



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΑΣ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ**

**Αξιολόγηση Της Περιβαλλοντικής Βιωσιμότητας Των Ανανεώσιμων
Πηγών Ενέργειας : η περίπτωση της ηλιακής και αιολικής ενέργειας**

Διπλωματική Εργασία

Της φοιτήτριας: Ανδριοπούλου Διονυσίας- Δήμητρας

AEM: 02229

Επιβλέπουσα: Όλγα Χριστοπούλου

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2025

ΒΟΛΟΣ

ΔΗΛΩΣΗ

Βεβαιώνω υπεύθυνα ότι η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί δικό μου πρωτότυπο πνευματικό έργο και δεν έχει συγγραφεί από τρίτο πρόσωπο, με ή χωρίς αμοιβή. Δηλώνω ότι δεν έχει αντιγραφεί ή βασιστεί σε εργασία άλλου, είτε δημοσιευμένη είτε αδημοσίευτη, ούτε έχει υποβληθεί στο παρελθόν για αξιολόγηση ή βαθμολόγηση στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας ή σε οποιοδήποτε άλλο πανεπιστημιακό ίδρυμα.

Βεβαιώνω επίσης ότι γνωρίζω και αποδέχομαι πλήρως τον κανονισμό περί λογοκλοπής του Τμήματος Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας & Περιφερειακής Ανάπτυξης και του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Κατά την εκπόνηση του παρόντος έργου, τηρήθηκαν όλοι οι κανόνες της ακαδημαϊκής δεοντολογίας σχετικά με την προστασία των πνευματικών δικαιωμάτων τρίτων.

Σε περίπτωση διαπίστωσης λογοκλοπής, αποδέχομαι χωρίς επιφύλαξη την επιβολή όλων των προβλεπόμενων από τη νομοθεσία και τους κανονισμούς κυρώσεων.

Ημερομηνία: 10/9/2025

Όνομα: Διονυσία-Δήμητρα

Επώνυμο: Ανδριοπούλου

Υπογραφή:

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την περιβαλλοντική βιωσιμότητα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην Ελλάδα, με έμφαση στην αιολική και τη ηλιακή ενέργεια, οι οποίες αποτελούν τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες της χώρας και βασικούς άξονες της εθνικής στρατηγικής για την ενεργειακή μετάβαση. Στόχος της μελέτης ήταν να αξιολογήσει τα πλεονεκτήματα και τις προκλήσεις αυτών των τεχνολογιών μέσω της εφαρμογής δεικτών βιωσιμότητας και της ανάλυσης συγκεκριμένων έργων μεγάλης κλίμακας, όπως το Αιολικό Πάρκο Καφηρέα και το Φωτοβολταϊκό Πάρκο Κοζάνης.

Η μεθοδολογία βασίστηκε σε εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση, στην εφαρμογή περιβαλλοντικών δεικτών και στην παρουσίαση μελετών περίπτωσης, με στόχο την αποτύπωση τόσο της ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης όσο και των κοινωνικών παραμέτρων που σχετίζονται με τη χωροθέτηση και την αποδοχή από τις τοπικές κοινωνίες.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ΑΠΕ παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς τη μείωση των εκπομπών και την ενεργειακή ασφάλεια, επιβεβαιώνοντας ότι αποτελούν μια βιώσιμη επιλογή για την Ελλάδα. Ωστόσο, αναδείχθηκαν προκλήσεις που σχετίζονται με την προστασία της βιοποικιλότητας, τη χρήση γης και την κοινωνική αποδοχή, οι οποίες απαιτούν κατάλληλες πολιτικές και τεχνολογικές παρεμβάσεις.

Συνολικά, η εργασία καταλήγει ότι η αιολική και η ηλιακή ενέργεια μπορούν να διαδραματίσουν κεντρικό ρόλο στη μετάβαση της Ελλάδας σε ένα ενεργειακό σύστημα χαμηλών εκπομπών, εφόσον ενταχθούν σε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο βιώσιμης ανάπτυξης που θα λαμβάνει υπόψη τις κοινωνικές και περιβαλλοντικές διαστάσεις.

Λέξεις-κλειδιά: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Αιολική Ενέργεια, Φωτοβολταϊκά, Βιωσιμότητα, Ελλάδα

Abstract

This dissertation examines the environmental sustainability of Renewable Energy Sources (RES) in Greece, focusing on wind and solar energy, which are the most widespread technologies in the country and key pillars of the national strategy for energy transition. The aim of the study was to assess the advantages and challenges of these technologies through the application of sustainability indicators and the analysis of large-scale projects, such as the Kafiareas Wind Farm and the Kozani Photovoltaic Park.

The methodology was based on an extensive literature review, the application of environmental indicators, and the presentation of case studies, in order to capture both the energy and environmental performance as well as the social parameters related to siting and local acceptance.

The findings indicate that RES have significant advantages in terms of reducing greenhouse gas emissions and enhancing energy security, confirming that they represent a sustainable option for Greece. However, challenges related to biodiversity protection, land use, and social acceptance were also highlighted, requiring appropriate policy and technological interventions.

Overall, the dissertation concludes that wind and solar energy can play a central role in Greece's transition to a low-carbon energy system, provided that they are integrated into a comprehensive framework of sustainable development that takes into account both social and environmental dimensions.

