



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ

ΚΑΜΜΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Επιβλέπων καθηγητής: ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΙΩΑΝΝΗΣ

Συν επιβλέπων καθηγητής: ΜΑΝΑΡΙΩΤΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΠΑΤΡΑ

ΜΑΙΟΣ 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή/της φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο/η συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του/της συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του/της συγγραφέα/δημιουργού. Ο/Η συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Αξιολόγηση Τεχνικών Διαχείρισης Ενέργειας Σε Κτίρια.

Ιωάννης Καμμάς

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Ιωάννης Νικολάου

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής

Ιωάννης Μαναριώτης

Πάτρα, Μάιος 2026

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το επιστέγασμα μιας απαιτητικής αλλά και εξαιρετικά δημιουργικής ακαδημαϊκής διαδρομής στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Διαχείριση Τεχνικών Έργων» του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου.

Το έναυσμα για την ενασχόλησή μου με το συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο, την αξιολόγηση δηλαδή των τεχνικών διαχείρισης ενέργειας κτιρίων, πηγάζει άμεσα από την πολυετή επαγγελματική μου πορεία ως μηχανολόγος μηχανικός. Η καθημερινή τριβή με την ωρίμανση, τον σχεδιασμό και την επίβλεψη σύνθετων έργων από τη θέση του προϊσταμένου στο τμήμα μελετών, με έφερε αντιμέτωπο με μια θεμελιώδη πρόκληση.

Η επιτυχία μιας ενεργειακής αναβάθμισης δεν εξαρτάται μόνο από τη θεωρητική εξοικονόμηση πόρων, αλλά από την ικανότητα του μηχανικού να λαμβάνει ολιστικές, πολυκριτηριακές αποφάσεις σε πραγματικές συνθήκες. Η εργασία αυτή γεφυρώνει το χάσμα ανάμεσα στη θεωρητική έρευνα και την πρακτική εφαρμογή στη σύγχρονη κατασκευαστική αγορά και την τοπική αυτοδιοίκηση που υπηρετώ.

Η ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την πολύτιμη αρωγή και συμπαράσταση ανθρώπων που στάθηκαν δίπλα μου.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Ιωάννη Νικολάου, για την άρτια επιστημονική του καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους συναδέλφους μηχανικούς και τους συνεργάτες, οι οποίοι, παρά το βεβαρημένο τους πρόγραμμα, αφιέρωσαν τον χρόνο τους για να συμμετάσχουν στην πρωτογενή έρευνα μιας και η δική τους κρίση και τεχνογνωσία αποτέλεσαν τον κορμό του μαθηματικού μοντέλου που αναπτύχθηκε.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την ενθάρρυνσή της απέναντι στις απαιτήσεις της ταυτόχρονης άσκησης επαγγελματικών και ακαδημαϊκών καθηκόντων. Αποτέλεσαν για εμένα το ισχυρότερο κίνητρο για να φτάσω στο τέλος αυτής της διαδρομής. Τους αφιερώνω την παρούσα εργασία με βαθιά ευγνωμοσύνη

Περίληψη

Ο κτιριακός τομέας αποτελεί έναν από τους πλέον ενεργοβόρους κλάδους παγκοσμίως, καθιστώντας την ενεργειακή του αναβάθμιση κρίσιμη προτεραιότητα για την επίτευξη των σύγχρονων περιβαλλοντικών στόχων. Ωστόσο, κατά τη διαχείριση τεχνικών έργων μεγάλης κλίμακας, η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου αναβάθμισης συνιστά ένα εξαιρετικά σύνθετο πρόβλημα. Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό τη συστηματική αξιολόγηση και ιεράρχηση επιλεγμένων τεχνικών διαχείρισης ενέργειας κτιρίων, εξετάζοντάς τες όχι μόνο υπό το πρίσμα της θεωρητικής εξοικονόμησης, αλλά μέσα από τις ρεαλιστικές απαιτήσεις της κατασκευαστικής αγοράς.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, αναπτύχθηκε ένα υβριδικό μοντέλο Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων (MCDA), συνδυάζοντας την Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP) και τη Μέθοδο Προσέγγισης Ιδεατής Λύσης (TOPSIS). Μέσω πρωτογενούς ποσοτικής έρευνας (Expert Survey) σε δείγμα 21 εξειδικευμένων μηχανικών, αξιολογήθηκαν πέντε βασικές ομάδες παρεμβάσεων έναντι τεσσάρων κριτηρίων: Οικονομική Βιωσιμότητα, Ενεργειακή Απόδοση, Επεκτασιμότητα και Λειτουργική Ανθεκτικότητα.

Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η Οικονομική Βιωσιμότητα αποτελεί το κυρίαρχο κριτήριο λήψης αποφάσεων (με βάρος 46,2%). Στην τελική κατάταξη, η Αναβάθμιση του Ηλεκτρομηχανολογικού (Η/Μ) Εξοπλισμού αναδείχθηκε ως η απόλυτα βέλτιστη τεχνική, ακολουθούμενη από τα συστήματα Έξυπνου Ελέγχου (BEMS/IoT), αφήνοντας την παραδοσιακή Παθητική Θωράκιση στην τρίτη θέση. Η μεθοδολογική αυτή προσέγγιση παρέχει ένα δομημένο και αξιόπιστο εργαλείο λήψης αποφάσεων, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα στον σχεδιασμό και την ωρίμανση έργων σε δίκτυα τοπικής αυτοδιοίκησης ή σε ευρείας κλίμακας προγράμματα βιώσιμης ανάπτυξης.

Λέξεις – Κλειδιά

Διαχείριση Ενέργειας Κτιρίων, Διαχείριση Τεχνικών Έργων, Πολυκριτηριακή Ανάλυση (MCDA), AHP, TOPSIS, Ενεργειακή Αναβάθμιση.

Evaluation of Building Energy Management Techniques

Abstract

Ioannis Kammas

The building sector is one of the most energy-intensive industries worldwide, making its energy upgrade a critical priority for achieving modern environmental and climate goals. However, in large-scale technical project management, selecting the optimal retrofit method constitutes a highly complex problem. This master's thesis aims to systematically evaluate and prioritize the available building energy management techniques, examining them not only from the perspective of theoretical energy savings but also through the realistic operational and financial demands of the construction market.

To address this multi-dimensional problem, a hybrid Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) model was developed, combining the Analytic Hierarchy Process (AHP) with the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). Through primary quantitative research (Expert Survey) conducted on a sample of 21 specialized engineers and project managers, five main groups of energy interventions were evaluated against four structural criteria: Economic Viability, Energy Efficiency, Scalability, and Operational Resilience.

The results demonstrated that Economic Viability is the dominant decision-making criterion, accounting for a weight of 46.2%. In the final ranking, the Upgrade of Electromechanical (HVAC and Lighting) Equipment emerged as the absolute optimal technique, followed closely by Smart Control systems (BEMS/IoT), leaving traditional Passive Shielding (building envelope retrofitting) in third place. This methodological approach provides a structured, robust, and reliable decision-making tool, which can be directly applied to the planning and maturation of infrastructure projects in local government networks, as well as in large-scale sustainable development programs.

Keywords

Building Energy Management, Technical Project Management, Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA), AHP, TOPSIS, Energy Retrofit.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Abstract.....	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ	Error! Bookmark not defined.
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	xi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	xii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ	xiii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Το θεωρητικό υπόβαθρο και το αντικείμενο της έρευνας	1
1.2 Το πρόβλημα της ενεργειακής σπατάλης και της λήψης αποφάσεων.....	2
1.3 Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής εργασίας	2
1.4 Δομή της εργασίας	3
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ & ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	6
2.1 Το Θεσμικό και Κανονιστικό Πλαίσιο (Οδηγία EPBD κ.ά.).....	6
2.1.1 Η Ευρωπαϊκή Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (EPBD).....	6
2.1.2 Εθνικό Πλαίσιο και ΚΕΝΑΚ.....	7
2.1.3 Η σημασία του πλαισίου στη λήψη αποφάσεων	7
2.2 Παθητική Ενεργειακή Θωράκιση και Κέλυφος	7
2.2.1 Συμβατικές Τεχνικές Αναβάθμισης (Conventional Retrofit Measures).....	8
2.2.2 Καινοτόμες Τεχνικές και Αναδυόμενα Υλικά (Innovative Retrofit Measures).....	9
2.3 Αναβάθμιση Ηλεκτρομηχανολογικού Εξοπλισμού (HVAC & Φωτισμός)	13
2.3.1 Παρεμβάσεις στα Συστήματα HVAC.....	14
2.3.2 Παρεμβάσεις στα Συστήματα Φωτισμού	16
2.4 Τοπική Παραγωγή και Αποθήκευση Ενέργειας (Φωτοβολταϊκά, Μπαταρίες, V2B)	17
2.4.1 Τοπική Παραγωγή (Φωτοβολταϊκά και BIPV).....	17
2.4.2 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας (ESS)	17
2.4.3 Ηλεκτροκίνηση και Αλληλεπίδραση Κτιρίου-Οχήματος (V2B)	18
2.5 Συστήματα Έξυπνου Ελέγχου και Αυτοματισμού (BEMS, IoT).....	18
2.5.1 Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης Κτιρίων (BEMS).....	19
2.5.2 Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT)	19
2.6 Προηγμένη Διαχείριση και Αλληλεπίδραση με το Δίκτυο (GEBS, Digital Twins, AI).....	20
2.6.1 Τεχνητή Νοημοσύνη και Βαθιά Ενισχυτική Μάθηση (Deep Reinforcement Learning - DRL)	20

2.6.2	Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins).....	21
2.6.3	Διαδραστικά με το Δίκτυο Αποδοτικά Κτίρια (Grid-Interactive Efficient Buildings - GEBS) 21	
2.7	Συμπεράσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης.....	21
3	Μεθοδολογία Έρευνας	23
3.1	Η Πολυκριτηριακή Ανάλυση στη Διαχείριση Τεχνικών Έργων.....	23
3.2	Η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Μέθοδος AHP)	23
3.2.1	Δημιουργία Πίνακα Συγκρίσεων ανά Ζεύγη	24
3.2.2	Υπολογισμός Διανύσματος Βαρών	24
3.2.3	Έλεγχος Συνοχής (Consistency Check)	25
3.3	Η Μέθοδος Προσέγγισης Ιδεατής Λύσης (Μέθοδος TOPSIS).....	25
3.4	Το Υβριδικό Μοντέλο AHP-TOPSIS της Έρευνας	27
3.5	Καθορισμός των Κριτηρίων Αξιολόγησης	28
3.5.1	Οικονομική Βιωσιμότητα (K1).....	28
3.5.2	Ενεργειακή και Περιβαλλοντική Απόδοση (K2).....	29
3.5.3	Επεκτασιμότητα και Τυποποίηση (K3).....	29
3.5.4	Λειτουργική Ανθεκτικότητα και Επιχειρησιακή Συνέχεια (K4).....	29
3.6	Σχεδιασμός και Διεξαγωγή της Πρωτογενούς Έρευνας	29
4	Αποτελέσματα Έρευνας και Ανάλυση	31
4.1	Στοιχεία και Προφίλ Συμμετεχόντων (Ειδικών)	31
4.2	Εξαγωγή Βαρών των Κριτηρίων (Αποτελέσματα AHP)	33
4.3	Αξιολόγηση και Βαθμολογία Εναλλακτικών Τεχνικών (Αποτελέσματα TOPSIS)	33
4.4	Τελική Κατάταξη Τεχνικών Αναβάθμισης	34
5	Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	36
5.1	Σύνοψη της Έρευνας	36
5.2	Βασικά Συμπεράσματα.....	36
5.2.1	Η Κυριαρχία της Οικονομικής Βιωσιμότητας.....	36
5.2.2	Η Αναβάθμιση Η/Μ Εξοπλισμού ως Βέλτιστη Λύση.....	37
5.2.3	Η Άνοδος των Έξυπνων Συστημάτων έναντι των Παραδοσιακών Παρεμβάσεων	37
5.2.4	Η Πρώιμη Φάση της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI).....	37
5.3	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	38
5.3.1	Εξειδίκευση σε Συγκεκριμένα Χαρτοφυλάκια Κτιρίων.....	38
5.3.2	Ενσωμάτωση Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA)	38
5.3.3	Διερεύνηση της Ετοιμότητας για Διαδραστικά Κτίρια (GEBS).....	38
6	Βιβλιογραφία	39

7	Παραρτήματα	42
7.1	Παράρτημα Α: Το Ερωτηματολόγιο της Έρευνας?.....	42
7.2	Παράρτημα Β: Αναλυτικοί Πίνακες Υπολογισμών (Excel tables)?.....	42

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1 Διάγραμμα Ροής προτεινόμενου υβριδικού μοντέλου AHP-TOPSIS.....	5
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2 Στρατηγικές εξοικονόμησης ενέργειας στη διαχείριση ενέργειας κτιρίων. .	15
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3 Ειδικότητες Μηχανικών	32
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4 Έτη Εμπειρίας	32
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5 Απεικόνιση τελικής κατάταξης.....	35

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<i>Πίνακας Β.1 — Συγκεντρωτικός πίνακας συγκρίσεων ανά ζεύγη (Γεωμετρικός Μέσος των 21 αξιολογήσεων).....</i>	<i>51</i>
Πίνακας Β. 2 — Κανονικοποιημένος πίνακας και διάνυσμα βαρών (w)	51
Πίνακας Β. 3 — Έλεγχος συνοχής του συγκεντρωτικού πίνακα ΑΗΡ.....	52
Πίνακας Β. 4 — Αρχικός πίνακας απόφασης (μέσοι όροι βαθμολογιών ειδικών, n = 21).....	53
Πίνακας Β. 5 — Κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης (rij)	53
Πίνακας Β.6 — Σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας (vij)	54
Πίνακας Β.7 — Θετική (PIS) και Αρνητική (NIS) Ιδεατή Λύση ανά κριτήριο	54
Πίνακας Β.8 — Ευκλείδειες αποστάσεις, Δείκτης Σχετικής Εγγύτητας (C_i) και τελική κατάταξη	55

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1 Κάψουλες Υλικών Αλλαγής Φάσης (PCM) ενσωματωμένες σε δομικά υλικά. ...	10
Εικόνα 2-2 Παράδειγμα εφαρμογής αεροτζέλ σε σύστημα υαλοπινάκων	11
Εικόνα 2-3 Εγκατάσταση προκατασκευασμένου θερμομονωτικού στοιχείου (EPS ενσωματωμένο μεταξύ δύο στρώσεων TRM) σε έργο ενεργειακής αναβάθμισης στην Ιταλία (Kamel & Memari, 2022).	12
Εικόνα 7-1 Ειδικότητα	44
Εικόνα 7-2 Έτη εμπειρίας	44
Εικόνα 7-3 Σύγκριση Κριτηρίων ανά Ζεύγη	45
Εικόνα 7-4 Επιλογή μεθόδου	45
Εικόνα 7-5 Βαθμολογία τεχνικών	46
Εικόνα 7-6 Αξιολόγηση ενεργειακής απόδοσης	47
Εικόνα 7-7 Αξιολόγηση επεκτασιμότητας	48
Εικόνα 7-8 Αξιολόγηση λειτουργικής ανθεκτικότητας	49

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

AHP: Analytic Hierarchy Process

APSC&VU TU: Advanced Passive Solar Collectors with Ventilation Units

BEMS: Building Energy Management Systems

BESS: Battery Energy Storage Systems

BIPV: Building-Integrated Photovoltaics

CAPEX: Capital Expenditure

CI: Consistency Index

CR: Consistency Ratio

DCV: Demand Control Ventilation

DRL: Deep Reinforcement Learning

DSM: Demand Side Management

EPBD: Energy Performance of Buildings Directive

EPS: Expanded Polystyrene

ERV: Energy Recovery Ventilators

ESS: Energy Storage Systems

ETICS: External Thermal Insulation Composite Systems

ETMMS: Energy, Thermal and Moisture Management Systems

EV: Electric Vehicle

FDD: Fault Detection and Diagnosis

GEBs: Grid-Interactive Efficient Buildings

GWP-Med: Global Water Partnership - Mediterranean

HVAC: Heating, Ventilation, and Air Conditioning

IoT: Internet of Things

LCA: Life Cycle Assessment

LCCA: Life Cycle Cost Analysis

MCDA: Multi-Criteria Decision Analysis

MEEFS: Multi-functional Energy-Efficient Façade Systems

MPC: Model Predictive Control

NIS: Negative Ideal Solution

nZEB: nearly Zero Energy Buildings

OPEX: Operational Expenditure

PCM: Phase Change Materials

PIR: Passive Infrared

PIS: Positive Ideal Solution

RI: Random Index

ROI: Return on Investment

SGPVTM: Single-channel Thermal Photovoltaic Models

SRI: Smart Readiness Indicator / Solar Reflectance Index

TES: Thermal Energy Storage

TOPSIS: Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

TRM: Textile Reinforced Mortar

V2B: Vehicle-to-Building

VFD: Variable Frequency Drive

XPS: Extruded Polystyrene

ZEB: Zero Emission Buildings

ΚΕΝΑΚ: Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων

ΠΕΑ: Πιστοποιητικό Ενεργειακής Απόδοσης

ΤΕΕ: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας

ΤΟΤΕΕ: Τεχνικές Οδηγίες του ΤΕΕ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Το θεωρητικό υπόβαθρο και το αντικείμενο της έρευνας

Η παγκόσμια κοινότητα αντιμετωπίζει σήμερα μια διττή πρόκληση. Την ανάγκη για ενεργειακή ασφάλεια σε συνδυασμό με την επιτακτική απαίτηση για μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Σε αυτό το πλαίσιο, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης δεν αποτελεί απλώς μια τεχνική επιλογή, αλλά μια στρατηγική προτεραιότητα για τη βιώσιμη ανάπτυξη.

