



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
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»

**Έρευνα και συγκριτική ανάλυση ενεργειακών marketplaces και
στρατηγικών διαχείρισης ζήτησης στα πλαίσια των ενεργειακών
κοινοτήτων**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιφιγένεια Μ. Τζίνα

Επιβλέπων : Ευάγγελος Μαρινάκης
Επίκουρος Καθηγητής Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων,
Σ.Η.Μ.Μ.Υ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος, 2025



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

Έρευνα και συγκριτική ανάλυση ενεργειακών marketplaces και στρατηγικών διαχείρισης ζήτησης στα πλαίσια των ενεργειακών κοινοτήτων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιφιγένεια Μ. Τζίνα

Επιβλέπων: Ευάγγελος Μαρινάκης
Επίκουρος Καθηγητής Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων,
Σ.Η.Μ.Μ.Υ. Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19^η Φεβρουαρίου 2025.

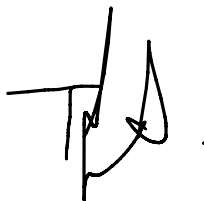
.....
Μαρινάκης Ευάγγελος
Επίκουρος Καθηγητής

.....
Ψαρράς Ιωάννης
Καθηγητής

.....
Ασκούνης Δημήτριος
Καθηγητής

Αθήνα Φεβρουάριος, 2025

Ιφιγένεια Μ. Τζίνα



Διπλωματούχος/Κάτοχος Μεταπτυχιακού Προγράμματος (ΔΠΜΣ) "Τεχνο-Οικονομικά Συστήματα", της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π και του Τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας της Σχολής Ναυτιλίας & Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Πειραιώς."

Copyright © Ifigeneia M. Tzina, 2025.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τη δυναμική των ενεργειακών κοινοτήτων και των ενεργειακών πλατφορμών (energy marketplaces) σε συνάρτηση με τις στρατηγικές διαχείρισης ζήτησης (DSM). Αφετηρία αποτελεί η επιτακτική ανάγκη για μετάβαση σε «καθαρές» μορφές ενέργειας, όπως ορίζουν οι ευρωπαϊκές πολιτικές και οι εθνικές νομοθετικές ρυθμίσεις, με στόχο τη μείωση των εκπομπών και τη βιώσιμη ανάπτυξη.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της πράσινης ενεργειακής μετάβασης, υπογραμμίζοντας τον ρόλο της αποκέντρωσης και της συμμετοχικότητας. Στη συνέχεια, αναλύεται η έννοια των ενεργειακών κοινοτήτων, μέσα από τα παραδείγματα της ευρωπαϊκής και ελληνικής νομοθεσίας, εστιάζοντας στους τρόπους με τους οποίους οι πολίτες, οι τοπικές αρχές και οι μικρές επιχειρήσεις μπορούν να συμπράξουν για την παραγωγή, κατανάλωση και ανταλλαγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

Σε αυτό το πλαίσιο, τα energy marketplaces περιγράφονται ως ηλεκτρονικές πλατφόρμες που αξιοποιούν τεχνολογίες όπως το blockchain, τα έξυπνα συμβόλαια (smart contracts) και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), προσφέροντας διαφανή, ασφαλή και αποδοτική διαχείριση ενέργειας. Παράλληλα, εξετάζονται οι στρατηγικές διαχείρισης ζήτησης (DSM) — από την ευέλικτη τιμολόγηση και τις πρακτικές εξοικονόμησης έως τα συστήματα αποθήκευσης — ως κεντρικοί μηχανισμοί για την ομαλή λειτουργία του δικτύου και τη βέλτιστη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών.

Η εργασία ολοκληρώνεται εστιάζοντας στην κατάσταση που επικρατεί στην Ελλάδα, παρουσιάζοντας χαρακτηριστικά παραδείγματα ενεργειακών κοινοτήτων και πραγματοποιώντας μια ανάλυση SWOT, η οποία καταδεικνύει πλεονεκτήματα, προκλήσεις, ευκαιρίες και απειλές. Το κεντρικό συμπέρασμα είναι ότι η ανάπτυξη των ενεργειακών κοινοτήτων, σε συνδυασμό με σύγχρονα μοντέλα ανταλλαγής ενέργειας και στοχευμένες στρατηγικές Διαχείρισης Ζήτησης Ενέργειας (DSM), μπορεί να ενισχύσει τη βιωσιμότητα και τον δημοκρατικό χαρακτήρα της παραγωγής και της κατανάλωσης ενέργειας. Ωστόσο, απαραίτητες προϋποθέσεις για την επιτυχή εφαρμογή αυτών των μοντέλων είναι η κατάλληλη νομοθετική στήριξη, η διαθεσιμότητα χρηματοδοτικών εργαλείων και η ενεργή συμμετοχή των πολιτών, ώστε να καταστεί εφικτή η πράσινη ενεργειακή μετάβαση για το σύνολο της κοινωνίας.

Λέξεις – Κλειδιά: Διαχείριση της Ζήτησης, Ενεργειακή Μετάβαση, Ενεργειακές Κοινότητες, Ενεργειακές Πλατφόρμες, Πράσινη Ενέργεια

Abstract

This thesis explores the dynamics of energy communities and energy marketplaces in relation to demand-side management (DSM) strategies. The starting point is the urgent need for a transition to "clean" energy sources, as defined by European policies and national legislative regulations, aiming at emissions reduction and sustainable development.

Initially, the fundamental characteristics of the green energy transition are presented, highlighting the role of decentralization and participation. Next, the concept of energy communities is analyzed through examples from European and Greek legislation, focusing on how citizens, local authorities, and small businesses can collaborate to produce, consume, and exchange energy from renewable sources.

In this context, energy marketplaces are described as digital platforms that leverage technologies such as blockchain, smart contracts, and the Internet of Things (IoT), offering transparent, secure, and efficient energy management. At the same time, demand-side management (DSM) strategies—ranging from flexible pricing and conservation practices to storage systems—are examined as key mechanisms for the smooth operation of the grid and the optimal utilization of renewable energy sources.

The study concludes by focusing on the situation in Greece, presenting notable examples of energy communities and conducting a SWOT analysis to identify strengths, challenges, opportunities, and threats. The central conclusion is that the development of energy communities, combined with modern energy exchange models and targeted demand-side management strategies, can enhance the sustainability and democratic nature of energy production and consumption. However, key prerequisites for the successful implementation of these models include appropriate legislative support, the availability of financial tools, and active citizen participation, ensuring that the green energy transition becomes a reality for society as a whole.

Keywords: Demand-Side Management, Energy Transition, Energy Communities, Energy Marketplaces, Green Energy

Πίνακας περιεχομένων

.....	4
Περίληψη.....	5
Abstract.....	7
1.Εισαγωγή.....	2
1.1 Πράσινη Ενεργειακή Μετάβαση.....	2
1.2 Σκοπός διπλωματικής.....	6
2. Ενεργειακές Κοινότητες.....	7
2.1 Ορισμός και ιστορικό πλαίσιο των ενεργειακών κοινοτήτων.....	7
2.2 Δομές και λειτουργία των Ενεργειακών Κοινοτήτων.....	9
2.2.1 Συλλογική Αυτοκατανάλωση (Collective self-consumption).....	11
2.3 Στόχοι των ενεργειακών κοινοτήτων.....	13
3. Νομοθετικό Πλαίσιο Ενεργειακών Κοινοτήτων.....	15
3.1 Ευρωπαϊκό Νομοθετικό Πλαίσιο.....	15
3.2 Νομοθετικό Πλαίσιο για Ενεργειακές Κοινότητες στην Ελλάδα.....	17
3.3 Παραδείγματα ενεργειακών κοινοτήτων.....	20
3.3.1 ChalkiOn: Ενεργειακή Κοινότητα Χάλκης.....	20
3.3.2 WEnCoop/ Ενεργειακή Κοινότητα Γυναικών.....	21
3.3.3 Minoa Energy/Κρήτη.....	21
3.3.4 Collective Energy Coop/ Αττική.....	21
4. Energy Marketplaces.....	22
4.1. Ορισμός των energy marketplaces.....	22
4.2 Σκοπός και Ρόλος των Energy Marketplaces στη Βιώσιμη Ενεργειακή Μετάβαση.....	23
4.3 Τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα Energy Marketplaces.....	24
4.3.1 Τεχνολογία Κατανεμημένων Βιβλίων (DLT).....	24
4.3.2 Blockchain Technology.....	25
4.3.3 Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT).....	26
4.3.4 Τεχνητή Νοημοσύνη και Μηχανική Μάθηση.....	26
4.3.5 Smart Contracts.....	27
4.4 Επιτυχημένα Παραδείγματα Energy Marketplaces.....	28
4.4.1 OurPower, Vienna.....	28
4.4.2 Quartierstrom, Switzerland.....	29
4.4.3 Piclo Flex, UK.....	30
4.4.4 Vandebron, Netherlands.....	31

4.4.5 SunContract,Slovenia	32
5. Διαχείριση της Ζήτησης - Demand side management (DSM)	32
5.1 Ορισμός.....	32
5.2 Κατηγορίες στρατηγικών Διαχείριση της Ζήτησης.....	35
5.2.1 Ανάλυση της Ενεργειακής Αποδοτικότητας (Energy Efficiency - EE)	36
5.2.2 Ανάλυση της Απόκρισης στη Ζήτηση (Demand Response - DR)	37
5.2.2.1 Προγράμματα DR ανάλογα με τον τύπο της ανταπόκρισης (Explicit vs. Implicit DR)	39
5.2.2.2 Προγράμματα DR ανάλογα με τους μηχανισμούς ελέγχου τους,	40
5.2.2.3 Προγράμματα DR που ταξινομούνται με βάση τα κίνητρα και τιμολογιακές στρατηγικές.	40
5.2.2.4 Προγράμματα DR που χρησιμοποιούν μεταβλητή απόφασης και βελτιστοποίηση.....	41
5.2.3 Ανάλυση της Βελτιστοποίησης Φορτίου και Προγραμματισμού (Load Optimization and Scheduling)	42
5.2.4 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage Systems).....	43
5.3 Ανάλυση της Διαχείρισης από την Πλευρά της Ζήτησης (DSM) στις Ενεργειακές Κοινότητες	45
6. Ανάλυση S.W.O.T και μελέτη περίπτωσης στην Ελλάδα.....	46
6.1 Ανάλυση SWOT	46
6.2 Ανάλυση SWOT για Energy Marketplaces	47
6.3 Ανάλυση SWOT σε Demand Side Management Strategies	50
6.4 Σενάριο στην Ελλάδα: Energy Marketplaces και Διαχείριση της Ζήτησης (DSM).....	53
7. Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα	59
7.1 Συμπεράσματα	59
7.2 Περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη.....	60
Βιβλιογραφία.....	62

1.Εισαγωγή

1.1 Πράσινη Ενεργειακή Μετάβαση

Η κλιματική αλλαγή, ως αποτέλεσμα της υπερβολικής εξόρυξης και χρήσης ορυκτών καυσίμων και την επακόλουθη αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, έχει καταστεί ως ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα του 21ου αιώνα. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) υποστηρίζει ότι οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες αερίων του θερμοκηπίου προκαλούν περίπου 1,1°C υπερθέρμανση του πλανήτη από την προβιομηχανική εποχή, με πιθανή αύξηση σε 1,5°C μέχρι το 2040 με τις σημερινές εκπομπές [35]. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι ήδη εμφανείς, όπως για παράδειγμα η αύξηση της στάθμης της θάλασσας, η αύξηση της συχνότητας και της έντασης των φυσικών καταστροφών και οι διαταραχές των οικοσυστημάτων που θέτουν σε κίνδυνο τη βιοποικιλότητα και τα ανθρώπινα μέσα διαβίωσης. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι απαραίτητες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, καθώς μειώνουν την εξάρτηση από πηγές ενέργειας έντασης άνθρακα. Το 2023, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρέχουν περίπου το 30% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κυρίως λόγω της επέκτασης της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας. Το 2022, η δυναμικότητα της ηλιακής ενέργειας αυξήθηκε πάνω από 20%, ωθούμενη από τις συνεχιζόμενες τεχνολογικές εξελίξεις και τη μείωση του κόστους που τονώνουν την ανάπτυξη της αγοράς.

Η μετάβαση προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) δεν είναι μόνο τεχνολογικής φύσης, αλλά περιλαμβάνει αλλαγές σε ολόκληρο το σύστημα παραγωγής, διανομής και χρήσης της ενέργειας. Η διαδικασία επικεντρώνεται στην αποκέντρωση της παραγωγής και στην ενσωμάτωση με ανανεώσιμες πηγές δικτύου, όπως η ηλιακή, η αιολική και η βιομάζα. Οι καθαρές και βιώσιμες τεχνολογίες θα μπορούσαν να καλύψουν έως και τα δύο τρίτα της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης έως το 2050 και αποτελούν το μέλλον στην ενεργειακή υποδομή. Αυτό θα μπορούσε κάλλιστα να συμβεί, ιδίως αν το κόστος τους γίνει πιο ανταγωνιστικό σε ορισμένους τομείς ώστε να μπορούν να αντικαταστήσουν σταδιακά τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Όλα αυτά αποτελούν ανάγκη στο σημερινό πλαίσιο όσον αφορά την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, τη μείωση της ρύπανσης και τη διασφάλιση της ενεργειακής ασφάλειας. Ο κίνδυνος της κλιματικής αλλαγής, η σημαντική αύξηση του πληθυσμού των καταναλωτών και της τοπικής παραγωγής ενέργειας, καθώς και η πρόοδος των καινοτόμων τεχνολογιών που διευκολύνουν τα νέα επιχειρηματικά μοντέλα, οδηγούν σε ταχείς μετασχηματισμούς στον ηλεκτρικό τομέα. Στο πλαίσιο αυτό, οι συναλλαγές μεταξύ ομότιμων (P2P) και οι ενεργειακές κοινότητες σηματοδοτούν καινοτόμες προσεγγίσεις στις ενεργειακές συναλλαγές που διαταράσσουν τις παραδοσιακές ιεραρχίες που διαμορφώνονται από κάθετες

συμφωνίες μεταξύ των παρόχων ενέργειας λιανικής και των καταναλωτών. Η αποκέντρωση της παραγωγής ενέργειας είναι το σήμα κατατεθέν αυτής της μετάβασης. Η κατανεμημένη παραγωγή, ή η παραγωγή κοντά στα σημεία κατανάλωσης, μειώνει τις απώλειες ενέργειας κατά τη μεταφορά και μπορεί να μετατρέψει τον καταναλωτή σε «επαγγελματία καταναλωτή», που είναι ταυτόχρονα παραγωγός και καταναλωτής ενέργειας. Σε αυτό το μοντέλο, η ενεργειακή δημοκρατία εξαπλώνεται, καθώς ανοίγονται περισσότεροι δρόμοι για τη συμμετοχή και τον έλεγχο των ενεργειακών πόρων από την κοινότητα [68].

Η Συμφωνία του Παρισιού το 2015 αποτελεί ορόσημο στη μετάβαση προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Έθεσε υψηλές φιλοδοξίες για τον περιορισμό της αύξησης της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας σε επίπεδα πολύ κάτω από τους 2°C, ή κατά προτίμηση στους 1,5°C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα, απαιτώντας έτσι από τις χώρες να εφαρμόσουν ισχυρές πολιτικές για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το πλαίσιο συλλογικής ευθύνης της συμφωνίας ώθησε τις κυβερνήσεις των κρατών-μελών να λάβουν συγκεκριμένα μέτρα για την αντιμετώπιση της παγκόσμιας υπερθέρμανσης και την ενίσχυση της ανθεκτικότητας τους στο κλίμα [19].

Η Ευρωπαϊκή Ένωση εν συνεχεία ενσωμάτωσε αυτούς τους στόχους στη νομοθεσία της μέσω της Ευρωπαϊκής Κλιματικής Νομοθεσίας, καθιερώνοντας νομικά δεσμευτικούς στόχους για μηδενικές καθαρές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου έως το 2050. Εισήγαγε έναν ενδιάμεσο στόχο για τη μείωση των εκπομπών κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Αυτοί οι στόχοι έχουν κρίσιμη σημασία για την επίτευξη του μακροπρόθεσμου στόχου της κλιματικής ουδετερότητας, όπως προβλέπεται στο ευρύ πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνία [23].

Η Πράσινη Συμφωνία καθιερώνει ένα νέο μοντέλο κλιματικής διακυβέρνησης, ενσωματώνοντας τη βιώσιμη ανάπτυξη στην οικονομική πρόοδο. Συνεπώς, περιλαμβάνει μια επανάσταση στους τομείς της ενέργειας, των μεταφορών και της γεωργίας για τη μείωση των εκπομπών άνθρακα, ενώ προσφέρει νέες ευκαιρίες στην κυκλική οικονομία. Μια δίκαιη και ολοκληρωμένη ενεργειακή μετάβαση συνδυάζει σαφώς καθορισμένους στόχους απανθρακοποίησης με μια ευρύτερη δέσμευση για περιβαλλοντική δικαιοσύνη [72].

Η πρόοδος της Ευρωπαϊκής Ένωσης στην εφαρμογή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών υπογραμμίζει την αφοσίωσή της στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Πρωτοβουλίες όπως η Οδηγία για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας ενισχύουν αυτές τις προσπάθειες, υποστηρίζοντας τόσο το σύστημα εμπορίας εκπομπών (ETS) όσο και τους στόχους για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως συνεργαζόμενα εργαλεία [44].

Σε συνέχεια των παραπάνω, τα οικονομικά και κοινωνικά ζητήματα είναι βαθιά συνυφασμένα με την πράσινη μετάβαση. Η παγκόσμια οικονομία ωφελείται σημαντικά από την ταχύτερη υιοθέτηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την αποδοτικότερη χρήση της ενέργειας. Η μετάβαση αυτή θα μπορούσε να αυξήσει το παγκόσμιο ΑΕΠ κατά 1% έως το 2050, ενώ παράλληλα θα δημιουργούσε εκατομμύρια νέες θέσεις εργασίας στην εγκατάσταση, συντήρηση και ανάπτυξη τεχνολογίας στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτή η οικονομική ανάπτυξη συμβαδίζει ταυτόχρονα με τεράστια εξοικονόμηση δαπανών υγείας, με μειωμένη ευπάθεια σε κινδύνους που σχετίζονται με το κλίμα, καθώς η υιοθέτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μειώνει τη ρύπανση και ελαχιστοποιεί τις δυσμενείς επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Η ενεργειακή αποδοτικότητα αποτελεί κρίσιμο συμπλήρωμα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μαζί, τα μέτρα αυτά θα μπορούσαν να συμβάλουν μόλις στο 94% περίπου της μείωσης των εκπομπών που απαιτείται έως το 2050 σύμφωνα με τους κλιματικούς στόχους. Μια τέτοια συνέργεια αποτελεί απόδειξη της αποτελεσματικότητας μιας ολοκληρωμένης πολιτικής που επιτάσσει τόσο τη βελτίωση της αποδοτικότητας όσο και την ευρεία διάδοση των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [37].

Η πράσινη μετάβαση χαρακτηρίζεται εξίσου από τεράστιες ανάγκες αναβάθμισης και ανάπτυξης των υποδομών. Η μετάβαση σε αποκεντρωμένα ενεργειακά συστήματα που παράγονται και καταναλώνονται τοπικά απαιτεί ισχυρές και έξυπνες υποδομές. Η ανάπτυξη έξυπνων δικτύων, εγκαταστάσεων αποθήκευσης ενέργειας και ενός δικτύου σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων καθίσταται υψίστης σημασίας για την απορρόφηση της διαλείπουσας φύσης της προσφοράς ανανεώσιμης ενέργειας και την αξιοπιστία του ενεργειακού εφοδιασμού. Η επιτυχία της πράσινης μετάβασης ωστόσο, εξαρτάται από την υπέρβαση των υφιστάμενων εμποδίων. Τα ρυθμιστικά πλαίσια πρέπει να εξελιχθούν ώστε να υποστηρίξουν τις αποκεντρωμένες ενεργειακές αγορές, επιτρέποντας στους ενεργούς prosumers—είτε μεμονωμένους καταναλωτές είτε επιχειρήσεις—να παράγουν, να καταναλώνουν και να εμπορεύονται ενέργεια αποτελεσματικά [51]. Οι αγορές ενέργειας καθιστούν δυνατή τη διαφανή και αποτελεσματική εμπορία ενέργειας. Αυτές οι πλατφόρμες θα είναι απαραίτητες για την επίτευξη δίκαιης ανανεώσιμης ενέργειας με ταυτόχρονη εμπλοκή των κοινοτήτων και δυνατότητα συμμετοχής.

Συνεπώς, η αλλαγή αυτή είναι κάτι περισσότερο από μια τεχνολογική μετάβαση. Είναι μια πολυδιάστατη μετάβαση, ένας συνδυασμός οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών προοπτικών. Προκειμένου η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας να συνάδει με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης και οι παγκόσμιες συμφωνίες για το κλίμα, η μετάβαση αυτή ανοίγει δρόμους προς ένα βιώσιμο και χωρίς αποκλεισμούς μέλλον της ενέργειας. Υπογραμμίζει επίσης ότι τα αποτελέσματα αυτά πρέπει να επιτευχθούν μέσω της ταχύτερης ανάπτυξης της τεχνολογίας, των υποστηρικτικών πλαισίων πολιτικής και της ενεργού συμμετοχής

της κοινότητας, έτσι ώστε τα οφέλη της πράσινης μετάβασης να είναι ευρέως διαδεδομένα και να διατηρηθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Οι πρόσφατες τάσεις δείχνουν ότι η αυξημένη χρήση των μεταβλητών ΑΠΕ - ηλιακή, αιολική και υδροηλεκτρική ενέργεια - είναι ζωτικής σημασίας για τη ρεαλιστική επίτευξη των στόχων της βιώσιμης ανάπτυξης και του μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Η μεγάλη εξέλιξη από αυτή την άποψη ήταν η τεράστια αύξηση της δυναμικότητας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι παγκόσμιες προσθήκες δυναμικότητας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξήθηκαν κατά 50% σε σχέση με το προηγούμενο έτος, σε σχεδόν 510 GW το 2023, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις της Διεθνούς Οργάνωσης Ενέργειας (IEA). Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά (PV) αποτέλεσαν τον πιο σημαίνοντα μοχλό για την ανάπτυξη αυτή μέσω της τεράστιας διάδοσης.

Στην ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών επιτυγχάνονται μεγάλες πρόοδοι, ώστε οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να γίνουν πιο διαθέσιμες και ανταγωνιστικές. Σύμφωνα με τον International Renewable Energy Agency [37] μόνο από το 2010 έως το 2019, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά μειώθηκε κατά περίπου 82%. Ομοίως, η καινοτομία στον σχεδιασμό των ανεμογεννητριών και στις τεχνολογίες υπεράκτιων αιολικών συστημάτων έχει βελτιώσει τις ενεργειακές αποδόσεις και έχει ανοίξει νέες δυνατότητες ανάπτυξης. Οι ψηφιακές παρεμβάσεις μέσω της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και του blockchain φέρνουν αλλαγές στον τομέα με καλύτερη διαχείριση του δικτύου, υψηλότερη προληπτική συντήρηση και διαφάνεια στις ενεργειακές συναλλαγές.

Η συμμετοχή των πολιτών σε αυτή την προσπάθεια αποτελεί βασικό παράγοντα καθώς η ενεργειακή δημοκρατία υποστηρίζει μια προσέγγιση από κάτω προς τα πάνω, όπου τα άτομα και οι κοινότητες αποκτούν τον έλεγχο των ενεργειακών πόρων, προωθώντας την ισότητα και την τοπική ιδιοκτησία. Για παράδειγμα, οι οικιακές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις τοποθετούν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο κατώφλι των ιδίων των σπιτιών, μειώνοντας τις απαιτήσεις από τις κεντρικές μονάδες παραγωγής ενέργειας και βελτιώνοντας την ενεργειακή ασφάλεια. Πρόκειται για μια υποδειγματική περίπτωση συλλογικής συμμετοχής, με την οποία ομάδες prosumers θα μπορούσαν να ασχοληθούν με τους τοπικούς ενεργειακούς πόρους, να βελτιστοποιήσουν τις καταναλώσεις τους και να μοιραστούν τα οφέλη από την ανάπτυξη ενός τοπικού ενεργειακού συστήματος αυτάρκειας. Πράγματι, μοντέλα όπως αυτά τονώνουν την κοινωνική συνοχή και προωθούν την τοπική οικονομική ανάπτυξη μέσω δημοκρατικών τρόπων ενεργειακής διακυβέρνησης, διασφαλίζοντας ότι οι αποφάσεις λαμβάνονται στο πλαίσιο των συμφερόντων της κοινότητας. Παρόλα αυτά ενώ σημειώνεται πρόοδος, μένουν ακόμα περισσότερα να γίνουν. Οι οικονομικοί περιορισμοί, τα ρυθμιστικά εμπόδια και η έλλειψη ευαισθητοποίησης του κοινού μπορούν να εμποδίσουν τους μελλοντικούς ενεργούς πολίτες. Αυτά χρειάζονται στοχευμένες πολιτικές, συλλογικές

δράσεις, οικονομικά κίνητρα και κυρίως ενημέρωση για να γίνουν χωρίς αποκλεισμούς και επεκτάσιμα.

1.2 Σκοπός διπλωματικής

Ο 21ος αιώνας έχει ρίξει νέο φως στην εξεύρεση εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης της ενέργειας. Η αυξανόμενη ζήτηση σε συνδυασμό με την έντονη πίεση από τα περιβαλλοντικά προβλήματα, δημιουργούν την ανάγκη για την ανάπτυξη αποκεντρωμένων ενεργειακών κοινοτήτων και ενεργειακών αγορών. Η έμφαση του παρόντος εγγράφου δίνεται στην ανάλυση αυτών των καινοτόμων προσεγγίσεων που περιλαμβάνουν στρατηγικές διαχείρισης της ζήτησης και των επιπτώσεών τους σε τεχνολογικό, οικονομικό και κοινωνικό επίπεδο.

Οι ενεργειακές κοινότητες αντιπροσωπεύουν την επαναστατική προσέγγιση για τη μετάβαση σε βιώσιμα ενεργειακά μοντέλα όπου οι πολίτες και οι μικροί παραγωγοί διαχειρίζονται και ανταλλάσσουν ενέργεια σε τοπικό επίπεδο. Τεχνολογίες όπως το blockchain, το IoT και τα smart contracts προσδίδουν στην αγορά τεράστια διαφάνεια, ασφάλεια και αποτελεσματικότητα, ενώ καθιστούν τις ενεργειακές αγορές ανεξάρτητες και βιώσιμες.

Η διαχείριση της ζήτησης αποτελεί ουσιαστικό μέσο για τη διασφάλιση της ενεργειακής ασφάλειας, ιδίως στο πλαίσιο των αναδυόμενων ενεργειακών κοινοτήτων. Η εξέλιξη των αποκεντρωμένων ενεργειακών κοινοτήτων διευκολύνεται από την υιοθέτηση νέων τακτικών, όπως η δυναμική τιμολόγηση, η ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και η εξέλιξη των έξυπνων τεχνολογιών. Οι μέθοδοι αυτές διευκολύνουν τη βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας, ιδίως κατά τις περιόδους αιχμής, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας. Η μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας απαιτεί αποτελεσματική διαχείριση της ζήτησης για τον μετριασμό των περιβαλλοντικών προβλημάτων που συνδέονται με τις συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Η αποτελεσματική εκτέλεση αυτών των μέτρων ενισχύει τη βιωσιμότητα του ενεργειακού συστήματος, προάγει τη σταθερότητα του δικτύου και ενθαρρύνει την ευρύτερη υιοθέτηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η εφαρμογή αυτών των πρακτικών σε ενεργειακές κοινότητες και αγορές αναδεικνύει την ικανότητά τους να εξισορροπούν την προσφορά και τη ζήτηση, προωθώντας τόσο την περιβαλλοντική όσο και την οικονομική βιωσιμότητα.

Η μελέτη αυτή αξιολογεί την αποτελεσματικότητα των μέτρων που λαμβάνονται για τη μείωση της εξάρτησης από τις συμβατικές πηγές ενέργειας, γεγονός που συμβάλλει στους ευρύτερους στόχους της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και της ενεργειακής ασφάλειας. Επιπλέον, αναμένεται να τροφοδοτήσει τη θεωρητική και πρακτική ανάπτυξη των αποκεντρωμένων ενεργειακών συστημάτων και των

καινοτόμων αγορών μέσω μιας κριτικής αξιολόγησης των δυνατοτήτων των αποκεντρωμένων ενεργειακών συστημάτων για την προώθηση της υιοθέτησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της ενεργειακής δημοκρατίας, καθοδηγώντας έτσι ολιστικές προσεγγίσεις προς την ανάπτυξη βιώσιμων, προσανατολισμένων στην κοινότητα ενεργειακών μοντέλων.

Τέλος, ένα πολύ σημαντικό μέρος της εργασίας καλύπτει την αξιολόγηση των ενεργειακών πλατφορμών με την ανάλυση SWOT. Το πλαίσιο αυτό παρέχει μια δομημένη προσέγγιση στην κατανόηση των δυνατών σημείων, των αδυναμιών, των ευκαιριών και των απειλών που σχετίζονται μέχρι σήμερα με τα αποκεντρωμένα ενεργειακά συστήματα. Έτσι, αναφέρονται σημαντικά πλεονεκτήματα όπως η αυξημένη διαφάνεια στις ενεργειακές συναλλαγές, ο εκδημοκρατισμός μέσω ατομικών και κοινοτικών συμμετοχικών εναλλακτικών λύσεων και η μικρότερη εξάρτηση από συμβατικές, κεντρικές ενεργειακές υποδομές. Από την άλλη όμως διαθέτουν και αξιοσημείωτες αδυναμίες όπως οι σημαντικές αρχικές δαπάνες, οι τεχνολογικές περιπλοκές και οι ρυθμιστικές ασάφειες παρουσιάζουν σημαντικά εμπόδια στην εφαρμογή και την επεκτασιμότητα. Η αυξανόμενη παγκόσμια ανάγκη για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), η ταχεία τεχνολογική πρόοδος στο blockchain και το IoT, καθώς και η αυξημένη συνείδηση του κοινού όσον αφορά τη βιωσιμότητα, δημιουργούν ευνοϊκές ευκαιρίες για την εφαρμογή και την εξέλιξη των ενεργειακών συστημάτων. Ωστόσο, αυτά μπορούν να μετριαστούν από διάφορες απειλές όπως τρωτά σημεία στην κυβερνοασφάλεια, αντιδράσεις από τους συμβατικούς προμηθευτές ενέργειας και πιθανή οικονομική αστάθεια που θα μπορούσε να υπονομεύσει τη βιωσιμότητα αυτών των δημιουργικών συστημάτων. Αυτό υπογραμμίζει τα πολύπλοκα χαρακτηριστικά των αποκεντρωμένων ενεργειακών συστημάτων και τον στρατηγικό σχεδιασμό που απαιτείται για την αξιοποίηση των δυνατών σημείων και των ευκαιριών, με παράλληλη αντιμετώπιση των αδυναμιών και μείωση των κινδύνων.

