κλάση Η σε Ε.	60
5.2.2 Ανάλυση κόστους, εξοικονόμησης ενέργειας και εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους για μετάβαση από ενεργειακή κλάση Η σε Δ.	66
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	71
6.1 Συμπεράσματα.....	71
6.2 Προοπτικές	72
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	74
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	80

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Κλιματικές ζώνες στην Ελλάδα (Διαδραστικός Χάρτης, 2024)	22
Σχήμα 2: Κατανομή κατοικήσιμων κτιρίων ανά κλιματική ζώνη.....	23
Σχήμα 3: Ποσοστό πλήθους Π.Ε.Α ανά ενεργειακή κλάση (ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2022)	24
Σχήμα 4: Μέση ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας κτιρίων κατοικιών ανά κλιματική ζώνη και χρήση χρονικής περιόδου 2011-2021 σε kWh/m ² /y (ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2022)	25
Σχήμα 5: Πιστοποιητικά ενεργειακής απόδοσης ανά έτος.....	26
Σχήμα 6: Πλήθος πιστοποιητικών ενεργειακής απόδοσης ανά χρήση και ενεργειακή κατηγορία (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2022)	27
Σχήμα 7: Τελική κατανάλωση ενέργειας οικιακού τομέα (TJ) 1990-2022 (Statistics Eurostat Disaggregated Final Energy Consumption in Households - Quantities, 2024).....	31
Σχήμα 8: Κατανομή τελικής κατανάλωσης ενέργειας οικιακού τομέα (Statistics Eurostat Disaggregated Final Energy Consumption in Households - Quantities, 2024).....	31
Σχήμα 9: Πρωτογενής κατανάλωση ενέργεια βιομηχανικού, κτιριακού και τομέα μεταφορών (Statistics Eurostat Complete Energy Balances, 2024).....	32
Σχήμα 10: Σωρευτικά ποσοστά ενεργειακών κλάσεων πριν και μετά την αναδιανομή τους.	35
Σχήμα 11: Ποσοστά κτιρίων ανά ενεργειακή κλάση πριν και μετά την αναδιανομή τους.	35
Σχήμα 12: ε - Περιορισμένη Μέθοδος.....	37
Σχήμα 13: Η Μέθοδος Augmecon (Mavrotas, 2009)	37
Σχήμα 14: Μεθοδολογία υπολογισμού εξοικονόμησης τελικής ενεργειακής κατανάλωσης και εξοικονόμησης κόστους ανά κατηγορία κτιρίων κλάσης Η και διαφορετικών μέτρων εφαρμογής	43
Σχήμα 15: Μεθοδολογία AUGMECON-Py.....	48
Σχήμα 16: Διάγραμμα Παρέτο κόστους – εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε οικιακού τομέα.....	52
Σχήμα 17: Αριθμός εμφάνισης λύσεων κόστους – εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε οικιακού τομέα	53
Σχήμα 18: Διάγραμμα Παρέτο κόστους – εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε οικιακού τομέα	55
Σχήμα 19: Αριθμός εμφάνισης λύσεων κόστους - εξοικονόμησης κόστους για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε οικιακού τομέα	56
Σχήμα 20: Διαγράμματα Παρέτο :Διάγραμμα Παρέτο κόστους –εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους- εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Δ οικιακού τομέα.....	58
Σχήμα 21: Αριθμός εμφάνισης λύσεων κόστους - εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Δ οικιακού τομέα	58
Σχήμα 22: Αριθμός εμφάνισης λύσεων κόστους - εξοικονόμησης για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Δ οικιακού τομέα	59
Σχήμα 23: Ποσοστό εμφάνισης λύσεων με εφαρμογή > 50%, κόστους – εξοικονόμησης ενέργειας και - εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Δ οικιακού τομέα	60
Σχήμα 24: Διάγραμμα Παρέτο κόστους - εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε τριτογενούς τομέα	62

Σχήμα 25: Ποσοστό εμφάνισης λύσεων κόστους - εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε τριτογενούς τομέα	62
Σχήμα 26: Ποσοστό εμφάνισης λύσεων με εφαρμογή > 50 κόστους - εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε τριτογενούς τομέα	63
Σχήμα 27: Διάγραμμα Παρέτο κόστους - εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε τριτογενούς τομέα.....	65
Σχήμα 28: Διάγραμμα Παρέτο κόστους - εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Δ τριτογενούς τομέα	68
Σχήμα 29: Διάγραμμα Παρέτο κόστους - εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Δ τριτογενούς τομέα.....	69

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Κατηγορίες ενεργειακής απόδοσης κτιρίων (ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ & ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ, 2017)	24
Πίνακας 2: Κατανομή κτιρίων ανά περίοδο κατασκευής (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2011)	29
Πίνακας 3: Κατανομή κτιρίων ανά χρήση (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2011)	30
Πίνακας 4: Ποσοστά κτιρίων ανά ενεργειακή κλάση (ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ & ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ, 2017)	34
Πίνακας 5: Ποσοστά κτιρίων ανά ενεργειακή κλάση μετά την αναδιανομή τους	35
Πίνακας 6: Μίγματα κτιρίων οικιακού τομέα (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2011; ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2022)	42
Πίνακας 7: Μίγματα κτιρίων οικιακού τομέα (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2011; ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2022)	42
Πίνακας 8: Η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας σε kWh/m ² /έτος εισόδου στην ενεργειακή κλάση Η είναι 2.73 * Ref (ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2022)	43
Πίνακας 9: Ποσοστιαίες εξοικονομήσεις ενέργειας εξαρτημένων μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας	45
Πίνακας 10: Ποσοστιαίες εξοικονομήσεις ενέργειας ανεξάρτητων μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας	45
Πίνακας 11: Κόστος των εξεταζόμενων μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας (Gkonis et al., 2020; Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (CREC), 2020)	47
Πίνακας 12: Εγκατεστημένη ισχύς, αριθμός συσκευών και λαμπτήρων, και κόστος ηλιακών συλλεκτών ανά τύπο κτιρίου	47
Πίνακας 13: Συνδυασμοί Προσομοιώσεων	49
Πίνακας 14: Κωδικοποίηση μέτρων ενεργειακής απόδοσης για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε οικιακού τομέα	51
Πίνακας 15: Ενδεικτικές λύσεις αρχικού προβλήματος κόστους – εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε οικιακού τομέα	54
Πίνακας 16: Ενδεικτικές λύσεις αρχικού προβλήματος κόστους - εξοικονόμησης κόστους για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε οικιακού τομέα	57
Πίνακας 17: Κωδικοποίηση μέτρων ενεργειακής απόδοσης για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Δ οικιακού τομέα	57
Πίνακας 18: Κωδικοποίηση μέτρων ενεργειακής απόδοσης για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε τριτογενούς τομέα	61
Πίνακας 19: Επικρατέστερα μέτρα ενεργειακής απόδοσης για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε τριτογενούς τομέα	63
Πίνακας 20: Ποσοστό εμφάνισης βέλτιστων λύσεων κόστους - εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε τριτογενούς τομέα	65
Πίνακας 21: Ποσοστό εμφάνισης βέλτιστων λύσεων με και χωρίς εφαρμογή > 50% κόστους - εξοικονόμησης κόστους για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε τριτογενούς τομέα	66
Πίνακας 22: Κωδικοποίηση μέτρων ενεργειακής απόδοσης, για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Δ τριτογενούς τομέα	67
Πίνακας 23: Ποσοστό εμφάνισης βέλτιστων λύσεων με και χωρίς εφαρμογή > 50% κόστους - εξοικονόμησης κόστους και εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Δ τριτογενούς τομέα	70

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο – Στόχος

Στο πλαίσιο της νομοθετικής δέσμης «Fit-for-55», η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (ΕΕ) πρότεινε τον Δεκέμβριο του 2021 την αναδιατύπωση της οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2021a). Η πρόταση εισάγει μια νέα πολιτική για την προώθηση της ανακαίνισης των υφιστάμενων κτιρίων σε ολόκληρη την Ευρωπαϊκή Ένωση: τα Ελάχιστα Πρότυπα Ενεργειακής Απόδοσης (Minimum Energy Performance Standards - MEPS). Τα MEPS απαιτούν από επιλεγμένα υφιστάμενα κτίρια να πληρούν ένα ελάχιστο επίπεδο ενεργειακής απόδοσης μέχρι μια μελλοντική ημερομηνία ή ένα σημείο ενεργοποίησης στον κύκλο ζωής του κτιρίου, για παράδειγμα κατά τη στιγμή της πώλησης ή της ενοικίασης. Η ενίσχυση της ανακαίνισης κτιρίων αυτή τη δεκαετία είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη των κλιματικών στόχων της ΕΕ και τη μείωση της εξάρτησης από το ρωσικό φυσικό αέριο. Η ανακαίνιση των κτιρίων με τις χειρότερες επιδόσεις αποτελεί επίσης βασική στρατηγική για την ανακούφιση της ενεργειακής φτώχειας.

Τα MEPS αποτελούν ένα βασικό εργαλείο για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον κτιριακό τομέα, ο οποίος ευθύνεται για το 40% της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ). Η εφαρμογή των MEPS, μέσω της βελτίωσης της απόδοσης των χειρότερων κτιρίων, οδηγεί σε σημαντικές μειώσεις της κατανάλωσης ενέργειας και της παραγωγής εκπομπών CO₂ (European Environment Agency, 2023; *Statistics / Eurostat / Complete Energy Balances*, 2024).

Τα οικονομικά οφέλη από την υιοθέτηση των MEPS είναι επίσης σημαντικά, όπως δείχνει η εμπειρία από άλλες χώρες. Στη Μαλαισία, η εφαρμογή MEPS για οικιακές συσκευές οδήγησε σε σωρευτική εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας 3,645 GWh μέχρι το 2015. Αυτό καταδεικνύει ότι τα MEPS συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση των ενεργειακών δαπανών (Salleh et al., 2018). Στο Ηνωμένο Βασίλειο, αυστηρά ελάχιστα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης (MEPS) για τις οικιακές συσκευές θα μπορούσαν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας κατά 25% ή περισσότερο, συμβάλλοντας στην επίτευξη των κλιματικών στόχων για τον περιορισμό της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας στους 1.5°C (Sonnenschein et al., 2019).

Η στρατηγική ανακαίνισης που προωθείται από την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία στοχεύει στην επίτευξη ενός πλήρως απανθρακοποιημένου κτιριακού αποθέματος υψηλής ενεργειακής απόδοσης έως το 2050, με στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον κτιριακό τομέα κατά τουλάχιστον 60% μέχρι το 2030, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2015. Το 85% των κτιρίων στην ΕΕ έχουν κατασκευαστεί πριν το 2000, ενώ το 75% από αυτά χαρακτηρίζονται από χαμηλή ενεργειακή απόδοση. Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων είναι επομένως κρίσιμη για την εξοικονόμηση ενέργειας, τη μείωση των λογαριασμών

για τους πολίτες και τις μικρές επιχειρήσεις, καθώς και για την επίτευξη των φιλόδοξων κλιματικών στόχων της ΕΕ. Η αναθεωρημένη Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (EPBD), η οποία τέθηκε σε ισχύ τον Μάιο του 2024, επιβάλλει την ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων με τη χαμηλότερη απόδοση και προωθεί μέτρα για τη σταδιακή μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, επιταχύνοντας έτσι την ενεργειακή μετάβαση στην Ευρώπη (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2024).

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση της εφαρμογής των ελάχιστων προτύπων ενεργειακής απόδοσης (MEPS) στον κτιριακό τομέα της Ελλάδας, με χρήση πολυστοχικού προγραμματισμού. Η έρευνα επικεντρώνεται στην επιλογή και την αξιολόγηση συγκεκριμένων μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας και την εφαρμογή τους σε διάφορα μίγματα κτιρίων, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες του ελληνικού κτιριακού αποθέματος.

Οι κύριοι στόχοι της εργασίας περιλαμβάνουν:

1. **Αξιολόγηση Εναλλακτικών Ελάχιστων Προτύπων Ενεργειακής Απόδοσης (MEPS):** Η εργασία ξεκινά με την ανάλυση διαφορετικών σεναρίων και εναλλακτικών προσεγγίσεων για την εφαρμογή των MEPS στα κτίρια χαμηλής ενεργειακής κλάσης, με χρήση πολυστοχικού προγραμματισμού. Μέσω αυτής της αξιολόγησης, θα προσδιοριστούν τα πιο αποδοτικά μέτρα με βάση την ενεργειακή απόδοση και την οικονομική βιωσιμότητα, με σκοπό την υποστήριξη των φορέων χάραξης πολιτικής μέσω ενός καλώς ορισμένου συνόλου εύρωστων βέλτιστων χαρτοφυλακίων, αντί μίας μοναδικής βέλτιστης λύσης.
2. **Βελτιστοποίηση Χαρτοφυλακίων:** Στη συνέχεια, η έρευνα στοχεύει στον υπολογισμό της βέλτιστης κατανομής των επενδύσεων για την εφαρμογή των MEPS σε διαφορετικούς τύπους κτιρίων. Η βελτιστοποίηση αυτή θα εξεταστεί με κριτήρια όπως το κόστος των επεμβάσεων, η εξοικονόμηση ενέργειας και η εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους.
3. **Ανάλυση Ευαισθησίας:** Τέλος, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας για την εκτίμηση της ανθεκτικότητας των προτεινόμενων λύσεων σε διάφορες παραδοχές και σεσνάρια. Αυτή η ανάλυση θα βοηθήσει στην κατανόηση των κινδύνων και των αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τις ενεργειακές επενδύσεις σε χαρτοφυλάκια κτιρίων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία φιλοδοξεί να συνεισφέρει στην κατανόηση των στρατηγικών διαχείρισης χαρτοφυλακίων κτιρίων υπό το πρίσμα της ενεργειακής απόδοσης, προτείνοντας αποδοτικές πρακτικές για την αναβάθμιση του ελληνικού κτιριακού τομέα και την επίτευξη των εθνικών και ευρωπαϊκών στόχων για την ενεργειακή απόδοση μέχρι το 2050.

1.2 Υλοποίηση

Η ενότητα αυτή περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η έρευνα. Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε συνδυάζει ποσοτικές και ποιοτικές μεθόδους για την αξιολόγηση των ελάχιστων προτύπων ενεργειακής απόδοσης (MEPS) των κτιρίων, με χρήση πολυστοχικού προγραμματισμού.

Η έρευνα ξεκίνησε με εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση για την κατανόηση των θεωρητικών και πρακτικών πτυχών των MEPS και των στρατηγικών ενεργειακής αναβάθμισης των κτιρίων. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν η μέθοδος πολυστοχικού προγραμματισμού AUGMECON-Py σε συνδυασμό με ανάλυση ευαισθησίας Monte Carlo, για την αξιολόγηση διάφορων ενεργειακών σεναρίων και τη βελτιστοποίηση του προϋπολογισμού για την εφαρμογή των MEPS.

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από εθνικές και ευρωπαϊκές βάσεις δεδομένων, καθώς και στατιστικές αναφορές για το ελληνικό κτιριακό απόθεμα. Η ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση προηγμένων εργαλείων λογισμικού και υπολογιστικών μοντέλων για την εξασφάλιση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

1.3 Διάρθρωση

Η διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας οργανώνεται σε έξι κύρια κεφάλαια, καθένα από τα οποία εξυπηρετεί συγκεκριμένο σκοπό και συμβάλλει στην επίτευξη των ερευνητικών στόχων:

- **Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή** – Παρουσιάζει το αντικείμενο, τους στόχους, τη μεθοδολογία, την υλοποίηση και τη διάρθρωση της εργασίας.
- **Κεφάλαιο 2: Ελάχιστα Πρότυπα Ενεργειακής Απόδοσης (MEPS)** – Αναλύει το νομικό πλαίσιο και τις απαιτήσεις των MEPS στην Ελλάδα και την Ευρώπη.
- **Κεφάλαιο 3: Πολυστοχικός Προγραμματισμός και Μέθοδοι Βελτιστοποίησης** – Παρέχει ανάλυση της μεθόδου πολυστοχικής βελτιστοποίησης AUGMECON-Py που χρησιμοποιήθηκε για την έρευνα.
- **Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία** – Περιγράφει τις πηγές δεδομένων, τη διαδικασία συλλογής δεδομένων, τη διάρθρωση του προβλήματος που επιλύεται με τη μέθοδο AUGMECON-Py και τη δημιουργία των διάφορων υπολογιστικών φύλλων εισαγωγής δεδομένων που είναι απαραίτητα για τη χρήση της μεθόδου.
- **Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα** – Παρουσιάζει τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τον οικιακό καθώς και τον τριτογενή κτιριακό τομέα.
- **Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις** – Συνοψίζει τα βασικά ευρήματα, συζητά τις επιπτώσεις της έρευνας και παρέχει προτάσεις για μελλοντική πολιτική και πρακτική στην ενεργειακή απόδοση των κτιρίων.

2 ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

2.1 Νομοθετικό πλαίσιο

2.1.1 Η Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (EPBD)

Η Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (Energy Performance of Buildings Directive - EPBD) είναι μια σημαντική νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης που αποσκοπεί στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Παρακάτω περιγράφονται οι κύριες αλλαγές και αναθεωρήσεις της οδηγίας με τα χρόνια:

Η Οδηγία 2010/31/ΕΕ εκδόθηκε στις 19 Μαΐου 2010 και αντικατέστησε την αρχική οδηγία 2002/91/ΕΚ (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2002). Κύριος στόχος της ήταν η περαιτέρω βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Οι βασικές διατάξεις της περιλαμβάνουν:

- **Κοινό Πλαίσιο Μεθοδολογίας:** Θέσπιση ενός κοινού πλαισίου για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων.
- **Ελάχιστες Απαιτήσεις Ενεργειακής Απόδοσης:** Καθορισμός ελάχιστων απαιτήσεων για την ενεργειακή απόδοση των νέων και των υφιστάμενων κτιρίων που υπόκεινται σε μεγάλες ανακαινίσεις.
- **Κτίρια με Σχεδόν Μηδενική Κατανάλωση Ενέργειας :** Προώθηση της ανέγερσης κτιρίων με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας, με προθεσμία την 31^η Δεκεμβρίου 2020 για νέα κτίρια δημόσιων αρχών και την 31η Δεκεμβρίου 2022 για όλα τα νέα κτίρια.
- **Επιθεωρήσεις και Έλεγχοι:** Τακτική επιθεώρηση των συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού, καθώς και των Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης (EPCs).
- **Πολιτικές Υποστήριξης και Χρηματοδότηση:** Θέσπιση μέτρων και κινήτρων για την υποστήριξη των ενεργειακά αποδοτικών ανακαινίσεων (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2010).

Η Οδηγία 2018/844/ΕΕ, που αναθεώρησε την προηγούμενη οδηγία, εισήγαγε νέες διατάξεις για την ενίσχυση των υφιστάμενων μέτρων και την ενθάρρυνση της καινοτομίας. Οι κύριες αλλαγές περιλάμβαναν:

- **Μακροπρόθεσμες Στρατηγικές Ανακαίνισης:** Καθορισμός μακροπρόθεσμων στρατηγικών για την υποστήριξη της ανακαίνισης του κτιριακού αποθέματος, με στόχο την επίτευξη ενός πολύ αποδοτικού και απολιγνιτοποιημένου κτιριακού αποθέματος έως το 2050.
- **Έξυπνα Κτίρια:** Εισαγωγή του δείκτη ετοιμότητας για έξυπνα κτίρια (Smart Readiness Indicator - SRI) για να ενθαρρυνθεί η χρήση έξυπνων τεχνολογιών.

- **Ηλεκτροκίνηση:** Θέσπιση απαιτήσεων για την εγκατάσταση υποδομών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε νέα και ανακαινισμένα κτίρια (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2018).

Το 2021, σύμφωνα με την οδηγία 2021/0426(COD), η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρουσίασε πρόταση για περαιτέρω αναθεώρηση της EPBD στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας. Οι βασικές αλλαγές περιλάμβαναν:

- **Ελάχιστα Πρότυπα Ενεργειακής Απόδοσης (MEPS):** Εισαγωγή των MEPS για τα κτίρια με τη χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση μέχρι το 2030. Τα MEPS απαιτούν από τα κτίρια να επιτύχουν ελάχιστα επίπεδα ενεργειακής απόδοσης που καθορίζονται με βάση την ανθρακική ή ενεργειακή βαθμολογία ή τα ελάχιστα μέτρα ανακαίνισης μέχρι μια καθορισμένη προθεσμία συμμόρφωσης.
- **Ανακαίνιση Κτιρίων:** Θέσπιση απαιτήσεων για την ανακαίνιση του 15% των κτιρίων με τις χειρότερες επιδόσεις..
- **Βελτίωση Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης (EPCs):** Βελτίωση της διαφάνειας και της αξιοπιστίας των EPCs.
- **Δημόσια Κτίρια:** Υποχρέωση των κρατών μελών να αναβαθμίσουν την ενεργειακή απόδοση των δημόσιων κτιρίων (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2021b).

Η Οδηγία 2023/1791/ΕΕ, εισήγαγε αυστηρότερες απαιτήσεις και στόχους για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, περιλαμβάνοντας:

- **Αυστηρότερες Ελάχιστες Απαιτήσεις:** Θέσπιση πιο αυστηρών ελάχιστων απαιτήσεων για την ενεργειακή απόδοση των νέων και υφιστάμενων κτιρίων, με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.
- **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας:** Προώθηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα κτίρια, με στόχο την κάλυψη μεγάλου μέρους των ενεργειακών τους αναγκών μέσω ανανεώσιμων πηγών.
- **Υποστήριξη και Χρηματοδότηση:** Ενίσχυση των μέτρων υποστήριξης και χρηματοδότησης για την ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων, περιλαμβάνοντας επιδοτήσεις, δάνεια με χαμηλό επιτόκιο και φορολογικά κίνητρα (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2023).

Το 2024, προτάθηκε περαιτέρω αναθεώρηση της EPBD σύμφωνα με την οδηγία 2024/1275/ΕΕ για την ενίσχυση της βιωσιμότητας και της ανθεκτικότητας των κτιρίων. Οι κύριες αλλαγές περιλάμβαναν:

- **Κτίρια Μηδενικών Εκπομπών (Zero-emission Buildings):** Θέσπιση προτύπων για τα κτίρια μηδενικών εκπομπών, τα οποία πρέπει να είναι ενεργειακά αποδοτικά και να χρησιμοποιούν αποκλειστικά ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- **Ανακαίνιση Κτιρίων:** Βάσει του ενισχυμένου πλαισίου, τα οικιστικά και τα μη οικιστικά κτίρια αντιμετωπίζονται με διαφορετικό τρόπο. Όσον αφορά τα οικιστικά κτίρια, κάθε κράτος μέλος θα υιοθετήσει τη δική του εθνική πορεία για τη μείωση της μέσης χρήσης πρωτογενούς ενέργειας κατά 16 % έως το 2030 και κατά 20-22 % έως το 2035. Με τα εθνικά μέτρα θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι τουλάχιστον το 55 % της μείωσης της μέσης χρήσης πρωτογενούς ενέργειας θα επιτευχθεί μέσω της ανακαίνισης των κτιρίων με τις χειρότερες επιδόσεις, ωστόσο, τα κράτη μέλη έχουν την ευχέρεια να επιλέξουν ποια κτίρια θα στοχεύσουν και ποια μέτρα θα λάβουν.
- **Για τα μη οικιστικά κτίρια,** η αναθεωρημένη οδηγία προβλέπει τη σταδιακή εισαγωγή ελάχιστων προτύπων ενεργειακής απόδοσης (MEPS), βάσει των οποίων το 16% των κτιρίων με τις χειρότερες επιδόσεις πρέπει να ανακαινιστεί έως το 2030 και το 26 % των κτιρίων με τις χειρότερες επιδόσεις πρέπει να ανακαινιστεί έως το 2033. Τα κράτη μέλη θα έχουν τη δυνατότητα να εξαιρούν ορισμένες κατηγορίες οικιστικών και μη οικιστικών κτιρίων από τις υποχρεώσεις αυτές, συμπεριλαμβανομένων των ιστορικών κτιρίων ή των εξοχικών κατοικιών, ωστόσο, τα κράτη μέλη έχουν την ευχέρεια να επιλέξουν ποια κτίρια θα στοχεύσουν και ποια μέτρα θα λάβουν.
- **Ψηφιακές Τεχνολογίες:** Προώθηση της χρήσης ψηφιακών τεχνολογιών για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης.
- **Ανθεκτικότητα σε Κλιματικές Αλλαγές:** Ενίσχυση της ανθεκτικότητας των κτιρίων στις κλιματικές αλλαγές και άλλες απειλές (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2024).

Κοινωνική Διάσταση: Αντιμετώπιση της ενεργειακής φτώχειας και της επιβάρυνσης των ευάλωτων πολιτών.

2.1.2 Στην Ελλάδα κατά ΚΕΝΑΚ

Ο Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (ΚΕΝΑΚ) είναι η ελληνική εφαρμογή της ευρωπαϊκής οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (EPBD). Ο ΚΕΝΑΚ αποσκοπεί στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων μέσω του ελέγχου των ενεργειακών χαρακτηριστικών τους και της επίτευξης ελάχιστων ενεργειακών απαιτήσεων (ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ & ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ, 2017).

