



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



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

**Ανάπτυξη μεθοδολογίας ιεράρχησης έξυπνων ενεργειακών υπηρεσιών
μέσω πολυκριτήριας αξιολόγησης**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κανλή Σ. Ευστρατία

Επιβλέπων: Ευάγγελος Μαρινάκης,
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2025



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



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

**Ανάπτυξη μεθοδολογίας ιεράρχησης έξυπνων ενεργειακών υπηρεσιών
μέσω πολυκριτήριας αξιολόγησης**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κανλή Σ. Ευστρατία

Επιβλέπων: Ευάγγελος Μαρινάκης,
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2ή Ιουλίου 2025.

.....
Ευάγγελος Μαρινάκης,
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Δημήτριος Ασκούνης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2025

.....
Κανλή Σ. Ευστρατία

Κάτοχος Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Τεχνο-οικονομικά Συστήματα» της Σχολής Ηλεκτρολόγων
Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κανλή Σ. Ευστρατία, 2025

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η εργασία παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο αξιολόγησης και ιεράρχησης έξυπνων ενεργειακών τεχνολογιών, με στόχο τη στήριξη της στρατηγικής λήψης αποφάσεων στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία συνδυάζει τρεις μεθόδους DEMATEL, Fuzzy Logic και VIKOR. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται σε τρεις κύριους άξονες, οικονομικό, περιβαλλοντικό και τεχνικό, προσφέροντας ένα ευέλικτο και αξιόπιστο εργαλείο για την αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων.

Η ανάλυση βασίστηκε στη συμμετοχή τριών διακριτών επαγγελματικών ομάδων του ενεργειακού τομέα: μηχανικών, συμβούλων και διοικητικών στελεχών. Μέσα από ερωτηματολόγια καταγράφηκαν οι αντιλήψεις και οι προτεραιότητες κάθε ομάδας, αναδεικνύοντας τις διαφοροποιήσεις που προκύπτουν από τον επαγγελματικό ρόλο και τις προσδοκίες τους. Η αξιολόγηση ανέδειξε πως κάθε επαγγελματική κατηγορία εστιάζει σε διαφορετικά κριτήρια καθώς οι μηχανικοί δίνουν έμφαση στην τεχνική αξιοπιστία και ωριμότητα, οι σύμβουλοι στην οικονομική αποδοτικότητα, ενώ τα διοικητικά στελέχη επικεντρώνονται σε ζητήματα στρατηγικής εφαρμογής και ρίσκου. Παράλληλα, αναγνωρίζονται σημαντικές προκλήσεις, όπως η διαλειτουργικότητα των συστημάτων και η κυβερνοασφάλεια.

Η υλοποίηση της παρούσας επιβεβαιώνει πως δεν υπάρχει μία καθολικά βέλτιστη τεχνολογική λύση, αλλά ότι η αποδοχή και η προτεραιοποίηση εξαρτώνται από το πλαίσιο εφαρμογής και τους εμπλεκόμενους φορείς. Υπογραμμίζεται η σημασία μιας ολιστικής και συμμετοχικής προσέγγισης, με έμφαση στη διατομεακή συνεργασία και την ενίσχυση της εμπιστοσύνης σε καινοτόμες τεχνολογίες μέσω θεσμικών ρυθμίσεων και μηχανισμών δοκιμών. Η προτεινόμενη προσέγγιση βοηθά στην κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την εφαρμογή έξυπνων ενεργειακών λύσεων και προσφέρει ένα πρακτικό εργαλείο για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών ενεργειακών πολιτικών.

Λέξεις κλειδιά: Έξυπνες ενεργειακές τεχνολογίες, Ενεργειακή μετάβαση, Πολυκριτήρια ανάλυση, DEMATEL, Fuzzy Logic, VIKOR

Abstract

The study presents an integrated framework for the evaluation and ranking of smart energy technologies, aiming to support strategic decision-making within the context of the energy transition. The proposed methodology combines three methods: DEMATEL, Fuzzy Logic, and VIKOR. This approach is based on three main axes—economic, environmental, and technical—offering a flexible and reliable tool for evaluating alternative solutions.

The analysis was based on the participation of three distinct professional groups in the energy sector: engineers, consultants, and managerial executives. Through questionnaires, the perceptions and priorities of each group were recorded, highlighting the differences arising from their professional role and expectations. The evaluation showed that each professional category focuses on different criteria, as engineers emphasize technical reliability and maturity, consultants focus on economic efficiency, while executives concentrate on strategic implementation issues and risk. At the same time, significant challenges are recognized, such as system interoperability and cybersecurity.

The implementation of this study confirms that there is no universally optimal technological solution, but that acceptance and prioritization depend on the application context and the involved stakeholders. The importance of a holistic and participatory approach is emphasized, with a focus on cross-sectoral collaboration and building trust in innovative technologies through regulatory frameworks and testing mechanisms. The proposed approach helps to understand the factors that affect the implementation of smart energy solutions and offers a practical tool for designing effective energy policies.

Keywords: Smart energy technologies, Energy transition, Multi-criteria analysis, DEMATEL, Fuzzy Logic, VIKOR

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια Διεπιστημονικό – Διαπανεπιστημιακό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Τεχνοοικονομικά Συστήματα», του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και του Πανεπιστημίου Πειραιώς. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο της διπλωματικής μου εργασίας καθηγητή κ. Ευάγγελο Μαρινάκη, καθώς και την Ιωάννα Ανδρεουλάκη, ερευνήτρια του Εργαστηρίου Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης, για την δυνατότητα που μου έδωσαν να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Ακόμα θα ήθελα να τους ευχαριστήσω για την πολύτιμη καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και για τις χρήσιμες πληροφορίες που μου προσέφεραν.

Τέλος, δεν μπορώ να παραλείψω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και του φίλους μου για την στήριξη τους σε όλη τη διάρκεια φοίτησης μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα και ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια συγγραφής της παρούσας μελέτης.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	11
1.1. Στόχος της εργασίας	11
1.2. Στάδια υλοποίησης	12
1.3. Δομή.....	13
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	15
2.1 Κλιματική κρίση και κατανάλωση ενέργειας	15
2.2 Έξυπνα ενεργειακά συστήματα	17
2.3 Νέες τεχνολογίες στον ενεργειακό κλάδο.....	18
3. Υφιστάμενη κατάσταση των έξυπνων ενεργειακών συστημάτων.....	22
3.1 Έξυπνα συστήματα ενέργειας.....	22
3.2 Πιλοτικά Έργα και Μελέτες Περιπτώσεων	34
3.3 Προκλήσεις και ευκαιρίες στην κλιμάκωση των υπηρεσιών έξυπνης ενέργειας.....	41
4. Μεθοδολογία.....	44
4.1. Εναλλακτικές λύσεις του προβλήματος.....	44
4.2. Κριτήρια.....	44
4.3. Μέθοδοι αξιολόγησης.....	46
4.3.1. Υπολογισμός Βαρών	47
4.3.2. Fuzzy - Linguistic Variables for Scoring Alternatives Against Criteria	48
4.3.3 Ιεράρχηση (VIKOR)	49
5. Εφαρμογή μεθοδολογίας.....	50
6. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	61
7. Συμπεράσματα.....	64
8. Βιβλιογραφία	66
Παράρτημα Ι – DEMATEL.....	72
Παράρτημα ΙΙ – Fuzzy Logic & VIKOR.....	87

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Στάδια υλοποίησης εργασίας	12
Εικόνα 2 Στατιστική απεικόνιση επαγγελματικού ρόλου δείγματος	53
Εικόνα 3 Στατιστική απεικόνιση επαγγελματικής εμπειρίας δείγματος	53
Εικόνα 4 Στατιστική απεικόνιση επαγγελματικού τομέα δείγματος.....	54
Εικόνα 5 Τελική Ιεράρχηση ανά Κατηγορία Δείγματος.....	61

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Πίνακας βαρών βασικών κριτηρίων	50
Πίνακας 2 Πίνακας βαρών οικονομικών κριτηρίων	52
Πίνακας 3 Αντιστοίχιση Λεκτικών Τιμών σε Τριγωνικούς Ασαφείς Αριθμούς (TFN) και Αποθλοωποιημένες Τιμές.....	55
Πίνακας 4 Κατηγοριοποίηση Οικονομικών Κριτηρίων σε Κριτήρια Οφέλους (B) και Κριτήρια Κόστους (C)	55
Πίνακας 5 Δείκτης Συμβιβασμού (Q) για Ενεργειακές Τεχνολογίες βάσει Αξιολόγησης Μηχανικού/Τεχνικού Ειδικού	57
Πίνακας 6 Δείκτης Συμβιβασμού (Q) για Ενεργειακές Τεχνολογίες βάσει Αξιολόγησης Συμβούλου .	58
Πίνακας 7 Δείκτης Συμβιβασμού (Q) για Ενεργειακές Τεχνολογίες βάσει Αξιολόγησης Μηχανικού/Τεχνικού Διοικητικών Στελεχών	59

Κατάλογος Αρκτικόλεξων

AI	Artificial Intelligence - Τεχνητή Νοημοσύνη
ML	Machine Learning - Μηχανική μάθηση
AMI	Advanced Metering Infrastructure - προηγμένες υποδομές μέτρησης
BAS	Building Automation System - Συστήματα Αυτοματισμού Κτιρίων
BDD	Bad data detection - Ανίχνευση Κακών Δεδομένων
CCS	Carbon Capture Storage - Δέσμευση και Αποθήκευση Άνθρακα
DER	Distributed Energy Resource - Κατανεμημένοι ενεργειακοί πόροι
DR	Demand Response - Απόκριση Ζήτησης
E.E.	Ευρωπαϊκή Ένωση
EaaS	Energy as a Service - Ενέργεια ως Υπηρεσία
EMS	Energy Management System - Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας
EVs	Electrical Vehicles - ηλεκτρικά οχήματα
GHG	Greenhouse Gases - Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου
HVAC	Heating, Ventilation, and Air Conditioning - θέρμανση, αερισμός και κλιματισμός
IoT	Internet of Things - Διαδίκτυο των πραγμάτων
IT	Information Technology - Τεχνολογίες πληροφοριών
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis - Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων
P2P	peer-to-peer - ανταλλαγή ενέργειας από καταναλωτή σε καταναλωτή
PKI	Public Key Infrastructure - Υποδομή Δημόσιου Κλειδιού
TFNs	Triangular Fuzzy Numbers - Τριγωνικοί ασαφείς αριθμοί
TRL	Technology Rediness Level - Επίπεδο Τεχνολογικής Ετοιμότητας
UNFCCC	Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για τις Κλιματικές Μεταβολές
V2G	Vehicle-to-Grid
VPPs	Virtual Power Plants - εικονικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

1. Εισαγωγή

1.1. Στόχος της εργασίας

Στην εποχή της ενεργειακής μετάβασης και των έξυπνων τεχνολογιών είναι ιδιαίτερα σημαντική η υιοθέτηση και η ενσωμάτωση νέων ενεργειακών λύσεων. Για την επίτευξη των στόχων βιωσιμότητας που έχουν τεθεί τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε εθνικό επίπεδο κρίνεται απαραίτητη η μελέτη και μετέπειτα αφομοίωση τέτοιων λύσεων στο ενεργειακό σύστημα της χώρας. Πρόκειται για λύσεις όπως τα έξυπνα συστήματα μέτρησης και διαχείρισης ενέργειας, τις υποδομές για την υποστήριξη των ηλεκτρικών οχημάτων, τα αυτοματοποιημένα συστήματα κτιρίων και άλλες.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει στόχο τη δημιουργία μεθοδολογίας για την αξιολόγηση και ιεράρχηση δεκατριών έξυπνων λύσεων στον τομέα της ενέργειας, με βάση συγκεκριμένα κριτήρια, μέσω πολυκριτήριας ανάλυσης.

Σε πρώτο στάδιο, η εργασία επικεντρώνεται στη συλλογή πληροφοριών από πιλοτικά έργα που έχουν υλοποιηθεί σε ευρωπαϊκό επίπεδο, αναλύοντας τις βασικές τεχνολογίες όπως το blockchain, η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), η Μηχανική Μάθηση (ML) και το Internet of Things (IoT).

Έπειτα, για την αξιολόγηση χρησιμοποιείται πολυκριτήρια μεθοδολογία σε τρία διακριτά μέρη:

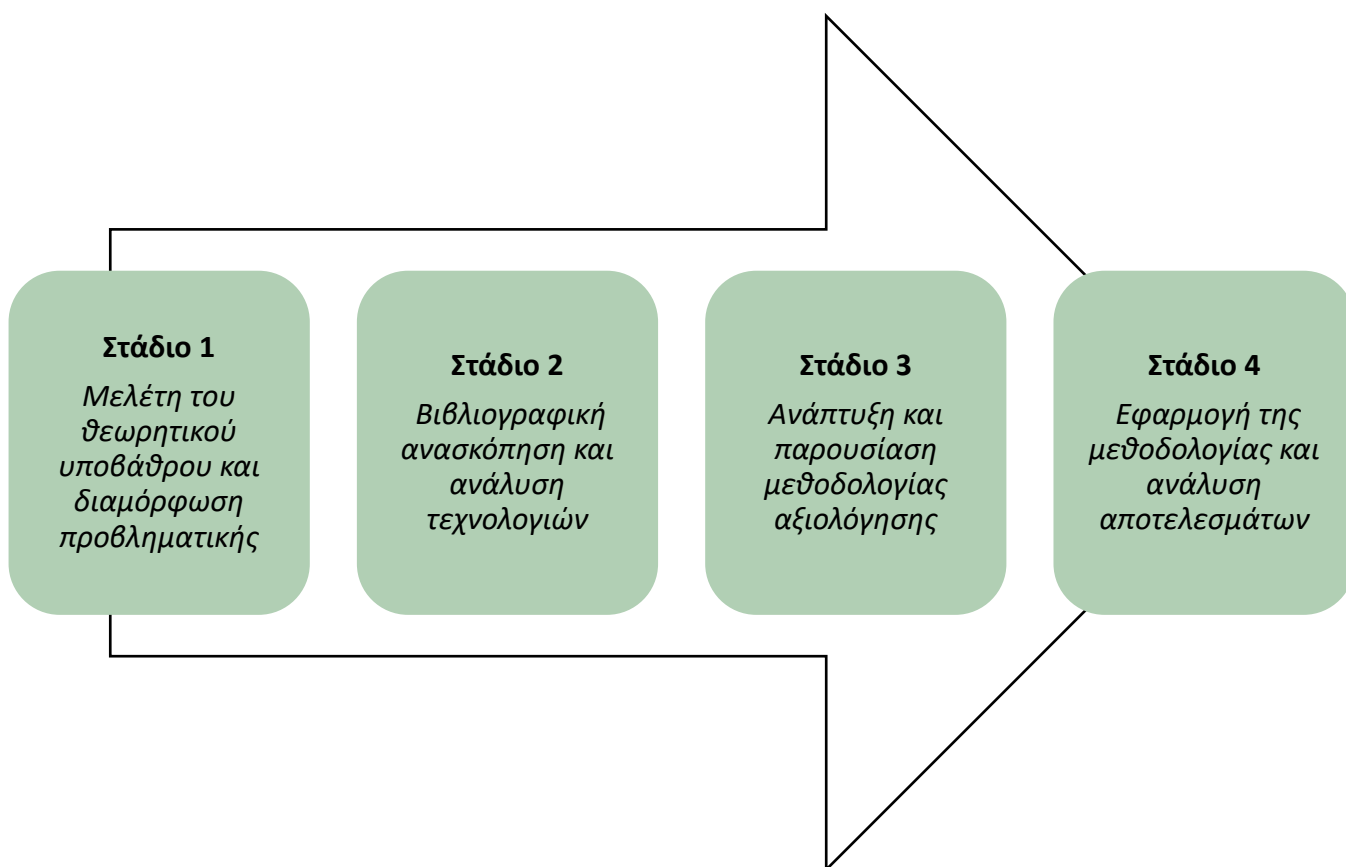
- Η μέθοδος DEMATEL χρησιμοποιείται για να καθορίσει τα βάρη των κριτηρίων,
- Η Fuzzy λογική χρησιμοποιείται για την ανάλυση των αποτελεσμάτων από τα ερωτηματολόγια που συμπληρώνονται από ειδικούς, μετατρέποντας τις ποιοτικές απόψεις τους σε ποσοτικά δεδομένα και τέλος
- Η μέθοδος VIKOR εφαρμόζεται για να γίνει η τελική αξιολόγηση και κατάταξη των τεχνολογιών, βάσει των κριτηρίων και των βαρών τους.

Για την υλοποίηση των παραπάνω λαμβάνονται υπόψη οικονομικά, περιβαλλοντικά, τεχνικά, κοινωνικά καθώς και ρυθμιστικά κριτήρια, τα οποία απαρτίζονται από άλλα υποκριτήρια αντίστοιχα για την βέλτιστη υλοποίηση της μεθοδολογίας, όπως το οικονομικό ρίσκο, την τεχνολογική ωριμότητα, τη συμβολή των τεχνολογιών στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, τη ρυθμιστική ωριμότητα κ.ά.

Το τελικό αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας είναι η ιεράρχηση των έξυπνων ενεργειακών τεχνολογιών, ανά κατηγορία εμπειρογνώμονα, μηχανικού, σύμβουλοι και διοίκηση, ώστε να δημιουργηθεί μία σαφής εικόνα για την ετοιμότητα και καταλληλότητα κάθε λύσεις, πληροφορία χρήσιμη τόσο για μελλοντικές μελέτες και στρατηγικές όσο και για πιθανή υλοποίηση από επενδυτές.

1.2. Στάδια υλοποίησης

Τα στάδια υλοποίησης της παρούσας διπλωματικής παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα και αναλυτικότερα στις αντίστοιχες παραγράφους:



Εικόνα 1 Στάδια υλοποίησης εργασίας

- Στάδιο 1: Μελέτη του θεωρητικού υποβάθρου και διαμόρφωση προβληματικής

Σε αρχικό στάδιο πραγματοποιήθηκε η ανάλυση του θεωρητικού πλαισίου. Εξετάστηκε ο ευρύτερος λόγος για τον οποίο κρίνεται απαραίτητη η μελέτη των έξυπνων ενεργειακών υπηρεσιών, με ιδιαίτερη αναφορά στην κλιματική κρίση, τη βιωσιμότητα, την ανάγκη περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου καθώς και τις στρατηγικές κατευθύνσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ενεργειακή μετάβαση.

- Στάδιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση και ανάλυση τεχνολογιών

Το δεύτερο στάδιο της εργασίας περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική έρευνα και επισκόπηση των διαθέσιμων έξυπνων ενεργειακών τεχνολογιών. Παρουσιάζονται οι κύριες τεχνολογίες που θα αξιολογηθούν σε μετέπειτα στάδια και εξετάζεται συνοπτικά η εξέλιξη αυτών. Ακόμα, γίνονται

αναφορές σε πιλοτικά έργα που έχουν υλοποιηθεί (case studies) σε ευρωπαϊκές χώρες, με στόχο την καλύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων και περιορισμών κάθε τεχνολογίας στην πράξη.

- Στάδιο 3: Ανάπτυξη και παρουσίαση μεθοδολογίας αξιολόγησης

Το τρίτο στάδιο αφορά την παρουσίαση της μεθοδολογίας που υιοθετήθηκε για την αξιολόγηση και κατάταξη των έξυπνων ενεργειακών υπηρεσιών. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε πολυκριτήρια προσέγγιση, η οποία συνδυάζει:

- ο τη μέθοδο DEMATEL για τον προσδιορισμό των βαρών των κριτηρίων αξιολόγησης,
- ο τη Fuzzy λογική για την ποσοτικοποίηση των ποιοτικών απαντήσεων που προέκυψαν από το ερωτηματολόγιο, και
- ο τη μέθοδο VIKOR για την τελική κατάταξη των τεχνολογιών βάσει της απόστασής τους από τη «βέλτιστη» λύση.

- Στάδιο 4: Εφαρμογή της μεθοδολογίας και ανάλυση αποτελεσμάτων

Στην τελευταία φάση πραγματοποιήθηκε η πρακτική εφαρμογή της μεθοδολογίας. Έγινε η συλλογή και επεξεργασία των απαντήσεων των συμμετεχόντων στο ερωτηματολόγιο, εφαρμόστηκαν τα επιμέρους βήματα των μεθόδων DEMATEL, Fuzzy και VIKOR και στη συνέχεια εξήχθησαν τα τελικά αποτελέσματα αξιολόγησης.

1.3. Δομή

Η διπλωματική εργασία δομείται σε επτά βασικά κεφάλαια, όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

- Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο της εργασίας, ο σκοπός και η σημασία της μελέτης, καθώς και τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα και οι στόχοι.

- Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο

Αναλύεται η αναγκαιότητα μελέτης των έξυπνων ενεργειακών υπηρεσιών στο πλαίσιο της κλιματικής κρίσης και της ενεργειακής μετάβασης. Εξετάζονται οι στρατηγικές και πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη βιώσιμη ενέργεια, καθώς και ο ρόλος των καινοτόμων τεχνολογιών στην υποστήριξη αυτών των στόχων.

- Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες έξυπνων ενεργειακών τεχνολογιών και παρουσιάζονται παραδείγματα πιλοτικών έργων (case studies) που έχουν εφαρμοστεί σε ευρωπαϊκές και άλλες χώρες.

- Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία

Αναπτύσσεται αναλυτικά η πολυκριτήρια μεθοδολογία αξιολόγησης που χρησιμοποιείται για την ιεράρχηση των τεχνολογιών. Παρουσιάζονται οι μέθοδοι DEMATEL, Fuzzy Logic και VIKOR, καθώς και ο τρόπος εφαρμογής τους στο πλαίσιο της εργασίας.

- Κεφάλαιο 5: Εφαρμογή της Μεθοδολογίας

Γίνεται η πρακτική εφαρμογή της μεθοδολογίας αξιολόγησης. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ερωτηματολογίων, η ανάλυση των δεδομένων και η τελική κατάταξη των τεχνολογιών σύμφωνα με τα επιλεγμένα κριτήρια.

- Κεφάλαιο 6: Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Αφορά στον σχολιασμό των ευρημάτων της ανάλυσης και παρουσιάζονται οι προτεραιότητες, τα πιθανά πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί τους, καθώς και η σημασία των αποτελεσμάτων για τη λήψη αποφάσεων.

- Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

Παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα ή πρακτική εφαρμογή.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Κλιματική κρίση και κατανάλωση ενέργειας

Στη Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για τις Κλιματικές Μεταβολές (UNFCCC), η κλιματική αλλαγή ορίζεται ως η μεταβολή στο κλίμα που οφείλεται άμεσα ή έμμεσα σε ανθρώπινες δραστηριότητες, διακρίνοντας τον όρο από την κλιματική μεταβλητότητα που έχει φυσικά αίτια. Συγκεκριμένα, προκαλείται κυρίως από τις δραστηριότητες οι οποίες απελευθερώνουν υπερβολικά μεγάλες ποσότητες εκπομπών του θερμοκηπίου. Η συνθήκη αυτή οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας, στην αύξηση συχνότητας εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων και στην καταστροφή οικοσυστημάτων συνεπάγοντας σημαντικούς κινδύνους για την υγεία του ανθρώπου, την οικονομία και τη φύση (Gabric, 2023). Ένα από τα βασικότερα μέρη του προβλήματος αποτελεί η χρήση των ορυκτών καυσίμων όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, τα οποία όχι μόνο δημιουργούν μεγάλες ποσότητες εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αλλά δημιουργούν σημαντικά ενεργειακά προβλήματα κατά τη διάρκεια παγκόσμιων κρίσεων (Farghali, et al., 2023). Η χρήση ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την τροφοδοσία των μεταφορών και την οδήγηση βιομηχανικών διεργασιών αντιπροσωπεύει περίπου το 75% των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (Farghali, et al., 2023).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.), έχει θέσει στόχους για την μείωση των επιβλαβών εκπομπών και κάθε κράτος-μέλος βάσει των ευρωπαϊκών οδηγιών και τους αντίστοιχους στόχους για το 2030 και 2050, έχει καθιερώσει και υιοθετήσει διαφορετικές προσεγγίσεις, με τις ταρίφες τροφοδότησης (feed-in tariffs)¹ να αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία για την ένταξη των ΑΠΕ στη ζήτηση ενέργειας (Fleck & Anatolitis, 2023). Η Συμφωνία του Παρισιού δεσμεύει τα κράτη-μέλη να διατηρήσουν την παγκόσμια μέση θερμοκρασία κάτω από τους 2 °C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα (Gabric, 2023). Οι επιστημονικές μελέτες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι για να περιοριστεί η αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας στην επιφάνεια απαιτείται σχεδόν πλήρης εξάλειψη των εκπομπών CO₂ (Parmesan & Hanley, 2015), καθώς και μια σταδιακή μείωση της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα (Doney, et al., 2020). Παρά τη σημαντική πρόοδο, η επίτευξη της σταθεροποίησης του παγκόσμιου κλίματος παραμένει μια μακροπρόθεσμη πρόκληση. Ακόμη και τα πιο φιλόδοξα σενάρια που προβλέπουν έντονα μέτρα μετριασμού εκτιμούν ότι η επίτευξη παγκόσμιων καθαρών μηδενικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου δεν θα γίνει πραγματικότητα πριν από τη δεκαετία του 2060 (Vicedo-Cabrera, et al., 2021).

¹ Οι feed-in ταρίφες επιτρέπει στους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ να πωλούν την ηλεκτρική τους ενέργεια σε σταθερή τιμή ανά κιλοβατώρα (kWh).

Οι προσπάθειες για τη μείωση των εκπομπών με παράλληλη κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών αποδεικνύονται ιδιαίτερα δύσκολες. Η μετάβαση στην πράσινη ενέργεια, μέσω των ΑΠΕ και άλλων τεχνολογιών, π.χ. υδρογόνο, παρουσιάζει εμπόδια όπως το υψηλό κόστος των τεχνολογιών, η επιρροή των βιομηχανιών ορυκτών καυσίμων καθώς και η ανάγκη για τις απαραίτητες αναβαθμίσεις των υφιστάμενων υποδομών ώστε να είναι σε θέση να υποδεχτούν αποτελεσματικά την παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ (Korneeva, et al., 2024). Παρά τις διεθνείς συμφωνίες για μείωση των εκπομπών και την προσαρμογή και μετριασμό της κλιματικής αλλαγής η πρόοδος των κρατών μελών παρουσιάζεται αρκετά ασυνεπής. Μεγάλος αριθμός χωρών εξακολουθεί να εξαρτάται στο μεγαλύτερο μέρος από ορυκτά καύσιμα δημιουργώντας συγκρούσεις μεταξύ της κάλυψης των άμεσων ενεργειακών αναγκών και των μακροπρόθεσμων κλιματικών στόχων (Borowski, 2022). Ένας βασικός τρόπος αντιμετώπισης των παραπάνω προκλήσεων αποτελεί η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μέσω βελτιστοποίησης της αποδοτικότητας αυτής, υιοθετώντας μέτρα όπως τα αποδοτικότερα μέσα μεταφοράς και ο εκσυγχρονισμός των βιομηχανιών διαδικασιών. Οι στρατηγικές που επικεντρώνονται στη μείωση της ζήτησης ενέργειας αναγνωρίζονται ως κρίσιμες για τον μετριασμό της κλιματικής κρίσης (Farghali, et al., 2023). Ωστόσο, για να μετασχηματιστεί πραγματικά το ενεργειακό τοπίο, είναι απαραίτητη η στροφή προς τα έξυπνα ενεργειακά συστήματα.

Τα έξυπνα ενεργειακά συστήματα αντιπροσωπεύουν μια νέα προσέγγιση στη διαχείριση της ενέργειας, χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνολογίες για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής, της διανομής και της κατανάλωσης. Αυτά τα συστήματα ενσωματώνουν εργαλεία όπως έξυπνα δίκτυα, έξυπνες πλατφόρμες διαχείρισης ενέργειας και προηγμένες συσκευές μέτρησης για να διασφαλίσουν ότι η ενέργεια χρησιμοποιείται όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά και βιώσιμα. Επιτρέποντας την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και τον προσαρμοστικό έλεγχο, τα έξυπνα συστήματα συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση της σπατάλης ενέργειας και ενισχύουν την αξιοπιστία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Korneeva, et al., 2024). Η ενεργειακή κρίση του 2022 φανέρωσε τον επείγοντα χαρακτήρα αυτών των λύσεων. Πολλά έθνη αντιμετώπισαν διακοπές στον εφοδιασμό και ραγδαία αύξηση των τιμών της ενέργειας, υπογραμμίζοντας τους κινδύνους της έντονης εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα και κεντρικά ενεργειακά συστήματα. Η διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας και η επένδυση σε καινοτόμες λύσεις όπως τα έξυπνα ενεργειακά συστήματα μπορούν όχι μόνο να ενισχύσουν την ενεργειακή ασφάλεια αλλά και να επιταχύνουν τη μετάβαση σε πιο πράσινες εναλλακτικές λύσεις. Αυτά τα συστήματα επιτρέπουν την καλύτερη ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, καθιστώντας τις πιο αξιόπιστες ακόμη και σε περιόδους κυμαινόμενης προσφοράς (Borowski, 2022).

Η αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης απαιτεί μια συνολική επανεξέταση του τρόπου με τον οποίο παράγουμε και καταναλώνουμε ενέργεια. Συνδυάζοντας τις βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση με την υιοθέτηση έξυπνων ενεργειακών συστημάτων, μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα πιο ανθεκτικό και βιώσιμο ενεργειακό μέλλον. Αυτές οι εξελίξεις, παράλληλα με την ευρύτερη ανάπτυξη τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αντιπροσωπεύουν ένα κρίσιμο βήμα προς την εξισορρόπηση της οικονομικής ανάπτυξης με τη διατήρηση του περιβάλλοντος.

2.2 Έξυπνα ενεργειακά συστήματα

Τα έξυπνα ενεργειακά συστήματα αποτελούν ένα από τα βασικά στοιχεία για την μετατροπή των παραδοσιακών συστημάτων με στόχο την καλύτερη αποδοτικότητα τους και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Τα συστήματα αυτά έχουν σχεδιαστεί ενσωματώνοντας τις ψηφιακές τεχνολογίες δίνοντας πρόσβαση σε δεδομένα σε πραγματικό χρόνο τόσο για τους καταναλωτές όσο και για τους παραγωγούς ώστε να παρακολουθούν και βελτιστοποιούν την χρήση ενέργειας. Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν από βασικές τεχνολογίες όπως η παρακολούθηση κατανάλωσης συσκευών έως και πολύ πιο σύνθετες όπως προγράμματα ανταπόκρισης ζήτησης και αποθήκευσης ενέργειας. Ένα από τα πιο βασικά στοιχεία των έξυπνων ενεργειακών συστημάτων είναι η έξυπνη μέτρηση (smart metering), η οποία επιτρέπει τη λεπτομερή παρακολούθηση της χρήσης ενέργειας. Παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, οι έξυπνοι μετρητές επιτρέπουν στους καταναλωτές να κατανοήσουν τα πρότυπα κατανάλωσης ενέργειας, οδηγώντας τους σε πιο ενημερωμένες αποφάσεις και ενθαρρύνοντας συμπεριφορές εξοικονόμησης ενέργειας. Οι πάροχοι επίσης μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτά τα δεδομένα για να βελτιώσουν τη διανομή ενέργειας, να μειώσουν τις απώλειες και να εξασφαλίσουν πιο ορθή τιμολόγηση (Deligiannis, et al., 2019). Σημειώνεται πως η ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης και της τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να βελτιστοποιήσουν στο μέγιστο στην χρήση αυτών των ενεργειακών συστημάτων καθώς είναι σε θέση να αναλύσουν τα πρότυπα ζήτησης ενέργειας και συνεπώς να προβλέψουν έγκυρα τη μελλοντική ζήτηση, βοηθώντας με αυτό το τρόπο την βέλτιστη διανομή ενέργειας και διαχείριση του κόστους. Τα προγράμματα απόκρισης ζήτησης (Demand-Response) ενθαρρύνουν τους καταναλωτές να προσαρμόζουν την χρήση ενέργειας κατά τις περιόδους αιχμής ζήτησης, καθώς και να υλοποιούν στρατηγικές εξοικονόμησης ενέργειας (Aalami, et al., 2010).