2. Ενεργειακές Κοινότητες

2.1 Ορισμός και ιστορικό πλαίσιο των ενεργειακών κοινοτήτων

Οι ενεργειακές κοινότητες είναι συνεργατικά σχήματα που αποτελούνται από πολίτες, τοπικές αρχές και μικρές επιχειρήσεις. Στόχος τους είναι η προώθηση της ενεργειακής αυτάρκειας, η ενίσχυση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η εξασφάλιση κοινωνικών, περιβαλλοντικών και οικονομικών οφελών για τα μέλη τους. Λειτουργούν κυρίως σε τοπικό επίπεδο και δίνουν έμφαση στη βιώσιμη ανάπτυξη. Όντας το σύστημα κατανομής των πόρων, η αγορά ενέργειας εξισώνει την προσφορά και τη ζήτηση μέσω του ανταγωνισμού και των μηχανισμών τιμών. Πολλές από αυτές χαρακτηρίζονται επίσης από αγορές χονδρικής και λιανικής.

Η έννοια των ενεργειακών κοινοτήτων έχει τις ρίζες της στις πρώτες κοινότητες στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική, κατά τη διάρκεια των πετρελαϊκών κρίσεων της δεκαετίας του 1970, που αναζητούσαν τοπικές ενεργειακές λύσεις ως εναλλακτική λύση στα εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα. Ήδη την περίοδο αυτή, η γέννηση συνεργατικών μοντέλων για την παραγωγή ενέργειας παρατηρήθηκε σε χώρες όπως η Δανία και η Γερμανία, οι οποίες ήδη τότε επένδυναν σε έργα αιολικής ενέργειας από πολίτες [64]. Το ενδιαφέρον για την κοινοτική ενέργεια όμως αναζωπυρώθηκε κατά τη δεκαετία του 1990 και τα πρώτα χρόνια της δεκαετίας του 2000, με ώθηση από τις περιβαλλοντικές ανησυχίες και την πρόοδο στις τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι ενεργειακές κοινότητες βασίζονται στη συνεργασία μεταξύ διαφόρων πολιτών, τοπικών αρχών ή μικρών επιχειρήσεων με στόχο την κοινή ενίσχυση των δραστηριοτήτων που σχετίζονται με την ενέργεια γενικά: παραγωγή, διανομή, κατανάλωση ή αποθήκευση. Ο προσανατολισμός αυτών των κοινοτήτων είναι η αύξηση της τοπικής ενεργειακής ασφάλειας, η προώθηση της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η εξασφάλιση κοινωνικών και οικονομικών οφελών στις εμπλεκόμενες περιοχές.

Αυτές οι κοινότητες βασίζονται σε τοπικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ. ηλιακά πάρκα, ανεμογεννήτριες) και ενσωματώνουν τεχνολογίες όπως έξυπνα δίκτυα, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και πλατφόρμες διαχείρισης ζήτησης, προωθώντας ενεργειακή αυτάρκεια και βιωσιμότητα [83]. Η λειτουργία τους στηρίζεται σε καινοτόμα μοντέλα, όπως η συμμετοχή σε τοπικές αγορές ενέργειας, όπου τα μέλη μπορούν να ανταλλάσσουν πλεονάζουσα παραγωγή μέσω συστημάτων πραγματικού χρόνου. Επιπλέον, χρησιμοποιούν μηχανισμούς όπως τα πιστοποιητικά ανανεώσιμης ενέργειας για να ενισχύσουν οικονομικά την ανάπτυξη καθαρών πηγών. Ωστόσο, η επιτυχία τους εξαρτάται από ανεπτυγμένα μοντέλα πρόβλεψης παραγωγής, ευέλικτες υποδομές αποθήκευσης και κανόνες που διευκολύνουν τη συμμετοχή μικρών παραγωγών στις αγορές. Παρά τις δυνατότητές τους, οι ενεργειακές κοινότητες αντιμετωπίζουν προκλήσεις, όπως η ανάγκη για επενδύσεις σε υποδομές, η προσαρμογή σε πολυσύνθετα κανονιστικά πλαίσια και οι κίνδυνοι στον κυβερνοχώρο λόγω της ψηφιοποίησης (π.χ. έξυπνα δίκτυα, blockchain) [84]. Επιπλέον, η έλλειψη πολιτικών που να ενθαρρύνουν τη συλλογική αυτοπαραγωγή σε ορισμένες περιοχές περιορίζει την ανάπτυξή τους.

Στο μέλλον οι ενεργειακές κοινότητες αναμένεται να διαδραματίσουν κεντρικό ρόλο στην εξισορρόπηση μεταξύ αποκέντρωσης και ρύθμισης. Για να επιτευχθεί αυτό, απαιτείται η δημιουργία ευέλικτων νομικών πλαισίων, η χρηματοδότηση τοπικών πρωτοβουλιών και η ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ κοινοτήτων και ευρύτερων δικτύων. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να γίνουν η βάση μιας δίκαιης και ανθεκτικής ενεργειακής μετάβασης.

2.2 Δομές και λειτουργία των Ενεργειακών Κοινοτήτων

Οι ενεργειακές κοινότητες αναδεικνύονται ως μια σύγχρονη προσέγγιση για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που σχετίζονται με την αποκέντρωση και τη δημοκρατικοποίηση των ενεργειακών συστημάτων, ενώ παράλληλα ενισχύουν τη βιωσιμότητα και την ενεργή συμμετοχή της κοινότητας. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες ενεργειακών κοινοτήτων: οι Κοινότητες Ενεργειακών Πολιτών (CECs) και οι Κοινότητες Ανανεώσιμης Ενέργειας (RECs). Οι Ενεργειακές Κοινότητες Πολιτών (CECs) όπως ορίζονται στην Οδηγία (ΕΥ) 2019/944 της ΕΕ σχετικά με τους κοινοτικούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, διευρύνουν το πεδίο εφαρμογής των κοινοτικών ενεργειακών προσπαθειών πέρα από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και περιλαμβάνουν δραστηριότητες όπως η διανομή ενέργειας, η ανταπόκριση στη ζήτηση και η συγκέντρωση πόρων. Οι πρωταρχικοί τους στόχοι είναι η ενίσχυση της τοπικής ανθεκτικότητας, η προώθηση της καινοτομίας στις αγορές ενέργειας και η ενδυνάμωση των πολιτών [85].

Από την άλλη πλευρά, οι Κοινότητες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (RECs) δίνουν έμφαση στη βιωσιμότητα και τη συμμετοχικότητα, δίνοντας προτεραιότητα στα περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη έναντι του οικονομικού κέρδους. Αποτελούμενες από τοπικούς ενδιαφερόμενους φορείς, συμπεριλαμβανομένων ιδιωτών, δήμων και μικρών επιχειρήσεων, οι REC επικεντρώνονται στην παραγωγή, την αυτοκατανάλωση, την αποθήκευση και τη διανομή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, με στόχο την ενίσχυση της τοπικής ενεργειακής ανθεκτικότητας και την προώθηση της εμπλοκής της κοινότητας στη μετάβαση στην καθαρή ενέργεια[22]. Αυτές οι κοινότητες όπως ορίζονται στη νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αποτελούν βασικό στοιχείο για την επίτευξη μιας βιώσιμης και αποκεντρωμένης ενεργειακής μετάβασης. Ειδικότερα, οι RECs σχεδιάζονται για να λειτουργούν κοντά σε έργα ανανεώσιμης ενέργειας, διασφαλίζοντας τη συμμετοχή τοπικών φορέων και μικρών επιχειρήσεων, ενώ οι CECs έχουν έναν πιο ευρύ ρόλο, καλύπτοντας δραστηριότητες όπως η διανομή, αποθήκευση και κατανάλωση ενέργειας. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τις βασικές διαφορές μεταξύ CECs και RECs:

Χαρακτηριστικά	Citizen Energy Communities (CECs)	Renewable Energy Communities (RECs)
Μέλη	Φυσικά πρόσωπα, τοπικές αρχές ή μικρές επιχειρήσεις	Φυσικά πρόσωπα, τοπικές αρχές ή μικρές επιχειρήσεις
Σκοπός	Περιβαλλοντικά, οικονομικά ή κοινωνικά κοινωτικά οφέλη/επίτευξη στόχων βιωσιμότητας	Περιβαλλοντικά, οικονομικά ή κοινωνικά κοινωτικά οφέλη
Κύριες Δραστηριότητες	Μπορεί να περιλαμβάνει και μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	Επικεντρώνεται αποκλειστικά σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
Ιδιοκτησία	Ελεγχόμενες από τα μέλη ή τους μετόχους	Αυτόνομες και ελεγχόμενες ουσιαστικά από τα μέλη ή τους μετόχους.
Ορισμός	Συνεργατικές ενεργειακές πρωτοβουλίες όπου οι πολίτες διαχειρίζονται, παράγουν και καταναλώνουν ενέργεια	Αποκεντρωμένες ομάδες. Επικεντρώνονται στην παραγωγή, διαχείριση και κοινή χρήση ΑΠΕ

Πίνακας 1. Βασικές διαφορές μεταξύ CECs και RECs

Συνοπτικά, οι ενεργειακές κοινότητες αντιπροσωπεύουν μια μετασχηματιστική προσέγγιση των ενεργειακών συστημάτων, προωθώντας την τοπική συμμετοχή, τη βιωσιμότητα και την ανθεκτικότητα. Η ιστορική τους ανάπτυξη υπογραμμίζει την αυξανόμενη αναγνώριση της σημασίας των πρωτοβουλιών υπό την ηγεσία της κοινότητας για την επίτευξη των στόχων της ενεργειακής μετάβασης. Το ευρωπαϊκό Πακέτο Καθαρής Ενέργειας [86] θεσπίζει ένα πλαίσιο για την υποστήριξη αυτών των πρωτοβουλιών, προάγοντας την ενεργή εμπλοκή των καταναλωτών τόσο σε ατομικό όσο και σε συλλογικό επίπεδο. Παράλληλα, τονίζει τη σημασία της δημοκρατικής διακυβέρνησης και της μη κερδοσκοπικής φύσης αυτών των κοινοτήτων. Οι κοινωνίες που έχουν ευνοϊκές νομοθετικές δομές και υποστηρικτικές πολιτικές είναι σε θέση να ενσωματώσουν ενεργειακές κοινότητες πιο αποτελεσματικά, δημιουργώντας βιώσιμες λύσεις για την τοπική ενέργεια.

2.2.1 Συλλογική Αυτοκατανάλωση (Collective self-consumption)

Η συλλογική αυτοκατανάλωση είναι μια νέα ενεργειακή προσέγγιση που περιλαμβάνει τη συνεργατική παραγωγή, διανομή και χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από ομάδες καταναλωτών, κυρίως μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αυτή η αποκεντρωμένη προσέγγιση μετατοπίζει την παραγωγή ενέργειας από τα συμβατικά, κεντρικά συστήματα προς την κατεύθυνση της βιωσιμότητας, της αυξημένης ενεργειακής αποδοτικότητας και των συλλογικών οικονομικών οφελών. Οι ενεργειακές κοινότητες συνήθως οργανώνονται σε κατοικημένες περιοχές, συγκροτήματα διαμερισμάτων ή τοπικές κοινότητες, επιτρέποντας στους συμμετέχοντες να μοιράζονται την ανανεώσιμη ενέργεια, να μειώνουν τα ατομικά κόστη και να ενσωματώνουν τη βιωσιμότητα στην καθημερινότητά τους.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην εδραίωση της συνεργασίας για την καθαρή ενέργεια μέσω της πολιτικής της γνωστής ως «Καθαρή Ενέργεια για Όλους τους Ευρωπαίους». Αυτό το πολιτικό πλαίσιο αποσκοπεί στην ενδυνάμωση ατόμων και κοινοτήτων ώστε να γίνουν ενεργοί συμμετέχοντες στη μετάβαση των ενεργειακών αγορών, υιοθετώντας πρακτικές ανανεώσιμης ενέργειας και κοινοτικής διαμοιρασμού. Παρόλο που η συλλογική αυτοκατανάλωση διαθέτει σημαντικό δυναμικό, η υλοποίησή της παρουσιάζει μεγάλη ανισότητα ανάμεσα στα κράτη μέλη. Δεν έχουν όλες οι χώρες θεσπίσει ευνοϊκούς κανονισμούς, ενώ κάποιες αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα, όπως πολύπλοκες διαδικασίες χορήγησης αδειών και γραφειοκρατικές δυσκολίες. Οι Frieden et al [24] υποστηρίζουν ότι τέτοια εμπόδια μπορεί να παρεμποδίσουν την επιτυχή υλοποίηση της συλλογικής αυτοκατανάλωσης, μειώνοντας την αποτελεσματικότητά της στην επιτάχυνση της ενεργειακής μετάβασης.

Η συλλογική αυτοκατανάλωση προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, ιδιαίτερα στην ενδυνάμωση τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων. Βασικό του χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα ομάδων νοικοκυριών, επιχειρήσεων ή θεσμικών φορέων να παράγουν, διαχειρίζονται και καταναλώνουν κοινά ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, μεγιστοποιώντας την αυτονομία και μειώνοντας το κόστος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αποδοτικής χρήσης τοπικών πόρων (π.χ. κοινόχρηστα ηλιακά πάρκα), όπου η ενέργεια παραμένει εντός της κοινότητας, ελαχιστοποιώντας απώλειες στη μεταφορά και εξομαλύνοντας τη μεταβλητότητα της ανανεώσιμης παραγωγής.

Ένα κύριο πλεονέκτημα είναι η οικονομική βελτίωση για τα μέλη: η κοινή παραγωγή επιτρέπει κλίμακες οικονομίας, μειώνοντας το κόστος ανά μονάδα ενέργειας, ενώ η άμεση κατανομή μεταξύ παραγωγών-καταναλωτών εξαλείφει διαμεσολαβητές. Παράλληλα, η ενίσχυση της ενεργειακής σταθερότητας μέσω ισορροπίας ζήτησης-

προσφοράς εντός της κοινότητας μειώνει την πίεση στο ευρύτερο δίκτυο, προσφέροντας ανθεκτικότητα σε διακοπές ή τιμές ρεύματος.

Σύμφωνα με μελέτες, όπως αυτή των Stephant et al [70], η συλλογική αυτοκατανάλωση βελτιώνει την αποδοτικότητα των ανανεώσιμων συστημάτων μέσω βέλτιστης τοπικής χρήσης παραγωγής, αποφεύγοντας την υπερφόρτωση δικτύων. Επιπλέον, δημιουργεί κοινωνικά-οικονομικά κίνητρα καθώς τα μέλη επενδύουν σε κοινές υποδομές, ενισχύοντας τη συμμετοχή στην ενεργειακή μετάβαση και δημιουργώντας έσοδα από πώληση πλεονάζουσας ενέργειας.

Τέλος, το μοντέλο ενισχύει τη βιωσιμότητα και τη δικαιοσύνη, καθώς δίνει πρόσβαση σε φθηνή και καθαρή ενέργεια σε ομάδες που δεν μπορούν να εγκαταστήσουν ατομικά συστήματα (π.χ. ενοικιαστές, μικρομεσαίες επιχειρήσεις). Αυτό μετατρέπει τους καταναλωτές σε ενεργούς παράγοντες, προωθώντας μια δίκαιη και αποκεντρωμένη ενεργειακή κοινωνία.

Από οικονομική άποψη, η συλλογική αυτοκατανάλωση προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση κόστους και δικαιότερη κατανομή ενεργειακών πόρων. Οι Hassan et al. [33] έδειξαν ότι η εφαρμογή φωτοβολταϊκών συστημάτων με κατάλληλη αποθήκευση μπαταριών θα μπορούσε να καλύψει πάνω από το 90% της ενεργειακής ζήτησης σε μια κοινότητα, καθιστώντας αυτά τα συστήματα οικονομικά βιώσιμα και αποδοτικά. Περιβαλλοντικά η συλλογική αυτοκατανάλωση παρέχει σημαντικά οφέλη μέσω της μείωσης των εκπομπών άνθρακα και της βιώσιμης αστικής ανάπτυξης. Η συλλογική αυτοκατανάλωση μπορεί να μειώσει τις εκπομπές άνθρακα στην κατανάλωση οικιακής ενέργειας, ειδικά εάν υποστηρίζεται από ευνοϊκά ρυθμιστικά πλαίσια και τοπικούς ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους [11].

Ωστόσο, η ευρεία εφαρμογή της αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις. Τα διοικητικά εμπόδια, όπως οι περίπλοκες διαδικασίες εγγραφής και συμμόρφωσης, είναι μερικά από τα σημαντικά προβλήματα στην εφαρμογή της. Αυτά τα εμπόδια θα μπορούσαν να παρεμποδίσουν την πρόοδο των έργων συλλογικής αυτοκατανάλωσης, εάν δεν αντιμετωπιστούν [25]. Επιπλέον, η ανάπτυξη συστημάτων συλλογικής αυτοκατανάλωσης και η ενσωμάτωσή τους στα υπάρχοντα δίκτυα ενέργειας απαιτούν περίπλοκες τεχνικές λύσεις. Σε αυτό το πλαίσιο, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής πρέπει να βελτιώσουν τις διοικητικές διαδικασίες, να παρέχουν οικονομικά κίνητρα και να επενδύσουν σε υποδομές που υποστηρίζουν τα αποκεντρωμένα ενεργειακά συστήματα.

Η μελλοντική επιτυχία της συλλογικής αυτοκατανάλωσης εξαρτάται από το πόσο καλά μπορεί να ενσωματώσει τις τεχνολογικές καινοτομίες με σαφή νομοθεσία και ενεργή συμμετοχή της κοινότητας. Καθώς περισσότερες χώρες αρχίζουν να θεσπίζουν νόμους που υποστηρίζουν πρωτοβουλίες κοινοτικής ενέργειας, η

δυναμική αυτού του μοντέλου για την επίτευξη στόχων βιωσιμότητας γίνεται όλο και πιο προφανής. Οι συνεργατικές προσπάθειες κυβερνήσεων, παρόχων τεχνολογίας και τοπικών κοινοτήτων θα είναι απαραίτητες για να διασφαλιστεί ότι τα συστήματα συλλογικής αυτοκατανάλωσης θα είναι χωρίς αποκλεισμούς, αποδοτικά και οικολογικά βιώσιμα. Αυτή η στρατηγική συνάδει με τις διεθνείς προσπάθειες για την επίλυση της κλιματικής αλλαγής, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει στις κοινότητες να αποφασίζουν για το ενεργειακό τους μέλλον.

Η εφαρμογή της συλλογικής αυτοκατανάλωσης επιτρέπει στις κοινωνίες να προσεγγίσουν ένα πιο βιώσιμο και δίκαιο ενεργειακό σύστημα. Η σύγχρονη τεχνολογία, μαζί με τη νομοθεσία, καθιστά τη συλλογική αυτοκατανάλωση ένα ζωτικό μέρος της καθαρής ενεργειακής μετάβασης που προάγει την ουδετερότητα του άνθρακα και την ανθεκτικότητα των κοινοτήτων.

2.3 Στόχοι των ενεργειακών κοινοτήτων

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission) και τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (International Energy Agency) η ενεργειακή φτώχεια ορίζεται διεθνώς ως η αδυναμία πρόσβασης σε βασικές ενεργειακές υπηρεσίες όπως θέρμανση, ψύξη, φωτισμό, κινητικότητα και ηλεκτροδότηση, ώστε να εξασφαλίσει ένα αξιοπρεπές επίπεδο διαβίωσης. Ο λόγος ύπαρξης αυτής της κατάστασης είναι, με βάση τον ορισμό, ένας συνδυασμός χαμηλού εισοδήματος, υψηλών ενεργειακών δαπανών και χαμηλής ενεργειακής απόδοσης των σπιτιών. Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί σε παγκόσμιο επίπεδο και η ύπαρξή του, μας κάνει να αναρωτιόμαστε όχι μόνο για την οικονομική πορεία των χωρών αλλά και για την περιβαλλοντική αλλαγή και τις επιπτώσεις που θα υπάρξουν ή που ήδη τις βιώνουμε. Με βάση τον Δ.Ο.Ε υπολογίζεται ότι πληθυσμός από 1,3 έως 2,6 δις ανθρώπων στον πλανήτη ζει σε συνθήκες ενεργειακής φτώχειας, με το μεγαλύτερο ποσοστό να ανήκει στις λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες. Επίσης, είναι άξιο να σημειωθεί ότι ο όρος “ενεργειακή φτώχεια” διαφέρει από τον όρο “φτώχεια” που μπορεί να αντιμετωπίζει ένα νοικοκυριό ή μία χώρα.

Τα χαμηλά εισοδήματα περιορίζουν την ικανότητα των νοικοκυριών να πληρώνουν για ενέργεια με αποτέλεσμα την ανεπαρκή θέρμανση ή ψύξη των κατοικιών τους [9]. Επιπλέον, η χαμηλής ποιότητας στέγαση, που χαρακτηρίζεται από κακή μόνωση και αναποτελεσματικά συστήματα θέρμανσης, αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας και συνεπώς το κόστος των νοικοκυριών. Το υψηλό ενεργειακό κόστος επιδεινώνει περαιτέρω τις συνθήκες διαβίωσης των νοικοκυριών και μειώνει την ικανότητά τους να επωφεληθούν από τις ενεργειακές υπηρεσίες. Η καταπολέμηση της ενεργειακής φτώχειας απαιτεί τη βελτίωση των κατοικιών μέσω της μόνωσης, της αντικατάστασης παραθύρων και της ανακαίνισης των συστημάτων θέρμανσης για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και του σχετικού κόστους. Παράλληλα, οι επιδοτήσεις

θέρμανσης και τα κοινωνικά τιμολόγια παρέχουν οικονομική στήριξη στα ευάλωτα νοικοκυριά για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών [10]. Η ανάπτυξη ΑΠΕ μέσω ενεργειακών κοινοτήτων επιτρέπει στους κατοίκους να συμμετέχουν συλλογικά στην παραγωγή και χρήση καθαρής ενέργειας, μειώνοντας έτσι το κόστος και ενισχύοντας την ενεργειακή ανεξαρτησία. Η ανάπτυξη δίκαιων και διαφανών αγορών ενέργειας είναι σημαντική για την αντιμετώπιση της ενεργειακής φτώχειας. Η ενσωμάτωση των ενεργειακών κοινοτήτων στις ενεργειακές αγορές προωθεί την αποκεντρωμένη παραγωγή και κατανάλωση, αυξάνοντας την ανταγωνιστικότητα και μειώνοντας έτσι τις τιμές. Εξάλλου, η ανάπτυξη αγορών για την εμπορία ενεργειακών υπηρεσιών και η παροχή επενδυτικών κινήτρων στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συμβάλλουν στη μείωση του ενεργειακού κόστους για τα νοικοκυριά. Συνολικά, η πολιτική για την καταπολέμηση της ενεργειακής φτώχειας θα πρέπει να είναι πολύπλευρη, βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση, παρέχοντας οικονομική στήριξη στις ευάλωτες ομάδες και προωθώντας την ενεργειακή δημοκρατία μέσω συμμετοχικών συστημάτων όπως οι ενεργειακές κοινότητες.

Επιπλέον, ο συνδυασμός της ικανοποίησης της αυξανόμενης ενεργειακής ζήτησης με τον αποτελεσματικό περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της, αποτελεί μία από τις κύριες αλληλένδετες διαστάσεις της σύγχρονης πρόκλησης που αντιμετωπίζει ο 21ος αιώνας. Διεθνώς, οι εθνικές κυβερνήσεις ασχολούνται εντατικά με τη διαμόρφωση νομοθετικών πλαισίων και πολιτικών παρεμβάσεων που στοχεύουν στην προώθηση βιώσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενσωματώνοντας καινοτόμες τεχνολογικές λύσεις για την εξασφάλιση περιβαλλοντικής προστασίας. Είναι σημαντικό να αναπτυχθούν βιώσιμες ενεργειακές πολιτικές και να δοθούν σχετικές και κατάλληλες συστάσεις πολιτικής για τους τελικούς χρήστες [45]. Ωστόσο, εξίσου σημαντική είναι η δημιουργία και η ενίσχυση ενεργειακών αγορών που προωθούν την ενσωμάτωση των ΑΠΕ και διασφαλίζουν την ενεργειακή ασφάλεια. Οι ενεργειακές αγορές επιτρέπουν τη διασύνδεση παραγωγών και καταναλωτών, διευκολύνοντας την εμπορία ενέργειας από διάφορες πηγές. Αυτό ενισχύει τον ανταγωνισμό, μειώνει τις τιμές και προωθεί την καινοτομία. Η ύπαρξη οργανωμένων αγορών ενέργειας συμβάλλει στη σταθερότητα του εφοδιασμού, επιτρέποντας την καλύτερη διαχείριση της προσφοράς και της ζήτησης [77].

Οι ενεργειακές κοινότητες αποτελούν βασικό πυλώνα για τη σταθερή και ολοκληρωμένη διαχείριση ενέργειας σε τοπικό επίπεδο, υποστηρίζοντας την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών, όπως ηλιακής και αιολικής ενέργειας. Μέσω έξυπνων δικτύων, οι κοινότητες αυτές ενεργοποιούν αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ μελών, διευκολύνοντας τη δυναμική αλληλεπίδραση παραγωγών-καταναλωτών και δημιουργώντας ανθεκτικές, αποκεντρωμένες δομές. Αυτό επιτρέπει τη βέλτιστη τοπική χρήση ενέργειας, μειώνοντας την εξάρτηση από κεντρικά δίκτυα και ενισχύοντας την αυτονομία της κοινότητας [54].

Το νομικό και ρυθμιστικό πλαίσιο είναι καθοριστικό για την ανάπτυξη τέτοιων κοινοτήτων. Χωρίς στοχευμένες πολιτικές, κίνητρα και ευέλικτους κανόνες, η δημιουργία συλλογικών μοντέλων παραγωγής-κατανάλωσης ανανεώσιμης ενέργειας αποκλείεται. Ιδιαίτερα, τεχνολογίες όπως το blockchain και τα smart contracts μπορούν να ενισχύσουν τη διαφάνεια και την εμπιστοσύνη εντός των κοινοτήτων, διευκολύνοντας την αυτοματοποιημένη διαχείριση ενεργειακών ροών και την εμπορία πλεονάζουσας ενέργειας μεταξύ μελών [5].

Μέσω της συλλογικής δράσης, οι ενεργειακές κοινότητες προσφέρουν μια βιώσιμη εναλλακτική στην παραδοσιακή ενεργειακή οικονομία. Ενώνουν πολίτες, επιχειρήσεις και δημόσιους φορείς σε κοινά έργα ανανεώσιμων πηγών, εξασφαλίζοντας τόσο την κάλυψη τοπικών αναγκών όσο και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Αυτό το μοντέλο ανοίγει τον δρόμο για μια κοινωνία που βασίζεται σε αποκεντρωμένη, δίκαιη και ανθεκτική ενέργεια, όπου η παραγωγή και η κατανάλωση γίνονται συλλογική ευθύνη [27].

3. Νομοθετικό Πλαίσιο Ενεργειακών Κοινοτήτων

3.1 Ευρωπαϊκό Νομοθετικό Πλαίσιο

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει αναπτύξει σταδιακά ένα δυναμικό νομοθετικό πλαίσιο για την προώθηση των ενεργειακών κοινοτήτων, με κύριους άξονες τη βιωσιμότητα, την αποκέντρωση και τη δημοκρατικοποίηση των ενεργειακών συστημάτων. Η νομοθετική πορεία ξεκίνησε το 2018 με την υιοθέτηση της Οδηγίας (ΕΥ) 2018/2001 (RED II) ως μέρος του Πακέτου Καθαρής Ενέργειας. Αυτή η οδηγία έθεσε τα θεμέλια για τις Ανανεώσιμες Ενεργειακές Κοινότητες (RECs) και τις Κοινότητες Ενεργειακών Πολιτών (CECs), καθορίζοντας ότι πρόκειται για ομάδες πολιτών, δημοτικών αρχών ή μικρών επιχειρήσεων με περιβαλλοντικούς, κοινωνικούς ή οικονομικούς στόχους, χωρίς κερδοσκοπικό χαρακτήρα [86]. Η RED II ενίσχυσε τη δυνατότητα των κοινοτήτων να παράγουν, καταναλώνουν και πωλούν ανανεώσιμη ενέργεια, ενώ υποχρέωσε τα κράτη μέλη να εξαλείψουν διοικητικά εμπόδια και να θεσπίσουν οικονομικά κίνητρα. Το 2019, η ΕΕ εμπλούτισε το πλαίσιο με την οδηγία (ΕΕ) 2019/944 (IEMD) και τη δέσμη μέτρων «Καθαρή ενέργεια για όλους τους Ευρωπαίους», η οποία ενίσχυσε τη συμμετοχή των πολιτών στις αγορές ενέργειας και επέκτεινε τις κοινοτικές δραστηριότητες, όπως η συλλογική αυτοκατανάλωση και η διαχείριση της ζήτησης [86]. Η IEMD αναγνώρισε τις ενεργειακές κοινότητες ως νομικές οντότητες, επιτρέποντάς τους να συνεργάζονται με τα δίκτυα διανομής ή να λειτουργούν ανεξάρτητα.