Keywords: Renewable Energy Sources, Wind Energy, Photovoltaic Panels, Sustainability, Greece

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	3
Abstract	4
Εισαγωγή	7
Κεφάλαιο 1ο : Θεωρητικό Υπόβαθρο	9
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ): Ορισμός	9
1.1.1 Είδη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	9
1.2 Περιβαλλοντική βιωσιμότητα: Έννοια και αρχές	11
1.3 Σχέση ΑΠΕ και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας	12
Κεφάλαιο 2ο : Αιολική Ενέργεια στην Ελλάδα	14
2.1 Τρέχουσα Κατάσταση, Οικονομικά Δεδομένα και Προοπτικές	14
2.1.1 Οικονομικά Δεδομένα και Τεχνολογική Εξάρτηση	14
2.1.2 Θεσμικό Πλαίσιο και Αδειοδότηση	15
2.1.3 Προοπτικές Ανάπτυξης	16
2.2 Πλεονεκτήματα της αιολικής ενέργειας	17
2.3 Μειονεκτήματα της αιολικής ενέργειας	18
2.3.1 Οικονομικές επιπτώσεις	18
2.3.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	19
2.4 Κοινωνική αποδοχή και συγκρούσεις χρήσεων γης	20
2.5 Παραδείγματα έργων	22
Κεφάλαιο 3ο: Φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα	23
3.1 Τρέχουσα κατάσταση και προοπτικές ανάπτυξης	23
3.2 Πλεονεκτήματα	24
3.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	25
3.4 Κοινωνική αποδοχή και συγκρούσεις χρήσεων γης	26
3.5 Παραδείγματα έργων	27
Κεφάλαιο 4ο: Δείκτες Αξιολόγησης Περιβαλλοντικής Βιωσιμότητας	28
4.1 Εισαγωγή στη Μεθοδολογία Δεικτών	28
4.2 Ενεργειακοί Δείκτες	29
4.2.1 Energy Payback Time (EPBT)	29
4.2.2 Energy Return on Investment (EROI)	30
4.3 Περιβαλλοντικοί Δείκτες	31
4.3.1 Εκπομπές ισοδύναμου CO ₂	31

4.3.2 Αποτύπωμα νερού	32
4.3.3 Χρήση γης και βιοποικιλότητα	33
4.3.4 Κυκλικότητα και διαχείριση τέλους ζωής.....	34
4.3.5 Κοινωνική διάσταση και διακυβέρνηση	34
4.4 Εφαρμογή στην Ελλάδα και Περιορισμοί.....	34
Κεφάλαιο 5ο: Πολιτικές και Κανονιστικό Πλαίσιο για την Ελλάδα.....	36
5.1 Εθνικές πολιτικές για τις ΑΠΕ και οι στόχοι για το 2030	36
5.2 Σύνδεση με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΣΒΑ).....	37
5.3 Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και επιπτώσεις στην Ελλάδα	38
Κεφάλαιο 6ο : Μελέτη Περίπτωσης στην Ελλάδα	40
6.1 Επιλεγμένα έργα αιολικής ενέργειας και φωτοβολταϊκών	40
6.1.1 Αιολικό Πάρκο Καφηρέα.....	40
6.1.2 Φωτοβολταϊκό Πάρκο Κοζάνης.....	41
6.1.3 Φωτοβολταϊκά: Σύμπλεγμα Ptolemaida 550 MW	42
6.2 Εφαρμογή δεικτών βιωσιμότητας και συγκριτική ανάλυση στην Ελλάδα	42
6.2.1 Εφαρμογή Δεικτών σε Ελληνικές Περιπτώσεις.....	42
6.2.2 Σύνοψη αποτελεσμάτων.....	43
Κεφάλαιο 7ο : Συμπεράσματα και Συστάσεις.....	45
7.1 Κύρια ευρήματα της μελέτης	45
7.2 Προτάσεις για βιώσιμη ανάπτυξη αιολικών και φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα	46
7.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	48
Βιβλιογραφία	50

Εισαγωγή

Η κλιματική αλλαγή και οι πολλαπλές επιπτώσεις της στο φυσικό περιβάλλον, στην οικονομία και στις κοινωνίες καθιστούν αναγκαία την άμεση μετάβαση σε νέα μοντέλα παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Η συνεχής αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, σε συνδυασμό με την εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και τις γεωπολιτικές αστάθειες που συνδέονται με την ενεργειακή εξάρτηση, έχουν αναδείξει τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ως την πλέον κατάλληλη και βιώσιμη λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του μέλλοντος (IEA, 2022). Η σημασία των ΑΠΕ επιβεβαιώνεται και από την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, η οποία θέτει ως βασικό στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050, μέσω της σταδιακής απανθρακοποίησης και της αύξησης της συμμετοχής των καθαρών μορφών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα (European Commission, 2020).

Στο πλαίσιο αυτό, η Ελλάδα, ως χώρα με πλούσιο ηλιακό και αιολικό δυναμικό, βρίσκεται μπροστά σε μια ιστορική ευκαιρία αλλά και σε μια μεγάλη πρόκληση. Από τη μία πλευρά, η γεωγραφική της θέση και τα φυσικά χαρακτηριστικά της προσφέρουν τις κατάλληλες συνθήκες για την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας και των ανέμων, επιτρέποντας την παραγωγή καθαρής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Από την άλλη, η εφαρμογή έργων ΑΠΕ δεν είναι πάντοτε εύκολη, καθώς συχνά συναντά εμπόδια που σχετίζονται με την κοινωνική αποδοχή, την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος και τη βέλτιστη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων (Skinitis, Daras, & Tsoutsos, 2022).