Επιπλέον, η ενσωμάτωση ΑΠΕ είναι απαραίτητη για τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και την αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης. Ωστόσο, οι ΑΠΕ είναι συχνά διακοπτόμενες, γεγονός που δυσχεραίνει την εξισορρόπηση προσφοράς και ζήτησης. Οι έξυπνες ενεργειακές υπηρεσίες δίνουν λύση σε αυτό το πρόβλημα μέσω τεχνολογιών όπως η αποθήκευση ενέργειας και τα συστήματα διαχείρισης του δικτύου. Το IoT και η τεχνολογία blockchain συμβάλλουν στην παρακολούθηση της παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας την αποτελεσματική αποθήκευση και

μετέπειτα διανομή (Bussar, et al., 2016). Αυτή η προσέγγιση μειώνει επίσης τις εκπομπές ρύπων, επιτρέποντας την αυξημένη ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών στο δίκτυο. Τα ηλεκτρικά οχήματα (Electrical Vehicles - EVs) αποτελούν ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο του έξυπνου ενεργειακού συστήματος. Με τη σύνδεση των EVs σε έξυπνα δίκτυα, η χρήση ενέργειας μπορεί να βελτιστοποιηθεί, ενώ η περίσσεια ενέργειας μπορεί να αποθηκεύεται στις μπαταρίες των οχημάτων κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης και να επιστρέφεται στο δίκτυο όταν η ζήτηση αυξάνεται. Αυτή η τεχνολογία, Vehicle-to-Grid (V2G), ενισχύει τη σταθερότητα του δικτύου και υποστηρίζει την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Mahmud, et al., 2021). Τέλος, οι εικονικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας (Virtual Power Plants - VPPs) και οι πλατφόρμες εμπορίας ενέργειας αναδεικνύονται ως καινοτόμες λύσεις για την ενίσχυση της ευελιξίας του δικτύου. Οι VPPs συγκεντρώνουν καταναλωτές ενέργειας, όπως ηλιακά πάνελ και μπαταρίες, δημιουργώντας μια εικονική, κεντροποιημένη πηγή ενέργειας. Με τη διαχείριση αυτών των πόρων από κοινού, οι VPPs επιτρέπουν πιο αποδοτική χρήση της ανανεώσιμης ενέργειας, ενώ οι πλατφόρμες εμπορίας ενέργειας, υποστηριζόμενες από blockchain, διευκολύνουν τις απευθείας συναλλαγές μεταξύ καταναλωτών, καθιστώντας τη χρήση ενέργειας πιο αποκεντρωμένη (Mahmud, et al., 2021). Οι έξυπνες ενεργειακές υπηρεσίες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, στην υποστήριξη της ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών και στη συμβολή στην επίτευξη κλιματικών στόχων. Μέσω προηγμένων τεχνολογιών αυτές οι υπηρεσίες συμβάλλουν στη δημιουργία ενός πιο βιώσιμου και ανθεκτικού ενεργειακού συστήματος για το μέλλον.

2.3 Νέες τεχνολογίες στον ενεργειακό κλάδο

Οι νέες τεχνολογίες προωθούν εξελίξεις στον ενεργειακό κλάδο που επιτρέπουν πιο βιώσιμα, αποδοτικά και ανθεκτικά ενεργειακά συστήματα. Τεχνολογίες όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), το blockchain, η AI, η ML και η ανάλυση μεγάλων δεδομένων ενισχύουν την ικανότητα παρακολούθησης, διαχείρισης και βελτιστοποίησης της παραγωγής, της διανομής και της κατανάλωσης ενέργειας. Με τη δυνατότητα συλλογής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και τον αυτοματισμό, οι τεχνολογίες αυτές παρέχουν νέα εργαλεία για τη βελτίωση της σταθερότητας του δικτύου, την αύξηση της αποδοτικότητας και την καλύτερη ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις υπάρχουσες υποδομές. Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει πώς αυτές οι τεχνολογίες διαμορφώνουν τον ενεργειακό κλάδο, εστιάζοντας στον ρόλο τους στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, τη διευκόλυνση της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών και την προώθηση των προσπαθειών βιωσιμότητας. Η συλλογική δυναμική αυτών των τεχνολογιών να φέρουν επανάσταση στα ενεργειακά συστήματα υπογραμμίζει τη σημασία τους στη μετάβαση προς ένα χαμηλών εκπομπών άνθρακα και βιώσιμο μέλλον.

Το IoT αποτελεί θεμέλιο των σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων, επιτρέποντας την αδιάλειπτη επικοινωνία μεταξύ συσκευών, αισθητήρων και της υποδομής του δικτύου. Το IoT περιλαμβάνει την ενσωμάτωση αισθητήρων, όπως μετρητές, μετασχηματιστές και γεννήτριες, για τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Στα ενεργειακά συστήματα, αυτή η συνδεσιμότητα επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας, της σταθερότητας του δικτύου και της κατάστασης του εξοπλισμού. Οι συσκευές IoT συλλέγουν δεδομένα, τα οποία μπορούν να αναλυθούν για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής, της διανομής και της κατανάλωσης ενέργειας, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος και μειώνοντας τα λειτουργικά κόστη (Hossein Motlagh, et al., 2020).

Για παράδειγμα, στα έξυπνα δίκτυα, το IoT επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από πολλαπλά σημεία, συμπεριλαμβανομένων κατοικιών, επιχειρήσεων και σταθμών παραγωγής ενέργειας. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση βλαβών, τη βελτιστοποίηση της ροής ενέργειας και την πρόβλεψη βλαβών του εξοπλισμού πριν αυτές συμβούν, μειώνοντας έτσι τον χρόνο διακοπής λειτουργίας και το κόστος συντήρησης. Η εγκατάσταση έξυπνων μετρητών, που αποτελούν βασικά στοιχεία του IoT, επιτρέπει λεπτομερή παρακολούθηση των προτύπων κατανάλωσης ενέργειας, δίνοντας στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας τη δυνατότητα να διαχειρίζονται τη ζήτηση πιο αποτελεσματικά και να εφαρμόζουν δυναμικές τιμολογιακές στρατηγικές.

Επιπλέον, το IoT παίζει ζωτικό ρόλο στην ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή. Μέσω της παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, οι εταιρείες κοινής ωφέλειας μπορούν να προσαρμόζουν τη λειτουργία του δικτύου με βάση τις διακυμάνσεις της παραγωγής ενέργειας από αυτές τις διαλείπουσες πηγές, διασφαλίζοντας έτσι μια σταθερή και αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, παρά τη μεταβλητότητα της παραγωγής (Ahmad & Zhang, 2021). Με τη δυνατότητα προγνωστικής συντήρησης, τη βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος και την υποστήριξη της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών, το IoT συμβάλλει σημαντικά στην ανθεκτικότητα και τη βιωσιμότητα των σύγχρονων ενεργειακών δικτύων (Hoque, et al., 2024).

Η τεχνολογία blockchain φέρνει επανάσταση στον ενεργειακό τομέα, παρέχοντας έναν αποκεντρωμένο, διαφανή και ασφαλή τρόπο καταγραφής και επαλήθευσης συναλλαγών. Στις αγορές ενέργειας, το blockchain μπορεί να αυτοματοποιήσει και να απλοποιήσει διαδικασίες, όπως το εμπόριο ενέργειας, η πιστοποίηση ανανεώσιμης ενέργειας και η διαχείριση πιστώσεων άνθρακα. Η ικανότητά του να δημιουργεί αμετάβλητα ψηφιακά λογιστικά βιβλία διασφαλίζει ότι οι συναλλαγές είναι διαφανείς, ασφαλείς και ανθεκτικές στην αλλοίωση, αυξάνοντας την εμπιστοσύνη μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών (Wang & Su, 2020).

Μία από τις βασικές εφαρμογές του blockchain στον ενεργειακό τομέα είναι η ανταλλαγή ενέργειας από καταναλωτή σε καταναλωτή (peer-to-peer, P2P). Χρησιμοποιώντας έξυπνα συμβόλαια, το blockchain διευκολύνει την άμεση ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ καταναλωτών, παραγωγών και "prosumer" (δηλαδή εκείνων που καταναλώνουν αλλά και παράγουν ενέργεια), χωρίς την ανάγκη διαμεσολαβητών. Αυτό μειώνει το κόστος συναλλαγών και αυξάνει την αποδοτικότητα της αγοράς, επιτρέποντας στους συμμετέχοντες να εμπορεύονται ενέργεια σε μια αποκεντρωμένη πλατφόρμα.

Επιπλέον, το blockchain επιτρέπει τη διαχείριση και την πιστοποίηση πιστώσεων ανανεώσιμης ενέργειας, διασφαλίζοντας ότι η προέλευση της πράσινης ενέργειας είναι διαφανής και επαληθεύσιμη. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς όλο και περισσότερες επιχειρήσεις και άτομα επιδιώκουν να επιτύχουν στόχους βιωσιμότητας και να μειώσουν το αποτύπωμα άνθρακα. Το blockchain μπορεί να παρακολουθεί και να επαληθεύει την παραγωγή και κατανάλωση ανανεώσιμης ενέργειας, επιτρέποντας στους καταναλωτές να λαμβάνουν ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με τις πηγές ενέργειάς τους. Το blockchain μπορεί να βελτιώσει την ασφάλεια του δικτύου, αποκεντρώνοντας την αποθήκευση δεδομένων και καθιστώντας το πιο ανθεκτικό σε κυβερνοεπιθέσεις. Απομακρύνοντας τη συγκεντρωτική διαχείριση, το blockchain ενισχύει την ανθεκτικότητα των ενεργειακών δικτύων, καθιστώντας τα πιο ασφαλή και αξιόπιστα απέναντι στις αυξανόμενες ψηφιακές απειλές (Raihan, 2023).

Η ΑΙ διαδραματίζει ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στον ενεργειακό τομέα, προσφέροντας προηγμένα εργαλεία ανάλυσης δεδομένων, βελτιστοποίησης και αυτοματοποίησης. Η ΑΙ αξιοποιεί μεγάλα σύνολα δεδομένων που δημιουργούνται από συσκευές IoT, έξυπνους μετρητές και αισθητήρες για την ανάπτυξη προγνωστικών μοντέλων που βελτιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας, βελτιώνουν τη λειτουργία του δικτύου και ενισχύουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων (Lyu & Liu, 2021). Οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να αναλύουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας τη δυναμική προσαρμογή της διανομής ενέργειας με βάση τη ζήτηση, την παραγωγή και τις συνθήκες του συστήματος. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στη διαχείριση της πολυπλοκότητας των σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων, όπου η παραγωγή ενέργειας είναι συχνά αποκεντρωμένη και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επηρεάζονται από εξωτερικούς παράγοντες, όπως οι καιρικές συνθήκες.

Η ML, ένας υποκλάδος της τεχνητής νοημοσύνης, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στη διαχείριση των τεράστιων όγκων δεδομένων που παράγονται από συσκευές IoT και αισθητήρες στον ενεργειακό τομέα. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να μάθουν από ιστορικά δεδομένα και να εντοπίζουν μοτίβα που είναι δύσκολο να ανιχνευθούν από τους ανθρώπους, επιτρέποντας πιο ακριβείς προβλέψεις, ανίχνευση ανωμαλιών και βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας (Nabavi, et al., 2020).

Η ανάλυση μεγάλων δεδομένων (Big Data Analytics) μεταμορφώνει επίσης τον ενεργειακό τομέα, επιτρέποντας την επεξεργασία και την ανάλυση πολύπλοκων συνόλων δεδομένων. Η εφαρμογή προηγμένων αναλυτικών τεχνικών βοηθά τις ενεργειακές εταιρείες να λαμβάνουν καλύτερες αποφάσεις, να διαχειρίζονται πιο αποτελεσματικά τα δίκτυά τους και να μειώνουν το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα (Munodawafa & Johl, 2019).

3. Υφιστάμενη κατάσταση των έξυπνων ενεργειακών συστημάτων

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η υφιστάμενη κατάσταση των έξυπνων ενεργειακών συστημάτων, με έμφαση στις τεχνολογίες καινοτομίας που υποστηρίζουν τη μετάβαση προς ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι βασικές έξυπνες ενεργειακές υπηρεσίες, όπως η έξυπνη μέτρηση, η απόκριση ζήτησης, η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η υποδομή φόρτισης και η αμφίδρομη διασύνδεση ηλεκτρικών οχημάτων με το δίκτυο, οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, τα συστήματα αυτοματισμού κτιρίων και οι ψηφιακές πλατφόρμες εμπορίας και διαχείρισης ενέργειας. Επίσης, αναλύονται τεχνολογίες πληροφορικής που απαιτούνται για την υλοποίηση των συστημάτων, το IoT, η ML, το blockchain και η ανάλυση μεγάλων δεδομένων. Στο δεύτερο μέρος της ενότητας παρουσιάζονται ορισμένα πιλοτικά έργα που έχουν υλοποιηθεί έως τώρα, τα οποία φανερώνουν την βιωσιμότητα των παραπάνω τεχνολογιών. Τέλος, παρουσιάζονται οι βασικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα συστήματα αυτά, όπως η κυβερνοασφάλεια, η επεκτασιμότητα και οι ρυθμιστικές απαιτήσεις αλλά και οι ευκαιρίες που για περαιτέρω ανάπτυξη, εφαρμογή και διάχυση των έξυπνων ενεργειακών λύσεων, στο πλαίσιο της παγκόσμιας προσπάθειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

3.1 Έξυπνα συστήματα ενέργειας

Το IoT έχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης συσκευών με το διαδίκτυο και έτσι τα ενεργειακά συστήματα είναι σε θέση να παράγουν πολύτιμες γνώσεις που τροφοδοτούν την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών, βελτιώνουν την απόδοση, αντιμετωπίζουν κρίσιμες προκλήσεις και επιτρέπουν τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Καθώς ο αριθμός των διασυνδεδεμένων συσκευών αυξάνεται, οι εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας αντιμετωπίζουν ολοένα και περισσότερο προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαλειτουργικότητα και την ασφάλεια. Για να ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις, οι προηγμένες τεχνολογίες πληροφοριών (IT) προσφέρουν ολοκληρωμένες λύσεις, συνδυάζοντας λογισμικό και υλικό προσαρμοσμένο στις ποικίλες ανάγκες της αγοράς ενέργειας. Αυτές οι τεχνολογίες έχουν σχεδιαστεί για να ενσωματώνονται απρόσκοπτα στα υπάρχοντα ενεργειακά δίκτυα, βελτιώνοντας την αξιοπιστία, την ασφάλεια και τη συνολική τους απόδοση. Η διαλειτουργικότητα και η διασυνδεσιμότητα αποτελούν τους ακρογωνιαίους λίθους των σύγχρονων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας, ειδικά για βιομηχανικές εγκαταστάσεις, διασφαλίζοντας ότι αυτά τα συστήματα λειτουργούν συνεκτικά και αποτελεσματικά. Η εφαρμογή του IoT σε διάφορους κλάδους και τομείς έχει διερευνηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία (Talari, et al., 2017). Αυτές οι μελέτες υπογραμμίζουν μια σημαντική μετατόπιση από τα παραδοσιακά προγράμματα συντήρησης και τους οπτικούς ελέγχους σε σύγχρονες πρακτικές όπως η απομακρυσμένη παρακολούθηση, τα σχέδια δικτύων που βασίζονται στο IoT και η προγνωστική συντήρηση. Για τις εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον ενεργειακό τομέα, αυτή η εξέλιξη απαιτεί μια προληπτική

προσέγγιση για την ασφαλή σύνδεση πόρων και περιουσιακών στοιχείων, τη διαχείριση των τεράστιων όγκων δεδομένων που παράγονται και την επίτευξη αυτών των στόχων με αποτελεσματικό και οικονομικό τρόπο.

Τα έξυπνα δίκτυα αποτελούν τη ραχοκοκαλιά των έξυπνων ενεργειακών συστημάτων και χρησιμεύουν ως βάση για τον εκσυγχρονισμό και τον μετασχηματισμό του ενεργειακού τοπίου. Τα έξυπνα δίκτυα ενσωματώνουν ψηφιακή επικοινωνία, συστήματα αυτοματισμού και προηγμένες τεχνολογίες για την ενίσχυση της αποδοτικότητας, της αξιοπιστίας και της βιωσιμότητας του δικτύου. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα, τα έξυπνα δίκτυα διαχειρίζονται δυναμικά την προσφορά και τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, διευκολύνουν την απρόσκοπτη ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο στους φορείς εκμετάλλευσης και τους καταναλωτές. Είναι απαραίτητα για την ενεργοποίηση της λειτουργικότητας των έξυπνων ενεργειακών συστημάτων και αποτελούν τη βάση για καινοτομίες όπως τα προγράμματα απόκρισης ζήτησης, η διαχείριση καταναμημένων ενεργειακών πόρων (Distributed Energy Resource - DER) και η προηγμένη ενεργειακή ανάλυση (Moreno Escobar, et al., 2021). Οι βασικές τεχνολογίες που απαιτούν τα έξυπνα δίκτυα περιλαμβάνουν συσκευές IoT για παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, αλγόριθμους ML για προγνωστική συντήρηση και πρόβλεψη ζήτησης, και blockchain για ασφαλείς και διαφανείς συναλλαγές ενέργειας. Οι αισθητήρες IoT που είναι εγκατεστημένοι σε όλη την υποδομή δικτύου συλλέγουν καίρια δεδομένα σχετικά με τη ροή ενέργειας, την απόδοση του εξοπλισμού και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτά τα δεδομένα αναλύονται από μοντέλα ML για τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών του δικτύου, την πρόληψη διακοπών και την ενίσχυση της ανθεκτικότητας του δικτύου (Yu, et al., 2011). Επιπλέον, τα έξυπνα δίκτυα επιτρέπουν προηγμένες υποδομές μέτρησης (Advanced Metering Infrastructure - AMI) που υποστηρίζουν αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των επιχειρήσεων κοινής ωφέλειας και των καταναλωτών, δίνοντας τη δυνατότητα στους χρήστες να διαχειρίζονται ενεργά την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος τους. Τα έξυπνα δίκτυα έχουν επίσης κρίσιμο ρόλο στην ενσωμάτωση καταναμημένων ενεργειακών πόρων, όπως ηλιακά πάνελ σε στέγες, ανεμογεννήτριες και συστήματα αποθήκευσης μπαταριών, επιτρέποντάς τους να λειτουργούν συνεκτικά εντός του ενεργειακού συστήματος. Τα προγράμματα απόκρισης ζήτησης, που υποστηρίζονται από τεχνολογίες έξυπνων δικτύων, εξισορροπούν δυναμικά τα φορτία ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις περιόδους αιχμής της ζήτησης, διασφαλίζοντας τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα του δικτύου. Τα οφέλη των έξυπνων δικτύων είναι τεράστια, όπως η βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση, η μειωμένη εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, η μεγαλύτερη ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η βελτιωμένη αξιοπιστία του δικτύου. Θέτοντας τα θεμέλια των έξυπνων ενεργειακών συστημάτων, επιτρέπουν τη μετάβαση σε ένα μέλλον χαμηλών εκπομπών άνθρακα και βιώσιμης ενέργειας. Ωστόσο, προκλήσεις

όπως το υψηλό κόστος υλοποίησης, οι κίνδυνοι κυβερνοασφάλειας και η ανάγκη για ισχυρά κανονιστικά πλαίσια πρέπει να αντιμετωπιστούν για να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητες των έξυπνων δικτύων (Moreno Escobar, et al., 2021). Η αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων απαιτεί σημαντικές επενδύσεις στην έρευνα και την ανάπτυξη, καθώς και τη συνεργασία μεταξύ των παρόχων τεχνολογίας, των υπευθύνων χάραξης πολιτικής και των καταναλωτών. Καθώς οι τεχνολογίες έξυπνων δικτύων συνεχίζουν να εξελίσσονται, παραμένουν ο ακρογωνιαίος λίθος της ενεργειακής μετάβασης, ανοίγοντας το δρόμο για ένα βιώσιμο, αποτελεσματικό και ανθεκτικό ενεργειακό μέλλον.

Τα έξυπνα δίκτυα δεν αποτελούν μόνο τη ραχοκοκαλιά των έξυπνων ενεργειακών συστημάτων, αλλά και το θεμέλιο πάνω στο οποίο χτίζονται όλες οι σύγχρονες ενεργειακές καινοτομίες. Ο κρίσιμος ρόλος τους στη διευκόλυνση της απρόσκοπτης ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στη βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου και στη βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας τα καθιστά απαραίτητα για τη μετάβαση σε ένα ενεργειακό μέλλον χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα έξυπνα ενεργειακά συστήματα που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη:

1. Smart Metering/ EMS

Η έξυπνη μέτρηση (Smart Metering) και τα Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας (EMS) αποτελούν κρίσιμα εργαλεία για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και την ενίσχυση της αποδοτικότητας σε οικιακά και βιομηχανικά περιβάλλοντα. Η έξυπνη μέτρηση επιτρέπει την παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας στους χρήστες τη δυνατότητα να κατανοήσουν και να διαχειριστούν καλύτερα τη χρήση ενέργειας (Newark, 2025). Η ενσωμάτωση τεχνολογιών IoT επιτρέπει τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων από διάφορες συσκευές, διευκολύνοντας την αυτοματοποίηση και τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης (Huang, et al., 2023). Οι αλγόριθμοι ML χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των προτύπων κατανάλωσης και την ανίχνευση ανωμαλιών, συμβάλλοντας στη μείωση της σπατάλης ενέργειας και στην αύξηση της αποδοτικότητας. Παρά τα πλεονεκτήματα, η εφαρμογή αυτών των συστημάτων αντιμετωπίζει προκλήσεις, όπως ανησυχίες για την ιδιωτικότητα των δεδομένων και την ασφάλεια των συστημάτων. Η χρήση τεχνολογιών όπως το blockchain προσφέρει λύσεις για την ασφαλή και διαφανή διαχείριση των δεδομένων κατανάλωσης ενέργειας (Nikrour, et al., 2023). Η επιτυχής υλοποίηση των έξυπνων μετρητικών συστημάτων και των EMS απαιτεί τη συνεργασία μεταξύ τεχνολογίας, πολιτικής και εμπλοκής των καταναλωτών για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων τους.

2. Απόκριση Ζήτησης

Η Απόκριση Ζήτησης (DR) αναφέρεται σε δυναμικά προγράμματα που έχουν σχεδιαστεί για να επιτρέπουν στους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας να τροποποιούν τα πρότυπα κατανάλωσής τους

ανάλογα με τις διακυμάνσεις στην παροχή και τις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας. Ο στόχος της DR είναι η επίτευξη σταθερότητας του δικτύου, ειδικά κατά τις περιόδους αιχμής της ζήτησης, βελτιστοποιώντας παράλληλα την κατανάλωση ενέργειας. Με την αυξανόμενη ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη ζήτηση για πιο αποτελεσματική αξιοποίηση της ενέργειας, η DR παίζει κρίσιμο ρόλο στο σύγχρονο ενεργειακό τοπίο. Η εφαρμογή συστημάτων DR αξιοποιεί συσκευές IoT για την παρακολούθηση και την επικοινωνία της κατανάλωσης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Οι έξυπνοι μετρητές και οι συνδεδεμένες συσκευές χρησιμεύουν ως κρίσιμα στοιχεία στη συλλογή δεδομένων κατανάλωσης. Οι αλγόριθμοι ML αναλύουν αυτά τα δεδομένα για να προβλέψουν τα πρότυπα ζήτησης και να αυτοματοποιήσουν τις προσαρμογές φορτίου. Για παράδειγμα, η ML μπορεί να βελτιστοποιήσει τη λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης σε κατοικίες ή βιομηχανικούς χώρους, μειώνοντας την περιττή χρήση ενέργειας χωρίς να διακυβεύεται η άνεση ή η παραγωγικότητα (Aalami, et al., 2010). Τα πλεονεκτήματα της Απόκρισης Ζήτησης περιλαμβάνουν σημαντική εξοικονόμηση κόστους τόσο για τους καταναλωτές όσο και για τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και βελτιωμένη αξιοπιστία του δικτύου. Οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας επωφελούνται αποφεύγοντας τις επενδύσεις σε πρόσθετες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, ενώ οι καταναλωτές μπορούν να απολαμβάνουν χαμηλότερους λογαριασμούς ηλεκτρικής ενέργειας μετατοπίζοντας τη χρήση τους σε ώρες εκτός αιχμής. Ωστόσο, η επιτυχία της DR εξαρτάται από τα υψηλά επίπεδα συμμετοχής των καταναλωτών, η επίτευξη των οποίων μπορεί να είναι δύσκολη λόγω ανησυχιών σχετικά με την ιδιωτικότητα και την ευκολία. Η ανάγκη για μια ισχυρή και ασφαλή υποδομή επικοινωνίας προσθέτει περαιτέρω πολυπλοκότητα στην εφαρμογή συστημάτων Απόκρισης στη Ζήτηση (Albadi & El-Saadany, 2007). Οι αναδυόμενες τεχνολογίες, όπως το blockchain, προσφέρουν πιθανές λύσεις για την ιδιωτικότητα και την ασφάλεια των δεδομένων, ενώ οι εξελίξεις στην ΑΙ συνεχίζουν να βελτιώνουν τις προγνωστικές δυνατότητες των συστημάτων Απόκρισης στη Ζήτηση. Σε αυτόν τον εξελισσόμενο τομέα, η ευθυγράμμιση της τεχνολογίας, της πολιτικής και της εμπλοκής των καταναλωτών είναι κρίσιμη για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων των προγραμμάτων Απόκρισης στη Ζήτηση.

3. Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ηλιακής, της αιολικής και της υδροηλεκτρικής ενέργειας, στα υπάρχοντα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη για τη μετάβαση σε ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον. Αυτές οι ανανεώσιμες πηγές είναι φιλικές προς το περιβάλλον και μειώνουν την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, ωστόσο παρουσιάζουν σημαντικές προκλήσεις λόγω της μεταβλητότητας και της διαλείπουσας λειτουργίας τους. Τα Υβριδικά Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας είναι καθοριστικά για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων. Αυτά τα

συστήματα συνδυάζουν πολλαπλές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες και υπερπυκνωτές, για την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας που παράγεται σε περιόδους υψηλής παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτή η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί στη συνέχεια να αναπτυχθεί σε περιόδους χαμηλής παραγωγής, διασφαλίζοντας σταθερή προσφορά. Οι συσκευές IoT διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο παρέχοντας παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των προτύπων παραγωγής και κατανάλωσης. Η ανάλυση μεγάλων δεδομένων επιτρέπει περαιτέρω τη βελτιστοποίηση των ενεργειακών ροών, επιτρέποντας στα δίκτυα να προσαρμόζονται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες προσφοράς και ζήτησης (Chauhan & Saini, 2014). Η ML ενισχύει την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προβλέποντας την παραγωγή ενέργειας με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα και τα ιστορικά πρότυπα. Αυτές οι γνώσεις διευκολύνουν την πιο αποτελεσματική διαχείριση του δικτύου και τη στρατηγική ανάπτυξη των ενεργειακών αποθεμάτων. Επιπλέον, η χρήση του blockchain στην πιστοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας διασφαλίζει τη διαφάνεια και την εμπιστοσύνη στις ενεργειακές συναλλαγές, προωθώντας την εμπιστοσύνη των καταναλωτών στις λύσεις πράσινης ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι πολλαπλά, συμπεριλαμβανομένων των μειωμένων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, της αυξημένης ενεργειακής ασφάλειας και της προώθησης αποκεντρωμένων ενεργειακών συστημάτων. Ωστόσο, το υψηλό αρχικό κόστος που σχετίζεται με τις τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την αποθήκευση ενέργειας παραμένει σημαντικό εμπόδιο. Επιπλέον, η ανάγκη για προηγμένη υποδομή δικτύου και εξελιγμένα συστήματα ελέγχου θέτει πρόσθετες προκλήσεις (Bussar, et al., 2016). Στο μέλλον, οι εξελίξεις στις τεχνολογίες έξυπνων δικτύων, σε συνδυασμό με υποστηρικτικές πολιτικές και επενδύσεις σε λύσεις αποθήκευσης, θα είναι κρίσιμες για την υπερνίκηση αυτών των εμποδίων. Οι συνεργατικές προσπάθειες μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών θα ανοίξουν το δρόμο για μια απρόσκοπτη και βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση.

4. Υποδομή Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων (EV)

Ο πολλαπλασιασμός των EVs απαιτεί μια ισχυρή και εκτεταμένη υποδομή φόρτισης για την υποστήριξη της λειτουργίας τους. Καθώς τα EV γίνονται πιο συνηθισμένα, η ζήτηση για αποτελεσματικές, προσβάσιμες και βιώσιμες λύσεις φόρτισης αυξάνεται εκθετικά. Η υποδομή φόρτισης έξυπνων EV χρησιμοποιεί τεχνολογία IoT για να επιτρέπει την παρακολούθηση και τη διαχείριση των σταθμών φόρτισης σε πραγματικό χρόνο. Αυτά τα συστήματα βελτιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας προγραμματίζοντας συνεδρίες φόρτισης κατά τις ώρες εκτός αιχμής, μειώνοντας την επιβάρυνση στο δίκτυο και μειώνοντας το κόστος. Τα μοντέλα ML προβλέπουν τα πρότυπα ζήτησης, βοηθώντας τους φορείς εκμετάλλευσης να κατανέμουν αποτελεσματικά τους πόρους. Επιπλέον, η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με φορτιστές EV καθιστά τη διαδικασία φόρτισης πιο βιώσιμη και

φιλική προς το περιβάλλον (Kong, et al., 2018). Η τεχνολογία Blockchain βελτιώνει την υποδομή επιτρέποντας ασφαλή και διαφανή συστήματα πληρωμών. Οι καταναλωτές μπορούν να χρησιμοποιούν ψηφιακά πορτοφόλια για να πληρώνουν για υπηρεσίες φόρτισης και οι φορείς εκμετάλλευσης μπορούν να παρακολουθούν τις συναλλαγές και την κατανάλωση ενέργειας με σιγουριά. Τα μοντέλα peer-to-peer συναλλαγών ενέργειας που διευκολύνονται από το blockchain δίνουν περαιτέρω τη δυνατότητα στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων να ανταλλάσσουν την πλεονάζουσα ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στις μπαταρίες των οχημάτων τους. Τα πλεονεκτήματα μιας καλά ανεπτυγμένης υποδομής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων περιλαμβάνουν τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, τη μειωμένη εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και την υποστήριξη για την ηλεκτροδότηση των συστημάτων μεταφοράς. Ωστόσο, οι προκλήσεις παραμένουν. Το υψηλό αρχικό κόστος κατασκευής δικτύων φόρτισης και η άνιση κατανομή των σταθμών φόρτισης μπορούν να δημιουργήσουν κενά προσβασιμότητας. Επιπλέον, η μεταβλητότητα στα πρότυπα και τις τεχνολογίες φόρτισης περιπλέκει την ανάπτυξη καθολικών λύσεων. Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, οι κυβερνήσεις και οι ενδιαφερόμενοι φορείς του ιδιωτικού τομέα επενδύουν στην έρευνα και ανάπτυξη, στις επιδοτήσεις και στις συμπράξεις δημόσιου-ιδιωτικού τομέα. Αυτές οι προσπάθειες στοχεύουν στη δημιουργία ενός δίκαιου και αποτελεσματικού δικτύου φόρτισης, επιταχύνοντας την παγκόσμια στροφή προς τη βιώσιμη κινητικότητα.