Στον ευρωπαϊκό χώρο, ο κτιριακός τομέας αναδεικνύεται στον πλέον κρίσιμο παράγοντα κατανάλωσης πόρων. Σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και την αναθεωρημένη Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (EPBD), τα κτίρια ευθύνονται για περίπου το 40% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας και το 36% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (European Commission, 2024). Το ποσοστό αυτό καθιστά τον κτιριακό τομέα τον μεγαλύτερο καταναλωτή ενέργειας, ξεπερνώντας ακόμη και τους τομείς των μεταφορών και της βιομηχανίας.

Η υψηλή αυτή κατανάλωση οφείλεται κυρίως στη λειτουργία συστημάτων θέρμανσης, ψύξης, αερισμού και φωτισμού, τα οποία είναι απαραίτητα για τη διασφάλιση της άνεσης των χρηστών. Ωστόσο, ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας σπαταλάται λόγω της παλαιότητας του κτιριακού αποθέματος, της ελλιπούς μόνωσης, αλλά κυρίως λόγω της απουσίας σύγχρονων συστημάτων ελέγχου και διαχείρισης. Πολλά κτίρια, ιδιαίτερα του δημοσίου ή της τοπικής αυτοδιοίκησης, εξακολουθούν να λειτουργούν με παρωχημένες στρατηγικές.

Η ενσωμάτωση Τεχνικών Διαχείρισης Ενέργειας Κτιρίων (Building Energy Management Techniques) εμφανίζεται ως η πλέον αποδοτική λύση. Οι τεχνικές αυτές πλέον καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, ξεκινώντας από την παθητική θωράκιση και την αναβάθμιση του βασικού Η/Μ εξοπλισμού, φτάνοντας έως την εγκατάσταση έξυπνων αισθητήρων (IoT) και την εφαρμογή προηγμένων αλγορίθμων Τεχνητής Νοημοσύνης (AI). Συνεπώς, η αξιολόγηση και η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής αποτελεί κρίσιμο ζητούμενο για τον σύγχρονο μηχανικό και τον διαχειριστή τεχνικών έργων.

1.2 Το πρόβλημα της ενεργειακής σπατάλης και της λήψης αποφάσεων

Παρά την ταχεία εξέλιξη των τεχνολογιών εξοικονόμησης, παρατηρείται συχνά μια σημαντική απόκλιση μεταξύ της σχεδιαζόμενης και της πραγματικής ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων. Το φαινόμενο αυτό, γνωστό ως «Χάσμα Ενεργειακής Απόδοσης» (Energy Performance Gap), οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στον αναποτελεσματικό τρόπο λειτουργίας και διαχείρισης των εγκαταστάσεων κατά τη φάση χρήσης του κτιρίου.

Το πρόβλημα δεν εστιάζεται πλέον στην έλλειψη τεχνολογικών λύσεων, αλλά στην υπερπροσφορά και την πολυπλοκότητά τους. Σήμερα, καλούμαστε να επιλέξουμε ανάμεσα σε μια πληθώρα τεχνικών. Η αφθονία αυτή δημιουργεί ένα σύνθετο πρόβλημα λήψης αποφάσεων (Project Management). Οι πιο προηγμένες τεχνικές υπόσχονται μεν υψηλότερη εξοικονόμηση, αλλά συχνά συνοδεύονται από υψηλό κόστος αρχικής επένδυσης (CAPEX) και αυξημένες απαιτήσεις συντήρησης.

Συνεπώς, το ερευνητικό πρόβλημα που ανακύπτει είναι η απουσία ενός συστηματικού και αντικειμενικού πλαισίου αξιολόγησης που να ιεραρχεί αυτές τις τεχνικές υπό ρεαλιστικές συνθήκες. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας δεν μπορεί να βασίζεται μόνο στο ενεργειακό κέρδος, αλλά πρέπει να συνυπολογίζει πολυδιάστατα κριτήρια, όπως την ευκολία εγκατάστασης χωρίς διακοπή της λειτουργίας του κτιρίου, τη διαλειτουργικότητα και την ικανότητα αναπαραγωγής της λύσης σε μεγάλη κλίμακα.

1.3 Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής εργασίας

Ο κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή ενός ολοκληρωμένου πλαισίου αξιολόγησης για την ιεράρχηση των Τεχνικών Διαχείρισης Ενέργειας Κτιρίων. Μέσω της χρήσης της υβριδικής μεθόδου Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων AHP-TOPSIS, η εργασία επιδιώκει να προσφέρει ένα εργαλείο που θα βοηθά τους διαχειριστές έργων να επιλέγουν τη βέλτιστη τεχνική λύση, γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ ακαδημαϊκής θεωρίας και τεχνικής πρακτικής. Ενσωματώνοντας δείκτες και εμπειρίες από την υλοποίηση απαιτητικών προγραμμάτων (όπως οι παρεμβάσεις του GWP-Med), η προσέγγιση εγγυάται τον ρεαλισμό των αποτελεσμάτων.

Για την επίτευξη του παραπάνω σκοπού, τίθενται οι ακόλουθοι επιμέρους ερευνητικοί στόχοι:

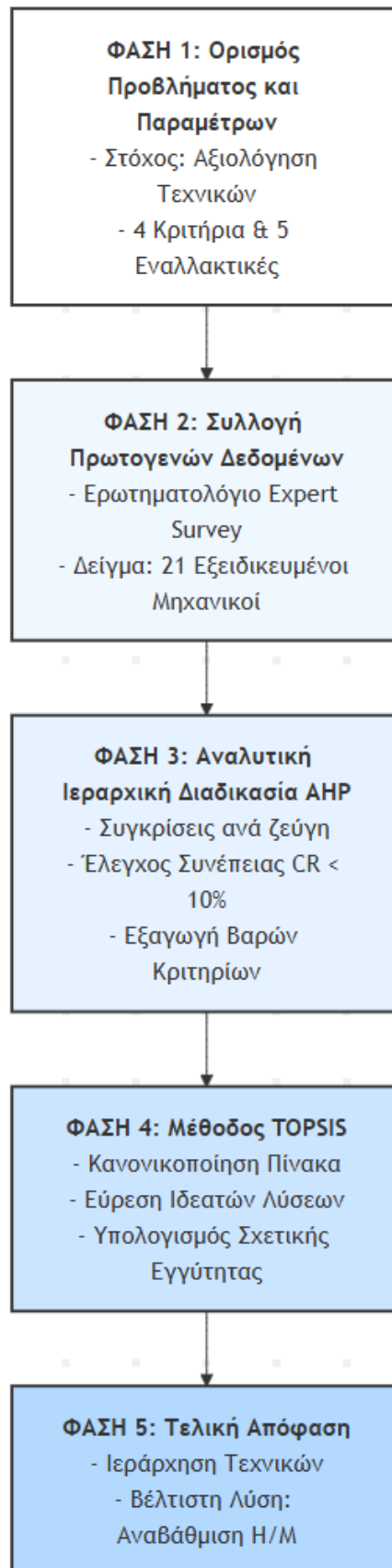
- Συστηματική καταγραφή τεχνικών: Βιβλιογραφική ανασκόπηση διεξοδικά για τον εντοπισμό 5 βασικών ομάδων τεχνικών που εφαρμόζονται σε κτίρια (Παθητική θωράκιση, Αναβάθμιση Η/Μ, Τοπική παραγωγή/αποθήκευση ενέργειας, Έξυπνος έλεγχος, Προηγμένη διαχείριση με AI).
- Προσδιορισμός κριτηρίων αξιολόγησης: Καθορισμός των κρίσιμων παραμέτρων (Οικονομική Βιωσιμότητα, Ενεργειακή/Περιβαλλοντική Απόδοση, Επεκτασιμότητα, Λειτουργική Ανθεκτικότητα).
- Ανάπτυξη μοντέλου αξιολόγησης: Δόμηση του προβλήματος με τη χρήση της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP) για τον προσδιορισμό των βαρών των κριτηρίων.
- Ενσωμάτωση της γνώσης ειδικών: Συλλογή δεδομένων από έμπειρους μηχανικούς του κλάδου για τη διασφάλιση της πρακτικής εφαρμοσιμότητας.
- Συγκριτική αξιολόγηση και κατάταξη: Βαθμολόγηση των εναλλακτικών τεχνικών μέσω της μεθόδου TOPSIS, με στόχο την ανάδειξη της βέλτιστης λύσης (βλέπε **Error! Reference source not found.**).

1.4 Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε πέντε διακριτά κεφάλαια

- Στο πρώτο κεφάλαιο (Εισαγωγή) παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο, αναλύεται το πρόβλημα της επιλογής κατάλληλων τεχνικών διαχείρισης και ορίζονται ο σκοπός και οι στόχοι της έρευνας.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση. Παρουσιάζονται αναλυτικά συγκεκριμένες σύγχρονες Τεχνικές Διαχείρισης Ενέργειας Κτιρίων, από τα συμβατικά συστήματα έως τα Grid-Interactive κτίρια.
- Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία της έρευνας. Περιγράφεται η θεωρητική βάση του υβριδικού μοντέλου AHP-TOPSIS και παρουσιάζεται ο σχεδιασμός της εμπειρικής έρευνας και του ερωτηματολογίου.

- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα. Περιλαμβάνεται η επεξεργασία των απαντήσεων των ειδικών, ο υπολογισμός των βαρών των κριτηρίων και η τελική κατάταξη των εξεταζόμενων τεχνικών.
- Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα, γίνεται συζήτηση των ευρημάτων σε σχέση με την πρακτική εφαρμογή τους στη διαχείριση έργων και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική μελέτη.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1 Διάγραμμα Ροής προτεινόμενου υβριδικού μοντέλου AHP-TOPSIS

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ & ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Το Θεσμικό και Κανονιστικό Πλαίσιο (Οδηγία EPBD κ.ά.)

Η μετάβαση του κτιριακού αποθέματος προς την κλιματική ουδετερότητα δεν αποτελεί απλώς μια τεχνολογική τάση, αλλά μια αυστηρά καθοδηγούμενη διαδικασία από το ευρωπαϊκό και εθνικό κανονιστικό πλαίσιο. Το πλαίσιο αυτό διαμορφώνει τις στρατηγικές προτεραιότητες, επιβάλλει ελάχιστες απαιτήσεις απόδοσης και παρέχει τα χρηματοδοτικά κίνητρα για την υλοποίηση επεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας.

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

Μελετώντας τις ευρωπαϊκές οδηγίες που έχουν εκδοθεί έως τώρα, βλέπουμε ότι ο ακρογωνιαίος λίθος της ευρωπαϊκής πολιτικής είναι η Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (Energy Performance of Buildings Directive - EPBD). Ήδη από τις προηγούμενες εκδόσεις της (όπως η EPBD 2010/31/EE), η Οδηγία εισήγαγε την έννοια των Κτιρίων Σχεδόν Μηδενικής Κατανάλωσης Ενέργειας (nearly Zero Energy Buildings, nZEB), θέτοντας τα θεμέλια για τις σύγχρονες ανακαινίσεις.

Με την πρόσφατη αναθεώρησή της στο πλαίσιο του πακέτου "Fit for 55" και της στρατηγικής "Clean Energy for all Europeans", η οδηγία έγινε πολύ πιο αυστηρή. Τα βασικά στοιχεία που επηρεάζουν άμεσα τις τεχνικές διαχείρισης που θα αναλυθούν στα επόμενα υποκεφάλαια είναι:

- Η μετάβαση από τα NZEB στα ZEB (Zero Emission Buildings): Από το 2030, όλα τα νέα κτίρια, καθώς και όσα υφίστανται ριζική ανακαίνιση, θα πρέπει να είναι Κτίρια Μηδενικών Εκπομπών, μηδενίζοντας πρακτικά τη χρήση ορυκτών καυσίμων στον χώρο.
- Δείκτης Ευφυούς Ετοιμότητας (Smart Readiness Indicator - SRI): Εισάγεται ένας νέος δείκτης που αξιολογεί την ικανότητα του κτιρίου να χρησιμοποιεί τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών (ΤΠΕ) για την προσαρμογή της λειτουργίας του στις ανάγκες του ενοίκου και του δικτύου (όπως τα συστήματα BEMS και τα Grid-Interactive κτίρια).

- Ηλεκτροκίνηση και Δίκτυα: Η Οδηγία επιβάλλει την ενσωμάτωση υποδομών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (EV) και προετοιμάζει το έδαφος για τεχνολογίες Vehicle-to-Building (V2B), αντιμετωπίζοντας το κτίριο ως κόμβο ενέργειας.

2.1.2 Εθνικό Πλαίσιο και ΚΕΝΑΚ

Στην Ελλάδα, η ευρωπαϊκή νομοθεσία έχει εναρμονιστεί μέσω του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (ΚΕΝΑΚ). Ο ΚΕΝΑΚ, σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες Τεχνικές Οδηγίες του ΤΕΕ (ΤΟΤΕΕ), καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις για τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό (π.χ. συντελεστές θερμοπερατότητας U) και τα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα. Αποτελεί τον βασικό "οδηγό" για κάθε μελετητή και διαχειριστή έργου, καθώς από αυτόν εξαρτάται η έκδοση των Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ) και η ένταξη των κτιρίων σε χρηματοδοτικά προγράμματα (π.χ. «Ηλέκτρα», «Εξοικονομώ» κ.α.).

2.1.3 Η σημασία του πλαισίου στη λήψη αποφάσεων

Το σύγχρονο αυτό ρυθμιστικό περιβάλλον καθιστά σαφές ότι οι "απλές" παρεμβάσεις (όπως η μεμονωμένη αλλαγή ενός λέβητα) δεν αρκούν πλέον. Απαιτείται μια ολιστική, πολυκριτηριακή προσέγγιση που να συνδυάζει τον περιορισμό των αναγκών (παθητικά συστήματα) με την υψηλή απόδοση (H/M συστήματα) και τον έξυπνο έλεγχο.

Όπως επισημαίνεται στη σύγχρονη βιβλιογραφία, οι στρατηγικές αναβάθμισης πρέπει πλέον να εξετάζονται και υπό το πρίσμα του συνολικού κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment - LCA), λαμβάνοντας υπόψη την ενσωματωμένη ενέργεια (embodied energy) των υλικών και των συστημάτων που επιλέγονται.

Στις επόμενες ενότητες αναλύονται οι τεχνικές διαχείρισης και αναβάθμισης που επιστρατεύει σήμερα η μηχανική επιστήμη προκειμένου να ανταποκριθεί σε αυτές τις αυστηρές κανονιστικές απαιτήσεις.

2.2 Παθητική Ενεργειακή Θωράκιση και Κέλυφος

Το κέλυφος αποτελεί το φυσικό διαχωριστικό όριο μεταξύ του εσωτερικού κλιματιζόμενου και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Στη διαχείριση ενέργειας κτιρίων, η παθητική θωράκιση

στοχεύει στον έλεγχο των τριών βασικών μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας: την αγωγιμότητα, τη συναγωγή και την ακτινοβολία. Οι περισσότερες τεχνικές περιορίζουν την απώλεια ενέργειας μέσω αγωγιμότητας, χρησιμοποιώντας υλικά με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα ή υψηλή θερμική αδράνεια. Αντίθετα, τεχνικές όπως η βελτίωση της αεροστεγανότητας στοχεύουν στον περιορισμό των απωλειών λόγω συναγωγής. Η σύγχρονη βιβλιογραφία διακρίνει τις παρεμβάσεις στο κέλυφος σε δύο βασικές κατηγορίες: τις συμβατικές και τις καινοτόμες τεχνολογίες (Kamel & Memari, 2022).

2.2.1 Συμβατικές Τεχνικές Αναβάθμισης (Conventional Retrofit Measures)

Στη συγκεκριμένη κατηγορία ανήκουν δοκιμασμένες και ευρέως διαθέσιμες λύσεις της αγοράς, οι οποίες επικεντρώνονται στην προσθήκη θερμικής αντίστασης και στον έλεγχο της ηλιακής ακτινοβολίας.

