



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Ανάλυση της ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο
ενεργειακό δίκτυο**

Διπλωματική Εργασία

Καρανίκα Φωτεινή

Επιβλέπων: Χροναίος Αλέξανδρος

Φεβρουάριος 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

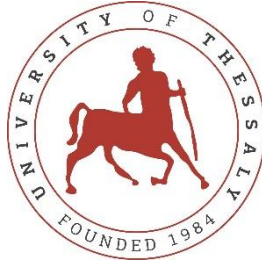
**Ανάλυση της ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο
ενεργειακό δίκτυο**

Διπλωματική Εργασία

Καρανίκα Φωτεινή

Επιβλέπων: Χροναίος Αλέξανδρος

Φεβρουάριος 2024



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**Overview of renewable energy sources integration in the power
grid**

Diploma Thesis

Karanika Foteini

Supervisor: Chronaios Alexandros

February 2024

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων/πουσα **Χροναίος Αλέξανδρος**

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Δασκαλοπούλου Ασπασία**

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Τσαλαπάτα Χαρίκλεια**

Μέλος Ε.ΔΙ.Π., Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο/Η Δηλών/ούσα

Καρανίκα Φωτεινή

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this diploma thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Karanika Foteini

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία σηµάνει το τέλος των σπουδών μου στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, µίας πολυετούς προσπάθειας που στόχευε στην επιµόρφωση, την εξέλιξη και την προσφορά των ικανοτήτων μου στην κοινωνία. Αυτή η προσπάθεια δε θα απέδιδε ποτέ καρπούς δίχως τη στήριξη και εποικοδομητική κριτική του συνόλου των καθηγητών μου, αλλά και της γενικότερης προσφοράς του τμήματος προς όλους τους φοιτητές του.

Σε αυτό το σηµείο θέλω να ευχαριστήσω θερµά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Αλέξανδρο Χροναίο, για την εμπιστοσύνη του σε µένα και την καθοδήγησή του, καθώς επίσης και τις επιβλέποντες καθηγήτριες κ. Ασπασία Δασκαλοπούλου και κ. Χαρίκλεια Τσαλαπάτα που µε ευχαρίστηση δέχθηκαν να αποτελέσουν µέρος της επιτροπής.

Τέλος, πρέπει να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους ανθρώπους μου που συνέβαλαν στον άνθρωπο που είµαι σήµερα και που στάθηκαν στο πλευρό µου όχι µόνο σε αυτή µου την προσπάθεια αλλά και σε κάθε βήµα της ζωής µου.

Ανάλυση της ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό δίκτυο

Καρανίκα Φωτεινή

Περίληψη

Καθώς ο κόσμος αντιμετωπίζει την επείγουσα ανάγκη μετάβασης προς βιώσιμες πηγές ενέργειας, η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στα υπάρχοντα ενεργειακά δίκτυα αναδεικνύεται ως κομβικό εγχείρημα. Αυτή η μελέτη εμβαθύνει στο πολύπλευρο τοπίο της εκμετάλλευσης των ΑΠΕ, διερευνώντας τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς των διαφόρων ειδών τους, τις προκλήσεις που θέτει η δικτυακή ενσωμάτωση και τις τεχνολογικές καινοτομίες που οδηγούν αυτή τη μετάβαση. Μέσω μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης των σχετικών τεχνολογιών, όπως φωτοβολταϊκά συστήματα, ανεμογεννήτριες, υδροηλεκτρικά εργοστάσια κλπ., μαζί με πραγματικές περιπτωσιολογικές μελέτες, αυτή η επισκόπηση αποσαφηνίζει επιτυχημένες στρατηγικές και υπογραμμίζει τις βασικές τάσεις που διαμορφώνουν το μέλλον της συγκεκριμένης βιομηχανίας. Αντιμετωπίζοντας τα ερευνητικά κενά και ενισχύοντας τη συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερομένων, με αυτή την μελέτη στοχεύουμε να συμβάλουμε στη συνεχιζόμενη συζήτηση γύρω από τη μετάβαση σε ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον.

Λέξεις-κλειδιά:

Ευελιξία ηλεκτροπαραγωγικού συστήματος, χονδρεμπορικές αγορές ηλεκτρισμού, σύζευξη αγορών, διείσδυση των ΑΠΕ, μοντέλο προσομοίωσης των αγορών ηλεκτρισμού, μοντέλο επέκτασης του ηλεκτροπαραγωγικού συστήματος, μονάδες αποθήκευσης

Overview of renewable energy sources integration in the power grid

Karanika Foteini

Abstract

As the world faces the urgent need to transition to sustainable energy sources, the integration of renewable energy sources (RES) into existing energy networks is emerging as a pivotal undertaking. This study delves into the multifaceted landscape of renewable energy exploitation, exploring the advantages and limitations of their various types, the challenges posed by grid integration, and the technological innovations driving this transition. Through a comprehensive analysis of relevant technologies, such as photovoltaic systems, wind turbines, hydroelectric plants, etc., together with real case studies, this overview clarifies successful strategies and highlights key trends shaping the future of this industry. By addressing research gaps and fostering collaboration between stakeholders, with this study we aim to contribute to the ongoing discussion around the transition to a sustainable energy future.

Keywords:

Stand-alone hybrid system; HOMER Pro; simulation-optimization; techno-economic analysis; excess electricity percentage; Net Present Cost (NPC); Levelized Cost of Energy (LCoE)

Πίνακας περιεχομένων

<i>Περίληψη</i>	<i>xiii</i>
<i>Abstract</i>	<i>xv</i>
<i>Κατάλογος εικόνων.....</i>	<i>xxi</i>
<i>Κατάλογος σχημάτων.....</i>	<i>xxiv</i>
<i>Συντομογραφίες.....</i>	<i>xxvi</i>
<i>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....</i>	<i>1</i>
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής.....	1
1.2 Οργάνωση του τόμου.....	2
<i>Κεφάλαιο 2 Επισκόπηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....</i>	<i>3</i>
2.1 Ηλιακή ενέργεια	3
2.1.1 Πλεονεκτήματα	4
2.1.2 Μειονεκτήματα	6
2.2 Υδροηλεκτρική ενέργεια	7
2.2.1 Πλεονεκτήματα	7
2.3 Αιολική ενέργεια	10
2.3.1 Πλεονεκτήματα	11
2.3.2 Μειονεκτήματα	13
2.4 Βιοενέργεια	14
2.4.1 Πλεονεκτήματα	15
2.4.2 Μειονεκτήματα	16
2.5 Ωκεάνια ενέργεια	17
2.5.1 Πλεονεκτήματα	17
2.5.2 Μειονεκτήματα	18
2.6 Γεωθερμική ενέργεια.....	20
2.6.1 Πλεονεκτήματα.....	20
2.6.2 Μειονεκτήματα	22
<i>Κεφάλαιο 3 Προκλήσεις στην ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας</i>	<i>23</i>
3.1 Τεχνικές προκλήσεις.....	23

3.1.1 Διαλείψεις και μεταβλητότητα.....	23
3.1.2 Σταθερότητα του δικτύου	24
3.2 Λειτουργικές προκλήσεις	26
3.2.1 Αποθήκευση και Διαχείριση Ενέργειας	26
3.2.2 Σχεδιασμός του δικτύου και επεκτάσεις	30
3.2.3 Διαχείριση από πλευράς ζήτησης	30
3.3 Κανονιστικές και Πολιτικές προκλήσεις	32
3.3.1 Ασυνεπή κανονιστικά πλαίσια	32
3.3.2 Δομές της αγοράς.....	33
3.4 Οικονομικές προκλήσεις	34
3.4.1 Αρχικό κόστος κεφαλαίου	34
3.4.2 Κόστη πρόσβασης στο δίκτυο και σύνδεσης	35
Κεφάλαιο 4 Τεχνολογίες Ανανεώσιμης Ενέργειας.....	37
4.1 Ηλιακή Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία	37
4.1.1 Φωτοβολταϊκά Κυψέλες/Κελιά (Photovoltaic Cells).....	37
4.1.2. Ηλιακά Πάρκα	40
4.1.3 Κατανεμημένες Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις	42
4.2 Τεχνολογία Ανεμογεννητριών	43
4.2.1 Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα (Horizontal Axis Wind Turbines - HAWT)	43
4.2.2 Ανεμογεννήτριες Κάθετου Άξονα (Vertical Axis Wind Turbines - VAWT)	44
4.2.3 Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα (Offshore Wind Farms).....	45
4.3 Υδροηλεκτρική Τεχνολογία	48
4.3.1 Υδροηλεκτρικά συστήματα που βασίζονται σε ροή ποταμού (Run-of-River - RoR).....	48
4.3.2 Υδροηλεκτρικά συστήματα με βάση το φράγμα (Dam-Based)	50
4.4 Τεχνολογία Γεωθερμικής Ενέργειας	51
4.4.1 Ατμοηλεκτρικοί σταθμοί φλας (Flash Steam Power Plants).....	51
4.4.2 Μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δυαδικού κύκλου (Binary Cycle Power Plants).....	52
4.4.3 Μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ξηρού ατμού (Dry Steam Power Plants).....	53
4.5 Τεχνολογίες Μετατροπής Βιομάζας	54
4.5.1 Καύση και αεριοποίηση	54
4.5.2 Παραγωγή Βιοαερίου.....	57
4.6 Τεχνολογία Ωκεάνιας ενέργειας	58
4.6.1 Τουρμπίνες παλιρροιακών ροών (Tidal Stream Turbine - TST).....	58
4.6.2 Παλιρροιακά φράγματα (Tidal Barrages)	61
4.6.3 Μετατροπείς Ενέργειας Κυμάτων (Wave Energy Converters - WECs)	62

Κεφάλαιο 5 Τεχνολογίες και στρατηγικές ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό δίκτυο.....	66
5.1 Μετατροπείς που συνδέονται με το δίκτυο (grid-tied inverters).....	66
5.1.1 Επισκόπηση	66
5.1.2 Εξελίξεις και Βελτιώσεις	67
5.2 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας	72
5.2.1 Τεχνολογίες μπαταριών	72
5.2.2 Υδροηλεκτρική Αντλία Αποθήκευσης (Pumped Storage Hydropower - PSH)	77
5.3 Τεχνολογίες Smart Grid	79
5.3.1 Προηγμένη υποδομή μέτρησης (Advanced Metering Infrastructure - AMI)	80
5.3.2 Συστήματα διαχείρισης διανομής (Distribution Management Systems - DMS).....	81
5.3.3 Εικονική μονάδα παραγωγής ενέργειας (Virtual Power Plant - VPP)	82
5.4 Μηχανισμοί απόκρισης ζήτησης (Demand Response Mechanisms)	83
5.4.1 Μετατόπιση φορτίου (Load Shifting)	84
5.4.2 Τιμολόγηση χρόνου χρήσης (Time-of-Use Pricing - TOU).....	85
5.5 Λύσεις Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας «Φιλικές προς το Δίκτυο» (Grid-Friendly) ...	86
5.5.1 Πρόβλεψη (Forecasting) και προγνωστική ανάλυση (Predictive Analytics)	86
Κεφάλαιο 6 Αντίκτυπο της Ενσωμάτωσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στα Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	89
6.1 Θετικές επιδράσεις στα δίκτυα ενέργειας.....	89
6.1.1 Μειωμένες εκπομπές άνθρακα.....	89
6.1.2 Ενισχυμένη ενεργειακή ασφάλεια	91
6.1.3 Πιθανά οικονομικά οφέλη	92
6.1.4 Τεχνολογική Καινοτομία και Έρευνα	93
6.2 Αρνητικές επιδράσεις στα δίκτυα ενέργειας	95
6.2.1 Διαλείψεις και Μεταβλητότητα	95
6.2.2 Δικτυακή Συμφόρηση	95
6.2.3 Χρήση της γης και Περιβαλλοντικές ανησυχίες	97
6.2.4 Οικονομικές Διαταραχές.....	99
Κεφάλαιο 7 Μελέτες περίπτωσης και βέλτιστες πρακτικές	101
7.1 Παραδείγματα επιτυχίας ενσωμάτωσης ηλιακής ενέργειας στο δίκτυο	101
7.1.1 Η πόλη του Σαν Ντιέγκο	101
7.1.2 Η Energiewende της Γερμανίας.....	102
7.1.3 Ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Συστήματος της Καλιφόρνια – CAISO	104
7.2 Παραδείγματα επιτυχίας ενσωμάτωσης αιολικής ενέργειας στο δίκτυο	105

7.2.1 Δανάη: Ένα πρωτοποριακό μοντέλο για τη βιώσιμη ενέργεια	105
7.2.2 Υπεράκτιος άνεμος στο Ηνωμένο Βασίλειο	106
7.2.3 Η μετάβαση της Γερμανίας στην αιολική ενέργεια	108
7.3 Παραδείγματα επιτυχίας ενσωμάτωσης υδροηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο	110
7.3.1 Το μνημειώδες Φράγμα Τριών Φαραγγιών στην Κίνα	110
7.3.2 Υδροηλεκτρικά έργα Run-of-River του Μπουτάν	111
7.3.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια αντλίας αποθήκευσης της Νορβηγίας	113
7.4 Παραδείγματα επιτυχίας ενσωμάτωσης γεωθερμικής ενέργειας στο δίκτυο	114
7.4.1 Το Geysers στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ	114
7.4.2 Γεωθερμική ανάπτυξη στην Κένυα	115
7.4.3 Ο γεωθερμικός σταθμός Hellisheiði στην Ισλανδία	117
7.5 Παραδείγματα επιτυχίας ενσωμάτωσης βιοενέργειας στο δίκτυο	118
7.5.1 Ο Ηλεκτρικός Σταθμός Alholmens kraft στη Φινλανδία	118
7.5.2 Ο Ηλεκτρικός Σταθμός Drax στο Ηνωμένο Βασίλειο	119
7.6 Παραδείγματα επιτυχίας ενσωμάτωσης ωκεάνιας ενέργειας στο δίκτυο	121
7.6.1 Το MeyGen Tidal Energy Project της Σκωτίας	121
7.6.2 Το Nova Scotia Tidal Energy Project στον Καναδά	122
7.6.3 Η Swansea Bay Tidal Lagoon στην Ουαλία	124
Κεφάλαιο 8 Μελλοντικές κατευθύνσεις και προκλήσεις	126
8.1 Μελλοντικές Τάσεις στην Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	126
8.2 Αναδυόμενες Τεχνολογίες που οδηγούν την Ενσωμάτωση ΑΠΕ	127
8.3 Ερευνητικά κενά και σημεία για περαιτέρω εξερεύνηση	127
Κεφάλαιο 9 Επίλογος	128
Βιβλιογραφία	129

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1.1: Αυγή σε λιβάδι	3
Εικόνα 2.1.2: Παγκόσμια χωρική αναπαράσταση της παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας (GHI) και της άμεσης κανονικής ακτινοβολίας (DNI).	4
Εικόνα 2.1.3: Αναπαράσταση GHI για τις χώρες της Νότιας Ευρώπης.	5
Εικόνα 2.1.4: Αναπαράσταση DNI για τις χώρες της Νότιας Ευρώπης.	5
Εικόνα 2.2.1: Υδροηλεκτρικό Φράγμα	7
Εικόνα 2.2.2: Παγκόσμια Παραγωγή ενέργειας από υδροηλεκτρικούς σταθμούς (σε TWh) σύμφωνα με δεδομένα της Ember για το έτος 2022	8
Εικόνα 2.3.1: Ανεμόμυλοι στη Μύκονο	10
Εικόνα 2.3.2: Παγκόσμιος Άτλας Ανέμων	11
Εικόνα 2.4.1: Τρύγος Σίκαλης	14
Εικόνα 2.5.1: Ωκεάνιο κύμα	17
Εικόνα 2.5.2: Το παγκόσμιο θεωρητικό δυναμικό της κυματικής ενέργειας	18
Εικόνα 2.6.1: Γεωθερμική πηγή στο Hverir Námafjall της Ισλανδίας	20
Εικόνα 3.2.1: Αίτια και αποτελέσματα της θερμικής διαφυγής	29
Εικόνα 3.2.2: Τεχνολογικές προκλήσεις στην ενσωμάτωση των ΑΠΕ	32
Εικόνα 3.4.1: Οικονομικές προκλήσεις στην ενσωμάτωση των ΑΠΕ	36
Εικόνα 4.1.1: Φωτοβολταϊκά πάνελ σε λιβάδι	37
Εικόνα 4.1.2: Λειτουργία Φωτοβολταϊκού Κελιού	38
Εικόνα 4.1.3: Τύποι Φωτοβολταϊκών Κυψελών	39
Εικόνα 4.1.4: Το ηλιακό πάρκο Calatagan, 63 μεγαβάτ στο Batangas των Φιλιππίνων	40
Εικόνα 4.1.5: Διαφορετικοί σχεδιασμοί πάνελ. Σταθερής κλίσης, μονού άξονα και διπλού άξονα	41
Εικόνα 4.1.6: Φωτοβολταϊκό σύστημα σε στέγη	42
Εικόνα 4.1.6: Κεντρική και Αποκεντρωμένη/Κατανεμημένη παραγωγή	43
Εικόνα 4.2.1: Ανεμογεννήτρια Οριζόντιου Άξονα	45
Εικόνα 4.2.2: Ανεμογεννήτρια Κάθετου Άξονα	45
Εικόνα 4.2.3: Υπεράκτιο Αιολικό Πάρκο	45
Εικόνα 4.2.4: Συστήματα πρόσδεσης πλωτών ανεμογεννητριών	46
Εικόνα 4.3.1: Μικρή υδροηλεκτρική RoR μονάδα	48
Εικόνα 4.3.1: Σχηματική απεικόνιση της κύριας ταξινόμησης των τρόπων λειτουργίας της μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικής παραγωγής RoR σύμφωνα με την παρουσία κατασκευών αποθήκευσης και εκτροπής.	49
Εικόνα 4.3.3: Three Gorges Dam, Κίνα	50
Εικόνα 4.3.2: Η διάταξη ενός τυπικού υδροηλεκτρικού σταθμού	51
Εικόνα 4.4.1: Απλοποιημένο διάγραμμα ροής για γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής ξηρού ατμού, μονού φλας, δυαδικού κύκλου και συνδυασμένου κύκλου	54
Εικόνα 4.5.1: Διαδικασία άμεσης καύσης	55

Εικόνα 4.5.2: Διαδικασία Αεριοποίησης	56
Εικόνα 4.5.3: Σχεδιασμός εγκατάστασης Αναερόβιας Χώνευσης	58
Εικόνα 4.6.1: Η Τουρμπίνα Οριζόντιου Άξονα Delta, κατασκευασμένη από την Tidal Energy Ltd., του HB ..	60
Εικόνα 4.6.2: Τουρμπίνα Κάθετου Άξονα	60
Εικόνα 4.6.3: Ταλαντούμενο Υδροπτέρυγο.....	60
Εικόνα 4.6.4: Απεικόνιση ενός παλιρροιακού φράγματος	62
Εικόνα 4.6.5: Είδη Σημειακών Απορροφητών	63
Εικόνα 4.6.6: Βασική αρχή δομής της τεχνολογίας ταλαντευόμενης στήλης νερού.....	64
Εικόνα 4.6.7: Απεικόνιση λειτουργίας εξασθενητή.....	65
Εικόνα 5.2.1: Μέθοδος φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας ιόντων λιθίου (α) και σχηματική απεικόνισή της (β)	73
Εικόνα 5.2.2: Σχήμα προηγμένης μπαταρίας μολύβδου-οξέος	74
Εικόνα 5.2.3: Φαινόμενα φόρτισης και εκφόρτισης μπαταρίας NaS (Θεικού Νατρίου)	75
Εικόνα 5.2.4: Κύρια όψη μπαταρίας ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου	76
Εικόνα 5.2.5: Τρεις τύποι μπαταριών: Μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την ποσότητα υγρού και το ποσοστό των ηλεκτρολυτών στερεάς κατάστασης στις συναρμολογημένες μπαταρίες	77
Εικόνα 5.2.6: Απεικόνιση της λειτουργίας της αντλία αποθήκευσης υδροηλεκτρικής ενέργειας	78
Εικόνα 5.3.1: Το Έξυπνο Δίκτυο.....	79
Εικόνα 5.3.2: Επισκόπηση της εξέλιξης του υποσυστήματος Smart Grid	80
Εικόνα 5.3.3: Προηγμένη Υποδομή Μέτρησης	81
Εικόνα 5.3.4: Απεικόνιση ενός τυπικού εικονικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής (VPP), που συνδυάζει διαφορετικούς ενεργειακούς πόρους μέσω κεντρικού λογισμικού.....	83
Εικόνα 5.4.1: Προσεγγίσεις DSM	84
Εικόνα 5.4.2: Σχήματα στρατηγικών δυναμικής τιμολόγησης	86
Σχήμα 5.5.1: Το γενικό πλαίσιο για τις προβλέψεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	87
Σχήμα 5.5.2: Η ροή δεδομένων των διαδικασιών του μοντέλου NWP	88
Εικόνα 5.5.1: Η δομή του νευρωνικού δικτύου του μοντέλου βαθιάς μάθησης που χρησιμοποιείται για BDA του έξυπνου δικτύου	88
Εικόνα 5.5.2: Μια τυπική δομή ενός επαναλαμβανόμενου νευρωνικού δικτύου (RNN)	89
Εικόνα 6.1.2: Διάγραμμα του όγκου αερίων του θερμοκηπίου (σε εκατομμύρια CO ₂) που σώζονται χάρη στην ανανεώσιμη ενέργεια ως αποτέλεσμα της πρωτοβουλίας Energiewende της Γερμανίας	90
Εικόνα 6.1.2: Προβλεπόμενα οικονομικά οφέλη της ανανεώσιμης ενέργειας με βάση τα δεδομένα της IRENA μέχρι το έτος 2030.....	93
Εικόνα 6.2.1: Χάρτης της Ολλανδίας. Παροχή συμφόρησης δικτύου	96
Εικόνα 6.2.2: Χάρτης της Ολλανδίας. Τροφοδοσία συμφόρησης δικτύου.....	96
Εικόνα 6.2.: Αλυκή κοντά σε λασπότοπους: (α) σε φυσική κατάσταση και (β) μετά την εγκατάσταση υδροηλεκτρικού φράγματος.....	98
Εικόνα 7.1.1: Φωτοβολταϊκό σύστημα πολλαπλών οικογενειών στην πόλη του Σαν Μάρκος, Σαν Ντιέγκο... ..	102
Εικόνα 7.1.2: Ηλιακές εγκαταστάσεις στέγης στο Φράιμπουργκ, Γερμανία.....	103
Εικόνα 7.1.3: Το ηλιακό πάρκο Mount Signal 2 στο Καλέξικο, Καλιφόρνια.	104

<i>Εικόνα 7.2.1: Υπεράκτιο Αιολικό Πάρκο Thor, Βόρεια Θάλασσα.....</i>	<i>106</i>
<i>Εικόνα 7.2.2: Υπεράκτια Αιολικά Project της εταιρίας RWE στο HB</i>	<i>107</i>
<i>Εικόνα 7.2.3: Αιολικό πάρκο στο Lindenberg, Γερμανία.....</i>	<i>109</i>
<i>Εικόνα 7.3.1: Το Φράγμα Three Gorges, Κίνα.....</i>	<i>111</i>
<i>Εικόνα 7.3.2: Μικρής κλίμακας υδροηλεκτρική μονάδα RoR στο Μπουτάν.....</i>	<i>112</i>
<i>Εικόνα 7.3.3: Το φράγμα Stornvassdammen είναι μέρος του Ulla-Førre, ενός υδροηλεκτρικού σταθμού που απλώνεται στους δήμους Hjelmeland, Suldal και Bylke της Νορβηγίας</i>	<i>114</i>
<i>Εικόνα 7.4.1: Ένας από τους γεωθερμικούς σταθμούς στο γεωθερμικό σύμπλεγμα του Geysheers</i>	<i>115</i>
<i>Εικόνα 7.4.3: Γεωθερμικός σταθμός Hellisheiði στο Hengill, Ισλανδία</i>	<i>118</i>
<i>Εικόνα 7.5.1: Βιοηλεκτρική μονάδα της Alholmens Kraft στο Pietarsaari, Φινλανδία.....</i>	<i>119</i>
<i>Εικόνα 7.5.2: Ο Ηλεκτρικός Σταθμός Drax στο Βόρειο Γιορκσάιρ, HB</i>	<i>121</i>
<i>Εικόνα 7.5.2: Το έργο MeyGen της Atlantis στο Πέντλαντ Φερθ, Σκωτία</i>	<i>122</i>
<i>Εικόνα 7.5.2: Ο ρυμουλκούμενος στρόβιλος Cape Sharp στον κόλπο του Fundy, Καναδάς.....</i>	<i>123</i>
<i>Εικόνα 7.6.3: Η παλιρροιακή λιμνοθάλασσα του Swansea Bay, Ουαλία</i>	<i>125</i>

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 2.1.1: Οι 10 χώρες με τη μεγαλύτερη επί τοις εκατό διείσδυση ηλιακής ενέργειας με βάση τα δεδομένα της IEA για το έτος 2021	6
Σχήμα 2.2.1: Οι 10 χώρες με τη μεγαλύτερη επί τοις εκατό διείσδυση υδροηλεκτρικής ενέργειας με βάση τα δεδομένα της Ember για το έτος 2022	9
Σχήμα 2.3.1: Οι 10 χώρες με τη μεγαλύτερη επί τοις εκατό διείσδυση υδροηλεκτρικής ενέργειας με βάση τα δεδομένα της IRENA για το έτος 2023	12
Σχήμα 2.3.2: Μερίδες ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης από διάφορες πηγές σύμφωνα με δεδομένα της Ember για το έτος 2022.....	12
Σχήμα 2.4.1: Οι 10 χώρες με τη μεγαλύτερη επί τοις εκατό διείσδυση βιοενέργειας με βάση τα δεδομένα της IRENA για το έτος 2023	15
Σχήμα 2.6.1: Οι 10 χώρες με τη μεγαλύτερη επί τοις εκατό διείσδυση γεωθερμικής ενέργειας με βάση τα δεδομένα της IRENA για το έτος 2023	21
Σχήμα 3.1.1: Κατανομές πυκνότητας πιθανότητας των μετρήσεων υψηλής συχνότητας Φ/B νοικοκυριού, Φ/B νοικοκυριού με περιοριστικό μετατροπέα και Φ/B συστήματος MME	25
Σχήμα 3.1.2: Απόκριση συχνότητας του συστήματος με μεταβλητή ταχύτητα ανέμου	25
Σχήμα 3.1.3: Αρμονικά μονής μονάδας (ΚΠ) με μη γραμμικό φορτίο σε λειτουργία νησιού (με φυσική αντίσταση $X = 0,47 \text{ pu}$, $R = 0,031 \text{ pu}$).....	26
Σχήμα 3.1.3: Αρμονικά μονής μονάδας (ΚΠ) με μη γραμμικό φορτίο σε λειτουργία νησιού (με φυσική αντίσταση $X = 0,47 \text{ pu}$, $R = 0,031 \text{ pu}$).....	26
Σχήμα 3.2.1: Εφαρμογές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	27
Σχήμα 3.2.2: Προσομοίωση αιολικής παραγωγής, ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και καθαρής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μείον την αιολική παραγωγή) για τη Μεγάλη Βρετανία το 2030 (πρόβλεψη).....	31
Σχήμα 5.1.1: Το σχηματικό διάγραμμα μετατροπέα συνδεδεμένου στο δίκτυο σε φωτοβολταϊκό σύστημα α) γενική τοπολογία β) μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα	67
Σχήμα 5.1.2: Το διάγραμμα ενός φίλτρου LCL	68
Σχήμα 5.1.3: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου MPPT	70
Σχήμα 5.1.4: Διάγραμμα ελεγκτή PID	71
Σχήμα 5.1.5: Διάγραμμα ενός γενικού FLC	72
Σχήμα 5.1.6: Διαμόρφωση του προτεινόμενου βρόχου ελέγχου PEC9 συμπεριλαμβανομένου του ισχυρού (robust) ελεγκτή που βασίζεται σε ANN	72
Σχήμα 5.2.1: Εγκατεστημένη χωρητικότητα παγκόσμιου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας για το έτος 2016	73
Σχήμα 5.5.1: Το γενικό πλαίσιο για τις προβλέψεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	87
Σχήμα 5.5.2: Η ροή δεδομένων των διαδικασιών του μοντέλου NWP	88
Σχήμα 6.1.1: Συσχέτιση επενδύσεων και παραγωγικότητας εργασίας σε ΑΠΕ στις χώρες της Ε.Ε.....	94

Σχήμα 6.2.1: Προβλεπόμενες χαμένες θέσεις εργασίας, ως αποτέλεσμα της ολοκληρωτικής μετάβασης (100%) στις ΑΠΕ με βάση τα δεδομένα από το σάιτ του Δρα. Mark Jacobson στο Πανεπιστήμιο του Στάνφορντ..... 101

Συντομογραφίες

βλ	βλέπε
κλπ.	και λοιπά
GHI	Global Horizontal Irradiation
DNI	Direct Normal Irradiation
TWh	Terrawatt/hours
IEA	International Energy Agency
IRENA	International Renewable Energy Agency
ET	Evapotranspiration
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
Φ/Β	Φωτοβολταϊκά
MME	Μικρομεσαίες Επιχειρήσεις
ΚΠ	Κατακεμημένη Παραγωγή
PCC	Point of Common Coupling
DSM	Demand-Side Management
PV	Photovoltaics
BIPV	Building Integrated Photovoltaics
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbines
VAWT	Vertical Axis Wind Turbines
ΥΑΠ	Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα
RoR	Run-of-River
CHP	Combining Heat and Power
TST	Tidal Stream Turbine
WEC	Wave Energy Converters
PTO	Power Take-Off
OWC	Oscillating Water Columns
DC	Direct Current
AC	Alternating Current
ANN	Artificial Neural Network
FL	Fuzzy Logic
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PID	Proportional – Integral – Derivative

MPC	Model Predictive Control
FLC	Fuzzy Logic Cotroller
PSH	Pumped Storage Hydropower
AMI	Advanced Metering Infrastructure
DMS	Distribution Management Systems
VPP	Virtual Power Plant
DRM	Demand Response Mechanisms
TOU	Time-of-Use
NWP	Numerical Weather Prediction
BDA	Big Data Analytics
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Average
RNN	Recurrent Neural Network
E.E.	Ευρωπαϊκή Ένωση
IoT	Internet of Things
E&A	Έρευνα και Ανάπτυξη
CAISO	California's Independent System Operator
HB	Ηνωμένο Βασίλειο
CfD	Contracts for Difference
MW	Megawatt
FORCE	Fundy Ocean Research Center for Energy

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Η αναζήτηση για την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας χρονολογείται πριν από αιώνες, με πολιτισμούς σε όλη την ιστορία να χρησιμοποιούν τον άνεμο, το νερό και τον ήλιο για να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες. Η ανθρωπότητα έχει βασιστεί σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για επιβίωση και τροφή σε πολλές περιόδους της ιστορίας [1][2]. Από τους ανεμόμυλους και τους υδάτινους τροχούς της αρχαιότητας μέχρι τα ηλιακά πάνελ που κοσμούν τις σύγχρονες στέγες, η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει μεταμορφωθεί για να συμβαδίζει με την πρόοδο της τεχνολογίας και τις απαιτήσεις της κοινωνίας. Ωστόσο, τις τελευταίες δεκαετίες, επείγοντα περιβαλλοντικά ζητήματα και ανάγκη επιβράδυνσης της κλιματικής αλλαγής, έχουν οδηγήσει σε παγκόσμιες πολιτικές τάσεις όπως τη συμφωνία του Παρισιού [3]. Χάρη σε αυτήν, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν γίνει βασικό συστατικό του παγκόσμιου κινήματος για τη μετάβαση σε συστήματα βιώσιμης ενέργειας.

Σε αυτό το άρθρο θα εξερευνήσουμε τις περίπλοκες αλληλεπιδράσεις που υπάρχουν μεταξύ των υποδομών δικτύου, των κοινωνικών απαιτήσεων και της τεχνολογίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Προσφέροντας μία κατανοητή περιγραφή των ιδίων των ΑΠΕ, θα ασχοληθούμε με τις προκλήσεις της ενσωμάτωσης του δικτύου καθώς και με την αντιμετώπισή τους μέσα από ένα πρίσμα δυνατοτήτων και πρακτικότητας. Θα αναλύσουμε δημιουργικές ιδέες και βέλτιστες πρακτικές που προέρχονται από πραγματικές περιπτωσιολογικές μελέτες, σε συνδυασμό με την επίδραση που έχουν οι ΑΠΕ στο δίκτυο. Στόχος μας δεν είναι απλώς να απαριθμήσουμε τις συνιστώσες που επηρεάζουν το συγκεκριμένο τομέα, αλλά να παρουσιάσουμε μία ιστορία που βασίζεται στην επιμονή, τη συνεργασία και τον επαναστατικό μετασχηματισμό. Αυτή η επισκόπηση επιδιώκει να ανοίξει το δρόμο για σημαντικές συζητήσεις και σκέψη, όλα προς ένα μελλοντικό φιλικό προς τον πλανήτη ενεργειακό μέλλον, όπου οι δυνατότητες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εκπληρώνονται σε ισορροπία με τις κοινωνικές απαιτήσεις και τις περιβαλλοντικές ανάγκες.

1.2 Οργάνωση του τόμου

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα διάφορα είδη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, αιολική, υδροηλεκτρική, βιοενέργεια, γεωθερμική και ωκεάνια), μερικά βασικά χαρακτηριστικά τους, όπως επίσης πλεονεκτήματα για μειονεκτήματα για το καθένα.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύονται τα διαφορετικά είδη προκλήσεων που αφορούν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (τεχνικές, λειτουργικές, κανονιστικές/πολιτικές και οικονομικές) και στέκονται εμπόδιο στην ενσωμάτωσή τους στα ενεργειακά δίκτυα.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι βασικότερες τεχνολογίες με τις οποίες αξιοποιούνται οι ανανεώσιμες πηγές με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο Κεφάλαιο 5 συζητούνται οι διάφορες τεχνολογίες και στρατηγικές που υποβοηθούν την ενσωμάτωση των ΑΠΕ σε ένα όποιο δίκτυο ενέργειας.

Στο Κεφάλαιο 6 σχολιάζονται οι όποιες μεταβολές θετικές είτε αρνητικές προκαλούνται από την χρησιμοποίηση ανανεώσιμης ενέργειας από πλευράς του δικτύου.

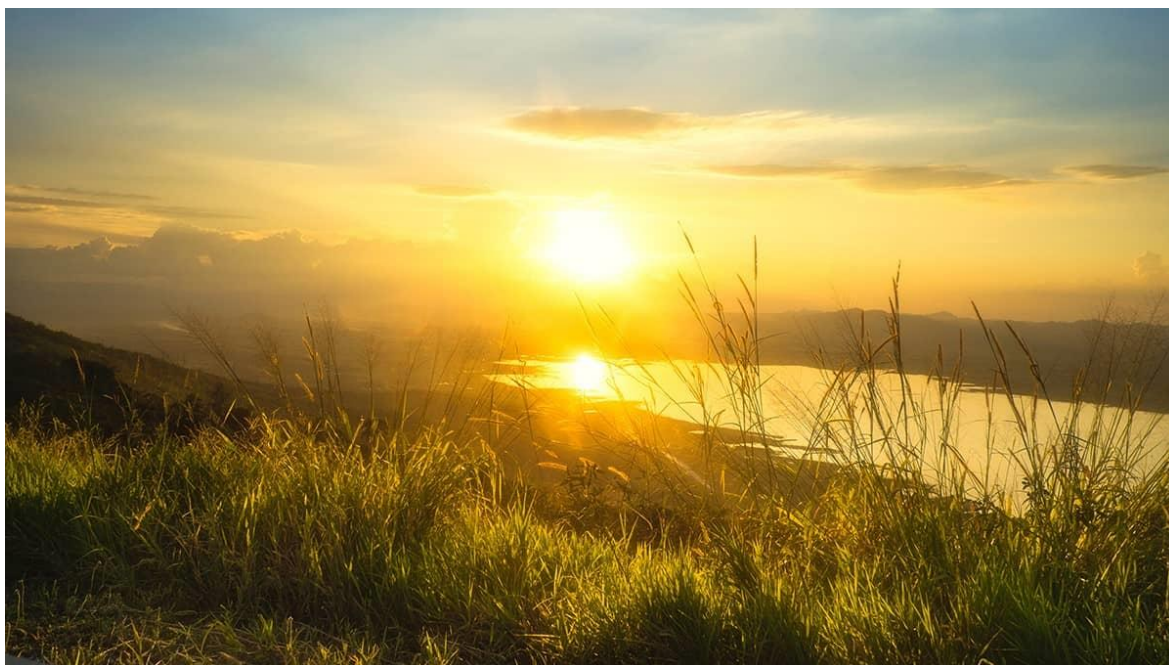
Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται περιπτώσιακές μελέτες και παραδείγματα αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και καλές πρακτικές.

Στο Κεφάλαιο 8 συζητούνται μερικές μελλοντικές τάσεις και γεγονότα που θα επηρεάσουν τον τομέα, όπως και σημεία που χρειάζονται περισσότερη διερεύνηση και μελέτες από πλευράς της έρευνας.

Κεφάλαιο 2 Επισκόπηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών με καθοριστική σημασία για την παγκόσμια μετάβαση προς βιώσιμα και καθαρότερα συστήματα ενέργειας. Αυτή η ενότητα προσφέρει μια εις βάθος εξερεύνηση πολλών βασικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, περιγράφοντας τα διακριτά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα, τους περιορισμούς και τα πιθανά αποτελέσματα της ενσωμάτωσής τους σε σύγχρονα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.

2.1 Ηλιακή ενέργεια

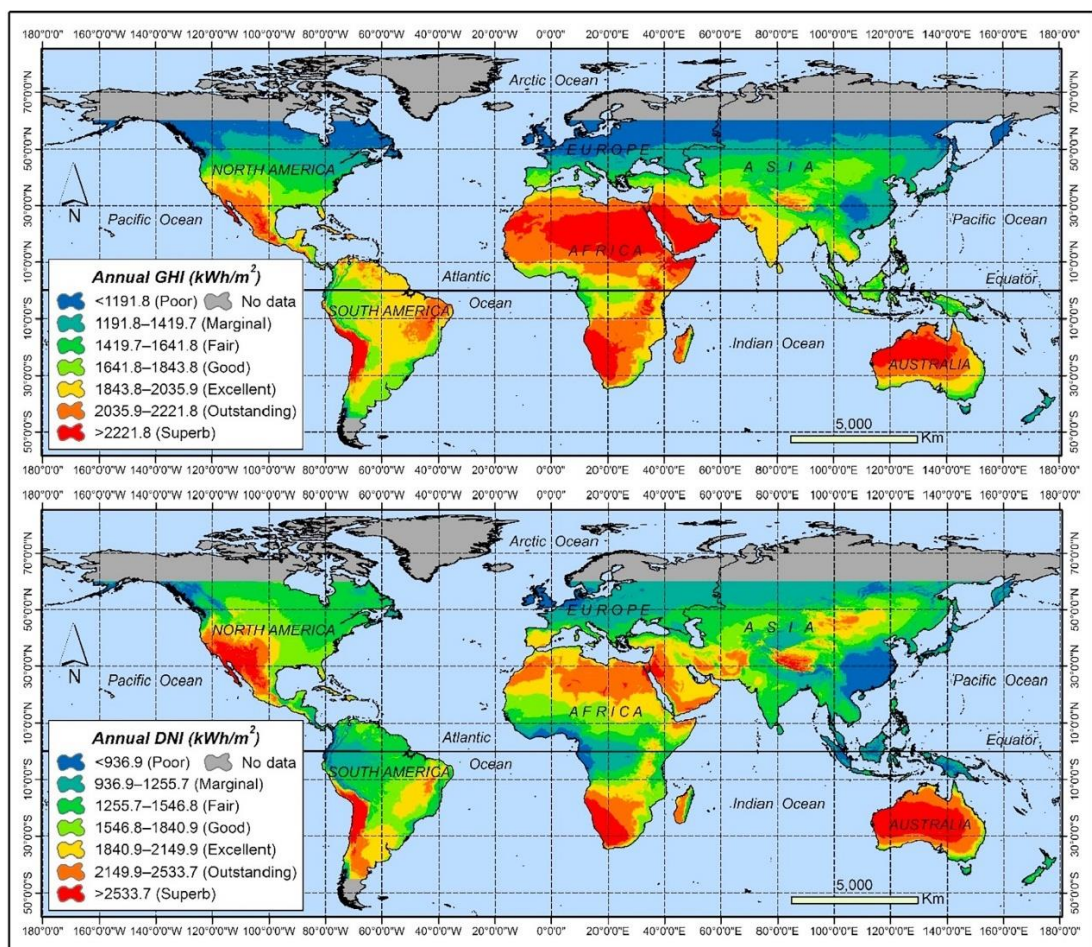


Εικόνα 2.1.1: Αυγή σε λιβάδι.

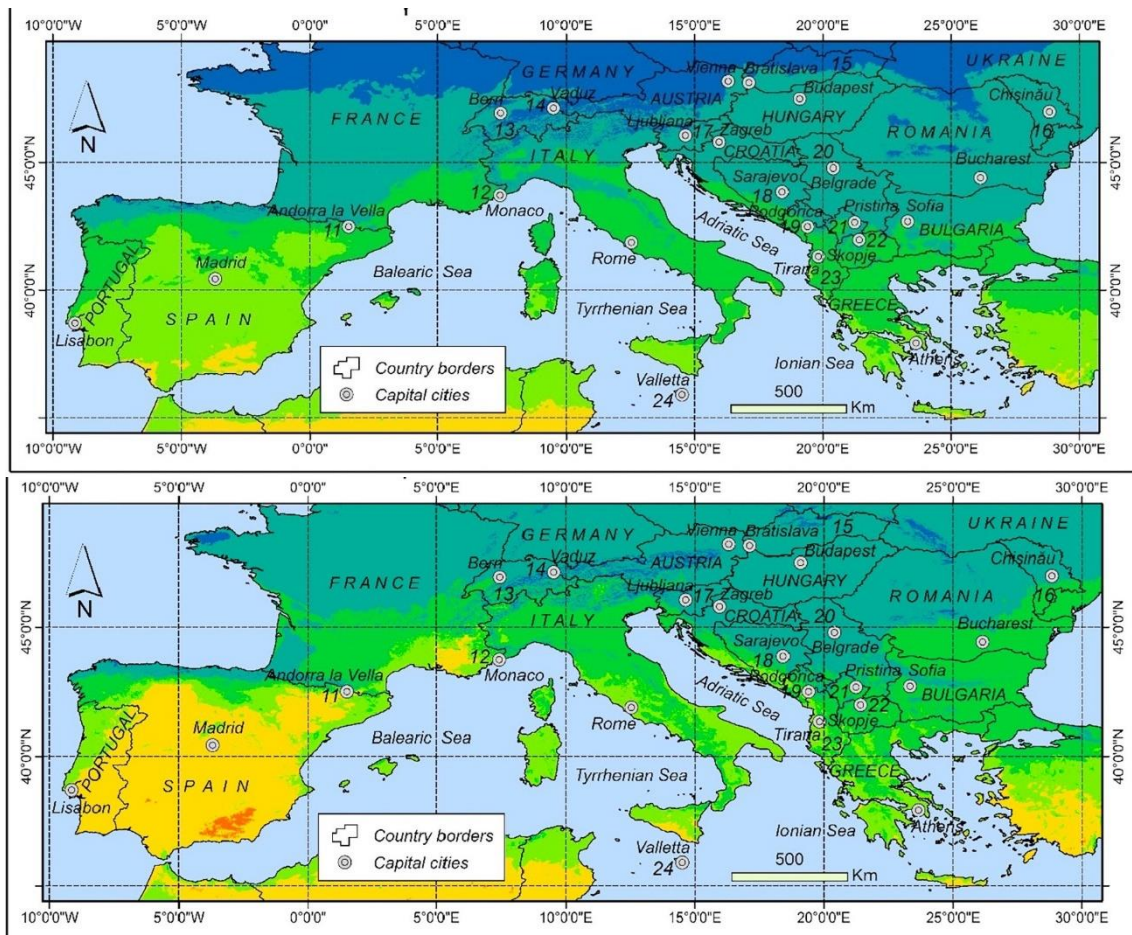
Η ηλιακή ενέργεια είναι ο καθαρότερος και πιο εύκολος να αποκτηθεί τύπος ανανεώσιμης ενέργειας. Η αφθονία του στις περισσότερες περιοχές είναι ένα από τα πλεονεκτήματά του. Όταν δεν υπάρχουν σύννεφα στον ουρανό, 1.8×10^{14} kW ηλιακής ενέργειας φτάνουν στην επιφάνεια της γης [4]. Ο ήλιος μέσα σε 90 λεπτά παρέχει ενέργεια η οποία αρκεί για να καλύψει τις ετήσιες ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη [5][6].

2.1.1 Πλεονεκτήματα

Η ηλιακή ενέργεια είναι απεριόριστη. Θεωρητικά, είναι ικανή να καλύψει τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες. Ακόμη και με τις τεράστιες δυνατότητές της και την αυξανόμενη συνειδητοποίηση, όμως, η ηλιακή ενέργεια εξακολουθεί να αποτελεί μόνο ένα μικρό μέρος του ενεργειακού εφοδιασμού του κόσμου. Ως εκ τούτου, η δημιουργία μιας ικανότητας για αποδοτική και αποτελεσματική συλλογή ηλιακής ενέργειας θα μπορούσε ενδεχομένως να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες παγκοσμίως χωρίς την ανάγκη για νέες πηγές ενέργειας [6][7]. Φυσικά, η ποσότητα της ενέργειας για συλλογή εξαρτάται από την τοποθεσία. Παρακάτω, παρατίθενται οι δυνατότητες ηλιακής ενέργειας κατά γεωγραφικά κριτήρια [βλ. Εικόνες 2.1.2, 2.1.3 και 2.1.4].



Εικόνα 2.1.2: Παγκόσμια χωρική αναπαράσταση της παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας (GHI) και της άμεσης κανονικής ακτινοβολίας (DNI) [8].



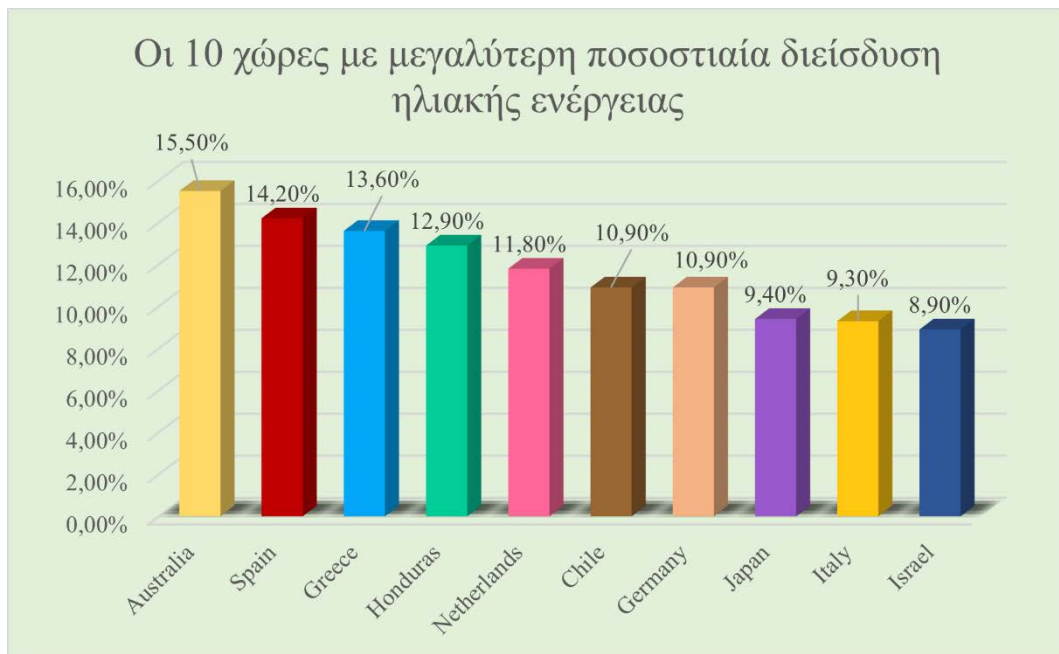
Εικόνα 2.1.3: Αναπαράσταση GHI για τις χώρες της Νότιας Ευρώπης (πάνω) [8].

Εικόνα 2.1.4: Αναπαράσταση DNI για τις χώρες της Νότιας Ευρώπης (κάτω) [8].

Επίσης, η ηλιακή ενέργεια είναι εύκολη στη συλλογή και με χαμηλά κόστη σε βάθος χρόνου. Η ηλιακή ενέργεια δεσμεύεται κυρίως από ηλιακά πάνελ, τα οποία χρησιμοποιούν φωτοβολταϊκή τεχνολογία για την παραγωγή ενέργειας. Οποιοδήποτε μέρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εγκατάσταση συστημάτων της. Για παράδειγμα, είναι πλέον απλή η εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών σε στέγες κατοικιών και επιχειρήσεων. Μπορεί εκ πρώτης όψεως το κόστος εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος να εμφανίζεται υψηλό, όμως τα ηλιακά πάνελ απαιτούν λίγη συντήρηση και μπορούν να λειτουργήσουν για δέκα έως δεκαπέντε χρόνια με μικρές επισκευές [6][7].

Η ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια επιπλέον παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ή έμμεσα για ένα ευρύ φάσμα σκοπών, τόσο βιομηχανικών όσο και καθημερινών. Παραδείγματα περιλαμβάνουν το στέγνωμα γεωργικών και βιομηχανικών ειδών, τη χρήση ηλιακής ενέργειας για ψυγεία, τη θέρμανση νερού, το μαγείρεμα και την ξήρανση τροφίμων [6][9].

Η χώρα μας έχει καταφέρει να βρίσκεται ανάμεσα στις 10 χώρες με μεγαλύτερη επί τοις εκατό διείσδυση ηλιακής ενέργειας, συγκεκριμένα κατέχουμε την τρίτη θέση (ποσοστό 13,6%) με βάση τα δεδομένα του IEA (Διεθνής Οργάνωση Ενέργειας) για το έτος 2021 [βλ Σχήμα 2.1.1].



Σχήμα 2.1.1: Οι 10 χώρες με τη μεγαλύτερη επί τοις εκατό διείσδυση ηλιακής ενέργειας με βάση τα δεδομένα της IEA για το έτος 2021 [10].

2.1.2 Μειονεκτήματα

Η ηλιακή ενέργεια είναι ακριβή και μη αποδοτική. Αναφερθήκαμε λίγο σε αυτό παραπάνω, αλλά το οικονομικό παραμένει ένα μεγάλο πρόβλημα με τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Παρόλο που το κόστος της ηλιακής ενέργειας έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια και το κόστος συντήρησης είναι ελάχιστο, πολλοί άνθρωποι εξακολουθούν να αδυνατούν να ξεπεράσουν το οικονομικό εμπόδιο. Ακόμη, τα ηλιακά πάνελ βρίσκονται στον πάτο της αποδοτικότητας σε σχέση με άλλες πηγές ενέργειας, ανανεώσιμες και μη, με ένα τυπικό ποσοστό απόδοσης να βρίσκεται στο 15-20% [6][11].

Τα κλιματικά και καιρικά φαινόμενα επίσης αποτελούν περιορισμό για την μαζικοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη μόνο την ημέρα, ενώ η πλειονότητα των ανθρώπων έχει μεγάλες ενεργειακές ανάγκες τη νύχτα, που βρίσκεται στο σπίτι. Για την όποια μαζικοποίηση επομένως τα φωτοβολταϊκά πρέπει να «πηγαίνουν πακέτο» με κάποιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, με ό,τι συνεπάγεται αυτό οικονομικά και τεχνολογικά [6][11][12].

2.2 Υδροηλεκτρική ενέργεια



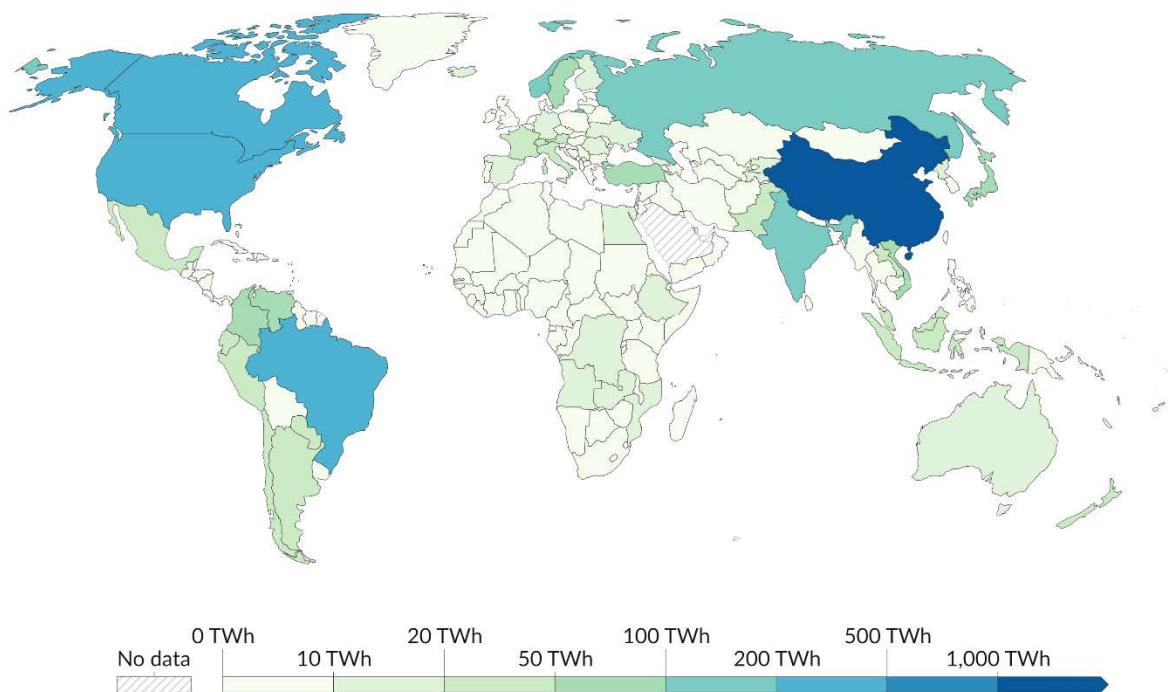
Εικόνα 2.2.1: Υδροηλεκτρικό Φράγμα.

Σε ανταγωνιστικές τιμές, η υδροηλεκτρική ενέργεια αντιπροσωπεύει το 16% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας την τη μεγαλύτερη ανανεώσιμη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι σήμερα [βλ Σχήμα 2.3.2]. Είναι μια καθιερωμένη και πολύ απλή τεχνική, κατά την οποία η δυναμική ενέργεια μιας πηγής νερού μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια που περιστρέφει έναν στρόβιλο η οποία με τη σειρά της οδηγεί μια γεννήτρια ηλεκτρικής ενέργειας [13].

2.2.1 Πλεονεκτήματα

Η υδροηλεκτρική ενέργεια έχει τεράστιες δυνατότητες επειδή το νερό αποτελεί περίπου τα δύο τρίτα του κόσμου. Ωστόσο, μόνο ένα μικρό μέρος των δυνατοτήτων του έχει διερευνηθεί μέχρι στιγμής. Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι το αποτέλεσμα του νερού που ρέει μέσα από ρυάκια και ποτάμια. Πιο συγκεκριμένα, είναι η φυσική καθοδική κίνηση του νερού που προκαλείται από τη βαρύτητα από τη γη στον ωκεανό [14].

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι αρκετά οικονομική. Μία από τις πιο προσιτές μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένας καλοσχεδιασμένος και λειτουργικός υδροηλεκτρικός σταθμός, πιθανώς επειδή το καύσιμο —το νερό που πέφτει— μπορεί να ληφθεί χωρίς άμεσο κόστος που σχετίζεται με την αγορά καυσίμων. Οι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούνται συνήθως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, παρέχοντας τουλάχιστον το 50% της συνολικής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε περισσότερες από 35 χώρες [13][14]. Παρακάτω παραθέτουμε την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας ανά τον κόσμο [βλ Εικόνα 2.2.2], καθώς επίσης και την παγκόσμια εξάρτηση από την υδροηλεκτρική ενέργεια [βλ Σχήμα 2.2.1].



Εικόνα 2.2.2: Παγκόσμια Παραγωγή ενέργειας από υδροηλεκτρικούς σταθμούς (σε TWh) σύμφωνα με δεδομένα της Ember για το έτος 2022 [15].

Στο Σχήμα 2.2.1 παρατηρούμε ποσοστά τελείως διαφορετικά σε σχέση με ό,τι ανάλογο είδαμε για την ηλιακή ενέργεια. Είναι αξιόπαινο να αναφέρουμε ότι το Μπουτάν έχει καταφέρει να ηλεκτροδοτείται πρακτικά εξ’ ολοκλήρου από την υδροηλεκτρικής ενέργεια! Μάλιστα, παράγει ποσά πολύ μεγαλύτερα από αυτά που χρειάζεται να καταναλώνει, οπότε τους θερινούς μήνες συνήθως πουλάει την περίσσεια ενέργεια σε γειτονικές χώρες, όπως η Ινδία (Περισσότερα για το Μπουτάν θα αναφέρουμε στην υποενότητα 7.3.2).



Σχήμα 2.2.1: Οι 10 χώρες με τη μεγαλύτερη επί τοις εκατό διείσδυση υδροηλεκτρικής ενέργειας με βάση τα δεδομένα της Ember για το έτος 2022 [15].

Σε σύγκριση με άλλα συστήματα παραγωγής ενέργειας, όπως οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μπορούν να ανταποκριθούν στις διακυμάνσεις της ζήτησης πολύ πιο γρήγορα [16]. Αυτό καθιστά την υδροηλεκτρική ενέργεια μια ευέλικτη τεχνολογία μετατροπής ενέργειας και επιβεβαιώνει τους λόγους για τους οποίους οι σταθμοί της χρησιμοποιούνται για κορυφαία παραγωγή ενέργειας σε πολλές περιστάσεις. Επιπλέον, επειδή η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπει το μηχανικό έργο απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια – όντας και οι δύο υψηλές μορφές ενέργειας - είναι μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος μετατροπής της ενέργειας. Ένας υδροηλεκτρικός σταθμός που λειτουργεί με μέγιστη απόδοση μπορεί να επιτύχει περίπου 85% απόδοση πλαισίου ενεργειακού μετασχηματισμού [14].

2.2.2 Μειονεκτήματα

Παρά τα οφέλη της ως βιώσιμης και ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, η χρήση υδροηλεκτρικών σταθμών έχει μια σειρά από κινδύνους που σχετίζονται με την οικονομία, την κοινωνία και το περιβάλλον. Καθώς ο σχεδιασμός του υδροηλεκτρικού σταθμού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωγραφία ενός μέρους και επειδή απαιτείται υψηλό επίπεδο ύψους νερού για να παραχθεί επαρκής ποσότητα ενέργειας, οι πλημμύρες είναι πρακτικά αναπόφευκτες. Εκτός αυτού, παρουσιάζουν μεγάλες επιπτώσεις στα

οικοσυστήματα, την παροχή νερού και το περιβάλλον, ενώ πολλές φορές απαιτούν και την μετεγκατάσταση πληθυσμών που ενδέχεται να επηρεαστούν από το έργο [17][18][19].

Πέραν των περιβαλλοντικών προβλημάτων, τα οικονομικά προβλήματα είναι επίσης σημαντικά, αφού τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα παρουσιάζουν υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης και μακροπρόθεσμες περιόδους απόσβεσης, μεγάλους κύκλους έγκρισης και κατασκευής και μακριούς χρόνους για την απόκτηση ή ανανέωση συνδέσεων δικτύου και δικαιωμάτων παραχώρησης. Για το λόγο αυτό τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια μικρής κλίμακας φαίνονται πολύ πιο ελκυστικά, έχοντας μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, παράγουν όμως και λιγότερη ενέργεια [14][18].