5. Ηλεκτρικά Οχήματα (EVs)

Τα ηλεκτρικά οχήματα αποτελούν ένα βασικό στοιχείο της ενεργειακής μετάβασης, καθώς είναι σε θέση να περιορίσουν σημαντικά τις εκπομπές θερμοκηπίου αλλά και την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα (Ajanovic & Haas, 2019). Η ενσωμάτωσή τους σε έξυπνα ενεργειακά δίκτυα συνδέεται στενά με την πρόοδο ψηφιακών τεχνολογιών, όπως η AI, η M και το IoT, που επιτρέπουν την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, τη βελτιστοποίηση κατανάλωσης και τη διαχείριση πόρων (Lyu & Liu, 2021). Παρά τις τεχνολογικές προόδους, εντοπίζονται σημαντικές ανισότητες πρόσβασης και οι καταναλωτικές αντιλήψεις επηρεάζουν σημαντικά τον ρυθμό υιοθέτησης των EVs (Sovacool, et al., 2018). Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτεί συνεργασία μεταξύ τεχνολογίας, πολιτικής και κοινωνίας, ώστε τα EVs να συμβάλουν ουσιαστικά στη διαμόρφωση ενός πιο ανθεκτικού και βιώσιμου ενεργειακού συστήματος.

6. Όχημα-προς-Δίκτυο (V2G)

Η τεχνολογία V2G αντιπροσωπεύει μια μετασχηματιστική προσέγγιση στη διαχείριση ενέργειας, επιτρέποντας την αμφίδρομη ροή ενέργειας μεταξύ EV και του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η καινοτόμος ιδέα τοποθετεί τα EV όχι μόνο ως μέσα μεταφοράς αλλά και ως κινητές μονάδες

αποθήκευσης ενέργειας που μπορούν να συμβάλουν στη σταθερότητα και την αποδοτικότητα του δικτύου. Η βασική τεχνολογία πίσω από τα συστήματα V2G περιλαμβάνει συσκευές IoT για επικοινωνία και έλεγχο σε πραγματικό χρόνο, καθώς και προηγμένους αλγόριθμους ML για τη βελτιστοποίηση των ανταλλαγών ενέργειας. Το V2G επιτρέπει στα EV να αποθηκεύουν πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ζήτησης και να την αποβάλλουν πίσω στο δίκτυο κατά τις περιόδους αιχμής. Αυτή η λειτουργικότητα υποστηρίζει τους διαχειριστές του δικτύου στην εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης, μειώνοντας την εξάρτηση από μονάδες αιχμής που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα (Guille & Gross, 2009) & (Tan, et al., 2024). Η τεχνολογία Blockchain διασφαλίζει ασφαλείς και διαφανείς συναλλαγές ενέργειας εντός του οικοσυστήματος V2G. Τα έξυπνα συμβόλαια αυτοματοποιούν τους διακανονισμούς πληρωμών, επιτρέποντας στους ιδιοκτήτες EV να κερδίζουν έσοδα για τη συνεισφορά ενέργειας στο δίκτυο. Εν τω μεταξύ, η ανάλυση μεγάλων δεδομένων παρέχει πληροφορίες για τα πρότυπα χρήσης, ενισχύοντας την αποδοτικότητα και την επεκτασιμότητα του συστήματος. Τα πλεονεκτήματα του V2G είναι πολλά. Ενισχύει την ανθεκτικότητα του δικτύου, υποστηρίζει την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρέχοντας αποθήκευση και προσφέρει οικονομικά κίνητρα στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, πρέπει να αντιμετωπιστούν προκλήσεις όπως η υποβάθμιση της μπαταρίας, οι κανονιστικές πολυπλοκότητες και η ανάγκη τυποποίησης στα πρωτόκολλα επικοινωνίας (Sovacool, et al., 2018). Καθώς η υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων συνεχίζει να αυξάνεται, η τεχνολογία V2G έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στο ενεργειακό τοπίο. Οι συνεργατικές προσπάθειες μεταξύ των αυτοκινητοβιομηχανιών, των διαχειριστών δικτύων και των υπευθύνων χάραξης πολιτικής θα είναι κρίσιμες για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων της και την αντιμετώπιση των υφιστάμενων εμποδίων.

7. Συστήματα Αυτοματισμού Κτιρίων (BAS)

Τα BAS αντιπροσωπεύουν μια πρωτοποριακή λύση για τη βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας σε οικιστικά, εμπορικά και βιομηχανικά κτίρια. Αυτά τα συστήματα ενσωματώνουν αισθητήρες IoT, αλγόριθμους ML και προηγμένους μηχανισμούς ελέγχου για την αυτοματοποίηση και την παρακολούθηση διαφόρων λειτουργιών του κτιρίου, συμπεριλαμβανομένου του φωτισμού, του HVAC (θέρμανση, αερισμός και κλιματισμός) και των συστημάτων ασφαλείας. Ο πρωταρχικός στόχος του BAS είναι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης διατηρώντας παράλληλα την άνεση των ενοίκων. Οι αισθητήρες IoT συλλέγουν συνεχώς δεδομένα σχετικά με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, την πληρότητα και τη χρήση ενέργειας. Αυτά τα δεδομένα αναλύονται από μοντέλα ML για τον εντοπισμό μοτίβων και τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Για παράδειγμα, ένα BAS μπορεί να προσαρμόσει τον φωτισμό με βάση την πληρότητα ή να ρυθμίσει τα συστήματα HVAC ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και τα επίπεδα πληρότητας (Domingues, et al., 2016). Η προγνωστική συντήρηση είναι ένα άλλο

σημαντικό πλεονέκτημα του BAS. Αναλύοντας τα λειτουργικά δεδομένα, το σύστημα μπορεί να εντοπίσει πιθανές βλάβες του εξοπλισμού πριν συμβούν, μειώνοντας τον χρόνο διακοπής λειτουργίας και το κόστος συντήρησης. Το BAS διευκολύνει επίσης τις προσαρμοστικές στρατηγικές ελέγχου, διασφαλίζοντας ότι οι λειτουργίες του κτιρίου ανταποκρίνονται στις αλλαγές των συνθηκών σε πραγματικό χρόνο. Ενώ τα πλεονεκτήματα του BAS περιλαμβάνουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, βελτιωμένη άνεση και μειωμένες εκπομπές, η τεχνολογία αντιμετωπίζει επίσης προκλήσεις. Το υψηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης μπορεί να αποτρέψει την ευρεία υιοθέτησή της, ειδικά σε παλαιότερα κτίρια. Επιπλέον, η εξάρτηση από διασυνδεδεμένα συστήματα εγείρει ανησυχίες σχετικά με την κυβερνοασφάλεια, καθώς τα τρωτά σημεία θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο τόσο την ασφάλεια των δεδομένων όσο και την επιχειρησιακή ακεραιότητα (Schrom, et al., 2017). Για να ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις, οι εξελίξεις σε οικονομικά προσιτές συσκευές IoT και ασφαλή πρωτόκολλα επικοινωνίας είναι απαραίτητες. Οι κυβερνήσεις και οι οργανισμοί πρέπει επίσης να δώσουν προτεραιότητα στην εκπαίδευση και την κατάρτιση για να διασφαλίσουν την αποτελεσματική εφαρμογή και διαχείριση των τεχνολογιών BAS.

8. Εικονικοί Σταθμοί Παραγωγής Ενέργειας (VPP)

Οι Εικονικοί Σταθμοί Παραγωγής Ενέργειας (VPP) αντιπροσωπεύουν μια καινοτόμο προσέγγιση στη διαχείριση ενέργειας που συγκεντρώνει DER όπως ηλιακούς συλλέκτες, ανεμογεννήτριες, μπαταρίες, ακόμη και προγράμματα απόκρισης ζήτησης σε ένα ενιαίο, ενοποιημένο σύστημα. Λειτουργώντας ως συντονισμένο δίκτυο, οι VPP βελτιστοποιούν την παραγωγή και την κατανάλωση ενέργειας, μιμούμενοι τη λειτουργικότητα ενός παραδοσιακού σταθμού παραγωγής ενέργειας χωρίς την ανάγκη κεντρικής υποδομής. Η λειτουργία ενός VPP βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην τεχνολογία IoT, η οποία διευκολύνει την παρακολούθηση και τον έλεγχο των DER σε πραγματικό χρόνο. Οι αλγόριθμοι ML αναλύουν δεδομένα από αυτούς τους πόρους για να προβλέψουν την παραγωγή ενέργειας, να προβλέψουν τη ζήτηση και να βελτιστοποιήσουν τις ροές ενέργειας. Αυτή η προγνωστική ικανότητα ενισχύει την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα του VPP. Η τεχνολογία Blockchain χρησιμοποιείται επίσης για την ασφαλή διαχείριση των ενεργειακών συναλλαγών, επιτρέποντας την peer-to-peer εμπορία ενέργειας εντός του οικοσυστήματος VPP (Rouzbahani, et al., 2021). Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των VPP είναι η ικανότητά τους να ενισχύουν την ευελιξία του δικτύου. Συντονίζοντας ένα ποικίλο φάσμα ενεργειακών πόρων, οι VPP μπορούν να ανταποκρίνονται δυναμικά στις διακυμάνσεις της ζήτησης και της προσφοράς ενέργειας. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα πολύτιμη για την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες είναι εγγενώς μεταβλητές. Επιπλέον, τα VPP μειώνουν την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και τους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, συμβάλλοντας σε ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό σύστημα. Παρά τα οφέλη αυτά, η

εφαρμογή των VPP παρουσιάζει αρκετές προκλήσεις. Η πολυπλοκότητα του συντονισμού πολλαπλών DER απαιτεί εξελιγμένα συστήματα επικοινωνίας και ελέγχου. Τα ρυθμιστικά πλαίσια πρέπει επίσης να προσαρμοστούν για να καλύψουν τα μοναδικά χαρακτηριστικά των VPP, συμπεριλαμβανομένης της αποκεντρωμένης φύσης τους. Επιπλέον, η διασφάλιση της κυβερνοασφάλειας εντός του δικτύου VPP είναι ζωτικής σημασίας για την αποτροπή πιθανών διακοπών ή παραβιάσεων δεδομένων. Το μέλλον των VPP φαίνεται πολλά υποσχόμενο καθώς οι εξελίξεις στις τεχνολογίες IoT, ML και blockchain συνεχίζουν να εξελίσσονται. Οι συνεργατικές προσπάθειες μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών, συμπεριλαμβανομένων των επιχειρήσεων κοινής ωφέλειας, των υπευθύνων χάραξης πολιτικής και των παρόχων τεχνολογίας, θα είναι απαραίτητες για την αντιμετώπιση των προκλήσεων και την πλήρη αξιοποίηση των VPP κατά τη μετάβαση σε ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον.

9. Εμπορία Ενέργειας – Energy Trading

Το εμπόριο ενέργειας περιλαμβάνει την ανταλλαγή ενεργειακών πόρων μεταξύ παραγωγών, καταναλωτών και prosumers (άτομα που παράγουν και καταναλώνουν ενέργεια). Αυτή η προσέγγιση που βασίζεται στην αγορά επιτρέπει την πιο αποτελεσματική διανομή και αξιοποίηση της ενέργειας, δημιουργώντας οικονομικά κίνητρα για την υιοθέτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη βελτιστοποίηση του δικτύου (Parag & Sovacool, 2016). Η τεχνολογία Blockchain διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στα σύγχρονα συστήματα συναλλαγών ενέργειας, επιτρέποντας ασφαλείς και διαφανείς συναλλαγές. Τα έξυπνα συμβόλαια αυτοματοποιούν την εκκαθάριση των συναλλαγών, μειώνοντας την ανάγκη για μεσάζοντες. Επιπλέον, οι συσκευές IoT παρακολουθούν την παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας την ακριβή αναφορά δεδομένων για σκοπούς συναλλαγών (Mengelkamp, et al., 2018). Η ανάλυση μεγάλων δεδομένων ενισχύει το οικοσύστημα συναλλαγών προβλέποντας τις τάσεις της αγοράς και βελτιστοποιώντας τα μοντέλα τιμολόγησης. Αυτές οι πληροφορίες επιτρέπουν στους εμπόρους και τους διαχειριστές δικτύων να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις, μεγιστοποιώντας την αποδοτικότητα και την κερδοφορία. Οι πλατφόρμες συναλλαγών ενέργειας peer-to-peer δίνουν περαιτέρω τη δυνατότητα στους καταναλωτές να πωλούν την πλεονάζουσα ανανεώσιμη ενέργεια απευθείας σε άλλους χρήστες, ενισχύοντας τις αποκεντρωμένες αγορές ενέργειας (Sousa, et al., 2019). Τα πλεονεκτήματα του εμπορίου ενέργειας περιλαμβάνουν την αυξημένη αποδοτικότητα της αγοράς, τη μειωμένη σπατάλη ενέργειας και την προώθηση της υιοθέτησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επιτρέποντας στους καταναλωτές να συμμετέχουν ενεργά στην αγορά ενέργειας, οι πλατφόρμες συναλλαγών εκδημοκρατικοποιούν την πρόσβαση σε καθαρή ενέργεια και παρέχουν οικονομικά κίνητρα για βιώσιμες πρακτικές. Ωστόσο, πρέπει να αντιμετωπιστούν προκλήσεις όπως τα κανονιστικά εμπόδια, οι κίνδυνοι κυβερνοασφάλειας και η πολυπλοκότητα της ενσωμάτωσης των συστημάτων συναλλαγών με τις υπάρχουσες υποδομές. Για να

ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις, οι κυβερνήσεις και οι ενδιαφερόμενοι φορείς του κλάδου πρέπει να συνεργαστούν για να θεσπίσουν σαφή κανονιστικά πλαίσια και να επενδύσουν σε ασφαλείς, κλιμακούμενες τεχνολογίες. Η συνεχής ανάπτυξη αποκεντρωμένων πλατφορμών συναλλαγών και προηγμένων εργαλείων ανάλυσης θα συμβάλει στην πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του εμπορίου ενέργειας ως ακρογωνιαίου λίθου του σύγχρονου ενεργειακού τοπίου.

10. Ενέργεια ως Υπηρεσία (EaaS)

Η EaaS είναι ένα επαναστατικό επιχειρηματικό μοντέλο που μετατοπίζει την εστίαση από την ενέργεια ως αγαθό σε μια προσέγγιση προσανατολισμένη στις υπηρεσίες. Σε αυτό το μοντέλο, οι καταναλωτές πληρώνουν για ενεργειακές υπηρεσίες, όπως θέρμανση, ψύξη ή φωτισμό, αντί να κατέχουν και να συντηρούν την ενεργειακή υποδομή. Οι πάροχοι EaaS διαχειρίζονται όλες τις πτυχές της παραγωγής, αποθήκευσης και βελτιστοποίησης ενέργειας, παρέχοντας εξατομικευμένες λύσεις για την κάλυψη των αναγκών των πελατών. Η εφαρμογή της EaaS βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις τεχνολογίες IoT, ML και blockchain. Οι αισθητήρες IoT συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας και την απόδοση του συστήματος, επιτρέποντας στους παρόχους να βελτιστοποιήσουν την παροχή υπηρεσιών. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης αναλύουν τα πρότυπα χρήσης για να εντοπίσουν ευκαιρίες για βελτιώσεις στην απόδοση και προγνωστική συντήρηση. Το Blockchain διασφαλίζει διαφάνεια και ασφάλεια στην τιμολόγηση και τις συναλλαγές ενέργειας, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη μεταξύ παρόχων και καταναλωτών (Paukstadt & Becker, 2021). Τα πλεονεκτήματα της EaaS περιλαμβάνουν μειωμένο αρχικό κόστος για τους καταναλωτές, πρόσβαση σε υπερσύγχρονες ενεργειακές λύσεις και βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση. Με την εξωτερική ανάθεση της διαχείρισης ενέργειας, οι επιχειρήσεις και τα νοικοκυριά μπορούν να επικεντρωθούν στις βασικές τους δραστηριότητες, απολαμβάνοντας παράλληλα αξιόπιστες και βιώσιμες ενεργειακές υπηρεσίες. Ωστόσο, το μοντέλο παρουσιάζει προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένης της ανάγκης για ισχυρές συμβατικές συμφωνίες, κανονιστική σαφήνεια και εμπιστοσύνη των πελατών. Καθώς το ενεργειακό τοπίο συνεχίζει να εξελίσσεται, η EaaS έχει τη δυνατότητα να μεταμορφώσει τον τρόπο κατανάλωσης και διαχείρισης της ενέργειας. Αξιοποιώντας προηγμένες τεχνολογίες και καινοτόμα επιχειρηματικά μοντέλα, οι πάροχοι EaaS μπορούν να προωθήσουν την υιοθέτηση λύσεων καθαρής ενέργειας και να συμβάλουν σε ένα πιο βιώσιμο μέλλον.

11. Υπηρεσίες Οικονομίας Υδρογόνου

Η οικονομία του υδρογόνου είναι ένα αναδυόμενο πλαίσιο που οραματίζεται το υδρογόνο ως βασικό ενεργειακό φορέα σε ένα βιώσιμο μέλλον. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από διάφορες πηγές, όπως φυσικό αέριο, ηλεκτρόλυση νερού που τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και βιομάζα.

Αυτή η ευελιξία την καθιστά μια πολλά υποσχόμενη λύση για την απαλλαγή από τον άνθρακα βιομηχανιών, μεταφορών και αποθήκευσης ενέργειας. Οι τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου περιλαμβάνουν ηλεκτρολύτες, οι οποίοι διασπούν το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο, και αναμορφωτές, οι οποίοι εξάγουν υδρογόνο από φυσικό αέριο. Τα συστήματα IoT παρακολουθούν τις διαδικασίες παραγωγής, διασφαλίζοντας την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια. Τα μοντέλα ML βελτιστοποιούν την παραγωγή υδρογόνου αναλύοντας λειτουργικά δεδομένα, ενώ το blockchain διασφαλίζει την ιχνηλασιμότητα στις αλυσίδες εφοδιασμού υδρογόνου, προωθώντας τη διαφάνεια και την εμπιστοσύνη (Brandon & Kurban, 2017). Η αποθήκευση και η διανομή υδρογόνου είναι κρίσιμα συστατικά της οικονομίας του υδρογόνου. Για την αποθήκευση χρησιμοποιούνται κύλινδροι συμπιεσμένου αερίου, δεξαμενές υγρού υδρογόνου και χημικοί φορείς όπως η αμμωνία. Οι συσκευές IoT παρακολουθούν τις συνθήκες αποθήκευσης και τις διαδρομές μεταφοράς, μειώνοντας τον κίνδυνο διαρροών και διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με τα πρότυπα ασφαλείας. Τα στοιχεία καυσίμου υδρογόνου μετατρέπουν το υδρογόνο σε ηλεκτρική ενέργεια, προσφέροντας μια καθαρή εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα για οχήματα και παραγωγή ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα της οικονομίας του υδρογόνου περιλαμβάνουν την ικανότητά της να αποθηκεύει και να μεταφέρει ενέργεια αποτελεσματικά, την υψηλή ενεργειακή της πυκνότητα και τη δυνατότητά της να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα σε τομείς που είναι δύσκολο να απανθρακωθούν. Ωστόσο, παραμένουν προκλήσεις, όπως το υψηλό κόστος παραγωγής, οι απαιτήσεις υποδομών και η ανάγκη για διεθνή συνεργασία σε πρότυπα και κανονισμούς (Mac Dowell, et al., 2021). Καθώς οι εξελίξεις στις τεχνολογίες υδρογόνου συνεχίζονται, οι κυβερνήσεις και οι βιομηχανίες επενδύουν σημαντικά στην αύξηση της παραγωγής, στη βελτίωση της αποδοτικότητας και στην κατασκευή υποδομών. Αυτές οι προσπάθειες στοχεύουν στην καθιέρωση του υδρογόνου ως ακρογωνιαίου λίθου της παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης, επιτρέποντας ένα καθαρότερο και πιο βιώσιμο μέλλον.

12. Υπηρεσίες Δέσμευσης και Αποθήκευσης Άνθρακα (CCS)

Η CCS είναι μια κρίσιμη τεχνολογία για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, μέσω της δέσμευσης εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) από βιομηχανικές διεργασίες και παραγωγή ενέργειας και της αποθήκευσής τους στο υπέδαφος. Η CCS παίζει ζωτικό ρόλο στην επίτευξη μηδενικών εκπομπών, ιδιαίτερα σε τομείς όπου η απαλλαγή από τον άνθρακα είναι δύσκολη. Η διαδικασία CCS περιλαμβάνει τρία κύρια στάδια: δέσμευση, μεταφορά και αποθήκευση. Το CO_2 δεσμεύεται χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως χημική απορρόφηση, προσρόφηση ή διαχωρισμό μεμβρανών. Οι αισθητήρες IoT παρακολουθούν την αποτελεσματικότητα των συστημάτων δέσμευσης και διασφαλίζουν την ασφαλή λειτουργία. Το δεσμευμένο CO_2 μεταφέρεται στη συνέχεια μέσω αγωγών ή πλοίων σε χώρους αποθήκευσης, όπου εγχέεται σε γεωλογικούς σχηματισμούς όπως εξαντλημένα πετρελαιοπηγές ή

αλατούχα υδροφορείς. Η τεχνολογία Blockchain χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση του CO₂ από τη δέσμευση έως την αποθήκευση, διασφαλίζοντας τη διαφάνεια και την λογοδοσία (Steen, et al., 2024). Η ML ενισχύει την CCS βελτιστοποιώντας τις διαδικασίες δέσμευσης και εντοπίζοντας κατάλληλες θέσεις αποθήκευσης. Αναλύοντας γεωλογικά δεδομένα, τα μοντέλα ML μπορούν να προβλέψουν την χωρητικότητα αποθήκευσης και να παρακολουθήσουν την ακεραιότητα των χώρων, μειώνοντας τον κίνδυνο διαρροής. Η CCS υποστηρίζει επίσης τεχνολογίες αρνητικών εκπομπών, όπως η βιοενέργεια με δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (BECCS), οι οποίες απομακρύνουν το CO₂ από την ατμόσφαιρα. Τα πλεονεκτήματα της CCS περιλαμβάνουν τη δυνατότητά της να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές από βιομηχανικές διεργασίες και σταθμούς παραγωγής ενέργειας, τη συμβατότητά της με τις υπάρχουσες υποδομές και τον ρόλο της στην επίτευξη αρνητικών εκπομπών. Ωστόσο, η CCS αντιμετωπίζει προκλήσεις όπως το υψηλό κόστος, οι ενεργειακές απαιτήσεις και η δημόσια αποδοχή των έργων αποθήκευσης. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων θα απαιτήσει πολιτική υποστήριξη, οικονομικά κίνητρα και αυξημένη ευαισθητοποίηση του κοινού. Καθώς οι παγκόσμιες προσπάθειες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής εντείνονται, η CCS είναι έτοιμη να γίνει ακρογωνιαίος λίθος των στρατηγικών απαλλαγής από τον άνθρακα. Η συνεχής καινοτομία και οι επενδύσεις σε τεχνολογίες CCS θα διασφαλίσουν την αποτελεσματικότητά και την επεκτασιμότητά τους, συμβάλλοντας σε ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον.

13. Πλατφόρμες Αντιστάθμισης Άνθρακα και Εμπορίας Άνθρακα

Οι πλατφόρμες αντιστάθμισης άνθρακα και εμπορίας είναι μηχανισμοί που βασίζονται στην αγορά και έχουν σχεδιαστεί για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) αποδίδοντας χρηματική αξία στον άνθρακα. Αυτές οι πλατφόρμες επιτρέπουν σε οργανισμούς και άτομα να αγοράζουν πιστώσεις άνθρακα, οι οποίες αντιπροσωπεύουν μείωση ή απομάκρυνση εκπομπών CO₂ αλλού, για να αντισταθμίσουν τις δικές τους εκπομπές. Αυτό το σύστημα δημιουργεί ένα οικονομικό κίνητρο για τους οργανισμούς να επενδύσουν σε καθαρότερες πρακτικές και υποστηρίζει τις παγκόσμιες προσπάθειες απαλλαγής από τον άνθρακα. Η τεχνολογία Blockchain στηρίζει τις σύγχρονες πλατφόρμες εμπορίας άνθρακα, διασφαλίζοντας τη διαφάνεια, την ασφάλεια και την ιχνηλασιμότητα στις συναλλαγές. Τα έξυπνα συμβόλαια αυτοματοποιούν τη διαδικασία συναλλαγών, επαληθεύοντας την αυθεντικότητα των πιστώσεων άνθρακα και διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με τα κανονιστικά πρότυπα. Οι συσκευές IoT ενισχύουν περαιτέρω την αξιοπιστία των αντισταθμίσεων άνθρακα παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις μειώσεις εκπομπών, όπως η παρακολούθηση έργων αναδάσωσης ή εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Boumaiza & Maher, 2024). Η ανάλυση μεγάλων δεδομένων διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην αξιολόγηση του αντίκτυπου των έργων αντιστάθμισης άνθρακα και στη βελτιστοποίηση των λειτουργιών της αγοράς. Για παράδειγμα, η προγνωστική

ανάλυση μπορεί να εντοπίσει τα πιο αποτελεσματικά έργα αντιστάθμισης με βάση γεωγραφικούς και οικονομικούς παράγοντες. Οι αλγόριθμοι ML αξιολογούν ιστορικά δεδομένα για να προβλέψουν τις τάσεις της αγοράς, βοηθώντας τα ενδιαφερόμενα μέρη να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με το εμπόριο άνθρακα. Τα πλεονεκτήματα των πλατφορμών εμπορίας άνθρακα περιλαμβάνουν την ενίσχυση των επενδύσεων σε βιώσιμα έργα, τη μείωση των συνολικών εκπομπών και τη δημιουργία μιας προσέγγισης που βασίζεται στην αγορά για τη δράση για το κλίμα. Επιπλέον, επιτρέπουν στις εταιρείες σε τομείς που είναι δύσκολο να μειωθούν να επιτύχουν τους κλιματικούς τους στόχους επενδύοντας σε αξιόπιστες αντισταθμίσεις. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις όπως η αστάθεια της αγοράς, η πιθανότητα διπλής καταμέτρησης των μειώσεων των εκπομπών και η ανάγκη για παγκόσμια τυποποίηση των πιστώσεων άνθρακα (Parhamfar, et al., 2024). Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, η διεθνής συνεργασία είναι απαραίτητη. Η καθιέρωση ενός ενιαίου κανονιστικού πλαισίου, η βελτίωση της ποιότητας και της επαλήθευσης των πιστώσεων άνθρακα και η αξιοποίηση προηγμένων τεχνολογιών θα ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία των συστημάτων εμπορίας άνθρακα. Δημιουργώντας μια διαφανή και υπεύθυνη αγορά, οι πλατφόρμες αντιστάθμισης άνθρακα μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην επίτευξη των παγκόσμιων κλιματικών στόχων.

Συμπερασματικά, τεχνολογίες όπως το IoT, η Μηχανική Μάθηση, το blockchain και η ανάλυση μεγάλων δεδομένων μετασχηματίζουν τα ενεργειακά συστήματα βελτιώνοντας την αποδοτικότητα, την αξιοπιστία και τη βιωσιμότητα. Αυτές οι εξελίξεις είναι κρίσιμες για τη μείωση των εκπομπών, την αύξηση της σταθερότητας του δικτύου και την ενεργοποίηση αποκεντρωμένων ενεργειακών λύσεων. Ωστόσο, προκλήσεις όπως το υψηλό κόστος, τα κανονιστικά εμπόδια και οι κίνδυνοι κυβερνοασφάλειας παραμένουν και απαιτούν συνεργασία μεταξύ βιομηχανιών, κυβερνήσεων και ερευνητών. Το επόμενο κεφάλαιο θα επικεντρωθεί σε πιλοτικά έργα σε πραγματικό κόσμο, καταδεικνύοντας πώς εφαρμόζονται αυτές οι τεχνολογίες στην πράξη και τις δυνατότητές τους να διαμορφώσουν το μέλλον των βιώσιμων ενεργειακών συστημάτων.

3.2 Πιλοτικά Έργα και Μελέτες Περιπτώσεων

Τα πιλοτικά έργα έχουν κρίσιμο ρόλο στην παρουσίαση της πρακτικής εφαρμογής και της σκοπιμότητας των έξυπνων ενεργειακών τεχνολογιών. Παρέχουν σημαντικά στοιχεία σχετικά με το πώς οι καινοτόμες λύσεις, όπως τα έξυπνα δίκτυα, το IoT, η ML και το blockchain, λειτουργούν σε πραγματικά περιβάλλοντα, γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ της θεωρητικής έρευνας και της εφαρμογής μεγάλης κλίμακας. Δοκιμάζοντας αυτές τις τεχνολογίες σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα, τα πιλοτικά έργα βοηθούν στον εντοπισμό προκλήσεων, στη βελτίωση των λύσεων και στην αξιολόγηση της επεκτασιμότητας και της οικονομικής τους βιωσιμότητας. Χρησιμοποιούν επίσης ως σημεία αναφοράς για μελλοντικές

εξελίξεις, καθοδηγώντας τα ενδιαφερόμενα μέρη στην υιοθέτηση και βελτιστοποίηση έξυπνων ενεργειακών συστημάτων. Αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζει πιλοτικά έργα, φανερώνοντας τον αντίκτυπο και τη σημασία τους στην προώθηση των έξυπνων ενεργειακών συστημάτων.

Smart metering

 Chain2Gate - Chain2gate | Italia

Η πρωτοβουλία CHAIN 2 στην Ιταλία αποτελεί παράδειγμα σημαντικής προόδου στα έξυπνα συστήματα μέτρησης και διαχείρισης ενέργειας. Ξεκίνησε για την ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης και της εμπλοκής των χρηστών, το CHAIN 2 δημιουργεί ένα ειδικό κανάλι επικοινωνίας μεταξύ έξυπνων μετρητών δεύτερης γενιάς και οικιακών συσκευών (IHD) μέσω επικοινωνίας μέσω γραμμής ρεύματος (PLC). Αυτή η ρύθμιση επιτρέπει την πρόσβαση σε δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, δίνοντας τη δυνατότητα στους καταναλωτές να παρακολουθούν και να προσαρμόζουν αποτελεσματικά την κατανάλωση ενέργειας.

Demand Response

- BungEES - <https://bungees.eu/>

Το έργο BungEES, με την επίσημη ονομασία «Ανάπτυξη Προσφοράς και Αποκτήσεως Υπηρεσιών Έξυπνης Ενέργειας Επόμενης Γενιάς, Αξιοποιώντας την Ενεργειακή Απόδοση και την Ευελιξία στην Πλευρά της Ζήτησης», ξεκίνησε την 1η Οκτωβρίου 2022 και έχει προγραμματιστεί να διαρκέσει 36 μήνες, ολοκληρώνοντας τον Σεπτέμβριο του 2025. Υπό τον συντονισμό του VIAEUROPA Competence Centre SRO από τη Σλοβακία, το έργο συγκεντρώνει μια κοινοπραξία οκτώ εταίρων από διάφορες ευρωπαϊκές χώρες, συμπεριλαμβανομένων της Σλοβακίας, της Γαλλίας, της Τσεχικής Δημοκρατίας, της Γερμανίας, της Ισπανίας, της Πορτογαλίας, της Ιταλίας και του Βελγίου. Χρηματοδοτούμενο από το Πρόγραμμα LIFE της Ε.Ε. – Υποπρόγραμμα Μετάβασης σε Καθαρή Ενέργεια, το BungEES επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων έξυπνων υπηρεσιών ενεργειακής απόδοσης (EES) που συνδυάζουν την ενεργειακή απόδοση, την καταναεμημένη παραγωγή, την απόκριση στη ζήτηση, την ηλεκτρική κινητικότητα και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Το έργο στοχεύει στην αντιμετώπιση των εμπορικών και κανονιστικών φραγμών, στην προώθηση καινοτόμων λύσεων χρηματοδότησης και στην ενίσχυση της ευελιξίας στην πλευρά της ζήτησης σε ολόκληρη την Ευρώπη.