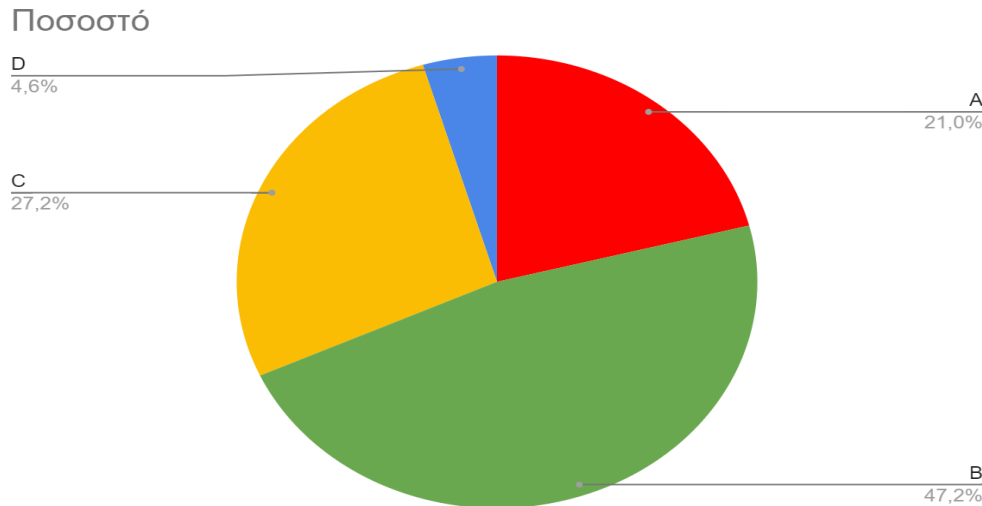
Η Ελλάδα κατά ΚΕΝΑΚ, χωρίζεται σε τέσσερις κλιματικές ζώνες, οι οποίες ορίζονται με βάση τον αριθμό των Ημερών Θερμικού Βαθμού Θέρμανσης (HDD), δηλαδή:

- Ζώνη Α (601–1100 HDD) που καλύπτει τα νότια τμήματα της ελληνικής ενδοχώρας και τα περισσότερα ελληνικά νησιά,
- Ζώνη Β (1101–1600 HDD) που περιλαμβάνει τη μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας,
- Ζώνη Γ (1601–2200 HDD) που καλύπτει τα κεντρικά και βόρεια τμήματα της ελληνικής ενδοχώρας και
- Ζώνη Δ (2201–2620 HDD) για υψηλά υψόμετρα και μικρά τμήματα της βόρειας Ελλάδας. (Dascalaki et al., 2013)



Σχήμα 1: Κλιματικές ζώνες στην Ελλάδα (Διαδραστικός Χάρτης, 2024)

Η ποσοστιαία κατανομή των κατοικιών ανά κλιματική ζώνη και αποτελεί μια οπτική αναπαράσταση της κατοικημένης πυκνότητας στις διάφορες κλιματικές περιοχές της χώρας και φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 2: Κατανομή κατοικήσιμων κτιρίων ανά κλιματική ζώνη

Η ενεργειακή κλάση ενός κτιρίου αντικατοπτρίζει την ενεργειακή του αποδοτικότητα με βάση την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, και καθορίζεται με έναν δείκτη σύγκρισης μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου που εξετάζεται και ενός κτιρίου αναφοράς. Αυτός ο δείκτης, γνωστός ως λόγος T (εξίσωση [1]), διαμορφώνεται από το πηλίκο της εκτιμώμενης κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας του εξεταζόμενου κτιρίου προς την κατανάλωση του κτιρίου αναφοράς.

$$T = \frac{EP}{R_r} [1]$$

όπου

EP : Εκτιμώμενη κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας εξεταζόμενου κτιρίου.

R_r : Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας κτιρίου αναφοράς.

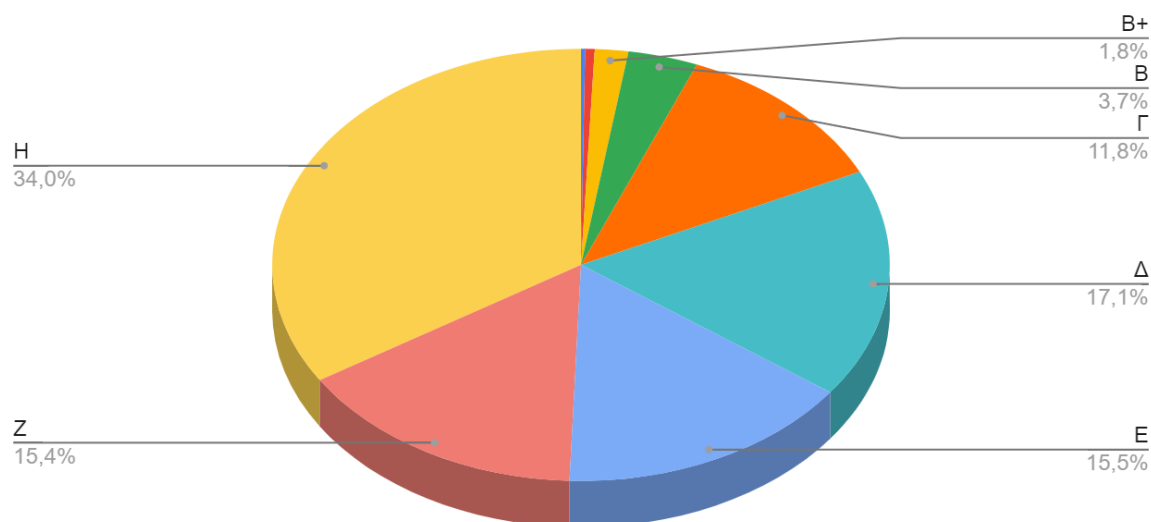
Ως κτίριο αναφοράς, ορίζετε το κτίριο που περιλαμβάνει, τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, θέση, προσανατολισμό, χαρακτηριστικά λειτουργίας και χρήση με το εξεταζόμενο κτίριο, ενώ περιλαμβάνει τυποποιημένα υλικά κατασκευής, όπως η μόνωση και τα παράθυρα, αποδοτικότερα συστήματα θέρμανσης, ψύξης, αερισμού και φωτισμού σύμφωνα με τον κανονισμό ενεργειακής απόδοσης κτιρίων. (ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ & ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ, 2017).

Οι ενεργειακές κατηγορίες κατά ΚΕΝΑΚ διακρίνονται σε οκτώ κλάσεις, από την A+ για τα πιο αποδοτικά κτίρια, με κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας μικρότερη από το 33% του κτιρίου αναφοράς, έως την H, για κτίρια με κατανάλωση πάνω από το 273% του κτιρίου αναφοράς. Η κλίμακα αυτή επιτρέπει τη λεπτομερή ταξινόμηση των κτιρίων ανάλογα με την ενεργειακή τους απόδοση και δίνει τη δυνατότητα στους φορείς εκμετάλλευσης και στους ενδιαφερόμενους να αναγνωρίζουν τα πιο ενεργειακά αποδοτικά κτίρια.

Κατηγορία	Όρια Κατηγορίας (RR)	Όρια Κατηγορίας (T)
A+	$ER < 0,33$	$T < 0,33$
A	$0,33R_r < ER < 0,50R_r$	$0,33 < T < 0,50$
B+	$0,50R_r < ER < 0,75R_r$	$0,50 < T < 0,75$
B	$0,75R_r < ER < 1,00R_r$	$0,75 < T < 1,00$
Γ	$1,00R_r < ER < 1,41R_r$	$1,00 < T < 1,41$
Δ	$1,41R_r < ER < 1,82R_r$	$1,41 < T < 1,82$
E	$1,82R_r < ER < 2,27R_r$	$1,82 < T < 2,27$
Z	$2,27R_r < ER < 2,73R_r$	$2,27 < T < 2,73$
H	$2,73R_r < ER$	$2,73 < T$

Πίνακας 1: Κατηγορίες ενεργειακής απόδοσης κτιρίων (ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ & ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ, 2017)

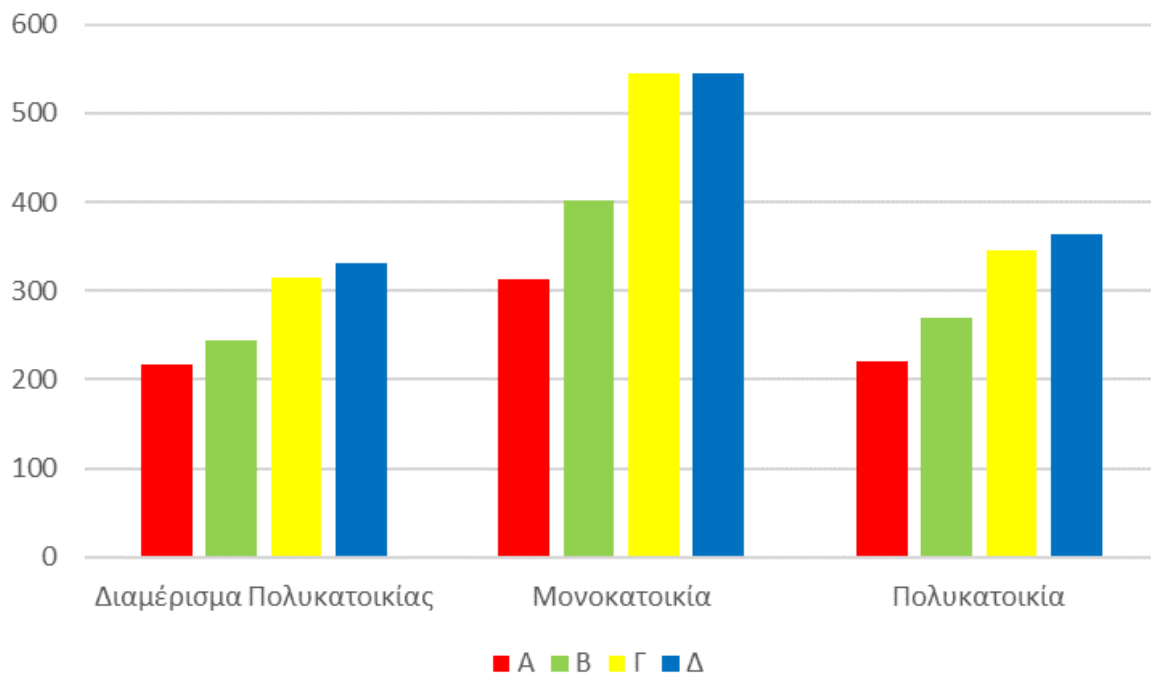
Στο πλαίσιο των προσπάθειών για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων στην Ελλάδα, ένα σημαντικό εμπόδιο αποτελεί η τρέχουσα κατάσταση του οικιακού τομέα. Σύμφωνα με την έκθεση του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, το 64,96% του οικιακού τομέα βρίσκεται στις ενεργειακές κλάσεις H έως E, με το ποσοστό των κτιρίων στην κλάση H να φτάνει το 50% για τις μονοκατοικίες και το 30% για τα διαμερίσματα πολυκατοικιών (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2022)



Σχήμα 3: Ποσοστό πλήθους Π.Ε.Α ανά ενεργειακή κλάση (ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2022)

Είναι επίσης ενδιαφέρον να εξεταστεί η μέση ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά τύπο κτιρίου και κλιματική ζώνη. Στα παρακάτω δεδομένα φαίνεται ότι υπάρχει σημαντική διαφορά στην κατανάλωση ενέργειας μεταξύ των διαμερισμάτων πολυκατοικιών, των μονοκατοικιών, και των πολυκατοικιών σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες. Συγκεκριμένα, η κατανάλωση ενέργειας για τις μονοκατοικίες είναι σημαντικά υψηλότερη σε όλες τις κλιματικές ζώνες σε σύγκριση με τα διαμερίσματα πολυκατοικιών και τις πολυκατοικίες. Ειδικότερα, στις ζώνες Γ και Δ, οι μονοκατοικίες παρουσιάζουν την υψηλότερη μέση κατανάλωση, φτάνοντας τα 545.21 kWh/m² και 589.97 kWh/m² αντίστοιχα, πράγμα που τις καθιστά τις πιο ενεργοβόρες στην κατηγορία τους. Αντίθετα, οι πολυκατοικίες, είτε σε μορφή διαμερισμάτων είτε ως ολόκληρα κτίρια, έχουν σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση σε όλες τις ζώνες, καθιστώντας τις πιο αποδοτικές από ενεργειακής σκοπιάς.

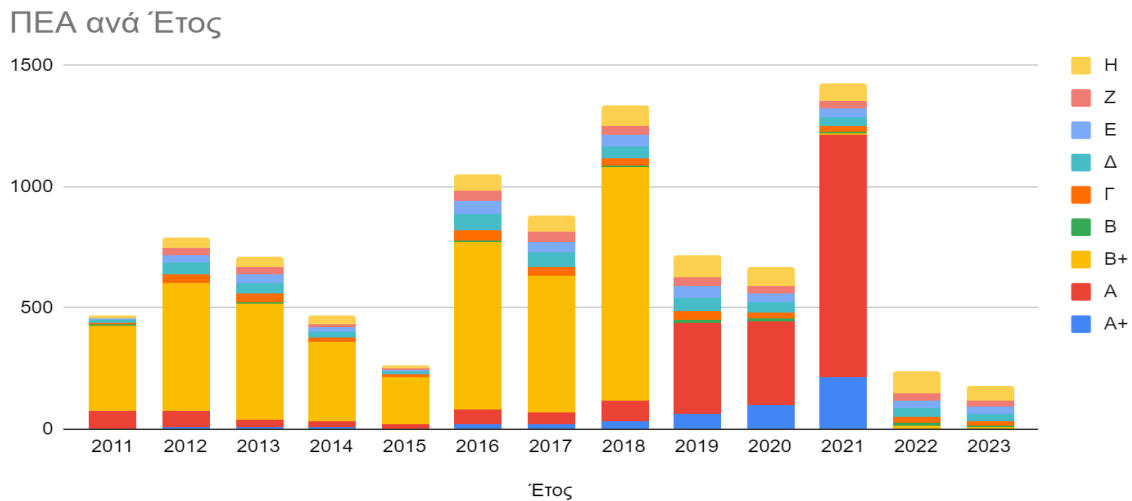
Η μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας στις μονοκατοικίες ενδεχομένως αντανακλά τις διαφορές στη θερμική μόνωση, τη χρήση του χώρου και τις γενικότερες ανάγκες θέρμανσης και ψύξης σε σχέση με τα διαμερίσματα πολυκατοικιών.



Σχήμα 4: Μέση ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας κτιρίων κατοικιών ανά κλιματική ζώνη και χρήση χρονικής περιόδου 2011-2021 σε kWh/m²/y (ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2022)

Μια δυναμική εικόνα της προόδου στην έκδοση των Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ) στην Ελλάδα από το έτος 2011 έως το 2023 φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Η εν λόγω ανάλυση αποκαλύπτει την εξέλιξη των ενεργειακών κατηγοριών των κτιρίων μέσα στον χρόνο και επιτρέπει την κατανόηση των τάσεων και των προκλήσεων που αντιμετωπίζει ο κτιριακός τομέας σε σχέση με την ενεργειακή απόδοση.

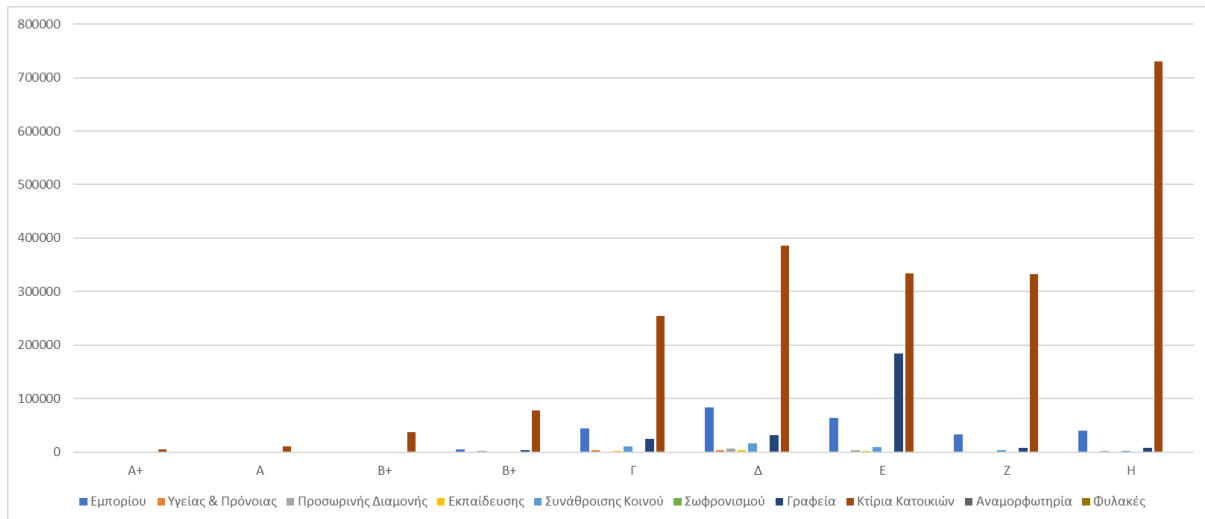
Είναι εμφανής η σταδιακή αύξηση των ΠΕΑ σε υψηλότερες ενεργειακές κατηγορίες, ειδικά από το 2016 και μετά, με τις κατηγορίες A+ και A να παρουσιάζουν μια σημαντική ανοδική τάση. Αντιθέτως, ο αριθμός των ΠΕΑ στις κατηγορίες E έως H - που αντιστοιχούν σε χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση - εμφανίζει μια πτωτική τάση εξαιτίας ανακαίνισης ή κατεδάφισης, αν και παραμένουν ακόμη οι πιο συχνές ενεργειακές κλάσεις



Σχήμα 5: Πιστοποιητικά ενεργειακής απόδοσης ανά έτος

Το επόμενο διάγραμμα παρουσιάζει την κατανομή των Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ) στην Ελλάδα, αποτυπώνοντας τις ενεργειακές κατηγορίες των κτιρίων από A+ έως H. Αυτή η ανάλυση είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς μας επιτρέπει να αξιολογήσουμε το τρέχον ενεργειακό προφίλ του κτιριακού στόλου στη χώρα και να εντοπίσουμε τις περιοχές όπου οι ενεργειακές αναβαθμίσεις είναι περισσότερο απαραίτητες.

Το διάγραμμα αποκαλύπτει μια σαφή προτίμηση στις χαμηλότερες ενεργειακές κατηγορίες, με έμφαση στις κατοικίες, κάτι που υποδηλώνει την ανάγκη για στοχευμένη παρέμβαση σε αυτόν τον τομέα. Η συνειδητοποίηση της κατανομής αυτής είναι κρίσιμη για την εξεύρεση αποτελεσματικών και βιώσιμων λύσεων που θα οδηγήσουν στην επίτευξη των εθνικών στόχων για ενεργειακή απόδοση και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στο μέλλον.



Σχήμα 6: Πλήθος πιστοποιητικών ενεργειακής απόδοσης ανά χρήση και ενεργειακή κατηγορία (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2022)

Για την επίτευξη των στόχων της βελτίωσης των κτιρίων που εμφανίζουν τις χειρότερες επιδόσεις της ενεργειακής απόδοσης, τα Ελάχιστα Ενεργειακά Πρότυπα Απόδοσης (MEPS) αποτελούν μια σημαντική πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αυτά τα κτίρια, που βρίσκονται συνήθως στις κατηγορίες Η ή Ζ του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης (EPC), αντιστοιχούν στο 15% των κτιρίων με τη χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση σε κάθε κράτος μέλος.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει συγκεκριμένες προθεσμίες για την ανακαίνιση αυτών των κτιρίων. Ειδικότερα, τα δημόσια κτίρια και τα κτίρια τριτογενούς τομέα πρέπει να ανακαινιστούν και να βελτιωθούν τουλάχιστον στο ενεργειακό επίπεδο Ζ έως το 2027 και στο επίπεδο Ε έως το 2030. Οι κατοικίες πρέπει να αναβαθμιστούν από Η σε τουλάχιστον Ζ μέχρι το 2030 και σε τουλάχιστον Ε μέχρι το 2033.

Τα κράτη μέλη θα πρέπει να καταρτίσουν ειδικά χρονοδιαγράμματα για την επίτευξη υψηλότερων ενεργειακών κλάσεων μέσω νέων Εθνικών Σχεδίων Ανακαίνισης Κτιρίων, συμμορφούμενα με τους εθνικούς δρόμους για την επίτευξη ενός απαλλαγμένου από εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κτιριακού αποθέματος έως το 2050. Παράλληλα, τους δίνεται η εξουσιοδότηση να θεσπίζουν εθνικά MEPS σύμφωνα με τα Εθνικά τους Σχέδια Ανακαίνισης Κτιρίων.

Η πρόταση για την αναθεώρηση της Οδηγίας EPBD στοχεύει στη σημαντική βελτίωση της διαφάνειας, της αξιοπιστίας και της ορατότητας των Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης (EPCs). Αυτό προβλέπεται να επιτευχθεί μέσω της διασαφήνισης της ορολογίας για τα πιστοποιητικά υψηλής ποιότητας, τον σκοπό τους και τη διαδικασία έκδοσής τους. Η πρόταση περιλαμβάνει την εισαγωγή ενός πρότυπου για τα EPCs με ένα ελάχιστο αριθμό κοινών δεικτών για την ενεργειακή κατανάλωση και τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, καθώς και την προσθήκη προαιρετικών δεικτών για τα σημεία φόρτισης, την ποιότητα του εσωτερικού αέρα

και τον Δυναμικό Παγκόσμιας Θέρμανσης βάσει των εκπομπών άνθρακα κατά τον κύκλο ζωής του κτιρίου.

Η ενεργειακή κλάση A αντιστοιχεί σε κτίρια μηδενικών εκπομπών, ενώ η ενεργειακή κλάση H αντιστοιχεί στα 15% των κτιρίων με τη χειρότερη ενεργειακή απόδοση σε κάθε χώρα. Η νέα συστηματοποίηση των βαθμολογιών επιτρέπει μια πιο σαφή και απλοποιημένη κατάταξη των κτιρίων, παρέχοντας παράλληλα την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα στα εθνικά χαρακτηριστικά του κτιριακού αποθέματος. Αυτό ενισχύει τη διασυννοριακή κατανόηση των EPCs και διευκολύνει τη χρήση τους από τις δημόσιες αρχές και τις χρηματοοικονομικές θεσμικές ενότητες. (European Commission, 2024)

Η υφιστάμενη κατανομή των ενεργειακών κλάσεων στην Ελλάδα, σύμφωνα με τον ΚΕΝΑΚ, εντοπίζει σχεδόν το 35% του κτιριακού στόλου στην κατηγορία H, η οποία αντιπροσωπεύει τα κτίρια με τη χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση. Αυτή η στατιστική κατάσταση δημιουργεί ένα σοβαρό εμπόδιο στην προσπάθεια αναβάθμισης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων στη χώρα και επισημαίνει την ανάγκη για μια ουσιαστική αναδιαμόρφωση των ενεργειακών κλάσεων.

2.2 Ο κτιριακός τομέας στην Ελλάδα

2.2.1 Απογραφή κατοικιών και ενεργειακές κλάσεις

Αρχικά, παρουσιάζεται ο Πίνακας 2 από την ΕΛΣΤΑΤ, ο οποίος δίνει μια σαφή εικόνα της κατανομής των κτιρίων ανάλογα με την περίοδο κατασκευής τους: πριν το 1980, μεταξύ 1980 και 2000, και μετά το 2000.

Στον πίνακα, οι κατοικίες κατατάσσονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: μονοκατοικίες, διαμερίσματα και μη κατοικήσιμες μονάδες. Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη ποσοστιαία αναλογία των μονοκατοικιών και των διαμερισμάτων κατασκευάστηκε πριν το 1980 στα οποία συχνά παρατηρείται έλλειψη μόνωσης, ενώ η μικρότερη αναλογία ανήκει στις μη κατοικήσιμες μονάδες. Η ανάλυση αυτή επισημαίνει τη σημασία της ανακαίνισης και της ενεργειακής αναβάθμισης του παλαιού κτιριακού στόλου, καθώς και την ανάγκη για ανάπτυξη στρατηγικών που θα εστιάζουν στα παλαιότερα κτίρια για την επίτευξη των εθνικών και ευρωπαϊκών στόχων σχετικά με την ενεργειακή απόδοση

Είδος κατοικίας	Περίοδος κατασκευής						Σύνολο	
	<1980		1980-2000		>2000			
	Αριθμός	%	Αριθμός	%	Αριθμός	%	Αριθμός	%
Μονοκατοικίες	1,338,936	56,96%	531985	45,56%	240393	39,83%	2111314	51,22%
Διαμερίσματα	1,006,739	42,83%	632267	54,14%	361539	59,90%	20005444	48,53%
Μη Κατοικήσιμες	5056	0,22%	3526	0,30%	1647	0,27%	10230	0,25%
Σύνολο	2350731		1167778		603579		4122088	

Πίνακας 2: Κατανομή κτιρίων ανά περίοδο κατασκευής (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2011)

Ο παρακάτω πίνακας 2 προσφέρει μια συνολική εικόνα της κατανομής των κτιρίων οικιακού τομέα στην Ελλάδα με βάση την περίοδο κατασκευής τους και τον τύπο χρήσης. Αναλύεται η διαχωριστική κατηγοριοποίηση των κτιρίων σε τρεις βασικές χρονικές περιόδους: πριν το 1980, μεταξύ 1980 και 2000, και από το 2000 και μετά. Επισημαίνεται ο αριθμός και το ποσοστό των κτιρίων σε κάθε κατηγορία και χρονική περίοδο, καθώς και η συνολική κατανομή αυτών.

Πέραν των κατοικιών, παρατηρείται ένα σημαντικό ποσοστό κτιρίων που ανήκουν στον τριτογενή τομέα, όπως εκκλησίες, μοναστήρια, ξενοδοχεία, εργοστάσια, εργαστήρια, σχολικά κτίρια, καταστήματα, γραφεία, σταθμούς αυτοκινήτων, νοσοκομεία, κλινικές και κτίρια με άλλες

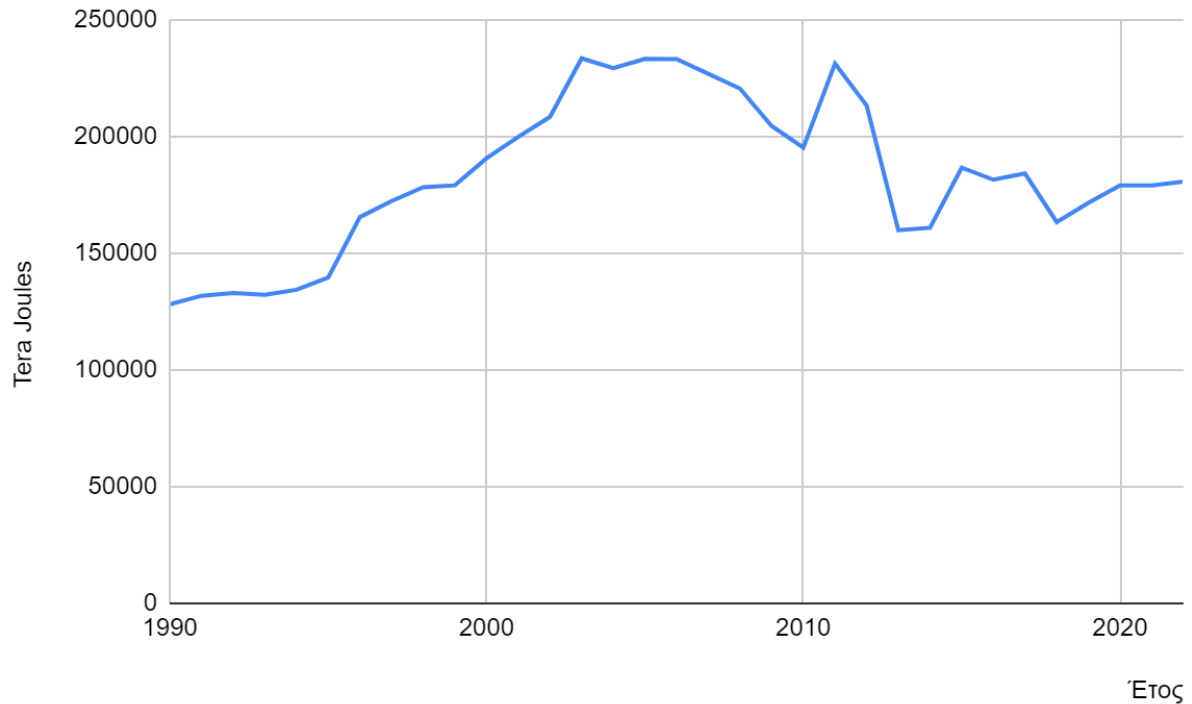
χρήσεις. Ειδικότερα, η ανάλυση των κτιρίων του τριτογενούς τομέα αναδεικνύει τη σημασία της ενεργειακής απόδοσης και της βιωσιμότητας σε ένα ευρύ φάσμα της κοινωνικής και οικονομικής δραστηριότητας.