Θερμομόνωση Αδιαφανών Στοιχείων

Η χρήση συμβατικών μονωτικών υλικών όπως ο υαλοβάμβακας, η πολουρεθάνη, ο πετροβάμβακας, η διογκωμένη (EPS) και η εξηλασμένη (XPS) πολυστερίνη αποτελεί τον πυρήνα των αναβαθμίσεων. Αυτά τα υλικά παρουσιάζουν συνήθως θερμική αγωγιμότητα που κυμαίνεται μεταξύ 0.030 και 0.054 W/mK. Εφαρμόζονται με διάφορες μορφές (π.χ. άκαμπτες πλάκες, ψεκαζόμενος αφρός) και συχνά ενσωματώνονται σε Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης (ETICS). Σε εφαρμογές όπως τα συστήματα διαχείρισης θερμότητας και υγρασίας (ETMMS), η μόνωση συνδυάζεται με πρόσθετες μεμβράνες για τον έλεγχο του αέρα, του νερού και των υδρατμών (Kamel & Memari, 2022).

Έλεγχος Αεροδιαρροών (Air Sealing)

Ο περιορισμός της ανεξέλεγκτης διείσδυσης αέρα μειώνει δραστικά τη μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής. Οι μελέτες ευαισθησίας αποδεικνύουν ότι η σφράγιση των αεροδιαρροών αποτελεί την παρέμβαση με τη μεγαλύτερη επιρροή στην εξοικονόμηση ενέργειας, τόσο σε θερμά όσο και σε πολύ ψυχρά κλίματα (Kamel & Memari, 2022).

Δροσερές Οροφές (Cool Roofs)

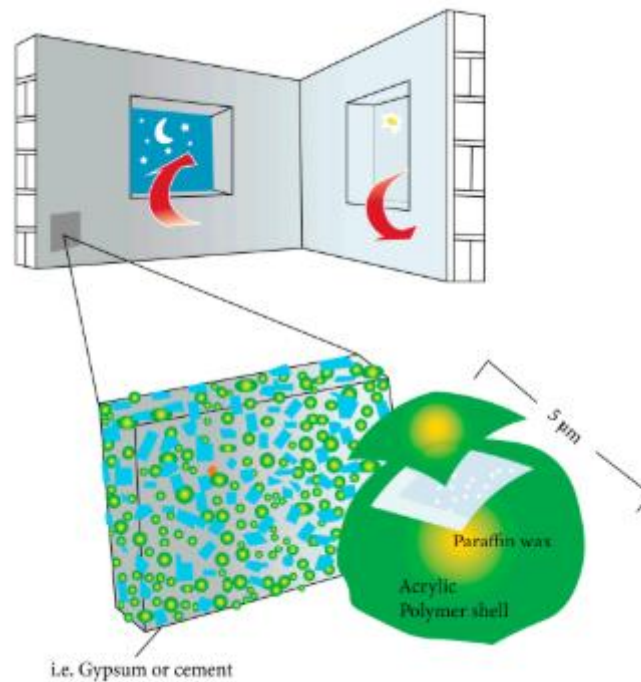
Επικεντρώνονται στον έλεγχο της μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Αποτελούν ιδανική επιλογή για θερμά κλίματα, καθώς χρησιμοποιούν επιστρώσεις υψηλής ανακλαστικότητας (όπως μετρείται από τον δείκτη SRI), μειώνοντας τις επιφανειακές θερμοκρασίες έως και 24°C σε σχέση με τις συμβατικές οροφές (Kamel & Memari, 2022).

2.2.2 Καινοτόμες Τεχνικές και Αναδυόμενα Υλικά (Innovative Retrofit Measures)

Σύμφωνα με όσα είπαν οι Kamel & Memari η αυξανόμενη ανάγκη για ριζικές ανακαινίσεις, σε συνδυασμό με τον περιορισμένο χώρο, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη και εφαρμογή προηγμένων υλικών νανοτεχνολογίας και ολοκληρωμένων συστημάτων (Kamel & Memari, 2022).

Υλικά Αλλαγής Φάσης (Phase Change Materials - PCMs)

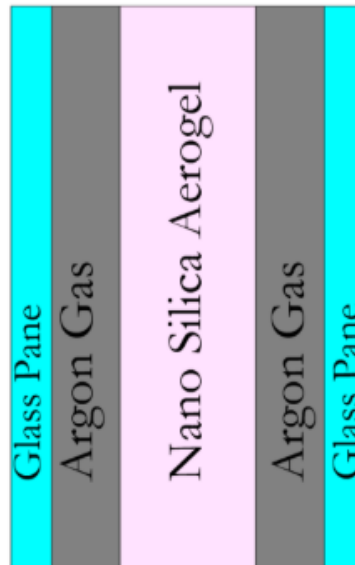
Διαθέτουν υψηλή θερμική αδράνεια και ενεργοποιούνται όταν η θερμοκρασία του χώρου φτάσει σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο (συνήθως 23–26°C). Απορροφούν θερμότητα αλλάζοντας φάση (π.χ. από στερεό σε υγρό) κατά τη διάρκεια της ημέρας και την απελευθερώνουν τη νύχτα. Τα PCMs, όπως η παραφίνη ή τα άλατα, μπορούν να μικρο-ενθυλακωθούν (micro-capsules) σε συνήθη δομικά υλικά όπως γυψοσανίδες, επιχρίσματα, ακόμη και ακρυλικά χρώματα (Kamel & Memari, 2022).



Εικόνα 2-1 Κάψουλες Υλικών Αλλαγής Φάσης (PCM) ενσωματωμένες σε δομικά υλικά.

Αεροζέλ (Aerogel)

Πρόκειται για νανο-υλικά (κλίμακας 1-100 nm), συνήθως με βάση το πυρίτιο (silica-based), τα οποία προσφέρουν κορυφαία θερμική αντίσταση. Η θερμική τους αγωγιμότητα αγγίζει τα 0.016-0.03 W/mK, υπερτερώντας σημαντικά έναντι των συμβατικών μονωτικών όπως η πολυστερίνη. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε περιπτώσεις όπου υπάρχει αυστηρός περιορισμός στο πάχος της μόνωσης (π.χ. σε ιστορικά κτίρια), ενώ μπορούν να ενσωματωθούν και σε διαφανή στοιχεία, μειώνοντας τα ψυκτικά και θερμικά φορτία των παραθύρων έως και 80% (Kamel & Memari, 2022).



Εικόνα 2-2 Παράδειγμα εφαρμογής αεροτζέλ σε σύστημα υαλοπινάκων

Προκατασκευασμένα και Ολοκληρωμένα Συστήματα (Integrated Systems)

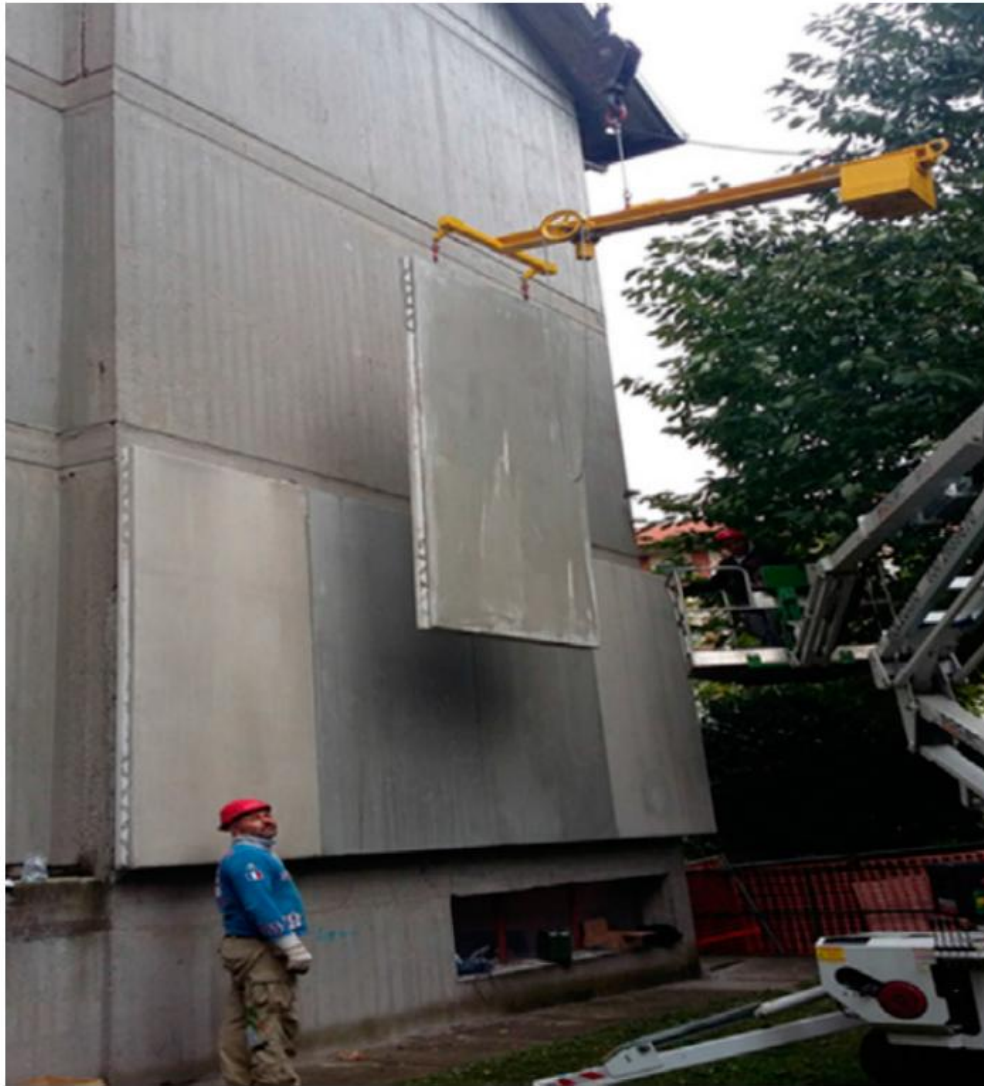
Στην πρόσφατη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η σύγχρονη τάση στις ενεργειακές αναβαθμίσεις κατευθύνεται προς τα προκατασκευασμένα (precast) στοιχεία και τα αρθρωτά (modular) συστήματα, τα οποία συνδυάζουν με καινοτόμο τρόπο τόσο συμβατικά όσο και προηγμένα υλικά. Η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων μειώνει δραστικά τον χρόνο και το κόστος εγκατάστασης, ενώ παράλληλα διασφαλίζει τον αυστηρό ποιοτικό έλεγχο, την ενσωμάτωση προβλέψεων για τη διαχείριση της υγρασίας και τον περιορισμό της όχλησης (downtime) του κτιρίου (Kamel & Memari, 2022).

Οι κυριότερες τεχνολογίες ολοκληρωμένων συστημάτων που εφαρμόζονται στο κέλυφος περιλαμβάνουν:

- **Προκατασκευασμένα Πάνελ Πολλαπλών Στρώσεων:**

Αναπτύσσονται καινοτόμα αρθρωτά συστήματα πάνελ που ενσωματώνουν ταυτόχρονα θερμικά και δομικά πλεονεκτήματα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα πάνελ που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων (όπως το "Envelope Approach") για πολυώροφα κτίρια, τα οποία περιλαμβάνουν είτε μονή στρώση εξηλασμένης πολυστερίνης (XPS) με τελικό επίχρισμα, είτε σύνθετα πάνελ διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) επικαλυμμένα και στις δύο πλευρές με κονίαμα

ενισχυμένο με υαλόπλεγμα (Textile Reinforced Mortar - TRM) (Kamel & Memari, 2022). Η τοποθέτησή τους γίνεται εξωτερικά με χρήση γερανοφόρου οχήματος, προσφέροντας εξαιρετική ταχύτητα υλοποίησης.



Εικόνα 2-3 Εγκατάσταση προκατασκευασμένου θερμομονωτικού στοιχείου (EPS ενσωματωμένο μεταξύ δύο στρώσεων TRM) σε έργο ενεργειακής αναβάθμισης στην Ιταλία (Kamel & Memari, 2022).

- **Πολυλειτουργικά Ενεργειακά Συστήματα Πρόσοψης (Multi-functional Energy-Efficient Façade Systems - MEEFS):**

Πρόκειται για προηγμένα συστήματα προσόψεων που δεν περιορίζονται στην παθητική μόνωση. Μπορούν να ενσωματώνουν Προηγμένους Παθητικούς Ηλιακούς Συλλέκτες

με Μονάδες Αερισμού (APSC&VU TU) ή τεχνολογίες απορρόφησης ενέργειας βασισμένες σε υλικά αλλαγής φάσης (PCM) για αυξημένη θερμική αποθήκευση (Kamel & Memari, 2022).

- **Ενσωμάτωση Φωτοβολταϊκών στο Κέλυφος (BIPV & SGPVTM):**

Σε περιπτώσεις όπου ο διαθέσιμος χώρος της οροφής είναι ανεπαρκής (π.χ. σε πολυκατοικίες), τα Σύνθετα Συστήματα Εξωτερικής Θερμομόνωσης (ETICS), τα οποία χρησιμοποιούν πετροβάμβακα ή EPS συνδυάζονται απευθείας με συστήματα Building Integrated Photovoltaics (BIPV) πάνω στις τυφλές όψεις του κτιρίου. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται προκατασκευασμένα στοιχεία όπως τα Θερμικά Φωτοβολταϊκά Μοντέλα Μονού Καναλιού (SGPVTM), τα οποία διαθέτουν ενσωματωμένο κανάλι αερισμού στο πίσω μέρος τους για να αποτρέπεται η υπερθέρμανση που μειώνει την απόδοση των κυψελών (Kamel & Memari, 2022).

- **Προσόψεις Διπλού Κελύφους (Double-Skin Facades):** Αποτελούν μια καινοτόμο παρέμβαση, συχνά σε κτίρια γραφείων ή δημοσίων υπηρεσιών, όπου προστίθεται μια δεύτερη, εξωτερική γυάλινη επιφάνεια πάνω από την υφιστάμενη διαφανή πρόσοψη. Το κενό που δημιουργείται μεταξύ των δύο επιφανειών λειτουργεί ως θερμομονωτικό στρώμα το οποίο θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία τον χειμώνα, ενώ το καλοκαίρι μπορεί να αερίζεται φυσικά ή μηχανικά (με ανοιγόμενες περσίδες) για την αποφυγή υπερθέρμανσης (Kamel & Memari, 2022). Για τη βελτιστοποίηση αυτών των συστημάτων, συχνά ενσωματώνονται στο διάκενο δυναμικά συστήματα σκίασης.

2.3 Αναβάθμιση Ηλεκτρομηχανολογικού Εξοπλισμού (HVAC & Φωτισμός)

Τα συστήματα Θέρμανσης, Αερισμού και Κλιματισμού (HVAC) σε συνδυασμό με τα συστήματα φωτισμού αποτελούν την «καρδιά» της ενεργειακής κατανάλωσης ενός κτιρίου. Όπως επισημαίνεται στην μελέτη του ο Amjath et al. (2021), τα συστήματα HVAC ευθύνονται συνήθως για το 51% της συνολικής κατανάλωσης, ενώ ο φωτισμός για το 25%. Συνδυαστικά, τα δύο αυτά υποσυστήματα καταναλώνουν περίπου τα τρία τέταρτα (75%) της συνολικής ενέργειας. Κατά συνέπεια, η στοχευμένη αναβάθμισή τους αποτελεί την πιο άμεση και αποδοτική στρατηγική ενεργειακής εξοικονόμησης.

2.3.1 Παρεμβάσεις στα Συστήματα HVAC

Η αναβάθμιση των συστημάτων κλιματισμού και αερισμού μπορεί να υλοποιηθεί τόσο σε επίπεδο καθαρού εξοπλισμού όσο και σε επίπεδο στρατηγικών ελέγχου.

Εγκατάσταση Μετατροπέων Μεταβλητής Συχνότητας (VFD)

Στο σύγγραμμα του Amjath αναφέρει ότι οι ηλεκτροκινητήρες συνήθως λειτουργούν σε σταθερή, πλήρη ταχύτητα, ενώ τα συστήματα HVAC κατά κανόνα λειτουργούν υπό συνθήκες μερικού φορτίου (part-load). Η χρήση συστημάτων VFD επιτρέπει την προσαρμογή της ταχύτητας του κινητήρα ακριβώς στις απαιτήσεις του φορτίου, εξαλείφοντας την άσκοπη σπατάλη ενέργειας.

Συστήματα Ανάκτησης Ενέργειας (ERV) και Ελεύθερη Ψύξη (Free Cooling)

Τονίζεται η σημασία των Εναλλακτών Ανάκτησης Ενέργειας (ERV), οι οποίοι προκλιματίζουν τον νωπό αέρα χρησιμοποιώντας τον αέρα εξαγωγής, μειώνοντας δραστικά το ψυκτικό ή θερμικό φορτίο του συστήματος. Παράλληλα, η εφαρμογή συστημάτων «ελεύθερης ψύξης» εκμεταλλεύεται την ψυκτική ικανότητα του εξωτερικού περιβάλλοντος (π.χ. αέρας) όταν αυτό είναι επαρκώς δροσερό, υποκαθιστώντας τη μηχανική ψύξη (Amjath κ.α., 2021).

