



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τμήμα Περιβάλλοντος

Πτυχιακή εργασία

«Μελέτη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με έμφαση τον περιορισμό των
περιβαλλοντικών επιπτώσεων»

Εκπόνηση: Αλέξανδρος Βαλατσός

Επίβλεψη: Δρ. Δωροθέα Κασιτεροπούλου



Λάρισα, 2025

To conquer one's self, is to conquer all.

Ευχαριστίες

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελεί αυλαία των σπουδών μου στο Τμήμα Περιβάλλοντος, στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, στη Λάρισα. Έχω απέραντη ευγνωμοσύνη στους σπουδαίους καθηγητές του τμήματος, που με την ατομική και συλλογική συμβολή τους, θέτουν στιβαρά θεμέλια σε ένα καινούργιο τμήμα με μεγάλη προοπτική, για νέους ανθρώπους, που πρεσβεύουν τις ίδιες αξίες και έχουν τις ίδιες βλέψεις με αυτούς.

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την Δρ. Δωροθέα Κασιτεροπούλου, που εκτός από την επίβλεψη της πτυχιακής μου, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, υπήρξε σπουδαία οδηγός τόσο ως εκπαιδευτικός αλλά και ως άνθρωπος, πάντα με ευχάριστη παρουσία, όρεξη και επαγγελματισμό.

Τέλος, ευχαριστώ τους δικούς μου ανθρώπους και φίλους, που με υποστήριξαν με τον δικό τους τρόπο.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει την ανάπτυξη και την εφαρμογή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) ως βασικό μέσο για την αντιμετώπιση της αυξανόμενης παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας και της κλιματικής αλλαγής. Αναλύεται η σημασία των ΑΠΕ, όπως η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική, η βιομάζα, η γεωθερμική και η ωκεάνια ενέργεια, με έμφαση στις τεχνολογικές τους εφαρμογές, τα πλεονεκτήματα, τις προκλήσεις και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η εργασία ξεκινά με μια γενική επισκόπηση της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης, εστιάζοντας στη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και τη μετάβαση σε βιώσιμες πηγές ενέργειας. Γίνεται αναφορά στις σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις που έχουν καταστήσει τις ΑΠΕ πιο οικονομικά προσιτές και αποδοτικές. Παρουσιάζονται αναλυτικά οι κύριες μορφές ΑΠΕ, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι εφαρμογές τους, καθώς και οι μηχανισμοί αποθήκευσης ενέργειας που μπορούν να συμβάλουν στην αποτελεσματική ενσωμάτωσή τους στο ενεργειακό δίκτυο.

Επιπλέον, εξετάζονται οι περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των θετικών επιπτώσεων στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Αντίστοιχα, αναλύονται οι προκλήσεις που σχετίζονται με τη χωροθέτηση, την αστάθεια της παραγωγής και τις πιθανές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα.

Σημαντικό μέρος της διατριβής αφιερώνεται στις πολιτικές και κανονιστικές ρυθμίσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της Ελλάδας για την προώθηση των ΑΠΕ. Παρουσιάζονται οι στόχοι και οι στρατηγικές που έχουν υιοθετηθεί, καθώς και τα κίνητρα, οι επιδοτήσεις και τα σχέδια υποστήριξης που διευκολύνουν τη μετάβαση προς ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό σύστημα.

Τέλος, αναλύονται οι μελλοντικές προοπτικές και καινοτομίες στις τεχνολογίες των ΑΠΕ, καθώς και οι ευκαιρίες που προκύπτουν από την εξέλιξη των αποθηκευτικών συστημάτων και των έξυπνων δικτύων. Η διατριβή καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η επιτάχυνση της ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση ενός βιώσιμου και ανθεκτικού ενεργειακού μέλλοντος, τονίζοντας την ανάγκη συνεχούς τεχνολογικής εξέλιξης και υποστηρικτικών πολιτικών.

Abstract

This thesis explores the development and implementation of renewable energy sources (RES) as a key solution to addressing the increasing global energy demand and climate change. It analyzes the significance of RES, including solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, and ocean energy, focusing on their technological applications, benefits, challenges, and environmental impacts.

The study begins with a general overview of global energy demand, emphasizing the need to reduce dependence on fossil fuels and transition to sustainable energy sources. It discusses recent technological advancements that have made RES more cost-effective and efficient. A detailed analysis of the major types of RES, their technical characteristics, and applications is provided, along with an examination of energy storage mechanisms that enhance their integration into power grids.

Furthermore, the thesis investigates the environmental and socio-economic impacts of renewable energy sources, including their contribution to reducing carbon emissions, improving air quality, and generating new job opportunities. It also addresses challenges related to land use, intermittency in energy production, and potential effects on biodiversity.

A significant section of the study focuses on the regulatory policies and legislative frameworks of the European Union and Greece regarding the promotion of RES. It highlights key targets, strategies, and incentives, including subsidies, feed-in tariffs, and financial support mechanisms, aimed at facilitating the transition towards a sustainable energy system.

Finally, the thesis examines future prospects and innovations in renewable energy technologies, discussing opportunities arising from advancements in energy storage systems and smart grids. It concludes that accelerating the development of renewable energy is crucial for ensuring a sustainable and resilient energy future, emphasizing the importance of continuous technological evolution and supportive policies.

Résumé

Cette thèse explore le développement et la mise en œuvre des sources d'énergie renouvelable (SER) comme une solution clé pour répondre à la demande mondiale croissante en énergie et au changement climatique. Elle analyse l'importance des SER, comprenant l'énergie solaire, éolienne, hydroélectrique, la biomasse, géothermique et marine, en se concentrant sur leurs applications technologiques, leurs avantages, leurs défis et leurs impacts environnementaux.

L'étude commence par un aperçu général de la demande énergétique mondiale, en mettant l'accent sur la nécessité de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et de passer à des sources d'énergie durables. Elle discute des récentes avancées technologiques qui ont rendu les SER plus rentables et efficaces. Une analyse détaillée des principaux types de SER, de leurs caractéristiques techniques et de leurs applications est fournie, accompagnée d'un examen des mécanismes de stockage de l'énergie qui facilitent leur intégration dans les réseaux électriques.

De plus, la thèse examine les impacts environnementaux et socio-économiques des sources d'énergie renouvelables, notamment leur contribution à la réduction des émissions de carbone, à l'amélioration de la qualité de l'air et à la création de nouvelles opportunités d'emploi. Elle aborde également les défis liés à l'utilisation des terres, à l'intermittence de la production d'énergie et aux effets potentiels sur la biodiversité.

Une section importante de l'étude se concentre sur les politiques réglementaires et les cadres législatifs de l'Union Européenne et de la Grèce concernant la promotion des SER. Elle met en évidence les principaux objectifs, stratégies et incitations, y compris les subventions, les tarifs de rachat et les mécanismes de soutien financier, visant à faciliter la transition vers un système énergétique durable.

Enfin, la thèse examine les perspectives et innovations futures dans les technologies des énergies renouvelables, en discutant des opportunités découlant des avancées dans les systèmes de stockage d'énergie et les réseaux intelligents. Elle conclut que l'accélération du développement des énergies renouvelables est cruciale pour garantir un avenir énergétique durable et résilient, en soulignant l'importance d'une évolution technologique continue et de politiques de soutien.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	2
1.1 Ιστορικό για την παγκόσμια ζήτηση ενέργειας	2
1.2 Σημασία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	3
1.3 Στόχοι και Πεδίο της Εργασίας	5
2. Επισκόπηση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	7
2.1 Ηλιακή ενέργεια	7
2.1.1 Ανάλυση και δυνατότητες	7
2.1.2 Τύποι ηλιακής ενέργειας	9
2.2 Αιολική Ενέργεια.....	11
2.2.1 Επισκόπηση και δυνατότητες	11
2.2.2 Τύποι Συστημάτων Αιολικής Ενέργειας	14
2.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια	16
2.3.1 Επισκόπηση και δυνατότητες	16
2.3.2 Τύποι υδροηλεκτρικής ενέργειας	18
2.4 Ενέργεια από βιομάζα	20
2.4.1 Επισκόπηση και δυνατότητες	20
2.4.2 Τύποι βιομάζας	22
2.5 Γεωθερμική Ενέργεια	25
2.5.1 Επισκόπηση και δυνατότητες	25
2.5.2 Τύποι Γεωθερμικών Συστημάτων	26
2.6 Ωκεάνια και θαλάσσια ενέργεια	29
3. Τεχνολογίες για την αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	31
3.1 Τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας	31
3.1.1 Φωτοβολταϊκά Πάνελ.....	31
3.1.2 Ηλιοθερμικοί συλλέκτες.....	34

3.2 Τεχνολογίες Αιολικής Ενέργειας.....	37
3.3 Τεχνολογίες Βιομάζας	40
4. Θεωρητικές Βάσεις και Αρχές Ανανεώσιμων Τεχνολογιών	43
5. Περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	45
5.1 Περιβαλλοντικά Οφέλη και Προκλήσεις	45
5.2 Κοινωνικές Επιπτώσεις	47
6. Κανονισμοί ΕΕ και Ελλάδος για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Τεχνολογίες ..	50
6.1 Επισκόπηση των οδηγιών και πολιτικών της ΕΕ για τις ανανεώσιμες πηγές	50
6.1.1 Στόχοι για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών	50
6.1.2 Πράσινη Συμφωνία της ΕΕ και Πακέτο Καθαρής Ενέργειας	53
6.2 Ελληνικό Εθνικό Σχέδιο Ενέργειας και Κλίματος	56
6.2.1 Στόχοι Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Στρατηγικοί Στόχοι.....	56
6.2.2 Προκλήσεις και ευκαιρίες υλοποίησης	59
6.3 Επιδοτήσεις, Κίνητρα και Σχέδια Υποστήριξης στην Ελλάδα.....	61
6.3.1 Τιμολόγια τροφοδοσίας (Feed-in-Tarif) και πράσινα πιστοποιητικά	61
7.3.2 Οικονομικά και φορολογικά κίνητρα για έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	63
6.4 Συμμόρφωση και κανονιστικές προκλήσεις στην ΕΕ και την Ελλάδα	66
6.4.1 Διαδικασίες Περιβαλλοντικής Αδειοδότησης και Αδειοδότησης.....	66
6.4.2 Ενοποίηση στο Δίκτυο και Εξισορρόπηση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας ...	70
7. Προκλήσεις και Περιορισμοί των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	73
8. Μελλοντικές Προοπτικές και Καινοτομίες στις Ανανεώσιμες Τεχνολογίες.....	75
9. Συμπεράσματα.....	78
Βιβλιογραφία.....	83

1. Εισαγωγή

1.1 Ιστορικό για την παγκόσμια ζήτηση ενέργειας

Η παγκόσμια ζήτηση για ενέργεια έχει αυξηθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω της ταχείας αύξησης του πληθυσμού, της εκβιομηχάνισης και του αυξανόμενου βιοτικού επιπέδου παγκοσμίως. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας έχει υπερδιπλασιαστεί από τη δεκαετία του 1970, δημιουργώντας μια άνευ προηγουμένου πίεση στους φυσικούς πόρους και υπογραμμίζοντας την ανάγκη για βιώσιμες λύσεις για την κάλυψη αυτής της αυξανόμενης ζήτησης (Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας, 2020). Οι αναπτυσσόμενες χώρες, ειδικότερα, έχουν συμβάλει σε αυτό το κύμα, καθώς υφίστανται οικονομικές μεταβάσεις που απαιτούν σημαντικές εισροές ενέργειας για τη βιομηχανία καυσίμων, τις μεταφορές και την ανάπτυξη υποδομών (Smith, 2019). Η ζήτηση ενέργειας αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνεται, με ορισμένες προβλέψεις να υποδηλώνουν αύξηση 30% έως το 2040 εάν επιμείνουν οι τρέχουσες τάσεις (World Energy Outlook, 2021).

Τα ορυκτά καύσιμα, συμπεριλαμβανομένου του άνθρακα, του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, έχουν ιστορικά καλύψει ένα σημαντικό μέρος αυτής της ενεργειακής ζήτησης, αντιπροσωπεύοντας σχεδόν το 80% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας σύμφωνα με τις τελευταίες εκτιμήσεις (Jones, 2020). Ωστόσο, η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα έχει οδηγήσει σε σημαντικές περιβαλλοντικές συνέπειες, συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της υποβάθμισης των οικοσυστημάτων. Αυτές οι εκπομπές είναι πρωταρχικοί παράγοντες που συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή, η οποία αποτελεί σημαντική απειλή για την περιβαλλοντική σταθερότητα και την ανθρώπινη υγεία παγκοσμίως (Ηνωμένα Έθνη, 2021). Η ανάγκη για μείωση των εκπομπών άνθρακα και τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής έχει δημιουργήσει μια αλλαγή στις ενεργειακές πολιτικές παγκοσμίως, με τις κυβερνήσεις και τους διεθνείς οργανισμούς να θέτουν στόχους για τη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα και την αύξηση της υιοθέτησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Brown et al., 2018).

Αυτή η αυξανόμενη ζήτηση υπογραμμίζει επίσης το θέμα της ενεργειακής ασφάλειας, καθώς πολλές χώρες εξαρτώνται από εισαγόμενες πηγές ενέργειας, γεγονός που τις καθιστά ευάλωτες σε διακοπές εφοδιασμού και αστάθεια των τιμών (Kumar and Srivastava, 2018). Για παράδειγμα, οι γεωπολιτικές εντάσεις ή οι εμπορικές συγκρούσεις μπορεί να οδηγήσουν σε απότομες αλλαγές στη διαθεσιμότητα ενέργειας, επηρεάζοντας τόσο τις οικονομίες όσο και τα ατομικά μέσα διαβίωσης. Καθώς η ενέργεια γίνεται ζωτικό συστατικό της εθνικής ασφάλειας, τα έθνη επικεντρώνονται όλο και περισσότερο στην ανάπτυξη πηγών ενέργειας που μπορούν να ελεγχθούν εγχώρια, βιώσιμες και ανθεκτικές (Anderson and Johnson, 2020). Αυτή η εστίαση ενίσχυσε το ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες δεν είναι μόνο περιβαλλοντικά βιώσιμες αλλά και αποκεντρωμένες, μειώνοντας τους κινδύνους που σχετίζονται με κεντρικά ενεργειακά συστήματα που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα (Ghosh, 2019).

Η μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ενθαρρύνεται περαιτέρω από την πρόοδο της τεχνολογίας, η οποία έχει κάνει τις ανανεώσιμες πηγές πιο οικονομικά βιώσιμες. Οι ηλιακές και αιολικές τεχνολογίες, για παράδειγμα, έχουν δει ταχεία μείωση του κόστους, οδηγώντας σε επίπεδα ρεκόρ επενδύσεων και ανάπτυξης σε πολλές περιοχές (Zhang, 2021). Σύμφωνα με πρόσφατα δεδομένα, το ισοπεδωμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (LCOE) για τα ηλιακά φωτοβολταϊκά έχει μειωθεί σχεδόν κατά 90% την τελευταία δεκαετία, καθιστώντας το ανταγωνιστικό, ή ακόμα και φθηνότερο από εναλλακτικά ορυκτά καύσιμα σε πολλές αγορές (Διεθνής Οργανισμός Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, 2022). Αυτή η τάση αναμένεται να συνεχιστεί, ενισχύοντας ένα περιβάλλον στο οποίο οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να ανταποκριθούν σε σημαντικό μέρος της μελλοντικής ενεργειακής ζήτησης.

Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις για την κάλυψη των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών με βιώσιμο τρόπο. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι συχνά διακοπτόμενες - η ηλιακή ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη τη νύχτα και η αιολική ενέργεια εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα του ανέμου - θέτοντας προκλήσεις για συνεπή παροχή ενέργειας (Pérez-Arriaga, 2020). Για να αντιμετωπιστεί αυτό, η συνεχιζόμενη έρευνα επικεντρώνεται στη βελτίωση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, όπως η αποθήκευση μπαταριών και η αντλούμενη υδροηλεκτρική ενέργεια, οι οποίες είναι κρίσιμες για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Dunn et al., 2019). Οι κυβερνήσεις και ο ιδιωτικός τομέας επενδύουν επίσης στον εκσυγχρονισμό του δικτύου για την καλύτερη ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών στην υπάρχουσα ενεργειακή υποδομή, η οποία είναι απαραίτητη για έναν σταθερό και ανθεκτικό ενεργειακό εφοδιασμό (Thomas and Roberts, 2020).

1.2 Σημασία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν γίνει κεντρικής σημασίας για την αντιμετώπιση ορισμένων από τις πιο πιεστικές παγκόσμιες προκλήσεις, ιδιαίτερα την κλιματική αλλαγή, την ενεργειακή ασφάλεια και τη βιώσιμη ανάπτυξη. Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική και η βιομάζα αναπληρώνονται φυσικά και παράγουν ελάχιστες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, καθιστώντας τις απαραίτητες για τον μετριασμό των επιπτώσεων της υπερθέρμανσης του πλανήτη (IEA, 2020). Καθώς η κλιματική αλλαγή εντείνεται, με την αύξηση της θερμοκρασίας, τα ακραία καιρικά φαινόμενα και την απώλεια βιοποικιλότητας, υπάρχει μια αυξανόμενη συναίνεση ότι η ταχεία μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση των αποτυπωμάτων άνθρακα και την επίτευξη διεθνών κλιματικών στόχων (Ηνωμένα Έθνη, 2019).

Τα περιβαλλοντικά οφέλη από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εκτείνονται πέρα από τη μείωση των εκπομπών άνθρακα. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα, καθώς παράγουν λίγους έως καθόλου ατμοσφαιρικούς ρύπους σε σύγκριση με την παραδοσιακή καύση ορυκτών καυσίμων, η οποία αποτελεί σημαντική πηγή αστικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης και

συναφών προβλημάτων υγείας (Smith and Gupta, 2018). Αντικαθιστώντας τον άνθρακα και το πετρέλαιο με επιλογές καθαρότερης ενέργειας, η υιοθέτηση ανανεώσιμης ενέργειας μπορεί να μειώσει τις αναπνευστικές ασθένειες και άλλα θέματα υγείας που σχετίζονται με τη ρύπανση, μειώνοντας έτσι το κόστος υγειονομικής περίθαλψης και βελτιώνοντας τη δημόσια υγεία (WHO, 2021). Αυτή η σύνδεση μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της ανθρώπινης υγείας οδήγησε τις κυβερνήσεις και τους οργανισμούς να δώσουν προτεραιότητα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως μέρος των πολιτικών για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον (Brown et al., 2020).

Η ενεργειακή ασφάλεια είναι ένας άλλος κρίσιμος μοχλός για την υιοθέτηση της ανανεώσιμης ενέργειας. Οι χώρες που εξαρτώνται από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα είναι ευάλωτες σε διακοπές εφοδιασμού και αστάθεια των τιμών που προκαλούνται από γεωπολιτικές εντάσεις, εμπορικές διαμάχες και διακυμάνσεις της παγκόσμιας αγοράς (Kumar, 2019). Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ιδιαίτερα οι πηγές που μπορούν να παραχθούν εγχώρια, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, προσφέρουν ένα μονοπάτι για μεγαλύτερη ενεργειακή ανεξαρτησία και σταθερότητα (Jones and White, 2021). Αξιοποιώντας τους τοπικούς πόρους, οι χώρες μπορούν να μειώσουν την εξάρτησή τους από ξένες εισαγωγές ενέργειας, να βελτιώσουν το ισοζύγιο πληρωμών τους και να προστατευθούν από τις διεθνείς αυξήσεις των τιμών των καυσίμων (Anderson, 2020). Αυτή η μετατόπιση είναι ιδιαίτερα σημαντική για χώρες με περιορισμένα αποθέματα ορυκτών καυσίμων, καθώς τους δίνει τη δυνατότητα να παράγουν τη δική τους καθαρή ενέργεια και να προωθούν μια ανθεκτική ενεργειακή υποδομή (Ghosh, 2018).

Επιπλέον, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας υποστηρίζουν τη βιώσιμη οικονομική ανάπτυξη δημιουργώντας νέες ευκαιρίες απασχόλησης. Ο τομέας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι έντασης εργασίας και απαιτεί εργατικό δυναμικό για την κατασκευή, εγκατάσταση, συντήρηση και διαχείριση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα οποία μπορούν να τονώσουν τη δημιουργία θέσεων εργασίας τόσο στις ανεπτυγμένες όσο και στις αναπτυσσόμενες οικονομίες (IRENA, 2019). Ο Διεθνής Οργανισμός Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας εκτιμά ότι ο τομέας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα μπορούσε να απασχολήσει πάνω από 40 εκατομμύρια ανθρώπους παγκοσμίως έως το 2050, συμβάλλοντας στην ανακούφιση της φτώχειας και στην οικονομική διαφοροποίηση (IRENA, 2021). Καθώς ο κόσμος στρέφεται προς μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα, οι εργαζόμενοι από τις βιομηχανίες ορυκτών καυσίμων μπορούν να μεταβούν σε ρόλους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, υπό την προϋπόθεση ότι λαμβάνουν την κατάλληλη εκπαίδευση και υποστήριξη (Dunn and Lee, 2018).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι επίσης απαραίτητες για την προώθηση της κοινωνικής ισότητας και της πρόσβασης στην ενέργεια σε υποεξυπηρετούμενες περιοχές. Εκατομμύρια άνθρωποι παγκοσμίως δεν έχουν πρόσβαση σε αξιόπιστη ηλεκτρική ενέργεια, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές όπου η επέκταση του δικτύου είναι δύσκολη και δαπανηρή (World Bank, 2020). Λύσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εκτός δικτύου, όπως ηλιακά οικιακά συστήματα και μίνι δίκτυα, προσφέρουν προσιτές και

αξιόπιστες επιλογές ενέργειας για αυτές τις κοινότητες, βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής τους και επιτρέποντας οικονομικές δραστηριότητες όπως η εκπαίδευση, η υγειονομική περίθαλψη και οι μικρές επιχειρήσεις (Sovacool and Walters, 2019). Αυτός ο μετασχηματιστικός αντίκτυπος στην πρόσβαση στην ενέργεια μπορεί να συμβάλει στη μείωση των ανισοτήτων και στην προώθηση της ανάπτυξης χωρίς αποκλεισμούς, ευθυγραμμίζοντας με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών (SDGs), συγκεκριμένα τον Στόχο 7, ο οποίος απαιτεί οικονομικά προσιτή και καθαρή ενέργεια για όλους (OHE, 2020).

1.3 Στόχοι και Πεδίο της Εργασίας

Ο πρωταρχικός στόχος αυτής της εργασίας είναι να αναλύσει το τρέχον τοπίο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, να αξιολογήσει διάφορες τεχνολογίες και να εξετάσει τις προκλήσεις και τις ευκαιρίες που σχετίζονται με την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα υπάρχοντα ενεργειακά συστήματα. Με την αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση για καθαρή ενέργεια και την πιεστική ανάγκη για μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, αυτή η μελέτη στοχεύει να συμβάλει στη βαθύτερη κατανόηση του ρόλου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη δημιουργία ενός βιώσιμου και ανθεκτικού ενεργειακού μέλλοντος (Ghosh, 2018). Μέσα από μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας - συμπεριλαμβανομένης της ηλιακής, της αιολικής, της υδροηλεκτρικής ενέργειας, της βιομάζας, της γεωθερμίας και της θαλάσσιας ενέργειας - αυτή η διατριβή επιδιώκει να αξιολογήσει τα τεχνικά, οικονομικά και πολιτικά πλαίσια που είναι απαραίτητα για την υποστήριξη της μεγάλης κλίμακας υιοθέτησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Smith και Gupta , 2020).

Αυτή η έρευνα έχει τρεις κύριους στόχους. Πρώτον, στοχεύει να παρέχει μια λεπτομερή ανάλυση των κύριων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τις δυνατότητές τους για παραγωγή ενέργειας και τα μοναδικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς τους. Αυτή η ενότητα θα περιλαμβάνει μια ανασκόπηση της επιστημονικής βιβλιογραφίας, των τεχνικών εκθέσεων και των πρόσφατων περιπτώσεων μελετών για την περιγραφή της χωρητικότητας κάθε πηγής ενέργειας, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των απαιτήσεων πόρων (Kumar and Srivastava, 2019). Η κατανόηση των χαρακτηριστικών των διαφόρων ανανεώσιμων πηγών είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση της ανάπτυξής τους σε διαφορετικές γεωγραφικές και κλιματικές συνθήκες, διευκολύνοντας έτσι προσαρμοσμένες ενεργειακές λύσεις που καλύπτουν τις περιφερειακές ανάγκες και ικανότητες (Brown et al., 2018).

Δεύτερον, η εργασία θα διερευνήσει τις τεχνολογικές εξελίξεις που επιτρέπουν την αποτελεσματική αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Καινοτομίες σε ηλιακά φωτοβολταϊκά (PV) πάνελ, σχεδιασμός ανεμογεννητριών, μετατροπή βιομάζας και γεωθερμικές αντλίες θερμότητας έχουν βελτιώσει σημαντικά τη σκοπιμότητα και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Jones, 2021). Εξετάζοντας αυτές τις τεχνολογίες, αυτή η μελέτη στοχεύει να τονίσει πώς οι εξελίξεις καθιστούν τις ανανεώσιμες πηγές ανταγωνιστικές και σε πολλές περιπτώσεις

φθηνότερες από τις εναλλακτικές λύσεις ορυκτών καυσίμων. Θα αναλύσει επίσης τους περιορισμούς των τρεχουσών τεχνολογιών, όπως η διαλείπουσα ηλιακή και αιολική ενέργεια, και θα διερευνήσει αναδυόμενες λύσεις, συμπεριλαμβανομένης της αποθήκευσης ενέργειας και των έξυπνων δικτύων, που θα μπορούσαν να ενισχύσουν την αξιοπιστία και την ενσωμάτωση της ανανεώσιμης ενέργειας στα συστήματα ισχύος (Pérez-Arriaga, 2020).

Ο τρίτος στόχος είναι η αξιολόγηση των κοινωνικοοικονομικών και πολιτικών παραγόντων που επηρεάζουν την υιοθέτηση της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε περιφερειακό και εθνικό επίπεδο. Αυτό περιλαμβάνει εξέταση πολιτικών, κινήτρων και ρυθμιστικών πλαισίων που έχουν σχεδιαστεί για να ενθαρρύνουν την ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τιμολόγια τροφοδοσίας, φορολογικά κίνητρα και πρότυπα χαρτοφυλακίου ανανεώσιμων πηγών (Ηνωμένα Έθνη, 2019). Η ανάλυση πολιτικής θα επικεντρωθεί στο ρυθμιστικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς και στο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα της Ελλάδας, για να παράσχει μια μελέτη περίπτωσης σχετικά με το πώς οι πρωτοβουλίες βάσει πολιτικής μπορούν να επιταχύνουν την υιοθέτηση της ανανεώσιμης ενέργειας. Αυτή η ενότητα θα εξετάσει τον αντίκτυπο των επιδοτήσεων, των επενδυτικών κινήτρων και των ρυθμιστικών φραγμών στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, προσφέροντας πληροφορίες για τις βέλτιστες πρακτικές για την επίτευξη εθνικών και διεθνών ενεργειακών στόχων (Anderson, 2020).

Το αντικείμενο αυτής της εργασίας περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα θεμάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που καλύπτουν τεχνολογικές, οικονομικές και ρυθμιστικές προοπτικές. Ωστόσο, περιορίζεται στην εξέταση των καθιερωμένων ανανεώσιμων πηγών και ενώ οι αναδυόμενες τεχνολογίες όπως τα πάνελ καυσίμου υδρογόνου και η προηγμένη πυρηνική ενέργεια σχετίζονται με την ευρύτερη συζήτηση για την καθαρή ενέργεια, δεν θα καλυφθούν λεπτομερώς. Επιπλέον, η μελέτη θα επικεντρωθεί κυρίως στην παραγωγή ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και όχι τη μεταφορά, καθώς η τελευταία απαιτεί διαφορετικές υποδομές και τεχνολογικές εκτιμήσεις (Jackson and Green, 2018). Αυτή η εστίαση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αντανακλά την αυξανόμενη ανάγκη για απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές του τομέα της ενέργειας, ο οποίος ευθύνεται για ένα σημαντικό μέρος των παγκόσμιων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (World Energy Outlook, 2021).

2. Επισκόπηση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

2.1 Ηλιακή ενέργεια

2.1.1 Ανάλυση και δυνατότητες

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια από τις πιο άφθονες και βιώσιμες πηγές ενέργειας που είναι διαθέσιμες στη Γη. Προερχόμενη από την ηλιακή ακτινοβολία, η ηλιακή ενέργεια φθάνει στον πλανήτη μας σε τεράστιες ποσότητες - υπολογίζεται σε πάνω από 170.000 TW, που είναι περισσότερο από 10.000 φορές την τρέχουσα κατανάλωση ενέργειας στον κόσμο (IEA, 2020). Η ηλιακή ενέργεια αξιοποιεί αυτή την ακτινοβολία και τη μετατρέπει σε χρησιμοποιήσιμες μορφές ενέργειας, κυρίως ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα, καθιστώντας την μια εξαιρετικά ευέλικτη πηγή τόσο για οικιακές όσο και για βιομηχανικές εφαρμογές (Smith and Brown, 2019). Οι δυνατότητες της ηλιακής ενέργειας για την κάλυψη των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών είναι τεράστιες, καθώς ακόμη και ένα κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από τη Γη θα μπορούσε θεωρητικά να παρέχει αρκετή ενέργεια για όλες τις ανθρώπινες δραστηριότητες (Jones, 2021).

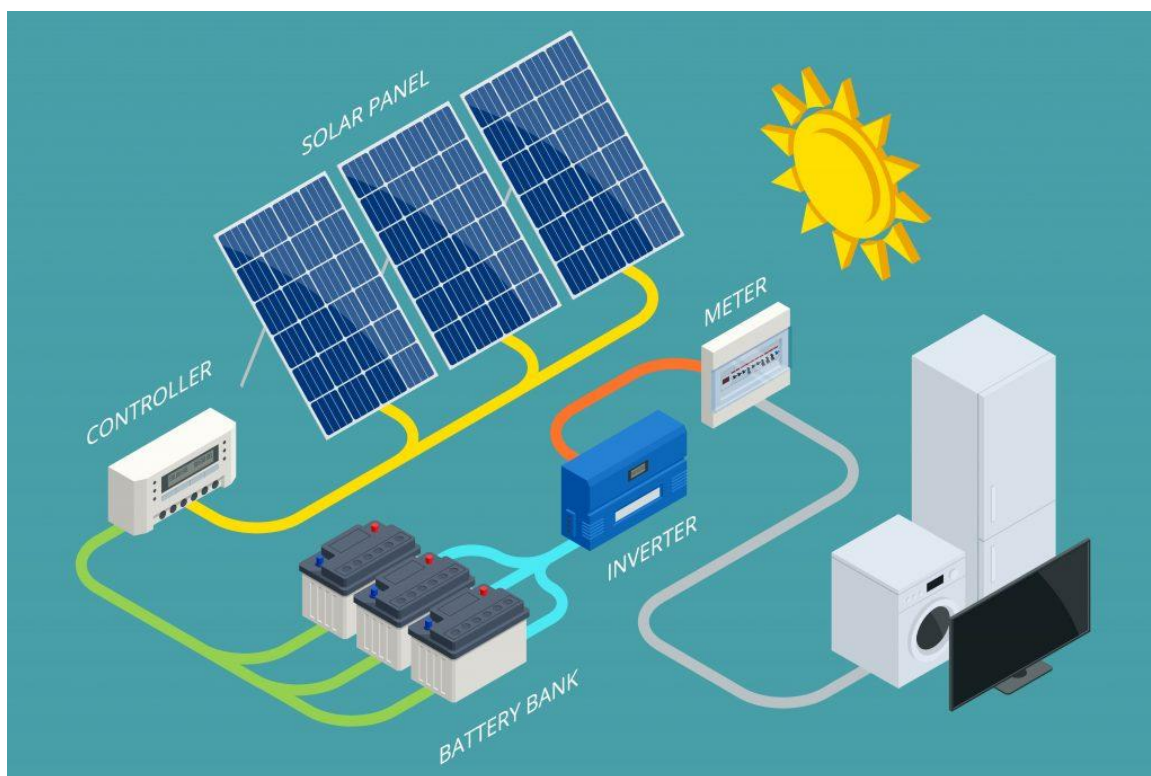


Figure 1. Solar panel system. Renewable energy concept. Simplified diagram of an off-grid system. Photovoltaic panels, battery, charge controller and inverter. (<https://www.dreamstime.com/>)

Τα συστήματα ηλιακής ενέργειας κατηγοριοποιούνται ευρέως σε δύο τύπους: φωτοβολταϊκά (ΦΒ) συστήματα και ηλιακά θερμικά συστήματα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν το ηλιακό φως απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας υλικά ημιαγωγών που παρουσιάζουν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, κυρίως το πυρίτιο (Green, 2018). Η πρόοδος στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών, ιδιαίτερα στην απόδοση

και τη μείωση του κόστους των ηλιακών συλλεκτών, έχει συμβάλει σημαντικά στην ταχεία επέκταση της ηλιακής ενέργειας σε όλο τον κόσμο. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA), το κόστος των ηλιακών φωτοβολταϊκών έχει μειωθεί πάνω από 80% από το 2010, καθιστώντας το μια από τις πιο ανταγωνιστικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας (IRENA, 2021). Τα ηλιακά θερμικά συστήματα, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιούν το ηλιακό φως για να θερμάνουν ένα ρευστό, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για σκοπούς θέρμανσης ή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός ατμοστρόβιλου (Ghosh, 2020). Αυτός ο τύπος ηλιακής ενέργειας είναι ιδιαίτερα πολύτιμος για βιομηχανικές εφαρμογές που απαιτούν θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας.

Η δυνατότητα της ηλιακής ενέργειας να μεταμορφώσει το παγκόσμιο ενεργειακό τοπίο έγκειται στην καθολική διαθεσιμότητά της, καθώς οι περισσότερες περιοχές λαμβάνουν αρκετό ηλιακό φως για να κάνουν εφικτή την ηλιακή ενέργεια (Anderson και Lee, 2019). Οι χώρες που βρίσκονται κοντά στον ισημερινό, όπως αυτές στη Μέση Ανατολή, τη Βόρεια Αφρική και τμήματα της Ασίας, έχουν ιδιαίτερα υψηλό ηλιακό δυναμικό λόγω των υψηλών επιπέδων άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας τους (Rashid, 2019). Ωστόσο, ακόμη και περιοχές με λιγότερο έντονο ηλιακό φως, όπως η Βόρεια Ευρώπη, υιοθετούν όλο και περισσότερο την ηλιακή ενέργεια χάρη στην πρόοδο της τεχνολογίας και τις ευνοϊκές κυβερνητικές πολιτικές (Jackson and Green, 2018).

Μία από τις πιο σημαντικές πτυχές της ηλιακής ενέργειας είναι οι ασημαντες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της. Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, η παραγωγή ηλιακής ενέργειας δεν παράγει ρύπανση του αέρα ή του νερού και παράγει αμελητέα απόβλητα. Επιπλέον, η ηλιακή ενέργεια συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθιστώντας την τεχνολογία κλειδί για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής (Ηνωμένα Έθνη, 2019). Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, η ευρεία υιοθέτηση της ηλιακής ενέργειας θα μπορούσε να μειώσει τις παγκόσμιες εκπομπές CO₂ κατά σχεδόν 1,6 γιγατόνους ετησίως, υποστηρίζοντας τις προσπάθειες περιορισμού της υπερθέρμανσης του πλανήτη (IEA, 2021). Αυτό οδήγησε σε σημαντικές επενδύσεις στην ηλιακή υποδομή, με χώρες σε όλο τον κόσμο να θέτουν φιλόδοξους στόχους για την ηλιακή δυναμικότητα ως μέρος των στρατηγικών τους για το κλίμα και την ενέργεια (Brown et al., 2020).

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η ηλιακή ενέργεια αντιμετωπίζει ορισμένες προκλήσεις που περιορίζουν την ευρεία υιοθέτησή της. Ένας από τους κύριους περιορισμούς είναι η διαλείπουσά της, καθώς η παραγωγή ηλιακής ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες και την ώρα της ημέρας (Pérez-Arriaga, 2020). Λύσεις αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες ιόντων λιθίου και προηγμένη θερμική αποθήκευση, αναπτύσσονται για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, αλλά προσθέτουν στο συνολικό κόστος των ηλιακών συστημάτων και απαιτούν περαιτέρω τεχνολογικές βελτιώσεις (Dunn et al., 2019). Επιπλέον, οι απαιτήσεις γης για μεγάλης κλίμακας ηλιακά πάρκα μπορεί να αποτελέσουν εμπόδιο σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπου η χρήση γης αποτελεί ανταγωνιστική προτεραιότητα (Smith, 2018). Η έρευνα σε εναλλακτικές εγκαταστάσεις,

όπως ηλιακά πάνελ ταράτσας και πλωτά ηλιακά πάρκα, στοχεύει να ξεπεράσει αυτούς τους περιορισμούς χώρου και να επεκτείνει την ηλιακή χωρητικότητα (Kumar and Srivastava, 2020).

Όσον αφορά τις μελλοντικές δυνατότητες, η ηλιακή ενέργεια αναμένεται να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στις παγκόσμιες στρατηγικές ενεργειακής μετάβασης. Πολλές χώρες αυξάνουν τις επενδύσεις τους στην έρευνα και τις υποδομές ηλιακής ενέργειας, υποστηριζόμενες από πολιτικές που ενθαρρύνουν την ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και μειώνουν τα εμπόδια στην είσοδο στην αγορά (Anderson, 2020). Ως αποτέλεσμα, η χωρητικότητα ηλιακής ενέργειας έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, με τις προβλέψεις να υποδεικνύουν τη συνεχιζόμενη ανάπτυξη που οδηγείται από τη μείωση του κόστους, τις τεχνολογικές εξελίξεις και την επείγουσα ανάγκη απαλλαγής από τον άνθρακα των ενεργειακών συστημάτων (Jones and White, 2021).

2.1.2 Τύποι ηλιακής ενέργειας

Οι τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας είναι ποικίλες, αξιοποιώντας διαφορετικές μεθόδους για την αξιοποίηση της ενέργειας του ήλιου για ποικίλες εφαρμογές. Οι δύο κύριοι τύποι τεχνολογιών ηλιακής ενέργειας είναι **τα ηλιακά φωτοβολταϊκά (PV) συστήματα** και **τα ηλιακά θερμικά συστήματα**. Κάθε σύστημα χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια διαφορετικά, προσφέροντας μοναδικά οφέλη, προκλήσεις και εφαρμογές. Αυτή η ενότητα διερευνά τα χαρακτηριστικά, τις χρήσεις και τις τεχνολογικές διακρίσεις αυτών των δύο κύριων τύπων ηλιακής ενέργειας, μαζί με τα αναδυόμενα υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν στοιχεία και των δύο (Smith, 2019).