Η συνολική εικόνα που παρουσιάζεται μέσω αυτού του πίνακα τονίζει την ανάγκη για μια ολοκληρωμένη και ευέλικτη προσέγγιση στην ενεργειακή αναβάθμιση και ανακαίνιση του κτιριακού στόλου της Ελλάδας, όπου το 58.35% των κατοικιών οικοδομήθηκαν πριν από σαράντα χρόνια το λιγότερο και περισσότερο από τα δύο τρίτα αυτών κατοικούνται ακόμα (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2011). Η ποικιλομορφία των τύπων και της ηλικίας των κτιρίων καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη στοχευμένων στρατηγικών και πολιτικών, με στόχο την επίτευξη των εθνικών και ευρωπαϊκών στόχων για την ενεργειακή απόδοση και τη βιώσιμη ανάπτυξη.

Περιγραφή διοικητικής διαίρεσης / Περίοδος κατασκευής	ΣΥΝΟΛΟ ΧΩΡΑΣ	προ του 1980	1980 - 2000	2000 και μετά
Σύνολο κτιρίων	4.105.637	2.395.772	1.233.358	476.507
Κατοικίες	3.246.008	1.857.629	993.110	395.269
	79,06%	77,54%	80,52%	82,95%
Τριτογενής Τομέας	859.629	538.143	240.248	81.238
	20,94%	22,46%	19,48%	17,05%
Εκκλησία - Μοναστήρι	48.387	38.045	7.248	3.094
Ξενοδοχείο	43.516	10.386	23.157	9.973
Εργοστάσιο - Εργαστήριο	33.762	14.441	14.020	5.301
Σχολικό κτίριο	21.853	12.432	6.741	2.680
Κατάστημα - Γραφείο	206.254	108.620	70.647	26.987
Σταθμός αυτοκινήτων (πάρκινγκ)	17.467	5.236	8.838	3.393
Νοσοκομείο, κλινική κλπ.	1.973	1.035	616	322
Άλλη χρήση	486.417	347.948	108.981	29.488

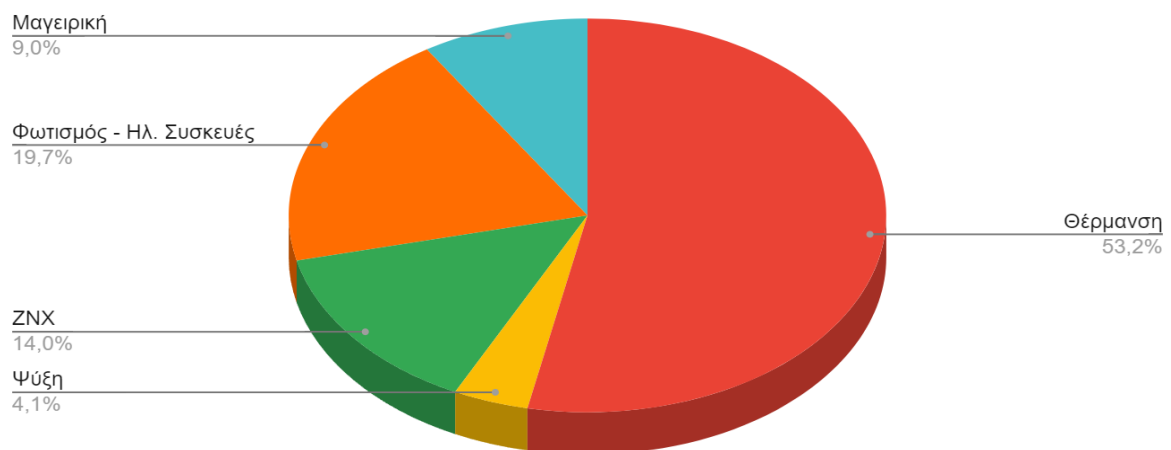
Πίνακας 3: Κατανομή κτιρίων ανά χρήση (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2011)

Η τελική κατανάλωση ενέργειας των νοικοκυριών στην Ελλάδα για το χρονικό διάστημα από το 1990 - 2022 απεικονίζεται από το παρακάτω γράφημα σε terajoules. Παρατηρούνται σημαντικές αυξομειώσεις αντανακλώντας πιθανώς τις επιπτώσεις της οικονομικής κρίσης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει πως στα τελευταία χρόνια η κατανάλωση της ενέργειας φαίνεται σταδιακά να μειώνεται, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στην χρήση πιο αποδοτικών ηλεκτρικών συσκευών, την αυξημένη ευαισθητοποίηση για την ενεργειακή αποδοτικότητα και την υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών στον τομέα της κατανάλωσης ενέργειας από τα νοικοκυριά.



Σχήμα 7: Τελική κατανάλωση ενέργειας οικιακού τομέα (TJ) 1990-2022 (Statistics | Eurostat | Disaggregated Final Energy Consumption in Households - Quantities, 2024)

Το σημαντικότερο ποσοστό της κατανάλωσης αυτής χρησιμοποιείται για λόγους θέρμανσης (53,2%) ή 93.162,10 terajoules, δείχνοντας τη σημασία της θέρμανσης στο συνολικό ενεργειακό προφίλ των νοικοκυριών. Αυτό υποδηλώνει ότι η θέρμανση είναι ένας κρίσιμος τομέας για την εφαρμογή μέτρων ενεργειακής απόδοσης βιωσιμότητας και ενεργειακής φτώχειας.

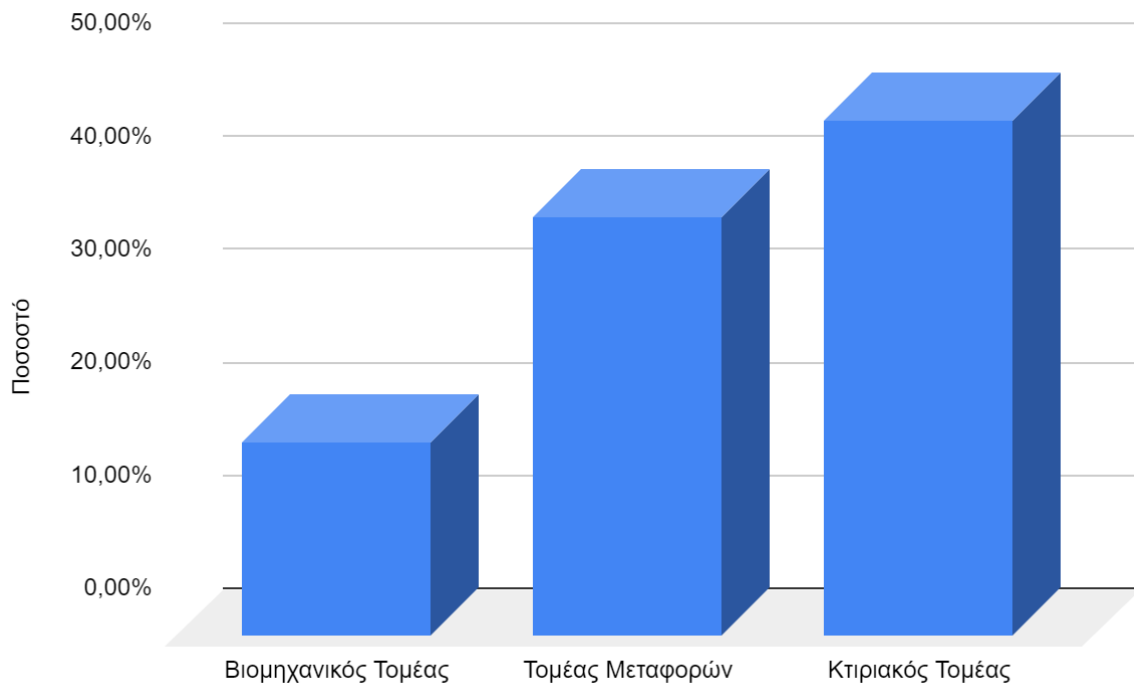


Σχήμα 8: Κατανομή τελικής κατανάλωσης ενέργειας οικιακού τομέα (Statistics | Eurostat | Disaggregated Final Energy Consumption in Households - Quantities, 2024)

Η σημαντικότητα της παρέμβασης στον οικιακό τομέα ανακλάται στις ποσοστιαίες αναλογίες της κατανάλωσης ενέργειας από τον βιομηχανικό τομέα, τον τομέα μεταφορών και τον κτιριακό τομέα, όπου παρέχουν ένα σαφές πλαίσιο για την κατεύθυνση των πολιτικών και των επενδύσεων.

Ο βιομηχανικός τομέας, όπως φαίνεται στο σχήμα 10, αντιπροσωπεύει το 17,20% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας, ενώ ο τομέας των μεταφορών καταλαμβάνει ένα σημαντικό ποσοστό 37,09%, αντανakλώντας την υψηλή εξάρτηση από τα οχήματα που καταναλώνουν πετρέλαιο και την ανάγκη για μετάβαση σε πιο βιώσιμα μέσα μεταφοράς. Ωστόσο, ο κτιριακός τομέας είναι εκείνος που καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μερίδιο, με 45,71% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας (*Statistics | Eurostat | Complete Energy Balances, 2024*). Αυτό τονίζει την κρισιμότητα της αναβάθμισης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων και την ανάγκη για εφαρμογή πιο αποδοτικών τεχνολογιών και υλικών κατασκευής.

Καθώς ο κτιριακός τομέας αποτελεί τον κύριο καταναλωτή ενέργειας υποδεικνύει την ανάγκη για δραστικές πολιτικές και μέτρα που θα επιτρέψουν στην Ελλάδα να επιτύχει τους ενεργειακούς και κλιματικούς της στόχους. Αυτό περιλαμβάνει την υιοθέτηση των ελάχιστων προτύπων ενεργειακής απόδοσης (MEPS), την ενθάρρυνση των ανακαινίσεων για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των υφιστάμενων κτιρίων και την προώθηση νέων κτιριακών προδιαγραφών που εστιάζουν στη βιωσιμότητα και την ενεργειακή αυτάρκεια.



Σχήμα 9: Πρωτογενής κατανάλωση ενέργεια βιομηχανικού, κτιριακού και τομέα μεταφορών (*Statistics | Eurostat | Complete Energy Balances, 2024*)

2.2.2 Αναδιανομή ενεργειακών κλάσεων

Η πρόκληση αναβάθμισης του κτιριακού στόλου στην Ευρώπη με σκοπό την μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα καθώς και της ενεργειακής κατανάλωσης εντείνεται με την ευρωπαϊκή προοπτική για την αναθεώρηση των Ενεργειακών Πρότυπων Απόδοσης (MEPS), όπου σύμφωνα με την οδηγία 2024/1275 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και Συμβουλίου τα όρια που θέτονται για την αναδιαμόρφωση των ενεργειακών κλάσεων δεν είναι σαφή όσον αφορά την κλάση Η. Σύμφωνα με προηγούμενη οδηγία της Ε.Ε προβλεπόταν ότι η τελευταία κλάση θα πρέπει να περιλαμβάνει μόνο το 15% των κτιρίων με την υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2021b).

Αυτό τονίζει την ανάγκη για επαναπροσδιορισμό των κριτηρίων κατηγοριοποίησης, ώστε να ανταποκρίνονται στις τρέχουσες ενεργειακές ανάγκες και να προωθούν μια πιο αποτελεσματική ανακαίνιση του κτιριακού αποθέματος, δεδομένου ότι σύμφωνα την απογραφή του 2011 και τα ΠΕΑ που έχουν εκδοθεί, ο αριθμός των κατοικιών στην κλάση Η εκτιμάται στα 1.7 εκατομμύρια

Στον σχεδιασμό αυτό, υπάρχουν δύο κυρίως κίνδυνοι. Καταρχάς, πολλά κτίρια με πολύ χαμηλή απόδοση, τα οποία συχνά φιλοξενούν ενεργειακά φτωχότερους πολίτες, μπορεί να μείνουν ανεκμετάλλευτα από τα σχέδια ανακαίνισης. Για παράδειγμα, βρέθηκε ότι τα κτίρια στην αναδιαμορφωμένη κλάση Η θα έχουν κατανάλωση τρεις φορές μεγαλύτερη από τα κτίρια κλάσης Β, ενώ προηγουμένως τα αντίστοιχα κτίρια είχαν λόγο κατανάλωσης 2.73, με αποτέλεσμα το ποσοστό των κτιρίων που βρίσκονται στην κλάση F να διπλασιάζεται.

Δεύτερον, καθώς εξελίσσεται η εφαρμογή του MEPS, εάν δεν υπάρχουν κατάλληλες διατάξεις υπάρχει κίνδυνος απροσδόκητα να υποχρεωθούν να συμμετέχουν και τα κτίρια της νέας κυρίαρχης κατηγορίας Z στο σχέδιο, αυξάνοντας δραστικά τον αριθμό των κτιρίων που επηρεάζονται. (Frilingou et al., 2024).

Η εικόνα που παρουσιάζεται σύμφωνα με τον Κ.Ε.Ν.Α.Κ είναι η παρακάτω:

Κλάσεις ΚΕΝΑΚ	Άνω όριο	Κάτω Όριο	Εύρος	Εκτιμώμενο ποσοστό κτιρίων
A+	0	0.33	0.33	0.19%
A	0.33	0.50	0.17	0.40%
B+	0.50	0.75	0.25	1.89%
B	0.75	1.00	0.25	4.06%
Γ	1.00	1.41	0.41	11.95%
Δ	1.41	1.82	0.41	17.75%
Ε	1.82	2.27	0.45	14.88%
Z	2.27	2.73	0.46	13.15%

Η	2.73	-	-	35.73%
---	------	---	---	--------

Πίνακας 4: Ποσοστά κτιρίων ανά ενεργειακή κλάση (ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ & ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ, 2017)

Γνωρίζοντας ότι η τελευταία κλάση πρέπει να περιλαμβάνει το 15% των χειρότερα αποδοτικών κτιρίων, γίνονται οι εξής παραδοχές.

- Θέτετε το εύρος της κλάσης Η σε 0,46, όσο δηλαδή και το εύρος της κλάσης Ζ, με αποτέλεσμα το κατώτατο όριο της να διαμορφώνετε σε 3.2.
- Οι ενεργειακές κλάσεις Α+, Α και Β+, Β «συγχωνεύονται» με τις νέες ενεργειακές κλάσεις Α και Β αντίστοιχα, καθώς σύμφωνα με τις τελευταίες οδηγίες της Ε.Ε, οι ενεργειακές κλάσεις θα πρέπει να διαμορφωθούν σε επτά, δηλαδή από Α έως Η. Η νέα κλάση Α, θα είναι ουσιαστικά η παλαιά Α+ έχοντας το εύρος και το ποσοστό των κτιρίων αυτής.
- Χρησιμοποιείται η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής ώστε να διανεμηθούν τα ποσοστά στις υπόλοιπες κλάσεις.

Για παράδειγμα, για να υπολογίσουμε το νέο άνω όριο της ενεργειακής κλάσης Η, με τον περιορισμό ότι το κάτω όριο της είναι το 3,19 και το ποσοστό των κτιρίων σε αυτή είναι 15%, έχουμε:

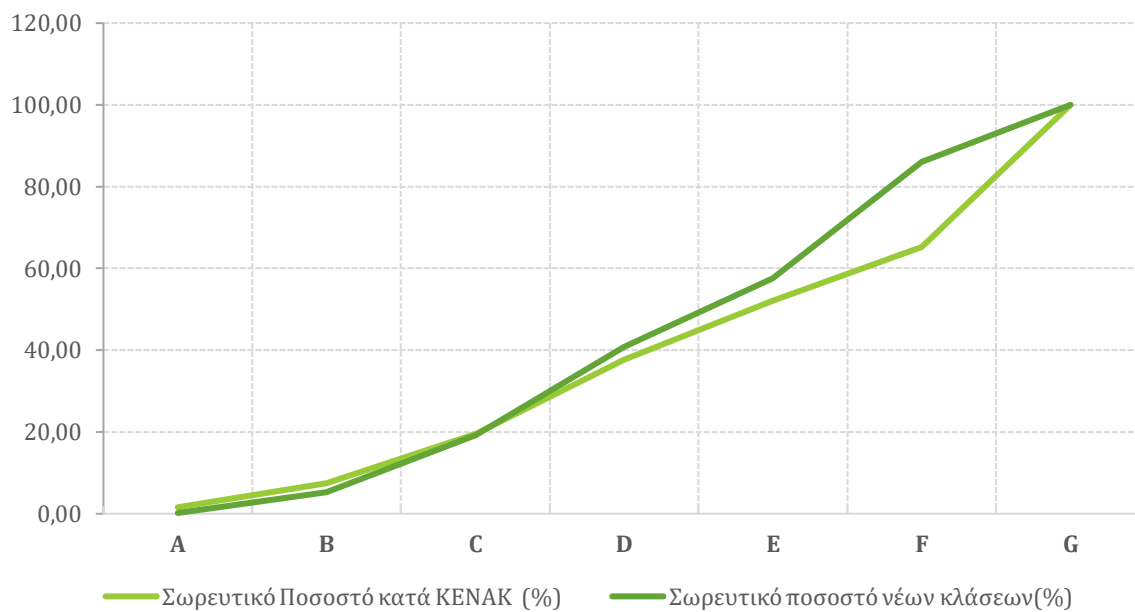
$$\frac{y - y_0}{x - x_0} = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}$$

Και υπολογίζεται το άνω όριο της κλάσης αυτής σε 3,00, με αποτέλεσμα το ποσοστό των κτιρίων όπου βρισκόταν ανάμεσα στο παλαιό όριο του 2,73 και στο καινούργιο όριο του 3,00 να μεταφέρεται στην επόμενη κλάση Ζ. Με όμοιο τρόπο υπολογίζονται όλα τα ποσοστά των κτιρίων των υπολοίπων κλάσεων, με την παραδοχή ότι τα εύρη των κλάσεων από Β έως Ζ είναι ίδια και υπολογίζονται σύμφωνα με το νέο ανώτερο όριο της ενεργειακής κλάσης Η και το κατώτερο όριο της ενεργειακής κλάσης Α ως εξής.

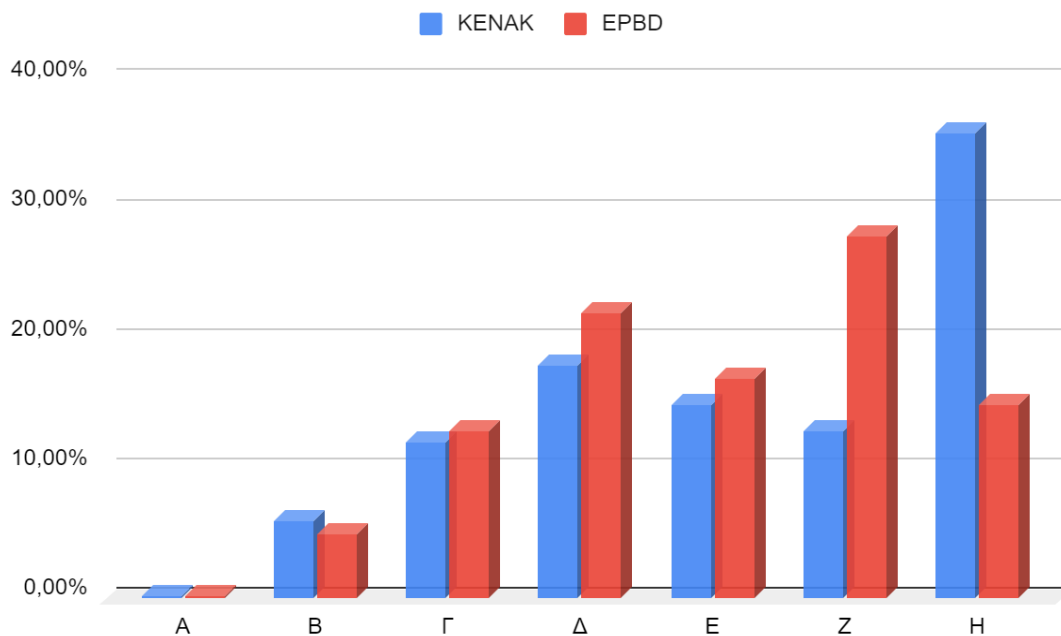
$$\frac{(3,00 - 0,33)}{5} = 0,533$$

Νέες Κλάσεις	Άνω όριο	Κάτω Όριο	Εύρος	Εκτιμώμενο ποσοστό κτιρίων	Αριθμός Κτιρίων
Α	0.00	0.33	0.33	0.19%	9,434
Β	0.33	0.86	0.533	5.08%	252,236
Γ	0.86	1.40	0.533	13.93%	691,662
Δ	1.40	1.93	0.533	21.68%	1,076,470
Ε	1.93	2.46	0.533	16.67%	827,710
Ζ	2.46	3.00	0.533	28.45%	1,412,618
Η	3.00	-	-	15.00%	744,790

Πίνακας 5: Ποσοστά κτιρίων ανά ενεργειακή κλάση μετά την αναδιανομή τους.



Σχήμα 10: Σωρευτικά ποσοστά ενεργειακών κλάσεων πριν και μετά την αναδιανομή τους.



Σχήμα 11: Ποσοστά κτιρίων ανά ενεργειακή κλάση πριν και μετά την αναδιανομή τους.

3 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

3.1 Εισαγωγή

Ο πολυκριτηριακός προγραμματισμός είναι ένας τομέας της βελτιστοποίησης που ασχολείται με τη λήψη αποφάσεων σε περιβάλλοντα όπου πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλαπλοί, συχνά αντικρουόμενοι στόχοι. Οι στόχοι αυτοί μπορεί να περιλαμβάνουν κόστος, απόδοση, ασφάλεια, και άλλα παρόμοια κριτήρια, τα οποία πρέπει να μεγιστοποιηθούν ή να ελαχιστοποιηθούν. Η βασική πρόκληση του πολυκριτηριακού προγραμματισμού είναι η εύρεση των βέλτιστων συμβιβαστικών λύσεων ανάμεσα σε αυτούς τους αντικρουόμενους στόχους (Cohon, 2004).

Στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, οι λύσεις που δε μπορούν να βελτιωθούν σε έναν στόχο χωρίς την επιδείνωση ενός άλλου ονομάζονται Παρέτο βέλτιστες ή Παρέτο αποδοτικές λύσεις. Αυτή η ιδέα είναι θεμελιώδης για την εύρεση αποδεκτών λύσεων σε πολυκριτηριακά προβλήματα, όπου οι αποφάσεις πρέπει να ισορροπούν μεταξύ διαφορετικών και συχνά ασυμβίβαστων απαιτήσεων (Steuer, 1986).

Το μέτωπο Παρέτο αποτελείται από όλες τις Παρέτο βέλτιστες λύσεις ενός πολυκριτηριακού προβλήματος. Αυτό το σύνολο αναπαριστά τη συννοριακή γραμμή ανάμεσα στις βέλτιστες και τις μη βέλτιστες λύσεις. Η ανάλυση του μετώπου Παρέτο βοηθά τους αναλυτές να κατανοήσουν τις σχετικές θυσίες μεταξύ των στόχων και να επιλέξουν τη λύση που ταιριάζει καλύτερα στις συγκεκριμένες προτεραιότητες και περιορισμούς τους (Ehrgott, 2006)

3.2 Η μέθοδος AUGMECON-Py

3.2.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος ε-περιορισμού (e-constraint method) είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για την επίλυση προβλημάτων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Προτάθηκε αρχικά από τους Haimes et al. (1971) και βασίζεται στη μετατροπή του προβλήματος πολλαπλών στόχων σε ένα σύνολο μονοκριτηριακών προβλημάτων, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα όρια (ϵ) για τους υπόλοιπους στόχους ως περιορισμούς. Κάθε φορά που εκτελείται μια βελτιστοποίηση, παράγεται ένα σημείο στο μέτωπο Παρέτο (Becerra & Coello, 2006). Η μέθοδος αυτή, όταν εφαρμόζεται σε μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης, παράγει ασθενώς βέλτιστες λύσεις Παρέτο, ενώ για να επιτευχθεί αληθινά βέλτιστη λύση Παρέτο, μπορεί να απαιτηθεί η εκτέλεση βελτιστοποιήσεων για όλους τους στόχους πριν από την αναφορά της τελικής λύσης (Haimes et al., 1971).

$$\begin{aligned} & \min f_l(x) \\ \text{st. } & f_j(x) \leq \epsilon_j, \forall j = 1, 2, \dots, m, j \neq l \end{aligned}$$

Σχήμα 12: ϵ - Περιορισμένη Μέθοδος

Η AUGMECON (Augmented ϵ -constraint method) αναπτύχθηκε ως μια εξελιγμένη εκδοχή της ϵ -περιορισμένης μεθόδου (ϵ -constraint method), η οποία σκοπό έχει να βελτιώσει την αποδοτικότητα της αρχικής μεθόδου και να μειώσει τις επαναλήψεις που δεν προσφέρουν νέες Παρετιανά βέλτιστες λύσεις (Mavrotas, 2009). Η AUGMECON επεκτείνει αυτή την ιδέα με την προσθήκη της λεξικογραφικής βελτιστοποίησης για τη δημιουργία του πίνακα αμοιβαίων ανταλλαγών (payoff table) και εξασφαλίζει την αποδοτικότητα των λύσεων προσθέτοντας μεταβλητές slack στους περιορισμούς των στόχων, οι οποίες βελτιστοποιούνται μαζί με τον κύριο στόχο. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται η παραγωγή ασθενών λύσεων, καθώς αυτές οι μεταβλητές ενισχύουν τους περιορισμούς (Mavrotas, 2009).