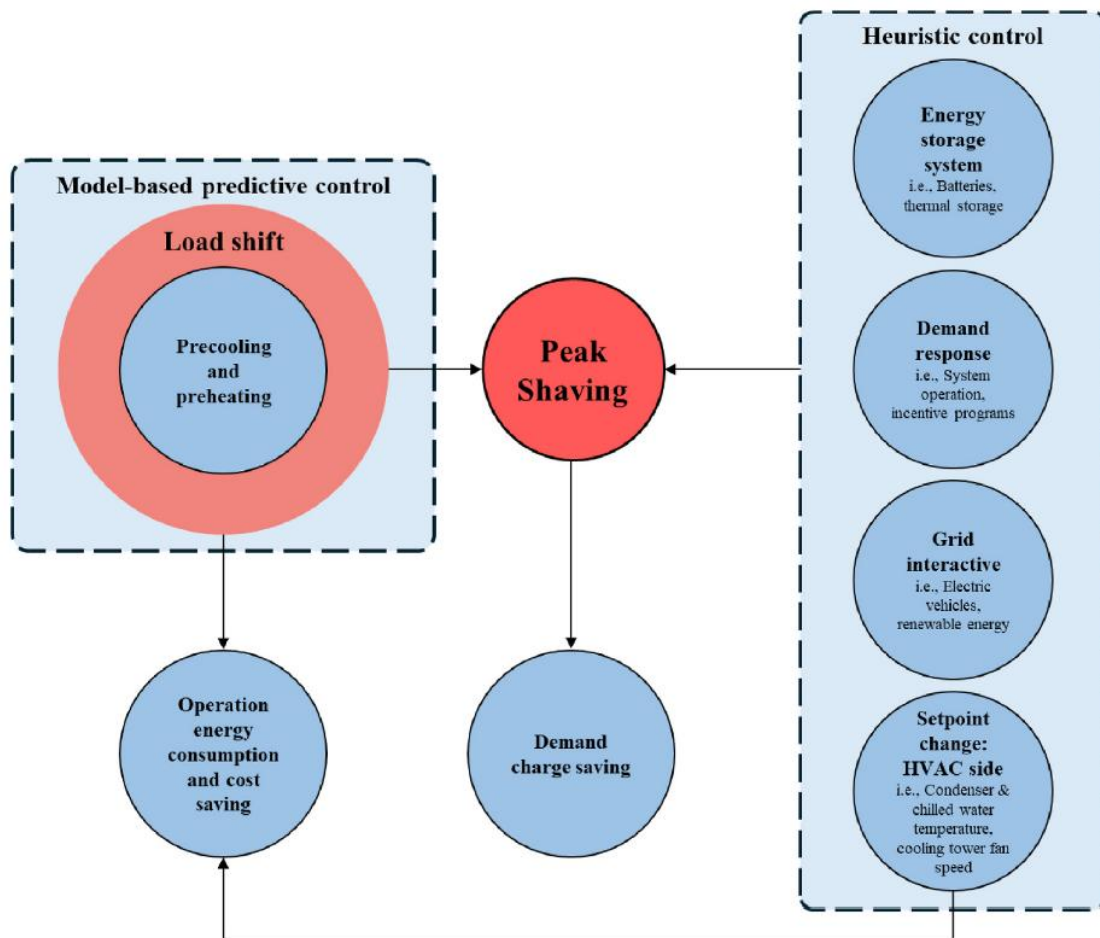
Έλεγχος Αερισμού Βάσει Ζήτησης (DCV)

Ο αερισμός χωρίς έλεγχο προκαλεί τεράστιες ενεργειακές απώλειες. Υπογραμμίζεται ότι τα συστήματα DCV προσαρμόζουν την παροχή νωπού αέρα υπολογίζοντας τον ακριβή αριθμό των ενοίκων μέσω αισθητήρων (occupancy detection), αποτρέποντας τον υπερ-αερισμό (over-ventilation) του χώρου (Amjath κ.α., 2021).

Προηγμένες Στρατηγικές Ελέγχου και Προ-κλιματισμός (MPC)

Σύμφωνα με αναφορά του Fernandes κ.α. (2021) η εγκατάσταση αντλιών θερμότητας, ειδικά τεχνολογίας αέρα-νερού, αποτελεί μια από τις πλέον αποδοτικές λύσεις, επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση της τάξης του 20% έως 40%. Ωστόσο, η απόδοσή τους μεγιστοποιείται με τη χρήση Προηγμένου Ελέγχου Βάσει Μοντέλου (Model Predictive Control - MPC). Σύμφωνα

με την μελέτη των Talib & Joe (2025), ο έλεγχος MPC επιτρέπει στρατηγικές όπως ο προ-κλιματισμός (pre-cooling/pre-heating) κατά τις ώρες εκτός αιχμής, μετατοπίζοντας το φορτίο και επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση που μπορεί να φτάσει έως και 39%. Επιπλέον, στη μελέτη αυτή καταδεικνύεται ότι η δυναμική προσαρμογή των ορίων θερμοκρασίας (setpoint adjustment) στο νερό συμπύκνωσης ή στους ανεμιστήρες των πύργων ψύξης μπορεί να αποφέρει επιπρόσθετη εξοικονόμηση έως 28%.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2 Στρατηγικές εξοικονόμησης ενέργειας στη διαχείριση ενέργειας κτιρίων.

2.3.2 Παρεμβάσεις στα Συστήματα Φωτισμού

Δεδομένου ότι ο φωτισμός επηρεάζει έμμεσα και το ψυκτικό φορτίο των κτιρίων (μέσω της εκλυόμενης θερμότητας), η αναβάθμισή του είναι κρίσιμης σημασίας. Οι σύγχρονες προσεγγίσεις διακρίνονται σε τεχνολογικές και λειτουργικές. (Amjath κ.α. 2021).

Τεχνολογία LED (Light Emitting Diode):

Αποτελεί την πλέον θεμελιώδη αναβάθμιση. Η χρήση λαμπτήρων LED συνεπάγεται εξαιρετικά χαμηλές απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία τους σε σύγκριση με οποιοδήποτε άλλο τύπο λαμπτήρα, ενώ ταυτόχρονα έχουν εκτεταμένη διάρκεια ζωής.

Έλεγχος Φωτισμού Βάσει Παρουσίας (Occupancy-based Control)

Βασικός στόχος είναι η ενεργοποίηση του φωτισμού αποκλειστικά όταν ο χώρος χρησιμοποιείται. Η τεχνική αυτή προϋποθέτει την εγκατάσταση αισθητήρων κίνησης ή παρουσίας (π.χ. υπερύθρων PIR ή ραντάρ ραδιοσυχνοτήτων), οι οποίοι ελέγχουν αυτόματα την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των φωτιστικών σωμάτων (Amjath κ.α. 2021).

Φωτισμός Κατά Ζώνες και Δραστηριότητες (Task Lighting)

Μεγαλύτερη εξοικονόμηση μπορεί να επιτευχθεί μέσω της μείωσης της γενικής πυκνότητας ισχύος φωτισμού στον χώρο και της παροχής εστιασμένου φωτισμού αποκλειστικά στα σημεία που εκτελείται κάποια εργασία όταν και όπου απαιτείται (Amjath κ.α. 2021).

Έλεγχος Φυσικού Φωτισμού (Daylight-linked Controls)

Σε κτίρια με επαρκή φυσικό φωτισμό, εγκαθίστανται συστήματα που σβήνουν ή ντιμάρουν (dimming) τα τεχνητά φώτα ανάλογα με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία. Τα συστήματα αυτά αποτρέπουν την περιττή υπερ-φωτεινότητα πέραν των απαιτούμενων επιπέδων άνεσης (Amjath κ.α. 2021).

2.4 Τοπική Παραγωγή και Αποθήκευση Ενέργειας (Φωτοβολταϊκά, Μπαταρίες, V2B)

Η μετάβαση των κτιρίων από απλούς καταναλωτές σε «ενεργούς καταναλωτές» (prosumers) αποτελεί κεντρικό άξονα των σύγχρονων ενεργειακών αναβαθμίσεων. Το θεσμικό πλαίσιο έχει ήδη αυστηροποιηθεί, με την αναθεωρημένη Ευρωπαϊκή Οδηγία 2024/1275 (EPBD) να επιβάλλει, σταδιακά, την ανάπτυξη κατάλληλων εγκαταστάσεων ηλιακής ενέργειας σε όλα τα νέα και τα υφιστάμενα δημόσια και μη οικιστικά κτίρια. Η προσέγγιση αυτή απαιτεί την ολιστική ενσωμάτωση συστημάτων τοπικής παραγωγής, αποθήκευσης και έξυπνης διαχείρισης φορτίων.

2.4.1 Τοπική Παραγωγή (Φωτοβολταϊκά και BIPV)

Η πιο ώριμη τεχνολογία τοπικής παραγωγής είναι τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Ωστόσο, οι σύγχρονες αναβαθμίσεις εστιάζουν στα Ενσωματωμένα Φωτοβολταϊκά Συστήματα (Building-Integrated Photovoltaics - BIPV).

Σύμφωνα με τη μελέτη των Shahid κ.α. (2025), τα συστήματα BIPV ενσωματώνονται απευθείας στο κέλυφος του κτιρίου, αντικαθιστώντας συμβατικά δομικά υλικά (όπως τοιχοποιίες, στέγες ή παράθυρα) και μειώνοντας έτσι το κόστος υλικών και της εγκατάστασης. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν διττά, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια και συμμετέχοντας στην παθητική θωράκιση. Η εφαρμογή τους, ειδικά σε πολυώροφα κτίρια γραφείων όπου ο χώρος της οροφής είναι περιορισμένος, μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη από 13.2% έως 32.8% (Shahid κ.α. 2025). Σε περιπτώσεις ριζικών ανακαινίσεων, η ενσωμάτωση BIPV έχει αποδείξει ικανότητα απόσβεσης (payback period) μεταξύ 14 και 18 ετών, προσφέροντας ισχυρά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

2.4.2 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας (ESS)

Η τοπική παραγωγή ενέργειας είναι συχνά ετεροχρονισμένη σε σχέση με τη ζήτηση του κτιρίου (π.χ. μέγιστη παραγωγή το μεσημέρι, μέγιστη ζήτηση το απόγευμα). Η εγκατάσταση Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage Systems - ESS) επιλύει αυτό το πρόβλημα. Όπως επισημαίνεται στο άρθρο των Lin κ.α. (2024), τα συστήματα αυτά διακρίνονται κυρίως σε:

- **Ηλεκτρική Αποθήκευση (BESS):** Οι συστοιχίες μπαταριών (κυρίως ιόντων λιθίου) αποθηκεύουν την πλεονάζουσα ενέργεια των φωτοβολταϊκών, βελτιώνοντας την ευστάθεια του δικτύου και επιτρέποντας στο κτίριο να λειτουργεί με τη μέγιστη δυνατή αυτονομία.
- **Θερμική Αποθήκευση (TES):** Εξίσου σημαντική είναι η θερμική αποθήκευση, η οποία, σε συνδυασμό με συστήματα όπως οι Αντλίες Θερμότητας, επιτρέπει τη μετατόπιση των θερμικών και ψυκτικών φορτίων εκτός των ωρών αιχμής, εξομαλύνοντας την καμπύλη ζήτησης.

2.4.3 Ηλεκτροκίνηση και Αλληλεπίδραση Κτιρίου-Οχήματος (V2B)

Η νέα Οδηγία EPBD (Άρθρο 14) αναγνωρίζει τον κρίσιμο ρόλο της ηλεκτροκίνησης, επιβάλλοντας την εγκατάσταση σημείων επαναφόρτισης και προκαλωδίσωσης στους χώρους στάθμευσης των κτιρίων, καθώς και τη δυνατότητα "έξυπνης" και αμφίδρομης φόρτισης Οδηγία (ΕΕ) 2024/1275.

Αυτή η αμφίδρομη φόρτιση εισάγει την τεχνολογία Vehicle-to-Building (V2B). Σύμφωνα με την μελέτη των Shahid κ.α. (2025), το V2B επιτρέπει στα κτίρια να αξιοποιούν την αποθηκευμένη ενέργεια από τις μπαταρίες των σταθμευμένων ηλεκτρικών οχημάτων, ειδικά όταν συνδυάζεται με τοπικά φωτοβολταϊκά. Η στρατηγική αυτή μπορεί να μειώσει τους λογαριασμούς ηλεκτρικής ενέργειας έως και 15.8%, καθιστώντας τα κτίρια λιγότερο εξαρτημένα από το δίκτυο. Ενδεικτικά, η βέλτιστη διαμόρφωση (π.χ. 50% φορτιστές V2B και 1 σύστημα μπαταριών BESS) μπορεί να μειώσει το αθροιστικό φορτίο των ωρών αιχμής (peak power) κατά 42.4% σε κτίρια γραφείων (Shahid, κ.α. 2025).

2.5 Συστήματα Έξυπνου Ελέγχου και Αυτοματισμού (BEMS, IoT)

Η μετάβαση από τα συμβατικά κτίρια στα "έξυπνα" κτίρια προϋποθέτει την ύπαρξη ενός κεντρικού νευρικού συστήματος που θα συντονίζει τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό. Ακόμη και τα πιο αποδοτικά συστήματα HVAC ή LED δεν μπορούν να αποδώσουν τα μέγιστα εάν δεν ελέγχονται δυναμικά βάσει των πραγματικών συνθηκών του χώρου (Al-Ghaili, κ.α. 2021).

2.5.1 Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης Κτιρίων (BEMS)

Τα Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης Κτιρίων (Building Energy Management Systems - BEMS) αποτελούν την ολοκληρωμένη πλατφόρμα ελέγχου. Σύμφωνα με όσα είπε ο Al-Ghaili το 2021, το BEMS είναι ένα σύστημα βασισμένο στην τεχνολογία πληροφορικής, το οποίο ενσωματώνει hardware και λογισμικό (software) για την παρακολούθηση, τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση του εσωτερικού κλίματος και της ενεργειακής κατανάλωσης.

Η αρχιτεκτονική ενός σύγχρονου BEMS βασίζεται σε μια συνεχή ροή δεδομένων, η οποία, όπως την αναλύει ο Al-Ghaili στις πρώτες σελίδες του άρθρου του, υποστηρίζει τέσσερις κύριες στρατηγικές βελτιστοποίησης.

1. **Διαχείριση Ζήτησης (Demand Side Management - DSM):** Προσαρμογή της κατανάλωσης του κτιρίου για την αποφυγή αιχμών (peak shaving) και τη μετατόπιση φορτίου (load shifting) σε ώρες με χαμηλότερο κόστος ενέργειας.
2. **Προηγμένος Έλεγχος (Model Predictive Control - MPC):** Χρήση μαθηματικών μοντέλων για την πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς του κτιρίου (π.χ. θερμική αδράνεια) και τον καθορισμό βέλτιστων εντολών λειτουργίας στα συστήματα HVAC.
3. **Βελτιστοποίηση (Optimization):** Εύρεση της χρυσής τομής μεταξύ της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης και της διατήρησης αυστηρών ορίων θερμικής και οπτικής άνεσης για τους χρήστες.
4. **Ανίχνευση και Διάγνωση Σφαλμάτων (Fault Detection and Diagnosis - FDD):** Μια από τις πιο κρίσιμες λειτουργίες του BEMS για τη Λειτουργική Ανθεκτικότητα. Όπως τονίζεται από τον Al-Ghaili, τα μη ανιχνεύσιμα σφάλματα στα συστήματα HVAC (π.χ. διαρροές ψυκτικού, κολλημένες βαλβίδες) ευθύνονται για σπατάλη ενέργειας που κυμαίνεται από 10% έως 30% στα εμπορικά κτίρια.

2.5.2 Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT)

Η παραδοσιακή δομή των BEMS απαιτούσε εκτεταμένες και δαπανηρές καλωδιώσεις, γεγονός που καθιστούσε δύσκολη την εφαρμογή τους σε υφιστάμενα κτίρια. Σήμερα, η ενσωμάτωση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) καταργεί αυτούς τους περιορισμούς. Το IoT επιτρέπει την τοποθέτηση ασύρματων, φθηνών αισθητήρων και έξυπνων μετρητών (smart meters) σε κάθε σημείο του κτιρίου (Al-Ghaili, κ.α. 2021).

Αυτή η τεχνολογία προσφέρει ασύγκριτη **Επεκτασιμότητα**, καθώς νέοι αισθητήρες θερμοκρασίας, CO₂, υγρασίας ή παρουσίας μπορούν να προστεθούν άμεσα και να συνδεθούν στο BEMS μέσω ασύρματων πρωτοκόλλων (όπως Zigbee, Wi-Fi ή LoRa), συλλέγοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο (real-time data). Η συλλογή και επεξεργασία αυτών των «Μεγάλων Δεδομένων» (Big Data) στο υπολογιστικό νέφος (Cloud) επιτρέπει στο κτίριο να μαθαίνει από τις συνήθειες των χρηστών του και να προσαρμόζεται δυναμικά, ανοίγοντας τον δρόμο για τη χρήση Αλγορίθμων Τεχνητής Νοημοσύνης.