Το 2023, εξέδωσε την οδηγία (ΕΕ) 2023/2411, RED III, η οποία αύξησε περαιτέρω τους

στόχους για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε 45% έως το 2030 και ενίσχυσε τον ρόλο των ενεργειακών κοινοτήτων, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στη συμμετοχή περιθωριοποιημένων ομάδων και στη χρηματοδότηση [96]. Η RED III εισήγαγε νέους μηχανισμούς για την αντιμετώπιση της γραφειοκρατίας και την ενίσχυση της τοπικής διακυβέρνησης, πιστοποιώντας περαιτέρω τη συνεχή δέσμευση της ΕΕ για μια δίκαιη ενεργειακή μετάβαση [62]. Παρά τις προσπάθειες εναρμόνισης από την ΕΕ, τα κράτη-μέλη παρουσιάζουν διαφορετικούς βαθμούς προσαρμογής. Για παράδειγμα, χώρες όπως η Γερμανία και οι Κάτω Χώρες έχουν υιοθετήσει προοδευτικές πολιτικές που διευκολύνουν τις ενεργειακές κοινότητες [73], ενώ άλλες, όπως η Ιταλία και η Σουηδία, υστερούν λόγω ανεπαρκών κανονιστικών πλαισίων. Στη Σουηδία, τα νομικά μέτρα συχνά κατακρίνονται για την ασαφή και ανεπαρκή εξασφάλιση της πλήρους συμμετοχής των νοικοκυριών, ιδίως των περιθωριοποιημένων [57]. Στην Ιταλία, παρά την άνθιση των τοπικών πρωτοβουλιών, η υφιστάμενη νομοθεσία παρέχει ελάχιστες και ανεπαρκείς εγγυήσεις για τη μακροχρόνια βιωσιμότητα των ενεργειακών κοινοτήτων [17].

Η συγκριτική ανάλυση μεταξύ πρωτοπόρων χωρών, όπως οι Κάτω Χώρες, και χωρών που καθυστερούν, όπως η Ιταλία, καταδεικνύει σαφείς διαφορές στην υλοποίηση. Ενώ η προσέγγιση που υιοθέτησαν οι Κάτω Χώρες είναι φιλική προς την κοινότητα και περισσότερο καινοτόμος, η Ιταλία χρειάζεται σημαντικές θεσμικές μεταρρυθμίσεις και καλύτερη συνεργασία μεταξύ δημοτικών και εθνικών πολιτικών [62]. Επιπλέον, οι συστημικές προσεγγίσεις στην έρευνα δίνουν έμφαση στις κοινωνικές, οικονομικές και τεχνικές πτυχές της υλοποίησης. Όσον αφορά τις ενεργειακές κοινότητες, έχει προταθεί ότι οι βασικοί παράγοντες είναι οι μέθοδοι συμμετοχής, η εξεύρεση πόρων και η ευαισθητοποίηση της κοινότητας [42]. Επιτυχημένες εμπειρίες από διάφορες χώρες επιβεβαιώνουν ότι η ανάπτυξή τους συνδέεται με την αποτελεσματική διαχείριση πολιτικών και προβλημάτων διακυβέρνησης γενικότερα [43].

Το νομοθετικό πλαίσιο της ΕΕ προσφέρει ένα ολοκληρωμένο σύνολο εργαλείων και οδηγιών για τη δημιουργία ενεργειακών κοινοτήτων. Εξασφαλίζει τη βιωσιμότητα, την αποκέντρωση της παραγωγής ενέργειας και την κοινωνική συνοχή, προωθώντας παράλληλα την καινοτομία στα τοπικά ενεργειακά συστήματα. Η πλήρης υλοποίηση αυτού του πλαισίου εξαρτάται από την ικανότητα των κρατών-μελών να προσαρμόσουν τις εθνικές τους πολιτικές στις τοπικές συνθήκες και να δημιουργήσουν ένα ευνοϊκό περιβάλλον που ενισχύει τη συμμετοχή και την ανάπτυξη ενεργειακών κοινοτήτων [62][17].

3.2 Νομοθετικό Πλαίσιο για Ενεργειακές Κοινότητες στην Ελλάδα

Η Ελλάδα, μέσω της εναρμόνισης του νομοθετικού της πλαισίου με τις ευρωπαϊκές οδηγίες, διαθέτει πλέον έναν ισχυρό θεσμικό μηχανισμό για τη λειτουργία και την ανάπτυξη ενεργειακών κοινοτήτων, ο οποίος αποτελεί σημαντικό εφόδιο για την επιτάχυνση της βιώσιμης ενεργειακής μετάβασης. Θεμέλιο αυτού του πλαισίου είναι ο Νόμος 4513/2018 [28], ο οποίος εισήγαγε τις ενεργειακές κοινότητες ως αστικούς συνεταιρισμούς με στόχο την ενίσχυση της κοινωνικής και αλληλέγγυας οικονομίας στον ενεργειακό τομέα. Ο νόμος αυτός δημιούργησε ένα υποστηρικτικό πλαίσιο που επέκτεινε το πεδίο δραστηριοτήτων των ενεργειακών κοινοτήτων, καλύπτοντας από την παραγωγή, τη διανομή και την προμήθεια ενέργειας έως την ενεργειακή αποδοτικότητα και τη διαχείριση πόρων. Ιδιαίτερη πρόβλεψη δόθηκε στην ενίσχυση της συμμετοχής των τοπικών αρχών και των πολιτών, με στόχο την ενίσχυση της τοπικής ενεργειακής ασφάλειας και βιωσιμότητας. Το πλαίσιο αυτό καθιέρωσε την αρχή της αποκεντρωμένης παραγωγής και διαχείρισης ενέργειας, όπου η ενεργή συμμετοχή των πολιτών και των τοπικών φορέων στη μετάβαση ενέργειας καθίσταται εφικτή, τοποθετώντας την Ελλάδα σε ευθυγράμμιση με τις ευρωπαϊκές κατευθυντήριες γραμμές για τη βιωσιμότητα της ενέργειας.

Η θέσπιση του Νόμου 4513/2018 ενισχύθηκε περαιτέρω το 2019 με την εισαγωγή του Εικονικού Ενεργειακού Συμψηφισμού μέσω του νόμου ΥΠΕΝ/ΔΑΠΕΕΚ/15084/382/2019 [29]. Η βελτίωση αυτή επέτρεψε τον συμψηφισμό της ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές με την ενέργεια που καταναλώνεται σε διαφορετικές τοποθεσίες. Αυτή η δυνατότητα ήταν ιδιαίτερα κρίσιμη για την ενίσχυση της ενεργειακής αυτονομίας, των αγροτικών συνεταιρισμών και την υποστήριξη των τοπικών κοινοτήτων. Με τον Εικονικό Ενεργειακό Συμψηφισμό, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να αξιοποιηθούν από πολίτες και τοπικούς φορείς, ακόμα και αν τα σημεία παραγωγής και κατανάλωσης είναι γεωγραφικά απομακρυσμένα. Η αποκεντρωμένη διαχείριση ενέργειας έκανε ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός χάρη σε αυτήν τη δυνατότητα.

Με τον Νόμο 5037/2023 [30], το νομικό πλαίσιο για τις ενεργειακές κοινότητες εκσυγχρονίστηκε περαιτέρω. Νέες βελτιώσεις και κίνητρα επιτάχυναν τη διαδικασία της ενεργειακής μετάβασης. Ίσως οι πιο σημαντικές καινοτομίες αυτού του νόμου αφορούν την πρόσβαση σε χρηματοδοτικά εργαλεία και επιδοτήσεις για έργα στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και την απλοποίηση των κανόνων που σχετίζονται με την ίδρυση και λειτουργία ενεργειακών κοινοτήτων. Επιπλέον, ο νόμος έδωσε έμφαση στις καινοτόμες τεχνολογίες, όπως τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και οι έξυπνες ενεργειακές λύσεις. Προσέφερε περισσότερες ευκαιρίες για ευρύτερη συμμετοχή, επιτρέποντας σε πολίτες, τοπικές αρχές και επιχειρήσεις να συνεργάζονται σε μεγάλης κλίμακας συνεταιριστικά ενεργειακά

έργα, δημιουργώντας ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη ενεργειακών κοινοτήτων σε όλη τη χώρα.

Οι τρεις αυτοί νόμοι - 4513/2018, ΥΠΕΝ/ΔΑΠΕΕΚ/15084/382/2019 και 5037/2023 - αποτελούν μέρος ενός ευρύτερου πλαισίου που στοχεύει στην αύξηση της ενεργειακής αυτονομίας, την ενίσχυση της βιωσιμότητας και τη δημιουργία δυνατοτήτων για ενεργή συμμετοχή των πολιτών στη μετάβαση ενέργειας. Το δίκτυο αυτής της νομοθεσίας έχει αναδείξει την Ελλάδα ως μια χώρα που δεσμεύεται στις ευρωπαϊκές κατευθυντήριες γραμμές, ενώ ταυτόχρονα εξοπλίζει τους πολίτες και τις τοπικές αρχές με τα μέσα για ενεργό ρόλο στη διαμόρφωση ενός βιώσιμου ενεργειακού μέλλοντος.

Επιπλέον, η Υπουργική Απόφαση ΥΠΕΝ/ΔΑΠΕΕΚ/93976/2772 [31], που δημοσιεύθηκε στο ΦΕΚ Β' 5074 στις 5 Σεπτεμβρίου 2024, αποτελεί ένα ακόμη σημαντικό βήμα προς τη συνεχή ανάπτυξη του νομοθετικού πλαισίου της χώρας μας για τη διάχυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και τη βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση. Η πρωτοποριακή μέθοδος που εισάγει, η καθαρή τιμολόγηση (net billing) με δυναμικά χαρακτηριστικά όπως η εικονική καθαρή τιμολόγηση (virtual net billing), ευθυγραμμίζεται πλήρως με τις σύγχρονες διεθνείς πρακτικές, καθιστώντας την Ελλάδα ακόμη πιο ανταγωνιστική στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης. Βασιζόμενη στην καθαρή τιμολόγηση ως βασικό μηχανισμό ενίσχυσης, δίνεται στους καταναλωτές η δυνατότητα να αφαιρούν από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο την αξία της παραγόμενης ενέργειας ανά χρονική στιγμή – δηλαδή κάθε 15 λεπτά λειτουργίας του συστήματος. Η πλεονάζουσα ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο έχει αξία ισοδύναμη με την τιμή της χονδρικής αγοράς, παρέχοντας οικονομικά κίνητρα για επενδύσεις σε ανανεώσιμες τεχνολογίες τόσο σε επίπεδο νοικοκυριών όσο και επιχειρήσεων. Το σύστημα αυτό ενισχύει την αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, μειώνει την εξάρτηση από τα κεντρικά δίκτυα και συμβάλλει στη συνολική μείωση του κόστους ενέργειας.

Ακολουθεί ο πίνακας που συνοψίζει τις διαφορές μεταξύ Net Billing και Net Metering:

Χαρακτηριστικά	Net Billing	Net Metering
Έννοια	Αντιστάθμιση κατανάλωσης ενέργειας με την αξία παραγόμενης ενέργειας, διακανονισμός σε πραγματικό χρόνο (ανά 15 λεπτά)	Αντιστάθμιση ενεργειακής κατανάλωσης με πιστώσεις πλεονάζουσας παραγόμενης ενέργειας, βάση κύκλου χρέωσης
Υπερβάλλουσα ενέργεια	Η πλεονάζουσα ενέργεια που αποστέλλεται στο δίκτυο πιστώνεται στη χονδρική τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας.	Η πλεονάζουσα ενέργεια πιστώνεται στη λιανική τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας.
Οικονομικά κίνητρα	Οικονομικά κίνητρα για επενδύσεις σε τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας/αποζημίωση σε πραγματικό χρόνο	Εφαρμογή πιστώσεων με την πάροδο του χρόνου, λιγότερο αποδοτική οικονομικά από την τιμολόγηση σε πραγματικό χρόνο
Ευελιξία	Πιο δυναμική τιμολόγηση και ευελιξία με τη χρήση και την παραγωγή ενέργειας	Σύστημα πιστώσεων με καθορισμένη τιμολόγηση για ηλεκτρική ενέργεια
Εναρμόνιση με διεθνείς πρακτικές	Πλήρης ευθυγράμμιση με διεθνείς πρακτικές αποζημίωσης καθαρής ενέργειας	Λιγότερο σύγχρονες πρακτικές, μειωμένη ανταγωνιστικότητα σε διεθνή κλίμακα για καθαρή ενέργεια

Πίνακας 2. Διαφορές μεταξύ Net Billing και Net Metering

Η νέα αυτή ρύθμιση επιτρέπει την ενεργή συμμετοχή των πολιτών και ενσωματώνει τις ευρωπαϊκές κατευθυντήριες γραμμές για τη βιώσιμη ανάπτυξη, ευθυγραμμίζοντας το ελληνικό πλαίσιο με τους στόχους της ΕΕ. Ωστόσο, η εφαρμογή αυτού του συστήματος συνοδεύεται από προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Στην καθαρή τιμολόγηση για παράδειγμα, ο καταναλωτής αναμένεται να τροποποιήσει την ενεργειακή του συμπεριφορά ώστε να αξιοποιήσει τα οφέλη. Συνεπώς, η προσαρμογή στη χρήση των ηλεκτρικών συσκευών και μια βασική κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος είναι βασικά στοιχεία για την

επιτυχή αξιοποίηση των ευκαιριών. Η εκπαίδευση και η ενημέρωση αποτελούν κρίσιμα σημεία για την κατανόηση των διαθέσιμων επιλογών.

Επιπλέον, ένα πιθανό εμπόδιο αφορά το κόστος εγκατάστασης, καθώς τα συστήματα καθαρής τιμολόγησης απαιτούν ειδικούς μετρητές και, σε πολλές περιπτώσεις, την αναβάθμιση της υπάρχουσας υποδομής. Τα κόστη αυτά ενδέχεται να είναι απαγορευτικά για ορισμένα νοικοκυριά ή μικρές επιχειρήσεις. Παράλληλα, οι οικονομικές αβεβαιότητες, όπως οι διακυμάνσεις στις τιμές της χονδρικής αγοράς που καθορίζουν την αποζημίωση για την πλεονάζουσα ενέργεια, ενδέχεται να δημιουργήσουν ανησυχίες στους καταναλωτές. Η αστάθεια στις τιμές μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τις προωλέψεις του εισοδήματος από την πώληση της πλεονάζουσας ενέργειας.

Σε κάθε περίπτωση, η εισαγωγή της καθαρής τιμολόγησης θεωρείται καθοριστικό βήμα προς την πλήρη αξιοποίηση των εναλλακτικών μορφών ενέργειας στην Ελλάδα. Ενισχύει τη συμμετοχή των πολιτών στη μετάβαση ενέργειας, μειώνοντας περαιτέρω την εξάρτηση από τα κεντρικά συστήματα και προωθώντας τη βιώσιμη χρήση της ενέργειας. Μέσω αυτής της καινοτομίας, η ελληνική νομοθεσία συνεχίζει να εξελίσσεται, υποστηρίζοντας την ανάπτυξη της πράσινης ενέργειας, που ενδυναμώνει την κοινωνία και την οικονομία.

3.3 Παραδείγματα ενεργειακών κοινοτήτων

3.3.1 ChalkiOn: Ενεργειακή Κοινότητα Χάλκης

Η Ενεργειακή Κοινότητα της Χάλκης, η οποία ιδρύθηκε το 2021, αποτελεί το πρώτο μοντέλο συλλογικής ενεργειακής δράσης στα Δωδεκάνησα. Με έδρα το ομώνυμο νησί, η κοινότητα δημιουργήθηκε με πρωτοβουλία του Δήμου Χάλκης, ο οποίος συμμετέχει ενεργά ως ιδρυτικό μέλος. Βασικός στόχος της είναι να ενισχύσει τη βιωσιμότητα της περιοχής μέσω οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης που αντλείται από τις ανάγκες των ντόπιων. Μεταξύ των κύριων προτεραιοτήτων της είναι:

- Η προώθηση καινοτόμων λύσεων στον τομέα της ενέργειας,
- Η ενδυνάμωση της αλληλέγγυας οικονομίας,
- Η καταπολέμηση της ενεργειακής φτώχειας με δράσεις παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής ενέργειας σε τοπικό επίπεδο,
- Η ανάπτυξη νέων υπηρεσιών ενέργειας για κατοίκους και επισκέπτες, με έμφαση στην ενεργειακή απόδοση και την περιβαλλοντική προστασία.

Πυρήνας λειτουργίας της κοινότητας είναι ένα ηλιακό πάρκο ισχύος 1 MW, που εγκαταστάθηκε το 2021 και καλύπτει πλήρως τις ηλεκτρικές ανάγκες του νησιού [12]. Η πρωτοβουλία αυτή εντάσσεται στην εθνική στρατηγική της Ελλάδας για μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές, με πάνω από 1.400 ενεργειακές κοινότητες να δρουν πλέον σε όλη τη χώρα, πολλές από τις οποίες βασίζονται σε φωτοβολταϊκά συστήματα.

3.3.2 WEnCoop/ Ενεργειακή Κοινότητα Γυναικών

Η WEnCoop, η πρώτη Ενεργειακή Κοινότητα με Γυναικεία Ηγεσία στην Ευρώπη ιδρύθηκε το 2021 από Ελληνίδες επιχειρηματίες διαφορετικών κλάδων, αποτελώντας σύμβολο καινοτομίας και κοινωνικής προόδου. Η πρωτοβουλία που αναγνωρίζεται για την προβολή του ρόλου των γυναικών στην ενεργειακή μετάβαση [76], λειτουργεί υπό την αιγίδα του Συνδέσμου Γυναικών Επιχειρηματιών Ελλάδας (Σ.Γ.Ε.Ε.), επιβεβαιώνοντας τη δράση του για την ισορροπία των φύλων και την ενδυνάμωση γυναικών στη βιώσιμη ανάπτυξη.

3.3.3 Minoa Energy/Κρήτη

Η Minoa Energy, η πρώτη Ενεργειακή Κοινότητα της Κρήτης και της νησιωτικής Ελλάδας, δραστηριοποιείται από το 2019 με έδρα το Αρκαλοχώρι (Δήμος Μινώα Πεδιάδος). Αποτελείται από 460 μέλη, με πλειοψηφία από την Κρήτη και συμμετοχή πολιτών, δήμων και φορέων από όλη τη χώρα, συμπεριλαμβανομένης της Περιφέρειας Κρήτης. Το 2022, η κοινότητα ολοκλήρωσε την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού πάρκου ισχύος 405 kW, το οποίο τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια, μέσω συστήματος συμψηφισμού, τα μέλη της, με ιδιαίτερη έμφαση στην κάλυψη αναγκών της Περιφέρειας [49].

Η Minoa Energy συμμετέχει ενεργά σε ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες, όπως το πρόγραμμα «Νησιά της ΕΕ με Καθαρή Ενέργεια», με στόχο την προώθηση της ενεργειακής δημοκρατίας και της μετάβασης σε τοπικό επίπεδο. Συνεργάζεται με δήμους, θεσμικούς φορείς και την Περιφέρεια Κρήτης για την ενίσχυση της συμμετοχής πολιτών στην παραγωγή και διαχείριση ανανεώσιμης ενέργειας, δημιουργώντας πρότυπα για κοινότητες σε άλλα νησιά.

3.3.4 Collective Energy Coop/ Αττική

Η Collective Energy Coop, ένα συνεταιριστικό σχήμα μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα στην Αττική, αναλαμβάνει από το 2021 την ανάπτυξη βιώσιμων ενεργειακών υποδομών για τα μέλη της, ισορροπώντας μεταξύ κοινωνικών αναγκών και

οικονομικής βιωσιμότητας. Το έργο της περιλαμβάνει 47 νοικοκυριά-μέλη, 2 αθηναϊκούς συνεταιρισμούς και 2 ευάλωτα νοικοκυριά από τον Δήμο Μοσχάτου-Ταύρου, δημιουργώντας ένα δίκτυο αλληλεγγύης και ενεργειακής αυτονομίας.

Το ενεργειακό έργο της ολοκληρώθηκε τον Ιανουάριο 2024, ενώ η σύνδεσή του με το δίκτυο πραγματοποιήθηκε τον Φεβρουάριο του ίδιου έτους, εξασφαλίζοντας πλέον την αδιάλειπτη παραγωγή καθαρής ενέργειας για τις τοπικές ανάγκες [14]. Παράλληλα, η Collective Energy Coop συνεργάζεται με ερευνητικούς φορείς και οργανισμούς για την προώθηση της αλληλέγγυας οικονομίας, την καταπολέμηση της ενεργειακής φτώχειας και τη διασφάλιση της δημοκρατίας στην ενεργειακή διαχείριση.

4. Energy Marketplaces

4.1. Ορισμός των energy marketplaces

Οι πλατφόρμες συναλλαγών ενέργειας αποτελούν ψηφιακά εργαλεία που διευκολύνουν την άμεση ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ παραγωγών, καταναλωτών και υβριδικών οντοτήτων (π.χ prosumers), χωρίς την ανάγκη συγκεντρωτικών μεσών. Στόχος τους είναι η δημιουργία ενός διαφανούς, ανταγωνιστικού και αποκεντρωμένου πλαισίου εμπορίας ενέργειας, προσβάσιμου ανεξάρτητα από τη γεωγραφική θέση των συμμετεχόντων. Αυτές οι πλατφόρμες αναδεικνύουν μια ριζική αλλαγή από τα παραδοσιακά ενεργειακά συστήματα, ενσωματώνοντας αρχές βιωσιμότητας, αποδοτικότητας και ενδυνάμωσης των χρηστών μέσω της αυτονομίας τους.

Λειτουργία και Συμμετέχοντες:

Μια ενεργειακή πλατφόρμα λειτουργεί ως αποκεντρωμένος χώρος συναλλαγών, όπου συμμετέχουν ποικίλοι φορείς:

- Παραγωγοί: Ατομικοί ή συλλογικοί φορείς που παράγουν ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές (π.χ., ηλιακά πάρκα).
- Καταναλωτές: Νοικοκυριά, επιχειρήσεις ή δημόσιοι φορείς που αγοράζουν ενέργεια.
- Prosumers: Υβριδικοί φορείς που ταυτόχρονα παράγουν και καταναλώνουν ενέργεια, πωλώντας πλεονάσματα στην πλατφόρμα.

Η διαφοροποίηση αυτή επιτρέπει την άμεση διαπραγμάτευση σε πραγματικό χρόνο,

με βάση δυναμικές τιμές που καθορίζονται από την προσφορά και τη ζήτηση. Σε αντίθεση με τις συμβατικές αγορές, όπου κυριαρχούν μεγάλες εταιρείες, οι πλατφόρμες αυτές δίνουν προτεραιότητα σε μικρό-παραγωγούς και τοπικές κοινότητες, μειώνοντας την εξάρτηση από κεντρικά δίκτυα.

Τεχνολογική Υποδομή:

Η λειτουργία των πλατφορμών στηρίζεται σε τεχνολογίες αιχμής:

1. Blockchain: Δημιουργεί ασφαλή και διαφανή ηλεκτρονικά μητρώα συναλλαγών, χωρίς τη διαμεσολάβηση τρίτων. Κάθε συναλλαγή καταγράφεται ανεπηρέαστα, εξασφαλίζοντας εμπιστοσύνη μεταξύ των μελών.
2. Έξυπνες Συμβάσεις (Smart Contracts): Αυτοματοποιούν συναλλαγές όταν πληρούνται προκαθορισμένες συνθήκες (π.χ., όταν η παραγωγή ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή).
3. Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT): Συλλέγει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από έξυπνους μετρητές και συσκευές, βελτιστοποιώντας τη διαχείριση ενέργειας.
4. Μηχανική Μάθηση (ML): Προβλέπει ζήτηση και παραγωγή ενέργειας, βελτιστοποιώντας την κατανομή πόρων και ελαχιστοποιώντας απώλειες.

Οφέλη και Προοπτικές:

- Οικονομικές Ευκαιρίες: Οι χρήστες μπορούν να πωλούν πλεονάζουσα ενέργεια ή να συμμετέχουν σε συλλογικά έργα, δημιουργώντας νέες πηγές εσόδων.
- Ενεργειακή Δημοκρατία: Ενδυνάμωση καταναλωτών και μικρο-παραγωγών μέσω αυτονομίας και ελέγχου των ενεργειακών ροών.
- Βιωσιμότητα: Ενίσχυση ανανεώσιμων πηγών και μείωση του αποτυπώματος άνθρακα λόγω αποκεντρωμένης παραγωγής.

4.2 Σκοπός και Ρόλος των Energy Marketplaces στη Βιώσιμη Ενεργειακή Μετάβαση

Οι πλατφόρμες συναλλαγών ενέργειας ξεχωρίζουν ως ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία για την υποστήριξη της μετάβασης, επιτρέποντας την ισορροπημένη

ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε αποκεντρωμένα δίκτυα. Συνδέοντας μικρές μονάδες παραγωγής, για παράδειγμα, φωτοβολταϊκά πάνελ και αιολικά πάρκα με καταναλωτές και επαγγελματίες καταναλωτές, οι εν λόγω πλατφόρμες επιτρέπουν τη διαχείριση της ζήτησης και της προσφοράς σε πραγματικό χρόνο, βελτιστοποιώντας την αποδοτικότητα, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες μεταφοράς και τη συνολική ασφάλεια του δικτύου. Με τέτοιες πλατφόρμες διευκολύνεται η ταχεία ανταπόκριση στις διακυμάνσεις της ζήτησης και της παραγόμενης παραγωγής, διασφαλίζεται η ασφαλής παράδοση ενέργειας και υποστηρίζεται η αποκεντρωμένη παραγωγή και εμπορία.

Τέτοιες πλατφόρμες επιτρέπουν τον εκδημοκρατισμό της ενέργειας μέσω της άμεσης συμμετοχής των πολιτών και των κοινοτήτων στις διαδικασίες μετάβασης, ενισχύοντας την πρόσβαση στις ανανεώσιμες πηγές και τη δημιουργία βιώσιμων μορφών παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης ενέργειας με χαμηλές εκπομπές άνθρακα. Ταυτόχρονα, τα δίκτυα συναλλαγών δρουν καταλυτικά για την επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας, με ένα μείγμα οικονομικής αποδοτικότητας, διατήρησης του περιβάλλοντος και κοινωνικής δραστηριοποίησης. Οι πλατφόρμες συναλλαγών ενέργειας παγκοσμίως αναδεικνύονται σε σημαντικό εργαλείο για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας, την προώθηση της χρήσης καθαρότερων ενεργειακών πηγών και του αποτελεσματικού, δίκαιου μέλλοντος στην παροχή ενέργειας.

4.3 Τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα Energy Marketplaces

Οι πλατφόρμες συναλλαγών ενέργειας αποτελούν κρίσιμο στοιχείο των σύγχρονων αποκεντρωμένων συστημάτων, καθώς διευκολύνουν την άμεση εμπορία ενέργειας (P2P), την ενσωμάτωση κατανεμημένων ανανεώσιμων πόρων και τη βελτίωση της λειτουργικής αποτελεσματικότητας. Η λειτουργικότητά τους στηρίζεται σε συνδυασμό καινοτόμων τεχνολογιών, που αντιμετωπίζουν προκλήσεις όπως η επεκτασιμότητα, η διαφάνεια δεδομένων, η ασφάλεια και η δυνατότητα απόκρισης σε πραγματικό χρόνο. Η παρούσα ανάλυση εστιάζει στις βασικές τεχνολογικές αρχιτεκτονικές που υιοθετούνται από αυτές τις πλατφόρμες, αναδεικνύοντας τον ρόλο τους στη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας, της δημοκρατίας και της βιωσιμότητας των ενεργειακών συναλλαγών.

4.3.1 Τεχνολογία Κατανεμημένων Βιβλίων (DLT)

Το κατανεμημένο λογιστικό βιβλίο ή τεχνολογία κατανεμημένου λογιστικού βιβλίου,

είναι μια ειδική μορφή κατανεμημένης βάσης δεδομένων που προϋποθέτει την πιθανή παρουσία κακόβουλων χρηστών εντός του ομότιμου δικτύου του συστήματος. Η τεχνολογία κατανεμημένων βιβλίων (Distributed Ledger Technology - DLT) μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένας μηχανισμός συναίνεσης για αντιγραμμένα, κοινόχρηστα και συγχρονισμένα ψηφιακά δεδομένα που κατανέμονται σε πολλές γεωγραφικές τοποθεσίες. Οι DLTs μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις ομάδες με βάση τις λειτουργίες ανάγνωσης και εγγραφής. Η πρόσβαση στο κατανεμημένο βιβλίο μπορεί να είναι είτε δημόσια είτε ιδιωτική για ανάγνωση, αν και η εγγραφή στο βιβλίο μπορεί να απαιτεί εξουσιοδότηση ή όχι. Αυτό μας φέρνει στις τέσσερις κατηγορίες τεχνολογιών κατανεμημένων βιβλίων: δημόσιες χωρίς άδεια, ιδιωτικές χωρίς άδεια, δημόσιες με άδεια και ιδιωτικές με άδεια [26]. Δύο από αυτές τις τέσσερις κατηγορίες κυριαρχούν στις εφαρμογές των τεχνολογιών κατανεμημένων βιβλίων στον πραγματικό κόσμο. Η αρχική κατηγορία περιλαμβάνει τις τεχνολογίες κατανεμημένων βιβλίων χωρίς δημόσια άδεια (DLTs), με παραδείγματα το Bitcoin και το Ethereum . Αυτή η κατηγορία τεχνολογιών κατανεμημένου βιβλίου χρησιμοποιείται συνήθως ως βάση για τα κρυπτονομίσματα και παρέχει στους χρήστες ψευδωνυμία. Η δεύτερη κατηγορία, οι τεχνολογίες κατανεμημένων βιβλίων με ιδιωτική άδεια (DLTs) , χρησιμοποιείται κυρίως σε επιχειρηματικό περιβάλλον. Σε αντίθεση με τις δημόσιες αντίστοιχες τεχνολογίες, οι τεχνολογίες κατανεμημένων βιβλίων με ιδιωτική άδεια (DLTs) παρέχουν βελτιωμένο έλεγχο πρόσβασης στα δεδομένα, μεγαλύτερη ιδιωτικότητα, ανώτερη απόδοση συναλλαγών, βελτιωμένη κλιμάκωση και μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα, αν και απαιτούν την αυθεντικοποίηση και εξουσιοδότηση των χρηστών. Τα κυριότερα παραδείγματα τεχνολογιών κατανεμημένων βιβλίων με ιδιωτική άδεια είναι το Hyperledger Fabric και το R3 Corda. Ο τομέας της ενέργειας έχει πρόσφατα παρουσιάσει σημαντική αύξηση του ενδιαφέροντος για την εφαρμογή τεχνολογιών κατανεμημένων βιβλίων (DLT). Η εξέλιξη αυτή διερευνήθηκε διεξοδικά και αναφέρθηκε σε μια εκτεταμένη μελέτη που διεξήχθη από τους [41].