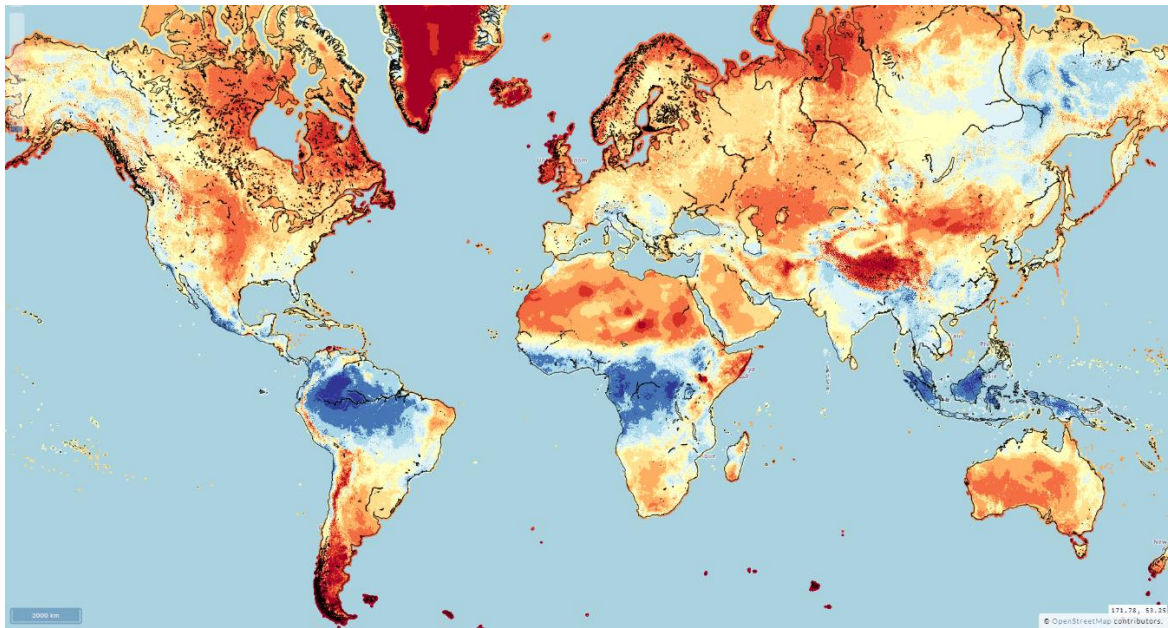
2.3 Αιολική ενέργεια



Εικόνα 2.3.1: Ανεμόμυλοι στη Μύκονο.

Μια άλλη σημαντική πηγή είναι η αιολική ενέργεια, η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας τουρμπίνες για να αξιοποιήσει την κινητική ενέργεια της κίνησης του αέρα. Πολλές χώρες ερευνούν ενεργά τις πηγές αιολικής ενέργειας, τόσο στην ξηρά όσο και σε υπεράκτιες περιοχές. Ο άνεμος είναι μία καθαρή και δωρεάν πηγή ενέργειας και η τεχνολογία γύρω από αυτόν είναι σχετικά ώριμη και δοκιμασμένη [19][20]. Παρακάτω

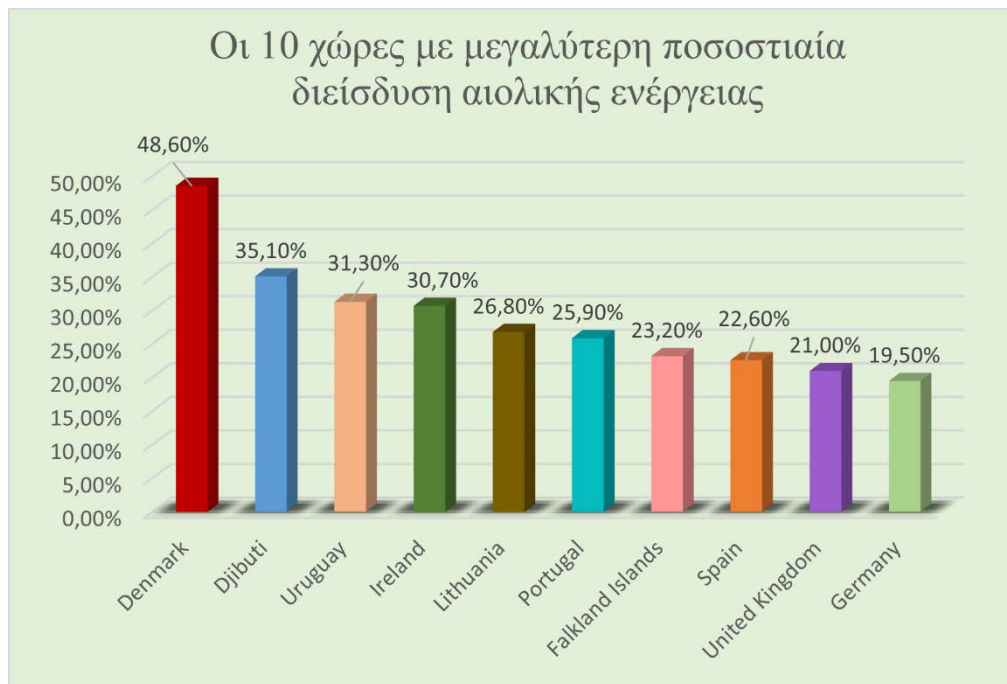
διακρίνονται οι ταχύτητες των ανέμων ανά τον κόσμο [βλ Εικόνα 2.3.2] και η παγκόσμια ποσοστιαία εξάρτηση από την αιολική ενέργεια [βλ Σχήμα 2.3.1].



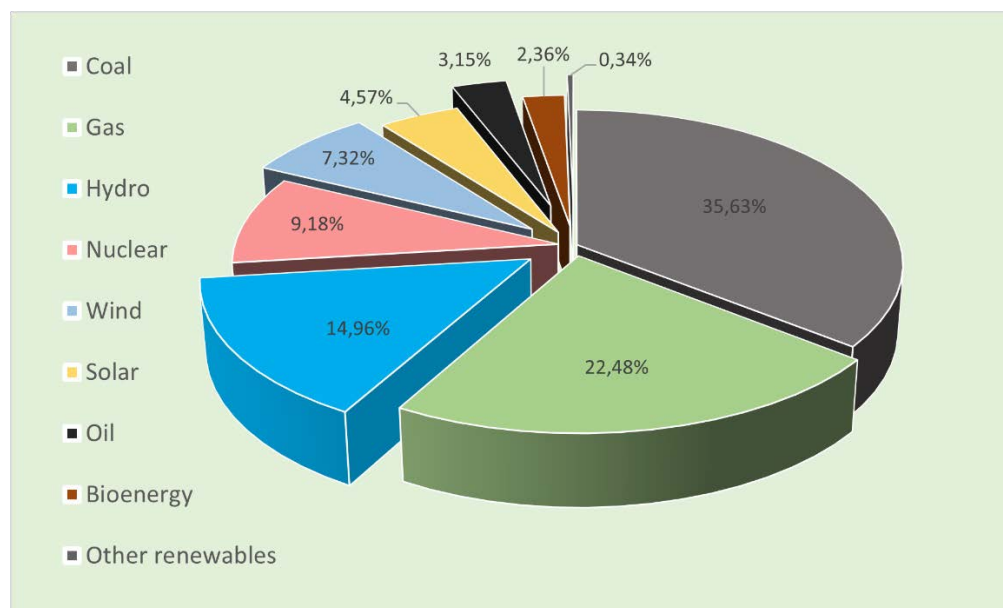
Εικόνα 2.3.2: Παγκόσμιος Άτλας Ανέμων [21] (Το μπλε αντιστοιχεί στους χαμηλότερους ανέμους ενώ το κόκκινο στους υψηλότερους).

2.3.1 Πλεονεκτήματα

Ο άνεμος είναι ανταγωνιστικός με άλλες πηγές ενέργειας όσον αφορά το κόστος, τις επιπτώσεις στο περιβάλλον και τη χρησιμότητα. Η βελτιωμένη οικονομία του έργου είναι ένα σημαντικό εμπόδιο για την αιολική ενέργεια, αλλά εκτός από την υδροηλεκτρική ενέργεια, η αιολική ενέργεια είναι η πλησιέστερη στην εμπορική κερδοφορία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας [βλ Σχήμα 2.3.2]. Δεδομένου ότι οι αιολικοί πόροι βρίσκονται στα περισσότερα έθνη, η αιολική ενέργεια έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών [20].



Σχήμα 2.3.1: Οι 10 χώρες με τη μεγαλύτερη επί τοις εκατό διείσδυση υδροηλεκτρικής ενέργειας με βάση τα δεδομένα της IRENA για το έτος 2023 [22].



Σχήμα 2.3.2: Μερίδες ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης από διάφορες πηγές σύμφωνα με δεδομένα της Ember για το έτος 2022 [15].

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια έχει πάρει σταδιακά το προβάδισμα στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, χάρις των πολλών προτερημάτων της. Σε αντίθεση με την αιολική ενέργεια στην ξηρά, η υπεράκτια αιολική ενέργεια αποφεύγει τη μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις και έχει υψηλότερη απόδοση, σταθερή κατεύθυνση ανέμου, χαμηλή διάτμηση ανέμου, χαμηλές αναταράξεις και υψηλή ταχύτητα κοντά στο κέντρο φορτίου.

Επίσης δεν καταλαμβάνει γη. Επειδή η επιφάνεια του νερού είναι λιγότερο τραχιά από την ξηρά, έρευνες υποδεικνύουν ότι η ταχύτητα του υπεράκτιου ανέμου σε απόσταση 10 km μακριά από την ξηρά είναι 25% υψηλότερη από την ακτή [23].

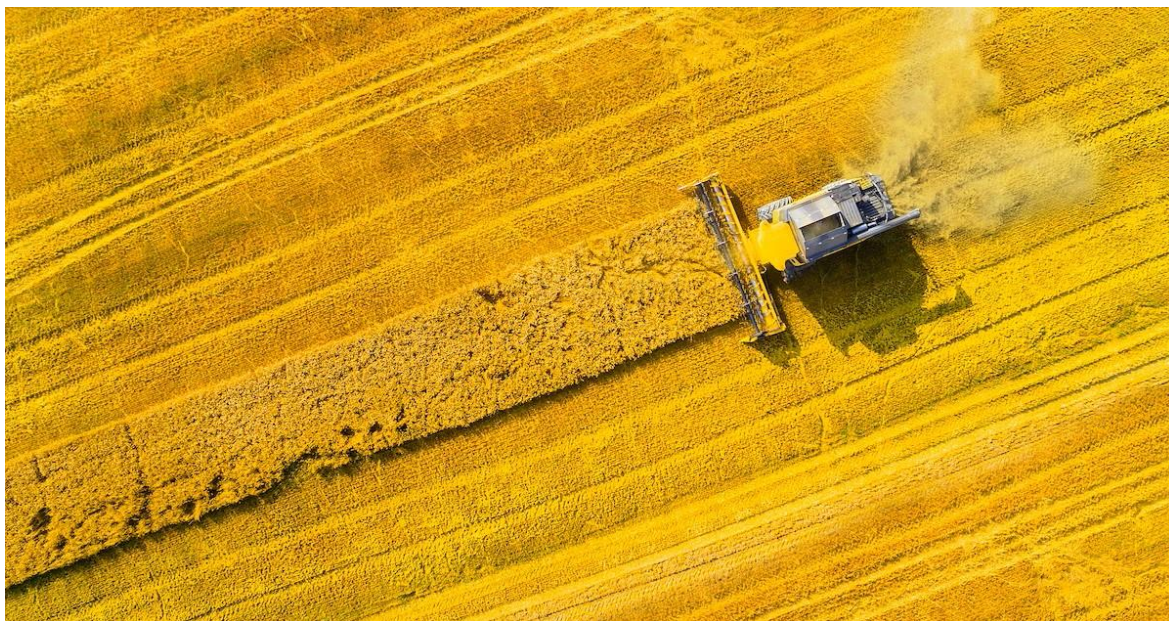
Επιπλέον, η αιολική ενέργεια είναι πολύ φιλική προς το περιβάλλον. Δεδομένου ότι καύσιμα οποιουδήποτε είδους δεν απαιτούνται για τις ανεμογεννήτριες, δεν υπάρχουν περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που να σχετίζονται με την εξερεύνηση, την εξόρυξη, τη μεταφορά, την αποστολή, την επεξεργασία ή τη διανομή του καυσίμου. Εκτός από την παραγωγή ενέργειας με μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (κατά τη διάρκεια της περιόδου λειτουργίας), η παραγωγή δεν εκθέτει επίσης συνηθισμένους ατμοσφαιρικούς ρύπους ή επικίνδυνους ρύπους όπως ο υδράργυρος [20].

2.3.2 Μειονεκτήματα

Το κύριο εμπόδιο για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας είναι ο σποραδικός χαρακτήρας της, καθώς αυτή δεν είναι σταθερά διαθέσιμη όποτε απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια. Δεν μπορούν να συλληφθούν όλοι οι άνεμοι για να ανταποκριθούν στο χρονοδιάγραμμα των απαιτήσεων ηλεκτρικής ενέργειας και η ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί χωρίς τη χρήση μπαταριών [20].

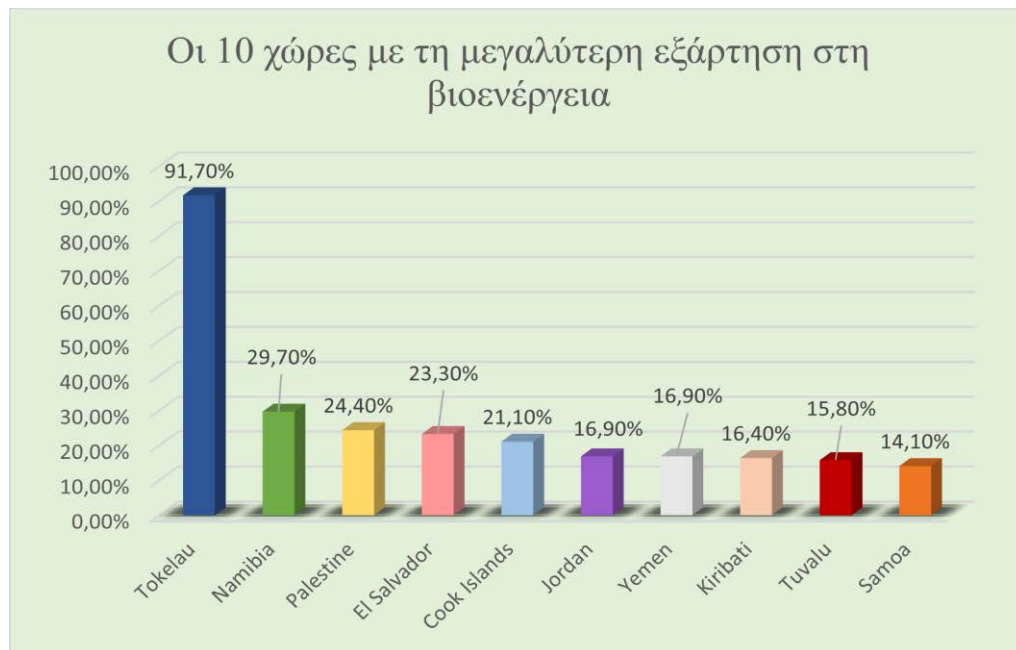
Η αιολική ενέργεια απαιτεί επαυξημένη κατανόηση της μηχανικής των ροών ατμοσφαιρικών και αιολικών σταθμών. Η ενέργεια εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοποθεσία και την τοπική τοπογραφία, είτε είναι λοφώδης είτε χαμηλού υψομέτρου σε πεδιάδες ή ερήμους. Ένα συγκεκριμένο σύνολο μετεωρολογικών παραγόντων, όπως τα στεριανά και θαλάσσια ρεύματα αέρα, η εγγύτητα στη γη, η θερμοκρασία του αέρα και του νερού και το ύψος των κυμάτων, επηρεάζουν τον αιολικό πόρο πάνω από τον ωκεανό. Ο άνεμος αλλάζει με τις εποχές και από μέρα σε νύχτα σε ορισμένες περιοχές. Καθώς ο άνεμος προέρχεται από παγκόσμια μετεωρολογικά φαινόμενα και η ενέργεια εξάγεται από το επιφανειακό στρώμα, η φυσική και τα μεγέθη που εμπλέκονται εκτείνονται πέρα από εκείνα πολλών, αν όχι όλων, άλλων δυναμικών συστημάτων μεγάλης κλίμακας [24].

2.4 Βιοενέργεια



Εικόνα 2.4.1: Τρύγος Σίκαλης.

Τα καύσιμα βιολογικής προέλευσης που είναι στερεά, υγρά ή αέρια περιλαμβάνονται όλα στον γενικό όρο «βιοενέργεια». Βιοενέργεια είναι η συλλογική ονομασία για την ενέργεια που χρησιμοποιείται ως θερμότητα και ενέργεια (δηλαδή ηλεκτρική ενέργεια) για σταθερούς σκοπούς ή ως υγρό βιοκαύσιμο για μεταφορά. Η βιοενέργεια σύμφωνα με εκτιμήσεις, δείχνει τη δυνατότητα να προσφέρει οπουδήποτε από 10% έως περισσότερο από 60% του εφοδιασμού παγκοσμίως [24][25]. Παρακάτω διακρίνονται οι χώρες με τη μεγαλύτερη εξάρτηση από τη βιοενέργεια σύμφωνα με τα δεδομένα του Διεθνούς Οργανισμού Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας [βλ Σχήμα 2.4.1]. Παρατηρούμε ότι εξαρτημένες σε αυτή την πηγή ενέργειας είναι κυρίως νησιά του Ειρηνικού Ωκεανού και χώρες της μέσης Ανατολής.



Σχήμα 2.4.1: Οι 10 χώρες με τη μεγαλύτερη επί τοις εκατό διείσδυση βιοενέργειας με βάση τα δεδομένα της IRENA για το έτος 2023 [22].

2.4.1 Πλεονεκτήματα

Η βιοενέργεια αποτελεί ήδη σημαντικό μέρος του ενεργειακού «μείγματος» στην Ευρώπη. Ο τομέας της βιοενέργειας επεκτείνεται σταθερά σε όλες τις κατηγορίες της αγοράς, με περίπου το 8% της συνολικής ευρωπαϊκής κατανάλωσης ενέργειας να αντιστοιχεί σε αυτόν τον τομέα. Η βιομάζα μπορεί να παρουσιάζει περιορισμένη δυναμική, αλλά δεν παρουσιάζει τις διακυμάνσεις άλλων ανανεώσιμων πηγών. Η αποτελεσματική εφαρμογή της σύγχρονης τεχνολογίας βιοενέργειας είναι κρίσιμη για τη μελλοντική εξέλιξη του ευρωπαϊκού συστήματος ενεργειακού εφοδιασμού, ιδιαίτερα για τον μετριασμό των διακυμάνσεων στην παραγωγή αιολικής και ηλιακής ενέργειας [26].

Η βιοενέργεια είναι μία αρκετά ευέλικτη μορφή ενέργειας. Η βιομάζα παρουσιάζεται ως η μόνη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με βάση τον άνθρακα που μπορεί να αντικαταστήσει αποτελεσματικά τα ορυκτά καύσιμα. Επιπλέον, είναι η μόνη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού, θέρμανσης και καυσίμων όποτε αυτά χρειάζονται [26].

Η βιομάζα είναι μια αποδεκτή εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα από οικολογική και τεχνική άποψη, ιδιαίτερα στη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ενώ η τεχνολογία παραγωγής ενέργειας από βιομάζα για τιμές άνω των 2 MW ηλεκτρικής ισχύος εξόδου με χρήση ατμοστρόβιλων βρίσκεται επί του παρόντος στην πρώτη γραμμή της τεχνολογίας, οι τεχνολογίες που είναι προσβάσιμες κάτω των 2 MW είναι λιγότερο

καθιερωμένες και παρουσιάζουν μια σειρά από καινοτόμες και δημιουργικές τεχνικές [26][27].

2.4.2 Μειονεκτήματα

Η διαθεσιμότητα γης είναι ένα από τα σημαντικότερα εμπόδια στην προερχόμενη από γη βιοενέργεια. Η γη είναι ουσιαστικά καθορισμένη σε ποσότητα και ήδη πολύτιμος πόρος, και μιας και η βιοενέργεια χρειάζεται τόσο πολύ γη, δεν αναμένεται ότι θα είναι ανταγωνιστική πηγή ενέργειας μακροπρόθεσμα. Παρόλο που οι γεωργικές αποδόσεις συνεχίζουν να αυξάνονται, ο συνδυασμός ενός αυξανόμενου ανθρώπινου πληθυσμού και της αυξανόμενης κατανόησης της ανάγκης διατήρησης των φυσικών οικοσυστημάτων, ιδιαίτερα εκείνων που είναι ως επί το πλείστον φυσικά, υποδηλώνει ότι εν τέλει θα επέλθει σπανιότητα σε αυτή την πηγή ενέργειας [28].

Η παραγωγή βιοενέργειας έχει επιπτώσεις και στο νερό, κυρίως μέσω της μετατροπής της γης σε «χρήσιμη» και της πιθανής κατανάλωσης νερού από καλλιέργειες βιοενέργειας. Επιπλέον, η μετατροπή γεωργικής γης ή λιβαδιών σε πολυετή είδη χόρτων (όπως το switchgrass και το Miscanthus) μπορεί να έχει σημαντικό και άμεσο αντίκτυπο σε κατά τόπους υδρολογικές διεργασίες όπως η ET (εξατμισοδιαπνοή), η επιφανειακή απορροή, η παραγωγή και αποθήκευση νερού στο έδαφος. Στη λεκάνη Yazoo του ποταμού Μισισσιπή, την κύρια περιοχή παραγωγής καλαμποκιού στις Ηνωμένες Πολιτείες, για παράδειγμα, αποτελέσματα μοντελοποίησης [29] απέδειξαν ότι η εκτεταμένη φύτευση βιοενεργειακών καλλιεργειών θα αυξήσει την ποσότητα του ET, θα μειώσει το ετήσιο επιφανειακό νερό και θα μειώσει την παραγωγή νερού [30].

2.5 Ωκεάνια ενέργεια



Εικόνα 2.5.1: Ωκεάνιο κύμα.

Ο ωκεανός, που αποτελεί το 71% της επιφάνειας της υδρογείου μας, είναι μια τεράστια πηγή ενέργειας. Η ανανεώσιμη ενέργεια των ωκεανών μπορεί να συλλεχθεί με πολλές μορφές: κύμα, παλίρροια, ρεύμα, διαφορά θερμοκρασίας και τύποι κλίσης αλατότητας. Το επιφανειακό κύμα είναι μακράν η πιο εμφανής πηγή ενέργειας των ωκεανών. Τα κύματα είναι απλώς ενέργεια σε κίνηση, ή ενέργεια που μεταφέρεται μακριά από την πηγή της [31][32].

2.5.1 Πλεονεκτήματα

Αρχικά, ο ωκεανός είναι μια δυνητικά τεράστια φυσική πηγή ενέργειας, πολύ μεγαλύτερη από οτιδήποτε θα μπορούσε ποτέ να καταναλώσει το ανθρώπινο είδος. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του Marine Foresight Panel, λιγότερο από το 0,1% της ωκεάνιας ενέργειας μπορεί να καλύψει περίπου πέντε φορές τις ενεργειακές ανάγκες του κόσμου [33]! Δυστυχώς όμως μέχρι σήμερα οι θαλάσσιοι πόροι ενέργειας συμβάλλουν σε ποσοστό κάτω του 3% στον ενεργειακό εφοδιασμό παγκοσμίως, το οποίο φανερώνει σημαντικό περιθώριο ανάπτυξης [32].

Παρακάτω φαίνονται οι χώρες με την μεγαλύτερη παραγωγή ωκεάνιας ενέργειας σε TWh ανά τον κόσμο. Στον ίδιο χάρτη φαίνεται και το θεωρητικό δυναμικό της κυματικής ενέργειας παγκοσμίως [βλ Εικόνα 2.5.2].



Εικόνα 2.5.2: Το παγκόσμιο θεωρητικό δυναμικό της κυματικής ενέργειας [34].

Επιπλέον, η ωκεάνια ενέργεια φαντάζει μία πολύ καλή απάντηση στις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας από γεωγραφική άποψη. Συγκεκριμένα, είναι ιδανική για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε παράκτιες περιοχές με υψηλά επίπεδα ανθρώπινης, εμπορικής και βιομηχανικής δραστηριότητας. Επί του παρόντος, περισσότεροι από τους μισούς ανθρώπους στη Γη κατοικούν 60 μίλια ή λιγότερο από μια ακτή του ωκεανού. Εκτός από νησιά και παράκτιες περιοχές, όμως, οι πόροι θαλάσσιας ανανεώσιμης ενέργειας μπορούν να προσφέρουν ηλεκτρική ενέργεια σε πλοία και υπεράκτιες πλατφόρμες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν περίπου το 3% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου [32]. Τέλος, η συμβολή της ωκεάνιας ενέργειας μπορεί να αλλάξει το γενικότερο πλαίσιο του εφοδιασμού ενέργειας. Με την εκμετάλλευση μίας σχετικά άγνωστης και ανεξερεύνητης πηγής, πολλοί πόροι που αυτή τη στιγμή θεωρούνται απαραίτητοι για την ενεργειακή κάλυψη θα «απελευθερωθούν». Όλοι γνωρίζουμε ότι οι στεριανοί πόροι είναι πολύτιμοι και πεπερασμένοι, και με αυτόν τον τρόπο θα μπορέσουν να διατηρηθούν και να χρησιμοποιηθούν για σημαντικότερους σκοπούς [32].

2.5.2 Μειονεκτήματα

Παρόλο που η χρήση της ενέργειας των ωκεανών έχει μεγάλες δυνατότητες ως βιώσιμη πηγή ενέργειας, υπάρχουν σημαντικά οικονομικά εμπόδια που αυξάνουν το κόστος αυτής

της πηγής ενέργειας σε σχέση με πιο παραδοσιακές επιλογές. Η πολυπλοκότητα και η δυσκολία των θαλάσσιων συνθηκών απαιτούν τη χρήση εξειδικευμένης τεχνολογίας για την εγκατάσταση και τη συντήρηση θαλάσσιων ενεργειακών συστημάτων. Λόγω των ακραίων καιρικών φαινομένων που μπορούν να παρουσιαστούν σε ένα τέτοιο περιβάλλον, πρέπει να αναπτυχθούν πιο προηγμένες μηχανολογικές λύσεις και υλικά μακράς διάρκειας. Όλα αυτά μεταφράζονται σε πολύ υψηλά κόστη τόσο για την έναρξη όσο και για τη συντήρηση ενός τέτοιου εγχειρήματος, πρόβλημα που σίγουρα δε φαντάζει αμελητέο [32][33].

Ως μια σχετικά νέα ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η ωκεάνια ενέργεια έχει το μειονέκτημα ότι βρίσκεται στις πρώτες φάσεις μελέτης και ανάπτυξής της, με πολλά εμπόδια που πρέπει να αντιμετωπιστούν ακόμη. Επειδή οι τεχνολογίες που χρειάζεται είναι νέες, μπορεί να είναι δύσκολο να προβλέψουμε και να επιλύσουμε απρόβλεπτα ζητήματα που μπορεί να προκύψουν στην πορεία. Οι μεγάλες φάσεις ανάπτυξης του έργου είναι συχνά το αποτέλεσμα των πολύπλοκων μηχανολογικών λύσεων που απαιτούνται για τη συλλογή ενέργειας από το νερό καθώς και της ανάγκης διαχείρισης περίπλοκων περιβαλλοντικών και αδειοδοτικών περιορισμών. Οι χρονικοί περιορισμοί εμποδίζουν την ικανότητα της ωκεάνιας ενέργειας να ανταγωνιστεί πιο καθιερωμένες και εύκολα προσβάσιμες πηγές, καθώς και καθυστερεί την απόσβεση της επένδυσης [32][33].

2.6 Γεωθερμική ενέργεια



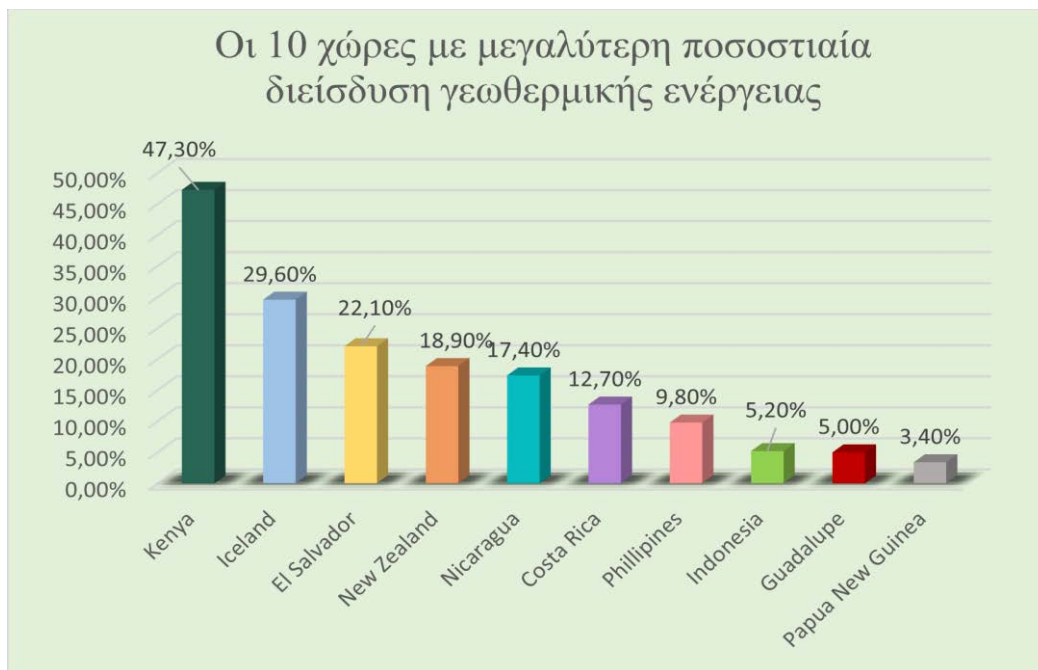
Εικόνα 2.6.1: Γεωθερμική πηγή στο Hverir Námafjall της Ισλανδίας.

Η θερμική ενέργεια που αποθηκεύεται κάτω από την επιφάνεια της στερεάς Γης αναφέρεται ως «γεωθερμική». Αυτή η τεράστια ενέργεια προέρχεται κυρίως από γεωλογικές και πλανητικές διεργασίες. Από την αρχή του χρόνου, ο πλανήτης μας σταδιακά ψύχεται και η αρχέγονη θερμότητα ταξιδεύει από το εσωτερικό της Γης στην επιφάνεια, όπου διαχέεται. Η γη στον ηπειρωτικό και ωκεάνιο φλοιό της απελευθερώνει τεράστια ποσά ενέργειας (μεγαλύτερα από ό,τι θα μπορούσε ποτέ να χρειαστεί ο άνθρωπος), τα οποία όμως δε θα μπορούσαν ποτέ να εκμεταλλευθούν ολοκληρωτικά, καθώς η ενέργεια είναι πολύ διασκορπισμένη. Έτσι, με τον όρο γεωθερμική, συνήθως αναφερόμαστε στο «κομμάτι» της ενέργειας στο οποίο έχουμε πρόσβαση [35].

2.6.1 Πλεονεκτήματα

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της γεωθερμικής ενέργειας είναι η αξιοπιστία της. Η παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας δεν εξαρτάται από εξωτερικές μεταβλητές όπως ο καιρός ή η ώρα της ημέρας, σε αντίθεση με ορισμένες άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως ο ήλιος ή ο άνεμος. Η αξιοπιστία σε ένα εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μετριέται από τον παράγοντα διαθεσιμότητας. Οι γεωθερμικοί σταθμοί παραγωγής έχουν υψηλότερο συντελεστή διαθεσιμότητας από ανανεώσιμες πηγές [36]. Αυτό καθιστά τις

εγκαταστάσεις γεωθερμικής ενέργειας κατάλληλες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας βασικού φορτίου [37]. Παρακάτω παρατίθενται οι χώρες με τη μεγαλύτερη διείσδυση γεωθερμικής ενέργειας παγκοσμίως [Σχήμα 2.6.1].



Σχήμα 2.6.1: Οι 10 χώρες με τη μεγαλύτερη επί τοις εκατό διείσδυση γεωθερμικής ενέργειας με βάση τα δεδομένα της IRENA για το έτος 2023 [22].

Ακόμη, η γεωθερμική ενέργεια παρουσιάζει αισθητά υψηλότερη απόδοση σε σχέση με άλλες απρόβλεπτες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ο συντελεστής ικανότητας ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής ή ο λόγος της πραγματικής ισχύος εξόδου προς τη μέγιστη χωρητικότητά του για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί πόσο αποδοτική είναι η μονάδα. Οι γεωθερμικοί σταθμοί έχουν εύρος συντελεστή δυναμικότητας 70–80%, ενώ οι εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας έχουν εύρος 85–90% (οι σταθμοί πυρηνικής ενέργειας είναι οι πιο αποδοτικοί) [38]. Αντίθετα, οι συντελεστές χωρητικότητας για εγκαταστάσεις ηλιακής και αιολικής ενέργειας είναι 16–30% και 30–50%, αντίστοιχα [37][39].

Τέλος, η ευελιξία της γεωθερμικής ενέργειας υπερβαίνει τη σταθερή και αξιόπιστη παραγωγή ενέργειας. Τα γεωθερμικά συστήματα προσφέρουν αξιόπιστες επιλογές θέρμανσης για εμπορικές, βιομηχανικές και οικιακές χρήσεις λόγω της συνεχούς και σταθερής θερμότητας που προέρχεται από το εσωτερικό της Γης. Αυτή η ικανότητα ευελιξίας καθιερώνει τη γεωθερμική ενέργεια ως μία ολοκληρωμένη λύση για την

ικανοποίηση των απαιτήσεων θέρμανσης και ψύξης διαφορετικών βιομηχανιών. Το τεράστιο εύρος χρήσεων της γεωθερμικής ενέργειας αυξάνει τη συνολική αξία και την ελκυστικότητά της ως μια ευέλικτη και βιώσιμη προσθήκη στην ευρύτερη ενεργειακή σκηνή [39].

2.6.2 Μειονεκτήματα

Αν και η γεωθερμική ενέργεια έχει πολλά πλεονεκτήματα, η γεωγραφική της κατανομή είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα. Η παρουσία γεωθερμικών πόρων, που βρίσκονται ως επί το πλείστον σε συγκεκριμένα γεωλογικά περιβάλλοντα, όπως όρια τεκτονικών πλακών και περιοχές με σημαντική ηφαιστειακή δραστηριότητα, είναι ζωτικής σημασίας για τη βιωσιμότητα της χρήσης γεωθερμικής ενέργειας. Αυτός ο περιορισμός εμποδίζει την ευρεία χρήση της γεωθερμικής ενέργειας ως πρωτογενούς ανανεώσιμου πόρου, υπογραμμίζοντας την αναγκαιότητα προσεκτικής επιλογής τοποθεσιών και την προώθηση της τεχνολογίας για τη βελτίωση της χρησιμότητας και της προσβασιμότητας αυτής της πολλά υποσχόμενης πηγής ενέργειας [37][40].

Οι υψηλές αρχικές δαπάνες εξερεύνησης, γεώτρησης και κατασκευής εγκαταστάσεων αποτελούν άλλο ένα μειονέκτημα της γεωθερμικής ενέργειας. Για την πρόσβαση σε γεωθερμικές δεξαμενές και την κατασκευή της απαιτούμενης υποδομής, μπορεί να χρειαστεί μια αρκετά μεγάλη αρχική επένδυση. Η γεώτρηση παρουσιάζει οικονομικές και τεχνικές δυσκολίες προκειμένου να φτάσει σε βαθιές δεξαμενές και να συλλέξει τη θερμότητα της Γης. Παρόλο που οι γεωθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής μετά την ίδρυσή τους έχουν χαμηλό κόστος λειτουργίας, η αρχική επένδυση κεφαλαίου μπορεί να είναι απαγορευτική για χώρες ή περιοχές με περιορισμένους οικονομικούς πόρους. Η ευρεία χρήση της γεωθερμικής ενέργειας εξαρτάται από την υπέρβαση αυτών των υψηλών αρχικών δαπανών και μόνο συνεχείς τεχνολογικές καινοτομίες και επιτεύγματα διαχείρισης έργων θα την καταστήσουν ανταγωνιστική πηγή ενέργειας.

Κεφάλαιο 3 Προκλήσεις στην ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό δίκτυο αποτελεί ένα πολύ μεγάλο και πολύπλοκο εγχείρημα. Είναι σαφές λοιπόν ότι τεχνικά, λειτουργικά, ρυθμιστικά και οικονομικά εμπόδια είναι αδύνατο να αποφευχθούν. Αυτή η ενότητα διερευνά τα περίπλοκα ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν προκειμένου να διασφαλιστεί η ομαλή και αποτελεσματική ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

3.1 Τεχνικές προκλήσεις

3.1.1 Διαλείψεις και μεταβλητότητα

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ιδιαίτερα η ηλιακή και η αιολική, παρουσιάζουν εγγενείς διαλείψεις και μεταβλητότητα. Αν και οι δύο όροι χρησιμοποιούνται συχνά εναλλακτικά στη βιβλιογραφία, τηρούμε τον ορισμό της Υπηρεσίας Ενεργειακών Πληροφοριών των ΗΠΑ, η οποία ορίζει τη διαλείπουσα κατάσταση ως αποτέλεσμα άμεσης, μη αποθηκευμένης μετατροπής φυσικών ροών ενέργειας, ενώ η μεταβλητότητα είναι από τη φύση της στην πηγή ενέργειας και ελέγχει τη μονάδα παραγωγής [41].

Η κύρια ανησυχία για την ποιότητα της ενέργειας είναι οι διακυμάνσεις της τάσης και της συχνότητας, οι οποίες οφείλονται σε μη ελεγχόμενη ασυνέπεια στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συνήθως προερχόμενη από συχνά μεταβαλλόμενα καιρικά χαρακτηριστικά. Όταν η διαθεσιμότητα του φωτός και η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζουν διακυμάνσεις, είναι φυσικό επόμενο οι διακυμάνσεις αυτές να μεταφέρονται και στο αποτέλεσμα της παραγόμενης ενέργειας [42][43].

Για παράδειγμα, οι ταχύτητες του ανέμου όχι μόνο μπορεί να κυμαίνονται γρήγορα, αλλά μία μικρή αλλαγή στην ταχύτητα του έχει ως αποτέλεσμα μια μεγάλη αλλαγή στην ισχύ εξόδου από έναν ανεμοκινητήρα, επειδή η μηχανική ισχύς που περιέχεται στον άνεμο είναι ανάλογη με την κυβική ταχύτητα του ανέμου [44].

Αντίστοιχα, η παραγόμενη ηλιακή ενέργεια επηρεάζεται πολύ από τα σύννεφα. Τα συμβάντα περαστικού νέφους τείνουν να τυχαioποιούνται σε μεγαλύτερες περιοχές, αλλά μπορεί να προκαλέσουν πολύ γρήγορες διακυμάνσεις εξόδου τοπικά. Αυτό το φαινόμενο

είναι επομένως πιο σημαντικό για μεγάλες, συνεχόμενες φωτοβολταϊκές συστοιχίες (που μπορούν να επηρεαστούν από ένα σύννεφο ταυτόχρονα) [44].

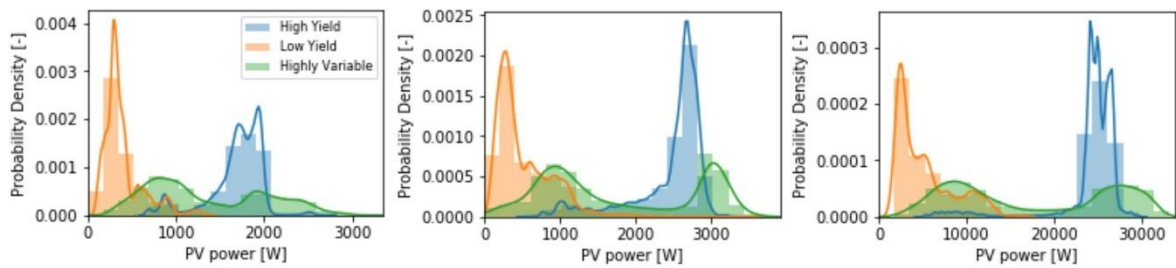
Η ωκεάνια ενέργεια επίσης παρουσιάζει μεταβολές και διακυμάνσεις. Πολλά περίπλοκα στοιχεία, όπως οι κύκλοι της σελήνης, τα μοτίβα του ανέμου και οι εποχιακές διακυμάνσεις επηρεάζουν τις παλίρροιες και τα κύματα, λόγω των εναλλασσόμενων φάσεων της Σελήνης όμως, η πρόβλεψή τους είναι πολύ πιο εύκολη [45][46].

3.1.2 Σταθερότητα του δικτύου

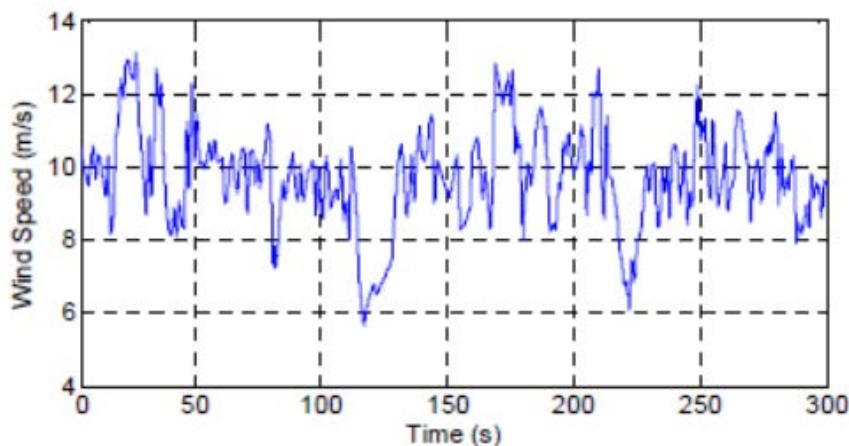
Η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό δίκτυο είναι σαφές πως φέρνει στο προσκήνιο ζητήματα σχετικά με τη σταθερότητα το δικτύου. Σύμφωνα με την τεκμηρίωση του IEEE Standard 929-2000, η τάση, η συχνότητα, το τρεμόπαιγμα της τάσης και η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος είναι τέσσερις βασικές παράμετροι με βάση τους οποίους θα πρέπει να ελέγχεται η επίδοση της ποιότητας ισχύος των συστημάτων παραγωγής ενέργειας [42][43].

3.1.2.1 Αδράνεια και συχνότητα

Αντικαθιστώντας τις παραδοσιακές σύγχρονες γεννήτριες με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), όπως ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά (PV), η συνολική αδράνεια του συστήματος μειώνεται. Επειδή οι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας συνδέονται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος, η αδράνειά τους απομονώνεται από το σύστημα και δεν μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της απόκρισης συχνότητας. Επιπλέον, η έλλειψη αδράνειας που μπορούν να προσφέρουν οι ηλιακές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις στο ηλεκτρικό δίκτυο επιδεινώνει ακόμη περισσότερο την απόκριση συχνότητας. Έτσι, ακόμη και σε μικρή αναντιστοιχία φορτίου-παραγωγής, η υψηλού επιπέδου διείσδυση των ΑΠΕ στο σύστημα μέσω της αντικατάστασης της συμβατικής σύγχρονης γεννήτριας μειώνει τη συνολική αδράνεια και αυξάνει τον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας, που ενεργοποιεί τον ελεγκτή αποβολής φορτίου (load-shedding controller) [Σχήματα 3.1.1 και 3.1.2]. Βέβαια, είναι σημαντικό να διευκρινίσουμε ότι αναφερόμαστε σε συστήματα ηλιακής, αιολικής και ωκεάνιας ενέργειας, καθώς αυτά συνδέονται στο σύστημα μέσω μη συγχρονισμένων αντιστροφών. Αντίθετα, συγχρόνως συνδεδεμένοι με το δίκτυο και ικανοί να παράγουν περιστροφική αδράνεια είναι σταθεροί ανανεώσιμοι πόροι όπως υδροηλεκτρικές, βιομάζας και γεωθερμικές γεννήτριες. [43][47][48].



Σχήμα 3.1.1: Κατανομές πυκνότητας πιθανότητας των μετρήσεων υψηλής συχνότητας Φ/B νοικοκυριού (αριστερά), Φ/B νοικοκυριού με περιοριστικό μετατροπέα (κέντρο) και Φ/B συστήματος MME (δεξιά) [49].



Σχήμα 3.1.2: Απόκριση συχνότητας του συστήματος με μεταβλητή ταχύτητα ανέμου [43].

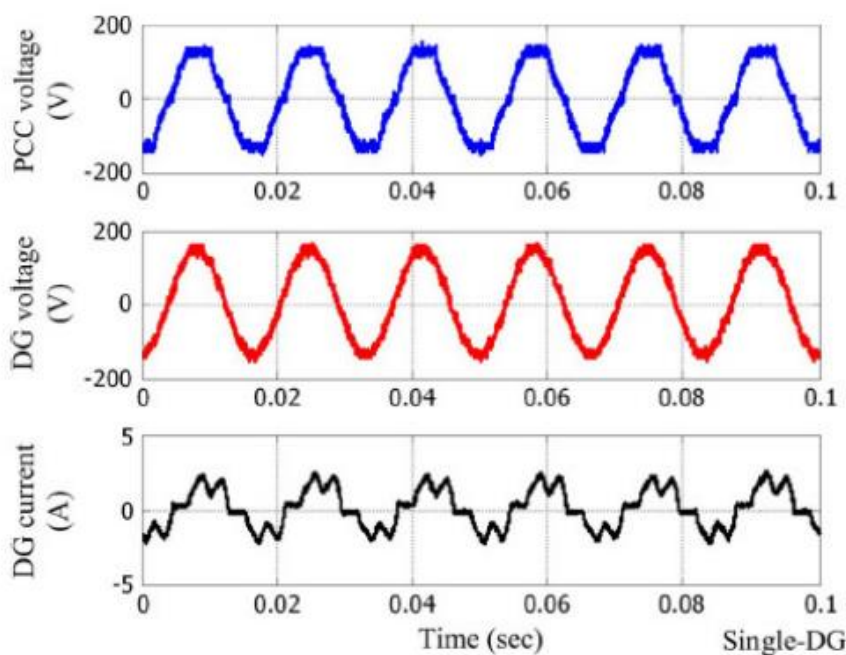
3.1.2.2 Διακυμάνσεις τάσης

Η σταθερότητα τάσης είναι γνωστή ως η ικανότητα ενός δικτύου να διατηρεί το επίπεδο τάσης των ζυγών (buses) και των τροφοδοτών (feeders) του σε εύλογο εύρος τόσο υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας όσο και μετά από ένα συμβάν έκτακτης ανάγκης. Η ανισορροπία άεργου ισχύος είναι το πρώτο βήμα προς την αστάθεια τάσης, η οποία είναι αρχικά τοπικό φαινόμενο. Οι δύο κύριες πηγές αστάθειας τάσης είναι οι ξαφνικές αλλαγές στα φορτία ή οι ξαφνικές αλλαγές στην ικανότητα ροής φορτίου, όπως η διακοπή της γραμμής μεταφοράς. Στην περίπτωση των ανανεώσιμων πηγών, η ασταθής φύση τους - ηλιακή, αιολική και ωκεάνια ενέργεια- είναι υπεύθυνη για αστάθειες τάσης [43][50]. Στην περίπτωση του ανέμου για παράδειγμα, η διακύμανση της αιολικής ισχύος προκαλεί διακυμάνσεις τάσης και τρεμούλιασμα που εξαρτώνται από τη διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου και τον τύπο του συστήματος παραγωγής [51].

3.1.2.3 Αρμονικά

Τα μη γραμμικά φορτία στο δίκτυο μπορούν να οδηγήσουν σε παραμορφώσεις της τάσης και του ρεύματος, οι οποίες είναι γνωστές ως αρμονικά (harmonics). Οι αρμονικές παραμορφώσεις είναι γενικά μια ανησυχία σε κυκλώματα που περιέχουν εξαρτήματα

ηλεκτρονικών ισχύος και άλλα ηλεκτρικά φορτία με μη γραμμικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των ανανεώσιμων πηγών, παρουσιάζουν ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα. [52]. Για μονάδες κατανεμημένης παραγωγής (ΚΠ) βασισμένα σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, υπάρχουν δύο είδη αρμονικών. Οι ηλεκτρονικές συσκευές ισχύος σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παράγουν το πρώτο είδος αρμονικών. Για ορισμένες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά συστήματα, η σύνδεσή τους στο δίκτυο διευκολύνεται από έναν αλληλοεπιδρών ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος. Οι αρμονικές παράγονται στην έξοδο του συστήματος παραγωγής από την εναλλαγή ηλεκτρονικών συσκευών ισχύος αυτών των μετατροπέων. Μη γραμμικά, τοπικά, σημεία κοινής σύζευξης (Point of Common Coupling - PCC) και φορτία χρησιμότητας στο σύστημα σε πολλαπλάσια της συχνότητας του δικτύου ισχύος (50/60 Hz), είναι αυτά που προκαλούν το δεύτερο είδος αρμονικών [Σχήμα 3.1.3][42][53].



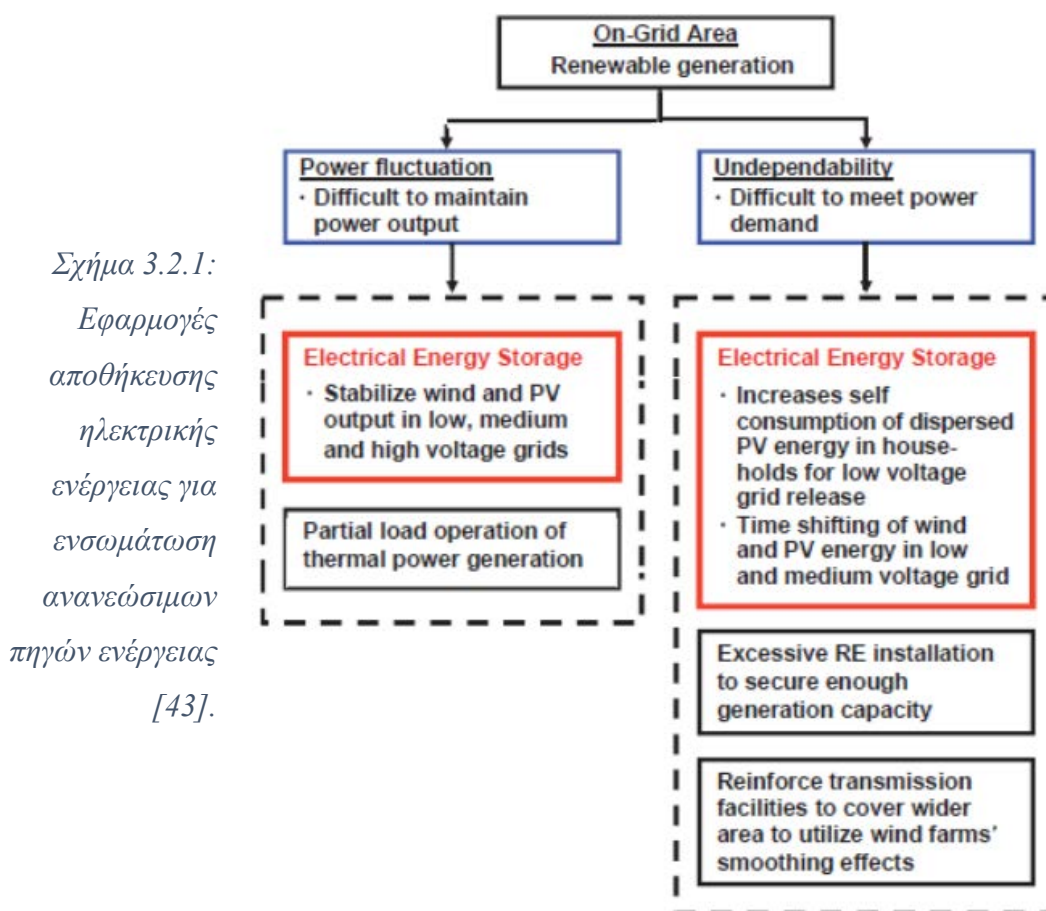
Σχήμα 3.1.3: Αρμονικά μονής μονάδας (ΚΠ) με μη γραμμικό φορτίο σε λειτουργία νησιού (με φυσική αντίσταση $X = 0,47 \text{ pu}$, $R = 0,031 \text{ pu}$). Από πάνω προς τα κάτω φαίνονται η PCC τάση, η ΚΠ τάση και το ΚΠ ρεύμα [43].

3.2 Λειτουργικές προκλήσεις

3.2.1 Αποθήκευση και Διαχείριση Ενέργειας

Μια θεμελιώδης απαίτηση για τις ενεργειακές υπηρεσίες κοινής ωφέλειας είναι να παρέχουν στους καταναλωτές ρεύμα σε τάση και συχνότητα που είναι εντός αποδεκτών ορίων. Ωστόσο, είναι πλέον γνωστό ότι η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές δεν είναι συνεπής. Ο έλεγχος συχνότητας του συστήματος καθίσταται δύσκολος εξαιτίας των

διακυμάνσεων στην παραγόμενη ενέργεια. Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να εκτελέσει λειτουργίες ελέγχου συχνότητας για να επιτρέψει την αποτελεσματική διαχείρισή της, επιλύοντας αυτό το πρόβλημα. Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας βοηθάει επίσης στον έλεγχο τάσης. Με την φόρτιση και εκφόρτιση ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνεται η εκτίναξη και ενισχύεται η πτώση της τάσης σε μία πολύ φορτωμένη γραμμή, διατηρώντας τη στα επιτρεπόμενα επίπεδα. Γενικώς, η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να συνδυαστεί με προηγμένα συστήματα ελέγχου για την επίτευξη βελτιωμένης σταθερότητας, αξιοπιστίας και ποιότητας ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές [Σχήμα 3.2.1][42][43].



Παρά το μεγάλο εύρος πλεονεκτημάτων και την σχεδόν απαραίτητη χρήση τους, η εφαρμογή συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας αντιμετωπίζει πολλά εμπόδια, τα βασικότερα από τα οποία αναλύονται παρακάτω.

3.2.1.1 Οικονομικά ζητήματα

Παρά τις σημαντικές προόδους στην αποθήκευση ενέργειας, η αρχική επένδυση παραμένει βασικός παράγοντας. Το υψηλό κόστος συνδέεται όχι μόνο με την αγορά υλικού αποθήκευσης αλλά και με την εγκατάσταση, τη συντήρηση και, στην περίπτωση των μπαταριών, την ενδεχόμενη αντικατάσταση. Επιπλέον, το μέγεθος και το κόστος των διαφορετικών τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας είναι αρκετά υψηλό. Όταν αυξάνεται το μέγεθος, αυξάνεται και το κόστος. Μέχρι στιγμής η κύρια συζήτηση για τη μείωση του κόστους εστιάζει στα εξαρτήματα, αγνοώντας όμως ότι αυτά αποτελούν το πολύ ένα 30-40% του συνολικού συστήματος. Αυτές οι οικονομικές προκλήσεις εμποδίζουν την ενσωμάτωση της αποθήκευσης ενέργειας σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, περιορίζοντας την ικανότητά τους να αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά τις διακοπές και να βελτιστοποιούν τη συνολική παραγωγή [54][55][56].

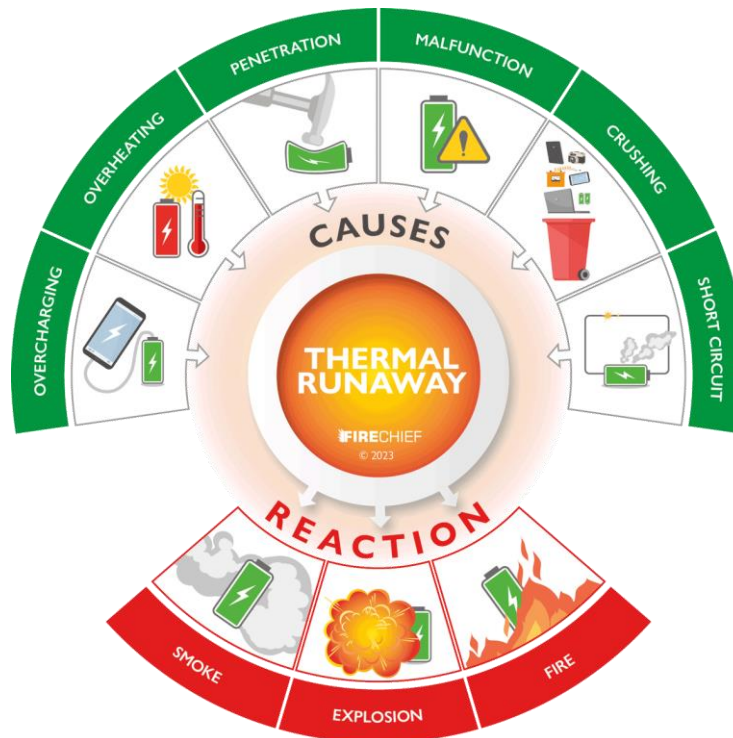
3.2.1.2 Θέματα ασφαλείας

Οι ανησυχίες που σχετίζονται με την ασφάλεια των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης, ιδίως στην περίπτωση των μπαταριών, βρίσκονται αυτή τη στιγμή στο επίκεντρο. Ζητήματα όπως η θερμική διαφυγή (thermal runaway) [βλ. Εικόνα 3.2.1], οι κίνδυνοι πυρκαγιάς και οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις θέτουν προκλήσεις για τη διασφάλιση της ασφαλούς εγκατάστασης και λειτουργίας συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Η χρήση εύφλεκτων ηλεκτρολυτών σε ορισμένες χημικές ουσίες μπαταριών και η ανάγκη για ισχυρά συστήματα θερμικής διαχείρισης είναι τομείς που απαιτούν συνεχή προσοχή για τον μετριασμό των κινδύνων ασφάλειας. Επιπρόσθετα, η αντιμετώπιση των ανησυχιών για την ασφάλεια κατά τα στάδια της κατασκευής, της μεταφοράς και του κύκλου ζωής των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι απαραίτητη. Τα ρυθμιστικά πρότυπα και κατευθυντήριες γραμμές παίζουν κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της ασφάλειας αυτών των τεχνολογιών, τονίζοντας την ανάγκη για ένα ολοκληρωμένο και διεθνώς αναγνωρισμένο πλαίσιο [54][55][56].

3.2.1.3 Επιλογή των υλικών

Οι διαφορετικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας βασίζονται σε συγκεκριμένα υλικά για ηλεκτρόδια, ηλεκτρολύτες και άλλα κρίσιμα συστατικά, το καθένα με τα δικά του πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Για παράδειγμα, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, που χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας, απαιτούν υλικά που εξισορροπούν την ενεργειακή πυκνότητα, την ασφάλεια και το κόστος. Η επιλογή των

υλικών επηρεάζει άμεσα την απόδοση, την αποδοτικότητα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος αποθήκευσης. Η επιλογή ακατάλληλων υλικών μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη διάρκεια ζωής, χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση και πιθανούς κινδύνους για την ασφάλεια. Επιπλέον, η εξασφάλιση αξιόπιστης και βιώσιμης προμήθειας υλικών, ειδικά όσων θεωρούνται σπάνια ή γεωπολιτικά ευαίσθητα, προσθέτει ένα επιπλέον επίπεδο πολυπλοκότητας [54][57].



Εικόνα 3.2.1: Αίτια και αποτελέσματα της θερμικής διαφυγής [58].

3.2.1.4 Δημόσια αποδοχή

Ενώ οι εξελίξεις στις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας συνεχίζονται, η επίτευξη ευρείας αποδοχής απαιτεί υπερνίκηση του σκεπτικισμού, αντιμετώπιση αβεβαιοτήτων και ενίσχυση της βαθύτερης κατανόησης των πλεονεκτημάτων και των πρακτικών εφαρμογών αυτών των συστημάτων. Οι βιομηχανίες, ιδιαίτερα εκείνες που παραδοσιακά εξαρτώνται από συμβατικές πηγές ενέργειας, μπορεί να διστάζουν να επενδύσουν και να υιοθετήσουν αποθήκευση ενέργειας λόγω ανησυχιών σχετικά με την οικονομική βιωσιμότητα, την αξιοπιστία και τη συμβατότητα αυτών των τεχνολογιών με την υπάρχουσα υποδομή. Η επίδειξη της πραγματικής αποτελεσματικότητας και των οικονομικών πλεονεκτημάτων της αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και η παροχή σαφών αποδεικτικών στοιχείων για τη συμβολή τους στη σταθερότητα, την ανθεκτικότητα και την αποδοτικότητα του δικτύου, είναι ζωτικής σημασίας για την απόκτηση αποδοχής. Οι συνεργατικές προσπάθειες μεταξύ

ερευνητικών ιδρυμάτων, υπευθύνων πολιτικών κανονισμών και ενδιαφερόμενων μερών του κλάδου είναι απαραίτητες για τη δημιουργία ενός υποστηρικτικού περιβάλλοντος που ενθαρρύνει τον πειραματισμό, την επικύρωση και, ενδεχομένως, την ευρεία υιοθέτηση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στο ενεργειακό δίκτυο [56].

3.2.2 Σχεδιασμός του δικτύου και επεκτάσεις

Η ενσωμάτωση τεχνολογιών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην υπάρχουσα υποδομή δικτύου παρουσιάζει ένα πολύπλευρο σύνολο προκλήσεων, ιδιαίτερα στον σχεδιασμό και την επέκταση των συστημάτων δικτύου.