Η επιλογή του συγκεκριμένου θέματος για τη διπλωματική εργασία συνδέεται με την ανάγκη διερεύνησης αυτής της διττής διάστασης. Οι ΑΠΕ, και ιδιαίτερα η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, παρουσιάζονται συχνά ως η «καθαρή» εναλλακτική λύση απέναντι στα ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, η πραγματικότητα είναι πιο σύνθετη. Η εγκατάσταση αιολικών πάρκων σε ορεινές και νησιωτικές περιοχές μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στη βιοποικιλότητα και να αλλοιώσει το τοπίο, ενώ τα μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα απαιτούν εκτάσεις που διαφορετικά θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για γεωργική παραγωγή. Ταυτόχρονα, σε κοινωνικό επίπεδο, οι τοπικές αντιδράσεις συχνά αποκαλύπτουν το αίσθημα ότι τα οφέλη των έργων δεν κατανέμονται δίκαια, με αποτέλεσμα να υπονομεύεται η κοινωνική συναίνεση που είναι απαραίτητη για την επιτυχία της ενεργειακής μετάβασης (Devine-Wright, 2007).

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να αξιολογήσει την περιβαλλοντική βιωσιμότητα των ΑΠΕ στην Ελλάδα, με ιδιαίτερη έμφαση στις τεχνολογίες της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας. Η αξιολόγηση αυτή πραγματοποιείται μέσα από την εφαρμογή δεικτών βιωσιμότητας που αποτυπώνουν την ενεργειακή απόδοση, τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, το αποτύπωμα χρήσης γης και νερού, αλλά και μέσα από την παρουσίαση μελετών περίπτωσης μεγάλων έργων, όπως το Αιολικό Πάρκο Καφηρέα στην Εύβοια και το Φωτοβολταϊκό Πάρκο Κοζάνης. Οι επιμέρους στόχοι της μελέτης είναι τρεις: (α) να αναλυθούν τα βασικά πλεονεκτήματα και οι προκλήσεις των δύο τεχνολογιών σε σχέση με τη βιωσιμότητα, (β) να διερευνηθεί η κοινωνική διάσταση της ανάπτυξής τους, με έμφαση στην

αποδοχή από τις τοπικές κοινωνίες, και (γ) να εξαχθούν συμπεράσματα και προτάσεις που θα μπορούσαν να στηρίξουν τον εθνικό ενεργειακό σχεδιασμό.

Η σπουδαιότητα της παρούσας έρευνας έγκειται στο γεγονός ότι, ενώ η Ελλάδα διαθέτει υψηλό δυναμικό ανάπτυξης ΑΠΕ, η μετάβαση σε καθαρές μορφές ενέργειας δεν είναι πάντοτε ομαλή. Η κατανόηση του κατά πόσο οι τεχνολογίες αυτές είναι όντως βιώσιμες περιβαλλοντικά και κοινωνικά είναι κρίσιμη για την εξασφάλιση ότι η ενεργειακή μετάβαση δεν θα δημιουργήσει νέες ανισότητες ή περιβαλλοντικές πιέσεις. Επιπλέον, η μελέτη φιλοδοξεί να συμβάλει στη διεθνή ακαδημαϊκή συζήτηση γύρω από τη βιωσιμότητα των ΑΠΕ, παρέχοντας στοιχεία και συμπεράσματα που αφορούν ειδικά την ελληνική περίπτωση, η οποία παρουσιάζει ιδιαιτερότητες λόγω του νησιωτικού χώρου, της βιοποικιλότητας και της ιστορικής εξάρτησης από τον λιγνίτη (Kaldellis & Apostolou, 2017).

Μεθοδολογικά, η εργασία στηρίζεται σε τρεις πυλώνες: (α) εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση της διεθνούς και ελληνικής έρευνας γύρω από την αιολική και την ηλιακή ενέργεια, (β) εφαρμογή δεικτών βιωσιμότητας για την αποτίμηση της περιβαλλοντικής και ενεργειακής τους απόδοσης, και (γ) ανάλυση επιλεγμένων μελετών περίπτωσης, με σκοπό να αποτυπωθούν οι προκλήσεις και οι προοπτικές στην πράξη.

Τέλος, η δομή της εργασίας έχει ως εξής: Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο και η έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης. Στο Κεφάλαιο 2 αναλύεται η αιολική ενέργεια, τα τεχνικά χαρακτηριστικά της, καθώς και οι περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Στο Κεφάλαιο 3 ακολουθεί η ανάλυση της ηλιακής ενέργειας και των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η μεθοδολογία και οι δείκτες βιωσιμότητας που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση. Στο Κεφάλαιο 5 εξετάζονται οι πολιτικές και το κανονιστικό πλαίσιο για την Ελλάδα, ενώ στο Κεφάλαιο 6 εφαρμόζονται οι δείκτες βιωσιμότητας για την αποτίμηση μεγάλων έργων. Τέλος, το Κεφάλαιο 7 περιλαμβάνει τα συμπεράσματα της έρευνας και τις προτάσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη των ΑΠΕ στη χώρα.