Στην πράξη, η εφαρμογή της μεθόδου AUGMECON γίνεται ως εξής:

- Επιλογή Στόχου και Ελάχιστα Επίπεδα: Οι στόχοι εκτός του βελτιστοποιούμενου τίθενται ως περιορισμοί με ελάχιστα επίπεδα.
- Διαμόρφωση του Μοντέλου: Το μοντέλο προσαρμόζεται για να παράγει λύσεις, προσθέτοντας στοιχεία όπως συναρτήσεις κόστους ή άλλους περιορισμούς.

$$\begin{aligned} & \max (f_1(x) + \epsilon \cdot (s_2 + s_3 + \dots + s_p)) \\ \text{st. } & f_2(x) - s_2 = e_2, \\ & f_3(x) - s_3 = e_3, \\ & \dots \\ & f_p(x) - s_p = e_p, \\ & x \in S, \quad s_i \in R^+ \end{aligned}$$

Σχήμα 13: Η Μέθοδος Augmecon (Mavrotas, 2009)

Η μέθοδος AUGMECON έχει βρει ευρεία εφαρμογή σε διάφορους τομείς, αποδεικνύοντας την αποδοτικότητά της στην επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων. Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση λειτουργίας εικονικών εργοστασίων ενέργειας, ενσωματώνοντας παραμέτρους όπως η μεγιστοποίηση κερδών και η ελαχιστοποίηση ενεργειακών απωλειών (Yan et al., 2024). Επιπλέον, η μέθοδος AUGMECON-R, μια βελτιωμένη εκδοχή της αρχικής μεθόδου, έχει εφαρμοστεί σε προγράμματα ανάκαμψης μετά την πανδημία COVID-19, όπου χρησιμοποιήθηκε για την ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της απασχόλησης και τη μείωση των εκπομπών CO₂, προσφέροντας καινοτόμες λύσεις σε θέματα περιβαλλοντικής πολιτικής (Ven et al., 2022). Η μέθοδος έχει επίσης αξιοποιηθεί σε πιο σύνθετα προβλήματα, όπως το πρόβλημα διαμόρφωσης κυττάρων, όπου η υβριδική μέθοδος GA-AUGMECON συνδυάστηκε με γενετικούς αλγορίθμους για την επίτευξη υψηλής ποιότητας Pareto βέλτιστων λύσεων με μειωμένο χρόνο υπολογισμού (Bootaki et al., 2014). Παράλληλα, σε περιπτώσεις σχεδιασμού τοποθεσίας εγκαταστάσεων με προηγμένες δυνατότητες συνδεσιμότητας δικτύων, η μέθοδος AUGMECON-

R (Nikas et al., 2022) αποδείχθηκε αποτελεσματική για την ακριβή διερεύνηση συνόλων Pareto σε πολύπλοκα προβλήματα (Fugaro & Sgalambro, 2023). Σε άλλη πρόσφατη μελέτη, η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση πολλαπλών επιπέδων αβεβαιότητας και την επίτευξη Pareto βέλτιστων λύσεων για την επίτευξη πολλαπλών Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs), όπως η μείωση της θνησιμότητας λόγω ατμοσφαιρικής ρύπανσης, η πρόσβαση σε καθαρή ενέργεια και η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Αυτή η προσέγγιση συνέβαλε στη δημιουργία χαρτοφυλακίων που ήταν ανθεκτικά σε διαφορετικές κοινωνικοοικονομικές διαδρομές, αποδεικνύοντας την ευελιξία της μεθόδου AUGMECON στη βελτιστοποίηση ενεργειακών και περιβαλλοντικών πολιτικών (Forouli et al., 2020).

Αυτές οι εφαρμογές δείχνουν τη δυναμική της μεθόδου AUGMECON στην αντιμετώπιση πολυκριτηριακών προκλήσεων, γεγονός που την καθιστά εξαιρετικά χρήσιμη για τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση ενεργειακών και άλλων συστημάτων.

3.2.2 Τροποποιήσεις και βελτιώσεις της μεθόδου

Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από βελτιώσεις στην αρχική μέθοδο, κυρίως στην διαχείριση της αβεβαιότητας και την προσαρμογή των περιορισμών για την παραγωγή ακριβέστερων λύσεων σε περιπτώσεις που οι δεδομένες παράμετροι έχουν υψηλή μεταβλητότητα (Mavrotas & Florios, 2013). Έπειτα, έγινε ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στην ανάλυση των πολυστοχευτικών συστημάτων, όπου οι αποφάσεις πρέπει να αντέχουν σε συνθήκες μεταβαλλόμενης αβεβαιότητας, καθώς και αναπτύχθηκαν προσεγγίσεις που επιτρέπουν την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των λύσεων, κάτι που είναι ζωτικό για τη βιωσιμότητα των λύσεων σε πολύπλοκότερα και αβέβαια περιβάλλοντα (Nikas et al., 2022).

Η εισαγωγή της AUGMECON-Py αποτελεί την τελευταία εξέλιξη στη σειρά των βελτιώσεων της AUGMECON (Forouli et al., 2022). Η AUGMECON-Py είναι μια Python εφαρμογή της AUGMECON, η οποία επιτρέπει την αποδοτικότερη ενσωμάτωση και χρήση της μεθόδου σε μια ευρύτερη γκάμα ερευνητικών και εμπορικών εφαρμογών, η οποία ενσωματώνει τη μέθοδο Monte Carlo για την ανάλυση αβεβαιότητας, επιτρέποντας την επίλυση μεγάλης κλίμακας προβλημάτων με αυξημένη ανθεκτικότητα σε στοχαστικές αβεβαιότητες (Forouli et al., 2022).

Η AUGMECON, μέσω των επεκτάσεών της από τους προαναφερθέντες ερευνητές και τις ερευνητικές τους ομάδες, έχει διαμορφωθεί ως ένα πολύτιμο εργαλείο για την επίλυση σύνθετων πολυκριτηριακών προβλημάτων. Κάθε νέα έκδοση της AUGMECON έχει επεκτείνει τις δυνατότητες της αρχικής μεθόδου, βελτιώνοντας την ευκολία χρήσης και την αποδοτικότητα των λύσεων, προσφέροντας πιο αξιόπιστες και αποτελεσματικές διαδικασίες για ερευνητές και επαγγελματίες που ασχολούνται με πολύπλοκα συστήματα αποφάσεων. Η εισαγωγή των τεχνικών Monte Carlo και η εφαρμογή σε Python προσφέρουν μεγάλη ευελιξία και

προσβασιμότητα, καθιστώντας την AUGMECON μία από τις πιο δυναμικές μεθόδους στον τομέα της πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Η επίτευξη της αναβάθμισης του κτιριακού τομέα στην Ελλάδα, αντιπροσωπεύει ένα πολυδιάστατο πρόβλημα που απαιτεί τη συνεκτίμηση διαφόρων κριτηρίων και περιορισμών. Η προσέγγιση του πολυκριτηριακού προγραμματισμού είναι ιδανική για τη διαχείριση τέτοιων προκλήσεων, καθώς επιτρέπει την ταυτόχρονη εξέταση πολλαπλών στόχων και την αναζήτηση βέλτιστων λύσεων με βάση τις προτεραιότητες και τις στρατηγικές των εμπλεκόμενων φορέων.

3.2.3 Η χρήση της μεθόδου στην παρούσα διπλωματική

Στην παρούσα διπλωματική το πρόβλημα που επιλύεται είναι το εξής:

- **Ελαχιστοποίηση του κόστους:** Η συνολική οικονομική επιβάρυνση για την εκτέλεση των αναβαθμίσεων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη.
- **Περιορισμός στο ποσοστό των κτιρίων που αναβαθμίζονται:** Το 15% του οικιακού τομέα και το 100% του τριτογενούς τομέα της ενεργειακής κλάσης Η πρέπει να αναβαθμιστεί στις επιθυμητές ενεργειακές κλάσεις.
- **Μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας και εξοικονόμησης κόστους:** Η επίτευξη της μέγιστης δυνατής μείωσης στην κατανάλωση ενέργειας και στην εξοικονόμηση του κόστους μέσω των εφαρμοζόμενων αναβαθμίσεων.
- **Ανάλυση αβεβαιότητας και ευρωστίας:** Η επίλυση προβλημάτων πολυστοχικής βελτιστοποίησης περιλαμβάνει συχνά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έναντι διαταραχών στα δεδομένα εισόδου (στοχαστική αβεβαιότητα). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η μέθοδος Monte Carlo για τον εντοπισμό ισχυρών κτιριακών μιγμάτων μεταξύ των βέλτιστων χαρτοφυλακίων.

Για να απαντηθούν τα παραπάνω επιστρατεύεται η μέθοδος AUGMECON-Py. Χρησιμοποιώντας μια αντικειμενοστραφή γλώσσα προγραμματισμού, η μέθοδος AUGMECON-Py ξεπερνά τις περιορισμένες απαιτήσεις μνήμης των προκατόχων της και επεκτείνει περαιτέρω τον αλγόριθμο λύσης, εξασφαλίζοντας ότι καμία αποδοτική λύση δεν παραμένει εκτός του πλέγματος λύσεων. Η μέθοδος είναι ανοιχτά προσβάσιμη¹, προσφέροντας απροβλημάτιστη προ- και μετά-επεξεργασία δεδομένων, διαχείριση, και οπτικοποίηση αποτελεσμάτων (Forouli et al., 2022, p.1).

Μετά την εφαρμογή της μεθόδου AUGMECON-Py για την εξισορρόπηση των στόχων και περιορισμών, η ανάλυση ευαισθησίας με τη χρήση της τεχνικής Monte Carlo προσφέρει μια σημαντική διάσταση στη διαδικασία αξιολόγησης των λύσεων. Η Monte Carlo είναι μια

¹ <https://github.com/ElsevierSoftwareX/SOFTX-D-22-00131>

στοχαστική μέθοδος προσομοίωσης, η οποία επιτρέπει την εκτίμηση της επιρροής της αβεβαιότητας των εισόδων στα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης (π.χ., κόστος αναβάθμισης, εξοικονόμηση ενέργειας). Μέσα από τη διακύμανση των παραμέτρων, οι διαχειριστές έργων μπορούν να εκτιμήσουν τα πιθανά σενάρια και τις πιθανές αποκλίσεις από το επιθυμητό αποτέλεσμα (Burhenne, 2013; Sturiale et al., 2017).

Η ανάλυση αυτή έχει αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματική σε διάφορους τομείς. Για παράδειγμα, στον τομέα της προσομοίωσης ενεργειακής απόδοσης κτιρίων, η Monte Carlo χρησιμοποιήθηκε για να προβλέψει την ανθεκτικότητα των λύσεων και την ευαισθησία των συστημάτων HVAC (Burhenne, 2013). Στην περιβαλλοντική διαχείριση, η Monte Carlo εφαρμόστηκε για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων και την εκτίμηση αβεβαιοτήτων (Jones et al., 2009). Ενώ η μέθοδος αυτή έχει συμβάλει στην ενίσχυση των προβλέψεων για τις αποκλίσεις στις επενδύσεις και τα χρηματοοικονομικά αποτελέσματα (Helton, 1997).

Η δυνατότητα δημιουργίας πολλαπλών σεναρίων μέσω τυχαίας διακύμανσης των εισόδων με βάση προκαθορισμένων κατανομών πιθανότητας ενισχύει περαιτέρω τη λήψη αποφάσεων. Μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας, είναι δυνατόν να εντοπιστούν οι παράμετροι που έχουν τη μεγαλύτερη επιρροή στα αποτελέσματα, επιτρέποντας στους φορείς λήψης αποφάσεων να προσαρμόσουν στρατηγικές και να μειώσουν τις επιπτώσεις των αβεβαιοτήτων (Macdonald & Strachan, 2001). Επιπλέον, η ενσωμάτωση της Monte Carlo στην ανάλυση ευαισθησίας προσφέρει τη δυνατότητα για μια στρατηγική προσέγγιση στη λήψη αποφάσεων, καθιστώντας τις λύσεις πιο ανθεκτικές σε μελλοντικές μεταβολές. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιβάλλοντα υψηλής αβεβαιότητας, όπως η αναβάθμιση του κτιριακού τομέα, όπου απαιτείται συνδυασμός κόστους-απόδοσης και ανθεκτικότητας στις συνθήκες της αγοράς (Mara & Tarantola, 2008).

Συμπερασματικά, η χρήση της μεθόδου Monte Carlo σε συνδυασμό με τη μέθοδο AUGMECON-Py ενισχύει σημαντικά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων σε πολύπλοκα προβλήματα, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει τη στρατηγική προσέγγιση των έργων που διαχειρίζονται αβεβαιότητες (Helton et al., 2006; Sturiale et al., 2017).

4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4.1 Διάρθρωση του προβλήματος

Στο πλαίσιο της ενεργειακής αναβάθμισης του οικιακού τομέα στην Ελλάδα, το πρόβλημα που εξετάζεται είναι η μετάβαση ενός σημαντικού αριθμού κατοικιών από την αναθεωρημένη ενεργειακή κλάση Η σε μια ανώτερη κλάση με τη χρήση της μεθόδου AUGMECON-Py. Η ανάλυση αυτή απαιτεί την επιλογή και την αξιολόγηση συγκεκριμένων μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας και την εφαρμογή τους σε διάφορα μίγματα κτιρίων που εκπροσωπούν μια σημαντική ποσοστιαία κάλυψη του οικιακού τομέα.

Η μεθοδολογία ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Επιλογή μιγμάτων κτιρίων.
2. Υπολογισμός εξοικονόμησης ενέργειας ανά μέτρο και κατηγορία κτιρίων κλάσης Η.
3. Υπολογισμός εξοικονόμησης κόστους ανά μέτρο και κατηγορία κτιρίων κλάσης Η.
4. Υπολογισμός κόστους ανά μέτρο και κατηγορία κτιρίων κλάσης Η.
5. Επιλογή κατάλληλων μέτρων για την μετάβαση των κτιρίων κλάσης Η στις ενεργειακές κλάσεις Ε και Δ.
6. Δημιουργία υπολογιστικών φύλλων.

Για τις αναλύσεις, έχουν επιλεγεί επτά διαφορετικά μίγματα κτιρίων του οικιακού τομέα (BM1 έως BM7), κάθε ένα από τα οποία καλύπτει περίπου το 15% ή περισσότερο, του συνολικού αριθμού κατοικιών στην Ελλάδα, με όλες τις κατοικίες να ανήκουν στην ενεργειακή κλάση Η. Το συνολικό ποσοστό του οικιακού τομέα που αντιστοιχεί στο 15% εκπροσωπείται από περίπου 618.313 κατοικίες.

Κωδ.	Τίτλος	Αριθμός Κτιρίων
BM1	Διαμερίσματα πολυκατοικιών	618040
BM2	Ιδιόκτητες Μονοκατοικίες > 50m ²	599625
BM3	Ενοικιαζόμενες Μονοκατοικίες και Ιδιόκτητα διαμερίσματα πολυκατοικιών	699961
BM4	Μονοκατοικίες και Διαμερίσματα πολυκατοικιών > 90m ² έως 2000	637114
BM5	Μονοκατοικίες και Διαμερίσματα πολυκατοικιών ζώνης Γ + Β>100 m ²	770501
BM6	Μονοκατοικίες και Διαμερίσματα πολυκατοικιών προ 1980 > 100m ² / 1980-2000	643640
BM7	Μονοκατοικίες και Διαμερίσματα πολυκατοικιών > 80m ² προ	753326

1980

Πίνακας 6: Μίγματα κτιρίων οικιακού τομέα (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2011; ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2022)

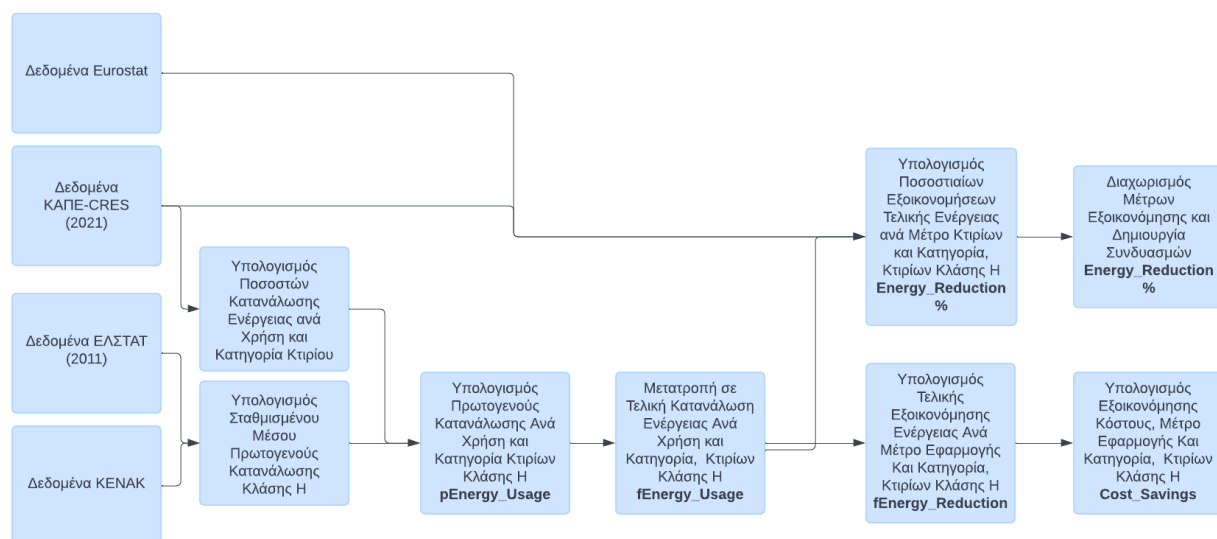
Έχουν επιλεγεί επίσης έξι μίγματα κτιρίων του τριτογενούς τομέα, τα οποία περιλαμβάνουν όλα τα κτίρια της ενεργειακής κλάσης H, ανάλογα με τη χρήση τους. Στην παρούσα διπλωματική θα μελετηθεί η εξ' ολοκλήρου αναβάθμιση των κτιρίων τριτογενούς τομέα της τελευταίας ενεργειακής κλάσης.

Κωδ.	Τίτλος	Αριθμός Κτιρίων
BMT_1	Εμπορικά Κτίρια	74920
BMT_2	Νοσοκομεία	80
BMT_3	Κτίρια Προσωρινής Διαμονής	3180
BMT_4	Γραφεία	4147
BMT_5	Χώροι Συναντήσεων	6416
BMT_6	Εκπαιδευτικές Εγκαταστάσεις	2326

Πίνακας 7: Μίγματα κτιρίων οικιακού τομέα (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2011; ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2022)

4.2 Υπολογισμός μείωσης τελικής ενεργειακής κατανάλωσης και εξοικονόμησης κόστους διαφορετικών μέτρων εφαρμογής σε κτίρια κλάσης H.

Για τον υπολογισμό εξοικονόμησης της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης ανά κατηγορία κτιρίων κλάσης H και διαφορετικών μέτρων εφαρμογής ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (CRES), 2021) για την τελική κατανάλωση ενέργειας ανά κατηγορία κτιρίων π.χ. εμπορικά, νοσοκομεία, μονοκατοικίες κλπ. καθώς και διαφορετικές χρήσεις ενέργειας, όπως θέρμανση, μαγειρική, φωτισμός κλπ. Έπειτα, βάσει των δεδομένων του ΚΕΝΑΚ καθώς και της απογραφής της ΕΛΣΤΑΤ, υπολογίστηκε η ελάχιστη πρωτογενής ενεργειακή κατανάλωση εισόδου στην ενεργειακή κλάση H για κτίρια οικιακού και τριτογενούς τομέα, ανάλογα με τις διαφορετικές κλιματικές ζώνες της Ελλάδας.



Σχήμα 14: Μεθοδολογία υπολογισμού εξοικονομήσης τελικής ενεργειακής κατανάλωσης και εξοικονομήσης κόστους ανά κατηγορία κτιρίων κλάσης Η και διαφορετικών μέτρων εφαρμογής

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις ελάχιστες καταναλώσεις σε kWh/m²γ ανά κλιματική ζώνη:

Κατηγορία Κτιρίου	Ζώνη Α	Ζώνη Β	Ζώνη Γ	Ζώνη Δ	Σταθμισμένος Μέσος
Εμπορικά Κτίρια	593	606	595	565	600
Νοσοκομεία	683	795	740	647	761
Προσωρινή Διαμονή	601	639	653	882	623
Γραφεία	492	543	527	497	530
Χώροι Συναντήσεων	1125	1172	1098	1163	1141
Εκπαιδευτικές Εγκαταστάσεις	249	311	391	191	294
Μονοκατοικίες	221	262	344	451	289
Διαμέρισμα Πολυκατοικίας	235	257	350	330	280
Μονοκατοικίες - Ζώνες Β/Γ		262	344		299
Διαμέρισμα Πολυκατοικίας - Ζώνες Β/Γ		257	350		284

Πίνακας 8: Η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας σε kWh/m²/έτος εισόδου στην ενεργειακή κλάση Η είναι 2.73 * Ref (ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2022)

Στη συνέχεια, πολλαπλασιάζοντας τον σταθμισμένο μέσο με τα αντίστοιχα ποσοστά ανά χρήση ενέργειας, υπολογίστηκε η πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας των κτιρίων της ενεργειακής κλάσης Η ανά κατηγορία και χρήση. Αυτή μετατράπηκε σε τελική κατανάλωση ενέργειας μέσω συντελεστών μετατροπής πρωτογενούς ενέργειας (Primary energy factor – PEF). Ο συντελεστής μετατροπής πρωτογενούς ενέργειας χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ποσότητας ενέργειας που είναι αναγκαία για την παραγωγή του ενεργειακού προϊόντος που απαιτείται για την κάλυψη της τελικής ενεργειακής ζήτησης. Για το πετρέλαιο, ο PEF στο ισούται με 1.01 ενώ για την ηλεκτρική ενέργεια στο ελληνικό ενεργειακό μίγμα ο PEF ισούται με 2.1.(ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2013). Χρησιμοποιώντας τις ποσοστιαίες εξοικονομήσεις ενέργειας των διαφορετικών μέτρων εφαρμογής τόσο στον οικιακό τομέα, όσο και στον

τριτογενή τομέα (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (CRES), 2021), υπολογίστηκε η ποσοστιαία εξοικονόμηση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας ανά χρήση κτιρίου και μέτρου εφαρμογής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Τα διάφορα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- **Εξαρτημένα Μέτρα:** Τα μέτρα όπου η εφαρμογή τους **δεν έχει** προσθετική επίδραση στα ποσοστά εξοικονόμησης όταν εφαρμόζονται συνδυαστικά.
- **Ανεξάρτητα Μέτρα:** Τα μέτρα όπου η εφαρμογή τους **έχει** προσθετική επίδραση στα ποσοστά εξοικονόμησης όταν εφαρμόζονται συνδυαστικά.

Εξαρτημένα Μέτρα

Μέτρο Εφαρμογής	Εμπορικά Κτίρια	Νοσοκομεία	Προσωρινή Διαμονή	Γραφεία	Χώροι Συναντήσεων	Εκπαιδευτικές Εγκαταστάσεις	Μονοκατοικίες - Ζώνες Β/Γ	Πολυκατοικίες - Ζώνες Β/Γ	Μονοκατοικίες	Πολυκατοικίες
Μόνωση	17%	19%	12%	16%	16%	26%	24%	24%	24%	24%
Μόνωση-Διπλά Τζάμια	23%	23%	14%	20%	20%	32%	30%	30%	30%	30%
Διπλά Τζάμια	7%	12%	6%	6%	6%	9%	13%	13%	13%	13%
Αντλίες Θερμότητας	48%	34%	22%	39%	43%	48%	44%	44%	44%	44%
Διπλά Τζάμια - Αντλίες Θερμότητας	44%	28%	19%	36%	39%	43%	37%	37%	37%	37%
Μόνωση - Αντλίες Θερμότητας	56%	43%	28%	46%	50%	60%	54%	54%	54%	54%
Μόνωση - Διπλά Τζάμια - Αντλίες Θερμότητας	58%	44%	29%	48%	52%	63%	57%	57%	57%	57%
Φυσικό Αέριο	10%	10%	5%	10%	9%	16%	15%	15%	15%	15%
Διπλά Τζάμια - Φυσικό Αέριο	16%	19%	11%	15%	15%	24%	26%	26%	26%	26%
Φυσικό Αέριο - Θερμοστάτες	12%	12%	6%	11%	11%	20%	18%	18%	18%	18%

BMS	19%	13%	9%	16%	17%	18%				
-----	-----	-----	----	-----	-----	-----	--	--	--	--

Πίνακας 9: Ποσοστιαίες εξοικονομήσεις ενέργειας εξαρτημένων μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας

Ανεξάρτητα Μέτρα

Μέτρο Εφαρμογής	Εμπορικά Κτίρια	Νοσοκομεία	Προσωρινή Διαμονή	Γραφεία	Χώροι Συναντήσεων	Εκπαιδευτικές Εγκαταστάσεις	Μονοκατοικίες - Ζώνες Β/Γ	Πολυκατοικίες - Ζώνες Β/Γ	Μονοκατοικίες	Πολυκατοικίες
Συσκευές Υψηλής Απόδοσης	6%	10 %	2%	13 %	7%	3%	5%	5%	5%	5%
Ηλιακοί Συλλέκτες για Παραγωγή ΖΝΧ	0%	8%	32%	0%	0%	0%	6%	6%	6%	6%
Αποδοτικοί Λαμπτήρες	4%	5%	6%	6%	4%	4%	1%	1%	1%	1%

Πίνακας 10: Ποσοστιαίες εξοικονομήσεις ενέργειας ανεξάρτητων μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας

Συνδυάζοντας τα εξαρτημένα με τα ανεξάρτητα μέτρα, δημιουργούνται 88 διαφορετικοί συνδυασμοί μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας με τα αντίστοιχα ποσοστά εξοικονόμησης της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης για τις 10 κατηγορίες κτιρίων που εξετάστηκαν.