Μια πρωταρχική πρόκληση είναι η ανάγκη για ουσιαστικές αναβαθμίσεις και επεκτάσεις για την διαχείριση της αυξανόμενης χωρητικότητας που προκαλεί η προσθήκη των ΑΠΕ. Πολλοί ανανεώσιμοι πόροι, όπως οι ηλιακοί και αιολικοί, βρίσκονται συχνά σε απομακρυσμένες περιοχές με μεγάλες ενεργειακές δυνατότητες. Η επέκταση του δικτύου για τη σύνδεση αυτών των περιοχών με αστικά κέντρα απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε νέες γραμμές μεταφοράς και υποδομές, εισάγοντας υλικοτεχνικές προκλήσεις που σχετίζονται με τη διασφάλιση των δικαιωμάτων γης, την απόκτηση αδειών και την πλοήγηση σε ρυθμιστικές διαδικασίες.

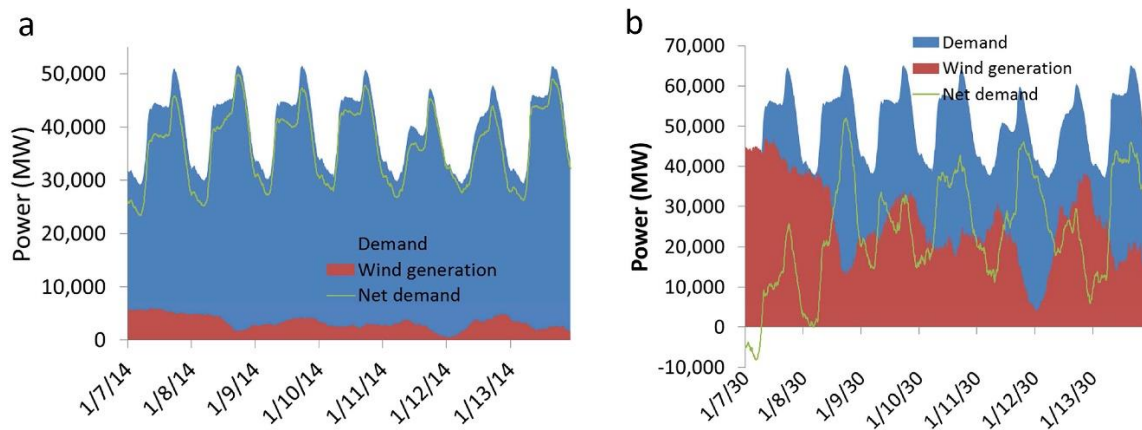
Η γεωγραφική κατανομή των ανανεώσιμων πηγών θέτει προκλήσεις όχι μόνο όσον αφορά τις υποδομές μεταφοράς αλλά και τον συντονισμό της παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Όπως αναφέραμε, τα έργα ΑΠΕ βρίσκονται συχνά σε μεγάλη απόσταση από περιοχές με αυξημένη ενεργειακή ζήτηση. Αυτή η χωρική ανισότητα απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό για να εξισορροπηθεί η εξίσωση παραγωγής-κατανάλωσης και να αποφευχθεί η συμφόρηση του δικτύου. Επιπλέον, τα διαφορετικά ρυθμιστικά πλαίσια σε διάφορες περιοχές μπορεί να περιπλέξουν τη διαδικασία σχεδιασμού, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για συντονισμένες προσπάθειες και τυποποιημένες πολιτικές για την προώθηση των έργων επέκτασης του δικτύου [44][59][60].

3.2.3 Διαχείριση από πλευράς ζήτησης

Η διαχείριση από την πλευρά της ζήτησης (Demand-Side Management, DSM) αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις που προκύπτουν από τις διακυμάνσεις στα πρότυπα κατανάλωσης ενέργειας. Η απρόβλεπτη φύση της ζήτησης ενέργειας, επηρεασμένη από παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες, η καθημερινή ρουτίνα και η ενσωμάτωση των

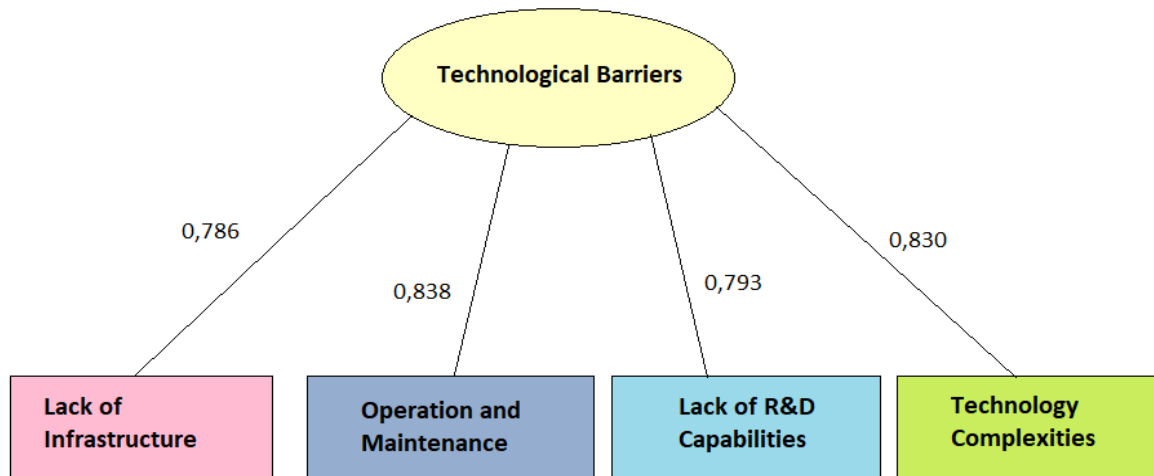
ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δημιουργεί δυσκολίες στην ακριβή πρόβλεψη και διαχείριση της ζήτησης των καταναλωτών.

Η εγγενής μεταβλητότητα της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές εισάγει ένα επίπεδο πολυπλοκότητας, που απαιτεί ευέλικτες στρατηγικές DSM για την αποτελεσματική εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης [Σχήμα 3.2.2].



Σχήμα 3.2.2: Προσομοίωση αιολικής παραγωγής, ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και καθαρής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μείον την αιολική παραγωγή) για τη Μεγάλη Βρετανία το 2030 (πρόβλεψη). Είναι προφανές ότι η μεγάλης κλίμακας ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Μεγάλης Βρετανίας θα επηρεάσει σημαντικά το πρότυπο της καθαρής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας [60].

Επιπλέον, τα εμπόδια συμπεριφοράς, όπως η αντίσταση στην προσαρμογή στα μεταβαλλόμενα προφίλ ζήτησης ή η περιορισμένη συνειδητοποίηση μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας κατά τις περιόδους αιχμής ζήτησης, πρέπει να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά για επιτυχημένες πρωτοβουλίες DSM. Επιπλέον, η ενσωμάτωση έξυπνων τεχνολογιών για τη διαχείριση των διακυμάνσεων της κατανάλωσης απαιτεί προσεκτική εξέταση των ζητημάτων απορρήτου και ασφάλειας των δεδομένων για να διασφαλιστεί η εμπιστοσύνη των καταναλωτών στην υιοθέτηση αυτών των λύσεων [Εικόνα 3.2.2][24][44][60][61].



Εικόνα 3.2.2: Τεχνολογικές προκλήσεις στην ενσωμάτωση των ΑΠΕ [62].

3.3 Κανονιστικές και Πολιτικές προκλήσεις

3.3.1 Ασυνεπή κανονιστικά πλαίσια

Οι ρυθμιστικές πολιτικές παίζουν κεντρικό ρόλο στη διαμόρφωση του τοπίου για την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, επηρεάζοντας τις επενδυτικές αποφάσεις και καθορίζοντας τη συνολική σκοπιμότητα των έργων. Η σημαντική επέκταση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει παρεμποδιστεί από μια σειρά παραγόντων μέχρι σήμερα, όπως η έλλειψη εθνικών πολιτικών, οι διοικητικοί και γραφειοκρατικοί φραγμοί, τα ανεπαρκή κίνητρα, οι μη ρεαλιστικοί κυβερνητικοί στόχοι και η έλλειψη προτύπων και πιστοποιήσεων.

Οι υπάρχουσες υποδομές και τα μονοπώλια της βιομηχανίας μπορούν να θεωρηθούν ως θεσμικοί φραγμοί. Τα περισσότερα έθνη έχουν μικρό αριθμό εταιρειών στον ενεργειακό τομέα, με αποτέλεσμα το σύστημα να γίνεται πιο συγκεντρωτικό και σε πολλές περιπτώσεις μονοπωλιακό, καθιστώντας το λιγότερο ανοιχτό σε διάσπαρτες, μικρότερες τεχνολογίες εφοδιασμού. Πολιτικές και κανονισμοί που σχετίζονται με μονοπωλιακούς ή σχεδόν μονοπωλιακούς παρόχους εξακολουθούν να ισχύουν σε πολλά έθνη. Η κυρίαρχη κεντρική παραγωγή, μεταφορά και διανομή ενέργειας προστατεύεται από αυτές τις πολιτικές, καθιστώντας τη μετάβαση στην ανανεώσιμη ενέργεια εξαιρετικά προκλητική. Είναι σαφές, λοιπόν, ότι προκειμένου να υιοθετηθούν και να προωθηθούν τεχνολογίες ΑΠΕ -ιδιαίτερα

για την ενσωμάτωση της ΑΠΕ στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας- είναι ζωτικής σημασίας η τροποποίηση των υφιστάμενων κανόνων και κανονισμών.

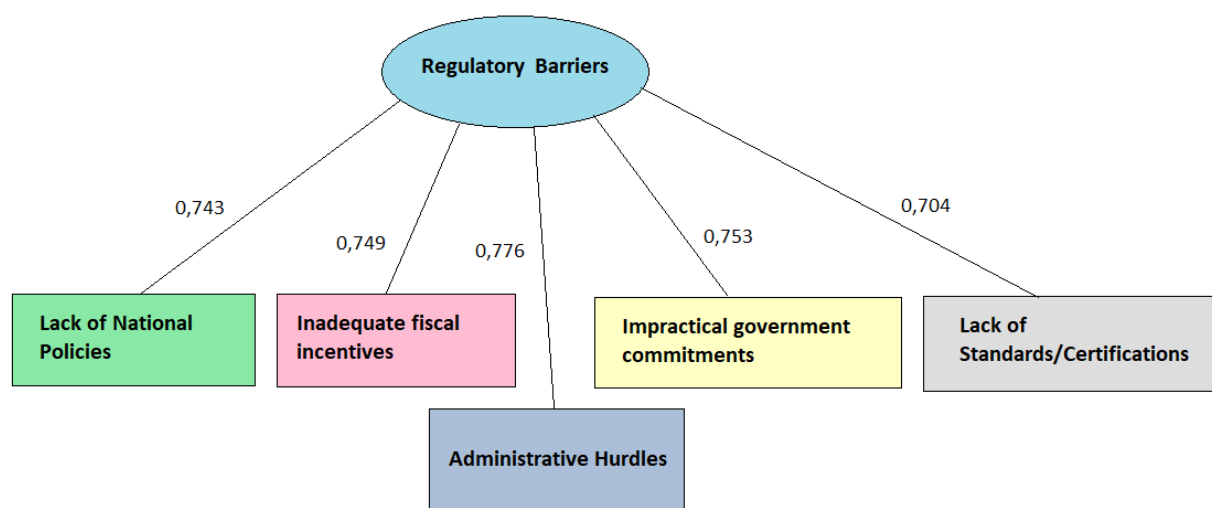
Η προώθηση των ΑΠΕ πλήττεται επίσης από διοικητικές και γραφειοκρατικές πολυπλοκότητες. Η φάση ανάπτυξης ενός έργου διαρκεί περισσότερο από όσο χρειάζεται λόγω των μακρών προθεσμιών για την απόκτηση άδειας και της έλλειψης συνεργασίας μεταξύ των διαφόρων φορέων. Λόγω της άσκησης πίεσης, η εξασφάλιση εξουσιοδότησης συνεπάγεται επίσης υψηλότερες δαπάνες. Η εφαρμογή των επιδοτήσεων προκαλεί σύγχυση σε διάφορα τμήματα λόγω έλλειψης κατάλληλων πολιτικών. Όλα αυτά τα στοιχεία αυξάνουν τον χρόνο που απαιτείται για την έναρξη ενός έργου και μειώνουν τα κίνητρα για επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [62][63][64][65].

3.3.2 Δομές της αγοράς

Η παραδοσιακή δομή της αγοράς ενέργειας, η οποία ευνοούσε ιστορικά την κεντρική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα, ενδέχεται να μην είναι κατάλληλη για τα χαρακτηριστικά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Οι δομές τιμολόγησης που συναντώνται στις τρέχουσες αγορές ενέργειας αποτελούν σημαντικό εμπόδιο. Οι ΑΠΕ μπορεί να υποτιμηθούν ή να αντιμετωπίσουν εμπόδια για να ανταγωνιστούν επί ίσοις όροις με τις συμβατικές πηγές ενέργειας, καθώς η παραδοσιακή αγορά ενέργειας συχνά δεν είναι σε θέση να χειριστεί την απρόβλεπτη παραγωγή ανανεώσιμων πηγών. Τα πλαίσια της αγοράς μπορεί να μην αντικατοπτρίζουν πάντα με ακρίβεια τα πλήρη περιβαλλοντικά και κοινωνικά πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων τεχνολογιών ή να ενθαρρύνουν επαρκώς την υιοθέτησή τους.

Τα τρέχοντα επιχειρηματικά μοντέλα δοκιμάζονται επίσης με την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ειδικά εκείνων που εξαρτώνται από την κεντρική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για τυπικές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και οι διάσπαρτοι ενεργειακοί πόροι, όπως συσκευές αποθήκευσης ενέργειας και ηλιακοί συλλέκτες στέγης, περιπλέκουν τις προβλέψεις, τη διαχείριση δικτύου και τα μοντέλα εσόδων. Είναι απαραίτητο να επαναξιολογηθούν οι δομές της αγοράς προκειμένου να διασφαλιστεί δίκαιος ανταγωνισμός, αποτελεσματικοί μηχανισμοί τιμολόγησης και ίσοι όροι ανταγωνισμού για όλους τους παράγοντες, καθώς το ενεργειακό τοπίο μετατοπίζεται σε ένα πιο αποκεντρωμένο και διαφοροποιημένο [Εικόνα 3.3.1][63][64][65][66].



Εικόνα 3.3.1: Κανονιστικές προκλήσεις στην ενσωμάτωση των ΑΠΕ [62].

3.4 Οικονομικές προκλήσεις

3.4.1 Αρχικό κόστος κεφαλαίου

Οι οικονομικές προκλήσεις που συνδέονται με το αρχικό κόστος κεφαλαίου της ανάπτυξης τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν αποτελέσει σημαντικό εμπόδιο στην ευρεία υιοθέτηση λύσεων καθαρής ενέργειας. Μπορεί να είναι πρόκληση για ιδιώτες, εταιρείες και κυβερνήσεις να ξεκινήσουν έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, επειδή τα ηλιακά πάνελ, οι ανεμογεννήτριες και άλλες υποδομές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να απαιτήσουν μια αρκετά μεγάλη αρχική επένδυση. Για τις αναπτυσσόμενες χώρες ή τις περιοχές με λίγους οικονομικούς πόρους, αυτό το οικονομικό εμπόδιο μπορεί να είναι ιδιαίτερα δύσκολο να ξεπεραστεί.

Εκτός αυτού, το μεγάλο χρονικό διάστημα που απαιτείται για να φτάσει η επένδυση σε περίοδο καθαρής απόσβεσης, ως αποτέλεσμα της μικρότερης απόδοσης των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θέτει τους επενδυτές σε μειονεκτική θέση. Οι αυστηροί κανονισμοί δανεισμού που περιορίζουν την πρόσβαση σε πιστώσεις ακόμη και σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν διαθέσιμα κεφάλαια για συμβατικά ενεργειακά έργα τονίζουν αυτό το ζήτημα ακόμη περισσότερο.

Τα υψηλά κόστη που συνδέονται με τις ΑΠΕ οφείλονται και στη αρκετά πρόσφατη τεχνολογία και τεχνογνωσία που χρειάζονται [54][55]. Το κόστος έρευνας και ανάπτυξης, εκτός από την κατασκευή, την εγκατάσταση και τη συνεχή συντήρηση, προσθέτει στις οικονομικές δυσκολίες. Επιπλέον, επειδή οι ανανεώσιμες τεχνολογίες αναπτύσσονται

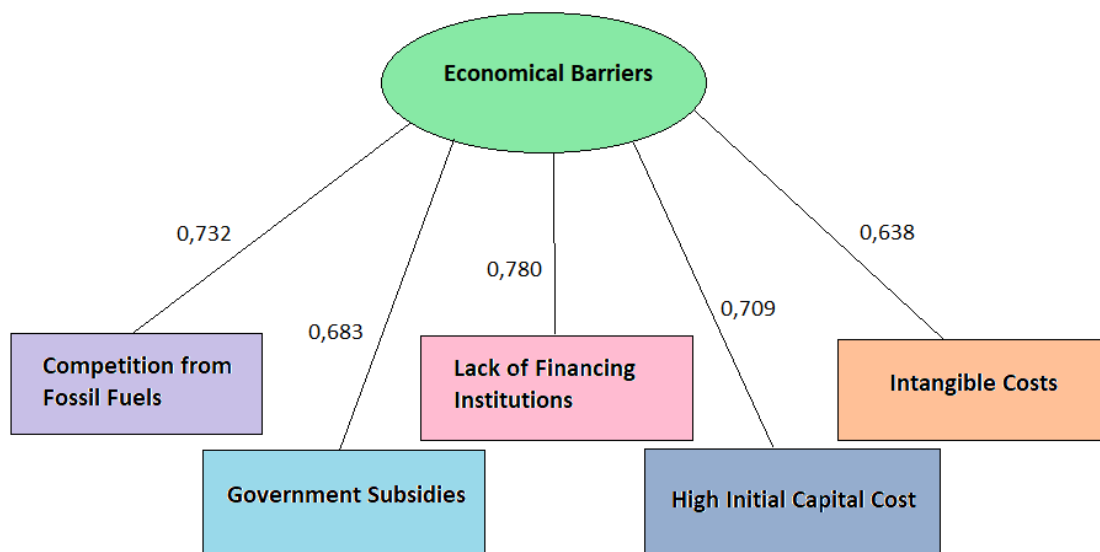
συνεχώς, η καινοτομίες εμφανίζονται με ταχείς ρυθμούς, εγείροντας ερωτήματα σχετικά με τη βιωσιμότητα των τρεχουσών εγκαταστάσεων και την αναγκαιότητα συνεχών βελτιώσεων. Για να εξασφαλιστεί η συνεχής επέκταση και βιωσιμότητα της βιομηχανίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι απαραίτητο να επιτευχθεί μια ισορροπία μεταξύ της ανάγκης για τεχνολογική πρόοδο και της βιωσιμότητας της μαζικής υιοθέτησης. Πρόκειται για ένα περίπλοκο έργο που απαιτεί στρατηγικό σχεδιασμό, υποστήριξη από πλευράς νομοθεσίας και συνεχείς επενδύσεις.

Ένας βασικός παράγοντας για τη μείωση του κόστους των ΑΠΕ είναι η τεχνολογική καινοτομία, όπως βελτιώσεις στα υλικά, στις τεχνικές παραγωγής και στην αύξηση της αποδοτικότητας. Η κρατική υποστήριξη είναι απαραίτητη για να δημιουργηθεί μια ατμόσφαιρα που να ευνοεί τις επενδύσεις. Οι μειώσεις φορολογίας, οι επιδοτήσεις και τα τιμολόγια τροφοδοσίας (feed-in tariffs) είναι παραδείγματα κινήτρων που προσφέρουν οικονομική υποστήριξη και παρακινούν τους ιδιώτες επενδυτές να συμμετάσχουν σε έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [62][64][65].

3.4.2 Κόστη πρόσβασης στο δίκτυο και σύνδεσης

Όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω, οι ΑΠΕ συχνά βρίσκονται μακριά από αστικά κέντρα. Εκτός αυτού, σε πολλές χώρες η γενικότερη ηλεκτροδότηση αποτελεί ακόμα και στις μέρες μας ένα ημιτελές έργο με πολλές προκλήσεις και ζητήματα που την καθυστερούν. Είναι λογικό, επομένως, ότι ένα έργο ανανεώσιμης ενέργειας -εκτός αν φυσικά αφορά κάποια από τις πολύ ανεπτυγμένες χώρες- είναι αλληλένδετο με επιπλέον ενέργειες για πρόσβαση και σύνδεση με το δίκτυο.

Οι επενδυτές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να θεωρήσουν δαπανηρή τη δημιουργία σύνδεσης, καθώς απαιτεί μεγάλη αρχική επένδυση σε υποδομές, όπως γραμμές μεταφοράς και υποσταθμούς. Όταν ένα έργο βρίσκεται μακριά από την τρέχουσα δικτυακή υποδομή, γίνεται αυτόματα ακριβότερο, αφού χρειάζεται να γίνουν περισσότερες καλωδιώσεις και συνδέσεις. Η διασπορά των ανανεώσιμων πηγών γεωγραφικά συχνά οδηγεί σε μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και ακριβά τέλη σύνδεσης, γεγονός που μειώνει την κερδοφορία των έργων και απομακρύνει τους επενδυτές [Εικόνα 3.4.1][67][68][69].



Εικόνα 3.4.1: Οικονομικές προκλήσεις στην ενσωμάτωση των ΑΠΕ [62].

Είναι προφανές ότι πέραν των ήδη αναφερόμενων προκλήσεων υπάρχουν και πολλές ακόμα μικρότερες ή πιο εξειδικευμένες για κάθε τεχνολογία ή ανανεώσιμη πηγή. Ο τομέας των ΑΠΕ είναι αρκετά πολύπλοκος και σύνθετος, με πολλές μεταβλητές να ληφθούν υπόψη, επομένως, οι προκλήσεις που τον χαρακτηρίζουν είναι αδύνατο να μην αντικατοπτρίζουν τη φύση του.

Κεφάλαιο 4 Τεχνολογίες Ανανεώσιμης Ενέργειας

Αυτό το κεφάλαιο παρέχει μια εις βάθος εξερεύνηση των διαφορετικών τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την αξιοποίησή τους στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Κάθε ενότητα εστιάζει σε συγκεκριμένες ανανεώσιμες πηγές και τις σχετικές τεχνολογίες τους.

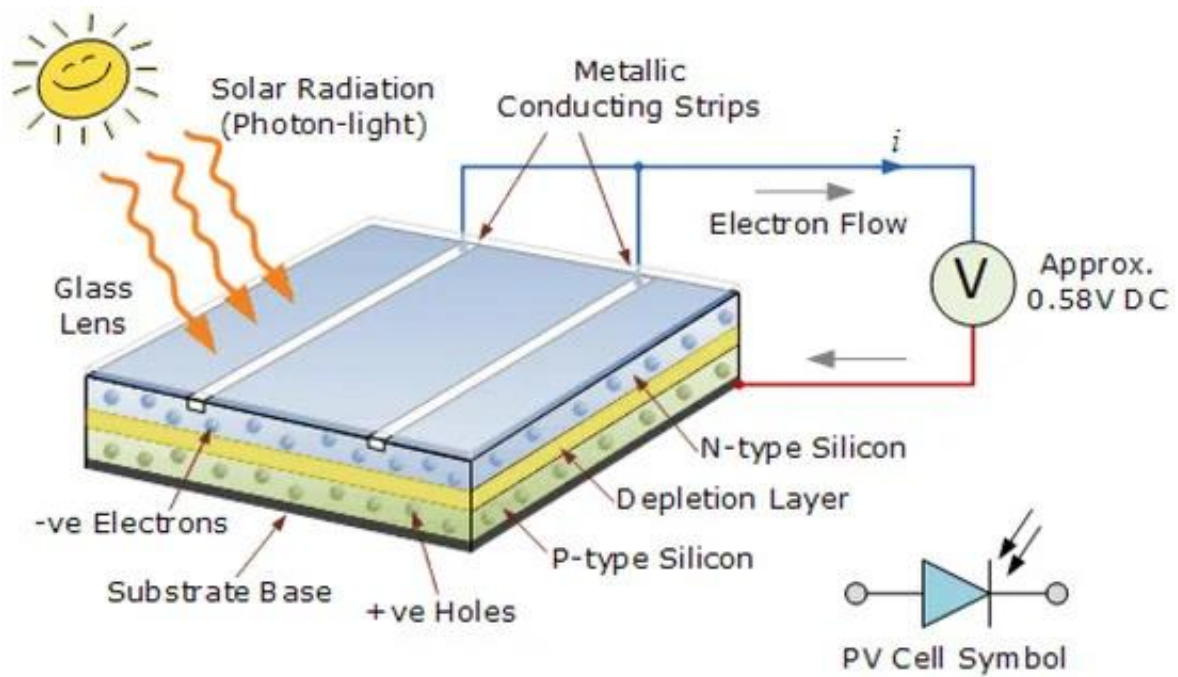
4.1 Ηλιακή Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία

4.1.1 Φωτοβολταϊκά Κυψέλες/Κελιά (Photovoltaic Cells)



Εικόνα 4.1.1: Φωτοβολταϊκά πάνελ σε λιβάδι.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το οποίο εμφανίζεται όταν συγκεκριμένα υλικά ημιαγωγών εκτίθενται στο ηλιακό φως και παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα, είναι ένα φαινόμενο που αξιοποιείται με την τεχνολογία ηλιακών φωτοβολταϊκών (PV). Το φωτοβολταϊκό στοιχείο, το οποίο μετατρέπει το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια, είναι ο εγκέφαλος πίσω από τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα. Σε αυτή τη διαδικασία, τα φωτόνια απορροφώνται από το υλικό ημιαγωγών, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων-οπών και τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος [βλέπε Εικόνα 4.1.2]. Η τεχνολογία ηλιακών φωτοβολταϊκών βασίζεται σε θεμελιώδεις έννοιες που δίνουν προτεραιότητα στην άμεση μετατροπή του ηλιακού φωτός σε βιώσιμη και χρησιμοποιήσιμη πηγή ενέργειας [5][9][70].



Εικόνα 4.1.2: Λειτουργία Φωτοβολταϊκού Κελιού [71].

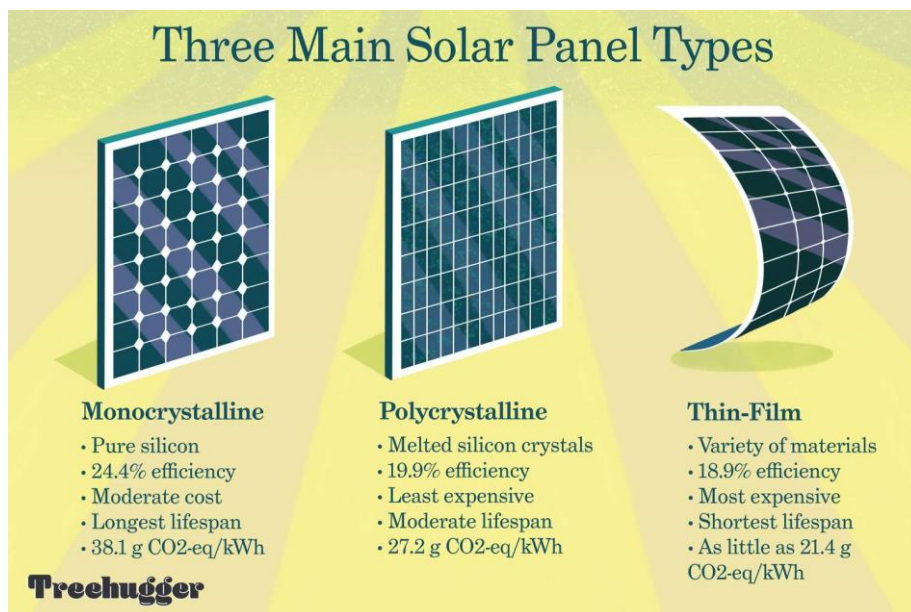
4.1.1.1 Τύποι και υλικά Φωτοβολταϊκών Κυψελών

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες διατίθενται σε διάφορες μορφές για να ανταποκρίνονται σε μια σειρά απαιτήσεων, με τις πιο συνηθισμένες να είναι οι κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) και οι κυψέλες λεπτής μεμβράνης (Thin-Film Cells).

Οι κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) αποτελούν την πιο διαδεδομένη τεχνολογία στα ηλιακά φωτοβολταϊκά. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: πολυκρυσταλλικά και μονοκρυσταλλικά. Τα μονοκρυσταλλικά κελιά, τα οποία είναι κατασκευασμένα από μια ενιαία κρυσταλλική δομή, προσφέρουν ανώτερη απόδοση. Μια πιο προσιτή επιλογή προσφέρουν οι πολυκρυσταλλικές κυψέλες, οι οποίες αποτελούνται από πολλούς κρυσταλλικούς σχηματισμούς. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα ηλιακά φωτοβολταϊκά είναι ζωτικής σημασίας, καθώς από αυτά εξαρτώνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, το κόστος και η αποδοτικότητά τους. Το πυρίτιο υψηλής καθαρότητας είναι απαραίτητο για τα κελιά κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si). Τα μονοκρυσταλλικά, συγκεκριμένα, απαιτούν μια ακόμη πιο καθαρή μορφή πυριτίου, καθώς σε αυτή οφείλεται η υψηλή τους απόδοση [70][72].

Ως εναλλακτική λύση στο κρυσταλλικό πυρίτιο, η Φ/Β τεχνολογία λεπτής μεμβράνης χρησιμοποιεί μια ποικιλία υλικών ημιαγωγών, συμπεριλαμβανομένου του άμορφου πυριτίου (a-Si), του τελλουρίου του καδμίου (CdTe) και του σεληνιούχου γαλλίου του χαλκού (CIGS)[βλ Εικόνα 4.1.3]. Το άμορφο πυρίτιο, ή a-Si, είναι ένα υλικό που μπορεί

εύκολα να αποτεθεί σε διάφορες επιφάνειες, γεγονός που το καθιστά χρήσιμο για διάφορες εφαρμογές. Γνωστά για τον ελαφρύ σχεδιασμό τους, το τελλουρίδιο του καδμίου (CdTe) και το σεληνίδιο του γαλλίου του χαλκού (CIGS) χαρακτηρίζονται από ευελιξία για μία σειρά από εφαρμογές, όπως φορητές ηλεκτρονικές συσκευές και φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε κτίρια (BIPV) [70][73].



Εικόνα 4.1.3:

Τύποι

Φωτοβολταϊκών

Κυψελών [74].

Οι νέες τεχνολογίες στα φωτοβολταϊκά, συμπεριλαμβανομένων των ηλιακών κυψελών περοβσκίτη (Perovskite), προσφέρουν μια καινοτόμα προσέγγιση. Οι ηλιακές αυτές κυψέλες χρησιμοποιούν οργανικά-ανόργανα υβριδικά υλικά με κρυσταλλική δομή περοβσκίτη. Η κατασκευή τους είναι απλή και ο υψηλός συντελεστής απορρόφησής τους επιτρέπει την απορρόφηση ολόκληρου του ορατού ηλιακού φάσματος με εξαιρετικά λεπτά φιλμ (~500 nm). Αυτά τα χαρακτηριστικά τους καθιστούν ιδανικούς υποψηφίους για την κατασκευή φωτοβολταϊκών μονάδων χαμηλού κόστους, υψηλής απόδοσης, λεπτών, ελαφριών και ευέλικτων. Η ηλιακή βιομηχανία δίνει μεγάλη προσοχή στις ραγδαίες βελτιώσεις στην συγκεκριμένη τεχνολογία [70][75].

Η συνεχής βελτίωση και διερεύνηση των υλικών για τα ηλιακά φωτοβολταϊκά είναι απαραίτητη για την επίτευξη αυξημένης απόδοσης, τη μείωση του κόστους κατασκευής και την αντιμετώπιση θεμάτων βιωσιμότητας. Οι επιστήμονες και οι παραγωγοί αναζητούν πάντα υλικά που επιτυγχάνουν μια ισορροπία μεταξύ των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των επιδόσεων. Ένα ευρύ φάσμα υλικών θα είναι πιθανώς κρίσιμο για τον καθορισμό του

τρόπου με τον οποίο θα αναπτύσσεται η ηλιακή ενέργεια στο μέλλον καθώς ο τομέας όλο και εξελίσσεται.

4.1.1.2 Απόδοση Φωτοβολταϊκών Κυψελών

Το ποσοστό της ηλιοφάνειας που μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια υποδεικνύεται από την απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ενώ τα μονοκρυσταλλικά κελιά συχνά βρίσκονται στο υψηλό άκρο του φάσματος απόδοσης, οι παραδοσιακές κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου συνήθως φτάνουν σε απόδοση που κυμαίνεται από 15% έως 22%. Οι κυψέλες λεπτής μεμβράνης συχνά εμφανίζουν χαμηλότερη απόδοση, αλλά προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως ελαφριά και οικονομική κατασκευή. Τα φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου κατέχουν το ρεκόρ για την υψηλότερη απόδοση στο 26.7% [76]. Οι τεχνολογικές εξελίξεις, όπως στην περίπτωση του περοβσκίτη και των διαδοχικών ηλιακών κελιών (Tandem Solar Cells), στοχεύουν στην υπέρβαση των ορίων απόδοσης. Τα διαδοχικά ηλιακά κύτταρα αυξάνουν την απορρόφηση φωτός στοιβάζοντας πολλαπλά στρώματα διαφορετικών υλικών, όπως των κελιών περοβσκίτη, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερα ποσοστά απόδοσης. Το ρεκόρ ηλιακής κυψέλης έξι συνδέσεων επιτυγχάνει απόδοση 47,1% σε 143 ήλιους (τη μεγαλύτερη που έχει καταγραφεί μέχρι σήμερα) [72][73][76].

4.1.2. Ηλιακά Πάρκα

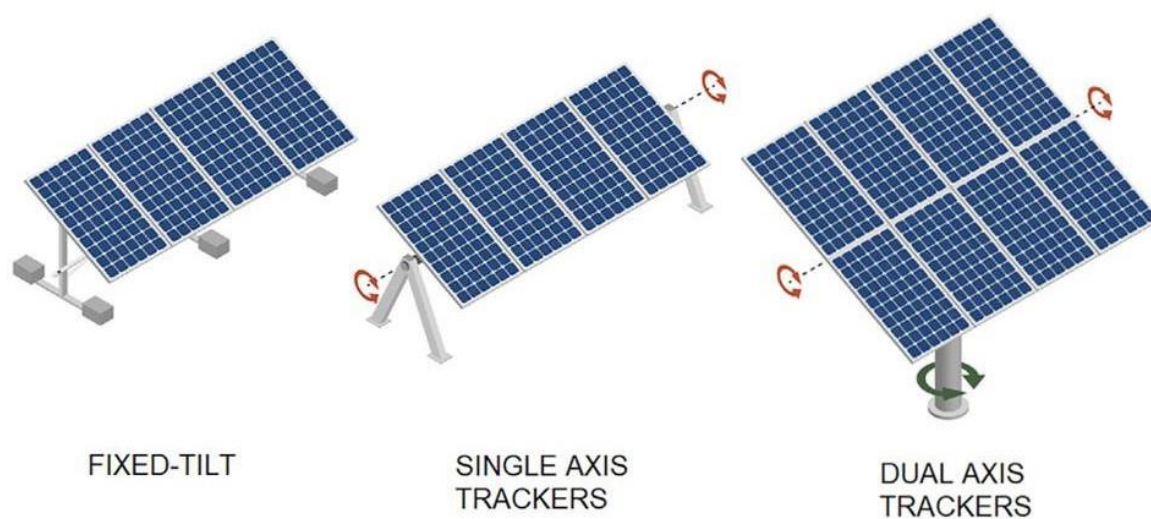


Εικόνα 4.1.4: Το ηλιακό πάρκο Calatagan, 63 μεγαβάτ στο Batangas των Φιλιππίνων [77].

Οι ηλιακές εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας, που μερικές φορές αναφέρονται ως ηλιακά πάρκα, είναι τεράστιες κατασκευές που κατασκευάζονται για να παράγουν μεγάλες

ποσότητες ενέργειας από την ηλιοφάνεια. Αυτές οι εγκαταστάσεις, οι οποίες χρησιμοποιούν φωτοβολταϊκά πάνελ για να μετατρέψουν την ηλιοφάνεια σε ενέργεια, συνήθως καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις [βλ Εικόνα 4.1.5].

Οι στρατηγικές εκτιμήσεις του προσανατολισμού των ηλιακών πάνελ αποτελούν μέρος του σχεδιασμού των μεγάλης κλίμακας ηλιακών πάρκων. Συστήματα σταθερής κλίσης, τα οποία τοποθετούν τα ηλιακά πάνελ σε σταθερή γωνία για να μεγιστοποιήσουν την έκθεση στον ήλιο με βάση το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας, είναι αρκετά διαδεδομένα. Άλλοι χρησιμοποιούν συστήματα ηλιακής παρακολούθησης που μεγιστοποιούν την δέσμευση ενέργειας προσαρμόζοντας δυναμικά τους προσανατολισμούς του πίνακα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Εκτός από την ευθυγράμμιση, σημαντική σημασία έχει η επιλογή της τεχνολογίας ηλιακών πάνελ. Τα διπλά ηλιακά πάνελ, για παράδειγμα, μπορούν θεωρητικά να αυξήσουν τη συνολική παραγωγή ενέργειας συλλαμβάνοντας το ηλιακό φως τόσο από την μπροστινή όσο και από την πίσω πλευρά, συγκριτικά με τα μονοπρόσωπα [βλ Εικόνα 4.1.4].



Εικόνα 4.1.5: Διαφορετικοί σχεδιασμοί πάνελ. Σταθερής κλίσης (αριστερά), μονού άξονα (κέντρο) και διπλού άξονα (δεξιά) [78].

Τα σχέδια μεγάλης κλίμακας πάρκων Φ/Β πρέπει να λαμβάνουν προσεκτικά υπόψη στοιχεία όπως η συνδεσιμότητα με το δίκτυο, η ηλιακή ακτινοβολία και η διαθέσιμη γη. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών ηλιακής παρακολούθησης μπορεί να μεγιστοποιήσει την ποσότητα της ηλιοφάνειας που συλλαμβάνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Όσον αφορά τη λειτουργία, αυτές οι εγκαταστάσεις χρειάζονται τακτική συντήρηση, η οποία

περιλαμβάνει τον καθαρισμό των ηλιακών συλλεκτών και την παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος. Τα ηλιακά πάρκα βελτιώνουν τη συνολική χωρητικότητα και την αξιοπιστία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας προσθέτοντας σημαντικές ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στο δίκτυο [79][80][81].

4.1.3 Κατανεμημένες Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις

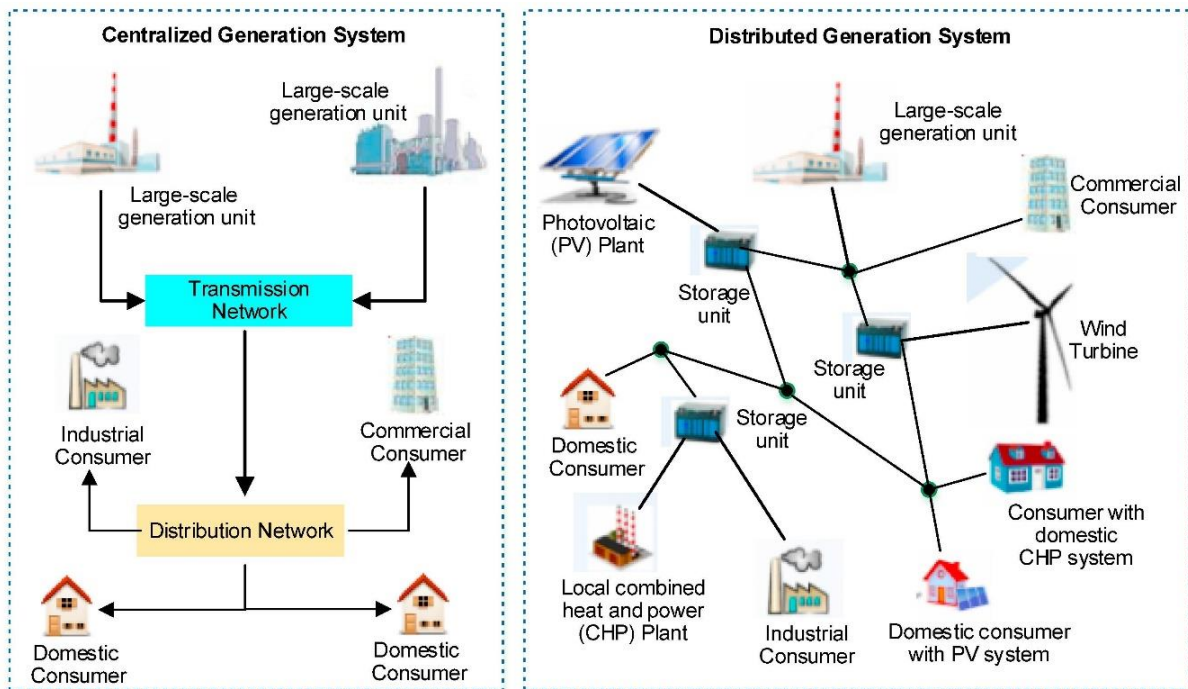


*Εικόνα 4.1.6:
Φωτοβολταϊκό
σύστημα σε στέγη.*

Αντίθετα, οι κατανεμημένες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις αποτελούνται από μικρότερα ηλιακά συστήματα που είναι ευρέως διασκορπισμένα σε στέγες, γειτονιές, επιχειρήσεις και κοινόχρηστους χώρους. Η αποκεντρωμένη/κατανεμημένη παραγωγή ενέργειας διευκολύνεται από αυτές τις εγκαταστάσεις, οι οποίες συχνά συνδέονται με το τοπικό σύστημα διανομής. Ο σχεδιασμός του ΚΠ ηλιακού συστήματος λαμβάνει υπόψη την τοπική κατανάλωση ενέργειας, την κατεύθυνση και τον διαθέσιμο χώρο στέγης. Σε σύγκριση με μεγάλης κλίμακας ηλιακά πάρκα, τα μικρά συστήματα λειτουργούν με λιγότερη συντήρηση, αλλά χρειάζονται παρόλα αυτά σποραδικούς καθαρισμούς και επιθεωρήσεις.

Η βασική πτυχή των ΚΠ φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η ενσωμάτωση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι εγκαταστάσεις συνήθως τροφοδοτούν την περίσσεια ενέργειας πίσω στο δίκτυο ή συνεισφέρουν απευθείας ηλεκτρική ενέργεια στη γειτονιά μέσω συνδέσεων στο τοπικό δίκτυο διανομής. Οι κατανεμημένες εγκαταστάσεις με δυνατότητες αμφίδρομης ροής ισχύος μπορούν να συμβάλουν σε δικτυακά προγράμματα μέτρησης τα οποία αποζημιώνουν τους ιδιοκτήτες συστημάτων για την υπερβολική ενέργεια που παράγεται και παρέχουν αξιοπιστία στο δίκτυο. Ενθαρρύνοντας μια πιο ποικιλόμορφη και προσαρμοστική ενεργειακή υποδομή και μειώνοντας την εξάρτηση από κεντρικές πηγές

ενέργειας, η κατανεμημένη φύση αυτών των εγκαταστάσεων βελτιώνει την ανθεκτικότητα του δικτύου [82][83][84][85].



Εικόνα 4.1.6: Κεντρική και Αποκεντρωμένη/Κατανεμημένη παραγωγή [85].

4.2 Τεχνολογία Ανεμογεννητριών

4.2.1 Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα (Horizontal Axis Wind Turbines - HAWT)

Το πιο δημοφιλές είδος ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας είναι οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα ή HAWT. Έχουν έναν κατακόρυφο άξονα περιστροφής που είναι κάθετος στην κατεύθυνση του ανέμου και έναν οριζόντιο άξονα ρότορα. Τα HAWT μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε χερσαίες όσο και σε υπεράκτιες τοποθετήσεις και εγκαθίστανται συχνά σε μεγάλα αιολικά πάρκα. Μερικά παραδείγματα των μεταβλητών που επηρεάζουν την απόδοση των HAWT είναι η ταχύτητα του ανέμου, το ύψος του στρόβιλου και το μήκος του πτερυγίου. Είναι γνωστά για την εξαιρετική τους απόδοση, ειδικά σε τοποθεσίες με σταθερούς και άφθονους αιολικούς πόρους. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι ελέγχου για την ενσωμάτωση των HAWT στο δίκτυο προκειμένου να ρυθμιστεί η παραγωγή ενέργειας και να διασφαλιστεί η σταθερότητα. Ο έλεγχος βήματος (pitch control) [86] και η αεροδυναμική βελτιστοποίηση είναι δύο παραδείγματα τεχνολογίας αιχμής που συμβάλλουν στην αύξηση της αξιοπιστίας

και της αποτελεσματικότητας των HAWT σε συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο [βλ Εικόνα 4.2.1][23][87][88][89].

4.2.2 Ανεμογεννήτριες Κάθετου Άξονα (Vertical Axis Wind Turbines - VAWT)

Οι άξονες του ρότορα των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα (VAWT) είναι τοποθετημένοι κάθετα, δίνοντάς τους μοναδικό σχεδιασμό. Ένας κεντρικός άξονας που εκτείνεται παράλληλα με την κατεύθυνση του ανέμου περιστρέφει τις λεπίδες. Τα VAWT διατίθενται σε πολυάριθμα σχέδια, συμπεριλαμβανομένων των Darrieus, Savonius και ελικοειδών μορφών. Η προσαρμοστικότητά τους και η καταλληλότητά τους για αποκεντρωμένες εφαρμογές είναι ευρέως γνωστά χαρακτηριστικά τους. Λόγω του μικρού μεγέθους και της ικανότητάς του να συλλέγουν άνεμο από οποιαδήποτε κατεύθυνση, τα VAWT χρησιμοποιούνται συχνά σε αστικά και οικιστικά περιβάλλοντα. Παρόλο που τα VAWT είναι λιγότερο αποδοτικά από τα HAWT, έχουν πλεονεκτήματα όπως ευκολία χρήσης, λιγότερα έξοδα συντήρησης και ικανότητα να λειτουργούν σε ταραχώδεις συνθήκες ανέμου. Τα VAWT μπορούν να ενσωματωθούν στο δίκτυο, παρέχοντας τοπική παραγωγή ενέργειας και υποστηρίζοντας καταναεμημένα ενεργειακά συστήματα.

Τόσο τα HAWT όσο και τα VAWT πρέπει να ενσωματωθούν στο δίκτυο με μεγάλη προσοχή. Για να ενισχυθεί η παραγωγή ενέργειας, τα HAWT πρέπει να έχουν όσο το δυνατόν καλύτερη τοποθέτηση σε περιοχές με αξιόπιστους και ισχυρούς αιολικούς πόρους. Προκειμένου να ελέγχεται η παραγωγή ισχύος του στροβίλου, είναι απαραίτητη η χρήση συστημάτων ελέγχου βήματος και μετατροπείς ισχύος. Επιπλέον, οι εξελίξεις στην προγνωστική συντήρηση και την παρακολούθηση της κατάστασης προσθέτουν στην αξιοπιστία των HAWT σε περιβάλλοντα που συνδέονται με το δίκτυο.

Δύο σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη με τα VAWT είναι η συμβατότητά τους με τα αστικά περιβάλλοντα και η καταλληλότητά τους για αποκεντρωμένες εφαρμογές. Παρόλο που τα VAWT μπορεί να μην είναι τόσο αποτελεσματικά, μπορούν να λειτουργήσουν σε ποικίλα αιολικά περιβάλλοντα, γεγονός που τα καθιστά εξαιρετικά ευέλικτα. Η ενσωμάτωση VAWT στο δίκτυο αφορά τοπική παραγωγή ενέργειας και για αυτήν ενδέχεται να χρειαστούν μετατροπείς ή συστήματα σύνδεσης δικτύου για την τροφοδοσία της ενέργειας στο τοπικό δίκτυο διανομής [βλ Εικόνα 4.2.2][23][87][89][90].



*Εικόνα 4.2.1:
Ανεμογεννήτρια
Οριζόντιου Άξονα
[89].*



*Εικόνα 4.2.2:
Ανεμογεννήτρια
Κάθετου Άξονα [89].*

4.2.3 Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα (Offshore Wind Farms)



Εικόνα 4.2.3: Υπεράκτιο Αιολικό Πάρκο.

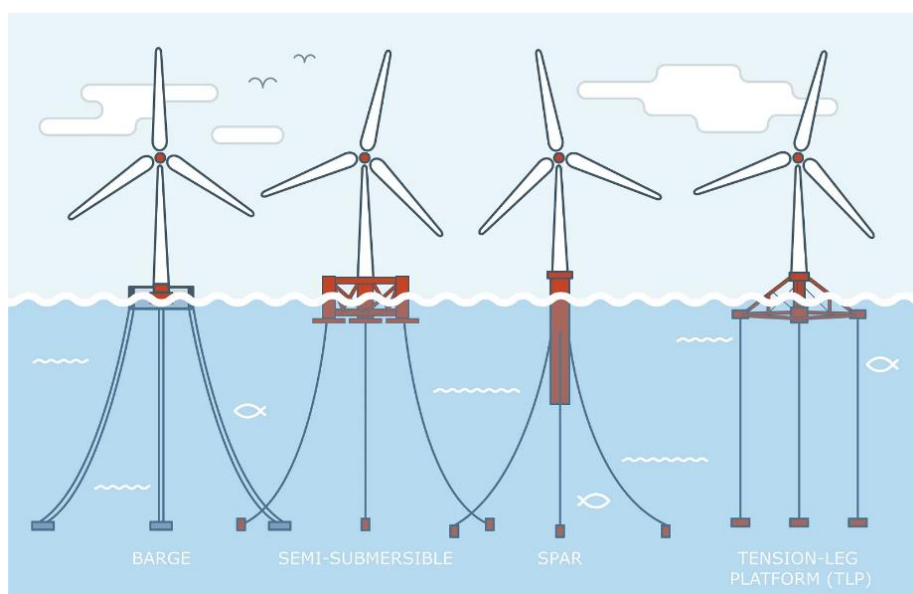
Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα (ΥΑΠ) αντιπροσωπεύουν σημαντική πρόοδο στη συλλογή αιολικής ενέργειας, έχοντας διάφορα πλεονεκτήματα έναντι των αντίστοιχων χερσαίων. Η διαθεσιμότητα ισχυρότερων και πιο αξιόπιστων ανέμων πάνω από την ανοιχτή θάλασσα, που έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη παραγωγή ενέργειας, είναι ένα κύριο πλεονέκτημά τους. Οι βελτιώσεις στα σχέδια θεμελίωσης, στις τεχνικές εγκατάστασης και στην τεχνολογία στροβίλων συνεισφέρουν ώστε όλα τα ΥΑΠ να γίνουν πιο αποδοτικά και ικανά για μεγαλύτερες χωρητικότητες. Μεγαλύτερες και πιο ισχυρές τουρμπίνες με μεγαλύτερα

πτερύγια σε επιτρέπουν τη δέσμευση περισσότερης αιολικής ενέργειας, ενώ οι εξελίξεις στις διαδικασίες σύνδεσης και συντήρησης στο δίκτυο βελτιώνουν περαιτέρω τη συνολική απόδοση των ΥΑΠ [23][24][91].

4.2.3.1 Τεχνολογία πλωτών ανεμογεννητριών (Floating Wind Turbines)

Η σύγχρονη τεχνολογία, με τη μορφή πλωτών ανεμογεννητριών, προορίζεται να εκμεταλλευτεί την αιολική ενέργεια σε βαθύτερους ωκεανούς όπου τα σταθερά θεμέλια δεν είναι εφικτά. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές τουρμπίνες σταθερής βάσης που απαιτούν ρηχά νερά, οι πλωτές ανεμογεννήτριες αγκυρώνονται στον πυθμένα της θάλασσας χρησιμοποιώντας συστήματα πρόσδεσης. Με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας, τα υπεράκτια έργα αιολικής ενέργειας μπορούν πλέον να βρίσκονται σε βαθύτερους ωκεανούς, επεκτείνοντας τις τοποθεσίες εγκατάστασης. Έτσι, οι ισχυρότεροι και πιο σταθεροί άνεμοι που βρίσκονται πιο μακριά από την θάλασσα μπορούν να αξιοποιηθούν από αυτό το είδος ανεμογεννητριών.

Σχέδια ημι-βυθιζόμενων συστημάτων και σημαδούρων αποτελούν πολύ εύχρηστες τεχνολογίες στις πλωτές ανεμογεννήτριες επειδή προσφέρουν σταθερότητα σε ασταθή νερά. Τα συστήματα δυναμικής τοποθέτησης διασφαλίζουν ότι οι τουρμπίνες είναι πάντα στραμμένες προς την κατεύθυνση του ανέμου. Οι τεχνολογικές εξελίξεις στα υλικά έχουν κάνει τις εγκαταστάσεις πλωτών ανεμογεννητριών πιο εφικτές και μακροχρόνιας διάρκειας. Παραδείγματα αυτών των εξελίξεων περιλαμβάνουν τη χρήση ελαφρών και ανθεκτικών στη διάβρωση υλικών για τις κατασκευές [Εικόνα 4.2.4][91][92].



Εικόνα 4.2.4:
Συστήματα
πρόσδεσης
πλωτών
ανεμογεννητριών
[93].

4.2.3.2 Προκλήσεις

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα έχουν δυνατότητες, αλλά αντιμετωπίζουν επίσης μια σειρά από δυσκολίες. Μπορεί να είναι δαπανηρή και υλικοτεχνικά δύσκολη η εγκατάσταση και η συντήρηση εξοπλισμού σε «εχθρικές» θαλάσσιες συνθήκες. Απαιτούνται εξελιγμένες υποδομές για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από υπεράκτιες περιοχές σε χερσαία συστήματα. Απαιτείται ενδεδειγμένος σχεδιασμός και τήρηση των κανονισμών λόγω περιβαλλοντικών και οικολογικών παραγόντων, όπως οι πιθανές επιπτώσεις στα θαλάσσια οικοσυστήματα και τα πρότυπα μετανάστευσης των πτηνών και της θάλασσας. Η αποτελεσματική εφαρμογή των υπεράκτιων αιολικών πάρκων απαιτεί επίσης την αντιμετώπιση ζητημάτων αποδοχής από την κοινότητα και πιθανής παρέμβασης στη θαλάσσια δραστηριότητα, τον θόρυβο και τις οπτικές επιπτώσεις.

4.2.3.3 Δυνατότητα για υψηλότερη απόδοση

Οι ευνοϊκές συνθήκες ανέμου σε βαθύτερες και πιο διαδεδομένες θαλάσσιες τοποθεσίες παρουσιάζουν μια ευκαιρία για αυξημένη απόδοση σε ΥΑΠ, ειδικά εκείνα που χρησιμοποιούν πλωτές ανεμογεννήτριες. Οι άνεμοι είναι συχνά ισχυρότεροι και πιο σταθεροί στα βαθύτερα νερά, γεγονός που αυξάνει την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να συλληφθεί. Αξιοποιώντας πιο αποτελεσματικά τις υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, η χρήση μεγαλύτερων στροβίλων με μακρύτερα πτερύγια αυξάνει περαιτέρω τη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας. Η βελτιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας υποβοηθάται από την τεχνολογική ανάπτυξη αυτού του είδους ανεμογεννητριών, η οποία περιλαμβάνει βελτιώσεις στα υλικά, αεροδυναμικό σχεδιασμό και συστήματα ελέγχου.

Οι πλωτές ανεμογεννήτριες, συγκεκριμένα, διευρύνουν τις δυνατότητες για υπεράκτια αιολική ενέργεια επιτρέποντας την ανάπτυξη σε τοποθεσίες μεγάλου βάθους που προηγουμένως ήταν απρόσιτες. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να απελευθερώσει τεράστιες δυνατότητες για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, επιτρέποντας την ικανότητα μετακίνησης των ανεμογεννητριών σε περιοχές με τις καλύτερες συνθήκες ανέμου, αυξάνοντας τη συνολική απόδοση των εγκαταστάσεων. Χάρη σε όλα τα παραπάνω, η υπεράκτια αιολική ενέργεια βρίσκεται σε θέση να αποτελέσει έναν από τους παράγοντες που ωθούν προς την αποτελεσματική και βιώσιμη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κόσμου, εκμεταλλεύοντας πόρους των βαθύτερων ωκεανών [23][24][91][92][94][95].

4.3 Υδροηλεκτρική Τεχνολογία

4.3.1 Υδροηλεκτρικά συστήματα που βασίζονται σε ροή ποταμού (Run-of-River - RoR)



Εικόνα 4.3.1: Μικρή υδροηλεκτρική RoR μονάδα.

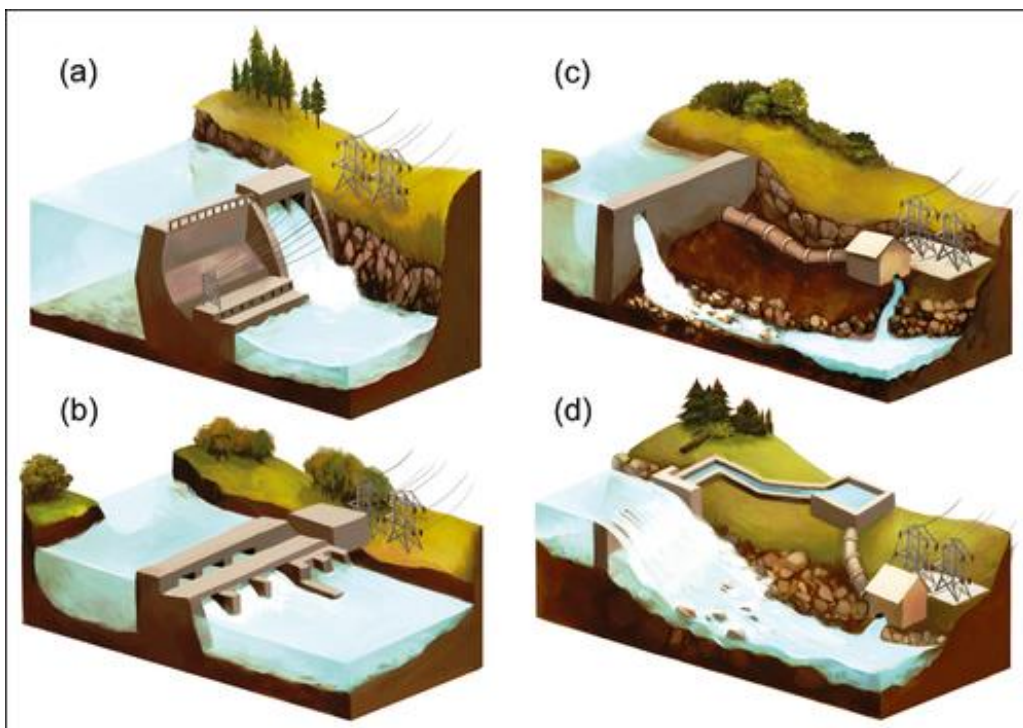
Η κινητική ενέργεια του ρέοντος νερού δεσμεύεται από υδροηλεκτρικούς σταθμούς ροής του ποταμού, οι οποίοι δεν απαιτούν μεγάλη δεξαμενή αποθήκευσης. Χρησιμοποιώντας ένα κανάλι, πραγματοποιείται ανακατεύθυνση ενός μέρους της ροής του ποταμού, και στη συνέχεια με μία τουρμπίνα, μετατρέπεται η κινητική ενέργεια του νερού σε ηλεκτρική ενέργεια. Για να πραγματοποιηθεί έλεγχος της ροής του νερού και να εξασφαλιστεί η εγγύηση ενός σταθερού ρυθμού παραγωγής, ένα χαμηλό φράγμα ή υδατοφράχτης χρησιμοποιείται συνήθως στα συστήματα ροής του ποταμού.

Οι εποχιακές διακυμάνσεις και τα καιρικά μοτίβα μπορούν να έχουν αντίκτυπο στη συνεχή ροή του νερού που απαιτείται για την υδροηλεκτρική ενέργεια από τον ποταμό, με την ανάγκη για ασταμάτητη ροή να αποτελεί έναν από τους παράγοντες που κρίνουν την ενσωμάτωση της ΑΠΕ στο δίκτυο. Κατά την ενσωμάτωση της παραγόμενης ενέργειας, χρησιμοποιούνται εξελιγμένα συστήματα ελέγχου και τεχνολογίες πρόβλεψης που αποβλέπουν στη μεγιστοποίηση της παραγωγής και την εγγύηση της σταθερότητας του δικτύου. Τα υδροηλεκτρικά συστήματα ροής του ποταμού προσφέρουν σταθερή παροχή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας ενώ ταυτόχρονα είναι κατάλληλα και για αποκεντρωμένη παραγωγή.

Οι πρωτοβουλίες RoR είναι συχνά κλιμακωτές και επεκτάσιμες. Ένα μοντέλο διάσπαρτης παραγωγής μπορεί να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας πολλές μικρότερες τουρμπίνες δίπλα

σε ένα ποτάμι. Τροποποιήσεις σαν κι αυτή καθιστούν δυνατή την ικανότητα προσαρμογής στις ποικίλες συνθήκες του ποταμού και κατ' επέκταση μεγιστοποίησης της παραγωγής ενέργειας [βλ Εικόνα 4.3.1].