Renewable Energy Integration

- H2020 InteGRIDy - <https://h2020integrity.eu/>

Το έργο Integrated Smart GRIDy του προγράμματος H2020, με επίσημη ονομασία «Ολοκληρωμένες Διαλειτουργικές Λύσεις Έξυπνου Δικτύου για Βελτιστοποιημένη Συνεργειακή Διανομή Ενέργειας,

Τεχνολογίες Αποθήκευσης Αξιοποίησης», ξεκίνησε την 1η Ιανουαρίου 2017 και ολοκληρώθηκε στις 30 Ιουνίου 2021. Υπό τον συντονισμό της Atos Spain S.A., το έργο συγκέντρωσε μια κοινοπραξία 30 εταίρων από οκτώ ευρωπαϊκές χώρες: Ισπανία, Ηνωμένο Βασίλειο, Ιταλία, Γαλλία, Ελλάδα, Κύπρο, Πορτογαλία και Ρουμανία. Το Integridy επικεντρώθηκε στην ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένου του IoT, της ανάλυσης μεγάλων δεδομένων και της μηχανικής μάθησης, για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας και της διαχείρισης έξυπνων δικτύων με υψηλή διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το έργο στόχευε στην ενίσχυση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, των στρατηγικών απόκρισης στη ζήτηση και της ευελιξίας του δικτύου, επιτρέποντας τη δυναμική προσαρμογή στις διακυμάνσεις της προσφοράς και της ζήτησης. Καθ' όλη τη διάρκειά του, το Integridy υλοποίησε και επικύρωσε τις λύσεις του σε δέκα πιλοτικές τοποθεσίες στις συμμετέχουσες χώρες, αποδεικνύοντας την τεχνική και επιχειρηματική βιωσιμότητα σύνθετων ψηφιακών πλαισίων στον ενεργειακό τομέα.

Electric Vehicle (EV) Charging Infrastructure

- PROBONO2020 - <https://www.probonoh2020.eu/about>

Το έργο PROBONO, το οποίο χρηματοδοτείται από το πρόγραμμα Ορίζοντας 2020 της Ευρωπαϊκής Ένωσης, είναι αφιερωμένο στην ανάπτυξη Γειτονιών Πράσινων Κτιρίων (GBN) που ενσωματώνουν βιώσιμες ενεργειακές λύσεις, συμπεριλαμβανομένης της προηγμένης υποδομής φόρτισης EV. Το έργο, που ξεκίνησε τον Σεπτέμβριο του 2021, εκτείνεται σε έξι ευρωπαϊκές χώρες: Ιρλανδία, Ισπανία, Πορτογαλία, Βέλγιο, Δανία και Τσεχική Δημοκρατία. Ένα βασικό επίκεντρο του PROBONO είναι η εφαρμογή έξυπνων, αμφίδρομων συστημάτων φόρτισης EV που διευκολύνουν τις δυνατότητες V2G και Vehicle-to-Home (V2H). Αυτά τα συστήματα επιτρέπουν την αποτελεσματική διαχείριση ενέργειας επιτρέποντας στα ηλεκτρικά οχήματα να αποθηκεύουν την πλεονάζουσα ανανεώσιμη ενέργεια και να την αποβάλλουν πίσω στο δίκτυο ή στα κτίρια κατά τις περιόδους αιχμής της ζήτησης, ενισχύοντας έτσι τη σταθερότητα του δικτύου και προωθώντας τη χρήση καθαρής ενέργειας. Για παράδειγμα, στο Dublin Living Lab, το έργο αναπτύσσει αμφίδρομη υποδομή φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων παράλληλα με φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις και τράπεζες μπαταριών για τη δημιουργία μιας βιώσιμης γειτονιάς μηδενικών εκπομπών άνθρακα. Ενσωματώνοντας έξυπνες λύσεις φόρτισης, το PROBONO στοχεύει να καταδείξει τη βιωσιμότητα της βιώσιμης αστικής κινητικότητας και να συμβάλει στην ευρύτερη υιοθέτηση πρακτικών πράσινης ενέργειας σε όλη την Ευρώπη.

Vehicle-to-Grid (V2G)

- RESONANCE Project - <https://www.resonance-project.eu/work-packages/>

Το έργο RESONANCE, το οποίο ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2023 στο πλαίσιο του Προγράμματος Πλαισίου Ορίζοντας Ευρώπη της Ε.Ε., επικεντρώνεται στην ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων για ευελιξία από την πλευρά της ζήτησης, συμπεριλαμβανομένων των τεχνολογιών V2G. Καλύπτοντας επτά ευρωπαϊκές χώρες (Φινλανδία, Γερμανία, Σουηδία, Ελλάδα, Σλοβενία, Γαλλία και Δανία), το έργο στοχεύει να επιτρέψει στα ηλεκτρικά οχήματα όχι μόνο να φορτίζουν από το δίκτυο, αλλά και να παρέχουν αποθηκευμένη ενέργεια πίσω σε αυτό, ενισχύοντας τη σταθερότητα του δικτύου και βελτιστοποιώντας την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ένα βασικό πιλοτικό έργο στη Γαλλία ενσωματώνει ηλεκτρικά οχήματα με δυνατότητα V2G με επιτόπια φωτοβολταϊκά (PV) συστήματα, καταδεικνύοντας πώς τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να αποθηκεύουν την πλεονάζουσα ηλιακή ενέργεια και να την εκφορτώνουν κατά τις περιόδους αιχμής της ζήτησης. Αυτή η προσέγγιση μειώνει το ενεργειακό κόστος, μειώνει το αποτύπωμα άνθρακα και υποστηρίζει την εξισορρόπηση του δικτύου. Το RESONANCE στοχεύει επίσης να καταστήσει τις λύσεις ευελιξίας, όπως οι Διαχειριστές Ενέργειας Πελατών (CEMs), πιο προσβάσιμες, μειώνοντας το κόστος και τις προσπάθειες ανάπτυξης. Τελικά, το έργο συμβάλλει σε ένα ανθεκτικό, αποδοτικό και βιώσιμο ενεργειακό σύστημα, ενώ παράλληλα ενθαρρύνει την υιοθέτηση σε μεγάλη κλίμακα των τεχνολογιών V2G.

Building Automation Systems (BAS)

- BuildON project - <https://buildon-project.eu/>

Το έργο BuildON, το οποίο ξεκίνησε τον Μάιο του 2023 με χρηματοδότηση από την Ε.Ε., επικεντρώνεται στην προώθηση συστημάτων αυτοματισμού κτιρίων για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και απόδοσης. Κατά τη διάρκεια του χρονοδιαγράμματος των 42 μηνών, το έργο ενσωματώνει καινοτόμες τεχνολογίες όπως τα πλαίσια IoT Edge-Cloud, τα Έξυπνα Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας και τα Ψηφιακά Δίδυμα για τη βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας και της ευελιξίας του δικτύου. Το BuildON διεξάγει πιλοτικά έργα σε πέντε διαφορετικές ευρωπαϊκές τοποθεσίες, συμπεριλαμβανομένων οικιστικών, εμπορικών και δημόσιων κτιρίων, για την επικύρωση αυτών των λύσεων σε πραγματικά σενάρια. Αξιοποιώντας ψηφιακά εργαλεία και αυτοματισμό, το έργο δίνει τη δυνατότητα στους διαχειριστές εγκαταστάσεων και τους ενοίκους να βελτιώσουν τις έξυπνες δυνατότητες των κτιρίων τους, ευθυγραμμίζόμενοι παράλληλα με το πλαίσιο του Δείκτη Έξυπνης Ετοιμότητας (SRI) της Ε.Ε.. Τελικά, το BuildON στοχεύει στην παροχή οικονομικά προσιτών, προσαρμοστικών και εύκολων στην εγκατάσταση τεχνολογιών για την υποστήριξη της ψηφιοποίησης και της απαλλαγής από τον άνθρακα του κτιριακού τομέα της Ευρώπης.

Virtual Power Plants (VPP)

- ELECTRA IRP - <https://www.electrairp.eu/>

Το Ολοκληρωμένο Ερευνητικό Πρόγραμμα (IRP) ELECTRA, το οποίο χρηματοδοτείται από το Έβδομο Πρόγραμμα-Πλαίσιο της Ε.Ε., είχε ως στόχο να φέρει επανάσταση στα μελλοντικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εισάγοντας την καινοτόμο έννοια του Ιστού Κυψελών (WoC). Το έργο, που διήρκεσε από τον Δεκέμβριο του 2013 έως τον Φεβρουάριο του 2018, επικεντρώθηκε στην ενίσχυση της σταθερότητας και της ευελιξίας του δικτύου σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με υψηλά μερίδια ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η έννοια του WoC διαίρεσε το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σε διασυνδεδεμένα κελιά, καθένα από τα οποία λειτουργεί ως τοπική μονάδα υπεύθυνη για την εξισορρόπηση και τον έλεγχο της τάσης. Αυτά τα κελιά λειτουργούν παρόμοια με τους VPPs, συγκεντρώνοντας καταναεμημένους ενεργειακούς πόρους, όπως η παραγωγή, η αποθήκευση και η απόκριση ζήτησης, για να λειτουργούν ως ενοποιημένες οντότητες, συμβάλλοντας παράλληλα στη σταθερότητα του συστήματος. Εφαρμόζοντας αποκεντρωμένα σχήματα ελέγχου και αξιοποιώντας την ευελιξία από διάφορους πόρους, το ELECTRA IRP απέδειξε τη σκοπιμότητα αυτής της προσέγγισης μέσω προσομοιώσεων και εργαστηριακών δοκιμών, θέτοντας τις βάσεις για εξελίξεις στα έξυπνα δίκτυα και επιτρέποντας πιο ανθεκτικά και ενσωματωμένα σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συστήματα σε όλη την Ευρώπη.

Energy Trading

- Quartierstrom project - <https://quartier-strom.ch/index.php/en/homepage/>

Το έργο Quartierstrom, το οποίο ξεκίνησε το 2018 στο Walenstadt της Ελβετίας, είναι μια πρωτοποριακή πιλοτική πρωτοβουλία που επικεντρώνεται στην εμπορία ενέργειας peer-to-peer (P2P) εντός των τοπικών κοινοτήτων. Αναπτύχθηκε μέσω της συνεργασίας μεταξύ του ETH Zurich, άλλων ακαδημαϊκών ιδρυμάτων και εταιρών του κλάδου, και επιτρέπει στους παραγωγούς-καταναλωτές να ανταλλάσσουν τοπικά παραγόμενη ηλιακή ενέργεια απευθείας με τους γείτονές τους χρησιμοποιώντας τεχνολογία blockchain και έξυπνους μετρητές. Αυτή η αποκεντρωμένη αγορά ενέργειας διασφαλίζει ασφαλείς, διαφανείς και αποτελεσματικές συναλλαγές, προωθώντας παράλληλα τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την ενεργειακή αυτάρκεια της κοινότητας. Το Quartierstrom καταδεικνύει τις δυνατότητες της εμπορίας ενέργειας P2P ως ένα κλιμακωτό και βιώσιμο μοντέλο για το μέλλον των ενεργειακών αγορών.

Energy as a Service (EaaS)

- FLEXICIENCY project - <http://www.flexiciency-h2020.eu/>

Το έργο FLEXICIENCY, το οποίο χρηματοδοτείται στο πλαίσιο του προγράμματος «Ορίζοντας 2020» της Ε.Ε., επικεντρώθηκε στην παροχή λύσεων EaaS μέσω της δημιουργίας μιας ευρωπαϊκής πλατφόρμας για την κοινή χρήση και πρόσβαση σε δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την

κατανάλωση ενέργειας, την παραγωγή και την ευελιξία. Το έργο, το οποίο ξεκίνησε το 2015 και ολοκληρώθηκε το 2019, συγκέντρωσε 18 εταιρίες από οκτώ ευρωπαϊκές χώρες. Το FLEXICIENCY στόχευε στην προώθηση μιας ανοιχτής αγοράς για ενεργειακές υπηρεσίες, επιτρέποντας στους παρόχους ενέργειας, τους συσσωρευτές και τους καταναλωτές να αλληλεπιδρούν αποτελεσματικά. Μέσω επιδείξεων μεγάλης κλίμακας σε πιλοτικές τοποθεσίες σε όλη την Ιταλία, τη Γαλλία, την Ισπανία, τη Σουηδία και την Αυστρία, το έργο παρουσίασε καινοτόμες ενεργειακές υπηρεσίες, όπως προηγμένη απόκριση ζήτησης, παρακολούθηση ενέργειας σε πραγματικό χρόνο και διαχείριση ευελιξίας. Προωθώντας τη διαλειτουργικότητα μεταξύ ενεργειακών συστημάτων και ενδιαφερομένων, το FLEXICIENCY άνοιξε το δρόμο για την ευρεία υιοθέτηση μοντέλων EaaS, ενισχύοντας την ενεργειακή απόδοση, την ευελιξία του δικτύου και την ενδυνάμωση των πελατών στην εξελισσόμενη ευρωπαϊκή αγορά ενέργειας.

Hydrogen Economy Services

- ZEMSHIPS - <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE06-ENV-D-000465/zeroemissionships>

Το έργο Πλοία Μηδενικών Εκπομπών, το οποίο χρηματοδοτείται στο πλαίσιο του προγράμματος LIFE της Ε.Ε. (LIFE06 ENV/D/000465), επικεντρώθηκε στην προώθηση της οικονομίας του υδρογόνου μέσω της προώθησης ενεργειακών λύσεων που βασίζονται στο υδρογόνο για τον ναυτιλιακό τομέα. Το έργο, το οποίο διήρκεσε από τον Οκτώβριο του 2006 έως τον Μάρτιο του 2010, στόχευε στη μείωση των εκπομπών από τα πλοία μέσω της ανάπτυξης και επίδειξης καινοτόμων συστημάτων που λειτουργούν με υδρογόνο, συμπεριλαμβανομένων των τεχνολογιών κυψελών καυσίμου και αποθήκευσης υδρογόνου. Μέσω πιλοτικών επιδείξεων, το έργο διερεύνησε τη σκοπιμότητα ενσωμάτωσης του υδρογόνου ως καθαρής πηγής ενέργειας στις θαλάσσιες δραστηριότητες, ανοίγοντας το δρόμο για πλοία μηδενικών εκπομπών. Επιπλέον, έδωσε έμφαση στη δημιουργία υποστηρικτικής υποδομής για την παραγωγή, αποθήκευση και διανομή υδρογόνου, που αποτελούν κρίσιμα στοιχεία της ευρύτερης οικονομίας υδρογόνου. Το έργο χρησίμευσε ως εφαλτήριο για την επέκταση του ρόλου του υδρογόνου στην απαλλαγή των μεταφορών από τον άνθρακα, αναδεικνύοντας τις δυνατότητές του ως βιώσιμης ενεργειακής λύσης σύμφωνα με τους στόχους της Ε.Ε. για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την προώθηση της μετάβασης σε καθαρές μορφές ενέργειας.

Carbon Capture and Storage (CCS) Services

- Porthos project - <https://www.porthosco2.nl/en/>

Το έργο Porthos (Κόμβος Μεταφοράς CO₂ και Υπεράκτια Αποθήκευση στο Λιμάνι του Ρότερνταμ) είναι μια πρωτοποριακή ευρωπαϊκή πρωτοβουλία που επικεντρώνεται στη δέσμευση, τη μεταφορά και

την αποθήκευση εκπομπών CO₂ από βιομηχανικές πηγές στο λιμάνι του Ρότερνταμ. Ξεκίνησε το 2019 και περιλαμβάνει τη συνεργασία μεταξύ των σημαντικότερων βιομηχανικών φορέων και της ολλανδικής κυβέρνησης. Στόχος του είναι η αποθήκευση έως και 2,5 εκατομμυρίων τόνων CO₂ ετησίως σε άδεια κοιτάσματα φυσικού αερίου κάτω από τη Βόρεια Θάλασσα, συμβάλλοντας σημαντικά στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Το Porthos ενσωματώνει έξυπνα ενεργειακά συστήματα, χρησιμοποιώντας προηγμένη παρακολούθηση και ανάλυση δεδομένων για την ασφαλή και αποτελεσματική διαχείριση της αποθήκευσης CO₂. Ως ένα από τα μεγαλύτερα έργα CCS στην Ευρώπη, το Porthos καταδεικνύει τη σκοπιμότητα της CCS μεγάλης κλίμακας ως βασικού στοιχείου της απαλλαγής από τον άνθρακα βιομηχανικών δραστηριοτήτων και της επίτευξης των στόχων της Ε.Ε. για κλιματική ουδετερότητα έως το 2050.

Carbon Offset and Carbon Trading Platforms

- TRACE Project - <https://trace-horizon.eu/>

Το έργο TRACE (Trade Carbon and Energy), το οποίο χρηματοδοτείται στο πλαίσιο του προγράμματος «Ορίζοντας 2020» της Ε.Ε., επικεντρώνεται στην ανάπτυξη μιας πλατφόρμας βασισμένης σε blockchain για το εμπόριο άνθρακα και τις συναλλαγές ενέργειας. Αυτή η καινοτόμος πλατφόρμα διευκολύνει το peer-to-peer εμπόριο πιστωτικών μονάδων άνθρακα, διασφαλίζοντας διαφάνεια, εμπιστοσύνη και αποτελεσματικότητα στην αγορά άνθρακα. Το TRACE, που ξεκίνησε για να ενισχύσει την προσβασιμότητα και την αξιοπιστία των μηχανισμών αντιστάθμισης άνθρακα, ενσωματώνει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για την παρακολούθηση του αποτυπώματος άνθρακα και χρησιμοποιεί τεχνολογία blockchain για ασφαλή επαλήθευση συναλλαγών. Βελτιστοποιώντας τη διαδικασία συναλλαγών και προωθώντας την ανταλλαγή πιστωτικών μονάδων άνθρακα μεταξύ εταιρειών, το έργο υποστηρίζει τους στόχους της Ε.Ε. για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και ενίσχυση των βιώσιμων ενεργειακών συστημάτων. Το TRACE υπογραμμίζει επίσης τις δυνατότητες συνδυασμού της ψηφιακής καινοτομίας με τη δράση για το κλίμα, ανοίγοντας το δρόμο για κλιμακούμενες, αγορακεντρικές λύσεις αντιστάθμισης άνθρακα.

Συμπερασματικά, τα παραπάνω πιλοτικά έργα δείχνουν τις σημαντικές εξελίξεις στα έξυπνα ενεργειακά συστήματα και τον ρόλο τους στην αντιμετώπιση των προκλήσεων της ενεργειακής απόδοσης, της βιωσιμότητας και της απαλλαγής από τον άνθρακα. Αυτές οι πρωτοβουλίες αναδεικνύουν τις δυνατότητες καινοτόμων τεχνολογιών όπως το IoT, η Μηχανική Μάθηση, το blockchain και η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον μετασχηματισμό του ενεργειακού τοπίου. Τα έργα υπογραμμίζουν επίσης τη σημασία της συνεργασίας μεταξύ κυβερνήσεων, ενδιαφερόμενων μερών του κλάδου και ερευνητών για την προώθηση της μετάβασης σε ένα ενεργειακό σύστημα χαμηλών

εκπομπών άνθρακα. Ενώ παραμένουν προκλήσεις όπως το υψηλό κόστος εφαρμογής, τα κανονιστικά εμπόδια και οι κίνδυνοι κυβερνοασφάλειας, οι γνώσεις που αποκτήθηκαν από αυτές τις πιλοτικές πρωτοβουλίες προσφέρουν πολύτιμα πλαίσια για την υπέρβαση αυτών των εμποδίων. Τα πιλοτικά έργα θέτουν και σημεία αναφοράς για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη.

3.3 Προκλήσεις και ευκαιρίες στην κλιμάκωση των υπηρεσιών έξυπνης ενέργειας

Η μετάβαση σε έξυπνα ενεργειακά συστήματα έχει φέρει μετασχηματιστικές αλλαγές στο ενεργειακό τοπίο, επιτρέποντας πιο αποτελεσματική, αξιόπιστη και βιώσιμη διαχείριση ενέργειας. Ωστόσο, η κλιμάκωση των έξυπνων ενεργειακών υπηρεσιών για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης παρουσιάζει μια σειρά από προκλήσεις και ευκαιρίες. Καθώς οι προηγμένες τεχνολογίες όπως το IoT, η ML και το blockchain καθίστανται αναπόσπαστα συνδεδεμένα με τα ενεργειακά συστήματα, είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστούν τα εμπόδια που εμποδίζουν την ευρεία υιοθέτησή τους, αξιοποιώντας παράλληλα τις ευκαιρίες που προσφέρουν.

Μία από τις πιο σημαντικές προκλήσεις στην υιοθέτηση των έξυπνων ενεργειακών υπηρεσιών είναι η επίτευξη διαλειτουργικότητας. Τα έξυπνα ενεργειακά συστήματα βασίζονται σε διασυνδεδεμένες συσκευές και πλατφόρμες για να λειτουργούν συνεκτικά, ωστόσο η ποικιλομορφία των πρωτοκόλλων, των προτύπων και των αρχιτεκτονικών συχνά οδηγεί σε κατακερματισμό (Ahmad, et al., 2022). Για παράδειγμα, οι συσκευές IoT που αναπτύσσονται σε διαφορετικές περιοχές ή βιομηχανίες ενδέχεται να χρησιμοποιούν ασύμβατα πρωτόκολλα επικοινωνίας, καθιστώντας δύσκολη την απρόσκοπτη ενσωμάτωση. Η διαλειτουργικότητα καθίσταται ακόμη πιο κρίσιμη σε μεγάλης κλίμακας ενεργειακά δίκτυα όπου ποικίλες τεχνολογίες, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η αποθήκευση μπαταριών και οι σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, πρέπει να συνεργάζονται. Χωρίς τυποποιημένα πλαίσια, η έλλειψη διαλειτουργικότητας μπορεί να εμποδίσει την αποτελεσματικότητα και την επεκτασιμότητα των έξυπνων ενεργειακών συστημάτων. Επιπλέον, στα έξυπνα ενεργειακά συστήματα, τεράστιες ποσότητες δεδομένων παράγονται σε πραγματικό χρόνο από αισθητήρες, μετρητές και άλλες συσκευές. Η διασφάλιση της ακρίβειας, της αξιοπιστίας και της ασφάλειας αυτών των δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική λήψη αποφάσεων. Ωστόσο, η ακεραιότητα των δεδομένων μπορεί να τεθεί σε κίνδυνο από βλάβες δικτύου, κυβερνοεπιθέσεις ή σφάλματα στη μετάδοση δεδομένων (Shahzad, et al., 2020). Για παράδειγμα, τα παραποιημένα δεδομένα από αισθητήρες μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένες προβλέψεις φορτίου, διαταράσσοντας τη σταθερότητα του δικτύου. Τεχνικές όπως η ανίχνευση κακών δεδομένων (BDD) και η Υποδομή Δημόσιου Κλειδιού (PKI) μπορούν να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση ζητημάτων ακεραιότητας δεδομένων, αλλά αυτές οι λύσεις συχνά απαιτούν υψηλούς υπολογιστικούς πόρους και ισχυρά πλαίσια υλοποίησης (Shi, et al., 2024).

Η κυβερνοασφάλεια παραμένει μια σημαντική ανησυχία καθώς η ενσωμάτωση των ψηφιακών τεχνολογιών στα ενεργειακά συστήματα αυξάνεται. Οι έξυπνες ενεργειακές υπηρεσίες, ιδίως εκείνες που βασίζονται σε πλατφόρμες IoT και cloud, είναι ευάλωτες σε κυβερνοεπιθέσεις όπως παραβιάσεις δεδομένων, πλαστογράφηση και επιθέσεις ransomware. Αυτά τα τρωτά σημεία θέτουν σε κίνδυνο όχι μόνο την ακεραιότητα των δεδομένων αλλά και τη σταθερότητα του ενεργειακού δικτύου (Shahzad et al., 2020). Η αντιμετώπιση των προκλήσεων στον κυβερνοχώρο απαιτεί μια πολυεπίπεδη προσέγγιση, συμπεριλαμβανομένων πρωτοκόλλων κρυπτογράφησης, ασφαλούς διαχείρισης συσκευών και συστημάτων ανίχνευσης απειλών σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, η ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών του κλάδου, των κυβερνήσεων και των ειδικών στον κυβερνοχώρο είναι απαραίτητη για τη δημιουργία ισχυρών αμυντικών μηχανισμών. Καθώς ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών και των ενεργειακών εφαρμογών συνεχίζει να αυξάνεται, η διασφάλιση ότι τα δίκτυα μπορούν να χειρίζονται αυξανόμενους φόρτους εργασίας χωρίς υποβάθμιση της απόδοσης είναι κρίσιμη. Τα ζητήματα επεκτασιμότητας συχνά προκύπτουν από περιορισμούς στην ισχύ επεξεργασίας, το εύρος ζώνης και την χωρητικότητα αποθήκευσης (Parvin, et al., 2022). Για παράδειγμα, η προσθήκη περισσότερων αισθητήρων και συσκευών σε ένα ήδη συμφορημένο δίκτυο μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις στη μετάδοση δεδομένων ή σε μειωμένη αξιοπιστία του συστήματος. Η αντιμετώπιση των προκλήσεων επεκτασιμότητας περιλαμβάνει την υιοθέτηση αποκεντρωμένων αρχιτεκτονικών, όπως το edge computing, το οποίο μειώνει το φόρτο στους κεντρικούς διακομιστές μέσω της τοπικής επεξεργασίας δεδομένων.

Παρά τις προκλήσεις αυτές, οι ευκαιρίες στην κλιμάκωση των έξυπνων ενεργειακών υπηρεσιών είναι τεράστιες. Μία από τις πιο πολλά υποσχόμενες ευκαιρίες έγκειται στην εφαρμογή τεχνολογιών ML. Τα μοντέλα ML μπορούν να αναλύσουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων που παράγονται από έξυπνα ενεργειακά συστήματα, επιτρέποντας την προγνωστική συντήρηση, την πρόβλεψη της ζήτησης και τη βελτιστοποίηση του δικτύου σε πραγματικό χρόνο (Ahmad, et al., 2022). Για παράδειγμα, οι αλγόριθμοι ML μπορούν να προβλέψουν πιθανές βλάβες εξοπλισμού με βάση ιστορικά δεδομένα, επιτρέποντας στους χειριστές να αντιμετωπίζουν προβλήματα προληπτικά και να μειώνουν τον χρόνο διακοπής λειτουργίας. Μια άλλη σημαντική ευκαιρία έγκειται στη χρήση της τεχνολογίας blockchain για το εμπόριο ενέργειας και την ασφάλεια δεδομένων. Το Blockchain παρέχει μια αποκεντρωμένη και διαφανή πλατφόρμα για την καταγραφή συναλλαγών, καθιστώντας την ιδανική για εφαρμογές όπως το peer-to-peer εμπόριο ενέργειας και η παρακολούθηση πιστώσεων άνθρακα (Marinakakis, et al., 2020). Χρησιμοποιώντας έξυπνα συμβόλαια, το blockchain μπορεί να αυτοματοποιήσει τις διαδικασίες εμπορίας ενέργειας, διασφαλίζοντας ότι οι συναλλαγές είναι ασφαλείς και ανθεκτικές σε παραβιάσεις. Επιπλέον, το blockchain ενισχύει την ασφάλεια των δεδομένων δημιουργώντας ένα αμετάβλητο αρχείο

όλων των δραστηριοτήτων, μειώνοντας τον κίνδυνο απάτης και μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης. Η υιοθέτηση του blockchain στις έξυπνες ενεργειακές υπηρεσίες μπορεί να ενδυναμώσει τους καταναλωτές, να προωθήσει τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και να ενισχύσει την ανάπτυξη αποκεντρωμένων αγορών ενέργειας. Το IoT είναι μια άλλη μετασχηματιστική τεχνολογία που οδηγεί στην κλιμάκωση των έξυπνων ενεργειακών υπηρεσιών. Οι συσκευές IoT επιτρέπουν την παρακολούθηση και τον έλεγχο των ενεργειακών συστημάτων σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για την κατανάλωση ενέργειας, την απόδοση του εξοπλισμού και τις περιβαλλοντικές συνθήκες (Shahzad, et al., 2020). Το IoT παίζει επίσης κρίσιμο ρόλο στην ενσωμάτωση καταναμεμένων ενεργειακών πόρων, όπως ηλιακούς συλλέκτες στέγης και ανεμογεννήτριες, στο δίκτυο. Παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας, το IoT επιτρέπει την πιο αποτελεσματική διαχείριση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Ωστόσο, η πλήρης αξιοποίηση των δυνατοτήτων αυτών των ευκαιριών απαιτεί την αντιμετώπιση των υπόλοιπων προκλήσεων. Η τυποποίηση είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για τη διασφάλιση της απρόσκοπτης ενσωμάτωσης ποικίλων τεχνολογιών και πλατφορμών. Η ανάπτυξη κοινών προτύπων για πρωτόκολλα επικοινωνίας, μορφές δεδομένων και μέτρα ασφαλείας μπορεί να ενισχύσει τη διαλειτουργικότητα και να μειώσει τον κατακερματισμό στα έξυπνα ενεργειακά συστήματα (Shi, et al., 2024). Επιπλέον, η ενεργειακή βιομηχανία πρέπει να δώσει προτεραιότητα στις επενδύσεις στην έρευνα και την ανάπτυξη για την προώθηση της καινοτομίας και την υπέρβαση των τεχνικών περιορισμών. Η υποστήριξη πολιτικών και η διεπιστημονική συνεργασία είναι επίσης απαραίτητες για τη δημιουργία ενός ευνοϊκού περιβάλλοντος για την υιοθέτηση προηγμένων τεχνολογιών.

4. Μεθοδολογία

4.1. Εναλλακτικές λύσεις του προβλήματος

Η μετάβαση σε βιώσιμα ενεργειακά συστήματα φέρνει πολλές προκλήσεις λόγω του πολύπλοκου συνδυασμού περιβαλλοντικών, οικονομικών, τεχνικών και κοινωνικών παραγόντων. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, απαιτούνται δομημένες και σαφείς μέθοδοι λήψης αποφάσεων για την αξιολόγηση διαφορετικών επιλογών και την εξισορρόπηση ανταγωνιστικών στόχων. Η Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA) είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στον ενεργειακό τομέα, όπου οι αποφάσεις συχνά περιλαμβάνουν αβεβαιότητα, αντικρουόμενους στόχους και έναν συνδυασμό ποιοτικών και ποσοτικών πληροφοριών. Η MCDA λαμβάνει υπόψη διάφορους παράγοντες όπως ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος, η τεχνική απόδοση, η οικονομική σκοπιμότητα και η κοινωνική αποδοχή. Αυτό καθιστά την MCDA ένα εξαιρετικό εργαλείο για την αξιολόγηση έξυπνων ενεργειακών λύσεων, οι οποίες συχνά απαιτούν εξισορρόπηση του βραχυπρόθεσμου κόστους με τα μακροπρόθεσμα οφέλη (Polatidis, et al., 2006).