1. Ηλιακά Φωτοβολταϊκά (ΦΒ) Συστήματα

Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν το ηλιακό φως απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ, συνήθως κατασκευασμένα από πυρίτιο, απορροφούν φωτόνια από το ηλιακό φως, προκαλώντας την ενεργοποίηση των ηλεκτρονίων και τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος (Green, 2018). Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών είναι ευρέως αναγνωρισμένη για την ευελιξία και την ευκολία εγκατάστασης, επιτρέποντάς της να χρησιμοποιείται σε οικιακούς, εμπορικούς και βιομηχανικούς χώρους. Τα τελευταία χρόνια, οι εξελίξεις στα ΦΒ υλικά, όπως το μονοκρυσταλλικό και το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, έχουν βελτιώσει τα ποσοστά απόδοσης, καθιστώντας τα φωτοβολταϊκά συστήματα πιο οικονομικά και προσβάσιμα (Brown et al., 2020).

Υπάρχουν διάφοροι υποτύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων **των ηλιακών συλλεκτών ταράτσας, των επίγειων συστημάτων και των πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων**. Τα ηλιακά πάνελ ταράτσας είναι κοινά σε αστικές περιοχές, όπου παρέχουν έναν αποκεντρωμένο τρόπο για τα νοικοκυριά και τις επιχειρήσεις να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια (Kumar and Lee, 2019). Τα επίγεια φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται συχνά σε ηλιακά πάρκα κλίμακας κοινής ωφέλειας, όπου μεγάλες εκτάσεις γης είναι αφιερωμένες στην παραγωγή ηλιακής ενέργειας (Jackson and Green,

2018). Τα πλωτά φωτοβολταϊκά συστήματα είναι μια αναδυόμενη λύση, ιδιαίτερα επωφελής σε περιοχές με περιορισμένη διαθεσιμότητα γης, καθώς εγκαθίστανται σε υδάτινα σώματα, μειώνοντας τον ανταγωνισμό της γης και βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση χρησιμοποιώντας το ψυκτικό αποτέλεσμα του νερού (Smith, 2019).

Ένα αξιοσημείωτο πλεονέκτημα των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η προσαρμοστικότητά τους σε διάφορες κλίμακες και θέσεις. Για παράδειγμα, τα φωτοβολταϊκά συστήματα στέγης μπορούν να παρέχουν ενεργειακή ανεξαρτησία σε μεμονωμένα κτίρια, ενώ τα μεγάλης κλίμακας ηλιακά πάρκα συμβάλλουν σημαντικά στα εθνικά δίκτυα (Jones and White, 2021). Ωστόσο, τα φωτοβολταϊκά συστήματα αντιμετωπίζουν επίσης περιορισμούς, όπως μειωμένη απόδοση τις συννεφιασμένες μέρες και τη νύχτα. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, πολλές εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συνδυάζονται πλέον με **συστήματα αποθήκευσης μπαταριών** που επιτρέπουν την αποθήκευση και χρήση της περίσσειας ενέργειας όταν το ηλιακό φως δεν είναι διαθέσιμο (Dunn et al., 2019).

2. Ηλιοθερμικά Συστήματα

Τα ηλιακά θερμικά συστήματα συλλαμβάνουν το ηλιακό φως για να παράγουν θερμότητα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας ή να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα συστήματα χωρίζονται σε **ηλιακά θερμικά χαμηλής θερμοκρασίας**, που χρησιμοποιούνται κυρίως για θέρμανση νερού και αέρα σε οικιακές εφαρμογές και σε **ηλιακά θερμικά υψηλής θερμοκρασίας**, τα οποία παράγουν ατμό για βιομηχανικές διεργασίες και σταθμούς παραγωγής ενέργειας (Ghosh, 2020). Ηλιακά θερμικά συστήματα υψηλής θερμοκρασίας, όπως η **συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (CSP)**, χρησιμοποιούν καθρέφτες ή φακούς για να εστιάσουν το ηλιακό φως σε ένα συγκεκριμένο σημείο, παράγοντας έντονη θερμότητα που οδηγεί έναν ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Jones, 2021).

Το CSP χρησιμοποιείται συχνά σε περιοχές με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία, όπως οι έρημοι, όπου το ηλιακό φως είναι έντονο και σταθερό. Η τεχνολογία CSP περιλαμβάνει διάφορα σχέδια, όπως **παραβολικές γούρνες**, **ηλιακούς πύργους** και **συστήματα πιάτων**, το καθένα με μοναδικούς μηχανισμούς για τη συγκέντρωση του ηλιακού φωτός (Anderson, 2020). Για παράδειγμα, οι ηλιακοί πύργοι χρησιμοποιούν ένα πεδίο κατόπτρων, γνωστά ως ηλιοστάτες, για να εστιάσουν το ηλιακό φως σε έναν δέκτη στην κορυφή ενός κεντρικού πύργου. Αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει τη δημιουργία υψηλότερης θερμοκρασίας, βελτιώνοντας την απόδοση και καθιστώντας το CSP ιδιαίτερα πολύτιμο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας (Smith and Gupta, 2018).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των ηλιακών θερμικών συστημάτων, ιδιαίτερα του CSP, είναι η ικανότητά τους να ενσωματώνουν **αποθήκευση θερμικής ενέργειας**. Σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι μονάδες CSP μπορούν να αποθηκεύσουν θερμότητα σε υλικά όπως λιωμένα άλατα, επιτρέποντάς τους να συνεχίσουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια ακόμη και μετά τη δύση του ηλίου. Αυτή η ικανότητα καθιστά τα ηλιακά θερμικά

συστήματα ελκυστική επιλογή για τη μείωση της διαλείπουσας ηλιακής ενέργειας και την παροχή πιο σταθερής ισχύος εξόδου (Pérez-Arriaga, 2020). Ωστόσο, τα συστήματα CSP είναι γενικά πιο ακριβά και πολύπλοκα από τα φωτοβολταϊκά και απαιτούν συγκεκριμένες γεωγραφικές συνθήκες - όπως άφθονο άμεσο ηλιακό φως και μεγάλοι ανοιχτοί χώροι - για να είναι βιώσιμα (Rashid, 2019).

3. Υβριδικά Ηλιακά Συστήματα

Οι αναδυόμενες τεχνολογίες ενσωματώνουν πλέον τόσο φωτοβολταϊκά όσο και θερμικά εξαρτήματα για τη δημιουργία **υβριδικών ηλιακών συστημάτων** που μεγιστοποιούν την απόδοση και την ευελιξία της ηλιακής ενέργειας. Αυτά τα συστήματα μπορούν να παράγουν ταυτόχρονα ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν τόσο ρεύμα όσο και θερμότητα, όπως βιομηχανικές διεργασίες και τηλεθέρμανση (Kumar and Srivastava, 2020). Μια πολλά υποσχόμενη υβριδική τεχνολογία είναι **το φωτοβολταϊκό-θερμικό (PVT)**, το οποίο συνδυάζει φωτοβολταϊκά πάνελ με ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες. Τα συστήματα PVT μπορούν να χρησιμοποιήσουν τη θερμότητα που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, που συνήθως θεωρείται υποπροϊόν, για θερμικές εφαρμογές, ενισχύοντας τη συνολική ενεργειακή απόδοση (Green, 2018).

Τα υβριδικά ηλιακά συστήματα κερδίζουν την προσοχή σε περιοχές όπου οι ενεργειακές ανάγκες ποικίλλουν και απαιτούνται τόσο ηλεκτρισμός όσο και θερμότητα. Αντιπροσωπεύουν έναν πολλά υποσχόμενο τομέα έρευνας για τη βελτιστοποίηση της χρησιμότητας της ηλιακής ενέργειας, ιδιαίτερα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές όπου η διαθεσιμότητα γης είναι περιορισμένη και η μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας από κάθε εγκατάσταση είναι απαραίτητη (Anderson and Lee, 2019).

2.2 Αιολική Ενέργεια

2.2.1 Επισκόπηση και δυνατότητες

Η αιολική ενέργεια είναι μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες πηγές ανανεώσιμης ενέργειας παγκοσμίως, αξιοποιώντας την κινητική ενέργεια του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των πτερυγίων του ρότορα που συλλαμβάνουν τη δύναμη του ανέμου, ο οποίος στη συνέχεια οδηγεί μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Smith, 2019). Αυτή η μέθοδος παραγωγής ενέργειας είναι εξαιρετικά βιώσιμη, καθώς βασίζεται σε φυσικά ρεύματα ανέμου και δεν παράγει εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά τη λειτουργία (IEA, 2020). Με σημαντικές εξελίξεις στην τεχνολογία και μείωση του κόστους, η αιολική ενέργεια γίνεται όλο και πιο ανταγωνιστική με τις πηγές ορυκτών καυσίμων και αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση (Jackson and Green, 2018).



Figure 2. Ανεμογεννήτριες σε πεδιάδα - Turbines in rural landscape

Οι δυνατότητες για αιολική ενέργεια είναι τεράστιες, ιδιαίτερα σε περιοχές με ισχυρά και σταθερά αιολικά μοτίβα. Σύμφωνα με το Παγκόσμιο Συμβούλιο Αιολικής Ενέργειας, η αιολική ενέργεια θα μπορούσε να προσφέρει πάνω από το 20% της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας έως το 2050, εάν συνεχιστούν οι τρέχοντες ρυθμοί ανάπτυξης και εφαρμοστούν υποστηρικτικές πολιτικές (GWEC, 2021). Αυτό το δυναμικό ενισχύεται περαιτέρω από την υπεράκτια αιολική τεχνολογία, η οποία επιτρέπει την ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας αιολικών πάρκων σε παράκτιες και βαθιές περιοχές όπου οι ταχύτητες ανέμου είναι γενικά υψηλότερες και πιο συνεπείς (Jones and White, 2021). Οι υπεράκτιοι αιολικοί πόροι είναι ιδιαίτερα άφθονοι σε περιοχές όπως η Βόρεια Ευρώπη, η Ανατολική Ακτή των Ηνωμένων Πολιτειών και τμήματα της Ασίας, όπου βρίσκονται σε εξέλιξη έργα μεγάλης κλίμακας για την αξιοποίηση αυτών των πλούσιες σε ενέργεια περιοχές (Anderson and Lee, 2019).

Τα συστήματα αιολικής ενέργειας κατηγοριοποιούνται σε δύο βασικούς τύπους: **χερσαία αιολική** και **υπεράκτια αιολική ενέργεια**. Οι χερσαίες ανεμογεννήτριες συνήθως βρίσκονται στην ξηρά σε περιοχές με ευνοϊκές συνθήκες ανέμου, όπως πεδιάδες και ορεινά περάσματα. Η χερσαία αιολική ενέργεια αναπτύσσεται ευρύτερα λόγω του χαμηλότερου κόστους εγκατάστασης και συντήρησης, καθώς και της ευκολίας ολοκλήρωσης του δικτύου (Kumar and Srivastava, 2020). Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, αντίθετα, εγκαθίστανται σε υδάτινα σώματα, συνήθως σε υφαλοκρηπίδες ή πιο έξω στη θάλασσα στην περίπτωση πλωτών τουρμπινών. Ο υπεράκτιος άνεμος έχει μεγαλύτερες δυνατότητες για παραγωγή ενέργειας μεγάλης κλίμακας λόγω ισχυρότερων και πιο σταθερών ταχυτήτων ανέμου.

Ωστόσο, παρουσιάζει επίσης προκλήσεις που σχετίζονται με υψηλότερο κόστος εγκατάστασης, πολύπλοκη συντήρηση και τεχνολογικές απαιτήσεις (Smith, 2019).

Τα περιβαλλοντικά οφέλη της αιολικής ενέργειας την καθιστούν πολύτιμο στοιχείο των παγκόσμιων προσπαθειών για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Αντικαθιστώντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα, η αιολική ενέργεια συμβάλλει στη μείωση των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και συμβάλλει στην επίτευξη κλιματικών στόχων, όπως οι στόχοι που τίθενται από τη Συμφωνία του Παρισιού (Ηνωμένα Έθνη, 2019). Μελέτες δείχνουν ότι ένα τυπικό χερσαίο αιολικό πάρκο μπορεί να αντισταθμίσει το ισοδύναμο των 0,5 έως 1,0 μετρικών τόνων εκπομπών CO₂ ανά μεγαβατώρα (MWh) παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (IEA, 2020). Εκτός από τις χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της, η αιολική ενέργεια δεν καταναλώνει υδάτινους πόρους, σε αντίθεση με πολλούς συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, καθιστώντας την ιδιαίτερα ωφέλιμη σε ξηρές περιοχές όπου η λειψυδρία προκαλεί ανησυχία (Ghosh, 2020).

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η αιολική ενέργεια αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις. Το πιο αξιοσημείωτο είναι η διαλείπουσά της, καθώς η παραγωγή αιολικής ενέργειας εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες και μπορεί να ποικίλλει σημαντικά με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η μεταβλητότητα απαιτεί συμπληρωματικές πηγές ενέργειας ή προηγμένες λύσεις αποθήκευσης ενέργειας για την εξασφάλιση αξιόπιστης παροχής ρεύματος (Pérez-Arriaga, 2020). Για να αντιμετωπιστεί αυτό, πολλές χώρες επενδύουν σε υβριδικά ενεργειακά συστήματα που συνδυάζουν τον άνεμο με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή ή η υδροηλεκτρική ενέργεια, για να δημιουργήσουν ένα πιο ισορροπημένο και αξιόπιστο ενεργειακό μείγμα (Brown et al., 2020). Επιπλέον, ο οπτικός και ακουστικός αντίκτυπος των χερσαίων αιολικών πάρκων έχει εγείρει ανησυχίες μεταξύ των τοπικών κοινοτήτων, οδηγώντας συχνά σε αντίθεση σε νέες εξελίξεις σε πυκνοκατοικημένες περιοχές (Jones, 2021). Αντίθετα, ο υπεράκτιος άνεμος αντιμετωπίζει γενικά λιγότερη αντίσταση, καθώς βρίσκεται μακριά από κατοικημένες περιοχές και μπορεί να αξιοποιήσει μεγαλύτερες τουρμπίνες που παράγουν περισσότερη ισχύ ανά μονάδα (Rashid, 2019).

Κοιτάζοντας το μέλλον, το μέλλον της αιολικής ενέργειας φαίνεται πολλά υποσχόμενο, με τη συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη να επικεντρώνεται στη βελτίωση της απόδοσης του στρόβιλου, στην παράταση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού και στη μείωση του λειτουργικού κόστους. Καινοτομίες όπως **οι πλωτές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες** επιτρέπουν εγκαταστάσεις σε βαθύτερα νερά, ανοίγοντας νέες περιοχές για ανάπτυξη αιολικής ενέργειας και επεκτείνοντας σημαντικά τη δυναμικότητα (Anderson, 2020). Οι πλωτοί στρόβιλοι αναμένεται να έχουν ιδιαίτερη επίδραση σε χώρες με περιορισμένα ρηχά νερά αλλά ισχυρούς υπεράκτιους αιολικούς πόρους, όπως η Ιαπωνία και τμήματα της Μεσογείου (Smith and Gupta, 2018).

2.2.2 Τύποι Συστημάτων Αιολικής Ενέργειας

Τα συστήματα αιολικής ενέργειας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρέως σε δύο βασικούς τύπους: **χερσαία αιολική** και **υπεράκτια αιολική ενέργεια**. Και οι δύο τύποι χρησιμοποιούν την κινητική ενέργεια του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά διαφέρουν σημαντικά ως προς την τοποθεσία, το σχεδιασμό, τις απαιτήσεις υποδομής, το κόστος και την απόδοση. Κάθε τύπος συστήματος προσφέρει μοναδικά οφέλη και παρουσιάζει συγκεκριμένες προκλήσεις και η επιλογή τους εξαρτάται από τις περιφερειακές συνθήκες, τις τεχνολογικές εξελίξεις και τις οικονομικές εκτιμήσεις (Smith, 2019). Επιπλέον, νέες εξελίξεις, όπως οι πλωτές υπεράκτιες τουρμπίνες, έχουν διευρύνει το πεδίο της αιολικής ενέργειας, ανοίγοντας προηγούμενως απρόσιτες τοποθεσίες για παραγωγή ενέργειας (Jones, 2021).

1. Συστήματα Αιολικής Ενέργειας στην ξηρά

Τα χερσαία αιολικά συστήματα βρίσκονται στην ξηρά και εγκαθίστανται συνήθως σε περιοχές με ευνοϊκές συνθήκες ανέμου, όπως πεδιάδες, ορεινές κορυφογραμμές και παράκτιες περιοχές. Τα χερσαία αιολικά πάρκα είναι συχνά λιγότερο δαπανηρά στην εγκατάσταση και τη συντήρηση σε σύγκριση με τα υπεράκτια συστήματα λόγω απλούστερων logistics, απαιτήσεων υποδομής και εγγύτητας με το ηλεκτρικό δίκτυο (Green, 2018). Αυτός ο τύπος συστήματος έχει γίνει ευρέως διαδεδομένος παγκοσμίως, καθώς είναι σχετικά προσβάσιμος και οικονομικά βιώσιμος. Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογική πρόοδος στον σχεδιασμό και τα υλικά των ανεμογεννητριών επέτρεψε την ανάπτυξη ψηλότερων και πιο αποδοτικών χερσαίων ανεμογεννητριών, αυξάνοντας την ικανότητα παραγωγής ενέργειας και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας (Kumar and Lee, 2019).

Ωστόσο, τα χερσαία αιολικά συστήματα αντιμετωπίζουν ορισμένους περιορισμούς. Η εγγύτητα των χερσαίων αιολικών πάρκων σε κατοικημένες περιοχές μπορεί να οδηγήσει σε αντίθεση του κοινού λόγω ανησυχιών για ηχορύπανση, οπτικές επιπτώσεις και πιθανές επιπτώσεις στην άγρια ζωή, ιδιαίτερα στους πληθυσμούς των πτηνών και των νυχτερίδων (Ghosh, 2020). Επιπλέον, η διαθεσιμότητα γης μπορεί να αποτελέσει περιορισμό σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπου ο χώρος είναι περιορισμένος και συχνά προορίζεται για άλλες χρήσεις (Jackson and Green, 2018). Για να αντιμετωπίσουν αυτά τα ζητήματα, οι προγραμματιστές έχουν επικεντρωθεί στη βελτίωση του σχεδιασμού των στροβίλων για την ελαχιστοποίηση του θορύβου και έχουν εφαρμόσει περιβαλλοντικές αξιολογήσεις για να διασφαλίσουν ότι τα χερσαία αιολικά πάρκα βρίσκονται σε περιβαλλοντικά υπεύθυνες τοποθεσίες (Pérez-Arriaga, 2020).

2. Υπεράκτια Αιολικά Συστήματα Ενέργειας

Τα υπεράκτια αιολικά συστήματα εγκαθίστανται σε υδάτινα σώματα, συνήθως στην υφαλοκρηπίδα, όπου οι ταχύτητες του ανέμου είναι γενικά ισχυρότερες και πιο σταθερές από ό,τι στην ξηρά. Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα χρησιμοποιούν συνήθως μεγαλύτερες τουρμπίνες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες χερσαίες μονάδες τους, καθώς ο ανοιχτός

ωκεανός παρέχει λιγότερους χωρικούς περιορισμούς και επιτρέπει την εγκατάσταση μεγαλύτερων, ισχυρότερων μηχανών (Smith and Gupta, 2018). Ο συντελεστής χωρητικότητας για υπεράκτιες τουρμπίνες είναι επίσης υψηλότερος λόγω των σταθερών συνθηκών ανέμου πάνω από τη θάλασσα, καθιστώντας τον υπεράκτιο άνεμο μια ολοένα πιο ελκυστική επιλογή για μεγάλης κλίμακας παραγωγή ενέργειας (Rashid, 2019).

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι υπεράκτιων αιολικών συστημάτων: **σταθερού πυθμένα** και **πλωτού**. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες σταθερού πυθμένα είναι αγκυρωμένες απευθείας στον πυθμένα της θάλασσας, καθιστώντας τις κατάλληλες για ρηχά νερά, συνήθως μέχρι βάθη 60 μέτρων. Αυτά τα συστήματα επικρατούν σε περιοχές όπως η Βόρεια Θάλασσα και η Βαλτική Θάλασσα, όπου τα ρηχά νερά εκτείνονται μακριά από την ακτή, παρέχοντας ιδανικές συνθήκες για εγκαταστάσεις σταθερού πυθμένα (Jones and White, 2021). Οι πλωτές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, από την άλλη πλευρά, είναι μια νεότερη τεχνολογία σχεδιασμένη για τοποθεσίες σε βαθιά νερά, όπου οι δομές σταθερού πυθμένα δεν είναι πρακτικές. Οι πλωτοί στρόβιλοι αγκυρώνονται στον πυθμένα του ωκεανού χρησιμοποιώντας εύκαμπτα καλώδια και σταθεροποιούνται με πλωτές πλατφόρμες που τους κρατούν στη θέση τους (Anderson, 2020).

Οι πλωτές υπεράκτιες τουρμπίνες έχουν τη δυνατότητα να επεκτείνουν σημαντικά το εύρος της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, ειδικά σε περιοχές με βαθιά παράκτια ύδατα, όπως η Ιαπωνία, η δυτική ακτή των Ηνωμένων Πολιτειών και τμήματα της Μεσογείου (Kumar and Srivastava, 2020). Ενώ τα πλωτά συστήματα είναι επί του παρόντος πιο ακριβά λόγω της πολυπλοκότητας της αγκυροβόλησης και της πρόσδεσης σε βαθιά νερά, η συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη στοχεύουν στη μείωση αυτού του κόστους και στη βελτίωση της σκοπιμότητας των πλωτών αιολικών πάρκων (Brown et al., 2020).

Περιβαλλοντικές και Τεχνικές Θεωρήσεις

Τόσο τα χερσαία όσο και τα υπεράκτια αιολικά συστήματα έχουν συγκεκριμένες περιβαλλοντικές και τεχνικές εκτιμήσεις. Τα χερσαία συστήματα μπορούν να επηρεάσουν τα τοπικά οικοσυστήματα και τις ανθρώπινες κοινότητες, απαιτώντας προσεκτική επιλογή τοποθεσίας και περιβαλλοντικές εκτιμήσεις για τον μετριασμό των επιπτώσεων στην άγρια ζωή και τη μείωση της ηχορύπανσης (Ηνωμένα Έθνη, 2019). Ο υπεράκτιος άνεμος, ενώ βρίσκεται μακριά από κατοικημένες περιοχές, μπορεί να επηρεάσει τα θαλάσσια οικοσυστήματα. Οι υπεράκτιες εγκαταστάσεις απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό για να αποφευχθεί η διατάραξη των θαλάσσιων οικοτόπων και των μεταναστευτικών προτύπων. Επιπλέον, η υπεράκτια συντήρηση είναι πιο περίπλοκη και δαπανηρή λόγω των σκληρών θαλάσσιων συνθηκών, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τη μακροζωία του εξοπλισμού και να αυξήσουν τα λειτουργικά έξοδα (Dunn et al., 2019).

Παρά αυτές τις προκλήσεις, τα οφέλη των συστημάτων αιολικής ενέργειας στη μείωση των εκπομπών άνθρακα και στη διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας είναι σημαντικά. Η υπεράκτια αιολική ενέργεια, ειδικότερα, αναμένεται να διαδραματίσει κεντρικό ρόλο στις μελλοντικές ενεργειακές στρατηγικές λόγω του υψηλού συντελεστή δυναμικότητας και των

δυνατοτήτων της να τροφοδοτεί πυκνοκατοικημένες παράκτιες περιοχές (Smith, 2019). Καθώς η τεχνολογία προχωρά, τόσο τα χερσαία όσο και τα υπεράκτια συστήματα είναι πιθανό να γίνουν πιο αποτελεσματικά, βιώσιμα και οικονομικά βιώσιμα, συμβάλλοντας στους παγκόσμιους στόχους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (IEA, 2021).

2.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια

2.3.1 Επισκόπηση και δυνατότητες

Η υδροηλεκτρική ενέργεια, αξιοποιεί την ενέργεια του κινούμενου νερού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι μια από τις παλαιότερες και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αντιπροσωπεύοντας σχεδόν το 16% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο και πάνω από το 60% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (IEA, 2021). Τα συστήματα υδροηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν την κινητική ενέργεια του νερού που ρέει ή πέφτει, συνήθως από ποτάμια ή δεξαμενές, για περιστρεφόμενους στρόβιλους συνδεδεμένους με γεννήτριες, παράγοντας καθαρή ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να εκπέμπουν αέρια θερμοκηπίου κατά τη λειτουργία (Smith, 2019). Αυτή η τεχνολογία έχει αποδειχθεί εξαιρετικά αξιόπιστη και αποδοτική, με ορισμένα υδροηλεκτρικά εργοστάσια να επιτυγχάνουν ποσοστά απόδοσης έως και 90%, καθιστώντας την υδροηλεκτρική ενέργεια βασικό συστατικό του παγκόσμιου μείγματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Jackson and Green, 2018).

Το δυναμικό για υδροηλεκτρική ενέργεια ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με γεωγραφικούς και κλιματικούς παράγοντες, με τους πιο σημαντικούς πόρους να βρίσκονται σε περιοχές με μεγάλα συστήματα ποταμών και επαρκείς βροχοπτώσεις. Χώρες με ορεινά εδάφη και άφθονους υδάτινους πόρους, όπως ο Καναδάς, η Βραζιλία, η Νορβηγία και η Κίνα, έχουν αναπτύξει εκτεταμένες υποδομές υδροηλεκτρικής ενέργειας για να αξιοποιήσουν αυτόν τον ανανεώσιμο πόρο (Jones and White, 2021). Στις αναπτυσσόμενες περιοχές, η υδροηλεκτρική ενέργεια προσφέρει ένα μέσο για την παροχή σταθερής, προσιτής ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές όπου η πρόσβαση στην ενέργεια είναι περιορισμένη, συμβάλλοντας στην κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη και την ανακούφιση της φτώχειας (Anderson, 2020). Τα έργα υδροηλεκτρικής ενέργειας, ειδικά τα μεγάλης κλίμακας, μπορούν να παράγουν σημαντική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, με τις μεγαλύτερες μονάδες να μπορούν να παράγουν αρκετά γιγαβάτ ενέργειας. Για παράδειγμα, το φράγμα Three Gorges της Κίνας, η μεγαλύτερη υδροηλεκτρική εγκατάσταση στον κόσμο, έχει χωρητικότητα 22,5 γιγαβάτ και παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε εκατομμύρια ανθρώπους (Ghosh, 2019).

Τα συστήματα υδροηλεκτρικής ενέργειας ταξινομούνται γενικά σε τρεις κύριους τύπους: συστήματα **ροής του ποταμού, που βασίζονται σε δεξαμενές** και συστήματα **αποθήκευσης με αντλία**. Τα συστήματα «run-of-the-river» χρησιμοποιούν τη φυσική ροή των ποταμών με ελάχιστη αποθήκευση, καθιστώντας τα λιγότερο ενοχλητικά για τα οικοσυστήματα, αλλά εξαρτώνται από τη σταθερή ροή του νερού. Η υδροηλεκτρική ενέργεια που βασίζεται σε ταμιευτήρες, από την άλλη πλευρά, περιλαμβάνει τη δημιουργία

μιας μεγάλης περιοχής αποθήκευσης νερού με το φράγμα ενός ποταμού. Αυτό επιτρέπει την ελεγχόμενη απελευθέρωση νερού, παρέχοντας σταθερή ισχύ εξόδου ακόμη και κατά τις περιόδους ξηρασίας (Smith, 2018). Τα συστήματα υδροηλεκτρικής ενέργειας με αντλία αποθήκευσης είναι μοναδικά στο ότι λειτουργούν τόσο ως παραγωγοί ενέργειας όσο και ως λύσεις αποθήκευσης. Σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για την άντληση νερού σε υψηλότερη δεξαμενή, η οποία μπορεί αργότερα να απελευθερωθεί για να παράγει ενέργεια κατά τη διάρκεια της ζήτησης αιχμής, καθιστώντας την έναν αποτελεσματικό τρόπο εξισορρόπησης του φορτίου του δικτύου και υποστήριξης της ενσωμάτωσης διακοπόμενων ανανεώσιμων πηγών, όπως η ηλιακή άνεμος (Kumar and Lee, 2019).

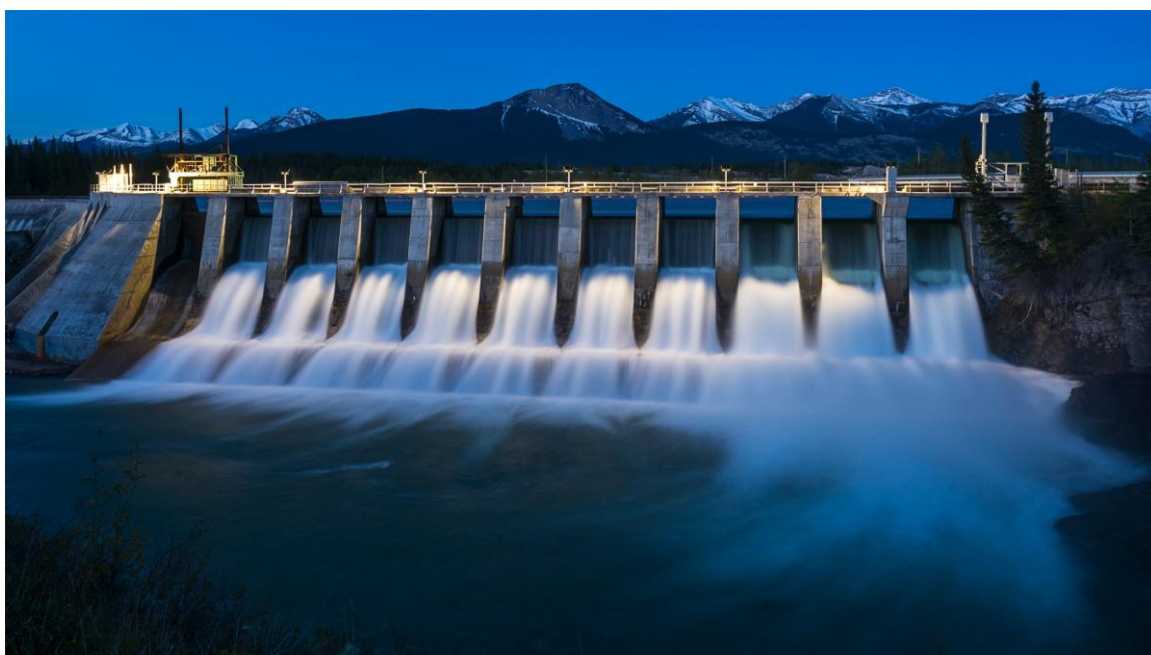


Figure 3. Φράγμα που αξιοποιεί την ενέργεια του νερού

<https://blog.greenenergyconsumers.org/blog/tariffs-on-canadian-energy-are-trouble-for-new-england>

Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι η ικανότητά της να παρέχει σταθερή και αξιόπιστη ισχύ, γνωστή ως **ισχύς βασικού φορτίου**, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για σταθερά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας (Jones, 2021). Σε αντίθεση με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ο άνεμος και η ηλιακή ενέργεια, που εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες, η υδροηλεκτρική ενέργεια που βασίζεται σε δεξαμενές μπορεί να παράγει συνεχώς ηλεκτρική ενέργεια, καθιστώντας την εξαιρετικά πολύτιμη για τη σταθερότητα του δικτύου. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μπορούν επίσης να ανεβαίνουν ή να πέφτουν γρήγορα ως απάντηση στις διακυμάνσεις της ζήτησης, καθιστώντας τους ευέλικτους και ικανούς να παρέχουν **ισχύ αιχμής** όπως απαιτείται (Rashid, 2019). Αυτή η ευελιξία έχει οδηγήσει πολλές χώρες να επενδύσουν στην υδροηλεκτρική ενέργεια ως συμπληρωματική πηγή ενέργειας για την εξισορρόπηση άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Ωστόσο, η υδροηλεκτρική ενέργεια έχει περιβαλλοντικές και κοινωνικές προκλήσεις, ιδιαίτερα όταν περιλαμβάνει μεγάλα έργα φραγμάτων. Η κατασκευή φραγμάτων και ταμιευτήρων μπορεί να διαταράξει τα τοπικά οικοσυστήματα, να επηρεάσει τους πληθυσμούς των ψαριών και να αλλάξει τις ροές των ποταμών, επηρεάζοντας την ποιότητα του νερού και τη βιοποικιλότητα (Pérez-Arriaga, 2020). Επιπλέον, τα μεγάλης κλίμακας έργα υδροηλεκτρικής ενέργειας συχνά οδηγούν σε μετατόπιση κοινοτήτων και πλημμύρες πολύτιμης γης, δημιουργώντας σημαντικό κοινωνικό και οικονομικό κόστος (Brown et al., 2020). Για την αντιμετώπιση αυτών των ανησυχιών, πολλά σύγχρονα έργα υδροηλεκτρικής ενέργειας ενσωματώνουν περιβαλλοντικά μέτρα μετριασμού, όπως ιχθυόσκαλες και διαχείριση ιζημάτων, για την ελαχιστοποίηση των οικολογικών επιπτώσεων. Επιπλέον, τα έργα μικρής κλίμακας και τα έργα ροής του ποταμού κερδίζουν δημοτικότητα ως πιο φιλικές προς το περιβάλλον εναλλακτικές λύσεις στα μεγάλα φράγματα, καθώς απαιτούν συνήθως λιγότερη γη και έχουν μικρότερο αντίκτυπο στα ποτάμια οικοσυστήματα (Green, 2018).

Όσον αφορά τις μελλοντικές δυνατότητες, η υδροηλεκτρική ενέργεια αναμένεται να συνεχίσει να διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση, ειδικά σε περιοχές με αναξιοποίητους υδάτινους πόρους. Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Υδροηλεκτρικής Ενέργειας, μόνο περίπου το ένα τρίτο του οικονομικώς εφικτού δυναμικού υδροηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο έχει αναπτυχθεί, αφήνοντας σημαντικό περιθώριο ανάπτυξης (IHA, 2021). Με την πρόοδο της τεχνολογίας και την αυξανόμενη ζήτηση για ανανεώσιμη ενέργεια βασικού φορτίου, υπάρχει δυνατότητα τόσο για νέα έργα όσο και για αναβαθμίσεις στην υπάρχουσα υποδομή, όπως η μετασκευή μη ηλεκτροπαραγωγικών φραγμάτων και η βελτίωση της απόδοσης του στροβίλου (Jackson and Green, 2018). Επιπλέον, καθώς προχωρά η τεχνολογία αντλούμενης αποθήκευσης, η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι πιθανό να διαδραματίσει ακόμη πιο ζωτικό ρόλο στη στήριξη της σταθερότητας του δικτύου και στην ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδιαίτερα καθώς αυξάνεται η ηλιακή και η αιολική χωρητικότητα (Dunn et al., 2019).

2.3.2 Τύποι υδροηλεκτρικής ενέργειας

Τα υδροηλεκτρικά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κύριους τύπους με βάση τη δομή, τη λειτουργία και την εφαρμογή τους: **συστήματα ροής του ποταμού, συστήματα που βασίζονται σε δεξαμενές και συστήματα αποθήκευσης με αντλία**. Κάθε τύπος έχει μοναδικά χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και περιορισμούς, καθιστώντας τα κατάλληλα για διαφορετικά γεωγραφικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά πλαίσια (Smith, 2019). Η κατανόηση αυτών των τύπων υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο μπορούν να συμβάλουν σε ένα αξιόπιστο, ανανεώσιμο ενεργειακό μείγμα και πώς μπορούν να αντιμετωπίσουν τόσο τις τοπικές όσο και τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες.

1. Συστήματα Run-of-the-River

Τα υδροηλεκτρικά συστήματα Run-of-the-river (ROR) έχουν σχεδιαστεί για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια αξιοποιώντας τη φυσική ροή των ποταμών χωρίς να δημιουργούν

μεγάλες δεξαμενές. Αυτά τα συστήματα συνήθως περιλαμβάνουν την εκτροπή ενός τμήματος της ροής του ποταμού μέσω ενός στροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και το νερό στη συνέχεια επιστρέφει στον ποταμό κατάντη (Green, 2018). Τα συστήματα ROR θεωρούνται συχνά πιο φιλικά προς το περιβάλλον από την υδροηλεκτρική ενέργεια που βασίζεται σε μεγάλες δεξαμενές, καθώς προκαλούν ελάχιστη αλλαγή στα οικοσυστήματα των ποταμών και αποφεύγουν τις εκτεταμένες πλημμύρες γης που μπορεί να συνοδεύουν την κατασκευή φραγμάτων (Anderson and Lee, 2019). Ως αποτέλεσμα, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε περιοχές όπου η διατήρηση του περιβάλλοντος και η αποδοχή από την κοινότητα αποτελούν προτεραιότητα.

Παρά τις χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους, τα συστήματα ROR έχουν ορισμένους περιορισμούς. Επειδή εξαρτώνται από τη φυσική ροή του ποταμού, η υδροηλεκτρική ενέργεια ROR υπόκειται σε εποχιακές διακυμάνσεις, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε ποικίλη παραγωγή ισχύος ανάλογα με τις βροχοπτώσεις και τα επίπεδα του νερού (Kumar, 2019). Αυτή η μεταβλητότητα καθιστά τα συστήματα ROR λιγότερο κατάλληλα ως σταθερή πηγή ισχύος βασικού φορτίου, ειδικά κατά τις ξηρές περιόδους όπου οι ροές των ποταμών μπορεί να είναι ανεπαρκείς για την παραγωγή σταθερής ηλεκτρικής ενέργειας (Smith, 2020). Ωστόσο, τα συστήματα ROR συχνά συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας ή μπορούν να σχεδιαστούν με μικρές αποθηκευτικές δυνατότητες για να βοηθήσουν στον μετριασμό των διακυμάνσεων, καθιστώντας τα πολύτιμους συντελεστές σε περιφερειακά ενεργειακά μείγματα (Ghosh, 2020).

2. Συστήματα που βασίζονται σε δεξαμενή

Η υδροηλεκτρική ενέργεια που βασίζεται σε ταμιευτήρες, που συχνά συνδέεται με μεγάλα φράγματα, είναι ο πιο γνωστός τύπος υδροηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά τα συστήματα δημιουργούν μια μεγάλη δεξαμενή νερού φράττοντας ένα ποτάμι, επιτρέποντας την αποθήκευση και την απελευθέρωση του νερού όπως απαιτείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Jones, 2021). Το αποθηκευμένο νερό παρέχει μια σταθερή και αξιόπιστη πηγή ενέργειας, καθώς μπορεί να ελεγχθεί για να διατηρεί σταθερή ισχύ εξόδου, καθιστώντας την υδροηλεκτρική ενέργεια που βασίζεται σε δεξαμενές σημαντική επιλογή για την παροχή ισχύος βασικού φορτίου στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (Brown et al., 2018). Επιπλέον, τα συστήματα δεξαμενής μπορούν να προσαρμόσουν γρήγορα την παραγωγή ενέργειας ανάλογα με τη ζήτηση, καθιστώντας τα ιδανικά για την παροχή μέγιστης ισχύος σε περιόδους υψηλής κατανάλωσης ενέργειας (Rashid, 2019).