Η περιβαλλοντική επίδραση των έργων RoR είναι συγκριτικά χαμηλότερη από εκείνη της τυπικής υδροηλεκτρικής παραγωγής που βασίζεται σε φράγματα. Συνεπάγεται ελάχιστες αλλαγές στη φυσική ροή των ποταμών και μικρότερες δομές. Με αυτόν τον τρόπο συμβάλλει στη διατήρηση των υδροβιότοπων και των φυσικών οικοσυστημάτων, γεγονός που καθιστά αυτή την τεχνολογία πολύ φιλική προς το περιβάλλον. Βέβαια, η επιστημονική γνώμη τείνει να είναι διχασμένοι σε αυτό, καθώς μία μειοψηφία υποστηρίζει ότι τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζουν τα ίδια περιβαλλοντικά προβλήματα με τα μεγάλης κλίμακας έργα (φράγματα) [14][18][96][97][98][99].



Εικόνα 4.3.1: Σχηματική απεικόνιση της κύριας ταξινόμησης των τρόπων λειτουργίας της μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικής παραγωγής RoR σύμφωνα με την παρουσία κατασκευών αποθήκευσης και εκτροπής. Μη εκτροπή με αποθήκευση (α) και χωρίς αποθήκευση (β). Εκτροπή με αποθήκευση (γ) και χωρίς αποθήκευση (δ) [100].

4.3.2 Υδροηλεκτρικά συστήματα με βάση το φράγμα (Dam-Based)



*Εικόνα 4.3.3:
Three Gorges
Dam, Κίνα.*

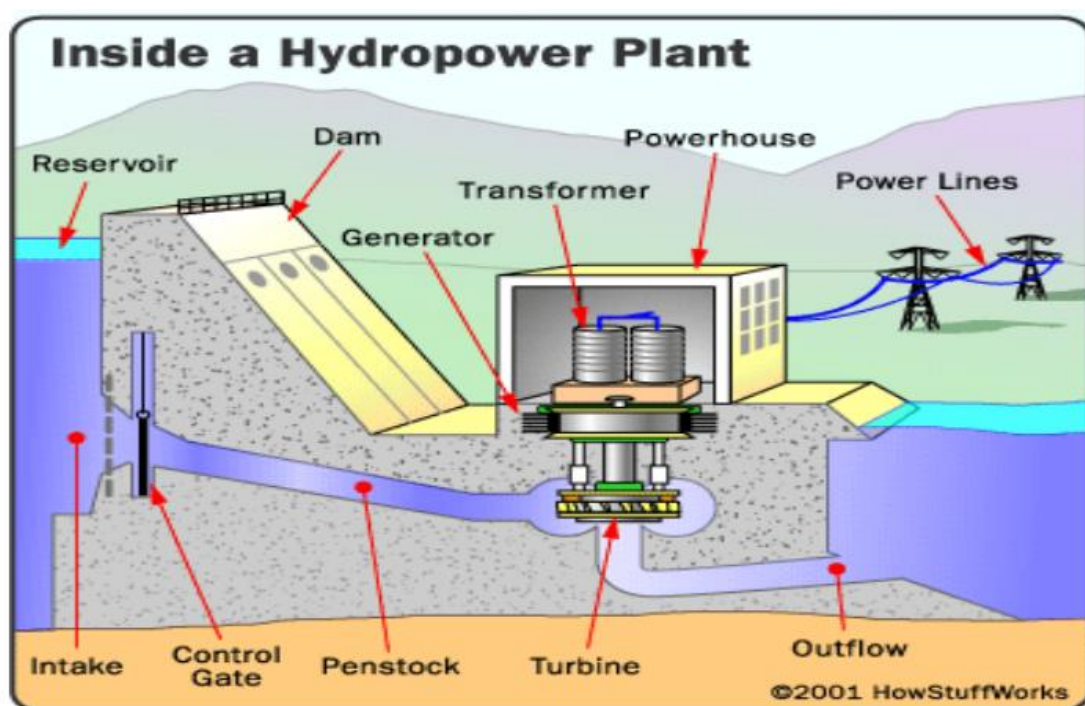
Σε αυτήν την τεχνολογία, το νερό αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή που παράγεται από ένα φράγμα. Τουρμπίνες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας απελευθερώνοντας το αποθηκευμένο νερό όταν χρειάζεται. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται όταν η δυναμική ενέργεια του ανερχόμενου νερού μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια όσο ρέει ανάμεσα στις τουρμπίνες. Η ρύθμιση της ροής του νερού με σκοπό τη διαχείριση της παραγωγής και την προσαρμογή σε αλλαγές στη ζήτηση αποτελεί τη βασική λειτουργική αρχή αυτών των έργων. Η χωρητικότητα του συστήματος και η ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας επηρεάζονται από το μέγεθος και τον σχεδιασμό του φράγματος [βλ Εικόνα 4.3.2].

Η αποθήκευση ενέργειας είναι ένα ειδικό πλεονέκτημα των συστημάτων *dam-based* υδροηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο οφείλεται στην ικανότητα της δεξαμενής να συγκρατεί νερό. Αυτό το νερό μπορεί να απελευθερωθεί επιλεκτικά για να προσαρμοστεί στις διακυμάνσεις της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμεύοντας ως μια ευέλικτη και με γρήγορη απόκριση πηγή ενέργειας. Η σταθερότητα και η αξιοπιστία του δικτύου ενισχύονται από αυτή την ικανότητα αποθήκευσης.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από φράγματα συχνά κατηγοριοποιείται ως πηγή ενέργειας βασικού φορτίου. Αυτό δείχνει ότι οι εγκαταστάσεις της είναι σε θέση να ανταποκριθούν στη σταθερή βασική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, προσφέροντας μια σταθερή και αξιόπιστη παροχή ρεύματος. Η υδροηλεκτρική ενέργεια που βασίζεται σε φράγματα αποτελεί ουσιαστικό μέρος ενός καλά ισορροπημένου ενεργειακού μείγματος,

καθώς η ισχύς βασικού φορτίου είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση σταθερής παροχής ενέργειας.

Η μεγάλη διάρκεια ζωής των υδροηλεκτρικών φραγμάτων —η οποία συχνά ξεπερνά τα 50 χρόνια— είναι ευρέως αναγνωρισμένη. Η ανθεκτικότητά του συμβάλλει στη διασφάλιση της σταθερής και αξιόπιστης παραγωγής ενέργειας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Χάρη σε αυτό το πλεονέκτημα, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί τέτοιου είδους αποτελούν ένα ανθεκτικό και βιώσιμο μέρος της ενεργειακής υποδομής [14][18][19][101][102].



Εικόνα 4.3.2: Η διάταξη ενός τυπικού υδροηλεκτρικού σταθμού [102].

4.4 Τεχνολογία Γεωθερμικής Ενέργειας

4.4.1 Ατμοηλεκτρικοί σταθμοί φλας (Flash Steam Power Plants)

Το πιο διαδεδομένο είδος γεωθερμικών σταθμών παραγωγής ενέργειας είναι οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί φλας. Το ρευστό που παράγεται στην επιφάνεια εξατμίζεται μόνο μερικώς μετά τη μείωση της πίεσης (φλας - flash). Όπως και στις μονάδες ξηρού ατμού, το υγρό μέρος εγχέεται ξανά στην υπόγεια επιφάνεια μαζί με το συμπυκνωμένο ρευστό από τον υγρό ψύκτη, αφού η υγρή φάση και ο ατμός διαχωριστούν και τροφοδοτηθούν στην τουρμπίνα. Συνολικά, επανεγχέεται στο σύστημα η πλειονότητα του γεωθερμικού ρευστού

(60–90%), συγκεκριμένα με τη χρήση γεννητριών. Ανάλογα με τη θερμοδυναμική κατάσταση των ρευστών, θα μπορούσε να είναι οικονομικά αποδοτική η εξαγωγή ενός δεύτερου, και περιστασιακά ακόμη και ενός τρίτου φλας από το διαχωρισμένο υγρό. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μεταβάλλοντας την πίεση, το οποίο θα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή περισσότερου ατμού κατά τη διάρκεια του βρασμού. Τα υγρά που χρησιμοποιούνται σε αυτούς τους σταθμούς έχουν συνήθως θερμοκρασίες υψηλότερες από 180 °C.

Επειδή αυτοί οι σταθμοί χρησιμοποιούν ατμό υψηλής θερμοκρασίας απευθείας για την κίνηση των τουρμπινών, έχουν εξαιρετική θερμική απόδοση. Η πίεση και η θερμοκρασία ενός γεωθερμικού πόρου έχουν αντίκτυπο στην απόδοση ενός σταθμού, ενώ οι δεξαμενές με υψηλότερες θερμοκρασίες συνήθως την οδηγούν σε υψηλότερα ποσοστά.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι σταθμοί ατμού φλας είναι ιδανικοί για ενσωμάτωση στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η παραγωγή τους μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να ανταποκρίνεται στη ζήτηση του δικτύου και προσφέρουν μια αξιόπιστη και σταθερή πηγή ηλεκτρικής ενέργειας [βλ Εικόνα 4.4.1].

4.4.2 Μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δυαδικού κύκλου (Binary Cycle Power Plants)

Όταν η θερμοκρασία του γεωθερμικού πόρου είναι χαμηλότερη από αυτή που απαιτούν τα συστήματα ατμού φλας, το ρευστό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δυαδικού κύκλου. Σε αυτές τις εγκαταστάσεις, ένα ρευστό εργασίας - συνήθως ένα οργανικό ρευστό με χαμηλό σημείο βρασμού και υψηλή τάση ατμών σε χαμηλές θερμοκρασίες (κοινώς γνωστό ως ρευστό Rankine [103])- ανταλλάσσει θερμότητα με το γεωθερμικό ρευστό. Σε έναν εναλλάκτη θερμότητας (heat exchanger), το οργανικό ρευστό εξατμίζεται πριν μεταφερθεί σε μία τουρμπίνα αξονικής ροής, όπου ψύχεται και συμπυκνώνεται πριν από την επανεκκίνηση του κύκλου. Όλο το γεωθερμικό νερό εγχέεται ξανά πίσω στη γη. Αυτή η τεχνολογία έχει προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, καθώς εξασφαλίζει ελάχιστη αλληλεπίδραση μεταξύ των γεωθερμικών ρευστών και του επιφανειακού περιβάλλοντος και ευελιξία στην έξοδο.

Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν δυαδικούς κύκλους είναι αποτελεσματικοί στην αξιοποίηση γεωθερμικών πόρων που βρίσκονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Είναι σε θέση να παράγουν κερδοφόρα ενέργεια από ρευστά τόσο χαμηλά όσο 57–93°C (135–200°F). Η απόδοσή τους επηρεάζεται από τη διαφορά θερμοκρασίας

μεταξύ του γεωθερμικού ρευστού και του δυαδικού ρευστού, αν και δυστυχώς είναι αρκετά χαμηλή, κυμαίνεται μεταξύ 2% και 10%.

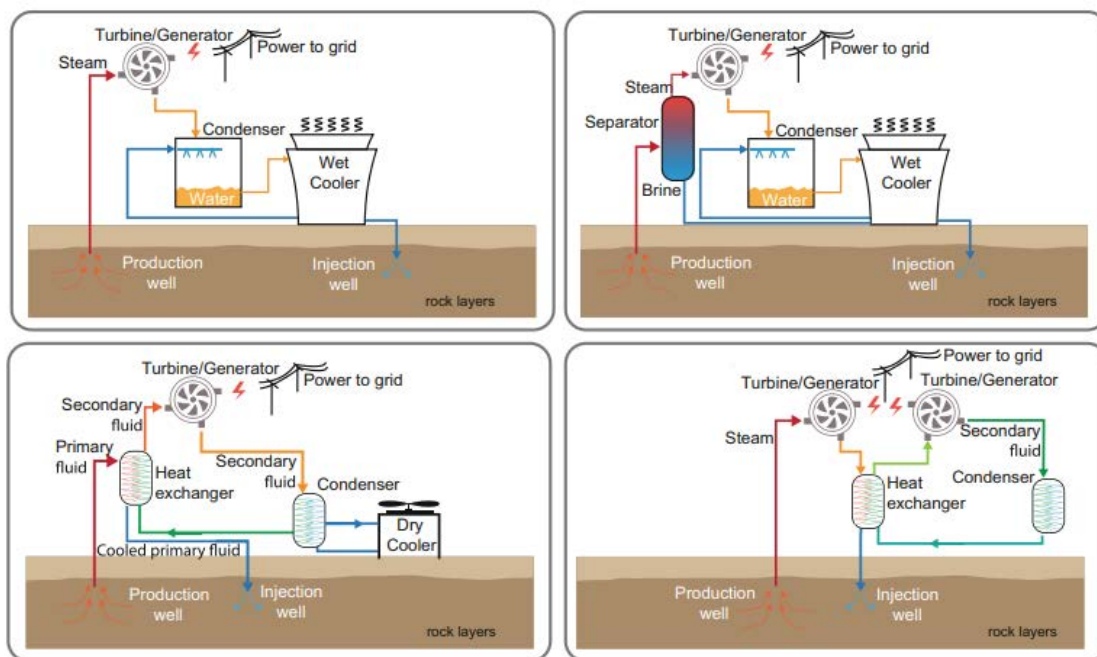
Εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ενέργειας τέτοιου είδους μπορούν να ενσωματωθούν με επιτυχία σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και να παρέχουν ευελιξία. Προσφέρουν ένα χρήσιμο μέσο για την εκμετάλλευση και εφαρμογή γεωθερμικών ρευστών που υπό άλλες συνθήκες θα παρέμεναν ανεκμετάλλευτοι, ενισχύοντας την ποικιλία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο [βλ Εικόνα 4.4.1].

4.4.3 Μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ξηρού ατμού (Dry Steam Power Plants)

Σε μονάδες ξηρού ατμού, ο ατμός διοχετεύεται απευθείας από τα υπόγεια φρεάτια στο εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας, όπου μεταφέρεται σε μια μονάδα στροβίλου/γεννήτριας. Αυτές οι μονάδες χρησιμοποιούνται όταν τα γεωθερμικά ρευστά βρίσκονται σε κατάσταση ατμού όταν φτάνουν στην επιφάνεια. Τα υγρά μπορεί να βρίσκονται σε κατάσταση ολικού ατμού ήδη στη δεξαμενή, κάτι που είναι σπάνιο, ή να προκύπτουν από ένα μείγμα υγρού και ατμού στη δεξαμενή, που λόγω της πτώσης πίεσης που δημιουργείται από το φρεάτιο, εξατμίζονται πλήρως πριν φτάσουν στην επιφάνεια. Τα υγρά που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις εγκαταστάσεις θερμαίνονται σε θερμοκρασίες άνω των 250 °C και οι εγκαταστάσεις ξηρού ατμού έχουν τυπικά χωρητικότητα 45 MW.

Ο ατμός υψηλής θερμοκρασίας που αντλείται απευθείας από τις γεωθερμικές δεξαμενές τροφοδοτεί τουρμπίνες κατηγοριοποιώντας αυτό το είδος γεωθερμικού εργοστασίου σε σταθμό παραγωγής ενέργειας ξηρού ατμού. Οι τουρμπίνες, οι οποίες περιστρέφονται κάνοντας χρήση του ατμού που βγαίνει από τη δεξαμενή, είναι προσαρτημένες σε γεννήτριες που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.

Η λειτουργία σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αυτή την τεχνολογία . Η αποτελεσματικότητα αυτών των συστημάτων επηρεάζεται από την ποιότητα και την καθαρότητα του ατμού. Η απόδοση αυξάνεται με την ποιότητα του ατμού [βλ Εικόνα 4.4.1][35][37][104][105].



Εικόνα 4.4.1: Απλοποιημένο διάγραμμα ροής για γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής ξηρού ατμού (πάνω αριστερά), μονού φλας (πάνω δεξιά), δυαδικού κύκλου (κάτω αριστερά) και συνδυασμένου κύκλου (κάτω δεξιά) [37].

4.5 Τεχνολογίες Μετατροπής Βιομάζας

4.5.1 Καύση και αεριοποίηση

Οι τεχνολογίες μετατροπής βιομάζας παίζουν σημαντικό ρόλο στη χρήση οργανικών υλικών για την παραγωγή ενέργειας. Δύο επιφανείς μέθοδοι είναι η καύση και η αεριοποίηση. Ας εξερευνήσουμε αυτές τις διαδικασίες λεπτομερώς, λαμβάνοντας υπόψη την αποτελεσματικότητά τους, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τη συμβατότητά τους με το δίκτυο.

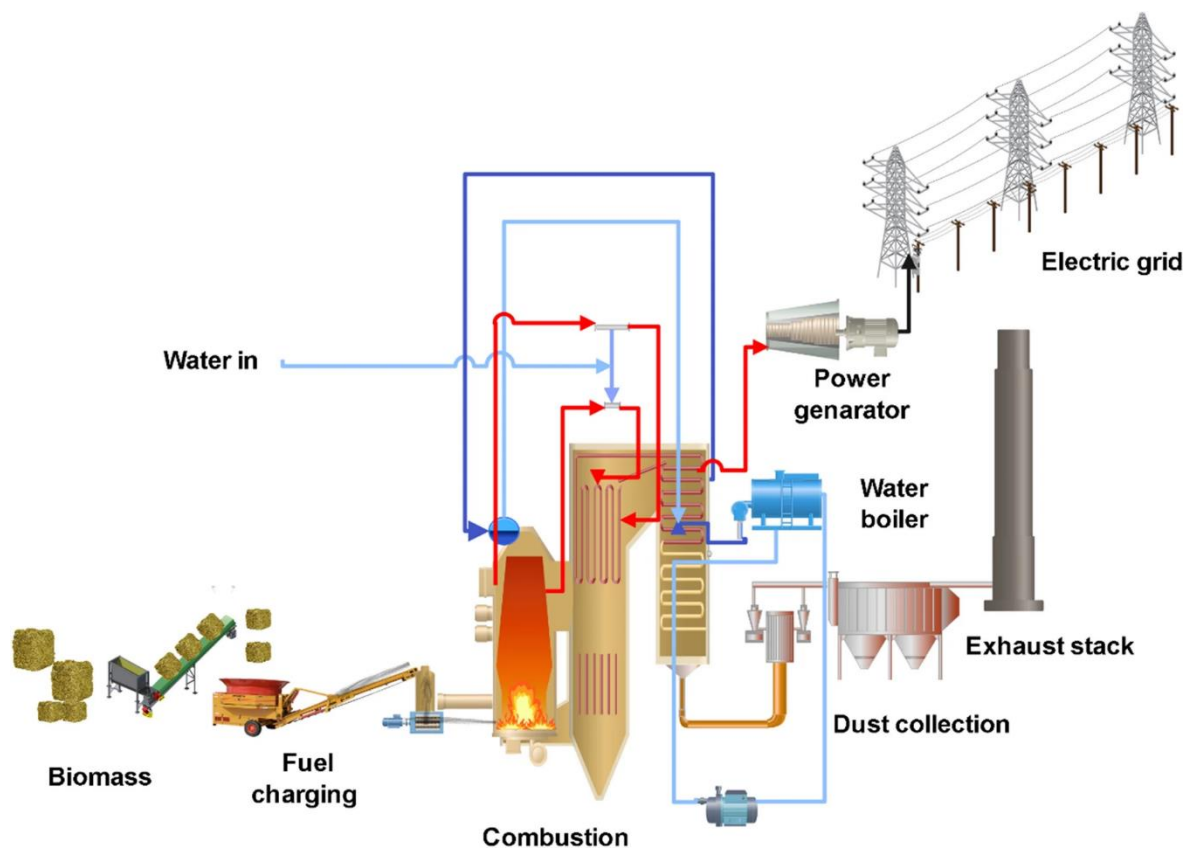
4.5.1.1 Καύση

Η καύση οργανικών πόρων για θερμότητα, όπως ξύλο, υπολείμματα καλλιεργειών ή ειδικές ενεργειακές καλλιέργειες, είναι γνωστή ως καύση βιομάζας. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε λέβητα ή φούρνο και η παραγόμενη θερμότητα μετατρέπεται σε ατμό, ο οποίος τροφοδοτεί τουρμπίνες. Οι τουρμπίνες με τη σειρά τους συνδέονται σε γεννήτριες για να παράγουν ενέργεια [βλ Εικόνα 4.5.1][106].

Η θερμική απόδοση στις διαδικασίες καύσης κυμαίνεται από μέτρια έως υψηλή. Μια σειρά από μεταβλητές, συμπεριλαμβανομένου του είδους της βιομάζας που χρησιμοποιείται και του επιπέδου υγρασίας της, ενδέχεται να επηρεάσουν την απόδοση. Τα συστήματα καύσης με καλό σχεδιασμό μπορούν να φτάσουν σε επίπεδα απόδοσης που είναι εφάμιλλα με άλλες παραδοσιακές τεχνικές παραγωγής ενέργειας.

Αν και η καύση της βιομάζας θεωρείται ότι είναι ουδέτερη ως προς τον άνθρακα, καθώς το διοξείδιο του άνθρακα που εκπέμπεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αποτελεί συστατικό του φυσικού κύκλου του άνθρακα, υπάρχουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των επιπτώσεών της στην τοπική ποιότητα του αέρα, οι εκπομπές από την καύση, όπως τα σωματίδια, τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και το διοξείδιο του θείου (SO_2), πρέπει να ελέγχονται [106][107].

Η καύση βιομάζας είναι πολύ συμβατή με το τρέχον ηλεκτρικό σύστημα. Η ικανότητά της να παράγει σταθερή και ελεγχόμενη ισχύ εξόδου την καθιστά κατάλληλη για εξισορρόπηση δικτύου ή ισχύ βασικού φορτίου. Μπορεί, ωστόσο, να αντιμετωπίσει δυσκολίες σε τομείς με αυστηρούς περιβαλλοντικούς νόμους, ιδιαίτερα όσον αφορά τις εκπομπές [19][26][106].

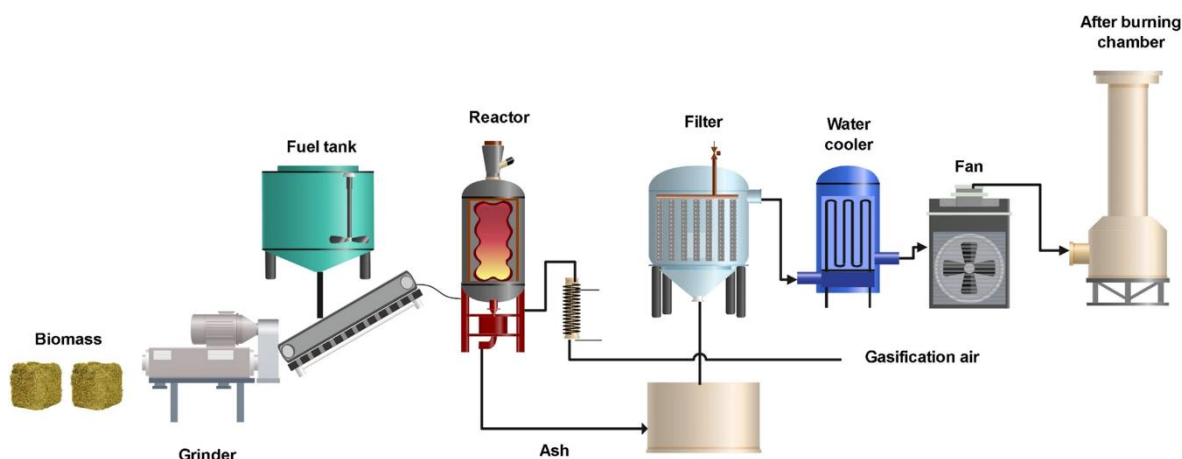


Εικόνα 4.5.1: Διαδικασία άμεσης καύσης [106].

4.5.1.2 Αεριοποίηση

Η αεριοποίηση μετατρέπει τη βιομάζα σε αέριο που ονομάζεται αέριο σύνθεσης (syngas) μέσω ελεγχόμενης οξείδωσης, σε αντίθεση με την καύση, η οποία καίει τη βιομάζα για να παράγει θερμότητα και ενέργεια. Ένας συνδυασμός αερίων, συμπεριλαμβανομένου του υδρογόνου, του μονοξειδίου του άνθρακα και του μεθανίου, παράγεται όταν η βιομάζα θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες (700–1000 °C) παρουσία μικρής ποσότητας ατμού ή οξυγόνου. Στη συνέχεια, το αέριο σύνθεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την παραγωγή χημικών και άλλων αγαθών ή ως καύσιμο για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας [βλ Εικόνα 4.5.2][106].

Με διαδικασίες αεριοποίησης μπορεί να επιτευχθεί υψηλή συνολική απόδοση, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με συστήματα συνδυασμένης θερμότητας και ισχύος (Combining Heat and Power - CHP). Το παραγόμενο αέριο σύνθεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους, όπως για την παραγωγή θερμότητας και ενέργειας, μεγιστοποιώντας επομένως την ενέργεια που προέρχεται από τη βιομάζα.



Εικόνα 4.5.2: Διαδικασία Αεριοποίησης [106].

Σε σύγκριση με τη συμβατική καύση, η αεριοποίηση μπορεί να είναι πιο ωφέλιμη για το περιβάλλον. Μέσω της ρυθμιζόμενης καύσης αερίου σύνθεσης σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα, τα συστήματα αεριοποίησης μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές τους. Η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου επωφελείται επίσης από την ικανότητα της διαδικασίας να απορροφά και να συλλέγει διοξείδιο του άνθρακα.

Οι τεχνολογίες αεριοποίησης είναι συμβατές με τα συστήματα δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Η αεριοποίηση είναι μια βιώσιμη επιλογή για ευέλικτη παραγωγή ενέργειας που μπορεί να αλλάξει για να ανταποκρίνεται στη ζήτηση του δικτύου λόγω της ικανότητάς της

να ελέγχει την παραγωγή του αερίου σύνθεσης. Επιπλέον, η δυνατότητα δέσμευσης και αποθήκευσης του άνθρακα βελτιώνει το περιβαλλοντικό της αντίκτυπο [19][26][106][107]. Τόσο η καύση όσο και η αεριοποίηση μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα ευρύ φάσμα πρώτων υλών βιομάζας, παρέχοντας ευελιξία στην επιλογή πόρων με βάση τη διαθεσιμότητα, τη βιωσιμότητα και τις περιφερειακές συνθήκες.

Η βιωσιμότητα των τεχνολογιών μετατροπής βιομάζας συνδέεται στενά με τις πρακτικές χρήσης γης. Η βιώσιμη προμήθεια πρώτων υλών βιομάζας και ο αποτελεσματικός σχεδιασμός χρήσης γης είναι ζωτικής σημασίας για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

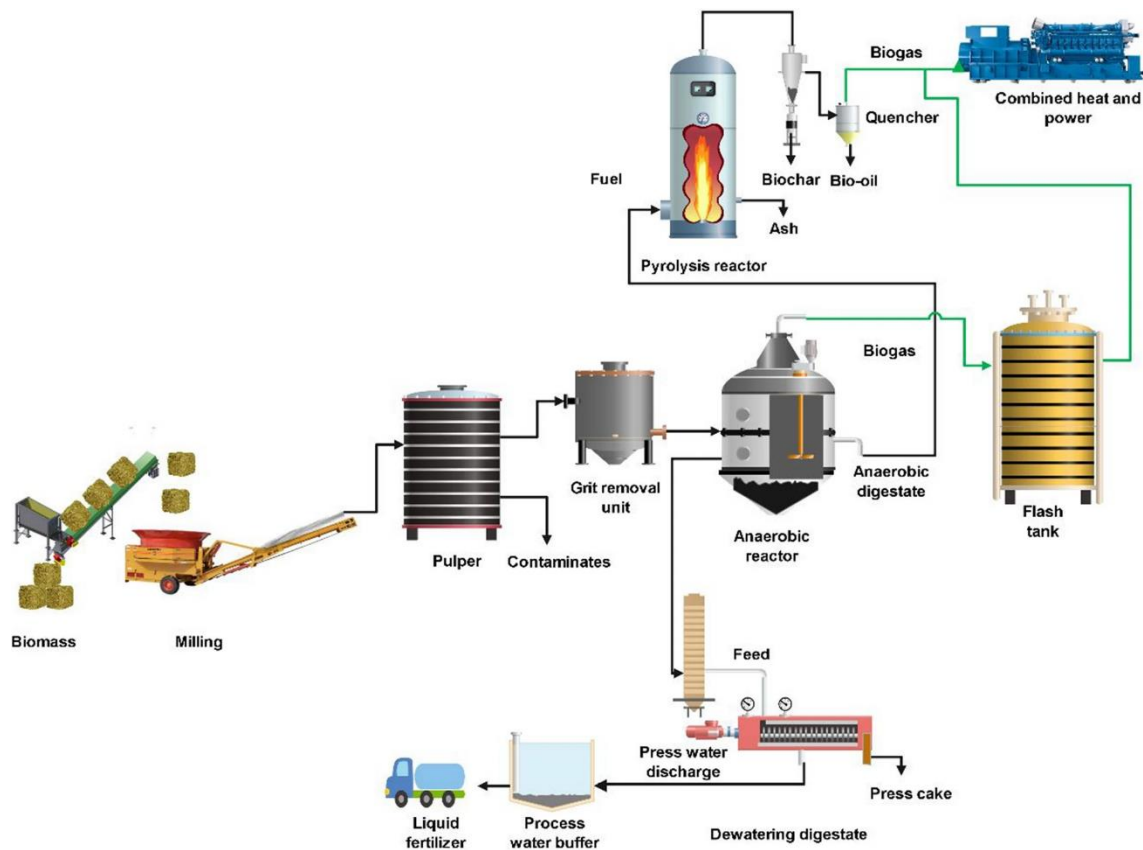
Η συνεχιζόμενη έρευνα και οι τεχνολογικές εξελίξεις τόσο στην καύση όσο και στην αεριοποίηση συνεχίζουν να βελτιώνουν την απόδοση, να μειώνουν τις εκπομπές και να βελτιώνουν τη συνολική απόδοση των συστημάτων μετατροπής βιομάζας.

4.5.2 Παραγωγή Βιοαερίου

Το βιοαέριο παράγεται κυρίως μέσω μίας διαδικασίας που ονομάζεται αναερόβια χώνευση (Anaerobic Digestion). Πρόκειται για μία φυσική τεχνική η οποία περιλαμβάνει τη χρήση μικροβίων χωρίς οξυγόνο για τη μετατροπή της βιομάζας σε βιοαέριο. Η τροφοδοσία οργανικών υλικών σε έναν χωνευτήρα (digester) επιτρέπει στους μικροοργανισμούς να διασπούν τα σκουπίδια και να παράγουν χωνεμένο υλικό και βιοαέριο. Το βιοαέριο, στην ουσία, είναι ένας συνδυασμός μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για οχήματα ή για παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας [βλ Εικόνα 4.5.3].

Η αναερόβια χώνευση έχει γενικά υψηλό ρυθμό μετατροπής του οργανικού υλικού σε χρησιμοποιήσιμη ενέργεια. Τόσο η σύνθεση της πρώτης ύλης όσο και ο σχεδιασμός του συστήματος της αναερόβιας χώνευσης μπορεί να έχουν αντίκτυπο στην απόδοση.

Το βιοαέριο μπορεί να τροφοδοτηθεί σε δίκτυα φυσικού αερίου ή να χρησιμοποιηθεί για κατανεμημένη παραγωγή ενέργειας. Ο συνδυασμός συστημάτων CHP με βιοαέριο επιτρέπει την παραγωγή τόσο θερμότητας όσο και ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα βιοαερίου είναι κατάλληλα για ενσωμάτωση στο δίκτυο λόγω της ευελιξίας τους, η οποία προσφέρει αξιόπιστη και ελεγχόμενη παροχή ανανεώσιμης ενέργειας [108][109].



Εικόνα 4.5.3: Σχεδιασμός εγκατάστασης Αναερόβιας Χώνευσης [106].

4.6 Τεχνολογία ωκεάνιας ενέργειας

Γενικά οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ωκεάνιας ενέργειας συμπίπτουν σε πολλά σημεία με τις τεχνολογίες αιολικής ενέργειας. Ορισμένοι μάλιστα δεν την θεωρούν καν ξεχωριστό είδος ανανεώσιμης ενέργειας αλλά κατηγοριοποιούν τις τεχνολογίες που την αφορούν στις αιολικής και υδροηλεκτρικής αντίστοιχα. Εμείς επιλέγουμε να επιμείνουμε σε αυτήν την κατηγοριοποίηση καθώς ο ωκεανός αποτελεί μία ξεχωριστή και μοναδική πηγή με τα δικά της χαρακτηριστικά και χρήζει ιδιαίτερων και διαφορετικών χειρισμών από τις υπόλοιπες ΑΠΕ.

4.6.1 Τουρμπίνες παλιρροιακών ροών (Tidal Stream Turbine - TST)

Η αρχή της εκμετάλλευσης της ενέργειας των θαλάσσιων ρευμάτων είναι από πολλές απόψεις ανάλογη με την αιολική ενέργεια, με τη διαφορά ότι εδώ, το ρευστό εργασίας είναι νερό αντί για αέρα. Οι τουρμπίνες παλιρροιακών ροών είναι μια μορφή τεχνολογίας θαλάσσιας ενέργειας που έχει σχεδιαστεί για να αξιοποιεί την κινητική ενέργεια που υπάρχει

στα παλιρροιακά ρεύματα και να τη μετατρέπει σε ηλεκτρική. Αυτές οι τουρμπίνες λειτουργούν με παρόμοιες αρχές με τις συμβατικές ανεμογεννήτριες, αλλά είναι ειδικά προσαρμοσμένες για χρήση σε υποβρύχια περιβάλλοντα με ισχυρές και προβλέψιμες παλιρροϊκές ροές [32][110].

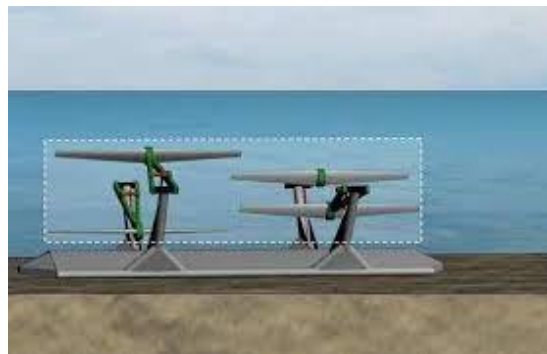
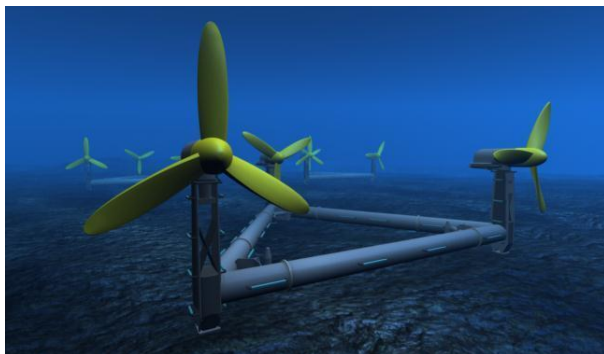
4.6.1.1 Σχεδιασμός και Λειτουργία

Οι γεννήτριες TST αποτελούνται συνήθως από ρότορες με πτερύγια ή στροβίλους /τουρμπίνες βυθισμένους στο παλιρροϊκό ρεύμα. Αυτοί οι στροβίλοι έχουν σχεδιαστεί για να συλλαμβάνουν την κινητική ενέργεια του κινούμενου νερού και να τη μετατρέπουν σε μηχανική ισχύ. Υπάρχουν διάφοροι σχεδιασμοί οι οποίοι δοκιμάζονται και εφαρμόζονται αλλά οι βασικότεροι είναι οι γεννήτριες οριζόντιου και κάθετου άξονα [βλ Εικόνες 4.6.1, 4.6.2 και 4.6.3] (για γενικές πληροφορίες σχετικά με τις τεχνολογίες τους βλέπε ενότητα 2.3.2.1).

Οι TST μπορούν να στερεωθούν στη θέση τους στον βυθό της θάλασσας ή να τοποθετηθούν σε πλωτές πλατφόρμες (βλέπε ενότητα 2.3.2.2.A), ανάλογα με το εκάστοτε σχέδιο. Ο προσανατολισμός των τουρμπινών είναι συχνά ρυθμιζόμενος για τη βελτιστοποίηση της δέσμευσης ενέργειας σε μεταβαλλόμενα παλιρροιακά ρεύματα.

Οι TST κατασκευάζονται από υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση και στις θαλάσσιες περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα υλικά πρέπει να αντέχουν τις διαβρωτικές επιδράσεις του αλμυρού νερού και να διασφαλίζουν την ανθεκτικότητα και τη μακροζωία της συσκευής [111][112].

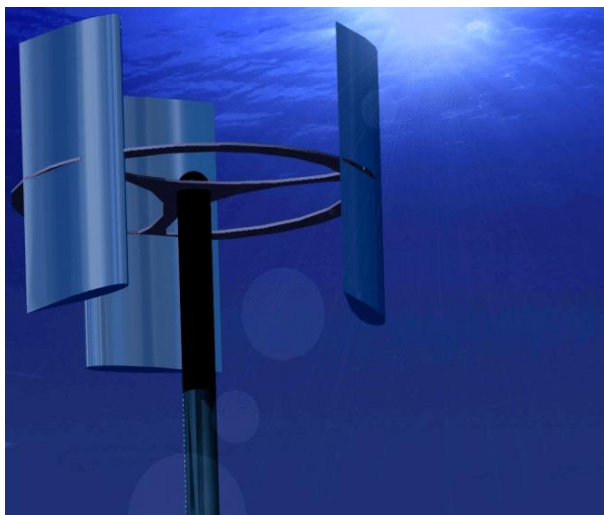
Ταλαντούμενα υδροπτέρυγα (oscillating hydrofoils) χρησιμοποιούνται σε ορισμένα σχέδια στροβίλων παλιρροιακού ρεύματος για τη βελτίωση της απόδοσης δέσμευσης ενέργειας. Ένα υδροπτέρυγο είναι μια ανυψωτική επιφάνεια ή φύλλο που λειτουργεί υποβρύχια και είναι σχεδιασμένο να δημιουργεί ανύψωση ως αποτέλεσμα της κίνησής του μέσα στο νερό. Τα υδροπτέρυγα χρησιμοποιούνται συνήθως σε διάφορες θαλάσσιες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων σκαφών, πλοίων και, σε ορισμένες περιπτώσεις, σε συστήματα παλιρροϊκής ενέργειας [111][113].



Εικόνα 4.6.1: Η Τουρμπίνα Οριζόντιου Άξονα Delta που κατασκευάστηκε από την Tidal Energy Ltd., του HB (πάνω αριστερά) [112].

Εικόνα 4.6.2: Τουρμπίνα Κάθετου Άξονα (κάτω) [110].

Εικόνα 4.6.3: Ταλαντούμενο Υδροπτέρυγο (πάνω δεξιά) [110].



4.6.1.2 Δυνατότητα για Συνεπή Παραγωγή Ενέργειας

Η αξιοποίηση του μοτίβων των παλιρροϊκών κύκλων είναι ένα από τα κύρια οφέλη των γεννητριών παλιρροιακών ρευμάτων. Η παλιρροιακή ενέργεια προέρχεται από την άνοδο και την πτώση της στάθμης της θάλασσας λόγω της βαρυτικής έλξης της Σελήνης. Επειδή τα ρεύματα έχουν συγκεκριμένα μοτίβα που μπορούν να μελετηθούν, προσφέρουν μια αξιόπιστη παροχή ενέργειας που το σύστημα μπορεί να προβλέψει και να χρησιμοποιήσει. Οι TST είναι σε θέση να παράγουν συνεχώς ισχύ τόσο κατά τη διάρκεια της παλίρροιας όσο και κατά τη διάρκεια της άμπωτης (ebb tide). Αυτή η ΑΠΕ προσφέρει ένα πιο συνεπές και αξιόπιστο προφίλ παραγωγής ενέργειας επειδή δεν επηρεάζεται από τις καιρικές διακυμάνσεις όπως ορισμένες άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή ή ο άνεμος.

Λόγω της αξιοπιστίας και της συνέπειάς της, η ενέργεια της παλίρροιας είναι κατάλληλη για ενσωμάτωση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Οι TST μπορούν να παρέχουν είτε ισχύ αιχμής είτε βασικού φορτίου, προσφέροντας σταθερότητα στο ηλεκτρικό σύστημα [32][110][111][112].

4.6.2 Παλιρροιακά φράγματα (Tidal Barrages)

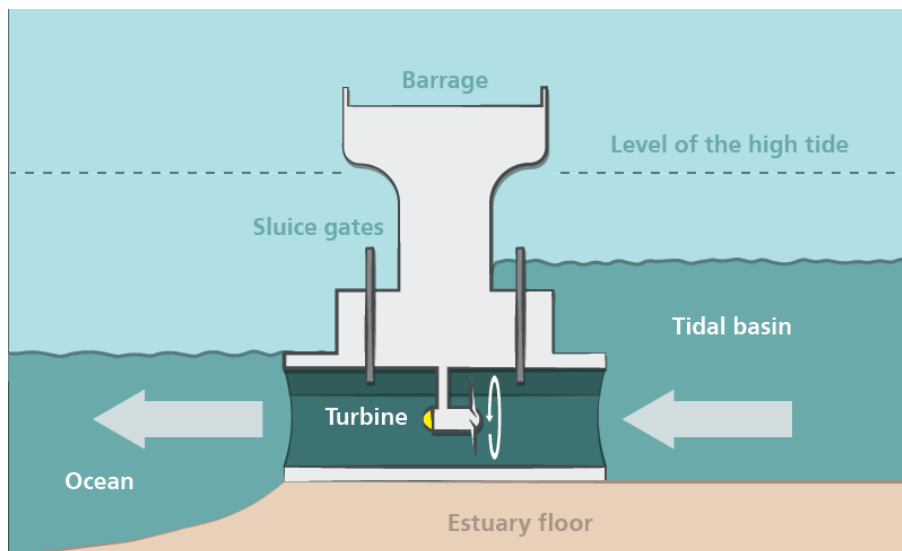
Ένας επιπλέον τύπος τεχνολογίας παλιρροιακής ενέργειας που στοχεύει στο να αξιοποιήσει τη δυναμική ενέργεια των παλιρροϊκών κινήσεων είναι τα παλιρροιακά φράγματα. Τα παλιρροϊκά φράγματα απαιτούν την κατασκευή ενός φράγματος ή ενός φράγματος κατά μήκος μιας εκβολής ή παλιρροϊκής λεκάνης προκειμένου να εκμεταλλευτείτε τη διαφορά δυναμικής ενέργειας μεταξύ υψηλής και χαμηλής παλίρροιας, σε αντίθεση με τους στροβίλους παλιρροιακού ρεύματος, οι οποίοι αξιοποιούν την κινητική ενέργεια των παλιρροϊκών ρευμάτων.

4.6.2.1 Σχεδιασμός και Λειτουργία

Τυπικά, τα παλιρροιακά φράγματα αποτελούνται από κάποιο είδος φράγματος που κατασκευάζεται κατά μήκος μιας εισόδου εκβολών ή παλιρροϊκής λεκάνης. Αυλακωτές πύλες, τουρμπίνες και άλλες κατασκευές ελέγχου αποτελούν μέρος του φράγματος. Οι αυλακωτές πύλες χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της ροής του νερού και τοποθετούνται στρατηγικά κατά μήκος του φράγματος. Οι πύλες είναι κλειστές κατά τη διάρκεια της παλίρροιας, κρατώντας το νερό στις εκβολές. Οι τουρμπίνες στεγάζονται σε χωριστούς θαλάμους ή μέσα στις πύλες του φράγματος. Κατά τη διάρκεια της παλίρροιας, συλλαμβάνουν τη δυναμική ενέργεια που συγκρατείται στο υψηλότερο νερό και κατά τη διάρκεια της άμπωτης, την απελευθερώνουν μέσω της ρυθμιζόμενης ροής της τουρμπίνας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από παλιρροιακά φράγματα είναι παρόμοια με αυτή της υδροηλεκτρικής παραγωγής, αλλά η διαφορά είναι ότι το παλιρροιακό ρεύμα ρέει και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες φραγμάτων, τα φράγματα μονής και διπλής λεκάνης (single-basin, double-basin barrages). Τα πρώτα αποτελούνται από ένα φράγμα που κατασκευάζεται κατά μήκος της εισόδου μιας ενιαίας παλιρροιακής λεκάνης ή εκβολής.

Τα δεύτερα περιλαμβάνουν την κατασκευή φραγμάτων σε δύο γειτονικές λεκάνες ή εκβολές ποταμών. Το νερό παγιδεύεται σε μία λεκάνη κατά τη διάρκεια της παλίρροιας, αλλά απελευθερώνεται στην παρακείμενη, επιτρέποντας μια πιο ελεγχόμενη και σταδιακή ροή μέσω των στροβίλων [111][112].



Εικόνα 4.6.4:
Απεικόνιση ενός
παλιρροιακού
φράγματος [114].

4.6.2.2 Δυνατότητες και Προκλήσεις

Τα φράγματα παλίρροιας παρέχουν σταθερή παραγωγή ενέργειας επειδή τα παλιρροιακά μοτίβα είναι τακτικά και κυκλικά. Επίσης, μπορούν να παρέχουν ισχύ βασικού φορτίου, παρέχοντας σταθερή παροχή ενέργειας. Αυτή την προβλεψιμότητα συμβάλλει στην αξιοπιστία του δικτύου σε περίπτωση ενσωμάτωσης της ΑΠΕ.

Τα παλιρροιακά φράγματα παρουσιάζουν μια σειρά από δυσκολίες, όπως πιθανά προβλήματα καθίζησης, περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε κοντινά οικοσυστήματα και ανησυχίες που αφορούν την πλοήγηση και τη ναυτιλία. Κοινωνικοί και οικονομικοί παράγοντες μπορεί επίσης να παίζουν ρόλο, ειδικά εάν έχουν να κάνουν με την εκτόπιση κοινοτήτων ή μεταβολές της τοπικής αλιείας [111][112][115].

4.6.3 Μετατροπείς Ενέργειας Κυμάτων (Wave Energy Converters - WECs)

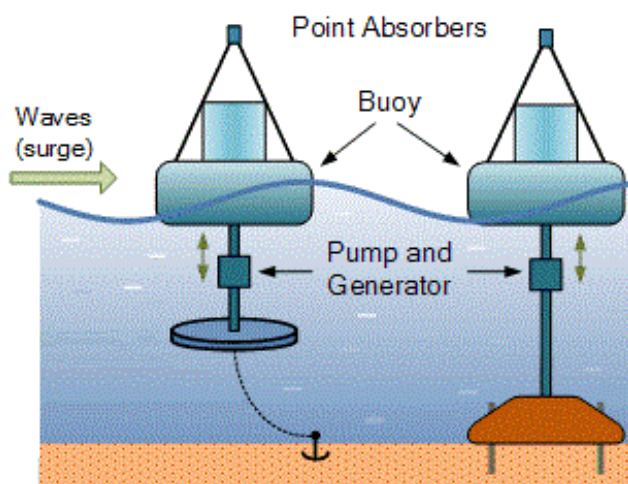
Ο σκοπός των μετατροπέων κυματικής ενέργειας (WEC) είναι να συλλέγουν την κινητική και δυναμική ενέργεια που βρίσκεται στα κύματα του ωκεανού και να τη μετατρέψουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι σημειακοί απορροφητές (point absorbers), οι ταλαντευόμενες στήλες νερού (oscillating water columns) και οι εξασθενητές (attenuators) είναι μερικές από τις συσκευές που έχουν δημιουργηθεί για να συλλαμβάνουν την ενέργεια των κυμάτων. Κάθε τεχνολογία έχει ξεχωριστό σχεδιασμό, λειτουργικά χαρακτηριστικά και σχετικές δυσκολίες [116][117].

4.6.3.1 Σημειακοί Απορροφητές (Point Absorbers)

Οι σημειακοί απορροφητές είναι μια κατηγορία αιωρούμενων ταλαντευόμενων σωμάτων που αποτελούνται από μια πλωτή πλατφόρμα/σημαδούρα που χρησιμοποιεί ένα Power Take-Off (PTO) για να εξάγει την ενέργεια κύματος από τη σχετική κίνηση της σημαδούρας σε σχέση με μια σταθερή αναφορά (απορροφητής ενός σημείου). Εναλλακτικά μπορεί να εξάγει την ενέργεια κύματος από την κίνηση της σημαδούρας σε σχέση με άλλο βυθισμένο ταλαντευόμενο σώμα (απορροφητής σώματος δύο σημείων), ή την ενέργεια βυθισμένου σώματος σε σχέση με τον πυθμένα της θάλασσας.

Λειτουργία

Η πλωτή πλατφόρμα ανταποκρίνεται στην κατακόρυφη κίνηση των κυμάτων μετακινώντας πάνω και κάτω καθώς περνούν. Ως αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας οι στήλες κάμπτονται ή λυγίζουν. Καθώς τα κύματα έρχονται στην πλωτή πλατφόρμα από διάφορες κατευθύνσεις, αυτή μπορεί και να κινηθεί οριζόντια εκτός από κάθετα. Οι στήλες κάμπτονται πάλι ως αποτέλεσμα της ταλαντευόμενης ή απότομης κίνησης. Από την κάμψη ή λύγισμα των στηλών προκύπτει μηχανική κίνηση. Το σύστημα PTO χρησιμοποιεί στη συνέχεια αυτή τη μηχανική κίνηση για να δημιουργήσει μηχανική περιστροφή ή υδραυλική πίεση, η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια [Εικόνα 4.6.5][116][117][118].



Εικόνα 4.6.5: Είδη Σημειακών Απορροφητών [119].

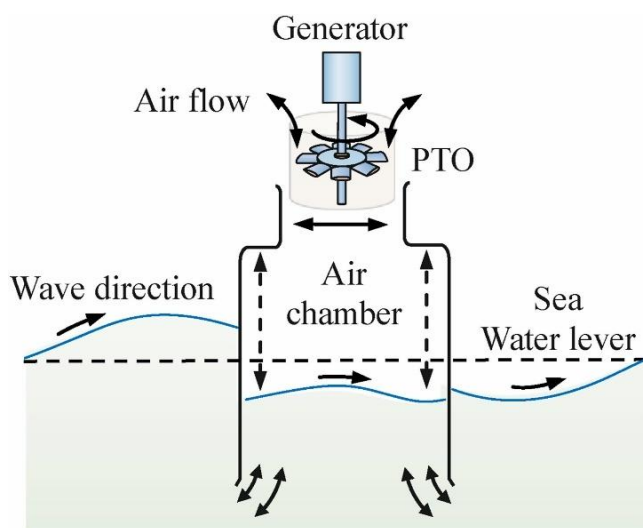
4.6.3.2 Ταλαντευόμενες Στήλες Νερού (Oscillating Water Columns OWC)

Ένα συγκεκριμένο είδος μετατροπέα ενέργειας κυμάτων που ονομάζεται στήλη ταλαντευόμενου νερού (OWC) χρησιμοποιεί την κίνηση ανόδου και πτώσης του νερού μέσα σε έναν θάλαμο για να συλλάβει την ενέργεια των κυμάτων του ωκεανού. Ένας στρόβιλος

συνδεδεμένος σε μια γεννήτρια κινείται από την κίνηση του αέρα που δημιουργείται από την κίνηση ανόδου και πτώσης μέσα στον θάλαμο, η οποία τελικά μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια.

Λειτουργία

Η στάθμη του νερού στον θάλαμο ανεβαίνει καθώς τα κύματα εισέρχονται, πιέζοντας τον αέρα. Η θετική πίεση παράγεται στο εσωτερικό του θαλάμου από αυτή τη συμπίεση αέρα. Ο στρόβιλος περιστρέφεται λόγω της θετικής πίεσης που πιέζει τον αέρα να τον διαπεράσει. Η περιστροφή του στρόβιλου παράγει μηχανική ενέργεια. Ο αέρας διαστέλλεται και δημιουργεί ένα μερικό κενό καθώς τα κύματα υποχωρούν και η στάθμη του νερού στον θάλαμο πέφτει. Μεγαλύτερος αέρας αναρροφάται πίσω μέσω του στρόβιλου από αυτή την αρνητική πίεση. Ο στρόβιλος περιστρέφεται συνεχώς ως αποτέλεσμα του αέρα που κινείται εμπρός και πίσω μέσα από αυτόν, προωθούμενος από τη στήλη του ταλαντευόμενου νερού. Η συνδεδεμένη γεννήτρια στη συνέχεια μετατρέπει αυτήν την περιστροφική κίνηση σε ηλεκτρική ενέργεια [Εικόνα 4.6.6] [32][116][117].



Εικόνα 4.6.6: Βασική αρχή δομής της τεχνολογίας ταλαντευόμενης στήλης νερού [120].

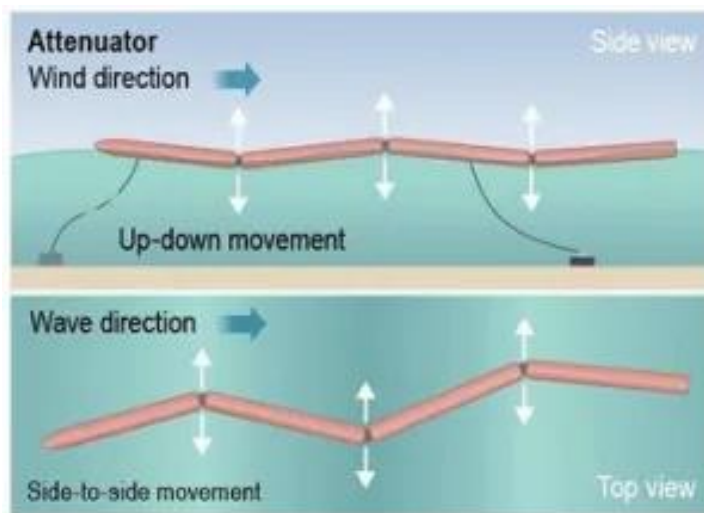
4.6.3.3 Εξασθενητές (Attenuators)

Οι μετατροπείς κυματικής ενέργειας γνωστοί ως εξασθενητές χρησιμοποιούν μακριές, πολλαπλών τμημάτων συσκευές που επιπλέουν στην επιφάνεια του νερού για τη συλλογή ενέργειας από τα κύματα του ωκεανού. Αυτές οι δομές ακολουθούν την πορεία των κυμάτων και η σχετική κίνηση μεταξύ των τμημάτων τους δημιουργεί μηχανική κίνηση, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο σκοπός των εξασθενητών είναι να

απορροφούν ενέργεια σε όλο το μήκος τους ως απόκριση σε διαφορετικές φάσεις κυμάτων [116][117].

Λειτουργία

Τα διάφορα μέρη της δομής κινούνται παράλληλα με τα κύματα καθώς πλησιάζουν στον εξασθενητή. Ως αποτέλεσμα αυτού, τα τμήματα μετακινούνται το ένα ως προς το άλλο. Υπάρχει μηχανική κίνηση κατά μήκος του εξασθενητή λόγω της κάμψης ή λυγίσματος που προκαλείται από τη σχετική κίνηση μεταξύ των τμημάτων. Το σύστημα PTO χρησιμοποιεί τη μηχανική δράση για να δημιουργήσει μηχανική περιστροφή ή υδραυλική πίεση, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι εξασθενητές είναι φτιαγμένοι να αντιδρούν σε κύματα που προέρχονται από διάφορες γωνίες. Είναι σε θέση να συλλέγουν ενέργεια πιο αποτελεσματικά σε διάφορες περιστάσεις κυμάτων χάρη στην πολυκατευθυντική απόκρισή τους [Εικόνα 4.6.7] [116][117][120].



Εικόνα 4.6.7: Απεικόνιση λειτουργίας εξασθενητή [121].

Κεφάλαιο 5 Τεχνολογίες και στρατηγικές ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό δίκτυο

Η αποτελεσματική ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο δίκτυο απαιτεί την ανάπτυξη συγκεκριμένων τεχνολογιών και την εφαρμογή στρατηγικών προσεγγίσεων. Αυτή η ενότητα εμβαθύνει στις βασικές τεχνολογίες και στρατηγικές που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της ομαλής ενσωμάτωσης της ανανεώσιμης ενέργειας στα υπάρχοντα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.

5.1 Μετατροπείς που συνδέονται με το δίκτυο (grid-tied inverters)

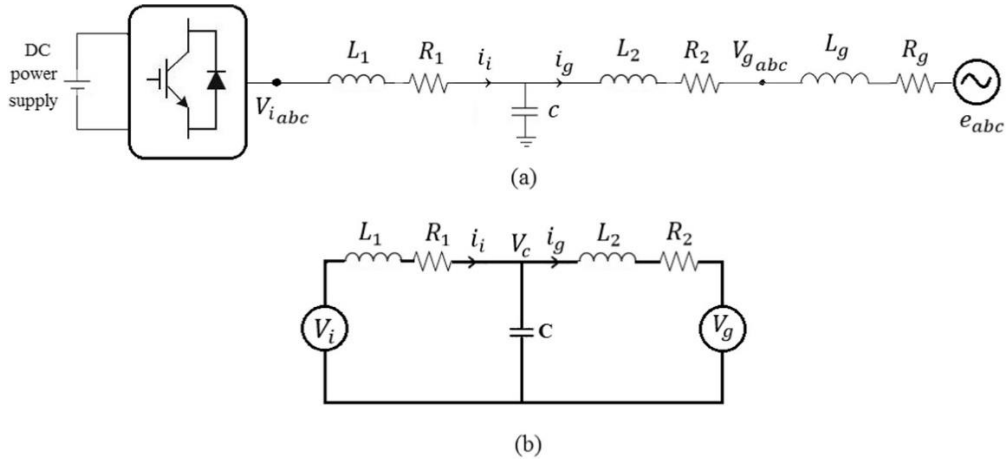
5.1.1 Επισκόπηση

Όταν πρόκειται για την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως τα ηλιακά φωτοβολταϊκά και τα συστήματα αιολικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο, οι μετατροπείς που συνδέονται με το δίκτυο είναι απαραίτητοι. Μετατρέποντας το συνεχές ρεύμα (DC) που παράγεται από ηλιακούς συλλέκτες ή ανεμογεννήτριες σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) που είναι συμβατό με το δίκτυο, αυτοί οι μετατροπείς λειτουργούν ως μεσολαβητές μεταξύ της όποιας ανανεώσιμης πηγής ενέργειας και του δικτύου [βλ Σχήμα 5.1.1].

Η κύρια δουλειά των μετατροπέων είναι να διατηρούν το συγχρονισμό μεταξύ της εξόδου του συστήματος ΑΠΕ και της τάσης και της συχνότητας του δικτύου. Επειδή οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι συχνά ασταθείς και κυμαινόμενες, οι μετατροπείς που συνδέονται με το δίκτυο χρειάζονται εξελιγμένους αλγόριθμους ελέγχου για την ομαλή ρύθμιση της ροής ισχύος. Ανάλογα με τοπικούς κανονισμούς εξατομικευμένους για κάποιες περιοχές, η πλεονάζουσα παραγόμενη από το σύστημα ισχύς, απελευθερώνεται πίσω στο δίκτυο για να επιτρέψει την καθαρή μέτρηση ή άλλες μεθόδους αντιστάθμισης όταν παράγει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από αυτή που χρησιμοποιείται τοπικά. Από την άλλη πλευρά, το δίκτυο παρέχει την απαραίτητη ισχύ για την κάλυψη της ζήτησης σε καταστάσεις όπου η παραγωγή του συστήματος είναι ανεπαρκής.

Ακολουθώντας τους κανονισμούς του δικτύου και τροποποιώντας τη φάση και τη συχνότητα της ισχύος που δίνουν στο δίκτυο, οι μετατροπείς ενισχύουν τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του δικτύου. Επιπλέον, βοηθούν στη μετάβαση σε ένα πιο αποκεντρωμένο και βιώσιμο ενεργειακό περιβάλλον διευκολύνοντας την ενσωμάτωση των διάσπαρτων ενεργειακών πόρων στην τρέχουσα δικτυακή αρχιτεκτονική. Ακόμη, επιτρέπουν την αποδοτική και οικονομική λειτουργία των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας,

παρέχοντας στους χρήστες την ευκαιρία να επωφεληθούν από την παραγωγή καθαρής ενέργειας ενώ ταυτόχρονα ενισχύουν τη συνολική ανθεκτικότητα και βιωσιμότητα του δικτύου [122][123][124].



Σχήμα 5.1.1: Το σχηματικό διάγραμμα μετατροπέα συνδεδεμένου στο δίκτυο σε φωτοβολταϊκό σύστημα α) γενική τοπολογία β) μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα [125].