Η παρούσα μελέτη εξετάζει μια σειρά από καινοτόμες ενεργειακές λύσεις για την αντιμετώπιση των προκλήσεων των βιώσιμων ενεργειακών συστημάτων. Αυτά περιλαμβάνουν Έξυπνα Συστήματα Μετρήσεων/Διαχείρισης Ενέργειας (EMS), Προγράμματα Απόκρισης Ζήτησης, Ολοκληρωμένα Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Υποδομές Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων, Τεχνολογίες V2G, Συστήματα Αυτοματισμού Κτιρίων, VPPs, Πλατφόρμες Εμπορίας Ενέργειας, Μοντέλα EaaS, Υπηρεσίες Οικονομίας Υδρογόνου, Τεχνολογίες CCS και Πλατφόρμες Αντιστάθμισης Άνθρακα και Εμπορίας Άνθρακα.

Στις επόμενες ενότητες, η MCDA θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση αυτών των επιλογών, δείχνοντας πώς μπορεί να αντιμετωπίσει την πολυπλοκότητα της λήψης αποφάσεων για την ενέργεια. Αυτή η προσέγγιση θα βοηθήσει στον εντοπισμό των λύσεων που ανταποκρίνονται καλύτερα στους στόχους βιωσιμότητας και αποδοτικότητας, παρέχοντας μια σαφή και ισορροπημένη βάση για τη λήψη αποφάσεων.

4.2. Κριτήρια

Οικονομικά Κριτήρια:

- Αποτελεσματικότητα κόστους: Περιλαμβάνει κεφαλαιουχικές επενδύσεις, κόστος λειτουργίας και συντήρησης και κόστος κύκλου ζωής.
- Οικονομική σκοπιμότητα: Αξιολογεί την απόδοση της επένδυσης, την περίοδο αποπληρωμής και την κερδοφορία.

- Οικονομικός κίνδυνος: Λαμβάνει υπόψη τους κινδύνους που σχετίζονται με το κόστος και τις επενδύσεις.
- Ανταγωνιστικότητα Αγοράς: Αξιολογεί πόσο καλά ανταγωνίζεται η λύση στην αγορά ενέργειας σε σύγκριση με εναλλακτικές λύσεις.
- Σταθερότητα Κόστους: Αξιολογεί πιθανές διακυμάνσεις κόστους λόγω αστάθειας της αγοράς ή σπανιότητας πόρων.

Περιβαλλοντικά Κριτήρια:

- Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου: Εστιάζει στη μείωση του CO₂ και άλλων αερίων του θερμοκηπίου.
- Διατήρηση πόρων: Λαμβάνει υπόψη τη βιώσιμη χρήση των φυσικών πόρων.
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις: Περιλαμβάνει τη ρύπανση του αέρα, του νερού και του εδάφους, καθώς και τη διατήρηση της βιοποικιλότητας.
- Διαχείριση Αποβλήτων: Αξιολογεί την παραγωγή, την επεξεργασία και τη διάθεση αποβλήτων (π.χ., μπαταριών, ηλεκτρονικών αποβλήτων) που σχετίζονται με τη λύση.
- Επιπτώσεις στη Χρήση Γης: Αξιολογεί την επίδραση στα οικοσυστήματα λόγω των απαιτήσεων γης για εγκαταστάσεις, όπως ηλιακά πάρκα ή ανεμογεννήτριες

Τεχνικά Κριτήρια:

- Αποδοτικότητα: Αξιολογεί τη μετατροπή ενέργειας και την επιχειρησιακή αποδοτικότητα.
- Αξιοπιστία: Αξιολογεί τη σταθερότητα του συστήματος, την επιχειρησιακή ασφάλεια και την τεχνολογική ωριμότητα.
- Επεκτασιμότητα: Εξετάζει την ικανότητα επέκτασης της τεχνολογίας ή του συστήματος για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης.
- Ενσωμάτωση με Υπάρχοντα Συστήματα: Αξιολογεί την ευκολία ενσωμάτωσης της λύσης με την τρέχουσα υποδομή.
- Επίπεδο Τεχνολογικής Ετοιμότητας (TRL): Εξετάζει την ωριμότητα της τεχνολογίας και την ετοιμότητα για ανάπτυξη.
- Διαλειτουργικότητα: Αξιολογεί πόσο καλά μπορεί η λύση να λειτουργήσει με άλλες τεχνολογίες και συστήματα.

Κοινωνικά Κριτήρια:

- Κοινωνική αποδοχή: Αξιολογεί την αντίληψη του κοινού και την προθυμία υιοθέτησης της τεχνολογίας.
- Δημιουργία θέσεων εργασίας: Εξετάζει τις ευκαιρίες απασχόλησης που δημιουργούνται από τη λύση.
- Πρόσβαση στην ενέργεια: Εστιάζει στη βελτίωση της προσβασιμότητας και της ισότητας στον ενεργειακό εφοδιασμό.

Κανονιστικά Κριτήρια:

- Συμμόρφωση με την πολιτική και κενά
- Πρότυπα εκπομπών
- Αδειοδότηση και αδειοδότηση

4.3. Μέθοδοι αξιολόγησης

Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP)

Η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP) είναι μια βασική τεχνική MCDA που απλοποιεί σύνθετα προβλήματα λήψης αποφάσεων οργανώνοντάς τα σε μια ιεραρχία στόχων, κριτηρίων και εναλλακτικών λύσεων. Οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων αποδίδουν βάρη στα κριτήρια με βάση τη σημασία τους και κατατάσσουν τις εναλλακτικές λύσεις ανάλογα. Η εφαρμογή της AHP σε ενεργειακά συστήματα, ιδιαίτερα στην αξιολόγηση τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπου λαμβάνονται υπόψη κριτήρια όπως το κόστος, η αποδοτικότητα και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η απλότητα και η διαφάνεια του AHP το καθιστούν δημοφιλή επιλογή στον ενεργειακό σχεδιασμό (Lin & Ren, 2021).

Τεχνική για την Προτίμηση Σειράς με Ομοιότητα με την Ιδανική Λύση (TOPSIS)

Το TOPSIS είναι μια άλλη ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος MCDA που κατατάσσει τις εναλλακτικές λύσεις συγκρίνοντας την εγγύτητά τους σε μια ιδανική λύση και την απόστασή τους από μια αρνητικά ιδανική λύση. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την αξιολόγηση έξυπνων ενεργειακών συστημάτων, όπου πρέπει να εξισορροπούνται πολλαπλοί δείκτες απόδοσης όπως το κόστος, οι εκπομπές και η ενεργειακή απόδοση. Οι (Pinto, et al., 2023) απέδειξαν την εφαρμογή του TOPSIS στη βελτιστοποίηση των στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας για έξυπνα κτίρια, επιδεικνύοντας την αποτελεσματικότητά του στην κατάταξη και την επιλογή των καλύτερων εναλλακτικών λύσεων.

Εργαστήριο Δοκιμών και Αξιολόγησης Λήψης Αποφάσεων (DEMATEL)

Η μέθοδος DEMATEL είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ κριτηρίων. Παρέχει πληροφορίες για τις σχέσεις αιτίας-αποτελέσματος μεταξύ κριτηρίων, κάτι που είναι κρίσιμο στις σύνθετες ενεργειακές αξιολογήσεις. Οι (Mrówczyńska, et al., 2021) χρησιμοποίησαν το DEMATEL για την αξιολόγηση των αστικών ενεργειακών πολιτικών, τονίζοντας πώς βοηθά τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να ιεραρχήσουν κριτήρια όπως το οικονομικό κόστος και τα περιβαλλοντικά οφέλη.

Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic)

Η ασαφής λογική επεκτείνει τις παραδοσιακές μεθόδους MCDA ενσωματώνοντας την αβεβαιότητα και την υποκειμενικότητα στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Χρησιμοποιεί γλωσσικές μεταβλητές (π.χ., "χαμηλή", "μέτρια", "υψηλή") αντί για ακριβείς αριθμητικές τιμές για την αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων. Οι (Polatidis, et al., 2006) τόνισαν τη σημασία της ασαφούς λογικής στην αξιολόγηση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπου τα δεδομένα μπορεί να είναι ελλιπή ή/και αβέβαια.

Μέθοδος VIKOR

Η μέθοδος VIKOR έχει σχεδιαστεί για να εντοπίζει συμβιβαστικές λύσεις που εξισορροπούν αντικρουόμενα κριτήρια, καθιστώντας την ιδιαίτερα χρήσιμη στον ενεργειακό σχεδιασμό όπου οι συμβιβασμοί μεταξύ περιβαλλοντικών, οικονομικών και τεχνικών στόχων είναι συνηθισμένοι. (Wang, et al., 2009) τόνισαν τη χρήση του VIKOR στον σχεδιασμό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπου βοηθά στην κατάταξη εναλλακτικών λύσεων με βάση την εγγύτητά τους σε μια ιδανική λύση. Η VIKOR είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιπτώσεις όπου οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων στοχεύουν στην επίτευξη ισορροπίας μεταξύ ανταγωνιστικών προτεραιοτήτων, όπως η ελαχιστοποίηση του κόστους και η μεγιστοποίηση των περιβαλλοντικών οφελών.

4.3.1. Υπολογισμός Βαρών

Οι μέθοδοι για τον προσδιορισμό των βαρών των κριτηρίων ταξινομούνται γενικά σε τρεις τύπους: υποκειμενικές μέθοδοι στάθμισης, αντικειμενικές μέθοδοι στάθμισης και συνδυαστικές μέθοδοι στάθμισης. Σύμφωνα με τους Wang et al. (2009), οι υποκειμενικές μέθοδοι στάθμισης βασίζονται εξ ολοκλήρου στις προτιμήσεις και τις κρίσεις των υπευθύνων λήψης αποφάσεων, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη ποσοτικά δεδομένα από ενεργειακά έργα. Αντίθετα, οι αντικειμενικές μέθοδοι στάθμισης παράγουν βαρίδια χρησιμοποιώντας μαθηματικές τεχνικές που βασίζονται σε ανάλυση αρχικών δεδομένων. Ενώ οι υποκειμενικές μέθοδοι παρέχουν σαφείς και διαφανείς αξιολογήσεις, ενδέχεται να μην έχουν αντικειμενικότητα. Οι αντικειμενικές μέθοδοι, από την άλλη πλευρά, βασίζονται περισσότερο σε δεδομένα, αλλά ενδέχεται να μην λαμβάνουν υπόψη τις λεπτές προτιμήσεις και γνώσεις

των υπευθύνων λήψης αποφάσεων. Η ακρίβεια των υποκειμενικών βαρών μπορεί να περιοριστεί από τις γνώσεις ή τις διαθέσιμες πληροφορίες των υπευθύνων λήψης αποφάσεων, γεγονός που εισάγει ένα βαθμό σφάλματος. Δεδομένου ότι καμία από τις δύο προσεγγίσεις δεν είναι τέλεια, συχνά συνιστάται μια συνδυαστική ή ολοκληρωμένη μέθοδος. Αυτή η υβριδική προσέγγιση εξισορροπεί τα δυνατά και τα αδύνατα σημεία τόσο των υποκειμενικών όσο και των αντικειμενικών μεθόδων, καθιστώντας την μια πιο αξιόπιστη επιλογή για τον προσδιορισμό των βαρών των κριτηρίων. Στην πραγματικότητα, έχουν προταθεί πολυάριθμες ολοκληρωμένες ή βέλτιστες μέθοδοι στάθμισης για την αποτελεσματική αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών.

4.3.2. Fuzzy - Linguistic Variables for Scoring Alternatives Against Criteria

Η διαδικασία αξιολόγησης και λήψης αποφάσεων για έξυπνα ενεργειακά συστήματα συχνά περιλαμβάνει πολύπλοκα και πολυδιάστατα κριτήρια που περιλαμβάνουν τόσο ποσοτικούς παράγοντες, όπως το κόστος και η αποδοτικότητα, όσο και ποιοτικούς παράγοντες, όπως οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η κοινωνική αποδοχή. Πολλά από αυτά τα κριτήρια είναι υποκειμενικά, ασαφή ή αβέβαια, γεγονός που καθιστά δύσκολη την έκφρασή τους με ακριβείς αριθμητικές τιμές. Σε αυτό το πλαίσιο, οι ασαφείς γλωσσικές μεταβλητές έχουν αναδειχθεί ως ένα κρίσιμο εργαλείο για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που ενυπάρχουν στην αξιολόγηση έξυπνων ενεργειακών συστημάτων (Wang, et al., 2009).

Οι ασαφείς γλωσσικές μεταβλητές επιτρέπουν στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να εκφράζουν τις αξιολογήσεις τους χρησιμοποιώντας απλή, διαισθητική γλώσσα όπως "υψηλή", "μέτρια" ή "χαμηλή" αντί για ακριβείς αριθμούς (Polatidis, et al., 2006). Αυτή η προσέγγιση γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ της ανθρώπινης συλλογιστικής και της μαθηματικής μοντελοποίησης, διευκολύνοντας την ενσωμάτωση υποκειμενικών κρίσεων στα πλαίσια λήψης αποφάσεων. Για παράδειγμα, οι (Wang, et al., 2009) τονίζουν ότι οι ασαφείς μέθοδοι είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές στην αντιμετώπιση της εγγενούς ασάφειας και αβεβαιότητας στα βιώσιμα ενεργειακά συστήματα. Αυτές οι μέθοδοι επιτρέπουν στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να ενσωματώνουν ένα ευρύ φάσμα ποιοτικών και ποσοτικών πληροφοριών, διασφαλίζοντας ότι οι αξιολογήσεις αντικατοπτρίζουν περισσότερο τις πολυπλοκότητες του πραγματικού κόσμου (Mrówczyńska, et al., 2021).

Οι ασαφείς γλωσσικές μεταβλητές ενισχύουν επίσης την προσαρμοστικότητα και την ευρωστία των πλαισίων λήψης αποφάσεων (Mrówczyńska, et al., 2021). Τα έξυπνα ενεργειακά συστήματα, όπως τα προγράμματα απόκρισης ζήτησης, οι τεχνολογίες V2G και οι VPPs, λειτουργούν σε δυναμικά και εξελισσόμενα περιβάλλοντα όπου τα δεδομένα και οι συνθήκες ενδέχεται να αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Ενσωματώνοντας την ασαφή λογική, οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων μπορούν να λάβουν

υπόψη αυτές τις αλλαγές και να λάβουν πιο ενημερωμένες, ευέλικτες αποφάσεις (Polatidis, et al., 2006). Οι (Pinto, et al., 2023) καταδεικνύουν πώς μπορούν να εφαρμοστούν ασαφείς μέθοδοι για την ιεράρχηση των επενδυτικών αποφάσεων στη διαχείριση ενέργειας, επιδεικνύοντας την ικανότητά τους να προσαρμόζονται σε ποικίλες συνθήκες και αβεβαιότητες του έργου.

4.3.3 Ιεράρχηση (VIKOR)

Η μέθοδος VIKOR (Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) είναι μια τεχνική πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων που εστιάζει στον προσδιορισμό λύσεων συμβιβασμού για πολύπλοκα προβλήματα με αντικρουόμενα κριτήρια. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους, η VIKOR στοχεύει στην επίτευξη της «πιο κοντινής» λύσης προς το ιδανικό, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την ολική βελτιστοποίηση όσο και την επιθυμία για συμβιβασμό μεταξύ των κριτηρίων (Opricovic & Tzeng, 2004). Αυτή η ιδιαιτερότητα καθιστά τη VIKOR κατάλληλη για την αξιολόγηση έξυπνων ενεργειακών συστημάτων, όπου οι αποφάσεις συχνά απαιτούν εξισορρόπηση μεταξύ ανταγωνιστικών στόχων, όπως κόστος, βιωσιμότητα και αποδοτικότητα.

Η διαδικασία της μεθόδου VIKOR περιλαμβάνει την κανονικοποίηση των κριτηρίων, τον προσδιορισμό των ιδανικών και αντι-ιδανικών λύσεων και τον υπολογισμό τριών βασικών δεικτών: το μέτρο ομαδικής χρησιμότητας (S), το μέτρο ατομικής απογοήτευσης (R) και τον σύνθετο δείκτη VIKOR (Q), ο οποίος ενσωματώνει τα S και R με συντελεστή στάθμισης. Το αποτέλεσμα είναι μια κατάταξη των εναλλακτικών, όπου η πρώτη λύση προτείνεται ως η πιο ισορροπημένη και συμβιβαστική επιλογή. Η VIKOR είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιβάλλοντα αβεβαιότητας και ασάφειας, όπως αυτά των έξυπνων ενεργειακών εφαρμογών, καθώς μπορεί να ενσωματωθεί με ασαφή δεδομένα και γλωσσικές μεταβλητές (Wang, et al., 2009). Επιπλέον, η VIKOR επιτρέπει την προσαρμογή του συντελεστή συμβιβασμού (v), ο οποίος αντανάκλα τη στάση του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων απέναντι στον συμβιβασμό μεταξύ της συλλογικής ωφελιμότητας και της μεμονωμένης απογοήτευσης. Αυτή η δυνατότητα ενισχύει την ευελιξία της μεθόδου στην εφαρμογή της σε διαφορετικά πλαίσια και στρατηγικές προτεραιότητες.

5. Εφαρμογή μεθοδολογίας

Η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη περιλάμβανε τη χρήση δύο διακριτών ερωτηματολογίων, τα οποία σχεδιάστηκαν για να υποστηρίξουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων σχετικά με την αξιολόγηση και ιεράρχηση έξυπνων ενεργειακών υπηρεσιών.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αρχικά, δημιουργήθηκε ένα σύνολο από κριτήρια και υποκρίτρια αυτών για την αξιολόγηση των υπό μελέτη υπηρεσιών. Για τον προσδιορισμό των τελικών κριτηρίων που θα χρησιμοποιηθούν στην έρευνα πραγματοποιήθηκε έρευνα μέσω ερωτηματολογίου, το οποίο απαντήθηκε από δύο εμπειρογνώμονες με υπόβαθρο ο πρώτος με εμπειρία σε ευρωπαϊκά ερευνητικά έργα και στρατηγικό σχεδιασμό ενεργειακών λύσεων, και ο δεύτερος με πιο τεχνικό υπόβαθρο, ειδικευμένος στην εφαρμογή έξυπνων τεχνολογιών στον τομέα της ενέργειας. Κατόπιν συλλογής των δεδομένων, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός των βαρών μέσω της μεθόδου DEMATEL για τις πέντε βασικές κατηγορίες κριτηρίων: οικονομικά, περιβαλλοντικά, τεχνικά, κοινωνικά και κανονιστικά. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, τα οικονομικά, περιβαλλοντικά και τεχνικά κριτήρια αναδείχθηκαν ως τα σημαντικότερα, παρουσιάζοντας τα υψηλότερα σταθμισμένα βάρη. Η μέθοδος DEMATEL περιλάμβανε τα εξής στάδια:

1. Κατασκευή του αρχικού πίνακα άμεσης επιρροής (direct relation matrix), βάσει των απαντήσεων των ειδικών.
2. Κανονικοποίηση του πίνακα, με τον τύπο:

$$Z = \frac{X}{\max_i \sum_j x_{ij}}$$

3. Υπολογισμός του συνολικού πίνακα επιρροής:

$$T = Z + Z^2 + Z^3 + \dots = Z(I - Z)^{-1}$$

4. Υπολογισμός των διανυσμάτων επιρροής και απορρόφησης (D και R), καθώς και των αθροισμάτων (D+R) και διαφορών (D-R) για τον χαρακτηρισμό της αιτιακής δομής του συστήματος.

Τα τελικά βάρη υπολογίστηκαν ως εξής:

Πίνακας 1 Πίνακας βαρών βασικών κριτηρίων

	Wi
Economic Criteria	0,247
Environmental Criteria	0,210

	Wi
Technical Criteria	0,189
Social Criteria	0,169
Regulatory Criteria	0,185

Αφού προσδιορίστηκαν τα γενικά βάρη, ακολούθησε ανάλυση σε επίπεδο υποκριτηρίων για τις τρεις επικρατέστερες κατηγορίες (οικονομικά, περιβαλλοντικά και τεχνικά), εφαρμόζοντας εκ νέου τη μέθοδο DEMATEL. Από την εφαρμογή την μεθόδου τα επικρατέστερα υποκριτήρια προέκυψαν ως εξής:

Οικονομικά Κριτήρια:

- Αποτελεσματικότητα κόστους: Περιλαμβάνει κεφαλαιουχικές επενδύσεις, κόστος λειτουργίας και συντήρησης και κόστος κύκλου ζωής.
- Οικονομική σκοπιμότητα: Αξιολογεί την απόδοση της επένδυσης, την περίοδο αποπληρωμής και την κερδοφορία.
- Οικονομικός κίνδυνος: Λαμβάνει υπόψη τους κινδύνους που σχετίζονται με το κόστος και τις επενδύσεις.

Περιβαλλοντικά Κριτήρια:

- Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου: Εστιάζει στη μείωση του CO₂ και άλλων αερίων του θερμοκηπίου.
- Διατήρηση πόρων: Λαμβάνει υπόψη τη βιώσιμη χρήση των φυσικών πόρων.
- Διαχείριση Αποβλήτων: Αξιολογεί την παραγωγή, την επεξεργασία και τη διάθεση αποβλήτων (π.χ., μπαταριών, ηλεκτρονικών αποβλήτων) που σχετίζονται με τη λύση.

Τεχνικά Κριτήρια:

- Αξιοπιστία: Αξιολογεί τη σταθερότητα του συστήματος, την επιχειρησιακή ασφάλεια και την τεχνολογική ωριμότητα.
- Ενσωμάτωση με Υπάρχοντα Συστήματα: Αξιολογεί την ευκολία ενσωμάτωσης της λύσης με την τρέχουσα υποδομή.
- TRL: Εξετάζει την ωριμότητα της τεχνολογίας και την ετοιμότητα για ανάπτυξη.

Τέλος, τα βάρη των επιμέρους υποκριτηρίων κανονικοποιήθηκαν, ώστε να χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι στο επόμενο στάδιο της ανάλυσης, που αφορά την ιεράρχηση των εναλλακτικών έξυπνων ενεργειακών υπηρεσιών μέσω της μεθόδου VIKOR. Η κανονικοποίηση εξασφάλισε ότι τα βάρη εκφράζονται σε συγκρίσιμη κλίμακα και αντικατοπτρίζουν την πραγματική βαρύτητα κάθε υποκριτηρίου εντός του συνολικού πλαισίου λήψης απόφασης.

Πίνακας 2 Πίνακας βαρών οικονομικών κριτηρίων

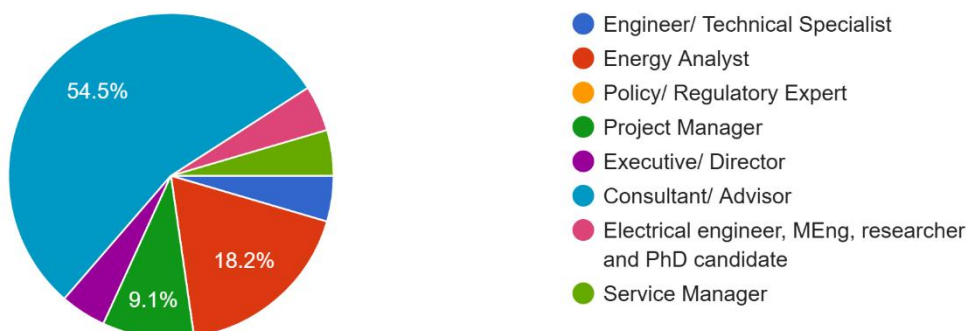
	Wi
Cost-effectiveness	0,113
Economic feasibility	0,119
Financial Risk	0,111
GHG Emissions	0,112
Resource Conservation	0,120
Waste management	0,120
Reliability	0,100
Inegration with Existing Systems	0,093
Technology Readiness Level	0,112

Μετά την οριστικοποίηση των βαρών των κριτηρίων, σχεδιάστηκε ένα δεύτερο ερωτηματολόγιο για την αξιολόγηση και ιεράρχηση 13 καινοτόμων υπηρεσιών στο πλαίσιο των έξυπνων ενεργειακών συστημάτων. Το ερωτηματολόγιο απαντήθηκε από 22 ειδικούς από διάφορους τομείς, όπως μηχανικοί, ενεργειακοί σύμβουλοι, ακαδημαϊκοί και επαγγελματίες με εμπειρία σε έργα ενέργειας. Οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να αξιολογήσουν κάθε εναλλακτική υπηρεσία με βάση τα εννέα κριτήρια, χρησιμοποιώντας την κλίμακα «πολύ χαμηλή», «χαμηλή», «μέτρια», «υψηλή» και «πολύ υψηλή». Παρακάτω παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων ορισμένα στατιστικά στοιχεία του δείγματος.

Το πρώτο διάγραμμα αφορά τον ρόλο των συμμετεχόντων εντός του οργανισμού τους. Παρατηρείται πως το μεγαλύτερο ποσοστό (54,5%) προέρχεται από τον χώρο της συμβουλευτικής (Consultant/Advisor), ενώ αντιπροσωπεύονται επίσης ρόλοι όπως αναλυτές ενέργειας, τεχνικοί ειδικοί, διευθυντές και υποψήφιοι διδάκτορες. Η πολυμορφία αυτή διασφαλίζει ένα διεπιστημονικό μείγμα απόψεων, ενισχύοντας την εγκυρότητα των απαντήσεων.

What is your current role in the organization?

22 responses

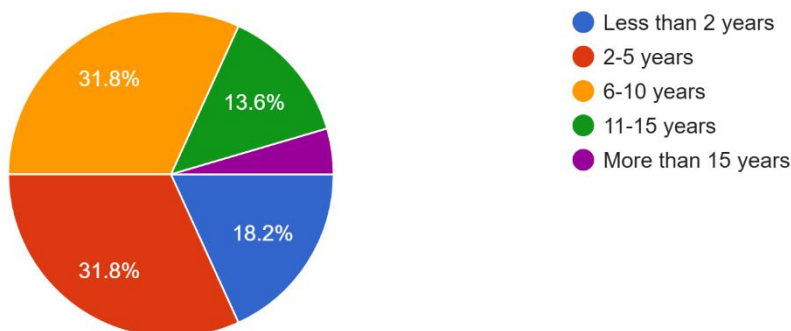


Εικόνα 2 Στατιστική απεικόνιση επαγγελματικού ρόλου δείγματος

Το δεύτερο διάγραμμα παρουσιάζει τα έτη εμπειρίας στον ενεργειακό τομέα. Το δείγμα είναι ισορροπημένο, με σχεδόν τα δύο τρίτα των συμμετεχόντων να έχουν εμπειρία από 2 έως 10 έτη, ενώ καταγράφεται και παρουσία επαγγελματιών με εμπειρία άνω των 15 ετών. Αυτό εξασφαλίζει την απαραίτητη γνώση του κλάδου, χωρίς να περιορίζεται η προοπτική σε συγκεκριμένες γενιές ειδικών.

How many years of experience do you have in the energy sector?

22 responses

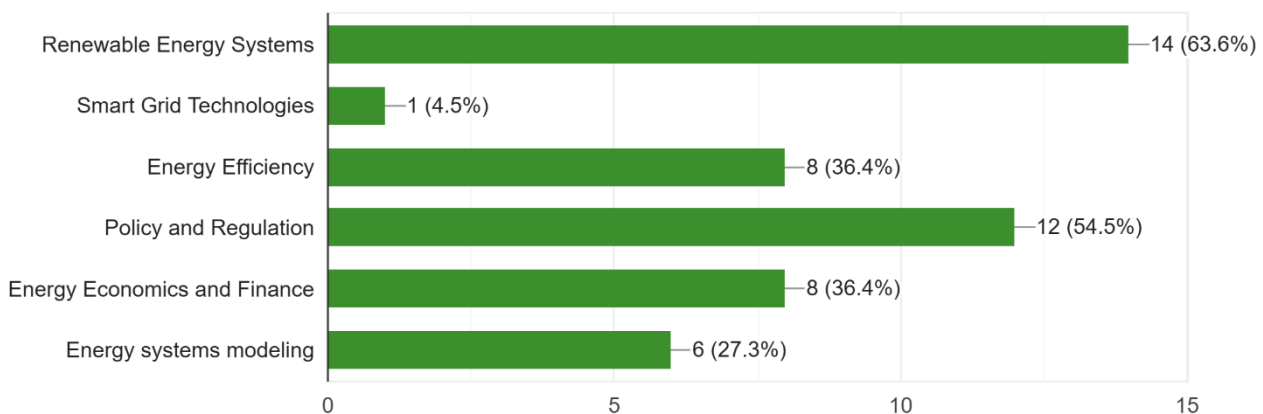


Εικόνα 3 Στατιστική απεικόνιση επαγγελματικής εμπειρίας δείγματος

Το τρίτο γράφημα καταγράφει τον τομέα εξειδίκευσης των συμμετεχόντων. Οι περισσότεροι δήλωσαν εμπειρία στα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (63,6%) και στην πολιτική και ρύθμιση ενέργειας (54,5%). Ακολουθούν οι τομείς της ενεργειακής αποδοτικότητας, της ενεργειακής οικονομίας και χρηματοδότησης, αλλά και της μοντελοποίησης ενεργειακών συστημάτων. Το εύρος αυτό ενισχύει τη σφαιρική κάλυψη τεχνολογικών, οικονομικών και κανονιστικών παραμέτρων στην αξιολόγηση των υπηρεσιών, καθιστώντας τα αποτελέσματα πιο αξιόπιστα και γενικεύσιμα.

What is your main area of expertise or focus within the energy sector?

22 responses



Εικόνα 4 Στατιστική απεικόνιση επαγγελματικού τομέα δείγματος

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε η θεωρία της Fuzzy Logic προκειμένου να γίνει μετατροπή των λεκτικών τιμών σε ασαφείς αριθμούς (fuzzification). Σημειώνεται πως το δείγμα των ερωτηθέντων διαιρέθηκε σε τρεις κατηγορίες βάσει του προφίλ των ειδικών, με στόχο την ενίσχυση της ακρίβειας, την ερμηνευσιμότητα και την αποτελεσματικότητα (Herrera-Viedma, et al., 2014). Οι κατηγορίες ορίστηκαν ως εξής:

- Μηχανικοί / Τεχνικοί: Άτομα με τεχνική κατάρτιση, που συμμετέχουν στον σχεδιασμό ή την τεχνική ανάλυση έργων
- Σύμβουλοι: Εμπλεκόμενοι στην αξιολόγηση στρατηγικών ή τη συμβουλευτική υποστήριξη έργων
- Διοίκηση / Managers: Στελέχη με οργανωτική ή επιχειρησιακή ευθύνη.

Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιήθηκαν οι τριγωνικοί ασαφείς αριθμοί (Triangular Fuzzy Numbers – TFNs) και η μέθοδος του Centroid of Area (COA) ή Center of Gravity (COG), για την αποασαφοποίηση (defuzzification) (Chen & Hwang, 1992):

$$D = \frac{l + m + u}{3}$$

όπου:

- l είναι το κατώτατο όριο του τριγωνικού αριθμού,
- m είναι το μέσο,

- μ είναι το ανώτατο όριο.