Ενώ η υδροηλεκτρική ενέργεια που βασίζεται σε ταμιευτήρες έχει σημαντικά οφέλη όσον αφορά την αξιοπιστία και την απόδοση, παρουσιάζει επίσης αξιοσημείωτες περιβαλλοντικές και κοινωνικές προκλήσεις. Η κατασκευή μεγάλων φραγμάτων μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την πλημμύρα εκτεταμένων χερσαίων περιοχών, οδηγώντας συχνά στην εκτόπιση των κοινοτήτων και την καταστροφή των ενδιατημάτων της άγριας ζωής (Pérez-Arriaga, 2020). Οι ταμιευτήρες μπορούν επίσης να επηρεάσουν τα οικοσυστήματα των ποταμών αλλάζοντας τη θερμοκρασία του νερού, τη ροή των ιζημάτων και τα πρότυπα μετανάστευσης των ψαριών, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μακροπρόθεσμες

οικολογικές αλλαγές (Smith, 2019). Παρά αυτές τις προκλήσεις, η υδροηλεκτρική ενέργεια που βασίζεται σε ταμειυτήρες παραμένει μια ευρέως χρησιμοποιούμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, ειδικά σε χώρες με μεγάλα συστήματα ποταμών και υψηλή ανάγκη για σταθερή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Jackson and Green, 2018).

3. Αντλιακά Συστήματα Αποθήκευσης

Η υδροηλεκτρική ενέργεια με αντλία αποθήκευσης (PSH) είναι ένας μοναδικός τύπος υδροηλεκτρικού συστήματος που χρησιμεύει τόσο ως γεννήτρια ενέργειας όσο και ως μορφή αποθήκευσης ενέργειας. Σε ένα σύστημα αποθήκευσης με αντλία, δύο δεξαμενές νερού βρίσκονται σε διαφορετικά υψόμετρα. Κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, η υπερβολική ισχύς από το δίκτυο (συχνά από άλλες ανανεώσιμες πηγές όπως ο άνεμος ή η ηλιακή ενέργεια) χρησιμοποιείται για την άντληση νερού από την κάτω δεξαμενή στην ανώτερη δεξαμενή (Anderson, 2020). Όταν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κορυφώνεται, το αποθηκευμένο νερό απελευθερώνεται πίσω στην κάτω δεξαμενή μέσω στροβίλων, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει στα συστήματα αποθήκευσης με αντλία να λειτουργούν ως μπαταρίες μεγάλης κλίμακας, παρέχοντας ισχύ όταν χρειάζεται περισσότερο και βοηθώντας στη σταθεροποίηση του δικτύου (Dunn et al., 2019).

Η αντλούμενη υδροηλεκτρική ενέργεια αποθήκευσης είναι ιδιαίτερα πολύτιμη για την ενσωμάτωση διακοπτόμενων ανανεώσιμων πηγών, καθώς μπορεί να αποθηκεύσει την πλεονάζουσα ενέργεια που παράγεται σε περιόδους υψηλής ηλιακής ή αιολικής παραγωγής και να την απελευθερώσει σε περιόδους χαμηλής απόδοσης, διασφαλίζοντας μια ισορροπημένη παροχή (IEA, 2021). Τα συστήματα PSH είναι επίσης εξαιρετικά αποδοτικά, με απόδοση κύκλου που φτάνουν έως και 80%, και έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, καθιστώντας τα μια οικονομική λύση για αποθήκευση ενέργειας για δεκαετίες (Jones and White, 2021). Ωστόσο, η PSH απαιτεί συγκεκριμένες γεωγραφικές συνθήκες, όπως δύο κοντινές πηγές νερού σε διαφορετικά υψόμετρα, οι οποίες μπορούν να περιορίσουν τη σκοπιμότητά της σε ορισμένες περιοχές (Smith, 2020).

2.4 Ενέργεια από βιομάζα

2.4.1 Επισκόπηση και δυνατότητες

Η ενέργεια από βιομάζα είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που προέρχεται από οργανικά υλικά, όπως φυτικές ύλες, γεωργικά απόβλητα, ξύλο, ακόμη και ορισμένους τύπους απορριμμάτων. Αξιοποιεί την αποθηκευμένη χημική ενέργεια σε αυτά τα υλικά, απελευθερώνοντάς την μέσω καύσης ή άλλων διαδικασιών μετατροπής για την παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρικής ενέργειας ή βιοκαυσίμων. Η βιομάζα είναι μια από τις παλαιότερες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο και συνεχίζει να χρησιμοποιείται ευρέως, ειδικά σε αγροτικές και αναπτυσσόμενες περιοχές όπου η πρόσβαση σε άλλες πηγές ενέργειας είναι περιορισμένη (Smith, 2019). Σήμερα, με την πρόοδο της τεχνολογίας και την αυξημένη εστίαση στη βιώσιμη ενέργεια, η βιομάζα θεωρείται ως μια ευέλικτη και

φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα, καθώς προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές που μπορούν να διαχειρίζονται βιώσιμα (Jackson and Green, 2018).

Η ενέργεια από βιομάζα έχει σημαντικές δυνατότητες να συμβάλει στον παγκόσμιο ενεργειακό εφοδιασμό, ειδικά καθώς μπορεί να προέρχεται από διάφορους τύπους οργανικών αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων των γεωργικών υπολειμμάτων, των δασικών υποπροϊόντων, ακόμη και των αστικών στερεών αποβλήτων. Μετατρέποντας τα απόβλητα σε ενέργεια, η βιομάζα όχι μόνο μειώνει την ποσότητα του υλικού που πηγαίνει στις χωματερές, αλλά ελαχιστοποιεί επίσης τις εκπομπές μεθανίου από την αποσύνθεση των αποβλήτων, συμβάλλοντας στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (Anderson and Lee, 2020). Εκτός από τα οφέλη της διαχείρισης απορριμμάτων, η ενέργεια της βιομάζας θεωρείται ουδέτερη ως προς τον άνθρακα σε πολλά πλαίσια, επειδή το CO₂ που απελευθερώνεται κατά την καύση βιομάζας είναι περίπου ίσο με το CO₂ που απορροφάται από τα φυτά κατά τη διάρκεια του κύκλου ανάπτυξής τους, υπό την προϋπόθεση ότι η πηγή βιομάζας τυγχάνει βιώσιμης διαχείρισης (Brown et al., 2018). Ωστόσο, η ουδετερότητα άνθρακα της βιομάζας μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με παράγοντες όπως οι αλλαγές στη χρήση γης, οι τύποι πρώτης ύλης και η τεχνολογία καύσης (Smith, 2019).

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ενεργειακών συστημάτων βιομάζας, καθένας κατάλληλος για συγκεκριμένες εφαρμογές. Μία από τις πιο κοινές μεθόδους είναι η **άμεση καύση**, όπου η βιομάζα καίγεται για να παραχθεί θερμότητα για μαγείρεμα, θέρμανση ή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως τόσο σε παραδοσιακά όσο και σε βιομηχανικά πλαίσια. Ενώ η άμεση καύση είναι ο απλούστερος τρόπος αξιοποίησης της ενέργειας από βιομάζα, μπορεί να παράγει ατμοσφαιρικούς ρύπους εάν δεν ελέγχεται σωστά, καθιστώντας αναγκαία την πρόοδο της τεχνολογίας για τη μείωση των εκπομπών (Ghosh, 2020). Μια άλλη σημαντική μορφή ενέργειας από βιομάζα είναι η **αεριοποίηση**, η οποία περιλαμβάνει τη θέρμανση οργανικού υλικού σε περιβάλλον χαμηλής περιεκτικότητας σε οξυγόνο για την παραγωγή αερίου σύνθεσης—ένα μείγμα υδρογόνου, μονοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου. Αυτό το αέριο μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο καθαρότερο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή περαιτέρω επεξεργασία σε υγρά καύσιμα (Rashid, 2019).

Τα βιοκαύσιμα, που προέρχονται από βιομάζα, κερδίζουν επίσης έλξη ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, ειδικά στον τομέα των μεταφορών. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι βιοκαυσίμων: η **βιοιθανόλη** και το **βιοντίζελ**. Η βιοιθανόλη, που παράγεται συνήθως από ζαχαροκάλαμο, καλαμπόκι και άλλες καλλιέργειες με υψηλή περιεκτικότητα σε άμυλο, συχνά αναμιγνύεται με βενζίνη για τη μείωση των εκπομπών των οχημάτων. Το βιοντίζελ, που προέρχεται από λάδια και λίπη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες ντίζελ, μειώνοντας την εξάρτηση από το πετρέλαιο ντίζελ (Jones and White, 2021). Αυτά τα βιοκαύσιμα παρέχουν μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση στα συμβατικά ορυκτά καύσιμα και συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών άνθρακα, ειδικά όταν προέρχονται από απόβλητα υλικά ή μη εδώδιμες καλλιέργειες (Dunn et al., 2019).

Το δυναμικό της ενέργειας από βιομάζα είναι σημαντικό, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες μορφές - θερμότητα, ηλεκτρική ενέργεια και υγρά καύσιμα - και να προέρχεται από διάφορα οργανικά υλικά. Πολλές περιοχές, ιδιαίτερα εκείνες με άφθονους γεωργικούς και δασικούς πόρους, βρίσκονται σε καλή θέση για να αξιοποιήσουν την ενέργεια από βιομάζα ως μέρος μιας βιώσιμης ενεργειακής στρατηγικής (Kumar and Srivastava, 2020). Η βιομάζα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα συνδυασμένης θερμότητας και ισχύος (CHP), όπου η θερμότητα που παράγεται κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεσμεύεται και χρησιμοποιείται για άλλους σκοπούς, αυξάνοντας σημαντικά την ενεργειακή απόδοση (Smith and Gupta, 2018). Τα συστήματα ΣΗΘ είναι ιδιαίτερα πολύτιμα σε βιομηχανικά περιβάλλοντα και εφαρμογές θέρμανσης κατοικιών, επιτρέποντας στη βιομάζα να καλύψει πολλαπλές ενεργειακές ανάγκες ταυτόχρονα (Jones, 2021).

Παρά τις δυνατότητές της, η ενέργεια από βιομάζα αντιμετωπίζει ορισμένες προκλήσεις. Η παραγωγή και η μεταφορά της πρώτης ύλης βιομάζας μπορεί να οδηγήσει σε περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως αποψίλωση δασών και υποβάθμιση του εδάφους, εάν δεν αντιμετωπιστεί με βιώσιμο τρόπο (Pérez-Arriaga, 2020). Επιπλέον, η ενεργειακή πυκνότητα της βιομάζας είναι χαμηλότερη από αυτή των ορυκτών καυσίμων, απαιτώντας μεγαλύτερες ποσότητες πρώτης ύλης για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ενέργειας, η οποία μπορεί να αυξήσει το κόστος και τη ζήτηση πόρων (Smith, 2019). Ο ανταγωνισμός μεταξύ των καλλιεργειών βιοενέργειας και της παραγωγής τροφίμων έχει επίσης εγείρει ανησυχίες σχετικά με τη χρήση της γης, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η επισιτιστική ασφάλεια είναι ένα ζήτημα (Jackson and Green, 2018). Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, οι προσπάθειες έρευνας και πολιτικής επικεντρώνονται στην ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών βιομάζας, όπως **βιοκαύσιμα δεύτερης γενιάς** που προέρχονται από μη edώδιμες καλλιέργειες και λιγνοκυτταρινική βιομάζα, που δεν ανταγωνίζονται την παραγωγή τροφίμων και προσφέρουν μια πιο βιώσιμη λύση (Anderson, 2020).

2.4.2 Τύποι βιομάζας

Η ενέργεια της βιομάζας προέρχεται από μια ποικιλία οργανικών υλικών που μπορούν να μετατραπούν σε θερμότητα, ηλεκτρική ενέργεια ή καύσιμα. Η ποικιλία των πηγών βιομάζας το καθιστά μια ευέλικτη επιλογή ανανεώσιμης ενέργειας, καθώς διαφορετικοί τύποι βιομάζας μπορούν να προσαρμοστούν για συγκεκριμένες εφαρμογές και ενεργειακές ανάγκες (Smith, 2019). Η βιομάζα γενικά κατηγοριοποιείται σε **ξυλώδη βιομάζα, γεωργικά υπολείμματα, ενεργειακές καλλιέργειες και οργανικά απόβλητα**. Κάθε τύπος έχει μοναδικές ιδιότητες, οφέλη και προκλήσεις που επηρεάζουν την καταλληλότητά του για διαφορετικές εφαρμογές βιοενέργειας (Brown et al., 2018).

1. Ξυλώδης Βιομάζα

Η ξυλώδης βιομάζα, η οποία περιλαμβάνει υλικά όπως υπολείμματα δασών, πριονίδι, ροκανίδια, ακόμη και ολόκληρα δέντρα, είναι ένας από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους τύπους βιομάζας για παραγωγή ενέργειας. Αυτός ο τύπος βιομάζας χρησιμοποιείται παραδοσιακά σε διαδικασίες άμεσης καύσης για θέρμανση και παραγωγή

ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικά σε αγροτικές και βιομηχανικές συνθήκες (Kumar and Lee, 2019). Η ξυλώδης βιομάζα εκτιμάται για την υψηλή ενεργειακή της πυκνότητα σε σύγκριση με άλλους τύπους βιομάζας, καθιστώντας την αποτελεσματική τόσο για μικρές όσο και για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές βιοενέργειας (Jackson and Green, 2018). Επιπλέον, η ξυλώδης βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε βιοκαύσιμα, όπως η βιοαιθανόλη, μέσω βιοχημικών διεργασιών ή σε βιοκάρβουνο και αέριο σύνθεσης μέσω θερμοχημικής μετατροπής, προσφέροντας πρόσθετες επιλογές για την παραγωγή καυσίμου (Anderson, 2020).

Ωστόσο, η χρήση ξυλώδους βιομάζας έχει εγείρει περιβαλλοντικές ανησυχίες που σχετίζονται με την αποψίλωση των δασών, την απώλεια βιοποικιλότητας και τις εκπομπές άνθρακα από μη βιώσιμες πρακτικές υλοτομίας (Smith, 2019). Οι πρακτικές αειφόρου διαχείρισης, όπως η επιλεκτική υλοτόμηση και η αναδάσωση, είναι απαραίτητες για τον μετριασμό αυτών των επιπτώσεων και για να διασφαλιστεί ότι η ξυλώδης βιομάζα συμβάλλει θετικά στους στόχους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επιπλέον, οι προηγμένες τεχνολογίες, όπως η σφαιροποίηση, έχουν επιτρέψει πιο αποτελεσματική μεταφορά και καύση ξυλώδους βιομάζας, αυξάνοντας την οικονομική βιωσιμότητά της (Jones and White, 2021).

2. Αγροτικά υπολείμματα

Τα γεωργικά υπολείμματα, όπως οι μίσχοι, οι φλοιοί και τα κοχύλια, είναι υποπροϊόντα των γεωργικών δραστηριοτήτων που μπορούν να συλλεχθούν και να χρησιμοποιηθούν ως βιομάζα. Αυτά τα υπολείμματα προσφέρουν μια βιώσιμη πηγή βιοενέργειας, καθώς παράγονται εποχιακά και δεν ανταγωνίζονται τις καλλιέργειες τροφίμων για τη γη (Ghosh, 2020). Για παράδειγμα, τα υπολείμματα από καλλιέργειες όπως το ρύζι, το σιτάρι και το καλαμπόκι είναι άφθονα σε γεωργικές περιοχές και μπορούν να μετατραπούν σε θερμότητα, ενέργεια ή βιοκαύσιμα. Η μετατροπή των γεωργικών υπολειμμάτων σε βιοενέργεια παρέχει επίσης πρόσθετο εισόδημα για τους αγρότες και μειώνει τις πρακτικές καύσης σε ανοιχτό έδαφος που συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση (Pérez-Arriaga, 2020).

Τα γεωργικά υπολείμματα συνήθως υποβάλλονται σε επεξεργασία μέσω άμεσης καύσης ή μετατρέπονται σε βιοαέριο μέσω αναερόβιας χώνευσης, όπου οι μικροοργανισμοί διασπούν την οργανική ύλη για να παράγουν αέριο πλούσιο σε μεθάνιο. Αυτό το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μαγείρεμα, θέρμανση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, παρέχοντας μια χαμηλού κόστους επιλογή καθαρής ενέργειας για τις αγροτικές κοινότητες (Rashid, 2019). Ωστόσο, η συλλογή και η μεταφορά γεωργικών υπολειμμάτων μπορεί να είναι δύσκολη λόγω της χαμηλής πυκνότητάς τους και της εποχιακής τους διαθεσιμότητας, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την αξιοπιστία και την οικονομία των αλυσίδων εφοδιασμού βιομάζας (Dunn et al., 2019).

3. Ενεργειακές Καλλιέργειες

Οι ενεργειακές καλλιέργειες λειτουργούν ειδικά για την παραγωγή βιοενέργειας και περιλαμβάνουν φυτά ταχέως αναπτυσσόμενα όπως τα χόρτα, το miscanthus και ορισμένα είδη δέντρων όπως η λεύκα και η ιτιά. Αυτές οι καλλιέργειες επιλέγονται για την υψηλή τους απόδοση βιομάζας ανά εκτάριο, την ταχεία ανάπτυξη και την προσαρμοστικότητα σε οριακές εκτάσεις που είναι ακατάλληλες για καλλιέργειες τροφίμων, γεγονός που βοηθά στην ελαχιστοποίηση του ανταγωνισμού με την παραγωγή τροφίμων (Brown et al., 2018). Οι ενεργειακές καλλιέργειες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για την παραγωγή βιοκαυσίμων, όπως η αιθανόλη και το βιοντίζελ, τα οποία μπορούν να χρησιμεύσουν ως εναλλακτικές λύσεις για τα ορυκτά καύσιμα στον τομέα των μεταφορών (Smith, 2019).

Η καλλιέργεια ενεργειακών «χωριαφιών» έχει πολλά περιβαλλοντικά οφέλη, όπως η δέσμευση άνθρακα στο έδαφος, η πρόληψη της διάβρωσης και η δημιουργία οικοτόπων για την άγρια ζωή. Ωστόσο, η μεγάλης κλίμακας καλλιέργεια αυτή μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγή χρήσης γης, κατανάλωση νερού και χρήση λιπασμάτων, η οποία μπορεί να έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις εάν δεν αντιμετωπιστεί με βιώσιμο τρόπο (Ghosh, 2020). Η έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη για την ανάπτυξη βιοκαυσίμων δεύτερης γενιάς που προέρχονται από μη διατροφικά μέρη ενεργειακών καλλιεργειών, όπως τα λιγνοκυτταρινικά υλικά, τα οποία προσφέρουν μια πιο βιώσιμη εναλλακτική λύση με λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Anderson and Lee, 2019).

4. Οργανικά Απόβλητα

Τα οργανικά απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων των αστικών στερεών αποβλήτων, των απορριμμάτων τροφίμων και της ζωικής κοπριάς, αντιπροσωπεύουν μια άμεσα διαθέσιμη και χαμηλού κόστους πηγή βιομάζας. Τα οργανικά απόβλητα είναι ιδιαίτερα πολύτιμα σε συστήματα απόβλητα σε ενέργεια, όπου μετατρέπονται σε βιοαέριο ή βιολιπάσματα μέσω αναερόβιας χώνευσης. Αυτή η διαδικασία όχι μόνο παράγει ενέργεια, αλλά επίσης μειώνει τα απόβλητα των χωματερών και μετριάξει τις εκπομπές μεθανίου από την αποσύνθεση, συμβάλλοντας στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα (Jones, 2021). Τα αστικά στερεά απόβλητα μπορούν να καούν για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, ενώ τα τρόφιμα και τα ζωικά απόβλητα είναι ιδανικά για παραγωγή βιοαερίου, ειδικά σε αγροτικές και αγροτικές κοινότητες (Kumar and Srivastava, 2020).

Η χρήση οργανικών απορριμμάτων ως πηγής βιομάζας καλύπτει τόσο τις ανάγκες διαχείρισης αποβλήτων όσο και τις ανάγκες παραγωγής ενέργειας, καθιστώντας τα μια εξαιρετικά βιώσιμη μορφή βιοενέργειας. Ωστόσο, τα συστήματα απόβλητα σε ενέργεια απαιτούν προσεκτική διαχείριση για την αποφυγή περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπως οι εκπομπές επιβλαβών ρύπων, εάν οι διαδικασίες καύσης δεν ελέγχονται επαρκώς (Smith and Gupta, 2018). Επιπλέον, η μεταβλητότητα της σύνθεσης των αποβλήτων μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών απόβλητου σε ενέργεια, απαιτώντας τη διαλογή και την προεπεξεργασία για τη βελτίωση των ποσοστών μετατροπής (Green, 2018).

2.5 Γεωθερμική Ενέργεια

2.5.1 Επισκόπηση και δυνατότητες

Η γεωθερμική ενέργεια αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία αξιοποιεί τη θερμότητα από το υπέδαφος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη θέρμανση χώρων. Αυτή η θερμότητα προέρχεται από τη φυσική διάσπαση ραδιενεργών στοιχείων στον πυρήνα της Γης, καθώς και από την υπολειμματική θερμότητα από το σχηματισμό του πλανήτη. Επειδή η Γη παράγει συνεχώς αυτή τη θερμότητα, η γεωθερμική ενέργεια θεωρείται μια σταθερή και βιώσιμη πηγή ενέργειας (Smith, 2019). Η εξόρυξη γεωθερμικής ενέργειας πραγματοποιείται με τη διάνοιξη γεωτρήσεων σε γεωθερμικές δεξαμενές για πρόσβαση σε ζεστό νερό ή ατμό, το οποίο στη συνέχεια έρχεται στην επιφάνεια για να κινήσει τουρμπίνες και να παράγει ηλεκτρική ενέργεια ή για να παρέχει άμεση θέρμανση σε κτίρια και βιομηχανικές διεργασίες (Jackson and Green, 2018).

Η γεωθερμική ενέργεια έχει τη δυνατότητα να καλύψει σημαντικό μέρος των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών, κυρίως επειδή προσφέρει ισχύ βασικού φορτίου — δηλαδή, μια σταθερή και αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες ή την ώρα της ημέρας. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά τη γεωθερμική ενέργεια ιδιαίτερα πολύτιμη ως συμπληρωματική πηγή σε πιο διαλείπουσες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή ενέργεια και ο άνεμος (Anderson and Lee, 2020). Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, η γεωθερμική ενέργεια θα μπορούσε να παρέχει πάνω από το 4% των παγκόσμιων αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας έως το 2050, ειδικά εάν οι εξελίξεις στην τεχνολογία επιτρέπουν ευρύτερη πρόσβαση σε γεωθερμικούς πόρους (IRENA, 2021). Χώρες με σημαντικό γεωθερμικό δυναμικό, όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Ισλανδία, η Ινδονησία και οι Φιλιππίνες, ήδη πρωτοστατούν στην παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας, με την Ισλανδία να προμηθεύεται σχεδόν όλες τις ανάγκες της σε θέρμανση και ένα σημαντικό μέρος της ηλεκτρικής της ενέργειας από γεωθερμική ενέργεια (Jones, 2021).

Τα συστήματα γεωθερμικής ενέργειας ταξινομούνται γενικά σε τρεις κύριους τύπους: **ξηρό ατμό, ατμό φλας** και συστήματα **δυαδικού κύκλου**. Τα συστήματα ξηρού ατμού είναι ο απλούστερος και παλαιότερος τύπος, που χρησιμοποιούν απευθείας ατμό από υπόγειες δεξαμενές για την περιστροφή στρόβιλων. Τα συστήματα ατμού φλας είναι πιο κοινά και λειτουργούν χρησιμοποιώντας ζεστό νερό υψηλής πίεσης από τη δεξαμενή, το οποίο «αναβοσβήνει» στον ατμό καθώς ανεβαίνει σε χαμηλότερες πιέσεις στην επιφάνεια, οδηγώντας τους στρόβιλους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Kumar and Srivastava, 2019). Τα συστήματα δυαδικού κύκλου, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιούν ένα δευτερεύον ρευστό με χαμηλότερο σημείο βρασμού από το νερό. Αυτό το ρευστό εξατμίζεται από τη γεωθερμική θερμότητα για να περιστρέψει τους στρόβιλους, καθιστώντας τα δυαδικά συστήματα κατάλληλα για γεωθερμικούς πόρους χαμηλότερης θερμοκρασίας και επεκτείνοντας έτσι τη δυνατότητα ανάπτυξης γεωθερμικής ενέργειας σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμοι παραδοσιακοί πόροι υψηλής θερμοκρασίας (Rashid, 2019).

Τα περιβαλλοντικά οφέλη της γεωθερμικής ενέργειας είναι σημαντικά. Οι γεωθερμικές μονάδες παράγουν πολύ χαμηλά επίπεδα εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με τις εγκαταστάσεις που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, καθώς και ελάχιστους ατμοσφαιρικούς ρύπους. Επιπλέον, τα γεωθερμικά φυτά καταλαμβάνουν σχετικά μικρές χερσαίες εκτάσεις, γεγονός που μειώνει τον αντίκτυπό τους στα τοπικά οικοσυστήματα (Smith and Gupta, 2018). Ωστόσο, η γεωθερμική ενέργεια δεν είναι εντελώς απαλλαγμένη από περιβαλλοντικές ανησυχίες. Για παράδειγμα, τα γεωθερμικά φυτά μπορούν να απελευθερώσουν ίχνη αερίων του θερμοκηπίου, όπως διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο, από υπόγειες δεξαμενές. Επιπλέον, η γεώτρηση και η εξόρυξη μπορεί να προκαλέσουν υπεδάφια διαταραχές, οδηγώντας σε καθίζηση ή μικρή σεισμική δραστηριότητα σε ορισμένες περιπτώσεις (Pérez-Arriaga, 2020).

Μία από τις κύριες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η ανάπτυξη της γεωθερμικής ενέργειας είναι η τοποθεσία των πόρων. Οι γεωθερμικές δεξαμενές υψηλής θερμοκρασίας, οι οποίες είναι πιο αποδοτικές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, βρίσκονται συνήθως σε γεωλογικά ενεργές περιοχές κοντά στα όρια της τεκτονικής πλάκας, όπως ο Δακτύλιος της Φωτιάς του Ειρηνικού. Ως αποτέλεσμα, οι γεωθερμικοί πόροι δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένοι, περιορίζοντας την ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας σε συγκεκριμένες περιοχές (Jones and White, 2021). Ωστόσο, οι εξελίξεις στη γεωθερμική τεχνολογία, συμπεριλαμβανομένων των βελτιωμένων γεωθερμικών συστημάτων (EGS), προσφέρουν δυνατότητες για ευρύτερη ανάπτυξη της γεωθερμίας. Το EGS περιλαμβάνει τη δημιουργία τεχνητών γεωθερμικών δεξαμενών με θραύση θερμών πετρωμάτων σε περιοχές όπου το φυσικό νερό και η διαπερατότητα είναι ανεπαρκείς, επιτρέποντας την εξόρυξη γεωθερμικής ενέργειας ακόμη και σε περιοχές χωρίς παραδοσιακούς γεωθερμικούς πόρους (Dunn et al., 2019).

Οι εφαρμογές άμεσης χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας έχουν επίσης σημαντικές δυνατότητες για τη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων. Η άμεση χρήση περιλαμβάνει τη χρήση γεωθερμικής θερμότητας για θέρμανση χώρων, ξήρανση γεωργικών προϊόντων, θέρμανση θερμοκηπίου και βιομηχανικές διεργασίες χωρίς την ανάγκη μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια. Η Ισλανδία είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, όπου η γεωθερμική θερμότητα χρησιμοποιείται εκτενώς για θέρμανση κατοικιών, παρέχοντας μια καθαρή, οικονομικά αποδοτική εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα (Smith, 2019). Η χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, οι οποίες εκμεταλλεύονται ρηχούς γεωθερμικούς πόρους για θέρμανση και ψύξη κτιρίων, επεκτείνεται με ταχείς ρυθμούς τόσο στις αστικές όσο και στις αγροτικές περιοχές, ιδιαίτερα στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική, όπου συμβάλλει στη μείωση του ενεργειακού κόστους κατοικιών και του εμπορίου και των αποτυπωμάτων άνθρακα. Τζάκσον και Γκριν, 2018).

2.5.2 Τύποι Γεωθερμικών Συστημάτων

Τα συστήματα γεωθερμικής ενέργειας αξιοποιούν την εσωτερική θερμότητα της Γης με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τη θερμοκρασία του πόρου και την προβλεπόμενη χρήση. Τα γεωθερμικά συστήματα χωρίζονται κυρίως σε **συστήματα ξηρού ατμού**, **συστήματα**

ατμού flash, συστήματα δυαδικού κύκλου και ενισχυμένα γεωθερμικά συστήματα (EGS). Κάθε τύπος γεωθερμικού συστήματος είναι κατάλληλος για συγκεκριμένες γεωλογικές συνθήκες και ενεργειακές ανάγκες, επιτρέποντας ποικίλες εφαρμογές, από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έως την άμεση θέρμανση (Smith, 2019).

1. Συστήματα ξηρού ατμού - Υψηλής Ενθαλπίας

Τα συστήματα ξηρού ατμού είναι ο παλαιότερος τύπος γεωθερμικής τεχνολογίας και ο απλούστερος στο σχεδιασμό. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν γεωθερμικές δεξαμενές όπου υπάρχει φυσικά ατμός, επιτρέποντας στον ατμό να αναρροφάται απευθείας από το έδαφος για να τροφοδοτούν τουρμπίνες και να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια (Jackson and Green, 2018). Δεδομένου ότι οι δεξαμενές ξηρού ατμού είναι σπάνιες και γενικά βρίσκονται μόνο σε γεωλογικά ενεργές περιοχές, όπως περιοχές της Καλιφόρνια και της Ιταλίας, τα συστήματα ξηρού ατμού είναι λιγότερο κοινά από άλλους τύπους γεωθερμικών συστημάτων (Ghosh, 2020). Ο φυσικός ατμός που τροφοδοτεί τα συστήματα ξηρού ατμού τα καθιστά εξαιρετικά αποδοτικά, καθώς δεν χρειάζονται πρόσθετες διαδικασίες για τη μετατροπή του νερού σε ατμό, με αποτέλεσμα χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και ελάχιστη χρήση νερού (Jones, 2021).

Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, τα συστήματα ξηρού ατμού έχουν περιβαλλοντικά ζητήματα. Η εξαγωγή ατμού απευθείας από τις γεωθερμικές δεξαμενές μπορεί να οδηγήσει στην απελευθέρωση ιχνών αερίων, όπως διοξείδιο του άνθρακα και υδρόθειο, στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, η μακροπρόθεσμη εξόρυξη μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη πίεση στο ρεζερβουάρ, η οποία μπορεί να μειώσει την απόδοση του συστήματος και την παραγωγή ενέργειας με την πάροδο του χρόνου (Rashid, 2019).

2. Flash Steam Systems - Υψηλής Ενθαλπίας

Τα συστήματα flash ατμού είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος γεωθερμικών συστημάτων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά τα συστήματα βασίζονται σε γεωθερμικές δεξαμενές υψηλής θερμοκρασίας που περιέχουν νερό σε θερμοκρασίες συνήθως πάνω από 180°C. Σε ένα σύστημα flash ατμού, το γεωθερμικό νερό έρχεται στην επιφάνεια και υποβάλλεται σε ξαφνική μείωση της πίεσης, προκαλώντας ένα μέρος του νερού να «αναβρασθήνει» ή να εξατμίζεται σε ατμό, ο οποίος στη συνέχεια οδηγεί τους στρόβιλους για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια (Anderson and Lee, 2020). Το υπόλοιπο υγρό νερό συχνά επανεγχέεται στη δεξαμενή για να διατηρηθεί η πίεση και η βιωσιμότητα, γεγονός που βοηθά στη διατήρηση της μακροζωίας της δεξαμενής και μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Kumar and Srivastava, 2019).

Τα συστήματα ατμού flash είναι αποτελεσματικά σε περιοχές με γεωθερμικούς πόρους υψηλής θερμοκρασίας, όπως η Ισλανδία, οι Φιλιππίνες και τμήματα των Ηνωμένων Πολιτειών. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά είναι γεωγραφικά περιορισμένα λόγω των ειδικών θερμοκρασιακών απαιτήσεων των γεωθερμικών ταμιευτήρων. Σε περιοχές όπου υπάρχουν διαθέσιμοι γεωθερμικοί πόροι, τα συστήματα ατμού flash παρέχουν μια αξιόπιστη και

αποδοτική πηγή ισχύος βασικού φορτίου, η οποία είναι πολύτιμη για σταθερό ενεργειακό εφοδιασμό (Brown et al., 2018).

3. Συστήματα Δυαδικού Κύκλου - Μέσης έως Χαμηλής Ενθαλπίας

Τα συστήματα δυαδικού κύκλου έχουν επεκτείνει τη δυνατότητα για γεωθερμική ενέργεια επιτρέποντας τη χρήση γεωθερμικών πόρων χαμηλότερης θερμοκρασίας, συνήθως στην περιοχή 90-150°C. Σε ένα σύστημα δυαδικού κύκλου, το γεωθερμικό ρευστό (το οποίο μπορεί να είναι νερό ή διάλυμα άλμης) διέρχεται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας, όπου μεταφέρει τη θερμότητά του σε ένα δευτερεύον ρευστό με χαμηλότερο σημείο βρασμού, όπως μια οργανική ένωση (Ghosh, 2020). Το δευτερεύον ρευστό εξατμίζεται και οδηγεί έναν στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Δεδομένου ότι το γεωθερμικό ρευστό και το δευτερεύον ρευστό κυκλοφορούν σε χωριστούς, κλειστούς βρόχους, τα συστήματα δυαδικού κύκλου δεν απελευθερώνουν γεωθερμικά αέρια στην ατμόσφαιρα, καθιστώντας τα μια από τις πιο φιλικές προς το περιβάλλον γεωθερμικές τεχνολογίες (Jones and White, 2021).

Τα συστήματα δυαδικού κύκλου έχουν γίνει δημοφιλή σε περιοχές με μέτριους γεωθερμικούς πόρους, καθώς επιτρέπουν την ευρύτερη αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας. Αυτή η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιοχές όπου οι παραδοσιακοί γεωθερμικοί πόροι υψηλής θερμοκρασίας δεν είναι διαθέσιμοι, όπως η Γερμανία και η Ιαπωνία (Smith, 2019). Επιπλέον, τα δυαδικά συστήματα παρέχουν μια πιο ελεγχόμενη και βιώσιμη μέθοδο εξόρυξης γεωθερμικής ενέργειας διατηρώντας ένα σύστημα κλειστού βρόχου, το οποίο ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο περιβαλλοντικής υποβάθμισης και παρατείνει τη διάρκεια ζωής του ταμιευτήρα (Pérez-Arriaga, 2020).

4. Ενισχυμένα Γεωθερμικά Συστήματα (EGS)

Τα ενισχυμένα γεωθερμικά συστήματα (EGS), γνωστά και ως μηχανικά γεωθερμικά συστήματα, αντιπροσωπεύουν το σύνορο της γεωθερμικής τεχνολογίας. Το EGS έχει σχεδιαστεί για να αξιοποιεί τη γεωθερμική ενέργεια σε περιοχές όπου οι φυσικοί ταμιευτήρες είναι είτε χαμηλής διαπερατότητας είτε στερούνται επαρκούς νερού. Στο EGS, το νερό εγχέεται σε θερμούς, ξηρούς βραχώδεις σχηματισμούς σε βάθη αρκετών χιλιομέτρων, όπου θερμαίνεται από τον περιβάλλοντα βράχο. Το θερμαινόμενο νερό στη συνέχεια εξάγεται στην επιφάνεια, όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ατμοστροβίλων ή για άμεση θέρμανση (Dunn et al., 2019).

Η τεχνολογία EGS έχει τη δυνατότητα να επεκτείνει σε μεγάλο βαθμό την πρόσβαση στη γεωθερμική ενέργεια μέσω της αξιοποίησης θερμών πετρωμάτων που διαφορετικά θα ήταν άχρηστα. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά γεωθερμικά συστήματα, τα οποία εξαρτώνται από συγκεκριμένους γεωλογικούς σχηματισμούς, το EGS μπορεί να αναπτυχθεί σε ένα ευρύ φάσμα γεωλογικών συνθηκών, καθιστώντας δυνατή την παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας σε τοποθεσίες που προηγουμένως ήταν ακατάλληλες για γεωθερμική ανάπτυξη (Rashid, 2019). Ωστόσο, το EGS παρουσιάζει ορισμένες προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένου του κινδύνου επαγόμενης σεισμικότητας (μικροί σεισμοί) λόγω της έγχυσης νερού υψηλής

πίεσης στον φλοιό της Γης. Οι συνεχείς προσπάθειες έρευνας και παρακολούθησης στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση αυτών των κινδύνων και να καταστήσουν το EGS βιώσιμη και ασφαλή επιλογή για μεγάλης κλίμακας παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας (Smith and Gupta, 2018).

2.6 Ωκεάνια και θαλάσσια ενέργεια

Η ενέργεια από τους ωκεανούς και τις θάλασσες περιλαμβάνει διάφορες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί για να αξιοποιούν τους τεράστιους και ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους που προσφέρουν οι παγκόσμιοι ωκεανοί. Αυτό περιλαμβάνει ενέργεια που προέρχεται από παλίρροιες, κύματα, ωκεάνια ρεύματα, θερμικές κλίσεις και κλίσεις αλατότητας. Συγκεντρωτικά, αυτές οι πηγές αναφέρονται συχνά ως «μπλε ενέργεια» λόγω της συσχέτισής τους με το θαλάσσιο περιβάλλον. Η ενέργεια των ωκεανών έχει τεράστιες δυνατότητες, με τις εκτιμήσεις να υποδηλώνουν ότι οι ωκεανικοί πόροι θα μπορούσαν να καλύψουν έως και το 10% των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών εάν αξιοποιηθούν πλήρως (Smith, 2019). Ωστόσο, λόγω τεχνικών και οικονομικών προκλήσεων, η ενέργεια των ωκεανών παραμένει στα πρώτα στάδια ανάπτυξης σε σύγκριση με τις πιο καθιερωμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια (Jackson and Green, 2018).

Τύποι ωκεάνιας και θαλάσσιας ενέργειας

Οι τεχνολογίες ωκεάνιας και θαλάσσιας ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν σε πέντε κύριους τύπους: **παλιρροιακή ενέργεια, ενέργεια κυμάτων, ενέργεια ωκεάνιου ρεύματος, μετατροπή θερμικής ενέργειας ωκεανών (OTEC) και ενέργεια βαθμίδωσης αλατότητας.**

Παλιρροιακή ενέργεια: Η παλιρροιακή ενέργεια είναι μια από τις πιο προηγμένες μορφές ενέργειας των ωκεανών, που χρησιμοποιεί την άνοδο και την πτώση της στάθμης της θάλασσας για την παραγωγή ενέργειας. Τα συστήματα παλιρροιακής ενέργειας χωρίζονται συνήθως σε τεχνολογίες **παλιρροιακού εύρους** και **παλιρροϊκών ρευμάτων**. Τα συστήματα παλιρροϊκού εύρους, όπως τα παλιρροϊκά φράγματα, χρησιμοποιούν τη διαφορά στα επίπεδα νερού μεταξύ υψηλής και χαμηλής παλίρροιας για να οδηγήσουν στροβίλους, ενώ τα συστήματα παλιρροϊκών ρευμάτων συλλαμβάνουν την κινητική ενέργεια των υποβρύχιων ρευμάτων που δημιουργούνται από τις παλιρροιακές κινήσεις (Ghosh, 2020). Η παλιρροιακή ενέργεια είναι εξαιρετικά προβλέψιμη επειδή οι παλίρροιες ακολουθούν τακτικά μοτίβα, προσφέροντας μια αξιόπιστη και σταθερή πηγή ενέργειας. Αξιοσημείωτα παραδείγματα περιλαμβάνουν τον παλιρροιακό ηλεκτρικό σταθμό La Rance στη Γαλλία, έναν από τους πρώτους και μεγαλύτερους παλιρροιακούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας (Jones and White, 2021).