Έχοντας υπολογίσει την τελική εξοικονόμηση ενέργειας, υπολογίζεται η εξοικονόμηση κόστους σε ευρώ ανά $\text{m}^2/\text{έτος}$ ($\text{euro}/\text{m}^2/\text{y}$) ανά μέτρο εφαρμογής και κατηγορία κτιρίων. Οι τιμές ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς είναι:

- **Τιμή ενέργειας - Ηλεκτρικό ρεύμα:** 0,21 ευρώ/kWh (*Statistics | Eurostat | Electricity Prices by Type of User, 2024*)
- **Τιμή ενέργειας - Φυσικό αέριο:** 0,09 ευρώ/kWh (*Statistics | Eurostat | Gas Prices by Type of User, 2024*)

Με αυτές τις τιμές και τις εξοικονομήσεις τελικής ενέργειας σε $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{έτος}$, υπολογίστηκε η εξοικονόμηση κόστους για κάθε μέτρο εξοικονόμησης ενέργειας και για κάθε κατηγορία κτιρίου. Το οποίο στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί για τα διάφορα μίγματα κτιρίων που θα επιλεγθούν.

4.3 Υπολογισμός κόστους εφαρμογής μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια ενεργειακής κλάσης H

Για τον υπολογισμό του κόστους εφαρμογής των διαφόρων μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας, για κάθε μίγμα κτιρίων, όπως θα φανεί και στο επόμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιήθηκε η εξής γενική μεθοδολογία:

1. Δεδομένα από Tabula

- Τα μέσα τετραγωνικά μέτρα του κάθε κτιρίου υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας δεδομένα από το Tabula Project (*TABULA WebTool*, 2013). Αυτά τα δεδομένα περιλαμβάνουν:
 - Τα τετραγωνικά μέτρα θερμαινόμενης επιφάνειας ανά κτίριο (Heated_Area).
 - Τα τετραγωνικά μέτρα μόνωσης (Insulation_Area).
 - Τα τετραγωνικά μέτρα των παραθύρων (Windows_Area).

2. Κατηγορίες Κόστους Τα κόστη χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- Το κόστος της μόνωσης ανά τετραγωνικό μέτρο μόνωσης ως Insulation_Cost, του συστήματος διαχείρισης κτιρίων (BMS) και των θερμοστατών ανά τετραγωνικό μέτρο θερμαινόμενης επιφάνειας ως BMS_Cost και Therm_Cost αντίστοιχα
- Το κόστος διπλών τζαμιών ανά τετραγωνικό μέτρο (Dglazing_Cost).
- Τα κόστη ανά μονάδα ή ανά kWh ως Unitary_Cost, τα οποία περιλαμβάνουν:
 - Αποδοτικούς λαμπτήρες ως Bulb_Cost ανά μονάδα.
 - Ηλεκτρικές συσκευές υψηλής απόδοσης (Appliance_Cost ανά μονάδα).
 - Ηλιακούς συλλέκτες για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης ως SolarPanels_Cost ανά μονάδα.
 - Εγκαταστάσεις φυσικού αερίου ως NatGas_Cost ανά kWh εγκατεστημένης ισχύος.
 - Εγκατάσταση αντλιών θερμότητας ως Heatpump_Cost ανά kWh εγκατεστημένης ισχύος (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2016).

Μέτρο ενεργειακής απόδοσης	Κόστος επένδυσης
Μόνωση τοίχων	57.5 €/m ² (επιφάνεια τοίχου)
Αντλίες θερμότητας	300 €/kW
Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)	10 €/m ² (θερμαινόμενη επιφάνεια)
Διπλά τζάμια	425 €/m ² (επιφάνεια)
Ηλιακοί συλλέκτες	9 €/lt

Αποδοτικές συσκευές (μόνο όταν σχετίζεται με το σχήμα EPC)	600 €/μονάδα
Θερμοστάτες χώρου	1.5 €/m ²
Θερμαντήρες φυσικού αερίου	180 €/kW
Αποδοτικοί λαμπτήρες	6 €/μονάδα

Πίνακας 11: Κόστος των εξεταζόμενων μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας (Gkonis et al., 2020; Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (CRES), 2020)

Κτίρια κατά χρήση	Εγκατεστημένη ισχύς (kWh) ανά κτίριο - Θέρμανση	Αριθμός συσκευών ανά τύπο κτιρίου	Αριθμός λαμπτήρων ανά τύπο κτιρίου	Κόστος μονάδας ηλιακών συλλεκτών ανά τύπο κτιρίου (EUR)
Εμπορικά κτίρια	48	10	11	
Νοσοκομεία	525	60	800	3450
Ξενοδοχεία	117	9	72	5175
Γραφεία	52	9	54	
Χώροι συνεδριάσεων	259	6	15	
Εκπαιδευτικές εγκαταστάσεις	91	19	19	
Μονοκατοικίες	24	4	22	1150
Πολυκατοικίες	24	4	22	1150

Πίνακας 12: Εγκατεστημένη ισχύς, αριθμός συσκευών και λαμπτήρων, και κόστος ηλιακών συλλεκτών ανά τύπο κτιρίου

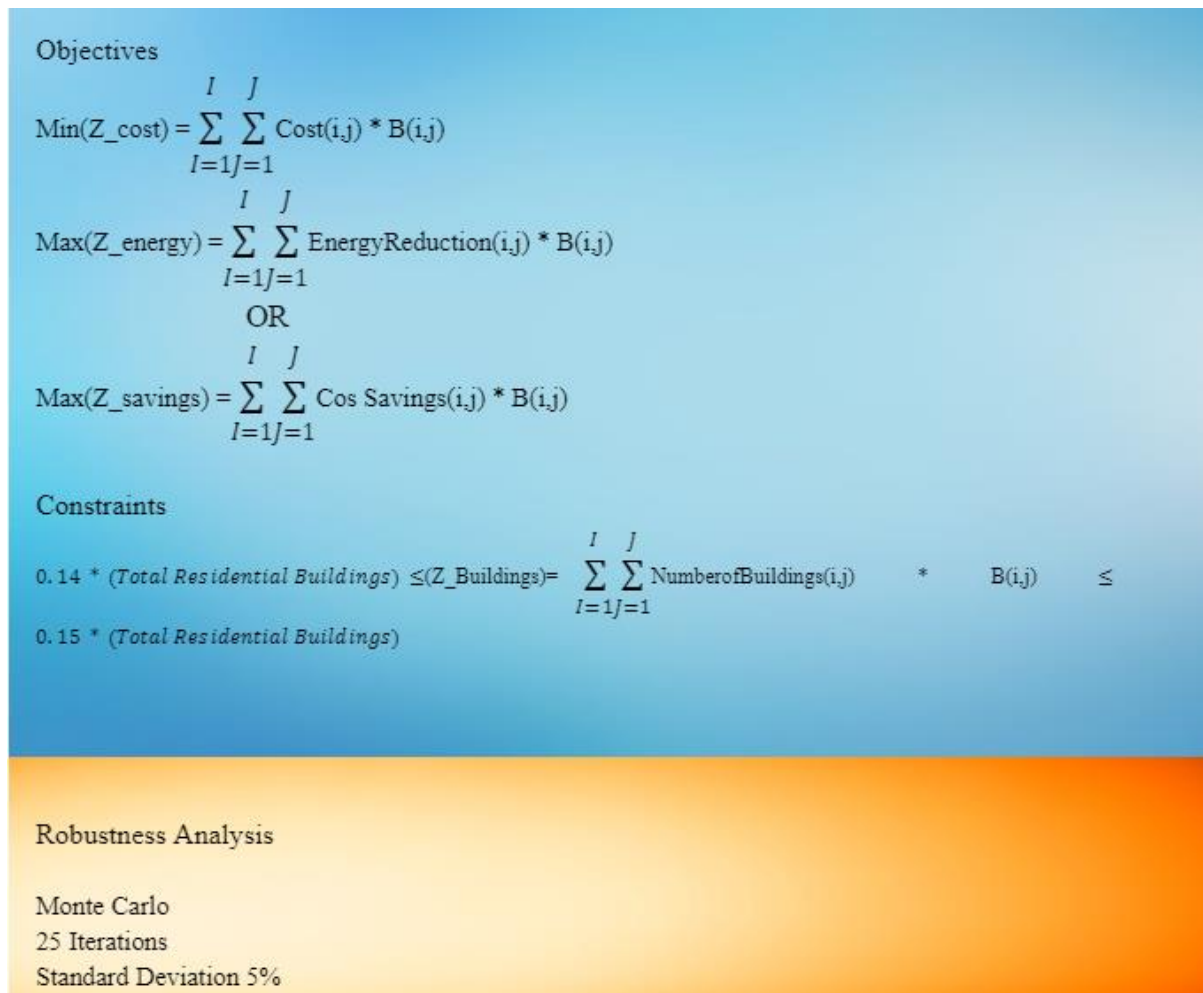
3. **Υπολογισμός Συνολικού Κόστους** Για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους εφαρμόζονται οι εξισώσεις:

$$Total_{Cost} = Insulation_{Cost} \times Insulation_{Area} + (BMS_{Cost} + Therm_{Cost}) \times Heated_{Area} + Dglazing_{Cost} \times Window_{Area} + BMS_{Cost} \times Heated_{Area} + Unitary_{Cost}$$

$$Unitary_{Cost} = Bulb_{Cost} \times N_{Bulbs} + Appliance_{Cost} \times N_{Appliances} + Heatpump_{Cost} \times Inst_Capacity + NatGas_{Cost} \times Inst_Capacity + SolarPanels_{Cost}$$

4.4 Δημιουργία υπολογιστικών φύλλων εισαγωγής δεδομένων

Η μέθοδος AUGMECON-Py απαιτεί τη δημιουργία υπολογιστικών φύλλων για την εισαγωγή δεδομένων και μεταβλητών για κάθε προσομοίωση, είτε πρόκειται για περιορισμούς είτε για αντικειμενικές συναρτήσεις. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε.



Σχήμα 15: Μεθοδολογία AUGMECON-Py

Σε κάθε προσομοίωση, ο αριθμός των κτιρίων ορίστηκε ως περιορισμός ο οποίος κυμαίνεται από το 14% έως το 15% για τον οικιακό τομέα ενώ περιλαμβάνει τον τριτογενή τομέα εξ' ολοκλήρου. Ως αντικειμενικές συναρτήσεις χρησιμοποιήθηκαν συνδυασμοί κόστους, εξοικονόμησης ενέργειας και εξοικονόμησης κόστους σε ζεύγη. Αυτοί οι συνδυασμοί εφαρμόστηκαν τόσο στον οικιακό όσο και στον τριτογενή τομέα, πραγματοποιώντας συνολικά τέσσερις προσομοιώσεις για κάθε τομέα.

Για τη διεξαγωγή της ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος AUGMECON-Py σε συνδυασμό με την ανάλυση ευαισθησίας Monte Carlo 25 επαναλήψεων. Η μέθοδος Monte Carlo επιλέχθηκε λόγω της ικανότητάς της να προσομοιώνει την αβεβαιότητα και να παρέχει μια εκτίμηση της κατανομής πιθανών αποτελεσμάτων με βάση την τυχαιότητα των εισόδων. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την κατανόηση της σταθερότητας και της ευρωστίας των λύσεων βελτιστοποίησης υπό συνθήκες αβεβαιότητας (Glasserman, 2003; Rubinstein & Kroese, 2016).

Η επιλογή αναβάθμισης του κτιριακού στόλου στις ενεργειακές κλάσεις **Ε** και **Δ** βασίστηκε στη στρατηγική αναβάθμισης των ενεργειακών κλάσεων των κτιρίων που εντάσσονται στο χαμηλότερο 15% της ενεργειακής απόδοσης, σύμφωνα με τις κατευθύνσεις που είχαν δοθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2021b). Λόγω της αναδιαμόρφωσης των ενεργειακών κλάσεων, η κλάση **Ζ** είναι υπερφορτωμένη, με το 28,45% των κτιρίων να κατατάσσονται σε αυτήν, καθιστώντας την αναβάθμιση σε κλάσεις **Ε** και **Δ** ως τη βέλτιστη στρατηγική για την επίτευξη των στόχων εξοικονόμησης ενέργειας, καθώς αυτές οι κλάσεις επιτρέπουν σημαντικές βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση χωρίς να απαιτούν εξαιρετικά υψηλό κόστος ή τεχνολογικά απαιτητικές λύσεις (Buildings Performance Institute Europe, 2021). Η εστίαση στις κλάσεις **Ε** και **Δ** εξυπηρετεί την επίτευξη μιας ισορροπίας μεταξύ οικονομικής βιωσιμότητας και ενεργειακής αποδοτικότητας, προσφέροντας ουσιαστικά οφέλη τόσο σε επίπεδο μείωσης εκπομπών όσο και εξοικονόμησης κόστους.

Περιορισμοί	Αντικειμενικές Συναρτήσεις	Αναβάθμιση σε ενεργειακή κλάση
Αριθμός Κτιρίων	Κόστος - Εξοικονόμηση Ενέργειας	Ε
Αριθμός Κτιρίων	Κόστος - Εξοικονόμηση Κόστους	Ε
Αριθμός Κτιρίων	Κόστος - Εξοικονόμηση Ενέργειας	Δ
Αριθμός Κτιρίων	Κόστος - Εξοικονόμηση Κόστους	Δ

Πίνακας 13: Συνδυασμοί Προσομοιώσεων

Για τις αναβαθμίσεις στις κατάλληλες ενεργειακές κλάσεις, επιλέχθηκαν τρία μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας για κάθε μίγμα κτιρίου, με στόχο την αναβάθμιση στις ενεργειακές κλάσεις **Ε** και **Δ**. Η επιλογή των μέτρων καθορίστηκε βάσει των άνω και κάτω ορίων των ενεργειακών κλάσεων στόχευσης, όπως προέκυψαν από τους υπολογισμούς στην υποενότητα 4.2, από τις οδηγίες και τα κίνητρα του προγράμματος «Εξοικονομώ», καθώς και από τη βιβλιογραφία (Frilingou et al., 2024; ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2019).

Τα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας επιλέχθηκαν και σχεδιάστηκαν με στόχο την επίτευξη των βέλτιστων αναβαθμίσεων στην ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, λαμβάνοντας υπόψη τον απαιτούμενο αριθμό κτιρίων που θα αναβαθμιστούν. Τα επιλεγμένα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας και η κωδικοποίησή τους παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Για την επίλυση των προβλημάτων, οι διάφοροι συνδυασμοί μεταξύ μιγμάτων κτιρίων και μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας έχουν μετατραπεί σε ποσοστά εφαρμογής επί του εκάστοτε μίγματος, κυμαινόμενα από 1% έως 100%. Οι κύριες δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν σχετίζονται με την εφαρμογή περιορισμών ανά μίγμα κτιρίου. Ειδικότερα, για κάθε περιορισμό,

η μέθοδος AUGMECON-P_γ απαιτεί διαφορετικό φύλλο εισαγωγής δεδομένων. Κάθε προσομοίωση απαιτεί τη δημιουργία ξεχωριστών υπολογιστικών φύλλων για το ανώτατο και κατώτατο όριο κάθε περιορισμού, καθώς και ένα φύλλο για κάθε διαφορετικό μίγμα κτιρίων, αλλά και ένα επιπλέον φύλλο για κάθε αντικειμενική συνάρτηση.

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Οικιακού τομέα

Σε αυτή την υποενότητα αναλύονται τα αποτελέσματα για τον οικιακό τομέα, εστιάζοντας στην αναβάθμιση της ενεργειακής κλάσης των κτιρίων από Η σε Ε και από Η σε Δ. Η ανάλυση περιλαμβάνει την εκτίμηση του σχετικού κόστους, της εξοικονόμησης ενέργειας, καθώς και της εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους.

5.1.1 Ανάλυση κόστους και εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από ενεργειακή κλάση Η σε Ε.

Από τους 80 διαφορετικούς συνδυασμούς μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας, έχουν επιλεχθεί τρία συγκεκριμένα μέτρα (Κωδ. 1, 22, 73) ως τα πλέον κατάλληλα για την μετάβαση των κατοικιών στην ενεργειακή κλάση Ε. Τα επιλεγμένα μέτρα περιλαμβάνουν τη μόνωση τοίχων, τη χρήση φυσικού αερίου με θερμοστάτες και την εγκατάσταση διπλών τζαμιών και συστήματος ζεστού νερού χρήσης.

Κωδ.	Τίτλος
1	Μόνωση τοίχων
22	Διπλά τζάμια - ZNX
73	Φυσικό αέριο - θερμοστάτες

Πίνακας 14: Κωδικοποίηση μέτρων ενεργειακής απόδοσης για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε οικιακού τομέα

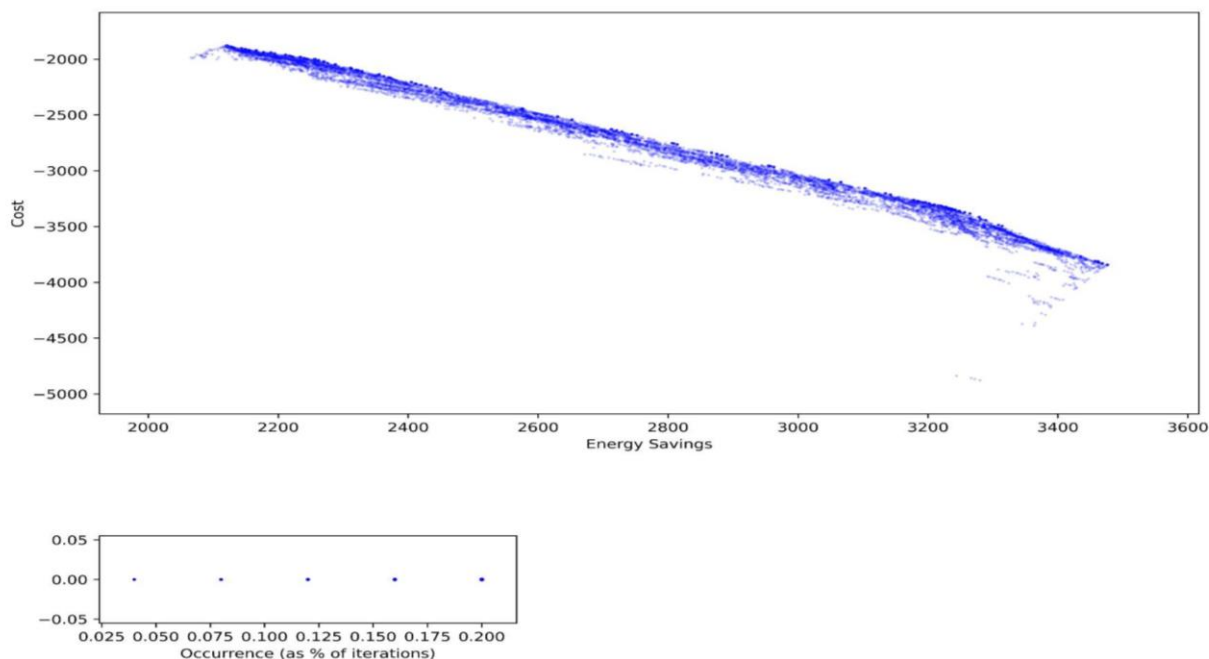
Η παρούσα ανάλυση στοχεύει να αποδείξει πώς η εφαρμογή στοχευμένων μέτρων μπορεί να συμβάλλει στην επίτευξη των εθνικών στόχων για την ενεργειακή αναβάθμιση των κατοικιών και στην ταυτόχρονη μείωση του συνολικού ενεργειακού αποτυπώματος της χώρας.

Με τη χρήση του AUGMECON-Py με ανάλυση ευαισθησίας Monte Carlo 25 επαναλήψεων έχουμε το ακόλουθο διάγραμμα Παρέτο που αποτυπώνει τον συμβιβασμό μεταξύ του κόστους των μέτρων ενεργειακής αποδοτικότητας και της εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνεται, μετρούμενη σε GWh/έτος. Ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει την εξοικονόμηση ενέργειας και ο κάθετος το σχετικό κόστος σε εκατομμύρια ευρώ.

Η καμπύλη του διαγράμματος εμφανίζει μία σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών, υποδεικνύοντας ότι υψηλότερες εξοικονομήσεις ενέργειας συνδέονται σταθερά με αυξημένο κόστος.

Στο δεξιό άκρο του γραφήματος Παρέτο, όπου παρατηρούμε λύσεις με εξοικονομήσεις ενέργειας από 3300 GWh/έτος και πάνω, επικρατούν συνδυασμοί που συμπεριλαμβάνουν την εφαρμογή μόνωσης σε υψηλά ποσοστά, ιδιαίτερα για το πέμπτο και έκτο μίγμα κτιρίων. Αυτό υποδηλώνει ότι η μόνωση είναι μια προτιμώμενη στρατηγική όταν στοχεύουμε στην επίτευξη μεγάλων εξοικονομήσεων ενέργειας, ειδικά σε κτίρια που είναι μεγαλύτερα σε μέγεθος ή έχουν υψηλότερες ανάγκες θέρμανσης.

Στο υπόλοιπο διάστημα του διαγράμματος, η μόνωση παραμένει ένα κυρίαρχο μέτρο αναβάθμισης, αλλά ξεχωρίζει ιδιαίτερα στο πρώτο μίγμα κτιρίων, τα διαμερίσματα πολυκατοικιών. Αυτή η τάση ενδέχεται να αντανάκλα την υψηλή συχνότητα και την οικονομική αποδοτικότητα της μόνωσης ως μέτρου για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης σε πυκνοκατοικημένες περιοχές ή σε κτίρια με μικρότερη επιφάνεια.

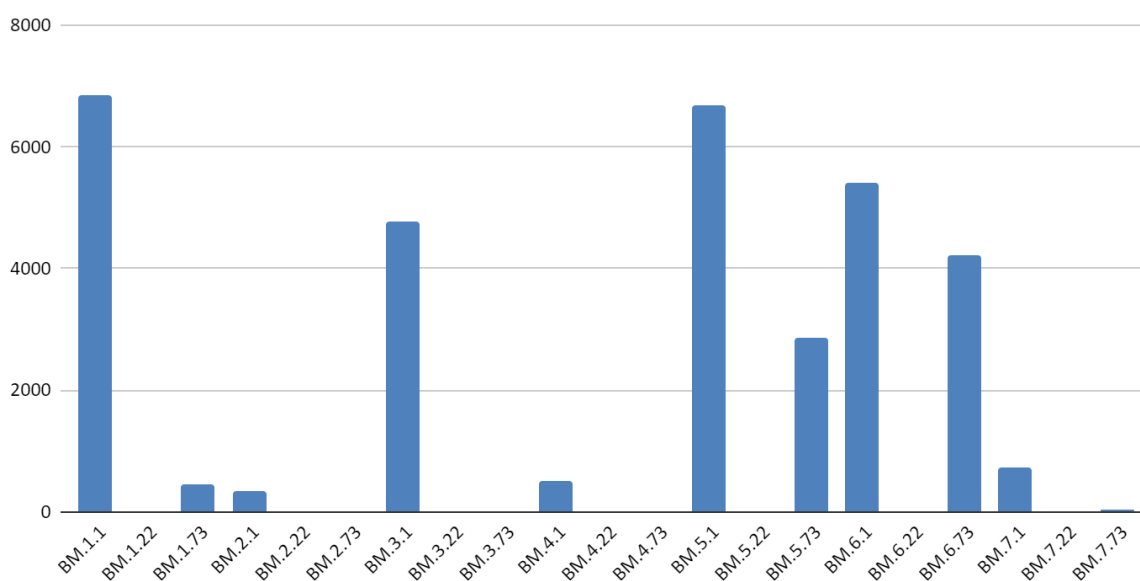


Σχήμα 16: Διάγραμμα Παρέτο κόστους – εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε οικιακού τομέα

Το ακόλουθο διάγραμμα απεικονίζει τον αριθμό εμφανίσεων κάθε επιλεγμένου μέτρου στο σύνολο των λύσεων που εξετάστηκαν. Στις προτεινόμενες λύσεις, διαπιστώνουμε έναν αποκλεισμό των ιδιόκτητων μονοκατοικιών μεγαλύτερων των 50 τετραγωνικών μέτρων (BM2), των παλαιότερων κατοικιών μεγάλων διαστάσεων (BM7), καθώς και των νεότερων κατοικιών με μεγάλη επιφάνεια (BM4), ενώ η μόνωση φαίνεται να είναι το κυρίαρχο μέτρο σε σχεδόν όλα τα μίγματα κτιρίων.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι στα μίγματα BM5 και BM6, τα οποία περιλαμβάνουν μεγαλύτερες οικίες, προτιμάται συχνά η εγκατάσταση φυσικού αερίου με θερμοστάτες, δείχνοντας ότι αυτή η επιλογή είναι ιδιαίτερα αποδοτική για αυτές τις περιπτώσεις. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται και από τα αριθμητικά δεδομένα του διαγράμματος, όπου, τα μέτρα BM.5.22 και BM.6.22 έχουν υψηλό αριθμό εμφανίσεων, ενώ το ποσοστό εφαρμογής τους είναι μικρό και κυμαίνεται στο 1% έως το 15%. Φαίνεται δηλαδή να είναι μια λύση συμπληρωματικής φύσεως.

Το παρακάτω διάγραμμα αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την κατανόηση της συχνότητας επιλογής κάθε μέτρου και της σχετικής αποτελεσματικότητάς τους σε διαφορετικά μίγματα κτιρίων, καθώς και για την κατεύθυνση των μελλοντικών πολιτικών παρεμβάσεων στον τομέα της ενεργειακής αναβάθμισης.



Σχήμα 17: Αριθμός εμφάνισης λύσεων κόστους – εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε οικιακού τομέα

Ενδεικτικά οι αρχικές λύσεις του προβλήματος που εμφανίζονται τις περισσότερες φορές σε 25 επαναλήψεις είναι οι ακόλουθες όπου για ακόμη μία φορά η εφαρμογή μόνωσης στα διαμερίσματα πολυκατοικιών εξασφαλίζει την μετάβαση του 15% του οικιακού στόλου στην κλάση Ε με το μικρότερο δυνατό κόστος.