Η τελική μετατροπή κατέληξε στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3 Αντιστοίχιση Λεκτικών Τιμών σε TFN και Αποθολωποιημένες Τιμές

Λεκτική Τιμή	TFN	Defuzzified
Very Low	(0,0, 0,0, 0,25)	0,083
Low	(0,0, 0,25, 0,5)	0,25
Medium	(0,25, 0,5, 0,75)	0,5
High	(0,5, 0,75, 1,0)	0,75
Very High	(0,75, 1,0, 1,0)	0,916

Το τελευταίο στάδιο της μεθοδολογίας αφορά την ιεράρχηση των 13 έξυπνων ενεργειακών υπηρεσιών μέσω της πολυκριτήριας μεθόδου VIKOR, η οποία είναι σχεδιασμένη να προσδιορίζει τη βέλτιστη συμβιβαστική λύση μεταξύ ανταγωνιστικών εναλλακτικών. Αρχικά, διαμορφώθηκαν οι πίνακες απόδοσης f_{ij} στον οποίο κάθε στοιχείο αντιπροσωπεύει την αποασαφοποιημένη τιμή της αξιολόγησης της εναλλακτικής j ως προς το κριτήριο i , όπως προέκυψε από την προηγούμενη φάση της fuzzy ανάλυσης.

Ακολούθησε η ταξινόμηση των κριτηρίων σε κριτήρια οφέλους (B) και κριτήρια κόστους (C) όπως αυτά εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4 Κατηγοριοποίηση Οικονομικών Κριτηρίων σε Κριτήρια Οφέλους (B) και Κριτήρια Κόστους (C)

Cost-effectiveness	B
Economic feasibility	B
Financial Risk	C
GHG Emissions	B
Resource Conservation	B
Waste management	B
Reliability	B
Inegration with Existing Systems	B

Technology Readiness Level	B
-----------------------------------	---

Έπειτα, για την εξασφάλιση συγκρισιμότητας μεταξύ διαφορετικών μονάδων μέτρησης, οι τιμές κανονικοποιήθηκαν ως εξής:

- Για κριτήρια οφέλους

$$R_{ij} = \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-}$$

- Για κριτήρια κόστους

$$R_{ij} = \frac{f_{ij} - f_i^-}{f_i^* - f_i^-}$$

όπου:

- $F_i^* = \max_j f_{ij}$: η βέλτιστη (μέγιστη) απόδοση για το κριτήριο i
- $F_i^- = \min_j f_{ij}$: η χειρότερη (ελάχιστη) απόδοση για το κριτήριο i.

Για την ολοκλήρωση τα μεθόδου και τον υπολογισμό του τελικού δείκτη συμβιβασμού υπολογίστηκαν επίσης οι παρακάτω δείκτες:

Συνολικό μειονέκτημα (S):

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i \cdot R_{ij}$$

όπου:

- w_i : το βάρος του κριτηρίου i
- R: μέγιστο μειονέκτημα:

$$R_j = \max_i (w_i \cdot R_{ij})$$

Τέλος υπολογίστηκε ο σύνθετος δείκτης συμβιβασμού (Q):

$$Q_j = v \cdot \frac{S_j - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \cdot \frac{R_j - R^*}{R^- - R^*}$$

όπου:

- $S^* = \min_j S_j$, $S^- = \max_j S_j$
- $R^* = \min_j R_j$, $R^- = \max_j R_j$

- ν είναι ο συντελεστής συμβιβασμού ($\nu=0,5$). Η τιμή 0,5 χρησιμοποιείται ως η ουδέτερη και ισορροπημένη επιλογή, αντιπροσωπεύοντας ίσο συμβιβασμό μεταξύ της επιδίωξης της συνολικής ωφέλειας και την μείωσης της μέγιστης δυσaráσκείας (Orpiconic & Tzeng, 2004).

Η διαδικασία εφαρμόστηκε ξεχωριστά για κάθε μία από τις τρεις επαγγελματικές ομάδες του δείγματος (Μηχανικοί/Τεχνικοί, Σύμβουλοι, Διοικητικά Στελέχη), επιτρέποντας την ανάλυση διαφοροποιήσεων στην ιεράρχηση ανά προφίλ συμμετεχόντων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Για τους μηχανικούς και τεχνικούς ειδικούς, η προτιμότερη υπηρεσία είναι οι VPPs, τους οποίους θεώρησαν την πιο ώριμη και αποτελεσματική λύση. Στις επόμενες θέσεις βρίσκονται τα συστήματα έξυπνης μέτρησης και τα ολοκληρωμένα συστήματα ανανεώσιμων πηγών, που σχετίζονται άμεσα με τη διαχείριση και την τεχνική απόδοση. Αντίθετα, υπηρεσίες όπως η φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων, το V2G και το εμπόριο ενέργειας έχουν μικρότερη προτεραιότητα.

Πίνακας 5 Δείκτης Συμβιβασμού (Q) για Ενεργειακές Τεχνολογίες βάσει Αξιολόγησης Μηχανικού/Τεχνικού Ειδικού

Engineer/ Technical Specialist	
	Q
VPPs	0,020
Smart Metering/EMS	0,451
Integrated Renewable Energy Systems	0,455
BAS	0,582
CCS	0,589
Demand Response Programs	0,653
Carbon Offset and Carbon Trading	0,750
Hydrogen Economy Services	0,775
EaaS	0,800
EVs	0,903
Energy Trading	0,910
V2G	0,984
EV Charging Infrastructure	1,000

Οι σύμβουλοι έδωσαν προτεραιότητα σε πιο ολοκληρωμένες και διαχειριστικές λύσεις, με πρώτη επιλογή τα ολοκληρωμένα συστήματα ΑΠΕ, και αμέσως μετά τα συστήματα αυτοματισμού κτιρίων και τα προγράμματα απόκρισης ζήτησης. Φαίνεται πως δίνουν έμφαση στην ευελιξία και τη συνολική απόδοση ενός ενεργειακού συστήματος. Οι VPPs ήταν μεσαίας προτεραιότητας για αυτή την ομάδα.

Πίνακας 6 Δείκτης Συμβιβασμού (Q) για Ενεργειακές Τεχνολογίες βάσει Αξιολόγησης Συμβούλου

Consultant/ Advisor	
	Q
Integrated Renewable Energy Systems	0,000
BAS	0,209
Demand Response Programs	0,412
EV Charging Infrastructure	0,473
Smart Metering/EMS	0,476
VPPs	0,649
Carbon Offset and Carbon Trading	0,653
EVs	0,693
CCS	0,770
EaaS	0,820
V2G	0,828
Hydrogen Economy Services	0,863
Energy Trading	0,934

Τα διοικητικά στελέχη συμφώνησαν με τους συμβούλους ως προς την πρώτη θέση, δίνοντας κι αυτά προτεραιότητα στα ολοκληρωμένα συστήματα ΑΠΕ. Ακολούθησαν τα προγράμματα απόκρισης ζήτησης και τα συστήματα μέτρησης, που φαίνεται να τα θεωρούν βασικά εργαλεία για τη λειτουργία και παρακολούθηση της ενέργειας. Οι υπηρεσίες που σχετίζονται με το υδρογόνο, τη φόρτιση EV και το V2G κατέλαβαν τις χαμηλότερες θέσεις, πιθανότατα επειδή θεωρούνται ακόμα πιο μακροπρόθεσμες ή λιγότερο εφαρμόσιμες σε τρέχοντα έργα.

Πίνακας 7 Δείκτης Συμβιβασμού (Q) για Ενεργειακές Τεχνολογίες βάσει Αξιολόγησης Μηχανικού/Τεχνικού Διοικητικών Στελεχών

Managers	
	Q
Integrated Renewable Energy Systems	0,000
Demand Response Programs	0,205
Smart Metering/EMS	0,471
BAS	0,528
Carbon Offset and Carbon Trading	0,569
EVs	0,743
VPPs	0,776
Energy Trading	0,796
EaaS	0,820
CCS	0,830
V2G	0,841
EV Charging Infrastructure	0,858
Hydrogen Economy Services	0,970

Τέλος, για την ολοκλήρωση της μεθόδου ακολουθήθηκε ο κανόνας αποδοχής της βέλτιστης λύσης υπολογίζοντας το αποδεκτό πλεονέκτημα (acceptable advantage) και για τις τρεις κατηγορίες του δείγματος βάσει του τύπου:

$$Q_{(2)} - Q_{(1)} \geq \frac{1}{m-1}$$

όπου:

$Q_{(1)}$: η καλύτερη (χαμηλότερη) τιμή Q

$Q_{(2)}$: η δεύτερη καλύτερη τιμή Q

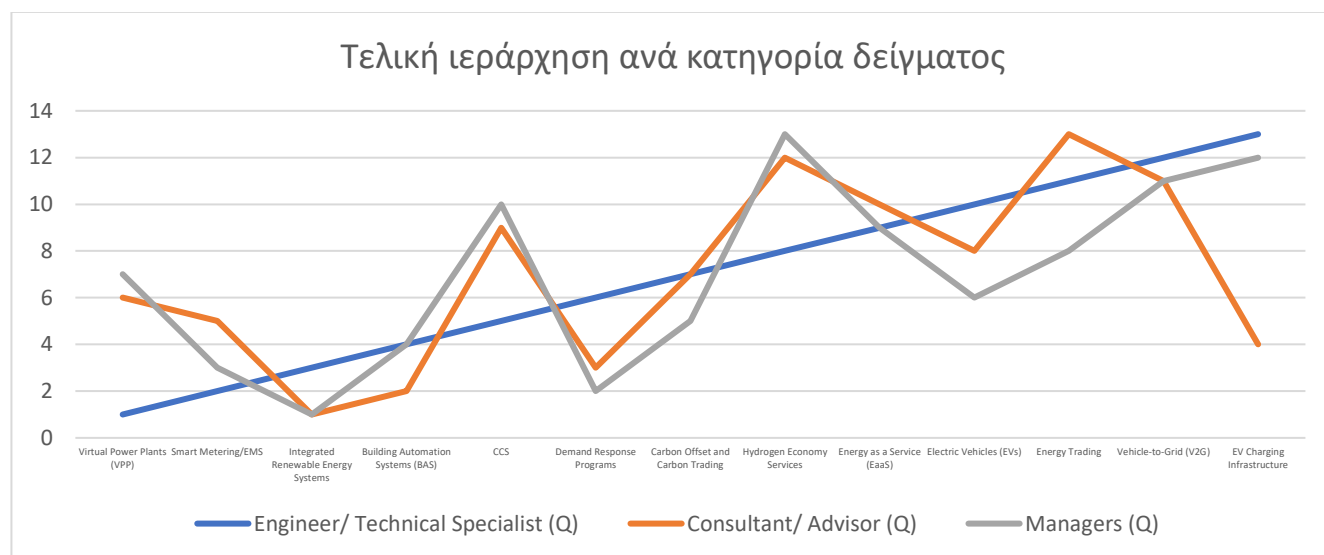
m είναι ο αριθμός των εναλλακτικών

Η εξίσωση επιβεβαιώθηκε και για τις τρεις κατηγορίες.

Οι υπολογισμοί της μεθοδολογίας βρίσκονται αναλυτικά στο Παράρτημα.

6. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Στον παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης αναφορικά με την ιεράρχηση των 13 έξυπνων ενεργειακών υπηρεσιών, όπως αυτά προέκυψαν από την παραπάνω μεθοδολογία. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις τρεις κατηγορίες του δείγματος παρουσιάζει ορισμένες κοινές προτιμήσεις αλλά και σημαντικές διαφοροποιήσεις. Κοινά και για τις τρεις κατηγορίες τα Integrated Renewable Energy Systems παρουσιάζονται ως υπηρεσίες υψηλής προτεραιότητας, γεγονός απόλυτα λογικό καθώς η ανάγκη ενσωμάτωσης των ΑΠΕ αποτελεί καίριο στοιχείο για το μέλλον των έξυπνων συστημάτων, όπως επιβεβαιώνεται και από την βιβλιογραφία (Zhang, et al., 2022). Από την άλλη πλευρά, κοινά αποτελέσματα παρουσιάζουν και οι υπηρεσίες που αφορούν την ηλεκτροκίνηση καθώς έχουν λάβει χαμηλές βαθμολογίες και από τις τρεις κατηγορίες, γεγονός που πιθανώς ερμηνεύεται λόγω των τεχνικών και ρυθμιστικών προκλήσεων που αντιμετωπίζουν, όπως η όπως υπερφόρτωση του δικτύου, μη συντονισμένη φόρτιση και αυξημένα φορτία αιχμής (Ajanovic & Haas, 2019).



Εικόνα 5 Τελική Ιεράρχηση ανά Κατηγορία Δείγματος

Πιο συγκεκριμένα από την κατηγορία των μηχανικών αναμένεται να προτιμηθούν υπηρεσίες με υψηλό βαθμό τεχνικής ωριμότητας και εφικτότητας εφαρμογής, λόγω της τεχνικής τους ιδιότητας στην υλοποίηση έργων ενέργειας. Οι μηχανικοί προτεραιοποίησαν τα VPPs, δείχνοντας πως υπάρχει δυνατότητα ελέγχου και διασύνδεσης αποκεντρωμένων μονάδων. Ακόμα, τόνισαν την ανάγκη υλοποίησης συστημάτων για την διαχείριση και την βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας καθώς δεύτερη και τρίτη επιλογή αποφάσισαν το smart metering και τα integrated RES.

Οι σύμβουλοι είναι σύνηθες να εμπλέκονται ενεργά με τον ενεργειακό σχεδιασμό σε στρατηγικό ρόλο, κυρίως αλλά όχι αποκλειστικά σε έργα που αφορούν τα ολοκληρωμένα συστήματα ΑΠΕ, τα προγράμματα απόκρισης ζήτησης και την ενεργειακή απόδοση. Αυτό επιβεβαιώνεται από τις τρεις

κυρίαρχες επιλογές τους (BAS, Demand Response Programs και integrated RES). Αντίθετα με τους μηχανικούς, τα VPP κατατάσσονται χαμηλότερα στην κλίμακα πιθανώς λόγω της αβέβαιης εμπορικής τους εφαρμογής και της πολυπλοκότητας τους (Mengelkamp, et al., 2018).

Τέλος, από τα στελέχη διοίκησης αναμένεται βασικό κριτήριο τους να είναι η οικονομική βιωσιμότητα των υπηρεσιών. Τα integrated RES, Demand Response και Smart Metering/EMS είναι στις πρώτες θέσεις, γεγονός που αποτυπώνει την ανάγκη για αξιόπιστα εργαλεία παρακολούθησης και απόκρισης σε συνθήκες ζήτησης. Από την άλλη πλευρά το Hydrogen Economy Service κατατάσσεται χαμηλά στην ιεράρχηση λόγω του υψηλού κόστους και της χαμηλής τεχνικής ωριμότητας της τεχνολογίας.

Συνολικά, η βασική διαφοροποίηση ανάμεσα στις κατηγορίες του δείγματος φαίνεται να είναι η υπηρεσία VPP. Παρά το γεγονός πως για τους μηχανικούς φαίνεται να είναι η καλύτερη επιλογή οι άλλες δύο κατηγορίες διαφωνούν. Παρά την πιθανή τεχνολογική ωριμότητα και τις δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει αυτή η υπηρεσία στο σύστημα ενέργειας παραμένουν σημαντικά μειονεκτήματα τα οποία δεν μπορούν να αγνοηθούν από τις άλλες κατηγορίες. Τέτοιου είδους τεχνολογίες αντιμετωπίζουν ακόμα σημαντικές ρυθμιστικές προκλήσεις καθώς και δυσκολία στην χρηματοδότηση, συνεπώς συνολικά θεωρούνται λιγότερο ελκυστικές για πιθανούς επενδυτές. Ακόμα, είναι σημαντικό να τονιστεί η σταθερά χαμηλή κατάταξη των υπηρεσιών που σχετίζονται με την ηλεκτροκίνηση από όλες τις κατηγορίες του δείγματος. Παρά το γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια έχει υπάρξει μεγάλη εξέλιξη και προώθηση τέτοιου είδους τεχνολογιών φανερώνεται η έντονη επιφυλακτικότητα των εμπειρογνομόνων απέναντι στις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν. Τα βασικότερα ζητήματα που ακόμα εξετάζονται από έμπειρους ειδικούς αφορούν κυρίως την υπερφόρτωση του δικτύου, την διάρκεια μπαταρίας, τις υποδομές φόρτισης των οχημάτων καθώς και τη μη συντονισμένη φόρτιση και αύξηση των ωρών αιχμής. Κοινώς, σε υψηλή κατάταξη για όλες τις κατηγορίες βρίσκονται και η Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο σύστημα. Τονίζεται, έτσι, πως αποτελούν βασικό στοιχείο για τις βιώσιμες ενεργειακές υποδομές, ειδικά λαμβάνοντας υπόψη την ραγδαία αύξηση των ΑΠΕ τα τελευταία χρόνια, τόσο στην Ελλάδα όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Η υλοποίηση τέτοιων έργων έχει πολλαπλά οφέλη συμπεριλαμβανομένων μείωση των εκπομπών, διασυνδεσιμότητα και πλήρη συμβατότητα με τις ευρωπαϊκές και εθνικές πολιτικές για ενεργειακή μετάβαση.

Ενδιαφέρουσα είναι η ιεράρχηση της ενεργειακής εμπορίας (energy trading) καθώς για όλες τις κατηγορίες κατέχει χαμηλή κατάταξη. Η υπηρεσία σήμερα υλοποιείται κυρίως σε επίπεδο χονδρεμπορικής αγοράς, όπου οι πάροχοι και οι διαχειριστές συστημάτων συμμετέχουν σε χρηματιστήρια ενέργειας. Ωστόσο η μετάβαση σε μοντέλα αποκεντρωμένης εμπορίας ενέργειας παραμένει σημαντικά περιορισμένη, κυρίως λόγω των ρυθμιστικών προκλήσεων, του κόστους

υλοποίησης καθώς και της εξαιρετικά περιορισμένης ενημέρωσης για την υποστήριξη μοντέλων συναλλαγών peer-to-peer.

Οι υπηρεσίες Smart Metering/EMS και Demand Response Programs έχουν υψηλές θέσεις τόσο στους Μηχανικούς όσο και στα Στελέχη Διοίκησης. Η αποδοχή αυτή αντικατοπτρίζει την επιχειρησιακή αξιοπιστία, την τεχνολογική ωριμότητα και τη δυνατότητα άμεσης εφαρμογής τους, όπως έχει ήδη τεκμηριωθεί σε πιλοτικά έργα εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Οι Σύμβουλοι επίσης κατατάσσουν υψηλά τα "Demand Response Programs", πιθανώς διότι αναγνωρίζουν τη συμβολή τους στη διαχείριση φορτίου και στην ενίσχυση της ευελιξίας σε περιβάλλοντα μεταβαλλόμενης ζήτησης. Τέλος, οι υπηρεσίες όπως EaaS, Carbon Trading και Hydrogen Service παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις ανάμεσα στις κατηγορίες του δείγματος. Τα διοικητικά στελέχη παρουσιάζουν προτίμηση στο EaaS, πιθανώς λόγω των χαμηλών κεφαλαιουχικών δαπανών αλλά οι άλλες δύο κατηγορίες παραμένουν επιφυλακτικοί λόγω της ωριμότητας της υπηρεσίας και της ευαλωτότητας της στις αστάθειες της αγοράς.

Συμπερασματικά, οι επαγγελματικές κατηγορίες είναι φανερό πως διαμόρφωσαν τις ιεραρχήσεις βάσει των διαφορετικών εμπειριών και αναγκών που αντιμετωπίζουν στον τομέα τους. Η ομοφωνία σε ορισμένες τεχνολογίες τονίζει την ωριμότητα και την ανάγκη υλοποίησης των συγκεκριμένων υπηρεσιών στο σύστημα ενέργειας με στόχο τη μετάβαση στην βιώσιμη και έξυπνη ενέργεια. Από την άλλη πλευρά οι κοινώς χαμηλά στην ιεράρχηση υπηρεσίες θα πρέπει να επανεξεταστούν ως προς τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν έως και σήμερα, ειδικά στην περίπτωση της ηλεκτροκίνησης, η οποία αναπτύσσεται σημαντικά και δαπανούνται για την υλοποίηση της σημαντικοί πόροι σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο. Επίσης, τονίζεται η ανάγκη για ολιστικό σχεδιασμό στρατηγικών ανάπτυξης έξυπνων ενεργειακών υπηρεσιών, οι οποίες θα λαμβάνουν υπόψη τόσο τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους όσο και τα ρυθμιστικά και οικονομικά στοιχεία. Η προώθηση των έξυπνων ενεργειακών υπηρεσιών απαιτεί συνεχή διάλογο μεταξύ διαφορετικών επαγγελματικών ομάδων, τεκμηριωμένες παρεμβάσεις πολιτικής και ισχυρή δέσμευση για την αντιμετώπιση των δυνητικών προκλήσεων.

7. Συμπεράσματα

Η αυξανόμενη κλιματική κρίση, η ενεργειακή αβεβαιότητα και η ανάγκη για βιώσιμη ανάπτυξη οδηγούν σε ριζικές αλλαγές στον ενεργειακό τομέα. Στο επίκεντρο αυτής της μετάβασης βρίσκονται οι έξυπνες ενεργειακές υπηρεσίες, τεχνολογικές λύσεις που αξιοποιούν καινοτόμες υποδομές και συστήματα πληροφορικής για να βελτιώσουν την αποδοτικότητα, τη διαφάνεια και την αξιοπιστία των ενεργειακών αγορών. Η Ε.Ε. έχει υιοθετήσει φιλόδοξες στρατηγικές, όπως η Πράσινη Συμφωνία και το πακέτο "Fit for 55", που προωθούν την απανθρακοποίηση, τη μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την ψηφιακή ενσωμάτωση τεχνολογιών αιχμής (European Commission, 2020).

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα διπλωματική εστιάζει στην πολυκριτήρια αξιολόγηση διαφόρων έξυπνων ενεργειακών λύσεων, χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία VIKOR και συνδυάζοντας υποκειμενικές κρίσεις ειδικών μέσω της DEMATEL. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόστηκε σε τρεις διακριτές κατηγορίες επαγγελματιών του τομέα: μηχανικούς/τεχνικούς ειδικούς, συμβούλους/αναλυτές και διοικητικά στελέχη. Μέσω δύο ερωτηματολογίων (ένα για την εκτίμηση βαρύτητας των κριτηρίων και ένα για την αξιολόγηση των εναλλακτικών), αναδείχθηκαν διαφορές στις προτιμήσεις και τις αντιλήψεις κάθε ομάδας.

Οι τεχνολογίες που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν λύσεις όπως τα Έξυπνα Συστήματα Μέτρησης (Smart Metering/EMS), η απόκριση ζήτησης (Demand Response), η ενοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα BAS, οι VPPs, οι τεχνολογίες Εμπορίας Ενέργειας, οι Υπηρεσίες Υδρογόνου, η ηλεκτροκίνηση και τα συστήματα V2G, καθώς και μηχανισμοί αντιστάθμισης εκπομπών άνθρακα (Carbon Offset).

Η πολυκριτήρια ανάλυση έδειξε ότι κάθε επαγγελματική κατηγορία προσεγγίζει διαφορετικά την αξία των τεχνολογιών. Οι μηχανικοί ανέδειξαν τα VPP ως την πλέον ώριμη και αποδοτική λύση, πιθανώς λόγω της τεχνικής φύσης και της ευκολίας ενσωμάτωσής τους σε υφιστάμενα συστήματα (Siano, 2014). Οι σύμβουλοι, με έμφαση στην οικονομική και επενδυτική προοπτική, έδωσαν καλύτερη βαθμολογία σε τεχνολογίες με μεγαλύτερη οικονομική απόδοση όπως τα ενσωματωμένα συστήματα ΑΠΕ, ενώ ανώτερα στελέχη διοίκησης αξιολόγησαν υψηλότερα τεχνολογίες με αποδεδειγμένο αντίκτυπο και μικρότερη αβεβαιότητα εφαρμογής.

Οι λύσεις αυτές πλαισιώνονται από έναν συνεχώς εξελισσόμενο τεχνολογικό πλαίσιο. Οι τεχνολογίες IoT προσφέρουν αισθητήρες και συσκευές πεδίου για απομακρυσμένη παρακολούθηση και έλεγχο. Η ΑΙ και η ML αξιοποιούνται για προβλέψεις ζήτησης, βελτιστοποίηση κατανομής φορτίου και πρόγνωση παραγωγής από ΑΠΕ. Το blockchain εισάγει νέες δυνατότητες για αποκεντρωμένες αγορές ενέργειας και αδιάβλητη καταγραφή συναλλαγών, μειώνοντας τον κίνδυνο απάτης και ενισχύοντας τη διαφάνεια.

Η ανάλυση Big Data προσφέρει εργαλεία για την εξαγωγή γνώσης από τεράστιους όγκους ενεργειακών και περιβαλλοντικών δεδομένων (Wang, et al., 2022).

Παρά τη δυναμική τους, οι τεχνολογίες αυτές συνοδεύονται από προκλήσεις. Ζητήματα όπως η διαλειτουργικότητα των συστημάτων, η ασφάλεια στον κυβερνοχώρο (cybersecurity), η έλλειψη ενιαίων προτύπων και η ανάγκη για νέες δεξιότητες αποτελούν εμπόδια που απαιτούν στρατηγικό σχεδιασμό. Επιπλέον, ο κοινωνικός παράγοντας, η αποδοχή από τους τελικούς χρήστες και η νομοθετική ευελιξία είναι καθοριστικά για την επιτυχία.

Η χρήση της μεθόδου DEMATEL επέτρεψε την αποτίμηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των κριτηρίων, ενισχύοντας την ακρίβεια της σταθμισμένης κατάταξης. Ακολούθως, η εφαρμογή του VIKOR, μιας μεθόδου επίλυσης προβλημάτων πολλαπλών κριτηρίων βασισμένης στην έννοια του συμβιβασμού, επέτρεψε την κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων και την εξαγωγή προτιμητέων επιλογών ανά επαγγελματική ομάδα.

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν πως δεν υπάρχει μία ενιαία βέλτιστη λύση, αλλά η προτεραιοποίηση εξαρτάται από την επαγγελματική θέση και τον ρόλο των αξιολογητών. Οι μηχανικοί επικεντρώνονται σε τεχνικά κριτήρια όπως η αξιοπιστία και η ωριμότητα τεχνολογίας, οι σύμβουλοι προτιμούν την οικονομική αποδοτικότητα, ενώ οι μάνατζερ εξετάζουν στρατηγικές πτυχές και ρίσκα εφαρμογής.

Επομένως, μια ολιστική στρατηγική υιοθέτησης έξυπνων ενεργειακών λύσεων θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τις τεχνικές ή οικονομικές διαστάσεις, αλλά και τη δυναμική των εμπλεκόμενων φορέων. Πολιτικές που ενσωματώνουν συμμετοχικές διαδικασίες λήψης απόφασης και ενδυναμώνουν το ανθρώπινο δυναμικό μέσω κατάλληλης επιμόρφωσης κρίνονται απαραίτητες.

Προτείνεται η ανάπτυξη προτυποποιημένων πλαισίων υλοποίησης και δοκιμών (testbeds) για νέες τεχνολογίες, η ενίσχυση της έρευνας σε τομείς όπως το AI-for-Energy και η στήριξη μικρομεσαίων επιχειρήσεων για την υιοθέτηση έξυπνων ενεργειακών εφαρμογών. Παράλληλα, η ενίσχυση της εμπιστοσύνης σε τεχνολογίες όπως το blockchain απαιτεί ρυθμιστικές πρωτοβουλίες και μηχανισμούς ελέγχου ποιότητας. Η εργασία αυτή συμβάλλει στην κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την υιοθέτηση έξυπνων ενεργειακών τεχνολογιών και υποδεικνύει την αναγκαιότητα πολυπαραγοντικής προσέγγισης στις διαδικασίες ενεργειακού μετασχηματισμού.

8. Βιβλιογραφία

- Aalami, . H. A., Moghaddam, M. P. & Yousefi, G. R., 2010. *Modeling and prioritizing demand response programs in power markets..* s.l.:Electric Power Systems Research, 80(4), 426-435..
- Ahmad, T. και συν., 2022. *Data-driven probabilistic machine learning in sustainable smart energy systems: Key developments, challenges, and future research opportunities in the context of smart grid paradigm..* s.l.: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 160, 112128..
- Ahmad, T. & Zhang, D., 2021. *Using the internet of things in smart energy systems and networks..* s.l.: Sustainable Cities and Society, 68, 102783..
- Ajanovic, A. & Haas, R., 2019. *Electric vehicles: Solution or new problem?..* s.l.: Environmental Development, 33, 100489.
- Albadi, M. H. & El-Saadany, . E. F., 2007. *Demand response in electricity markets: An overview*, s.l.: IEEE power engineering society general meeting (pp. 1-5). IEEE.
- Borowski, P. F., 2022. *Mitigating climate change and the development of green energy versus a return to fossil fuels due to the energy crisis in 2022..* s.l.:Energies, 15 (24), 9289..
- Boumaiza, A. & Maher, K., 2024. *Leveraging blockchain technology to enhance transparency and efficiency in carbon trading markets*, s.l.: International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 162, 110225.
- Brandon, N. P. & Kurban, Z., 2017. *Clean energy and the hydrogen economy..* s.l.: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 375(2098), 20160400.
- Bussar, C. και συν., 2016. *Large-scale integration of renewable energies and impact on storage demand in a European renewable power system of 2050—Sensitivity study*, s.l.: Journal of Energy Storage, 6, 1-10..
- Chauhan, A. & Saini, R. P., 2014. *A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control..* s.l.: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 38, 99-120.
- Chawla, A. και συν., 2022. *IoT-based monitoring in carbon capture and storage systems*, s.l.: IEEE Internet of Things Magazine, 5(4), 106-111.

- Chen, S. J. & Hwang, C. L., 1992. *Fuzzy multiple attribute decision making*, s.l.: Springer.
- Deligiannis, P., Koutroubinas, S. & Koronias, 2019. *Predicting energy consumption through machine learning using a smart-metering architecture..* s.l.:IEEE Potentials, 38(2), 29-34..
- Domingues, P., Carreira, P. & Vieira, R., 2016. *Building automation systems: Concepts and technology review*, s.l.: Computer Standards & Interfaces, 45, 1-12..
- Doney, S. C., Busch, D. S., Cooley, S. & Kroek, 2020. *The impacts of ocean acidification on marine ecosystems and reliant human communities. Annual Review of Environment and Resources*, 45(1), 83-112, s.l.: s.n.
- European Commission , 2020. *A European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent*, s.l.: s.n.
- European Commission, 2020. *A European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent*, s.l.: s.n.
- Farghali, M., Osman, A. I. & Moha, I. M. A., 2023. *Strategies to save energy in the context of the energy crisis: a review.*, s.l.: Environmental Chemistry Letters, 21(4), 2003-2039..
- Fleck, A. K. & Anatolitis, V., 2023. *Achieving the objectives of renewable energy policy—Insights from renewable energy auction design in Europe.*, s.l.: Energy Policy, 173, 113357..
- Gabric, A. J., 2023. *The climate change crisis: a review of its causes and possible responses. Atmosphere*, 14(7), 1081., s.l.: s.n.
- Guille, C. & Gross, G., 2009. *A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation*, s.l.: Energy policy, 37(11), 4379-4390.
- Herrera-Viedma, E., Cabrerizo, F. J., Kacprzyk, J. & Pedrycz, W., 2014. *A review of soft consensus models in a fuzzy environment*, s.l.: Information Fusion, 17, 4-13..
- Hoque, K., Hossain, M. B., Das, D. & Roy, P. P., 2024. *Integration of IoT in Energy Sector*, s.l.: International Journal of Computer Applications, 975, 8887.
- Hossein Motlagh, N., Mohammadrezaei, M., Hunt, J. & Zakeri, B., 2020. *Internet of Things (IoT) and the energy sector*. s.l.:Energies, 13(2), 494..
- Huang, G.-L. και συν., 2023. *IoT-based Analysis for Smart Energy Management*, s.l.: s.n.