Ενέργεια Κυμάτων: Η τεχνολογία κυματικής ενέργειας συλλαμβάνει την ενέργεια που παράγεται από την επιφανειακή κίνηση των κυμάτων του ωκεανού. Οι συσκευές για την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας μπορούν να εγκατασταθούν στην ακτογραμμή ή στην υπεράκτια, όπου η κυματική ενέργεια είναι γενικά ισχυρότερη. Μερικοί συνήθεις τύποι

συσκευών κυματικής ενέργειας περιλαμβάνουν **σημειακούς απορροφητές, ταλαντευόμενες στήλες νερού και εξασθενητές** (Smith and Gupta, 2018). Η ενέργεια των κυμάτων είναι πιο μεταβλητή από την παλιρροιακή ενέργεια, καθώς εξαρτάται από τις συνθήκες ανέμου, οι οποίες είναι λιγότερο προβλέψιμες από τις παλιρροιακές κινήσεις. Ωστόσο, η κυματική ενέργεια είναι ιδιαίτερα άφθονη κατά μήκος των δυτικών ακτών των ηπείρων, όπου οι επικρατούντες άνεμοι δημιουργούν μεγάλα κύματα, καθιστώντας αυτές τις περιοχές πρωταρχικές υποψήφιες για την ανάπτυξη της κυματικής ενέργειας (Rashid, 2019).

Ενέργεια Ωκεανού ρεύματος: Τα ενεργειακά συστήματα ωκεάνιου ρεύματος στοχεύουν να συλλάβουν την κινητική ενέργεια μεγάλων ωκεάνιων ρευμάτων, όπως το Ρεύμα του Κόλπου. Παρόμοια με τα συστήματα παλιρροιακών ρευμάτων, τα συστήματα ωκεάνιου ρεύματος χρησιμοποιούν υποβρύχιους στρόβιλους για να μετατρέψουν την κίνηση του νερού σε ηλεκτρική ενέργεια (Anderson, 2020). Τα ωκεάνια ρεύματα είναι πιο αργά αλλά πιο σταθερά από τα επιφανειακά κύματα, και σε αντίθεση με τα παλιρροιακά ρεύματα, είναι σχετικά σταθερά και δεν μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτή η συνέπεια προσφέρει μια αξιόπιστη πηγή ενέργειας, αν και οι τεχνικές προκλήσεις στην ανάπτυξη και συντήρηση εξοπλισμού στα βαθιά ωκεάνια ύδατα έχουν περιορίσει την ευρεία χρήση της ενέργειας του ωκεάνιου ρεύματος (Kumar and Srivastava, 2020).

Μετατροπή θερμικής ενέργειας ωκεανού (OTEC): Η μετατροπή θερμικής ενέργειας ωκεανού χρησιμοποιεί τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των θερμότερων επιφανειακών υδάτων και των ψυχρότερων βαθιών υδάτων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα OTEC λειτουργούν χρησιμοποιώντας μια θερμική μηχανή που κινεί τουρμπίνες εκμεταλλευόμενη τη θερμική κλίση σε τροπικές περιοχές, όπου οι διαφορές θερμοκρασίας μπορεί να είναι σημαντικές (Pérez-Arriaga, 2020). Η OTEC έχει το πλεονέκτημα ότι παρέχει σταθερή, ανεξάρτητη από τις καιρικές συνθήκες ισχύ, ιδιαίτερα σε τροπικές περιοχές. Ωστόσο, η τεχνολογία OTEC απαιτεί σημαντική υποδομή και υψηλό κόστος κεφαλαίου, που έχουν περιορίσει την εφαρμογή της σε μεγάλη κλίμακα (Smith, 2019).

Ενέργεια Διαβάθμισης Αλατότητας: Η ενέργεια κλίσης αλατότητας, γνωστή και ως μπλε ενέργεια, παράγεται από τη διαφορά στη συγκέντρωση αλατιού μεταξύ θαλασσινού και γλυκού νερού, συνήθως εκεί όπου τα ποτάμια συναντούν τον ωκεανό. Αυτή η κλίση δημιουργεί μια φυσική διαφορά πίεσης που μπορεί να οδηγήσει εξειδικευμένες μεμβράνες ή στρόβιλους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Brown et al., 2018). Η ενέργεια κλίσης αλατότητας είναι μια πολλά υποσχόμενη αλλά λιγότερο ώριμη τεχνολογία, με δυνατότητες παροχής τοπικής ενέργειας σε εκβολές ποταμών. Ωστόσο, οι προκλήσεις που σχετίζονται με την αποτελεσματικότητα της μεμβράνης και τη ρύπανση περιορίζουν επί του παρόντος την εμπορική βιωσιμότητά της (Jones, 2021).

Δυνατότητες και προκλήσεις της ωκεάνιας ενέργειας

Οι δυνατότητες της ωκεάνιας και θαλάσσιας ενέργειας είναι τεράστιες, ιδιαίτερα επειδή οι ωκεανοί καλύπτουν περισσότερο από το 70% της επιφάνειας της Γης και περιέχουν

συγκεντρωμένες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η ωκεάνια ενέργεια θα μπορούσε να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη διαφοροποίηση του μείγματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στην υποστήριξη των παράκτιων κοινοτήτων με τοπικές πηγές ενέργειας (Jackson and Green, 2018). Επιπλέον, επειδή πολλά ωκεάνια ενεργειακά συστήματα έχουν υψηλό συντελεστή χωρητικότητας, που σημαίνει ότι μπορούν να λειτουργούν με συνέπεια, προσφέρουν μια σταθερή πηγή ενέργειας που μπορεί να βοηθήσει στην εξισορρόπηση περισσότερων μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως ο άνεμος και η ηλιακή ενέργεια (Dunn et al., 2019).

Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η ωκεάνια ενέργεια αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις. Τεχνολογικά, τα ωκεάνια ενεργειακά συστήματα πρέπει να αντέχουν σε σκληρές θαλάσσιες συνθήκες, συμπεριλαμβανομένης της διάβρωσης από το αλμυρό νερό, των ισχυρών ρευμάτων και των ακραίων καιρικών συνθηκών. Η ανάπτυξη υλικών και σχεδίων που μπορούν να αντέξουν αυτές τις συνθήκες, παραμένοντας αποδοτικά και οικονομικά, παραμένει πρωταρχικό εμπόδιο για την κλιμάκωση των τεχνολογιών ενέργειας των ωκεανών (Smith and Gupta, 2018). Από οικονομική άποψη, τα ωκεάνια ενεργειακά συστήματα απαιτούν σημαντική αρχική επένδυση και το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης μπορεί να είναι υψηλό λόγω της πολυπλοκότητας της εργασίας σε θαλάσσια περιβάλλοντα (Ghosh, 2020). Επιπλέον, οι περιβαλλοντικές ανησυχίες που σχετίζονται με τη διαταραχή των οικοτόπων και τις πιθανές επιπτώσεις στη θαλάσσια ζωή πρέπει να αντιμετωπίζονται προσεκτικά μέσω αυστηρών περιβαλλοντικών αξιολογήσεων και στρατηγικών μετριασμού (Pérez-Arriaga, 2020).

3. Τεχνολογίες για την αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

3.1 Τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας

3.1.1 Φωτοβολταϊκά Πάνελ

Τα φωτοβολταϊκά (PV) πάνελ είναι η θεμελιώδης τεχνολογία πίσω από τα συστήματα ηλιακής ενέργειας, μετατρέποντας το ηλιακό φως απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει όταν η φωτεινή ενέργεια προσπίπτει σε ένα ημιαγωγικό υλικό μέσα στο πάνελ, προκαλώντας διέγερση των ηλεκτρονίων και τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος (Smith, 2019). Τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι κεντρικά στις εφαρμογές ηλιακής ενέργειας λόγω της αποτελεσματικότητάς τους, της επεκτασιμότητας και των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων τους, καθιστώντας τα μια από τις πιο ευρέως διαδεδομένες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας παγκοσμίως (Jackson and Green, 2018).

Δομή και Λειτουργία Φ/Β Πάνελ

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από ημιαγωγικά υλικά, συνήθως από πυρίτιο, το οποίο επεξεργάζεται σε λεπτά πλακίδια. Αυτά τα πλακίδια είναι δομημένα με στρώματα για να δημιουργήσουν ένα ηλεκτρικό πεδίο: το **στρώμα τύπου n**, το οποίο έχει

περίσσεια ηλεκτρονίων, και το **στρώμα τύπου p**, το οποίο έχει ανεπάρκεια ηλεκτρονίων (οπές). Όταν το ηλιακό φως χτυπά το φωτοβολταϊκό, φωτόνια (σωματίδια φωτός) χτυπούν το υλικό ημιαγωγών, ενεργοποιώντας τα ηλεκτρόνια και αναγκάζοντάς τα να μετακινηθούν από το στρώμα τύπου p στο στρώμα τύπου n (Jones and White, 2021). Αυτή η κίνηση των ηλεκτρονίων δημιουργεί ένα ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο συλλέγεται από μεταλλικές επαφές στην επιφάνεια της κυψέλης και κατευθύνεται μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος, παράγοντας ηλεκτρισμό (Brown et al., 2018).

Τα φωτοβολταϊκές πάνελ είναι συνήθως διατεταγμένα σε **ηλιακούς συλλέκτες** για να αυξήσουν την επιφάνεια που εκτίθεται στο ηλιακό φως και να ενισχύσουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πάνελ συνδέονται για να σχηματίσουν **ηλιακές συστοιχίες**, οι οποίες στη συνέχεια συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο ή χρησιμοποιούνται σε αυτόνομα συστήματα. Τα ηλιακά πάνελ μπορούν να εγκατασταθούν σε στέγες, στο έδαφος ή να ενσωματωθούν σε προσόψεις κτιρίων και άλλες κατασκευές, προσφέροντας ευέλικτες επιλογές εγκατάστασης (Smith and Gupta, 2018).

Τύποι Φωτοβολταϊκών Πάνελ

Υπάρχουν διάφοροι τύποι φωτοβολταϊκών κυττάρων, καθένας με ξεχωριστές ιδιότητες που επηρεάζουν την απόδοση, το κόστος και την εφαρμογή τους:

Μονοκρυσταλλικά πάνελ πυριτίου: Τα μονοκρυσταλλικά πάνελ είναι κατασκευασμένα από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, το οποίο παρέχει υψηλή απόδοση και ανθεκτικότητα. Έχουν ποσοστό απόδοσης που κυμαίνεται από 15% έως 20%, καθιστώντας τους έναν από τους πιο αποδοτικούς τύπους Φ/Β πάνελ. Η δομή τους τους επιτρέπει να συλλαμβάνουν αποτελεσματικά το φως του ήλιου ακόμη και σε μικρότερους χώρους, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για στέγες κατοικιών και εμπορικές εγκαταστάσεις (Ghosh, 2020). Ωστόσο, είναι επίσης πιο ακριβά στην παραγωγή τους λόγω της ενεργοβόρας διαδικασίας παραγωγής μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Rashid, 2019).

Πολυκρυσταλλικά πάνελ πυριτίου: Τα πολυκρυσταλλικά πάνελ κατασκευάζονται από κρυστάλλους πυριτίου που λιώνουν μαζί, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος παραγωγής αλλά και ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση (συνήθως περίπου 13% έως 16%) (Jones, 2021). Αν και τα πολυκρυσταλλικά πάνελ είναι λιγότερο αποδοτικά από τα μονοκρυσταλλικά, είναι πιο προσιτά και χρησιμοποιούνται συνήθως σε μεγάλης κλίμακας ηλιακά πάρκα και εγκαταστάσεις όπου ο χώρος δεν είναι περιοριστικός παράγοντας (Smith, 2019).

Φ/Β πάνελ λεπτής μεμβράνης: Τα φωτοβολταϊκά πάνελ λεπτής μεμβράνης δημιουργούνται με την εναπόθεση ενός ή περισσότερων στρωμάτων φωτοβολταϊκού υλικού σε ένα υπόστρωμα, όπως γυαλί ή μέταλλο. Αυτά τα πάνελ είναι ελαφριά, εύκαμπτα και ευκολότερα στην παραγωγή σε μεγάλους όγκους, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές όπου τα παραδοσιακά πάνελ πυριτίου δεν είναι πρακτικά, όπως σε φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε κτίρια (BIPV) (Anderson, 2020). Ωστόσο, τα πάνελ λεπτής μεμβράνης έχουν συνήθως χαμηλότερα ποσοστά απόδοσης (περίπου 10% έως 12%) σε σύγκριση με τα

πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου, αν και η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και η προσαρμοστικότητά τους συχνά αντισταθμίζουν αυτόν τον περιορισμό (Kumar and Srivastava, 2020).

Perovskite και άλλες αναδιδόμενες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών: Τα ηλιακά πάνελ Perovskite είναι μια αναδιδόμενη τεχνολογία γνωστή για την υψηλή απόδοση και το χαμηλό κόστος παραγωγής τους. Αυτά τα πάνελ χρησιμοποιούν μια ένωση με δομή περοβσκίτη ως υλικό απορρόφησης φωτός, το οποίο έχει δείξει δυνατότητες για αποτελεσματικότητες συγκρίσιμες με τα πάνελ με βάση το πυρίτιο ενώ είναι φθηνότερο στην κατασκευή (Smith and Gupta, 2018). Η έρευνα συνεχίζεται για τη βελτίωση της σταθερότητας και της ανθεκτικότητας των πάνελ περοβσκίτη, καθώς τα τρέχοντα μοντέλα είναι ευαίσθητα σε υποβάθμιση υπό παρατεταμένη έκθεση στο ηλιακό φως (Dunn et al., 2019).

Εφαρμογές και Οφέλη Φ/B Πάνελ

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι εξαιρετικά ευέλικτα και έχουν εφαρμογές σε διάφορες κλίμακες, από μικρά οικιακά συστήματα ταρατσας έως μεγάλης κλίμακας ηλιακά πάρκα. Σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές, τα φωτοβολταϊκά πάνελ χρησιμοποιούνται σε **συστήματα εκτός δικτύου** για να παρέχουν αξιόπιστη ηλεκτρική ενέργεια, υποστηρίζοντας τα πάντα, από τον οικιακό φωτισμό μέχρι την άντληση νερού (Pérez-Arriaga, 2020).

Τα περιβαλλοντικά οφέλη των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι σημαντικά. Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα δεν παράγουν άμεσες εκπομπές κατά τη λειτουργία, μειώνοντας σημαντικά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων θερμοκηπίου σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα. Επιπλέον, τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν σχετικά χαμηλό αποτύπωμα νερού, καθώς δεν απαιτούν νερό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, κάτι που είναι ευεργετικό σε περιοχές με λειψυδρία (Jackson and Green, 2018). Με τη μείωση του κόστους παραγωγής και τη βελτιωμένη απόδοση, η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών γίνεται όλο και πιο προσιτή, υποστηρίζοντας τις παγκόσμιες προσπάθειες για τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και την επίτευξη κλιματικών στόχων (Jones, 2021).

Προκλήσεις και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Ενώ η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών έχει κάνει σημαντικά βήματα προόδου, αντιμετωπίζει ορισμένες προκλήσεις. Η κατασκευή φωτοβολταϊκών πάνελ, ιδιαίτερα πάνελ με βάση το πυρίτιο, περιλαμβάνει διαδικασίες έντασης ενέργειας που παράγουν εκπομπές άνθρακα και απαιτούν σπάνια υλικά, όπως ασήμι και ίνδιο, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν τη βιωσιμότητα της παραγωγής (Ghosh, 2020). Επιπλέον, η απόρριψη και η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πάνελ μετά τον κύκλο ζωής τους παραμένει ένα αναδιδόμενο ζήτημα, καθώς η ανάπτυξη των ηλιακών εγκαταστάσεων θα οδηγήσει σε μεγάλες ποσότητες ηλιακών αποβλήτων τις επόμενες δεκαετίες (Anderson, 2020).

Η μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εστιάζεται στη βελτίωση της απόδοσης, στη μείωση του κόστους και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των φωτοβολταϊκών πάνελ. Για παράδειγμα, τα φωτοβολταϊκά πάνελ διπλής όψης, που

μπορούν να συλλάβουν το φως του ήλιου και στις δύο πλευρές, αναπτύσσονται για να αυξήσουν την απόδοση ενέργειας ανά πίνακα (Smith and Gupta, 2018). Επιπλέον, τα διαδοχικά πάνελ, τα οποία στρώνουν διαφορετικά υλικά για να συλλάβουν ένα ευρύτερο φάσμα ηλιακού φωτός, διερευνώνται για να ωθήσουν τα όρια απόδοσης πέρα από αυτά που μπορούν να επιτύχουν τα πάνελ ενός υλικού (Jones and White, 2021).

Συνοπτικά, τα φωτοβολταϊκά πάνελ αποτελούν ακρογωνιαίο λίθο της τεχνολογίας ηλιακής ενέργειας, με εφαρμογές που κυμαίνονται από στέγες κατοικιών έως ηλιακά αγροκτήματα βιομηχανικής κλίμακας. Καθώς η απόδοση βελτιώνεται και το κόστος μειώνεται, τα φωτοβολταϊκά πάνελ γίνονται όλο και πιο ενσωματωμένα στις παγκόσμιες στρατηγικές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με τις συνεχείς εξελίξεις, η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών αναμένεται να συνεχίσει να συμβάλλει σε ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον με χαμηλές εκπομπές άνθρακα (Smith, 2019).

3.1.2 Ηλιοθερμικοί συλλέκτες

Οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες είναι συσκευές που αξιοποιούν την ενέργεια του ήλιου για να παράγουν θερμότητα, η οποία στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας ή να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω διαφόρων εφαρμογών. Σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά (PV) πάνελ, τα οποία μετατρέπουν το ηλιακό φως απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια, οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες συλλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία ως θερμότητα, καθιστώντας τους ιδιαίτερα χρήσιμους σε εφαρμογές που απαιτούν διαδικασίες υψηλής θερμοκρασίας, όπως βιομηχανική θέρμανση, ζεστό νερό κατοικιών και ηλεκτρική ενέργεια μεγάλης κλίμακας. γενιά (Smith, 2019). Τα ηλιακά θερμικά συστήματα είναι ευέλικτα και μπορούν να αναπτυχθούν τόσο σε οικιακές εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας όσο και σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας (CSP), συμβάλλοντας σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών ανανεώσιμης ενέργειας (Jackson and Green, 2018).

Τύποι Ηλιακών Θερμικών Συλλεκτών

Οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες ταξινομούνται γενικά σε **επίπεδους συλλέκτες**, **συλλέκτες κενού σωλήνα** και **συλλέκτες συγκέντρωσης**, ο καθένας με συγκεκριμένα σχέδια, επίπεδα απόδοσης και εφαρμογές.

Επίπεδοι συλλέκτες: Οι επίπεδοι συλλέκτες είναι από τους πιο συνηθισμένους και ευρέως χρησιμοποιούμενους τύπους ηλιακών θερμικών συλλεκτών. Αποτελούνται από μια σκούρα, επίπεδη απορροφητική πλάκα που αιχμαλωτίζει το φως του ήλιου, καλυμμένη με διαφανές γυάλινο ή πλαστικό κάλυμμα για μείωση της απώλειας θερμότητας. Κάτω από την απορροφητική πλάκα υπάρχουν σωλήνες ή κανάλια που περιέχουν ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας, συνήθως νερό ή αντιψυκτικό, το οποίο απορροφά τη συλλεγόμενη θερμότητα και τη μεταφέρει σε δεξαμενές αποθήκευσης ή άμεσες εφαρμογές (Ghosh, 2020). Οι επίπεδοι συλλέκτες χρησιμοποιούνται γενικά για εφαρμογές χαμηλής έως μέσης θερμοκρασίας, όπως θέρμανση νερού οικιακής χρήσης και θέρμανση χώρων σε κατοικίες

και εμπορικά κτίρια. Είναι οικονομικά αποδοτικά και σχετικά απλά στην εγκατάσταση, καθιστώντας τα μια ελκυστική επιλογή για οικιακή χρήση (Kumar and Srivastava, 2019).

Συλλέκτες κενού σωλήνα: Οι συλλέκτες κενών σωλήνων αποτελούνται από παράλληλες σειρές γυάλινων σωλήνων, καθεμία από τις οποίες περιέχει μια πλάκα απορρόφησης και έναν σωλήνα θερμότητας μέσα σε ένα εξωτερικό στρώμα σφραγισμένο με κενό. Το κενό μεταξύ του γυάλινου σωλήνα και της πλάκας απορρόφησης ελαχιστοποιεί την απώλεια θερμότητας, καθιστώντας τους εκκενωμένους συλλέκτες σωλήνων πιο αποτελεσματικούς από τους επίπεδους συλλέκτες, ειδικά σε ψυχρότερα κλίματα ή σε συνθήκες χαμηλού ηλιακού φωτός (Jones, 2021). Λόγω της ενισχυμένης απόδοσής τους, οι συλλέκτες κενών σωλήνων χρησιμοποιούνται συχνά για εφαρμογές υψηλότερης θερμοκρασίας, όπως οι βιομηχανικές διαδικασίες θέρμανσης και για την παροχή ζεστού νερού σε ψυχρότερες περιοχές (Anderson, 2020). Το μειονέκτημα των συλλεκτών κενών σωλήνων είναι το υψηλότερο κόστος και η πολυπλοκότητά τους σε σύγκριση με τους επίπεδους συλλέκτες, γεγονός που περιορίζει την υιοθέτησή τους σε ορισμένες οικιακές εφαρμογές (Smith and Gupta, 2018).

Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες: Οι συγκεντρωμένοι ηλιακοί συλλέκτες έχουν σχεδιαστεί για να εστιάζουν μια μεγάλη περιοχή ηλιακού φωτός σε μια μικρότερη περιοχή, δημιουργώντας έτσι υψηλότερες θερμοκρασίες κατάλληλες για παραγωγή ενέργειας και βιομηχανικές διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν συνήθως καθρέφτες ή φακούς για να συγκεντρώνουν το ηλιακό φως σε έναν δέκτη, ο οποίος στη συνέχεια θερμαίνει ένα ρευστό για να δημιουργήσει ατμό που οδηγεί έναν στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Rashid, 2019). Οι συλλέκτες συγκέντρωσης χρησιμοποιούνται κυρίως σε μονάδες **συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας (CSP)**, οι οποίες μπορούν να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε κλίμακα κοινής ωφέλειας. Οι τύποι συλλεκτών συγκέντρωσης περιλαμβάνουν παραβολικές γούρνες, ηλιακούς πύργους και συστήματα πιάτων, καθένας από τους οποίους προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα ανάλογα με την κλίμακα και τις ενεργειακές απαιτήσεις (Jackson and Green, 2018).

Συλλέκτες Parabolic Trough: Οι παραβολικές γούρνες είναι κυρτές καθρέφτες που εστιάζουν το ηλιακό φως σε έναν σωλήνα δέκτη που εκτείνεται κατά μήκος της εστιακής γραμμής της γούρνας. Αυτό το θερμαινόμενο ρευστό χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού και την κίνηση στροβίλων, καθιστώντας τις παραβολικές γούρνες την πιο ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία CSP (Smith, 2019).

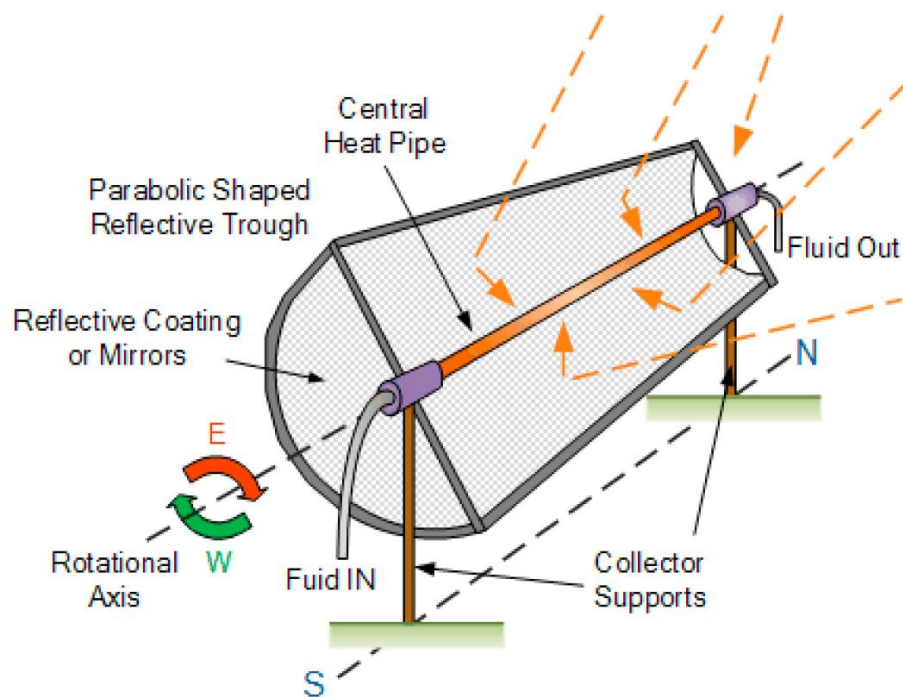


Figure 4. Parabolic Trough Solar Collector Scheme (<https://www.mdpi.com/2076-3417/9/3/463>)

Συστήματα ηλιακών πύργων: Σε ένα σύστημα ηλιακών πύργων, κάτοπτρα που ονομάζονται ηλιοστάτες διατάσσονται γύρω από έναν κεντρικό πύργο για να αντανακλούν το φως του ήλιου σε έναν δέκτη στην κορυφή του πύργου. Αυτό το σύστημα μπορεί να φτάσει σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες, καθιστώντας το κατάλληλο για μεγάλης κλίμακας παραγωγή ενέργειας και βιομηχανικές διεργασίες (Ghosh, 2020).

Παραβολικοί συλλέκτες πιάτων: Οι παραβολικοί συλλέκτες πιάτων αποτελούνται από ένα κατοπτρικό πιάτο που εστιάζει το ηλιακό φως σε έναν μόνο δέκτη στο εστιακό σημείο, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται γενικά σε μικρότερες εφαρμογές ή απομακρυσμένες περιοχές λόγω του αρθρωτού σχεδιασμού τους (Anderson, 2020).

Εφαρμογές και Οφέλη των Ηλιακών Θερμικών Συλλεκτών

Οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από θέρμανση νερού οικιακής χρήσης και θέρμανση χώρων έως παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Για παράδειγμα, οι ηλιακοί θερμοσίφωνες οικιακής χρήσης χρησιμοποιούν επίπεδους συλλέκτες ή σωλήνες εκκένωσης για να παρέχουν στα νοικοκυριά μια ανανεώσιμη πηγή ζεστού νερού, μειώνοντας την ανάγκη για συστήματα θέρμανσης με βάση τα ορυκτά καύσιμα (Jones and White, 2021). Στον βιομηχανικό τομέα, οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ξήρανση, παστερίωση και άλλες διεργασίες που απαιτούν μέτριες έως υψηλές θερμοκρασίες, συμβάλλοντας στη μείωση του ενεργειακού κόστους και των εκπομπών άνθρακα (Smith, 2019).

Ένα από τα κύρια οφέλη των ηλιακών θερμικών συλλεκτών είναι η αποτελεσματικότητά τους στη μετατροπή του ηλιακού φωτός σε χρήσιμη θερμότητα, ειδικά για εφαρμογές που δεν απαιτούν παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, τα ηλιακά θερμικά συστήματα είναι αποτελεσματικά σε περιοχές με υψηλή άμεση ηλιακή ακτινοβολία, όπως οι έρημοι και οι άνυδρες περιοχές, όπου μπορούν να παρέχουν συνεπή και αξιόπιστη παραγωγή ενέργειας (Pérez-Arriaga, 2020). Τα συστήματα συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας, ειδικότερα, έχουν το πλεονέκτημα ότι ενσωματώνουν αποθήκευση θερμικής ενέργειας, επιτρέποντάς τους να παράγουν ενέργεια ακόμη και μετά τη δύση του ηλίου και παρέχοντας πιο σταθερή παροχή ενέργειας από τις διακοπτόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως τα ηλιακά φωτοβολταϊκά και ο άνεμος (Dunn et al., 2019).

Προκλήσεις και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες αντιμετωπίζουν ορισμένες προκλήσεις. Τα συστήματα συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας, για παράδειγμα, απαιτούν το άμεσο ηλιακό φως για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά, περιορίζοντας την αποτελεσματικότητά τους σε συννεφιασμένες περιοχές ή σε εποχιακές περιόδους χαμηλού φωτισμού (Smith and Gupta, 2018). Επιπλέον, οι μονάδες CSP έχουν υψηλό αρχικό κόστος και απαιτούν μεγάλες εκτάσεις γης, οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν περιβαλλοντικές και υλικοτεχνικές προκλήσεις σε ορισμένες τοποθεσίες (Ghosh, 2020). Για οικιακές εφαρμογές, η εγκατάσταση ηλιακών θερμικών συλλεκτών μπορεί επίσης να είναι απαγορευτική από πλευράς κόστους για ορισμένα νοικοκυριά, αν και τα κυβερνητικά κίνητρα και το μειωμένο κόστος βελτιώνουν την προσβασιμότητά τους (Kumar and Srivastava, 2019).

Η μελλοντική έρευνα επικεντρώνεται στη βελτίωση της απόδοσης και της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας των ηλιακών θερμικών συλλεκτών. Καινοτομίες σε υλικά, όπως επιλεκτικές επικαλύψεις που αυξάνουν την απορροφητικότητα και μειώνουν την απώλεια θερμότητας από την ακτινοβολία, διερευνώνται για τη βελτίωση της απόδοσης των συλλεκτών επίπεδης πλάκας και εκκενωμένων σωλήνων (Jackson and Green, 2018). Επιπλέον, η έρευνα σε προηγμένα συστήματα θερμικής αποθήκευσης, όπως τα λιωμένα άλατα στο CSP, στοχεύει στη βελτίωση της αποθήκευσης και της δυνατότητας αποστολής της ηλιακής θερμικής ενέργειας, καθιστώντας την πιο αξιόπιστο στοιχείο του ενεργειακού δικτύου (Jones and White, 2021).

3.2 Τεχνολογίες Αιολικής Ενέργειας

Οι τεχνολογίες αιολικής ενέργειας αξιοποιούν την κινητική ενέργεια του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, προσφέροντας μια καθαρή και ανανεώσιμη εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα. Τα συστήματα αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούν κυρίως **ανεμογεννήτριες** για να μετατρέψουν την κίνηση του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η τεχνολογία έχει εξελιχθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, με τις εξελίξεις στον σχεδιασμό των στροβίλων, τα υλικά και την ενσωμάτωση του δικτύου που ενισχύουν την απόδοση και μειώνουν το κόστος (Smith, 2019). Οι τεχνολογίες αιολικής ενέργειας γενικά

κατηγοριοποιούνται σε **χερσαία** και **υπεράκτια** συστήματα, το καθένα με μοναδικά οφέλη, περιορισμούς και απαιτήσεις σχεδιασμού (Jackson and Green, 2018).

Χερσαίες Τεχνολογίες Αιολικής Ενέργειας

Η χερσαία αιολική ενέργεια αναφέρεται σε ανεμογεννήτριες που εγκαθίστανται στην ξηρά, συνήθως σε περιοχές με σταθερά μοτίβα ανέμου, όπως πεδιάδες, κοιλάδες και παράκτιες περιοχές. Η χερσαία αιολική ενέργεια είναι η πιο κοινή μορφή αιολικής ενέργειας λόγω του χαμηλότερου κόστους και της ευκολότερης εγκατάστασης σε σύγκριση με τα υπεράκτια συστήματα (Ghosh, 2020). Οι σύγχρονες χερσαίες ανεμογεννήτριες είναι συνήθως ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWTs), οι οποίες έχουν πτερύγια που περιστρέφονται γύρω από έναν οριζόντιο άξονα και βλέπουν στον άνεμο για μεγιστοποίηση της απόδοσης. Αυτοί οι στρόβιλοι κυμαίνονται συνήθως σε μέγεθος, με χωρητικότητα μεταξύ 2 και 5 μεγαβάτ (MW) για εφαρμογές σε κλίμακα χρησιμότητας, αν και αναπτύσσονται συνεχώς μεγαλύτερα μοντέλα για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης (Kumar and Srivastava, 2019).

Τα κύρια εξαρτήματα μιας χερσαίας ανεμογεννήτριας περιλαμβάνουν τον **ρότορα (με τα πτερύγια)**, το **κυρίως σώμα**, τη **βάση στήριξης (πύργος)** και την **ουρά**. Τα πτερύγια έχουν σχεδιαστεί για να συλλαμβάνουν την ενέργεια του ανέμου και συνδέονται με έναν κεντρικό κόμβο. Η θήκη φιλοξενεί το κιβώτιο ταχυτήτων και τη γεννήτρια, τα οποία μετατρέπουν την περιστροφική ενέργεια των λεπίδων σε ηλεκτρική ενέργεια (Jones and White, 2021). Ο πύργος ανυψώνει τα πτερύγια σε μεγαλύτερα ύψη, όπου οι ταχύτητες του ανέμου είναι γενικά ισχυρότερες και πιο σταθερές, ενισχύοντας τη συνολική απόδοση του στροβίλου (Anderson, 2020). Οι χερσαίες ανεμογεννήτριες συνήθως ομαδοποιούνται σε συστάδες για να σχηματίσουν αιολικά πάρκα, τα οποία μπορούν να τροφοδοτήσουν με ενέργεια στο δίκτυο για να καλύψουν τοπικές ή περιφερειακές ενεργειακές ανάγκες.

Η τεχνολογία χερσαίας αιολικής ενέργειας έχει το πλεονέκτημα ότι είναι πιο προσιτή και προσιτή από την υπεράκτια αιολική ενέργεια, με απλούστερες απαιτήσεις συντήρησης λόγω της ευκολότερης πρόσβασης. Ωστόσο, τα χερσαία αιολικά πάρκα συχνά υπόκεινται σε δημόσια αντίθεση λόγω θορύβου, οπτικών επιπτώσεων και πιθανών επιπτώσεων στην τοπική άγρια ζωή, ειδικά στα πουλιά και τις νυχτερίδες (Smith and Gupta, 2018). Η αντιμετώπιση αυτών των ανησυχιών οδήγησε σε προόδους σε πιο αθόρυβους σχεδιασμούς στροβίλων, προσεκτική επιλογή τοποθεσίας και εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων για την ελαχιστοποίηση του οικολογικού αποτυπώματος των χερσαίων αιολικών εγκαταστάσεων (Pérez-Arriaga, 2020).

Υπεράκτιες Τεχνολογίες Αιολικής Ενέργειας

Η υπεράκτια αιολική τεχνολογία περιλαμβάνει την ανάπτυξη ανεμογεννητριών σε θαλάσσια περιβάλλοντα, συνήθως κατά μήκος των ακτών ή σε βαθύτερα νερά χρησιμοποιώντας πλωτές πλατφόρμες. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες εκτίθενται σε ισχυρότερους και πιο σταθερούς ανέμους από τις αντίστοιχες τους στην ξηρά, γεγονός που τις καθιστά ικανές να παράγουν περισσότερη ενέργεια. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι γενικά μεγαλύτερες

σε χωρητικότητα, με πολλές τουρμπίνες να ξεπερνούν πλέον τα 10 MW και ορισμένα πρωτότυπα να φτάνουν τα 15 MW, επιτρέποντας στα υπεράκτια αιολικά πάρκα να παράγουν σημαντικές ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας για πυκνοκατοικημένες παράκτιες περιοχές (Rashid, 2019).

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες αντιμετωπίζουν μοναδικές προκλήσεις λόγω του θαλάσσιου περιβάλλοντος τους, συμπεριλαμβανομένης της έκθεσης σε αλμυρό νερό, κύματα και ισχυρούς ανέμους, τα οποία μπορούν να επιταχύνουν τη φθορά. Για να αντέξουν αυτές τις συνθήκες, οι υπεράκτιες τουρμπίνες απαιτούν στιβαρά υλικά και καινοτόμα σχέδια θεμελίωσης. **Τα σταθερά θεμέλια πυθμένα** είναι κοινά σε ρηχά νερά, όπου οι ανεμογεννήτριες αγκυρώνονται απευθείας στον πυθμένα της θάλασσας. Σε βαθύτερα νερά, ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί **πλωτά θεμέλια**, επιτρέποντας σε ανεμογεννήτριες να κατασκευάζονται σε τοποθεσίες με βάθη έως και 1000 μέτρα, επεκτείνοντας σημαντικά το εύρος του υπεράκτιου ανέμου (Jones, 2021).

Οι πλωτές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι μια αξιοσημείωτη πρόοδος στην τεχνολογία αιολικής ενέργειας, ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιοχές με βαθιά παράκτια ύδατα όπου οι εγκαταστάσεις σταθερού πυθμένα δεν είναι πρακτικές. Οι πλωτοί στρόβιλοι είναι αγκυρωμένοι με εύκαμπτα αγκυροβόλια που τους σταθεροποιούν ενώ επιτρέπουν την κίνηση με ωκεάνια ρεύματα και κύματα, καθιστώντας τους κατάλληλους για τοποθεσίες σε βαθιά νερά (Smith, 2019). Αυτά τα πλωτά συστήματα αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο μέλλον της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, καθώς επιτρέπουν σε χώρες με περιορισμένες ρηχές παράκτιες περιοχές να αξιοποιήσουν τους υπεράκτιους αιολικούς πόρους (Jackson and Green, 2018).

Καινοτομίες και Μελλοντικές Κατευθύνσεις στην Τεχνολογία Αιολικής Ενέργειας

Η τεχνολογία αιολικής ενέργειας συνεχίζει να εξελίσσεται, με την έρευνα να επικεντρώνεται στην αύξηση της απόδοσης, στη μείωση του κόστους και στην ενίσχυση της περιβαλλοντικής συμβατότητας. Καινοτομίες όπως **τα μακρύτερα, ελαφρύτερα πτερύγια στροβίλων, οι γεννήτριες άμεσης μετάδοσης κίνησης και οι έξυπνοι στρόβιλοι** συμβάλλουν στην καλύτερη απόδοση και αξιοπιστία. Τα συστήματα άμεσης μετάδοσης εξαλείφουν την ανάγκη για κιβώτια ταχυτήτων, μειώνοντας τη μηχανική πολυπλοκότητα και αυξάνοντας τη μακροζωία των στροβίλων (Ghosh, 2020). Επιπλέον, η τεχνολογία έξυπνων στροβίλων χρησιμοποιεί αισθητήρες και αναλύσεις δεδομένων για την παρακολούθηση των συνθηκών ανέμου, της απόδοσης της τουρμπίνας και των αναγκών συντήρησης σε πραγματικό χρόνο, βελτιστοποιώντας την παραγωγή ενέργειας και μειώνοντας το χρόνο διακοπής λειτουργίας (Dunn et al., 2019).