4.3.2 Blockchain Technology

Το blockchain είναι μια μορφή κατανεμημένου ηλεκτρονικού βιβλίου που μπορεί να αποθηκεύσει πολλούς τύπους πληροφοριών και να καθιερώσει πρωτόκολλα για την ενημέρωση αυτών των πληροφοριών. Επεκτείνεται διαρκώς όταν μπλοκ (αρχεία δεδομένων, όπως συναλλαγές) προσαρτώνται και διασυνδέονται (αλυσιδωτά) με το προηγούμενο μπλοκ μέσω ενός κατακερματισμού, που παράγεται με την επεξεργασία του περιεχομένου του σχετικού μπλοκ μέσω μιας κρυπτογραφικής συνάρτησης. Μια βέλτιστη κρυπτογραφική συνάρτηση μπορεί να παράγει αποτελεσματικά έναν κατακερματισμό για οποιαδήποτε δεδομένη είσοδο, αν και είναι δύσκολο να ανακατασκευαστεί η είσοδος από τον κατακερματισμό. Επιπλέον, οποιεσδήποτε μεταβολές στα αρχικά δεδομένα θα πρέπει να παράγουν σημαντικές

και φαινομενικά άσχετες τροποποιήσεις [38]. Ως αποτέλεσμα είναι πρακτικά αδύνατο δύο διαφορετικές είσοδοι να αποδίδουν πανομοιότυπο κατακερματισμό. Η χρήση κρυπτογραφικών κατακερματισμών με αυτόν τον τρόπο απαιτεί ότι κάθε τροποποίηση σε μια καταχώρηση σε ένα προηγούμενο μπλοκ απαιτεί τροποποιήσεις και σε όλα τα επόμενα μπλοκ. Το λογιστικό βιβλίο πιστοποιείται και διατηρείται από ένα δίκτυο συμμετεχόντων (κόμβων) με βάση έναν καθορισμένο μηχανισμό συναίνεσης (μια συλλογή κανόνων που επιτρέπει στο δίκτυο να επιτύχει μια καθολική συμφωνία), εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για μια μοναδική κεντρική αρχή. Αρκετοί (αλλά όχι όλοι) κόμβοι διαθέτουν ένα πλήρες αντίγραφο ολόκληρης της βάσης δεδομένων [67].

4.3.3 Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT)

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) αποτελεί μια αναδυόμενη τεχνολογία που βασίζεται στο Διαδίκτυο για τη σύνδεση φυσικών συσκευών («πραγμάτων»), όπως οικιακών συσκευών ή βιομηχανικού εξοπλισμού. Με την ενσωμάτωση αισθητήρων και δικτύων επικοινωνίας, αυτές οι συσκευές συλλέγουν και μεταδίδουν δεδομένα, προσφέροντας υπηρεσίες που βελτιώνουν την καθημερινή ζωή. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η έξυπνη διαχείριση ενέργειας σε κτίρια, όπου το IoT επιτρέπει τη ρύθμιση της θέρμανσης, της ψύξης και του κλιματισμού (HVAC) με βάση πραγματικές ανάγκες, μειώνοντας το ενεργειακό κόστος [6].

Κατά τον σχεδιασμό μιας εφαρμογής IoT, η επιλογή των στοιχείων – όπως ο τύπος αισθητήρων, το πρωτόκολλο επικοινωνίας, τα συστήματα αποθήκευσης δεδομένων και οι υπολογιστικοί πόροι – πρέπει να ανταποκρίνεται ακριβώς στους στόχους της εφαρμογής. Για παράδειγμα μια πλατφόρμα IoT για έλεγχο HVAC απαιτεί περιβαλλοντικούς αισθητήρες (π.χ., θερμοκρασίας, υγρασίας) και αξιόπιστες τεχνολογίες επικοινωνίας (π.χ., LoRaWAN, Zigbee) για αδιάσπαστη λειτουργία.

Το IoT προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στον ενεργειακό τομέα: καταγράφει λεπτομερή δεδομένα για παραγωγή, κατανάλωση και αποθήκευση ενέργειας, τα οποία τροφοδοτούν δυναμικά συστήματα τιμολόγησης και μηχανισμούς απόκρισης στη ζήτηση (Demand Response). Παράλληλα, η δυνατότητα αποκεντρωμένης λήψης αποφάσεων – όπου συσκευές συντονίζονται αυτόνομα – διασφαλίζει ότι οι ενεργειακές συναλλαγές τηρούν τους περιορισμούς του δικτύου και τις συνθήκες της αγοράς [34]. Αυτή η τεχνολογία, με την ικανότητά της να συνδέει το φυσικό με το ψηφιακό κόσμο, αναδεικνύεται ως κρίσιμο εργαλείο για βιώσιμα και έξυπνα ενεργειακά συστήματα.

4.3.4 Τεχνητή Νοημοσύνη και Μηχανική Μάθηση

Αναμφισβήτητα, ο τομέας της ενέργειας είναι ένας τομέας όπου η AI και η ML μπορεί

να είναι πολύ ευεργετικά [89]. Η AI είναι ένας τεράστιος και αναπτυσσόμενος τομέας που διεισδύει σε όλα τα επιστημονικά πεδία και τα τελευταία χρόνια οι εφαρμογές της στα ενεργειακά συστήματα έχουν αποκτήσει μεγαλύτερη εστίαση. Είτε πρόκειται για την κατανάλωση ενέργειας είτε για τη μεταφορά της, η ύπαρξη ενός έξυπνου συστήματος διαχείρισης που μπορεί να αντιδράσει σε ξαφνικές αλλαγές στις εισροές (όπως η αύξηση/μείωση της ζήτησης) ή να προβλέψει το μέλλον μπορεί να αποβεί πολύ επωφελής, όπως για παράδειγμα η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της απαιτούμενης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής ορυκτών καυσίμων και της χρήσης των καυσίμων τους με την πρόβλεψη των διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή ή η αιολική, και της ζήτησης του δικτύου. Ένας τομέας στη χρήση της AI και της ML είναι η μοντελοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων [21]. Η κατανάλωση ενέργειας σε κτίρια είναι ένα δύσκολο έργο καθώς πολλοί παράγοντες, όπως οι φυσικές ιδιότητες του κτιρίου, οι καιρικές συνθήκες, ο εξοπλισμός στο εσωτερικό του κτιρίου και οι η συμπεριφορά των ενοίκων ως προς τη χρήση ενέργειας είναι δύσκολο να προβλεφθούν. Στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών, η AI εφαρμόζεται για την πρόβλεψη παραγωγής και τη βελτίωση της αποδοτικότητας. Για φωτοβολταϊκά συστήματα, αλγόριθμοι ML (π.χ. νευρωνικά δίκτυα) προβλέπουν την παραγωγή ενέργειας με βάση δεδομένα ηλιοφάνειας, θερμοκρασίας και σκίασης, βοηθώντας στη βέλτιστη τοποθέτηση πλαισίων ή στη ρύθμιση γωνιών πρόσπτωσης. Παρόμοιες τεχνικές χρησιμοποιούνται για ανεμογεννήτριες, όπου η πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου και φορτίου δικτύου αυξάνει την αξιοπιστία της ενεργειακής προσφοράς. Τέλος, η ML διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη βελτίωση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες ιόντων λιθίου. Μέσω ταξινόμησης και παλινδρόμησης δεδομένων, μοντέλα ML αναλύουν την απόδοση, τη διάρκεια ζωής και τη θερμική συμπεριφορά των μπαταριών, προσφέροντας προτάσεις για βέλτιστη χρήση ή ακόμη και ανακάλυψη νέων υλικών με υψηλή χωρητικότητα [40]. Επιπλέον, οι αλγόριθμοι βελτιστοποιούν τη χρήση αποθηκευμένης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, ελαχιστοποιώντας την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα κατά τη διακοπή ανανεώσιμων πηγών.

4.3.5 Smart Contracts

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό ορισμένων τεχνολογιών blockchain είναι η ικανότητά τους να αναπτύσσουν και να εκτελούν κωδικοποιημένα σενάρια, γνωστά ως έξυπνες συμβάσεις. Τα σενάρια, λόγω της αμετάβλητης φύσης της τεχνολογίας blockchain θεωρούνται αυτοεκτελούμενα και αξιοποιούνται για την αυτοματοποίηση δραστηριοτήτων όπως οι πληρωμές μεταξύ οντοτήτων σε μια πλατφόρμα, οι οποίες διαφορετικά θα απαιτούσαν ανθρώπινη αλληλεπίδραση ή αλληλεπίδραση τρίτων [41]. Ο κώδικας των smart contracts είναι προσβάσιμος στους χρήστες επιτρέποντάς τους να κατανοήσουν τους καθορισμένους όρους που τον

διέπουν. Στη συνέχεια, όταν τα μέρη συναινούν να χρησιμοποιήσουν ένα έξυπνο συμβόλαιο, η δυναμική των αλληλεπιδράσεών τους ρυθμίζεται από τους όρους που είναι κωδικοποιημένοι εντός του έξυπνου συμβολαίου, χωρίς καμία ανθρώπινη παρέμβαση για επαλήθευση. Συνεπώς, ένα smart contract εγγυάται την αυτόματη εκτέλεση της συμφωνίας με την εκπλήρωση των καθορισμένων συνθηκών, μειώνοντας την ανάγκη για μεσάζοντες, επιταχύνοντας τις διαδικασίες και ελαχιστοποιώντας τα ανθρώπινα λάθη. Στα περισσότερα, ο κώδικας είναι ορατός στους χρήστες του, οι οποίοι μπορούν επομένως να τον αναθεωρήσουν και να κατανοήσουν τι θα ορίζουν οι προκαθορισμένοι όροι στη λειτουργικότητα.

Η εν λόγω προσβασιμότητα αυξάνει τη διαφάνεια και την εμπιστοσύνη μεταξύ των μερών, επειδή, σε αυτές τις συμβάσεις, οι όροι είναι προκαθορισμένοι και κατανοητοί από όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη. Σε μια κατάσταση όπου τα μέρη αποδέχονται τη χρήση ενός έξυπνου συμβολαίου, η δυναμική των αλληλεπιδράσεών τους ελέγχεται και ρυθμίζεται πλήρως από τους όρους του smart contract και δεν απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση για την επαλήθευση [16]. Παράλληλα, εκτελούν μια συμφωνία αμέσως τη στιγμή που πληρούνται οι όροι της συμφωνίας, μειώνοντας την τεράστια ανάγκη για μεσάζοντα. Αυτό, επομένως, επιταχύνει την επεξεργασία, μειώνει το ανθρώπινο λάθος και, ως εκ τούτου, καθιστά τις συναλλαγές πιο αξιόπιστες, ταχύτερες και αποτελεσματικές στις ψηφιακές πλατφόρμες.

4.4 Επιτυχημένα Παραδείγματα Energy Marketplaces

4.4.1 OurPower, Vienna

Η OurPower, η οποία ιδρύθηκε στη Βιέννη το 2018, λειτουργεί ως ένας αυστριακός συνεταιρισμός που διαχειρίζεται μια πλατφόρμα peer-to-peer (P2P) για ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα μέλη της. Αποστολή του συνεταιρισμού είναι να εμπλέξει ενεργά τους πολίτες στην ενεργειακή μετάβαση, τονίζοντας ότι ο μετασχηματισμός αυτός περιλαμβάνει όχι μόνο την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών αλλά και την προώθηση της κοινωνικής αλλαγής μέσω της ουσιαστικής συμμετοχής. Εντάσσεται σε ένα διαβαθμισμένο πλαίσιο όπου εγγυάται ότι άτομα από διάφορα οικονομικά υπόβαθρα μπορούν τόσο να συνεισφέρουν όσο και να αποκομίσουν οφέλη από τα έργα του συνεταιρισμού. Ο συνεταιρισμός εποπτεύει μια ψηφιακή πλατφόρμα που συνδέει περισσότερους από 300 μεμονωμένους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας με τους καταναλωτές, επιτρέποντας έτσι την άμεση ανταλλαγή ενέργειας [55]. Αυτό το αποκεντρωμένο μοντέλο περιλαμβάνει ένα ποικίλο φάσμα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων μικρών φωτοβολταϊκών συστημάτων σε στέγες, μικρής κλίμακας αιολικά πάρκα, υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις και εγκαταστάσεις ενέργειας από βιομάζα. Υποστηρίζοντας την

τοπική παραγωγή και χρήση ενέργειας, η OurPower ενισχύει την ενεργειακή ασφάλεια και συμβάλλει στην περιφερειακή οικονομική ανάπτυξη. Υπογραμμίζει τη σημασία της δέσμευσης της κοινότητας και των κοινών οικονομικών συνεισφορών, χρησιμοποιώντας το crowdfunding για τη διευκόλυνση των πρωτοβουλιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η προσέγγιση αυτή όχι μόνο προωθεί την ταχεία εφαρμογή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά και καλλιεργεί την αίσθηση της ιδιοκτησίας και της υπευθυνότητας μεταξύ των συμμετεχόντων [36]. Οι προσπάθειες του συνεταιρισμού έχουν αναγνωριστεί ως αξιοσημείωτη συμβολή στη μετάβαση της Αυστρίας προς την καθαρή ενέργεια, λειτουργώντας ως παράδειγμα για τα ενεργειακά έργα με πρωτοβουλία των πολιτών. Παρά τα επιτεύγματα της ωστόσο, η OurPower συνεχίζει να αντιμετωπίζει εμπόδια, όπως η ανάγκη ενίσχυσης της συνείδησης του κοινού όσον αφορά την κοινή χρήση ενέργειας και η πολυπλοκότητα της κανονιστικής συμμόρφωσης. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων είναι απαραίτητη για τη διεύρυνση του αντίκτυπου του συνεταιρισμού και τη διασφάλιση ότι τα πλεονεκτήματα της ενεργειακής μετάβασης θα είναι διαθέσιμα σε όλους. Συνοψίζοντας, αποτελεί παράδειγμα για το πώς οι ενεργειακοί συνεταιρισμοί μπορούν να προωθήσουν τη μετάβαση στην καθαρή ενέργεια συνδυάζοντας την τεχνολογική καινοτομία με την κοινωνική δέσμευση, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στους πολίτες να διαδραματίσουν ενεργό ρόλο στη διαμόρφωση ενός βιώσιμου ενεργειακού μέλλοντος.

4.4.2 Quartierstrom, Switzerland

Η πρωτοβουλία Quartierstrom στο Walenstadt της Ελβετίας αποτελεί παράδειγμα μιας καινοτόμου στρατηγικής για τη δημιουργία τοπικών ομότιμων πλατφορμών ενέργειας. Αυτό το πειραματικό έργο ενέπλεξε 37 νοικοκυριά, συμπεριλαμβανομένων τόσο prosumers με φωτοβολταϊκά συστήματα όσο και πελατών χωρίς, σε τοπικές απευθείας εμπορικές συναλλαγές από την έναρξή του τον Δεκέμβριο του 2018 [1]. Στόχος ήταν να αξιολογηθεί η τεχνολογική, οικονομική και κοινωνική βιωσιμότητα της δημιουργίας μιας αποκεντρωμένης ενεργειακής ανταλλαγής με δυνατότητα blockchain. Αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει στους prosumers να πωλούν την πλεονάζουσα ηλιακή ενέργεια απευθείας σε σπίτια, ενώ οι ιδιοκτήτες σπιτιών μπορούν να αγοράζουν τοπικά παραγόμενη ανανεώσιμη ενέργεια. Οι συναλλαγές που πραγματοποιούνται σε μια διαφανή και ασφαλή πλατφόρμα με βάση το blockchain δεν εξαρτώνται από συμβατικούς μεσάζοντες για τη διαχείριση. Χρησιμοποιήθηκε μια διαδικασία διπλής δημοπρασίας, η οποία επιτρέπει σε κάθε συμμετέχοντα να αποκαλύψει την τιμή αγοράς ή πώλησης, επιτρέποντας έτσι στη δυναμική της αγοράς να καθορίσει την τιμή της ενέργειας. Η τεχνική αυτή αποσκοπούσε στη βελτιστοποίηση της περιφερειακής χρήσης ενέργειας, παρέχοντας παράλληλα οικονομικά πλεονεκτήματα τόσο στους παραγωγούς όσο και στους καταναλωτές. Τα αποτελέσματα του έργου έδειξαν

σημαντική αύξηση της υιοθέτησης της ηλιακής ενέργειας από την κοινότητα, με περισσότερο από το 80% της παραγόμενης ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας να χρησιμοποιείται τοπικά σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Οι συμμετέχοντες παρουσίασαν υψηλά επίπεδα ικανοποίησης και δέσμευσης, αλληλεπιδρώντας συχνά με την πλατφόρμα συναλλαγών. Τα ευρήματα καταδεικνύουν ότι οι ενεργειακές αγορές P2P μπορούν να ενισχύσουν το ποσοστό της αυτοκατανάλωσης ανανεώσιμης ενέργειας και να παρακινήσουν τους καταναλωτές να αναλάβουν πιο ενεργό ρόλο στη διαχείριση των ενεργειακών πόρων. Παρ' όλα αυτά, η πρωτοβουλία Quartierstrom αναγνώρισε ορισμένα εμπόδια, συμπεριλαμβανομένης της περίπλοκης φύσης των νομικών πλαισίων και της ανάγκης για μια προηγμένη τεχνολογική υποδομή. Τα προβλήματα αυτά πρέπει να αντιμετωπιστούν προκειμένου οι ενεργειακές αγορές P2P να γίνουν συνήθης πρακτική.

4.4.3 Piclo Flex, UK

Η πλατφόρμα Piclo Flex, η οποία δημιουργήθηκε από τη βρετανική επιχείρηση Piclo, αποτελεί παράδειγμα ενός καινοτόμου συστήματος εμπορίας ενέργειας από ομότιμους χρήστες (P2P) που επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση των καταναλωμένων ενεργειακών πόρων (DERs) σε ένα έξυπνο δίκτυο. Το Piclo Flex βελτιώνει την ευελιξία του δικτύου και διευκολύνει την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας διευκολύνοντας τις άμεσες συναλλαγές μεταξύ των παρόχων ενέργειας και των πελατών [66]. Λειτουργεί ως αυτόνομη αγορά που επιτρέπει στους παρόχους υπηρεσιών ευελιξίας (FSP), συμπεριλαμβανομένων των διαχειριστών αποθήκευσης μπαταριών και των συσσωρευτών απόκρισης ζήτησης, να παρουσιάζουν τις υπηρεσίες τους στους διαχειριστές δικτύων διανομής (DNO) και σε άλλους υποψήφιους αγοραστές [53]. Η πλατφόρμα χρησιμοποιεί δεδομένα έξυπνων μετρητών για τον συγχρονισμό της προσφοράς με τη ζήτηση, βελτιώνοντας τη διανομή ενέργειας και προωθώντας τη σταθερότητα του δικτύου. Αυτή η προσέγγιση με γνώμονα την αγορά ενισχύει την αποδοτικότητα της κατανομής των πόρων, ενθαρρύνει τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και μειώνει την εξάρτηση από τη συμβατική παραγωγή ορυκτών καυσίμων. Η πλατφόρμα έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλά πιλοτικά έργα, αναδεικνύοντας την ικανότητά της να μειώνει τις ενεργειακές δαπάνες και τις εκπομπές Local Matching, ενισχύοντας παράλληλα την ευελιξία και την ανθεκτικότητα του ενεργειακού συστήματος [80]. Το Piclo Flex επέτρεψε στα UK Power Networks να αποκτήσουν υπηρεσίες ευελιξίας, βελτιώνοντας την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ενισχύοντας τη σταθερότητα του συστήματος. Ακόμη, διευκολύνει τις άμεσες ενεργειακές συναλλαγές μεταξύ επαγγελματιών και καταναλωτών, προωθώντας τον εκδημοκρατισμό των ενεργειακών αγορών και βοηθώντας τη μετάβαση σε πιο βιώσιμα και αποκεντρωμένα ενεργειακά συστήματα. Παρά τα επιτεύγματά του, η εκτέλεση συστημάτων εμπορίας ενέργειας P2P, όπως το Piclo Flex, συναντά ορισμένα εμπόδια.

Τα ρυθμιστικά εμπόδια, συμπεριλαμβανομένης της ανάγκης για ρητούς κανονισμούς που ελέγχουν τις συναλλαγές P2P μπορούν να εμποδίσουν την ευρύτερη εφαρμογή [60]. Οι οικονομικοί παράγοντες, ιδίως η διαμόρφωση βιώσιμων επιχειρηματικών μοντέλων που εγγυώνται κερδοφορία για όλους τους ενδιαφερόμενους, είναι ουσιαστικής σημασίας για τη βιωσιμότητα. Επιπλέον, πρέπει να επιλυθούν τεχνολογικά εμπόδια που αφορούν την προστασία της ιδιωτικής ζωής των δεδομένων, την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο και την ενσωμάτωση διαφόρων καταναμημένων ενεργειακών πόρων, ώστε να διασφαλιστεί η ανθεκτικότητα και η αξιοπιστία της πλατφόρμας. Η Piclo Flex δείχνει την ικανότητα των πλατφορμών ενεργειακών συναλλαγών P2P να μετασχηματίζουν τις ενεργειακές αγορές ενισχύοντας την ευελιξία, τη βιωσιμότητα και την ενδυνάμωση των καταναλωτών. Η ανάπτυξη και η εκτέλεση αποδίδουν σημαντικές γνώσεις σχετικά με τα πλεονεκτήματα και τα εμπόδια της ενσωμάτωσης των καταναμημένων ενεργειακών πόρων στα τρέχοντα ενεργειακά συστήματα. Καθώς το ενεργειακό τοπίο εξελίσσεται, πλατφόρμες όπως η Piclo Flex θα διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στη μετάβαση σε πιο αποκεντρωμένα και ανθεκτικά ενεργειακά δίκτυα.

4.4.4 Vandebron, Netherlands

Η Vandebron είναι μια ολλανδική εταιρεία ενέργειας με έδρα το Άμστερνταμ, που ιδρύθηκε το 2014 και εξειδικεύεται στην παροχή 100% πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου σε ιδιώτες και επιχειρήσεις. Η εταιρεία δεν παράγει η ίδια ενέργεια, αλλά αγοράζει ανανεώσιμη ενέργεια από τοπικά ηλιακά και μεγάλα αιολικά πάρκα και διανέμει ηλεκτρική ενέργεια και φυσικό αέριο σε ανεξάρτητους προμηθευτές ανανεώσιμης ενέργειας και καταναλωτές. Το επιχειρηματικό μοντέλο της Vandebron βασίζεται στην άμεση σύνδεση παραγωγών και καταναλωτών, προωθώντας τη διαφάνεια και την επιλογή στην αγορά ενέργειας. Οι παραγωγοί καθορίζουν τις δικές τους τιμές, ενώ οι πελάτες επιλέγουν από ποιον παραγωγό θα προμηθευτούν την ενέργειά τους. Τον Φεβρουάριο του 2016, ο ιστότοπος Vandebron απαριθμούσε περίπου 50 παραγωγούς ενέργειας που ήταν σε θέση να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες περισσότερων από 30.000 νοικοκυριών [66] και τον Δεκέμβριο του 2018, ο αριθμός των νοικοκυριών που τροφοδοτούνται από αιολική, βιομάζα και ηλιακή ενέργεια έφτασε τα 100.000. Το 2017, η Vandebron ξεκίνησε συνεργασία με την Alfen, έναν προμηθευτή έξυπνων σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων για το σπίτι και τις επιχειρήσεις, με σκοπό την επίτευξη της ισορροπίας του ενεργειακού δικτύου με την τεχνολογία blockchain. Οι πελάτες μπορούν να επιλέξουν μεταξύ έξι έργων αντιστάθμισης σε διάφορες αναπτυσσόμενες χώρες τα οποία επιθυμούν να υποστηρίξουν με την κατανάλωση φυσικού αερίου [58].

4.4.5 SunContract,Slovenia

Η SunContract είναι μια σλοβενική πλατφόρμα εμπορίας ενέργειας που αξιοποιεί την τεχνολογία blockchain για να επιτρέψει την άμεση συναλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ παραγωγών και καταναλωτών, προωθώντας ένα αποκεντρωμένο και διαφανές ενεργειακό οικοσύστημα. Ιδρύθηκε το 2018 και έχει ως στόχο την ενίσχυση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, επιτρέποντας στους χρήστες να επιλέγουν την προέλευση της ενέργειάς τους και να συμμετέχουν ενεργά στην αγορά ενέργειας. Για τον σκοπό αυτό, η εταιρεία δημιούργησε μια ενεργειακή δεξαμενή που περιλαμβάνει τόσο παραγωγούς όσο και καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας για την ενθάρρυνση της εμπορίας. Εκτός από τους προμηθευτές ενέργειας, οι πελάτες του SunContract μπορούν επίσης να επιλέξουν την τιμή που είναι διατεθειμένοι να πληρώσουν από οικονομική και περιβαλλοντική άποψη. Ομοίως, το SunContract επιτρέπει στους παραγωγούς ενέργειας να καθορίζουν την τιμή πώλησης της πλεονάζουσας ενέργειάς τους, καθώς και διπλές προσφορές δημοπρασίας στην αγορά για τις παραγγελίες των καταναλωτών [71]. Για τις συναλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτούνται τα SunContract tokens (SNC), τα οποία βασίζονται στο Ethereum και λειτουργούν ως άδειες λογισμικού και ενέργειας που οι εγγεγραμμένοι πελάτες χρησιμοποιούν στην ενεργειακή δεξαμενή. Για να διασφαλιστεί η κάλυψη του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας για τουλάχιστον δύο μήνες, όλοι οι χρήστες της πλατφόρμας πρέπει να διατηρούν ανά πάσα στιγμή ένα ελάχιστο υπόλοιπο 1.000 SNC tokens [15]. Η SunContract στοχεύει στη σύνδεση αυτόνομης προσφοράς και ζήτησης μέσω της ενεργειακής δεξαμενής, υποστηριζόμενη από έξυπνα συμβόλαια, αντικαθιστώντας τον παραδοσιακό μεσάζοντα με την τεχνολογία blockchain. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται η διαφάνεια στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ παραγωγών και καταναλωτών μέσω της δεξαμενής [66].

5. Διαχείριση της Ζήτησης - Demand side management (DSM)

5.1 Ορισμός

Η διαχείριση της ζήτησης (DSM) είναι η τροποποίηση των προτύπων κατανάλωσης ενέργειας από την πλευρά της ζήτησης, με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητας και της λειτουργίας των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Ο όρος εισήχθη για πρώτη φορά το 1970 και όπου προτάθηκε το μοντέλο και την αρχιτεκτονική DSM από τη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας για τη ρύθμιση του χρόνου χρήσης (ToU) , της μέγιστης ζήτησης ενέργειας και την ανάλυση των προφίλ φορτίου μεταξύ των καταναλωτών [75]. Οι στρατηγικές DSM, οι οποίες διακρίνονται σε ενεργειακή απόδοση και απόκριση στη ζήτηση, προσελκύουν αυξανόμενο ενδιαφέρον λόγω της

τεχνολογικής προόδου στα έξυπνα δίκτυα, της απελευθέρωσης των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και της ολοένα και ευρύτερης χρήσης συστημάτων αποθήκευσης (π.χ. μπαταρίες), που βελτιστοποιούν την ενεργειακή διαχείριση μέσω αποθήκευσης ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και παροχής της σε ώρες αιχμής.. Η βιωσιμότητα της απαιτεί τη δημιουργία επιχειρηματικών μοντέλων, τα οποία εξαρτώνται από παράγοντες που σχετίζονται με τη ρύθμιση της αγοράς ενέργειας, τις διαδικασίες, τα χαρακτηριστικά του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και τις υποδομές [81]. Η DSM στο σύστημα ηλεκτρικού δικτύου αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα. Καθώς αναπτύσσονται όλο και πιο αποδοτικές και έξυπνες συσκευές για οικιακή και εμπορική χρήση, υπάρχει ανάγκη για μια τυποποιημένη στρατηγική διαχείρισης της ενέργειας τόσο σε επίπεδο καταναλωτή όσο και σε επίπεδο προμηθευτή, με έμφαση στη διαχείριση του προφίλ φορτίου από την πλευρά της κατανάλωσης. Η διαχείριση αυτή μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή ποικίλων αποδοτικών λύσεων που επικεντρώνονται στην ελαχιστοποίηση των απωλειών φορτία και στο σύστημα του έξυπνου δικτύου συνολικά. Το προφίλ φορτίου αντιπροσωπεύει τις χρονικές διακυμάνσεις της ενεργειακής ζήτησης σε ένα δίκτυο. Για παράδειγμα σε μια πόλη, η κατανάλωση ενέργειας κορυφώνεται το πρωί (όταν οι κάτοικοι ετοιμάζονται για δουλειά) και το απόγευμα (όταν επιστρέφουν), δημιουργώντας «αιχμές». Η βελτίωση του προφίλ φορτίου στοχεύει στην εξομάλυνση αυτών των αιχμών και στην ισορροπημένη κατανομή της ζήτησης, ώστε να αντιστοιχεί καλύτερα με την προσφορά ενέργειας, ιδιαίτερα από ανανεώσιμες πηγές. Για πελάτες, αυτό σημαίνει μείωση του ενεργειακού κόστους μέσω ευέλικτων τιμολογίων που ενθαρρύνουν κατανάλωση εκτός αιχμής (π.χ. φθηνότερο ρεύμα τα βράδια). Παράλληλα, συμμετέχοντας σε προγράμματα διαχείρισης ζήτησης, οι καταναλωτές ανταμείβονται οικονομικά για τη ρύθμιση της κατανάλωσής τους, ενισχύοντας τη συλλογική προσπάθεια για σταθερότητα του δικτύου. Για παραγωγούς, η βελτιστοποίηση του φορτίου οδηγεί σε αποδοτικότερη λειτουργία μονάδων παραγωγής. Εξαλείφει την ανάγκη για ξαφνική εκκίνηση ρυπογόνων εφεδρικών μονάδων (π.χ., σταθμούς φυσικού αερίου) κατά τις αιχμές, μειώνοντας τόσο το λειτουργικό κόστος όσο και τις εκπομπές CO₂. Επιπλέον, διευκολύνει την ενσωμάτωση διαλειπουσών ανανεώσιμων πηγών, όπως ηλιακών και αιολικών συστημάτων, τα οποία παράγουν ενέργεια με βάση τις καιρικές συνθήκες και όχι την ανθρώπινη ζήτηση.