2.6 Προηγμένη Διαχείριση και Αλληλεπίδραση με το Δίκτυο (GEBs, Digital Twins, AI)

Η ραγδαία εξέλιξη της πληροφορικής έχει οδηγήσει τη διαχείριση ενέργειας στο υψηλότερο δυνατό επιστημονικό επίπεδο, μετατρέποντας το κτίριο από έναν παθητικό καταναλωτή σε έναν δυναμικό και διαδραστικό κόμβο. Οι προσεγγίσεις αυτές υπερβαίνουν τον απλό έλεγχο και εισάγουν την ικανότητα του κτιρίου να "μαθαίνει", να προβλέπει και να προσαρμόζεται αυτόνομα.

2.6.1 Τεχνητή Νοημοσύνη και Βαθιά Ενισχυτική Μάθηση (Deep Reinforcement Learning - DRL)

Η πιο σύγχρονη προσέγγιση στον έλεγχο των συστημάτων HVAC και των μικροδικτύων (microgrids) των κτιρίων είναι η χρήση αλγορίθμων Βαθιάς Ενισχυτικής Μάθησης (DRL). Όπως αναλύεται διεξοδικά στη βιβλιογραφία, η τεχνική DRL αποτελεί την αιχμή της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση κτιρίων (Υν,κ.α. 2021). Σε αντίθεση με τον παραδοσιακό Προηγμένο Έλεγχο Βάσει Μοντέλου (MPC), ο οποίος απαιτεί τη δημιουργία πολύπλοκων και χρονοβόρων θερμοδυναμικών μοντέλων (white-box ή grey-box) για κάθε κτίριο ξεχωριστά, οι αλγόριθμοι DRL είναι συνήθως ανεξάρτητοι μοντέλου (model-free).

Το σύστημα μαθαίνει τη βέλτιστη πολιτική ελέγχου μέσω της συνεχούς αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον (δοκιμή και σφάλμα / trial and error), λαμβάνοντας αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο. Ο βασικός σκοπός του αλγορίθμου είναι η μεγιστοποίηση μιας προκαθορισμένης συνάρτησης ανταμοιβής (reward function), η οποία σχεδιάζεται για να εξισορροπεί τέλεια τη δραστηκή μείωση του ενεργειακού κόστους με την αυστηρή διατήρηση της θερμικής άνεσης

των χρηστών. Η ικανότητα της DRL να διαχειρίζεται αβεβαιότητες, όπως οι ξαφνικές αλλαγές στις καιρικές συνθήκες ή η μεταβλητότητα στην πληρότητα του κτιρίου, την καθιστά ανώτερη από τις συμβατικές μεθόδους ελέγχου (Yu, κ.α. 2021).

2.6.2 Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins)

Η τεχνολογία αυτή δημιουργεί ένα ψηφιακό, δυναμικό αντίγραφο (virtual replica) του φυσικού κτιρίου. Το Ψηφιακό Δίδυμο τροφοδοτείται αδιάκοπα με δεδομένα από το δίκτυο αισθητήρων IoT. Αυτό επιτρέπει στους διαχειριστές του έργου να προσομοιώνουν σενάρια βελτιστοποίησης (what-if scenarios) και να αξιολογούν την απόδοση νέων ρυθμίσεων στον Η/Μ εξοπλισμό χωρίς να διαταράσσεται στο ελάχιστο η πραγματική λειτουργία του κτιρίου. Επιπλέον, διευκολύνει την προγνωστική συντήρηση (predictive maintenance), αναγνωρίζοντας μοτίβα φθοράς στον εξοπλισμό πριν αυτά οδηγήσουν σε βλάβη, εξασφαλίζοντας έτσι τη μέγιστη λειτουργική ανθεκτικότητα.

2.6.3 Διαδραστικά με το Δίκτυο Αποδοτικά Κτίρια (Grid-Interactive Efficient Buildings - GEBs)

Το τελικό στάδιο της έξυπνης ενεργειακής διαχείρισης είναι η μετατροπή της υποδομής σε ένα Διαδραστικό με το Δίκτυο, Κτίριο (GEB). Συνδυάζοντας την παραγωγή από φωτοβολταϊκά, την αποθήκευση σε μπαταρίες, τις τεχνολογίες V2B και τους αλγόριθμους DRL, το κτίριο δεν καταναλώνει απλώς ενέργεια, αλλά παρέχει «ευελιξία» (demand flexibility) στο ευρύτερο Έξυπνο Δίκτυο (Smart Grid). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της δυναμικής διαχείρισης φορτίων (load shedding και load shifting), επιτρέποντας στο κτίριο να μειώνει την κατανάλωσή του τις ώρες αιχμής, μεγιστοποιώντας ταυτόχρονα το οικονομικό όφελος από τα δυναμικά τιμολόγια ενέργειας (Yu, κ.α. 2021).

2.7 Συμπεράσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης

Η εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε ένα ευρύ και εξαιρετικά διαφοροποιημένο φάσμα τεχνικών διαχείρισης και αναβάθμισης της ενέργειας των κτιρίων. Όπως καταγράφηκε, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί μέσα από παθητικές παρεμβάσεις (μονώσεις, δροσερές οροφές), την ριζική αναβάθμιση του Η/Μ εξοπλισμού, την εγκατάσταση

συστημάτων τοπικής παραγωγής και αποθήκευσης, αλλά και μέσα από ψηφιακές τεχνολογίες μηδενικής όχλησης, όπως τα BEMS, το IoT και η Τεχνητή Νοημοσύνη (DRL).

Κάθε τεχνική παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε ό,τι αφορά το αρχικό κόστος (CAPEX), τον χρόνο απόσβεσης, την εξοικονόμηση ενέργειας και τον βαθμό δυσκολίας κατά την εγκατάσταση. Καθίσταται, συνεπώς, σαφές ότι δεν υπάρχει μια ενιαία «βέλτιστη» λύση. Η επιλογή του κατάλληλου μείγματος παρεμβάσεων συνιστά ένα σύνθετο πρόβλημα πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων, το οποίο απαιτεί τη συστηματική ιεράρχηση των τεχνικών υπό το πρίσμα ρεαλιστικών δεικτών απόδοσης και αξιοπιστίας. Το ζήτημα αυτό έρχεται να επιλύσει η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στο επόμενο κεφάλαιο του πονήματος.

3 Μεθοδολογία Έρευνας

3.1 Η Πολυκριτηριακή Ανάλυση στη Διαχείριση Τεχνικών Έργων

Η λήψη αποφάσεων για την "Αξιολόγηση τεχνικών διαχείρισης ενέργειας κτιρίων" αποτελεί ένα θέμα, που συχνά προκαλεί προβληματισμό σε συναδέλφους μηχανικούς και μη. Στη σύγχρονη διαχείριση τεχνικών έργων, ειδικότερα σε επίπεδο διεύθυνσης μελετών για ευρύτερα δίκτυα οργανισμών ή τοπικής αυτοδιοίκησης, η αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στη θεωρητική εξοικονόμηση kWh. Η πραγματική πρόκληση είναι ο συγκερασμός ετερογενών, και συχνά αντικρουόμενων, παραμέτρων, όπως το αρχικό κόστος επένδυσης, η επιχειρησιακή συνέχεια (αποφυγή διακοπής λειτουργίας του κτιρίου) και η δυνατότητα τυποποίησης και κλιμάκωσης της λύσης.

Τεχνικές προσεγγίσεις που εφαρμόζονται σε απαιτητικά προγράμματα ευρείας κλίμακας καταδεικνύουν ότι η βιωσιμότητα μιας παρέμβασης εξαρτάται από την ολιστική αξιολόγησή της. Για τον σκοπό αυτό, στην παρούσα έρευνα επιστρατεύεται η Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Analysis - MCDA).

Η MCDA παρέχει ένα αυστηρό μαθηματικό πλαίσιο για τη μοντελοποίηση σύνθετων προβλημάτων, επιτρέποντας την ιεράρχηση εναλλακτικών λύσεων βάσει ποσοτικών (π.χ. χρόνος απόσβεσης) και ποιοτικών (π.χ. λειτουργική ανθεκτικότητα) κριτηρίων. Μεταξύ των διαθέσιμων μεθόδων, η παρούσα εργασία υιοθετεί ένα υβριδικό μοντέλο, συνδυάζοντας την Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP) για την εξαγωγή των βαρών των κριτηρίων και τη Μέθοδο Προσέγγισης Ιδεατής Λύσης (TOPSIS) για την τελική αξιολόγηση των τεχνικών.

3.2 Η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Μέθοδος AHP)

Η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytic Hierarchy Process - AHP), που αναπτύχθηκε από τον Thomas L. Saaty, αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες και αξιόπιστες μεθόδους MCDA. Το βασικό της πλεονέκτημα έγκειται στην ικανότητά της να αναλύει ένα σύνθετο πρόβλημα στα επιμέρους συστατικά του, δημιουργώντας μια ιεραρχική δομή (Στόχος-Κριτήρια-Εναλλακτικές) και επιτρέποντας τη μετατροπή υποκειμενικών κρίσεων σε μετρήσιμα αποτελέσματα (Saaty, 1994).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η μέθοδος AHP χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των σχετικών βαρών των 4 βασικών κριτηρίων αξιολόγησης, αξιοποιώντας την κρίση των ειδικών (experts) εξειδικευμένοι με μεγάλη εμπειρία στο αντικείμενο (μηχανικοί, καθηγητές κ.α.). Η μαθηματική διαδικασία της μεθόδου περιλαμβάνει τα θεμελιώδη στάδια που περιγράφονται στις επόμενες υποενότητες.

3.2.1 Δημιουργία Πίνακα Συγκρίσεων ανά Ζεύγη

Οι κριτές καλούνται να συγκρίνουν τα κριτήρια ανά δύο, χρησιμοποιώντας τη θεμελιώδη κλίμακα 1 έως 9 του Saaty, όπου το 1 υποδηλώνει ίση σημασία, ενώ το 9 υποδηλώνει απόλυτη υπεροχή του ενός στοιχείου έναντι του άλλου (Saaty, 1999). Εάν εξετάζονται n κριτήρια, δημιουργείται ένας τετραγωνικός, θετικός και αντίστροφος πίνακας A διαστάσεων $n \times n$ (Saaty, 1999).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

όπου a_{ij} εκφράζει τη σχετική σπουδαιότητα του κριτηρίου i έναντι του κριτηρίου j . Ισχύει πάντα ότι $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ και προφανώς $a_{ii} = 1$ (Saaty, 1999).

3.2.2 Υπολογισμός Διανύσματος Βαρών

Το διάνυσμα των βαρών (σχετικής σπουδαιότητας) w εξάγεται μέσω της επίλυσης του προβλήματος ιδιοτιμών, αποτελώντας το κύριο ιδιοδιάνυσμα (principal eigenvector) του πίνακα (Saaty, 1994):

$$A \times w = \lambda_{\max} \times w$$

όπου λ_{\max} είναι η μέγιστη ιδιοτιμή του πίνακα A . Πρακτικά, τα βάρη υπολογίζονται κανονικοποιώντας τις στήλες του πίνακα A και στη συνέχεια εξάγοντας τον μέσο όρο κάθε γραμμής του κανονικοποιημένου πίνακα.

3.2.3 Έλεγχος Συνοχής (Consistency Check)

Επειδή οι ανθρώπινες εκτιμήσεις συχνά εμπεριέχουν λογικές αντιφάσεις (ασυνέπειες κατά τις συγκρίσεις), η AHP ενσωματώνει έναν μαθηματικό ελεγκτή λογικής που μετράει τον βαθμό αυτής της ασυνέπειας. Αρχικά υπολογίζεται ο Δείκτης Συνοχής (Consistency Index - CI):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

Στη συνέχεια, ο δείκτης αυτός συγκρίνεται με τον Τυχαίο Δείκτη (Random Index - RI), ο οποίος αποτελεί τη μέση τιμή του CI για τυχαία συμπληρωμένους πίνακες μεγέθους n . Ο Λόγος Συνοχής (Consistency Ratio - CR) υπολογίζεται ως:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

Για να θεωρηθεί αποδεκτός ο πίνακας συγκρίσεων και τα εξαγόμενα βάρη να κριθούν αξιόπιστα, ο κανόνας σύμφωνα με τον Saaty επιβάλλει να ισχύει $CR \leq 0.10$ (10%). Εάν ο λόγος υπερβαίνει το 10%, οι συγκρίσεις κρίνονται υπερβολικά ασυνεπείς και η διαδικασία αξιολόγησης (ή το αντίστοιχο ερωτηματολόγιο) πρέπει να αναθεωρηθεί.

3.3 Η Μέθοδος Προσέγγισης Ιδεατής Λύσης (Μέθοδος TOPSIS)

Η μέθοδος TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), η οποία αναπτύχθηκε αρχικά από τους Hwang και Yoon το 1981, βασίζεται σε μια θεμελιώδη και ταυτόχρονα απλή γεωμετρική αρχή. Η βέλτιστη εναλλακτική λύση θα πρέπει να έχει τη μικρότερη απόσταση από τη Θετική Ιδεατή Λύση (Positive Ideal Solution - PIS) και τη μεγαλύτερη απόσταση από την Αρνητική Ιδεατή Λύση (Negative Ideal Solution - NIS). Στην διεθνή βιβλιογραφία βρέθηκε να έχει ευρεία εφαρμογή ως εργαλείο πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται εκτενώς στην αξιολόγηση και επιλογή προμηθευτών στη διοίκηση εφοδιαστικής αλυσίδας, στην ενεργειακή πολιτική για την επιλογή βέλτιστων τεχνολογιών και πηγών ενέργειας, καθώς και στη βιώσιμη ανάπτυξη για την κατάταξη περιβαλλοντικών δεικτών. Επιπλέον, εμφανίζεται συχνά σε μελέτες χρηματοοικονομικής ανάλυσης, στην αξιολόγηση επενδύσεων, αλλά και στον τομέα της μηχανικής για την επιλογή υλικών και τεχνολογικών λύσεων. Η ευελιξία της μεθόδου και η

δυνατότητά της να συνδυάζει ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια την καθιστούν ιδιαίτερα δημοφιλή σε πλήθος επιστημονικών πεδίων.

Στο πλαίσιο της αξιολόγησης τεχνικών διαχείρισης ενέργειας κτιρίων, η κλασική μέθοδος ακολουθεί τα εξής διαδοχικά μαθηματικά βήματα:

1. Δημιουργία και Κανονικοποίηση Πίνακα Απόφασης:

Αρχικά, κατασκευάζεται ο πίνακας απόφασης D διάστασης $m \times n$, όπου m είναι οι εναλλακτικές τεχνικές και n τα κριτήρια. Στην παρούσα έρευνα, τα στοιχεία x_{ij} του πίνακα προκύπτουν από τη βαθμολογία των ειδικών (κλίμακα 1-5). Επειδή τα κριτήρια συχνά έχουν διαφορετικές μονάδες μέτρησης και κλίμακες, ο πίνακας απαιτείται να κανονικοποιηθεί (διανυσματική κανονικοποίηση) ώστε οι τιμές να είναι αδιάστατες και συγκρίσιμες. Ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (4)$$

2. Δημιουργία Σταθμισμένου Κανονικοποιημένου Πίνακα: Κάθε στοιχείο του κανονικοποιημένου πίνακα πολλαπλασιάζεται με το αντίστοιχο βάρος του κριτηρίου w_j (τα οποία στην περίπτωσή μας θα προκύψουν από τη μέθοδο AHP). Ο νέος πίνακας έχει στοιχεία:

$$v_{ij} = w_j * r_{ij} \quad (5)$$

3. Προσδιορισμός της Θετικής (PIS) και Αρνητικής (NIS) Ιδεατής Λύσης:

Η Θετική Ιδεατή Λύση (A^+) περιλαμβάνει τις καλύτερες επιδόσεις για κάθε κριτήριο, ενώ η Αρνητική Ιδεατή Λύση (A^-) περιλαμβάνει τις χειρότερες.

- $A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\}$, όπου v_j^+ είναι η μέγιστη τιμή αν το κριτήριο είναι προς μεγιστοποίηση (π.χ. Ενεργειακή Απόδοση).
- $A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$, όπου v_j^- είναι η ελάχιστη τιμή αντίστοιχα.

4. Υπολογισμός Ευκλείδειων Αποστάσεων: Η μέτρηση του διαχωρισμού (απόστασης) κάθε εναλλακτικής τεχνικής i από την PIS (d_i^+) και τη NIS (d_i^-) υπολογίζεται γεωμετρικά χρησιμοποιώντας την n -διάστατη σχετική ευκλείδεια απόσταση. Οι αποστάσεις υπολογίζονται ως εξής:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (6)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (7)$$

5. Υπολογισμός της Σχετικής Εγγύτητας (Relative Closeness):

Τέλος, προκειμένου να καταταχθούν οι εναλλακτικές, υπολογίζεται ο δείκτης σχετικής εγγύτητας C_i προς την ιδεατή λύση, ο οποίος συνδυάζει ταυτόχρονα και τις δύο Ευκλείδειες αποστάσεις:

$$C_i = \frac{d_i^-}{(d_i^+ + d_i^-)} \quad (8)$$

Η εναλλακτική με τη μεγαλύτερη τιμή C_i (τιμή πιο κοντά στο 1) κατατάσσεται πρώτη, αποτελώντας τη βέλτιστη επιλογή.