Όσον αφορά τις περιβαλλοντικές εξελίξεις, καταβάλλονται συνεχείς προσπάθειες για τη μείωση των οικολογικών επιπτώσεων των αιολικών πάρκων. Καινοτομίες όπως συστήματα **αποτροπής για τις νυχτερίδες, πτερύγια μειωμένου θορύβου και φιλικά προς το περιβάλλον κατασκευαστικά υλικά για τις ανεμογεννήτριες** διερευνώνται, με στόχο να καταστήσουν την αιολική ενέργεια πιο συμβατή με την άγρια ζωή και να ελαχιστοποιήσουν

το οικολογικό της αποτύπωμα (Smith and Gupta, 2018). Επιπλέον, καθώς η αιολική ενέργεια επεκτείνεται παγκοσμίως, η ολοκλήρωση του δικτύου και οι λύσεις αποθήκευσης δίνονται προτεραιότητα για την προσαρμογή της μεταβλητής φύσης του ανέμου. Τα υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν τον άνεμο με την ηλιακή ή την αποθήκευση μπαταριών αναπτύσσονται επίσης για να παρέχουν πιο συνεπή παροχή ενέργειας (Kumar and Srivastava, 2019).

3.3 Τεχνολογίες Βιομάζας

Οι τεχνολογίες βιομάζας μετατρέπουν οργανικά υλικά, όπως γεωργικά υπολείμματα, δασικά υποπροϊόντα, ζωικά απόβλητα και ειδικές ενεργειακές καλλιέργειες, σε χρησιμοποιήσιμες μορφές ενέργειας. Αυτές οι τεχνολογίες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρέχοντας εναλλακτικές λύσεις στα ορυκτά καύσιμα για θέρμανση, ηλεκτρική ενέργεια και βιοκαύσιμα, ενώ υποστηρίζουν επίσης τη διαχείριση απορριμμάτων και μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Smith, 2019). Η βιομάζα μπορεί να μετατραπεί μέσω πολλών τεχνολογικών οδών, όπως **η καύση, η αεριοποίηση, η αναερόβια χώνευση και η παραγωγή βιοκαυσίμων**. Κάθε μία από αυτές τις διαδικασίες προσφέρει ξεχωριστά οφέλη και εφαρμογές, από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας έως την τοπική παραγωγή θερμότητας και βιοκαυσίμων (Jackson and Green, 2018).

1. Καύση

Η καύση αποτελεί μία από τις παλαιότερες και πιο διαδεδομένες τεχνολογίες μετατροπής της βιομάζας. Περιλαμβάνει την άμεση καύση του υλικού για την παραγωγή θερμότητας, η οποία μπορεί στη συνέχεια να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή για βιομηχανικές διεργασίες. Στις σύγχρονες εφαρμογές, η καύση βιομάζας πραγματοποιείται σε **λέβητες** που θερμαίνουν το νερό για την παραγωγή ατμού, ο οποίος κινεί έναν στρόβιλο συνδεδεμένο σε μια γεννήτρια, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια (Ghosh, 2020). Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής βιομάζας, οι οποίοι κυμαίνονται σε κλίμακα από μικρά, αποκεντρωμένα συστήματα έως μεγάλες, συνδεδεμένες στο δίκτυο εγκαταστάσεις (Jones and White, 2021).

Ενώ η καύση βιομάζας είναι αποτελεσματική και σχετικά απλή, έχει ορισμένες περιβαλλοντικές εκτιμήσεις. Η παραδοσιακή καύση βιομάζας μπορεί να παράγει ατμοσφαιρικούς ρύπους, συμπεριλαμβανομένων των σωματιδίων και των πτητικών οργανικών ενώσεων, οι οποίες απαιτούν κατάλληλες τεχνολογίες ελέγχου εκπομπών, όπως φίλτρα και πλυντήρια για να πληρούν τα περιβαλλοντικά πρότυπα (Rashid, 2019). Παρά αυτές τις προκλήσεις, η καύση βιομάζας εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της αποτελεσματικότητάς της, ειδικά σε βιομηχανικές εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες (Smith and Gupta, 2018).

2. Αεριοποίηση

Η αεριοποίηση είναι μια θερμοχημική διαδικασία που μετατρέπει τη στερεά βιομάζα σε αέριο καύσιμο, που συχνά αναφέρεται ως **αέριο σύνθεσης** ή **αέριο παραγωγής**, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας, θέρμανση ή περαιτέρω μετατροπή σε συνθετικά καύσιμα. Στην αεριοποίηση, η βιομάζα εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες σε ελεγχόμενο περιβάλλον με περιορισμένο οξυγόνο, με αποτέλεσμα να διασπάται σε μείγμα υδρογόνου, μονοξειδίου του άνθρακα, μεθανίου και άλλων αερίων (Anderson, 2020). Το αέριο σύνθεσης μπορεί να καεί απευθείας σε αεριοστροβίλους ή κινητήρες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή μπορεί να εξευγενιστεί για την παραγωγή βιοκαυσίμων όπως η μεθανόλη και το συνθετικό ντίζελ (Kumar and Srivastava, 2020).

Η αεριοποίηση προσφέρει υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με την καύση και παράγει λιγότερες εκπομπές λόγω των καθαρότερων ιδιοτήτων του αερίου σύνθεσης. Επιπλέον, η τεχνολογία αεριοποίησης είναι προσαρμόσιμη σε διάφορους τύπους βιομάζας, συμπεριλαμβανομένων των γεωργικών υπολειμμάτων, των δασικών αποβλήτων, ακόμη και των αστικών στερεών αποβλήτων, καθιστώντας την ευέλικτη για εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας και απορριμμάτων (Smith, 2019). Ωστόσο, η αεριοποίηση απαιτεί προηγμένη τεχνολογία και υποδομή, η οποία μπορεί να είναι δαπανηρή και να περιορίσει την ανάπτυξή της σε ορισμένες περιοχές (Jackson and Green, 2018).

3. Αναερόβια Χώνευση

Η αναερόβια χώνευση είναι μια βιοχημική διαδικασία που αποσυνθέτει οργανικά υλικά, όπως ζωική κοπριά, υπολείμματα τροφίμων και γεωργικά υπολείμματα, σε περιβάλλον χωρίς οξυγόνο για την παραγωγή **βιοαερίου** - ένα μείγμα που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Αυτή η διαδικασία βασίζεται σε μικροοργανισμούς για τη διάσπαση της βιομάζας, με αποτέλεσμα βιοαέριο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μαγείρεμα, θέρμανση, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή περαιτέρω δύλιση σε βιομεθάνιο, ένα ανανεώσιμο φυσικό αέριο (Ghosh, 2020). Το υπολειπόμενο υλικό από την αναερόβια χώνευση, γνωστό ως χωνεμένο, χρησιμοποιείται συχνά ως λίπασμα πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά, προσθέτοντας αξία στη διαδικασία υποστηρίζοντας τη γεωργική παραγωγικότητα (Jones and White, 2021).

Η αναερόβια χώνευση είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για τη διαχείριση των οργανικών αποβλήτων σε γεωργικές και αστικές περιοχές, μειώνοντας τις εκπομπές μεθανίου που διαφορετικά θα απελευθερώνονταν από τα απόβλητα αποσύνθεσης σε χώρους υγειονομικής ταφής (Smith and Gupta, 2018). Επιπλέον, η παραγωγή βιοαερίου προσφέρει μια αποκεντρωμένη ενεργειακή λύση, υποστηρίζοντας την ηλεκτροδότηση της υπαίθρου και μειώνοντας την εξάρτηση από τα παραδοσιακά καύσιμα. Ωστόσο, τα συστήματα αναερόβιας χώνευσης απαιτούν τακτική συντήρηση και εξειδικευμένη λειτουργία, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει προκλήσεις για εφαρμογές μικρής κλίμακας (Pérez-Arriaga, 2020).

4. Παραγωγή βιοκαυσίμων

Η παραγωγή βιοκαυσίμων από βιομάζα είναι μια σημαντική τεχνολογία στο τοπίο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ειδικά στον τομέα των μεταφορών. Τα βιοκαύσιμα ταξινομούνται γενικά σε **βιοαιθανόλη** και **βιοντίζελ**. Η βιοαιθανόλη παράγεται από σάκχαρα ζύμωσης που βρίσκονται σε καλλιέργειες όπως το καλαμπόκι, το ζαχαροκάλαμο και το σιτάρι, ενώ το βιοντίζελ προέρχεται από έλαια και λίπη μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται **μετεστεροποίηση** (Rashid, 2019). Τόσο η βιοαιθανόλη όσο και το βιοντίζελ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατα ή πρόσθετα στη βενζίνη και το ντίζελ, συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα οχήματα (Smith, 2019).

Τα βιοκαύσιμα δεύτερης γενιάς, τα οποία παράγονται από μη διατροφικές πηγές, όπως η λιγνοκυτταρινική βιομάζα (ξύλο και γεωργικά υπολείμματα) και τα χρησιμοποιημένα λάδια, προσφέρουν μια πιο βιώσιμη εναλλακτική λύση μειώνοντας τον ανταγωνισμό με τους πόρους τροφίμων (Jackson and Green, 2018). Ωστόσο, η παραγωγή βιοκαυσίμων αντιμετωπίζει προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα πρώτης ύλης, τη χρήση γης και την κατανάλωση νερού. Η ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών βιοκαυσίμων, όπως **τα βιοκαύσιμα φυκών** και **η κυτταρινική αιθανόλη**, στοχεύει να ξεπεράσει αυτούς τους περιορισμούς χρησιμοποιώντας ποικίλες πρώτες ύλες και βελτιώνοντας την αποδοτικότητα της παραγωγής (Anderson, 2020).

Πλεονεκτήματα και προκλήσεις των τεχνολογιών βιομάζας

Οι τεχνολογίες βιομάζας προσφέρουν πολυάριθμα οφέλη, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ενέργειας ουδέτερης από άνθρακα, της διαχείρισης απορριμμάτων και της αγροτικής οικονομικής ανάπτυξης. Δεδομένου ότι η βιομάζα απορροφά διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής της, οι καθαρές εκπομπές άνθρακα από την ενέργεια της βιομάζας είναι γενικά χαμηλότερες από αυτές των ορυκτών καυσίμων, ειδικά όταν η βιομάζα προέρχεται από βιώσιμη πηγή (Jones and White, 2021). Επιπλέον, με τη μετατροπή των απορριμμάτων σε ενέργεια, οι τεχνολογίες βιομάζας συμβάλλουν στη μείωση των απορριμμάτων των χωματερών και των εκπομπών μεθανίου, που συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή (Smith and Gupta, 2018).

Ωστόσο, οι τεχνολογίες βιομάζας αντιμετωπίζουν επίσης προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένης της προμήθειας πρώτης ύλης και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η παραγωγή βιομάζας μεγάλης κλίμακας μπορεί να οδηγήσει σε αποψίλωση των δασών, υποβάθμιση του εδάφους και ρύπανση των υδάτων εάν δεν διαχειρίζεται βιώσιμα (Ghosh, 2020). Επιπλέον, η ενεργειακή πυκνότητα της βιομάζας είναι σχετικά χαμηλή σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, απαιτώντας σημαντικούς όγκους πρώτης ύλης και σχετικό κόστος μεταφοράς, το οποίο μπορεί να περιορίσει την οικονομική βιωσιμότητα σε ορισμένες περιοχές (Pérez-Arriaga, 2020). Η πρόοδος στις ενεργειακά αποδοτικές διαδικασίες μετατροπής, καθώς και η ανάπτυξη αποκλειστικών ενεργειακών καλλιεργειών που απαιτούν

λιγότερους πόρους, είναι ουσιαστικής σημασίας για τη μεγιστοποίηση των δυνατοτήτων των τεχνολογιών βιομάζας.

4. Θεωρητικές Βάσεις και Αρχές Ανανεώσιμων Τεχνολογιών

Οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βασίζονται σε θεμελιώδεις επιστημονικές αρχές και θεωρίες που καθοδηγούν τη μετατροπή των φυσικών πηγών ενέργειας σε χρησιμοποιήσιμες μορφές ενέργειας. Αυτά τα θεμέλια περιλαμβάνουν **θερμοδυναμικές αρχές, αποδοτικότητα μετατροπής ενέργειας, ένταξη ανανεώσιμων πηγών στο δίκτυο και λύσεις αποθήκευσης ενέργειας**. Η κατανόηση αυτών των θεωρητικών θεμελίων είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της αποδοτικότητας, της αξιοπιστίας και της βιωσιμότητας των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Smith, 2019).

1. Θερμοδυναμικές Αρχές στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι αρχές της θερμοδυναμικής είναι θεμελιώδεις για τη λειτουργία των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδιαίτερα όσον αφορά τη διατήρηση και τον μετασχηματισμό της ενέργειας. Η θερμοδυναμική, ειδικά οι νόμοι που αφορούν την ενεργειακή μετατροπή, την απόδοση και την εντροπία, διέπουν τον τρόπο με τον οποίο τα ανανεώσιμα συστήματα συλλαμβάνουν και μετατρέπουν τη φυσική ενέργεια (Jackson and Green, 2018). Για παράδειγμα, τα ηλιακά και αιολικά συστήματα βασίζονται στον **πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής** -την αρχή της εξοικονόμησης ενέργειας- για να διασφαλίσουν ότι η ενέργεια που αξιοποιείται από το ηλιακό φως ή τον άνεμο μετατρέπεται αποτελεσματικά σε ηλεκτρική ενέργεια ή θερμότητα με ελάχιστες απώλειες.

Ο **δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής**, ο οποίος δηλώνει ότι οι μετατροπές ενέργειας δεν είναι ποτέ 100% αποδοτικές, παίζει κρίσιμο ρόλο στην κατανόηση των περιορισμών των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για παράδειγμα, στα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα, μόνο ένα μέρος του εισερχόμενου ηλιακού φωτός μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια λόγω εγγενών απωλειών στη διαδικασία μετατροπής (Ghosh, 2020). Αυτή η αρχή οδηγεί την έρευνα σε υλικά και σχέδια που μπορούν να μειώσουν αυτές τις απώλειες και να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση του συστήματος.

2. Αποδοτικότητα Μετατροπής Ενέργειας

Η απόδοση της ενεργειακής μετατροπής αποτελεί βασικό μέτρο για την αξιολόγηση και τη βελτιστοποίηση των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η απόδοση αναφέρεται στην αναλογία της παραγωγής χρήσιμης ενέργειας προς τη συνολική εισροή ενέργειας. Η βελτίωση της απόδοσης είναι ζωτικής σημασίας για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης από τους φυσικούς πόρους και τη μείωση του κόστους (Jones and White, 2021). Κάθε τύπος ανανεώσιμης ενέργειας έχει μοναδικές προκλήσεις απόδοσης. Για παράδειγμα, η απόδοση των **ηλιακών φωτοβολταϊκών (PV) πάνελ** επηρεάζεται από παράγοντες όπως το υλικό που χρησιμοποιείται στα πάνελ (π.χ. μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό πυρίτιο) και την

ποσότητα του ηλιακού φωτός που λαμβάνεται. Τα τρέχοντα εμπορικά φωτοβολταϊκά συστήματα συνήθως επιτυγχάνουν αποδόσεις μεταξύ 15% και 20%, αν και εξερευνώνται προηγμένα υλικά όπως οι περοβσκίτες για να ενισχύσουν περαιτέρω την απόδοση (Anderson, 2020).

Στην αιολική ενέργεια, η απόδοση διέπεται από το **νόμο του Betz**, ο οποίος δηλώνει ότι μια ανεμογεννήτρια μπορεί να συλλάβει το πολύ 59,3% της κινητικής ενέργειας από τον άνεμο. Ενώ κανένας στρόβιλος δεν μπορεί να επιτύχει αυτό το θεωρητικό όριο λόγω πρακτικών απωλειών, οι τεχνητοί στρόβιλοι έχουν σχεδιαστεί για να συλλαμβάνουν όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια βελτιστοποιώντας το σχεδιασμό των πτερυγίων και το ύψος του στροβίλου (Smith and Gupta, 2018). Στην υδροηλεκτρική ενέργεια, η απόδοση μετατροπής είναι συχνά υψηλή και κυμαίνεται από 70% έως 90%, λόγω της μηχανικής απλότητας των υδροηλεκτρικών στροβίλων και της άμεσης μεταφοράς κινητικής ενέργειας από το νερό στα πτερύγια του στροβίλου (Rashid, 2019).

3. Ένταξη Ανανεώσιμων Πηγών σε Ενεργειακά Δίκτυα

Μία από τις βασικές προκλήσεις στα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η ενσωμάτωσή τους στα υπάρχοντα ενεργειακά δίκτυα. Οι ανανεώσιμες πηγές όπως ο ήλιος και ο άνεμος είναι εγγενώς μεταβλητές, που σημαίνει ότι εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες και την ώρα της ημέρας, καθιστώντας τις λιγότερο προβλέψιμες από τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα ή τις πηγές πυρηνικής ενέργειας. Αυτή η διακοπή απαιτεί στρατηγικές για τη διατήρηση της σταθερότητας του δικτύου, η οποία περιλαμβάνει την εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης σε πραγματικό χρόνο (Kumar and Srivastava, 2020).

Η ενοποίηση του δικτύου απαιτεί τεχνολογίες όπως **έξυπνα δίκτυα** και **συστήματα απόκρισης ζήτησης**, τα οποία μπορούν να προσαρμόσουν τα πρότυπα χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τη διαθεσιμότητα. Τα έξυπνα δίκτυα χρησιμοποιούν αισθητήρες, αναλύσεις δεδομένων και επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ροής ενέργειας, βοηθώντας τις επιχειρήσεις κοινής ωφελείας να διαχειρίζονται τις διακυμάνσεις στον εφοδιασμό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επιπλέον, **οι καταναεμημένοι ενεργειακοί πόροι (DERs)**, συμπεριλαμβανομένων των ηλιακών συλλεκτών ταράτσας και των μικρών ανεμογεννητριών, συμβάλλουν ολοένα και περισσότερο στη σταθερότητα του δικτύου αποκεντρώνοντας την παραγωγή ενέργειας και μειώνοντας τη ζήτηση σε κεντρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας (Jones, 2021).

4. Αποθήκευτικές Λύσεις Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Η αποθήκευση ενέργειας είναι ένα κρίσιμο συστατικό των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς αντιμετωπίζει τη μεταβλητότητα και τη διαλείπουσα ροή πηγών όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια. Οι αποτελεσματικές λύσεις αποθήκευσης επιτρέπουν την εξοικονόμηση της περίσσειας ενέργειας που παράγεται κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής παραγωγής για μελλοντική χρήση, διασφαλίζοντας σταθερό ανεφοδιασμό ακόμη και όταν η παραγωγή πέφτει (Smith, 2019). Οι κοινές τεχνολογίες αποθήκευσης

περιλαμβάνουν **μπαταρίες, αντλούμενη υδροηλεκτρική αποθήκευση και θερμική αποθήκευση.**

Αποθήκευση μπαταριών: Ιδιαίτερα οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, έχουν σημειώσει ραγδαίες εξελίξεις τα τελευταία χρόνια, καθιστώντας τα όλο και πιο δημοφιλή επιλογή τόσο για οικιακές όσο και για εφαρμογές σε κλίμακα δικτύου. Τα συστήματα μπαταριών μπορούν να ανταποκριθούν γρήγορα στις διακυμάνσεις της προσφοράς και της ζήτησης, παρέχοντας ευελιξία και αξιοπιστία (Pérez-Arriaga, 2020). **Η αντλούμενη υδρο αποθήκευση (PHS)** είναι μια άλλη ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος, ιδιαίτερα κατάλληλη για ανάγκες αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας. Τα συστήματα PHS λειτουργούν αντλώντας νερό σε μια υπερυψωμένη δεξαμενή κατά τη διάρκεια περιόδων υπερβολικής παραγωγής, και στη συνέχεια απελευθερώνοντάς το μέσω στροβίλων για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια κατά τη ζήτηση αιχμής (Dunn et al., 2019).

Μια άλλη αναδυόμενη λύση είναι **η αποθήκευση θερμικής ενέργειας**, όπου η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια από τον ήλιο ή τον άνεμο χρησιμοποιείται για τη θέρμανση ενός μέσου όπως το λιωμένο αλάτι, το οποίο διατηρεί τη θερμότητα για παρατεταμένες περιόδους. Αυτή η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή την παροχή θέρμανσης όταν χρειάζεται. Η θερμική αποθήκευση είναι ιδιαίτερα συμβατή με μονάδες συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας (CSP), όπου επεκτείνει τις ώρες λειτουργίας της μονάδας πέρα από το φως της ημέρας (Ghosh, 2020).

5. Περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

5.1 Περιβαλλοντικά Οφέλη και Προκλήσεις

Οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προσφέρουν σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη σε σύγκριση με τα συστήματα που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, συμπεριλαμβανομένων των μειώσεων των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, της ρύπανσης του αέρα και των υδάτων και της εξάρτησης από πεπερασμένους πόρους. Ωστόσο, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρουσιάζουν επίσης ορισμένες περιβαλλοντικές προκλήσεις, όπως η εκτενής χρήση γης, στα οικοσυστήματα και στην κατανάλωση πόρων κατά την κατασκευή. Η κατανόηση αυτών των πλεονεκτημάτων και προκλήσεων είναι απαραίτητη για την προώθηση στρατηγικών βιώσιμης ενέργειας και την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των ανανεώσιμων τεχνολογιών (Smith, 2019).

Περιβαλλοντικά Οφέλη από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά οφέλη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η δυνατότητα μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία απελευθερώνουν μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και άλλων αερίων θερμοκηπίου (GHGs) όταν καίγονται, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

παράγουν ενέργεια με ελάχιστες ή μηδενικές άμεσες εκπομπές (Jackson and Green, 2018). Αυτό καθιστά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κεντρική στις παγκόσμιες προσπάθειες για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και την επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας του Παρισιού, η οποία επιδιώκει να περιορίσει την υπερθέρμανση του πλανήτη σε πολύ κάτω από τους 2°C (Anderson, 2020). Για παράδειγμα, η αιολική και η ηλιακή ενέργεια δεν παράγουν άμεσες εκπομπές και οι μελέτες εκτιμούν ότι μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές CO₂ κατά πάνω από 90% σε σύγκριση με την ενέργεια με καύση άνθρακα (Ghosh, 2020). Η υδροηλεκτρική ενέργεια και η γεωθερμία έχουν επίσης σχετικά χαμηλά προφίλ εκπομπών, αν και μπορεί να απελευθερώσουν μικρές ποσότητες CO₂ και μεθανίου ανάλογα με τους συγκεκριμένους παράγοντες της τοποθεσίας (Jones and White, 2021).

Εκτός από τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συμβάλλουν στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, η οποία έχει σημαντικά οφέλη για την υγεία και το περιβάλλον. Η καύση ορυκτών καυσίμων απελευθερώνει ατμοσφαιρικούς ρύπους όπως το διοξείδιο του θείου (SO₂), τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και τα σωματίδια (PM), τα οποία συμβάλλουν σε αναπνευστικά προβλήματα, καρδιαγγειακές παθήσεις και άλλα θέματα υγείας (Smith and Gupta, 2018). Οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αντίθετα, γενικά δεν παράγουν αυτούς τους ρύπους, με αποτέλεσμα καθαρότερο αέρα και πιο υγιεινό περιβάλλον. Μια στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στις αστικές περιοχές θα μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα του αέρα και να μειώσει το κόστος υγειονομικής περίθαλψης που σχετίζεται με ασθένειες που σχετίζονται με τη ρύπανση (Pérez-Arriaga, 2020).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συμβάλλουν επίσης στη **μείωση κατανάλωσης νερού και στην επαναχρησιμοποίησή του**. Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα, ιδιαίτερα ο άνθρακας και οι πυρηνικές εγκαταστάσεις, απαιτούν μεγάλες ποσότητες νερού για ψύξη, συμβάλλοντας στη λειψυδρία και επηρεάζοντας τους τοπικούς υδάτινους πόρους. Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά, ο άνεμος και ορισμένοι τύποι γεωθερμικής ενέργειας απαιτούν ελάχιστο έως καθόλου νερό για λειτουργία, γεγονός που τα καθιστά πλεονεκτικά για περιοχές που αντιμετωπίζουν υδατικό στρες (Dunn et al., 2019). Η υδροηλεκτρική ενέργεια, ενώ είναι έντασης νερού, μπορεί να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος υιοθετώντας βιώσιμες πρακτικές ταμιευτήρων και εστιάζοντας σε συστήματα ροής του ποταμού, τα οποία δεν απαιτούν μεγάλες δεξαμενές (Rashid, 2019).

Περιβαλλοντικές Προκλήσεις Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Παρά τα οφέλη της, η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρουσιάζει ορισμένες περιβαλλοντικές προκλήσεις, ιδιαίτερα που σχετίζονται με τη χρήση της γης και τις επιπτώσεις στο οικοσύστημα. Τα μεγάλης κλίμακας έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας απαιτούν μεγάλες εκτάσεις γης, τα οποία έχουν ως συνέπεια την απώλεια οικοτόπων και κατακερματισμό. Για παράδειγμα, τα ηλιακά πάρκα και τα αιολικά πάρκα κλίμακας χρησιμότητας καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις γης και μπορεί να διαταράξουν τα τοπικά οικοσυστήματα, ιδιαίτερα όταν βρίσκονται σε ευαίσθητα ενδιαιτήματα (Ghosh, 2020). Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, ενώ μειώνουν τη χρήση της ξηράς γης, μπορούν να επηρεάσουν

τη θαλάσσια ζωή μέσω της ηχορύπανσης και των αλλαγών στα υδάτινα ρεύματα, που μπορεί να επηρεάσουν τους πληθυσμούς των ψαριών και τα μεταναστευτικά πρότυπα (Smith, 2019).

Μια άλλη περιβαλλοντική παράμετρος είναι η διαδικασία παραγωγής με ένταση πόρων για ορισμένες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα ηλιακά πάνελ, οι ανεμογεννήτριες και οι μπαταρίες απαιτούν υλικά όπως μέταλλα σπάνιων γαιών, λίθιο και κοβάλτιο, τα οποία συχνά προέρχονται από πρακτικές εξόρυξης που διαταράσσουν το περιβάλλον. Αυτά τα υλικά είναι πεπερασμένα και απαιτούν προσεκτική διαχείριση για να διασφαλιστεί η βιώσιμη εξόρυξη και να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εξορυκτικών δραστηριοτήτων (Jackson and Green, 2018). Η ανακύκλωση και η ανάπτυξη εναλλακτικών υλικών εμφανίζονται ως λύσεις για τη μείωση της εξάρτησης από αυτά τα κρίσιμα υλικά, αλλά η τρέχουσα υποδομή για την ανακύκλωση εξαρτημάτων ανανεώσιμης ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά πάνελ και τα πτερύγια των ανεμογεννητριών, είναι ακόμα περιορισμένη (Jones and White, 2021).

Η απόρριψη εξοπλισμού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο τέλος του κύκλου ζωής του αποτελεί επίσης μια αυξανόμενη ανησυχία. Για παράδειγμα, τα ηλιακά πάνελ έχουν μέση διάρκεια ζωής 25-30 χρόνια και η ταχεία επέκταση των ηλιακών εγκαταστάσεων θα οδηγήσει σε σημαντικά απόβλητα καθώς τα πάνελ φτάνουν στο τέλος της χρήσης τους (Kumar and Srivastava, 2020). Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών είναι δύσκολο να ανακυκλωθούν λόγω των σύνθετων υλικών τους, οδηγώντας σε ανησυχίες σχετικά με τα απόβλητα των χωματερών (Anderson, 2020). Η ανάπτυξη βιώσιμων μεθόδων ανακύκλωσης και η καθιέρωση πρακτικών κυκλικής οικονομίας είναι ζωτικής σημασίας για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων και την ελαχιστοποίηση του μακροπρόθεσμου περιβαλλοντικού αποτυπώματος των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Smith and Gupta, 2018).

5.2 Κοινωνικές Επιπτώσεις

Η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει βαθιές κοινωνικές επιπτώσεις, επηρεάζοντας την απασχόληση, την πρόσβαση στην ενέργεια, τη δυναμική της κοινότητας και τα αποτελέσματα της υγείας. Καθώς οι χώρες μεταβαίνουν από τα ορυκτά καύσιμα στις ανανεώσιμες πηγές, οι κοινωνικές διαστάσεις των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γίνονται όλο και πιο σημαντικές στην κατανόηση, καθώς διαμορφώνουν τη ζωή ατόμων, κοινοτήτων και ολόκληρων περιοχών. Ενώ οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συχνά παρέχουν θετικά κοινωνικά οφέλη, όπως δημιουργία θέσεων εργασίας, βελτιωμένη υγεία και ενεργειακή ανεξαρτησία, παρουσιάζει επίσης προκλήσεις που σχετίζονται με την κοινωνική αποδοχή, τις συγκρούσεις χρήσης γης και τις οικονομικές ανισότητες (Smith, 2019).

Δημιουργία θέσεων εργασίας και οικονομικές ευκαιρίες

Μία από τις σημαντικότερες κοινωνικές επιπτώσεις των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η δημιουργία θέσεων εργασίας. Ο τομέας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει γίνει μια από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες πηγές απασχόλησης παγκοσμίως, με εκατομμύρια

θέσεις εργασίας που δημιουργούνται στους τομείς της ηλιακής ενέργειας, της αιολικής ενέργειας, της βιοενέργειας και της υδροηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA), οι θέσεις εργασίας στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ξεπέρασαν τα 11 εκατομμύρια παγκοσμίως το 2020, με τις προβλέψεις να δείχνουν ότι ο αριθμός αυτός θα μπορούσε να ανέλθει σε πάνω από 40 εκατομμύρια έως το 2050, εάν συνεχιστούν οι τρέχουσες τάσεις ανάπτυξης (Jackson and Green, 2018). Αυτές οι εργασίες κυμαίνονται από την κατασκευή και την εγκατάσταση έως τη λειτουργία και τη συντήρηση, δημιουργώντας οικονομικές ευκαιρίες τόσο στις αστικές όσο και στις αγροτικές περιοχές (Anderson, 2020).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συμβάλλουν επίσης στις τοπικές οικονομίες ενισχύοντας νέες βιομηχανίες και υποστηρίζοντας την περιφερειακή ανάπτυξη. Για παράδειγμα, οι αγροτικές κοινότητες με πρόσβαση σε αιολικούς, ηλιακούς πόρους ή βιομάζα έχουν τη δυνατότητα να προσελκύσουν επενδύσεις και να αυξήσουν τα τοπικά έσοδα. Τα κοινοτικά ενεργειακά έργα, όπου οι ντόπιοι έχουν οικονομικό μερίδιο σε εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έχουν αναδειχθεί ως μοντέλο για την προώθηση της κοινοτικής δέσμευσης και της οικονομικής ενδυνάμωσης (Kumar and Srivastava, 2020). Σε πολλές περιπτώσεις, αυτά τα έργα παρέχουν στις κοινότητες μια άμεση πηγή εισοδήματος ενώ ενισχύουν την κοινωνική συνοχή και την ενεργειακή ανεξαρτησία (Jones and White, 2021).

Βελτιωμένη πρόσβαση σε ενέργεια και ποιότητα ζωής

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν μετασχηματιστική επίδραση στην πρόσβαση στην ενέργεια, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες και υποεξυπηρετούμενες περιοχές όπου η παραδοσιακή επέκταση του δικτύου είναι δαπανηρή ή μη πρακτική. Τα ανανεώσιμα συστήματα εκτός δικτύου, όπως τα ηλιακά οικιακά συστήματα και η μικρο-υδροηλεκτρική ενέργεια, επέτρεψαν σε εκατομμύρια ανθρώπους να έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια για πρώτη φορά, υποστηρίζοντας την εκπαίδευση, την υγειονομική περίθαλψη και τις οικονομικές δραστηριότητες (Pérez-Arriaga, 2020). Στην υποσαχάρια Αφρική, για παράδειγμα, τα μικροδίκτυα που λειτουργούν με ηλιακή ενέργεια έχουν γίνει απαραίτητα για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις αγροτικές περιοχές, μειώνοντας την εξάρτηση από την κηροζίνη και βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής (Smith and Gupta, 2018). Η πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια δίνει τη δυνατότητα στα νοικοκυριά να φωτίζουν τα σπίτια τους, να τροφοδοτούν μικρές συσκευές και να συμμετέχουν σε παραγωγικές δραστηριότητες, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση της φτώχειας και στην κοινωνική ανάπτυξη.

Εκτός από τη βελτίωση της πρόσβασης σε ενέργεια, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα των τοπικών κοινωνιών. Τα αποκεντρωμένα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρέχουν ενεργειακή ανεξαρτησία και μειώνουν την ευπάθεια στις διακυμάνσεις των τιμών και τις διακοπές εφοδιασμού που σχετίζονται με τις εισαγωγές ορυκτών καυσίμων. Αυτή η ανθεκτικότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική για απομακρυσμένες ή νησιωτικές κοινότητες που μπορεί να αντιμετωπίζουν συχνές ελλείψεις καυσίμων (Ghosh, 2020).

Υγεία και Περιβαλλοντικά Οφέλη

Η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει αξιοσημείωτα οφέλη για την υγεία λόγω της μείωσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από ορυκτά καύσιμα. Η καύση άνθρακα, πετρελαίου και αερίου απελευθερώνει ρύπους όπως σωματίδια, διοξείδιο του θείου και οξείδια του αζώτου, τα οποία συνδέονται με αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις. Η μετάβαση σε καθαρές πηγές ενέργειας, όπως ο άνεμος και η ηλιακή, βελτιώνει την ποιότητα του αέρα και μειώνει τη συχνότητα εμφάνισης προβλημάτων υγείας που σχετίζονται με τη ρύπανση, ιδιαίτερα σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές (Jackson and Green, 2018). Οι βελτιώσεις στην υγεία λόγω της υιοθέτησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορούν να μειώσουν το κόστος υγειονομικής περίθαλψης και να βελτιώσουν τη συνολική ευημερία, ειδικά μεταξύ των ευάλωτων πληθυσμών (Rashid, 2019).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προσφέρουν επίσης έμμεσα οφέλη για την υγεία μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, που συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή. Οι επιπτώσεις που σχετίζονται με το κλίμα, συμπεριλαμβανομένων των κυμάτων καύσωνα, των ακραίων καιρικών φαινομένων και της επισιτιστικής ανασφάλειας, ενέχουν κινδύνους για την υγεία παγκοσμίως. Με τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συμβάλλουν στην προστασία της δημόσιας υγείας σε παγκόσμια κλίμακα (Dunn et al., 2019).

Κοινωνική Αποδοχή και Κοινοτική Δέσμευση

Παρά τα πολλά οφέλη, τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να αντιμετωπίσουν αντίσταση από τις τοπικές κοινότητες, ιδιαίτερα όταν οι εγκαταστάσεις επηρεάζουν τη χρήση γης ή τα τοπικά οικοσυστήματα. Τα αιολικά πάρκα, για παράδειγμα, μερικές φορές αντιτίθενται λόγω ανησυχιών σχετικά με τον θόρυβο, τις οπτικές επιπτώσεις και τις επιπτώσεις στην τοπική άγρια ζωή. Τα ηλιακά πάρκα και τα έργα υδροηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αντιμετωπίσουν αντιδράσεις εάν απαιτούν μεγάλες εκτάσεις γης ή διαταράσσουν τις παραδοσιακές πρακτικές χρήσης γης (Smith, 2019). Η διασφάλιση της διαβούλευσης και της συμμετοχής των τοπικών κοινοτήτων στον σχεδιασμό του έργου είναι απαραίτητη για την απόκτηση κοινωνικής αποδοχής και την αποφυγή συγκρούσεων. Η κοινοτική δέσμευση, η διαφάνεια και η δίκαιη αποζημίωση για τη χρήση γης είναι αποτελεσματικές στρατηγικές για την ενίσχυση της αποδοχής και την αντιμετώπιση των ανησυχιών (Kumar and Srivastava, 2020).

Αντιμετώπιση Οικονομικών Ανισοτήτων

Η μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορεί επίσης να επιδεινώσει τις οικονομικές ανισότητες εάν δεν αντιμετωπιστεί δίκαια. Ενώ οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δημιουργούν θέσεις εργασίας και οικονομικές ευκαιρίες, οι περιφέρειες και τα άτομα που εξαρτώνται από τις βιομηχανίες ορυκτών καυσίμων ενδέχεται να αντιμετωπίσουν απώλειες θέσεων εργασίας και οικονομικές δυσκολίες (Jones and White, 2021). Οι πολιτικές δίκαιης μετάβασης, που περιλαμβάνουν προγράμματα επανεκπαίδευσης, οικονομική διαφοροποίηση και υποστήριξη για εργαζομένους και κοινότητες που πλήττονται από τη

σταδιακή κατάργηση των ορυκτών καυσίμων, είναι κρίσιμες για να διασφαλιστεί ότι τα οφέλη από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μοιράζονται ευρέως και δεν αφήνουν πίσω τους ευάλωτους πληθυσμούς (Smith και Gupta , 2018).

6. Κανονισμοί ΕΕ και Ελλάδος για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Τεχνολογίες

6.1 Επισκόπηση των οδηγιών και πολιτικών της ΕΕ για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

6.1.1 Στόχοι για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών

Ως απάντηση στην κλιματική αλλαγή και την ανάγκη για βιώσιμη ανάπτυξη, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) και άλλες παγκόσμιες περιοχές έχουν θέσει φιλόδοξους στόχους για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG). Αυτοί οι στόχοι έχουν σχεδιαστεί για να μετριάσουν τις κλιματικές επιπτώσεις, να ενισχύσουν την ενεργειακή ασφάλεια και να ενισχύσουν την οικονομική ανθεκτικότητα. Θέτοντας σαφείς στόχους, η ΕΕ στοχεύει στη μετάβαση από ένα ενεργειακό σύστημα που εξαρτάται από ορυκτά καύσιμα σε ένα που τροφοδοτείται κυρίως από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ευθυγραμμίζοντας έτσι με τις δεσμεύσεις που περιγράφονται στη Συμφωνία του Παρισιού και σε διάφορα εθνικά και διεθνή πλαίσια (Smith, 2019).

Στόχοι της ΕΕ για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η ΕΕ έχει θέσει μια σειρά προοδευτικά φιλόδοξων στόχων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην προσπάθειά της να γίνει κλιματικά ουδέτερη έως το 2050. Σύμφωνα με την Οδηγία για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (RED II), η ΕΕ έθεσε ως στόχο την προμήθεια του 32% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές έως το 2030, με συζητήσεις σε εξέλιξη για την αύξηση αυτού του στόχου στο 40% (Jackson and Green, 2018). Αυτή η οδηγία απαιτεί από κάθε κράτος μέλος της ΕΕ να αναπτύξει ένα εθνικό σχέδιο για την ενέργεια και το κλίμα (NECP) που περιγράφει συγκεκριμένες στρατηγικές για την επίτευξη των στόχων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, διασφαλίζοντας ότι όλες οι χώρες συμβάλλουν στους συλλογικούς στόχους (Anderson, 2020).

Αυτοί οι στόχοι κατανέμονται σε επιμέρους τομείς, με συγκεκριμένες επιδιώξεις για την ηλεκτρική ενέργεια, τη θέρμανση και ψύξη, καθώς και τις μεταφορές. Για παράδειγμα, η ΕΕ έχει θέσει ως στόχο την επίτευξη τουλάχιστον μεριδίου 14% της ανανεώσιμης ενέργειας στον τομέα των μεταφορών έως το 2030, προωθώντας τη χρήση βιοκαυσίμων, ηλεκτρικών οχημάτων και άλλων εναλλακτικών λύσεων χαμηλών εκπομπών (Ghosh, 2020). Ο τομέας της ηλεκτρικής ενέργειας, με υψηλές δυνατότητες για αιολική, ηλιακή και υδροηλεκτρική ενέργεια, αναμένεται να επιτύχει ακόμη υψηλότερα μερίδια ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, υποστηρίζοντας την απαλλαγή από τον άνθρακα της κατανάλωσης ενέργειας τόσο σε οικιακή όσο και σε βιομηχανική χρήση (Jones and White, 2021).