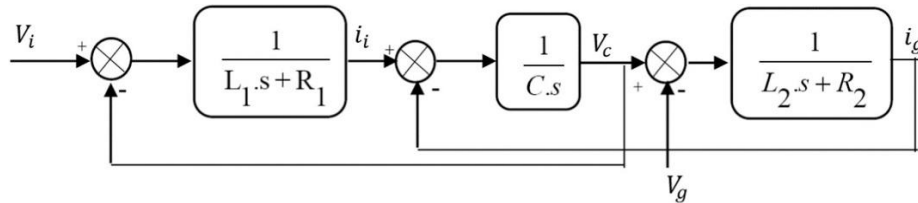
5.1.2 Εξελίξεις και Βελτιώσεις

5.1.2.1 Φίλτρα LCL (LCL filters)

Τα φίλτρα LCL παίζουν καθοριστικό ρόλο στη μείωση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, των αιχμών τάσης και της αρμονικής παραμόρφωσης που παράγονται από τους μετατροπείς. Προσθέτοντας αντίσταση στο σύστημα, αυτά τα φίλτρα βοηθούν στην εξομάλυνση των διακυμάνσεων τάσης και ρεύματος, δημιουργώντας μια πιο ομαλή κυματομορφή AC. Σε σύγκριση με απλούστερα σχέδια φίλτρων, η δομή LCL προσφέρει υψηλότερη αρμονική εξασθένηση, η οποία βελτιώνει την ποιότητα ισχύος [βλ Σχήμα 5.1.2]. Η βελτιωμένη σταθερότητα του δικτύου, ο λιγότερος ηλεκτρικός θόρυβος και η συμμόρφωση με αυστηρούς κανόνες και κανονισμούς δικτύου είναι μερικά μόνο πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης των φίλτρων LCL. Επιπλέον, εγγυώνται ότι η εγχεόμενη ηλεκτρική ενέργεια πληροί κριτήρια ποιότητας, τα οποία είναι απαραίτητα για τη διευκόλυνση της ομαλής ενσωμάτωσης συστημάτων ΑΠΕ στο δίκτυο. Προσθέτουν επίσης στη συνολική διάρκεια ζωής και αξιοπιστία του συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και στον ίδιο τον μετατροπέα.

Αν και τα φίλτρα LCL προσφέρουν αποτελεσματικό αρμονικό φιλτράρισμα, παράγοντες σχεδιασμού όπως η συχνότητα συντονισμού και ο λόγος απόσβεσης πρέπει να μελετηθούν

λεπτομερώς ώστε να αποφευχθούν προβλήματα αστάθειας. Για την ελαχιστοποίηση πιθανών προβλημάτων και τη μεγιστοποίηση της απόδοσης των φίλτρων LCL, χρησιμοποιούνται συχνά προηγμένοι αλγόριθμοι ελέγχου [123][125][126].



Σχήμα 5.1.2: Το διάγραμμα ενός φίλτρου LCL [125].

5.1.2.2 Ευφυείς αλγόριθμοι και τεχνικές βελτιστοποίησης

Κάθε σύστημα χρειάζεται πλέον βελτιστοποίηση στο σχεδιασμό του λόγω της γρήγορης αύξησης της πολυπλοκότητας. Όπως έχουμε προαναφέρει, πολλές ΑΠΕ προκαλούν αστάθεια στο σύστημα. Για να επιτευχθεί πιο ομαλή και καλύτερη απόδοση, πρέπει να εφαρμοστούν τεχνικές βελτιστοποίησης έτσι ώστε το φορτίο να τροφοδοτείται χωρίς διακυμάνσεις. Η κατανόηση της υπολογιστικής νοημοσύνης, η οποία χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με προσεγγίσεις βελτιστοποίησης, είναι απαραίτητη για την κατανόηση σύγχρονων ευφυών αλγορίθμων και στρατηγικών βελτιστοποίησης [127]. Παρακάτω, αναφέρουμε τις βασικότερες τεχνικές.

Artificial Neural Network – ANN

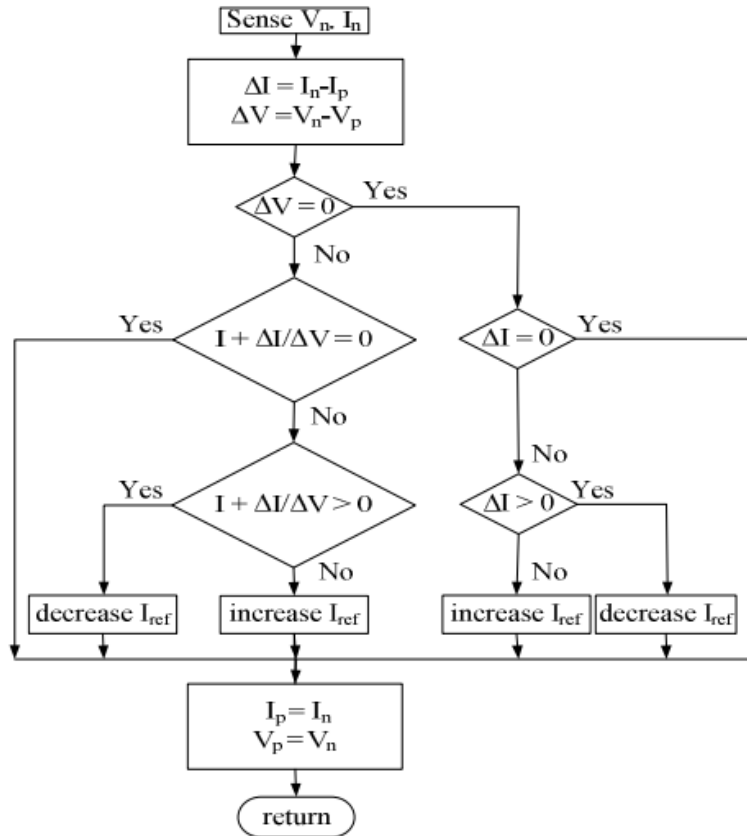
Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN) είναι υπολογιστικά μοντέλα εμπνευσμένα από τη δομή και τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου. Ο Frank Rosenblatt εισήγαγε στη βιβλιογραφία αυτή την ιδέα το 1958. Τα ANN επιτρέπουν στους μετατροπείς που συνδέονται με το δίκτυο να προσαρμόζονται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες και στις ποικίλες εισροές ενέργειας, συμβάλλοντας στην καλύτερη ενοποίηση του δικτύου, στην αυξημένη απόδοση ενέργειας και στη βελτιωμένη συνολική σταθερότητα των συστημάτων ΑΠΕ που συνδέονται στο δίκτυο. Η εφαρμογή των ANN σε συνδεδεμένους με το δίκτυο μετατροπείς αντιπροσωπεύει μια σύγχρονη προσέγγιση για την αντιμετώπιση των πολυπλοκοτήτων που σχετίζονται με την παραγωγή και τη μεγιστοποίηση των δυνατοτήτων των καθαρών πηγών ενέργειας με έξυπνο και προσαρμοστικό τρόπο [128][129][130].

Fuzzy Logic – FL

Μια άλλη υπολογιστική τεχνική αιχμής που χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο οι μετατροπείς που συνδέονται με το δίκτυο είναι η ασαφής λογική (FL). Οι εφαρμογές της ασαφούς λογικής περιλαμβάνουν συγχρονισμό δικτύου, έλεγχο τάσης και πρόβλεψη φορτίου. Η FL δίνει στους μετατροπείς τη δυνατότητα να παίρνουν περίπλοκες αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο, βελτιστοποιώντας την απόδοση και προσαρμόζοντας τις μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου. Αυτό το καταφέρνουν ενσωματώνοντας μεταβλητές γλώσσας και κανόνες που προέρχονται από ανθρώπινη σκέψη. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει έναν βαθμό ευελιξίας και προσαρμοστικότητας που ενισχύει τη συνολική αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία του μετατροπέα σε διάφορα δυναμικά περιβάλλοντα λειτουργίας [131][132][133].

Maximum Power Point Tracking – MPPT

Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται στα Φ/Β συστήματα για τη μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου από τα ηλιακά πάνελ ονομάζεται Μέγιστη Παρακολούθηση Σημείου Ισχύος (MPPT). Το MPPT στοχεύει στη μεγιστοποίηση της ηλιακής ενέργειας, για αυτό λειτουργεί τα ηλιακά πάνελ στο βέλτιστο σημείο ισχύος τους. Εκεί μπορούν να παράγουν την περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια κάτω από συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία και η ένταση της ηλιοφάνειας. Για τους μετατροπείς που συνδέονται με το δίκτυο, το MPPT είναι ζωτικής σημασίας επειδή ενισχύει την απόδοση του συνολικού φωτοβολταϊκού συστήματος. Αυτό όχι μόνο μεγιστοποιεί την παραγωγή ενέργειας αλλά και βελτιώνει την οικονομική βιωσιμότητα των ηλιακών εγκαταστάσεων αυξάνοντας τη συνολική ενεργειακή απόδοση [βλ Σχήμα 5.1.3] [133][134].



Σχήμα 5.1.3: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου MPPT [124].

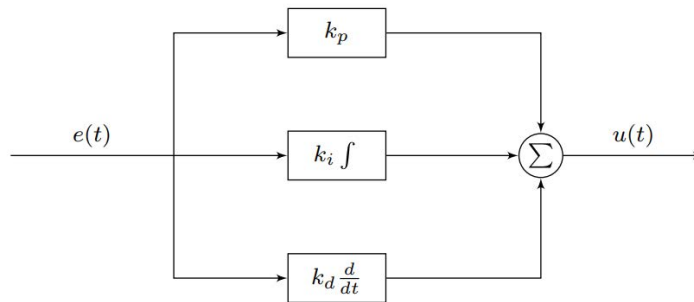
5.1.2.3 Ελεγκτές (Controllers)

Οι ελεγκτές είναι βασικά στοιχεία για τη διασφάλιση της απρόσκοπτης και βελτιστοποιημένης μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές σε μορφή κατάλληλη για το ηλεκτρικό δίκτυο. Καθώς η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γίνεται πιο περίπλοκη, οι ελεγκτές παίζουν κρίσιμο ρόλο στην εξισορρόπηση της πολυπλοκότητας της παραγωγής με τις απαιτήσεις ενός σταθερού και αποδοτικού ηλεκτρικού δικτύου. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη και κατηγορίες, εμείς όμως θα επικεντρωθούμε στους πιο διαδεδομένους και ευρέως χρησιμοποιούμενους [122][134].

Ελεγκτές Proportional – Integral – Derivative (PID)

Οι μετατροπείς που συνδέονται με το δίκτυο χρησιμοποιούν συχνά ελεγκτές PID λόγω της αποδοτικότητας και ευκολίας χρήσης τους. Τρεις μεταβλητές ρυθμίζονται συνεχώς για τον έλεγχο της εξόδου του μετατροπέα: η αναλογική (P), η ολοκληρωτική (I) και η παράγωγη (D). Ο αναλογικός όρος προβλέπει μελλοντικά σφάλματα, ο ολοκληρωτικός όρος ασχολείται με τη συσσώρευση παλιών σφαλμάτων και ο παραγόμενος όρος προβλέπει μελλοντικά σφάλματα [βλ Σχήμα 5.1.4]. Οι ελεγκτές PID είναι αποτελεσματικοί για απλά

γραμμικά συστήματα και παρέχουν σταθερότητα και ακρίβεια στις διαδικασίες ελέγχου [133][135][136].



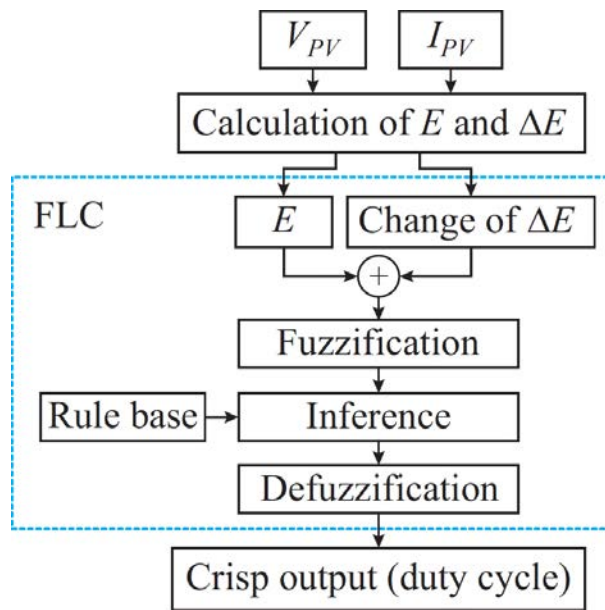
Σχήμα 5.1.4: Διάγραμμα ελεγκτή PID [136].

Ελεγκτής Model Predictive Control (MPC)

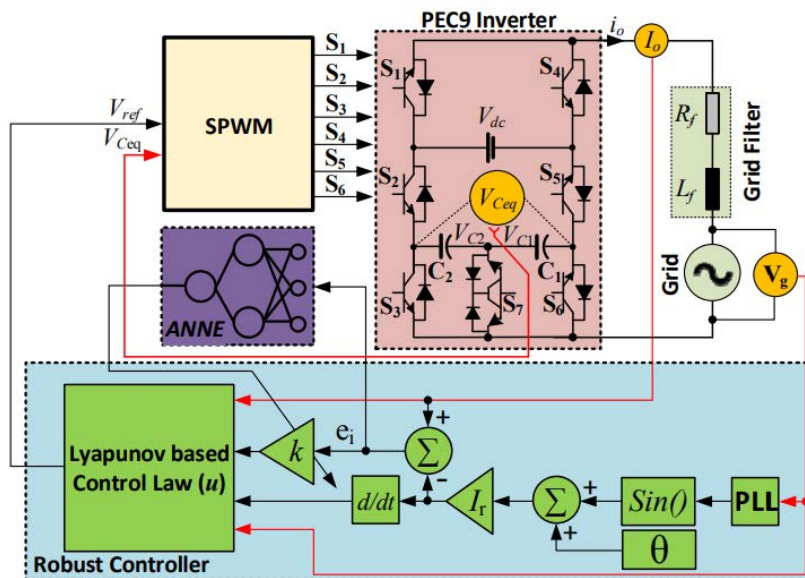
Μια πιο εξελιγμένη τεχνική ελέγχου που ονομάζεται προγνωστικός έλεγχος μοντέλων χρησιμοποιεί μαθηματικά μοντέλα για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος για εκτεταμένη χρονική περίοδο. Το MPC επιτρέπει μια πιο σύνθετη και προσαρμόσιμη στρατηγική ελέγχου λαμβάνοντας υπόψη τους στόχους βελτιστοποίησης και τους περιορισμούς του συστήματος. Το MPC μπορεί να προσαρμόσει την ισχύ εξόδου των συνδεδεμένων με το δίκτυο μετατροπέων σύμφωνα με τις προβλέψεις για τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμης ενέργειας, τις συνθήκες του δικτύου και τη ζήτηση φορτίου [136][137].

Ελεγκτές FL-ANN

Η ασαφής λογική και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ελεγκτές των αντιστροφών. Τα FLC (FL Controller) χρησιμοποιούν κανόνες και γλωσσικές μεταβλητές που βασίζονται στην ανθρώπινη λογική [βλ Σχήμα 5.1.5]. Για ένα σύστημα που βρίσκεται αντιμέτωπο με αβεβαιότητες και ασαφείς πληροφορίες, τα FLC είναι ιδιαίτερα χρήσιμα. Αντίστοιχα, τα ANN χρησιμοποιούν μηχανική εκμάθηση για να αναγνωρίσουν μοτίβα στα δεδομένα και χρησιμοποιούν αυτά τα μοτίβα για να προβλέψουν τα αποτελέσματα [βλ Σχήμα 5.1.6] [122][129][131][138][139].



Σχήμα 5.1.5: Διάγραμμα ενός γενικού FLC [134].

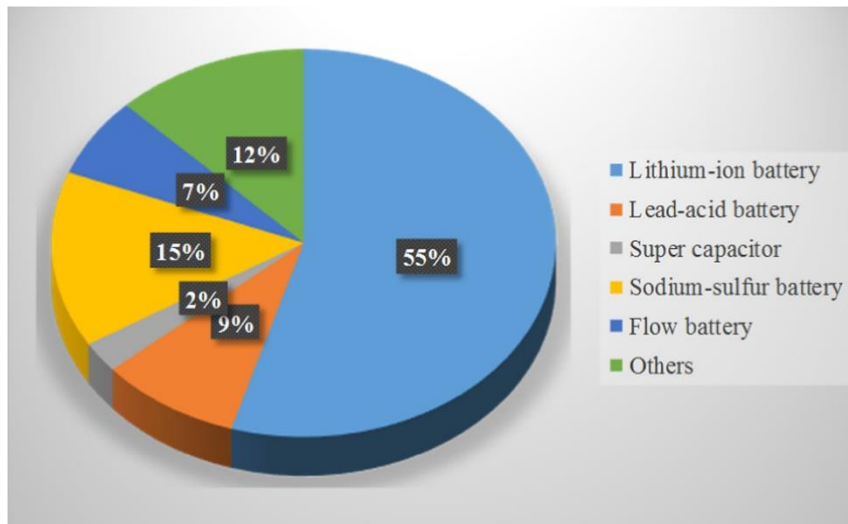


Σχήμα 5.1.6: Διαμόρφωση του προτεινόμενου βρόχου ελέγχου PEC9 συμπεριλαμβανομένου του ισχυρού (robust) ελεγκτή που βασίζεται σε ANN [129].

5.2 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας

5.2.1 Τεχνολογίες μπαταριών

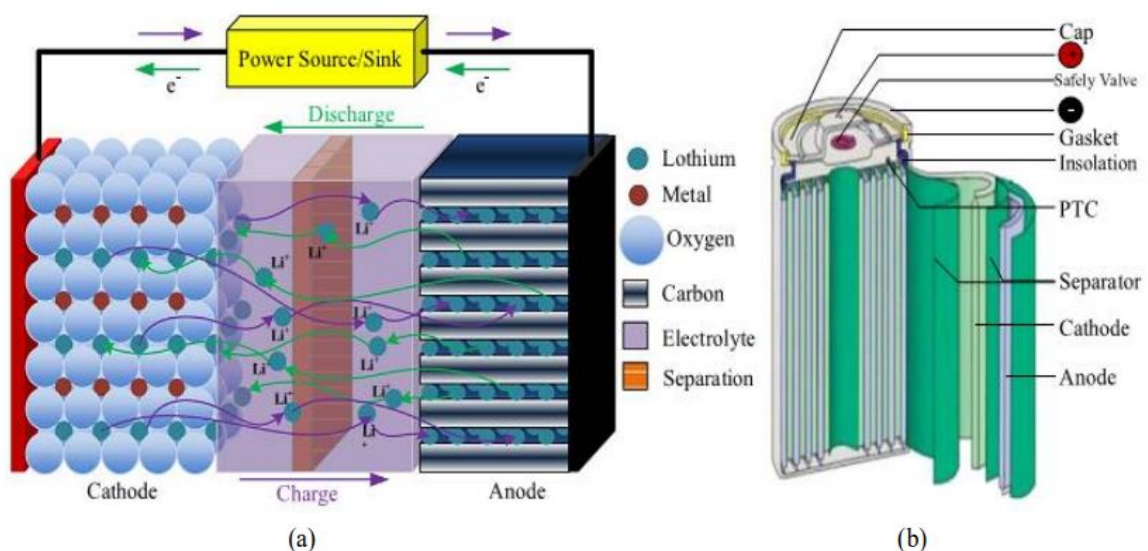
Διάφορες τεχνολογίες μπαταριών χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ενέργειας σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθεμία με το δικό της σύνολο χαρακτηριστικών, πλεονεκτημάτων και περιορισμών. Ακολουθεί η παγκόσμια εγκατεστημένη χωρητικότητα συστημάτων αποθήκευσης που χρησιμοποιήθηκαν για έργα αποθήκευσης ενέργειας για το έτος 2016 [Σχήμα 5.2.1], και στη συνέχεια μία επισκόπηση των διαφορετικών τεχνολογιών:



Σχήμα 5.2.1:
Εγκατεστημένη
χωρητικότητα
παγκόσμιου
συστήματος
αποθήκευσης
ενέργειας μπαταρίας
για το έτος 2016
[140].

5.2.1.1 Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Lithium-Ion Batteries)

Λόγω της υψηλής ενεργειακής τους πυκνότητας, της μεγάλης διάρκειας ζωής τους και του σχετικά ελαφρού σχεδιασμού, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χρησιμοποιούνται συχνά για αποθήκευση ενέργειας. Μερικές από τις χρήσεις τους είναι η αποθήκευση ενέργειας σε κλίμακα δικτύου, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και οι οικιακές ηλιακές εγκαταστάσεις. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι κατάλληλες για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη απόκριση λόγω των γρήγορων ταχυτήτων φόρτισης και εκφόρτισης. Ωστόσο, μπορεί να είναι κάπως

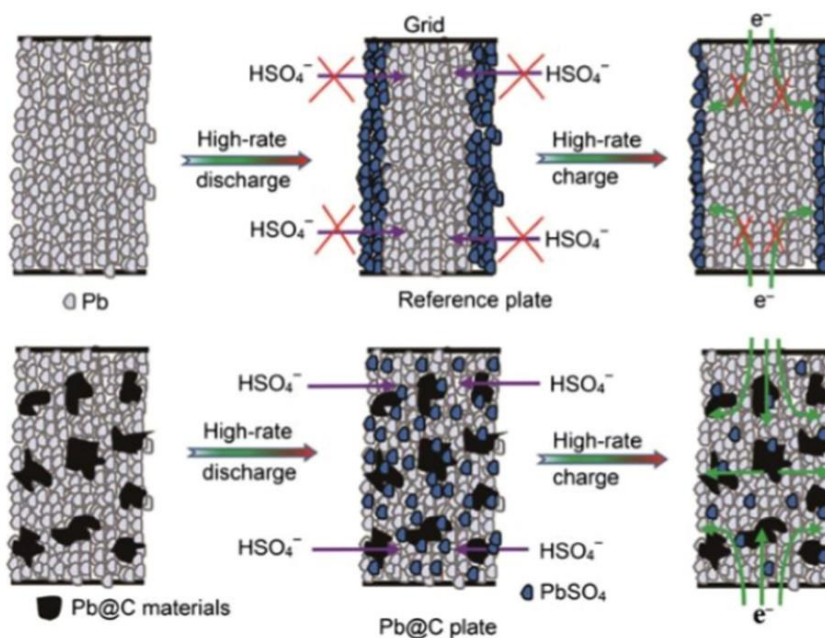


Εικόνα 5.2.1: Μέθοδος φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας ιόντων λιθίου (α) και σχηματική απεικόνισή της (β) [54].

δαπανηρές, και γύρω από το όνομά τους έχουν αναπτυχθεί ερωτήματα σχετικά με την διαθεσιμότητα των πηγών λιθίου καθώς και με τους πιθανούς κινδύνους ασφαλείας που σχετίζονται με τη θερμική διαφυγή. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που συνδέονται με το δίκτυο, που κυμαίνονται από οικιακές και εμπορικές λύσεις αποθήκευσης ενέργειας έως εφαρμογές σε κλίμακα δημοσίων υπηρεσιών [Εικόνα 5.2.1].

5.2.1.2 Μπαταρίες οξέων μολύβδου (Lead-Acid Batteries)

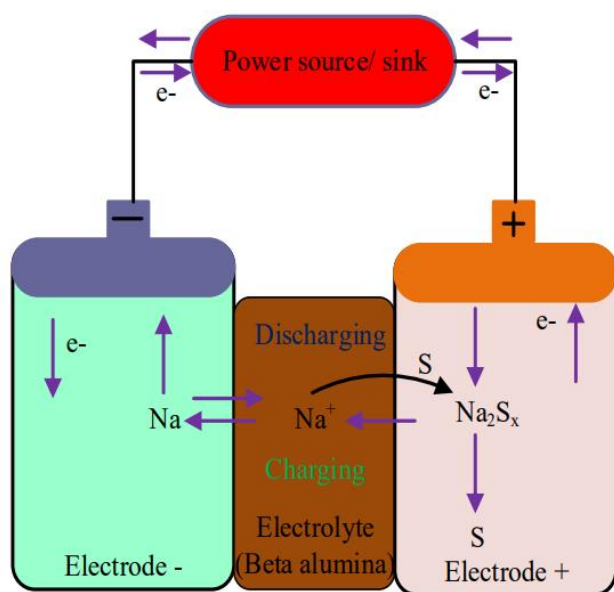
Οι μπαταρίες οξέων μολύβδου αποτελούν εδώ και καιρό μια αξιόπιστη και προσιτή επιλογή για την αποθήκευση ενέργειας. Είναι ανθεκτικές, επαναχρησιμοποιήσιμες και κατάλληλες για ποικίλες χρήσεις, όπως για εφεδρική ισχύς και ηλιακά συστήματα εκτός δικτύου. Σε αντίθεση με ορισμένες πιο πρόσφατες τεχνολογίες, οι μπαταρίες οξέων μολύβδου έχουν χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και μικρότερη διάρκεια ζωής. Τα μειονεκτήματά τους περιλαμβάνουν επίσης τη συντήρηση, τις ανάγκες αερισμού και τις ανησυχίες σχετικά με τη μόλυνση από μόλυβδο κατά τη διάρκεια της διαχείρισης απορριμμάτων. Αν και έχουν επισκιαστεί από μπαταρίες ιόντων λιθίου σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας στο ενεργειακό δίκτυο, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος παραμένουν οικονομικές και βολικές σε συγκεκριμένες περιπτώσεις [Εικόνα 5.2.2].



Εικόνα 5.2.2:
Σχήμα προηγμένης
μπαταρίας
μολύβδου-οξέος
[140].

5.2.1.3 Μπαταρίες ιόντων νατρίου (Sodium-Ion Batteries)

Ένα όλο και πιο δημοφιλές υποκατάστατο για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου που εμφανίζεται ως πιο προσιτό και ευρέως διαθέσιμο είναι οι μπαταρίες ιόντων νατρίου (Sodium). Αυτές οι μπαταρίες είναι κάπως συγκρίσιμες με την τεχνολογία ιόντων λιθίου, χρησιμοποιώντας νάτριο αντί για λίθιο. Αν και οι μπαταρίες ιόντων νατρίου βρίσκονται ακόμα στα αρχικά στάδια ανάπτυξης, έχουν δυνατότητες χρήσης σε εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο, όπως οι μπαταρίες λιθίου, παρουσιάζουν προβλήματα θερμικής διαφυγής και έχουν προκαλέσει σοβαρά ατυχήματα πυρκαγιάς. Οι μπαταρίες ιόντων νατρίου βρίσκονται ακόμη στη φάση έρευνας και ανάπτυξης για εφαρμογές δικτύου και η χρήση τους δεν είναι τόσο διαδεδομένη όσο ιόντων λιθίου. Ωστόσο, έχουν δυναμική ως μια πιο οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση [Εικόνα 5.2.3].

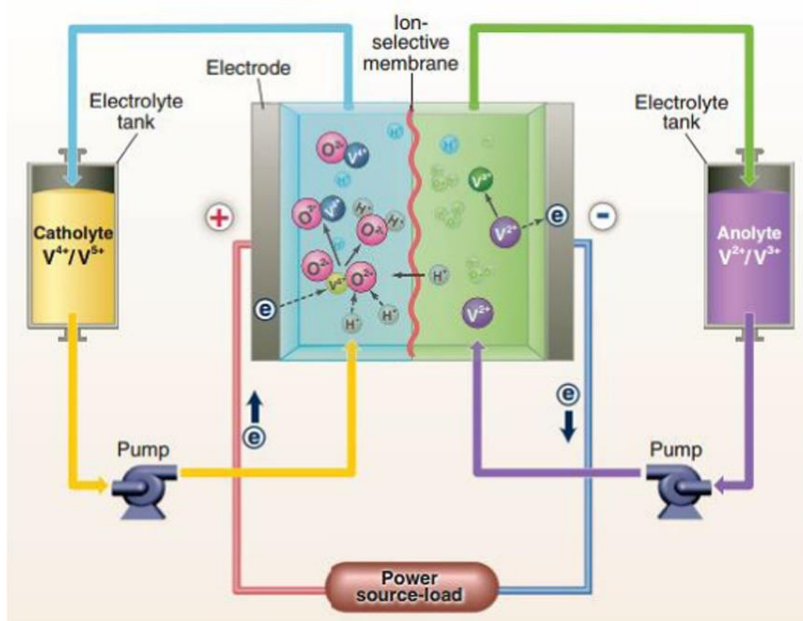


Εικόνα 5.2.3: Φαινόμενα φόρτισης και εκφόρτισης μπαταρίας NaS (Θεικού Νατρίου) [54].

5.2.1.4 Μπαταρίες ροής (Flow Batteries)

Οι μπαταρίες ροής αποθηκεύουν ενέργεια σε υγρούς ηλεκτρολύτες που βρίσκονται σε εξωτερικές δεξαμενές. Ένας τύπος μπαταρίας ροής είναι η μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου (Vanadium Redox Flow Battery) [βλ Εικόνα 5.2.4]. Παρέχουν υψηλή διάρκεια ζωής, επεκτασιμότητα και ικανότητα διαχωρισμού ισχύος και ενέργειας. Οι εφαρμογές που χρειάζονται μακροχρόνια αποθήκευση ενέργειας και επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης μπορούν να επωφεληθούν από τις μπαταρίες ροής. Ωστόσο, ο περίπλοκος σχεδιασμός του συστήματος τους, το αυξημένο κόστος και η συγκριτικά χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα είναι κάποια από τα μειονεκτήματά τους. Παρόλα αυτά,

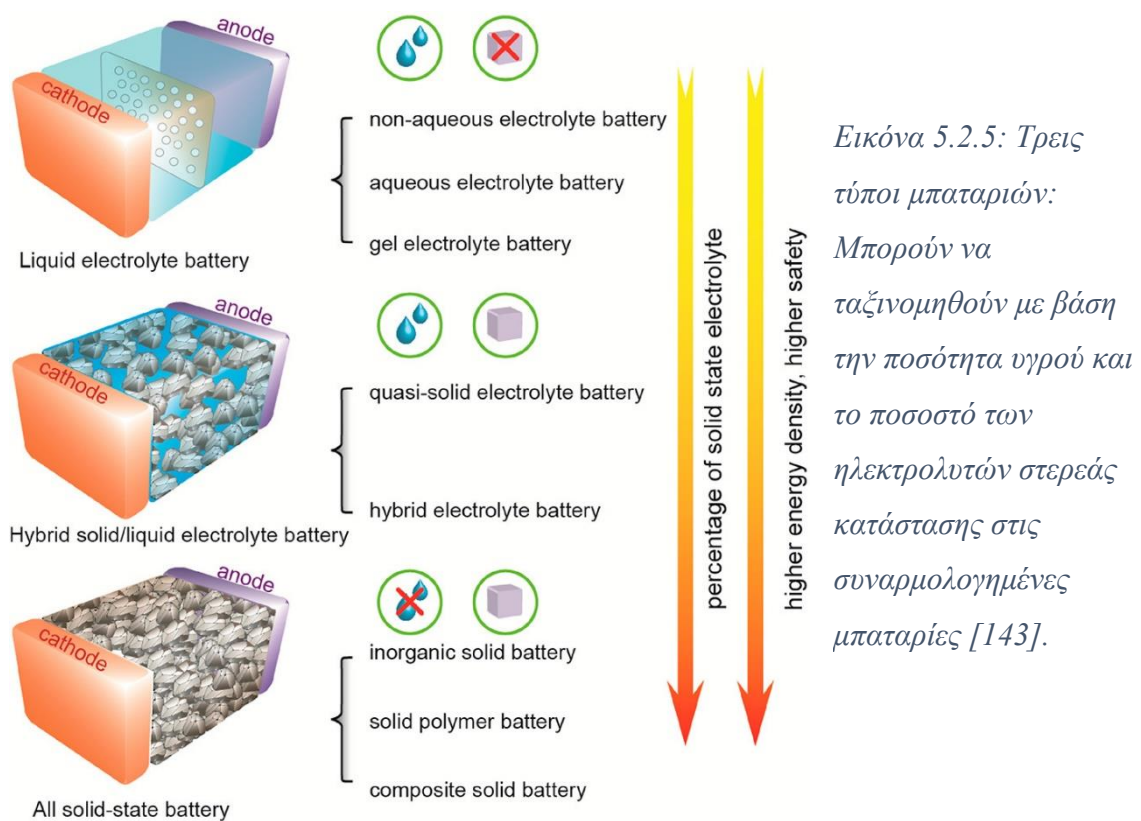
οι μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου κερδίζουν δημοτικότητα ως συσκευές αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας για το ηλεκτρικό δίκτυο. Μπορούν να βοηθήσουν τη σταθερότητα του δικτύου και να διαχειριστούν τη διαλείπουσα παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας λόγω της ικανότητάς τους να παρέχουν επεκτάσιμη αποθήκευση μεγάλης διάρκειας [54][57][140][141].



Εικόνα 5.2.4: Κύρια όψη μπαταρίας ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου [140].

5.2.1.5 Μπαταρίες στερεάς κατάστασης (Solid-State Batteries)

Οι μπαταρίες στερεάς κατάστασης είναι μια νέα τεχνολογία που χρησιμοποιεί έναν στερεό ηλεκτρολύτη στη θέση ενός υγρού. Σε σύγκριση με τις συμβατικές μπαταρίες, προσφέρουν καλύτερη ασφάλεια, υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και ίσως μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Ωστόσο, η τεχνολογία μπαταριών στερεάς κατάστασης βρίσκεται ακόμα στο στάδιο έρευνας και ανάπτυξης και εξακολουθούν να υπάρχουν προβλήματα με το κόστος και την κλιμάκωση της παραγωγής. Η χρήση μπαταριών στερεάς κατάστασης σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο και οι εφαρμογές τους είναι περιορισμένες. Ωστόσο, υπάρχει συνεχής έρευνα σε αυτόν τον τομέα λόγω των πιθανών πλεονεκτημάτων τους [142][143].



5.2.2 Υδροηλεκτρική Αντλία Αποθήκευσης (Pumped Storage Hydropower - PSH)

Αυτή η τεχνολογία περιλαμβάνει τη χρήση δύο δεξαμενών νερού σε διαφορετικά υψόμετρα. Η πλεονάζουσα ενέργεια χρησιμοποιείται για την άντληση νερού από την κάτω δεξαμενή στην επάνω δεξαμενή όταν παράγεται περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας ή όταν η ζήτηση είναι χαμηλή. Όταν υπάρχει σημαντική ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια, το αποθηκευμένο νερό της υψηλότερης δεξαμενής απελευθερώνεται και περνά μέσα από τουρμπίνες για να παράγει ενέργεια [βλ Εικόνα 5.2.6][32][144].

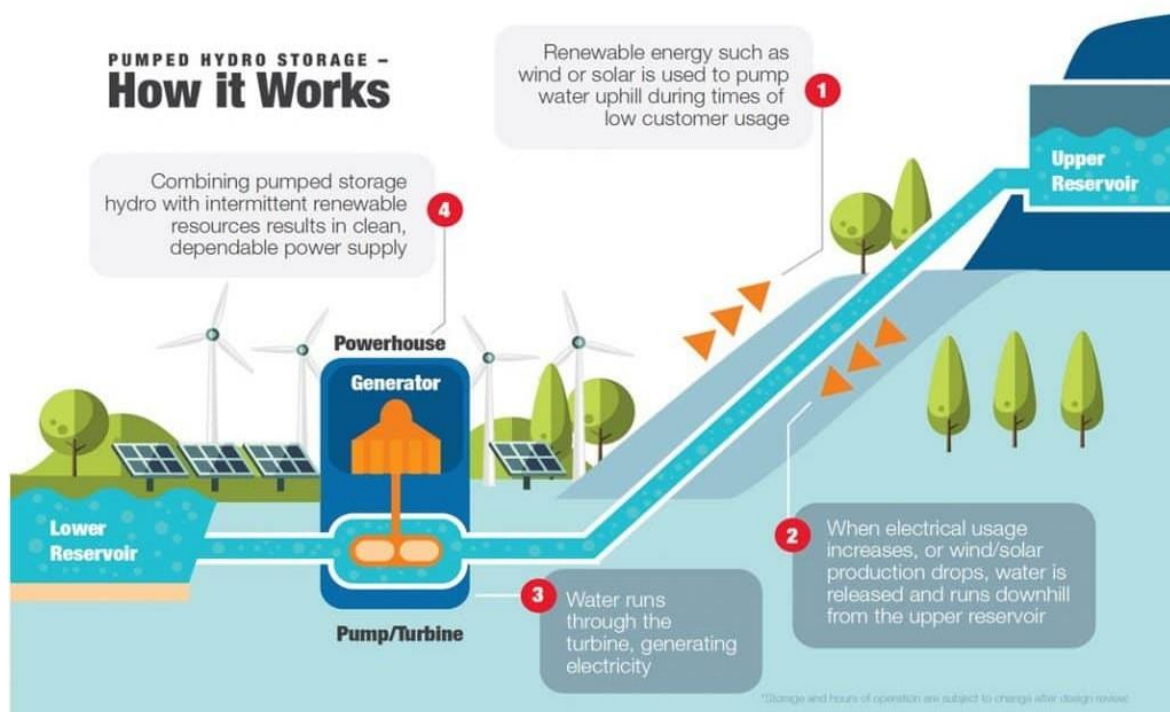
5.2.2.1 Πλεονεκτήματα

Η PSH έχει τεράστια χωρητικότητα αποθήκευσης, γεγονός που την καθιστά ιδανική για απαιτήσεις μεγάλης κλίμακας. Οι αντλούμενες υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις μπορούν να λειτουργήσουν ως μπαταρίες κλίμακας δικτύου, προσφέροντας μια αξιόπιστη και ταχεία παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπλέον, αυτή η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την αντιμετώπιση της ακανόνιστης και διακοπτόμενης φύσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή και η αιολική. Οι αντλούμενες υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι σε θέση να προσαρμόζονται αμέσως

σε ξαφνικές αλλαγές στην παραγωγή των ΑΠΕ ή στις διακυμάνσεις της ζήτησης, χάρη στη μεγάλη ευελιξία τους.

Ακόμη, προσφέροντας απαραίτητες υπηρεσίες όπως διαχείριση συχνότητας και συμπληρωματικές βοηθητικές υπηρεσίες, η PSH προάγει τη σταθερότητα του δικτύου. Τα συστήματα υδροηλεκτρικής άντλησης είναι χρήσιμα εργαλεία για τη διατήρηση της ανθεκτικότητας και της αξιοπιστίας του δικτύου λόγω των γρήγορων χρόνων αντίδρασης και της ευελιξίας τους. Αυτή η τεχνολογία παίζει ζωτικό ρόλο στη διευκόλυνση της μετάβασης σε ένα σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα και βιώσιμης ενέργειας, καθώς το ποσοστό της ανανεώσιμης ενέργειας στο ηλεκτρικό μείγμα συνεχώς αυξάνεται [144][145][146].



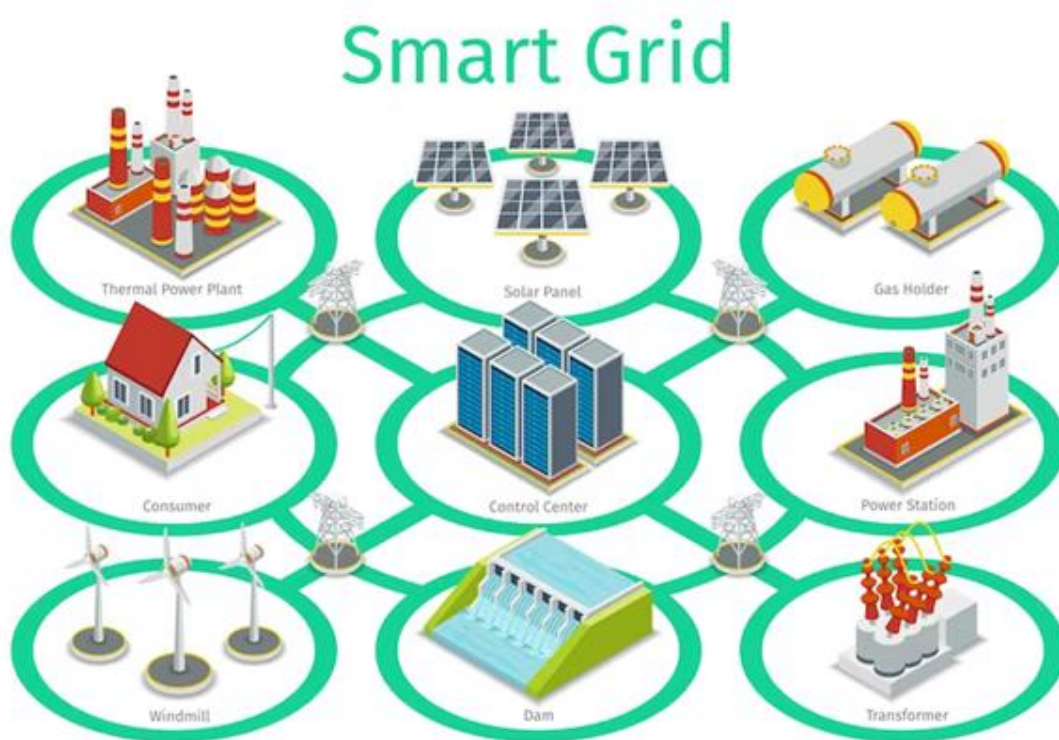
Εικόνα 5.2.6: Απεικόνιση της λειτουργίας της αντλία αποθήκευσης υδροηλεκτρικής ενέργειας [147].

5.2.2.2 Μειονεκτήματα

Παρά τα αποδεδειγμένα πλεονεκτήματά της, γεωγραφικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες μπορεί να εμποδίσουν την ευρεία χρήση της αντλούμενης υδροηλεκτρικής αποθήκευσης. Η κατασκευή αποτελεσματικών αντληθέντων υδροηλεκτρικών σταθμών απαιτεί τοπογραφία με αξιοσημείωτες υψομετρικές διακυμάνσεις και προσβάσιμα αποθέματα νερού. Η αντλούμενη υδροηλεκτρική αποθήκευση, από την άλλη, όταν είναι εφαρμόσιμη (βλέπε

πηγές [148][149]), αποτελεί μια καθιερωμένη και αξιόπιστη τεχνολογία που συμβάλλει ουσιαστικά στην αποθήκευση ενέργειας μεγάλης κλίμακας, στην ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών και στη σταθερότητα των σύγχρονων δικτύων ενέργειας [144][145][146].

5.3 Τεχνολογίες Smart Grid



Εικόνα 5.3.1: Το Έξυπνο Δίκτυο [150].

Το έξυπνο δίκτυο είναι ένα εξελιγμένο, ψηφιακά βελτιωμένο δίκτυο διανομής ενέργειας που χρησιμοποιεί σύγχρονη τεχνολογία πληροφοριών και επικοινωνιών για να επιτρέψει την αμφίδρομη επικοινωνία των υπηρεσιών κοινής ωφέλειας και των πελατών. Σε αντίθεση με τα συμβατικά δίκτυα, το έξυπνο δίκτυο βελτιστοποιεί την παραγωγή, τη διανομή και την κατανάλωση ενέργειας μέσω της χρήσης έξυπνων συστημάτων ελέγχου, αυτοματισμού και παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο.

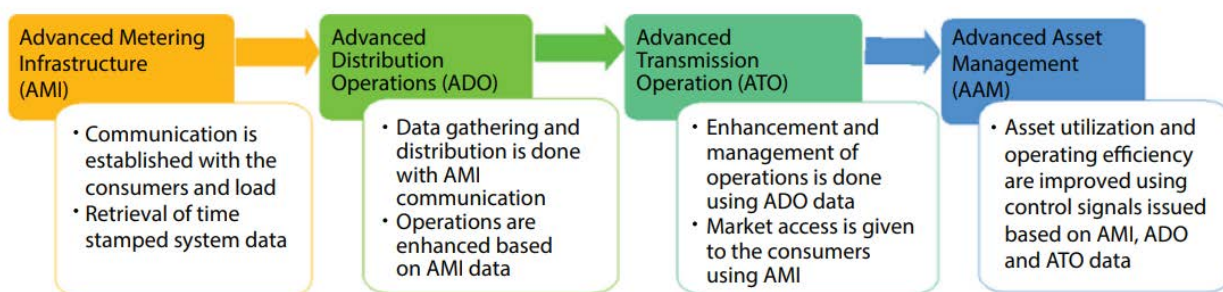
Το έξυπνο δίκτυο επιτρέπει τον απρόσκοπτο συντονισμό και τη διαχείριση ποικίλων ανανεώσιμων πηγών, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, αξιοποιώντας προηγμένες τεχνολογίες επικοινωνίας και ελέγχου. Αυτή η συνεργασία μεταξύ του έξυπνου δικτύου και

των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ενθαρρύνει ένα πιο βιώσιμο, ανθεκτικό και ανταποκρινόμενο ενεργειακό οικοσύστημα [151].

5.3.1 Προηγμένη υποδομή μέτρησης (Advanced Metering Infrastructure - AMI)

Η ενεργειακή βιομηχανία πρόκειται να περάσει μία επαναστατική αλλαγή με την εισαγωγή προηγμένων υποδομών μέτρησης (AMI), η οποία παρέχει βελτιωμένες δυνατότητες διαχείρισης δικτύου, αξιόπιστη συλλογή δεδομένων και παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο. Η AMI συνεπάγεται κατά κύριο λόγο την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών με εγκατεστημένη τεχνολογία επικοινωνίας, προκειμένου να δημιουργηθεί αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ πελατών και επιχειρήσεων κοινής ωφέλειας.

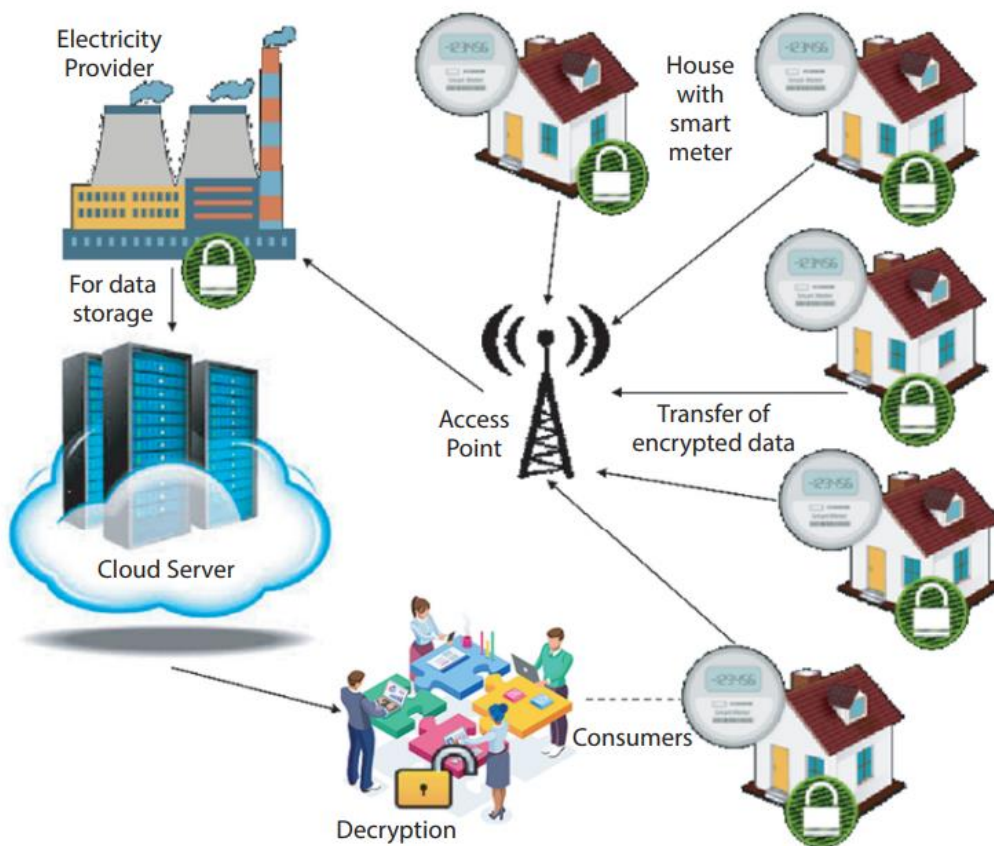
Η AMI είναι γνωστή για την παρακολούθησή της σε πραγματικό χρόνο (real-time monitoring), η οποία παρέχει στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας άμεσες πληροφορίες σχετικά με τα πρότυπα κατανάλωσης ενέργειας. Η σταθερή αναμετάδοση δεδομένων από έξυπνους μετρητές (smart meters) επιτρέπει στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να παρακολουθούν και να αντιδρούν σε πραγματικό χρόνο στις διακυμάνσεις της παραγωγής και της ζήτησης [Εικόνα 5.3.2]. Η βελτιστοποίηση της λειτουργικής απόδοσης και η βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου καθίστανται δυνατές χάρη σε αυτήν την τεχνολογία.



Εικόνα 5.3.2: Επισκόπηση της εξέλιξης του υποσυστήματος Smart Grid [153].

Η AMI επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων που ξεπερνούν την παραδοσιακή μέτρηση. Οι έξυπνοι μετρητές παρέχουν μια λεπτομερή εικόνα των προτύπων χρήσης ενέργειας, συλλέγοντας λεπτομερή δεδομένα κατανάλωσης σε συντομότερα διαστήματα. Οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτήν την αφθονία πληροφοριών ώστε να λάβουν καλά ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με τις τακτικές διαχείρισης από την πλευρά της ζήτησης, την πρόβλεψη φορτίου και τις επενδύσεις σε υποδομή. Η AMI διευκολύνει επίσης την ενσωμάτωση των ΑΠΕ, παρέχοντας δεδομένα κατανεμημένης παραγωγής σε πραγματικό χρόνο [βλ Εικόνα 5.3.3].

Η AMI απλοποιεί σε μεγάλο βαθμό τη διαχείριση του δικτύου και επιτρέπει στα βοηθητικά προγράμματα να παρακολουθούν και να ελέγχουν εξ αποστάσεως στοιχεία του συστήματος. Οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας είναι σε θέση να διαχειρίζονται αποτελεσματικά τα φορτία αιχμής, να εκτελούν προγράμματα απόκρισης στη ζήτηση και να εξισορροπούν δυναμικά το δίκτυο χάρη στο σύστημα αμφίδρομης επικοινωνίας. Η AMI εξακολουθεί να βρίσκεται στην πρώτη γραμμή της δημιουργίας μιας πιο βιώσιμης, ισχυρής και προσαρμόσιμης ενεργειακής υποδομής για την κάλυψη των αναγκών μιας σύγχρονης, δυναμικής κοινωνίας καθώς αλλάζει το ενεργειακό τοπίο [152][153][154].



Εικόνα
5.3.3:
Προηγμένη
Υποδομή
Μέτρησης
[153].

5.3.2 Συστήματα διαχείρισης διανομής (Distribution Management Systems - DMS)

Στις λειτουργίες του δικτύου έχει προκύψει μία αλλαγή συνθηκών εξαιτίας αυξανόμενη ενσωμάτωση κατανεμημένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως οι ανεμογεννήτριες και οι ηλιακοί συλλέκτες, στο ηλεκτρικό δίκτυο. Τα ΚΠ συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παράγουν ενέργεια κοντά στο σημείο χρήσης, ωφελώντας το περιβάλλον και μειώνοντας τις απώλειες μετάδοσης. Οι χειριστές δικτύου, όμως, αντιμετωπίζουν δυσκολίες στον έλεγχο της ασταθούς και διακοπτόμενης φύσης αυτών των διάσπαρτων πηγών. Τα

Συστήματα Διαχείρισης Διανομής (DMS) παρουσιάζονται, λοιπόν, ως απαραίτητα εργαλεία για την πλοήγηση σε αυτό το τοπίο.

Η διαχείριση του δικτύου διανομής ενέργειας βελτιώνεται από τις δυνατότητες παρακολούθησης, ελέγχου και αυτοματισμού σε πραγματικό χρόνο που προσφέρουν τα DMS. Μέσω της συνεχούς συλλογής δεδομένων από αισθητήρες, έξυπνους μετρητές και άλλες συσκευές συνδεδεμένες στο δίκτυο, αυτά τα συστήματα επιτρέπουν στους χειριστές του δικτύου να κατανοήσουν τη δυναμική συμπεριφορά των κατανεμημένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτά τα δεδομένα είναι απαραίτητα για τη διατήρηση της σταθερότητας του δικτύου, τη μείωση των διακοπών και την πρόβλεψη και την αντίδραση στις διακυμάνσεις της παραγωγής ενέργειας.

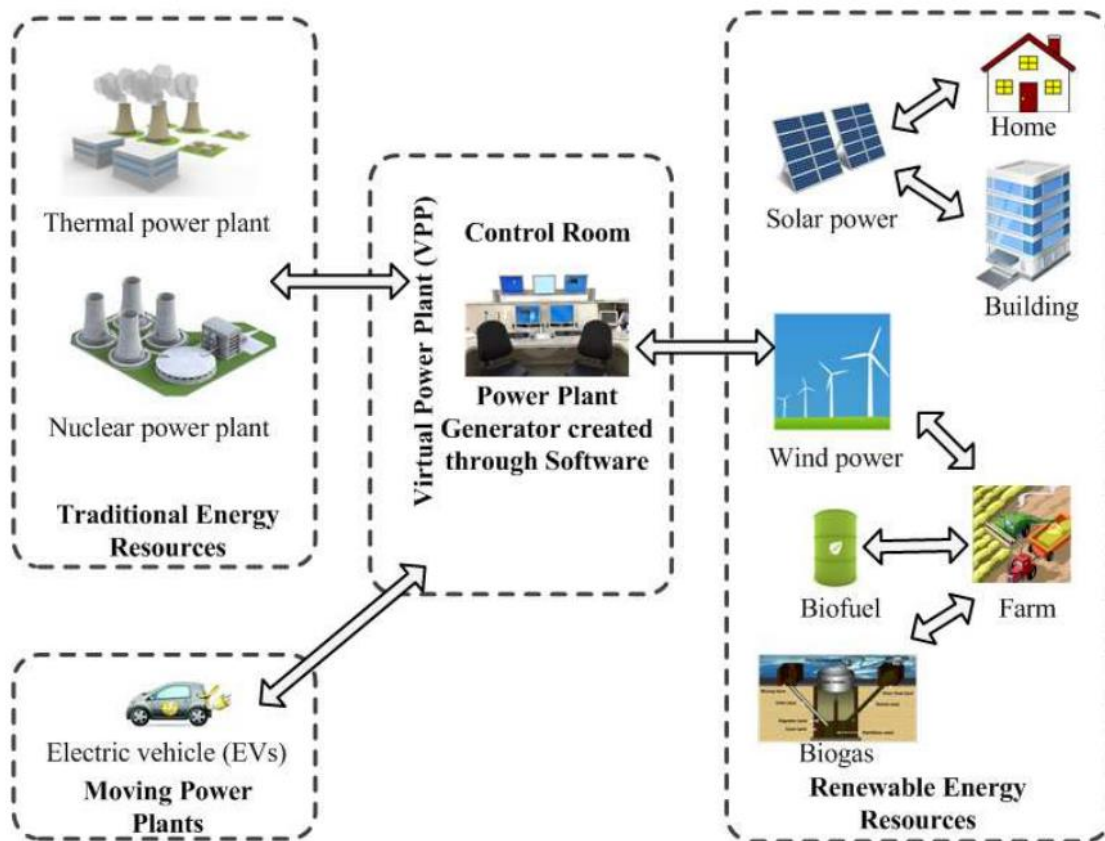
Επιπλέον, διευκολύνοντας τις γρήγορες αντιδράσεις σε διακοπές και αναταράξεις, τα DMS ενισχύουν την ανθεκτικότητα του δικτύου. Είναι σε θέση να απομονώνουν αποτελεσματικότερα τις επηρεαζόμενες τοποθεσίες, να επαναδρομολογούν την ηλεκτρική ενέργεια και να αποκαθιστούν το σήμα σε περίπτωση βλάβης ή απρόβλεπτων αλλαγών στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά το δίκτυο πιο αξιόπιστο συνολικά και εγγυάται ότι οι πελάτες θα έχουν πάντα μια αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμη και όταν οι διανεμημένες ΑΠΕ προκαλούν αλλαγή του δικτύου [153][154][155].

5.3.3 Εικονική μονάδα παραγωγής ενέργειας (Virtual Power Plant - VPP)

Οι εικονικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής έχουν γίνει ένας ουσιαστικός σύνδεσμος μεταξύ των αποκεντρωμένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της ευρύτερης υποδομής έξυπνων δικτύων. Τα VPP συνδυάζουν τις δυνατότητες πολλών πηγών, όπως συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, ανεμογεννήτριες και ηλιακούς συλλέκτες, σε μια ενιαία, διαχειρίσιμη οντότητα. Η έννοια του VPP είναι βασικά μια γεννήτρια σταθμού παραγωγής ενέργειας που δημιουργήθηκε μέσω λογισμικού. Στην πραγματικότητα, δηλαδή, ένα VPP είναι μια εικονική οντότητα και δεν διαθέτει καμία φυσική υποδομή.

Λόγω της εγγενούς ακανόνιστης και απρόβλεπτης φύσης ορισμένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αυτή η συγκέντρωση επιτρέπει τον ομαλό συντονισμό και τη βελτιστοποίηση της παραγωγής ΑΠΕ. Προκειμένου να εξισορροπηθεί η ροή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κατανεμημένες πηγές, τα VPP λειτουργούν ως δυναμικοί «ενορχηστρωτές». Στο πλαίσιο του έξυπνου δικτύου, βελτιώνουν τη σταθερότητά του και την αξιοπιστία των ανανεώσιμων πηγών χρησιμοποιώντας λογισμικό αιχμής και τηλεπικοινωνίες. Η ικανότητά

τους να συνδυάζουν και να επιβλέπουν τους διασκορπισμένους πόρους εγγυάται μία πιο απρόσκοπτη διαδικασία ολοκλήρωσης, ενισχύοντας ένα πιο εύρωστο και βιώσιμο ενεργειακό περιβάλλον [Εικόνα 5.3.4][154][156].

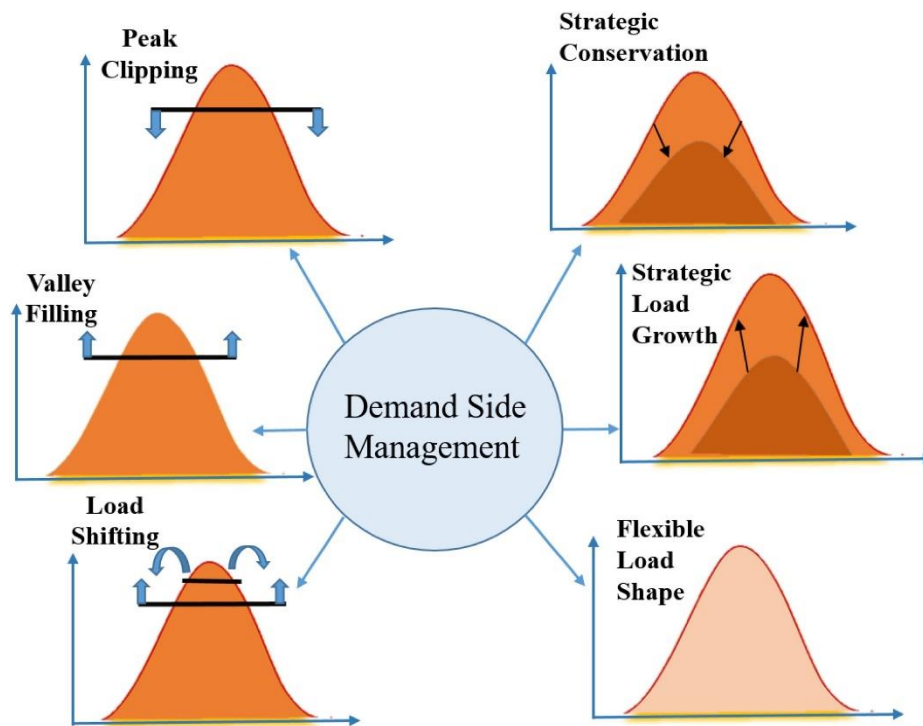


Εικόνα 5.3.4: Απεικόνιση ενός τυπικού εικονικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής (VPP), που συνδυάζει διαφορετικούς ενεργειακούς πόρους μέσω κεντρικού λογισμικού [156].

5.4 Μηχανισμοί απόκρισης ζήτησης (Demand Response Mechanisms)

Στη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας, ένας μηχανισμός ανταπόκρισης στη ζήτηση είναι μια τακτική όπου οι χρήστες τροποποιούν προληπτικά τις συνήθειες χρήσης ενέργειας ως απόκριση σε σήματα από την αγορά ενέργειας ή τον διαχειριστή του δικτύου. Η ανταπόκριση στη ζήτηση διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην επίλυση της διαλείπουσας φύσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια. Οι μέθοδοι ανταπόκρισης στη ζήτηση βελτιώνουν τη συνολική απόδοση και αξιοπιστία του δικτύου

παροτρύνοντας τους καταναλωτές να προσαρμόσουν την κατανάλωση ενέργειας ώστε να συμπίπτουν με περιόδους άφθονης παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας [Εικόνα 5.4.1][157].



Εικόνα 5.4.1:
Προσεγγίσεις
DRM [159].