Κεφάλαιο 1ο : Θεωρητικό Υπόβαθρο

1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ): Ορισμός

Η έννοια των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) κατέχει κεντρική θέση στη διεθνή συζήτηση για τη βιώσιμη ανάπτυξη και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Οι ΑΠΕ ορίζονται ως πηγές ενέργειας που προέρχονται από φυσικές διεργασίες οι οποίες ανανεώνονται συνεχώς, χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης, και είναι πρακτικά ανεξάντλητες σε ανθρώπινη κλίμακα χρόνου. Σύμφωνα με τους Twidell και Weir (2022), σε αυτές περιλαμβάνονται η ηλιακή ακτινοβολία, η αιολική ενέργεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια από τη ροή των υδάτων, η γεωθερμική θερμότητα και η βιομάζα. Σε αντίθεση με τις μη ανανεώσιμες πηγές, όπως τα ορυκτά καύσιμα και η πυρηνική ενέργεια, οι ΑΠΕ θεωρούνται φιλικότερες προς το περιβάλλον, καθώς η αξιοποίησή τους συνεπάγεται περιορισμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Η στροφή προς τις ΑΠΕ είναι κρίσιμη στο πλαίσιο της διεθνούς προσπάθειας για τον περιορισμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη και την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί από διεθνείς συμφωνίες, όπως η Συμφωνία του Παρισιού του 2015. Παράλληλα, η Ευρωπαϊκή Ένωση, μέσω της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, έχει θέσει ως στόχο την κλιματική ουδετερότητα έως το 2050, ενσωματώνοντας τη μετάβαση σε καθαρές μορφές ενέργειας ως βασικό πυλώνα της στρατηγικής της (European Commission, 2020). Η ενεργειακή μετάβαση, λοιπόν, δεν είναι απλώς μια τεχνική ή τεχνολογική αλλαγή· αποτελεί κοινωνικοοικονομική και πολιτική πρόκληση, καθώς προϋποθέτει τον ανασχεδιασμό του ενεργειακού συστήματος, την αλλαγή προτύπων κατανάλωσης και την ενίσχυση της κοινωνικής αποδοχής.

Επιπλέον, οι ΑΠΕ συνδέονται άμεσα με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΣΒΑ) του ΟΗΕ, και ειδικότερα με τον ΣΒΑ 7 («Φθινή και Καθαρή Ενέργεια»), ο οποίος στοχεύει στην καθολική πρόσβαση σε αξιόπιστες, βιώσιμες και σύγχρονες ενεργειακές υπηρεσίες. Μέσω της ευρείας εφαρμογής τους, οι ΑΠΕ μπορούν να συμβάλουν όχι μόνο στη μείωση των εκπομπών αλλά και στην προώθηση της ενεργειακής ασφάλειας, τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και την ενίσχυση της ενεργειακής δημοκρατίας (Bhattacharya, Paramati, Ozturk, & Bhattacharya, 2016).

Συνολικά, ο ορισμός και η κατανόηση της έννοιας των ΑΠΕ αποτελούν τη βάση για την αποτίμηση της συμβολής τους στη βιώσιμη ανάπτυξη. Ενσαρκώνουν μια νέα προσέγγιση στο ενεργειακό ζήτημα, η οποία υπερβαίνει τη λογική της απλής υποκατάστασης των ορυκτών καυσίμων, προωθώντας μια ολιστική θεώρηση που ενσωματώνει περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές διαστάσεις.

1.1.1 Είδη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν βασικό πυλώνα της βιώσιμης ανάπτυξης, αξιοποιώντας φυσικούς πόρους για την παραγωγή καθαρής ενέργειας. Σύμφωνα με την ανάλυση των Herzog, et al. (2001), περιλαμβάνουν ποικίλες τεχνολογίες που προσφέρουν βιώσιμες λύσεις για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών. Μια από τις πιο σημαντικές ΑΠΕ είναι η βιομάζα, η οποία περιλαμβάνει οργανικά υλικά φυτικής ή ζωικής προέλευσης που μπορούν να μετατραπούν σε ενέργεια. Η βιομάζα χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρικής ενέργειας και βιοκαυσίμων, ενώ οι σύγχρονες τεχνολογίες,

όπως η αεριοποίηση και η αναερόβια χώνευση, συμβάλλουν στη βελτίωση της αποδοτικότητάς της. Η χρήση της μπορεί επίσης να μειώσει τις εκπομπές άνθρακα, υπό την προϋπόθεση ότι εφαρμόζονται βιώσιμες πρακτικές παραγωγής.