- Kong, Q. και συν., 2018. *The role of charging infrastructure in electric vehicle implementation within smart grids*, s.l.: Energies, 11(12), 3362.
- Korneeva, E., Omarova, A. & Nurova, O., 2024. *Adoption of smart energy technologies in the context of sustainable development. In E3S Web of Conferences (Vol. 531, p. 02001). EDP Sciences..* s.l.:s.n.
- Lin, R. & Ren, J., 2021. *Overview of multi-criteria decision analysis and its applications on energy systems*, s.l.: In Energy Systems Evaluation (Volume 2) Multi-Criteria Decision Analysis (pp. 1-26).
- Lyu, W. & Liu, J., 2021. *Artificial Intelligence and emerging digital technologies in the energy sector*, s.l.: Applied energy, 303, 117615.
- Mac Dowell, N. και συν., 2021. *The hydrogen economy: A pragmatic path forward*, s.l.: Joule, 5(10), 2524-2529.
- Mahmud, M. A., Islam, S. N., Lilley, I. & Kastner, W., 2021. *A smart energy hub for smart cities: Enabling peer-to-peer energy sharing and trading*, s.l.: IEEE Consumer Electronics Magazine, 10(6), 97-105.
- Marinakis, V. και συν., 2020. *From big data to smart energy services: An application for intelligent energy management*, s.l.: Future Generation Computer Systems, 110, 572-586.
- Mengelkamp, E. και συν., 2018. *A blockchain-based smart grid: towards sustainable local energy markets*, s.l.: Computer Science - Research and Development, 33, 207–214.
- Mengelkamp, E. και συν., 2018. *A blockchain-based smart grid: towards sustainable local energy markets*, s.l.: Computer Science - Research and Development, 33, 207–214.
- Moreno Escobar, J. J. και συν., 2021. *A comprehensive review on smart grids: Challenges and opportunities*, s.l.: Sensors, 21(21), 6978.
- Mrówczyńska, M. και συν., 2021. *Scenarios as a tool supporting decisions in urban energy policy: The analysis using fuzzy logic, multi-criteria analysis and GIS tools*, s.l.: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 137, 110598..
- Munodawafa, R. T. & Johl, S. K., 2019. *Big data analytics capabilities and eco-innovation: a study of energy*, s.l.: s.n.
- Nabavi, S. και συν., 2020. *Machine learning modeling for energy consumption of residential and commercial sectors*, s.l.: Energies, 13(19), 5171.
- Newark, 2025. *Smart Energy Management Systems (EMS) in Smart Buildings*, s.l.: s.n.

- Nikpour, M. και συν., 2023. *Intelligent Energy Management with IoT Framework in Smart Cities Using Intelligent Analysis: An Application of Machine Learning Methods for Complex Networks and Systems*, s.l.: s.n.
- Opricovic, S. & Tzeng, G. H., 2004. *Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS*, s.l.: European Journal of Operational Research, 156(2), 445–455.
- Opricovic, S. & Tzeng, G. H., 2004. *Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS*, s.l.: European Journal of Operational Research, 156(2), 445–455..
- Parag, Y. & Sovacool, B. K., 2016. *Electricity market design for the prosumer era*, s.l.: Nature Energy, 1(4), 16032.
- Parhamfar, M., Sadeghkhani, I. & Adeli, A. M., 2024. *Energy Science & Engineering*, 12(3), 1242-1264, s.l.: Energy Science & Engineering, 12(3), 1242-1264.
- Parmesan, C. & Hanley, M. E., 2015. *Plants and climate change: complexities and surprises. Annals of botany*, 116(6), 849-864., s.l.: s.n.
- Parvin, K. και συν., 2022. *The future energy internet for utility energy service and demand-side management in smart grid: Current practices, challenges and future directions*, s.l.: Sustainable Energy Technologies and Assessments, 53, 102648.
- Paukstadt, U. & Becker, J., 2021. *From energy as a commodity to energy as a service—a morphological analysis of smart energy services*, s.l.: Schmalenbach Journal of Business Research, 73(2), 207-242.
- Pinto, M. C., Crespi, G., Dell'Anna, F. & Becchio, C., 2023. *Combining energy dynamic simulation and multi-criteria analysis for supporting investment decisions on smart shading devices in office buildings*, s.l.: Applied Energy, 332, 120470.
- Polatidis, H., Haralambopoulos, D. A., Munda, G. & Vreeker, R., 2006. *Selecting an appropriate multi-criteria decision analysis technique for renewable energy planning*, s.l.: Energy Sources, Part B, 1(2), 181-193.
- Raihan, A., 2023. *A comprehensive review of artificial intelligence and machine learning applications in energy sector*, s.l.: Journal of Technology Innovations and Energy, 2(4), 1-26.
- Rouzbahani, H. M., Karimipour, H. & Lei, L., 2021. *A review on virtual power plant for energy management*, s.l.: Sustainable energy technologies and assessments, 47, 101370.

- Schrom, H., Schwartze, J. & Diekmann, S., 2017. *Building automation by an intelligent embedded infrastructure: Combining medical, smart energy, smart environment and heating*, s.l.: International Smart Cities Conference (ISC2) (pp. 1-4).
- Shahzad, Y. και συν., 2020. *Internet of energy: Opportunities, applications, architectures and challenges in smart industries*, s.l.: Computers & Electrical Engineering, 86, 106739.
- Shi, H. και συν., 2024. *Review of the opportunities and challenges to accelerate mass-scale application of smart grids with large-language models*, s.l.: IET Smart Grid.
- Siano, P., 2014. *Demand response and smart grids—A survey*, s.l.: Renewable and sustainable energy reviews, 30, 461-478.
- Sousa, T. και συν., 2019. *Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review*, s.l.: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 104, 367-378.
- Sovacool, B. K., Noel, L., Axsen, J. & Kempton, W., 2018. *The neglected social dimensions to a vehicle-to-grid (V2G) transition: a critical and systematic review*, s.l.: Environmental Research Letters, 13(1), 013001.
- Steen, M. και συν., 2024. *CCS technological innovation system dynamics in Norway*, s.l.: International Journal of Greenhouse Gas Control, 136, 104171.
- Talari, S. και συν., 2017. *A Review of Smart Cities Based on the Internet of Things Concept*, s.l.: Energies, 10(4), 421.
- Tan, ,. Q. και συν., 2024. *Optimizing supply-demand balance with the vehicle to grid system: A case study*, s.l.: Journal of Energy Storage, 97, 112900..
- Vicedo-Cabrera, A. M. και συν., 2021. *The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. Nature climate change*, 11(6), 492-500., s.l.: s.n.
- Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F. & Zhao, J. H., 2009. *Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making*, s.l.: Renewable and sustainable energy reviews, 13(9), 2263-2278.
- Wang, Q. & Su, M., 2020. *Integrating blockchain technology into the energy sector—from theory of blockchain to research and application of energy blockchain*, s.l.: Computer Science Review, 37, 100275.

Wang, Y., Zhang, N. & Qian, Z., 2022. *Big Data analytics for smart energy management: Methods and applications*, s.l.: Energy Reports, 8, 1895-1908.

Yu, X., Cecati, C., Dillon, T. & Simoes, M. G., 2011. *The new frontier of smart grids*, s.l.: IEEE Industrial Electronics Magazine, 5(3), 49-63.

Zhang, X., Li, H. & Zhou, K., 2022. *Integrated renewable energy systems: A review of current status, trends and challenges*, s.l.: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 159, 112193.

Παράρτημα Ι – DEMATEL

Γενικές κατηγορίες κριτηρίων

Average matrix						
	Economic Criteria	Environmental Criteria	Technical Criteria	Social Criteria	Regulatory Criteria	
Economic Criteria	0	3,5	3,5	3,5	3	13,5
Environmental Criteria	2,5	0	2	2	3	9,5
Technical Criteria	2,5	3	0	1	1,5	8
Social Criteria	2,5	2	1,5	0	1,5	7,5
Regulatory Criteria	3	1,5	2	1	0	7,5
10,5		10	9	7,5	9	

Normalized initial direct-relation matrix (D)					
	Economic Criteria	Environmental Criteria	Technical Criteria	Social Criteria	Regulatory Criteria
Economic Criteria	0,00000	0,25926	0,25926	0,25926	0,22222
Environmental Criteria	0,18519	0,00000	0,14815	0,14815	0,22222
Technical Criteria	0,18519	0,22222	0,00000	0,07407	0,11111
Social Criteria	0,18519	0,14815	0,11111	0,00000	0,11111
Regulatory Criteria	0,22222	0,11111	0,14815	0,07407	0,00000

Calculate matrix T by the following formula

$$T = D * (I - D)^{-1}$$

Identity matrix					
	Economic Criteria	Environmental Criteria	Technical Criteria	Social Criteria	Regulatory Criteria

Economic Criteria	1	0	0	0	0
Environmental Criteria	0	1	0	0	0
Technical Criteria	0	0	1	0	0
Social Criteria	0	0	0	1	0
Regulatory Criteria	0	0	0	0	1

I-D

	Economic Criteria	Environmental Criteria	Technical Criteria	Social Criteria	Regulatory Criteria
Economic Criteria	1,00000	-0,25926	-0,25926	-0,25926	-0,22222
Environmental Criteria	-0,18519	1,00000	-0,14815	-0,14815	-0,22222
Technical Criteria	-0,18519	-0,22222	1,00000	-0,07407	-0,11111
Social Criteria	-0,18519	-0,14815	-0,11111	1,00000	-0,11111
Regulatory Criteria	-0,22222	-0,11111	-0,14815	-0,07407	1,00000

Inverse I-D

	Economic Criteria	Environmental Criteria	Technical Criteria	Social Criteria	Regulatory Criteria
Economic Criteria	1,49188	0,68520	0,64483	0,58199	0,62011
Environmental Criteria	0,52656	1,35649	0,45929	0,40965	0,51501
Technical Criteria	0,48268	0,50568	1,29546	0,32563	0,39975
Social Criteria	0,46301	0,42956	0,37742	1,23964	0,37802
Regulatory Criteria	0,49584	0,40972	0,41420	0,31491	1,28225

T (total relation matrix)

	Economic Criteria	Environmental Criteria	Technical Criteria	Social Criteria	Regulatory Criteria	Ri
Economic Criteria	0,49188	0,68520	0,64483	0,58199	0,62011	3,024
Environmental Criteria	0,52656	0,35649	0,45929	0,40965	0,51501	2,267

Technical Criteria	0,48268	0,50568	0,29546	0,32563	0,39975	2,0092
Social Criteria	0,46301	0,42956	0,37742	0,23964	0,37802	1,8876
Regulatory Criteria	0,49584	0,40972	0,41420	0,31491	0,28225	1,9169
Ci	2,45997	2,38666	2,19120	1,87182	2,19514	

	Ri	Ci	Ri+Ci	Ri-Ci	Identify
Economic Criteria	3,02402	2,45997	5,48399	0,56405	Cause
Environmental Criteria	2,26700	2,38666	4,65366	-0,11965	Effect
Technical Criteria	2,00919	2,19120	4,20039	-0,18201	Effect
Social Criteria	1,88765	1,87182	3,75947	0,01583	Cause
Regulatory Criteria	1,91693	2,19514	4,11207	-0,27821	Effect

22,20958

Normalized Weight Calculation (Wi)	
	Wi
Economic Criteria	0,247
Environmental Criteria	0,210
Technical Criteria	0,189
Social Criteria	0,169
Regulatory Criteria	0,185

Οικονομικά Υπό-κριτήρια

Average matrix						
	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	Market Competitiveness	Cost Stability	
Cost-effectiveness	0	3,5	2,5	3	2,5	11,5
Economic feasibility	3,5	0	3	3,5	2,5	12,5
Financial Risk	3	3,5	0	2,5	3	12
Market Competitiveness	3,5	3,5	3	0	2,5	12,5
Cost Stability	3,5	3,5	4	1,5	0	12,5
	13,5	14	12,5	10,5	10,5	

Normalized initial direct-relation matrix (D)					
	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	Market Competitiveness	Cost Stability
Cost-effectiveness	0,00000	0,25000	0,17857	0,21429	0,17857
Economic feasibility	0,25000	0,00000	0,21429	0,25000	0,17857
Financial Risk	0,21429	0,25000	0,00000	0,17857	0,21429
Market Competitiveness	0,25000	0,25000	0,21429	0,00000	0,17857
Cost Stability	0,25000	0,25000	0,28571	0,10714	0,00000

Calculate matrix T by the following formula $T=D*(I-D)^{-1}$

Identity matrix					
	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	Market Competitiveness	Cost Stability
Cost-effectiveness	1	0	0	0	0

Economic feasibility	0	1	0	0	0
Financial Risk	0	0	1	0	0
Market Competitiveness	0	0	0	1	0
Cost Stability	0	0	0	0	1

I-D

	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	Market Competitiveness	Cost Stability
Cost-effectiveness	1,00000	-0,25000	-0,17857	-0,21429	-0,17857
Economic feasibility	-0,25000	1,00000	-0,21429	-0,25000	-0,17857
Financial Risk	-0,21429	-0,25000	1,00000	-0,17857	-0,21429
Market Competitiveness	-0,25000	-0,25000	-0,21429	1,00000	-0,17857
Cost Stability	-0,25000	-0,25000	-0,28571	-0,10714	1,00000

Inverse I-D

	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	Market Competitiveness	Cost Stability
Cost-effectiveness	2,24298	1,48037	1,30854	1,20881	1,16114
Economic feasibility	1,52843	2,36876	1,41168	1,30371	1,23124
Financial Risk	1,46234	1,52515	2,19812	1,21810	1,22202
Market Competitiveness	1,52843	1,56876	1,41168	2,10371	1,23124
Cost Stability	1,52443	1,56612	1,45934	1,20156	2,07916

T (total relation matrix)

	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	Market Competitiveness	Cost Stability	Ri
Cost-effectiveness	1,24298	1,48037	1,30854	1,20881	1,16114	6,401833865
Economic feasibility	1,52843	1,36876	1,41168	1,30371	1,23124	6,843821077

Financial Risk	1,46234	1,52515	1,19812	1,21810	1,22202	6,625731329
Market Competitiveness	1,52843	1,56876	1,41168	1,10371	1,23124	6,843821077
Cost Stability	1,52443	1,56612	1,45934	1,20156	1,07916	6,830603516
Ci	7,28661	7,50916	6,78935	6,03589	5,92480	

	Ri	Ci	Ri+Ci	Ri-Ci	Identify
Cost-effectiveness	6,40183	7,28661	13,68844	-0,88478	Effect
Economic feasibility	6,84382	7,50916	14,35298	-0,66534	Effect
Financial Risk	6,62573	6,78935	13,41508	-0,16362	Effect
Market Competitiveness	6,84382	6,03589	12,87971	0,80793	Cause
Cost Stability	6,83060	5,92480	12,75540	0,90580	Cause

67,09162

Normalized Weight Calculation (Wi)	
	Wi
Cost-effectiveness	0,204
Economic feasibility	0,214
Financial Risk	0,200
Market Competitiveness	0,192
Cost Stability	0,190

Περιβαλλοντικά υπό-κριτήρια

Average matrix					
	GHG Emissions	Resource Conservation	Biodiversity impact	Waste management	Land Use Impact
GHG Emissions	0	2	3	3	1
Resource Conservation	3,5	0	3,5	3,5	2
Biodiversity impact	1,5	1,5	0	1,5	1,5
Waste management	3	3,5	3	0	2

9
12,5
6
11,5

Land Use Impact	3,5	2,5	3	2	0
	11,5	9,5	12,5	10	6,5

11

Normalized initial direct-relation matrix (D)

	GHG Emissions	Resource Conservation	Biodiversity impact	Waste management	Land Use Impact
GHG Emissions	0,00000	0,16000	0,24000	0,24000	0,08000
Resource Conservation	0,28000	0,00000	0,28000	0,28000	0,16000
Biodiversity impact	0,12000	0,12000	0,00000	0,12000	0,12000
Waste management	0,24000	0,28000	0,24000	0,00000	0,16000
Land Use Impact	0,28000	0,20000	0,24000	0,16000	0,00000

Calculate matrix T by the following formula

$$T=D*(I-D)^{-1}$$

Identity matrix

	GHG Emissions	Resource Conservation	Biodiversity impact	Waste management	Land Use Impact
GHG Emissions	1	0	0	0	0
Resource Conservation	0	1	0	0	0
Biodiversity impact	0	0	1	0	0
Waste management	0	0	0	1	0
Land Use Impact	0	0	0	0	1

I-D

	GHG Emissions	Resource Conservation	Biodiversity impact	Waste management	Land Use Impact
GHG Emissions	1,00000	-0,16000	-0,24000	-0,24000	-0,08000
Resource Conservation	-0,28000	1,00000	-0,28000	-0,28000	-0,16000
Biodiversity impact	-0,12000	-0,12000	1,00000	-0,12000	-0,12000
Waste management	-0,24000	-0,28000	-0,24000	1,00000	-0,16000
Land Use Impact	-0,28000	-0,20000	-0,24000	-0,16000	1,00000

Inverse I-D

	GHG Emissions	Resource Conservation	Biodiversity impact	Waste management	Land Use Impact
GHG Emissions	1,58860	0,65327	0,84982	0,73844	0,45174
Resource Conservation	1,00546	1,68249	1,09063	0,94434	0,63161
Biodiversity impact	0,53493	0,47689	1,47169	0,49859	0,37547

Waste management	0,93910	0,86592	1,01809	1,68693	0,60576
Land Use Impact	0,92454	0,77241	0,97218	0,78520	1,43984

T (total relation matrix)

	GHG Emissions	Resource Conservation	Biodiversity impact	Waste management	Land Use Impact	Ri
GHG Emissions	0,58860	0,65327	0,84982	0,73844	0,45174	3,281866541
Resource Conservation	1,00546	0,68249	1,09063	0,94434	0,63161	4,354532392
Biodiversity impact	0,53493	0,47689	0,47169	0,49859	0,37547	2,357564609
Waste management	0,93910	0,86592	1,01809	0,68693	0,60576	4,115800169
Land Use Impact	0,92454	0,77241	0,97218	0,78520	0,43984	3,894172643
Ci	3,99264	3,45097	4,40241	3,65350	2,50442	

	Ri	Ci	Ri+Ci	Ri-Ci	Identify
GHG Emissions	3,28187	3,99264	7,27450	-0,71077	Effect
Resource Conservation	4,35453	3,45097	7,80551	0,90356	Cause
Biodiversity impact	2,35756	4,40241	6,75997	-2,04484	Effect
Waste management	4,11580	3,65350	7,76930	0,46230	Cause
Land Use Impact	3,89417	2,50442	6,39859	1,38976	Cause

36,00787

Normalized Weight Calculation (Wi)

	Wi
GHG Emissions	0,202
Resource Conservation	0,217
Biodiversity impact	0,188
Waste management	0,216
Land Use Impact	0,178

Τεχνικά υπό-κριτήρια

Average matrix						
	Efficiency	Reliability	Scalability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level	Interoperability

Efficiency	0	1,5	1,5	1,5	3,5	1	9
Reliability	3	0	2	3,5	4	2,5	15
Scalability	2,5	2	0	2,5	3,5	2	12,5
Inegration with Existing Systems	1,5	2	1,5	0	2,5	1,5	9
Technology Readiness Level	1,5	2	3	3	0	2,5	12
Interoperability	1	2,5	1	3	3	0	
	9,5	10	9	13,5	16,5	9,5	

Normalized initial direct-relation matrix (D)

	Efficiency	Reliability	Scalability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level	Interoperability
Efficiency	0,00000	0,09091	0,09091	0,09091	0,21212	0,06061
Reliability	0,18182	0,00000	0,12121	0,21212	0,24242	0,15152
Scalability	0,15152	0,12121	0,00000	0,15152	0,21212	0,12121
Inegration with Existing Systems	0,09091	0,12121	0,09091	0,00000	0,15152	0,09091
Technology Readiness Level	0,09091	0,12121	0,18182	0,18182	0,00000	0,15152
Interoperability	0,06061	0,15152	0,06061	0,18182	0,18182	0,00000

Calculate matrix T by the following formula $T=D*(I-D)^{-1}$

Identity matrix

	Efficiency	Reliability	Scalability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level	Interoperability
Efficiency	1	0	0	0	0	0
Reliability	0	1	0	0	0	0
Scalability	0	0	1	0	0	0
Inegration with Existing Systems	0	0	0	1	0	0
Technology Readiness Level	0	0	0	0	1	0
Interoperability	0	0	0	0	0	1

I-D

	Efficiency	Reliability	Scalability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level	Interoperability
Efficiency	1,00000	-0,09091	-0,09091	-0,09091	-0,21212	-0,06061
Reliability	-0,18182	1,00000	-0,12121	-0,21212	-0,24242	-0,15152
Scalability	-0,15152	-0,12121	1,00000	-0,15152	-0,21212	-0,12121
Inegration with Existing Systems	-0,09091	-0,12121	-0,09091	1,00000	-0,15152	-0,09091
Technology Readiness Level	-0,09091	-0,12121	-0,18182	-0,18182	1,00000	-0,15152
Interoperability	-0,06061	-0,15152	-0,06061	-0,18182	-0,18182	1,00000

Inverse I-D

	Efficiency	Reliability	Scalability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level	Interoperability
Efficiency	1,18006	0,27602	0,27222	0,33795	0,47136	0,248477286
Reliability	0,43235	1,29893	0,39277	0,56964	0,65283	0,421316842
Scalability	0,37043	0,36397	1,24493	0,46740	0,56658	0,356834484
Inegration with Existing Systems	0,26525	0,30212	0,26906	1,25622	0,42661	0,273304021
Technology Readiness Level	0,31542	0,35751	0,38869	0,48150	1,37676	0,372772104
Interoperability	0,26505	0,35553	0,27105	0,45107	0,48970	1,217989833

T (total relation matrix)

	Efficiency	Reliability	Scalability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level	Interoperability	Ri
Efficiency	0,18006	0,27602	0,27222	0,33795	0,47136	0,248477286	1,786090497
Reliability	0,43235	0,29893	0,39277	0,56964	0,65283	0,421316842	2,767826273
Scalability	0,37043	0,36397	0,24493	0,46740	0,56658	0,356834484	2,370143547
Inegration with Existing Systems	0,26525	0,30212	0,26906	0,25622	0,42661	0,273304021	1,792559919
Technology Readiness Level	0,31542	0,35751	0,38869	0,48150	0,37676	0,372772104	2,292659215
Interoperability	0,26505	0,35553	0,27105	0,45107	0,48970	0,217989833	2,050391341
Ci	1,82856	1,95408	1,83872	2,56379	2,98384	1,89069	

	Ri	Ci	Ri+Ci	Ri-Ci	Identify
Efficiency	1,78609	1,82856	3,61465	-0,04246	Effect
Reliability	2,76783	1,95408	4,72190	0,81375	Cause

Scalability	2,37014	1,83872	4,20886	0,53142	Cause
Inegration with Existing Systems	1,79256	2,56379	4,35635	-0,77123	Effect
Technology Readiness Level	2,29266	2,98384	5,27650	-0,69118	Effect
Interoperability	2,05039	1,89069	3,94109	0,15970	Cause
			26,11934		

Normalized Weight Calculation (Wi)	
	Wi
Efficiency	0,138
Reliability	0,181
Scalability	0,161
Inegration with Existing Systems	0,167
Technology Readiness Level	0,202
Interoperability	0,151

Ρυθμιστικά Υπό-κριτήρια

Average matrix			
	Policy Compliance and Gaps	Emissions Standards	Permitting and Licensing
Policy Compliance and Gaps	0	2,5	2,5
Emissions Standards	4	0	3,5
Permitting and Licensing	3,5	3	0
	7,5	5,5	6

Normalized initial direct-relation matrix (D)			
	Policy Compliance and Gaps	Emissions Standards	Permitting and Licensing

Policy Compliance and Gaps	0,00000	0,33333	0,33333
Emissions Standards	0,53333	0,00000	0,46667
Permitting and Licensing	0,46667	0,40000	0,00000

Calculate matrix T by the following formula $T=D*(I-D)^{-1}$

Identity matrix

	Policy Compliance and Gaps	Emissions Standards	Permitting and Licensing
Policy Compliance and Gaps	1	0	0
Emissions Standards	0	1	0
Permitting and Licensing	0	0	1

I-D

	Policy Compliance and Gaps	Emissions Standards	Permitting and Licensing
Policy Compliance and Gaps	1,00000	-0,33333	-0,33333
Emissions Standards	-0,53333	1,00000	-0,46667
Permitting and Licensing	-0,46667	-0,40000	1,00000

Inverse I-D

	Policy Compliance and Gaps	Emissions Standards	Permitting and Licensing
Policy Compliance and Gaps	2,41850	1,38767	1,45374
Emissions Standards	2,23348	2,51101	1,91630
Permitting and Licensing	2,02203	1,65198	2,44493

T (total relation matrix)

	Policy Compliance and Gaps	Emissions Standards	Permitting and Licensing	Ri
--	----------------------------	---------------------	--------------------------	----

Policy Compliance and Gaps	1,41850	1,38767	1,45374	4,25991
Emissions Standards	2,23348	1,51101	1,91630	5,660793
Permitting and Licensing	2,02203	1,65198	1,44493	5,118943
Ci	5,67401	4,55066	4,81498	

	Ri	Ci	Ri+Ci	Ri-Ci	Identify
Policy Compliance and Gaps	4,25991	5,67401	9,93392	-1,41410	Effect
Emissions Standards	5,66079	4,55066	10,21145	1,11013	Cause
Permitting and Licensing	5,11894	4,81498	9,93392	0,30396	Cause

30,07930

Normalized Weight Calculation (Wi)	
	Wi
Policy Compliance and Gaps	0,330
Emissions Standards	0,339
Permitting and Licensing	0,330

Κοινωνικά Υπό-κριτήρια

Average matrix			
	Social Acceptance	Job Creation	Energy Access
Social Acceptance	0	2	3
Job Creation	4	0	2,5
Energy Access	3,5	1	0
	7,5	3	5,5

Normalized initial direct-relation matrix (D)

	Social Acceptance	Job Creation	Energy Access
Social Acceptance	0,00000	0,26667	0,40000
Job Creation	0,53333	0,00000	0,33333
Energy Access	0,46667	0,13333	0,00000

Calculate matrix T by the following formula

$$T = D * (I - D)^{-1}$$

Identity matrix

	Social Acceptance	Job Creation	Energy Access
Social Acceptance	1	0	0
Job Creation	0	1	0
Energy Access	0	0	1

I-D

	Social Acceptance	Job Creation	Energy Access
Social Acceptance	1,00000	-0,26667	-0,40000
Job Creation	-0,53333	1,00000	-0,33333
Energy Access	-0,46667	-0,13333	1,00000

Inverse I-D

	Social Acceptance	Job Creation	Energy Access
Social Acceptance	1,71634	0,57477	0,87813
Job Creation	1,23736	1,46088	0,98191
Energy Access	0,96594	0,46301	1,54071

T (total relation matrix)

	Social Acceptance	Job Creation	Energy Access	Ri
--	-------------------	--------------	---------------	----

Social Acceptance	0,71634	0,57477	0,87813	2,169239
Job Creation	1,23736	0,46088	0,98191	2,680149
Energy Access	0,96594	0,46301	0,54071	1,969665
Ci	2,91964	1,49867	2,40075	

	Ri	Ci	Ri+Ci	Ri-Ci	Identify
Cost-effectiveness	2,16924	2,91964	5,08888	-0,75040	Effect
Market Competitiveness	2,68015	1,49867	4,17882	1,18148	Cause
Cost Stability	1,96966	2,40075	4,37041	-0,43108	Effect

13,63811

Normalized Weight Calculation (Wi)	
	Wi
Cost-effectiveness	0,373
Market Competitiveness	0,306
Cost Stability	0,320

Τελική Κανονικοποίηση βαρών	
	Wi
Cost-effectiveness	0,113
Economic feasibility	0,119
Financial Risk	0,111
GHG Emissions	0,112
Resource Conservation	0,120
Waste management	0,120
Reliability	0,100
Integration with Existing Systems	0,093
Technology Readiness Level	0,112

Παράρτημα II – Fuzzy Logic & VIKOR

Engineer/ Technical Specialist									
	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	GHG Emissions	Resource Conservation	Waste management	Reliability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level
Smart Metering/EMS	0,750000	0,486000	0,375000	0,541667	0,736000	0,541667	0,736000	0,791333	0,708333
Demand Response Programs	0,625000	0,416667	0,416667	0,625000	0,736000	0,472167	0,611000	0,652667	0,583333
Integrated Renewable Energy Systems	0,652667	0,430500	0,541667	0,805333	0,666667	0,555500	0,736000	0,680333	0,583333
EV Charging Infrastructure	0,388833	0,472167	0,472167	0,458167	0,347167	0,374833	0,472167	0,347167	0,555500
EVs	0,416667	0,416667	0,652667	0,527667	0,416667	0,416500	0,416667	0,347167	0,513833
V2G	0,500000	0,416667	0,611000	0,416667	0,416667	0,374833	0,416667	0,305500	0,347167
BAS	0,666667	0,625000	0,416667	0,458333	0,500000	0,416667	0,569333	0,555500	0,583333
VPPs	0,611000	0,722000	0,583333	0,652667	0,611000	0,500000	0,652667	0,569333	0,527667
Energy Trading	0,374833	0,569167	0,583333	0,319333	0,527667	0,319333	0,430500	0,500000	0,569333
EaaS	0,472167	0,569333	0,458333	0,388833	0,500000	0,347167	0,541667	0,375000	0,583333
Hydrogen Economy Services	0,569333	0,416500	0,680333	0,708000	0,541667	0,541500	0,472167	0,236000	0,194333
CCS	0,583333	0,458167	0,652667	0,722000	0,666667	0,527667	0,388833	0,347167	0,388833
Carbon Offset and Carbon Trading	0,416667	0,500000	0,458333	0,569333	0,458333	0,388833	0,541667	0,500000	0,541667

Consultant/ Advisor									
	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	GHG Emissions	Resource Conservation	Waste management	Reliability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level
Smart Metering/EMS	0,652667	0,736000	0,319333	0,590167	0,569333	0,423583	0,756667	0,680333	0,749667
Demand Response Programs	0,604000	0,583167	0,374917	0,597167	0,618000	0,423583	0,555500	0,576333	0,611000
Integrated Renewable Energy Systems	0,749833	0,687333	0,423583	0,812167	0,631833	0,381917	0,715000	0,701167	0,701167
EV Charging Infrastructure	0,513833	0,506917	0,534667	0,638833	0,458333	0,319417	0,618000	0,555500	0,597167
EVs	0,520833	0,541583	0,583250	0,701333	0,375000	0,319417	0,555500	0,534667	0,597167
V2G	0,486083	0,479083	0,618000	0,597167	0,437500	0,319417	0,458333	0,371182	0,326333
BAS	0,638833	0,680500	0,423583	0,631833	0,541667	0,444417	0,562500	0,562500	0,562500

VPPs	0,520750	0,618000	0,479083	0,513833	0,388833	0,402750	0,513833	0,562333	0,555417
Energy Trading	0,492917	0,652667	0,548500	0,381833	0,347167	0,249917	0,520750	0,590727	0,631667
EaaS	0,437417	0,694333	0,486083	0,423583	0,402750	0,423583	0,541667	0,513833	0,486000
Hydrogen Economy Services	0,506917	0,340167	0,701167	0,645833	0,541667	0,513750	0,416667	0,401364	0,340167
CCS	0,465167	0,381833	0,708167	0,756667	0,458333	0,555417	0,402750	0,446818	0,305417
Carbon Offset and Carbon Trading	0,451333	0,638833	0,541667	0,645583	0,409667	0,451250	0,555500	0,537727	0,569333

Managers									
	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	GHG Emissions	Resource Conservation	Waste management	Reliability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level
Smart Metering/EMS	0,625000	0,750000	0,312500	0,437500	0,562500	0,500000	0,791500	0,666500	0,666500
Demand Response Programs	0,729000	0,625000	0,500000	0,625000	0,687500	0,437500	0,562500	0,562500	0,562500
Integrated Renewable Energy Systems	0,750000	0,625000	0,562500	0,833000	0,625000	0,500000	0,562500	0,625000	0,562500
EV Charging Infrastructure	0,375000	0,562500	0,520750	0,500000	0,437500	0,437500	0,437500	0,562500	0,562500
EVs	0,437500	0,562500	0,500000	0,604000	0,437500	0,437500	0,437500	0,437500	0,604000
V2G	0,437500	0,437500	0,562500	0,562500	0,500000	0,437500	0,375000	0,312500	0,333250
BAS	0,625000	0,750000	0,270750	0,562500	0,541500	0,625000	0,687500	0,625000	0,562500
VPPs	0,604000	0,395750	0,500000	0,604000	0,500000	0,437500	0,375000	0,312500	0,395750
Energy Trading	0,562500	0,687500	0,562500	0,375000	0,500000	0,312500	0,625000	0,562500	0,625000
EaaS	0,500000	0,750000	0,437500	0,375000	0,500000	0,375000	0,562500	0,437500	0,500000
Hydrogen Economy Services	0,437500	0,166500	0,770500	0,562500	0,604000	0,562500	0,375000	0,124750	0,229000
CCS	0,500000	0,270750	0,874500	0,833000	0,395750	0,562500	0,541500	0,270750	0,333250
Carbon Offset and Carbon Trading	0,437500	0,500000	0,625000	0,687500	0,437500	0,562500	0,687500	0,562500	0,562500

Η εφαρμογή της μεθόδου VIKOR πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για τρεις επαγγελματικές υποομάδες, προκειμένου να αναδειχθούν πιθανές διαφοροποιήσεις στις προτιμήσεις και αξιολογήσεις των έξυπνων ενεργειακών υπηρεσιών.