3.4 Το Υβριδικό Μοντέλο AHP-TOPSIS της Έρευνας

Η επιστημονική προσέγγιση σε πολύπλοκα τεχνικά έργα επιβάλλει συχνά τον συνδυασμό μεθοδολογιών για τη βελτιστοποίηση του αποτελέσματος. Το υβριδικό μοντέλο AHP-TOPSIS που εφαρμόζεται στην παρούσα έρευνα αποτελεί το ιδανικό εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικές συνθήκες.

Κατά τον σχεδιασμό και την επίβλεψη τεχνικών έργων μεγάλης κλίμακας, ή κατά την υλοποίηση απαιτητικών προγραμμάτων (όπως αυτά του GWP-Med), η ανάλυση πρέπει να είναι ταυτόχρονα επιστημονικά στιβαρή αλλά και επιχειρησιακά εφαρμόσιμη από τα τμήματα μελετών. Το υβριδικό μοντέλο εξυπηρετεί ακριβώς αυτόν τον σκοπό, κατανέμοντας το υπολογιστικό βάρος σε δύο διακριτές φάσεις:

- **Φάση 1 (AHP):** Η μέθοδος AHP χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την εύρεση των βαρών των 4 βασικών κριτηρίων (Οικονομική Βιωσιμότητα, Ενεργειακή Απόδοση, Επεκτασιμότητα, Λειτουργική Ανθεκτικότητα) μέσω συγκρίσεων ανά ζεύγη. Αυτό

εξασφαλίζει ότι η ιεράρχηση των κριτηρίων παραμένει απολύτως αντικειμενική και μαθηματικά συνεπής.

- **Φάση 2 (TOPSIS):** Η μέθοδος TOPSIS αναλαμβάνει την αξιολόγηση των 5 ομάδων εναλλακτικών τεχνικών (Παθητική Θωράκιση, Αναβάθμιση Η/Μ, Τοπική Παραγωγή, Έξυπνος Έλεγχος, Προηγμένη Διαχείριση). Αντί να υποβληθούν οι συμμετέχοντες ειδικοί σε εξαντλητικές συγκρίσεις ανά ζεύγη για κάθε τεχνική ξεχωριστά, βαθμολογούν την απόδοση κάθε τεχνικής ως προς κάθε κριτήριο με μια απλή κλίμακα Likert (1 έως 5). Τα δεδομένα αυτά εισάγονται έπειτα στον αλγόριθμο TOPSIS, ενσωματώνοντας τα βάρη της AHP.

Αυτός ο διαχωρισμός προσφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα της μελέτης μας. Ταυτόχρονα, αποτρέπει το φαινόμενο της «κόπωσης» των ερωτώμενων (survey fatigue), διασφαλίζοντας την υψηλή ποιότητα των πρωτογενών δεδομένων που συλλέγονται.

3.5 Καθορισμός των Κριτηρίων Αξιολόγησης

Για την ορθή εφαρμογή της πολυκριτηριακής μεθόδου AHP-TOPSIS, η επιλογή και ο σαφής ορισμός των κριτηρίων αξιολόγησης αποτελεί ένα βαρυσήμαντο κομμάτι μελέτης. Τα κριτήρια δεν πρέπει να επικαλύπτονται, ενώ οφείλουν να αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές προκλήσεις που αντιμετωπίζει ένας διαχειριστής τεχνικών έργων κατά τη λήψη αποφάσεων.

Λαμβάνοντας υπόψη την εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση, αλλά και τις αυστηρές προδιαγραφές που θέτουν σύγχρονα προγράμματα ευρείας κλίμακας (όπως τα έργα του GWP-Med, προγράμματα Εταιρικής Κοινωνικής Ευθύνης και αναβαθμίσεις δημοτικών δικτύων), καθορίστηκαν τέσσερα (4) θεμελιώδη κριτήρια.

3.5.1 Οικονομική Βιωσιμότητα (K1)

Το κριτήριο αυτό εκφράζει την οικονομική αποδοτικότητα της επένδυσης. Περιλαμβάνει το αρχικό κόστος κεφαλαίου για την προμήθεια και εγκατάσταση του εξοπλισμού (CAPEX), το λειτουργικό κόστος και το κόστος συντήρησης (OPEX), καθώς και τον εκτιμώμενο χρόνο απόσβεσης (Payback Period / ROI). Στη διαχείριση έργων, μια τεχνικά άρτια λύση απορρίπτεται συχνά εάν ο κύκλος ζωής της δεν δικαιολογεί το κόστος της.

3.5.2 Ενεργειακή και Περιβαλλοντική Απόδοση (K2)

Αφορά την ικανότητα της εκάστοτε τεχνικής να μειώσει μετρήσιμα την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του κτιρίου (kWh/m²). Ταυτόχρονα, το κριτήριο αυτό ενσωματώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, δηλαδή τη δραστική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (CO₂) και την εναρμόνιση με τους στόχους της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και της Οδηγίας EPBD.

3.5.3 Επεκτασιμότητα και Τυποποίηση (K3)

Αποτελεί ένα κριτήριο του Project Management που αξιολογεί το πόσο εύκολα μια τεχνική παρέμβαση μπορεί να τυποποιηθεί και να αναπαραχθεί μαζικά σε ένα ευρύτερο χαρτοφυλάκιο κτιρίων (π.χ. σε δίκτυα κτιρίων τοπικής αυτοδιοίκησης ή εταιρικές εγκαταστάσεις). Λύσεις που απαιτούν υπερβολική εξειδίκευση ή προσαρμογή ανά κτίριο, λαμβάνουν χαμηλότερη βαθμολογία ως προς την επεκτασιμότητά τους.

3.5.4 Λειτουργική Ανθεκτικότητα και Επιχειρησιακή Συνέχεια (K4)

Το κριτήριο αυτό μετρά τον βαθμό στον οποίο η εγκατάσταση και η λειτουργία της τεχνικής διαταράσσουν την κανονική χρήση του κτιρίου. Αξιολογείται η αποφυγή διακοπής των λειτουργιών (zero downtime) κατά την κατασκευή, η αντοχή του συστήματος σε βλάβες, η ευκολία συντήρησης και η διασφάλιση των συνθηκών θερμικής και οπτικής άνεσης των χρηστών.

3.6 Σχεδιασμός και Διεξαγωγή της Πρωτογενούς Έρευνας

Για την τροφοδότηση του υβριδικού μαθηματικού μοντέλου με πρωτογενή δεδομένα, σχεδιάστηκε και διεξήχθη ποσοτική έρευνα μέσω δομημένου ερωτηματολογίου. Η έρευνα απευθύνθηκε αυστηρά σε εξειδικευμένο δείγμα (Expert Survey), αποτελούμενο από μηχανικούς και στελέχη διαχείρισης τεχνικών έργων με εμπειρία στον κατασκευαστικό και μελετητικό κλάδο.

Το ερωτηματολόγιο δημιουργήθηκε μέσω της πλατφόρμας Google Forms, με ανωνυμία των συμμετεχόντων. Η δομή του σχεδιάστηκε στρατηγικά ώστε να εξυπηρετεί τα υπολογιστικά

βήματα της μεθοδολογίας AHP-TOPSIS, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τον χρόνο συμπλήρωσης (5-7 λεπτά) για την αποφυγή κόπωσης του δείγματος. Συγκεκριμένα, το ερωτηματολόγιο διακρίνεται σε τρεις ενότητες:

- **Ενότητα 1 - Επαγγελματικό Προφίλ:** Συλλογή δημογραφικών και επαγγελματικών στοιχείων (ειδικότητα, έτη εμπειρίας) με σκοπό την επαλήθευση της επιστημονικής εγκυρότητας και της εξειδίκευσης του δείγματος.
- **Ενότητα 2 - Συγκρίσεις Κριτηρίων (AHP):** Στο τμήμα αυτό, οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να αξιολογήσουν τη σχετική σπουδαιότητα των τεσσάρων (4) κριτηρίων (K1 έως K4) πραγματοποιώντας έξι (6) συγκρίσεις ανά ζεύγη. Για την αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκε η κλίμακα του Saaty (1-9), μορφοποιημένη σε πλέγμα πολλαπλών επιλογών. Τα δεδομένα αυτής της ενότητας χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή του διανύσματος βαρών (w).
- **Ενότητα 3 - Αξιολόγηση Τεχνικών (TOPSIS):** Για την εξαγωγή του πίνακα απόφασης (X), οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να αξιολογήσουν τις πέντε (5) εναλλακτικές ομάδες τεχνικών αναβάθμισης (Παθητική Θωράκιση, Αναβάθμιση Η/Μ, Τοπική Παραγωγή, Έξυπνος Έλεγχος, Προηγμένη Διαχείριση ΑΙ) ξεχωριστά για το κάθε ένα από τα τέσσερα κριτήρια. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μέσω μιας τυπικής κλίμακας Likert πέντε βαθμίδων (1 = Πολύ Κακή Απόδοση / Ασύμφορη, έως 5 = Άριστη Απόδοση / Εξαιρετικά Συμφέρουσα).

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από την παραπάνω διαδικασία εξήχθησαν σε μορφή λογιστικού φύλλου (Excel) για την περαιτέρω μαθηματική επεξεργασία τους. Τα αναλυτικά αποτελέσματα των υπολογισμών, ο έλεγχος συνοχής των απαντήσεων και η τελική ιεράρχηση των τεχνικών παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

4 Αποτελέσματα Έρευνας και Ανάλυση

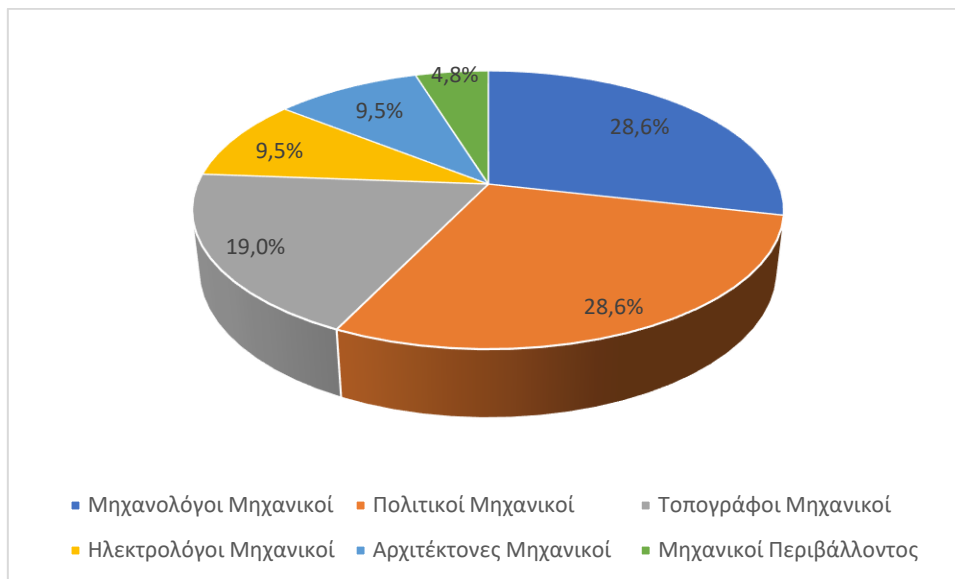
Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται και αναλύονται τα πρωτογενή δεδομένα που συλλέχθηκαν μέσω της έρευνας πεδίου (Expert Survey). Η ανάλυση ακολουθεί τη μεθοδολογική ροή που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ξεκινώντας από την αποτύπωση του προφίλ των συμμετεχόντων, προχωρώντας στην εξαγωγή των βαρών των κριτηρίων (AHP) και καταλήγοντας στην τελική αξιολόγηση και ιεράρχηση των τεχνικών διαχείρισης ενέργειας (TOPSIS).

4.1 Στοιχεία και Προφίλ Συμμετεχόντων (Ειδικών)

Η εγκυρότητα μιας πολυκριτηριακής ανάλυσης εξαρτάται άμεσα από το γνωστικό και επαγγελματικό υπόβαθρο των ατόμων που καλούνται να αξιολογήσουν τις εναλλακτικές λύσεις. Για τον λόγο αυτό, η έρευνα απευθύνθηκε στοχευμένα σε επαγγελματίες μηχανικούς και στελέχη με ενεργό ρόλο στη μελέτη, επίβλεψη και διαχείριση τεχνικών έργων.

Συνολικά, συγκεντρώθηκαν 21 απαντήσεις στο τελικό δείγμα. Από την ανάλυση των επαγγελματικών στοιχείων (Ενότητα 1 του ερωτηματολογίου) προκύπτουν τα εξής ευρήματα:

- **Ειδικότητα / Τίτλος Σπουδών:** Το δείγμα παρουσιάζει εξαιρετική διεπιστημονικότητα. Οι κυρίαρχες ειδικότητες εκπροσωπούνται ισομερώς από Μηχανολόγους Μηχανικούς (**28,6%**) και Πολιτικούς Μηχανικούς (**28,6%**), ειδικότητες που κατεξοχήν εμπλέκονται στον ενεργειακό σχεδιασμό και την κατασκευή των κτιρίων. Ακολουθούν οι Τοπογράφοι Μηχανικοί με **19,0%**, ενώ το υπόλοιπο 23,8% καλύπτεται από κομβικές ειδικότητες, δηλαδή Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς (**9,5%**), Αρχιτέκτονες Μηχανικούς (**9,5%**) και Μηχανικούς Περιβάλλοντος (**4,8%**).

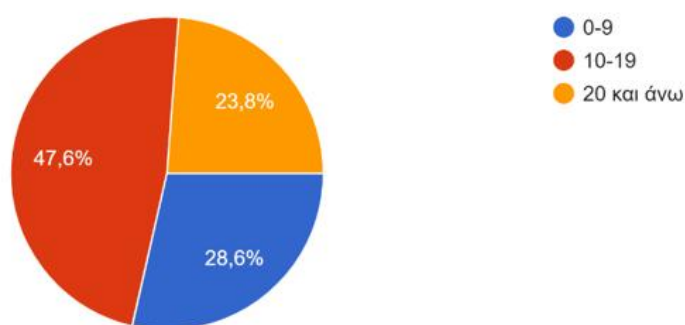


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3 Ειδικότητες Μηχανικών

- **Έτη Εμπειρίας στον κλάδο**

Σε αυτή την ενότητα αποδεικνύεται η υψηλή εξειδίκευση (expert profile) του δείγματος, η πλειοψηφία των ερωτηθέντων διαθέτει εμπειρία άνω των 10 ετών. Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη ηλικιακή/επαγγελματική ομάδα είναι αυτή των 10 έως 19 ετών εμπειρίας με **47,6%**. Ακολουθούν οι μηχανικοί με 0-9 έτη εμπειρίας με **28,6%**, ενώ το **23,8%** διαθέτει 20 και πλέον έτη εμπειρίας. Η συγκέντρωση τόσο μεγάλης εμπειρίας (το 71,4% έχει πάνω από μια δεκαετία στον κλάδο) διασφαλίζει την ωριμότητα των απαντήσεων που δόθηκαν στις τεχνικές συγκρίσεις.

Έτη εμπειρίας
21 απαντήσεις



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4 Έτη Εμπειρίας

4.2 Εξαγωγή Βαρών των Κριτηρίων (Αποτελέσματα ΑHP)

Στη δεύτερη ενότητα της έρευνας, ζητήθηκε από τους ειδικούς να συγκρίνουν τα τέσσερα βασικά κριτήρια αξιολόγησης (Οικονομική Βιωσιμότητα, Ενεργειακή Απόδοση, Επεκτασιμότητα, Λειτουργική Ανθεκτικότητα) ανά ζεύγη, χρησιμοποιώντας τη θεμελιώδη κλίμακα Saaty (1-9).

Μετά τη μαθηματική συνένωση των 21 αυτόνομων πινάκων μέσω του Γεωμετρικού Μέσου Όρου (Geometric Mean), προέκυψε ο τελικός πίνακας βαρών (Vector of Weights). Για τη διασφάλιση της επιστημονικής ορθότητας των εκτιμήσεων, υπολογίστηκε ο Λόγος Συνοχής (Consistency Ratio - CR), ο οποίος βρέθηκε ίσος με **0,065** (δηλαδή **6,5%**). Εφόσον η τιμή αυτή είναι αυστηρά μικρότερη του ορίου 0,10 (10%) που ορίζει η θεωρία του Saaty, ο συνολικός πίνακας κρίνεται απολύτως συνεπής, λογικός και αξιόπιστος.