Μια άλλη σημαντική μορφή ΑΠΕ είναι η αιολική ενέργεια, η οποία αξιοποιεί την κινητική ενέργεια του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ανεμογεννητριών. Η τεχνολογική πρόοδος έχει μειώσει σημαντικά το κόστος παραγωγής, καθιστώντας την αιολική ενέργεια μία από τις οικονομικότερες πηγές καθαρής ενέργειας, ενώ παράλληλα συμβάλλει στη διαφοροποίηση του ενεργειακού μείγματος και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Αντίστοιχα, η ηλιακή ενέργεια, η οποία αξιοποιείται μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων και θερμικών ηλιακών τεχνολογιών, έχει σημειώσει μεγάλη πρόοδο τα τελευταία χρόνια. Η μείωση του κόστους παραγωγής και η αύξηση της αποδοτικότητας την καθιστούν μια ελκυστική επιλογή για ενεργειακή αυτάρκεια.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια, που βασίζεται στην εκμετάλλευση της ροής του νερού, αποτελεί μια από τις παλαιότερες και πιο αξιόπιστες μορφές ΑΠΕ. Ενώ οι μεγάλες υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις ενδέχεται να έχουν κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι μικρές υδροηλεκτρικές μονάδες προσφέρουν πιο βιώσιμες λύσεις για τοπική χρήση. Επιπλέον, η γεωθερμική ενέργεια, που αξιοποιεί τη θερμότητα από το εσωτερικό της Γης, παρέχει σταθερή και αξιόπιστη ενεργειακή απόδοση, ιδίως σε περιοχές με υψηλή γεωθερμική δραστηριότητα.

Όσον αφορά τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, η Ελλάδα έχει σημειώσει αξιοσημείωτη πρόοδο, ιδίως στους τομείς της ηλιακής και αιολικής ενέργειας μέσω της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων και αιολικών πάρκων. Ωστόσο, η τεχνολογία και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις είναι εισαγόμενοι, καθώς η χώρα δεν διαθέτει ουσιαστική βιομηχανία παραγωγής φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών. Αυτό σημαίνει ότι παρόλο που η ενέργεια παράγεται εγχώρια η τεχνολογική εξάρτηση παραμένει έντονη. (HAEE et al., n.d.)

Η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προσφέρει πολλαπλά οφέλη. Συμβάλει στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, στη διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας και στην ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας. Παράλληλα, ενισχύει την ενεργειακή αυτάρκεια, μειώνει την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα και δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας. Ωστόσο, η περαιτέρω ανάπτυξη τους εξαρτάται από την συνεχή τεχνολογική πρόοδο, την οικονομική βιωσιμότητα και την πολιτική υποστήριξη.

1.2 Περιβαλλοντική βιωσιμότητα: Έννοια και αρχές

Η περιβαλλοντική βιωσιμότητα αποτελεί θεμελιώδη έννοια στη σύγχρονη επιστημονική σκέψη και πολιτική πράξη, καθώς συνδέεται άμεσα με την ικανότητα των οικοσυστημάτων να διατηρούν τη λειτουργικότητά τους, την ανθεκτικότητά τους και την παραγωγικότητά τους στο πέρασμα του χρόνου. Η έννοια αυτή δεν περιορίζεται στη διατήρηση των φυσικών πόρων, αλλά επεκτείνεται στην εξασφάλιση της οικολογικής ισορροπίας, της κοινωνικής ευημερίας και της οικονομικής σταθερότητας, εντός των ορίων που θέτει η φέρουσα ικανότητα του πλανήτη. Η περιβαλλοντική βιωσιμότητα προϋποθέτει την αναγνώριση της αλληλεξάρτησης μεταξύ ανθρώπινων και φυσικών συστημάτων και την ανάγκη για μακροπρόθεσμη διατήρηση των οικολογικών λειτουργιών που υποστηρίζουν τη ζωή.

Σύμφωνα με τη θεωρία των πλανητικών ορίων που διατυπώθηκε από τους Rockström και συνεργάτες, η ανθρωπότητα οφείλει να λειτουργεί εντός ενός «ασφαλούς λειτουργικού χώρου» που καθορίζεται από εννέα βασικές περιβαλλοντικές μεταβλητές, όπως η κλιματική αλλαγή, η απώλεια βιοποικιλότητας και η διαταραχή των κύκλων του αζώτου και του φωσφόρου (Rockström et al., 2009). Η υπέρβαση αυτών των ορίων ενδέχεται να οδηγήσει σε μη αναστρέψιμες αλλαγές στα οικοσυστήματα και να απειλήσει τη βιωσιμότητα των ανθρώπινων κοινωνιών. Η έννοια της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, επομένως, δεν αφορά μόνο την προστασία της φύσης, αλλά και τη διατήρηση των συνθηκών που καθιστούν δυνατή την ανθρώπινη ζωή και ευημερία.

Η οικολογική οικονομία, όπως αναπτύσσεται από τον Van Den Bergh, προσφέρει ένα θεωρητικό πλαίσιο για την κατανόηση της βιωσιμότητας ως συστημικής ισορροπίας μεταξύ οικονομικών δραστηριοτήτων και οικολογικών περιορισμών. Σε αντίθεση με την παραδοσιακή οικονομική θεωρία, η οικολογική οικονομία δεν αντιμετωπίζει το περιβάλλον ως εξωτερικότητα, αλλά ως θεμελιώδη βάση κάθε παραγωγικής διαδικασίας. Ο Van Den Bergh υποστηρίζει ότι η οικονομία πρέπει να λειτουργεί εντός των φυσικών ορίων του πλανήτη, λαμβάνοντας υπόψη την εντροπία, την περιορισμένη διαθεσιμότητα των πόρων και την ανάγκη για ανακύκλωση της ύλης και της ενέργειας (Van Den Bergh, 1996). Η προσέγγιση αυτή προτείνει την αναδιάρθρωση των παραγωγικών συστημάτων με στόχο τη βιώσιμη ευημερία και όχι την αέναη μεγέθυνση, ενσωματώνοντας δείκτες όπως το οικολογικό αποτύπωμα και το φυσικό κεφάλαιο.