Η ενσωμάτωση διαφόρων πρωτοκόλλων επικοινωνίας (π.χ. LoRaWAN, Zigbee, MQTT) και συσκευών IoT – όπως έξυπνων μετρητών, αισθητήρων και αυτοματοποιημένων συστημάτων ελέγχου – επέτρεψε την αμφίδρομη ανταλλαγή πληροφοριών, καθώς οι συσκευές αυτές μπορούν τώρα τόσο να λαμβάνουν δεδομένα (π.χ., ενεργειακή ζήτηση, τιμολόγια) όσο και να στέλνουν πληροφορίες (π.χ., καταναλωτικά μοτίβα, βλάβες) σε πραγματικό χρόνο, δημιουργώντας ένα δυναμικό και συνεργατικό δίκτυο. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες μεθόδους

διαχείρισης της ενέργειας. Από την πλευρά της ζήτησης, οι συσκευές μπορούν να επωφεληθούν από αυτές τις πληροφορίες και μπορούν να βελτιστοποιήσουν στρατηγικά τη λειτουργία τους και τις παραμέτρους αποδοτικότητάς τους με τη συμπερίληψη άλλων ψηφιακών αισθητήριων και επικοινωνιακών συσκευών, τον έξυπνο έλεγχο των συσκευών και την επικοινωνία μεταξύ της κοινής ωφέλειας και των οντοτήτων του δικτύου. Αυτά τα πρωταρχικά ζητήματα που συνδέονται με τη βιωσιμότητα του δικτύου, την ασφάλεια, την αξιοπιστία και τη μείωση της κατανάλωσης φορτίου μπορούν να αντιμετωπιστούν με τη χρήση της έννοιας της διαχείρισης της ζήτησης. Η DSM περιλαμβάνει ένα σύνολο στρατηγικών διαχείρισης φορτίου, που ενσωματώνουν το σχεδιασμό, την ενσωμάτωση και την παρακολούθηση προκαθορισμένων δραστηριοτήτων ρουτίνας με βάση το πρότυπο χρήσης του καταναλωτή [82].

Η σταθερότητα, η ασφάλεια, η αξιοπιστία και η επιδίωξη της μεγιστοποίησης του κέρδους καθιστούν την εφαρμογή τεχνικών DSM απαραίτητη στον σύγχρονο ενεργειακό τομέα. Ένας από τους κύριους στόχους είναι η βελτιστοποίηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της αντιστοίχισης των διαθέσιμων πόρων, ώστε να αξιοποιούνται πλήρως οι υπάρχουσες πηγές χωρίς άμεση ανάγκη για επέκταση του συστήματος. Ωστόσο, αυτό δεν αντικαθιστά την ανάγκη ανάπτυξης νέων ανανεώσιμων πηγών, αλλά συμβάλλει στην αποδοτικότερη χρήση τους, μειώνοντας παράλληλα την πίεση στο δίκτυο. Επιπλέον, η πλατφόρμα λειτουργεί ως ένα δυναμικό εργαλείο διαχείρισης ενεργειακής ζήτησης σε πραγματικό χρόνο, όπου οι καταναλωτές μπορούν να λαμβάνουν ενεργά αποφάσεις για τη χρήση ενέργειας (π.χ., μετατόπιση κατανάλωσης σε ώρες χαμηλής ζήτησης). Αυτή η συμμετοχή τους βοηθά στη μείωση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης *συλλογικά* και στην εξοικονόμηση χρημάτων, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα το οικονομικό κόστος για όλους τους συμμετέχοντες. Αυξάνει την ευαισθητοποίηση των καταναλωτών σχετικά με τα οφέλη που προσφέρει, προωθώντας την προσαρμογή των συνηθειών κατανάλωσης και βελτιστοποιώντας τα πρότυπα χρήσης του ηλεκτρικού ρεύματος. Επιπλέον, επιτυγχάνεται εξισορρόπηση του φορτίου μέσω μείωσης ή μετατόπισης της κατανάλωσης ενέργειας από ώρες αιχμής σε περιόδους με μικρότερη ζήτηση, γεγονός που βελτιώνει τον συνολικό συντελεστή φορτίου. Για την περαιτέρω ενθάρρυνση της συμμετοχής, οι καταναλωτές λαμβάνουν οικονομικά κίνητρα μέσω προγραμμάτων διαχείρισης φορτίου και απόκρισης στη ζήτηση, με αποτέλεσμα τη μείωση της ζήτησης και τη βελτίωση της αποδοτικότητας του ηλεκτρικού συστήματος.

Έτσι, η εφαρμογή στρατηγικής DSM συμβάλλει στην εξοικονόμηση κόστους και στην πρόληψη διακοπών ηλεκτρικού ρεύματος (blackouts), ενώ ενσωματώνει και την έννοια της ατομικής ευθύνης στους χρήστες ενέργειας. Παράλληλα, προάγεται η βιώσιμη και αξιόπιστη παροχή ενέργειας, επιτυγχάνεται μείωση του κόστους κατανάλωσης και επιτυγχάνονται σημαντικοί περιβαλλοντικοί στόχοι. Αξίζει επίσης

να σημειωθεί ότι μειώνοντας τη ζήτηση αιχμής, περιορίζονται οι ανάγκες για νέους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τέλος, προσφέρει οικονομικά οφέλη τόσο για τους καταναλωτές όσο και για τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, όταν εφαρμόζεται σωστά, μέσω της έξυπνης διαχείρισης των φορτίων, η οποία οδηγεί σε σημαντική μείωση του συνολικού προφίλ φορτίου. Η εκτέλεση της διαχείρισης από την πλευρά της ζήτησης απαιτεί την ενσωμάτωση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και της υποδομής των συστημάτων επικοινωνίας. Οι συνδυασμοί αυτοί διευκολύνουν την ταχεία και αποτελεσματική λειτουργία, διατηρώντας παράλληλα την ευελιξία εντός του λειτουργικού πλαισίου. Η αποτελεσματική αξιοποίηση των προηγμένων τεχνολογιών έχει διευκολύνει τη διαχείριση της ζήτησης σε σύγχρονα περιβάλλοντα έξυπνων δικτύων. Οι εξελίξεις σε αυτόν τον τομέα έχουν βελτιώσει αισθητά τις διαδικασίες παρακολούθησης, ελέγχου και βελτιστοποίησης της ενέργειας ως αντίδραση στις ποικίλες ανάγκες των πελατών.

5.2 Κατηγορίες στρατηγικών Διαχείριση της Ζήτησης

Οι στρατηγικές Διαχείρισης της Ζήτησης αποτελούν κρίσιμο πλαίσιο για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, με στόχο την οικονομική αποδοτικότητα, τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την ενίσχυση της σταθερότητας του δικτύου. Οι βασικές κατηγορίες όπως φαίνονται στην εικόνα 1 περιλαμβάνουν:

- Βελτιστοποίηση φόρτου και ενεργειακή απόδοση με έμφαση στη ρύθμιση της ζήτησης και στη μείωση των απωλειών.
- Προγραμματισμός και εξοικονόμηση ενέργειας που αφορούν τη δυναμική διαχείριση της κατανάλωσης.
- Διαχείριση ζήτησης σε πραγματικό χρόνο με στόχο την προσαρμογή σε διακυμάνσεις του δικτύου.
- Ενσωμάτωση διανεμημένων πόρων και συστημάτων αποθήκευσης που υποστηρίζουν την ευελιξία και την αυτονομία του συστήματος.

Αυτές οι κατηγορίες αλληλεπιδρούν για τη δημιουργία ενός ευφυούς ενεργειακού συστήματος, ικανό να αντιμετωπίσει σύγχρονες προκλήσεις, όπως η μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές και η αύξηση της ενεργειακής ζήτησης. Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται ανάλυση κάθε κατηγορίας, επισημαίνοντας τη σημασία και τις συνέργειές τους στο πλαίσιο των στρατηγικών Διαχείρισης της Ζήτησης.



Εικόνα 1. Κατηγορίες της Διαχείρισης της Ζήτησης.

5.2.1 Ανάλυση της Ενεργειακής Αποδοτικότητας (Energy Efficiency - EE)

Η Ενεργειακή Αποδοτικότητα ασχολείται κυρίως με τη συνολική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, ενώ παράλληλα έχει ζωτική σημασία στη διατήρηση της ποιότητας ζωής και της λειτουργικής ικανότητας των συστημάτων. Γενικά, τα προγράμματα Ενεργειακής Αποδοτικότητας περιλαμβάνουν τον εξοπλισμό, την αναβάθμιση συστήματος καθώς και την εκπαίδευση των χρηστών. Αρχικά, η αναβάθμιση του εξοπλισμού αποτελεί βασικό στοιχείο για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Αποδοτικότητα του εξοπλισμού σημαίνει εφαρμογή νέων τεχνολογιών που περιλαμβάνουν επίσης αντλίες θερμότητας, ενεργειακά αποδοτικές συσκευές, εξελιγμένα συστήματα αυτοματισμού κ.α. Σύμφωνα με τους Perez-Lombard [59] η τεχνολογική πρόοδος στα κτίρια έχει σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και σύμφωνα με τους Nejat κ.ά. [52] αυτές οι στρατηγικές αναβάθμισης του εξοπλισμού μειώνουν τις εκπομπές CO₂ αυξάνοντας έτσι την αποδοτικότητα σε διάφορες βιομηχανίες του κόσμου. Η ενεργειακή απόδοση ασχολείται κυρίως με τη μετασκευή των συστημάτων φωτισμού και HVAC (Heating Ventilation Air Conditioning). Ακόμη, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στις δομές φωτισμού και ψύξης είναι κρίσιμη. Η αντικατάσταση των παραδοσιακών λαμπτήρων με LED, καθώς και η χρήση αποδοτικότερων συστημάτων ψύξης,

βελτιώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας. Τέτοιες πρακτικές αναβάθμισης στις κατασκευές όχι μόνο μειώνουν την ενεργειακή ζήτηση αλλά και προάγουν τη βιωσιμότητα των κτιρίων, ενισχύοντας τις πρακτικές «πράσινης» δόμησης [78].

Η εκπαίδευση των χρηστών συγκαταλέγεται μεταξύ των βασικότερων παραγόντων της ενεργειακής απόδοσης, καθώς το αποτέλεσμα είναι η συνειδητή κατανάλωση ενέργειας. Οι Dietz κ.ά [18] ανέφεραν ότι σημαντικές μειώσεις στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι δυνατές με την αλλαγή της συμπεριφοράς των χρηστών. Η κοινωνική ευαισθητοποίηση, όταν συνδυάζεται με τη χρήση κατάλληλων πληροφοριακών εργαλείων, οδηγεί στην υιοθέτηση ορθών πρακτικών. Η ενεργειακή απόδοση μπορεί να οριστεί ως η πολυδιάστατη μέθοδος που συνδυάζει την τεχνολογική ανάπτυξη με την ανθρώπινη αλληλεπίδραση, στον απόηχο της ολοένα αυξανόμενης πολιτικής και των κανονισμών για την εξοικονόμηση ενέργειας.

5.2.2 Ανάλυση της Απόκρισης στη Ζήτηση (Demand Response - DR)

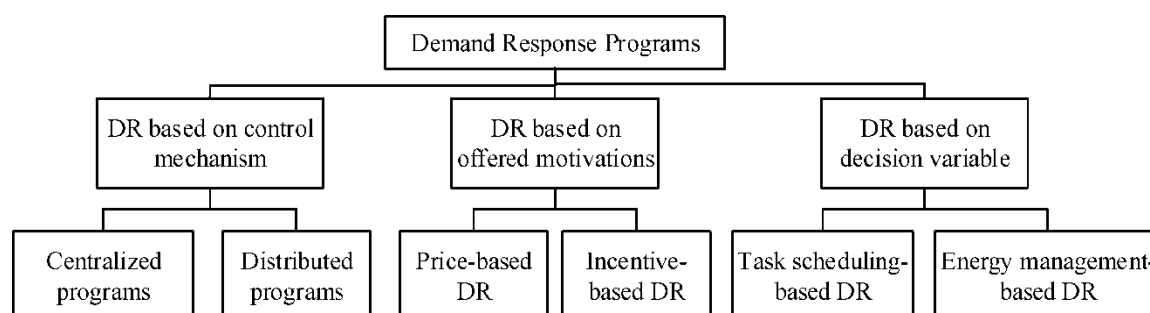
Η απόκριση στη ζήτηση (DR) περιλαμβάνει μια σειρά από τακτικές και προγράμματα που αποσκοπούν στη ρύθμιση των μεταβολών στη χρήση ενέργειας από τους καταναλωτές ως αντίδραση στις διακυμάνσεις της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας, στις πληρωμές κινήτρων ή στην έναρξη μιας συμβατικής ρύθμισης. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη μείωση της κατανάλωσης κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής ζήτησης ή την ανακατανομή της χρήσης σε ώρες χαμηλότερης ζήτησης, που συνήθως είναι επωφελής τόσο για τους καταναλωτές όσο και για τους παρόχους υπηρεσιών κοινής ωφέλειας [13]. Η DR αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο των σύγχρονων συστημάτων έξυπνων δικτύων, διευκολύνοντας την ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, ανακουφίζοντας την πίεση του δικτύου και επιτρέποντας την αποτελεσματική ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αποτελεί βασική στρατηγική για τη δυναμική προσαρμογή της κατανάλωσης ενέργειας, ιδιαίτερα σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας ευελιξία και αποδοτικότητα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Al-Fuqaha κ.ά. [4] υποστήριξαν ότι οι τεχνολογίες IoT και τα έξυπνα δίκτυα παρέχουν ισχυρά εργαλεία για την ενίσχυση της αποδοτικότητας των συστημάτων απόκρισης ζήτησης, δίνοντας έμφαση στους αισθητήρες και τους αυτοματοποιημένους μηχανισμούς επικοινωνίας που οδηγούν στη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Η διαχείριση του φορτίου αιχμής μεταξύ των κύριων στόχων της απόκρισης ζήτησης επιτρέπει τη ρύθμιση των καταναλωτικών αιχμών με οικονομικές αρχές. Κατά συνέπεια, μειώνει την καταπόνηση του δικτύου και, το σημαντικότερο, δημιουργεί ένα αξιόπιστο σύστημα. Τα συστήματα IoT προωθούν μια καλύτερη ισορροπία του φορτίου για τη βιωσιμότητα, ενώ επιτρέπουν εστιασμένες λύσεις με βάση τα δεδομένα [65].

Η DR λειτουργεί ως μέθοδος για την επίτευξη της απαραίτητης ισορροπίας τόσο στις αγορές ενέργειας χονδρικής όσο και στις αγορές ενέργειας λιανικής. Οι τροποποιήσεις προκύπτουν από διάφορους ενδιαφερόμενους, συμπεριλαμβανομένων των διαχειριστών δικτύων διανομής, των φορέων χάραξης πολιτικής και των τελικών χρηστών. Παρ' όλα αυτά, ο τελικός χρήστης είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την εφαρμογή της αποκατάστασης της ζήτησης [69]. Παραδοσιακά, ο τελικός χρήστης είτε πρόκειται για νοικοκυριό είτε όχι, λειτουργούσε ως ένα απομονωμένο τερματικό που χρησιμοποιούσε την ενέργεια για την ικανοποίηση άμεσων αναγκών. Ωστόσο, η απόκριση ζήτησης αντιλαμβάνεται τον χρήστη ως μια θεμελιωδώς διαφορετική οντότητα, που λειτουργεί ως ολοκληρωμένο και δυναμικό στοιχείο στο πλαίσιο της ισορροπίας προσφοράς και ζήτησης. Επιδιώκει να βελτιώσει την αποδοτικότητα των σταθμών παραγωγής ενέργειας και των δικτύων, προωθώντας έτσι ένα πιο αποτελεσματικό ενεργειακό σύστημα. Ως εκ τούτου, αποτελεί κρίσιμο μέσο για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και οι δύο αυτοί τομείς θα πρέπει να αξιολογούνται ταυτόχρονα και όχι ανεξάρτητα. Η ζήτηση αιχμής, η οποία χαρακτηρίζεται ως το διάστημα κατά το οποίο το δίκτυο χρησιμοποιεί τη μέγιστη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, είναι ο κύριος καθοριστικός παράγοντας για την αύξηση των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας. Γενικά, τόσο ο αγοραστής όσο και ο πωλητής δίνουν έμφαση στο οικονομικό κέρδος. Μετά την αξιολόγηση των προγραμμάτων κοινής ωφέλειας, το Electric Power Research Institute (EPRI) εκτίμησε ότι η DR μείωσε τη ζήτηση αιχμής στις Ηνωμένες Πολιτείες έως και κατά 45.000 MW [47]. Παρ' όλα αυτά, η εφαρμογή της είναι μάλλον περιορισμένη λόγω ανεπαρκών στρατηγικών μάρκετινγκ και ελάχιστης κατανόησης όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους.

Η δυναμική τιμολόγηση εφαρμόζει ευέλικτους μηχανισμούς τιμολόγησης που παρέχουν κίνητρα για την κατανάλωση ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης. Οι καταναλωτές αλλάζουν τη συμπεριφορά τους για να επωφεληθούν από τις χαμηλότερες τιμές, ενώ οι προμηθευτές προσαρμόζουν την ισορροπία μεταξύ ζήτησης και προσφοράς ενέργειας. Οι τεχνολογίες blockchain θα μπορούσαν να ενισχύσουν την εφαρμογή τέτοιων μοντέλων αυξάνοντας τη διαφάνεια και την ασφάλεια των ενεργειακών συναλλαγών [5]. Η αρχιτεκτονική του IoT επιτρέπει στιγμιαίες και γρήγορες αλλαγές στο φορτίο εντός των έξυπνων συστημάτων μέσω αυτοματισμού. Σύμφωνα με τους Rasheed et al. [61], τα ψηφιακά δίδυμα επιτρέπουν την εικονική αναπαράσταση των φυσικών συστημάτων και, ως εκ τούτου, επιτρέπουν την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, τη βελτιστοποίηση και τη δυνατότητα λήψης αποφάσεων.

Η DR έχει αναδειχθεί σε βασικό χαρακτηριστικό των σύγχρονων αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, προσφέροντας μια στρατηγική προσέγγιση για τη δυναμική ευθυγράμμιση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας με τις συνθήκες προσφοράς. Με άλλα λόγια για τους τελικούς χρήστες της, η μεταβολή του προτύπου χρήσης της

ενέργειας μέσω σημάτων τιμών ή άμεσων κινήτρων σημαίνει την επίτευξη όλης της λειτουργικής σταθερότητας, της οικονομικής αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 2: Κατηγοριοποίηση των προγραμμάτων DR [69]

5.2.2.1 Προγράμματα DR ανάλογα με τον τύπο της ανταπόκρισης (Explicit vs. Implicit DR)

Η DR αποτελεί βασικό εργαλείο για την εξισορρόπηση των ενεργειακών συστημάτων, με τα προγράμματά της να κατηγοριοποιούνται κυρίως σε ρητά (explicit) και σιωπηρά (implicit) ανάλογα με τον τύπο ανταπόκρισης των καταναλωτών. Αυτός ο διαχωρισμός λειτουργεί ως ο κεντρικός άξονας για την κατανόηση όλων των υπολοίπων διακρίσεων, οι οποίες εξετάζουν τους μηχανισμούς ελέγχου, τα κίνητρα και τις στρατηγικές που υποστηρίζουν τη λειτουργία τους.

Τα ρητά προγράμματα DR βασίζονται σε συμβάσεις με άμεσα οικονομικά κίνητρα, όπου οι καταναλωτές λαμβάνουν πληρωμές ή ανταμοιβές για τη μείωση ή τη μετατόπιση της κατανάλωσής τους. Παραδείγματα περιλαμβάνουν το Direct Load Control (DLC), όπου ο πάροχος ελέγχει εξ αποστάσεως συσκευές όπως κλιματιστικά ή θερμοσίφωνες κατά τις ώρες αιχμής, καθώς και τη συμμετοχή σε αγορές ενέργειας (Demand Bidding), όπου οι καταναλωτές υποβάλλουν προσφορές για μείωση της ζήτησης. Επιπλέον, η παροχή υπηρεσιών συχνότητας (FCR, aFRR) απαιτεί από τους καταναλωτές να προσφέρουν ευελιξία στο δίκτυο με αντάλλαγμα οικονομική αποζημίωση.

Αντίθετα, τα σιωπηρά προγράμματα DR στηρίζονται σε δυναμικές τιμολογήσεις που επηρεάζουν έμμεσα τη συμπεριφορά των καταναλωτών, χωρίς άμεσες πληρωμές. Για παράδειγμα, η Time-of-Use (TOU) τιμολόγηση διαφοροποιεί το κόστος ανάλογα με την ώρα της ημέρας (π.χ. υψηλότερες τιμές το απόγευμα), ενώ η Real-Time Pricing (RTP) αντικατοπτρίζει σε πραγματικό χρόνο τις συνθήκες της αγοράς. Η Critical Peak

Pricing (CPP) εφαρμόζει έκτακτες αυξήσεις σε κρίσιμες περιόδους, με στόχο την αποφυγή υπερφορτώσεων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η κίνηση των καταναλωτών προέρχεται από την επιθυμία να ελαχιστοποιήσουν το κόστος, αντί να λάβουν άμεση ανταμοιβή.

5.2.2.2 Προγράμματα DR ανάλογα με τους μηχανισμούς ελέγχου τους.

Για την υποστήριξη αυτών των προγραμμάτων, απαιτούνται διαφορετικοί μηχανισμοί ελέγχου. Τα κεντρικά συστήματα όπως αυτά σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, ευθυγραμμίζονται συχνά με τα ρητά DR, καθώς βασίζονται σε συμβάσεις με σαφείς υποχρεώσεις. Αντίθετα, τα κατανεμημένα συστήματα, όπως τα έξυπνα σπίτια, μπορούν να συνδυάσουν και τις δύο προσεγγίσεις: οι χρήστες μπορούν να συμμετέχουν σε προγράμματα με κίνητρα (ρητά DR) ενώ ταυτόχρονα να προσαρμόζουν την κατανάλωσή τους βάσει δυναμικών τιμών (σιωπηρά DR). Αυτή η ευελιξία καθιστά τα κατανεμημένα συστήματα ιδανικά για την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη διαχείριση πολύπλοκων ζητημάτων, όπως οι αιχμές ζήτησης [74].

5.2.2.3 Προγράμματα DR που ταξινομούνται με βάση τα κίνητρα και τιμολογιακές στρατηγικές.

Η επόμενη κατηγορία περιλαμβάνει τα προγράμματα DR που ταξινομούνται με βάση τις τιμές και με βάση τα κίνητρα. Αρχικά, στα προγράμματα με βάση τη τιμή, βασίζεται σε δυναμικούς μηχανισμούς τιμολόγησης όπως οι τιμές χρόνου χρήσης (TOU), η τιμολόγηση κρίσιμης αιχμής (CPP) και η τιμολόγηση σε πραγματικό χρόνο (RTP) [39]. Ο χρόνος χρήσης (TOU) είναι ένα μοντέλο τιμολόγησης που προσαρμόζει το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με την ώρα της ημέρας, την εποχή και το είδος της ημέρας -καθημερινή, Σαββατοκύριακο ή γιορτές- με στόχο να αντικατοπτρίζει τα πραγματικά έξοδα που σχετίζονται με την παραγωγή και τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορες χρονικές περιόδους. Η CPP είναι μια τεχνική δυναμικής τιμολόγησης για την ενέργεια που αποσκοπεί στη ρύθμιση της ζήτησης αιχμής και στη βελτίωση της σταθερότητας του συστήματος. Η στρατηγική αυτή οδηγεί σε σημαντικά αυξημένες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων περιόδων υψηλής ζήτησης, που συνήθως διαρκούν αρκετές ώρες σε καθορισμένες ημέρες κάθε χρόνο, γνωστές ως κρίσιμες εκδηλώσεις αιχμής. Τέλος, η RTP είναι μια μέθοδος που αντικατοπτρίζει τη δυναμική της προσφοράς και της ζήτησης σε πραγματικό χρόνο στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, με τιμές ισχύος που αυξομειώνονται συχνά ανά ώρα ή συχνότερα σύμφωνα με τις τιμές που καθορίζονται στις χονδρικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτοί οι μηχανισμοί είναι ουσιαστικά τεχνικές που οδηγούν τους πελάτες να μειώσουν ή να μετατοπίσουν τη χρήση ενέργειας από τις περιόδους αιχμής της ζήτησης σε περιόδους εκτός αιχμής της ημέρας με την ιδέα της εξομάλυνσης των καμπυλών ζήτησης, ανακουφίζοντας έτσι

ένα δίκτυο που βρίσκεται σε δυσχερή θέση [3]. Για παράδειγμα, οι υψηλότερες τιμές κατά τις ώρες αιχμής στέλνουν τα κατάλληλα σήματα στους καταναλωτές για την προσαρμογή των χρήσεων, γεγονός που θα οδηγήσει σε οικονομικά αποδοτική διαχείριση του φορτίου. Στη συνέχεια, τα προγράμματα DR που βασίζονται σε κίνητρα, αποζημιώνουν άμεσα τη μείωση του φορτίου κατά τη διάρκεια περιόδων πίεσης του δικτύου. Άλλοι μηχανισμοί άμεσου ελέγχου του φορτίου, υποβολής προσφορών ζήτησης και αγορές επικουρικών υπηρεσιών χρησιμοποιούν τις εθελοντικές επιλογές του συμμετέχοντα για μείωση της κατανάλωσης για τη σταθερότητα του δικτύου. Αυτά τελικά γλιτώνουν τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας από τη χρήση δαπανηρών, βραχυπρόθεσμων προμηθειών ενέργειας ή την επέκταση των υποδομών σε περιόδους που η αξιοπιστία των συστημάτων τους είναι πιο κρίσιμη.

5.2.2.4 Προγράμματα DR που χρησιμοποιούν μεταβλητή απόφασης και βελτιστοποίηση.

Η τελευταία κατηγορία προγραμμάτων DR περιλαμβάνει συστήματα που χρησιμοποιούν τη μεταβλητή απόφασης για τον προγραμματισμό των λειτουργιών και συστήματα που βασίζονται στον έλεγχο της ισχύος. Στα ρητά συστήματα DR, η μεταβλητή απόφασης καθορίζεται από συμβάσεις με άμεσα κίνητρα, όπως οικονομικές ανταμοιβές για τη μείωση της κατανάλωσης, ενώ στα έμμεσα συστήματα DR η απόφαση επηρεάζεται από δυναμικά τιμολόγια που ωθούν τους καταναλωτές να μετατοπίσουν τη ζήτηση σε περιόδους χαμηλότερου κόστους. Για παράδειγμα, στη ρητή DR, ένας βιομηχανικός πελάτης μπορεί να συμφωνήσει να απενεργοποιεί ορισμένες συσκευές κατά τις ώρες αιχμής με αντάλλαγμα χρηματική αποζημίωση, ενώ στην έμμεση DR, ένα νοικοκυριό μπορεί να προγραμματίσει αυτόματα το πλυντήριο ρούχων να λειτουργεί όταν οι τιμές RTP (Real-Time Pricing) είναι ελάχιστες.

Αυτή η διάκριση μεταφράζεται σε σημαντικά οικονομικά οφέλη. Στη ρητή απόκριση ζήτησης η μείωση του λογαριασμού προέρχεται από άμεσες ανταμοιβές και βελτιστοποίηση της κατανάλωσης, ενώ στην έμμεση προέρχεται από την αποφυγή υψηλών τιμών κατά τις ώρες αιχμής. Ταυτόχρονα, η μειωμένη ζήτηση κατά τις ώρες αιχμής οδηγεί σε συνολική πτώση των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς αποφεύγεται η χρήση δαπανηρών μονάδων αιχμής, οι οποίες συνήθως λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη για νέες επενδύσεις σε υποδομές παραγωγής, μεταφοράς και διανομής, προσφέροντας μακροπρόθεσμα οικονομικά πλεονεκτήματα τόσο για το δίκτυο όσο και για τους καταναλωτές.

Η ρητή DR μειώνει άμεσα τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου μέσω της απενεργοποίησης των ανθρακικών μονάδων αιχμής, ενώ η έμμεση DR ενισχύει έμμεσα την αιεφορία, καθώς οι δυναμικές τιμές (π.χ. RTP, TOU) ωθούν τους καταναλωτές να χρησιμοποιούν ενέργεια κατά τις ώρες με υψηλή διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πόρων. Επιπλέον, η έμμεση DR διευκολύνει την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο, καθώς η προσαρμογή της ζήτησης στις διακυμάνσεις της προσφοράς (π.χ. αιολική ενέργεια) γίνεται αυτόματα μέσω τιμολογιακών σημάτων, χωρίς να απαιτείται άμεση ανθρώπινη παρέμβαση.

Η επιτυχία της DR ωστόσο, απαιτεί τη συνεργασία όλων των φορέων. Τα ρητά προγράμματα απαιτούν τη συμμετοχή των καταναλωτών σε συμβάσεις με τους παρόχους, ενώ τα έμμεσα προγράμματα εξαρτώνται από την υιοθέτηση τεχνολογιών όπως οι έξυπνοι μετρητές και τα αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου. Σε έναν κόσμο που υφίσταται ψηφιακό μετασχηματισμό, η DR - είτε ρητή είτε σιωπηρή - αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία καθώς τα έξυπνα δίκτυα επιτρέπουν την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ παρόχων και καταναλωτών. Αυτό μετατρέπει την DR από μια απλή τεχνική λύση σε ένα εργαλείο αλλαγής νοοτροπίας, ευθυγραμμισμένο με τους στόχους της οικονομικής αποδοτικότητας, της βιωσιμότητας και της ενεργού συμμετοχής των καταναλωτών.

Συνοψίζοντας, DR δεν αντιμετωπίζει μόνο τεχνικές προκλήσεις, αλλά δημιουργεί ένα ισορροπημένο ενεργειακό οικοσύστημα. Η ρητή DR προσφέρει άμεσες λύσεις σε κρίσεις του δικτύου μέσω συμβατικών μοντέλων, ενώ η σιωπηρή DR ενισχύει τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα μέσω της δυναμικής τιμολόγησης. Η συνύπαρξη και η συνέργειά τους καθιστούν την DR απαραίτητη για τη μετάβαση σε ένα πιο ανθεκτικό και δίκαιο ενεργειακό μέλλον.