5.4.1 Μετατόπιση φορτίου (Load Shifting)

Πρόκειται για την πιο διαδεδομένη και συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδο DRM. Ο στόχος των λύσεων μετατόπισης φορτίου είναι να εξισορροπηθεί αποτελεσματικότερα η προσφορά και η ζήτηση στο ηλεκτρικό δίκτυο, επαναπρογραμματίζοντας τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες εκτός αιχμής. Αυτή η στρατηγική, η οποία αποτελεί κρίσιμο μέρος των μηχανισμών ανταπόκρισης στη ζήτηση, αντιμετωπίζει τα προβλήματα που προκαλούνται από την ασταθή φύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την απαίτηση για σταθερότητα του δικτύου.

Οι στρατηγικές για τη μετατόπιση φορτίου έχουν πολλά πλεονεκτήματα. Πρώτα απ' όλα, συντονίζοντας την κατανάλωση με εποχές άφθονης παραγωγής, βοηθούν στην αποτελεσματική χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Δεύτερον, μειώνουν τις επιπτώσεις στο περιβάλλον αποτρέποντας την ανάγκη για πρόσθετους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, οι οποίοι συχνά βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, για την κάλυψη της ζήτησης αιχμής. Τρίτον, με τη μείωση της πιθανότητας υπερφόρτωσης κατά τις ώρες αιχμής, η μετατόπιση φορτίου βελτιώνει την αξιοπιστία του δικτύου και τελικά οδηγεί σε μια πιο ανθεκτική και βιώσιμη ενεργειακή υποδομή. Οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και οι φορείς

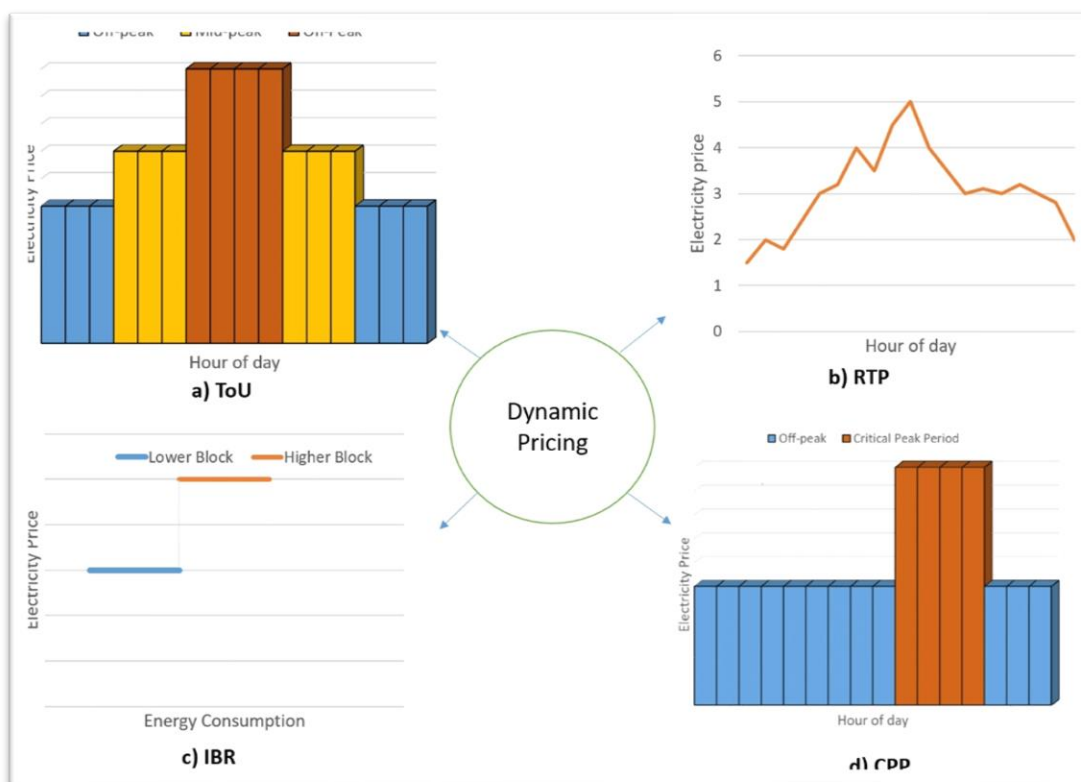
εκμετάλλευσης δικτύου εφαρμόζουν συχνά προγράμματα κινήτρων και τιμολόγηση χρόνου χρήσης για να ενθαρρύνουν τη μετατόπιση φορτίου [158][159].

5.4.2 Τιμολόγηση χρόνου χρήσης (Time-of-Use Pricing - TOU)

Ένα εργαλείο ανταπόκρισης στη ζήτηση που ονομάζεται τιμολόγηση χρόνου χρήσης προσπαθεί να αλλάξει τη συμπεριφορά των πελατών αντιστοιχίζοντας τις τιμές ενέργειας με τα μεταβαλλόμενα επίπεδα ζήτησης και τις συνθήκες δικτύου. Το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας ποικίλλει κατά τη διάρκεια της ημέρας βάσει ενός σχεδίου τιμολόγησης TOU. κανονικά, οι τιμές είναι υψηλότερες σε περιόδους αιχμής ζήτησης και χαμηλότερες σε ώρες εκτός αιχμής. Με αυτήν τη στρατηγική, οι πελάτες ενθαρρύνονται να μετακινήσουν τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους μειωμένης ζήτησης για πιο προσιτή, άφθονη ενέργεια.

Το θέμα της τιμολόγησης TOU γίνεται ιδιαίτερα επίκαιρο όταν εξετάζεται η ενσωμάτωση της ανανεώσιμης ενέργειας. Αυτό το εργαλείο ωθεί τους χρήστες να προγραμματίσουν τη χρήση ενέργειας τους σε χρονικά διαστήματα που η ανανεώσιμη ενέργεια είναι πιο άφθονη, όπως στις ηλιόλουστες ημέρες όταν παράγεται η ηλιακή ενέργεια ή κατά τη διάρκεια των θυελλωδών/ανεμωδών συνθηκών όταν παράγεται η αιολική ενέργεια. Η τιμολόγηση TOU ενθαρρύνει την καλύτερη χρήση βιώσιμων πηγών ενέργειας μειώνοντας τις τιμές σε περιόδους αυξανόμενης διαθεσιμότητας. Αυτό μειώνει την ανάγκη για συμβατική, συχνά βασισμένη σε ορυκτά καύσιμα, εφεδρική ισχύ σε περιόδους αιχμής ζήτησης.

Με τη βοήθεια της τιμολόγησης TOU, οι πελάτες μπορούν να επιλέξουν σοφά πότε θα χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια ανάλογα με τον ενεργειακό τους προϋπολογισμό και τις προσωπικές τους προτιμήσεις. Αυτός ο μηχανισμός προωθεί ένα πιο ευέλικτο και προσαρμόσιμο ενεργειακό οικοσύστημα που ωφελεί τους πελάτες καθώς και τους γενικότερους στόχους της ενσωμάτωσης των ΑΠΕ [160][161][162].



Εικόνα 5.4.2: Σχήματα στρατηγικών δυναμικής τιμολόγησης [159].

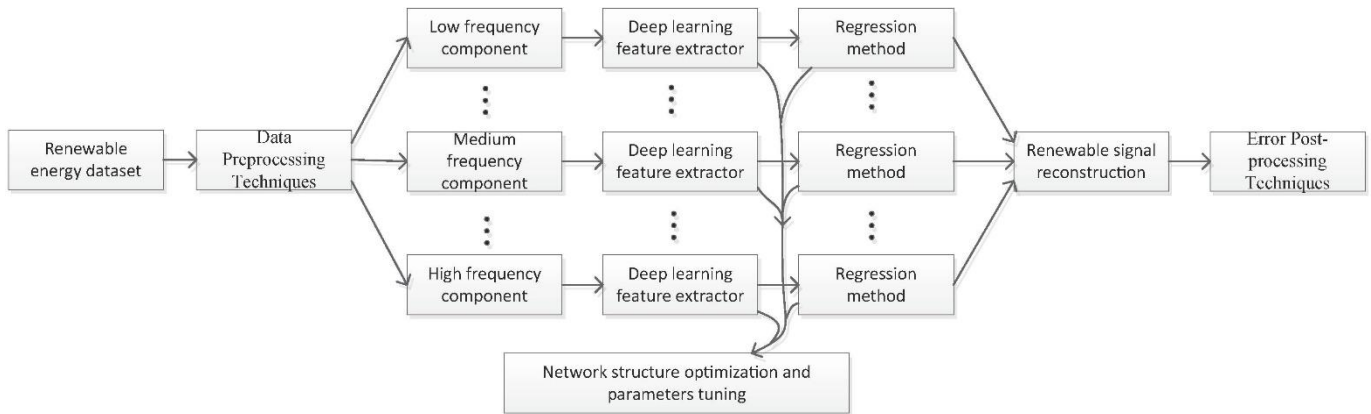
5.5 Λύσεις Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας «Φιλικές προς το Δίκτυο» (Grid-Friendly)

5.5.1 Πρόβλεψη (Forecasting) και προγνωστική ανάλυση (Predictive Analytics)

Νέες και καινοτόμες τεχνικές απαιτούνται για τη διαχείριση του δικτύου όταν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με την εγγενή μεταβλητότητα τους, ενσωματώνονται σε αυτό. Προκειμένου να προβλεφθούν τα πρότυπα δημιουργίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι προβλέψεις και οι προγνωστικές αναλύσεις έχουν γίνει βασικές τεχνολογίες που βοηθούν τους χειριστές δικτύου να λαμβάνουν καλά ενημερωμένες αποφάσεις και να αυξήσουν τη συνολική αποτελεσματικότητα του συστήματος. Αυτές οι τεχνολογίες προσφέρουν σημαντικές γνώσεις σχετικά με την προβλεπόμενη παραγωγή των ΑΠΕ, σε διάφορες χρονικές περιόδους, χρησιμοποιώντας εξελεγμένους αλγόριθμους και προσεγγίσεις μοντελοποίησης [βλ Σχήμα 5.5.1].

Για προβλέψεις και προγνωστικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνολογίες, όπως η αριθμητική πρόβλεψη καιρού (Numerical Weather Prediction - NWP)

[βλ Σχήμα 5.5.2][163][164][165], το machine learning και deep learning [Εικόνες 5.1.1. και 5.1.2][166][167][168], στατιστικά μοντέλα (time series analysis, regression analysis, Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)) [163][167][169] και πολλές ακόμα.



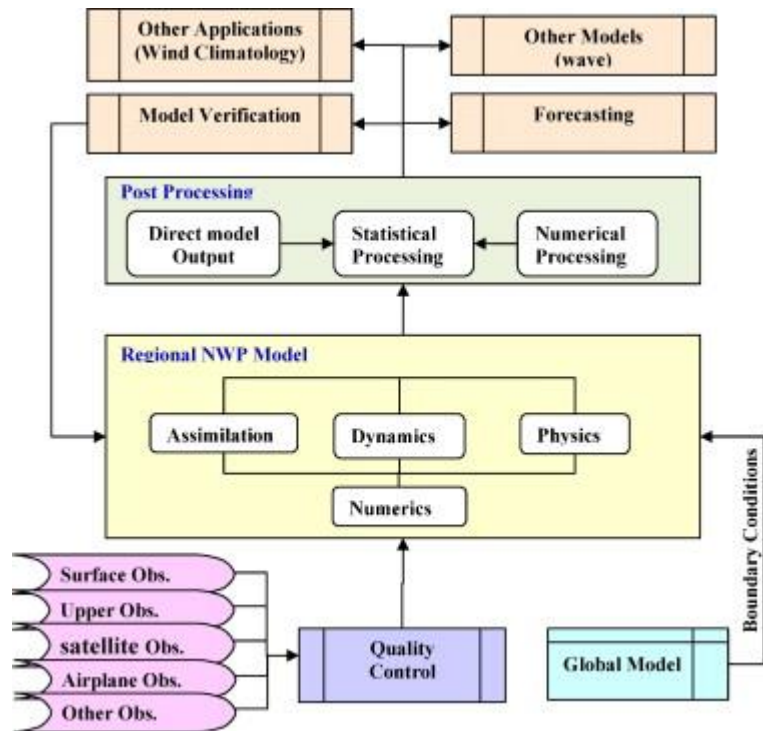
Σχήμα 5.5.1: Το γενικό πλαίσιο για τις προβλέψεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [167].

Όταν πρόκειται για βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη, η προγνωστική ανάλυση είναι απαραίτητη επειδή παρέχει ακριβείς εκτιμήσεις για την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε λίγες ώρες ή ημέρες. Οι διαχειριστές συστημάτων μπορούν προληπτικά να εξισορροπήσουν την προσφορά και τη ζήτηση, να μεγιστοποιήσουν τη σταθερότητα του συστήματος και να προσαρμοστούν εγκαίρως στις διακυμάνσεις της παραγωγής των ΑΠΕ χάρη σε αυτήν την πρόβλεψη. Η προγνωστική ανάλυση βοηθά τους χειριστές του δικτύου να προβλέπουν αλλαγές στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας και να τροποποιούν κατάλληλα τις ρυθμίσεις δικτύου χρησιμοποιώντας δεδομένα πραγματικού χρόνου και προγνώσεις καιρού [168].

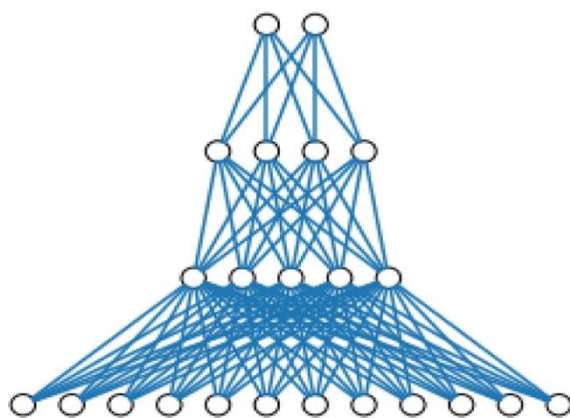
Τα αναλυτικά στοιχεία (Big Data Analytics) που προκύπτουν από τις προβλέψεις βοηθούν στην επέκταση του ορίζοντα πρόβλεψης σε εβδομάδες, μήνες ή και χρόνια μέσω μακροπρόθεσμων προβλέψεων. Οι ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με την ανάπτυξη του δικτύου, τις απαιτήσεις αποθήκευσης ενέργειας και τη συνολική ανθεκτικότητα του δικτύου γίνονται ευκολότερες για τους διαχειριστές του, τους υπεύθυνους σχεδιασμού ενέργειας και τις ρυθμιστικές αρχές με τη βοήθεια αυτών των στρατηγικού σχεδιασμού εργαλείων. Επειδή η μακροπρόθεσμη πρόβλεψη προσφέρει πληροφορίες για τα πρότυπα μελλοντικής παραγωγής και διευκολύνει τη βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων και των επενδύσεων σε υποδομές δικτύου, βοηθά επίσης την ενσωμάτωση της ανανεώσιμης ενέργειας στις αγορές ενέργειας [166].

Τα BDA και οι προβλέψεις συμβάλλουν επίσης στην ενσωμάτωση τεχνικών απόκρισης ζήτησης και αποθήκευσης ενέργειας. Οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύου μπορούν να βελτιστοποιήσουν τους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας και να ενθαρρύνουν την ανταπόκριση της ζήτησης σε περιόδους υψηλής ή χαμηλής διαθεσιμότητας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, γνωρίζοντας τότε η παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας προβλέπεται να κορυφωθεί ή να μειωθεί [165->169].

Σχήμα 5.5.2: Η ροή δεδομένων των διαδικασιών του μοντέλου NWP [165].



Neural Network architecture



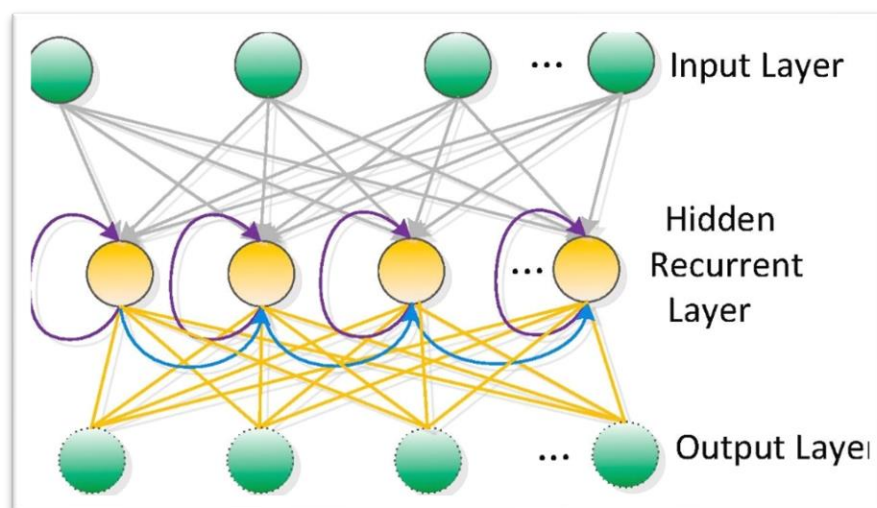
Output Layer

Hidden Layer 2

Hidden Layer 1

Input Layer

Εικόνα 5.5.1: Η δομή του νευρωνικού δικτύου του μοντέλου βαθιάς μάθησης που χρησιμοποιείται για BDA του έξυπνου δικτύου [168].



Εικόνα 5.5.2: Μια τυπική δομή ενός επαναλαμβανόμενου νευρωνικού δικτύου (RNN). Σε αντίθεση με τα νευρωνικά δίκτυα τροφοδοσίας, το RNN είναι σε θέση να χρησιμοποιεί τις νευρικές εσωτερικές καταστάσεις για να επεξεργάζεται ακολουθίες χρονοσειρών εισόδων, καθιστώντας τις κατάλληλες για την πρόβλεψη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [167].

Κεφάλαιο 6 Αντίκτυπο της Ενσωμάτωσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στα Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας

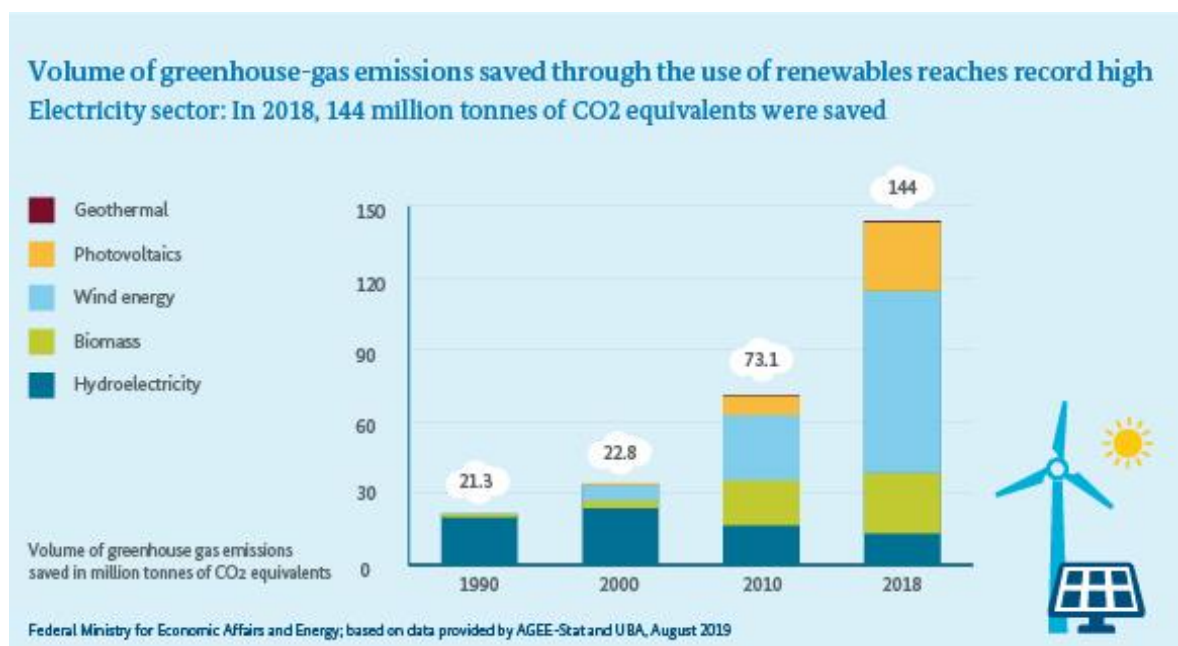
Η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα υπάρχοντα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας σηματοδοτεί μια μεγάλη αλλαγή στο παγκόσμιο ενεργειακό τοπίο. Αυτό το κεφάλαιο εμβαθύνει στην περίπλοκη δυναμική μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, διερευνώντας τόσο τις θετικές συνεισφορές όσο και τα λειτουργικά προβλήματα που θέτει η αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών.

6.1 Θετικές επιδράσεις στα δίκτυα ενέργειας

6.1.1 Μειωμένες εκπομπές άνθρακα

Ένας από τους βασικούς πυλώνες της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας είναι η ενσωμάτωση των ΑΠΕ στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μειώνει σημαντικά τις εκπομπές άνθρακα και προωθεί ένα καθαρότερο, πιο πράσινο ενεργειακό περιβάλλον. Σε αντίθεση με την παραδοσιακή παραγωγή ενέργειας που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα, οι ΑΠΕ

χρησιμοποιούν φυσικές διαδικασίες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ δεν παράγουν εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ως αποτέλεσμα, η ενσωμάτωσή τους στο δίκτυο μειώνει σημαντικά το αποτύπωμα άνθρακα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο είναι σημαντικό για τις διεθνείς προσπάθειες επιβράδυνσης της κλιματικής αλλαγής. Η ενσωμάτωση τους συμβάλλει στην απεξάρτηση του ενεργειακού μείγματος από τον άνθρακα, αντικαθιστώντας τους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και μειώνοντας την εξάρτηση από το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο. Έτσι, μειώνονται οι άμεσες εκπομπές που σχετίζονται με την παραγωγή ενέργειας και προάγεται ο μακροπρόθεσμος στόχος μιας βιώσιμης ενεργειακής υποδομής με χαμηλές εκπομπές άνθρακα [Εικόνα 6.1.2].



Εικόνα 6.1.2: Διάγραμμα του όγκου αερίων του θερμοκηπίου (σε εκατομμύρια CO₂) που σώζονται χάρη στην ανανεώσιμη ενέργεια ως αποτέλεσμα της πρωτοβουλίας *Energiewende* της Γερμανίας (για περισσότερες πληροφορίες βλέπε υποενότητες 7.1.2 και 7.2.3). Βλέπουμε ότι η όλο και μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ συνεπάγεται όλο και λιγότερες εκπομπές [170].

Επιπλέον, η συνολική περιβαλλοντική απόδοση βελτιώνεται από τις τεχνολογικές εξελίξεις στις ΑΠΕ, όπως είναι οι βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση και η καινοτομία στην αποθήκευση ενέργειας. Η ευρεία χρήση των πηγών αυτών είναι ένα πολλά υποσχόμενο σημάδι του μέλλοντος, όπου η παραγωγή ενέργειας συνδέεται με την περιβαλλοντική ευθύνη, καθώς η παγκόσμια κοινότητα εργάζεται για την επίτευξη της ουδετερότητας προς τον άνθρακα (carbon neutrality). Η μείωση των εκπομπών άνθρακα και η ενθάρρυνση

πρακτικών καθαρής ενέργειας καθιστούν την ενσωμάτωση των ΑΠΕ απαραίτητη για τη στροφή προς ένα πιο καθαρό και βιώσιμο ενεργειακό περιβάλλον, το οποίο είναι σύμφωνο με την ανάγκη διαφύλαξης και διατήρησης της υγείας του πλανήτη μας [19][42][47][171][172].

6.1.2 Ενισχυμένη ενεργειακή ασφάλεια

Ενθαρρύνοντας τη διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας, η ενσωμάτωση των ΑΠΕ στα δίκτυα ενέργειας συμβάλλει στη διασφάλιση της ενεργειακής ασφάλειας. Σε αντίθεση με τα συμβατικά ενεργειακά συστήματα που βασίζονται κυρίως σε περιορισμένα και γεωπολιτικά ευαίσθητα ορυκτά καύσιμα, οι ανανεώσιμες πηγές συνδυάζουν μια ποικιλία από φυσικά διασκορπισμένες και διαφοροποιημένες πηγές ενέργειας. Μειώνοντας την εξάρτηση από μια ενιαία πηγή ενέργειας ή μια μικρή ομάδα προμηθευτών, η διαφοροποίηση συμβάλλει στον μετριασμό των κινδύνων που σχετίζονται με διακοπές στον εφοδιασμό, γεωπολιτικές αναταραχές ή διακυμάνσεις στην τιμή της ενέργειας στις διεθνείς αγορές.

Εκτός από την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των ενεργειακών συστημάτων, η διαφοροποίηση διασφαλίζει έναν σταθερό και ασφαλή εφοδιασμό ενέργειας ακόμη και ενόψει απρόβλεπτων εξωτερικών καταστάσεων. Με αυτόν τον τρόπο, η σκόπιμη ενσωμάτωση των ΑΠΕ παίζει κρίσιμο ρόλο στην ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας σε εθνικό αλλά και διεθνές επίπεδο [19][172][173].

Η τοπική παραγωγή, χαρακτηριστικό πολλών συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, παίζει καθοριστικό ρόλο στην αναμόρφωση του ενεργειακού τοπίου. Τεχνολογίες όπως τα ηλιακά πάνελ ταράτσας και οι ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας δίνουν τη δυνατότητα σε κοινότητες και άτομα να γίνουν ενεργοί συμμετέχοντες στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η αποκεντρωμένη μέθοδος βελτιώνει σημαντικά την ανθεκτικότητα έναντι των διαταραχών ενώ παράλληλα εκδημοκρατίζει την παραγωγή ενέργειας. Η τοπική παραγωγή προάγει την ενεργειακή ανεξαρτησία σε τοπικό επίπεδο, σε αντίθεση με το συγκεντρωτικό μοντέλο, το οποίο κυριαρχείται από μαζικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και τεράστια δίκτυα μεταφοράς. Αυτά τα κατανομημένα ενεργειακά συστήματα συνεχίζουν να λειτουργούν κατά τη διάρκεια έντονων καιρικών φαινομένων, φυσικών καταστροφών και άλλων καταστάσεων έκτακτης ανάγκης που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την κεντρική υποδομή, διασφαλίζοντας έναν πιο αξιόπιστο εφοδιασμό. Η ανθεκτικότητα της τοπικής παραγωγής σηματοδοτεί μια κίνηση προς αυτάρκη, βασισμένα στην κοινότητα ενεργειακά

οικοσυστήματα που δίνουν στους ανθρώπους τη δύναμη να ελέγχουν ενεργά το δικό τους ενεργειακό μέλλον [172][174][175].

6.1.3 Πιθανά οικονομικά οφέλη

Η κατασκευή φωτοβολταϊκών, ανεμογεννητριών και λοιπών τεχνολογιών ανανεώσιμης ενέργειας είναι πολύπλοκη και περίτεχνη διαδικασία που απαιτεί ειδικευμένο εργατικό δυναμικό. Αυτή η παραγωγική έκρηξη οδηγεί σε τεχνολογική καινοτομία και έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα οποία προφανώς για να υλοποιηθούν δημιουργούν νέες θέσεις εργασίας. Για τις φάσεις κατασκευής και εγκατάστασης των έργων ΑΠΕ απαιτείται επαγγελματικό εργατικό δυναμικό σε διάφορα επαγγέλματα, συμπεριλαμβανομένων μηχανικών, ηλεκτρολόγων και εργατών οικοδομών. Επιπλέον, η συνεχής συντήρηση και λειτουργία τους εγγυάται τη μακροπρόθεσμη σταθερότητα της εργασίας.

Τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών υπερβαίνουν την άμεση απασχόληση, αφού χάρη σε αυτές δημιουργούνται θέσεις εργασίας σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού. Ο τομέας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ενισχύει την οικονομική δραστηριότητα σε ένα ευρύ φάσμα τομέων, από την εξόρυξη πρώτων υλών έως τις βιομηχανίες μεταφορών, τα logistics και τομείς διάφορων υπηρεσιών. Η ζήτηση για ειδικούς στην έρευνα και την ανάπτυξη, την ενθάρρυνση και συνηγορία νομοσχεδίων και την εκπαίδευση αυξάνεται, επεκτείνοντας περαιτέρω τα οικονομικά πλεονεκτήματα.

Οι επενδύσεις σε έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γίνονται κεντρικός μοχλός των σχεδίων οικονομικής δραστηριότητας καθώς οι κυβερνήσεις και οι εταιρείες σε όλο τον κόσμο δεσμεύονται να μειώσουν το αποτύπωμα άνθρακά τους και να στραφούν σε πιο καθαρές ενεργειακές επιλογές. Η επέκταση της βιομηχανίας ΑΠΕ προωθεί τις επενδύσεις, ενισχύει ένα περιβάλλον ευνοϊκό για την καινοτομία και βοηθά στην τοπική και περιφερειακή ανάπτυξη. Επιπλέον, καθώς ο κλάδος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ωριμάζει, ο αυξημένος ανταγωνισμός οδηγεί σε μείωση του κόστους, καθιστώντας τις ΑΠΕ όλο και πιο ανταγωνιστικές με τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας. Αυτή η ανταγωνιστικότητα είναι καλά νέα για τη μακροπρόθεσμη οικονομική ανάπτυξη καθώς και για την οικονομική προσιτότητα της ενέργειας [Εικόνα 6.1.2][176][177][178][179].

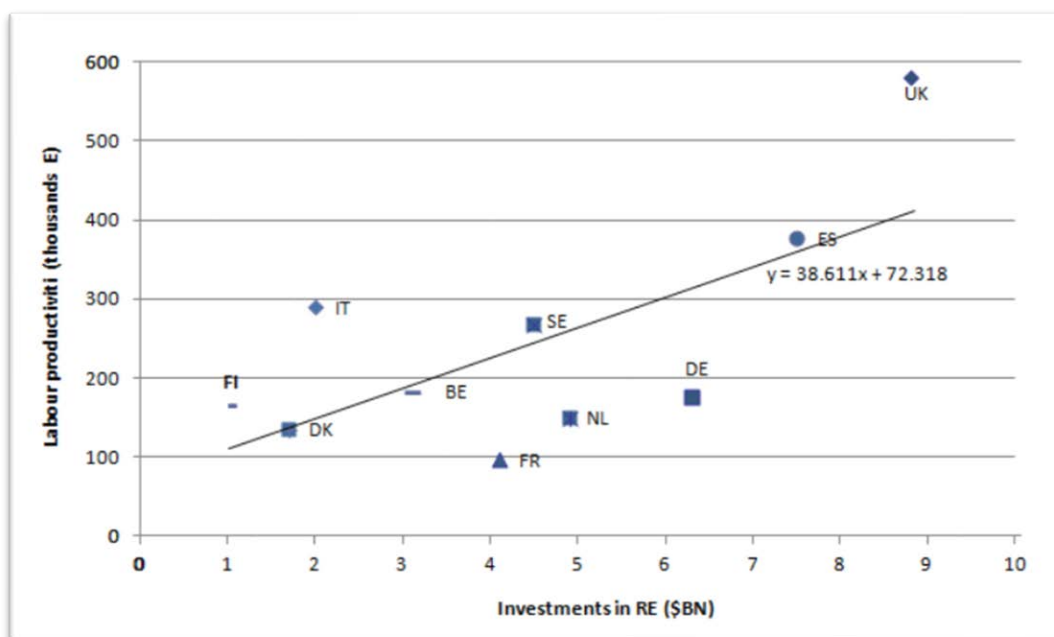


Εικόνα 6.1.2: Προβλεπόμενα οικονομικά οφέλη της ανανεώσιμης ενέργειας με βάση τα δεδομένα της IRENA μέχρι το έτος 2030 [180].

6.1.4 Τεχνολογική Καινοτομία και Έρευνα

Καθώς τα έθνη και οι βιομηχανίες σε όλο τον κόσμο δεσμεύονται για βιώσιμες ενεργειακές λύσεις, ο τομέας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γίνεται κομβικό σημείο για την έρευνα και την καινοτομία. Οι κυβερνήσεις, οι ιδιωτικές επιχειρήσεις και τα ερευνητικά ιδρύματα διαθέτουν σημαντικούς πόρους για την προώθηση της αποτελεσματικότητας, της αξιοπιστίας και της επεκτασιμότητας των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η χρηματοδότηση της έρευνας κατανέμεται σε ένα ευρύ φάσμα τομέων, συμπεριλαμβανομένης της αποθήκευσης ενέργειας, της διαχείρισης δικτύου, της επιστήμης των υλικών και της μηχανικής. Τα ερευνητικά έργα επικεντρώνονται στην ανάπτυξη καινοτόμων συστημάτων αποθήκευσης που παρέχουν μια πιο αξιόπιστη ενσωμάτωση διακοπτόμενων ανανεώσιμων πηγών στο δίκτυο, καθώς και στη βελτιστοποίηση της απόδοσης [Σχήμα 6.1.1].



Σχήμα 6.1.1: Συσχέτιση επενδύσεων και παραγωγικότητας εργασίας σε ΑΠΕ στις χώρες της Ε.Ε. Οι επενδύσεις είναι κινητήριος παράγοντας για την αύξηση της αποδοτικότητας στον τομέα των ΑΠΕ [187].

Η ανάπτυξη τεχνολογικών συνεργασιών εκτός του ενεργειακού τομέα είναι ένα από τα κύρια οφέλη του όλου εγχειρήματος. Οι καινοτομίες των ΑΠΕ έχουν συχνά έμμεσο αντίκτυπο τη δημιουργία ευκαιριών για συνεργασία με άλλους τομείς και τεχνολογία. Για παράδειγμα, οι εξελίξεις στις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας έχουν στενή σχέση με τη βιομηχανία ανανεώσιμων πηγών, στοχεύοντας στην επίλυση προβλημάτων διακυμάνσεων. Η συμβολή της ψηφιοποίησης, της τεχνητής νοημοσύνης και του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) με τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ένα τρανταχτό παράδειγμα. Τα έξυπνα δίκτυα, που χαρακτηρίζονται από ψηφιακές τεχνολογίες, ενισχύουν την αποδοτικότητα της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, βελτιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας και επιτρέπουν την παρακολούθηση και τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο. Ο δυναμικός χαρακτήρας της βιομηχανίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ενισχύει τη συνεργασία μεταξύ νέων και καθιερωμένων επιχειρήσεων καθώς και ερευνητικών ιδρυμάτων, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός ακμάζοντος οικοσυστήματος που επιταχύνει την πρόοδο της τεχνολογίας [181][182][183][184][185][186][187].

6.2 Αρνητικές επιδράσεις στα δίκτυα ενέργειας

6.2.1 Διαλείψεις και Μεταβλητότητα

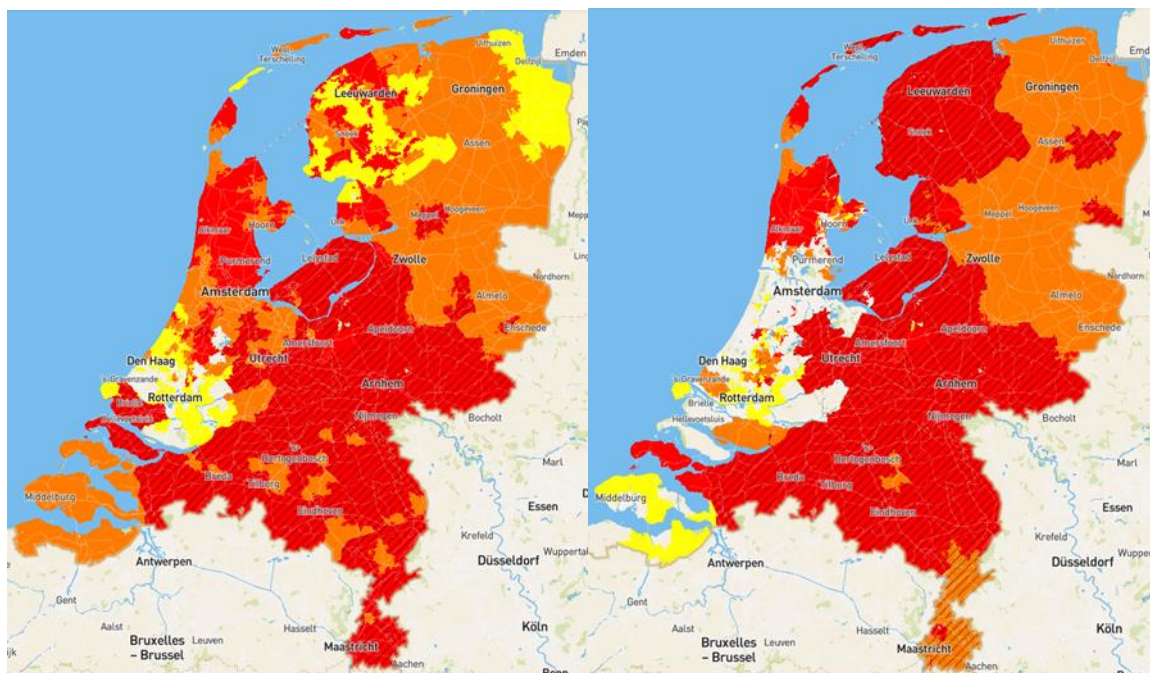
Έχουμε συζητήσει ενδελεχώς για το πρόβλημα αυτό σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η ηλιακή και αιολική ενέργεια είναι κυμαινόμενες και ασταθείς πηγές ενέργειας. Η ενσωμάτωσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο θα σημαίνει μεταβαλλόμενη παροχή ενέργειας, κάτι που προφανώς είναι απαγορευτικό για έναν πάροχο ενεργειακών υπηρεσιών. Για αυτό το λόγο απαιτείται ανάπτυξη και χρησιμοποίηση πρόσθετων τεχνολογιών, όπως οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας (για λεπτομέρειες βλέπε 3.1.1).

6.2.2 Δικτυακή Συμφόρηση

Η συμφόρηση δικτύου αναφέρεται σε μια κατάσταση σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας όπου η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια υπερβαίνει τη διαθέσιμη χωρητικότητα μεταφοράς, οδηγώντας σε σημεία συμφόρησης και πιθανές διακοπές στη ροή της ηλεκτρικής ενέργειας. Η χωρική συγκέντρωση των μονάδων ανανεώσιμης ενέργειας είναι ένα σημαντικό στοιχείο που προκαλεί συμφόρηση του συστήματος. Για παράδειγμα, οι ηλιακές εγκαταστάσεις και τα αιολικά πάρκα βρίσκονται συχνά σε περιοχές με τους καλύτερους διαθέσιμους πόρους. Ωστόσο, αυτές οι περιοχές ενδέχεται να μην διαθέτουν την υποδομή μεταφοράς που απαιτείται για τη μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές με υψηλή ζήτηση.

Κατά την ενσωμάτωση μεταβαλλόμενων ανανεώσιμων πηγών, η ακαμψία των παραδοσιακών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας - τα οποία κατασκευάστηκαν για να υποστηρίξουν κεντρική παραγωγή ενέργειας - μπορεί να προκαλέσει συμφόρηση. Η αδυναμία του δικτύου να προσαρμοστεί έγκαιρα στις διακυμάνσεις της προσφοράς ή της ζήτησης θα μπορούσε να οδηγήσει σε συγκεκριμένα σημεία συμφόρησης.

Μερικές φορές η αυξημένη ροή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από τις εγκαταστάσεις παραγωγής στα κέντρα πληθυσμού μπορεί να είναι υπερβολική για να χειριστεί το τρέχον σύστημα μεταφοράς. Μπορεί να προκύψει συμφόρηση από αυτή την ανεπαρκή ικανότητα μεταφοράς, γεγονός που καθιστά δυσκολότερη την πλήρη υλοποίηση της υπόσχεσης για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες ευθύνονται - σε διαφορετικά ποσοστά ανάλογα με την περίπτωση - για τη δικτυακή συμφόρηση και κατ' επέκταση για την μείωση της εμπιστοσύνης του κοινού προς το δίκτυο [βλ Εικόνες 6.2.1 και 6.2.2] [44][188][189][190].



Εικόνα 6.2.1: Χάρτης της Ολλανδίας. Παροχή συμφόρησης δικτύου (αριστερά).

Εικόνα 6.2.2: Χάρτης της Ολλανδίας. Τροφοδοσία συμφόρησης δικτύου (δεξιά).

Ο χάρτης φαίνεται επί το πλείστον κόκκινος σκιασμένος και στις δύο περιπτώσεις που σημαίνει ότι δεν υπάρχει διαθέσιμη μεταφορική ικανότητα: έχουν επιτευχθεί τα όρια για την εφαρμογή διαχείρισης συμφόρησης. Τα δεδομένα αφορούν Φεβρουάριο του 2024 [191].

Η ενίσχυση της ανθεκτικότητας και της αποδοτικότητας των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μιας ολοκληρωμένης σειράς λύσεων είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση προβλημάτων συμφόρησης του δικτύου. Για τη διαχείριση της αυξημένης ροής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στα κέντρα ζήτησης, είναι απαραίτητες οι αναβαθμίσεις και οι επεκτάσεις των υποδομών μεταφοράς. Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του δικτύου και να μειωθεί η συμφόρηση, χρειάζονται προηγμένες τεχνολογίες διαχείρισης δικτύου, όπως συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, σχέδια απόκρισης ζήτησης και παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο.

Ο αυτοματισμός και η τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών σε συνδυασμό με λύσεις έξυπνου δικτύου επιτρέπουν πιο προσαρμοστικό και ευέλικτο έλεγχο δικτύου. Επιπλέον, προκειμένου να εντοπιστούν πιθανές περιοχές συμφόρησης και να ληφθούν προληπτικά μέτρα, οι διαχειριστές του δικτύου, οι νομοθέτες και οι φορείς ανάπτυξης ΑΠΕ πρέπει να συντονίζονται και να συμμετέχουν σε στρατηγικό σχεδιασμό. Μπορούμε να εγγραφούμε την ομαλή ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μειώνοντας παράλληλα τις

διακοπές και αξιοποιώντας στο έπακρο τις ήδη υπάρχουσες υποδομές, προωθώντας ένα δυναμικό και ανταποκρινόμενο ενεργειακό δίκτυο (Για ενδελεχείς πληροφορίες βλέπε ενότητες 5.3. και 5.4.).

6.2.3 Χρήση της γης και Περιβαλλοντικές ανησυχίες

Η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αν και είναι απαραίτητη για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και τη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα, εισάγει ορισμένες χρήσεις γης και περιβαλλοντικές ανησυχίες που απαιτούν προσεκτική εξέταση.

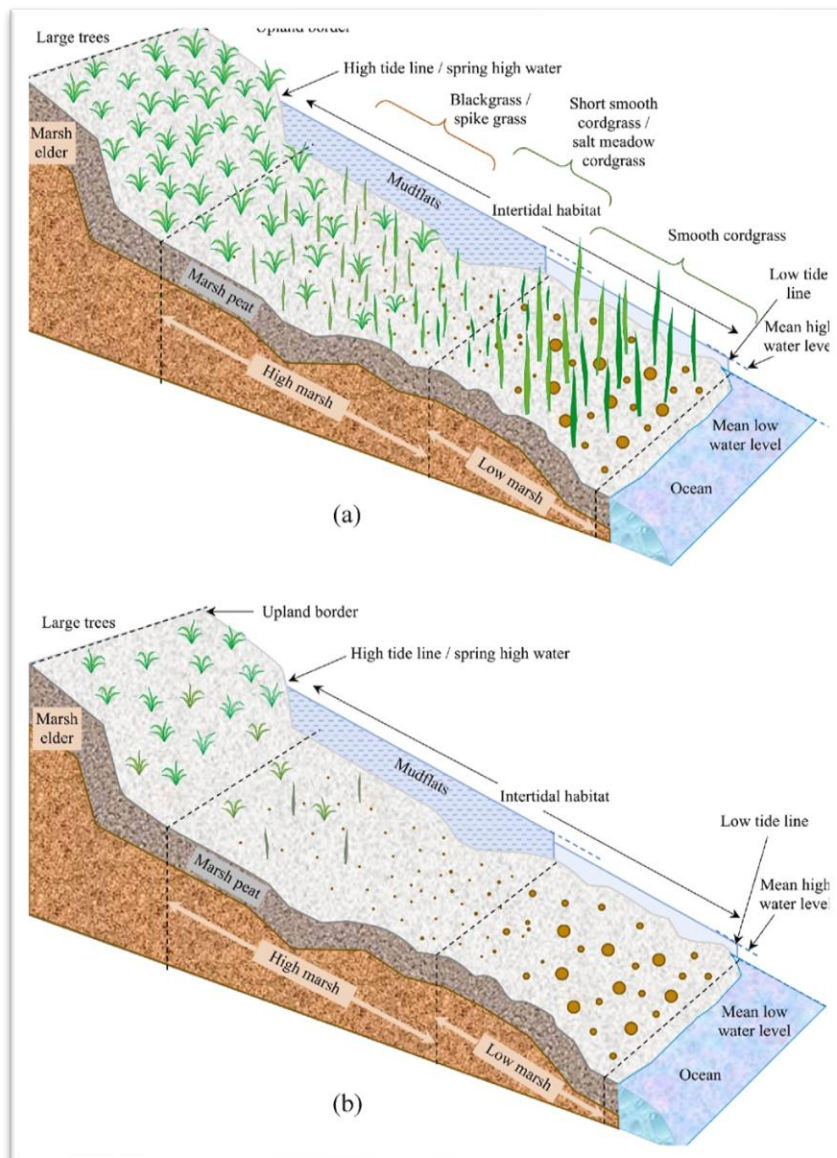
Οι εγκαταστάσεις υποδομής των ΑΠΕ μεγάλης κλίμακας, όπως τα αιολικά και ηλιακά πάρκα, χρειάζονται μεγάλο μέρος γης. Ιδιαίτερα στα χερσαία αιολικά πάρκα, τα ηλιακά φωτοβολταϊκά πάνελ και οι ανεμογεννήτριες μπορούν να καταλαμβάνουν μεγάλες ποσότητες χώρου, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει διαταραχή των οικοτόπων, μεταβάσεις και κατακερματισμό της γης. Αυτό θα μπορούσε να έχει επιπτώσεις στη γεωργία, τη βιοποικιλότητα και τα τοπικά οικοσυστήματα.

Αρνητικές κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εξόρυξη πρώτων υλών για τεχνολογία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι επίσης μία πολύ αληθινή ανησυχία. Σε περιοχές εξόρυξης, η εξόρυξη ορυκτών όπως σπάνια στοιχεία για χρήση σε ανεμογεννήτριες και ηλιακούς συλλέκτες, μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα με τα ανθρώπινα δικαιώματα, καταστροφή της φυσικής ισορροπίας και ρύπανση των υδάτων. Προγράμματα ανακύκλωσης και οι βιώσιμοι μέθοδοι εφοδιασμού είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση αυτών των επιπτώσεων.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια και η βιοενέργεια είναι δύο παραδείγματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που μπορεί να έχουν αντίκτυπο στην παροχή νερού. Η παραγωγή βιοενεργειακών καλλιεργειών μπορεί να απαιτήσει μεγάλες εισροές νερού, οι οποίες θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα του τοπικού νερού. Τα μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικά έργα έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν το υδάτινο περιβάλλον και τη μετανάστευση των ψαριών στα ποτάμια [βλ Εικόνα 6.2][98][99][106][107][172][192].

Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας περιλαμβάνει προσεκτικό σχεδιασμό και προληπτικά μέτρα για τον μετριασμό των περιβαλλοντικών κινδύνων. Οι τεχνικές βιώσιμης χωροθέτησης είναι ζωτικής σημασίας, καθώς συνεπάγονται την προσεκτική επιλογή τοποθεσιών για εγκαταστάσεις ΑΠΕ προκειμένου να μειωθούν οι αρνητικές επιπτώσεις τους στα οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα. Ο εντοπισμός και ο μετριασμός των πιθανών

οικολογικών κινδύνων διευκολύνεται, ακόμη, με τη διεξαγωγή ολοκληρωμένων μελετών περιβαλλοντικών επιπτώσεων πριν από την κατασκευή του έργου.



Εικόνα 6.2.: Αλυκή κοντά σε λασπότοπους: (α) σε φυσική κατάσταση και (β) μετά την εγκατάσταση υδροηλεκτρικού φράγματος [171].

Επιπλέον, οι βελτιώσεις στην επιστήμη και την τεχνολογία των υλικών μπορούν να συμβάλουν στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των υποδομών. Τα ανακυκλωμένα υλικά και οι κατάλληλες τεχνικές για την απαλλαγή από παλαιωμένα εξαρτήματα, είναι το κλειδί για τη μείωση της ποσότητας των ηλεκτρικών σκουπιδιών που παράγονται. Η συμμετοχή των τοπικών κοινοτήτων και η αξιοποίηση της τεχνογνωσίας τους στη φάση του σχεδιασμού προωθεί μια πιο ολοκληρωμένη στρατηγική για τη διατήρηση του περιβάλλοντος. Η διασφάλιση ότι τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης των ΑΠΕ αντισταθμίζουν τυχόν πιθανά μειονεκτήματα απαιτεί την υιοθέτηση καινοτόμων και βελτιωμένων τεχνικών διατήρησης όπως επίσης και ισχυρά ρυθμιστικά πλαίσια. Αυτό

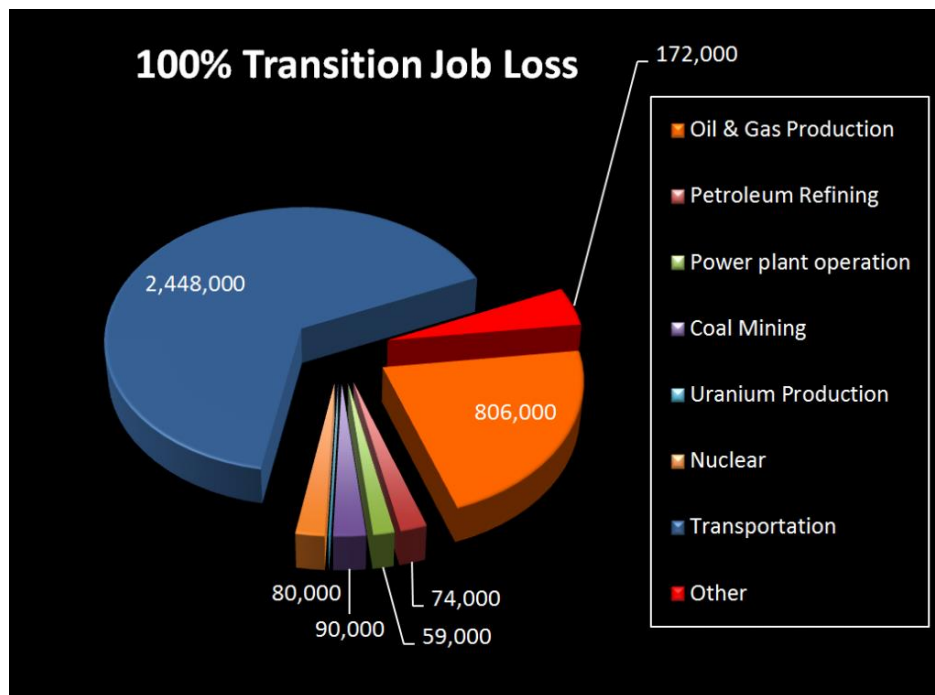
προωθεί μια πιο βιώσιμη και ειρηνική συνύπαρξη μεταξύ της ανάπτυξης της ενέργειας και του περιβάλλοντος.

6.2.4 Οικονομικές Διαταραχές

Απώλειες εργασίας σε βιομηχανίες συναφείς με την παλιά καθιερωμένη παραγωγή ενέργειας μπορεί να προκύψουν από την εξάντληση των συμβατικών πηγών όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο. Καθώς η ανάγκη για ορυκτά καύσιμα μειώνεται, οι εργαζόμενοι που ασχολούνται με την εξόρυξη, την επεξεργασία και την παραγωγή τους μπορεί να βιώσουν την ανεργία. Ένα από τα πιο σημαντικά μέρη του χειρισμού των οικονομικών διαταραχών είναι η αναδιάταξη αυτού του προσωπικού σε νέες θέσεις στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ή σε άλλες συναφείς επιχειρήσεις.

Επίσης, οικονομικές πτώσεις ενδέχεται να εμφανιστούν σε περιοχές που βασίζονται σημαντικά στις παραδοσιακές μεθόδους εξόρυξης ενέργειας. Η οικονομική δραστηριότητα σε κοινότητες που εξαρτώνται από την παραγωγή φυσικού αερίου, την εξόρυξη άνθρακα ή την εξόρυξη πετρελαίου μπορεί να μειωθεί όταν η ζήτηση μειώνεται. Η δημιουργία εναλλακτικών βιομηχανιών και η διαφοροποίηση των τοπικών οικονομιών είναι πλέον ζωτικής σημασίας για την ελαχιστοποίηση αυτών των διαταραχών.

Οι αλυσίδες ανεφοδιασμού μπορεί να χρειαστεί να αλλάξουν ως αποτέλεσμα των αλλαγών στην ενεργειακή κατάσταση. Καθώς η ζήτηση κινείται προς τις ανανεώσιμες τεχνολογίες, οι βιομηχανίες που ασχολούνται με την κατασκευή και την πώληση παραδοσιακού εξοπλισμού που σχετίζεται με την ενέργεια ενδέχεται να αντιμετωπίσουν δυσκολίες. Οι διαταραχές μπορούν να μειωθούν με την τροποποίηση των αλυσίδων εφοδιασμού και την ενθάρρυνση της καινοτομίας από πλευράς των παραδοσιακών και καθιερωμένων βιομηχανιών της οικονομίας [193][194][195].



Σχήμα 6.2.1: Προβλεπόμενες χαμένες θέσεις εργασίας, ως αποτέλεσμα της ολοκληρωτικής μετάβασης (100%) στις ΑΠΕ με βάση τα δεδομένα από το σάιτ του Δρ Mark Z. Jacobson στο Πανεπιστήμιο του Στάνφορντ [196].

Η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει οδηγήσει σε οικονομικές διαταραχές που πρέπει να αντιμετωπιστούν με μια διαφοροποιημένη προσέγγιση εστιασμένη σε προληπτικές λύσεις. Οι κοινότητες, τα ενδιαφερόμενα μέρη του κλάδου και οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής πρέπει να συνεργαστούν για να θέσουν σε εφαρμογή λύσεις που μειώνουν τις επιζήμιες επιπτώσεις στην απασχόληση και την οικονομική σταθερότητα. Μια πιο απρόσκοπτη στροφή προς τις ανανεώσιμες βιομηχανίες καθίσταται δυνατή με πρωτοβουλίες όπως τα εκτεταμένα προγράμματα κατάρτισης των εργαζομένων, τα οποία αποσκοπούν στην αναβάθμιση των δεξιοτήτων και στην αναβάθμιση των ατόμων από τους παραδοσιακούς τομείς ενέργειας.

Επιπλέον, η ενίσχυση των τοπικών οικονομιών μέσω της διαφοροποίησης —ειδικά σε περιοχές που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη συμβατική εξόρυξη ενέργειας— μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και στην οικονομική επέκταση. Μια ισορροπημένη οικονομική μετάβαση διευκολύνεται από έξυπνες πολιτικές που ενθαρρύνουν την καινοτομία και φέρνουν κεφάλαια τόσο σε συμβατικές όσο και σε ανανεώσιμες βιομηχανίες. Επιπλέον, η υποστήριξη έργων E&A που επικεντρώνονται στη βιώσιμη τεχνολογία μπορεί να ανοίξει νέες αγορές και τομείς της οικονομίας, μειώνοντας τους οικονομικούς κλυδωνισμούς που προκαλεί το μεταβαλλόμενο ενεργειακό τοπίο. Οι

κοινωνίες θα μπορούν να διαχειριστούν αποτελεσματικά τις οικονομικές αλλαγές που επιφέρει η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αν υιοθετήσουν μια προληπτική και χωρίς αποκλεισμούς προσέγγιση, με σκοπό μια δίκαιη και χωρίς επιπλοκές ενεργειακή μετάβαση.

Κεφάλαιο 7 Μελέτες περίπτωσης και βέλτιστες πρακτικές

Η αποτελεσματικότητα της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γίνεται καλύτερα κατανοητή μέσω πραγματικών περιπτώσιολογικών μελετών που παρουσιάζουν επιτυχημένες υλοποιήσεις και παρέχουν πολύτιμες γνώσεις για το ευρύτερο ενεργειακό τοπίο. Αυτό το κεφάλαιο εμβαθύνει σε διάφορες περιπτώσιολογικές μελέτες, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη ανάλυση των επιτυχημένων πρακτικών ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

7.1 Παραδείγματα επιτυχίας ενσωμάτωσης ηλιακής ενέργειας στο δίκτυο

7.1.1 Η πόλη του Σαν Ντιέγκο

Το Σαν Ντιέγκο (Καλιφόρνια, ΗΠΑ) ξεχωρίζει ως πρωτοπόρος στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, παρουσιάζοντας μια ενδεδειγμένη και αποτελεσματική στρατηγική που συνδυάζει την καινοτομία στην τεχνολογία, τη συμμετοχή της κοινότητας και την προοδευτική νομοθεσία. Οι αστικές περιοχές που στοχεύουν να στραφούν προς βιώσιμες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να αντλήσουν έμπνευση από την αξιοσημείωτη ιστορία επιτυχίας αυτής της πόλης.

Για να διαχειριστεί αποτελεσματικά τις διακυμάνσεις της, η πόλη χρησιμοποιεί τεχνολογικές καινοτομίες, όπως έξυπνους μετατροπείς, αποθήκευση ενέργειας σε κλίμακα δικτύου και εξελιγμένους αλγόριθμους πρόβλεψης.

Παρέχοντας κίνητρα και επισπεύδουσες διαδικασίες για την εγκατάσταση ηλιακών πάνελ σε σπίτια και επιχειρήσεις, η πόλη ενθάρρυνε επιθετικά τους πολίτες να συμμετάσχουν στη στροφή προς την ηλιακή ενέργεια. Εκτός από τη μείωση της εξάρτησης από κεντρικές πηγές, αυτό το μοντέλο επιτρέπει στην κοινότητα να υποστηρίξει ενεργά τους στόχους της πόλης για τις ΑΠΕ.

Η πόλη έθεσε σε εφαρμογή μέτρα για την προώθηση της χρήσης ηλιακής ενέργειας, όπως συμφέρουσες συμφωνίες net metering που επιτρέπουν στα σπίτια που λειτουργούν με ηλιακή ενέργεια να πωλούν την περίσσεια ενέργειά τους πίσω στο δίκτυο. Αυτά τα κίνητρα προώθησαν έναν βιώσιμο τρόπο ζωής μεταξύ των ντόπιων και των εταιρειών, ενώ ταυτόχρονα ενθάρρυναν τις ιδιωτικές επενδύσεις σε ηλιακά έργα [Εικόνα 7.1.1][197][198][199][200][201].



Εικόνα 7.1.1: Φωτοβολταϊκό σύστημα πολλαπλών οικογενειών στην πόλη του Σαν Μάρκος, στα βόρεια της κομητείας του Σαν Ντιέγκο.

7.1.2 Η Energiewende της Γερμανίας

Η πρωτοβουλία Energiewende της Γερμανίας αποτελεί μετασχηματιστικό μοντέλο για την επιτυχή ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε ένα εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το φιλόδοξο έργο, που ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 2000, είχε ως στόχο τη μετάβαση της χώρας προς ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα, με μεγάλη έμφαση στην αιολική και ηλιακή ενέργεια. Η επιτυχία του Energiewende παρέχει πολύτιμες γνώσεις σχετικά με τις ολιστικές στρατηγικές που απαιτούνται για μια μετάβαση σε εθνικό επίπεδο προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η επιτυχία της Γερμανίας αποδόθηκε σε μεγάλο βαθμό στη χρήση ισχυρών νομοθετικών εργαλείων, κυρίως των τιμολογίων feed-in. Αυτά τα τιμολόγια έδωσαν στους παραγωγούς

ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μια σταθερή εγγύηση τιμής, η οποία ενθάρρυνε ανθρώπους και εταιρείες να συμμετάσχουν οικονομικά σε σταθμούς ηλιακής και αιολικής ενέργειας.

Η Energiewende προώθησε την αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας και ενθάρρυνε τους ιδιώτες και τις τοπικές ομάδες να γίνουν αγοραστές και να επιστρέφουν επιπλέον ενέργεια στο δίκτυο. Η μετάβαση της Γερμανίας προς τις ΑΠΕ χαρακτηρίστηκε επίσης από την εμφάνιση κοινοτικών έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως οι αιολικοί συνεταιρισμοί.

Η ανακαίνιση του δικτύου ήταν η κορυφαία προτεραιότητα της Γερμανίας προκειμένου να χειριστεί την ακανόνιστη φύση των ΑΠΕ. Η ανταπόκριση στη ζήτηση, η αποτελεσματική διαχείριση της ροής ενέργειας και η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο κατέστησαν το σύστημα ικανό να διατηρήσει μια σταθερή παροχή ενέργειας.