Παράλληλα, η έννοια του Buen Vivir, όπως αναλύεται από τον Villalba, προτείνει μια εναλλακτική αντίληψη για την ανάπτυξη, βασισμένη στην αρμονική συνύπαρξη ανθρώπου και φύσης. Το Buen Vivir, που προέρχεται από τις κοσμοθεωρίες των ιθαγενών λαών των Άνδεων, προτάσσει την κοινοτική ευημερία, την πολιτισμική πολυμορφία και την οικολογική ισορροπία ως βασικές αρχές ενός βιώσιμου τρόπου ζωής (Villalba, 2013). Σε αντίθεση με το δυτικό μοντέλο ανάπτυξης, το Buen Vivir απορρίπτει την οικονομική μεγέθυνση ως αυτοσκοπό και προτάσσει την ενδυνάμωση των κοινοτήτων, την αναγνώριση των δικαιωμάτων της φύσης και την απομάκρυνση από το εξορυκτικό μοντέλο οικονομίας.

Η αποανάπτυξη, όπως παρουσιάζεται από τον Escobar, αποτελεί ένα ριζοσπαστικό θεωρητικό και πολιτικό ρεύμα που αμφισβητεί τη λογική της συνεχούς οικονομικής επέκτασης

και προτείνει τη μείωση της υλικής και ενεργειακής κατανάλωσης ως στρατηγική για την οικολογική και κοινωνική βιωσιμότητα. Η αποανάπτυξη δεν περιορίζεται σε τεχνικές λύσεις, αλλά καλεί σε βαθύ πολιτισμικό και αξιακό μετασχηματισμό, προτείνοντας την ενίσχυση της τοπικότητας, την αποεμπορευματοποίηση της ζωής και την ενδυνάμωση της αυτονομίας των κοινοτήτων (Escobar, 2015). Η έννοια του «πλουραλιστικού κόσμου» που προτείνει ο Escobar, δηλαδή η συνύπαρξη πολλαπλών κοσμοθεωριών και τρόπων ζωής, αποτελεί μια πρόταση για έναν κόσμο πιο δίκαιο, πιο βιώσιμο και πιο δημοκρατικό.

Συνολικά, η περιβαλλοντική βιωσιμότητα δεν μπορεί να περιοριστεί σε τεχνικές παρεμβάσεις ή σε επιφανειακές μεταρρυθμίσεις. Απαιτεί μια βαθιά αναθεώρηση του τρόπου με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε την πρόοδο, την ευημερία και τη σχέση μας με τον φυσικό κόσμο. Οι προσεγγίσεις της οικολογικής οικονομίας, του Buen Vivir και της αποανάπτυξης συγκλίνουν στην ανάγκη για ένα νέο υπόδειγμα που να ενσωματώνει την οικολογική ακεραιότητα, την κοινωνική δικαιοσύνη και την πολιτισμική πολυμορφία. Η μετάβαση προς ένα βιώσιμο μέλλον προϋποθέτει την ενίσχυση της επιστημονικής έρευνας, τη θεσμική καινοτομία, την κοινωνική συμμετοχή και την πολιτική βούληση. Δεν αρκεί η τεχνολογική πρόοδος ή η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των ΑΠΕ· απαιτείται μια συλλογική επανανοηματοδότηση της σχέσης μας με τον πλανήτη, με στόχο όχι μόνο την επιβίωση, αλλά την ευημερία εντός των οικολογικών ορίων.

1.3 Σχέση ΑΠΕ και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας

Η σχέση μεταξύ Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας είναι θεμελιώδης, καθώς οι ΑΠΕ αποτελούν βασικό εργαλείο για την επίτευξη ενός ενεργειακού συστήματος χαμηλών εκπομπών και την προστασία των φυσικών οικοσυστημάτων. Η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με καθαρές μορφές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική, συμβάλλει καθοριστικά στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, οι οποίες ευθύνονται για την υπερθέρμανση του πλανήτη και τις συνακόλουθες περιβαλλοντικές κρίσεις (Osman et al., 2022). Παράλληλα, η χρήση ΑΠΕ περιορίζει την ατμοσφαιρική ρύπανση, μειώνει την εξάρτηση από μη ανανεώσιμους φυσικούς πόρους και ενισχύει την ενεργειακή αυτάρκεια των κρατών.

Η συμβολή των ΑΠΕ στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα δεν περιορίζεται μόνο στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Οι επενδύσεις σε έργα ανανεώσιμης ενέργειας δημιουργούν νέες θέσεις εργασίας, ενισχύουν την τοπική οικονομία και προωθούν την κοινωνική συνοχή, ιδίως όταν συνοδεύονται από συμμετοχικά μοντέλα διακυβέρνησης, όπως οι ενεργειακές κοινότητες (Bhattacharya et al., 2015). Ωστόσο, η ανάπτυξη των ΑΠΕ δεν είναι αυτόματα βιώσιμη. Απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός, περιβαλλοντική αξιολόγηση και κοινωνική συναίνεση, ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα περιβαλλοντικής υποβάθμισης ή κοινωνικών συγκρούσεων.