5.2.3 Ανάλυση της Βελτιστοποίησης Φορτίου και Προγραμματισμού (Load Optimization and Scheduling)

Η βελτιστοποίηση του φορτίου και ο προγραμματισμός είναι μερικές από τις βασικές τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξισορρόπηση της κατανάλωσης ενέργειας για τη σταθερότητα του δικτύου. Τα αρχιτεκτονικά μοντέλα και τα μοντέλα διαχείρισης φορτίου είναι εγγενή στοιχεία που βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση και ελέγχουν τη ζήτηση αιχμής [75]. Οι αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού είναι απαραίτητοι επειδή παρέχουν τη δυνατότητα δυναμικής διαχείρισης των ωρών κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με τη ζήτηση. Η ανάπτυξη καινοτόμων αλγορίθμων για τη διαχείριση των βιομηχανικών φορτίων στο πλαίσιο των έξυπνων δικτύων ενισχύει την αποδοτικότητα των ενεργειακών πόρων σε σχέση με τη δυναμική τιμολόγηση και τους περιορισμούς δυναμικότητας.

Οι έξυπνες συσκευές, όπως αυτές που ενσωματώνονται στα Home Energy Management Systems (HEMS), συμβάλλουν στην προσαρμογή της κατανάλωσης ενέργειας σε ώρες χαμηλής ζήτησης. Ο προγραμματισμός των οικιακών συσκευών μέσω ενός συστήματος AI θα επιτρέψει τη μεγαλύτερη ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πόρων και τη σημαντική μείωση του κόστους λόγω των διαδικασιών αυτοματοποίησης. Θα βελτιωθεί περαιτέρω εντός του βιομηχανικού τομέα μέσω της κατάλληλης διαχείρισης των ενεργειακών πόρων στο επίπεδο των γραμμών παραγωγής. Μια πιο εξελιγμένη στρατηγική DSM θα μπορούσε να επιτύχει μια ισορροπημένη και βιώσιμη χρήση της ενέργειας με την ενσωμάτωση τεχνικών χρονοπρογραμματισμού στους έξυπνους μετρητές [56]. Τέλος, τα νευρωνικά δίκτυα βελτιστοποιούν δυναμικά τη χρήση ενέργειας σε κατοικίες και εξισορροπούν αποτελεσματικά το φορτίο, ελαχιστοποιώντας το κόστος και βελτιώνοντας παράλληλα την αποδοτικότητα σε ενεργειακά συστήματα που επηρεάζονται από τη μεταβλητότητα των καιρικών συνθηκών και την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτές οι μέθοδοι δείχνουν τις δυνατότητες των ευφυών αλγορίθμων για τη διακυβέρνηση πολύπλοκων, χρονικά ευαίσθητων ενεργειακών συστημάτων.

Αξιοποιώντας αυτές τις νέες μεθόδους, η βελτιστοποίηση φορτίου και ο προγραμματισμός είναι έτοιμες να αποτελέσουν έναν από τους παράγοντες που θα αλλάξουν το παιχνίδι προς την κατεύθυνση ασφαλών, βιώσιμων και οικονομικά προσιτών ενεργειακών συστημάτων. Αυτές οι πρόσφατες εξελίξεις καταδεικνύουν την ανάγκη ενσωμάτωσης της τεχνολογικής καινοτομίας σε προσεγγίσεις με επίκεντρο τον καταναλωτή, εάν πρόκειται να αξιοποιηθεί πλήρως το δυναμικό της διαχείρισης της ζήτησης στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας του εικοστού πρώτου αιώνα.

5.2.4 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage Systems)

Ο πλανήτης υιοθετεί με ταχείς ρυθμούς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για να αντιμετωπίσει την αυξανόμενη περιβαλλοντική κρίση των εκπομπών CO₂. Οι ΑΠΕ έχουν σημαντικό δυναμικό για την απαλλαγή του περιβάλλοντος από τον άνθρακα, καθώς δεν εκπέμπουν αέρια του θερμοκηπίου ή άλλους ρύπους. Ωστόσο, βασίζονται σε φυσικούς πόρους για την παραγωγή ενέργειας, όπως το ηλιακό φως, ο άνεμος, το νερό και η γεωθερμική ενέργεια, οι οποίοι είναι συχνά απρόβλεπτοι και υπόκεινται σε καιρικές συνθήκες, εποχιακές διακυμάνσεις και ετήσιους κύκλους. Για τον μετριασμό αυτών των διαλείψεων, η ανανεώσιμη ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί με τη χρήση διαφόρων τεχνολογιών και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί με αξιόπιστο και ελεγχόμενο τρόπο όταν χρειάζεται. Πολυάριθμοι ερευνητές έχουν ενισχύσει σημαντικά την ανάπτυξη νέων συσκευών αποθήκευσης ενέργειας κατά τη

διάρκεια του περασμένου αιώνα, επιτυγχάνοντας απόδοση επαρκή για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης ενέργειας και των τεχνολογικών βελτιώσεων.

Ο κύριος ρόλος των Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας είναι η μετατόπιση του φορτίου και η εξοικονόμηση αιχμής, η μετατόπιση της χρήσης ενέργειας από περιόδους υψηλής ζήτησης σε περιόδους χαμηλής ζήτησης. Αυτό ανακουφίζει τη συμφόρηση του δικτύου και μειώνει την εξάρτηση από ακριβές μονάδες παραγωγής αιχμής, αποφέροντας έτσι οικονομικά οφέλη τόσο για τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας όσο και για τους καταναλωτές. Επιπλέον, μπορούν να μειώσουν τη μεταβλητότητα που συνδέεται με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια. Ακόμη, τα Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας έρχονται να διατηρήσουν μια σταθερή παροχή ενέργειας και εκτελούν τη λειτουργία της αποθήκευσης της πλεονάζουσας παραγόμενης ενέργειας όταν η παραγωγή είναι πλεονασματική και της απελευθέρωσης ενέργειας όταν η παραγωγή είναι φτωχή, ενισχύοντας έτσι την εξάρτηση από εναλλακτικές ανανεώσιμες πηγές.

Με τη στροφή της οικονομίας προς την πράσινη ενέργεια, η ζήτηση για Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας έχει εκτοξευθεί στα ύψη και κάποιες από τις βασικές κατηγορίες τους είναι οι εξής: Η θερμική αποθήκευση ενέργειας (TES), η οποία περιλαμβάνει την αποθήκευση αισθητής θερμότητας (SHS) που βασίζεται σε υλικά όπως το νερό ή τα πετρώματα για την αποθήκευση θερμότητας μέσω αλλαγών θερμοκρασίας και την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας (LHS) που χρησιμοποιεί υλικά αλλαγής φάσης (PCM) για την απορρόφηση ή την απελευθέρωση θερμότητας κατά τη διάρκεια μεταβάσεων φάσης. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας με αντλία (PTES) είναι μια άλλη κατηγορία TES που χρησιμοποιεί αντλίες θερμότητας και θερμοδυναμικούς κύκλους. Επιπλέον, η μηχανική αποθήκευση ενέργειας (MES) περιλαμβάνει συστήματα όπως η αντλησιοταμιευτική αποθήκευση υδροηλεκτρικής ενέργειας, η οποία χρησιμοποιεί δεξαμενές σε διαφορετικά υψόμετρα για την αποθήκευση και την απελευθέρωση ενέργειας. Τέλος, η ηλεκτροχημική αποθήκευση ενέργειας περιλαμβάνει συστήματα μπαταριών, συμπεριλαμβανομένων των μπαταριών μολύβδου-οξέος, ιόντων λιθίου, νικελίου-καδμίου, νατρίου-θειού, ιόντων νατρίου και μετάλλου-αέρα, καθώς και μπαταρίες ροής όπως οι μπαταρίες οξειδοαναγωγής του βαναδίου και οι μπαταρίες βρωμιούχου πολυθειούχου [50]. Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας αποθηκεύουν ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία, όπως οι πυκνωτές, οι υπερπυκνωτές και η υπεραγωγίμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας (SMES). Τα υβριδικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συνδυάζουν πολλαπλές τεχνολογίες για τη βελτιστοποίηση της διατήρησης και της παροχής ενέργειας για συγκεκριμένες εφαρμογές. Τόσο από οικονομική όσο και από περιβαλλοντική άποψη, αυξάνει την ενεργειακή απόδοση, μειώνει την εξάρτηση από τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας και μειώνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Αυτό το διπλό όφελος ανταποκρίνεται στους κύριους στόχους της

DSM: να καταστούν τα ενεργειακά συστήματα βιώσιμα και οικονομικά βιώσιμα. Ο βασικός πυλώνας των συστημάτων αποθήκευσης είναι διάφορες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων συστημάτων αποθήκευσης μπαταριών, αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και προηγμένων λύσεων ενσωμάτωσης στο δίκτυο που ενισχύουν το ρόλο του στα σύγχρονα συστήματα διαχείρισης ενέργειας.

5.3 Ανάλυση της Διαχείρισης από την Πλευρά της Ζήτησης (DSM) στις Ενεργειακές Κοινότητες

Η DSM μπορεί να αποδειχθεί ένα πολύ ζωτικό εργαλείο για κάθε ενεργειακή κοινότητα, ιδίως στην πλευρά της ζήτησης των αποκεντρωμένων ενεργειακών συστημάτων. Θα επιτρέψει τα έξυπνα δίκτυα, την αποθήκευση ενέργειας, το blockchain και τους μηχανισμούς πώλησης από ομότιμους προς ομότιμους για να εξισορροπήσουν την ανάγκη του κοινοτικού πλαισίου στην προσφορά και την κατανάλωση βιώσιμης ενέργειας. Αυτές οι ενεργειακές κοινότητες εφαρμόζουν διαχείριση της ζήτησης, δίνοντας προτεραιότητα σε τεχνολογίες που επιτρέπουν τον δυναμικό και σε πραγματικό χρόνο έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό το σύστημα διαχείρισης ενέργειας και τιμολόγησης αυτοματοποιεί πλήρως και καθιστά διαφανείς τις συναλλαγές στους χρήστες μέσω της ασφαλούς επικοινωνίας προκειμένου να τους δώσει τη δυνατότητα να δημιουργήσουν τρόπους μείωσης του κόστους κατανάλωσης και περαιτέρω αύξησης της αποδοτικότητας εντός της κοινότητας.

Τα ενσωματωμένα στην κοινότητα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας θα παρέχουν την απαιτούμενη αποτελεσματικότητα στη διαχείριση της ζήτησης αιχμής και θα αυξήσουν την αξιοπιστία του δικτύου. Η οικονομική σκοπιμότητα εξακριβώνεται περαιτέρω με την άμεση εμπορία ενέργειας μεταξύ των μελών της κοινότητας μέσω της εμπορίας ενέργειας P2P. Η DSM θα καταστήσει δυνατή την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις αποκεντρωμένες ενεργειακές κοινότητες. Η αποδοτική χρήση των πόρων με οικονομικά βιώσιμο τρόπο, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, θα είναι δυνατή με τον δυναμικό έλεγχο του φορτίου και τη μετατόπιση της κατανάλωσης σε περιόδους χαμηλής ζήτησης. Η μεθοδολογία προσφέρει ανάπτυξη προς πολύ πιο βιώσιμες και ενεργειακά αποδοτικές κοινωνίες με μικρότερο κόστος, ενώ προωθεί τη σταθερότητα στα συστήματα παραγωγής ενέργειας προς την ενεργειακή αυτάρκεια.

Οι Afzal κ.ά. [2] πρότειναν ένα σύστημα διαχείρισης της ζήτησης από την πλευρά του blockchain για τη διαχείριση της ενέργειας σε κοινότητες μικροδικτύων. Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας IoT με έξυπνους μετρητές θα μειώσει τις δυναμικές ρυθμίσεις σε πραγματικό χρόνο στη χρήση της ενέργειας και θα εξοικονομήσει

δαπάνες τόσο σε ατομικό όσο και σε κοινοτικό επίπεδο. Από την άλλη, οι Lyden κ.ά. [46] υποστήριξαν την ανάπτυξη μιας μεθόδου με την οποία επιλέγονται εργαλεία για την ανάλυση και τον σχεδιασμό ενεργειακών συστημάτων κοινοτικής κλίμακας, χρησιμοποιώντας βέλτιστες μεθόδους εφαρμογής της διαχείρισης της ζήτησης ως απαραίτητο στοιχείο για τη διευκόλυνση της περαιτέρω χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις κοινότητες. Οι Zhou κ.ά. [79] στοχεύουν στις ενεργειακές συναλλαγές P2P σε ενεργειακές κοινότητες και τονίζουν ότι οι χρήστες δεν είναι πλέον παθητικοί στη διαχείριση της ζήτησης. Όσο μεγαλύτερη είναι η εμπλοκή των καταναλωτών, τόσο μεγαλύτερη είναι η δυναμική προσαρμοστικότητα και η οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων διαχείρισης της ζήτησης.

Εν κατακλείδι, η DSM σε ενεργειακές κοινότητες έχει μελετηθεί για την επίτευξη δυναμικών αποτελεσμάτων, εστιάζοντας στη μετατόπιση φορτίου χωρίς διακοπές και στη βελτίωση της διαχείρισης ενέργειας. Παράλληλα, οι στρατηγικές αυτές συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Επιπλέον, έχει αναπτυχθεί ένα πλαίσιο DSM που ενσωματώνει συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Το σύστημα αυτό διατηρεί τις τάσεις του δικτύου εντός αποδεκτών ορίων, ενισχύει την αποδοτικότητα της κατανάλωσης και μειώνει το κόστος τόσο για τους καταναλωτές όσο και για τους παρόχους ενέργειας.

6. Ανάλυση S.W.O.T και μελέτη περίπτωσης στην Ελλάδα

6.1 Ανάλυση SWOT

Η ανάλυση SWOT ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1950 στη Σχολή Επιχειρήσεων του Χάρβαρντ για την ανάλυση μελετών περιπτώσεων από τους καθηγητές του Χάρβαρντ George Albert Smith Jr. και C Roland Christensen. Τη δεκαετία του 1980-1990 η μέθοδος αυτή επανήλθε εκτενώς [32] και κατέκτησε κυρίαρχο πλαίσιο στον τομέα της στρατηγικής διοίκησης και έκτοτε αποδεικνύοντας την εγκυρότητα και την ακρίβειά της, έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλούς διαφορετικούς τομείς.

Αποτελεί βασικό εργαλείο για όλους τους οργανισμούς προκειμένου να αξιολογήσουν τη θέση τους στην αγορά και χρησιμοποιείται συνήθως για την εξέταση τόσο του εσωτερικού όσο και του εξωτερικού περιβάλλοντος σε περιόδους αβεβαιότητας [8], αναλύοντας τα τέσσερα συστατικά στοιχεία που οριοθετούν είτε εσωτερικούς είτε εξωτερικούς παράγοντες. Οι ευκαιρίες είναι ουσιαστικά εξωτερικοί παράγοντες που βοηθούν μια επιχείρηση στην επίτευξη των στόχων της, περιλαμβάνοντας ευνοϊκά περιβαλλοντικά στοιχεία και προοπτικές για την

αντιμετώπιση των ελλείψεων και την ανάληψη νέων πρωτοβουλιών. Τα δυνατά σημεία υποδηλώνουν τα εσωτερικά στοιχεία ενός οργανισμού που διευκολύνουν την επίτευξη των στόχων του, ενώ οι αδυναμίες υποδηλώνουν τις εσωτερικές μεταβλητές που εμποδίζουν την επιτυχία της επιχείρησης. Οι απειλές είναι στοιχεία του εξωτερικού περιβάλλοντος ενός οργανισμού που εμποδίζουν ή ενδέχεται να εμποδίσουν την επίτευξη των στόχων.

6.2 Ανάλυση SWOT για Energy Marketplaces

Η διενέργεια ανάλυσης SWOT για τις πλατφόρμες συναλλαγών ενέργειας περιλαμβάνει την αξιολόγηση των εσωτερικών τους δυνάμεων και αδυναμιών, καθώς και των εξωτερικών ευκαιριών και απειλών. Παρακάτω παρατίθεται μια ανάλυση αυτών.

Δυνατά σημεία

Οι πλατφόρμες συναλλαγών ενέργειας αναδεικνύονται ως καίριο εργαλείο για τη βιώσιμη μετάβαση του ενεργειακού τομέα. Αρχικά, επιτρέπουν την ενσωμάτωση των ΑΠΕ στα ηλεκτρικά δίκτυα και ενθαρρύνουν τη συμμετοχή των καταναλωτών στη διαδικασία της παραγωγής. Σύμφωνα με την έκθεση του IRENA [111], πιλοτικά προγράμματα σε Μαλαισία, Αυστραλία και Ηνωμένο Βασίλειο πέτυχαν μείωση του κόστους ενέργειας έως 10% για τους συμμετέχοντες, προωθώντας παράλληλα τη βελτίωση της σταθερότητας των δικτύων. Η χρήση αποκεντρωμένων τεχνολογιών, όπως το blockchain, αυτοματοποιεί και επιταχύνει τις συναλλαγές ενέργειας, μειώνοντας ταυτόχρονα τις αμοιβές των μεσαζόντων. Όπως δείχνει η μελέτη του MDPI [113], η αξιοποίηση blockchain σε P2P πλατφόρμες μπορεί να ελαττώσει το κόστος συναλλαγών, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει τη ρευστότητα της αγοράς. Επιπλέον, οι πλατφόρμες συναλλαγών ενέργειας συμβάλλουν στην ευρύτερη προσπάθεια για απανθρακοποίηση, με χαρακτηριστικό παράδειγμα πιλοτικά συστήματα στην Κίνα, που μείωσαν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα [114]. Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα είναι η ενεργοποίηση των prosumers, δηλαδή των καταναλωτών που παράγουν και τροφοδοτούν τα δίκτυα με ενέργεια από ιδιωτικές εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών (π.χ. ηλιακά πάνελ). Στο Brooklyn Microgrid, οι prosumers κατέγραψαν αύξηση του εισοδήματος τους χάρη στην πώληση της πλεονάζουσας ηλιακής ενέργειάς τους [111]. Επιπλέον, οι ψηφιακές πλατφόρμες που αξιοποιούν τεχνολογίες AI βελτιστοποιούν την τιμολόγηση, διευκολύνουν την ακριβέστερη πρόβλεψη προσφοράς-ζήτησης και ενθαρρύνουν τη συμμετοχή και μικρότερων παικτών στην αγορά [112]. Συνολικά, οι πλατφόρμες συναλλαγών ενέργειας αποτελούν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την οικοδόμηση ενός αποδοτικότερου, φιλικού προς το περιβάλλον και πιο «συνεργατικού» ενεργειακού

οικοσυστήματος. Με τη συνεχιζόμενη ανάπτυξη τεχνολογιών blockchain και AI, η αποκεντρωμένη εμπορία ενέργειας αναμένεται να υποστηρίξει ακόμη περισσότερο την απανθρακοποίηση και τη βελτίωση της ενεργειακής ασφάλειας [95].

Αδύναμα Σημεία

Οι πλατφόρμες συναλλαγών ενέργειας αντιμετωπίζουν σύνθετες προκλήσεις τόσο σε ρυθμιστικό όσο και σε τεχνολογικό επίπεδο, σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες [96,115,118]. Η ασάφεια στο νομοθετικό πλαίσιο δημιουργεί οικονομικούς κινδύνους και καθυστερήσεις, καθώς διαφοροποιημένες ρυθμίσεις ανά δικαιοδοσία (π.χ. διαφορετικά φορολογικά κίνητρα ή επιδοτήσεις) απαιτούν συνεχείς προσαρμογές. Παράλληλα, η δυναμική των πολιτικών εντείνει το κόστος συμμόρφωσης και τη γραφειοκρατία, ιδίως σε διασυνοριακές αλυσίδες εφοδιασμού, όπου οι εταιρείες καλούνται να τηρούν πολυεπίπεδες περιβαλλοντικές και εργασιακές προδιαγραφές. Για τον μετριασμό αυτών των κινδύνων, προτείνονται πρακτικές όπως η ανάπτυξη ενοποιημένων πλαισίων διακυβέρνησης (π.χ. ISO 14001) και η αξιοποίηση τεχνητής νοημοσύνης για την αυτοματοποιημένη παρακολούθηση και προσαρμογή σε κανονιστικές αλλαγές [118].

Σε τεχνολογικό επίπεδο, η διαλειτουργικότητα μεταξύ πολλαπλών συστημάτων και συσκευών αποτελεί κρίσιμο ζήτημα, ιδίως όταν πρόκειται για ενσωμάτωση μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά και η αιολική ενέργεια [116,119]. Οι έξυπνοι μετρητές, οι κατανεμημένοι ενεργειακοί πόροι (DER) και τα προηγμένα συστήματα διαχείρισης δικτύου χρειάζονται ασφαλή πρωτόκολλα επικοινωνίας και τυποποιημένες μεθόδους ανταλλαγής δεδομένων. Την κατάσταση περιπλέκει περαιτέρω το υψηλό τεχνικό κόστος, καθώς η υλοποίηση έξυπνων δικτύων απαιτεί επενδύσεις σε υποδομές, συμμόρφωση με κανονιστικά πλαίσια όπως το GDPR, καθώς και εξέλιξη αλγορίθμων ML [117]. Παρά τη δυσκολία προσαρμογής, οι ερευνητές συμφωνούν ότι η στενή συνεργασία μεταξύ νομοθετών, τεχνολογικών παρόχων και ερευνητικών ιδρυμάτων μπορεί να επιταχύνει τη μετάβαση σε βιώσιμα ενεργειακά συστήματα, συνδυάζοντας ρυθμιστικές βελτιώσεις με καινοτομίες που ελαχιστοποιούν την πολυπλοκότητα και το κόστος.

Ευκαιρίες

Τα έξυπνα δίκτυα (smart grids) προσφέρουν σημαντικές ευκαιρίες για βελτίωση της αποδοτικότητας, της αξιοπιστίας και της επεκτασιμότητας, χάρη στη χρήση προηγμένων συστημάτων παρακολούθησης, ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και αυτοματοποιημένων μηχανισμών ελέγχου [120,97]. Με αυτόν τον τρόπο, διευκολύνεται η βελτιστοποίηση της διανομής ενέργειας και η αύξηση της σταθερότητας του δικτύου, ενώ παράλληλα παρέχονται εξατομικευμένες λύσεις τόσο στους καταναλωτές όσο και στους παραγωγούς [120]. Η εφαρμογή τέτοιων

τεχνολογιών στηρίζεται, επιπλέον, στην παγκόσμια στροφή προς τη βιώσιμη ανάπτυξη και τα ενεργειακά συστήματα χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [122]. Η αυξανόμενη περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση των καταναλωτών και οι πολιτικές που ενθαρρύνουν τη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δημιουργούν ένα ευνοϊκό πλαίσιο για την ανάπτυξη καινοτόμων υποδομών. Παράλληλα, οι διεθνείς συμφωνίες για το κλίμα και οι εθνικές ενεργειακές πολιτικές επιταχύνουν τις επενδύσεις, καθιστώντας τα έξυπνα δίκτυα απαραίτητα για την ορθολογική ενσωμάτωση και αξιοποίηση αυτών των πόρων [121,122].

Ένα έξυπνο δίκτυο αποτελεί μια ευφυή υποδομή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία βασίζεται σε σύγχρονες τεχνολογίες επικοινωνίας, υπολογισμού και ηλεκτρονικής, ώστε να ανταποκρίνεται στις μελλοντικές απαιτήσεις της κοινωνίας σε ηλεκτρική ενέργεια [120]. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, τα έξυπνα δίκτυα αξιοποιούν και συνδυάζουν τις φυσικές υποδομές των ηλεκτρικών συστημάτων με τεχνολογίες πληροφορικής και επικοινωνιών, εξασφαλίζοντας αδιάλειπτη παροχή, βελτιωμένη ασφάλεια και αξιοπιστία [120]. Ενδεικτικά, μέσα από την ενσωμάτωση έξυπνων μετρητών και συσκευών, καθώς και την ανάπτυξη μονάδων μικρο-παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας, δίνεται η δυνατότητα στους καταναλωτές να παρακολουθούν την κατανάλωση και την τιμολόγηση της ενέργειάς τους σε πραγματικό χρόνο [121]. Ταυτόχρονα, παρέχεται η ευελιξία ενσωμάτωσης μονάδων που βασίζονται σε ΑΠΕ, ενισχύοντας τη πράσινη μετάβαση. [122].

Απειλές

Παρά τα σημαντικά οφέλη, οι πλατφόρμες συναλλαγών ενέργειας και τα έξυπνα δίκτυα καλούνται να αντιμετωπίσουν ορισμένες προκλήσεις και απειλές. Αρχικά, αυξάνεται ο ανταγωνισμός μεταξύ των πλατφορμών, αναγκάζοντάς τις να επενδύουν διαρκώς στην έρευνα, την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών και τη δημιουργία στρατηγικών συνεργασιών, προκειμένου να διατηρήσουν το ανταγωνιστικό τους πλεονέκτημα [124]. Η αδυναμία έγκαιρης προσαρμογής στις τεχνολογικές εξελίξεις μπορεί να υπονομεύσει τη βιωσιμότητα και την επιτυχία αυτών των πλατφορμών [124,125]. Επιπλέον, η ψηφιακή υποδομή της ενεργειακής βιομηχανίας εκτίθεται σε απειλές στον κυβερνοχώρο, καθώς οι διασυνδεδεμένες ροές δεδομένων και οι ψηφιακές συναλλαγές αποτελούν ελκυστικούς στόχους για επιθέσεις [123]. Η αποτελεσματική προστασία προϋποθέτει ισχυρά κρυπτογραφικά συστήματα, αξιόπιστα πρωτόκολλα ελέγχου ταυτότητας και διαρκή παρακολούθηση των δικτύων [123].

Τέλος, η υπάρχουσα υποδομή δικτύου δεν είναι σε κάθε περίπτωση κατάλληλη για την υποστήριξη και την ευρεία εφαρμογή των τεχνολογιών έξυπνου δικτύου [122]. Οι απαιτήσεις για αγορά έξυπνων μετρητών, αισθητήρων και σχετικών συσκευών αυξάνουν σημαντικά το κόστος εγκατάστασης [121,122]. Επίσης, ορισμένες

κοινωνικοοικονομικές προκλήσεις, όπως οι υψηλές κεφαλαιακές δαπάνες, οι ανησυχίες για την προστασία της ιδιωτικότητας, οι φόβοι απαξίωσης ή οι πιθανοί νέοι δασμοί και οι επιπτώσεις στην υγεία από ραδιοσυχνότητες, ενδέχεται να επιβραδύνουν τη διεξόδυση των έξυπνων δικτύων [121]. Παρ' όλ' αυτά, η αμοιβαία ενημέρωση και συνεργασία μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων φορέων (κυβερνήσεις, εταιρείες, καταναλωτές, ερευνητικοί οργανισμοί) μπορεί να λειτουργήσει ως καταλύτης για την επιτυχία και τη βιωσιμότητα των smart grids σε παγκόσμιο επίπεδο.



Εικόνα 3. Ανάλυση SWOT για τα Energy Marketplaces

6.3 Ανάλυση SWOT σε Demand Side Management Strategies

Δυνατά σημεία

Η DSM ενισχύει την αξιοπιστία του δικτύου εξοπλίζοντας τους καταναλωτές με τα απαραίτητα εργαλεία και πληροφορίες για να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις κατανάλωσης ενέργειας. Ρυθμίζοντας ενεργά τη ζήτηση αιχμής, η DSM μειώνει το φορτίο του δικτύου, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο διακοπών και ενισχύοντας τη σταθερότητα του συστήματος. Αυτή η δυναμική μεταβολή του προφίλ φορτίου διευκολύνει μια πιο δίκαιη και αποτελεσματική κατανομή των ενεργειακών πόρων και ενισχύει τη χρήση της υφιστάμενης υποδομής. Εκτός από τη διασφάλιση της

λειτουργικής αξιοπιστίας, η διαχείριση της ζήτησης ενισχύει επίσης άμεσα τη βιωσιμότητα του έξυπνου δικτύου. Μειώνοντας τη ζήτηση αιχμής και ευθυγραμμίζοντας τη χρήση ενέργειας με τη διαθέσιμη προσφορά, μετριάζει την ανάγκη για ακριβές και ενεργοβόρες εγκαταστάσεις αιχμής. Αυτό μειώνει σημαντικά τα λειτουργικά έξοδα των υπηρεσιών κοινής ωφέλειας και μειώνει τις συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, προωθώντας έτσι περιβαλλοντικά βιώσιμες συνήθειες [99]. Επιπλέον, η ενσωμάτωση της διαχείρισης της ζήτησης στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας συγχρονίζει τα πρότυπα ζήτησης με τις διακυμάνσεις στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, διευκολύνοντας την εφαρμογή της και προωθώντας περαιτέρω τους στόχους απαλλαγής από τον άνθρακα. Αυτή η επαναστατική ισχύς την καθιστά θεμελιώδους σημασίας για τη σύγχρονη διαχείριση της ενέργειας, παρέχοντας τα οικονομικά, περιβαλλοντικά και λειτουργικά πλεονεκτήματα που είναι απαραίτητα για τη μετάβαση σε ένα πιο έξυπνο και βιώσιμο ενεργειακό σύστημα.

Αδύναμα Σημεία

Η εφαρμογή στρατηγικών DSM απαιτεί σημαντικές οικονομικές και τεχνολογικές επενδύσεις και συχνά αντιμετωπίζει μια σειρά σημαντικών εμποδίων: πρέπει να αναπτυχθούν προηγμένες υποδομές όπως έξυπνοι μετρητές, αυτοματοποιημένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας και δίκτυα επικοινωνίας. Αυτό απαιτεί υψηλό κόστος χρέους [99]. Το κόστος αυτό είναι ακόμη χειρότερο λόγω της ανάγκης για συνεχή συντήρηση, αναβαθμίσεις και ενσωμάτωση με τα υφιστάμενα ενεργειακά συστήματα. Αυτό είναι ιδιαίτερα δύσκολο για τους πόρους ή τις δημόσιες υπηρεσίες που σχετίζονται με περιοχές ανάπτυξης. Εκτός από τις οικονομικές και τεχνικές προκλήσεις, η επιτυχία των στρατηγικών DSM συνδέεται άρρηκτα με τη συμμετοχή των καταναλωτών και την προσαρμογή της συμπεριφοράς τους [100]. Η προώθηση της εμπλοκής των καταναλωτών στη διαχείριση της ενέργειας απαιτεί εκτεταμένες εκπαιδευτικές και ενημερωτικές πρωτοβουλίες για τη διαλεύκανση των πλεονεκτημάτων και των χαρακτηριστικών της διαχείρισης της ενέργειας. Επιπλέον, η διατήρηση της μακροχρόνιας δέσμευσης αποτελεί τεράστια πρόκληση, απαιτώντας νέες τακτικές όπως η δυναμική τιμολόγηση, η ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο και τα εξατομικευμένα κίνητρα για τη διατήρηση των κινήτρων και της συμμετοχής των καταναλωτών.