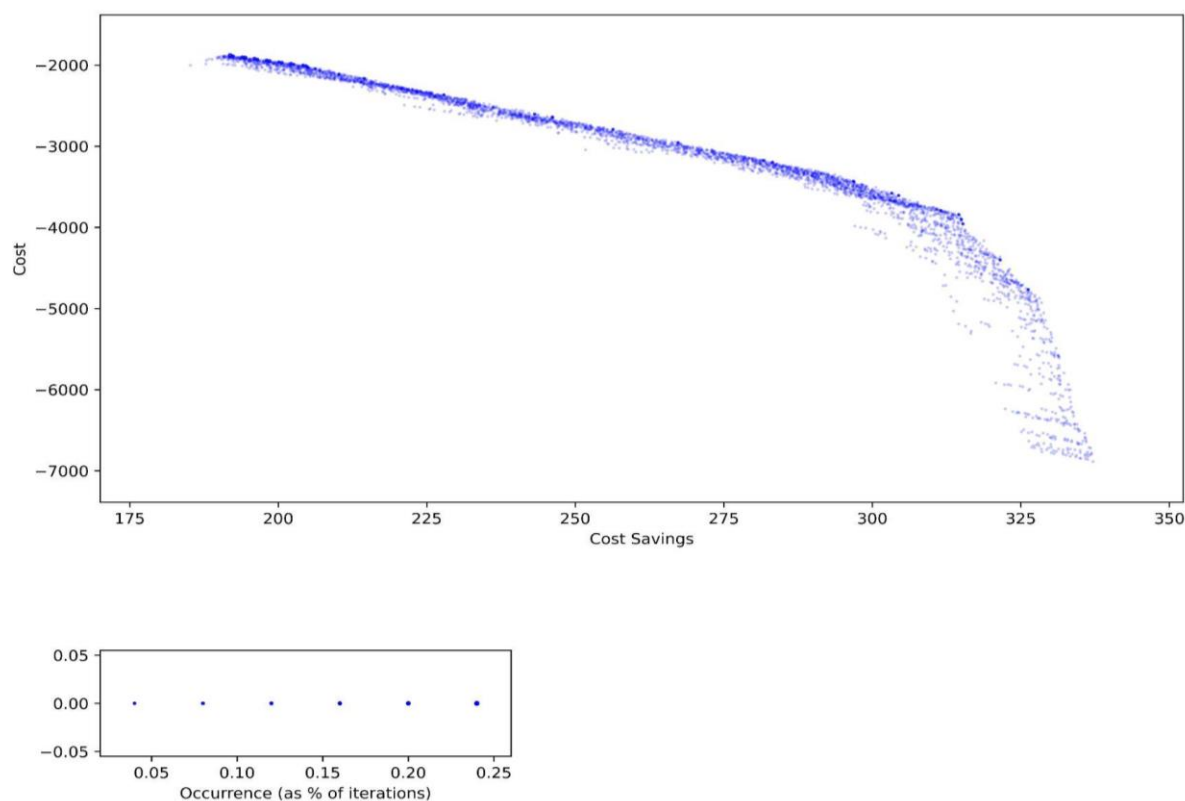
Αριθμός Εμφανίσεων	Λύση	Κόστος (εκ. ευρώ)	Εξοικονόμηση Ενέργειας (GWh/γ)
5	BM.1.1-Perc94	1.882,61	2.121,08
4	BM.1.1-Perc100	2.002,78	2.256,47
4	BM.1.1-Perc93, BM.6.73-Perc1	1.891,48	2.126,68
3	BM.6.1-Perc95, BM.6.73-Perc1	3.831,66	3.468,11
3	BM.1.1-Perc1, BM.6.1-Perc95	3.822,79	3.462,51

3	BM.1.1-Perc99, BM.6.1-Perc1	2.022,78	2.270,12
3	BM.1.1-Perc99, BM.6.73-Perc1	2.011,64	2.262,07
3	BM.1.1-Perc99	1.982,75	2.233,91
3	BM.1.1-Perc97	1.942,69	2.188,78
3	BM.1.1-Perc94, BM.6.73-Perc2	1.940,40	2.177,41
3	BM.1.1-Perc93, BM.6.73-Perc2	1.920,37	2.154,84
3	BM.1.1-Perc94, BM.6.73-Perc1	1.911,51	2.149,25
3	BM.1.1-Perc93, BM.3.1-Perc1	1.895,84	2.129,63

Πίνακας 15: Ενδεικτικές λύσεις αρχικού προβλήματος κόστους – εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε οικιακού τομέα

5.1.2 Ανάλυση κόστους και εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους για μετάβαση από ενεργειακή κλάση Η σε Ε

Προχωρώντας στην ανάλυση για τη μετάβαση του 15% του οικιακού στόλου στην κλάση Ε, και διατηρώντας τα ίδια μίγματα κτιρίων με τα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας, μελετούμε τη σχέση μεταξύ του κόστους (άξονας γ) και της εξοικονόμησης κόστους ανά έτος (άξονας χ), με τα δύο αυτά μεγέθη να εκφράζονται σε εκατομμύρια ευρώ. Παρατηρούμε μία σχεδόν γραμμική συμπεριφορά στο διάγραμμα μέχρι να φτάσουμε τις εξοικονομήσεις κόστους στα 315 εκατομμύρια ευρώ ανά έτος. Από αυτό το σημείο και μετά, παρατηρείται δραματική άνοδο στην κλίμακα του κόστους, υποδηλώνοντας ότι η περαιτέρω αύξηση στην εξοικονόμηση κόστους γίνεται με δυσανάλογα υψηλό οικονομικό κόστος, κάτι που μπορεί να καταστήσει τις αντίστοιχες λύσεις λιγότερο ελκυστικές.

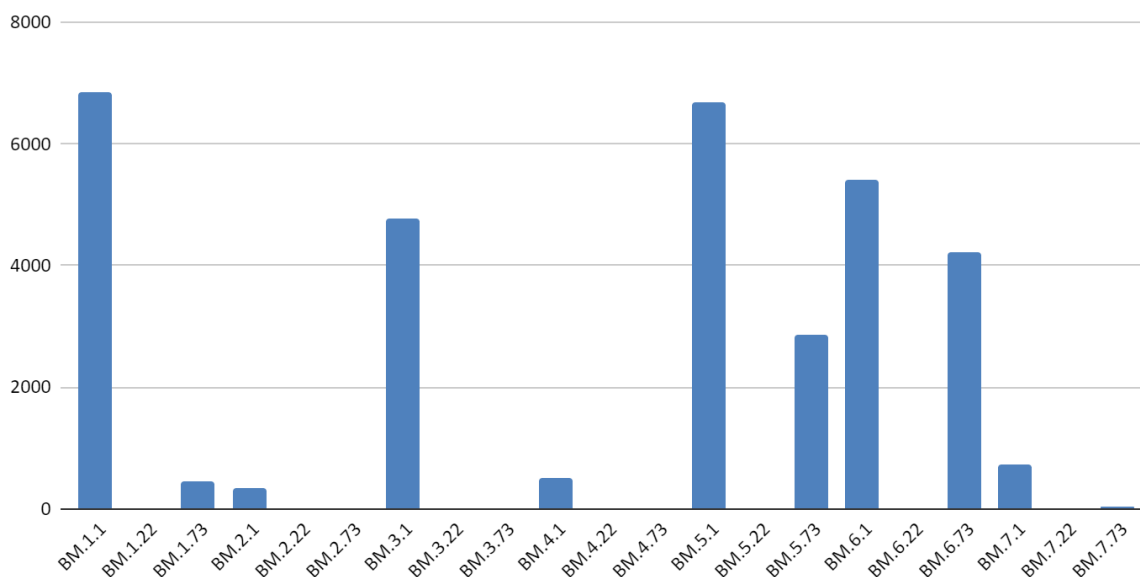


Σχήμα 18: Διάγραμμα Παρέτο κόστους – εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε οικιακού τομέα

Συνεχίζοντας με την ανάλυση των εφαρμοζόμενων μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας επί του οικιακού στόλου, διαπιστώνουμε ότι η μόνωση εμφανίζεται πάλι ως κυρίαρχο μέτρο στο σύνολο των λύσεων. Ωστόσο, στις κατηγορίες BM2, BM4 και BM7, τα μέτρα αυτά εμφανίζονται ελάχιστα ή καθόλου, πράγμα που ενδεχομένως υποδεικνύει μια υποβαθμισμένη προτίμηση ή αποδοτικότητα των εν λόγω μέτρων για αυτούς τους τύπους κτιρίων.

Από τις δύο εκτελέσεις του AUGMECON-Py μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας φαίνονται να είναι οικονομικά πιο συμφέροντα κατά την εφαρμογή τους στα διαμερίσματα πολυκατοικιών, και ιδίως όταν αναφερόμαστε στη μόνωση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα διαμερίσματα πολυκατοικιών απαιτούν μικρότερη επιφάνεια προς μόνωση σε σύγκριση με τις μονοκατοικίες, κάτι που οδηγεί σε μικρότερο κόστος επένδυσης.

Το συγκεκριμένο διάγραμμα και οι αριθμητικές του τιμές υποστηρίζουν το συμπέρασμα αυτό, ενώ παράλληλα ενισχύουν την προοπτική ότι μέτρα όπως η εγκατάσταση φυσικού αερίου με θερμοστάτες μπορεί να αποτελούν αποδοτική λύση σε μεγαλύτερες οικίες, όπως δείχνουν οι συχνότερες εμφανίσεις στα μίγματα BM5 και BM6.



Σχήμα 19: Αριθμός εμφάνισης λύσεων κόστους - εξοικονόμησης κόστους για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε οικιακού τομέα

Στη συνέχεια της ανάλυσής μας, παρατηρούμε και πάλι τις λύσεις που εμφανίζονται συχνότερα στο σύνολο των σεναρίων για την ενεργειακή αναβάθμιση. Όπως και στις προηγούμενες μετρήσεις, η μόνωση αναδεικνύεται ως το κυρίαρχο μέτρο, και ειδικά στο μίγμα των διαμερισμάτων πολυκατοικιών (BM1), υπογραμμίζοντας τη σημασία της σε κτίρια με μικρότερη επιφάνεια μόνωσης.

Αναλύοντας τον πίνακα με τον αριθμό εμφανίσεων των διάφορων λύσεων, βλέπουμε ότι οι συνδυασμοί που περιλαμβάνουν υψηλά ποσοστά μόνωσης στα διαμερίσματα πολυκατοικιών είναι αυτοί που επικρατούν. Το μοντέλο BM.1.1 με ποσοστό 94% εμφανίζεται να έχει τον υψηλότερο αριθμό εμφανίσεων, καταδεικνύοντας την αποδοτικότητα αυτού του μέτρου από πλευράς κόστους και εξοικονόμησης. Επίσης, παρατηρούμε ότι το μέτρο εφαρμογής της μόνωσης συνδυάζεται και με μικρά ποσοστά εφαρμογής στο BM.6.73, δηλαδή την εγκατάσταση φυσικού αερίου και θερμοστατών σε μεγάλες κατοικίες οικοδομημένες πριν το 2000, υποδεικνύοντας μια στοχευμένη προσέγγιση που ενδέχεται να αφορά ειδικότερες περιπτώσεις εντός αυτού του μίγματος κτιρίων.

Από την ανάλυση αυτή μπορούμε να συναγάγουμε ότι, η επιλογή των μέτρων που θα εφαρμοστούν δεν εξαρτάται μόνο από το είδος της παρέμβασης, αλλά και από τον τύπο των κτιρίων καθώς και το μέγεθος της επιφάνειας που χρήζει αναβάθμισης. Η μόνωση, λόγω της ευρύτερης εφαρμογής και του υψηλού αριθμού εμφανίσεων στα δεδομένα, φαίνεται να αποτελεί μια αξιόπιστη και οικονομικά βιώσιμη επιλογή, ειδικά για τα διαμερίσματα σε πολυκατοικίες.

Αριθμός Εμφανίσεων	Λύσεις	Κόστος (εκ. ευρώ)	Εξοικονόμηση Κόστους (εκ. ευρώ/έτος)
6	BM.1.1-Perc94	1.882,61	191,93
5	BM.1.1-Perc94, BM.6.73-Perc1	1.911,51	194,44
4	BM.1.1-Perc97, BM.6.73-Perc1	1.971,59	200,57
4	BM.1.1-Perc96, BM.6.73-Perc1	1.951,56	198,52
4	BM.1.1-Perc96	1.922,66	196,02
3	BM.1.1-Perc99, BM.6.73-Perc1	2.011,64	204,65
3	BM.1.1-Perc99	1.982,75	202,14
3	BM.1.1-Perc97	1.942,69	198,06
3	BM.1.1-Perc95, BM.6.73-Perc1	1.931,53	196,48
3	BM.1.1-Perc95	1.902,64	193,97
3	BM.1.1-Perc93, BM.6.73-Perc1	1.891,48	192,40

Πίνακας 16: Ενδεικτικές λύσεις αρχικού προβλήματος κόστους - εξοικονόμησης κόστους για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε οικιακού τομέα

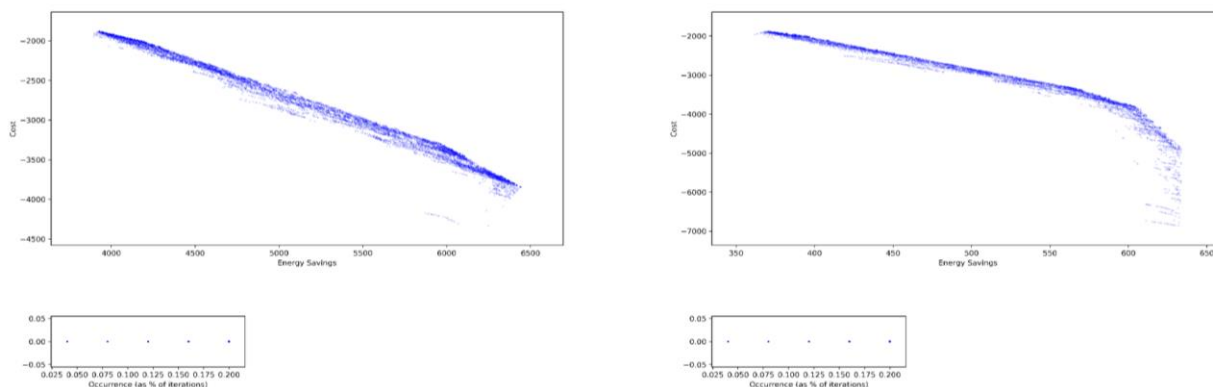
5.1.3 Ανάλυση κόστους εξοικονόμησης ενέργειας και εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους για μετάβαση από ενεργειακή κλάση Η σε Δ.

Μία δεύτερη μέτρηση που έγινε στα παραπάνω μίγματα κτιρίων είναι η μετάβασή του ίδιου ποσοστού αριθμού κτιρίων στην κλάση Δ. Η μόνη διαφοροποίηση σε αυτό το πρόβλημα είναι η επιλογή των μέτρων ενεργειακής απόδοσης των οποίων η κωδικοποίηση φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Κωδ.	Τίτλος
3	Μόνωση τοίχων / ZNX + Αποδοτικές συσκευές
9	Μόνωση τοίχων + Διπλά τζάμια
25	Αντλίες θερμότητας

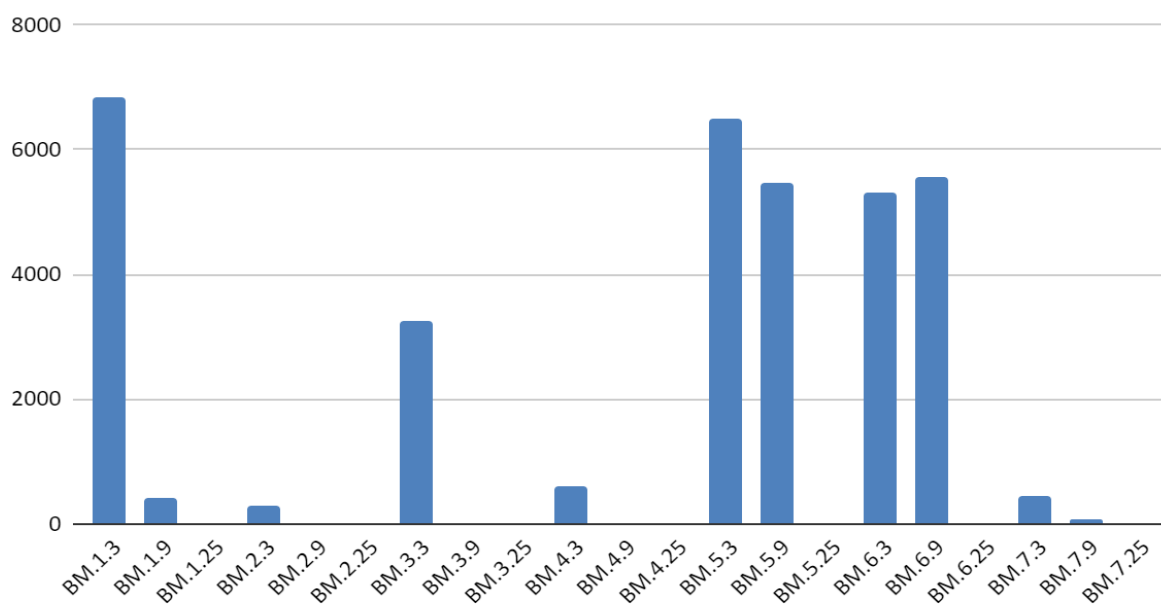
Πίνακας 17: Κωδικοποίηση μέτρων ενεργειακής απόδοσης για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Δ οικιακού τομέα

Στην παρούσα ανάλυση, οι καμπύλες Παρέτο παρουσιάζουν συγκρίσιμη μορφολογία με εκείνες των προηγούμενων ερευνών. Η σχέση μεταξύ της ενεργειακής κατανάλωσης και του κόστους αποκτά γραμμική διάσταση, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας έως και 6500 GWh ετησίως, με πιθανή αύξηση του κόστους έως τα 4 δισεκατομμύρια ευρώ. Η καμπύλη κόστους και εξοικονόμησης κόστους αποδεικνύει μια καμπή, γνωστή ως "γόνατο", σε κόστος λίγο πάνω από τα 4 δισεκατομμύρια ευρώ. Προσπερνώντας αυτήν την περιοχή η αύξηση του κόστους δεν συνεπάγεται αντίστοιχη αύξηση στη εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους. Με βάση την ανάλυση, μία ιδανική λύση φαίνεται να βρίσκεται στην περιοχή των 3,5 δισεκατομμυρίων ευρώ, συνδυάζοντας εξοικονόμηση ενέργειας από 6200 έως 6500 GWh ετησίως και ετήσια μείωση κόστους από 546 έως 600 εκατομμύρια ευρώ.

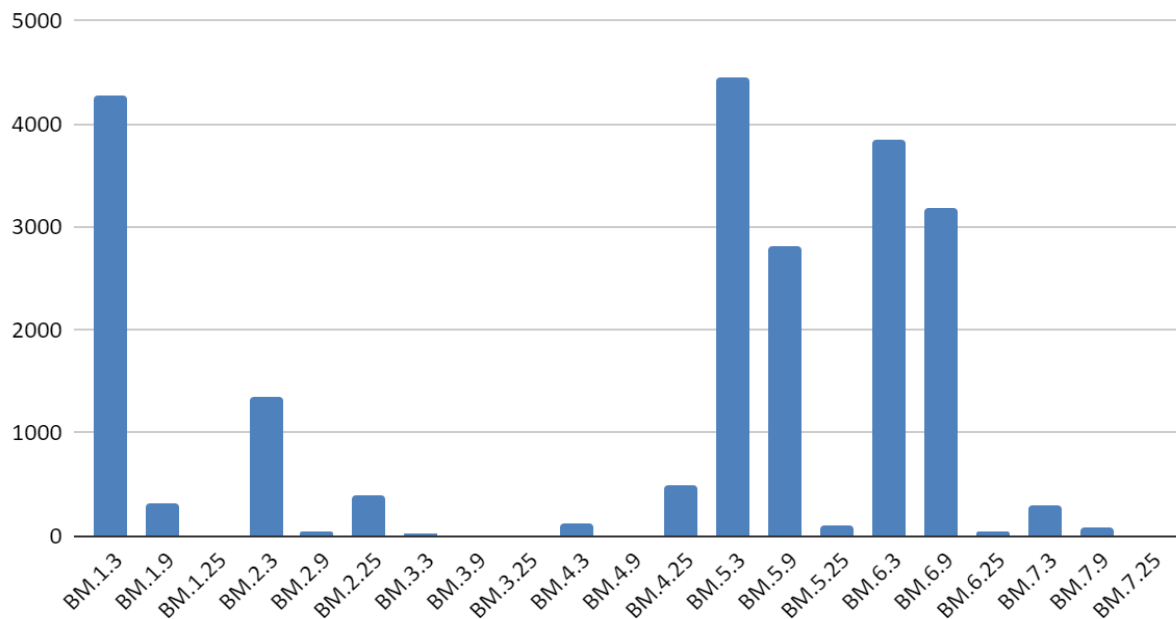


Σχήμα 20: Διαγράμματα Παρέτο :Διάγραμμα Παρέτο κόστους –εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους- εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Δ οικιακού τομέα

Βασισμένοι στα δεδομένα από τις δύο μετρήσεις με συνολικά 8124 και 5338 λύσεις αντίστοιχα, διαπιστώνουμε μια έντονη προτίμηση για τα μίγματα 1, 5 και 6. Αυτά τα μίγματα συμπεριλαμβάνουν κυρίως διαμερίσματα σε πολυκατοικίες και μονοκατοικίες άνω των 100 τετραγωνικών μέτρων. Ειδικότερα για τα διαμερίσματα σε πολυκατοικίες, η επιλογή της μόνωσης τοίχων σε συνδυασμό με τη χρήση ZNX (Ζεστού Νερού Χρήσης) και αποδοτικών συσκευών αποτελεί μια σταθερή επιλογή. Για τα μίγματα 5 και 6, παρατηρείται παρόμοια τάση με τη μόνωση τοίχων και την τοποθέτηση διπλών τζαμιών να είναι εξίσου κρίσιμα, δείχνοντας τη σημασία της θερμομόνωσης στην ενεργειακή απόδοση των κατοικιών.

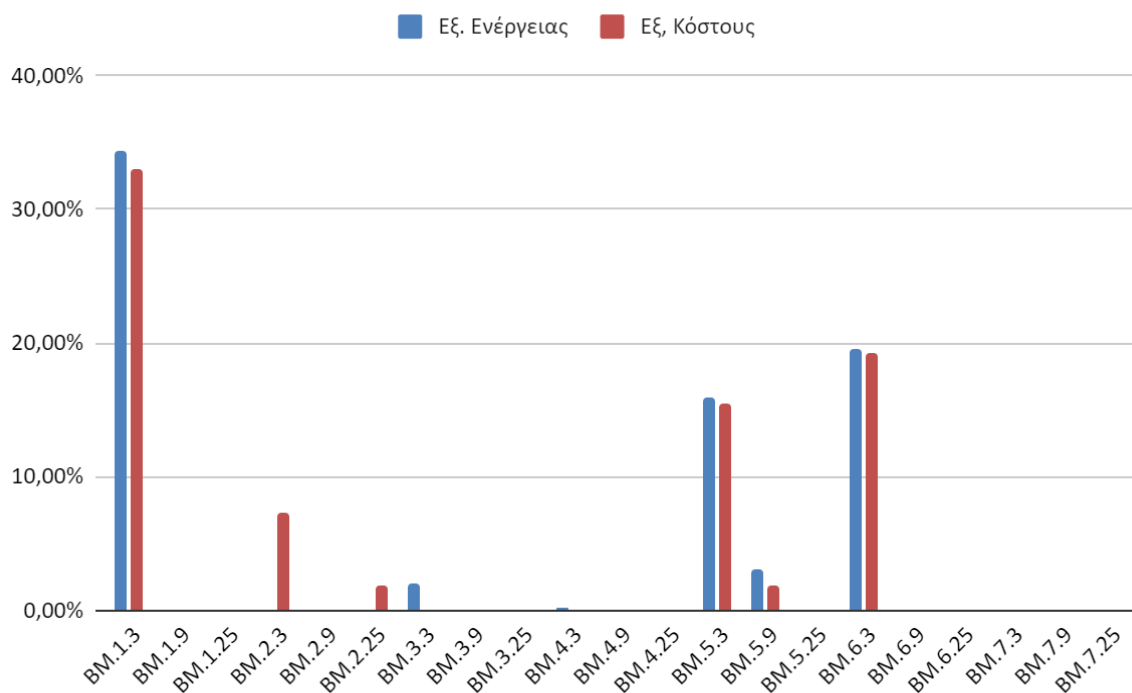


Σχήμα 21: Αριθμός εμφάνισης λύσεων κόστους - εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Δ οικιακού τομέα



Σχήμα 22: Αριθμός εμφάνισης λύσεων κόστους - εξοικονόμησης για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Δ οικιακού τομέα

Η ανάλυση των λύσεων με ποσοστά εφαρμογής άνω του 50% αποκαλύπτει την επιβεβαίωση των προηγούμενων ευρημάτων. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι αντλίες θερμότητας δεν φαίνεται να επιλέγονται σχεδόν από καμία από τις λύσεις, υποδεικνύοντας πιθανά θέματα κόστους. Επιπλέον, ο αλγόριθμος εστιάζει κυρίως σε διαμερίσματα πολυκατοικιών και μεγαλύτερες οικίες, ενισχύοντας την προτίμηση προς λύσεις που αφορούν αυτούς τους δύο τύπους κατοικιών. Τέλος, παρατηρείται ότι η εφαρμογή του συνδυασμού μόνωσης τοίχων και διπλών τζαμιών δεν αποτελεί πρωταρχική επιλογή στα μεγάλα ποσοστά εφαρμογής, κάτι που θα μπορούσε να διερευνηθεί περαιτέρω για την κατανόηση των ενδεχόμενων προκλήσεων ή εμποδίων.



Σχήμα 23: Ποσοστό εμφάνισης λύσεων με εφαρμογή > 50%, κόστους – εξοικονόμησης ενέργειας και - εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Δ οικιακού τομέα

5.2 Τριτογενούς τομέα

5.2.1 Ανάλυση κόστους και εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από ενεργειακή κλάση Η σε Ε.

Συνεχίζοντας την ανάλυση του προβλήματος. αλλά για τον τριτογενή τομέα έχουμε σχεδόν την ίδια διαμόρφωση του προβλήματος αλλά με διαφορετικά επιλεγμένα μέτρα ενεργειακής απόδοσης και διαφορετικούς περιορισμούς. Εδώ μελετάμε την αναβάθμιση του τριτογενούς τομέα εξ ολοκλήρου. Δηλαδή όλα τα κτίρια που βρίσκονται στην κλάση Η.

Για την μετάβαση των παραπάνω κτιρίων στην ενεργειακή κλάση Ε έχουν επιλεχθεί τα παρακάτω μέτρα, με την αντίστοιχη κωδικοποίηση τους να φαίνεται στον πίνακα.