Πολλές χώρες έχουν αναγνωρίσει τη σημασία των ΑΠΕ για την επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης και έχουν υιοθετήσει πολιτικές που ενισχύουν τη διεξόδυσή τους στο

ενεργειακό μείγμα. Η Γερμανία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα, μέσω της πολιτικής “Energiewende”, η οποία περιλαμβάνει επιδοτήσεις, εγγυημένες τιμές αγοράς (feed-in tariffs) και φορολογικά κίνητρα για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών και αιολικών συστημάτων (Akrofi et al., 2022). Η πολιτική αυτή οδήγησε σε ραγδαία αύξηση της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, με αποτέλεσμα το 2023 περίπου το 50% της ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.

Αντίστοιχα, η Δανία έχει επενδύσει συστηματικά στην αιολική ενέργεια, τόσο σε χερσαία όσο και σε υπεράκτια αιολικά πάρκα. Μέσω κρατικών επιδοτήσεων, σταθερού ρυθμιστικού πλαισίου και συμμετοχής των τοπικών κοινοτήτων στα έργα, η χώρα έχει καταφέρει να καλύπτει πάνω από το 40% της ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο (Solaun & Cerdá, 2019). Η επιτυχία της Δανίας οφείλεται επίσης στην ενσωμάτωση της ενεργειακής πολιτικής με την περιβαλλοντική εκπαίδευση και την κοινωνική αποδοχή.

Στην Ασία, η Ινδία έχει υιοθετήσει ένα φιλόδοξο πρόγραμμα για την ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας, με στόχο την εγκατάσταση 280 GW φωτοβολταϊκής ισχύος έως το 2030. Το πρόγραμμα “Solar Park Scheme” παρέχει χρηματοδότηση, τεχνική υποστήριξη και φορολογικά κίνητρα σε επενδυτές, ενώ παράλληλα ενισχύει την πρόσβαση σε καθαρή ενέργεια σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές (Akrofi et al., 2022). Η Κίνα, από την άλλη πλευρά, έχει καταστεί παγκόσμιος ηγέτης στην παραγωγή και εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ, αξιοποιώντας κρατικές επιδοτήσεις, στρατηγικό σχεδιασμό και επενδύσεις σε έρευνα και ανάπτυξη.

Αξιοσημείωτο είναι και το παράδειγμα της Πορτογαλίας, η οποία έχει καταφέρει να καλύψει για συνεχόμενες ημέρες το σύνολο της ηλεκτρικής της ζήτησης αποκλειστικά από ΑΠΕ, κυρίως μέσω υδροηλεκτρικών, αιολικών και ηλιακών σταθμών. Η επιτυχία αυτή βασίστηκε σε ένα συνδυασμό πολιτικής βούλησης, επενδύσεων σε υποδομές και ευέλικτης διαχείρισης του ηλεκτρικού δικτύου (Bhattacharya et al., 2015).

Τα παραπάνω παραδείγματα καταδεικνύουν ότι η περιβαλλοντική βιωσιμότητα μέσω των ΑΠΕ δεν είναι απλώς τεχνικό ζήτημα, αλλά αποτέλεσμα συντονισμένων πολιτικών, κοινωνικής συμμετοχής και θεσμικής σταθερότητας. Η εμπειρία αυτών των χωρών μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο οδηγό για την Ελλάδα, η οποία διαθέτει πλούσιο φυσικό δυναμικό αλλά αντιμετωπίζει προκλήσεις σε επίπεδο αδειοδότησης, κοινωνικής αποδοχής και θεσμικής συνέχειας.

Συμπερασματικά, οι ΑΠΕ αποτελούν αναγκαία αλλά όχι επαρκή συνθήκη για την επίτευξη της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Η επιτυχής ενσωμάτωσή τους απαιτεί ένα συνεκτικό πλαίσιο πολιτικών, τεχνολογική καινοτομία, κοινωνική συναίνεση και συνεχή αξιολόγηση των περιβαλλοντικών και κοινωνικών επιπτώσεων. Μόνο μέσα από μια τέτοια ολιστική προσέγγιση μπορεί να διασφαλιστεί ότι η ενεργειακή μετάβαση θα είναι πράγματι βιώσιμη και δίκαιη.

Κεφάλαιο 2ο : Αιολική Ενέργεια στην Ελλάδα

2.1 Τρέχουσα Κατάσταση, Οικονομικά Δεδομένα και Προοπτικές

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πηγές καθαρής ενέργειας στην Ελλάδα, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στη σταδιακή απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Η αξιοποίησή της έχει ενταθεί τις τελευταίες δύο δεκαετίες, με αποτέλεσμα η αιολική ενέργεια να αποτελεί σήμερα τη δεύτερη μεγαλύτερη εγχώρια πηγή ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, μετά τα φωτοβολταϊκά.

Μέχρι το τέλος του 2022, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών πάρκων στην Ελλάδα έφτασε τα 4.681 MW, σημειώνοντας αύξηση 5,2% σε σχέση με το 2021. Το 2023, η ισχύς αυξήθηκε περαιτέρω, φτάνοντας τα 5.355 MW στο τέλος του 2024, με την προσθήκη 39 νέων ανεμογεννητριών και συνολική νέα ισχύ 125,5 MW. Η αιολική ενέργεια κάλυψε περίπου το 20% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας, συμβάλλοντας καθοριστικά στην ενεργειακή ασφάλεια και στη μείωση των εκπομπών CO₂.