Engineer/ Technical Specialist

1. Πίνακας απόδοσης
Engineer/ Technical Specialist

	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	GHG Emissions	Resource Conservation	Waste management	Reliability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level
Smart Metering/EMS	0,750000	0,486000	0,375000	0,541667	0,736000	0,541667	0,736000	0,791333	0,708333
Demand Response Programs	0,625000	0,416667	0,416667	0,625000	0,736000	0,472167	0,611000	0,652667	0,583333
Integrated Renewable Energy Systems	0,652667	0,430500	0,541667	0,805333	0,666667	0,555500	0,736000	0,680333	0,583333
EV Charging Infrastructure	0,388833	0,472167	0,472167	0,458167	0,347167	0,374833	0,472167	0,347167	0,555500
EVs	0,416667	0,416667	0,652667	0,527667	0,416667	0,416500	0,416667	0,347167	0,513833
V2G	0,500000	0,416667	0,611000	0,416667	0,416667	0,374833	0,416667	0,305500	0,347167
BAS	0,666667	0,625000	0,416667	0,458333	0,500000	0,416667	0,569333	0,555500	0,583333
VPPs	0,611000	0,722000	0,583333	0,652667	0,611000	0,500000	0,652667	0,569333	0,527667
Energy Trading	0,374833	0,569167	0,583333	0,319333	0,527667	0,319333	0,430500	0,500000	0,569333
EaaS	0,472167	0,569333	0,458333	0,388833	0,500000	0,347167	0,541667	0,375000	0,583333
Hydrogen Economy Services	0,569333	0,416500	0,680333	0,708000	0,541667	0,541500	0,472167	0,236000	0,194333
CCS	0,583333	0,458167	0,652667	0,722000	0,666667	0,527667	0,388833	0,347167	0,388833
Carbon Offset and Carbon Trading	0,416667	0,500000	0,458333	0,569333	0,458333	0,388833	0,541667	0,500000	0,541667

2. Κανονικοποίηση τιμών

benefit criterion → όσο μεγαλύτερη η τιμή, τόσο καλύτερη η απόδοση.

cost criterion → όσο μικρότερη η τιμή, τόσο καλύτερη η απόδοση.

Cost-effectiveness	B	Όσο πιο αποδοτική είναι η λύση ως προς το κόστος, τόσο καλύτερη.
Economic feasibility	B	Όσο πιο εφικτή οικονομικά, τόσο πιο επιθυμητή.
Financial Risk	C	Όσο μικρότερος ο κίνδυνος, τόσο καλύτερα.
GHG Emissions	B	Όσο περισσότερο μειώνονται οι εκπομπές, τόσο καλύτερα.
Resource Conservation	B	Όσο περισσότερη εξοικονόμηση πόρων, τόσο πιο θετικό.

Waste management	B	Όσο καλύτερη/αποτελεσματικότερη η διαχείριση, τόσο καλύτερα.
Reliability	B	Όσο πιο αξιόπιστο το σύστημα, τόσο καλύτερο.
Inegration with Existing Systems	B	Όσο πιο εύκολη η ενσωμάτωση, τόσο πιο επιθυμητή η υπηρεσία.
Technology Readiness Level	B	Όσο πιο ώριμη η τεχνολογία, τόσο πιο εφαρμόσιμη και επιθυμητή.

	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	GHG Emissions	Resource Conservation	Waste management	Reliability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level
M AX	0,750000	0,722000	0,680333	0,805333	0,736000	0,555500	0,736000	0,791333	0,708333
MIN	0,374833	0,416500	0,375000	0,319333	0,347167	0,319333	0,388833	0,236000	0,194333

W	0,113218508	0,118714986	0,110957493	0,112108266	0,1202916	0,119733635	0,10032	0,092553309	0,112102451
rij	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	GHG Emissions	Resource Conservation	Waste management	Reliability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level
Smart Metering/EMS	0	0,772504092	1	0,542524005	0	0,058574453	0	0	0
Demand Response Programs	0,333185251	0,999454446	0,863537118	0,371056241	0	0,352858151	0,360058	0,24969988	0,243190661
Integrated Renewable Energy Systems	0,259440249	0,954173486	0,454148472	0	0,178311187	0	0	0,199879952	0,243190661
EV Charging Infrastructure	0,962683252	0,817785052	0,681768559	0,714334705	1	0,764996471	0,759962	0,799819928	0,297341115
EVs	0,888494003	0,999454446	0,090611354	0,57133059	0,82126018	0,588567396	0,919827	0,799819928	0,378404669
V2G	0,666370502	0,999454446	0,227074236	0,799725652	0,82126018	0,764996471	0,919827	0,87484994	0,702658885
BAS	0,222123501	0,317512275	0,863537118	0,71399177	0,606943849	0,58786168	0,480077	0,424669868	0,243190661
VPPs	0,370501999	0	0,31768559	0,314128944	0,321474496	0,235003529	0,240038	0,399759904	0,351491569
Energy Trading	1	0,500272777	0,31768559	1	0,535790827	1	0,879981	0,524609844	0,270428016
EaaS	0,740559751	0,499727223	0,727074236	0,856995885	0,606943849	0,882145378	0,55977	0,74969988	0,243190661
Hydrogen Economy Services	0,481563749	1	0	0,200274348	0,499785684	0,059280169	0,759962	1	1
CCS	0,444247001	0,863611566	0,090611354	0,171467764	0,178311187	0,117854622	1	0,799819928	0,621595331
Carbon Offset and Carbon Trading	0,888494003	0,726677578	0,727074236	0,485596708	0,714102015	0,705716302	0,55977	0,524609844	0,324254215

3. Υπολογισμός S_i (σταθμισμένο άθροισμα) και R_i (μέγιστη σταθμισμένη απόκλιση)

$r_{ij} \cdot w$	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	GHG Emissions	Resource Conservation	Waste management	Reliability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level
Smart Metering/EMS	0	0,091707812	0,110957493	0,060821425	0	0,007013332	0	0	0
Demand Response Programs	0,037722737	0,118650221	0,095815914	0,041598472	0	0,042248989	0,036121	0,02311055	0,027262269
Integrated Renewable Energy Systems	0,029373438	0,113274692	0,050391176	0	0,021449338	0	0	0,018499551	0,027262269
EV Charging Infrastructure	0,108993561	0,097083341	0,07564733	0,080082825	0,1202916	0,091595809	0,076239	0,074025981	0,033332668
EVs	0,100593965	0,118650221	0,010054009	0,064050882	0,098790701	0,070471314	0,092277	0,074025981	0,042420091
V2G	0,075445474	0,118650221	0,025195588	0,089655856	0,098790701	0,091595809	0,092277	0,080970256	0,078769783
BAS	0,025148491	0,037693465	0,095815914	0,080044379	0,073010247	0,070386816	0,048161	0,039304601	0,027262269
VPPs	0,041947683	0	0,035249597	0,035216451	0,038670682	0,028137827	0,024081	0,036999102	0,039403066
Energy Trading	0,113218508	0,059389876	0,035249597	0,112108266	0,064451136	0,119733635	0,088279	0,048554377	0,030315643
EaaS	0,08384507	0,05932511	0,080674334	0,096076322	0,073010247	0,105622473	0,056156	0,069387204	0,027262269
Hydrogen Economy Services	0,054521929	0,118714986	0	0,02245241	0,06012002	0,00709783	0,076239	0,092553309	0,112102451
CCS	0,050296983	0,102523635	0,010054009	0,019222954	0,021449338	0,014111162	0,10032	0,074025981	0,06968236
Carbon Offset and Carbon Trading	0,100593965	0,086267518	0,080674334	0,054439405	0,085900474	0,084497978	0,056156	0,048554377	0,036349692

	S	R	$S_i - S_{min}$	$R_i - R_{min}$	$(S_i - S_{min}) / (S_{max} - S_{min})$	$(R_i - R_{min}) / (R_{max} - R_{min})$
Smart Metering/EMS	0,270500	0,110957	0,010250	0,069010	0,020621	0,880857
Demand Response Programs	0,422530	0,118650	0,162280	0,076703	0,326491	0,979049
Integrated Renewable Energy Systems	0,260250	0,113275	0,000000	0,071327	0,000000	0,910435
EV Charging Infrastructure	0,757292	0,120292	0,497042	0,078344	1,000000	1,000000
EVs	0,671334	0,118650	0,411084	0,076703	0,827060	0,979049
V2G	0,751351	0,118650	0,491100	0,076703	0,988046	0,979049

BAS	0,496827	0,095816	0,236577	0,053868	0,475970	0,687587
VPPs	0,279705	0,041948	0,019455	0,000000	0,039141	0,000000
Energy Trading	0,671300	0,119734	0,411050	0,077786	0,826993	0,992878
EaaS	0,651359	0,105622	0,391109	0,063675	0,786872	0,812760
Hydrogen Economy Services	0,543802	0,118715	0,283552	0,076767	0,570478	0,979876
CCS	0,461686	0,102524	0,201436	0,060576	0,405269	0,773206
Carbon Offset and Carbon Trading	0,633434	0,100594	0,373183	0,058646	0,750809	0,748575

Smax	0,757292273
Smin	0,260250464
Rmax	0,1202916
Rmin	0,041947683
v	0,5
Smax-Smin	0,49704181
Rmax-Rmin	0,078343917
1-v	0,5

4. Υπολογισμός δείκτη συμβιβασμού Q_i

	Q
Smart Metering/EMS	0,450739
Demand Response Programs	0,652770
Integrated Renewable Energy Systems	0,455217
EV Charging Infrastructure	1,000000
EVs	0,903055
V2G	0,983547

5. Κατάταξη Q_i

	Q
VPPs	0,019570
Smart Metering/EMS	0,450739
Integrated Renewable Energy Systems	0,455217
BAS	0,581778
CCS	0,589237
Demand Response Programs	0,652770

BAS	0,581778	Carbon Offset and Carbon Trading	0,749692
VPPs	0,019570	Hydrogen Economy Services	0,775177
Energy Trading	0,909935	EaaS	0,799816
EaaS	0,799816	EVs	0,903055
Hydrogen Economy Services	0,775177	Energy Trading	0,909935
CCS	0,589237	V2G	0,983547
Carbon Offset and Carbon Trading	0,749692	EV Charging Infrastructure	1,000000

Consultant/Advisor

1. Πίνακας απόδοσης

Consultant/Advisor	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	GHG Emissions	Resource Conservation	Waste management	Reliability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level
Smart Metering/EMS	0,652667	0,736000	0,319333	0,590167	0,569333	0,423583	0,756667	0,680333	0,749667
Demand Response Programs	0,604000	0,583167	0,374917	0,597167	0,618000	0,423583	0,555500	0,576333	0,611000
Integrated Renewable Energy Systems	0,749833	0,687333	0,423583	0,812167	0,631833	0,381917	0,715000	0,701167	0,701167
EV Charging Infrastructure	0,513833	0,506917	0,534667	0,638833	0,458333	0,319417	0,618000	0,555500	0,597167
EVs	0,520833	0,541583	0,583250	0,701333	0,375000	0,319417	0,555500	0,534667	0,597167
V2G	0,486083	0,479083	0,618000	0,597167	0,437500	0,319417	0,458333	0,371182	0,326333
BAS	0,638833	0,680500	0,423583	0,631833	0,541667	0,444417	0,562500	0,562500	0,562500
VPPs	0,520750	0,618000	0,479083	0,513833	0,388833	0,402750	0,513833	0,562333	0,555417
Energy Trading	0,492917	0,652667	0,548500	0,381833	0,347167	0,249917	0,520750	0,590727	0,631667
EaaS	0,437417	0,694333	0,486083	0,423583	0,402750	0,423583	0,541667	0,513833	0,486000

Hydrogen Economy Services	0,506917	0,340167	0,701167	0,645833	0,541667	0,513750	0,416667	0,401364	0,340167
CCS	0,465167	0,381833	0,708167	0,756667	0,458333	0,555417	0,402750	0,446818	0,305417
Carbon Offset and Carbon Trading	0,451333	0,638833	0,541667	0,645583	0,409667	0,451250	0,555500	0,537727	0,569333

2. Κανονικοποίηση τιμών

benefit criterion → όσο μεγαλύτερη η τιμή, τόσο καλύτερη η απόδοση.

cost criterion → όσο μικρότερη η τιμή, τόσο καλύτερη η απόδοση.

Cost-effectiveness	B	Όσο πιο αποδοτική είναι η λύση ως προς το κόστος, τόσο καλύτερη.
Economic feasibility	B	Όσο πιο εφικτή οικονομικά, τόσο πιο επιθυμητή.
Financial Risk	C	Όσο μικρότερος ο κίνδυνος, τόσο καλύτερα.
GHG Emissions	B	Όσο περισσότερο μειώνονται οι εκπομπές, τόσο καλύτερα.
Resource Conservation	B	Όσο περισσότερη εξοικονόμηση πόρων, τόσο πιο θετικό.
Waste management	B	Όσο καλύτερη/αποτελεσματικότερη η διαχείριση, τόσο καλύτερα.
Reliability	B	Όσο πιο αξιόπιστο το σύστημα, τόσο καλύτερο.
Inegration with Existing Systems	B	Όσο πιο εύκολη η ενσωμάτωση, τόσο πιο επιθυμητή η υπηρεσία.
Technology Readiness Level	B	Όσο πιο ώριμη η τεχνολογία, τόσο πιο εφαρμόσιμη και επιθυμητή.

	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	GHG Emissions	Resource Conservation	Waste management	Reliability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level
M AX	0,749833	0,736000	0,708167	0,812167	0,631833	0,555417	0,756667	0,701167	0,749667
MIN	0,437417	0,340167	0,319333	0,381833	0,347167	0,249917	0,402750	0,371182	0,305417

W

0,113218508	0,118714986	0,110957493	0,112108266	0,1202916	0,119733635	0,10031975	0,092553309	0,112102451
-------------	-------------	-------------	-------------	-----------	-------------	------------	-------------	-------------

rij	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	GHG Emissions	Resource Conservation	Waste management	Reliability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level
Smart Metering/EMS	0,31102	0,00000	1,00000	0,51588	0,21956	0,43153	0,00000	0,06313	0,00000
Demand Response Programs	0,46679	0,38611	0,85705	0,49961	0,04859	0,43153	0,56840	0,37830	0,31214
Integrated Renewable Energy Systems	0,00000	0,12295	0,73189	0,00000	0,00000	0,56792	0,11773	0,00000	0,10917
EV Charging Infrastructure	0,75540	0,57874	0,44621	0,40279	0,60948	0,77250	0,39181	0,44143	0,34328
EVs	0,73300	0,49116	0,32126	0,25755	0,90222	0,77250	0,56840	0,50457	0,34328
V2G	0,84423	0,64905	0,23189	0,49961	0,68267	0,77250	0,84295	1,00000	0,95292
BAS	0,35529	0,14021	0,73189	0,41905	0,31674	0,36334	0,54862	0,42022	0,42131
VPPs	0,73326	0,29811	0,58916	0,69326	0,85363	0,49973	0,68613	0,42073	0,43725
Energy Trading	0,82235	0,21053	0,41063	1,00000	1,00000	1,00000	0,66659	0,33468	0,26562
EaaS	1,00000	0,10526	0,57115	0,90298	0,80474	0,43153	0,60749	0,56770	0,59351
Hydrogen Economy Services	0,77754	1,00000	0,01800	0,38652	0,31674	0,13639	0,96068	0,90854	0,92178
CCS	0,91118	0,89474	0,00000	0,12897	0,60948	0,00000	1,00000	0,77079	1,00000
Carbon Offset and Carbon Trading	0,95545	0,24547	0,42820	0,38710	0,78044	0,34097	0,56840	0,49529	0,40593

3. Υπολογισμός S_i (σταθμισμένο άθροισμα) και R_i (μέγιστη σταθμισμένη απόκλιση)

rij*w	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	GHG Emissions	Resource Conservation	Waste management	Reliability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level
Smart Metering/EMS	0,035213	0,000000	0,110957	0,057834	0,026411	0,051669	0,000000	0,005843	0,000000
Demand Response Programs	0,052849	0,045836	0,095096	0,056011	0,005846	0,051669	0,057022	0,035013	0,034991
Integrated Renewable Energy Systems	0,000000	0,014596	0,081209	0,000000	0,000000	0,067999	0,011811	0,000000	0,012239
EV Charging Infrastructure	0,085525	0,068705	0,049510	0,045156	0,073316	0,092495	0,039306	0,040856	0,038482

EVs	0,082989	0,058308	0,035646	0,028874	0,108530	0,092495	0,057022	0,046699	0,038482
V2G	0,095582	0,077052	0,025730	0,056011	0,082119	0,092495	0,084564	0,092553	0,106824
BAS	0,040226	0,016645	0,081209	0,046980	0,038102	0,043504	0,055038	0,038893	0,047230
VPPs	0,083019	0,035390	0,065371	0,077720	0,102685	0,059834	0,068833	0,038940	0,049017
Energy Trading	0,093106	0,024993	0,045562	0,112108	0,120292	0,119734	0,066872	0,030976	0,029776
EaaS	0,113219	0,012496	0,063374	0,101232	0,096804	0,051669	0,060943	0,052543	0,066534
Hydrogen Economy Services	0,088032	0,118715	0,001998	0,043332	0,038102	0,016330	0,096375	0,084088	0,103334
CCS	0,103162	0,106219	0,000000	0,014459	0,073316	0,000000	0,100320	0,071339	0,112102
Carbon Offset and Carbon Trading	0,108175	0,029141	0,047512	0,043397	0,093881	0,040826	0,057022	0,045841	0,045505

	S	R	Si-Smin	Ri-Rmin	(Si-Smin)/(Smax-Smin)	Ri-Rmin/Rmax-Rmin
Smart Metering/EMS	0,287928	0,110957	0,100075	0,029749	0,190590	0,761172
Demand Response Programs	0,434333	0,095096	0,246481	0,013888	0,469417	0,355335
Integrated Renewable Energy Systems	0,187853	0,081209	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
EV Charging Infrastructure	0,533351	0,092495	0,345498	0,011286	0,657993	0,288771
EVs	0,549045	0,108530	0,361192	0,027321	0,687882	0,699062
V2G	0,712931	0,106824	0,525078	0,025616	1,000000	0,655418
BAS	0,407825	0,081209	0,219972	0,000000	0,418933	0,000000
VPPs	0,580808	0,102685	0,392955	0,021476	0,748375	0,549494
Energy Trading	0,643418	0,120292	0,455565	0,039083	0,867614	1,000000
EaaS	0,618813	0,113219	0,430960	0,032010	0,820754	0,819023
Hydrogen Economy Services	0,590305	0,118715	0,402453	0,037506	0,766462	0,959660
CCS	0,580916	0,112102	0,393063	0,030894	0,748581	0,790467
Carbon Offset and Carbon Trading	0,511302	0,108175	0,323449	0,026966	0,616001	0,689981

Smax	0,712931
Smin	0,187853
Rmax	0,120292
Rmin	0,081209
v	0,500000
Smax-Smin	0,525078
Rmax-Rmin	0,039083
1-v	0,500000

4. Υπολογισμός δείκτη συμβιβασμού Q_i

	Q
Smart Metering/EMS	0,475881
Demand Response Programs	0,412376
Integrated Renewable Energy Systems	0,000000
EV Charging Infrastructure	0,473382
EVs	0,693472
V2G	0,827709
BAS	0,209466
VPPs	0,648934
Energy Trading	0,933807
EaaS	0,819889
Hydrogen Economy Services	0,863061
CCS	0,769524

5. Κατάταξη Q_i

	Q
Integrated Renewable Energy Systems	0,000000
BAS	0,209466
Demand Response Programs	0,412376
EV Charging Infrastructure	0,473382
Smart Metering/EMS	0,475881
VPPs	0,648934
Carbon Offset and Carbon Trading	0,652991
EVs	0,693472
CCS	0,769524
EaaS	0,819889
V2G	0,827709
Hydrogen Economy Services	0,863061

Carbon Offset and Carbon Trading	0,652991	Energy Trading	0,933807
----------------------------------	----------	----------------	----------

Managers

1. Πίνακας απόδοσης

Managers	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	GHG Emissions	Resource Conservation	Waste management	Reliability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level
Smart Metering/EMS	0,625000	0,750000	0,312500	0,437500	0,562500	0,500000	0,791500	0,666500	0,666500
Demand Response Programs	0,729000	0,625000	0,500000	0,625000	0,687500	0,437500	0,562500	0,562500	0,562500
Integrated Renewable Energy Systems	0,750000	0,625000	0,562500	0,833000	0,625000	0,500000	0,562500	0,625000	0,562500
EV Charging Infrastructure	0,375000	0,562500	0,520750	0,500000	0,437500	0,437500	0,437500	0,562500	0,562500
EVs	0,437500	0,562500	0,500000	0,604000	0,437500	0,437500	0,437500	0,437500	0,604000
V2G	0,437500	0,437500	0,562500	0,562500	0,500000	0,437500	0,375000	0,312500	0,333250
BAS	0,625000	0,750000	0,270750	0,562500	0,541500	0,625000	0,687500	0,625000	0,562500
VPPs	0,604000	0,395750	0,500000	0,604000	0,500000	0,437500	0,375000	0,312500	0,395750
Energy Trading	0,562500	0,687500	0,562500	0,375000	0,500000	0,312500	0,625000	0,562500	0,625000
EaaS	0,500000	0,750000	0,437500	0,375000	0,500000	0,375000	0,562500	0,437500	0,500000
Hydrogen Economy Services	0,437500	0,166500	0,770500	0,562500	0,604000	0,562500	0,375000	0,124750	0,229000
CCS	0,500000	0,270750	0,874500	0,833000	0,395750	0,562500	0,541500	0,270750	0,333250
Carbon Offset and Carbon Trading	0,437500	0,500000	0,625000	0,687500	0,437500	0,562500	0,687500	0,562500	0,562500

2. Κανονικοποίηση τιμών

benefit criterion → όσο μεγαλύτερη η τιμή,

τόσο καλύτερη η απόδοση.

cost criterion → όσο μικρότερη η τιμή, τόσο

καλύτερη η απόδοση.

Cost-effectiveness	B	Όσο πιο αποδοτική είναι η λύση ως προς το κόστος, τόσο καλύτερη.
Economic feasibility	B	Όσο πιο εφικτή οικονομικά, τόσο πιο επιθυμητή.

Financial Risk	C	Όσο μικρότερος ο κίνδυνος, τόσο καλύτερα.
GHG Emissions	B	Όσο περισσότερο μειώνονται οι εκπομπές, τόσο καλύτερα.
Resource Conservation	B	Όσο περισσότερη εξοικονόμηση πόρων, τόσο πιο θετικό.
Waste management	B	Όσο καλύτερη/αποτελεσματικότερη η διαχείριση, τόσο καλύτερα.
Reliability	B	Όσο πιο αξιόπιστο το σύστημα, τόσο καλύτερο.
Inegration with Existing Systems	B	Όσο πιο εύκολη η ενσωμάτωση, τόσο πιο επιθυμητή η υπηρεσία.
Technology Readiness Level	B	Όσο πιο ώριμη η τεχνολογία, τόσο πιο εφαρμόσιμη και επιθυμητή.

	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	GHG Emissions	Resource Conservation	Waste management	Reliability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level
M AX	0,750000	0,750000	0,874500	0,833000	0,687500	0,625000	0,791500	0,666500	0,666500
MIN	0,375000	0,166500	0,270750	0,375000	0,395750	0,312500	0,375000	0,124750	0,229000

W	0,113218508	0,118714986	0,110957493	0,112108266	0,1202916	0,119733635	0,10031975	0,092553309	0,112102451
rij	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	GHG Emissions	Resource Conservation	Waste management	Reliability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level
Smart Metering/EMS	0,33333	0,00000	0,93085	0,86354	0,42845	0,40000	0,00000	0,00000	0,00000
Demand Response Programs	0,05600	0,21422	0,62029	0,45415	0,00000	0,60000	0,54982	0,19197	0,23771
Integrated Renewable Energy Systems	0,00000	0,21422	0,51677	0,00000	0,21422	0,40000	0,54982	0,07660	0,23771
EV Charging Infrastructure	1,00000	0,32134	0,58592	0,72707	0,85690	0,60000	0,84994	0,19197	0,23771
EVs	0,83333	0,32134	0,62029	0,50000	0,85690	0,60000	0,84994	0,42270	0,14286
V2G	0,83333	0,53556	0,51677	0,59061	0,64267	0,60000	1,00000	0,65344	0,76171
BAS	0,33333	0,00000	1,00000	0,59061	0,50043	0,00000	0,24970	0,07660	0,23771
VPPs	0,38933	0,60711	0,62029	0,50000	0,64267	0,60000	1,00000	0,65344	0,61886
Energy Trading	0,50000	0,10711	0,51677	1,00000	0,64267	1,00000	0,39976	0,19197	0,09486
EaaS	0,66667	0,00000	0,72381	1,00000	0,64267	0,80000	0,54982	0,42270	0,38057

Hydrogen Economy Services	0,83333	1,00000	0,17226	0,59061	0,28620	0,20000	1,00000	1,00000	1,00000
CCS	0,66667	0,82134	0,00000	0,00000	1,00000	0,20000	0,60024	0,73050	0,76171
Carbon Offset and Carbon Trading	0,83333	0,42845	0,41325	0,31769	0,85690	0,20000	0,24970	0,19197	0,23771

3. Υπολογισμός S_i (σταθμισμένο άθροισμα) και R_i (μέγιστη σταθμισμένη απόκλιση)

$r_{ij} \cdot w$	Cost-effectiveness	Economic feasibility	Financial Risk	GHG Emissions	Resource Conservation	Waste management	Reliability	Inegration with Existing Systems	Technology Readiness Level
Smart Metering/EMS	0,037740	0,000000	0,103285	0,096810	0,051539	0,047893	0,000000	0,000000	0,000000
Demand Response Programs	0,006340	0,025432	0,068826	0,050914	0,000000	0,071840	0,055158	0,017768	0,026648
Integrated Renewable Energy Systems	0,000000	0,025432	0,057340	0,000000	0,025769	0,047893	0,055158	0,007090	0,026648
EV Charging Infrastructure	0,113219	0,038147	0,065012	0,081511	0,103078	0,071840	0,085266	0,017768	0,026648
EVs	0,094349	0,038147	0,068826	0,056054	0,103078	0,071840	0,085266	0,039123	0,016015
V2G	0,094349	0,063579	0,057340	0,066212	0,077308	0,071840	0,100320	0,060478	0,085390
BAS	0,037740	0,000000	0,110957	0,066212	0,060197	0,000000	0,025050	0,007090	0,026648
VPPs	0,044080	0,072073	0,068826	0,056054	0,077308	0,071840	0,100320	0,060478	0,069375
Energy Trading	0,056609	0,012716	0,057340	0,112108	0,077308	0,119734	0,040104	0,017768	0,010634
EaaS	0,075479	0,000000	0,080312	0,112108	0,077308	0,095787	0,055158	0,039123	0,042663
Hydrogen Economy Services	0,094349	0,118715	0,019113	0,066212	0,034428	0,023947	0,100320	0,092553	0,112102
CCS	0,075479	0,097505	0,000000	0,000000	0,120292	0,023947	0,060216	0,067610	0,085390
Carbon Offset and Carbon Trading	0,094349	0,050863	0,045853	0,035615	0,103078	0,023947	0,025050	0,017768	0,026648

	S	R	$S_i - S_{min}$	$R_i - R_{min}$	$(S_i - S_{min}) / (S_{max} - S_{min})$	$(R_i - R_{min}) / (R_{max} - R_{min})$
Smart Metering/EMS	0,337266	0,103285	0,091936	0,045945	0,213068	0,729843
Demand Response Programs	0,322925	0,071840	0,077595	0,014501	0,179833	0,230344
Integrated Renewable Energy Systems	0,245330	0,057340	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

EV Charging Infrastructure	0,602489	0,113219	0,357159	0,055879	0,827742	0,887643
EVs	0,572697	0,103078	0,327367	0,045738	0,758697	0,726554
V2G	0,676816	0,100320	0,431486	0,042980	1,000000	0,682745
BAS	0,333895	0,110957	0,088565	0,053618	0,205255	0,851727
VPPs	0,620354	0,100320	0,375024	0,042980	0,869146	0,682745
Energy Trading	0,504320	0,119734	0,258990	0,062394	0,600228	0,991137
EaaS	0,577938	0,112108	0,332608	0,054769	0,770843	0,870007
Hydrogen Economy Services	0,661740	0,118715	0,416409	0,061375	0,965059	0,974955
CCS	0,530439	0,120292	0,285109	0,062952	0,660760	1,000000
Carbon Offset and Carbon Trading	0,423171	0,103078	0,177840	0,045738	0,412158	0,726554

Smax	0,676816
Smin	0,245330
Rmax	0,120292
Rmin	0,057340
v	0,500000
Smax-Smin	0,431486
Rmax-Rmin	0,062952
1-v	0,500000

4. Υπολογισμός δείκτη συμβιβασμού Q_i

	Q
Smart Metering/EMS	0,471456
Demand Response Programs	0,205089
Integrated Renewable Energy Systems	0,000000
EV Charging Infrastructure	0,857692

5. Κατάταξη Q_i

	Q
Integrated Renewable Energy Systems	0,000000
Demand Response Programs	0,205089
Smart Metering/EMS	0,471456
BAS	0,528491

EVs	0,742626
V2G	0,841373
BAS	0,528491
VPPs	0,775946
Energy Trading	0,795682
EaaS	0,820425
Hydrogen Economy Services	0,970007
CCS	0,830380
Carbon Offset and Carbon Trading	0,569356

Carbon Offset and Carbon Trading	0,569356
EVs	0,742626
VPPs	0,775946
Energy Trading	0,795682
EaaS	0,820425
CCS	0,830380
V2G	0,841373
EV Charging Infrastructure	0,857692
Hydrogen Economy Services	0,970007