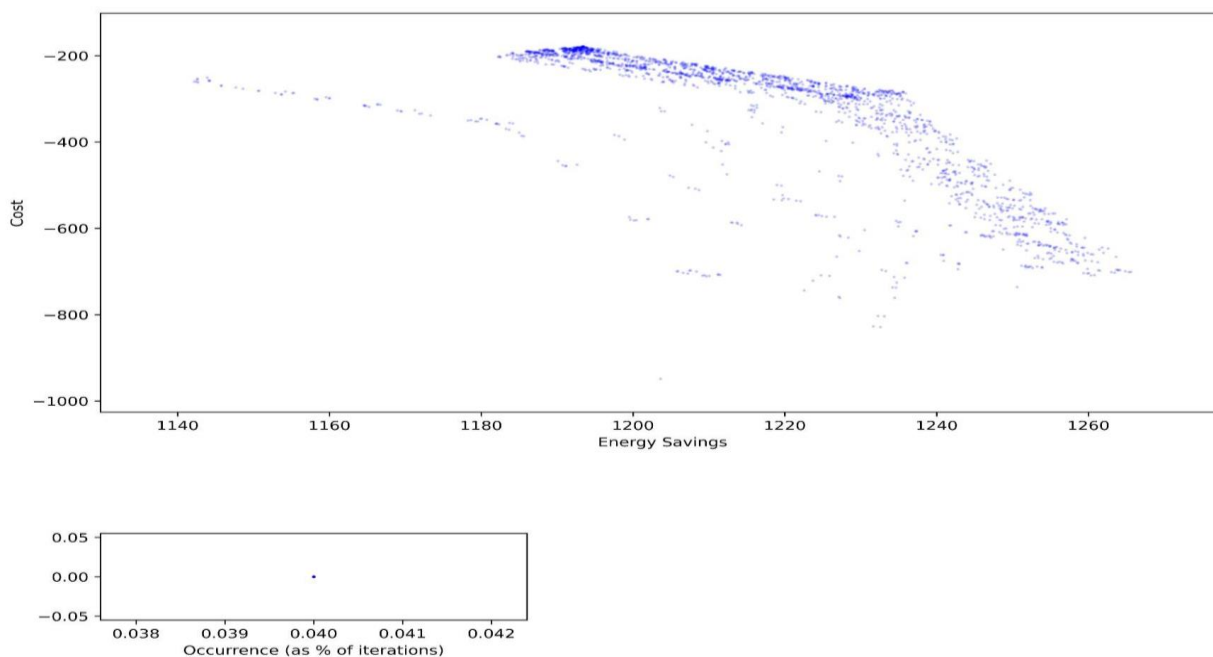
Κωδικός	Μέτρα Ενεργειακής Απόδοσης
BMT.1.1	Μόνωση τοίχων
BMT.1.2	Διπλά τζάμια + Καυστήρες φυσικού αερίου
BMT.1.3	Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)
BMT.2.1	Μόνωση τοίχων
BMT.2.2	Φυσικό αέριο / Θερμοστάτες
BMT.2.3	Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)

BMT.3.1	Αντλίες θερμότητας
BMT.3.2	Ηλιακά πάνελ
BMT.3.3	Μόνωση τοίχων, Αντλίες θερμότητας
BMT.4.1	Μόνωση τοίχων
BMT.4.2	Διπλά τζάμια + Καυστήρες φυσικού αερίου
BMT.4.3	Διπλά τζάμια + Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)
BMT.5.1	Μόνωση τοίχων + Αποδοτικοί λαμπτήρες
BMT.5.2	Αποδοτικές συσκευές + Διπλά τζάμια + Φυσικό αέριο
BMT.5.3	Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)
BMT.6.1	Μόνωση τοίχων + Αποδοτικοί λαμπτήρες
BMT.6.2	Αποδοτικοί λαμπτήρες + Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)
BMT.6.3	Μόνωση τοίχων + Διπλά τζάμια

Πίνακας 18: Κωδικοποίηση μέτρων ενεργειακής απόδοσης για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση H σε E τριτογενούς τομέα

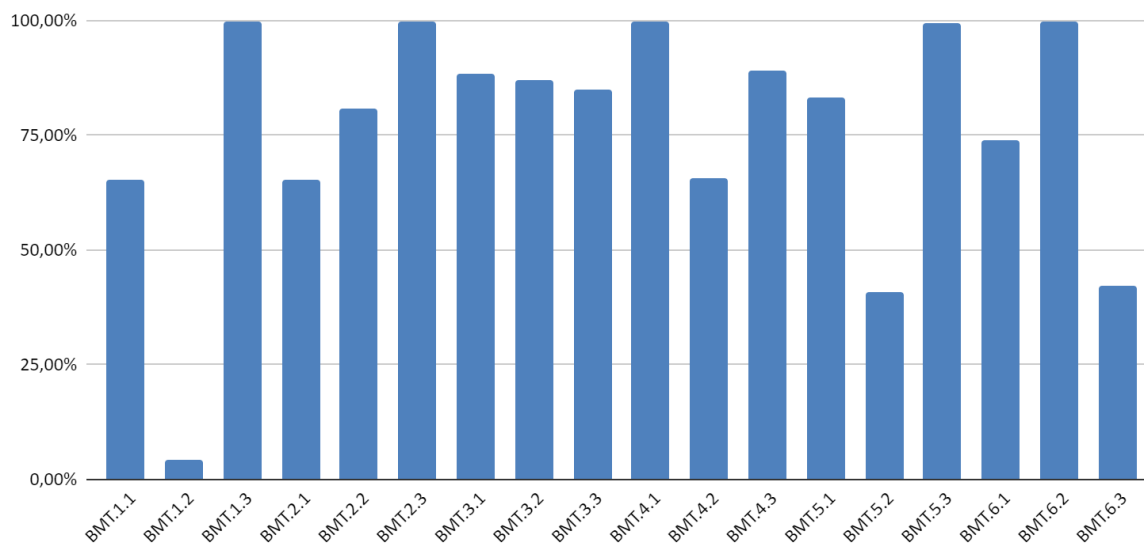
Ως πρώτη ανάλυση χρησιμοποιούμε τα παραπάνω μελετώντας τη μέγιστη μείωση κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε συνάρτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και θέτοντας ως περιορισμό τον μέγιστο αριθμό των κτιρίων. Με την εκτέλεση του προγράμματος παίρνουμε ένα χαρτοφυλάκιο 2246 μοναδικών λύσεων και το ακόλουθο διάγραμμα Παρέτο στο οποίο παρατηρούμε τα εξής:

- 1) Στο εύρος κόστους των 200 έως 280 εκατομμυρίων ευρώ βρίσκονται οι 129 βέλτιστες λύσεις, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 1,220 Gwh/έτος έως 1,240 Gwh/έτος.
- 2) Όλες οι παραγόμενες λύσεις είναι μοναδικές στις 25 αυτές επαναλήψεις, γεγονός που ίσως οφείλεται στη κατάτμηση του προβλήματος σε 100 ποσοστιαίες μονάδες με αποτέλεσμα να επιλέγονται τα ίδια μέτρα με ελάχιστη ποσοστιαία διαφορά.



Σχήμα 24: Διάγραμμα Παρέτο κόστους - εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση H σε E τριτογενούς τομέα

Το ποσοστό του αριθμού εμφανίσεων των διαφόρων μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας ως προς το συνολικό αριθμό λύσεων του χαρτοφυλακίου φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



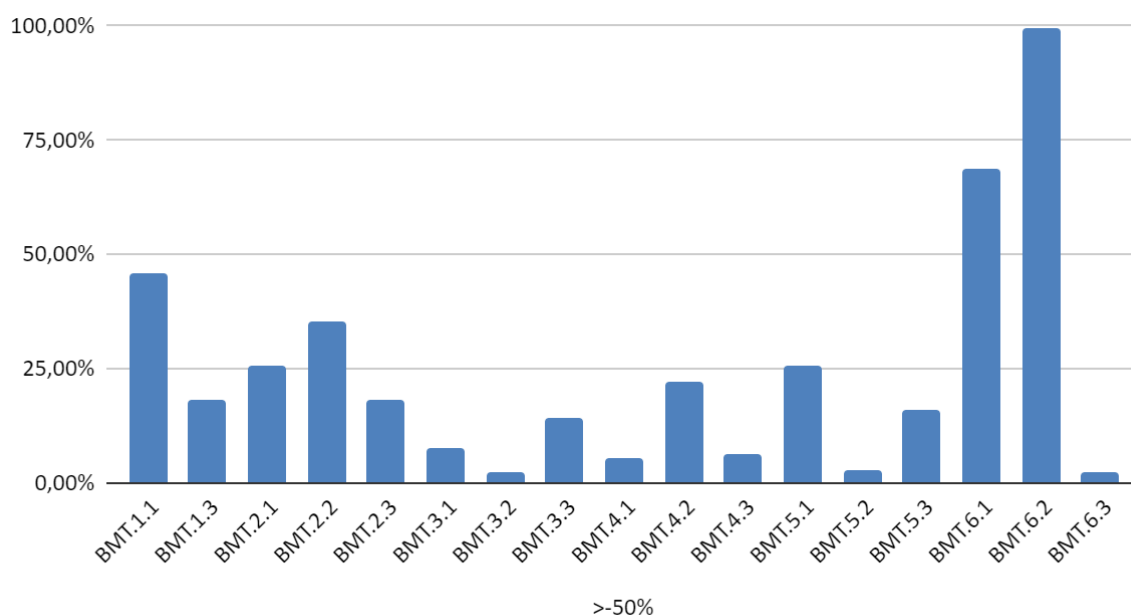
Σχήμα 25: Ποσοστό εμφάνισης λύσεων κόστους - εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση H σε E τριτογενούς τομέα

Με μία πρώτη ματιά τα επικρατέστερα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας είναι τα εξής:

Κτίρια κατά χρήση	Μέτρα Ενεργειακής Απόδοσης
Εμπορικά Κτίρια	Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)
Νοσοκομεία	Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)
Προσωρινή Διαμονή	Μόνωση τοίχων
Γραφεία	Μόνωση τοίχων
Χώροι Συναντήσεων	Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίων (BMS)
Εκπαιδευτικές Εγκαταστάσεις	Αποδοτικοί λαμπτήρες + Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)

Πίνακας 19: Επικρατέστερα μέτρα ενεργειακής απόδοσης για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση H σε E τριτογενούς τομέα

Αξίζει να αναφερθεί ότι στα παραπάνω εμπεριέχονται και οι λύσεις με ποσοστά εφαρμογής της τάξεως του 1% έως 5%. Μια πιο ρεαλιστική εικόνα, η οποία παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα, είναι ο αριθμός εμφάνισης των επιλεγμένων μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας με ποσοστό εφαρμογής μεγαλύτερο του 50% επί του αντίστοιχου μίγματος κτιρίων. Εδώ φαίνεται πως για να μεγιστοποιηθεί η μείωση στην κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας επιλέγονται σε μεγαλύτερα ποσοστά μονώσεις τοίχων και καυστήρες φυσικού αερίου.



Σχήμα 26: Ποσοστό εμφάνισης λύσεων με εφαρμογή > 50 κόστους - εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση H σε E τριτογενούς τομέα

Εστιάζοντας όμως στο βέλτιστο εύρος τιμών σύμφωνα με το διάγραμμα Παρέτο, που περιέχει 129 λύσεις, φαίνεται πως για όλους τους τύπους κτιρίων πέραν της προσωρινής διαμονής τα

συστήματα διαχείρισης κτιρίων (BMS) είναι αυτά που βλέπουμε συχνότερα σε μεγάλα ποσοστά εφαρμογής. Μπορούμε τελικά να συμπεράνουμε πως η εφαρμογή μέτρων πέραν των BMS είναι γενικότερα μη αποδοτική σε μεγάλα ποσοστά εφαρμογής και είναι κυρίως συμπληρωματικού χαρακτήρα.

Κωδικός	Μέτρα Ενεργειακής Απόδοσης	Ποσοστό εμφανίσεων
BMT.1.1	Μόνωση τοίχων	37,98%
BMT.1.2	Διπλά τζάμια + Καυστήρες φυσικού αερίου	0,00%
BMT.1.3	Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)	99,22%
BMT.2.1	Μόνωση τοίχων	60,47%
BMT.2.2	Φυσικό αέριο / Θερμοστάτες	74,42%
BMT.2.3	Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)	99,22%
BMT.3.1	Αντλίες θερμότητας	89,92%
BMT.3.2	Ηλιακά πάνελ	90,70%
BMT.3.3	Μόνωση τοίχων, Αντλίες θερμότητας	99,22%
BMT.4.1	Μόνωση τοίχων	99,22%
BMT.4.2	Διπλά τζάμια + Καυστήρες φυσικού αερίου	76,74%
BMT.4.3	Διπλά τζάμια + Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)	87,60%
BMT.5.1	Μόνωση τοίχων + Αποδοτικοί λαμπτήρες	93,02%
BMT.5.2	Αποδοτικές συσκευές + Διπλά τζάμια + Φυσικό αέριο	10,85%
BMT.5.3	Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)	99,22%
BMT.6.1	Μόνωση τοίχων + Αποδοτικοί λαμπτήρες	73,64%
BMT.6.2	Αποδοτικοί λαμπτήρες + Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)	99,22%

BMT.6.3

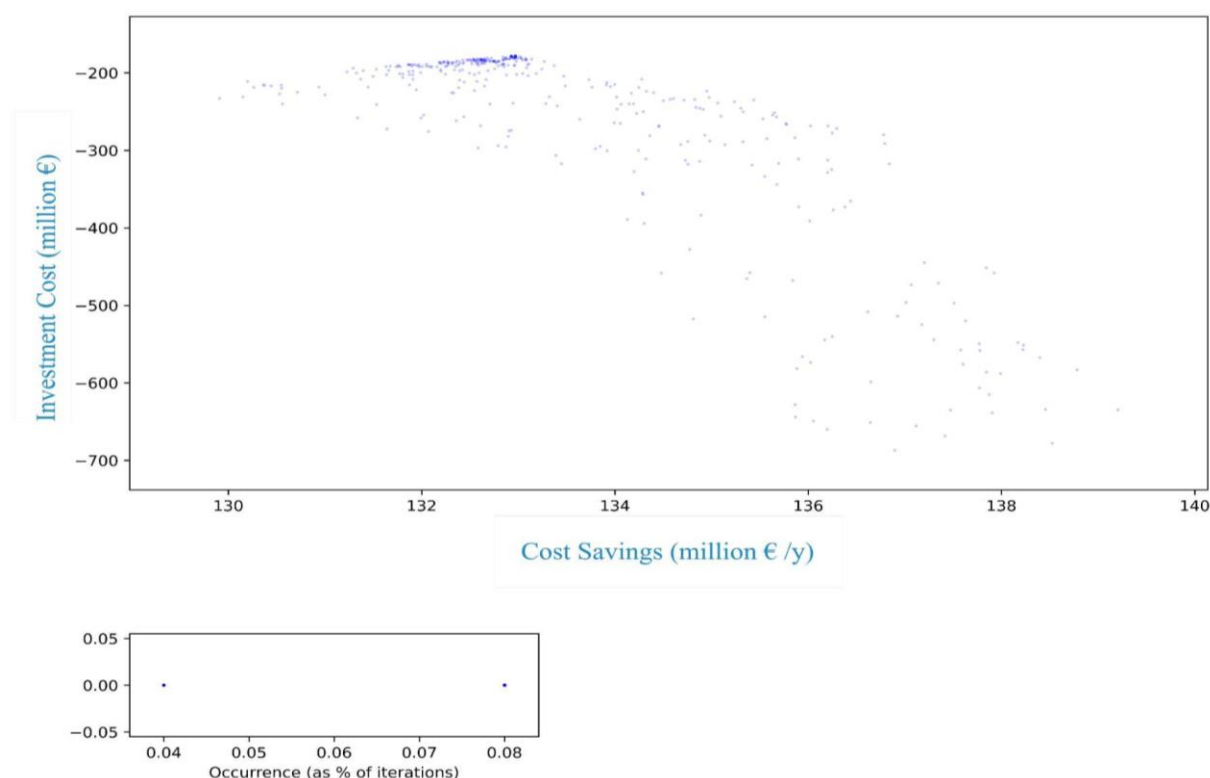
Μόνωση τοίχων + Διπλά τζάμια

49,61%

Πίνακας 20: Ποσοστό εμφάνισης βέλτιστων λύσεων κόστους - εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση H σε E τριτογενούς τομέα

Συνεχίζοντας την ανάλυση, χρησιμοποιείται η ίδια κωδικοποίηση και περιορισμοί αλλά αντικαθιστώντας την μείωση την ενεργειακής κατανάλωσης με την εξοικονόμηση κόστους.

Στο διάγραμμα Παρέτο έχουμε την ακόλουθη εικόνα, στην οποία μπορούμε να διακρίνουμε μια μικρή περιοχή βέλτιστων λύσεων μεταξύ 132 έως 134 εκατ. ευρώ εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους ανά έτος και μεταξύ 170 και 200 εκατ. ευρώ κόστους επένδυσης. Οι βέλτιστες λύσεις είναι 166 και περιέχουν κυρίως την εγκατάσταση συστημάτων διαχείρισης κτιρίων λόγω της μεγάλης αναλογίας μεταξύ των δύο μεγεθών.



Σχήμα 27: Διάγραμμα Παρέτο κόστους - εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση H σε E τριτογενούς τομέα

Πιο συγκεκριμένα τα ποσοστά εμφάνισης των λύσεων προς τον συνολικό αριθμό λύσεων που έχουν εφαρμογή μεγαλύτερη του 50% αλλά και συνολικά φαίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα.

Εδώ φαίνεται ξεκάθαρα η προτίμηση των συστημάτων διαχείρισης κτιρίων, όπου αυτή είναι διαθέσιμη, ενώ τα ηλιακά πάνελ για τα κτίρια προσωρινής διαμονής και η εγκατάσταση μόνωσης για τα γραφεία επικρατούν στο 100% επί των λύσεων.

Κωδικός	Μέτρα Ενεργειακής Απόδοσης	Ποσοστό εμφανίσεων συνολικά	Ποσοστό εμφανίσεων >50%
BMT.1.1	Μόνωση τοίχων	71,08%	0,00%
BMT.1.2	Διπλά τζάμια + Καυστήρες φυσικού αερίου	0,00%	0,00%
BMT.1.3	Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)	100,00%	100,00%
BMT.2.1	Μόνωση τοίχων	0,00%	0,00%
BMT.2.2	Φυσικό αέριο / Θερμοστάτες	76,51%	0,00%
BMT.2.3	Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)	100,00%	100,00%
BMT.3.1	Αντλίες θερμότητας	81,33%	0,00%
BMT.3.2	Ηλιακά πάνελ	100,00%	100,00%
BMT.3.3	Μόνωση τοίχων, Αντλίες θερμότητας	19,28%	0,00%
BMT.4.1	Μόνωση τοίχων	100,00%	100,00%
BMT.4.2	Διπλά τζάμια + Καυστήρες φυσικού αερίου	32,53%	0,00%
BMT.4.3	Διπλά τζάμια + Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)	34,34%	0,00%
BMT.5.1	Μόνωση τοίχων + Αποδοτικοί λαμπτήρες	59,64%	0,00%
BMT.5.2	Αποδοτικές συσκευές + Διπλά τζάμια + Φυσικό αέριο	0,60%	0,00%
BMT.5.3	Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)	100,00%	100,00%
BMT.6.1	Μόνωση τοίχων + Αποδοτικοί λαμπτήρες	33,13%	0,00%
BMT.6.2	Αποδοτικοί λαμπτήρες + Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (BMS)	100,00%	100,00%
BMT.6.3	Μόνωση τοίχων + Διπλά τζάμια	0,00%	0

Πίνακας 21: Ποσοστό εμφάνισης βέλτιστων λύσεων με και χωρίς εφαρμογή > 50% κόστους - εξοικονόμησης κόστους για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Ε τριτογενούς τομέα

5.2.2 Ανάλυση κόστους, εξοικονόμησης ενέργειας και εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους για μετάβαση από ενεργειακή κλάση Η σε Δ.

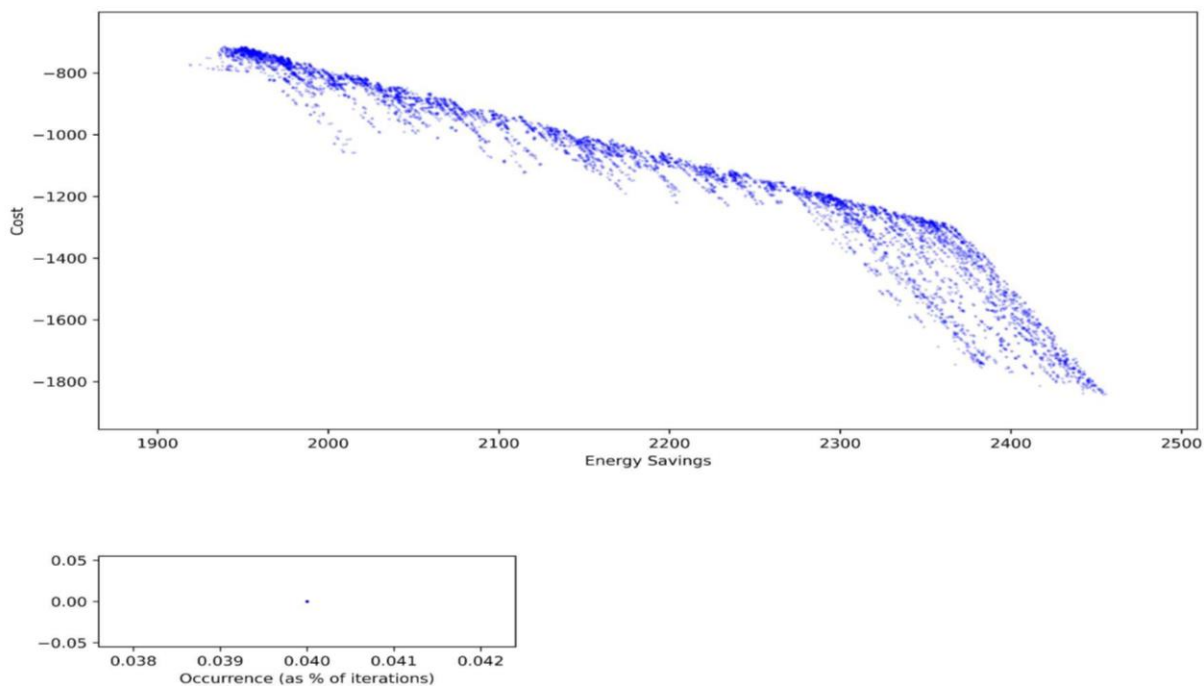
Συνεχίζοντας την ανάλυση ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξ' ολοκλήρου μετάβαση του τριτογενούς τομέα στην ενεργειακή κλάση Δ. Ακολουθώντας την προηγούμενη κωδικοποίηση του προβλήματος όσον αφορά τους τύπους και τον αριθμό των κτιρίων, επιλέχθηκαν τρεις συνδυασμοί μέτρων όπου μπορούν να τα αναβαθμίσουν στην κλάση αυτή.

Κωδικός	Μέτρα Ενεργειακής Απόδοσης
BMT.1.1	Αντλίες θερμότητας
BMT.1.2	Μόνωση τοίχων + ΣΔΚ
BMT.1.3	ΣΔΚ / Αποδοτικοί λαμπτήρες + Διπλά τζάμια + Αποδοτικές συσκευές
BMT.2.1	Αντλίες θερμότητας
BMT.2.2	Μόνωση τοίχων + ΣΔΚ
BMT.2.3	Μόνωση τοίχων /Αποδοτικοί λαμπτήρες + Διπλά τζάμια
BMT.3.1	ZNX + Αποδοτικοί λαμπτήρες
BMT.3.2	Τοίχοι + Αντλίες θερμότητας + Αποδοτικοί λαμπτήρες
BMT.3.3	Αντλίες θερμότητας + Μόνωση τοίχων + Αποδοτικοί λαμπτήρες
BMT.4.1	Αντλίες θερμότητας
BMT.4.2	ΣΔΚ + ZNX+ Αποδοτικές συσκευές
BMT.4.3	Μόνωση τοίχων + Αποδοτικοί λαμπτήρες + ZNX
BMT.5.1	Αντλίες θερμότητας
BMT.5.2	Αποδοτικοί λαμπτήρες + ΣΔΚ + Διπλά τζάμια + Αποδοτικές συσκευές
BMT.5.3	Μόνωση τοίχων +Αποδοτικοί λαμπτήρες / ΣΔΚ
BMT.6.1	Αντλίες θερμότητας
BMT.6.2	Αποδοτικοί λαμπτήρες + ΣΔΚ + αποδοτικές συσκευές
BMT.6.3	Μόνωση τοίχων + Αποδοτικές συσκευές + ΣΔΚ

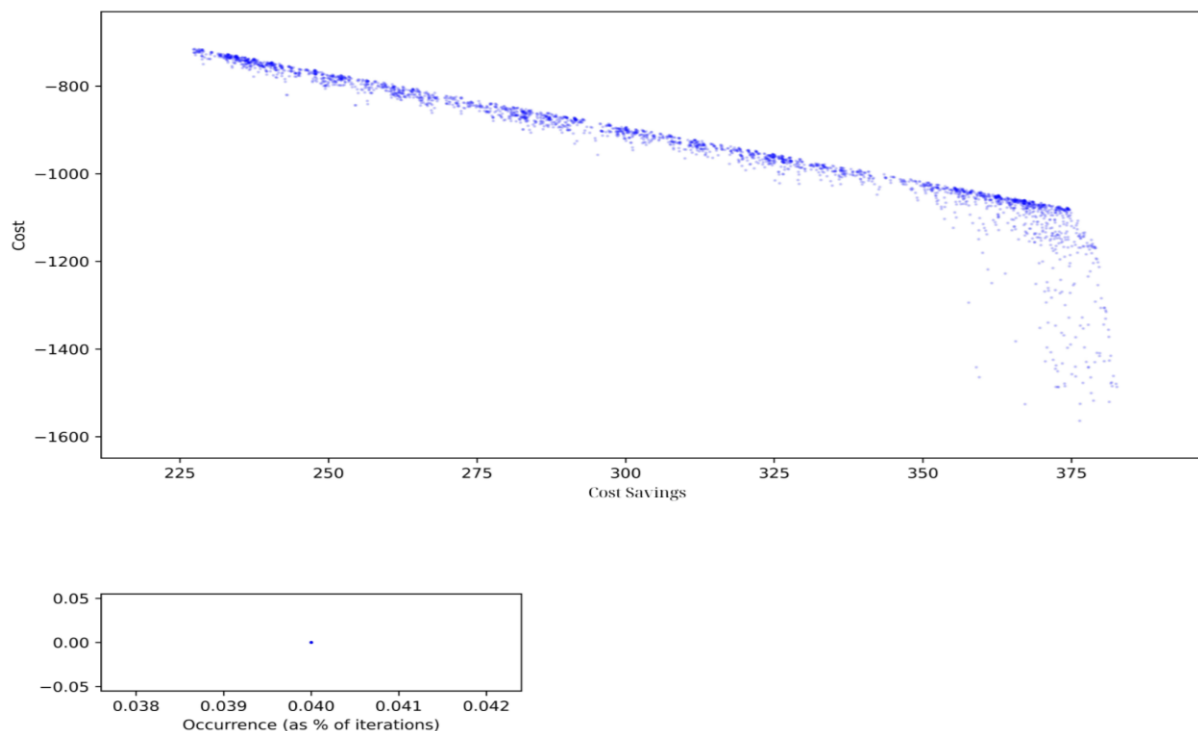
Πίνακας 22: Κωδικοποίηση μέτρων ενεργειακής απόδοσης, για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση H σε Δ τριτογενούς τομέα

Στην εφαρμογή της AUGMECON-Py σε δύο διακριτά προβλήματα, που αφορούν την αντίθεση μεταξύ του κόστους επένδυσης και της εξοικονόμησης ενέργειας ή της εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους, αναπτύχθηκαν συνολικά 8.500 μοναδικές λύσεις. Οι αναλύσεις παράγουν γραφήματα Παρέτο με συγκρίσιμες δομές, υποδεικνύοντας μια αρχική γραμμική σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Οι λύσεις παρουσιάζουν μια καμπή - ή όπως αλλιώς αναφέρεται "γόνατο" - στο εύρος του κόστους επένδυσης από 1 έως 1.4 δισεκατομμύρια ευρώ. Αυτό το φαινόμενο υποδηλώνει μια σημαντική μεταβολή στην αποδοτικότητα της επένδυσης, καθιστώντας έτσι το εν λόγω εύρος κρίσιμο για την αποφασιστική διαχείριση των επενδυτικών

κεφαλαίων. Με το εν λόγω κεφάλαιο μπορούμε να επιτύχουμε έως και 2,4 Twh/έτος αλλά και εξοικονόμηση κόστους της τάξεως των 350 εκ. ευρώ ανά έτος.