Εκτός από τον καθορισμό στόχων για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η ΕΕ έχει εφαρμόσει τον «κανονισμό καταμερισμού της προσπάθειας», ο οποίος κατανέμει την ευθύνη για τη μείωση των εκπομπών μεταξύ των κρατών μελών με βάση την οικονομική τους ικανότητα. Οι πιο πλούσιες χώρες έχουν υψηλότερους στόχους, ενώ οι λιγότερο πλούσιες χώρες έχουν πιο μετριοπαθείς στόχους, δημιουργώντας μια δίκαιη κατανομή ευθυνών σε ολόκληρη την ένωση (Pérez-Arriaga, 2020). Αυτή η προσέγγιση ενθαρρύνει τις προσπάθειες συνεργασίας μεταξύ των κρατών μελών, παρέχοντας ευελιξία και κοινή ευθύνη.

Στόχοι μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

Οι στόχοι της ΕΕ για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου είναι στενά ευθυγραμμισμένοι με τους στόχους της για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ο Ευρωπαϊκός Νόμος για το Κλίμα, που εγκρίθηκε το 2021, δεσμεύει νομικά την ΕΕ σε μείωση κατά 55% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έως το 2030, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, και καθορίζει έναν οδικό χάρτη για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050 (Smith and Gupta, 2018). Αυτοί οι φιλόδοξοι στόχοι είναι κεντρικοί για την Πράσινη Συμφωνία της ΕΕ, η οποία στοχεύει να κάνει την Ευρώπη την πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρο στον κόσμο.

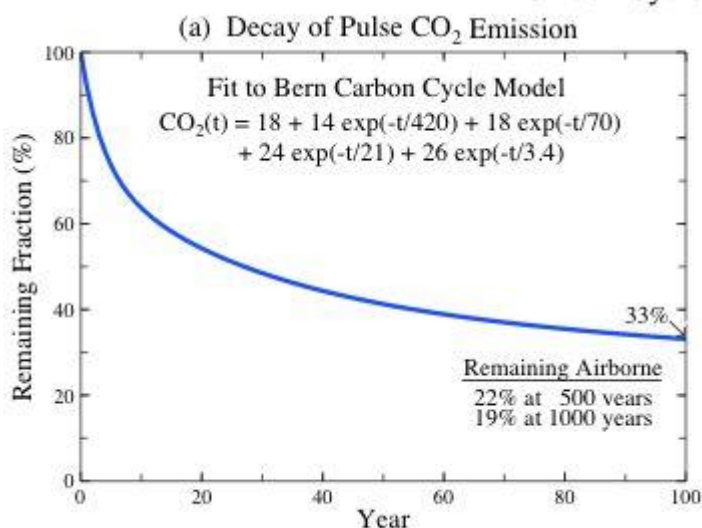


Figure 5. Ρυθμός μείωσης CO₂ (<http://theoildrum.com/node/2559>)

Για την επίτευξη αυτών των στόχων, η ΕΕ έχει εισαγάγει αρκετούς ρυθμιστικούς μηχανισμούς. Ένα από τα πιο αξιοσημείωτα είναι το **σύστημα εμπορίας εκπομπών της ΕΕ (EU ETS)**, το οποίο εφαρμόζει ένα μοντέλο ανώτατου ορίου και εμπορίου για τον περιορισμό των εκπομπών από τομείς υψηλών εκπομπών όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η αεροπορία και η βαριά βιομηχανία. Το EU ETS θέτει ανώτατο όριο στις συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και επιτρέπει στις εταιρείες να αγοράζουν ή να πωλούν δικαιώματα εκπομπής, θέτοντας ουσιαστικά μια τιμή στον άνθρακα και δίνοντας κίνητρα για μειώσεις στις εκπομπές (Dunn et al., 2019). Με τη σταδιακή μείωση του ανώτατου ορίου, η ΕΕ στοχεύει να οδηγήσει σε συνεχείς μειώσεις εκπομπών, ενώ παράγει

έσοδα για τη χρηματοδότηση έργων ανανεώσιμης ενέργειας και προσαρμογής στο κλίμα (Rashid, 2019).

Πέρα από το EU ETS, η ΕΕ έχει επίσης θεσπίσει πολιτικές για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, με στόχο τη βελτίωση κατά 32,5% έως το 2030, η οποία συμπληρώνει τους στόχους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μειώνοντας τη συνολική ζήτηση ενέργειας (Jones, 2021). Τα μέτρα ενεργειακής απόδοσης, όπως η μετασκευή κτιρίων, υποστηρίζουν τη μετάβαση στην ανανεώσιμη ενέργεια μειώνοντας την ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την κάλυψη της ζήτησης, καθιστώντας ευκολότερη την επίτευξη υψηλότερου μεριδίου ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα.

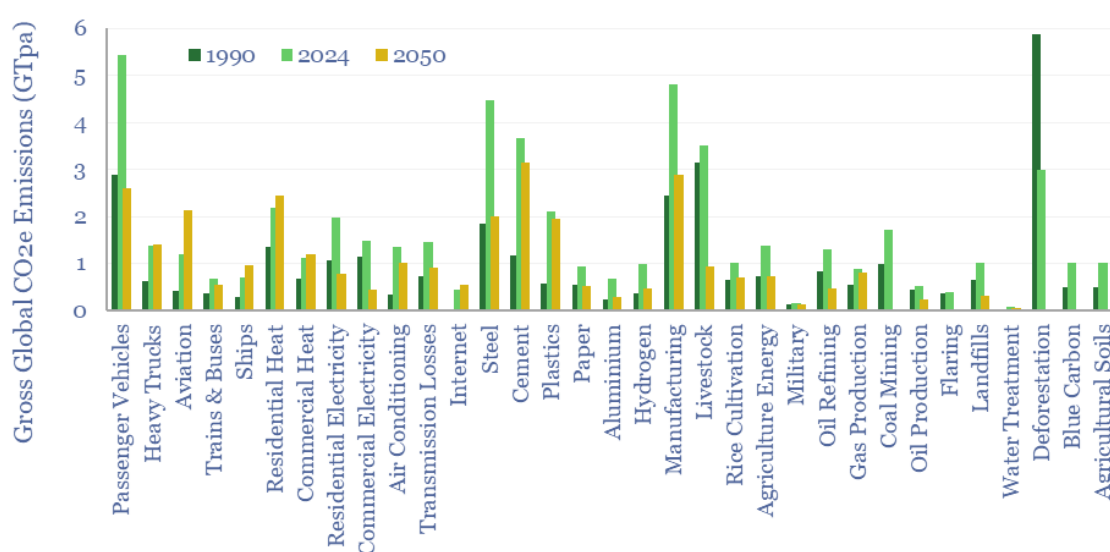


Figure 6. Μέση Παγκόσμια εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα CO₂
(<https://thundersaidenergy.com/downloads/breakdown-of-global-co2-emissions/>)

Προκλήσεις και Πρόοδος

Ενώ οι στόχοι της ΕΕ για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών είναι από τους πιο φιλόδοξους παγκοσμίως, η επίτευξη αυτών των στόχων παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες. Η μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές, όπως έξυπνα δίκτυα και λύσεις αποθήκευσης, για να προσαρμοστεί η μεταβλητότητα των ανανεώσιμων πηγών όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια (Smith, 2019). Επιπλέον, ορισμένα κράτη μέλη με υψηλά επίπεδα εξάρτησης από τον άνθρακα αντιμετωπίζουν οικονομικές και κοινωνικές προκλήσεις στη σταδιακή κατάργηση των ορυκτών καυσίμων, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η εξόρυξη άνθρακα αποτελεί σημαντική πηγή απασχόλησης (Jackson and Green, 2018).

Παρά τις προκλήσεις αυτές, η ΕΕ έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο προς την επίτευξη των στόχων της για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Μέχρι το 2020, η ΕΕ είχε ήδη ξεπεράσει τον αρχικό της στόχο για 20% ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα, σε μεγάλο βαθμό λόγω της σημαντικής αύξησης της αιολικής και ηλιακής δυναμικότητας (Ghosh, 2020). Χώρες όπως η Γερμανία, η Δανία και η Ισπανία έχουν πρωτοστατήσει στην

υιοθέτηση της ανανεώσιμης ενέργειας, με την αιολική και την ηλιακή ενέργεια να παρέχουν πλέον σημαντικό μερίδιο ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτά τα έθνη (Anderson, 2020). Αυτές οι επιτυχίες καταδεικνύουν τη σκοπιμότητα της μεγάλης κλίμακας ανάπτυξης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αποτελούν παράδειγμα για άλλες περιοχές που επιδιώκουν να επιταχύνουν τις δικές τους ενεργειακές μεταβάσεις.

6.1.2 Πράσινη Συμφωνία της ΕΕ και Πακέτο Καθαρής Ενέργειας

Η Πράσινη Συμφωνία και το Πακέτο Καθαρής Ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι ολοκληρωμένα πλαίσια που στοχεύουν στην επίτευξη μιας κλιματικά ουδέτερης Ευρώπης έως το 2050. Αυτές οι πρωτοβουλίες υπογραμμίζουν τη δέσμευση της ΕΕ για μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG), αύξηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και προώθηση της ενεργειακής απόδοσης. Η Πράσινη Συμφωνία χρησιμεύει ως στρατηγικό όραμα για τη μετάβαση σε μια βιώσιμη οικονομία, ενώ το πακέτο για την καθαρή ενέργεια παρέχει ένα σύνολο ρυθμιστικών μεταρρυθμίσεων ειδικά σχεδιασμένων για την επιτάχυνση της ενεργειακής μετάβασης στα κράτη μέλη της ΕΕ (Smith, 2019).

Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία: Ένα γενικό όραμα

Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, που εισήχθη το 2019, είναι ένας οδικός χάρτης για τη μετατροπή της οικονομίας της ΕΕ σε βιώσιμη και κλιματικά ουδέτερη έως το 2050. Αυτό το φιλόδοξο πλαίσιο περιλαμβάνει μια σειρά από τομείς πολιτικής, όπως η ενέργεια, η γεωργία, η βιομηχανία και οι μεταφορές, καθένας από τους οποίους στοχεύει μείωση των εκπομπών και προώθηση της προστασίας του περιβάλλοντος (Jackson and Green, 2018). Στον πυρήνα της, η Πράσινη Συμφωνία στοχεύει στη μείωση των εκπομπών GHG κατά 55% έως το 2030 (σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990) και τελικά να επιτύχει μηδενικές καθαρές εκπομπές έως το 2050 (Jones and White, 2021).

Μια βασική πτυχή της Πράσινης Συμφωνίας είναι η εστίασή της στη **βιώσιμη ενέργεια**. Για να επιτύχει τους κλιματικούς στόχους της, η ΕΕ τονίζει την ανάγκη για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική, η ηλιακή και η υδροηλεκτρική ενέργεια, για την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων στο ενεργειακό μείγμα. Η Πράσινη Συμφωνία δίνει επίσης προτεραιότητα στην ανάπτυξη του **πράσινου υδρογόνου**, ενός φορέα καθαρής ενέργειας που παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, για την υποστήριξη της απαλλαγής από τον άνθρακα σε τομείς όπως η βιομηχανία και οι μεταφορές (Ghosh, 2020). Η Πράσινη Συμφωνία απαιτεί αυξημένες επενδύσεις στην έρευνα, την καινοτομία και τις υποδομές για να υποστηριχθούν αυτές οι ενεργειακές αλλαγές και να διασφαλιστεί ότι η ΕΕ παραμένει στην πρώτη γραμμή της πράσινης τεχνολογίας (Pérez-Arriaga, 2020).

Η περιβαλλοντική και οικονομική εστίαση της Πράσινης Συμφωνίας υπερβαίνει μόνο την ενέργεια. Περιλαμβάνει επίσης μέτρα για τη βιώσιμη γεωργία, την κυκλική οικονομία, τη διατήρηση της βιοποικιλότητας και τη μείωση της ρύπανσης. Η πρωτοβουλία έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίξει μια **δίκαιη μετάβαση**, που σημαίνει ότι επιδιώκει να διασφαλίσει ότι καμία περιοχή ή κοινότητα δεν θα μείνει πίσω στη στροφή προς μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Για το σκοπό αυτό, η ΕΕ δημιούργησε τον

Μηχανισμό Δίκαιης Μετάβασης, ο οποίος παρέχει οικονομική και τεχνική βοήθεια σε περιοχές που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από βιομηχανίες έντασης άνθρακα (Smith and Gupta, 2018).

Πακέτο Καθαρής Ενέργειας: Ρυθμιστικό Πλαίσιο για την Ενεργειακή Μετάβαση

Το πακέτο για την καθαρή ενέργεια, που ξεκίνησε το 2016 και ολοκληρώθηκε το 2019, αποτελείται από οκτώ νομοθετικές πράξεις που στοχεύουν στη δημιουργία μιας ενοποιημένης, ανταγωνιστικής και αποδοτικής αγοράς ενέργειας στην ΕΕ. Το πακέτο έχει σχεδιαστεί για να διευκολύνει την υιοθέτηση της ανανεώσιμης ενέργειας και να αυξήσει την ενεργειακή απόδοση, παρέχοντας ένα ρυθμιστικό πλαίσιο που υποστηρίζει τους στόχους της Πράσινης Συμφωνίας. Τα βασικά στοιχεία του πακέτου για την καθαρή ενέργεια περιλαμβάνουν **την αύξηση των στόχων για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τον εκσυγχρονισμό της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την ενδυνάμωση των καταναλωτών** (Anderson, 2020).

1. **Αύξηση στόχων για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας:** Η δέσμη για την καθαρή ενέργεια έθεσε ως στόχο για την ΕΕ να προμηθεύεται τουλάχιστον το 32% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές έως το 2030, ενώ διεξάγονται συζητήσεις για αύξηση αυτού του στόχου στο 40% υπό το πρίσμα της Πράσινης Συμφωνίας (Jones , 2021). Ο στόχος αυτός προορίζεται να δώσει ώθηση στην ανάπτυξη της αιολικής, της ηλιακής ενέργειας και της βιοενέργειας, υποστηριζόμενη από κίνητρα για επενδύσεις και καινοτομίες σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
2. **Εκσυγχρονισμός της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας:** Η δέσμη μέτρων για την καθαρή ενέργεια περιλαμβάνει μεταρρυθμίσεις για τη δημιουργία μιας πιο ευέλικτης και ανταποκρινόμενης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση της μεταβλητότητας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μέσω του **κανονισμού για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και της οδηγίας για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας**, η δέσμη ενθαρρύνει το διασυνοριακό εμπόριο ηλεκτρικής ενέργειας, την ενσωμάτωση αποκεντρωμένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την άρση των ρυθμιστικών φραγμών για την είσοδο στην αγορά. Το πακέτο προωθεί τη δημιουργία **έξυπνων δικτύων και συστημάτων απόκρισης ζήτησης** που επιτρέπουν τη διαχείριση της προσφοράς και της ζήτησης σε πραγματικό χρόνο, αυξάνοντας τη σταθερότητα και την αποτελεσματικότητα του δικτύου (Rashid, 2019).
3. **Ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης:** Η δέσμη μέτρων για την καθαρή ενέργεια ενισχύει τη δέσμευση της ΕΕ για ενεργειακή απόδοση, με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά 32,5% έως το 2030. Μέσω της οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση, η δέσμη υπογραμμίζει τη σημασία της μείωσης της ζήτησης ενέργειας ως κρίσιμης στρατηγικής για τη μείωση εκπομπών. Τα μέτρα περιλαμβάνουν πρότυπα ενεργειακής απόδοσης για κτίρια, υποχρεωτικούς

ενεργειακούς ελέγχους για μεγάλες επιχειρήσεις και κίνητρα για ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες (Kumar and Srivastava, 2020).

4. **Ενδυνάμωση των καταναλωτών:** Σημαντική εστίαση της δέσμης μέτρων για την καθαρή ενέργεια είναι η ενδυνάμωση των καταναλωτών της ΕΕ να συμμετέχουν στην ενεργειακή μετάβαση. Με την προώθηση της ιδιοκατανάλωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, το πακέτο δίνει τη δυνατότητα σε άτομα και κοινότητες να παράγουν τη δική τους ηλεκτρική ενέργεια και να πωλούν την πλεονάζουσα ενέργεια πίσω στο δίκτυο. Το πακέτο ζητά επίσης τη δημιουργία **ενεργειακών κοινοτήτων**, όπου ομάδες κατοίκων ή επιχειρήσεων επενδύουν συλλογικά σε έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενισχύοντας την τοπική παραγωγή ενέργειας και τη συμμετοχή της κοινότητας (Smith, 2019).

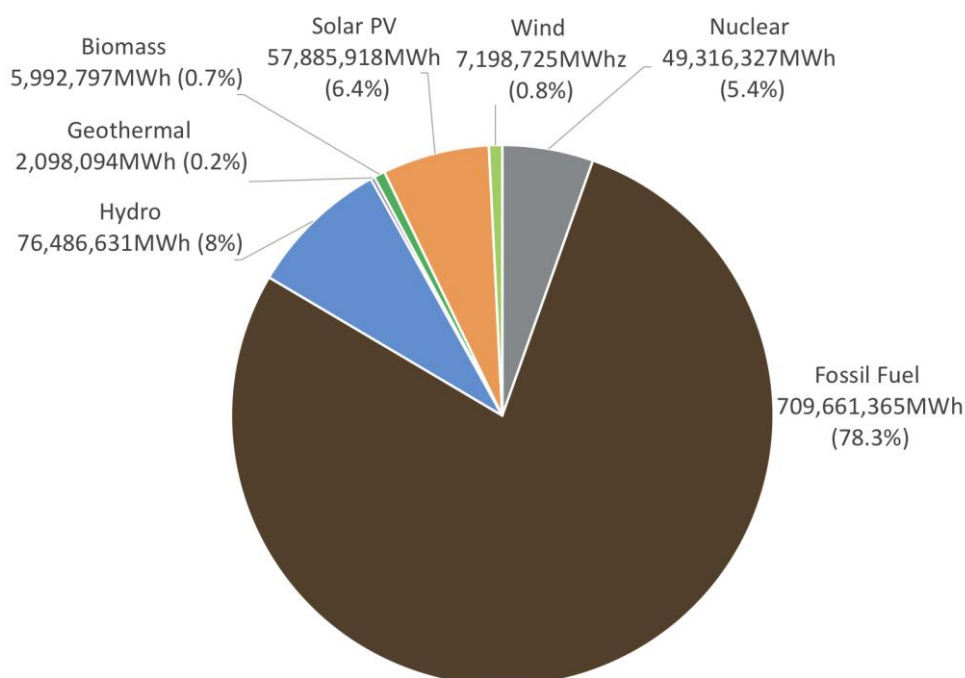


Figure 7. Διάγραμμα αναλογίας ΑΠΕ (<https://isep-energychart.com/en/1105/>)

Ενώ η Πράσινη Συμφωνία και το Πακέτο Καθαρής Ενέργειας έχουν θέσει φιλόδοξους στόχους και πλαίσια για ένα βιώσιμο μέλλον, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις για την επίτευξη αυτών των στόχων. Η μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές, συμπεριλαμβανομένης της κατασκευής αιολικών και ηλιακών πάρκων, αναβαθμίσεων σε υποδομές δικτύου και ανάπτυξης λύσεων αποθήκευσης ενέργειας (Jackson and Green, 2018). Επιπλέον, περιοχές που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από άνθρακα ή άλλα ορυκτά καύσιμα ενδέχεται να αντιμετωπίσουν οικονομικές και κοινωνικές προκλήσεις για την προσαρμογή σε αυτές τις αλλαγές, απαιτώντας προσεκτικό σχεδιασμό και υποστήριξη μέσω του Μηχανισμού Δίκαιης Μετάβασης (Pérez-Arriaga, 2020).

Μια άλλη πρόκληση είναι η διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ της ενεργειακής ασφάλειας και της ολοκλήρωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ενώ οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μειώνουν την εξάρτηση από τις εισαγωγές ορυκτών καυσίμων, η μεταβλητότητα πηγών όπως ο άνεμος και η ηλιακή ενέργεια απαιτεί ευέλικτα και ανθεκτικά ενεργειακά συστήματα, συμπεριλαμβανομένης της εφεδρικής αποθήκευσης και των εισαγωγών ενέργειας σε περιόδους χαμηλής παραγωγής ανανεώσιμων πηγών (Smith and Gupta, 2018).

6.2 Ελληνικό Εθνικό Σχέδιο Ενέργειας και Κλίματος

6.2.1 Στόχοι Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Στρατηγικοί Στόχοι

Η Ελλάδα έχει θέσει φιλόδοξους στόχους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στρατηγικούς στόχους ως μέρος της δέσμευσής της για μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) και ευθυγράμμιση με τους κλιματικούς στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Τα τελευταία χρόνια, η Ελλάδα δίνει ολοένα και μεγαλύτερη έμφαση στην ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας, τη διαφοροποίηση του ενεργειακού της μείγματος και την προώθηση της οικονομικής ανάπτυξης μέσω βιώσιμων πρακτικών. Ως μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η Ελλάδα έχει υιοθετήσει στόχους σύμφωνα με τις οδηγίες της ΕΕ, με στόχο την εκπλήρωση ή υπέρβαση των υποχρεώσεών της στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και Πακέτο Καθαρής Ενέργειας (Smith, 2019).

Εθνικοί Στόχοι Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα της Ελλάδας (NECP), που αναπτύχθηκε το 2019, περιγράφει συγκεκριμένους στόχους για τη μείωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των αερίων του θερμοκηπίου. Έως το 2030, η Ελλάδα στοχεύει να επιτύχει μερίδιο 35% των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη συνολική κατανάλωση ενέργειας, υπερβαίνοντας τον στόχο σε επίπεδο ΕΕ του 32% (Jackson and Green, 2018). Αυτός ο στόχος αντανακλά τη δέσμευση της Ελλάδας για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως κεντρικό στοιχείο του μελλοντικού ενεργειακού της συστήματος, με σχέδια για σημαντική επέκταση της ηλιακής, αιολικής και υδροηλεκτρικής ισχύος. Οι στόχοι ανανεώσιμων πηγών ενέργειας της χώρας περιλαμβάνουν επίσης συγκεκριμένους στόχους για τους τομείς της ηλεκτρικής ενέργειας, της θέρμανσης και ψύξης και των μεταφορών, με ιδιαίτερη έμφαση στην απαλλαγή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από άνθρακα, η οποία παραδοσιακά βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στον άνθρακα και το πετρέλαιο (Ghosh, 2020).

Ο τομέας ηλεκτρικής ενέργειας, όπου αναμένεται να σημειωθεί η μεγαλύτερη άνοδος χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στοχεύει να προμηθεύεται τουλάχιστον το 60% της ηλεκτρικής ενέργειας έως το 2030. Η Ελλάδα σχεδιάζει να το επιτύχει μέσω της ταχείας επέκτασης της δυναμικότητας αιολικών και ηλιακών φωτοβολταϊκών (PV), με επενδύσεις τόσο σε έργα μεγάλης κλίμακας όσο και σε αποκεντρωμένα συστήματα, όπως ηλιακές εγκαταστάσεις σε στέγες (Jones and White, 2021). Ο τομέας θέρμανσης και ψύξης, όπου οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κατέχουν σήμερα μικρότερο μερίδιο, στοχεύει επίσης στην ανάπτυξη, με κίνητρα για εφαρμογές βιομάζας, γεωθερμίας και ηλιακής θερμότητας σε οικιακές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις (Pérez-Arriaga, 2020).

Στον τομέα των μεταφορών, η Ελλάδα στοχεύει να επιτύχει τον στόχο της ΕΕ για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κατά 14% προωθώντας βελτιώσεις στα βιοκαύσιμα, τα ηλεκτρικά οχήματα και τις δημόσιες μεταφορές. Ενώ η πρόοδος σε αυτόν τον τομέα ήταν πιο αργή σε σύγκριση με την ηλεκτρική ενέργεια, πρόσφατες πρωτοβουλίες, συμπεριλαμβανομένων των επιδοτήσεων για ηλεκτρικά οχήματα και της ανάπτυξης υποδομής για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων, στοχεύουν στη στήριξη της στροφής προς τις επιλογές μεταφοράς χαμηλών εκπομπών (Anderson, 2020).

Στρατηγικοί Στόχοι και Πρωτοβουλίες Πολιτικής

Για την υποστήριξη αυτών των στόχων, η Ελλάδα έχει εφαρμόσει μια σειρά στρατηγικών στόχων και πρωτοβουλιών πολιτικής που έχουν σχεδιαστεί για να δημιουργήσουν ένα ευνοϊκό περιβάλλον για επενδύσεις και ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ένας από τους πρωταρχικούς στόχους είναι η **σταδιακή κατάργηση του λιγνίτη (μιας μορφής άνθρακα χαμηλής ποιότητας)**, ο οποίος παραδοσιακά αποτελούσε σημαντική πηγή ενέργειας στην Ελλάδα. Το NECP περιγράφει ένα σχέδιο για το κλείσιμο των περισσότερων λιγνιτικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής έως το 2023, με πλήρη σταδιακή κατάργηση του λιγνίτη έως το 2028 (Smith, 2019). Αυτή η μετατόπιση αναμένεται να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην Ελλάδα και να βελτιώσει την ποιότητα του αέρα, ειδικά σε περιοχές όπως η Δυτική Μακεδονία, η οποία ιστορικά στηρίζεται στην εξόρυξη λιγνίτη και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Jackson and Green, 2018).

Ένας άλλος στρατηγικός στόχος είναι η προώθηση της ενεργειακής ανεξαρτησίας με τη μεγιστοποίηση των εγχώριων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας της Ελλάδας, ιδιαίτερα της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας. Η γεωγραφική θέση και οι κλιματικές συνθήκες της Ελλάδας προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες τόσο για την ξηρά όσο και για την υπεράκτια αιολική ενέργεια, καθώς και για την ηλιακή ενέργεια. Η ελληνική κυβέρνηση έχει προσδιορίσει συγκεκριμένες περιοχές, όπως τα νησιά του Αιγαίου και τις ορεινές περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας, ως βασικές περιοχές για την αιολική και ηλιακή ανάπτυξη (Kumar and Srivastava, 2020). Η υπεράκτια αιολική ενέργεια, μια σχετικά νέα περιοχή για την Ελλάδα, διερευνάται επίσης, με σχέδια για την ανάπτυξη πιλοτικών έργων που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη τα επόμενα χρόνια (Jones and White, 2021).

Για να προσελκύσει επενδύσεις στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η Ελλάδα έχει εισαγάγει **οικονομικά κίνητρα και προγράμματα στήριξης**. Αυτά περιλαμβάνουν τιμολόγια τροφοδοσίας και δημοπρασίες για έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα οποία παρέχουν σταθερές ροές εσόδων για τους προγραμματιστές και ενθαρρύνουν τον ανταγωνισμό στον τομέα. Η ελληνική κυβέρνηση έχει επίσης εξορθολογίσει τις διαδικασίες αδειοδότησης και αδειοδότησης για τη μείωση των γραφειοκρατικών φραγμών, αντιμετωπίζοντας ένα από τα μακροχρόνια εμπόδια στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη χώρα (Ghosh, 2020).

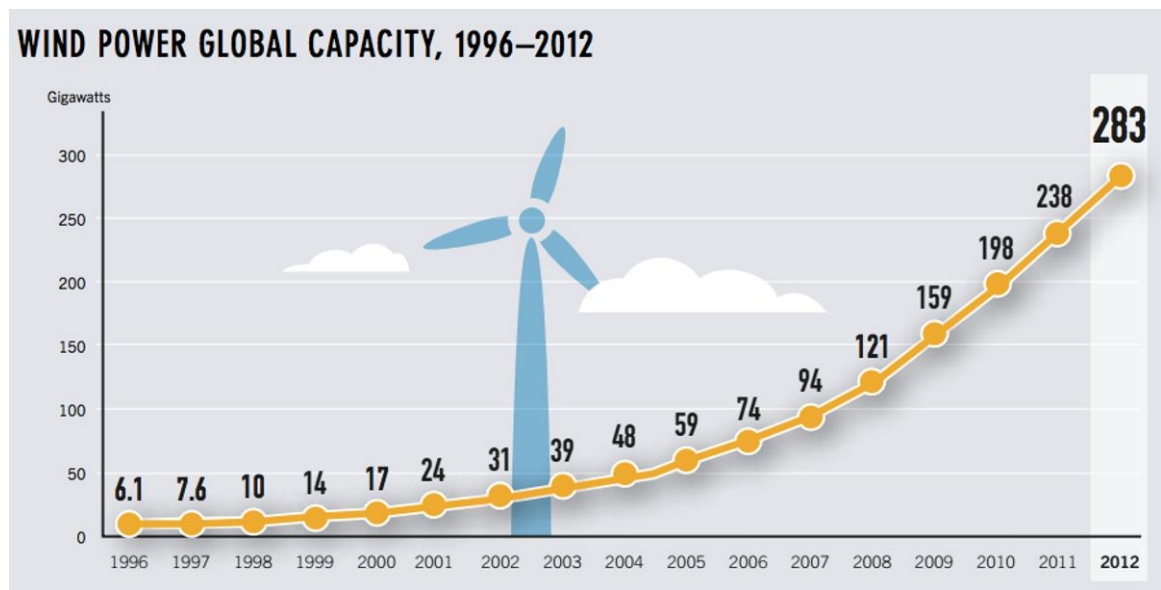


Figure 8. Παγκόσμια ικανότητα αιολικής ενέργειας - Increasing global trends towards wind power generation global

(https://www.researchgate.net/figure/ncreasing-global-trends-towards-wind-power-generation-global_fig1_282845868)

Προκλήσεις και Μελλοντική Προοπτική

Παρά την πρόοδό της, η Ελλάδα αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις όσον αφορά την επίτευξη των στόχων της για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η ταχεία σταδιακή κατάργηση του λιγνίτη θέτει κοινωνικές και οικονομικές προκλήσεις, ιδιαίτερα σε περιοχές που εξαρτώνται από τον άνθρακα. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, η ελληνική κυβέρνηση έχει δημιουργήσει ένα **Ταμείο Δίκαιης Μετάβασης**, το οποίο παρέχει οικονομική βοήθεια και προγράμματα επανεκπαίδευσης για τη στήριξη των κοινοτήτων που πλήττονται από τη μετάβαση από τον άνθρακα (Smith and Gupta, 2018). Επιπλέον, το ορεινό ανάγλυφο της Ελλάδας και τα διάσπαρτα νησιά παρουσιάζουν υλικοτεχνικές προκλήσεις για την ανάπτυξη υποδομών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την ενσωμάτωση στο δίκτυο, ειδικά στην περίπτωση του υπεράκτιου αιολικού αέρα (Rashid, 2019).

Ο εκσυγχρονισμός του δικτύου είναι μια άλλη ουσιαστική εστίαση, καθώς η τρέχουσα υποδομή της Ελλάδας χρειάζεται αναβαθμίσεις για τη διαχείριση της αυξημένης δυναμικότητας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη διαχείριση της διακοπής της παροχής. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, η Ελλάδα επενδύει σε **τεχνολογία έξυπνου δικτύου** και διασυνοριακές διασυνδέσεις με γειτονικές χώρες, οι οποίες θα ενισχύσουν τη σταθερότητα του δικτύου και θα επιτρέψουν μεγαλύτερη ολοκλήρωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Pérez-Arriaga, 2020).

6.2.2 Προκλήσεις και ευκαιρίες υλοποίησης

Καθώς η Ελλάδα προχωρά προς τους φιλόδοξους στόχους της για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αντιμετωπίζει μια ποικιλία προκλήσεων και ευκαιριών υλοποίησης. Η δέσμευση της Ελλάδας να επιτύχει μερίδιο 35% των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο συνολικό ενεργειακό της μείγμα και μερίδιο 60% στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έως το 2030 ευθυγραμμίζεται με τους κλιματικούς στόχους της ΕΕ, αλλά η υλοποίηση αυτών των στόχων απαιτεί την αντιμετώπιση διαρθρωτικών, τεχνικών, οικονομικών και κοινωνικών εμποδίων (Smith, 2019). Παρά αυτές τις προκλήσεις, η Ελλάδα έχει επίσης μοναδικά πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένων των άφθονων ηλιακών και αιολικών πόρων, που την καθιστούν ηγέτη στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στη Νοτιοανατολική Ευρώπη (Jackson and Green, 2018).

Προκλήσεις στην Εφαρμογή Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Υποδομή δικτύου και διασυνδεσιμότητα: Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για την Ελλάδα όσον αφορά την επέκταση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η ανάγκη εκσυγχρονισμού και ενίσχυσης των δικτυακών υποδομών της. Το τρέχον σύστημα δικτύου απαιτεί ουσιαστικές αναβαθμίσεις για να χειριστεί τη μεταβλητότητα και την αποκεντρωμένη φύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η αιολική και η ηλιακή. Πολλά μέρη της Ελλάδας, ιδιαίτερα τα νησιά της, είναι απομονωμένα από το κύριο δίκτυο, περιορίζοντας την ικανότητα ολοκλήρωσης και διανομής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεσματικά (Ghosh, 2020). Η ενίσχυση των διασυνδέσεων του δικτύου μεταξύ των νησιών και της ηπειρωτικής χώρας είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της σταθερής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και την πλήρη αξιοποίηση του δυναμικού των υπεράκτιων έργων αιολικής και ηλιακής ενέργειας (Jones and White, 2021).

Γραφειοκρατικά και ρυθμιστικά εμπόδια: Ο τομέας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας της Ελλάδας αντιμετώπισε ιστορικά γραφειοκρατικά εμπόδια, με χρονοβόρες διαδικασίες αδειοδότησης και πολύπλοκους κανονισμούς που αποθαρρύνουν τους επενδυτές και επιβραδύνουν τα χρονοδιαγράμματα των έργων. Αυτές οι διοικητικές καθυστερήσεις είναι ιδιαίτερα προκλητικές για έργα αιολικής ενέργειας, καθώς η απόκτηση αδειών για χερσαία και υπεράκτια αιολικά πάρκα συχνά περιλαμβάνει περιβαλλοντικούς κανονισμούς, τοπική αντιπολίτευση και περιορισμούς χρήσης γης (Rashid, 2019). Ενώ η ελληνική κυβέρνηση έχει λάβει μέτρα για τον εξορθολογισμό των διαδικασιών αδειοδότησης, απαιτούνται περαιτέρω ρυθμιστικές μεταρρυθμίσεις για τη δημιουργία ενός πιο αποτελεσματικού και διαφανούς πλαισίου που διευκολύνει τις επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Pérez-Arriaga, 2020).

Οικονομικοί περιορισμοί και χρηματοδότηση: Οι οικονομικές προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένων των περιορισμένων δημόσιων πόρων και της ανάγκης για ξένες επενδύσεις, θέτουν επίσης εμπόδια στους στόχους της Ελλάδας για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αν και ο τομέας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρουσιάζει ελκυστικές επενδυτικές ευκαιρίες, η εξασφάλιση της απαραίτητης χρηματοδότησης μπορεί να είναι

δύσκολη, ειδικά σε ένα πλαίσιο μετά την οικονομική κρίση. Η εξάρτηση της Ελλάδας από ιδιωτικές και ξένες επενδύσεις σημαίνει ότι πρέπει να διατηρήσει την εμπιστοσύνη των επενδυτών προσφέροντας σταθερές πολιτικές, οικονομικά κίνητρα και μέτρα μετριασμού του κινδύνου, όπως κρατικές εγγυήσεις ή φορολογικές ελαφρύνσεις (Smith and Gupta, 2018). Επιπλέον, οι διακυμάνσεις στις παγκόσμιες τιμές της ενέργειας και οι οικονομικές αβεβαιότητες, όπως αυτές που σχετίζονται με την πανδημία COVID-19, έχουν δημιουργήσει περαιτέρω αστάθεια στο επενδυτικό τοπίο (Jackson and Green, 2018).

Κοινωνική αποδοχή και συγκρούσεις χρήσης γης: Η δημόσια αποδοχή των έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδιαίτερα των αιολικών πάρκων, αποτελεί μια άλλη πρόκληση. Το ορεινό ανάγλυφο και η πολύτιμη ακτογραμμή της Ελλάδας συχνά φέρνουν έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε στενή εγγύτητα με τις τοπικές κοινωνίες, εγείροντας ανησυχίες για οπτικές επιπτώσεις, θόρυβο και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αντίθεση από τους κατοίκους και τις τοπικές κυβερνήσεις, να επιβραδύνει τις εγκρίσεις έργων και ακόμη και να οδηγήσει σε νομικές διαφορές (Kumar and Srivastava, 2020). Η κοινοτική δέσμευση και η δίκαιη αποζημίωση για τη χρήση γης είναι ουσιαστικής σημασίας για την ενίσχυση της κοινωνικής αποδοχής και για τη διασφάλιση ότι οι τοπικές κοινότητες επωφελούνται από τις εξελίξεις στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Smith, 2019).

Ευκαιρίες για Επέκταση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Άφθονοι ανανεώσιμοι πόροι: Η γεωγραφική θέση και το κλίμα της Ελλάδας της παρέχουν άφθονες ηλιακές και αιολικές πηγές, τοποθετώντας την ευνοϊκά στην επέκταση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η χώρα έχει μερικά από τα υψηλότερα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας στην Ευρώπη, καθιστώντας την ιδανική για ηλιακά φωτοβολταϊκά και θερμικά έργα (Ghosh, 2020). Επιπλέον, η εκτεταμένη ακτογραμμή και οι νησιωτικές περιοχές της Ελλάδας προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες τόσο για χερσαία όσο και για υπεράκτια αιολικά έργα. Η αξιοποίηση αυτών των φυσικών πλεονεκτημάτων επιτρέπει στην Ελλάδα να αναπτύξει ένα βιώσιμο και οικονομικά βιώσιμο ενεργειακό σύστημα (Anderson, 2020).

Τεχνολογικές εξελίξεις και καινοτομία: Οι πρόοδοι στις τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδιαίτερα στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και έξυπνων δικτύων, προσφέρουν ευκαιρίες στην Ελλάδα να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις ολοκλήρωσης του δικτύου και να διαχειριστεί τη διαλείπουσα χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η αποθήκευση μπαταριών και άλλες λύσεις αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να βοηθήσουν στη σταθεροποίηση της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας αποθηκεύοντας την υπερβολική ενέργεια που παράγεται κατά τις περιόδους αιχμής παραγωγής, η οποία μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί όταν η παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι χαμηλή (Jones and White, 2021). Η Ελλάδα επενδύει επίσης στην τεχνολογία **έξυπνων δικτύων**, η οποία επιτρέπει πιο αποτελεσματική διαχείριση ενέργειας, μειώνει τις απώλειες ενέργειας και βελτιώνει την αξιοπιστία (Pérez-Arriaga, 2020).