Ευκαιρίες

Ο συνδυασμός της DSM με καινοτόμες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων του blockchain και των μεθοδολογιών θεωρίας παιγνίων, προσφέρει μετασχηματιστικές προοπτικές για τη βελτίωση της διαχείρισης της ενέργειας, ιδίως σε μικροδίκτυα και περιοχές που αντιμετωπίζουν περιορισμούς στον εφοδιασμό. Η τεχνολογία blockchain προσφέρει ασφαλείς, διαφανείς και αποκεντρωμένες πλατφόρμες για τις

ενεργειακές συναλλαγές, διευκολύνοντας το αποτελεσματικότερο εμπόριο ενέργειας μεταξύ ομότιμων και ελαχιστοποιώντας τις διοικητικές αναποτελεσματικότητες. Αυτή η λειτουργικότητα είναι ιδιαίτερα επωφελής για τα μικροδίκτυα, τα οποία μπορούν να εξισορροπούν δυναμικά την τοπική παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας για να εγγυηθούν την αξιοπιστία και να μειώσουν τις ενεργειακές απώλειες. Επιπλέον, η διαχείρισης της ζήτησης έχει τη δυνατότητα να ενισχύσει σημαντικά την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο [99]. Με την αντιμετώπιση της κυμαινόμενης και σποραδικής φύσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, η DSM μπορεί να ενισχύσει τη σταθερότητα του δικτύου και να βελτιστοποιήσει τη χρήση αυτών των καθαρών ενεργειακών πόρων. Τα προγράμματα απόκρισης στη ζήτηση, στα οποία οι χρήστες τροποποιούν την ενεργειακή τους κατανάλωση σε απόκριση σε σήματα πραγματικού χρόνου ή σε κίνητρα τιμών, είναι ζωτικής σημασίας για τον έλεγχο της διακύμανσης της ανανεώσιμης ενέργειας.

Απειλές

Η ενεργειακή πολιτική και οι κανόνες είναι συχνά απρόβλεπτοι και δημιουργούν σημαντικές απειλές για την εφαρμογή στρατηγικών DSM. Οι συχνές αλλαγές στις πολιτικές, οι διαφορές στους κανονισμούς στις διάφορες περιοχές και οι καθυστερήσεις στις σαφείς κατευθυντήριες γραμμές μπορούν να δημιουργήσουν αβεβαιότητα στους ενδιαφερόμενους, να αποτρέψουν τις επενδύσεις και να καθυστερήσουν την αποδοχή. Αυτή η κανονιστική πολυπλοκότητα μπορεί επίσης να δημιουργήσει ασυνέπειες στην ανάπτυξη DSM, καθιστώντας δύσκολη την αποτελεσματική κλιμάκωση του προγράμματος ή την επίτευξη τυποποιημένων πρακτικών [99]. Επιπλέον, η αυξανόμενη ψηφιοποίηση των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας, ενώ είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της βιώσιμης διαχείρισης της ενέργειας, αυξάνει την ευπάθειά τους σε απειλές κυβερνοασφάλειας [101]. Αυτές οι απειλές περιλαμβάνουν παραβιάσεις δεδομένων και χειραγώγηση συστημάτων, οι οποίες θα μπορούσαν να διαταράξουν τις λειτουργίες, να θέσουν σε κίνδυνο ευαίσθητα δεδομένα των καταναλωτών και να διαβρώσουν την εμπιστοσύνη στις πρωτοβουλίες DSM.



Εικόνα 4. Ανάλυση SWOT για τις στρατηγικές Διαχείρισης της Ζήτησης

6.4 Σενάριο στην Ελλάδα: Energy Marketplaces και Διαχείριση της Ζήτησης (DSM)

Η Ελλάδα βρίσκεται σήμερα σε μια κρίσιμη φάση της ενεργειακής μετάβασης, όπου ο εκδημοκρατισμός της ενέργειας και η αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας πρέπει να αποτελέσουν βασικά στοιχεία της μετάβασης αυτής. Η εκμετάλλευση προηγμένων ψηφιακών πλατφορμών και στρατηγικών διαχείρισης ζήτησης έρχεται να υποστηρίξει και να θεμελιώσει τη προσπάθεια αυτή για τη δημιουργία ενός βιώσιμου, αποκεντρωμένου και ανθεκτικού ενεργειακού συστήματος.

Η θέσπιση νομοθετικών πρωτοβουλιών, όπως ο Νόμος 4513/2018 για τις ενεργειακές κοινότητες, έχει δημιουργήσει το νομικό πλαίσιο που επιτρέπει την ανάπτυξη νέων μοντέλων παραγωγής και διαχείρισης ενέργειας [90, 91, 93]. Μέσα από την υιοθέτηση τεχνολογιών όπως το blockchain, τα smart contracts και οι συναλλαγές τύπου P2P, δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για την ενσωμάτωση καινοτόμων εφαρμογών, μειώνοντας έτσι τις πολλές αβεβαιότητες για τους επενδυτές. Η πρόσβαση σε ευρωπαϊκές χρηματοδοτήσεις, όπως το Ταμείο Ανάκαμψης [102], ενισχύει περαιτέρω την οικονομική βάση των έργων, επιταχύνοντας την υλοποίηση των ψηφιακών πλατφορμών και των στρατηγικών διαχείρισης ζήτησης.

Σε επίπεδο ενεργειακών κοινοτήτων, η μετάβαση σε net billing για την ανταλλαγή και την τιμολόγηση της ενέργειας καθίσταται όλο και πιο αναγκαία. Ενώ οι νέες

ενεργειακές κοινότητες τείνουν πλέον να σχεδιάζονται εξαρχής με βάση το net billing, οι παλαιότερες μπορούν – και σταδιακά οφείλουν – να προσαρμόζονται σε αυτό το πλαίσιο, αξιοποιώντας τις δυνατότητες που προσφέρει η ψηφιακή τεχνολογία για δίκαιη και αποδοτική διαχείριση της παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Παρότι το net billing θεωρείται πιο δίκαιο και αποδοτικό μοντέλο σε σχέση με το απλό net metering, η μετάβαση σε αυτό συνεπάγεται ορισμένες πρακτικές δυσκολίες, ειδικά για όσους δεν είχαν σχεδιάσει εξαρχής τα έργα τους με αυτή τη λογική (π.χ. ανάγκη επανεπένδυσης, τεχνικές αναβαθμίσεις, εκπαίδευση προσωπικού). Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου δεν προτιμώνται οι ενεργειακές κοινότητες ως νομική και οργανωτική μορφή, η συλλογική αυτοκατανάλωση μπορεί να αποτελέσει μια ευέλικτη εναλλακτική λύση, επιτρέποντας σε ομάδες καταναλωτών να μοιράζονται την παραγόμενη ενέργεια με έναν δίκαιο και διαφανή τρόπο.

Παράλληλα, η εφαρμογή της εθνικής στρατηγικής για την εγκατάσταση «έξυπνων» μετρητών έως το 2030 [103] είναι κρίσιμη για τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, δεδομένων που επιτρέπουν την εφαρμογή δυναμικών τιμολογήσεων και την παρακολούθηση της κατανάλωσης με υψηλή ακρίβεια. Μέσω των έξυπνων μετρητών, οι καταναλωτές έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζουν τις ενεργειακές τους συνήθειες βάσει της διαθεσιμότητας ανανεώσιμων πηγών ή των περιόδων με χαμηλότερες τιμές, οδηγώντας έτσι σε μια πιο ομαλή κατανομή του φορτίου και σε συνολικά υψηλότερη αποδοτικότητα του συστήματος. Ωστόσο, η συλλογή και επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων συνοδεύεται από προκλήσεις που αφορούν την προστασία των προσωπικών δεδομένων και την ανάγκη για συστηματική ενημέρωση και εκπαίδευση των χρηστών, ώστε να κατανοήσουν πλήρως τα οφέλη και τους πιθανούς κινδύνους.

Με την αξιοποίηση της AI, είναι δυνατόν να επεξεργαστούν μεγάλοι όγκοι δεδομένων που συλλέγονται από τους «έξυπνους» μετρητές, επιτρέποντας την πρόβλεψη αιχμών κατανάλωσης και την αυτοματοποίηση διαδικασιών λήψης αποφάσεων. Ταυτόχρονα, οι συναλλαγές που πραγματοποιούνται μέσω smart contracts εξασφαλίζουν διαφάνεια και ασφάλεια, μειώνοντας την ανάγκη για ενδιάμεσους φορείς και οδηγώντας σε μείωση του κόστους των συναλλαγών. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η ψηφιοποίηση του ενεργειακού συστήματος αυξάνει την ευπάθεια σε κυβερνοεπιθέσεις, γεγονός που απαιτεί επενδύσεις σε προηγμένα μέτρα κυβερνοασφάλειας και συνεχή αναβάθμιση των υποδομών. Επιπλέον, η απουσία επαρκών πολιτικών ή κινήτρων που θα ενθαρρύνουν την ενεργό συμμετοχή των πολιτών στον ενεργειακό μετασχηματισμό δυσχεραίνει τη δυναμική ανάπτυξη και την αποδοχή των νέων τεχνολογιών.

Η ενεργειακή αυτονομία στα ελληνικά νησιά αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη προοπτική για τη δημιουργία αυτόνομων ενεργειακών κοινοτήτων, όπου οι πολίτες ενεργούν ως ταυτόχρονοι παραγωγοί και καταναλωτές, ενισχύοντας την τοπική

αυτοδιαχείριση και μειώνοντας τις ανισότητες μεταξύ αστικών και απομακρυσμένων περιοχών. Παράλληλα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει θέσει ως στόχο έξι νησιά – τη Λέσβο, την Ικαρία, τα Ψαρά, την Αστυπάλαια, την Τήλο και τη Μεγίστη – να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες με 100% καθαρή ενέργεια έως το 2030, με την Τήλο να ξεχωρίζει ως το πρώτο ενεργειακά αυτόνομο νησί της Μεσογείου. Στο πλαίσιο της πρωτοβουλίας «30 Renewable Islands for 2030» [104], δήμοι όπως της Μυτιλήνης και της Δυτικής Λέσβου, σε συνεργασία με τη ΔΕΗ Ανανεώσιμες, έχουν υποβάλει πρόταση στο πρόγραμμα «Καθαρή Ενέργεια για τα νησιά της Ευρωπαϊκής Ένωσης», με στόχο την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης μέσω της ανάπτυξης μονάδων παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, της εγκατάστασης λύσεων αποθήκευσης και της παροχής υπηρεσιών ευελιξίας στο δίκτυο.

Επιπλέον, η υβριδική αξιοποίηση πηγών όπως ηλιακή και αιολική ενέργεια, σε συνδυασμό με τεχνολογίες αποθήκευσης, συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης από το κεντρικό δίκτυο, με παραδείγμα την Τήλο όπου ο υβριδικός σταθμός καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος των ενεργειακών αναγκών και τη Λέσβο, όπου σχεδιάζεται η ανάπτυξη γεωθερμικής μονάδας στην περιοχή Στύψη, παράλληλα με την αξιοποίηση βιοαποβλήτων για παραγωγή βιοαερίου [105]. Ωστόσο, οι μπαταρίες αποθήκευσης ενέργειας εξακολουθούν να έχουν υψηλό κόστος, με αποτέλεσμα πολλοί επενδυτές και τοπικές αρχές να διστάζουν να προχωρήσουν στην ευρεία υιοθέτησή τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο, καθώς η αποθήκευση θα μπορούσε να μεγιστοποιήσει τη χρησιμότητα και τα οικονομικά οφέλη από σχήματα όπως το net billing ή η συλλογική αυτοκατανάλωση, επιτρέποντας την αξιοποίηση της ενέργειας σε χρονικές ζώνες με υψηλότερες τιμές ή μεγαλύτερη ανάγκη.

Σε επίπεδο οργάνωσης και διαχείρισης, οι νησιωτικές αυτές πρωτοβουλίες λειτουργούν στην πράξη ως μορφές «τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων», αξιοποιώντας συλλογικές και καινοτόμες δομές παραγωγής/διαμοιρασμού ενέργειας σύμφωνα με το ευρύτερο νομοθετικό πλαίσιο του Ν.4513/2018. Ωστόσο, σε αντίθεση με πολλές άλλες ενεργειακές κοινότητες στην ηπειρωτική χώρα, τα νησιά επωφελούνται συχνά από ειδικά ευρωπαϊκά προγράμματα και κονδύλια, γεγονός που επιταχύνει τη μετάβαση σε καθαρές και αυτόνομες μορφές ενέργειας.

Παρά τις προκλήσεις που περιλαμβάνουν την ανάγκη για αποτελεσματικές διοικητικές δομές και επαρκείς επενδύσεις για την εγκατάσταση και συντήρηση των υποδομών – καθώς και το γεγονός ότι 32 τουριστικά νησιά εξακολουθούν να καλύπτουν τις ενεργειακές τους ανάγκες με ρυπογόνες μονάδες μαζούτ – η ενεργειακή μετάβαση με αξιοποίηση των τοπικών πόρων, της τεχνολογικής καινοτομίας και της ενεργούς συμμετοχής των πολιτών παραμένει ρεαλιστική, καθιστώντας τη συμμετοχή στην πρωτοβουλία «30 Renewable Islands for 2030» ένα κρίσιμο βήμα προς την ενεργειακή αυτονομία των ελληνικών νησιών [106]. Η γραφειοκρατία που επικρατεί στη χώρα, ωστόσο, συχνά επιβραδύνει τις διαδικασίες

αδειοδότησης και υλοποίησης έργων, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για περαιτέρω διοικητικές μεταρρυθμίσεις.

Ο ενεργειακός μετασχηματισμός στην Ελλάδα αντιμετωπίζει πολυεπίπεδες προκλήσεις, απαιτώντας συντονισμένες παρεμβάσεις σε όλα τα επίπεδα. Η παραμονή της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα επιβραδύνει τη μετάβαση σε ένα βιώσιμο μοντέλο, ενώ οι κοινωνικοοικονομικές ανισότητες μεταξύ περιοχών εντείνονται. Η επιτυχία του μετασχηματισμού εξαρτάται από μια ολοκληρωμένη στρατηγική που συνδυάζει τεχνολογική καινοτομία, σταθερή ρυθμιστική και νομική βάση, και ενεργή συμμετοχή της κοινωνίας [107]. Σύμφωνα με το Ινστιτούτο Ενέργειας Νοτιοανατολικής Ευρώπης (IENE) και το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), απαιτούνται επενδύσεις ύψους 67,5 έως 95 δισ. ευρώ έως το 2030 [108].

Οι προκλήσεις περιλαμβάνουν τον περιορισμένο ηλεκτρικό χώρο και τις περικοπές έγχυσης ηλεκτρικής ενέργειας, που αναμένεται να φτάσουν κοντά στο 5% της πράσινης παραγωγής το 2024, καθιστώντας απαραίτητη την ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [108]. Η έλλειψη υποδομών και αγοράς για εναλλακτικά καύσιμα, όπως το υδρογόνο, και το μεταβαλλόμενο ρυθμιστικό πλαίσιο αποτελούν επίσης εμπόδια [107]. Η δημιουργία πειραματικών ζωνών για τη δοκιμή νέων εφαρμογών, όπως οι συναλλαγές peer-to-peer (P2P), μπορεί να επιταχύνει την υιοθέτηση καινοτόμων πρακτικών. Η προσέλκυση ξένων επενδύσεων απαιτεί σταθερό νομικό πλαίσιο, μακροπρόθεσμο σχεδιασμό, και απλούστευση των διαδικασιών αδειοδότησης [109].

Συνολικά, ο ενεργειακός μετασχηματισμός στην Ελλάδα αποτελεί ένα πολυδιάστατο φαινόμενο που επηρεάζει τόσο τις τεχνολογικές όσο και τις ρυθμιστικές και κοινωνικές διαστάσεις [110]. Ενώ οι ψηφιακές πλατφόρμες, οι έξυπνοι μετρητές και οι τεχνολογίες AI προσφέρουν τεράστιες ευκαιρίες για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και της διαχείρισης της ζήτησης, οι προκλήσεις που συνδέονται με την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, την κυβερνοασφάλεια και τις κοινωνικές ανισότητες απαιτούν συντονισμένες και στρατηγικές παρεμβάσεις. Μέσα από μια ολοκληρωμένη και συνεργατική προσέγγιση, που θα συνδυάζει τεχνολογικές καινοτομίες, νομική προσαρμογή και ενεργή συμμετοχή των πολιτών, η Ελλάδα έχει τη δυνατότητα να διαμορφώσει ένα ενεργειακό σύστημα που θα αποτελεί πρότυπο βιωσιμότητας, διαφάνειας και κοινωνικής δικαιοσύνης για το μέλλον [110]. Παρ' όλα αυτά, το επενδυτικό περιβάλλον, αν και βελτιούμενο, συνεχίζει να χαρακτηρίζεται από διοικητικές και ρυθμιστικές δυσκολίες, όπως η γραφειοκρατία και το υψηλό κόστος συγκεκριμένων τεχνολογιών (π.χ. αποθήκευση ενέργειας). Ωστόσο, για όσους διαθέτουν τη βούληση να επενδύσουν μακροπρόθεσμα και να αξιοποιήσουν τις διαθέσιμες ευρωπαϊκές και εθνικές χρηματοδοτήσεις, η αγορά παρουσιάζει ευκαιρίες ανάπτυξης, καθώς το ενδιαφέρον για «πράσινες» επενδύσεις, ψηφιακές

λύσεις και καινοτόμες μορφές συλλογικής αυτοκατανάλωσης συνεχίζει να αυξάνεται.

Ανάλυση SWOT για τη μελέτη περίπτωσης στην Ελλάδα

Κατηγορία	Στοιχεία
Strengths (Δυνατά Σημεία)	Νομοθετική Υποστήριξη: Ο Νόμος 4513/2018 και τα ευρωπαϊκά χρηματοδοτικά προγράμματα ενισχύουν τις ενεργειακές κοινότητες και τις επενδύσεις στις ΑΠΕ. Αυξημένη Παραγωγή ΑΠΕ & Μείωση Ρυπών: Η σταδιακή παύση λειτουργίας των λιγνιτικών μονάδων και η ανάπτυξη φωτοβολταϊκών, αιολικών κ.λπ. βελτιώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της χώρας. Εξυπνοι Μετρητές & Δεδομένα: Επιτρέπουν τη δυναμική τιμολόγηση και τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης. Τεχνολογική Καινοτομία: AI, blockchain και smart contracts βελτιώνουν τη διαφάνεια, την ασφάλεια και την αυτοματοποίηση των συναλλαγών. Αποκέντρωση & Ενεργειακές Κοινότητες: Πρωθείται η ενεργειακή δημοκρατία και η μείωση της εξάρτησης από το κεντρικό δίκτυο.
Weaknesses (Αδύναμα Σημεία)	Εξάρτηση από Ορυκτά Καύσιμα: Παρά τη στροφή προς τις ΑΠΕ, εξακολουθεί να υπάρχει υψηλή εξάρτηση από το φυσικό αέριο και τον λιγνίτη. Υποδομές & Ανισότητες: Διαφορετικά επίπεδα ανάπτυξης σε αστικές και απομακρυσμένες περιοχές, περιορισμένη πρόσβαση

Κατηγορία	Στοιχεία
	στις νέες τεχνολογίες. Αντίσταση στην Αλλαγή: Πολιτικές, οικονομικές και κοινωνικές αντιστάσεις μπορεί να επιβραδύνουν τη μετάβαση. Ψηφιακός Αναλφαβητισμός: Χαμηλή εξοικείωση μεγάλου μέρους του πληθυσμού με έξυπνα συστήματα διαχείρισης ενέργειας. Δυσκολία Προσαρμογής στο Net Billing: Παρότι βοηθά τις νεοσύστατες ενεργειακές κοινότητες, οι παλαιότερες δυσκολεύονται να ενταχθούν στο νέο μοντέλο ή δεν επωφελούνται πλήρως, επιβραδύνοντας τη μετάβασή τους.
Opportunities (Ευκαιρίες)	Ευρωπαϊκή Χρηματοδότηση: Ταμείο Ανάκαμψης και άλλα προγράμματα παρέχουν κεφάλαια για πράσινες επενδύσεις. Ανάπτυξη Αποθήκευσης Ενέργειας: Βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος με μπαταρίες και άλλα μέσα αποθήκευσης. Δημιουργία Νέων Αγορών: Εφαρμογή peer-to-peer συναλλαγών μέσω blockchain, ανάπτυξη πράσινων πιστοποιητικών και υπηρεσιών διαχείρισης ζήτησης (DSM). Συνεργασίες με Ιδιωτικό Τομέα: Ευκαιρίες για start-ups και μεγάλες εταιρείες στον τομέα της έξυπνης ενέργειας. Ταχεία Απολιγνιτοποίηση: Η οριστική παύση των λιγνιτικών μονάδων μπορεί να τονώσει τον κλάδο ΑΠΕ, υποστηρίζοντας την καινοτομία και την «πράσινη» επιχειρηματικότητα.
Threats (Απειλές)	Κυβερνοασφάλεια & Επιθέσεις: Τα ψηφιακά ενεργειακά συστήματα είναι ευάλωτα σε κυβερνοεπιθέσεις. Αστάθεια στην Ενεργειακή Αγορά: Οι διακυμάνσεις των τιμών ενέργειας και των πρώτων υλών μπορούν να επηρεάσουν τις επενδύσεις. Καθυστερήσεις στη Νομοθέτηση: Η γραφειοκρατία και οι αργές

Κατηγορία	Στοιχεία
	διαδικασίες μπορεί να εμποδίσουν τις επενδύσεις. Αντιδράσεις Τοπικών Κοινωνιών: Πιθανή αντίδραση σε νέες εγκαταστάσεις ΑΠΕ ή μεγάλες ενεργειακές επενδύσεις.

7. Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα

7.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα έρευνα επιβεβαιώνει το καθοριστικό ρόλο των ενεργειακών κοινοτήτων στη δημιουργία βιώσιμων ενεργειακών μοντέλων. Διάφορες ενεργειακές κοινότητες στην Ελλάδα καταδεικνύουν πώς η συλλογική δράση ενδυναμώνει την ενεργειακή δημοκρατία, μειώνει την ενεργειακή φτώχεια και ενισχύει την ανθεκτικότητα μέσω αυτοκατανάλωσης και διαχείρισης ανανεώσιμων πηγών σε τοπικό επίπεδο. Ταυτόχρονα, η σύγχρονη ενεργειακή μετάβαση στηρίζεται σε καινοτόμες τεχνολογίες, όπως blockchain, IoT και smart contracts, που προσφέρουν διαφάνεια, ασφάλεια και αποτελεσματικότητα στις P2P συναλλαγές, ενώ διευκολύνουν τη δυναμική συμμετοχή των prosumers.

Η ανάλυση SWOT των πλατφορμών συναλλαγής ενέργειας και των στρατηγικών DSM αποκαλύπτει την πολυδιάστατη αλληλεπίδραση μεταξύ τεχνολογικών προκλήσεων, ρυθμιστικών ασαφειών και κοινωνικοοικονομικών δυνατοτήτων. Αν και οι πλατφόρμες συναλλαγής ενέργειας αποτελούν κρίσιμο εργαλείο για την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών, η επιτυχία τους εξαρτάται από την αντιμετώπιση ζητημάτων όπως η διαλειτουργικότητα συστημάτων, τα υψηλά επενδυτικά κόστη και η κοινωνική διστακτικότητα. Παράλληλα, οι στρατηγικές DSM, παρότι βελτιώνουν την αξιοπιστία του δικτύου και μειώνουν τις εκπομπές, απαιτούν τεχνολογικές αναβαθμίσεις (π.χ. έξυπνοι μετρητές) και ενεργό συμμετοχή των καταναλωτών.

Στο ελληνικό πλαίσιο, ο συνδυασμός αυτών των εργαλείων αντιμετωπίζει ιδιαίτερες προκλήσεις λόγω της ετερογένειας των υποδομών, της γραφειοκρατίας και της ανισότητας μεταξύ νησιών και ηπειρωτικής χώρας. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικές ευκαιρίες μέσω ευρωπαϊκών χρηματοδοτήσεων, υβριδικών συστημάτων (αιολική + ηλιακή ενέργεια + αποθήκευση) και πειραματικών πρωτοβουλιών, όπως οι ενεργειακές κοινότητες σε νησιά. Για μια ουσιαστική μετάβαση, απαιτείται μια ολιστική προσέγγιση που να συνδυάζει τεχνολογική καινοτομία, ρυθμιστική ευελιξία,

ενίσχυση της κυβερνοασφάλειας και εκστρατείες ευαισθητοποίησης για τα οφέλη της ενεργειακής αυτονομίας.

Η Ελλάδα, με στρατηγική αξιοποίηση των πόρων της, μπορεί να διαμορφώσει ένα πρότυπο βιώσιμης ενεργειακής μετάβασης. Αυτό απαιτεί συντονισμένη δράση μεταξύ κυβερνήσεων, βιομηχανίας και κοινωνίας, με έμφαση σε διασυνοριακή συνεργασία, επένδυση σε έρευνα (π.χ., AI για πρόβλεψη ζήτησης) και εξοικείωση του κοινού με τις δυνατότητες των αποκεντρωμένων συστημάτων. Μόνο έτσι μπορούν οι ενεργειακές κοινότητες να γίνουν ο πυρήνας μιας δίκαιης, ανθεκτικής και κλιματικά ουδέτερης ενεργειακής μελλοντικότητας, ισορροπώντας ανάπτυξη, περιβαλλοντική προστασία και κοινωνική συνοχή.

7.2 Περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη

Το διαρκώς μεταβαλλόμενο τοπίο του ενεργειακού κλάδου καθώς και των ενεργειακών κοινοτήτων και πλατφορμών δημιουργεί τεράστιες ευκαιρίες για περαιτέρω έρευνα και τεχνολογική ανάπτυξη. Ενώ η παρούσα μελέτη μπόρεσε να διερευνήσει ορισμένους από τους βασικούς τομείς, όπως οι ενεργειακές κοινότητες, το DSM και η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών όπως το blockchain και το IoT, από την άλλη πλευρά εντοπίστηκαν επίσης αρκετά κενά και ευκαιρίες για περαιτέρω ανάπτυξη.

Πιθανώς ένα από τα σημεία που χρειάζεται πράγματι περαιτέρω έρευνα είναι η επεκτασιμότητα για τις ενεργειακές κοινότητες. Οι περισσότερες αν όχι όλες οι τρέχουσες εφαρμογές παραμένουν σε πολύ τοπική ή ακόμη και πιλοτική κλίμακα. Χρειάζεται να διεξαχθεί περαιτέρω έρευνα για να μελετηθεί πώς τα συστήματα αυτά μπορούν να επεκταθούν ώστε να εξυπηρετούν πολύ μεγαλύτερους πληθυσμούς σε ετερογενείς γεωγραφικές περιοχές χωρίς απώλεια της αποτελεσματικότητας και της βιωσιμότητας. Αυτό περιλαμβάνει την απαιτούμενη υποδομή, τη ρυθμιστική ευθυγράμμιση και την εμπλοκή της κοινότητας σε κλίμακα.

Απαιτούνται περισσότερες διαβουλεύσεις σε επίπεδο πολιτικής με σκοπό την αξιολόγηση των διαφόρων ρυθμιστικών πλαισίων από διάφορες περιοχές. Τέτοιες συγκριτικές μελέτες θα δείξουν τις βέλτιστες πρακτικές και θα προτείνουν ένα πλαίσιο πολιτικής διασύνδεσης που θα μπορούσε να υποστηρίξει την ανάπτυξη των αποκεντρωμένων ενεργειακών συστημάτων. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν κατευθυντήριες γραμμές για τον εξορθολογισμό των διαδικασιών αδειοδότησης ή τα κίνητρα που προσφέρονται για την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ή τα κοινοτικά ενεργειακά προγράμματα.

Τα ενεργειακά συστήματα θα πρέπει τουλάχιστον να είναι οικονομικά βιώσιμα. Η έρευνα σχετικά με τα οικονομικά μοντέλα και τα κίνητρα που μπορούν να συμβάλουν στην τόνωση της διάδοσης των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των κοινοτικών συστημάτων είναι εξαιρετικά σημαντική. Αυτό θα σήμαινε τη μελέτη καινοτόμων μοντέλων χρηματοδότησης που θα μπορούσαν να ξεπεράσουν τις δαπανηρές αρχικές επενδύσεις, συμπεριλαμβανομένων εκείνων από συμπράξεις δημόσιου και ιδιωτικού τομέα, πράσινα ομόλογα και κοινοτικά επενδυτικά προγράμματα που συμβάλλουν στην επίτευξη αυτού του στόχου.

Ακόμη, ένα άλλο σημαντικό πεδίο μελλοντικής έρευνας στον τομέα των ενεργειακών κοινοτήτων και των ενεργειακών πλατφορμών αφορά τη βελτίωση και την επέκταση των στρατηγικών DSM και προγραμμάτων DR. Παρά το γεγονός ότι αυτές οι τεχνολογίες έχουν αποδειχθεί κρίσιμες για την εξισορρόπηση προσφοράς-ζήτησης και την ενσωμάτωση διαλειμματικών ανανεώσιμων πηγών, οι τρέχουσες εφαρμογές συχνά περιορίζονται σε μικρές κλίμακες ή σε πειραματικά πλαίσια. Απαιτείται περαιτέρω μελέτη για τη βελτιστοποίηση προγραμμάτων DR που να λαμβάνουν υπόψη την ετερογένεια των καταναλωτικών προτύπων, την επίδραση ψυχολογικών και κοινωνικοοικονομικών παραγόντων στη συμμετοχή των χρηστών, καθώς και την ανάπτυξη έξυπνων συστημάτων αυτοματοποιημένης απόκρισης με χρήση τεχνολογιών όπως το blockchain και το IoT. Επιπλέον, πρέπει να διερευνηθεί ο ρόλος των δυναμικών τιμολογιακών μοντέλων και των P2P συναλλαγών ενέργειας στην ενίσχυση της DR, ιδίως σε συνδυασμό με αποκεντρωμένες αγορές ενέργειας. Ένα κρίσιμο ερευνητικό κενό αφορά τη δημιουργία ενοποιημένων πλαισίων πολιτικής που να ενθαρρύνουν την υιοθέτηση των στρατηγικών DSM και DR κινήτρων (π.χ. φορολογικών ελαφρύνσεων, επιδοτήσεων) και ρυθμιστικών προσαρμογών, ενώ παράλληλα να εξασφαλίζουν δίκαιη πρόσβαση και προστασία των ευάλωτων ομάδων. Τέλος, η ανάπτυξη προηγμένων αλγορίθμων AI και ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο θα μπορούσε να βελτιώσει την προγνωστική ικανότητα των συστημάτων DR, επιτρέποντας τη δυναμική προσαρμογή της ζήτησης σε συνθήκες αστάθειας δικτύου ή μετεωρολογικής απρόβλεπτης παραγωγής. Η διεξαγωγή πιλοτικών προγραμμάτων σε πολυδιάστατα πλαίσια (αστική/αγροτική/βιομηχανική/οικιακή) θα συμβάλει στη διασφάλιση της επεκτασιμότητας και της ανθεκτικότητας αυτών των λύσεων.