Σχήμα 28: Διάγραμμα Παρέτο κόστους - εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Δ τριτογενούς τομέα



Σχήμα 29: Διάγραμμα Παρέτο κόστους - εξοικονόμησης λειτουργικού κόστους για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση H σε Δ τριγωνούς τομέα

Στην παρούσα ανάλυση, επικεντρωθήκαμε στο ποσοστό εφαρμογής των διάφορων μέτρων ενεργειακής απόδοσης, με ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα μέτρα που ξεπερνούν το κατώφλι του 50% σε εφαρμογή ανά τύπο κτιρίων. Η ανάλυση αποκαλύπτει διαφοροποιημένες προτιμήσεις και εφαρμογές μεταξύ των μέτρων που αφορούν εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους. Παρατηρείται για ακόμη μία φορά η εγκατάσταση συστημάτων διαχείρισης κτιρίων (BMS) σε συνδυασμό με μέτρα που είναι ικανά να οδηγήσουν τα κτίρια στην ενεργειακή κλάση Δ και για τα δύο μεγέθη. Προτίμηση ιδιαίτερη αποδίδεται στην εγκατάσταση αντλιών θερμότητας τόσο σε εμπορικά καταστήματα αλλά και δομές υγείας για εξοικονόμηση ενέργειας. Ειδική έμφαση δίνεται στην υιοθέτηση αντλιών θερμότητας, καθώς αυτές επιλέγονται τόσο από εμπορικά κέντρα όσο και από ιατρικά ιδρύματα για την αποδοτική εξοικονόμηση ενέργειας.

Κατηγορία	Μέτρα Ενεργειακής Απόδοσης	Ποσοστό εμφανίσεων >50% Εξοικ. Ενέργειας	Ποσοστό εμφανίσεων >50% Εξοικ. Κόστους
BMT.1.1	Αντλίες θερμότητας	99,40%	0,00%
BMT.1.2	Μόνωση τοίχων + ΣΔΚ	0,00%	0,00%
BMT.1.3	ΣΔΚ / Αποδοτικοί λαμπτήρες + Διπλά τζάμια + Αποδοτικές συσκευές	0,00%	100,00%

BMT.2.1	Αντλίες θερμότητας	96,17%	81,03%
BMT.2.2	Μόνωση τοίχων + ΣΔΚ	3,23%	18,97%
BMT.2.3	Μόνωση τοίχων /Αποδοτικοί λαμπτήρες + Διπλά τζάμια	0,00%	0,00%
BMT.3.1	ΖΝΧ + Αποδοτικοί λαμπτήρες	66,73%	100,00%
BMT.3.2	Τοίχοι + Αντλίες θερμότητας + Αποδοτικοί λαμπτήρες	9,07%	0,00%
BMT.3.3	Αντλίες θερμότητας + Μόνωση τοίχων + Αποδοτικοί λαμπτήρες	18,15%	0,00%
BMT.4.1	Αντλίες θερμότητας	0,00%	0,00%
BMT.4.2	ΣΔΚ + ΖΝΧ+ Αποδοτικές συσκευές	31,05%	75,38%
BMT.4.3	Μόνωση τοίχων + Αποδοτικοί λαμπτήρες + ΖΝΧ	67,94%	24,62%
BMT.5.1	Αντλίες θερμότητας	0,00%	0,00%
BMT.5.2	Αποδοτικοί λαμπτήρες + ΣΔΚ + Διπλά τζάμια + Αποδοτικές συσκευές	1,81%	0,51%
BMT.5.3	Μόνωση τοίχων +Αποδοτικοί λαμπτήρες / ΣΔΚ	97,58%	99,49%
BMT.6.1	Αντλίες θερμότητας	0,00%	0,00%
BMT.6.2	Αποδοτικοί λαμπτήρες + ΣΔΚ + αποδοτικές συσκευές	99,40%	100,00%
BMT.6.3	Μόνωση τοίχων + Αποδοτικές συσκευές + ΣΔΚ	0,00%	0,00%

Πίνακας 23: Ποσοστό εμφάνισης βέλτιστων λύσεων με και χωρίς εφαρμογή > 50% κόστους - εξοικονόμησης κόστους και εξοικονόμησης ενέργειας για μετάβαση από την ενεργειακή κλάση Η σε Δ τριτογενούς τομέα

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η αξιολόγηση των ελάχιστων προτύπων ενεργειακής απόδοσης (MEPS) των κτιρίων, με χρήση πολυστοχικού προγραμματισμού. Μέσω της χρήσης της μεθόδου AUGMECON-Py και της ανάλυσης ευαισθησίας Monte Carlo, πραγματοποιήθηκε λεπτομερής ανάλυση των ενεργειακών αναβαθμίσεων στον οικιακό και τριτογενή τομέα. Η ανάλυση αποσκοπούσε στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και της οικονομικής βιωσιμότητας των κτιρίων υπό συνθήκες αβεβαιότητας.

Ένα από τα κύρια σημεία της μελέτης ήταν ότι η διαμόρφωση των ενεργειακών κλάσεων έγινε αναγκαία λόγω του υψηλού ποσοστού κτιρίων που βρίσκονται στην ενεργειακή κλάση Η στην Ελλάδα. Σύμφωνα με την οδηγία 2021/0426(COD), πριν την τελική της ψήφιση, η έρευνα επικεντρώθηκε στην αναβάθμιση του 15% του οικιακού στόλου και στην αναβάθμιση ολόκληρου του τριτογενούς τομέα από την κλάση Η στις κλάσεις Ε και Δ, με στόχο τη σημαντική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και του ενεργειακού αποτυπώματος σε εθνικό επίπεδο, σύμφωνα με τις οδηγίες της ευρωπαϊκής επιτροπής.

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν μίγματα κτιρίων προκειμένου να δοθεί η δυνατότητα επιλογής διαφορετικών ποσοστών εφαρμογής των μέτρων σε κάθε μίγμα. Αυτή η προσέγγιση επέτρεψε την ευελιξία στην εφαρμογή των μέτρων ανάλογα με τις ιδιαίτερες ανάγκες και τα χαρακτηριστικά των κτιρίων, προσαρμόζοντας τις λύσεις στις συγκεκριμένες απαιτήσεις του κτιριακού αποθέματος.

Η ανάλυση έδειξε ότι, για τη μετάβαση του οικιακού τομέα από την ενεργειακή κλάση Η στην κλάση Ε (μέσος όρος εξοικονόμησης Χ%), τα βέλτιστα χαρτοφυλάκια προτιμούν το μέτρο της μόνωσης τοίχων στα διαμερίσματα πολυκατοικιών. Η μόνωση τοίχων προσφέρει σημαντικά οφέλη στην εξοικονόμηση ενέργειας, ενώ παράλληλα είναι οικονομικά βιώσιμη λόγω του χαμηλότερου κόστους εφαρμογής της σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπως αυτές που περιλαμβάνουν πολυκατοικίες. Αυτό το μέτρο όχι μόνο μειώνει την ενεργειακή κατανάλωση, αλλά συμβάλλει επίσης σημαντικά στη μείωση του λειτουργικού κόστους, καθιστώντας το προτιμητέα επιλογή για την ενεργειακή αναβάθμιση στον οικιακό τομέα.

Αντίστοιχα, για τη μετάβαση του οικιακού τομέα από την κλάση Η στην Δ (μέσος όρος εξοικονόμησης Χ%), τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχουν πολλές αποτελεσματικές λύσεις, με κάποιες να ξεχωρίζουν. Η μόνωση τοίχων σε συνδυασμό με συστήματα ζεστού νερού χρήσης (ZNX) και αποδοτικές συσκευές ήταν η πιο αποδοτική λύση για τα διαμερίσματα πολυκατοικιών,

επιτυγχάνοντας υψηλή ενεργειακή εξοικονόμηση. Επιπλέον, η μόνωση τοίχων σε συνδυασμό με διπλά τζάμια προτιμήθηκε για μονοκατοικίες και διαμερίσματα πολυκατοικιών στη ζώνη Γ και Β με εμβαδόν μεγαλύτερο από 100 τ.μ., καθώς και για κτίρια που κατασκευάστηκαν πριν το 1980 ή μεταξύ 1980 και 2000. Αυτά τα κτίρια παρουσιάζουν αυξημένες ανάγκες για θερμομόνωση, γεγονός που καθιστά τον συνδυασμό αυτό ιδανικό για τη βελτίωση της ενεργειακής τους απόδοσης.

Για τη μετάβαση των κτιρίων του τριτογενούς τομέα από την ενεργειακή κλάση Η στην Ε, τα αποτελέσματα έδειξαν σαφώς ότι τα Συστήματα Διαχείρισης Κτιρίων (BMS) είναι η πλέον αποδοτική επιλογή για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Τα BMS εμφανίστηκαν στο 100% των λύσεων για πολλά διαφορετικά μίγματα κτιρίων, όπως εμπορικά κτίρια, νοσοκομεία, και εκπαιδευτικές εγκαταστάσεις. Επίσης, η εφαρμογή ηλιακών πάνελ είχε 100% ποσοστό εμφανίσεων για ορισμένα μίγματα, υποδεικνύοντας την αποδοτικότητά τους σε συγκεκριμένους τύπους κτιρίων. Από την άλλη πλευρά, μέτρα όπως η μόνωση τοίχων και η χρήση διπλών τζαμιών σε συνδυασμό με καυστήρες φυσικού αερίου εμφανίστηκαν με χαμηλότερα ποσοστά εφαρμογής, γεγονός που υποδηλώνει ότι δεν ήταν εξίσου αποδοτικά σε σύγκριση με τα BMS και τα ηλιακά πάνελ.

Αντίθετα, για τη μετάβαση των κτιρίων του τριτογενούς τομέα από την ενεργειακή κλάση Η στην Δ, η ανάλυση έδειξε διαφορετικές προτιμήσεις. Οι αντλίες θερμότητας αναδείχθηκαν ως η πλέον αποδοτική λύση, με πολύ υψηλό ποσοστό εμφάνισης (>99%) σε πολλές κατηγορίες κτιρίων, ιδιαίτερα για εμπορικά κτίρια και γραφεία. Η χρήση αντλιών θερμότητας συνδυάζεται συχνά με άλλα μέτρα, όπως η μόνωση τοίχων και οι αποδοτικοί λαμπτήρες, για τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση. Επιπλέον, η συνδυαστική εφαρμογή του BMS με αποδοτικούς λαμπτήρες, διπλά τζάμια και αποδοτικές συσκευές παρουσίασε υψηλά ποσοστά εφαρμογής, ιδιαίτερα για την εξοικονόμηση κόστους. Αυτή η προσέγγιση δείχνει ότι η χρήση προηγμένων τεχνολογιών διαχείρισης ενέργειας, σε συνδυασμό με παραδοσιακές μεθόδους όπως η μόνωση, μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη στην ενεργειακή αποδοτικότητα και στην οικονομική βιωσιμότητα.

6.2 Προοπτικές

Ένα σημαντικό στοιχείο που αξίζει να σημειωθεί είναι η συνεχής αλλαγή στις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Παρόλο που αυτές οι αναθεωρήσεις στοχεύουν στην επίτευξη μεγαλύτερης ενεργειακής αποδοτικότητας και στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, δημιουργούν προκλήσεις για τα κράτη μέλη και τους ιδιώτες επενδυτές λόγω των σημαντικών αλλαγών από οδηγία σε οδηγία. Η διαρκής αναπροσαρμογή στις νέες απαιτήσεις και πρότυπα μπορεί να προκαλέσει σύγχυση και να απαιτήσει συνεχείς επενδύσεις σε χρόνο και πόρους για την προσαρμογή στις νέες ρυθμίσεις.

Επιπλέον, η έρευνα αυτή ανέδειξε προκλήσεις που συνδέονται με τη χρήση της μεθόδου AUGMECON-Py, κυρίως λόγω της έλλειψης επαρκούς τεκμηρίωσης (documentation). Η προσέγγιση trial and error που απαιτήθηκε για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής υπογράμμισε την ανάγκη για καλύτερη τεκμηρίωση και υποστήριξη από την κοινότητα χρηστών και τους προγραμματιστές. Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να επωφεληθούν από την ανάπτυξη ενός πιο ολοκληρωμένου οδηγού χρήσης για την AUGMECON-Py, προκειμένου να μειωθούν οι δυσκολίες και να βελτιωθεί η αποδοτικότητα της ανάλυσης.

Επιπροσθέτως, η αξιολόγηση του κοινωνικοοικονομικού αντίκτυπου των μέτρων ενεργειακής αναβάθμισης αποτελεί μια σημαντική κατεύθυνση για μελλοντική έρευνα. Είναι κρίσιμη η διερεύνηση της προσβασιμότητας και της οικονομικής επιβάρυνσης αυτών των μέτρων για διαφορετικές κοινωνικές ομάδες, καθώς και η εξέταση της αποδοχής τους από τους ιδιοκτήτες και διαχειριστές κτιρίων. Με αυτόν τον τρόπο, θα είναι εφικτό να διαμορφωθούν πιο δίκαιες και προσιτές ενεργειακές πολιτικές που να ανταποκρίνονται στις ανάγκες όλων των πολιτών.

Η ανάπτυξη και εφαρμογή νέων τεχνολογιών αποτελεί επίσης μια πολλά υποσχόμενη προοπτική. Νέες τεχνολογίες, όπως τα έξυπνα ενεργειακά δίκτυα και οι λύσεις παρακολούθησης ενεργειακής κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο, μπορούν να ενισχύσουν την ενεργειακή αποδοτικότητα των κτιρίων και να επιτρέψουν μια πιο ακριβή και προσαρμοστική διαχείριση της ενέργειας. Ενσωματώνοντας αυτές τις τεχνολογίες, είναι δυνατόν να βελτιωθεί η παρακολούθηση και ο έλεγχος της κατανάλωσης ενέργειας, να μειωθεί το κόστος και να επιτευχθεί μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας.

Αντιμετωπίζοντας τους περιορισμούς της παρούσας έρευνας και βελτιώνοντας τις υφιστάμενες πολιτικές, μπορούμε να επιτύχουμε σημαντική πρόοδο προς μια πιο ενεργειακά αποδοτική και βιώσιμη κοινωνία. Με τις κατάλληλες στρατηγικές και επενδύσεις, τα κτίρια μπορούν να μετατραπούν σε ενεργειακά αποδοτικές και οικονομικά βιώσιμες μονάδες, υποστηρίζοντας τους εθνικούς και ευρωπαϊκούς στόχους για τη βιωσιμότητα και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Becerra, R. L., & Coello, C. A. C. (2006). Solving Hard Multiobjective Optimization Problems Using ϵ -Constraint with Cultured Differential Evolution. In T. P. Runarsson, H.-G. Beyer, E. Burke, J. J. Merelo-Guervós, L. D. Whitley, & X. Yao (Eds.), *Parallel Problem Solving from Nature—PPSN IX* (pp. 543–552). Springer. https://doi.org/10.1007/11844297_55
- Bootaki, B., Mahdavi, I., & Paydar, M. M. (2014). A hybrid GA-AUGMECON-Py method to solve a cubic cell formation problem considering different worker skills. *Computers & Industrial Engineering*, 75, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.05.022>
- Buildings Performance Institute Europe. (2021). *DEEP RENOVATION: SHIFTING FROM EXCEPTION TO STANDARD PRACTICE IN EU POLICY*.
- Burhenne, S. (2013). *Monte Carlo Based Uncertainty and Sensitivity Analysis for Building Performance Simulation* [PhD Thesis/Doctoral Dissertation]. Karlsruhe Institute for Technology.
- Cohon, J. L. (2004). *Multiobjective Programming and Planning*. Courier Corporation.
- Dascalaki, E. G., Kontoyiannidis, S., Balaras, C. A., & Droutsa, K. G. (2013). Energy certification of Hellenic buildings: First findings. *Energy and Buildings*, 65, 429–437. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.025>
- Ehrgott, M. (2006). *Multicriteria Optimization*. Springer Science & Business Media.
- European Commission. (2024, April 12). *Questions and Answers on the revised Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/en./qanda_24_1966/QANDA_24_1966_EN.pdf
- European Environment Agency. (2023). *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2021 and inventory report 2023* [Publication]. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/annual-european-union-greenhouse-gas-2>

- Forouli, A., Nikas, A., Van de Ven, D.-J., Sampedro, J., & Doukas, H. (2020). A multiple-uncertainty analysis framework for integrated assessment modelling of several sustainable development goals. *Environmental Modelling & Software*, 131, 104795.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104795>
- Forouli, A., Pagonis, A., Nikas, A., Koasidis, K., Xexakis, G., Koutsellis, T., Petkidis, C., & Doukas, H. (2022). AUGMECON-Py: A Python framework for multi-objective linear optimisation under uncertainty. *SoftwareX*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2022.101220>
- Frilingou, N., Koasidis, K., Spyridaki, N.-A., Nikas, A., Marinakis, V., & Doukas, H. (2024). Is it feasible to implement minimum energy performance standards (MEPS) for existing buildings in Greece? A cost-benefit evaluation. *Energy Policy*, 188, 114112.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114112>
- Fugaro, S., & Sgalambro, A. (2023). Advanced network connectivity features and zonal requirements in Covering Location problems. *Computers & Operations Research*, 159, 106307.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106307>
- Gkonis, N., Arsenopoulos, A., Stamatiou, A., & Doukas, H. (2020). Multi-perspective design of energy efficiency policies under the framework of national energy and climate action plans. *Energy Policy*, 140, 111401. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111401>
- Glasserman, P. (2003). *Monte Carlo Methods in Financial Engineering* (Vol. 53). Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-0-387-21617-1>
- Haimes, Y. Y., Lasdon, L. S., & Wiisner, D. A. (1971). *On a Bicriterion Formulation of the Problems of Integrated System Identification and System Optimization*.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/4308298>
- Helton, J. C. (1997). Uncertainty and sensitivity analysis in the presence of stochastic and subjective uncertainty. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 57(1–4), 3–76.
<https://doi.org/10.1080/00949659708811803>

- Helton, J. C., Johnson, J. D., Sallaberry, C. J., & Storlie, C. B. (2006). Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(10), 1175–1209. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.11.017>
- Jones, S., Lacey, P., & Walshe, T. (2009). A dynamic hydrological Monte Carlo simulation model to inform decision-making at Lake Toolibin, Western Australia. *Journal of Environmental Management*, 90(5), 1761–1769. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.027>
- Macdonald, I., & Strachan, P. (2001). Practical application of uncertainty analysis. *Energy and Buildings*, 33, 219–227. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00085-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00085-2)
- Mara, T. A., & Tarantola, S. (2008). Application of global sensitivity analysis of model output to building thermal simulations. *Building Simulation*, 1(4), 290–302. <https://doi.org/10.1007/s12273-008-8129-5>
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213(2), 455–465. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.03.037>
- Mavrotas, G., & Florios, K. (2013). An improved version of the augmented ϵ -constraint method (AUGMECON-Py2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 219(18), 9652–9669. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2013.03.002>
- Nikas, A., Fountoulakis, A., Forouli, A., & Doukas, H. (2022). A robust augmented ϵ -constraint method (AUGMECON-R) for finding exact solutions of multi-objective linear programming problems. *Operational Research*, 22(2), 1291–1332. <https://doi.org/10.1007/s12351-020-00574-6>
- Rubinstein, R. Y., & Kroese, D. P. (2016). *Simulation and the Monte Carlo Method*. John Wiley & Sons.
- Salleh, S. F., Roslan, M. E., Isa, A. M., Nair, M. F. B., & Salleh, S. S. (2018). The Impact of Minimum Energy Performance Standards (MEPS) Regulation on Electricity Saving in Malaysia. *IOP Conference*

- Series: Materials Science and Engineering*, 341(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/341/1/012022>
- Sonnenschein, J., Van Buskirk, R., Richter, J. L., & Dalhammar, C. (2019). Minimum energy performance standards for the 1.5 °C target: An effective complement to carbon pricing. *Energy Efficiency*, 12(2), 387–402. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9669-x>
- Statistics | Eurostat | Complete energy balances*. (2024). [Dataset].
https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_d_hhq__custom_9357902/default/table?lang=en%20
- Statistics | Eurostat | Electricity prices by type of user*. (2024). [Dataset].
https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00117/default/table?lang=en&category=t_nrg.t_nrg_indic
- Statistics | Eurostat | Gas prices by type of user*. (2024). [Dataset].
https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00118/default/table?lang=en&category=t_nrg.t_nrg_indic
- Steuer, R. E. (1986). *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application*. Wiley.
- Sturiale, A., Chicca, L., & Gerosa, S. (2017). Monte Carlo Analysis Goes Beyond Risk Management | PMI. *PM Network*, 31(10), 30–31.
- TABULA WebTool*. (2013). [Dataset]. <https://webtool.building-typology.eu/#bm>
- Ven, D.-J. van de, Nikas, A., Koasidis, K., Forouli, A., Cassetti, G., Chiodi, A., Gargiulo, M., Giarola, S., Köberle, A. C., Koutsellis, T., Mittal, S., Perdana, S., Vielle, M., Xexakis, G., Doukas, H., & Gambhir, A. (2022). COVID-19 recovery packages can benefit climate targets and clean energy jobs, but scale of impacts and optimal investment portfolios differ among major economies. *One Earth*, 5(9), 1042–1054. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.08.008>
- Yan, X., Gao, C., Song, M., & Rizwan, M. (2024). AUGMECON-Py2-based multi-objective optimization of virtual power plant considering economical and security operation of the distribution networks.

- Sustainable Energy, Grids and Networks*, 38, 101388.
<https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101388>
- Ελληνική Στατιστική Αρχή. (2011). *Στατιστικές—ΕΛΣΤΑΤ*. <https://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SAM05/2011>
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. (2002, December 16). *Οδηγία 2002/91/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 16ης Δεκεμβρίου 2002, για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων*.
<http://data.europa.eu/eli/dir/2002/91/oj/ell>
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. (2010, May 31). *Οδηγία 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 19ης Μαΐου 2010, για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (αναδιατύπωση)*.
<http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/2021-01-01/ell>
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. (2016). *EU Building Stock Observatory*.
https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/eu-building-stock-observatory_en
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. (2018, May 30). *Οδηγία (ΕΕ) 2018/844 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 30ής Μαΐου 2018, για την τροποποίηση της οδηγίας 2010/31/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων και της οδηγίας 2012/27/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση (Κείμενο που παρουσιάζει ενδιαφέρον για τον ΕΟΧ)*.
<http://data.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj/ell>
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. (2021a). *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS “Fit for 55”: Delivering the EU’s 2030 Climate Target on the way to climate neutrality*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0550>
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. (2021b). *Πρόταση για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (αναδιατύπωση)*.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=CELEX:52021PC0802>

Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. (2023, September 13). *Οδηγία—2023/1791—EN - EUR-Lex*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=CELEX:32023L1791>

Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. (2024, April 24). *Οδηγία (ΕΕ) 2024/1275 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 24ης Απριλίου 2024, για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, (αναδιατύπωση), (Κείμενο που παρουσιάζει ενδιαφέρον για τον ΕΟΧ)*. <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/ell>

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (CRES). (2020). *Analysis of the energy efficiency potentials in enterprises in Greece*.

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (CRES). (2021). *Energy Efficiency Trends and Policies in Greece*.

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. (2013). *PURSUANT TO ARTICLE 7(9) OF DIRECTIVE 2012/27/EU, OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, ON ENERGY EFFICIENCY, AMENDMENT OF DIRECTIVES 2009/125/EC AND 2010/30/EC AND REPEALING DIRECTIVES 2004/8/EC AND 2006/32/EC*.

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. (2019). *Εξοικονόμηση κατ' οίκον II»—Β' Κύκλος: Παρεμβάσεις*. <https://exoikonomisi-b.ypen.gr/parembaseis>

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. (2022). *ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΕΙΣ ΚΤΗΡΙΩΝ, ΣΘ ΚΑΙ ΣΚ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2022*. https://bpes.ypeka.gr/wp-content/uploads/2023_06_30_E%CE%A4%CE%97%CE%A3%CE%99%CE%91_%CE%95%CE%9A%CE%98%CE%95%CE%A3%CE%97_%CE%A3%CE%A4%CE%91%CE%A4%CE%99%CE%A3%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D_%CE%91%CE%A0%CE%9F%CE%A4%CE%95%CE%9B%CE%95%CE%A3%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%A9%CE%9D.pdf

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, & ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ. (2017). *Υ.Α. ΔΕΠΕΑ/οικ.178581/2017 (ΦΕΚ 2367/Β` 12.7.2017) | ΕΛΙΝΥΑΕ*. <https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/ya-depeaoik1785812017-fek-2367b-1272017>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. Φύλλα εισαγωγής δεδομένων οικιακού τομέα
2. Φύλλα εισαγωγής δεδομένων τριτογενούς τομέα
3. Αποτελέσματα οικιακού τομέα
4. Αποτελέσματα τριτογενούς τομέα