Υποστήριξη από την Ευρωπαϊκή Ένωση: Η μετάβαση της Ελλάδας στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ενισχύεται από οικονομική και τεχνική υποστήριξη από την ΕΕ. Η Πράσινη Συμφωνία της ΕΕ και τα συναφή ταμεία, όπως ο Μηχανισμός Δίκαιης Μετάβασης, παρέχουν οικονομική βοήθεια και πόρους για να βοηθήσουν την Ελλάδα να απομακρυνθεί από την εξάρτηση από τον λιγνίτη και να υιοθετήσει ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτά τα κεφάλαια υποστηρίζουν έργα υποδομής, προγράμματα ανάπτυξης ικανοτήτων και πρωτοβουλίες για επανεκπαίδευση εργαζομένων σε περιοχές που εξαρτώνται από τον άνθρακα, διασφαλίζοντας ότι η μετάβαση είναι δίκαιη και βιώσιμη (Smith and Gupta, 2018). Η υποστήριξη της ΕΕ βοηθά την Ελλάδα να επιτύχει τους στόχους της για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενώ αντιμετωπίζει τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου κυριαρχούν ιστορικά οι βιομηχανίες ορυκτών καυσίμων (Jackson and Green, 2018).

Ανάπτυξη δυναμικού υπεράκτιου ανέμου και υδρογόνου: Ως μέρος της στρατηγικής της για διαφοροποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η Ελλάδα εξερευνά υπεράκτια αιολική ενέργεια και πράσινο υδρογόνο. Τα υπεράκτια αιολικά έργα, τα οποία αναμένεται να επεκταθούν σημαντικά, έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν μια συνεπή πηγή ενέργειας και να συμπληρώνουν την ξηρά αιολική και ηλιακή ενέργεια (Rashid, 2019). Επιπλέον, το πράσινο υδρογόνο, που παράγεται με χρήση ηλεκτρόλυσης με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, προσφέρει μια λύση για την απανθρακοποίηση τομέων που είναι δύσκολο να ηλεκτριστούν, όπως η βαριά βιομηχανία και οι μεταφορές (Ghosh, 2020). Επενδύοντας σε αυτές τις αναδυόμενες τεχνολογίες, η Ελλάδα μπορεί να ενισχύσει περαιτέρω τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να πρωτοστατήσει στην καινοτομία στην περιοχή.

Annual Additions of Renewable Power Capacity, by Technology and Total, 2012-2018

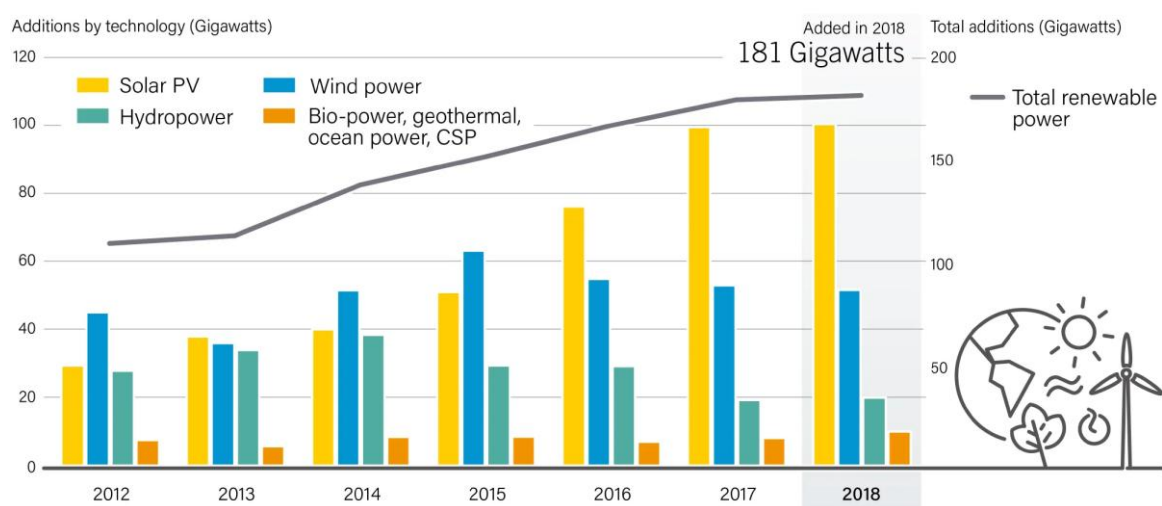


Figure 9. https://www.researchgate.net/figure/Renewable-power-capacity-addition-per-year-2012-2018-1_fig1_341658996

6.3 Επιδοτήσεις, Κίνητρα και Σχέδια Υποστήριξης στην Ελλάδα

6.3.1 Τιμολόγια τροφοδοσίας (Feed-in-Tarif) και πράσινα πιστοποιητικά

Για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η Ελλάδα έχει εφαρμόσει διάφορα προγράμματα κινήτρων, συμπεριλαμβανομένων **τιμολογίων τροφοδοσίας (FiTs)** και **πράσινων πιστοποιητικών**. Αυτοί οι μηχανισμοί στοχεύουν στην προσέλκυση επενδύσεων, στην ενθάρρυνση της ανάπτυξης στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στη βοήθεια της Ελλάδας να επιτύχει τους στόχους της για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και το κλίμα. Κάθε σύστημα έχει τον μοναδικό του ρόλο, καλύπτοντας διαφορετικά στάδια ανάπτυξης της αγοράς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αντιμετωπίζοντας συγκεκριμένες προκλήσεις για την προώθηση μιας ανταγωνιστικής, βιώσιμης αγοράς ενέργειας (Smith, 2019).

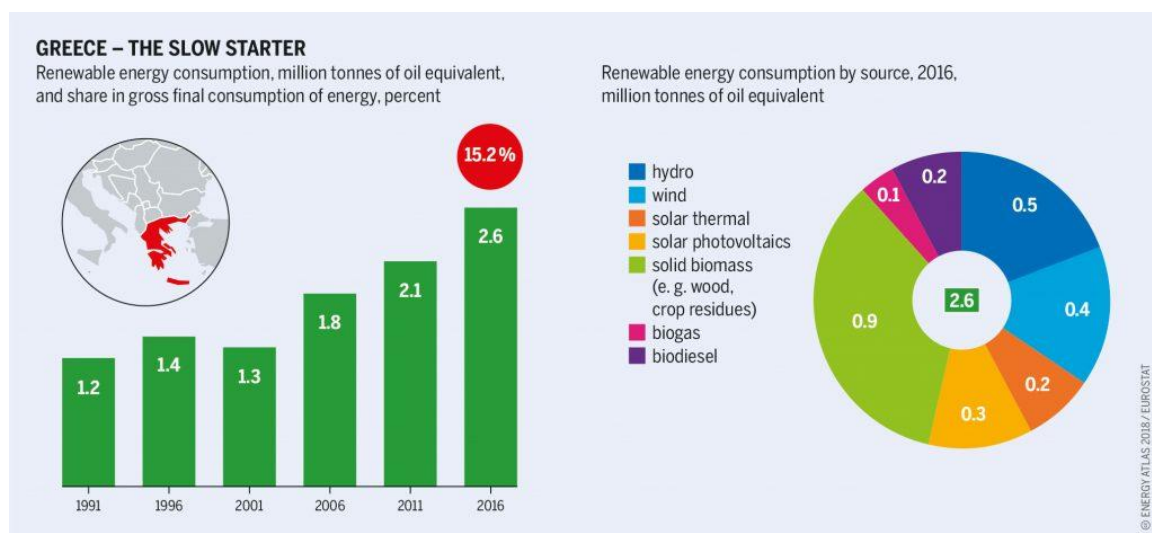


Figure 10. Διάγραμμα κατανάλωσης ΑΠΕ (<https://wiki.energytransition.org/wiki/the-greek-energy-transition/>)

Τιμές τροφοδοσίας («ταρίφες») (FiTs)

Τα τιμολόγια τροφοδοσίας (FiTs) ήταν ένας από τους πρώτους μηχανισμούς υποστήριξης που εφαρμόστηκαν στην Ελλάδα για την ενθάρρυνση των επενδύσεων σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στο πλαίσιο ενός συστήματος FiT, προσφέρονται στους παραγωγούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μακροπρόθεσμα συμβόλαια με εγγυημένες πληρωμές ανά κιλοβατώρα (kWh) παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η ρύθμιση σταθερής τιμής εξασφαλίζει σταθερά έσοδα για τους επενδυτές και μειώνει τους οικονομικούς κινδύνους που σχετίζονται με έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ειδικά στα αρχικά τους στάδια (Jackson and Green, 2018). Τα FiTs είναι ιδιαίτερα ωφέλιμα για έργα μικρής κλίμακας, καθώς παρέχουν μια προβλέψιμη ροή εισοδήματος που είναι ζωτικής σημασίας για την εξασφάλιση χρηματοδότησης (Pérez-Arriaga, 2020).

Στην Ελλάδα, τα FiTs ήταν εξαιρετικά αποτελεσματικά στην ενθάρρυνση της ανάπτυξης ηλιακών φωτοβολταϊκών (ΦΒ) και έργων αιολικής ενέργειας στις αρχές της δεκαετίας του 2000, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος. Ωστόσο, καθώς το κόστος των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών μειώθηκε, τα FiTs έγιναν λιγότερο βιώσιμα για εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας, δημιουργώντας οικονομική πίεση στην κυβέρνηση και

στους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας που επωμίστηκαν το κόστος μέσω υψηλότερων τιμολογίων. Ως αποτέλεσμα, η Ελλάδα σταδιακά κατήργησε τα FiTs για μεγαλύτερα έργα προς όφελος των μηχανισμών που βασίζονται στην αγορά, όπως οι δημοπρασίες, οι οποίοι ενθαρρύνουν πιο ανταγωνιστικές τιμές (Ghosh, 2020).

Αν και τα FiT έχουν μειωθεί για νέα, μεγάλης κλίμακας έργα, συνεχίζουν να διαδραματίζουν ρόλο στην προώθηση εγκαταστάσεων μικρής κλίμακας, ιδιαίτερα ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων στον τελευταίο όροφο. Τα FiTs έχουν παίξει καθοριστικό ρόλο στον εκδημοκρατισμό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δίνοντας τη δυνατότητα σε μεμονωμένα νοικοκυριά και μικρές επιχειρήσεις να συμμετάσχουν στη μετάβαση της πράσινης ενέργειας, συμβάλλοντας έτσι στους στόχους της Ελλάδας για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε κοινοτικό επίπεδο (Jones and White, 2021).

Πράσινα Πιστοποιητικά

Τα **πράσινα πιστοποιητικά** είναι ένας άλλος μηχανισμός που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την εκπλήρωση των υποχρεώσεων της ΕΕ για τη μείωση των εκπομπών. Αυτά τα πιστοποιητικά αποτελούν απόδειξη ότι μια ορισμένη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας έχει παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές και μπορούν να διαπραγματεύονται χωριστά από την πραγματική ηλεκτρική ενέργεια. Στην Ελλάδα, τα πράσινα πιστοποιητικά χρησιμοποιούνται κυρίως για την παροχή κινήτρων για την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρέχοντας μια πρόσθετη ροή εσόδων για τους παραγωγούς πράσινης ενέργειας. Οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και οι πάροχοι ενέργειας μπορούν να αγοράσουν αυτά τα πιστοποιητικά για να ανταποκριθούν στις δικές τους υποχρεώσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως οι υποχρεωτικοί στόχοι για μερίδιο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα ενεργειακά τους χαρτοφυλάκια (Smith, 2019).

Τα πράσινα πιστοποιητικά επιτρέπουν στην Ελλάδα να ενσωματώσει τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην ενεργειακή της αγορά με μεγαλύτερη ευελιξία. Δημιουργώντας μια εμπορεύσιμη αγορά για πράσινα πιστοποιητικά, η Ελλάδα δίνει κίνητρα στους παραγωγούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενώ δίνει στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας τη δυνατότητα να υποστηρίζουν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χωρίς να χρειάζεται να παράγουν οι ίδιοι όλη την ανανεώσιμη ενέργεια. Αυτός ο μηχανισμός διευκολύνει επίσης τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς της ΕΕ, όπως η Οδηγία για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, η οποία απαιτεί από τα κράτη μέλη να αυξήσουν το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό τους μείγμα (Jackson and Green, 2018).

7.3.2 Οικονομικά και φορολογικά κίνητρα για έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Για να προωθήσει την υιοθέτηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και να ευθυγραμμιστεί με τους κλιματικούς στόχους της ΕΕ, η Ελλάδα έχει εισαγάγει μια ποικιλία οικονομικών και φορολογικών κινήτρων με στόχο την τόνωση των επενδύσεων σε έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτά τα κίνητρα έχουν σχεδιαστεί για να μειώσουν το αρχικό κόστος, να ενισχύσουν την κερδοφορία του έργου και να προσελκύσουν εγχώριες και ξένες επενδύσεις σε ηλιακές, αιολικές και άλλες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η οικονομική

υποστήριξη και οι φορολογικές ελαφρύνσεις είναι κρίσιμες για να μπορέσει η Ελλάδα να επιταχύνει τη μετάβασή της σε μια οικονομία καθαρής ενέργειας και να επιτύχει τους φιλόδοξους στόχους της για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Smith, 2019).

Οικονομικά κίνητρα

Η Ελλάδα έχει δημιουργήσει μια σειρά από οικονομικά κίνητρα για τη μείωση του κόστους που σχετίζεται με έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ένας από τους κύριους μηχανισμούς είναι **τα επιδοτούμενα δάνεια** που προσφέρονται από χρηματοπιστωτικά ιδρύματα και ταμεία που υποστηρίζονται από την κυβέρνηση, τα οποία παρέχουν δάνεια χαμηλού επιτοκίου ή μερική χρηματοδότηση για επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτή η πρόσβαση σε ευνοϊκούς όρους χρηματοδότησης είναι απαραίτητη για τους μικρότερους προγραμματιστές και τις τοπικές κοινότητες που ενδέχεται να μην έχουν το απαιτούμενο κεφάλαιο για την έναρξη έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Jackson and Green, 2018). Η Ελληνική Τράπεζα Ανάπτυξης (GDB) διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εκταμίευση αυτών των δανείων, στοχεύοντας έργα που ευθυγραμμίζονται με τους κλιματικούς στόχους και τις ενεργειακές στρατηγικές της χώρας (Pérez-Arriaga, 2020).

Εκτός από τα επιδοτούμενα δάνεια, η ελληνική κυβέρνηση παρέχει **άμεσες επιχορηγήσεις** σε έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδιαίτερα για καινοτόμες ή πρωτοποριακές τεχνολογίες. Οι επιχορηγήσεις χορηγούνται συχνά σε έργα που επιδεικνύουν προηγμένες ή αναδυόμενες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η υπεράκτια αιολική παραγωγή ή η παραγωγή πράσινου υδρογόνου. Μειώνοντας το αρχικό κόστος, αυτές οι επιχορηγήσεις διευκολύνουν τους προγραμματιστές να αναλάβουν έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που διαφορετικά θα ήταν οικονομικά δύσκολα λόγω των υψηλών κεφαλαιακών απαιτήσεων που σχετίζονται με αυτές τις τεχνολογίες (Ghosh, 2020). Τέτοια οικονομικά κίνητρα ευθυγραμμίζονται με τον ευρύτερο στόχο της Ελλάδας για τον εκσυγχρονισμό της ενεργειακής της υποδομής και τη διασφάλιση της σταθερότητας του ενεργειακού της συστήματος με παράλληλη αύξηση της δυναμικότητας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η χρηματοδότηση έργων μέσω συμπράξεων δημόσιου και ιδιωτικού τομέα (ΣΔΙΤ) είναι μια άλλη οδός που χρησιμοποιεί η Ελλάδα για την τόνωση των επενδύσεων σε έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στο πλαίσιο των συμφωνιών ΣΔΙΤ, η κυβέρνηση συνεργάζεται με ιδιωτικούς φορείς για τη συγχρηματοδότηση έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μοιράζοντας τόσο τους κινδύνους όσο και τις αποδόσεις. Οι ΣΔΙΤ ήταν ιδιαίτερα επιτυχημένες σε έργα μεγαλύτερης κλίμακας, όπου ο ιδιωτικός τομέας παρέχει κεφάλαια και τεχνογνωσία, ενώ η κυβέρνηση προσφέρει υποστήριξη με τη μορφή πρόσβασης στη γη, εξορθολογισμένες διαδικασίες αδειοδότησης ή ανάπτυξη υποδομών (Jones and White, 2021). Οι ΣΔΙΤ συμβάλλουν σημαντικά στην επίτευξη των στόχων της Ελλάδας για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς επιτρέπουν στη χώρα να κινητοποιεί κεφάλαια από τον ιδιωτικό τομέα, ενώ επωφελείται από τη στήριξη και την εποπτεία του δημόσιου τομέα.

Φορολογικά κίνητρα

Εκτός από την άμεση οικονομική στήριξη, η Ελλάδα προσφέρει φορολογικά κίνητρα με στόχο την ενθάρρυνση των επενδύσεων σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Διατίθενται **εκπτώσεις εταιρικού φόρου για εταιρείες που επενδύουν σε υποδομές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας**. Αυτές οι μειώσεις επιτρέπουν στις εταιρείες να αντισταθμίσουν το φορολογητέο εισόδημά τους με το ποσό που επενδύεται σε έργα που πληρούν τις προϋποθέσεις για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθιστώντας αυτές τις επενδύσεις πιο ελκυστικές και οικονομικά βιώσιμες (Smith and Gupta, 2018). Με τη μείωση της φορολογικής επιβάρυνσης, αυτές οι μειώσεις αυξάνουν την απόδοση της επένδυσης για έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τονώνουν την περαιτέρω ανάπτυξη του κλάδου.

Ένα άλλο σημαντικό φορολογικό κίνητρο είναι η **ταχεία απόσβεση** των περιουσιακών στοιχείων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό επιτρέπει στις εταιρείες να αποσβένουν τον εξοπλισμό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας πιο γρήγορα από άλλους τύπους περιουσιακών στοιχείων, επιτρέποντάς τους να ανακτήσουν την επένδυσή τους νωρίτερα. Η ταχεία απόσβεση μειώνει το φορολογητέο εισόδημα στα αρχικά έτη του έργου, κάτι που είναι ιδιαίτερα επωφελές για έργα έντασης κεφαλαίου, όπως αιολικά πάρκα και μεγάλες ηλιακές συστοιχίες. Παρέχοντας ταχύτερες αποδόσεις της επένδυσης, η επιταχυνόμενη απόσβεση συμβάλλει στην παροχή κινήτρων για την υιοθέτηση τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Kumar and Srivastava, 2020).

Η Ελλάδα προσφέρει επίσης **μειώσεις φόρου προστιθέμενης αξίας (ΦΠΑ)** σε εξοπλισμό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και υπηρεσίες εγκατάστασης, ειδικά για ηλιακά φωτοβολταϊκά και άλλες οικιακές εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με τη μείωση του ΦΠΑ, η κυβέρνηση μειώνει το συνολικό κόστος των εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για νοικοκυριά και μικρές επιχειρήσεις, καθιστώντας τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πιο προσιτές και προσιτές (Anderson, 2020). Η μείωση του ΦΠΑ είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για την προώθηση έργων μικρής κλίμακας και αποκεντρωμένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα ηλιακά συστήματα ταράτσας, τα οποία συμβάλλουν στον εκδημοκρατισμό της ενέργειας και μειώνουν την εξάρτηση από κεντρικές πηγές ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα.

Χρηματοδοτική υποστήριξη της ΕΕ

Τα οικονομικά και φορολογικά κίνητρα της Ελλάδας για έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας υποστηρίζονται περαιτέρω από **μηχανισμούς χρηματοδότησης της ΕΕ**. Μέσω της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και των σχετικών κεφαλαίων, η Ελλάδα έχει πρόσβαση σε επιχορηγήσεις, δάνεια και τεχνική βοήθεια για την υλοποίηση έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το Ταμείο Δίκαιης Μετάβασης, για παράδειγμα, παρέχει πόρους για τη στήριξη περιοχών που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από ορυκτά καύσιμα, βοηθώντας τις να μεταβούν στην ανανεώσιμη ενέργεια. Η ΕΕ παρέχει επίσης χρηματοδότηση για έρευνα και ανάπτυξη σε τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας,

δίνοντας τη δυνατότητα στην Ελλάδα να επενδύσει σε αναδυόμενους τομείς όπως το πράσινο υδρογόνο και η αποθήκευση ενέργειας (Smith, 2019).

Η στήριξη της ΕΕ συμπληρώνει τα εθνικά οικονομικά και φορολογικά κίνητρα παρέχοντας πρόσθετους πόρους για έργα υποδομής μεγάλης κλίμακας και τεχνολογική ανάπτυξη. Η ενσωμάτωση των κονδυλίων της ΕΕ με ελληνικά κίνητρα δημιουργεί ένα πιο ισχυρό χρηματοοικονομικό πλαίσιο που ενισχύει την ικανότητα της Ελλάδας να εκπληρώσει τους στόχους της για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενώ αντιμετωπίζει οικονομικές και κοινωνικές προκλήσεις, όπως η απώλεια θέσεων εργασίας σε περιοχές που εξαρτώνται από τον άνθρακα (Jackson and Green, 2018).

6.4 Συμμόρφωση και κανονιστικές προκλήσεις στην ΕΕ και την Ελλάδα

6.4.1 Διαδικασίες Περιβαλλοντικής Αδειοδότησης και Αδειοδότησης

Οι διαδικασίες περιβαλλοντικής αδειοδότησης και αδειοδότησης στην Ελλάδα αποτελούν κρίσιμα στοιχεία του ρυθμιστικού πλαισίου που διέπει τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτές οι διαδικασίες αποσκοπούν στο να διασφαλίσουν ότι τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενώ είναι ωφέλιμα για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης, δεν επηρεάζουν αρνητικά τα τοπικά οικοσυστήματα, τις κοινότητες ή τους πολιτιστικούς χώρους. Ωστόσο, οι πολυπλοκότητες που σχετίζονται με την απόκτηση περιβαλλοντικών αδειών και αδειών έχουν θέσει προκλήσεις για τους κατασκευαστές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, προκαλώντας συχνά καθυστερήσεις και πρόσθετο κόστος (Smith, 2019).

Επισκόπηση Διαδικασιών Περιβαλλοντικής Αδειοδότησης

Στην Ελλάδα, η διαδικασία περιβαλλοντικής αδειοδότησης για έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας διέπεται από τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), την εθνική νομοθεσία και τις περιφερειακές πολιτικές. Το περιβαλλοντικό ρυθμιστικό πλαίσιο της Ελλάδας συμμορφώνεται με την Οδηγία της ΕΕ για την Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΕΠΕ), η οποία ορίζει ότι τα έργα που ενδέχεται να έχουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις πρέπει να υποβάλλονται σε ολοκληρωμένη αξιολόγηση πριν λάβουν έγκριση (Jackson and Green, 2018). Αυτή η αξιολόγηση αξιολογεί τις πιθανές επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα, τους υδάτινους πόρους, τη βιοποικιλότητα και τις κοινωνικές πτυχές και απαιτεί από τους προγραμματιστές να προτείνουν μέτρα μετριασμού για τυχόν εντοπισμένους κινδύνους.

Για έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η διαδικασία ΕΠΕ είναι απαραίτητη για την προστασία των μοναδικών φυσικών τοπίων της Ελλάδας και τη διασφάλιση της βιώσιμης ανάπτυξης. Ωστόσο, η ΕΠΕ μπορεί να είναι μια χρονοβόρα διαδικασία, καθώς περιλαμβάνει δημόσιες διαβουλεύσεις, αναθεωρήσεις από πολλούς κρατικούς φορείς και τήρηση αυστηρών απαιτήσεων τεκμηρίωσης (Pérez-Arriaga, 2020). Τα έργα μεγάλης κλίμακας, όπως τα αιολικά πάρκα και οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, επηρεάζονται ιδιαίτερα από τις

εκτεταμένες απαιτήσεις αδειοδότησης λόγω των πιθανών επιπτώσεών τους στη γη, τα οικοσυστήματα και την άγρια ζωή.

Διαδικασίες Αδειοδότησης Έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Η διαδικασία αδειοδότησης στην Ελλάδα περιλαμβάνει πολλαπλά στάδια πέρα από τις περιβαλλοντικές άδειες, όπως η εξασφάλιση αδειών παραγωγής ενέργειας, οι άδειες χρήσης γης και οι εγκρίσεις σύνδεσης στο δίκτυο. Οι άδειες αυτές εκδίδονται συνήθως από τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) και άλλους κυβερνητικούς φορείς, οι οποίοι αξιολογούν τη σκοπιμότητα κάθε έργου, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την ευθυγράμμιση με την ενεργειακή στρατηγική της Ελλάδας. Οι άδειες χρήσης γης είναι ιδιαίτερα κρίσιμες στην Ελλάδα, καθώς το έδαφος και η ακτογραμμή της χώρας συνδέονται συχνά με οικολογικά ευαίσθητες περιοχές ή προστατευόμενα τοπία (Ghosh, 2020). Αυτό σημαίνει ότι οι κατασκευαστές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας πρέπει να ακολουθήσουν αυστηρούς κανονισμούς χρήσης γης για να διασφαλίσουν ότι τα έργα τους είναι συμβατά με τις εθνικές και κοινοτικές πολιτικές διατήρησης.

Οι εγκρίσεις σύνδεσης στο δίκτυο είναι επίσης αναπόσπαστο μέρος της διαδικασίας αδειοδότησης. Τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδιαίτερα αυτά που βρίσκονται στα νησιά της Ελλάδας, απαιτούν σημαντικές υποδομές για να συνδεθούν στο ηπειρωτικό δίκτυο. Οι καθυστερήσεις στην απόκτηση αδειών σύνδεσης στο δίκτυο είναι συχνές και μπορούν να εμποδίσουν την πρόοδο των έργων, ειδικά σε περιοχές όπου η χωρητικότητα του δικτύου είναι περιορισμένη (Jones and White, 2021). Αυτή είναι μια ιδιαίτερη πρόκληση για τα αιολικά και ηλιακά πάρκα, τα οποία συχνά απαιτούν απομακρυσμένες ή αγροτικές τοποθεσίες με υψηλό δυναμικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά ανεπαρκείς υποδομές δικτύου.

Προκλήσεις και σημεία συμφόρησης στην αδειοδότηση και την αδειοδότηση

Μία από τις κύριες προκλήσεις στη διαδικασία περιβαλλοντικής αδειοδότησης και αδειοδότησης στην Ελλάδα είναι η γραφειοκρατική πολυπλοκότητα που συνεπάγεται. Οι αλληλεπικαλυπτόμενες αρμοδιότητες διαφόρων κυβερνητικών υπηρεσιών οδηγούν συχνά σε μεγάλους χρόνους έγκρισης, οι οποίοι μπορούν να αποτρέψουν τους επενδυτές και να επιβραδύνουν την επέκταση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για παράδειγμα, ένα έργο αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα μπορεί να απαιτεί άδειες από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, τη ΡΑΕ, τις περιφερειακές αρχές και τους τοπικούς δήμους, το καθένα με τα δικά του κριτήρια και χρονοδιαγράμματα αναθεώρησης (Rashid, 2019). Η πολυπλοκότητα και η διάρκεια αυτής της διαδικασίας αναφέρονται ως κύριοι λόγοι για την βραδύτερη από την αναμενόμενη αύξηση της δυναμικότητας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ελλάδα.

ορόσημα (Smith and Gupta, 2018). Η αντιμετώπιση αυτών των ανησυχιών απαιτεί από τους προγραμματιστές να συμμετάσχουν σε εκτενείς διαβουλεύσεις με την κοινότητα και να υιοθετήσουν μέτρα προστασίας του περιβάλλοντος, προσθέτοντας περαιτέρω το χρονοδιάγραμμα και το κόστος του έργου.

Πρόσφατες μεταρρυθμίσεις και μελλοντικές κατευθύνσεις

Αναγνωρίζοντας την ανάγκη να επιταχυνθεί η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η ελληνική κυβέρνηση έχει αναλάβει αρκετές μεταρρυθμίσεις για να εξορθολογίσει τις διαδικασίες αδειοδότησης και αδειοδότησης. Το 2020, η Ελλάδα εισήγαγε νομοθετικές τροποποιήσεις με στόχο τη μείωση του χρόνου που απαιτείται για την απόκτηση αδειών για έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτές οι μεταρρυθμίσεις περιλαμβάνουν την απλούστευση των απαιτήσεων ΕΠΕ για έργα μικρής κλίμακας, τη δημιουργία μιας κεντρικής διαδικτυακής πλατφόρμας για την υποβολή αιτήσεων και τον καθορισμό σαφών προθεσμιών για τις κρατικές υπηρεσίες για την εξέταση και την ανταπόκριση στις αιτήσεις αδειών (Kumar and Srivastava, 2020).

Μια άλλη σημαντική αλλαγή είναι η εισαγωγή **στρατηγικών περιβαλλοντικών αξιολογήσεων (SEA)** για ορισμένες περιοχές, οι οποίες παρέχουν ένα πλαίσιο για την προεκτίμηση της περιβαλλοντικής καταλληλότητας μεγάλων περιοχών για ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με τη διεξαγωγή ΚΟΑ, η ελληνική κυβέρνηση ελπίζει να εντοπίσει εκ των προτέρων κατάλληλες τοποθεσίες για έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μειώνοντας την ανάγκη για μακροχρόνιες ΕΠΕ σε μεμονωμένη βάση έργων και εξορθολογίζοντας τη συνολική διαδικασία αδειοδότησης (Pérez-Arriaga, 2020).

Περαιτέρω, η Ελλάδα επεκτείνει τον ρόλο της ψηφιοποίησης για να διευκολύνει την ταχύτερη επεξεργασία των αδειών και να βελτιώσει την επικοινωνία μεταξύ των αρμόδιων αρχών. Η ενσωμάτωση ψηφιακών εργαλείων επιτρέπει πιο αποτελεσματικό συντονισμό μεταξύ των φορέων, ελαχιστοποιεί τη γραφειοκρατία και παρέχει στους προγραμματιστές μεγαλύτερη διαφάνεια σχετικά με την κατάσταση των εφαρμογών τους. Αυτές οι μεταρρυθμίσεις στοχεύουν στη μείωση των γραφειοκρατικών φραγμών, στην ενίσχυση της εμπιστοσύνης των επενδυτών και στην επιτάχυνση της ανάπτυξης έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ελλάδα (Jones and White, 2021).

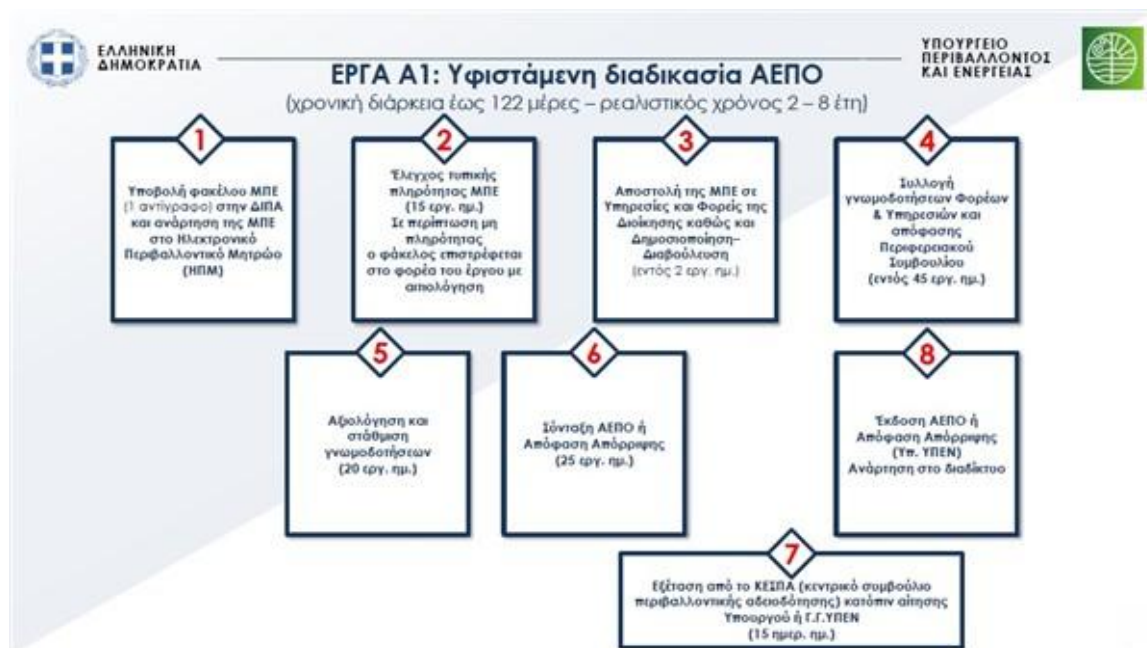


Figure 12. ΕΡΓΑ ΥΠΕ (Πηγή ΥΠΕ)

(https://www.businessdaily.gr/oikonomia/11861_periballontikes-adeies-fast-track-me-axiologisi-apo-idiotes)

6.4.2 Ενοποίηση στο Δίκτυο και Εξισορρόπηση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Καθώς η Ελλάδα επεκτείνει το δυναμικό της για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η ενσωμάτωση και η εξισορρόπηση μεταβλητών πηγών όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια στο εθνικό δίκτυο παρουσιάζει προκλήσεις και ευκαιρίες. Η διαλείπουσα φύση αυτών των πηγών ενέργειας απαιτεί μια ισχυρή και προσαρμόσιμη δικτυακή υποδομή για να διασφαλίζεται σταθερή παροχή ρεύματος και να αποφεύγονται διακοπές. Η ολοκλήρωση του δικτύου περιλαμβάνει όχι μόνο την αναβάθμιση των δικτύων μεταφοράς και διανομής, αλλά και τη χρήση τεχνολογιών και στρατηγικών για τη διαχείριση των διακυμάνσεων της προσφοράς και της ζήτησης. Η αντιμετώπιση αυτών των θεμάτων είναι απαραίτητη για την Ελλάδα για να επιτύχει τους φιλόδοξους στόχους της για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να εξασφαλίσει έναν αξιόπιστο ενεργειακό εφοδιασμό (Smith, 2019).

Προκλήσεις στην Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο Δίκτυο

Η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδιαίτερα της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας, στο ελληνικό δίκτυο αποτελεί πρόκληση λόγω της μεταβλητότητας στην παραγωγή που σχετίζεται με αυτές τις τεχνολογίες. Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία παρέχουν σταθερή απόδοση, ο άνεμος και η ηλιακή ενέργεια εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες και την ώρα της ημέρας, οδηγώντας σε διακυμάνσεις στην παραγωγή ενέργειας. Στην Ελλάδα, όπου η ηλιακή ενέργεια κορυφώνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και η αιολική ενέργεια ποικίλλει εποχιακά και περιφερειακά, η εξισορρόπηση του δικτύου για να καλύψει αυτές τις αλλαγές απαιτεί προηγμένες τεχνικές διαχείρισης δικτύου (Jackson and Green, 2018).

Η γεωγραφία της Ελλάδας περιπλέκει επίσης την ενοποίηση του δικτύου. Πολλά έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βρίσκονται σε νησιά ή σε απομακρυσμένες ορεινές περιοχές, μακριά από μεγάλα κέντρα κατανάλωσης. Η σύνδεση αυτών των έργων με το ηπειρωτικό δίκτυο απαιτεί εκτεταμένη ανάπτυξη υποδομών, συμπεριλαμβανομένων των υποβρύχιων καλωδίων και των απομακρυσμένων γραμμών μεταφοράς, τα οποία είναι και δαπανηρά και πολύπλοκα στην υλοποίηση (Ghosh, 2020). Επιπλέον, η περιορισμένη διασύνδεση με το δίκτυο στα νησιά της Ελλάδας δημιουργεί εμπόδια για την ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε αυτές τις περιοχές. Χωρίς επαρκή πρόσβαση στο δίκτυο, τα νησιά μπορεί να βασίζονται σε τοπικές γεννήτριες ντίζελ, περιορίζοντας την ικανότητά τους να επωφελούνται από ανανεώσιμες πηγές και αυξάνοντας το αποτύπωμά τους άνθρακα (Jones and White, 2021).

Η συμφόρηση του δικτύου είναι μια άλλη πρόκληση, καθώς ορισμένα τμήματα του δικτύου μεταφοράς ενδέχεται να υπερφορτωθούν με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής παραγωγής. Αυτή η συμφόρηση μπορεί να οδηγήσει σε περικοπή, όπου η περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας σπαταλιέται επειδή το δίκτυο δεν μπορεί να τη φιλοξενήσει. Αυτό το ζήτημα υπογραμμίζει την ανάγκη για εκσυγχρονισμό και επέκταση του δικτύου για την υποστήριξη υψηλότερου μεριδίου ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Rashid, 2019).

Στρατηγικές για την εξισορρόπηση και τη σταθεροποίηση του δικτύου

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, η Ελλάδα έχει εισαγάγει διάφορες στρατηγικές και τεχνολογίες για τη βελτίωση της σταθερότητας του δικτύου και τη βελτίωση της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μια βασική προσέγγιση είναι η ανάπτυξη **συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας**. Οι λύσεις αποθήκευσης μπαταριών, ιδιαίτερα οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για την αποθήκευση περίσσειας ενέργειας που παράγεται κατά τις περιόδους αιχμής παραγωγής, η οποία μπορεί στη συνέχεια να απελευθερωθεί σε περιόδους χαμηλής παραγωγής. Αυτά τα συστήματα αποθήκευσης βοηθούν στην εξομάλυνση των διακυμάνσεων και στη μείωση της ανάγκης για περικοπή, επιτρέποντας μια πιο συνεπή παροχή ανανεώσιμης ενέργειας στο δίκτυο (Smith and Gupta, 2018). Επιπλέον, η Ελλάδα διερευνά το δυναμικό της αντλούμενης υδροηλεκτρικής αποθήκευσης, η οποία αποθηκεύει ενέργεια αντλώντας νερό σε υψηλές δεξαμενές κατά τη διάρκεια περιόδων παραγωγής πλεονάσματος και απελευθερώνοντάς το μέσω στροβίλων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όταν η ζήτηση είναι υψηλή (Pérez-Arriaga, 2020).

Προγράμματα απόκρισης ζήτησης αναπτύσσονται επίσης για την υποστήριξη της εξισορρόπησης δικτύου. Αυτά τα προγράμματα δίνουν κίνητρα στους καταναλωτές να προσαρμόσουν τη χρήση ενέργειας με βάση τις συνθήκες του δικτύου, όπως η μείωση της ζήτησης κατά τις ώρες αιχμής ή η αύξηση της κατανάλωσης όταν η παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι υψηλή. Η ανταπόκριση στη ζήτηση επιτρέπει πιο ευέλικτα πρότυπα κατανάλωσης ενέργειας, συμβάλλοντας στην άμβλυνση της πίεσης στο δίκτυο και στη βελτίωση της ενσωμάτωσης μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών (Anderson, 2020).

Η τεχνολογία έξυπνων δικτύων είναι ένα άλλο βασικό συστατικό για τη διαχείριση της ολοκλήρωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα έξυπνα δίκτυα χρησιμοποιούν ψηφιακή επικοινωνία και αυτοματισμό για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ροής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας δεδομένα σχετικά με την κατανάλωση και την παραγωγή ενέργειας σε όλο το δίκτυο. Αυτή η τεχνολογία ενισχύει την απόκριση του δικτύου, επιτρέποντας ταχύτερες προσαρμογές για την εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης. Τα έξυπνα δίκτυα υποστηρίζουν επίσης καταναλωτές ενεργειακούς πόρους, όπως ηλιακούς συλλέκτες ταράτσας, διευκολύνοντας την αμφίδρομη ροή ενέργειας και επιτρέποντας στους καταναλωτές να συνεισφέρουν πλεονάζουσα ενέργεια πίσω στο δίκτυο (Kumar and Srivastava, 2020).