Τέλος, η Γερμανία πραγματοποίησε μεγάλες επενδύσεις στην κατασκευή της υποδομής του δικτύου της, συμπεριλαμβανομένων των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης που συνδέουν αστικές περιοχές και περιοχές πλούσιες σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτή η προληπτική στρατηγική μείωσε τα σημεία συμφόρησης του δικτύου και βελτίωσε τη συνολική αξιοπιστία του δικτύου [Εικόνα 7.1.2][202][203][204][205].



Εικόνα 7.1.2: Ηλιακές εγκαταστάσεις στέγης στο Φράιμπουργκ, Γερμανία.

7.1.3 Ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Συστήματος της Καλιφόρνια – CAISO

Ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Συστήματος της Καλιφόρνια (California's Independent System Operator) έχει αναδειχθεί ως πρωτοποριακό παράδειγμα αποτελεσματικής διαχείρισης δικτύου στο πλαίσιο της ενσωμάτωσης σημαντικού μεριδίου ανανεώσιμης ενέργειας. Λειτουργώντας ένα από τα πιο δυναμικά και πλούσια σε ανανεώσιμες πηγές δίκτυα στον κόσμο, η CAISO έχει επιδείξει καινοτόμες στρατηγικές και τεχνολογίες για να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις που θέτουν οι μεταβλητές ανανεώσιμες πηγές, ιδιαίτερα η ηλιακή ενέργεια.

Η CAISO έχει αγκαλιάσει την τεχνολογία synchrophasor, η οποία παρέχει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για τις συνθήκες του δικτύου. Οι διαχειριστές δικτύων μπορούν να παρακολουθούν την τάση, το ρεύμα και τη συχνότητα με ακρίβεια ανήκουστη μέχρι τώρα. Έτσι, μπορούν να προσαρμόζονται γρήγορα στις αλλαγές στην παραγωγή ηλιακής ενέργειας, διασφαλίζοντας τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του δικτύου.



Εικόνα 7.1.3: Το ηλιακό πάρκο Mount Signal 2 στο Καλέξικο, Καλιφόρνια.

Το μυστικό της επιτυχίας της CAISO είναι τα προηγμένα εργαλεία μοντελοποίησης δικτύου, τα οποία επιτρέπουν σε βάθος ανάλυση και προσομοιώσεις. Μέσω της πρόβλεψης και της κατανόησης των επιπτώσεων της διακύμανσης της ηλιακής ενέργειας, η CAISO μπορεί να

λάβει προληπτικά μέτρα για τη διαχείριση της προσφοράς και της ζήτησης, μεγιστοποιώντας τη χρήση των ΑΠΕ χωρίς να διακυβεύεται η ακεραιότητα του δικτύου.

Η CAISO έχει δώσει προτεραιότητα στη διασύνδεση των ανανεώσιμων πηγών, συμπεριλαμβανομένων των μεγάλης κλίμακας ηλιακών εγκαταστάσεων. Οι απλοποιημένες διαδικασίες διασύνδεσης και η αφοσίωση στην ανάπτυξη του δικτύου έχουν διευκολύνει την αποτελεσματική ενσωμάτωση αυτών των πόρων στο σύστημα. Έτσι, η Καλιφόρνια μπόρεσε να αξιοποιήσει την ηλιακή ενέργεια από διάφορες γεωγραφικές τοποθεσίες [Εικόνα 7.1.3][206][207][208][209][210].

7.2 Παραδείγματα επιτυχίας ενσωμάτωσης αιολικής ενέργειας στο δίκτυο

7.2.1 Δανία: Ένα πρωτοποριακό μοντέλο για τη βιώσιμη ενέργεια

Η Δανία έχει κερδίσει παγκόσμια αναγνώριση για την εξαιρετική ηγετική της θέση στην ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό της τοπίο. Η επιτυχία της μπορεί να αποδοθεί σε έναν συνδυασμό οραματικών πολιτικών, στρατηγικών επενδύσεων και δεσμεύσεων για τεχνολογική καινοτομία. Η εξέταση της πορείας της Δανίας παρέχει πολύτιμες γνώσεις σχετικά με τους βασικούς παράγοντες που έχουν ωθήσει το έθνος στην πρώτη γραμμή της επανάστασης της αιολικής ενέργειας.

Η Δανία ήταν μια από τις πρώτες χώρες που κατάλαβε τις δυνατότητες της αιολικής ενέργειας και ενθάρρυνε την ανάπτυξή της με προοδευτικούς νόμους. Η εφαρμογή τιμολογίων τροφοδοσίας και ευνοϊκών ρυθμιστικών πλαισίων ενίσχυσε την εμπιστοσύνη των επενδυτών και την ανάπτυξη έργων αιολικής ενέργειας δημιουργώντας μια ατμόσφαιρα ευεργετική για την επέκτασή τους.

Η αποτελεσματική χρήση των αιολικών πόρων κατέστη δυνατή με την ενσωμάτωση της τεχνολογίας έξυπνων δικτύων, όπως τα εξελεγχόμενα εργαλεία πρόβλεψης και τα συστήματα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο.

Το έθνος έχει δημιουργήσει ένα τεράστιο, διασυνδεδεμένο δίκτυο μεταφοράς που μεταφέρει αποτελεσματικά την ενέργεια από απομονωμένες τοποθεσίες, όπου παράγεται, στις μεγάλες πόλεις. Αυτή η προορατική στρατηγική εγγυάται την καλύτερη δυνατή χρήση των αιολικών πόρων, ενώ μειώνει τα σημεία συμφόρησης στη μεταφορά.

Η στρατηγική της Δανίας ξεχωρίζει λόγω της εστίασής της στην αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας και τη συμμετοχή της κοινότητας. Το έθνος επινόησε την ιδέα των αιολικών

συνεταιρισμών, που επιτρέπουν στους ντόπιους να έχουν ενεργό ρόλο και να επωφελοούνται από έργα αιολικής ενέργειας.

Η Δανία βρίσκεται στην πρώτη γραμμή των τεχνολογικών εξελίξεων στον σχεδιασμό ανεμογεννητριών. Ο τομέας της αιολικής ενέργειας της χώρας προωθεί ξεπερνάει συνεχώς τα όρια της καινοτομίας δημιουργώντας πιο εξελιγμένα συστήματα ελέγχου, ψηλότερους πύργους και πτερύγια που είναι πιο αποτελεσματικά.

Η ηγετική θέση της Δανίας στην αιολική ενέργεια εκτείνεται πέρα από τα σύνορά της μέσω της ενεργού συμμετοχής σε διεθνείς συνεργασίες και της ανταλλαγής γνώσεων. Η χώρα έχει συμβάλει καθοριστικά στην προώθηση παγκόσμιων πρωτοβουλιών για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στην ανταλλαγή βέλτιστων πρακτικών με άλλα έθνη. Αυτή η συλλογική προσέγγιση συμβάλλει στην επιτάχυνση της υιοθέτησης της αιολικής ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα [Εικόνα 7.2.1][211][212][213][214].

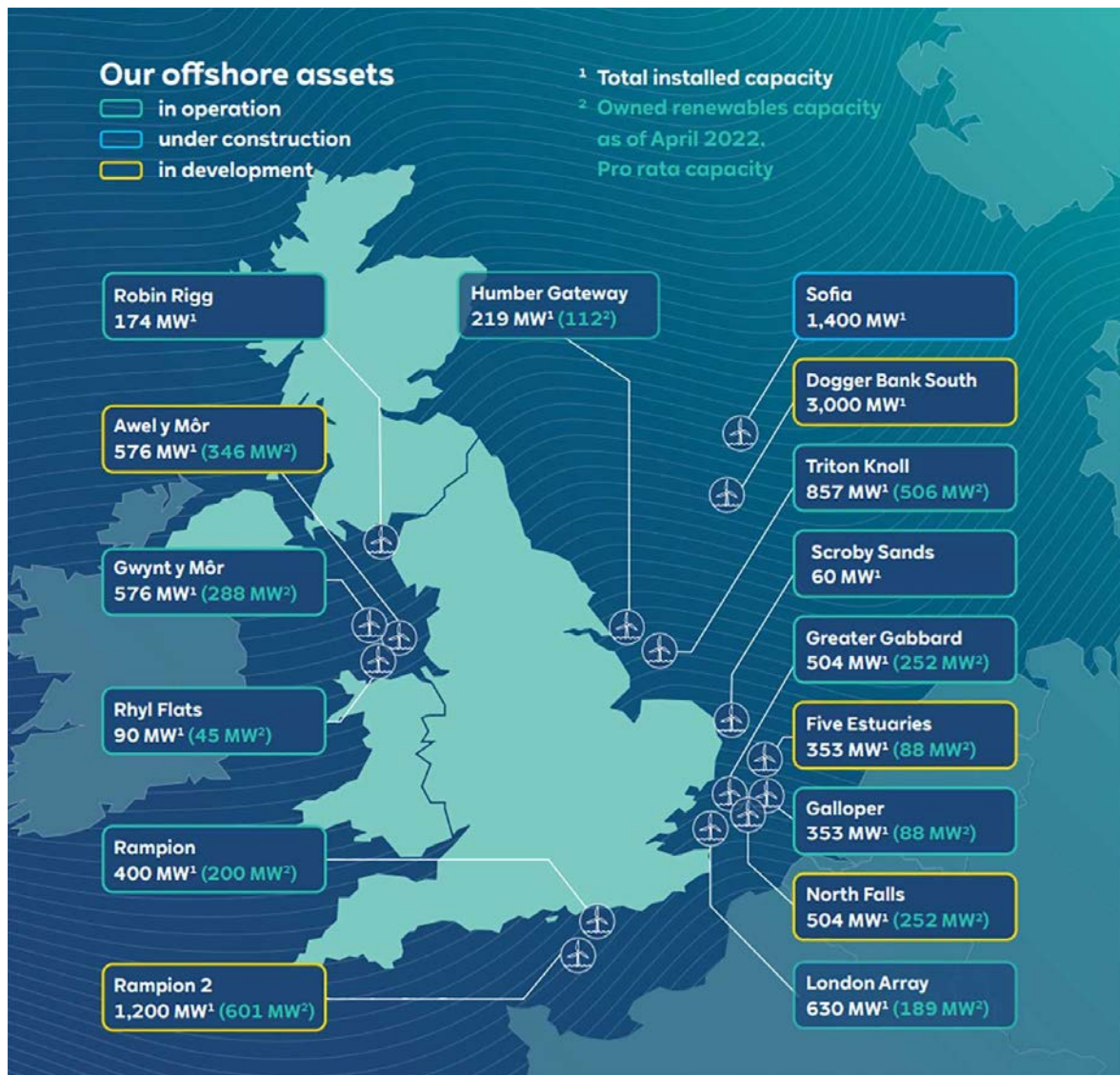


Εικόνα 7.2.1: Υπεράκτιο Αιολικό Πάρκο Thor, Βόρεια Θάλασσα.

7.2.2 Υπεράκτιος άνεμος στο Ηνωμένο Βασίλειο

Το Ηνωμένο Βασίλειο έχει αναδειχθεί ως παγκόσμιος ηγέτης στην ενσωμάτωση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, επιδεικνύοντας μια ιστορία επιτυχίας στη ναυτιλία στην υιοθέτηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η στρατηγική αξιοποίηση της εκτεταμένης ακτογραμμής του, σε συνδυασμό με την τεχνολογική καινοτομία και τις υποστηρικτικές πολιτικές, έχει ωθήσει το Ηνωμένο Βασίλειο στην πρώτη γραμμή της υπεράκτιας αιολικής ανάπτυξης, παρέχοντας πολύτιμα μαθήματα για άλλα παράκτια έθνη.

Η προσεκτική χαρτογράφηση των πόρων και η προσεκτική επιλογή τοποθεσίας είναι τα πρώτα βήματα προς την επιτυχία του Ηνωμένου Βασιλείου στην ενσωμάτωση υπεράκτιας αιολικής ενέργειας. Το HB έχει μεγιστοποιήσει την ανάπτυξη ΥΑΠ επιλέγοντας περιοχές με σημαντικό αιολικό δυναμικό και κατάλληλες συνθήκες βυθού.



Εικόνα 7.2.2: Υπεράκτια Αιολικά Project της εταιρίας RWE στο HB [219].

Όσον αφορά τη δημιουργία και την εφαρμογή τεχνολογιών αιχμής για ΥΑΠ, το HB είναι πρωτοπόρος στην ανάπτυξη πλωτών ανεμογεννητριών. Τα πλωτά αιολικά πάρκα επεκτείνουν τα όρια των πιθανών εκμεταλλεύσιμων περιοχών σε νέα μέρη μακρύτερα από την ακτή.

Το ρυθμιστικό πλαίσιο του HB ήταν πολύ σημαντικό για την προώθηση αυτού του εγχειρήματος. Συστήματα υποστήριξης όπως το Contracts for Difference (CfD) παρέχουν στους προγραμματιστές μια σταθερή και προβλέψιμη πηγή εισοδήματος, η οποία ενθαρρύνει τις επενδύσεις σε μεγάλα υπεράκτια έργα, προσελκύοντας επενδυτές από το εξωτερικό και τις εγχώριες αγορές.

Τα ΥΑΠ έχουν κερδίσει δημοτικότητα λόγω της συμμετοχής της κοινότητας στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων και στα προγράμματα κατανομής εσόδων για τις παράκτιες πόλεις. Επιπλέον, ο κλάδος συμβάλλει σημαντικά στην οικονομική επέκταση, ενισχύοντας τις τοπικές οικονομίες και δημιουργώντας θέσεις εργασίας σε περιοχές που φιλοξενούν υπεράκτιες αιολικές υποδομές [Εικόνα 7.2.2][215][216][217][218].

7.2.3 Η μετάβαση της Γερμανίας στην αιολική ενέργεια

Η γερμανική πρωτοβουλία Energiewende, αν και συνδέεται συχνά με την ηλιακή ενέργεια, έχει επίσης σημειώσει σημαντική επιτυχία στην ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας στην ξηρά. Η μετάβαση στην αιολική ενέργεια είναι βαθιά ριζωμένη στη δέσμευση της Γερμανίας να καταργήσει σταδιακά την πυρηνική ενέργεια και να μειώσει τις εκπομπές άνθρακα. Η στρατηγική προσέγγιση της χώρας περιλαμβάνει έναν συνδυασμό αποκεντρωμένων αιολικών έργων, τεχνολογικής καινοτομίας και ολιστικού μετασχηματισμού του ενεργειακού συστήματος.

Η εστίαση σε αποκεντρωμένα έργα και η κοινοτική συμμετοχή είναι ένα από τα καθοριστικά χαρακτηριστικά της επανάστασης της αιολικής ενέργειας της Γερμανίας. Οι τοπικές κοινότητες ενθαρρύνονται να κατέχουν και να επωφελούνται από αιολικά έργα. Αυτή η αποκεντρωμένη προσέγγιση υποστηρίζει κοινοτικά προγράμματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη Γερμανία και προωθεί την κοινωνική αποδοχή.

Η μετάβαση στην αιολική ενέργεια στη Γερμανία αποτελεί στοιχείο μιας ευρύτερης αναμόρφωσης του ενεργειακού συστήματος που περιλαμβάνει και άλλες ΑΠΕ. Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα ποικίλο και ανθεκτικό ενεργειακό χαρτοφυλάκιο, η αιολική ενέργεια συνεργάζεται με την ηλιακή και άλλες ανανεώσιμες. Αυτή η ενοποίηση εποπτεύεται υπό το πλαίσιο ενός ολοκληρωμένου ενεργειακού σχεδίου που επιδιώκει το χαμηλό κόστος, την ασφάλεια και τη βιωσιμότητα.

Η συνολική απόδοση των αιολικών πάρκων έχει αυξηθεί λόγω της προόδου στην απόδοση των ανεμογεννητριών, της κατασκευής ψηλότερων πύργων και των βελτιστοποιημένων σχεδίων ρότορα. Η αφοσίωση της Γερμανίας στην E&A διατηρεί την αιολική βιομηχανία

της χώρας στην πρώτη γραμμή της τεχνικής προόδου, μειώνοντας τις τιμές και ενισχύοντας την ανταγωνιστικότητα.

Η Γερμανία συμμετέχει ενεργά στη διεθνή συνεργασία και στο πολιτικό λόμπι για την ενθάρρυνση της ευρείας χρήσης της αιολικής ενέργειας. Συμβάλλει στην πολύτιμη παγκόσμια συζήτηση για τις βιώσιμες ενεργειακές μεταβάσεις μοιράζοντας τις βέλτιστες πρακτικές και τις εμπειρίες της. Η αφοσίωση του έθνους στις διπλωματικές και συνεργατικές προσπάθειες υπογραμμίζει την ανάγκη ομαδικής προσπάθειας για την αντιμετώπιση κλιματικών ζητημάτων [Εικόνα 7.2.3][203][220][221][222][223].



Εικόνα 7.2.3: Αιολικό πάρκο στο Λίντερμπεργκ, Γερμανία.

7.3 Παραδείγματα επιτυχίας ενσωμάτωσης υδροηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο

7.3.1 Το μνημειώδες Φράγμα Τριών Φαραγγιών στην Κίνα

Το φράγμα Τριών Φαραγγιών (Three Gorges Dam) στην Κίνα αποτελεί ένα από τα πιο φιλόδοξα μηχανολογικά έργα στην ιστορία, αναδεικνύοντας τις τεράστιες δυνατότητες της παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας σε τεράστια κλίμακα. Τοποθετημένο στον ποταμό Yangtze, το φράγμα εκτείνεται σε μήκος 2,3 χιλιομέτρων και υψώνεται σε ύψος 185 μέτρων, καθιστώντας το τον μεγαλύτερο σταθμό ηλεκτροπαραγωγής στον κόσμο από άποψη εγκατεστημένης ισχύος.

Η κατασκευή του φράγματος ξεκίνησε το 1994 και ολοκληρώθηκε το 2006, γεγονός που ήταν ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός για την Κίνα στην επιδίωξή της για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ενεργειακή ασφάλεια. Με μια εκπληκτική χωρητικότητα άνω των 22.500 μεγαβάτ, το φράγμα μπορεί να παράγει καθαρή ηλεκτρική ενέργεια για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες εκατομμυρίων ανθρώπων στην Κίνα.

Το φράγμα, το οποίο διαθέτει 32 κύριες γεννήτριες και δύο μικρότερες, μειώνει την εξάρτηση της Κίνας από τα ορυκτά καύσιμα και μετριάξει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Η κατασκευή ενός τέτοιου εγχειρήματος δε θα μπορούσε να μην συνοδεύεται από περιβαλλοντικό αντίλογο. Μεγάλες εκτάσεις γης πνίγηκαν, εκατομμύρια άνθρωποι αναγκάστηκαν να μετεγκατασταθούν και το οικοσύστημα της λεκάνης του ποταμού Yangtze άλλαξε με την κατασκευή της δεξαμενής. Τα περιβαλλοντικά ζητήματα, που περιλαμβάνουν την απώλεια οικοτόπων, την καθίζηση και την αλλαγή των προτύπων ροής του νερού έχουν προκαλέσει ανησυχίες για τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα του έργου.

Παρά τις δυσκολίες και τις αντιρρήσεις, η κατασκευή του φράγματος έχει παράξει σημαντικές γνώσεις και καινοτομία στον τομέα της μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικής παραγωγής. Η ολοκλήρωση του έργου χρησιμεύει ως απόδειξη της αξίας του προσεκτικού σχεδιασμού, της ισχυρής μηχανικής και της ενδεδειγμένης περιβαλλοντικής αξιολόγησης σε έργα υποδομής μεγάλης κλίμακας [Εικόνα 7.3.1][224][225][226][227].



Εικόνα 7.3.1: Το Φράγμα Three Gorges, Κίνα.

7.3.2 Υδροηλεκτρικά έργα Run-of-River του Μπουτάν

Το Μπουτάν, φωλιασμένο στα Ιμαλάια, έχει ενστερνιστεί τα υδροηλεκτρικά έργα ροής του ποταμού ως ακρογωνιαίο λίθο της στρατηγικής βιώσιμης ανάπτυξης του. Αξιοποιώντας τους άφθονους υδάτινους πόρους και το τραχύ έδαφος του, το Μπουτάν έχει αναδειχθεί ως ηγέτης στην αποκεντρωμένη παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, θέτοντας παράδειγμα για τις χώρες που αναζητούν λύσεις καθαρής, ανανεώσιμης ενέργειας.

Πολυάριθμα ποτάμια και ρέματα διασχίζουν το απόκρημνο έδαφος του Μπουτάν, παρέχοντας ένα τέλειο περιβάλλον για υδροηλεκτρικούς σταθμούς ροής του ποταμού. Το Μπουτάν χρησιμοποιεί μια μέθοδο που μεγιστοποιεί την παραγωγή ενέργειας από τους υδάτινους πόρους του, ενώ δίνει χαμηλή προτεραιότητα στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τα έργα υδροηλεκτρικής ενέργειας του Μπουτάν ξεχωρίζουν για την εστίασή τους στην κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη και την ιδιοκτησία της κοινότητας. Οι τοπικές κοινότητες έχουν πλέον την εξουσία να κατέχουν και να λειτουργούν μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικούς σταθμούς, διασφαλίζοντας ότι τα πλεονεκτήματα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατανέμονται δίκαια.

Οι εγκαταστάσεις ροής του ποταμού διατηρούν τους υδρόβιους οικοτόπους και επιτρέπουν στα ποτάμια να ρέουν φυσικά, ελαχιστοποιώντας έτσι την οικολογική διαταραχή. Η

αφοσίωση του Μπουτάν στη διατήρηση της βιοποικιλότητάς του, μαζί με την προσεκτική επιλογή τοποθεσιών και τις εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων, εγγυάται ότι η υδροηλεκτρική ανάπτυξη δεν θα επηρεάσει αρνητικά το όμορφο φυσικό περιβάλλον του έθνους.

Το δυναμικό υδροηλεκτρικής ενέργειας του Μπουτάν επέτρεψε στο έθνος να γίνει καθαρός εξαγωγέας ηλεκτρικής ενέργειας ενώ ταυτόχρονα καλύπτει τις εγχώριες ενεργειακές του ανάγκες. Το Μπουτάν μπόρεσε να εξάγει πλεονάζουσα υδροηλεκτρική ενέργεια σε περιφερειακές αγορές μέσω συμφωνιών συνεργασίας με γειτονικές χώρες, ιδιαίτερα την Ινδία. Φανερώνοντας την αφοσίωσή του στις εταιρικές σχέσεις βιώσιμης ανάπτυξης και στην περιφερειακή ενεργειακή ασφάλεια.

Η εφευρετικότητα και η ικανότητα του Μπουτάν να προσαρμόζεται στους τοπικούς περιορισμούς είναι οι κύριοι λόγοι για την επιτυχία του στον τομέα. Η προκλητική τοπογραφία και τα διαφορετικά υδρολογικά χαρακτηριστικά δημιουργούν ιδιαίτερα προβλήματα που απαιτούν εξειδικευμένες προσεγγίσεις και τεχνολογία αιχμής. Το Μπουτάν έχει αποδείξει την ικανότητά του για βιώσιμη ενεργειακή καινοτομία, υιοθετώντας σχέδια στροβίλων αιχμής, αποτελεσματική υποδομή μετάδοσης και τεχνολογίες έξυπνων δικτύων για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής και διανομής ενέργειας [Εικόνα 7.3.2] [228][229][230][231].



Εικόνα 7.3.2: Μικρής κλίμακας υδροηλεκτρική μονάδα RoR στο Μπουτάν [232].

7.3.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια αντλίας αποθήκευσης της Νορβηγίας

Το τραχύ έδαφος της Νορβηγίας και οι άφθονοι υδάτινοι πόροι έχουν τοποθετήσει τη χώρα ως ηγέτη στην αντλούμενη αποθήκευση υδροηλεκτρικής ενέργειας, παρέχοντας ένα σχέδιο για τη σταθερότητα του δικτύου και την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης με αντλία διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην εξισορρόπηση της διαλείπουσας λειτουργίας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, διασφαλίζοντας έναν αξιόπιστο και ανθεκτικό ενεργειακό εφοδιασμό.

Για την απρόσκοπτη μετάβαση σε ένα ενεργειακό μέλλον χαμηλών εκπομπών άνθρακα διατηρώντας παράλληλα τη σταθερότητα, τα έργα αποθήκευσης αντλίας της Νορβηγίας είναι απαραίτητα για την ενσωμάτωση μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια στο δίκτυο.

Το ενεργειακό τοπίο της Νορβηγίας έχει επικεντρωθεί εδώ και πολύ καιρό γύρω από την υδροηλεκτρική ενέργεια, η οποία παράγει το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας. Το τεράστιο δίκτυο συμβατικών εγκαταστάσεων υδροηλεκτρικής ενέργειας της Νορβηγίας ενισχύεται από την αντλούμενη αποθήκευση υδροηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αυξάνει την ικανότητα της χώρας να αποθηκεύει ενέργεια και να ελέγχει το σύστημα.

Οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης με αντλία αποδίδουν καλύτερα όταν χρησιμοποιούνται προηγμένα σχέδια τουρμπίνας, αποτελεσματικά συστήματα άντλησης και τεχνολογίες έξυπνων δικτύων, μειώνοντας ταυτόχρονα τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους. Οι μέθοδοι βιώσιμης ανάπτυξης διασφαλίζονται με την επιστράτευση έρευνας και ανάπτυξης με σκοπό την καινοτομία.

Οι διασυνδέσεις με γειτονικές χώρες διευκολύνουν το διασυνοριακό εμπόριο ηλεκτρικής ενέργειας και τη βελτιστοποίηση του δικτύου, ενισχύοντας την περιφερειακή ενεργειακή ασφάλεια και την αποδοτικότητα της αγοράς. Οι καθαρές εξαγωγές ενέργειας της Νορβηγίας υποστηρίζουν τους στόχους της ευρωπαϊκής ενεργειακής μετάβασης και βελτιώνουν τις σχέσεις μεταξύ των χωρών μέσω της διπλωματίας [Εικόνα 7.3.3][233][234][235][236][237].



Εικόνα 7.3.3: Το φράγμα Storvassdammen είναι μέρος του Ulla-Førre, ενός υδροηλεκτρικού σταθμού που απλώνεται στους δήμους Hjelmeland, Suldal και Bylke της Νορβηγίας.

7.4 Παραδείγματα επιτυχίας ενσωμάτωσης γεωθερμικής ενέργειας στο δίκτυο

7.4.1 Το Geysers στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ

Το Geysers, που βρίσκεται στα βουνά Mayacamas της Καλιφόρνια, είναι το μεγαλύτερο γεωθερμικό πεδίο στον κόσμο και ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ενσωμάτωσης γεωθερμικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αποτελείται από περισσότερους από 20 σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που λειτουργούν από την Calpine Corporation και άλλες εταιρείες, που παράγουν συνδυασμένη ισχύ άνω των 1.500 μεγαβάτ (MW) ηλεκτρικής ενέργειας.

Με τη διευκόλυνση της πρόσβασης σε βαθύτερα γεωθερμικά αποθέματα, οι προηγμένες τεχνικές γεώτρησης, συμπεριλαμβανομένης της κατευθυνόμενης γεώτρησης (directional drilling) και της διάτρησης λεπτών οπών (slim-hole drilling), έχουν μεγιστοποιήσει τη χρήση των πόρων.

Σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, το Geysers έχει οδηγήσει σε σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, όπως χαμηλότερες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και ατμοσφαιρική ρύπανση. Χρησιμοποιώντας

ατμό και ζεστό νερό που υπάρχουν φυσικά, συμβάλλει στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και στην προώθηση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

Για τα κοντινά χωριά, η ευημερία του σταθμού έχει ανοίξει νέες επιχειρηματικές προοπτικές. Η οικονομία της περιοχής αναπτύχθηκε χάρη στη δημιουργία θέσεων εργασίας, τις βελτιωμένες υποδομές και τις ροές εισοδήματος, οι οποίες στήριξαν τη βιωσιμότητα και προώθησαν την κοινωνική ανάπτυξη [Εικόνα 7.4.1][238][239][240][241].



Εικόνα 7.4.1: Ένας από τους γεωθερμικούς σταθμούς στο γεωθερμικό σύμπλεγμα του Geyshers.

7.4.2 Γεωθερμική ανάπτυξη στην Κένυα

Η Κένυα αποτελεί φάρο επιτυχίας στην παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας, αξιοποιώντας τα μοναδικά γεωλογικά της χαρακτηριστικά, ιδιαίτερα το East African Rift System, για να γίνει παγκόσμιος ηγέτης στις ΑΠΕ. Οι φιλόδοξες πρωτοβουλίες γεωθερμικής ανάπτυξης της χώρας έχουν μεταμορφώσει το ενεργειακό της τοπίο, ενισχύοντας την οικονομική ανάπτυξη, ενισχύοντας την ενεργειακή ασφάλεια και μετριάζοντας την κλιματική αλλαγή. Ο ακρογωνιαίος λίθος του συστήματος παραγωγής γεωθερμικής ενέργειας της Κένυας είναι το Γεωθερμικό Σύμπλεγμα Olkaria, το οποίο βρίσκεται περίπου 100 χιλιόμετρα βορειοδυτικά του Ναϊρόμπι. Η Olkaria φιλοξενεί πολλούς σταθμούς γεωθερμίας που

διαχειρίζεται η Kenya Electricity Generating Company (KenGen), με συνολική εγκατεστημένη ισχύ άνω των 800 μεγαβάτ (MW).

Οι πόροι του έθνους έχουν επεκταθεί χάρη στη χρήση προηγμένων τεχνικών γεώτρησης, συμπεριλαμβανομένης της κατευθυνόμενης γεώτρησης και της διάτρησης λεπτών οπών, που κατέστησαν δυνατή την αξιοποίηση βαθύτερων γεωθερμικών πηγών. Επιπλέον, η εισαγωγή σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δυαδικού κύκλου, έχει βελτιώσει την απόδοση της παραγωγής συνολικά μεγιστοποιώντας τη χρήση των πόρων και μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η επιτυχία της Κένυας οφείλεται εν μέρει και στις στρατηγικές συμμαχίες μεταξύ του δημόσιου και του ιδιωτικού τομέα και στη συνεργασία με ξένους οργανισμούς. Προκειμένου να συγκεντρώσει χρήματα, τεχνική βοήθεια και υποστήριξη των έργων, η KenGen συνεργάστηκε ενεργά με αναπτυξιακούς εταίρους όπως η Παγκόσμια Τράπεζα, η Αφρικανική Τράπεζα Ανάπτυξης και διμερείς δωρητές.

Η εγκατάσταση γεωθερμικών σταθμών παραγωγής ενέργειας έχει πυροδοτήσει την κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη στις τοπικές κοινότητες, βελτιώνοντας την πρόσβαση σε βασικές υπηρεσίες, αυξάνοντας τις δυνατότητες απασχόλησης και ενισχύοντας τις τοπικές οικονομίες. Ακόμη, η αξιόπιστη και σε λογικές τιμές παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια έχει ωθήσει τις επενδύσεις, τη βιομηχανική επέκταση και την ενεργειακή πρόσβαση σε ανθρώπους και εταιρείες σε όλη τη χώρα [Εικόνα 7.4.2][242][243][244][245].



Εικόνα 7.4.2: Γεωθερμικό Εργοστάσιο στο Μενενγκάι, Κένυα.

7.4.3 Ο γεωθερμικός σταθμός Hellisheiði στην Ισλανδία

Ο γεωθερμικός σταθμός Hellisheiði, που βρίσκεται κοντά στο Ρέικιαβικ, στην Ισλανδία, είναι ένα άλλο αξιοσημείωτο παράδειγμα. Λειτουργεί από την Orka Náttúrunnar (ON Power), και η μονάδα αξιοποιεί τη γεωθερμική θερμότητα από την ηφαιστειακή περιοχή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού για τηλεθέρμανση. Με χωρητικότητα περίπου 300 MW ηλεκτρικής ενέργειας και 400 MW θερμικής ενέργειας, η Hellisheiði παίζει κρίσιμο ρόλο στο χαρτοφυλάκιο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας της Ισλανδίας.

Ένα μέρος της επιτυχίας του εργοστασίου μπορεί να αποδοθεί σε εξελιγμένες μεθόδους γεώτρησης που καθιστούν προσβάσιμες βαθύτερες γεωθερμικές δεξαμενές. Οι καινοτομίες στις γεωτρήσεις, (η κατευθυνόμενη γεώτρηση, η διάτρηση λεπτών οπών), έχουν βελτιώσει την απόδοση και έχουν κάνει καλύτερη χρήση των διαθέσιμων πόρων.

Το εργοστάσιο μπορεί να παρέχει κρίσιμες υπηρεσίες υποστήριξης και εξισορρόπησης του δικτύου προσαρμόζοντας την παραγωγή ενέργειας ανάλογα με τις διακυμάνσεις της ζήτησης. Οι τεχνικές διαχείρισης δικτύου δίνουν υψηλή προτεραιότητα στη βέλτιστη χρήση της γεωθερμικής ενέργειας, ελαχιστοποιώντας τις πιθανές διαταραχές και εγγυώνται μια σταθερή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το ρυθμιστικό περιβάλλον της Ισλανδίας και το υποστηρικτικό πλαίσιο πολιτικής συνέβαλαν καθοριστικά στην ανάπτυξη του σταθμού Hellisheiði. Οι επενδύσεις σε έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ενθαρρύνονται από κρατικές επιδοτήσεις, κίνητρα και τεχνικές μακροπρόθεσμου σχεδιασμού, οι οποίες συμβάλλουν επίσης στη διευκόλυνση της ανάπτυξης και της ενσωμάτωσης των έργων στο εθνικό δίκτυο.

Λόγω του εργοστασίου, η τοπική οικονομία έχει αναπτυχθεί, προσελκύοντας επενδύσεις και δημιουργώντας ευκαιρίες απασχόλησης. Προκειμένου να διασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα του εργοστασίου, οι πρωτοβουλίες συμμετοχής της κοινότητας δίνουν προτεραιότητα στην ενίσχυση των κοινωνικοοικονομικών πλεονεκτημάτων με ταυτόχρονη μείωση τυχόν αρνητικών επιπτώσεων [Εικόνα 7.4.3][246][247][248][249].



Εικόνα 7.4.3: Γεωθερμικός σταθμός Hellisheiði στο Χέινκιλ, Ισλανδία.

7.5 Παραδείγματα επιτυχίας ενσωμάτωσης βιοενέργειας στο δίκτυο

7.5.1 Ο Ηλεκτρικός Σταθμός Alholmens kraft στη Φινλανδία

Ο σταθμός Alholmens Kraft, που βρίσκεται στο Jakobstad της Φινλανδίας, αναγνωρίζεται ως ένας από τους μεγαλύτερους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύσιμα βιομάζας στον κόσμο. Το εργοστάσιο, το οποίο λειτουργεί από τη Vattenfall, διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στη μετάβαση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη Φινλανδία και έθεσε ένα σημείο αναφοράς για την ενοποίηση της βιομάζας σε βιομηχανική κλίμακα.

Με συνολική ισχύ 265 MW, το εργοστάσιο λειτουργεί κυρίως με βιομάζα, η οποία περιλαμβάνει πριονίδι, φλοιό και ροκανίδια ξύλου. Παρέχει σημαντικό μέρος της παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας της Φινλανδίας, παράγοντας περίπου 1,7 TWh ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ετησίως.

Η εγκατάσταση έχει εφαρμόσει καινοτόμες λύσεις το χειρισμό, την αποθήκευση και την αποστολή της πρώτης ύλης βιομάζας εφαρμόζοντας τεχνολογίες logistics. Η αποτελεσματικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας βιομάζας μεγιστοποιείται με προηγμένες

τεχνολογίες αυτοματισμού και παρακολούθησης, οι οποίες ελαχιστοποιούν επίσης το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Τα ενσωματωμένα συστήματα CHP της Alholmens Kraft αυξάνουν την ενεργειακή απόδοση χρησιμοποιώντας την θερμότητα από απορρίμματα για βιομηχανικές διεργασίες και τηλεθέρμανση. Αυτή η στρατηγική συμπαραγωγής μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις βελτιώνοντας παράλληλα τη συνολική χρήση ενέργειας [Εικόνα 7.5.1][250][251].



Εικόνα 7.5.1: Βιοηλεκτρική μονάδα της Alholmens Kraft στο Pietarsaari, Φινλανδία.

7.5.2 Ο Ηλεκτρικός Σταθμός Drax στο Ηνωμένο Βασίλειο

Ο σταθμός Drax Power Station, που βρίσκεται στο Βόρειο Γιορκσάιρ του Ηνωμένου Βασιλείου, αποτελεί πρωτοποριακό παράδειγμα επιτυχημένης εκμετάλλευσης βιομάζας σε μεγάλη κλίμακα. Αρχικά ένας σταθμός παραγωγής ενέργειας με καύση άνθρακα, ο Drax ξεκίνησε ένα ταξίδι μεταμόρφωσης για να γίνει ο μεγαλύτερος σταθμός παραγωγής ενέργειας με καύσιμο βιομάζα στον κόσμο. Αυτή η μετάβαση όχι μόνο έχει τοποθετήσει τον Drax ως βασικό παράγοντα στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλά έχει επίσης συμβάλει σημαντικά στους στόχους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας του Ηνωμένου Βασιλείου και στους στόχους μείωσης του άνθρακα.

Ο Drax έχει μειώσει σημαντικά τις εκπομπές άνθρακα αλλάζοντας από άνθρακα σε βιομάζα. Σύμφωνα με τον στόχο του Ηνωμένου Βασιλείου να απανθρακοποιήσει την ενεργειακή του βιομηχανία, η μετατροπή σε βιομάζα έχει προκαλέσει μείωση 85% στις εκπομπές CO₂ σε σύγκριση με την παραγωγή άνθρακα.

Χιλιάδες θέσεις εργασίας στους τομείς της δασοκομίας, των μεταφορών και της παραγωγής πέλετ της αλυσίδας εφοδιασμού βιομάζας έχουν δημιουργηθεί από αυτή τη μετάβαση. Εκτός από την προώθηση της περιφερειακής ανάπτυξης, αυτό έχει ωφελήσει οικονομικά τις αγροτικές κοινότητες στο Ηνωμένο Βασίλειο.

Για να βοηθήσει τη μετάβαση, ο Drax πραγματοποίησε μεγάλες επενδύσεις στην υποδομή που απαιτείται για το χειρισμό και την αποθήκευση βιομάζας. Αυτό καλύπτει την εγκατάσταση μηχανημάτων χειρισμού βιομάζας, την κατασκευή θόλων αποθήκευσης βιομάζας και τη μετατροπή μονάδων με καύση άνθρακα σε βιομάζα.

Για να αυξήσει την ενεργειακή απόδοση και να μειώσει τις εκπομπές, ο Drax έχει υιοθετήσει καινοτόμες τεχνολογίες μετατροπής βιομάζας, όπως η σφαιροποίηση (pelletization) και η καύση ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed combustion). Η απόδοση των εγκαταστάσεων και η περιβαλλοντική βιωσιμότητα έχουν βελτιωθεί λόγω της συνεχιζόμενης καινοτομίας στον χειρισμό της βιομάζας, την καύση και τον έλεγχο των εκπομπών.

Επιπλέον, ο σταθμός παρέχει χωρητικότητα και ευελιξία για την υποστήριξη της ενσωμάτωσης διακοπτόμενων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η αιολική και η ηλιακή. Οι μονάδες βιομάζας του μπορούν να ανεβαίνουν και να κατεβαίνουν γρήγορα, ανταποκρινόμενες στις διακυμάνσεις της παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της ζήτησης δικτύου [Εικόνα 7.5.2][252][253][254][255].



Εικόνα 7.5.2: Ο Ηλεκτρικός Σταθμός Drax στο Βόρειο Γιorkσάιρ, ΗΒ.

7.6 Παραδείγματα επιτυχίας ενσωμάτωσης ωκεάνιας ενέργειας στο δίκτυο

7.6.1 Το MeyGen Tidal Energy Project της Σκωτίας

Το έργο MeyGen Tidal Energy Project, που βρίσκεται στο Πέντλαντ Φερθ της Σκωτίας, ανήκει στην SIMEC Atlantis Energy και είναι ένα από τις μεγαλύτερα ενεργειακά έργα παλιρροιακών ρευμάτων στον κόσμο. Αποτελείται από μια σειρά παλιρροϊκών στροβίλων που αναπτύσσονται στον βυθό της θάλασσας για να αξιοποιήσουν την ενέργεια των παλιρροϊκών ρευμάτων.

Το εγχείρημα χρησιμοποιεί καινοτόμα τεχνολογία στροβίλων που προορίζεται να αντέχει σε δύσκολα θαλάσσια περιβάλλοντα και να βελτιστοποιεί την αποτελεσματικότητα εξόρυξης ενέργειας. Η μέγιστη απόδοση και αξιοπιστία διασφαλίζονται από συστήματα τελευταίας τεχνολογίας, συμπεριλαμβανομένων συστημάτων αγκύρωσης στο βυθό και αμφίδρομους ρότορες.

Μέσω της χρήσης υποβρύχιων καλωδίων, το έργο διασυνδέεται με την τοπική υποδομή δικτύου για να διευκολύνει την αποτελεσματική μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στην

ηπειρωτική χώρα. Για τη διατήρηση της σταθερότητας και της ισορροπίας του δικτύου, οι εξελιγμένες τεχνολογίες διαχείρισης δικτύου παρακολουθούν την παραγωγή παλιρροιακής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο.

Καθ' όλη τη διάρκεια του έργου, η MeyGen έχει διατηρήσει ενεργή επικοινωνία με ρυθμιστικούς, περιβαλλοντικούς φορείς και τοπικούς ανθρώπους. Η σαφής επικοινωνία, η συμμετοχή των ενδιαφερομένων και οι μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων έχουν προωθήσει την έγκριση των σχετικών κανονισμών καθώς και την κοινοτική υποστήριξη [Εικόνα 7.6.1][256][257][258].



Εικόνα 7.5.2: Το έργο MeyGen της Atlantis στο Πέντλαντ Φερθ, Σκωτία.

7.6.2 Το Nova Scotia Tidal Energy Project στον Καναδά

Οι καινοτόμες πρωτοβουλίες του Καναδά στην ενσωμάτωση της θαλάσσιας ενέργειας αποτελούν παράδειγμα εξαιτίας των έργων παλιρροϊκής ενέργειας στη Νέα Σκωτία, τα οποία περιλαμβάνουν το Fundy Ocean Research Center for Energy (FORCE). Εγκατεστημένα στον κόλπο του Fundy, ο οποίος φημίζεται για τις ισχυρές παλίρροιες του, αυτές οι εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν παλιρροιακά ρεύματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα δημιουργικά σχέδια τουρμπινών που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις της Νέας Σκωτίας είναι ειδικά προσαρμοσμένα στα χαρακτηριστικά παλιρροϊκά χαρακτηριστικά του κόλπου του Fundy. Τα αποδοτικά υλικά, τα βελτιωμένα πτερύγια του στρόβιλου και οι ευέλικτοι μηχανισμοί ελέγχου μεγιστοποιούν την απορρόφηση ενέργειας ενώ μειώνουν το οικολογικό αποτύπωμα.

Προκειμένου να ενσωματωθεί η παλιρροιακή ενέργεια στο τρέχον ηλεκτρικό σύστημα, η FORCE συνεργάζεται στενά με περιφερειακές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και φορείς εκμετάλλευσης δικτύου. Τα προγράμματα απόκρισης ζήτησης και η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο είναι δύο παραδείγματα τεχνολογιών έξυπνου δικτύου που εγγυώνται σταθερές λειτουργίες δικτύου και ομαλή ενοποίηση.

Η επιτυχία των έργων στη Νέα Σκωτία οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη συμμετοχή της κοινότητας. Για αυτόν τον λόγο, το FORCE έχει δημιουργήσει δημόσιες συζητήσεις, εκπαιδευτικές πρωτοβουλίες και ομάδες επικοινωνίας με την κοινότητα για να αντιμετωπίζει ζητήματα, να λαμβάνει πληροφορίες και να ενισχύει την εμπιστοσύνη ανάμεσα στους ενδιαφερόμενους της περιοχής [Εικόνα 7.6.2][259][260][261].



Εικόνα 7.5.2: Ο ρυμουλκούμενος στρόβιλος Cape Sharp στον κόλπο του Fundy, Καναδάς.

7.6.3 Η Swansea Bay Tidal Lagoon στην Ουαλία

Το έργο της παλιρροιακής λιμνοθάλασσας (tidal lagoon) του Swansea Bay στην Ουαλία είναι μια προτεινόμενη υποδομή παλιρροιακής ενέργειας που στοχεύει στην αξιοποίηση της ενέργειας των παλιρροιών των ωκεανών χρησιμοποιώντας μια μοναδική δομή λιμνοθάλασσας. Το έργο έχει συγκεντρώσει σημαντική προσοχή για τις δυνατότητές του να παρέχει καθαρή, αξιόπιστη ενέργεια στην περιοχή.

Στο έργο του Swansea Bay, η παλιρροιακή ενέργεια συλλαμβάνεται συνδυάζοντας την κατασκευή ενός θαλάσσιου τοιχώματος με υδροστρόβιλους, μια τεχνολογία παλιρροιακής ενέργειας που σχεδιάστηκε για λιμνοθάλασσες. Η περιβαλλοντική βιωσιμότητα και η ελαχιστοποίηση των οπτικών επιπτώσεων στην ακτογραμμή έχουν προτεραιότητα στο σχεδιασμό.

Οι στρατηγικές ενσωμάτωσης του έργου στο δίκτυο περιλαμβάνουν συντονισμό με εθνικούς φορείς εκμετάλλευσης δικτύου και σύνδεση στο τοπικό δίκτυο διανομής. Η μεταβλητή παραγωγή παλιρροιακής ενέργειας μπορεί να προσαρμοστεί και η σταθερότητα του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας ευέλικτα χρονοδιαγράμματα λειτουργίας και επιλογές αποθήκευσης ενέργειας.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι ανησυχίες και να λάβουν σχόλια και γνώμες, οι δημιουργοί του έργου έχουν αλληλεπιδράσει με κυβερνητικές υπηρεσίες, περιβαλλοντικές οργανώσεις και τοπικές κοινότητες. Η συμμετοχή των ενδιαφερομένων και η αποδοχή του έργου ενθαρρύνονται από δημόσιες διαβουλεύσεις, επιτροπές περιβαλλοντικών επιπτώσεων και οργανισμούς κοινοτικών οφελών [Εικόνα 7.6.3][262][263][264].



Εικόνα 7.6.3: Η παλιρροιακή λιμνοθάλασσα του Swansea Bay, Ουαλία.

Συμπερασματικά, μια ολοκληρωμένη στρατηγική που να περιλαμβάνει τεχνικές διαχείρισης δικτύου, συμμετοχή της κοινότητας και τεχνολογική καινοτομία απαιτούνται για την επιτυχή ενσωμάτωση των ΑΠΕ στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Η βελτιστοποίηση του δυναμικού των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας απαιτεί τεχνολογικές καινοτομίες, συμπεριλαμβανομένων συσκευών αποθήκευσης συμβατές με το δίκτυο και αποδοτικές τεχνολογίες παραγωγής. Η αξιόπιστη και σταθερή εκμετάλλευση των μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών διασφαλίζεται από αποτελεσματικές στρατηγικές διαχείρισης δικτύου, όπως η διαχείριση από την πλευρά της ζήτησης και οι τεχνολογίες έξυπνων δικτύων. Η προληπτική συμμετοχή της κοινότητας προάγει επίσης την αποδοχή και την υποστήριξη, οι οποίες είναι απαραίτητες για την υπέρβαση των ρυθμιστικών εμποδίων και την εγγύηση της μακροπρόθεσμης επιτυχίας. Αυτές οι ιστορίες επιτυχίας προσφέρουν έναν «οδικό χάρτη» για όσες περιοχές και οργανισμούς ελπίζουν να συμμετέχουν στη μετάβαση προς ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον με γνώμονα τις ανανεώσιμες πηγές.

Κεφάλαιο 8 Μελλοντικές κατευθύνσεις και προκλήσεις

Έχοντας ολοκληρώσει την επισκόπηση της πορείας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της ενσωμάτωσής τους στο ενεργειακό δίκτυο τόσο στο παρόν όσο και στο παρελθόν, θεωρήσαμε σκόπιμο να συζητήσουμε λίγο και το μέλλον. Αυτό το κεφάλαιο παρέχει μια κριτική ανάλυση για το μεταβαλλόμενο περιβάλλον που χαρακτηρίζει το θέμα μας, δίνοντας έμφαση στις νέες εξελίξεις στην τεχνολογία, τις αναδυόμενες τάσεις και τις προκλήσεις της μετάβασης προς ένα πρότυπο ενέργειας με επίκεντρο τις ανανεώσιμες πηγές.

8.1 Μελλοντικές Τάσεις στην Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Υπάρχουν πολλές αξιοσημείωτες τάσεις που θα διαμορφώσουν την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο μέλλον. Μια αξιοσημείωτη εξέλιξη είναι ο αυξανόμενος εξηλεκτρισμός (electrification) πολλών περιοχών σε αναπτυσσόμενες χώρες, με λίγα λόγια η διαδικασία αντικατάστασης τεχνολογιών που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο) με τεχνολογίες που χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια ως πηγή ενέργειας [265][266]. Ας μην ξεχνάμε βέβαια ότι η ηλεκτροδότηση τριτοκοσμικών χωρών και περιοχών συνεχίζεται, καθώς πολλά μέρη του κόσμου ακόμη δεν έχουν πρόσβαση σε ρεύμα. Όλα τα παραπάνω γεγονότα είναι προφανές ότι θα αυξήσουν τη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια. Προκειμένου, λοιπόν, να ικανοποιηθούν οι επεκτεινόμενες ενεργειακές ανάγκες με βιώσιμο τρόπο (καθώς αυτό φαίνεται να είναι το σχέδιο παγκοσμίως), θα απαιτηθεί μεγαλύτερη ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [267][268].

Επιπλέον, αναμένεται ότι οι εξελίξεις στην τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας θα είναι ζωτικής σημασίας για την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η αντλία αποθήκευσης υδροηλεκτρικής ενέργειας, τα συστήματα με βάση το υδρογόνο και οι μπαταρίες επόμενης γενιάς γίνονται σημαντικά εργαλεία για τον έλεγχο της διαλείπουσας ανανεώσιμης ενέργειας και την εξισορρόπηση των λειτουργιών του δικτύου [101][269][270]. Επιπλέον, οι συνεχείς επενδύσεις στην ψηφιοποίηση και τον εκσυγχρονισμό του δικτύου αναμένεται να βελτιώσουν τη χωρητικότητα, την ανθεκτικότητα και την ευελιξία του συστήματος, διευκολύνοντας την πιο απρόσκοπτη ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [271][272][273]. Τέλος, μια τάση προς τοπικές ενεργειακές λύσεις παρατηρείται στην εμφάνιση αποκεντρωμένων ενεργειακών συστημάτων, όπως μικροδικτύων και κοινοτικών έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα

οποία βελτιώνουν την ενεργειακή βιωσιμότητα και ανθεκτικότητα [για περεταίρω πληροφορίες, βλέπε ενότητα 2.3.1.2.B][274].

8.2 Αναδυόμενες Τεχνολογίες που οδηγούν την Ενσωμάτωση ΑΠΕ

Οι αναδυόμενες τεχνολογίες έχουν τη δυνατότητα να προωθήσουν σημαντικά τον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και να καθορίσουν μελλοντικές τάσεις. Αν και η αγορά των ΑΠΕ κυριαρχείται από καθιερωμένες τεχνολογίες όπως οι ανεμογεννήτριες και τα ηλιακά φωτοβολταϊκά, επίκεινται νέες εξελίξεις που έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν εντελώς τον τρόπο με τον οποίο συγκομίζουμε και χρησιμοποιούμε ανανεώσιμες πηγές. Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά κύτταρα επόμενης γενιάς, όπως τα ηλιακά κύτταρα περοβσκίτη και τα διπλά ηλιακά κύτταρα, συγκαταλέγονται σε αυτές τις αναπτυσσόμενες τεχνολογίες και παρέχουν τη δυνατότητα για αυξημένη απόδοση και μειωμένο κόστος παραγωγής [βλέπε 2.3.1.1.A και 2.3.1.2.A].

Επιπλέον, τα διαλείποντα ζητήματα με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα μπορούσαν να επιλυθούν με τις εξελίξεις στις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως η αποθήκευση υδρογόνου σε κλίμακα δικτύου και η βελτιωμένη χημεία των μπαταριών, που αναφέραμε και παραπάνω. Εξελίξεις στις τεχνολογίες αιχμής του δικτύου, όπως οι πλατφόρμες εμπορίας ενέργειας που βασίζονται σε blockchain [275][276] και οι καταναμετημένοι ενεργειακοί πόροι [83], έχουν τη δυνατότητα να εκδημοκρατίσουν την πρόσβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να αποκεντρώσουν την παραγωγή ενέργειας. Αυτές οι τεχνολογίες αιχμής έχουν τη δυνατότητα να ανοίξουν νέους δρόμους για την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ανοίγοντας την πόρτα σε ένα πιο ισχυρό ενεργειακό μέλλον καθώς αναπτύσσονται και αποκτούν δημοτικότητα.

8.3 Ερευνητικά κενά και σημεία για περαιτέρω εξερεύνηση

Στο αντικείμενο της εργασίας μας, υπάρχει ένας αριθμός μη απαντημένων ερευνητικών ερωτημάτων για πρόσθετη μελέτη. Αυτά περιλαμβάνουν ζητήματα όπως την κατανόηση των κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων των έργων ΑΠΕ σε τοπικές κοινότητες και την δημιουργία και υιοθέτηση στρατηγικών που στοχεύουν στην συμμετοχή και την αποδοχή της κοινότητας. Επιπλέον, απαιτείται επιπρόσθετη τεχνολογική έρευνα και εξέλιξη με σκοπό τη βελτίωση εργαλείων και μεθοδολογιών μοντελοποίησης του δικτύου για την ακριβή αξιολόγηση των επιδράσεων της ενσωμάτωσης. Εκτός των άλλων, η βελτιστοποίηση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας για βελτίωση της απόδοσης και της μακροζωίας απέχει πολύ από την τελειότητα. Για την περαιτέρω προστασία από μελλοντικές

επιθέσεις στον κυβερνοχώρο και τη διασφάλιση σταθερού εφοδιασμού ενέργειας, η έρευνα για τις απειλές και τις στρατηγικές ανθεκτικότητας για συστήματα ΑΠΕ και υποδομές δικτύου στο διαδίκτυο είναι ζωτικής σημασίας. Όπως είναι πλέον σαφές, ο τομέας της ενσωμάτωσης των ΑΠΕ απαιτεί τη συνεργασία πολλών διαφορετικών θεσμών και φορέων, στην συγκεκριμένη περίπτωση υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, επιχειρηματικούς φορείς και ερευνητές, που πρέπει να συνεργαστούν για να καλύψουν αυτά τα ερευνητικά κενά και να προωθήσουν την καινοτομία στη βιομηχανία.

Κεφάλαιο 9 Επίλογος

Συμπερασματικά, η παρούσα επισκόπηση έχει προσφέρει μια ολοκληρωμένη ανάλυση της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα σημερινά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ξεκινήσαμε αξιολογώντας τα οφέλη και τα μειονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αναγνωρίζοντας τόσο τις δυνατότητές τους για την παραγωγή βιώσιμης ενέργειας όσο και εμπόδια όπως τη μεταβλητότητα και τους γεωγραφικούς περιορισμούς. Συμπληρωματικά, εξετάσαμε τις δυσκολίες που επιφέρει ένα τέτοιο εγχείρημα στο δίκτυο, όπως οι ρυθμιστικές περιπλοκές και η συμφόρηση.

Κατά τη διάρκεια της εξερεύνησής μας, οι τεχνολογίες ΑΠΕ, όπως τα φωτοβολταϊκά συστήματα και οι ανεμογεννήτριες, αναδείχθηκαν ως βασικοί παράγοντες για την ενσωμάτωση στο δίκτυο, υποστηριζόμενες από τις εξελίξεις στην αποθήκευση ενέργειας και τους συνδεδεμένους στο δίκτυο μετατροπείς. Οι μελέτες περιπτώσεων πραγματικών παραδειγμάτων ανά τον κόσμο φώτισαν επιτυχημένες στρατηγικές, υπογραμμίζοντας τη σημασία του λεπτομερή σχεδιασμού και της τεχνολογικής καινοτομίας.

Οι μελλοντικές εξελίξεις στην τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας και οι πρωτοβουλίες εκσυγχρονισμού του δικτύου εμφανίζουν πολλές δυνατότητες για την εκμετάλλευση των ΑΠΕ. Συμπληρώνοντας τα κενά στις γνώσεις μας και ενθαρρύνοντας τη συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερομένων μερών, μπορούμε να ξεπεράσουμε με επιτυχία τις προκλήσεις και να φτάσουμε ένα βήμα πιο κοντά σε ένα μέλλον που τροφοδοτείται από τη βιώσιμη ενέργεια.