Υπάρχει ανάγκη για βαθύτερη κατανόηση των κοινωνικών διαστάσεων των ενεργειακών κοινοτήτων, εστιάζοντας σε τρόπους ενίσχυσης της συμμετοχής των πολιτών, καλλιέργειας εμπιστοσύνης στις νέες τεχνολογίες και αντιμετώπισης των ανισοτήτων στην πρόσβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να εξετάσουν τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις των αποκεντρωμένων ενεργειακών συστημάτων στη συμπεριφορά των καταναλωτών και των prosumers, καθώς και τον ρόλο της εκπαίδευσης στην προώθηση της υιοθέτησης αυτών των μοντέλων.

Βιβλιογραφία

1. Ableitner, L., Meeuw, A., Schopfer, S., Tiefenbeck, V., Wortmann, F., & Wörner, A. (2019). Quartierstrom--Implementation of a real world prosumer centric local energy market in Walenstadt, Switzerland. *arXiv preprint arXiv:1905.07242*. <https://arxiv.org/abs/1905.07242>
2. Afzal, M., Huang, Q., Amin, W., Umer, K., Raza, A., & Naeem, M. (2020). Blockchain enabled distributed demand side management in community energy system with smart homes. *Ieee Access*, 8, 37428-37439. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2975233>
3. Zhang, Q., & Li, J. (2012, May). Demand response in electricity markets: A review. In *2012 9th international conference on the European Energy market* (pp. 1-8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PES.2007.385728>
4. Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE communications surveys & tutorials*, 17(4), 2347-2376. <https://doi.org/10.1109/comst.2015.2444095>
5. Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P., & Peacock, A. (2018). Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>
6. Ramamurthy, A., & Jain, P. (2017). The internet of things in the power sector opportunities in Asia and the Pacific. <https://doi.org/10.22617/WPS178914-2>
7. Bahrami, S., Khazaeli, F., & Parniani, M. (2013). Industrial load scheduling in smart power grids. <https://doi.org/10.1049/cp.2013.0991>
8. Benzaghta, M. A., Elwalda, A., Mousa, M. M., Erkan, I., & Rahman, M. (2021). SWOT analysis applications: An integrative literature review. *Journal of Global Business Insights*, 6(1), 54-72.
9. Bouzarovski, S., Thomson, H., & Cornelis, M. (2021). Confronting energy

- poverty in Europe: A research and policy agenda. *Energies*, 14(4), 858. <https://doi.org/10.3390/en14040858>
10. Bouzarovski, S., Tirado Herrero, S., Petrova, S., & Ürge-Vorsatz, D. (2015). Unpacking the spaces and politics of energy poverty: Path-dependencies, deprivation and fuel switching in post-communist Hungary. *Local Environment*, 21(9), 1151–1170. <https://doi.org/10.1080/13549839.2015.1075480>
 11. Canova, A., Lazzeroni, P., Lorenti, G., Moraglio, F., Porcelli, A., & Repetto, M. (2022). Decarbonizing residential energy consumption under the Italian collective self-consumption regulation. *Sustainable Cities and Society*, 87, 104196. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104196>
 12. Chalkion. (n.d.). *About us*. Retrieved December 25, 2024, from <https://www.chalkion.gr/#about>
 13. Chen, Y., Xu, P., Gu, J., Schmidt, F., & Li, W. (2018). Measures to improve energy demand flexibility in buildings for demand response (DR): A review. *Energy and buildings*, 177, 125-139. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.003>
 14. COEN. (n.d.). *Ποιοι είμαστε* [Who we are]. Retrieved December 25, 2024, from https://coen.coop/poioi-eimaste/?utm_source
 15. Cointelegraph. (2018). *The world's first peer-to-peer energy trading platform, SunContract, launched*. Cointelegraph <https://cointelegraph.com/press-releases/the-worlds-first-peer-to-peer-energy-trading-platform-suncontract-launched>
 16. Han, D., Zhang, C., Ping, J., & Yan, Z. (2020). Smart contract architecture for decentralized energy trading and management based on blockchains. *Energy*, 199, 117417. doi: 10.1016/j.energy.2020.117417
 17. De Santi, F., Moncecchi, M., Prettico, G., Fulli, G., Olivero, S., & Merlo, M. (2022). To join or not to join? The energy community dilemma: An Italian case study. *Energies*, 15(19), 7072. <https://doi.org/10.3390/en15197072>
 18. Dietz, T., Gardner, G. T., Gilligan, J., Stern, P. C., & Vandenberg, M. P. (2009). Household actions can provide a behavioral wedge to rapidly reduce US carbon emissions. *Proceedings of the national academy of sciences*, 106(44), 18452-18456. <https://doi.org/10.1073/pnas.0908738106>
 19. Doelle, M. (2016). The Paris Agreement: historic breakthrough or high stakes experiment?. *Climate Law*, 6(1-2), 1-20.
 20. Dou, X., Xu, P., Hu, Q., Sheng, W., Quan, X., Wu, Z., & Xu, B. (2018). A distributed voltage control strategy for multi-microgrid active distribution networks considering economy and response speed. *IEEE Access*, 6, 31259-31268. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2837082>
 21. Entezari, A., Aslani, A., Zahedi, R., & Noorollahi, Y. (2023). Artificial intelligence and machine learning in energy systems: A bibliographic perspective. *Energy Strategy Reviews*, 45, 101017. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101017>
 22. European Commission. (2024). *Roadmap report - Energy communities*

- repository: A roadmap to developing a policy and legal framework that enables the development of energy communities*. European Commission
23. Fetting, C. (2020). The European green deal. *ESDN Report, December*, 2(9).
 24. Frieden, D., Tuerk, A., Antunes, A. R., Athanasios, V., Chronis, A. G., d'Herbement, S., ... & Gubina, A. F. (2021). Are we on the right track? Collective self-consumption and energy communities in the European union. *Sustainability*, 13(22), 12494. <https://doi.org/10.3390/su132212494>
 25. Frieden, D., Tuerk, A., Roberts, J., D'Herbement, S., Gubina, A. F., & Komel, B. (2019). Overview of emerging regulatory frameworks on collective self-consumption and energy communities in Europe. In *2019 16th International Conference on the European Energy Market (EEM)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EEM.2019.8916222>
 26. Gajić, D. B., Petrović, V. B., Horvat, N., Dragan, D., Stanisavljević, A., Katić, V., & Popović, J. (2022). A Distributed Ledger-Based Automated Marketplace for the Decentralized Trading of Renewable Energy in Smart Grids. *Energies*, 15(6), 2121. <https://doi.org/10.3390/en15062121>
 27. Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy strategy reviews*, 24, 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>
 28. Government Gazette of the Hellenic Republic. (2018). *Law No. 4513/2018: Energy Communities and other provisions*. *Government Gazette, Series A*, No. 9. Retrieved from https://www.kodiko.gr/nomologia/download_fek?f=fek/2018/a/fek_a_9_2018.pdf&t=58972c3b8cccfad532cfbe135992a3d1
 29. Government Gazette of the Hellenic Republic. (2019). *Ministerial Decision No. ΥΠΕΝ/ΔΑΠΕΕΚ/15084/382*. *Government Gazette, Series B*, No. 759. Retrieved from https://www.kodiko.gr/nomologia/download_fek?f=fek/2019/b/fek_b_759_2019.pdf&t=643cdd63de65af91199bfa51c3b90d29
 30. Government Gazette of the Hellenic Republic. (2023). *Law No. Νόμο 5037/2023*. *Government Gazette, Series A*, No. 78. Retrieved from https://www.kodiko.gr/nomologia/download_fek?f=fek/2023/a/fek_a_78_2023.pdf&t=ae622e251fcae2546f195727ca9742d7
 31. Government Gazette of the Hellenic Republic. (2024). *Ministerial Decision No. ΥΠΕΝ/ΔΑΠΕΕΚ/93976/2772*. *Government Gazette, Series B*, No. 5074. Retrieved from https://www.kodiko.gr/nomologia/download_fek?f=fek/2024/b/fek_b_5074_2024.pdf&t=ef9776dafd4cf2279322d83479eb9853
 32. Hadighi, A., & Mahdavi, I. (2011). A new model for strategy formulation using Mahalanobis-Taguchi system and clustering algorithm. *Intelligent Information*

- Management*, 3(5), 224–230. <https://doi.org/10.4236/iim.2011.35024>
33. Hassan, Q., Abbas, M. K., Tabar, V. S., Tohidi, S., Al-Hitmi, M., Jaszczur, M., Sameen, A. Z., & Salman, H. M. (2023). Collective self-consumption of solar photovoltaic and batteries for a micro-grid energy system. *Results in Engineering*, 17, 100925. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100925>
 34. Hossein Motlagh, N., Mohammadrezaei, M., Hunt, J., & Zakeri, B. (2020). Internet of Things (IoT) and the Energy Sector. *Energies*, 13(2), 494. <https://doi.org/10.3390/en13020494>
 35. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021, August 9). *Climate change 2021: The physical science basis. Press release*. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/>
 36. Interreg Baltic Sea Region. (n.d.). *Case Study 8: OurPower, Austria*. Retrieved December 25, 2024, from <https://interreg-baltic.eu/project-posts/startsun/case-study-8-ourpower-austria/>
 37. IRENA (2019), *Climate Change and Renewable Energy: National policies and the role of communities, cities and regions* (Report to the G20 Climate Sustainability Working Group (CSWG)), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
 38. J2 Capital. (n.d.). *A gentle introduction to blockchain technology*. Retrieved from <https://j2-capital.com/wp-content/uploads/2017/11/A-Gentle-Introduction-To-Blockchain-Technology.pdf>
 39. Javadi, M. S., Nezhad, A. E., Nardelli, P. H., Gough, M., Lotfi, M., Santos, S., & Catalão, J. P. (2021). Self-scheduling model for home energy management systems considering the end-users discomfort index within price-based demand response programs. *Sustainable Cities and Society*, 68, 102792. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102792>
 40. Kauwe, S. K., Rhone, T. D., & Sparks, T. D. (2019). Data-driven studies of li-ion-battery materials. *Crystals*, 9(1), 54. <https://doi.org/10.3390/cryst9010054>
 41. Kirli, D., Couraud, B., Robu, V., Salgado-Bravo, M., Norbu, S., Andoni, M., ... & Kiprakis, A. (2022). Smart contracts in energy systems: A systematic review of fundamental approaches and implementations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112013>
 42. Kojonsaari, A. R., & Palm, J. (2021). Distributed energy systems and energy communities under negotiation. *Technology and economics of smart grids and sustainable energy*, 6(1), 17. <https://doi.org/10.1007/s40866-021-00116-9>
 43. Krug, M., Di Nucci, M. R., Caldera, M., & De Luca, E. (2022). Mainstreaming community energy: is the renewable energy directive a driver for renewable energy communities in Germany and Italy?. *Sustainability*, 14(12), 7181. <https://doi.org/10.3390/su14127181>
 44. Lindberg, M. B. (2019). The EU Emissions Trading System and Renewable Energy Policies: Friends or Foes in the European Policy Mix? *Politics and*

- Governance, 7 (1), 105–123. *CIRCULAR ECONOMY: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES*.
45. Lu, Y., Khan, Z. A., Alvarez-Alvarado, M. S., Zhang, Y., Huang, Z., & Imran, M. (2020). A critical review of sustainable energy policies for the promotion of renewable energy sources. *Sustainability*, 12(12), 5078. <https://doi.org/10.3390/su12125078>
 46. Lyden, A., Pepper, R., & Tuohy, P. (2018). A modelling tool selection process for planning of community scale energy systems including storage and demand side management. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.003>
 47. Marwan, M., Ledwich, G., & Ghosh, A. (2014). Demand-side response model to avoid spike of electricity price. *Journal of Process Control*, 24(6), 782–789. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2014.01.009>
 48. Mediawathe, C. P., & Blackhall, L. (2020). Network-aware demand-side management framework with a community energy storage system considering voltage constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(2), 1229-1238. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.3015218>
 49. Minoan Energy. (n.d.). *Home*. Retrieved December 25, 2024, from https://minoanenergy.com/?utm_source
 50. Mitali, J., Dhinakaran, S., & Mohamad, A. A. (2022). Energy storage systems: A review. *Energy Storage and Saving*, 1(3), 166-216. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2022.07.002>
 51. Morstyn, T., Farrell, N., Darby, S. J., & McCulloch, M. D. (2018). Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants. *Nature energy*, 3(2), 94-101. <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0075-y>
 52. Nejat, P., Jomehzadeh, F., Taheri, M. M., Gohari, M., & Majid, M. Z. A. (2015). A global review of energy consumption, CO2 emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO2 emitting countries). *Renewable and sustainable energy reviews*, 43, 843-862. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.066>
 53. Open Utility. (2016). *A glimpse into the future of Britain's energy economy*. Retrieved from https://cdn.prod.website-files.com/6123718de4b96c44035b9af8/616d7e544fba06703d1a3cd_piclo_whitepaper_trial-report.pdf
 54. Orlando, M., Estebasari, A., Pons, E., Pau, M., Quer, S., Poncino, M., Bottaccioli, L., & Patti, E. (2021). A smart meter infrastructure for smart grid IoT applications. *IEEE Internet of Things Journal*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3137596>
 55. OurPower. (n.d.). *Über uns*. Retrieved December 25, 2024, from <https://www.ourpower.coop/page/ueber-uns>

56. Pálenský, P., & Dietrich, D. (2011). Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. <https://doi.org/10.1109/tii.2011.2158841>
57. Palm, J. (2021). The Transposition of Energy Communities into Swedish Regulations: Overview and Critique of Emerging Regulations. *Energies*, 14(16), 4982. <https://doi.org/10.3390/en14164982>
58. Parag, Y., & Sovacool, B. K. (2016). Electricity market design for the prosumer era. *Nature energy*, 1(4), 1-6. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.32>
59. Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and buildings*, 40(3), 394-398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
60. Piclo. (n.d.). *Local grid charging: Exploring the incentivisation of local energy*. Retrieved December 25, 2024, from https://uploads-ssl.webflow.com/6123718de4b96c44035b9af8/616d7e59675fd95b8939a47f_piclo_whitepaper_local-grid-charging.pdf
61. Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE access*, 8, 21980-22012. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2970143>
62. Roberto, R., Ferruzzi, G., Negro, V., & Noussan, M. (2023). Mapping of Energy Community Development in Europe: State of the Art and Research Directions. *Energies*, 16(18), 6554. <https://doi.org/10.3390/en16186554>
63. Rossetto, N. (2020). *The future of renewable energy communities in the EU: An investigation at the time of the Clean Energy Package*. ResearchGate. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Nicolo-Rossetto-2/publication/344439098_The_Future_of_Renewable_Energy_Communities_in_the_EU_an_investigation_at_the_time_of_the_Clean_Energy_Package/links/5f7599de458515b7cf5c6112/The-Future-of-Renewable-Energy-Communities-in-the-EU-an-investigation-at-the-time-of-the-Clean-Energy-Package.pdf
64. Rossetto, N. (2023). Beyond individual active customers: Citizen and renewable energy communities in the European Union. *IEEE Power and Energy Magazine*, 21(4), 36–44. <https://doi.org/10.1109/MPE.2023.3269541>
65. Sethi, P., & Sarangi, S. R. (2017). Internet of things: Architectures, protocols, and applications. *Hindawi International Journal of Wireless Communications and Mobile Computing*. <https://doi.org/10.1155/2017/9324035>
66. Shan, S., Yang, S., Becerra, V., Deng, J., & Li, H. (2023). A case study of existing peer-to-peer energy trading platforms: calling for integrated platform features. *Sustainability*, 15(23), 16284. <https://doi.org/10.3390/su152316284>
67. Sikorski, J. J., Haughton, J., & Kraft, M. (2017). Blockchain technology in the chemical industry: Machine-to-machine electricity market. *Applied Energy*, 195, 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.039>

68. Soto, E. A., Bosman, L. B., Wollega, E., & Leon-Salas, W. D. (2021). Peer-to-peer energy trading: A review of the literature. *Applied Energy*, 283, 116268.
69. Stanelyte, D., Radziukyniene, N., & Radziukynas, V. (2022). Overview of demand-response services: A review. *Energies*, 15(5), 1659. <https://doi.org/10.3390/en15051659>
70. Stephant, M., Hassam-Ouari, K., Abbes, D., Labrunie, A., & Robyns, B. (2018). A survey on energy management and blockchain for collective self-consumption. In *2018 7th International Conference on Systems and Control (ICSC)* (pp. 237–243). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICoSC.2018.8587812>
71. SunContract: Ljubljana, Slovenia. Retrieved from <https://suncontract.org/>
72. Tang, C., Tukker, A., Sprecher, B., & Mogollón, J. M. (2022). Assessing the European electric-mobility transition: emissions from electric vehicle manufacturing and use in relation to the EU greenhouse gas emission targets. *Environmental Science & Technology*, 57(1), 44-52.
73. Tarpani, E., Piselli, C., Fabiani, C., Pigliautile, I., Kingma, E. J., Pioppi, B., & Pisello, A. L. (2022). Energy Communities Implementation in the European Union: Case Studies from Pioneer and Laggard Countries. *Sustainability*, 14(19), 12528. <https://doi.org/10.3390/su141912528>
74. Vardakas, J. S., Zorba, N., & Verikoukis, C. V. (2014). A survey on demand response programs in smart grids: Pricing methods and optimization algorithms. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(1), 152-178. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2341586>
75. GELLINGS, C.W. Evolving practice of demand-side management. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 5, 1–9 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40565-016-0252-1>
76. Women and Gender Constituency. (n.d.). <https://sege.gr/success-stories/wencoop/>
77. Wu, Y., Wu, Y., Cimen, H., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2022). Towards collective energy Community: Potential roles of microgrid and blockchain to go beyond P2P energy trading. *Applied Energy*, 314, 119003.
78. Yang, L., Yan, H., & Lam, J. C. (2014). Thermal comfort and building energy consumption implications—a review. *Applied energy*, 115, 164-173. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.062>
79. Zhou, S., Zou, F., Wu, Z., Gu, W., Hong, Q., & Booth, C. (2020). A smart community energy management scheme considering user dominated demand side response and P2P trading. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 114, 105378. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105378>
80. Mujeeb, A., Hong, X., & Wang, P. (2019, November). Analysis of peer-to-peer (P2P) electricity market and piclo's local matching trading platform in UK. In *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)* (pp. 619-624). IEEE.

81. Behrangrad, M. (2015). A review of demand side management business models in the electricity market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 270-283.
82. Panda, S., Mohanty, S., Rout, P. K., Sahu, B. K., Bajaj, M., Zawbaa, H. M., & Kamel, S. (2022). Residential Demand Side Management model, optimization and future perspective: A review. *Energy Reports*, 8, 3727-3766.
83. Papadis, E., & Tsatsaronis, G. (2020). Challenges in the decarbonization of the energy sector. *Energy*, 205, 118025
84. IEA (2021), World Energy Outlook 2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
85. Cutore, E., Volpe, R., Sgroi, R., & Fichera, A. (2023). Energy management and sustainability assessment of renewable energy communities: The Italian context. *Energy Conversion and Management*, 278, 116713
86. Lowitzsch, J., Hoicka, C. E., & van Tulder, F. J. (2020). Renewable energy communities under the 2019 European Clean Energy Package—Governance model for the energy clusters of the future?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 122, 109489.
87. European Union. (2018). *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)*. Official Journal of the European Union, L 328, 82–209. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001>
88. European Union. (2019). *Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU*. Official Journal of the European Union, L 158, 125–199. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019L0944>
89. Entezari, A., Aslani, A., Zahedi, R., & Noorollahi, Y. (2023). Artificial intelligence and machine learning in energy systems: A bibliographic perspective. *Energy Strategy Reviews*, 45, 101017.
90. Atzarakis, N., Kouveliotis-Lysikatos, I., Palaogiannis, F., Vasilakis, A., Tsekeris, D., & Hatziargyriou, N. (2020, September). SMART energy communities: a case study for Greece. In *CIREN 2020 Berlin Workshop (CIREN 2020)* (Vol. 2020, pp. 136-139). IET.
91. Panda, S., Mohanty, S., Rout, P. K., Sahu, B. K., Parida, S. M., Kotb, H., Flah, A., Tostado-Véliz, M., Abdul Samad, B., & Shouran, M. (2022). An Insight into the Integration of Distributed Energy Resources and Energy Storage Systems with Smart Distribution Networks Using Demand-Side Management. *Applied Sciences*, 12(17), 8914. <https://doi.org/10.3390/app12178914>
92. Chatzigeorgiou, I. M., Manolas, D., Gkaragkouni, T., & Andreou, G. T. (2018, June). Demand response in Greece: An introductory mobile application. In

- 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC/IC&CPS Europe) (pp. 1-5). IEEE.
93. Mimi, S., Ben Maissa, Y., & Tamtaoui, A. (2023). Optimization Approaches for Demand-Side Management in the Smart Grid: A Systematic Mapping Study. *Smart Cities*, 6(4), 1630-1662. <https://doi.org/10.3390/smartcities6040077>
 94. European Commission. (2023, October 18). EU agrees to boost renewables, energy efficiency [Press release] from https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_2061
 95. Hutchinson, A. J., Harrison, C. M., Bryden, T. S., Alahyari, A., Hu, Y., Gladwin, D. T., ... & Forsyth, A. (2025). A comprehensive review of modeling approaches for grid-connected energy storage technologies. *Journal of Energy Storage*, 109, 115057.
 96. Attar, M. (2025). Market-based Congestion Management in Power Systems: With a focus on distribution grids.
 97. Melli, Z., & Shaker, Y. (2025). Blockchain-Based Platform for Decentralized Renewable Energy Trading: A Regional Approach for Saudi Arabia, Qatar, and the UAE.
 98. Zucaro, A., & Agostinho, F. Urban Sustainability: Challenges and Opportunities for Resilient and Resource-efficient cities. *Frontiers in Sustainable Cities*, 7, 1556974.
 99. Ponds, K. T., Arefi, A., Sayigh, A., & Ledwich, G. (2018). Aggregator of demand response for renewable integration and customer engagement: Strengths, weaknesses, opportunities, and threats. *Energies*, 11(9), 2391.
 100. Shaikh, A., Hameed Shaikh, P., Kumar, L., Husain Mirjat, N., Ahmed Memon, Z., El Haj Assad, M., ... & Eskandarpour, B. (2022). A SWOT analysis for a roadmap towards sustainable electric power generation. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2022(1), 1743570.
 101. Alasser, R., Tripathi, A., Rao, T. J., & Sreekanth, K. J. (2017). A review on implementation strategies for demand side management (DSM) in Kuwait through incentive-based demand response programs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 617-635.
 102. Γενική Γραμματεία Συντονισμού. *RRP reforms*. Ανακτήθηκε από <https://gsco.gov.gr/rrp-reforms/>
 103. Αντιπροεδρία της Κυβέρνησης και Υπουργείο Οικονομίας & Ανάπτυξης. (2019). *Εθνική Στρατηγική για τη Βιώσιμη και Δίκαιη Ανάπτυξη 2030* [National Strategy for Sustainable and Equitable Development 2030]. <https://www.mindev.gov.gr/wp-content/uploads/2019/05/%CE%91%CE%9D%CE%91%CF%80%CF%84%CF%85%CE%BE%CE%B9%CE%91%CE%9A%CE%97-%CE%A3%CF%84%CF%81%CE%91%CF%84%CE%97%CE%93%CE%99%CE%9A>

[%CE%97-2030.pdf](#)

104. European Commission. (2023, November 30). *Commission confirms participants in 30 Renewable Islands for 2030 initiative*. Energy. Retrieved from https://energy.ec.europa.eu/news/commission-confirms-participants-30-renewable-islands-2030-initiative-2023-11-30_en
105. Katsaprakakis, D. A., Proka, A., Zafirakis, D., Damasiotis, M., Kotsampopoulos, P., Hatzigargyriou, N., Dakanali, E., Arnaoutakis, G., & Xevgenos, D. (2022). Greek Islands' Energy Transition: From Lighthouse Projects to the Emergence of Energy Communities. *Energies*, 15(16), 5996. <https://doi.org/10.3390/en15165996>
106. Rakocevic, L., Matowska, M., & De Brouwer, A. (2022). *EU islands: Study on regulatory barriers and recommendation for clean energy transition on the islands Greece* (Publication date: 16 December 2022). Clean energy for EU islands. https://clean-energy-islands.ec.europa.eu/system/files/2022-12/PUBLIC_IslandSecretariatII_Study%20on%20barriers%20and%20recommendations%20GREECE_20221214%20clean.pdf
107. Τσιλιώνης, Κ. (2023, July 7). *Τα εμπόδια, οι προκλήσεις και οι ευκαιρίες στον δρόμο της ενεργειακής μετάβασης* [Obstacles, challenges and opportunities on the road to energy transition]. Fortune Greece. <https://www.fortunegreece.com/article/ta-empodia-oi-prokliseis-kai-oi-efkairies-ston-dromo-tis-energeiakis-metavasis/>
108. Σκυλακάκης, Ν. (2024, Φεβρουάριος 5). *Ενέργεια: Ο επενδυτικός μααραθώνιος των 95 δις., οι προκλήσεις και το στοίχημα* [Energy: The 95 billion investment marathon, the challenges and the bet]. *EnergyMag*. https://www.energymag.gr/energeia/energeiaki-metabasi/103623_energeia-o-ependytikos-marathonios-ton-95-dis-oi-prokliseis-kai
109. Βουρνέλης, Σ. (2024, January). *Ο ενεργειακός μετασχηματισμός της Ελλάδας: Σταθερά βήματα προς ένα βιώσιμο μέλλον* [The energy transformation of Greece: Steady steps towards a sustainable future]. *Energypress*. <https://energypress.gr/news/o-energeiakos-metashimatismos-tis-elladas-stathera-bimata-pros-ena-biosimo-mellon>
110. World Energy News (2024, January 11). *Οι εγχώριες προκλήσεις της αγοράς ενέργειας το 2024* [The domestic challenges of the energy market in 2024]. World Energy News. <https://www.worldenergynews.gr/special-report-energy-transition-2024/articles/550996/oi-egxories-prokliseis-tis-agoras-energeias-to-2024>
111. IRENA (2020). *Peer-to-peer electricity trading*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Peer-to-peer_electricity_trading_2020.pdf

112. Montel (2024). *AI in Renewable Energy Trading*.
<https://montel.energy/blog/how-is-ai-transforming-renewable-energy-trading>
113. Boumaiza, A. (2024). Carbon and Energy Trading Integration within a Blockchain-Powered Peer-to-Peer Framework. *Energies*, 17(11), 2473.
<https://doi.org/10.3390/en17112473>
114. Wang, D., Zhao, D., Chen, F., & Tang, X. (2024). Research on Energy Trading Mechanism Based on Individual Level Carbon Quota. *Sustainability*, 16(13), 5810. <https://doi.org/10.3390/su16135810>
115. Wehkamp, S., Schmeling, L. & Leonhardt, S. (2024). 2 Regulatory and Legal Challenges for District Energy Systems in Practice and Research. In S. Leonhardt, T. Nusser, J. Görres, S. Rosinger, G. Stryi-Hipp & M. Eckhard (Ed.), *Innovations and challenges of the energy transition in smart city districts* (pp. 17-34). Berlin, Boston: De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110777567-002>
116. Montel. (n.d.). *Smart grid challenges – cybersecurity, renewable energy integration, and financial barriers*. Ανακτήθηκε από <https://montel.energy/blog/smart-grid-challenges-cybersecurity-renewable-energy-integration-and-financial-barriers>
117. Moreno Jaramillo, A. F., Lopez-Lorente, J., Laverty, D. M., Martinez-del-Rincon, J., Morrow, D. J., & Foley, A. M. (2022). Effective identification of distributed energy resources using smart meters net-demand data. *IET Smart Grid*, 5(2), 120-135. Advance online publication.
<https://doi.org/10.1049/stg2.12056>
118. Onlinescientificresearch. (n.d.). *Compliance challenges in the renewable energy sector*. Ανακτήθηκε από <https://onlinescientificresearch.com/articles/compliance-challenges-in-the-renewable-energy-sector.pdf>
119. Sinsel, S. R., Riemke, R. L., & Hoffmann, V. H. (2020). Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review. *renewable energy*, 145, 2271-2285.
120. Moreno Escobar JJ, Morales Matamoros O, Tejeida Padilla R, Lina Reyes I, Quintana Espinosa H. A Comprehensive Review on Smart Grids: Challenges and Opportunities. *Sensors* (Basel). 2021 Oct 21;21(21):6978. doi: 10.3390/s21216978. PMID: 34770285; PMCID: PMC8587637.
121. Talhar Belge A, Gupta S, Alegavi S, Singh V and Shukla K (2024) Advancements, challenges, and future prospects of smart grid technology in India. *Front. Artif. Intell.* 7:1475604. doi: 10.3389/frai.2024.1475604
122. Ohanu, C. P., Rufai, S. A., & Oluchi, U. C. (2024). A comprehensive review of recent developments in smart grid through renewable energy

- resources integration. *Heliyon*, 10(3), e25705.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25705>
123. Kiasari, M., Ghaffari, M., & Aly, H. H. (2024). A Comprehensive Review of the Current Status of Smart Grid Technologies for Renewable Energies Integration and Future Trends: The Role of Machine Learning and Energy Storage Systems. *Energies*, 17(16), 4128.
<https://doi.org/10.3390/en17164128>
124. Salkuti, S. R. (2020). Challenges, issues and opportunities for the development of smart grid. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 10(2), 1179-1186.
125. Arnold, G. W. (2011). Challenges and opportunities in smart grid: A position article. *Proceedings of the IEEE*, 99(6), 922-927.