Τα τελικά βάρη (w) που προέκυψαν για κάθε κριτήριο έχουν ως εξής:

- **Οικονομική Βιωσιμότητα (K1): 46,2%** (Βάρος: 0,462)
- **Ενεργειακή και Περιβαλλοντική Απόδοση (K2): 31,8%** (Βάρος: 0,318)
- **Επεκτασιμότητα και Τυποποίηση (K3): 13,1%** (Βάρος: 0,131)
- **Λειτουργική Ανθεκτικότητα και Επιχειρησιακή Συνέχεια (K4): 8,9%** (Βάρος: 0,089)

Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται μια σαφής επικράτηση του κριτηρίου της Οικονομικής Βιωσιμότητας, ακολουθούμενου από την Ενεργειακή Απόδοση. Αυτό επιβεβαιώνει τη θέση ότι η θεωρητική ενεργειακή εξοικονόμηση δεν αρκεί από μόνη της για την έγκριση μιας τεχνικής λύσης σε ευρείας κλίμακας προγράμματα. Η απόφαση "κλειδώνει" κυρίως όταν το κόστος (CAPEX) και ο χρόνος απόσβεσης (ROI) καθιστούν την επένδυση ρεαλιστική.

4.3 Αξιολόγηση και Βαθμολογία Εναλλακτικών Τεχνικών (Αποτελέσματα TOPSIS)

Μετά τον καθορισμό των βαρών των κριτηρίων, η ανάλυση προχώρησε στη δεύτερη φάση του υβριδικού μοντέλου. Στην Ενότητα 3 του ερωτηματολογίου, οι ειδικοί βαθμολόγησαν τις πέντε

(5) ομάδες τεχνικών αναβάθμισης ως προς κάθε κριτήριο ξεχωριστά, χρησιμοποιώντας κλίμακα από το 1 (Πολύ Κακή Απόδοση) έως το 5 (Άριστη Απόδοση).

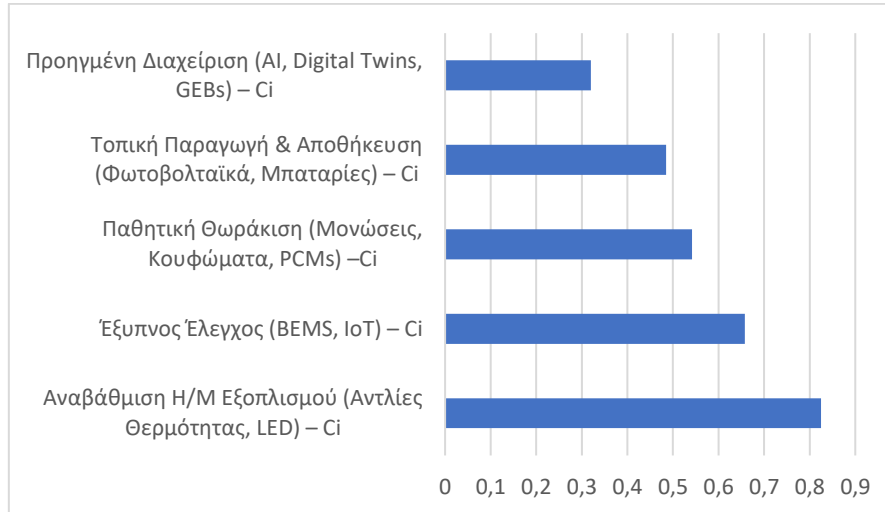
Για την εφαρμογή του αλγορίθμου TOPSIS, υπολογίστηκε αρχικά ο μέσος όρος των βαθμολογιών του δείγματος ($n=21$), διαμορφώνοντας τον Αρχικό Πίνακα Απόφασης (Decision Matrix). Στη συνέχεια, ο πίνακας υπέστη διανυσματική κανονικοποίηση (Normalized Decision Matrix) και πολλαπλασιάστηκε με τα αντίστοιχα βάρη της μεθόδου AHP, παράγοντας τον Σταθμισμένο Κανονικοποιημένο Πίνακα (Weighted Normalized Matrix).

Από τον πίνακα αυτόν προσδιορίστηκαν η Θετική (PIS) και η Αρνητική (NIS) Ιδεατή Λύση, και εν συνεχεία υπολογίστηκαν γεωμετρικά οι Ευκλείδειες αποστάσεις κάθε τεχνικής από τα δύο αυτά άκρα (d^+ και d^- αντίστοιχα).

4.4 Τελική Κατάταξη Τεχνικών Αναβάθμισης

Η τελική ιεράρχηση των τεχνικών διαχείρισης ενέργειας κτιρίων προκύπτει από τον Δείκτη Σχετικής Εγγύτητας (C_i), ο οποίος συνθέτει τις Ευκλείδειες αποστάσεις σε μια ενιαία βαθμολογία απόδοσης (με άριστα το 1). Η κατάταξη των τεχνικών βάσει των αληθινών δεδομένων διαμορφώθηκε ως εξής:

1. **Αναβάθμιση Η/Μ Εξοπλισμού (Αντλίες Θερμότητας, LED) – $C_i = 0,825$**
2. **Έξυπνος Έλεγχος (BEMS, IoT) – $C_i = 0,658$**
3. **Παθητική Θωράκιση (Μονώσεις, Κουφώματα, PCMs) – $C_i = 0,542$**
4. **Τοπική Παραγωγή & Αποθήκευση (Φωτοβολταϊκά, Μπαταρίες) – $C_i = 0,485$**
5. **Προηγμένη Διαχείριση (AI, Digital Twins, GEBS) – $C_i = 0,320$**



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5 Απεικόνιση τελικής κατάταξης

Όπως παρατηρείται από τα τελικά αποτελέσματα, η Αναβάθμιση του Η/Μ Εξοπλισμού αναδεικνύεται ως η απόλυτα βέλτιστη επιλογή. Η επικράτηση αυτής της τεχνικής δεν αποτελεί έκπληξη. Σε απαιτητικά προγράμματα ενεργειακής αναβάθμισης, η αντικατάσταση παλαιών κλιματιστικών μονάδων με σύγχρονες Αντλίες Θερμότητας και η εγκατάσταση φωτισμού LED επιτυγχάνει τη χρυσή τομή. Προσφέρει άμεση και μετρήσιμη ενεργειακή εξοικονόμηση, έχει εξαιρετικά χαμηλό χρόνο απόσβεσης (ROI) και επιτρέπει την επιχειρησιακή συνέχεια των υποδομών χωρίς την πρόκληση εκτεταμένης κατασκευαστικής όχλησης.

Στη δεύτερη θέση βρίσκεται ο **Έξυπνος Έλεγχος (BEMS, IoT)**, γεγονός που αποδεικνύει την τάση του σύγχρονου project management προς τις «έξυπνες» λύσεις ελάχιστης παρέμβασης που βελτιστοποιούν τον υφιστάμενο εξοπλισμό. Αντιθέτως, παρότι η Παθητική Θωράκιση είναι θεμελιώδης, το συχνά υψηλό αρχικό της κόστος (CAPEX) σε συνδυασμό με την αναστάτωση που προκαλεί στη λειτουργία του κτιρίου κατά την κατασκευή, την κατέταξαν στην τρίτη θέση. Τέλος, η Προηγμένη Διαχείριση με Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), παρότι καινοτόμα, κρίνεται ακόμη ως λιγότερο ώριμη και οικονομικά βιώσιμη επιλογή για ευρεία εφαρμογή.

5 Συμπεράσματα και Προτάσεις

5.1 Σύνοψη της Έρευνας

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Αξιολόγηση τεχνικών διαχείρισης ενέργειας κτιρίων» είχε ως πρωταρχικό στόχο τη συστηματική ιεράρχηση επιλεγμένων μεθόδων ενεργειακής αναβάθμισης, ξεφεύγοντας από τη μονοδιάστατη προσέγγιση της θεωρητικής εξοικονόμησης ενέργειας. Κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση απαιτητικών τεχνικών έργων, η βιωσιμότητα μιας παρέμβασης κρίνεται από τον συγκερασμό πολλαπλών και συχνά αντικρουόμενων παραμέτρων.

Για την αντιμετώπιση αυτού του σύνθετου προβλήματος, αναπτύχθηκε ένα υβριδικό μοντέλο Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων (MCDA), συνδυάζοντας την Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP) και τη Μέθοδο Προσέγγισης Ιδεατής Λύσης (TOPSIS). Το μοντέλο τροφοδοτήθηκε με πρωτογενή δεδομένα μέσω στοχευμένης έρευνας πεδίου (Expert Survey), στην οποία συμμετείχαν 21 εξειδικευμένοι επαγγελματίες μηχανικοί με πολυετή εμπειρία στον κατασκευαστικό και μελετητικό κλάδο. Αξιολογήθηκαν πέντε (5) βασικές ομάδες τεχνικών (Παθητική Θωράκιση, Αναβάθμιση Η/Μ Εξοπλισμού, Τοπική Παραγωγή, Έξυπνος Έλεγχος, Προηγμένη Διαχείριση ΑΙ) έναντι τεσσάρων (4) ρεαλιστικών κριτηρίων: Οικονομική Βιωσιμότητα, Ενεργειακή Απόδοση, Επεκτασιμότητα, και Λειτουργική Ανθεκτικότητα.

5.2 Βασικά Συμπεράσματα

Από τη μαθηματική επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων, εξήχθησαν τα χρήσιμα συμπεράσματα, τα οποία επιβεβαιώνουν πλήρως τις τάσεις της σύγχρονης αγοράς και τις επιταγές της βέλτιστης διαχείρισης έργων.

5.2.1 Η Κυριαρχία της Οικονομικής Βιωσιμότητας

Η μέθοδος AHP κατέδειξε ότι το κριτήριο της Οικονομικής Βιωσιμότητας (46,2%) αποτελεί τον αδιαμφισβήτητο ρυθμιστή των αποφάσεων. Η Ενεργειακή και Περιβαλλοντική Απόδοση ακολουθεί στη δεύτερη θέση (31,8%). Το εύρημα αυτό αποδεικνύει ότι, παρά την αυστηροποίηση των ευρωπαϊκών κανονισμών (π.χ. EPBD), οι μηχανικοί δεν εγκρίνουν

τεχνικές λύσεις εάν το κόστος επένδυσης (CAPEX) και ο χρόνος απόσβεσης δεν τις καθιστούν ρεαλιστικά εφαρμόσιμες.

5.2.2 Η Αναβάθμιση Η/Μ Εξοπλισμού ως Βέλτιστη Λύση

Η μέθοδος TOPSIS ανέδειξε με σαφή διαφορά την Αναβάθμιση του Η/Μ Εξοπλισμού (αντικατάσταση παλαιών μονάδων με σύγχρονες Αντλίες Θερμότητας και εφαρμογή συστημάτων LED) ως την κορυφαία επιλογή (Δείκτης Εγγύτητας $C_i = 0,825$). Η λύση αυτή εξισορροπεί άριστα το κόστος με το αποτέλεσμα, επιτρέποντας την επιχειρησιακή συνέχεια των υποδομών με ελάχιστη κατασκευαστική όχληση. Η στρατηγική αυτή ταυτίζεται απόλυτα με τις τεχνικές προσεγγίσεις που υιοθετούνται σε επιτυχημένα προγράμματα ευρείας κλίμακας, όπως οι παρεμβάσεις του οργανισμού GWP-Med ή οι στοχευμένες δράσεις Εταιρικής Κοινωνικής Ευθύνης μεγάλων οργανισμών (π.χ. Coca-Cola), όπου το ζητούμενο είναι η άμεση, μετρήσιμη και αποδοτική ενεργειακή ανακούφιση των κτιρίων.

5.2.3 Η Άνοδος των Έξυπνων Συστημάτων έναντι των Παραδοσιακών Παρεμβάσεων

Ένα εξίσου σημαντικό εύρημα είναι η κατάταξη του Έξυπνου Ελέγχου (BEMS, IoT) στη δεύτερη θέση ($C_i = 0,658$), αφήνοντας την παραδοσιακή Παθητική Θωράκιση (μονώσεις κελύφους) στην τρίτη θέση ($C_i = 0,542$). Η διείσδυση των ασύρματων αισθητήρων IoT επιτρέπει τον δραστικό περιορισμό της σπατάλης χωρίς τα τεράστια κόστη και τις χρονοβόρες εργασίες πολιτικού μηχανικού που απαιτεί μια ριζική ανακαίνιση κελύφους.

5.2.4 Η Πρώιμη Φάση της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI)

Παρά την τεράστια ακαδημαϊκή βιβλιογραφία, η Προηγμένη Διαχείριση (Deep Reinforcement Learning, Ψηφιακό Δίδυμο) κατετάγη τελευταία ($C_i = 0,320$) από τους αξιολογητές. Η εγχώρια κατασκευαστική αγορά θεωρεί την τεχνολογία αυτή οικονομικά ασύμφορη και δύσκολα επεκτάσιμη στο παρόν στάδιο, καταδεικνύοντας ένα σημαντικό χάσμα μεταξύ θεωρητικής έρευνας και πρακτικής εφαρμογής.

5.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας θέτουν ένα ισχυρό θεμέλιο για τη λήψη αποφάσεων, ωστόσο η έρευνα μπορεί να επεκταθεί σε πολλαπλά επίπεδα:

5.3.1 Εξειδίκευση σε Συγκεκριμένα Χαρτοφυλάκια Κτιρίων

Το μοντέλο θα μπορούσε να παραμετροποιηθεί αποκλειστικά για δημόσια κτίρια ή δημοτικές εγκαταστάσεις. Η εφαρμογή της πολυκριτηριακής μεθοδολογίας σε κτιριακά χαρτοφυλάκια μεγάλων Αναπτυξιακών Οργανισμών και Δικτύων Τοπικής Αυτοδιοίκησης, θα προσέφερε ανεκτίμητα εργαλεία προτεραιοποίησης έργων για τις τεχνικές υπηρεσίες των δήμων.

5.3.2 Ενσωμάτωση Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA)

Στο μέλλον, τα κριτήρια αξιολόγησης θα πρέπει να εμπλουτιστούν με δείκτες Ενσωματωμένης Ενέργειας (Embodied Energy) και Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (LCCA), αξιολογώντας τις τεχνικές όχι μόνο κατά τη λειτουργία τους, αλλά από την παραγωγή των υλικών έως την ανακύκλωσή τους.

5.3.3 Διερεύνηση της Ετοιμότητας για Διαδραστικά Κτίρια (GEBs)

Καθώς η τεχνολογία ωριμάζει και το κόστος μειώνεται, κρίνεται σκόπιμη η διενέργεια νέων ερευνών την επόμενη πενταετία, προκειμένου να μετρηθεί εκ νέου η αποδοχή της Τεχνητής Νοημοσύνης και του Vehicle-to-Building (V2B) από την τεχνική κοινότητα.

6 Βιβλιογραφία

European Commission (2024). Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) - 2024 Revision updates. Official Journal of the European Union.

Yu, L., Qin, S., Zhang, M., Shen, C., Jiang, T., & Guan, X. (2021). A review of deep reinforcement learning for smart building energy management. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(15), 12046-12063.

Al-Ghaili, A. M., Kasim, H., Al-Hada, N. M., Jørgensen, B. N., Othman, M., & Wang, J. (2021). Energy management systems and strategies in buildings sector: A scoping review. *Ieee Access*, 9, 63790-63813.

Shakeri, M., Pasupuleti, J., Amin, N., Rokonuzzaman, M., Low, F. W., Yaw, C. T., ... & Lai, C. W. (2020). An overview of the building energy management system considering the demand response programs, smart strategies and smart grid. *Energies*, 13(13), 3299.

Aburabi'e, M., Bataineh, K., & Al-Kabaha, Y. (2025). Multi objective design optimization of residential buildings: energy consumption, life cycle cost and thermal discomfort based on NSGA-II. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(8), 354.

Talib, A., & Joe, J. (2025). Analyzing the overrated performance of model-based predictive control and energy saving strategies in building energy management: A review. *Journal of Building Engineering*, 101, 111909.

Shahid, M. N., Shahid, M. U., & Irfan, M. (2025). Advances in building energy management: A comprehensive review. *Buildings*, 15(23), 4237.

Bayasgalan, A., Park, Y. S., Koh, S. B., & Son, S. Y. (2024). Comprehensive review of building energy management models: Grid-interactive efficient building perspective. *Energies*, *17*(19), 4794.

Kamel, E., & Memari, A. M. (2022). Residential building envelope energy retrofit methods, simulation tools, and example projects: a review of the literature. *Buildings*, *12*(7), 954.

Fernandes, J., Santos, M. C., & Castro, R. (2021). Introductory review of energy efficiency in buildings retrofits. *Energies*, *14*(23), 8100.

Amjath, M. R., Chandanie, H., & Amarasinghe, S. D. I. A. (2021). Energy retrofits for improving energy efficiency in buildings: a review of HVAC and lighting systems. In *World Construction Symposium* (No. 290-301).

Erbach, G., & Jensen, L. (2022). Fit for 55 package. *EPRS, European Parliament*.

Hammouda, N. G., Ahmed, Z., Omar, I., Alizadeh, A. A., Singh Sawaran Singh, N., Louhichi, B., ... & Hamidi, B. (2026). Intelligent multi-objective optimization of thermal comfort and ventilation performance in stratum ventilation design. *Scientific Reports*.