Βιβλιογραφία

- [1] Sørensen, B., 1991. A history of renewable energy technology. *Energy Policy* 19, 8–12. Available at: [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(91\)90072-V](https://doi.org/10.1016/0301-4215(91)90072-V)
- [2] Solorio, I., Jörgens, H., 2017. A Guide to EU Renewable Energy Policy. Edward Elgar Publishing. Available at: <https://doi.org/10.4337/9781783471560>
- [3] Paris Agreement (2015) – United Nations Framework Convention on Climate Change, Paris, France, Dec. 12, 2015. Available at: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- [4] Thirugnanasambandam, M., Iniyan, S., Goic, R., 2010. A review of solar thermal technologies☆. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 312–322. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.014>
- [5] Prešovský samosprávny kraj, n.d. Renewable Energy Sources. Available at: https://www.po-kraj.sk/files/dokumenty-odborov/O_RR/robinwood/ObnovitelneZdrojeEnergie_Aj.pdf
- [6] Guangul, F.M., Chala, G.T., 2019. Solar Energy as Renewable Energy Source: SWOT Analysis, in: 2019 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC). Presented at the 2019 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC), IEEE, Muscat, Oman, pp. 1–5. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICBDSC.2019.8645580>
- [7] Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A.A., Kim, K.-H., 2018. Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, 894–900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>
- [8] Právělie, R., Patriche, C., Bandoc, G., 2019. Spatial assessment of solar energy potential at global scale. A geographical approach. *Journal of Cleaner Production* 209, 692–721. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.239>
- [9] Sansaniwal, S.K., Sharma, V., Mathur, J., 2018. Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, 1576–1601. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.003>
- [10] IEA, 2021. Renewables 2021 - Analysis and forecast to 2026. Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5ae32253-7409-4f9a-a91d-1493ffb9777a/Renewables2021-Analysisandforecastto2026.pdf>
- [11] Top 7 Disadvantages of Solar Energy - Understand Solar [WWW Document], n.d. Available at: <https://understandsolar.com/advantages-vs-disadvantages-solar-power/>

- [12] Maradin, D., 2021. Advantages and Disadvantages of Renewable Energy Sources Utilization. *IJEPP* 11, 176–183. <https://doi.org/10.32479/ijepp.11027>
- [13] Siri, R., Mondal, S.R., Das, S., 2020. Hydropower: A Renewable Energy Resource for Sustainability in Terms of Climate Change and Environmental Protection, in: Pathak, P., Srivastava, R.R. (Eds.), *Alternative Energy Resources, The Handbook of Environmental Chemistry*. Springer International Publishing, Cham, pp. 93–113. https://doi.org/10.1007/698_2020_635
- [14] Sajin, N., 2016. International Renewable Energy Agency (IRENA). Available at: <https://policycommons.net/artifacts/1340810/international-renewable-energy-agency-irena/1951671/>
- [15] Yearly electricity data | Ember [WWW Document], n.d. Available at: <https://ember-climate.org/data-catalogue/yearly-electricity-data/>
- [16] Chala, G.T., Ma’Arof, M.I.N., Sharma, R., 2019. Trends in an increased dependence towards hydropower energy utilization—a short review. *Cogent Engineering* 6, 1631541. Available at: <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1631541>
- [17] Kaygusuz, K., 2016. Hydropower as clean and renewable energy source for electricity generation. *Journal of Engineering Research and Applied Science* 5, 359–369. Available at: <https://journaleras.com/index.php/jeras/article/view/52/52>
- [18] Moran, E.F., Lopez, M.C., Moore, N., Müller, N., Hyndman, D.W., 2018. Sustainable hydropower in the 21st century. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, 11891–11898. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1809426115>
- [19] Li, Y., Khanal, S.K., 2016. *Bioenergy: Principles and Applications*. John Wiley & Sons. Available at: https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=hZRZDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR19&dq=renewable+energy+sources+bioenergy&ots=O7Q1UjK9nj&sig=rlvwqrZsUf2m-5czKOfQ_0zCUIs&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [20] Jaber, S., 2014. Environmental Impacts of Wind Energy. *JOCET* 251–254. <https://doi.org/10.7763/JOCET.2013.V1.57>
- [21] Global Wind Atlas [WWW Document], n.d. Available at: <https://science.globalwindatlas.info/#/map>
- [22] Renewable energy statistics 2023 [WWW Document], 2023. Available at: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jul/Renewable-energy-statistics-2023>
- [23] Li, J., Wang, G., Li, Z., Yang, S., Chong, W.T., Xiang, X., 2020. A review on development of offshore wind energy conversion system. *Int J Energy Res* 44, 9283–9297. Available at: <https://doi.org/10.1002/er.5751>
- [24] Veers, P., Dykes, K., Lantz, E., Barth, S., Bottasso, C.L., Carlson, O., Clifton, A., Green, J., Green, P., Holttinen, H., Laird, D., Lehtomäki, V., Lundquist, J.K., Manwell, J., Marquis, M., Meneveau, C., Moriarty, P., Munduate, X., Muskulus,

- M., Naughton, J., Pao, L., Paquette, J., Peinke, J., Robertson, A., Sanz Rodrigo, J., Sempreviva, A.M., Smith, J.C., Tuohy, A., Wiser, R., 2019. Grand challenges in the science of wind energy. *Science* 366, eaau2027. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.aau2027>
- [25] Duarah, P., Haldar, D., Patel, A.K., Dong, C.-D., Singhanian, R.R., Purkait, M.K., 2022. A review on global perspectives of sustainable development in bioenergy generation. *Bioresource Technology* 348, 126791. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126791>
- [26] Strzalka, R., Schneider, D., Eicker, U., 2017. Current status of bioenergy technologies in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72, 801–820. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.091>
- [27] Wilgeroth, P., n.d. Current status of small scale biomass CHP technology development. Available at: https://www.academia.edu/13793937/Current_status_of_small_scale_biomass_CHP_technology_development
- [28] Reid, W.V., Ali, M.K., Field, C.B., 2020. The future of bioenergy. *Global Change Biology* 26, 274–286. Available at: <https://doi.org/10.1111/gcb.14883>
- [29] Kim, H.K., Parajuli, P.B., Filip To, S.D., 2013. Assessing impacts of bioenergy crops and climate change on hydrometeorology in the Yazoo River Basin, Mississippi. *Agricultural and Forest Meteorology* 169, 61–73. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.10.007>
- [30] Wu, Y., Zhao, F., Liu, S., Wang, L., Qiu, L., Alexandrov, G., Jothiprakash, V., 2018. Bioenergy production and environmental impacts. *Geosci. Lett.* 5, 14. Available at: <https://doi.org/10.1186/s40562-018-0114-y>
- [31] McCormick, M.E., 2013. Ocean Wave Energy Conversion. Courier Corporation. Available at: https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=wkDDAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT10&dq=renewable+energy+sources+marine+energy&ots=wd4i9CZ2am&sig=b4WSzshy3Z_rW0rpioVa0m4Cm7k&redir_esc=y#v=onepage&q=renewable%20energy%20sources%20marine%20energy&f=false
- [32] Wang, Zhiwen, Carriveau, R., Ting, D.S.-K., Xiong, W., Wang, Zuwen, 2019. A review of marine renewable energy storage. *International Journal of Energy Research* 43, 6108–6150. Available at: <https://doi.org/10.1002/er.4444>
- [33] Chen, H., Tang, T., Ait-Ahmed, N., Benbouzid, M.E.H., Machmoum, M., Zaim, M.E.-H., 2018. Attraction, Challenge and Current Status of Marine Current Energy. *IEEE Access* 6, 12665–12685. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2795708>
- [34] World Wide Wave Energy Maps, 2021. Available at: <https://waves-energy.co/maps/>
- [35] Manzella, A., Allansdottir, A., Pellizzone, A. (Eds.), 2019. Geothermal Energy and

Society, Lecture Notes in Energy. Springer International Publishing, Cham.
Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78286-7>

- [36] Ngala, G., Oumarou, M.B., Oluwole, F.A., 2015. Review of Geothermal Energy Technology and its Potential for Power Generation in Borno Basin, Nigeria. *Annals of Borno* 25, 59–67. Available at: https://www.academia.edu/34274653/Review_of_Geothermal_Energy_Technology_and_its_Potential_for_Power_Generation_in_Borno_Basin_Nigeria
- [37] Kulasekara, H., Seynulabdeen, V., 2019. A Review of Geothermal Energy for Future Power Generation, in: 2019 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE). Presented at the 2019 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), IEEE, Dhaka, Bangladesh, pp. 223–228. <https://doi.org/10.1109/ICAEE48663.2019.8975470>
- [38] Lofthouse, J., Simmons, R.T., Yonk, R.M., 2015. Reliability of renewable energy: Geothermal. Utah Institute of Political Economy, Report. Available at: <https://www.scribd.com/document/514691759/Reliability-Geothermal-Full-Report>
- [39] Glassley, W.E., 2014. Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment, Second Edition. CRC Press. Available at: https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=hPCsBAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=renewable+energy+sources+geothermal&ots=cY7hijVtDS&sig=7yECq_Xf7qIHgYgacV-hxjkd7BM&redir_esc=y#v=onepage&q=renewable%20energy%20sources%20geothermal&f=false
- [40] Dincer, I., Ozturk, M., 2021. Geothermal Energy Systems. Elsevier. Available at: https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=mnXhDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=geothermal+energy+advantages+disadvantages&ots=b09z1GbEI9&sig=ozhjwehO_dG7BnKvXiN03-myS5Q&redir_esc=y#v=onepage&q=geothermal%20energy%20advantages%20disadvantages&f=false
- [41] Glossary - U.S. Energy Information Administration (EIA) [WWW Document], n.d. Available at: <https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php>
- [42] Bajaj, M., Singh, A.K., 2020. Grid integrated renewable DG systems: A review of power quality challenges and state-of-the-art mitigation techniques. *International Journal of Energy Research* 44, 26–69. Available at: <https://doi.org/10.1002/er.4847>
- [43] Liang, X., 2017. Emerging Power Quality Challenges Due to Integration of Renewable Energy Sources. *IEEE Trans. on Ind. Applicat.* 53, 855–866. Available at: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2626253>
- [44] von Meier, A., 2014. Challenges to the Integration of Renewable Resources at High System Penetration. Available at: <https://escholarship.org/uc/item/81x1c1t5#author>
- [45] Neto, P.B.L., Saavedra, O.R., Oliveira, D.Q., 2020. The effect of complementarity

- between solar, wind and tidal energy in isolated hybrid microgrids. *Renewable Energy* 147, 339–355. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.134>
- [46] Almoghayer, M.A., Woolf, D.K., Kerr, S., Davies, G., 2022. Integration of tidal energy into an island energy system – A case study of Orkney islands. *Energy* 242, 122547. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122547>
- [47] Alam, Md.S., Al-Ismail, F.S., Salem, A., Abido, M.A., 2020. High-Level Penetration of Renewable Energy Sources Into Grid Utility: Challenges and Solutions. *IEEE Access* 8, 190277–190299. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031481>
- [48] Johnson, S.C., Rhodes, J.D., Webber, M.E., 2020. Understanding the impact of non-synchronous wind and solar generation on grid stability and identifying mitigation pathways. *Applied Energy* 262, 114492. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114492>
- [49] Kreuwel, F.P.M., Knap, W.H., Visser, L.R., van Sark, W.G.J.H.M., Vilà-Guerau de Arellano, J., van Heerwaarden, C.C., 2020. Analysis of high frequency photovoltaic solar energy fluctuations. *Solar Energy* 206, 381–389. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.093>
- [50] Hosseinzadeh, N., Aziz, A., Mahmud, A., Gargoom, A., Rabbani, M., 2021. Voltage Stability of Power Systems with Renewable-Energy Inverter-Based Generators: A Review. *Electronics* 10, 115. Available at: <https://doi.org/10.3390/electronics10020115>
- [51] Ahmed, S.D., Al-Ismail, F.S.M., Shafiullah, M., Al-Sulaiman, F.A., El-Amin, I.M., 2020. Grid Integration Challenges of Wind Energy: A Review. *IEEE Access* 8, 10857–10878. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2964896>
- [52] Eroğlu, H., Cuce, E., Mert Cuce, P., Gul, F., Iskenderoğlu, A., 2021. Harmonic problems in renewable and sustainable energy systems: A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 48, 101566. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101566>
- [53] Liang, X., Andalib -Bin- Karim, C., 2018. Harmonics and Mitigation Techniques Through Advanced Control in Grid-Connected Renewable Energy Sources: A Review. *IEEE Trans. on Ind. Applicat.* 54, 3100–3111. Available at: <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2823680>
- [54] Faisal, M., Hannan, M.A., Ker, P.J., Hussain, A., Mansor, M.B., Blaabjerg, F., 2018. Review of Energy Storage System Technologies in Microgrid Applications: Issues and Challenges. *IEEE Access* 6, 35143–35164. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2841407>
- [55] Kamlesh, K., Babu, J., 2022. The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation. In: Ghofrani, M., ed. *Electric Grid Modernization*. IntechOpen. 77–89. Available at: <https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=deZ8EAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA7>

[7&dq=renewable+energy+challenges+in+energy+storage&ots=0zr4GIW-EJ&sig=lkZCGVmyUVn6zzWzz_B87lhZCw&redir_esc=y#v=onepage&q=renewable%20energy%20challenges%20in%20energy%20storage&f=false](https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.141)

- [56] Gür, T.M., 2018. Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage. *Energy Environ. Sci.* 11, 2696–2767. Available at: <https://doi.org/10.1039/C8EE01419A>
- [57] Dehghani-Sani, A.R., Tharumalingam, E., Dusseault, M.B., Fraser, R., 2019. Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 104, 192–208. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.023>
- [58] What causes Lithium-ion battery fires? [WWW Document], n.d. . Firechief Lithium-ion Battery Safety Range. Available at: <https://batteryfiresafety.co.uk/what-causes-lithium-ion-battery-fires/>
- [59] Imprim, S., Varbak Nese, S., Oral, B., 2020. Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: A survey. *Energy Strategy Reviews* 31, 100539. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100539>
- [60] Pean, E., Pirouti, M., Qadrdan, M., 2016. Role of the GB-France electricity interconnectors in integration of variable renewable generation. *Renewable Energy* 99, 307–314. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.057>
- [61] Rodríguez, R.A., Becker, S., Andresen, G.B., Heide, D., Greiner, M., 2014. Transmission needs across a fully renewable European power system. *Renewable Energy* 63, 467–476. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.005>
- [62] Seetharaman, Moorthy, K., Patwa, N., Saravanan, Gupta, Y., 2019. Breaking barriers in deployment of renewable energy. *Heliyon* 5, e01166. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01166>
- [63] Sen, S., Ganguly, S., 2017. Opportunities, barriers and issues with renewable energy development – A discussion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69, 1170–1181. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.137>
- [64] Kumar, J., C.R., Majid, M.A., 2020. Renewable energy for sustainable development in India: current status, future prospects, challenges, employment, and investment opportunities. *Energy Sustain Soc* 10, 2. Available at: <https://doi.org/10.1186/s13705-019-0232-1>
- [65] Solangi, Y.A., Longsheng, C., Shah, S.A.A., 2021. Assessing and overcoming the renewable energy barriers for sustainable development in Pakistan: An integrated AHP and fuzzy TOPSIS approach. *Renewable Energy* 173, 209–222. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.141>
- [66] Hu, J., Harmsen, R., Crijns-Graus, W., Worrell, E., van den Broek, M., 2018. Identifying barriers to large-scale integration of variable renewable electricity into

- the electricity market: A literature review of market design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, 2181–2195. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.028>
- [67] Ali, S., Xu, H., Al-amin, A.Q., Ahmad, N., 2019. Energy sources choice and environmental sustainability disputes: an evolutionary graph model approach. *Qual Quant* 53, 561–581. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11135-018-0775-9>
- [68] Ur Rehman, S.A., Cai, Y., Mirjat, N.H., Walasai, G.D., Nafees, M., 2019. Energy-environment-economy nexus in Pakistan: Lessons from a PAK-TIMES model. *Energy Policy* 126, 200–211. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.031>
- [69] Hussain Mirjat, N., Uqaili, M.A., Harijan, K., Mustafa, M.W., Rahman, M.M., Khan, M.W.A., 2018. Multi-Criteria Analysis of Electricity Generation Scenarios for Sustainable Energy Planning in Pakistan. *Energies* 11, 757. Available at: <https://doi.org/10.3390/en11040757>
- [70] Luceño-Sánchez, J.A., Díez-Pascual, A.M., Peña Capilla, R., 2019. Materials for Photovoltaics: State of Art and Recent Developments. *International Journal of Molecular Sciences* 20, 976. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijms20040976>
- [71] Solar Cell Construction Diagram and Working Principle, 2018. . *Electrical Engineering* 123. Available at: <https://electricalengineering123.com/solar-cell-construction-working-principle/>
- [72] Green, M.A., 2019. Photovoltaic technology and visions for the future. *Prog. Energy* 1, 013001. Available at: <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ab0fa8>
- [73] Husain, A.A.F., Hasan, W.Z.W., Shafie, S., Hamidon, M.N., Pandey, S.S., 2018. A review of transparent solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94, 779–791. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.031>
- [74] Rhode, E., n.d. Types of Solar Panels: Pros and Cons [WWW Document]. *Treehugger*. Available at: <https://www.treehugger.com/types-of-solar-panels-pros-and-cons-5181546>
- [75] Yin, W., Shi, T., Yan, Y., 2014. Unique Properties of Halide Perovskites as Possible Origins of the Superior Solar Cell Performance. *Advanced Materials* 26, 4653–4658. Available at: <https://doi.org/10.1002/adma.201306281>
- [76] Victoria, M., Haegel, N., Peters, I.M., Sinton, R., Jäger-Waldau, A., del Cañizo, C., Breyer, C., Stocks, M., Blakers, A., Kaizuka, I., Komoto, K., Smets, A., 2021. Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future. *Joule* 5, 1041–1056. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.03.005>
- [77] A 28-Year-Old Aims to Build Southeast Asia’s Top Solar Farm, 2021. . *Bloomberg.com*. Available at: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-11-16/a-28-year-old-wants-to-build-southeast-asia-s-biggest-solar-farm>

- [78] India, R., 2021. Solar Trackers [WWW Document]. renewsysworld. Available at: <https://www.renewsysworld.com/post/solar-trackers>
- [79] Al Garni, H.Z., Awasthi, A., 2018. Solar PV Power Plants Site Selection: A Review, in: *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*. Elsevier, pp. 57–75. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00002-2>
- [80] Patel, M.T., Ahmed, M.S., Imran, H., Butt, N.Z., Khan, M.R., Alam, M.A., 2021. Global analysis of next-generation utility-scale PV: Tracking bifacial solar farms. *Applied Energy* 290, 116478. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116478>
- [81] Patel, M.T., Khan, M.R., Sun, X., Alam, M.A., 2019. A worldwide cost-based design and optimization of tilted bifacial solar farms. *Applied Energy* 247, 467–479. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.150>
- [82] Andrade, A.M.S.S., Schuch, L., Da Silva Martins, M.L., 2019. Analysis and Design of High-Efficiency Hybrid High Step-Up DC–DC Converter for Distributed PV Generation Systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 66, 3860–3868. Available at: <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2840496>
- [83] Mehigan, L., Deane, J.P., Gallachóir, B.P.Ó., Bertsch, V., 2018. A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems. *Energy* 163, 822–836. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.022>
- [84] Zubo, Rana.H.A., Mokryani, G., Rajamani, H.-S., Aghaei, J., Niknam, T., Pillai, P., 2017. Operation and planning of distribution networks with integration of renewable distributed generators considering uncertainties: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72, 1177–1198. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.036>
- [85] Ehsan, A., Yang, Q., 2018. Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques. *Applied Energy* 210, 44–59. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.106>
- [86] Opie, R., 2018. Pitch Control Critical for Wind Power [WWW Document]. *Machine Design*. Available at: <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21836463/pitch-control-critical-for-wind-power>
- [87] Rehman, S., Alam, M.M., Alhems, L.M., Rafique, M.M., 2018. Horizontal Axis Wind Turbine Blade Design Methodologies for Efficiency Enhancement—A Review. *Energies* 11, 506. Available at: <https://doi.org/10.3390/en11030506>
- [88] Yang, J., Fang, L., Song, D., Su, M., Yang, X., Huang, L., Joo, Y.H., 2021. Review of control strategy of large horizontal-axis wind turbines yaw system. *Wind Energy* 24, 97–115. Available at: <https://doi.org/10.1002/we.2564>
- [89] Johari, M.K., Jalil, M., Shariff, M., 2018. Comparison of horizontal axis wind turbine

- (HAWT) and vertical axis wind turbine (VAWT) 7, 74–80. Available at: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.13.21333>
- [90] Kumar, R., Raahemifar, K., Fung, A.S., 2018. A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89, 281–291. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.033>
- [91] Jiang, Z., 2021. Installation of offshore wind turbines: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 139, 110576. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110576>
- [92] Bhattacharya, S., 2019. *Design of Foundations for Offshore Wind Turbines*. John Wiley & Sons. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781119128137>
- [93] Oceans unlocked - a floating wind future [WWW Document], n.d. . COWI. Available at: <https://www.cowi.com/insights/oceans-unlocked-a-floating-wind-future>
- [94] Letcher, T., 2023. *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*. Elsevier. Available at: <https://www.sciencedirect.com/book/9780323993531/wind-energy-engineering>
- [95] Ren, Z., Verma, A.S., Li, Y., Teuwen, J.J.E., Jiang, Z., 2021. Offshore wind turbine operations and maintenance: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 144, 110886. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110886>
- [96] Venus, T.E., Hinzmann, M., Bakken, T.H., Gerdes, H., Godinho, F.N., Hansen, B., Pinheiro, A., Sauer, J., 2020. The public’s perception of run-of-the-river hydropower across Europe. *Energy Policy* 140, 111422. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111422>
- [97] Sarzaeim, P., Bozorg-Haddad, O., Zolghadr-Asli, B., Fallah-Mehdipour, E., Loáiciga, H.A., 2018. Optimization of Run-of-River Hydropower Plant Design under Climate Change Conditions. *Water Resour Manage* 32, 3919–3934. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2027-0>
- [98] Kuriqi, A., Pinheiro, A.N., Sordo-Ward, A., Bejarano, M.D., Garrote, L., 2021. Ecological impacts of run-of-river hydropower plants—Current status and future prospects on the brink of energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 142, 110833. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110833>
- [99] Chala, G.T., Ma’Arof, M.I.N., Sharma, R., 2019. Trends in an increased dependence towards hydropower energy utilization—a short review. *Cogent Engineering* 6, 1631541. Available at: <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1631541>
- [100] Couto, T.B., Olden, J.D., 2018. Global proliferation of small hydropower plants – science and policy. *Frontiers in Ecology and the Environment* 16, 91–100. Available at: <https://doi.org/10.1002/fee.1746>

- [101] Kumar, K., Saini, R.P., 2022. A review on operation and maintenance of hydropower plants. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 49, 101704. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101704>
- [102] Kirmani, F., Pal, A., Mudgal, A., Shrestha, A., Siddiqui, A., 2021. Advantages and Disadvantages of Hydroelectric Power Plant. *International Journal of Innovative Science and Research Technology* 6, 2456–2165. Available at: <https://www.scribd.com/document/517945910/Advantages-and-Disadvantages-of-Hydroelectric-Power-Plant>
- [103] Ahmadi, A., El Haj Assad, M., Jamali, D.H., Kumar, R., Li, Z.X., Salameh, T., Al-Shabi, M., Ehyaei, M.A., 2020. Applications of geothermal organic Rankine Cycle for electricity production. *Journal of Cleaner Production* 274, 122950. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122950>
- [104] Moya, D., Aldás, C., Kaparaju, P., 2018. Geothermal energy: Power plant technology and direct heat applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94, 889–901. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.047>
- [105] Prananto, L.A., Juangsa, F.B., Iqbal, R.M., Aziz, M., Soelaiman, T.A.F., 2018. Dry steam cycle application for excess steam utilization: Kamojang geothermal power plant case study. *Renewable Energy* 117, 157–165. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.029>
- [106] Osman, A.I., Lai, Z.Y., Farghali, M., Yiin, C.L., Elgarahy, A.M., Hammad, A., Ihara, I., Al-Fatesh, A.S., Rooney, D.W., Yap, P.-S., 2023. Optimizing biomass pathways to bioenergy and biochar application in electricity generation, biodiesel production, and biohydrogen production. *Environ Chem Lett* 21, 2639–2705. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01613-2>
- [107] Khan, S., Nisar, A., Wu, B., Zhu, Q.-L., Wang, Y.-W., Hu, G.-Q., He, M., 2022. Bioenergy production in Pakistan: Potential, progress, and prospect. *Science of The Total Environment* 814, 152872. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152872>
- [108] Pramanik, S.K., Suja, F.B., Zain, S.M., Pramanik, B.K., 2019. The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraints. *Bioresource Technology Reports* 8, 100310. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100310>
- [109] Obileke, K., Nwokolo, N., Makaka, G., Mukumba, P., Onyeaka, H., 2021. Anaerobic digestion: Technology for biogas production as a source of renewable energy—A review. *Energy & Environment* 32, 191–225. Available at: <https://doi.org/10.1177/0958305X20923117>
- [110] Nachtane, M., Tarfaoui, M., Goda, I., Rouway, M., 2020. A review on the technologies, design considerations and numerical models of tidal current turbines. *Renewable Energy* 157, 1274–1288. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.155>

- [111] O'Doherty, T., O'Doherty, D.M., Mason-Jones, A., 2018. Tidal Energy Technology, in: Greaves, D., Iglesias, G. (Eds.), *Wave and Tidal Energy*. Wiley, pp. 105–150. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781119014492.ch4>
- [112] Warak, P., Goswami, P., 2020. Overview of Generation of Electricity using Tidal Energy, in: 2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC). Presented at the 2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC), IEEE, Nagpur, India, pp. 1–6. Available at: <https://doi.org/10.1109/STPEC49749.2020.9297690>
- [113] Molland, A.F., Turnock, S.R., 2022. Chapter 4 - Hydrofoils, in: Molland, A.F., Turnock, S.R. (Eds.), *Marine Rudders, Hydrofoils and Control Surfaces (Second Edition)*. Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 57–89. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824378-7.00005-6>
- [114] Mia, M., Islam, Md.A., Islam, M., 2021. Powering Offshore Structure Using Renewable Energy: A Review Study. *SSRN Electronic Journal* 05, 61–80. Available at: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3807353>
- [115] Barbarelli, S., Nastasi, B., 2021. Tides and Tidal Currents—Guidelines for Site and Energy Resource Assessment. *Energies* 14, 6123. Available at: <https://doi.org/10.3390/en14196123>
- [116] Sheng, W., 2019. Wave energy conversion and hydrodynamics modelling technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 109, 482–498. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.030>
- [117] Guo, B., Ringwood, J.V., 2021. Geometric optimisation of wave energy conversion devices: A survey. *Applied Energy* 297, 117100. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117100>
- [118] Al Shami, E., Zhang, R., Wang, X., 2019. Point Absorber Wave Energy Harvesters: A Review of Recent Developments. *Energies* 12, 47. Available at: <https://doi.org/10.3390/en12010047>
- [119] Vukajlović, N., Katie, V., Milicevic, D., Dumnice, B., Popadic, B., 2018. Active Control of Induction Generator in Ocean Wave Energy Conversion System. Available at: <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2018.8521902>
- [120] Zhang, Y., Zhao, Y., Sun, W., Li, J., 2021. Ocean wave energy converters: Technical principle, device realization, and performance evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 141, 110764. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110764>
- [121] Wave Energy, 2016. . *envirogroupmohawk*. Available at: <https://envirogroupmohawk.wordpress.com/2016/02/09/wave-energy/>
- [122] Kumar, S., Sethuraman, C., 2022. Grid tied inverters for renewable energy systems - a review. *International Journal of Environment and Sustainable Development* 21,

- 43–75. Available at: <https://doi.org/10.1504/IJESD.2022.119384>
- [123] Solatalkaran, D., Khajeh, K.G., Zare, F., 2021. A Novel Filter Design Method for Grid-Tied Inverters. *IEEE Trans. Power Electron.* 36, 5473–5485. Available at: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3029827>
- [124] Mohammad Noor, S.Z., Omar, A.M., Mahzan, N.N., Ibrahim, I.R., 2013. A review of single-phase single stage inverter topologies for photovoltaic system, in: 2013 IEEE 4th Control and System Graduate Research Colloquium. Presented at the 2013 IEEE 4th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), IEEE, Shah Alam, Malaysia, pp. 69–74. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICSGRC.2013.6653278>
- [125] Mahlooji, M.H., Mohammadi, H.R., Rahimi, M., 2018. A review on modeling and control of grid-connected photovoltaic inverters with LCL filter. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, 563–578. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.002>
- [126] Solatalkaran, D., Zare, F., Saha, T.K., Sharma, R., 2020. A Novel Approach in Filter Design for Grid-Connected Inverters Used in Renewable Energy Systems. *IEEE Trans. Sustain. Energy* 11, 154–164. Available at: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2887079>
- [127] Kavya Santhoshi, B., Mohana Sundaram, K., Padmanaban, S., Holm-Nielsen, J.B., K. K., P., 2019. Critical Review of PV Grid-Tied Inverters. *Energies* 12, 1921. Available at: <https://doi.org/10.3390/en12101921>
- [128] Rosenblatt, F., 1958. The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review* 65, 386–408. Available at: <https://doi.org/10.1037/h0042519>
- [129] Babaie, M., Sharifzadeh, M., Mehraza, M., Al-Haddad, K., 2020. Lyapunov Based Neural Network Estimator Designed for Grid-Tied Nine-Level Packed E-Cell Inverter, in: 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Presented at the 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), IEEE, New Orleans, LA, USA, pp. 3311–3315. Available at: <https://doi.org/10.1109/APEC39645.2020.9124449>
- [130] Mehraza, M., Babaie, M., Sharifzadeh, M., Al-Haddad, K., 2021. An Input–Output Feedback Linearization Control Method Synthesized by Artificial Neural Network for Grid-Tied Packed E-Cell Inverter. *IEEE Trans. on Ind. Applicat.* 57, 3131–3142. Available at: <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3049456>
- [131] Kovacic, Z., Bogdan, S., 2018. *Fuzzy Controller Design: Theory and Applications*. CRC Press. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781420026504>
- [132] Roselyn, J.P., Chandran, C.P., Nithya, C., Devaraj, D., Venkatesan, R., Gopal, V., Madhura, S., 2020. Design and implementation of fuzzy logic based modified real-reactive power control of inverter for low voltage ride through enhancement in grid connected solar PV system. *Control Engineering Practice* 101, 104494. Available

at: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104494>

- [133] Shah, M.L., Dhaneria, A., Modi, P.S., Khambhadiya, H., D, K.K., 2020a. Fuzzy Logic MPPT for Grid Tie Solar Inverter, in: 2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON). Presented at the 2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON), IEEE, Bangluru, India, pp. 1–6. Available at: <https://doi.org/10.1109/INOCON50539.2020.9298323>
- [134] Yap, K.Y., Sarimuthu, C.R., Lim, J.M.-Y., 2020. Artificial Intelligence Based MPPT Techniques for Solar Power System: A review. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 8, 1043–1059. Available at: <https://doi.org/10.35833/MPCE.2020.000159>
- [135] Gonzalez, J.M., Busada, C.A., Solsona, J.A., 2021. A Robust Controller for a Grid-Tied Inverter Connected Through an *LCL* Filter. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Ind. Electron.* 2, 82–89. Available at: <https://doi.org/10.1109/JESTIE.2020.3014834>
- [136] Díaz-Rodríguez, I.D., Han, S., Bhattacharyya, S.P., 2019a. Analytical Design of PID Controllers. Springer International Publishing, Cham. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-18228-1>
- [137] Liu, Q., Caldognetto, T., Buso, S., 2020. Review and Comparison of Grid-Tied Inverter Controllers in Microgrids. *IEEE Trans. Power Electron.* 35, 7624–7639. Available at: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2957975>
- [138] Azab, M., 2021. A finite control set model predictive control scheme for single-phase grid-connected inverters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135, 110131. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110131>
- [139] Zangeneh Bighash, E., Sadeghzadeh, S.M., Ebrahimzadeh, E., Blaabjerg, F., 2019. Robust MPC-based current controller against grid impedance variations for single-phase grid-connected inverters. *ISA Transactions* 84, 154–163. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.09.021>
- [140] Zhang, C., Wei, Y.-L., Cao, P.-F., Lin, M.-C., 2018. Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, 3091–3106. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.030>
- [141] Kularatna, N., Gunawardane, K., 2021. Energy Storage Devices for Renewable Energy-Based Systems: Rechargeable Batteries and Supercapacitors. Academic Press. Available at: <https://shop.elsevier.com/books/energy-storage-devices-for-renewable-energy-based-systems/kularatna/978-0-12-820778-9>
- [142] Xiao, Y., Wang, Y., Bo, S.-H., Kim, J.C., Miara, L.J., Ceder, G., 2019. Understanding interface stability in solid-state batteries. *Nat Rev Mater* 5, 105–126. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0157-5>
- [143] Chen, R., Li, Q., Yu, X., Chen, L., Li, H., 2020. Approaching Practically Accessible Solid-State Batteries: Stability Issues Related to Solid Electrolytes and Interfaces.

- Chem. Rev. 120, 6820–6877. Available at:
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00268>
- [144] Alvarez, G.E., 2020. Operation of pumped storage hydropower plants through optimization for power systems. *Energy* 202, 117797. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117797>
- [145] Chenna, A., Aouzellag, D., Ghedamsi, K., 2020. Study and Control of a Pumped Storage Hydropower System Dedicated to Renewable Energy Resources. *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 53, 95–102. Available at:
<https://doi.org/10.18280/jesa.530112>
- [146] Xu, B., Chen, D., Venkateshkumar, M., Xiao, Y., Yue, Y., Xing, Y., Li, P., 2019. Modeling a pumped storage hydropower integrated to a hybrid power system with solar-wind power and its stability analysis. *Applied Energy* 248, 446–462. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.125>
- [147] Groop, C.S., 2022. Pumped Storage Project explained. Tri-State Livestock News [WWW Document]. Available at: <https://www.tsln.com/news/pumped-storage-project-explained/>
- [148] Hunt, J.D., Falchetta, G., Parkinson, S., Vinca, A., Zakeri, B., Byers, E., Jurasz, J., Quaranta, E., Grenier, E., Pereira Junior, A.O., Barbosa, P.S.F., Brandão, R., de Castro, N.J., Schneider, P.S., Vieira, L.W., Nascimento, A., Wada, Y., 2021. Hydropower and seasonal pumped hydropower storage in the Indus basin:pros and cons. *Journal of Energy Storage* 41, 102916. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102916>
- [149] Dong, Z., Tan, J., Muljadi, E., Nelms, R.M., St-Hilaire, A., Pevarnik, M., Jacobson, M.D., 2020. Developing of Quaternary Pumped Storage Hydropower for Dynamic Studies. *IEEE Trans. Sustain. Energy* 11, 2870–2878. Available at:
<https://doi.org/10.1109/TSTE.2020.2980585>
- [150] Summit, E.C., n.d. Top Challenges and Solutions in Smart Grid Technology - EV Charging Summit Blog. Available at: <https://evchargingsummit.com/blog/top-challenges-and-solutions-in-smart-grid-technology/>
- [151] Smart grid, 2024. Wikipedia. Available at:
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Smart_grid&oldid=1199033451
- [152] Ghosal, A., Conti, M., 2019. Key Management Systems for Smart Grid Advanced Metering Infrastructure: A Survey. *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 21, 2831–2848. Available at: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2907650>
- [153] Gomathy, V., Kavitha, V., Nayantara, C., Khan, J.M.F., Vimalarani, G., Rani, S.S., 2021. Internet of Things-Based Advanced Metering Infrastructure (AMI) for Smart Grids, in: Kathiresh, M., Mahaboob Subahani, A., Kanagachidambaresan, G.R. (Eds.), *Integration of Renewable Energy Sources with Smart Grid*. Wiley, pp. 77–100. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781119751908.ch4>

- [154] Ugwu, J., Odo, K.C., Ohanu, C.P., García, J., Georgious, R., 2023. Comprehensive Review of Renewable Energy Communication Modeling for Smart Systems. *Energies* 16, 409. Available at: <https://doi.org/10.3390/en16010409>
- [155] Jabr, R.A., Džafić, I., 2022. Distribution Management Systems for Smart Grid: Architecture, Work Flows, and Interoperability. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 10, 300–308. Available at: <https://doi.org/10.35833/MPCE.2021.000542>
- [156] Rehmani, M.H., Reisslein, M., Rachedi, A., Erol-Kantarci, M., Radenkovic, M., 2018. Integrating Renewable Energy Resources Into the Smart Grid: Recent Developments in Information and Communication Technologies. *IEEE Trans. Ind. Inf.* 14, 2814–2825. Available at: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2819169>
- [157] Demand response [WWW Document], n.d. IEA. Available at: <https://www.iea.org/energy-system/energy-efficiency-and-demand/demand-response>
- [158] Jasim, A.M., Jasim, B.H., Mohseni, S., Brent, A.C., 2023. Energy Internet-Based Load Shifting in Smart Microgrids: An Experimental Study. *Energies* 16, 4957. Available at: <https://doi.org/10.3390/en16134957>
- [159] Sharda, S., Singh, M., Sharma, K., 2021. Demand side management through load shifting in IoT based HEMS: Overview, challenges and opportunities. *Sustainable Cities and Society* 65, 102517. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102517>
- [160] Zhao, D., Wang, H., Huang, J., Lin, X., 2022. Time-of-Use Pricing for Energy Storage Investment. *IEEE Transactions on Smart Grid* 13, 1165–1177. Available at: <https://doi.org/10.1109/TSG.2021.3136650>
- [161] Wesseh, P.K., Lin, B., 2022. A time-of-use pricing model of the electricity market considering system flexibility. *Energy Reports* 8, 1457–1470. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.12.027>
- [162] Kumamoto, T., Aki, H., Ishida, M., 2020. Provision of grid flexibility by distributed energy resources in residential dwellings using time-of-use pricing. *Sustainable Energy, Grids and Networks* 23, 100385. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100385>
- [163] Sweeney, C., Bessa, R.J., Browell, J., Pinson, P., 2020. The future of forecasting for renewable energy. *WIREs Energy & Environment* 9, e365. Available at: <https://doi.org/10.1002/wene.365>
- [164] Zheng, J., Du, J., Wang, B., Klemeš, J.J., Liao, Q., Liang, Y., 2023. A hybrid framework for forecasting power generation of multiple renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 172, 113046. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113046>
- [165] Al-Yahyai, S., Charabi, Y., Gastli, A., 2010. Review of the use of Numerical

- Weather Prediction (NWP) Models for wind energy assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 3192–3198. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.001>
- [166] Anagnostopoulos, T., Kyriakopoulos, G.L., Ntanos, S., Gkika, E., Asonitou, S., 2020. Intelligent Predictive Analytics for Sustainable Business Investment in Renewable Energy Sources. *Sustainability* 12, 2817. Available at: <https://doi.org/10.3390/su12072817>
- [167] Wang, H., Lei, Z., Zhang, X., Zhou, B., Peng, J., 2019. A review of deep learning for renewable energy forecasting. *Energy Conversion and Management* 198, 111799. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111799>
- [168] Mostafa, N., Ramadan, H.S.M., Elfarouk, O., 2022. Renewable energy management in smart grids by using big data analytics and machine learning. *Machine Learning with Applications* 9, 100363. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2022.100363>
- [169] Debnath, K.B., Mourshed, M., 2018. Forecasting methods in energy planning models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 88, 297–325. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.002>
- [170] In the electricity sector: Renewables use leading to big cuts in greenhouse-gas emissions [WWW Document]. Available at: <https://www.bmwk-energiewende.de/EWD/Redaktion/EN/Newsletter/2019/09/Meldung/direkt-answers-infographic.html>
- [171] Rahman, A., Farrok, O., Haque, M.M., 2022. Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 161, 112279. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279>
- [172] Twidell, J., 2021. *Renewable Energy Resources*. Routledge. Available at: <https://www.routledge.com/Renewable-Energy-Resources/Twidell/p/book/9780415633581>
- [173] Hache, E., 2018. Do renewable energies improve energy security in the long run? *International Economics* 156, 127–135. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.inteco.2018.01.005>
- [174] Agostini, M., Bertolini, M., Coppo, M., Fontini, F., 2021. The participation of small-scale variable distributed renewable energy sources to the balancing services market. *Energy Economics* 97, 105208. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105208>
- [175] Burke, M.J., Stephens, J.C., 2018. Political power and renewable energy futures: A critical review. *Energy Research & Social Science, Energy and the Future* 35, 78–93. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.018>
- [176] Klepacka, A.M., 2019. Significance of renewable energy sources in sustainable

- development. *Annals of the Polish Association of Agricultural and Agrobusiness Economists* 21. Available at: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.0852>
- [177] Kuik, O., Branger, F., Quirion, P., 2019. Competitive advantage in the renewable energy industry: Evidence from a gravity model. *Renewable Energy* 131, 472–481. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.046>
- [178] Wang, Q., Dong, Z., Li, R., Wang, L., 2022. Renewable energy and economic growth: New insight from country risks. *Energy* 238, 122018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122018>
- [179] Halkos, G.E., Gkampoura, E.-C., 2020. Reviewing Usage, Potentials, and Limitations of Renewable Energy Sources. *Energies* 13, 2906. Available at: <https://doi.org/10.3390/en13112906>
- [180] Renewable Energy Benefits Measuring the Economics, [WWW Document], 2016. Available at: <https://www.irena.org/publications/2016/jan/renewable-energy-benefits-measuring-the-economics>
- [181] Breyer, C., Khalili, S., Bogdanov, D., Ram, M., Oyewo, A.S., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Solomon, A.A., Keiner, D., Lopez, G., Østergaard, P.A., Lund, H., Mathiesen, B.V., Jacobson, M.Z., Victoria, M., Teske, S., Pregger, T., Fthenakis, V., Raugei, M., Holttinen, H., Bardi, U., Hoekstra, A., Sovacool, B.K., 2022. On the History and Future of 100% Renewable Energy Systems Research. *IEEE Access* 10, 78176–78218. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3193402>
- [182] Carbajo, R., Cabeza, L.F., 2018. Renewable energy research and technologies through responsible research and innovation looking glass: Reflexions, theoretical approaches and contemporary discourses. *Applied Energy* 211, 792–808. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.088>
- [183] Sim, J., Kim, C.-S., 2019. The value of renewable energy research and development investments with default consideration. *Renewable Energy* 143, 530–539. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.140>
- [184] Perea-Moreno, M.-A., Hernandez-Escobedo, Q., Perea-Moreno, A.-J., 2018. Renewable Energy in Urban Areas: Worldwide Research Trends. *Energies* 11, 577. Available at: <https://doi.org/10.3390/en11030577>
- [185] Hiwale, A.P., Gaikwad, D.S., Dongare, A.A., Mhatre, P.C., 2018. IoT Based Smart Energy Monitoring. *International Research Journal of Engineering and Technology* 5, 2522–2526. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/IOT-BASED-SMART-ENERGY-MONITORING-Hiwale-Gaikwad/748bb549bca2c73d427d0f3dd98e23ce36a20a80>
- [186] Eltamaly, A.M., Alotaibi, M.A., Alolah, A.I., Ahmed, M.A., 2021. IoT-Based Hybrid Renewable Energy System for Smart Campus. *Sustainability* 13, 8555. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13158555>

- [187] Serban, A.C., Lytras, M.D., 2020. Artificial Intelligence for Smart Renewable Energy Sector in Europe—Smart Energy Infrastructures for Next Generation Smart Cities. *IEEE Access* 8, 77364–77377. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990123>
- [188] Prajapati, V.K., Mahajan, V., 2021. Reliability assessment and congestion management of power system with energy storage system and uncertain renewable resources. *Energy* 215, 119134. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119134>
- [189] Mararakanye, N., Bekker, B., 2019. Renewable energy integration impacts within the context of generator type, penetration level and grid characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 108, 441–451. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.045>
- [190] Millstein, D., Wiser, R., Mills, A.D., Bolinger, M., Seel, J., Jeong, S., 2021. Solar and wind grid system value in the United States: The effect of transmission congestion, generation profiles, and curtailment. *Joule* 5, 1749–1775. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.05.009>
- [191] Capaciteitskaart invoeding elektriciteitsnet [WWW Document], n.d. Available at: <https://capaciteitskaart.netbeheernederland.nl>
- [192] Rahman, A., Farrok, O., Haque, M.M., 2022a. Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 161, 112279. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279>
- [193] Kramer, G.J., 2018. Energy scenarios—Exploring disruption and innovation. *Energy Research & Social Science* 37, 247–250. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.047>
- [194] Johnstone, P., Kivimaa, P., 2018. Multiple dimensions of disruption, energy transitions and industrial policy. *Energy Research & Social Science* 37, 260–265. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.027>
- [195] Saavedra M., M.R., de O. Fontes, C.H., M. Freires, F.G., 2018. Sustainable and renewable energy supply chain: A system dynamics overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, 247–259. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.033>
- [196] Everley, S., 2016. Climate Activists Push Study Showing 3.8 Million Lost Jobs from Renewable Energy Transition. Available at: <https://www.energyindepth.org/climate-activists-study-millions-lost-jobs-renewables/>
- [197] LaMasse, J., 2021. Examining the Sustainability of Sustainability: The Relationship Between Residential Solar Energy & Gentrification in San Diego, CA. Available at: <https://doi.org/10.17615/Q52S-RC72>

- [198] Hess, D.J., Lee, D., 2020. Energy decentralization in California and New York: Conflicts in the politics of shared solar and community choice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 121, 109716. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109716>
- [199] Kim, J.D., Trevena, W., 2021. Measuring the rebound effect: A case study of residential photovoltaic systems in San Diego. *Utilities Policy* 69, 101163. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101163>
- [200] Nabat, M.H., Soltani, M., Razmi, A.R., Nathwani, J., Dusseault, M.B., 2021. Investigation of a green energy storage system based on liquid air energy storage (LAES) and high-temperature concentrated solar power (CSP): Energy, exergy, economic, and environmental (4E) assessments, along with a case study for San Diego, US. *Sustainable Cities and Society* 75, 103305. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103305>
- [201] Sabzehgar, R., Amirhosseini, D.Z., Rasouli, M., 2020. Solar power forecast for a residential smart microgrid based on numerical weather predictions using artificial intelligence methods. *Journal of Building Engineering* 32, 101629. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101629>
- [202] Hansen, K., Mathiesen, B.V., Skov, I.R., 2019. Full energy system transition towards 100% renewable energy in Germany in 2050. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 102, 1–13. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.038>
- [203] Egerer, J., Oei, P.-Y., Lorenz, C., 2018. Renewable Energy Sources as the Cornerstone of the German Energiewende, in: von Hirschhausen, C., Gerbaulet, C., Kemfert, C., Lorenz, C., Oei, P.-Y. (Eds.), *Energiewende “Made in Germany”: Low Carbon Electricity Sector Reform in the European Context*. Springer International Publishing, Cham, pp. 141–172. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95126-3_6
- [204] Sait, M.A., Chigbu, U.E., Hamiduddin, I., De Vries, W.T., 2019. Renewable Energy as an Underutilised Resource in Cities: Germany’s ‘Energiewende’ and Lessons for Post-Brexit Cities in the United Kingdom. *Resources* 8, 7. Available at: <https://doi.org/10.3390/resources8010007>
- [205] von Hirschhausen, C., 2018. German Energy and Climate Policies: A Historical Overview, in: von Hirschhausen, C., Gerbaulet, C., Kemfert, C., Lorenz, C., Oei, P.-Y. (Eds.), *Energiewende “Made in Germany”: Low Carbon Electricity Sector Reform in the European Context*. Springer International Publishing, Cham, pp. 17–44. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95126-3_2
- [206] Shan, R., Sasthav, C., Wang, X., Lima, L.M.M., 2020. Complementary relationship between small-hydropower and increasing penetration of solar photovoltaics: Evidence from CAISO. *Renewable Energy* 155, 1139–1146. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.008>
- [207] Byrne, R.H., Nguyen, T.A., Headley, A., Wilches-Betnal, F., Concepcion, R., Trevizan, R.D., 2020. Opportunities and Trends for Energy Storage Plus Solar in

- CAISO: 2014-2018, in: 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Presented at the 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), IEEE, Montreal, QC, Canada, pp. 1–5. Available at: <https://doi.org/10.1109/PESGM41954.2020.9281883>
- [208] Hobbs, B.F., Zhang, J., Hamann, H.F., Siebensschuh, C., Zhang, R., Li, B., Krad, I., Krishnan, V., Spyrou, E., Wang, Y., Xu, Q., Zhang, S., 2022. Using probabilistic solar power forecasts to inform flexible ramp product procurement for the California ISO. *Solar Energy Advances* 2, 100024. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.seja.2022.100024>
- [209] Saha, S., Sriprasath, V.J., Ashwin, M.R., Shivram, B., Kumar, Anu.G., 2021. Renewable Energy Curtailment Reduction for California, in: 2021 International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT). Presented at the 2021 International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT), pp. 1–7. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICAECT49130.2021.9392581>
- [210] Hiebert, J., Alam, A., Vinnakota, V.R., Subakti, D., 2019. Operational Use of Synchrophasor Technology for Power System Oscillations Monitoring at California ISO, in: Nuthalapati, S. (NDR) (Ed.), *Power System Grid Operation Using Synchrophasor Technology, Power Electronics and Power Systems*. Springer International Publishing, Cham, pp. 285–296. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-89378-5_11
- [211] Johansen, K., 2021. Blowing in the wind: A brief history of wind energy and wind power technologies in Denmark. *Energy Policy* 152, 112139. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112139>
- [212] Carlini, F., Christensen, B.J., Datta Gupta, N., Santucci de Magistris, P., 2023. Climate, wind energy, and CO2 emissions from energy production in Denmark. *Energy Economics* 125, 106821. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106821>
- [213] Mey, F., Diesendorf, M., 2018. Who owns an energy transition? Strategic action fields and community wind energy in Denmark. *Energy Research & Social Science, Energy and the Future* 35, 108–117. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.044>
- [214] Ahsan, D., Pedersen, S., 2018. The influence of stakeholder groups in operation and maintenance services of offshore wind farms: Lesson from Denmark. *Renewable Energy* 125, 819–828. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.098>
- [215] Hannon, M., Topham, E., Dixon, J., Mcmillan, D., Collu, M., 2019. Offshore wind, ready to float? Global and UK trends in the floating offshore wind market. Available at: <https://doi.org/10.17868/69501>
- [216] Paterson, J., D’Amico, F., Thies, P.R., Kurt, R.E., Harrison, G., 2018. Offshore wind installation vessels – A comparative assessment for UK offshore rounds 1 and 2.

- Ocean Engineering 148, 637–649. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.08.008>
- [217] Aldersey-Williams, J., Broadbent, I.D., Strachan, P.A., 2020. Analysis of United Kingdom offshore wind farm performance using public data: Improving the evidence base for policymaking. *Utilities Policy* 62, 100985. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.jup.2019.100985>
- [218] Mytilinou, V., Kolios, A.J., 2019. Techno-economic optimisation of offshore wind farms based on life cycle cost analysis on the UK. *Renewable Energy* 132, 439–454. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.146>
- [219] RWE, 2023. Offshore wind | RWE in the UK [WWW Document]. Available at:
<https://uk.rwe.com/our-energy/offshore-wind/>
- [220] Solarin, S.A., Bello, M.O., 2022. Wind energy and sustainable electricity generation: evidence from Germany. *Environ Dev Sustain* 24, 9185–9198. Available at:
<https://doi.org/10.1007/s10668-021-01818-x>
- [221] Knauf, J., 2022. Can't buy me acceptance? Financial benefits for wind energy projects in Germany. *Energy Policy* 165, 112924. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112924>
- [222] Jung, C., Schindler, D., Grau, L., 2018. Achieving Germany's wind energy expansion target with an improved wind turbine siting approach. *Energy Conversion and Management* 173, 383–398. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.090>
- [223] Langer, K., Decker, T., Roosen, J., Menrad, K., 2018. Factors influencing citizens' acceptance and non-acceptance of wind energy in Germany. *Journal of Cleaner Production* 175, 133–144. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.221>
- [224] Jiang, H., Qiang, M., Fan, Q., Zhang, M., 2018. Scientific research driven by large-scale infrastructure projects: A case study of the Three Gorges Project in China. *Technological Forecasting and Social Change* 134, 61–71. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.05.012>
- [225] Cheng, D., Shi, X., Yu, J., 2021. The impact of green energy infrastructure on firm productivity: Evidence from the Three Gorges Project in China. *International Review of Economics & Finance* 71, 385–406. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.iref.2020.09.022>
- [226] Huang, L., Li, X., Fang, H., Yin, D., Si, Y., Wei, J., Liu, J., Hu, X., Zhang, L., 2019. Balancing social, economic and ecological benefits of reservoir operation during the flood season: A case study of the Three Gorges Project, China. *Journal of Hydrology* 572, 422–434. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.009>
- [227] Huang, Z., Wu, B., 2018. Three Gorges Dam: Environmental Monitoring Network

- and Practice. Springer, Berlin, Heidelberg. Available at:
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-55302-2>
- [228] Gyeltshen, S., 2022. Analysis of Bhutan's energy policies in relation to energy security and climate change: Policy perspective. *Energy Policy* 170, 113223. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113223>
- [229] Rai, A., Zangpo, D., Feuerbacher, A., 2024. Land cover changes and hydropower in Bhutan: Analyzing trade-offs in economic and ecosystem impacts. *Energy for Sustainable Development* 78, 101371. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101371>
- [230] Ogino, K., Son, J., Nakayama, M., 2021. Effectiveness of hydropower development finance: evidence from Bhutan and Nepal. *International Journal of Water Resources Development* 37, 491–507. Available at: <https://doi.org/10.1080/07900627.2020.1790342>
- [231] Fröstad, D., 2019. The importance of hydropower in relation to the achievement of the SDGs in Bhutan. Linnaeus University, Sweden. Available at: <https://lnu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1345090&dswid=-9100>
- [232] admin, 2019. Hydro High: Bhutan looks to expand capacity and energy trade [WWW Document]. *Power Line Magazine*. Available at: <https://powerline.net.in/2019/02/02/hydro-high/>
- [233] Munthe, C.E., 2019. The likelihood of a Norwegian Pumped-Storage that can support intermittent Power dispatch from Solar and Wind. University of Stavanger. Available at: <http://hdl.handle.net/11250/2621768>
- [234] Šćekić, L., Mujović, S., Radulović, V., 2020. Pumped Hydroelectric Energy Storage as a Facilitator of Renewable Energy in Liberalized Electricity Market. *Energies* 13, 6076. Available at: <https://doi.org/10.3390/en13226076>
- [235] Tellefsen, T., Van Putten, J., Gjerde, O., 2020. Norwegian Hydropower: Connecting to Continental Europe. *IEEE Power and Energy Mag.* 18, 27–35. Available at: <https://doi.org/10.1109/MPE.2020.3001417>
- [236] Pitorac, L., Vereide, K., Lia, L., 2020. Technical Review of Existing Norwegian Pumped Storage Plants. *Energies* 13, 4918. Available at: <https://doi.org/10.3390/en13184918>
- [237] Charmasson, J., Belsnes, M.M., Andersen, O., Eloranta, A., Graabak, I., Korpås, M., Helland, I., Sundt, H., Wolfgang, O., 2018. HydroBalance - Roadmap for large-scale balancing and energy storage from Norwegian hydropower. Available at: https://www.researchgate.net/publication/327509568_HydroBalance_-_Roadmap_for_large-scale_balancing_and_energy_storage_from_Norwegian_hydropower
- [238] Dobson, P., Dwivedi, D., Millstein, D., Krishnaswamy, N., Garcia, J., Kiran, M., 2020. Analysis of curtailment at The Geysers geothermal Field, California.

- Geothermics 87, 101871. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101871>
- [239] Tester, J.W., Beckers, K.F., Hawkins, A.J., Lukawski, M.Z., 2021. The evolving role of geothermal energy for decarbonizing the United States. *Energy Environ. Sci.* 14, 6211–6241. Available at: <https://doi.org/10.1039/D1EE02309H>
- [240] Farison, J., Garcia, J., Benn, B., 2022. Investigating Flexible Generation Capabilities at the Geysers (No. CEC-500-2022-005). California Energy Commission. Available at: <https://www.energy.ca.gov/publications/2022/investigating-flexible-generation-capabilities-geysers>
- [241] Millstein, D., Dobson, P., Jeong, S., 2020. The Potential to Improve the Value of U.S. Geothermal Electricity Generation Through Flexible Operations. *Journal of Energy Resources Technology* 143. Available at: <https://doi.org/10.1115/1.4048981>
- [242] Mangi, P.M., 2018. Geothermal Development in Kenya-Country Updates, in: 7th African Rift Geothermal Conference. Presented at the 7th African Rift Geothermal Conference, Kenya Electricity Generating Company, Kigali, Rwanda. Available at: https://www.academia.edu/73285818/Geothermal_Development_in_Kenya_Country_Updates?uc-g-sw=62051025
- [243] Merem, E., Twumasi, Y., Wesley, J., Olagbegi, D., Fageir, S., Crisler, M., Romorno, C., Alsarari, M., Hines, A., Ochai, G., Nwagboso, E., Leggett, S., Foster, D., Purry, V., Washington, J., 2019. Analyzing Geothermal Energy Use in the East African Region: The Case of Kenya. *Energy and Power* 9, 12–26. Available at: <https://doi.org/10.5923/j.ep.20190901.02>
- [244] Omenda, P., Mangi, P., Ofwona, C., Mwangi, M., 2021. Country Update Report for Kenya 2015-2019. Presented at the World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland. Available at: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01055.pdf>
- [245] Spittler, N., Davidsdottir, B., Shafiei, E., Diemer, A., 2021. Implications of renewable resource dynamics for energy system planning: The case of geothermal and hydropower in Kenya. *Energy Policy* 150, 111985. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111985>
- [246] Ragnarsson, Á., Steingrímsson, B., Thorhallsson, S., 2021. Geothermal Development in Iceland 2015-2019. Presented at the World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland. Available at: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01063.pdf>
- [247] Paulillo, A., Striolo, A., Lettieri, P., 2019. The environmental impacts and the carbon intensity of geothermal energy: A case study on the Hellisheiði plant. *Environment International* 133, 105226. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105226>
- [248] Karlsdottir, M.R., Heinonen, J., Palsson, H., Palsson, O.P., 2020. Life cycle assessment of a geothermal combined heat and power plant based on high

- temperature utilization. *Geothermics* 84, 101727. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101727>
- [249] Díaz-Ramírez, M., Jokull, S., Zuffi, C., Mainar-Toledo, M.D., Manfrida, G., 2023. Environmental Assessment of Hellisheidi Geothermal Power Plant based on Exergy Allocation Factors for Heat and Electricity Production. *Energies* 16, 3616. Available at: <https://doi.org/10.3390/en16093616>
- [250] OPET Finland, n.d. The world's largest biofuel CHP plant Alholmens Kraft, Pietarsaari. Energie. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/view/27538435/the-worldas-largest-biofuel-chp-plant-alholmens-kraft-pietarsaaripdf>
- [251] Alholmens Kraft [WWW Document], n.d. Available at: <https://www.alholmenskraft.com/en/home>
- [252] Drax Group, 2021. Driven by our purpose [WWW Document]. Drax Global. Available at: <https://www.drax.com/annual-report/driven-by-our-purpose/>
- [253] Creasey, G., 2021. Capacity of UK electricity generation assets in the 21st century, 2000 to 2019. *Energy Trends*. Available at: <https://www.gov.uk/government/publications/energy-trends-march-2021-special-feature-article-capacity-of-uk-electricity-generation-assets-in-the-21st-century-2000-to-2019>
- [254] admin, 2019, Carbon dioxide now being captured in first of its kind BECCS pilot [WWW Document]. Drax Global. Available at: https://www.drax.com/press_release/world-first-co2-beccs-ccus/
- [255] North, J., 2021. Preliminary Environmental Information Report – Vol 3 – Non-Technical Summary (No. 3). Available at: <https://beccs-drax.com/wp-content/uploads/2021/10/BECCS-at-Drax-PEIR-Volume-3-NTS.pdf>
- [256] Rajgor, G., 2016. Tidal developments power forward. *Renewable Energy Focus* 17, 147–149. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2016.06.006>
- [257] Coles, D., Greenwood, C., Vogler, A., Walsh, T., Taaffe, D., n.d. Assessment of the turbulent flow upstream of the Meygen Phase 1A tidal stream turbines. Available at: <https://tethys-engineering.pnnl.gov/sites/default/files/publications/AWTEC2018-367.pdf>
- [258] Yang, Z., Ren, Z., Li, Z., Xu, Y., Li, H., Li, W., Hu, X., 2022. A comprehensive analysis method for levelized cost of energy in tidal current power generation farms. *Renewable Energy* 182, 982–991. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.026>
- [259] Carlson, J.T., Adams, M., 2020. Assessing the consistency of in-stream tidal energy development policy in Nova Scotia, Canada. *Marine Policy* 113, 103743. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103743>

- [260] Gilmore, A., 2018. Infrastructural Landscapes: Integrating Renewable Energy with Landscape and Community in the Bay of Fundy, Nova Scotia (Thesis). Dalhousie University Halifax, Nova Scotia. Available at: <https://DalSpace.library.dal.ca/handle/10222/74087>
- [261] Lawrence, C.M., 2019. Social Licence and Tidal Energy Development in Nova Scotia, Canada (Thesis). Acadia University. Available at: https://openarchive.acadiau.ca/islandora/object/theses%3A3222?solar_nav%5Bid%5D=00d99a0552edf020ae5f&solar_nav%5Bpage%5D=25&solar_nav%5Boffset%5D=11
- [262] Waters, S., Aggidis, G., 2016. A World First: Swansea Bay Tidal lagoon in review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56, 916–921. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.011>
- [263] Petley, S., Aggidis, G., 2016. Swansea Bay tidal lagoon annual energy estimation. *Ocean Engineering* 111, 348–357. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.11.022>
- [264] Todeschini, G., 2017. Review of Tidal Lagoon Technology and Opportunities for Integration within the UK Energy System. *Inventions* 2, 14. Available at: <https://doi.org/10.3390/inventions2030014>
- [265] Electrification - Energy System [WWW Document], n.d. . IEA. Available at: <https://www.iea.org/energy-system/electricity/electrification>
- [266] Forecasting Electrification Rate | Energy Outlook 2050 | Enerdata [WWW Document], n.d. Available at: <https://eneroutlook.enerdata.net/electrification-rate-data-projections.html>
- [267] Almeshqab, F., Ustun, T.S., 2019. Lessons learned from rural electrification initiatives in developing countries: Insights for technical, social, financial and public policy aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 102, 35–53. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.035>
- [268] ElectriFi - The Electrification Financing Initiative - European Commission [WWW Document], n.d. Available at: https://international-partnerships.ec.europa.eu/policies/programming/projects/electrifi-electrification-financing-initiative_en
- [269] Zsiborács, H., Baranyai, N.H., Vincze, A., Zentkó, L., Birkner, Z., Máté, K., Pintér, G., 2019. Intermittent Renewable Energy Sources: The Role of Energy Storage in the European Power System of 2040. *Electronics* 8, 729. Available at: <https://doi.org/10.3390/electronics8070729>
- [270] Arsad, A.Z., Hannan, M.A., Al-Shetwi, A.Q., Mansur, M., Muttaqi, K.M., Dong, Z.Y., Blaabjerg, F., 2022. Hydrogen energy storage integrated hybrid renewable energy systems: A review analysis for future research directions. *International Journal of Hydrogen Energy* 47, 17285–17312. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.208>

- [271] Singh, R., Akram, S.V., Gehlot, A., Buddhi, D., Priyadarshi, N., Twala, B., 2022. Energy System 4.0: Digitalization of the Energy Sector with Inclination towards Sustainability. *Sensors* 22, 6619. Available at: <https://doi.org/10.3390/s22176619>
- [272] Baidya, S., Potdar, V., Pratim Ray, P., Nandi, C., 2021. Reviewing the opportunities, challenges, and future directions for the digitalization of energy. *Energy Research & Social Science* 81, 102243. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102243>
- [273] Mondejar, M.E., Avtar, R., Diaz, H.L.B., Dubey, R.K., Esteban, J., Gómez-Morales, A., Hallam, B., Mbungu, N.T., Okolo, C.C., Prasad, K.A., She, Q., Garcia-Segura, S., 2021. Digitalization to achieve sustainable development goals: Steps towards a Smart Green Planet. *Science of The Total Environment* 794, 148539. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148539>
- [274] Bauwens, T., Devine-Wright, P., 2018. Positive energies? An empirical study of community energy participation and attitudes to renewable energy. *Energy Policy* 118, 612–625. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.03.062>
- [275] Kang, E.S., Pee, S.J., Song, J.G., Jang, J.W., 2018. A Blockchain-Based Energy Trading Platform for Smart Homes in a Microgrid, in: 2018 3rd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). Presented at the 2018 3rd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS), pp. 472–476. Available at: <https://doi.org/10.1109/CCOMS.2018.8463317>
- [276] AlSkaif, T., Crespo-Vazquez, J.L., Sekuloski, M., van Leeuwen, G., Catalão, J.P.S., 2022. Blockchain-Based Fully Peer-to-Peer Energy Trading Strategies for Residential Energy Systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 18, 231–241. Available at: <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3077008>