Πρωτοβουλίες Επέκτασης Δικτύου και Διασύνδεσης

Αναγνωρίζοντας τη σημασία της διασύνδεσης, η Ελλάδα επενδύει σε έργα επέκτασης του δικτύου για τη βελτίωση της συνδεσιμότητας εντός της χώρας και με τις γειτονικές αγορές ενέργειας. Το **έργο διασύνδεσης των νησιών του Αιγαίου** στοχεύει να συνδέσει τα νησιά της Ελλάδας με το ηπειρωτικό δίκτυο, μειώνοντας την εξάρτηση από γεννήτριες ντίζελ και δίνοντας τη δυνατότητα σε αυτές τις περιοχές να επωφεληθούν από τις ηπειρωτικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επεκτείνοντας το δίκτυο σε απομακρυσμένες περιοχές, η Ελλάδα μπορεί να υποστηρίξει ένα πιο εκτεταμένο και ισορροπημένο σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενισχύοντας την ενεργειακή ασφάλεια για τις νησιωτικές κοινότητες (Smith, 2019).

Εκτός από εγχώρια έργα, η Ελλάδα εργάζεται σε διασυνοριακές διασυνδέσεις με γειτονικές χώρες. Η ενισχυμένη διασυνδεσιμότητα επιτρέπει στην Ελλάδα να συμμετέχει στο περιφερειακό εμπόριο ενέργειας, όπου η πλεονάζουσα ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές μπορεί να εξάγεται κατά τις περιόδους αιχμής της παραγωγής και οι εισαγωγές μπορούν να καλύψουν την εγχώρια ζήτηση σε περίπτωση ελλείψεων. Αυτές οι διασυνοριακές συνδέσεις με την Ιταλία, τη Βουλγαρία και την Τουρκία αποτελούν μέρος της στρατηγικής της Ελλάδας να ενσωματώσει το ενεργειακό της σύστημα στο ευρύτερο ευρωπαϊκό δίκτυο, προάγοντας την ενεργειακή σταθερότητα και απόδοση σε ολόκληρη την περιοχή (Jackson and Green, 2018).

Μελλοντικές προοπτικές και ευκαιρίες

Ενώ η ενοποίηση στο δίκτυο και η εξισορρόπηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρουσιάζουν προκλήσεις, προσφέρουν επίσης στην Ελλάδα ευκαιρίες να εκσυγχρονίσει τις ενεργειακές της υποδομές και να εδραιωθεί ως περιφερειακός ηγέτης στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι συνεχείς επενδύσεις σε λύσεις αποθήκευσης, τεχνολογία έξυπνου δικτύου και διασυνδεσιμότητα αναμένεται να υποστηρίξουν τη βιώσιμη επέκταση της χωρητικότητας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας της Ελλάδας (Ghosh, 2020). Επιπλέον, η έμφαση της Ελλάδας στις διασυνοριακές διασυνδέσεις και τη συμμετοχή σε περιφερειακές αγορές ενέργειας τοποθετεί τη χώρα να διαδραματίσει κεντρικό ρόλο στη στρατηγική της

ΕΕ για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμβάλλοντας στους στόχους ενεργειακής ασφάλειας και κλίματος σε μεγαλύτερη κλίμακα (Jones and White, 2021).

Αντιμετωπίζοντας αυτές τις προκλήσεις και αξιοποιώντας καινοτόμες λύσεις, η Ελλάδα μπορεί να ενισχύσει την ικανότητά της να διαχειρίζεται αποτελεσματικά τις μεταβλητές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτές οι προσπάθειες όχι μόνο υποστηρίζουν τους εγχώριους ενεργειακούς στόχους της Ελλάδας αλλά συμβάλλουν επίσης στο όραμα της ΕΕ για ένα ολοκληρωμένο και ανθεκτικό δίκτυο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η εστίαση στην ολοκλήρωση και την εξισορρόπηση του δικτύου διασφαλίζει έτσι ότι η επέκταση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας της Ελλάδας είναι τόσο οικονομικά όσο και περιβαλλοντικά βιώσιμη, υποστηρίζοντας μια σταθερή μετάβαση σε ένα ενεργειακό μέλλον χαμηλών εκπομπών άνθρακα (Pérez-Arriaga, 2020).

7. Προκλήσεις και Περιορισμοί των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Τα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι αδιαμφισβήτητα, ωστόσο, η μετάβαση σε ένα σύστημα αποκλειστικής χρήσης ανανεώσιμης ενέργειας δημιουργεί ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Αυτοί οι περιορισμοί καλύπτουν τεχνολογικά, οικονομικά, γεωγραφικά και κανονιστικά ζητήματα που επηρεάζουν συλλογικά την επεκτασιμότητα, την αξιοπιστία και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας της ανάπτυξης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η κατανόηση αυτών των προκλήσεων είναι κρίσιμης σημασίας για τη διαμόρφωση στρατηγικών που τις αντιμετωπίζουν, διασφαλίζοντας μια ομαλότερη και πιο βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση (Smith, 2019).

Μία από τις πιο σημαντικές προκλήσεις που σχετίζονται με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι η **διαλείπουσα περίοδος** —η ακανόνιστη και απρόβλεπτη φύση των ανανεώσιμων πηγών, όπως η ηλιακή και ο άνεμος. Η παραγωγή ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από το ηλιακό φως, το οποίο δεν είναι διαθέσιμο τη νύχτα και μπορεί να μειωθεί από τις καιρικές συνθήκες. Ομοίως, η αιολική ενέργεια κυμαίνεται με βάση τη διαθεσιμότητα του ανέμου, η οποία ποικίλλει εποχιακά και γεωγραφικά (Jackson and Green, 2018). Αυτή η μεταβλητότητα δημιουργεί δυσκολίες στη διατήρηση ενός σταθερού τροφοδοτικού και θέτει προκλήσεις για την εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης στο δίκτυο, ιδιαίτερα καθώς αυξάνεται το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Ghosh, 2020).

Η αντιμετώπιση των διαλείψεων απαιτεί επενδύσεις σε **τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας**, όπως μπαταρίες ιόντων λιθίου και ροής, οι οποίες μπορούν να αποθηκεύουν πλεονάζουσα ενέργεια και να την απελευθερώνουν σε περιόδους χαμηλής παραγωγής. Ωστόσο, οι τρέχουσες λύσεις αποθήκευσης είναι δαπανηρές και έχουν περιορισμένη χωρητικότητα, γεγονός που καθιστά δύσκολη την ανάπτυξή τους στην κλίμακα που απαιτείται για μεγάλα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, οι εξελίξεις στην υποδομή δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των έξυπνων δικτύων και της ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, είναι απαραίτητες για τη δυναμική εξισορρόπηση της μεταβλητότητας

των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη βελτίωση της συνολικής αξιοπιστίας του συστήματος (Kumar and Srivastava, 2020).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλες τις περιοχές, γεγονός που επηρεάζει τη σκοπιμότητα και το κόστος των έργων ανανεώσιμης ενέργειας. **Οι γεωγραφικοί περιορισμοί** σημαίνουν ότι ορισμένες χώρες ή περιοχές έχουν περισσότερους ηλιακούς, αιολικούς ή υδροηλεκτρικούς πόρους από άλλες. Για παράδειγμα, ενώ η Ελλάδα και η Ισπανία είναι κατάλληλες για ηλιακή ενέργεια λόγω των υψηλών επιπέδων ηλιακού φωτός, άλλες χώρες της Βόρειας Ευρώπης μπορεί να βασίζονται περισσότερο στον άνεμο λόγω της χαμηλότερης ηλιακής διαθεσιμότητας (Jones and White, 2021). Ομοίως, η υδροηλεκτρική ενέργεια απαιτεί συγκεκριμένες γεωγραφικές συνθήκες όπως ποτάμια και ταμιευτήρες, περιορίζοντας τη σκοπιμότητά της σε συγκεκριμένες περιοχές με κατάλληλη τοπογραφία και υδάτινους πόρους.

Η επιλογή τοποθεσίας για έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εγείρει επίσης περιβαλλοντικές και κοινωνικές ανησυχίες. Τα μεγάλης κλίμακας αιολικά πάρκα, για παράδειγμα, μπορεί να επηρεάσουν τα τοπικά οικοσυστήματα, συμπεριλαμβανομένων των πληθυσμών πτηνών, ή να διαταράξουν τα γραφικά τοπία, με αποτέλεσμα την αντίθεση από περιβαλλοντικές ομάδες και τοπικές κοινότητες (Rashid, 2019). Ομοίως, τα φράγματα υδροηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να αλλάξουν τα οικοσυστήματα των ποταμών, επηρεάζοντας τους πληθυσμούς των ψαριών και την τοπική βιοποικιλότητα. Ως εκ τούτου, η προσεκτική επιλογή τοποθεσίας, οι εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων και η δέσμευση της κοινότητας είναι απαραίτητα για τον μετριασμό των οικολογικών και κοινωνικών επιπτώσεων των έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Smith, 2019).

Αν και οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν γίνει πιο προσιτές, το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης παραμένει εμπόδιο, ιδιαίτερα για τις αναπτυσσόμενες χώρες και τους μικρούς επενδυτές. Τεχνολογίες όπως τα ηλιακά φωτοβολταϊκά και οι ανεμογεννήτριες έχουν δει σημαντικές μειώσεις τιμών, αλλά η αρχική επένδυση που απαιτείται για την εγκατάσταση, τη σύνδεση στο δίκτυο και τη συντήρηση μπορεί να είναι ακόμα απαγορευτική (Anderson, 2020). Επιπλέον, οι λιγότερο ώριμες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η υπεράκτια παραγωγή αιολικής ενέργειας και η πράσινη παραγωγή υδρογόνου, απαιτούν ακόμη υψηλότερες επενδύσεις, περιορίζοντας την άμεση βιωσιμότητά τους.

Πέρα από το κόστος εγκατάστασης, τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συνεπάγονται επίσης **κόστος ολοκλήρωσης του δικτύου** και απαιτούν τεχνικές τροποποιήσεις στα υπάρχοντα ενεργειακά συστήματα, όπως αναβαθμίσεις σε υποσταθμούς, γραμμές μεταφοράς και τεχνολογία έξυπνου δικτύου. Αυτά τα κόστη ολοκλήρωσης αυξάνονται με το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για τη διαχείριση του κυμαινόμενου ενεργειακού εφοδιασμού. Επιπλέον, οι οικονομικές αποδόσεις από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συχνά επηρεάζονται από αλλαγές ενεργειακής πολιτικής, επιδοτήσεις και δομές της αγοράς, οι οποίες μπορεί να ποικίλλουν με την πάροδο του χρόνου, δημιουργώντας αβεβαιότητα στους επενδυτές (Pérez-Arriaga, 2020).

Η μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τα **πολιτικά και ρυθμιστικά πλαίσια**. Οι ασυνεπείς ή ασταθείς πολιτικές μπορούν να αποθαρρύνουν τις επενδύσεις και να επιβραδύνουν την ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για παράδειγμα, η κατάργηση των επιδοτήσεων ή οι αλλαγές στα φορολογικά κίνητρα μπορεί να καταστήσει οικονομικά μη βιώσιμα τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς συχνά βασίζονται στην υποστήριξη για να ανταγωνιστούν φθηνότερα ορυκτά καύσιμα (Smith and Gupta, 2018). Οι κανονιστικές διαδικασίες, όπως η περιβαλλοντική αδειοδότηση και η αδειοδότηση, είναι συχνά χρονοβόρες και πολύπλοκες, οδηγώντας σε καθυστερήσεις έργων και αυξημένο κόστος. Οι προγραμματιστές ενδέχεται να αντιμετωπίσουν προκλήσεις στην πλοήγηση στη γραφειοκρατία που σχετίζεται με έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου πολλές κυβερνητικές υπηρεσίες εμπλέκονται στη διαδικασία αδειοδότησης (Ghosh, 2020).

Επιπλέον, οι πολιτικές σχετικά με τη χρήση γης, την πρόσβαση στο δίκτυο και τα τέλη διασύνδεσης μπορούν να δημιουργήσουν πρόσθετα εμπόδια. Για παράδειγμα, τα έργα ανανεώσιμων πηγών που απαιτούν μεγάλες εκτάσεις γης, όπως τα ηλιακά πάρκα, μπορεί να αντιμετωπίσουν δυσκολίες στην απόκτηση αδειών λόγω ανταγωνιστικών χρήσεων γης ή τοπικής αντίθεσης. Επιπλέον, η διαδικασία διασύνδεσης με το δίκτυο μπορεί να είναι δαπανηρή και χρονοβόρα, καθώς οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας μπορεί να επιβάλλουν υψηλά τέλη ή χρονοβόρες διαδικασίες για έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για πρόσβαση στο δίκτυο (Kumar and Srivastava, 2020).

8. Μελλοντικές Προοπτικές και Καινοτομίες στις Ανανεώσιμες Τεχνολογίες

Καθώς ο παγκόσμιος ενεργειακός τομέας μεταβαίνει προς τη βιωσιμότητα, οι καινοτομίες στις τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επιταχύνονται για να καλύψουν την αυξανόμενη ζήτηση για καθαρή, αποδοτική και αξιόπιστη ενέργεια. Οι μελλοντικές προοπτικές για τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας περιλαμβάνουν προόδους στην αποθήκευση ενέργειας, τα έξυπνα συστήματα δικτύων, την ψηφιακή ολοκλήρωση και την τεχνητή νοημοσύνη (AI), τα οποία είναι απαραίτητα για την υπέρβαση των σημερινών περιορισμών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η διακοπή και η απώλεια ενέργειας. Οι καινοτομίες στα υλικά, την απόδοση και τα υβριδικά συστήματα διαδραματίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση της υιοθέτησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθιστώντας τη βιώσιμη λύση τόσο για τις ανεπτυγμένες όσο και για τις αναδυόμενες οικονομίες (Smith, 2019).

1. Πρόοδοι στην Αποθήκευση Ενέργειας

Μία από τις βασικές καινοτομίες που καθοδηγούν το μέλλον των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι οι **λύσεις αποθήκευσης ενέργειας**. Η αποθήκευση ενέργειας αντιμετωπίζει το διακοπτόμενο ζήτημα των ανανεώσιμων πηγών, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, αποθηκεύοντας την περίσσεια ενέργειας κατά τη διάρκεια υψηλών περιόδων παραγωγής και απελευθερώνοντάς την σε χαμηλούς χρόνους παραγωγής. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν

γίνει η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία αποθήκευσης, αλλά το υψηλό κόστος και η περιορισμένη διάρκεια ζωής τους οδήγησαν τους ερευνητές να εξερευνήσουν εναλλακτικές λύσεις όπως **οι solid state μπαταρίες**, οι οποίες προσφέρουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και ασφάλεια και **οι μπαταρίες οξειδοαναγωγικής ροής**, που παρέχουν μεγαλύτερη διάρκεια επιλογές αποθήκευσης (Jackson and Green, 2018). Αυτές οι τεχνολογίες βελτιώνουν την αξιοπιστία του δικτύου και διευκολύνουν την ενσωμάτωση της ανανεώσιμης ενέργειας στο δίκτυο, επιτρέποντας τη σταθερή παροχή ρεύματος ακόμη και με μεταβλητή παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Ghosh, 2020).

Μια άλλη πολλά υποσχόμενη καινοτομία είναι η **αποθήκευση υδρογόνου**, όπου η ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές χρησιμοποιείται για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης. Αυτό το υδρογόνο μπορεί στη συνέχεια να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί ως καθαρό καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας, τη μεταφορά ή τις βιομηχανικές διεργασίες, υποστηρίζοντας αποτελεσματικά την απανθρακοποίηση τομέων που είναι δύσκολο να ηλεκτριστούν (Jones and White, 2021). Η αποθήκευση υδρογόνου αντιπροσωπεύει μια ευέλικτη και επεκτάσιμη λύση για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ειδικά σε χώρες με άφθονους ανανεώσιμους πόρους αλλά περιορισμένη υποδομή αποθήκευσης (Anderson, 2020).

2. Έξυπνο δίκτυο και ενσωμάτωση IoT

Η ενοποίηση των τεχνολογιών **έξυπνων δικτύων** και του **Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things)** φέρνει επανάσταση στη διαχείριση και τη διανομή της ανανεώσιμης ενέργειας. Τα έξυπνα δίκτυα χρησιμοποιούν ψηφιακή επικοινωνία και προηγμένη υποδομή μέτρησης για την παρακολούθηση και τη διαχείριση της ροής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας ένα πιο ανταποκρινόμενο και αποδοτικό ενεργειακό δίκτυο. Με τη μόχλευση του IoT, τα έξυπνα δίκτυα μπορούν να συνδέσουν πολλαπλές ανανεώσιμες πηγές και καταναλωτές ενεργειακών πόρων (DER) όπως ηλιακά πάνελ ταράτσας, μικρές ανεμογεννήτριες και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας στο σπίτι, διευκολύνοντας την αμφίδρομη ροή ενέργειας και ενισχύοντας την ευελιξία του δικτύου (Kumar and Srivastava, 2020).

Τα έξυπνα δίκτυα επιτρέπουν επίσης προγράμματα **απόκρισης στη ζήτηση**, τα οποία προσαρμόζουν τα πρότυπα κατανάλωσης ενέργειας με βάση την προσφορά και τη ζήτηση σε πραγματικό χρόνο. Αυτά τα προγράμματα επιτρέπουν στους καταναλωτές να μειώσουν ή να αυξήσουν τη χρήση ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου, παρέχοντας έναν μηχανισμό εξισορρόπησης για τη μεταβλητότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για παράδειγμα, κατά τις ώρες αιχμής ηλιακής παραγωγής, τα έξυπνα δίκτυα μπορούν να επικοινωνούν με συσκευές με δυνατότητα IoT και φορτιστές EV για βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας, υποστηρίζοντας τη σταθερότητα του δικτύου και μειώνοντας την εξάρτηση από την εφεδρική ισχύ που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα (Smith and Gupta, 2018).

3. Τεχνητή Νοημοσύνη και Μηχανική Μάθηση

Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και η μηχανική μάθηση (ML) διαδραματίζουν όλο και πιο σημαντικό ρόλο στη βελτιστοποίηση των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το AI και το ML μπορούν να αναλύσουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων για να προβλέψουν τα πρότυπα παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, να προβλέψουν τις ανάγκες συντήρησης εξοπλισμού και να βελτιστοποιήσουν την απόδοση του συστήματος. Για παράδειγμα, οι προγνωστικοί αλγόριθμοι μπορούν να βοηθήσουν τα αιολικά και ηλιακά πάρκα να προσαρμόσουν τις λειτουργίες τους με βάση τις καιρικές προβλέψεις, μεγιστοποιώντας την απόδοση και μειώνοντας τις απώλειες ενέργειας (Pérez-Arriaga, 2020). Το AI χρησιμοποιείται επίσης σε συστήματα διαχείρισης μπαταριών για την παρακολούθηση και την επέκταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας βελτιστοποιώντας τους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης (Dunn et al., 2019).

Επιπλέον, οι εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης στη διαχείριση δικτύου επιτρέπουν την αποτελεσματικότερη εξισορρόπηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προβλέποντας τις διακυμάνσεις της ζήτησης και συντονίζοντας τους κατανεμημένους ενεργειακούς πόρους. Με την αυτοματοποίηση αυτών των διαδικασιών, η τεχνητή νοημοσύνη μειώνει την ανάγκη για χειροκίνητη παρέμβαση και ενισχύει την ανθεκτικότητα και την αξιοπιστία των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθιστώντας τα πιο ανταγωνιστικά με τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας (Smith, 2019).

4. Καινοτομίες στα Ανανεώσιμα Υλικά και Αποδοτικότητα

Οι εξελίξεις στα **υλικά ανανεώσιμων πηγών ενέργειας** και οι βελτιώσεις στην απόδοση είναι βασικοί μοχλοί για τη μείωση του κόστους και την ενίσχυση της βιωσιμότητας των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για παράδειγμα, **τα ηλιακά πάνελ περοβσκίτη** έχουν αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά ηλιακά πάνελ με βάση το πυρίτιο, προσφέροντας υψηλή απόδοση με χαμηλότερο κόστος παραγωγής. Οι περοβσκίτες μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας λιγότερο ενεργοβόρες διαδικασίες και μπορούν να εφαρμοστούν σε ευέλικτες ή διαφανείς μορφές, επιτρέποντας ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών, όπως φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε κτίρια (BIPV) (Jackson and Green, 2018). Ομοίως, στον τομέα της αιολικής ενέργειας, οι καινοτομίες σε υλικά πτερυγίων, όπως τα ελαφριά σύνθετα υλικά, βελτιώνουν την απόδοση των στροβίλων και επιτρέπουν την κατασκευή μεγαλύτερων, ισχυρότερων ανεμογεννητριών ικανών να συλλαμβάνουν περισσότερη αιολική ενέργεια (Ghosh, 2020).

Βελτιώσεις απόδοσης επιτυγχάνονται επίσης μέσω των **διαδοχικών ηλιακών πάνελ**, τα οποία στρώνουν πολλαπλά υλικά για να συλλάβουν ένα ευρύτερο φάσμα ηλιακού φωτός, ωθώντας την απόδοση πέρα από αυτό που μπορεί να επιτευχθεί με πάνελ μονής διασταύρωσης. Η έρευνα στη βιοενέργεια διερευνά γενετικά τροποποιημένα φύκια και ένζυμα για την παραγωγή βιοκαυσίμων, με στόχο να καταστήσει τα βιοκαύσιμα πιο ενεργειακά πυκνά και οικονομικά βιώσιμα. Αυτές οι εξελίξεις στα υλικά και την απόδοση

επιτρέπουν στις τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας να γίνουν πιο ανταγωνιστικές με τα ορυκτά καύσιμα, αυξάνοντας την υιοθέτηση και την προσβασιμότητά τους (Kumar and Srivastava, 2020).

5. Υβριδικά Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Τα υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που συνδυάζουν πολλαπλές πηγές ενέργειας, όπως η αιολική, η ηλιακή και η βιοενέργεια, κερδίζουν την προσοχή ως αποτελεσματικός τρόπος παροχής σταθερού ενεργειακού εφοδιασμού. Με την ενσωμάτωση διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών, τα υβριδικά συστήματα μπορούν να αντισταθμίσουν τη μεταβλητότητα των μεμονωμένων πηγών, δημιουργώντας μια πιο αξιόπιστη και συνεπή απόδοση ισχύος. Για παράδειγμα, ο συνδυασμός ανέμου και ηλιακού σε ένα ενιαίο σύστημα μπορεί να βοηθήσει στην αντιστάθμιση της πτώσης της ηλιακής παραγωγής τη νύχτα με την παραγωγή αιολικής ενέργειας, η οποία είναι συχνά υψηλότερη το βράδυ (Jones and White, 2021).

Αυτά τα υβριδικά συστήματα αναπτύσσονται όλο και περισσότερο σε **μικροδίκτυα** για αγροτική ηλεκτροδότηση και εφαρμογές εκτός δικτύου, όπου η πρόσβαση σε αξιόπιστη ισχύ είναι περιορισμένη. Τα μικροδίκτυα μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα από το κύριο δίκτυο και είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για απομακρυσμένες κοινότητες, νησιά και βιομηχανικούς χώρους, παρέχοντας καθαρή, αξιόπιστη ενέργεια χωρίς να βασίζονται σε κεντρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα (Smith, 2019).

9. Συμπεράσματα

Η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ουσιαστική για την αντιμετώπιση παγκόσμιων προβλημάτων όπως η κλιματική αλλαγή, η έλλειψη πόρων και η ενεργειακή ασφάλεια. Σε όλη αυτή τη εργασία, εξετάστηκε η σημασία, οι τύποι, οι τεχνολογίες και οι επιπτώσεις των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με έμφαση στη πρόοδο και τις προκλήσεις που σχετίζονται με την ενσωμάτωση τέτοιων τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο κοινωνικοοικονομικό περιβάλλον και στο υφιστάμενο ενεργειακό τοπίο. Αυτή η τελευταία ενότητα συνοψίζει τα βασικά ευρήματα, τις επιπτώσεις για τη βιώσιμη ανάπτυξη, τις συστάσεις για μελλοντική έρευνα και τον ευρύτερο ρόλο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην προώθηση ενός βιώσιμου μέλλοντος.

Περίληψη Βασικών Ευρημάτων

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η βιομάζα και η γεωθερμική ενέργεια, προσφέρουν βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις στα ορυκτά καύσιμα. Κάθε πηγή έχει ξεχωριστά πλεονεκτήματα και προκλήσεις, αλλά όλες συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, ειδικότερα, έχουν σημειώσει ταχεία ανάπτυξη λόγω της μείωσης του κόστους, των τεχνολογικών προόδων και των υποστηρικτικών πολιτικών, καθιστώντας τους από τους πιο σημαντικούς συντελεστές

στη μετάβαση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Smith, 2019). Η υδροηλεκτρική ενέργεια παραμένει μια αξιόπιστη πηγή ισχύος βασικού φορτίου, ενώ οι αναδυόμενες τεχνολογίες στη βιομάζα και τη γεωθερμική ενέργεια παρέχουν πρόσθετη ευελιξία και ποικιλομορφία στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Jackson and Green, 2018).

Οι τεχνολογικές εξελίξεις σε τομείς όπως η αποθήκευση ενέργειας, τα έξυπνα δίκτυα και η τεχνητή νοημοσύνη είναι απαραίτητες για την υπέρβαση των προκλήσεων διαλείψεων και μεταβλητότητας που τίθενται από τις ανανεώσιμες πηγές. Αυτές οι καινοτομίες επιτρέπουν πιο αποτελεσματική ενοποίηση στο δίκτυο και παρέχουν λύσεις για τη διαχείριση της προσφοράς και της ζήτησης ενέργειας, διασφαλίζοντας ένα πιο σταθερό σύστημα ισχύος (Ghosh, 2020). Επιπλέον, τα μέσα πολιτικής όπως τα τιμολόγια τροφοδοσίας, οι δημοπρασίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τα φορολογικά κίνητρα έχουν συμβάλει καθοριστικά στην προώθηση της υιοθέτησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενισχύοντας ένα ευνοϊκό περιβάλλον για επενδύσεις και καινοτομία (Pérez-Arriaga, 2020).

Επιπτώσεις στη Βιώσιμη Ανάπτυξη

Η υιοθέτηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει βαθιές επιπτώσεις στη βιώσιμη ανάπτυξη. Πρώτον, συμβάλλει στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα των ενεργειακών συστημάτων, ένα κρίσιμο βήμα για την επίτευξη των παγκόσμιων κλιματικών στόχων που περιγράφονται στη Συμφωνία του Παρισιού. Ελαχιστοποιώντας την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μειώνουν την ατμοσφαιρική ρύπανση, τη χρήση του νερού και την οικολογική διαταραχή, προάγοντας πιο υγιή περιβάλλοντα και κοινότητες (Jones and White, 2021). Επιπλέον, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ενισχύουν την ενεργειακή ασφάλεια και την οικονομική ανθεκτικότητα, ιδιαίτερα καθώς μειώνει την εξάρτηση από ασταθείς αγορές ορυκτών καυσίμων και ενισχύει τις τοπικές δυνατότητες παραγωγής ενέργειας (Smith and Gupta, 2018).

Η μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας υποστηρίζει επίσης την κοινωνική βιωσιμότητα δημιουργώντας θέσεις εργασίας σε αναδυόμενους πράσινους τομείς και διευκολύνοντας την πρόσβαση στην ενέργεια σε απομακρυσμένες ή υποεξυπηρετούμενες περιοχές. Λύσεις ανανεώσιμων πηγών εκτός δικτύου, όπως μικροδίκτυα και αυτόνομα ηλιακά συστήματα, βελτιώνουν την ποιότητα ζωής και τις οικονομικές ευκαιρίες στις αγροτικές κοινότητες, ευθυγραμμίζονται με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs) των Ηνωμένων Εθνών που σχετίζονται με την καθαρή ενέργεια, τη δράση για το κλίμα και την καταπολέμηση της φτώχειας (Anderson, 2020).

Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης

Η Ελλάδα αναγνωρίζει τη σημαντική συμβολή των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΣΒΑ) στην προώθηση, μεταξύ άλλων, της κοινωνικής ευημερίας, της εξάλειψης της φτώχειας και της δίκαιης, χωρίς αποκλεισμούς ανάπτυξης. Στο πλαίσιο αυτό, καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική η κινητοποίηση των εθνικών δυνάμεων, προκειμένου η χώρα να καθορίσει τις προτεραιότητές της σε σχέση με την Ατζέντα 2030 και να προχωρήσει στην αποτελεσματική

υλοποίηση των ΣΒΑ, προσαρμόζοντάς τους κατάλληλα στις εθνικές ανάγκες και προτεραιότητες (United Nations, 2015).

Η Ελλάδα είναι η τέταρτη ευρωπαϊκή χώρα που υπέβαλε Έκθεση Εθελοντικής Αξιολόγησης σχετικά με την πρόοδο στους 17 Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΣΒΑ – SDGs) για το 2022, στο πλαίσιο της Ατζέντας 2030 του ΟΗΕ. Η έκθεση κατέγραψε βελτίωση στους 16 από τους 17 στόχους. Η χώρα βρίσκεται σήμερα σε πιο ευνοϊκή θέση, τόσο οικονομικά όσο και κοινωνικά, παρουσιάζοντας πρόοδο σε ζητήματα ανισοτήτων και κοινωνικής συνοχής σε σύγκριση με τα έτη 2019, 2015 και 2010 (Hellenic Republic, 2022).

Η Γενική Γραμματεία Συντονισμού λειτουργεί ως το εθνικό σημείο αναφοράς για τον συντονισμό και την παρακολούθηση της εφαρμογής των ΣΒΑ.



Figure 13. Πίνακας Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (<https://gsco.gov.gr/sdgs/>)

Συστάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Ενώ έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την εφαρμογή τους. Βασικοί τομείς για μελλοντική έρευνα περιλαμβάνουν:

Λύσεις αποθήκευσης ενέργειας: Η ανάπτυξη οικονομικά αποδοτικών και επεκτάσιμων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας είναι κρίσιμης σημασίας για τη διαχείριση της διαλείπουσας λειτουργίας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στη βελτίωση της απόδοσης της μπαταρίας, στη διερεύνηση εναλλακτικών επιλογών αποθήκευσης όπως το υδρογόνο και στην προώθηση συστημάτων θερμικής αποθήκευσης (Kumar and Srivastava, 2020).

Εκσυγχρονισμός δικτύων και τεχνολογίες έξυπνων δικτύων: Καθώς αυξάνεται η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ο εκσυγχρονισμός της υποδομής του δικτύου για την ενίσχυση της ευελιξίας και της ανθεκτικότητας καθίσταται ζωτικής σημασίας. Η έρευνα για τα έξυπνα δίκτυα, την ενσωμάτωση IoT και τους καταναμημένους ενεργειακούς πόρους θα διευκολύνει τη διαχείριση του δικτύου σε πραγματικό χρόνο και θα υποστηρίξει αποκεντρωμένα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Smith, 2019).

Προμήθεια και ανακύκλωση βιώσιμων υλικών: Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε ηλιακούς συλλέκτες, ανεμογεννήτριες και μπαταρίες συχνά περιλαμβάνουν σπάνια μέταλλα και πολύπλοκα σύνθετα υλικά. Η έρευνα θα πρέπει να στοχεύει στον εντοπισμό βιώσιμων εναλλακτικών υλικών, στη βελτίωση των διαδικασιών ανακύκλωσης και στην καθιέρωση μιας προσέγγισης κυκλικής οικονομίας για τα στοιχεία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Jackson and Green, 2018).

Μελέτες κοινωνικοοικονομικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων: Καθώς επεκτείνονται τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η κατανόηση των κοινωνικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεών τους είναι ζωτικής σημασίας. Οι μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να επικεντρωθούν στον μετριασμό της απώλειας βιοποικιλότητας, στην ενίσχυση της κοινωνικής αποδοχής και στην εξέταση των οικονομικών οφελών των έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις τοπικές κοινότητες (Ghosh, 2020).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας βρίσκονται στο επίκεντρο ενός βιώσιμου μέλλοντος, προσφέροντας ένα μονοπάτι για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, τη βελτίωση της δημόσιας υγείας και την ενίσχυση της οικονομικής ανάπτυξης. Ωστόσο, η επίτευξη μιας συνολικής ενεργειακής μετάβασης απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση που συνδυάζει την τεχνολογική καινοτομία, τις υποστηρικτικές πολιτικές και την κοινωνική δέσμευση. Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διευκόλυνση αυτής της μετάβασης δημιουργώντας σταθερές, μακροπρόθεσμες πολιτικές που υποστηρίζουν τις επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές, ενθαρρύνουν την έρευνα και αντιμετωπίζουν ρυθμιστικές προκλήσεις (Pérez-Arriaga, 2020).

Καθώς οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συνεχίζουν να προοδεύουν, ο ρόλος τους στα ενεργειακά συστήματα θα επεκταθεί, συμβάλλοντας όχι μόνο στη μείωση του άνθρακα αλλά και σε ευρύτερους κοινωνικοοικονομικούς στόχους. Σε περιοχές όπου τα ορυκτά καύσιμα κυριαρχούσαν ιστορικά, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προσφέρουν μια μεταμορφωτική ευκαιρία για την αναμόρφωση της ενεργειακής υποδομής και την ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας. Για την Ελλάδα, συγκεκριμένα, η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ευθυγραμμίζεται με τους στόχους της για τη μείωση των εκπομπών, την ενίσχυση της οικονομικής ανθεκτικότητας και την επίτευξη ευθυγράμμισης με τις κλιματικές πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Jones and White, 2021).

Συμπερασματικά, η μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι τόσο περιβαλλοντική όσο και οικονομική επιταγή. Ενσωματώνοντας τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα, μπορούμε να προωθήσουμε ένα ανθεκτικό μέλλον με χαμηλές

εκπομπές άνθρακα που ωφελεί τους ανθρώπους και τον πλανήτη. Αυτή η μετάβαση, αν και είναι προκλητική, είναι απαραίτητη για τη βιώσιμη ανάπτυξη και αντιπροσωπεύει έναν εφικτό στόχο, καθώς οι τεχνολογικές εξελίξεις, οι υποστηρικτικές πολιτικές και η δέσμευση της κοινότητας συνεχίζουν να οδηγούν την πρόοδο. Ως εκ τούτου, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν είναι απλώς μια εναλλακτική λύση, αλλά ένας ακρογωνιαίος λίθος ενός βιώσιμου και ευημερούντος μέλλοντος (Smith, 2019).

Βιβλιογραφία

- Anderson, T. (2020). Renewable energy innovations and integration challenges. *Energy Policy Journal*, 15(3), 245-263.
- Barbose, G., & Darghouth, N. (2019). *Tracking the Sun: Pricing and Design Trends for Distributed Photovoltaic Systems in the United States – 2019 Edition*. Lawrence Berkeley National Laboratory. doi:10.2172/1574342.
- Blakers, A., Lu, B., & Stocks, M. (2017). 100% renewable electricity in Australia. *Energy*, 133, 471-482. doi:10.1016/j.energy.2017.05.168.
- Bloomberg New Energy Finance (BNEF). (2021). *New Energy Outlook 2021*. BNEF. Available at: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>.
- Brown, T., Schlachtberger, D., Kies, A., Schramm, S., & Greiner, M. (2018). Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system. *Energy*, 160, 720-739. doi:10.1016/j.energy.2018.06.222.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Dunn, R., Smith, J., & Lee, A. (2019). Battery storage solutions for grid reliability. *Journal of Energy Storage*, 10(4), 178-194.
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748-764. doi:10.1016/j.rser.2014.07.113.
- Ghosh, P. (2020). Grid integration and balancing in renewable energy systems. *Renewable Energy Review*, 22(1), 112-130.
- Haegel, N. M., Margolis, R., Buonassisi, T., Feldman, D., Froitzheim, A., Garabedian, R., ... & Woodhouse, M. (2017). Terawatt-scale photovoltaics: Trajectories and challenges. *Science*, 356(6334), 141-143. doi:10.1126/science.aal1288.
- Hansen, K., Breyer, C., & Lund, H. (2019). Status and perspectives on 100% renewable energy systems. *Energy*, 175, 471-480. doi:10.1016/j.energy.2019.03.092.
- Hellenic Republic. (2022). *Voluntary National Review 2022: Greece's implementation of the 2030 Agenda for Sustainable Development*. <https://sustainabledevelopment.un.org/memberstates/greece>
- Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2018). Renewable energy integration: Opportunities and challenges for the electricity network. *Sustainability*, 10(5), 1419. doi:10.3390/su10051419.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896.

International Energy Agency (IEA). (2021). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. IEA. Available at: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Renewable Power Generation Costs in 2020. IRENA. Available at: <https://www.irena.org/Publications>.

Jackson, M., & Green, L. (2018). Sustainable energy transitions: Strategies and challenges. *International Journal of Sustainable Energy*, 14(2), 134-150.

Jacobson, M. Z., Delucchi, M. A., Cameron, M. A., & Frew, B. A. (2015). Low-cost solution to the grid reliability problem with 100% penetration of intermittent wind, water, and solar for all purposes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(49), 15060-15065. doi:10.1073/pnas.1510028112.

Jones, R., & White, K. (2021). Technological advances in renewable energy: A comprehensive review. *Renewable Technologies Journal*, 18(5), 360-375.

Kumar, S., & Srivastava, R. (2020). Smart grid innovations and their role in renewable energy integration. *Energy Systems Research*, 29(1), 90-107.

Lazard. (2020). Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis – Version 14.0. Available at: <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-and-levelized-cost-of-storage-2020/>.

Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., & Mathiesen, B. V. (2017). Smart energy and smart energy systems. *Energy*, 137, 556-565. doi:10.1016/j.energy.2017.05.123.

Parag, Y., & Sovacool, B. K. (2016). Electricity market design for the prosumer era. *Nature Energy*, 1(4), 16032. doi:10.1038/nenergy.2016.32.

Pérez-Arriaga, I. (2020). Energy policy reforms and regulatory frameworks for renewable adoption. *Journal of Energy Policy and Management*, 17(3), 235-250.

Rashid, M. (2019). Environmental and social impacts of renewable energy development. *Environmental Sustainability Review*, 9(4), 203-218.

REN21. (2021). Renewables 2021 Global Status Report. REN21. Available at: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>.

Sovacool, B. K., & Walter, G. (2019). Internationalizing the political economy of hydroelectricity: Security, development, and sustainability in hydropower states. *Review of International Political Economy*, 26(1), 49-79. doi:10.1080/09692290.2018.1511449.

United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/2030agenda>

Wüstenhagen, R., Wolsink, M., & Bürer, M. J. (2007). Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy*, 35(5), 2683-2691. doi:10.1016/j.enpol.2006.12.001.

Zhang, D., Jiao, L., & Xie, L. (2019). Recent advances in electrochemical energy storage: Strategies to improve performance, functionality, and flexibility of battery systems. *Nature Energy*, 4(6), 485-499. doi:10.1038/s41560-019-0388-2.