Aguacil, S., Duque, S., Lufkin, S., & Rey, E. (2024). Designing with building-integrated photovoltaics (BIPV): A pathway to decarbonize residential buildings. *Journal of Building Engineering*, *96*, 110486.

Saaty, T. L. (1999). Basic theory of the analytic hierarchy process: how to make a decision. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas Fisicas y Naturales*, *93*(4), 395-423.

Saaty, T. L. (1994). Highlights and critical points in the theory and application of the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 74(3), 426-447.

Yin, H., Li, X. R., & Gao, Y. (2020). Relative Euclidean distance with application to TOPSIS and estimation performance ranking. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 52(2), 1052-1064.

Anjum, R., Mirza, M. U., Kausar, N., & Ali, R. (2027). Decision-making framework for urban transportation using linear Diophantine fuzzy Z-numbers with Dombi aggregation, TOPSIS and VIKOR methods. *Spectrum of Operational Research*, 1-34.

Çelikbilek, Y., & Tüysüz, F. (2020). An in-depth review of theory of the TOPSIS method: An experimental analysis. *Journal of Management Analytics*, 7(2), 281-300.

Batterton, K. A., & Hale, K. N. (2017). The Likert scale what it is and how to use it. *Phalanx*, 50(2), 32-39.

Jebb, A. T., Ng, V., & Tay, L. (2021). A review of key Likert scale development advances: 1995–2019. *Frontiers in psychology*, 12, 637547.

Joshi, A., Kale, S., Chandel, S., & Pal, D. K. (2015). Likert scale: Explored and explained. *British journal of applied science & technology*, 7(4), 396-403.

7 Παραρτήματα

7.1 Παράρτημα Α: Το Ερωτηματολόγιο της Έρευνας

7.2 Παράρτημα Β: Αναλυτικοί Πίνακες Υπολογισμών (Excel tables)

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Ερωτηματολόγιο

Ειδικότητα / Τίτλος Σπουδών (π.χ. Μηχανολόγος Μηχανικός) *

μηχανικός

Εικόνα 7-1 Ειδικότητα

Έτη εμπειρίας *

- 0-9
- 10-19
- 20 και άνω

Εικόνα 7-2 Έτη εμπειρίας

Ενότητα 2: Σύγκριση Κριτηρίων ανά Ζεύγη (Μέθοδος AHP)

Σε αυτή την ενότητα καλείστε να συγκρίνετε τα κριτήρια ανά δύο. Αν θεωρείτε ότι το κριτήριο στα αριστερά είναι πιο σημαντικό, επιλέξτε έναν αριθμό προς τα αριστερά (3, 5, 7 ή 9 ανάλογα με την ένταση της υπεροχής). Αν θεωρείτε πιο σημαντικό το κριτήριο στα δεξιά, επιλέξτε έναν αριθμό προς τα δεξιά. Αν τα θεωρείτε εξίσου σημαντικά, επιλέξτε το 1 στη μέση.

Εικόνα 7-3 Σύγκριση Κριτηρίων ανά Ζεύγη

Κατά την επιλογή μιας μεθόδου ενεργειακής αναβάθμισης, ποιο από τα δύο κριτήρια θεωρείτε πιο σημαντικό και με τι ένταση (1=Ισοπαλία, 9=Απόλυτη Υπεροχή); *

	9 υπέρ Πρώτου	7.	5.	3.	1 (Ιση Σημασία)	3.	5.	7.
Οικονομική Βιωσιμότητα VS Ενεργειακή Απόδοση	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Οικονομική Βιωσιμότητα VS Επεκτασιμότητα	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Οικονομική Βιωσιμότητα VS Λειτουργική Ανθεκτικότητα	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ενεργειακή Απόδοση VS Επεκτασιμότητα	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ενεργειακή Απόδοση VS Λειτουργική Ανθεκτικότητα	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Επεκτασιμότητα VS Λειτουργική Ανθεκτικότητα	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Εικόνα 7-4 Επιλογή μεθόδου

Ενότητα 3: Βαθμολογία Τεχνικών (Μέθοδος TOPSIS)

1. Αξιολογήστε τις παρακάτω ομάδες τεχνικών, με γνώμονα **ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΑ** την **ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ (Κόστος & Απόσβεση)**:

	1 (Πολύ Κακή Απόδοση / Πολύ Ασύμφορη)	2	3	4	5 (Άριστη Απόδοση / Εξαιρετικά Συμφέρουσα)
Παθητική Θωράκιση (Μονώσεις, Κουφώματα, PCMs)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Αναβάθμιση Η/Μ Εξοπλισμού (Αντλίες Θερμότητας, LED)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Τοπική Παραγωγή & Αποθήκευση (Φωτοβολταϊκά, Μπαταρίες)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Έξυπνος Έλεγχος (BEMS, IoT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Προηγμένη Διαχείριση (AI, Digital Twins, GEBs)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Εικόνα 7-5 Βαθμολογία τεχνικών

2. Αξιολογήστε τις παρακάτω ομάδες τεχνικών, με γνώμονα **ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΑ** την **ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ**.

	1 (Πολύ Κακή Απόδοση / Πολύ Ασύμφορη)	2	3	4	5 (Άριστη Απόδοση / Εξαιρετικά Συμφέρουσα)
Παθητική Θωράκιση (Μονώσεις, Κουφώματα, PCMs)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Αναβάθμιση Η/Μ Εξοπλισμού (Αντλίες Θερμότητας, LED)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Τοπική Παραγωγή & Αποθήκευση (Φωτοβολταϊκά, Μπαταρίες)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Έξυπνος Έλεγχος (BEMS, IoT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Προηγμένη Διαχείριση (AI, Digital Twins, GEBs)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Εικόνα 7-6 Αξιολόγηση ενεργειακής απόδοσης

3. Αξιολογήστε τις παρακάτω ομάδες τεχνικών, με γνώμονα **ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΑ** την **ΕΠΕΚΤΑΣΙΜΟΤΗΤΑ** (Ευκολία αναπαραγωγής/τυποποίησης).

	1 (Πολύ Κακή Απόδοση / Πολύ Ασύμφορη)	2	3	4	5 (Άριστη Απόδοση / Εξαιρετικά Συμφέρουσα)
Παθητική Θωράκιση (Μονώσεις, Κουφώματα, PCMs)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Αναβάθμιση Η/Μ Εξοπλισμού (Αντλίες Θερμότητας, LED)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Τοπική Παραγωγή & Αποθήκευση (Φωτοβολταϊκά, Μπαταρίες)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Έξυπνος Έλεγχος (BEMS, IoT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Προηγμένη Διαχείριση (AI, Digital Twins, GEBs)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Εικόνα 7-7 Αξιολόγηση επεκτασιμότητας

4. Αξιολογήστε τις παρακάτω ομάδες τεχνικών, με γνώμονα **ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΑ** τη **ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ** (Μηδενική διακοπή λειτουργίας, άνεση).

	1 (Πολύ Κακή Απόδοση / Πολύ Ασύμφορη)	2	3	4	5 (Άριστη Απόδοση / Εξαιρετικά Συμφέρουσα)
Παθητική Θωράκιση (Μονώσεις, Κουφώματα, PCMs)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Αναβάθμιση Η/Μ Εξοπλισμού (Αντλίες Θερμότητας, LED)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Τοπική Παραγωγή & Αποθήκευση (Φωτοβολταϊκά, Μπαταρίες)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Έξυπνος Έλεγχος (BEMS, IoT)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Προηγμένη Διαχείριση (AI, Digital Twins, GEBs)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Μην υποβάλλετε κατά μηδενικό πρόβλημα μέσω των Φορμών Βαθμολογίας

[Πίσω](#)
[Υποβολή](#)
[Εκκαθάριση φόρμας](#)

Εικόνα 7-8 Αξιολόγηση λειτουργικής ανθεκτικότητας

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Αναλυτικοί Πίνακες Υπολογισμών (AHP – TOPSIS)

Στο παρόν παράρτημα παρατίθενται αναλυτικά οι ενδιάμεσοι μαθηματικοί υπολογισμοί του υβριδικού μοντέλου AHP–TOPSIS, όπως αυτοί προέκυψαν από την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων της έρευνας πεδίου (Expert Survey, n = 21). Το πρώτο μέρος (B.1) τεκμηριώνει την εξαγωγή του διανύσματος βαρών των κριτηρίων μέσω της μεθόδου AHP, ενώ το δεύτερο μέρος (B.2) παρουσιάζει βήμα προς βήμα την αξιολόγηση και τελική ιεράρχηση των πέντε ομάδων τεχνικών αναβάθμισης μέσω της μεθόδου TOPSIS. Όλοι οι πίνακες είναι πλήρως αναπαραγώγιοι και αντιστοιχούν στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4 της εργασίας.

7.3 Β.1 Υπολογισμοί Μεθόδου AHP – Εξαγωγή Βαρών Κριτηρίων

Οι 21 αυτόνομοι πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη των τεσσάρων κριτηρίων (κλίμακα Saaty 1–9) συνενώθηκαν σε έναν ενιαίο συγκεντρωτικό πίνακα μέσω του Γεωμετρικού Μέσου Όρου (Geometric Mean) κάθε αντίστοιχου στοιχείου a_{ij} . Ο προκύπτων αντίστροφος πίνακας A (4 × 4) παρουσιάζεται στον Πίνακα Β.1.

Πίνακας Β.1 — Συγκεντρωτικός πίνακας συγκρίσεων ανά ζεύγη (Γεωμετρικός Μέσος των 21 αξιολογήσεων)

A (Geom. Mean)	K1	K2	K3	K4
K1	1,000	1,453	5,346	3,425
K2	0,688	1,000	1,602	5,416
K3	0,187	0,624	1,000	1,472
K4	0,292	0,185	0,679	1,000
Σ (Άθροισμα στήλης)	2,167	3,262	8,627	11,313

Η διαγώνιος ισούται με 1,000 και ισχύει η σχέση αντιστροφής $a_{ji} = 1 / a_{ij}$.

Στη συνέχεια, κάθε στοιχείο διαιρέθηκε με το άθροισμα της στήλης του (κανονικοποίηση) και ο μέσος όρος κάθε γραμμής του κανονικοποιημένου πίνακα έδωσε το τελικό βάρος (w) του αντίστοιχου κριτηρίου (Πίνακας Β.2).

Πίνακας Β.2 — Κανονικοποιημένος πίνακας και διάνυσμα βαρών (w)

Κανονικοποιημένος	K1	K2	K3	K4	Βάρος w (μ.ο. γραμμής)
K1	0,4615	0,4454	0,6197	0,3027	0,4573
K2	0,3175	0,3066	0,1857	0,4787	0,3221
K3	0,0863	0,1913	0,1159	0,1301	0,1309
K4	0,1347	0,0567	0,0787	0,0884	0,0896

Στρογγυλοποιημένα, τα τελικά βάρη που χρησιμοποιήθηκαν στη μέθοδο TOPSIS είναι: $w(K1) = 0,462$ · $w(K2) = 0,318$ · $w(K3) = 0,131$ · $w(K4) = 0,089$.

Έλεγχος Συνοχής (Consistency Check). Υπολογίστηκε η μέγιστη ιδιοτιμή λ_{\max} του πίνακα και, βάσει αυτής, ο Δείκτης Συνοχής (CI) και ο Λόγος Συνοχής (CR). Για $n = 4$ ο Τυχαίος Δείκτης είναι $RI = 0,90$. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα Β.3.

Πίνακας Β. 3 — Έλεγχος συνοχής του συγκεντρωτικού πίνακα ΑΗΡ

Δείκτης Ελέγχου Συνοχής	Τιμή
Μέγιστη ιδιοτιμή (λ_{\max})	4,1754
Διάσταση πίνακα (n)	4
Δείκτης Συνοχής $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$	0,0585
Τυχαίος Δείκτης $RI (n = 4)$	0,90
Λόγος Συνοχής $CR = CI / RI$	0,065 (6,5%)
Όριο αποδοχής (Saaty)	$CR \leq 0,10 (10\%)$
Συμπέρασμα	Αποδεκτός — απολύτως συνεπής

Επειδή $CR = 6,5\% < 10\%$, ο συγκεντρωτικός πίνακας κρίνεται λογικά συνεπής και τα εξαγόμενα βάρη αξιόπιστα.

7.4 Β.2 Υπολογισμοί Μεθόδου TOPSIS – Ιεράρχηση Τεχνικών

Οι βαθμολογίες των 21 ειδικών (κλίμακα Likert 1–5) για τις πέντε ομάδες τεχνικών ως προς τα τέσσερα κριτήρια (μέσοι όροι ανά κελί) διαμόρφωσαν τον Αρχικό Πίνακα Απόφασης (Decision Matrix) του Πίνακα Β.4.

Πίνακας Β. 4 — Αρχικός πίνακας απόφασης (μέσοι όροι βαθμολογιών ειδικών, n = 21)

Εναλλακτική / Κριτήριο	K1	K2	K3	K4
A1	3,19	4,00	3,32	2,28
A2	3,79	3,82	4,10	3,75
A3	3,11	3,82	2,78	3,55
A4	3,60	3,04	4,74	4,57
A5	2,45	4,22	2,20	3,12

Όλα τα κριτήρια αξιολογούνται ως ωφέλιμα (*benefit*): υψηλότερη τιμή Likert = καλύτερη απόδοση/συμπεριφορά.

Ο πίνακας υπέστη διανυσματική κανονικοποίηση μέσω της σχέσης $r_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum x_{ij}^2}$. Οι παρονομαστές κανονικοποίησης ανά κριτήριο ($\sqrt{\sum x_{ij}^2}$) είναι: K1 = 7,2921 · K2 = 8,4991 · K3 = 7,9290 · K4 = 7,9046.

Πίνακας Β. 5 — Κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης (r_{ij})

Εναλλακτική / Κριτήριο	K1	K2	K3	K4
A1	0,4375	0,4706	0,4187	0,2884
A2	0,5197	0,4495	0,5171	0,4744
A3	0,4265	0,4495	0,3506	0,4491
A4	0,4937	0,3577	0,5978	0,5781
A5	0,3360	0,4965	0,2775	0,3947

Κάθε στήλη πολλαπλασιάστηκε με το αντίστοιχο βάρος AHP ($v_{ij} = w_j \cdot r_{ij}$), παράγοντας τον Σταθμισμένο Κανονικοποιημένο Πίνακα (Πίνακας Β.6).

Πίνακας Β.6 — Σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας (v_{ij})

Εναλλακτική / Κριτήριο	K1	K2	K3	K4
A1	0,2021	0,1497	0,0549	0,0257
A2	0,2401	0,1429	0,0677	0,0422
A3	0,1970	0,1429	0,0459	0,0400
A4	0,2281	0,1137	0,0783	0,0515
A5	0,1552	0,1579	0,0363	0,0351

Πίνακας Β.7 — Θετική (PIS) και Αρνητική (NIS) Ιδεατή Λύση ανά κριτήριο

Ιδεατή Λύση	K1	K2	K3	K4
Θετική Ιδεατή Λύση (A^+ / PIS)	0,2401	0,1579	0,0783	0,0515
Αρνητική Ιδεατή Λύση (A^- / NIS)	0,1552	0,1137	0,0363	0,0257

Υπολογίστηκαν οι Ευκλείδειες αποστάσεις κάθε τεχνικής από τη θετική (d_i^+) και την αρνητική (d_i^-) ιδεατή λύση και, εν συνεχεία, ο Δείκτης Σχετικής Εγγύτητας $C_i = d_i^- / (d_i^+ + d_i^-)$. Τα τελικά αποτελέσματα και η κατάταξη παρουσιάζονται στον Πίνακα Β.8.

Πίνακας Β.8 — Ευκλείδειες αποστάσεις, Δείκτης Σχετικής Εγγύτητας (C_i) και τελική κατάταξη

Εναλλακτική Τεχνική	d^+	d^-	Δείκτης C_i	Κατάταξη
A1 – Παθητική Θωράκιση (Μονώσεις, Κουφώματα, PCMs)	0,0522	0,0619	0,542	3
A2 – Αναβάθμιση Η/Μ (Αντλίες Θερμότητας, LED)	0,0205	0,0965	0,825	1
A3 – Τοπική Παραγωγή & Αποθήκευση (Φ/Β, Μπαταρίες)	0,0571	0,0538	0,485	4
A4 – Έξυπνος Έλεγχος (BEMS, IoT)	0,0458	0,0879	0,658	2
A5 – Προηγμένη Διαχείριση (AI, Digital Twins, GEBs)	0,0961	0,0452	0,320	5

Όσο υψηλότερη η τιμή C_i (πλησιέστερη στο 1), τόσο βέλτιστη η τεχνική. Η Αναβάθμιση Η/Μ Εξοπλισμού (A2) αναδεικνύεται πρώτη με $C_i = 0,825$.

Η τελική ιεράρχηση επιβεβαιώνει τα ευρήματα του Κεφαλαίου 4: **A2 (Αναβάθμιση Η/Μ, 0,825) > A4 (Έξυπνος Έλεγχος, 0,658) > A1 (Παθητική Θωράκιση, 0,542) > A3 (Τοπική Παραγωγή, 0,485) > A5 (Προηγμένη AI, 0,320).**