Η γεωγραφική κατανομή των αιολικών πάρκων παρουσιάζει έντονη συγκέντρωση στην Κεντρική Ελλάδα και την Εύβοια, ενώ περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό, όπως το Αιγαίο και η Κρήτη, παραμένουν σχετικά υποεκμεταλλευμένες λόγω θεσμικών, τεχνικών και κοινωνικών εμποδίων.

2.1.1 Οικονομικά Δεδομένα και Τεχνολογική Εξάρτηση

Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα χαρακτηρίζεται από σημαντικές επενδύσεις και οικονομικές προκλήσεις, οι οποίες αφορούν τόσο το αρχικό κόστος εγκατάστασης όσο και τις συνεχιζόμενες δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης. Σύμφωνα με τα στοιχεία του 2024, οι νέες επενδύσεις στον τομέα της αιολικής ενέργειας εκτιμώνται περίπου στα 150 εκατομμύρια ευρώ, γεγονός που αντανάκλα τη σημαντική κινητοποίηση κεφαλαίων προς την υποστήριξη της ενεργειακής μετάβασης της χώρας (ΕΛΕΤΑΕΝ, 2025).

Το κόστος εγκατάστασης ενός χερσαίου αιολικού πάρκου παραμένει υψηλό και ποικίλλει ανάλογα με την τοποθεσία και τη δυναμικότητα της εγκατάστασης, με την τυπική αξία να κυμαίνεται μεταξύ 1.200 και 1.500 ευρώ ανά kW εγκατεστημένης ισχύος. Για παράδειγμα, ένα τυπικό αιολικό πάρκο ισχύος 50 MW απαιτεί επένδυση που προσεγγίζει τα 60 έως 75 εκατομμύρια ευρώ (ΕΛΕΤΑΕΝ, 2025). Ωστόσο, η οικονομική βιωσιμότητα του κλάδου επηρεάζεται από πολυάριθμους παράγοντες, όπως η διαμόρφωση των τιμών πώλησης της παραγόμενης ενέργειας (feed-in tariffs ή feed-in premiums), και το ρυθμιστικό περιβάλλον που καθορίζει τις επενδυτικές προοπτικές.

Σε ό,τι αφορά τη λειτουργία και τη συντήρηση των αιολικών σταθμών, το κόστος κινείται σε πιο χαμηλά επίπεδα σε σχέση με το αρχικό κεφάλαιο, ωστόσο αποτελεί σημαντικό ποσοστό του συνολικού κύκλου ζωής των έργων. Οι δαπάνες αυτές περιλαμβάνουν τακτικές επιθεωρήσεις, επισκευές, καθώς και ασφαλιστικά έξοδα και ενοίκια γης. Το κόστος αυτό κυμαίνεται περίπου στα 1,2 έως 1,5 ευρώ ανά MWh παραγόμενης ενέργειας (European Wind Energy Association et al., 2009).

Ένα σημαντικό στοιχείο που επιβαρύνει την οικονομική αποδοτικότητα των αιολικών έργων είναι η στοχαστική φύση του ανέμου, η οποία οδηγεί σε διακυμάνσεις στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και επιβάλλει την ανάγκη ύπαρξης μηχανισμών εξισορρόπησης ισχύος. Το κόστος εξισορρόπησης μπορεί να προσθέσει περίπου 4 ευρώ ανά MWh στην τιμή της παραγόμενης ενέργειας, ιδιαίτερα σε περιόδους με αυξημένη διείσδυση αιολικών στο ενεργειακό μείγμα (European Wind Energy Association et al., 2009). Επιπλέον, η ελλιπής υποδομή των δικτύων μεταφοράς, ιδίως σε απομακρυσμένες περιοχές όπου συχνά εγκαθίστανται ανεμογεννήτριες, αυξάνει το κόστος σύνδεσης και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Εξίσου κρίσιμο πρόβλημα σε εθνικό επίπεδο αποτελεί η τεχνολογική εξάρτηση της ελληνικής αγοράς αιολικής ενέργειας, δεδομένου ότι πάνω από το 90% του εξοπλισμού προέρχεται από εισαγωγές, κυρίως από ευρωπαϊκές εταιρείες όπως η Vestas, Siemens Gamesa και Nordex (ΕΛΕΤΑΕΝ, 2025). Η έλλειψη εγχώριας βιομηχανικής βάσης για την παραγωγή κρίσιμων υποσυστημάτων, όπως οι ανεμογεννήτριες ή τα πτερύγια, δημιουργεί αναντιστοιχία μεταξύ της εγχώριας ενεργειακής παραγωγής και της τεχνολογικής αυτονομίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αυξημένο κόστος λόγω εξωτερικών προμηθειών και ευπάθειες που σχετίζονται με την εξάρτηση από τις διεθνείς αλυσίδες εφοδιασμού και τεχνολογικής καινοτομίας.

Παράλληλα, η εισαγωγή τεχνολογιών από το εξωτερικό απαιτεί συχνά εξειδικευμένες υπηρεσίες εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης, οι οποίες στην Ελλάδα περιορίζονται στην υποστηρικτική βιομηχανία και δεν συνοδεύονται από σημαντική εγχώρια προστιθέμενη αξία. Για να αντιστραφεί αυτή η τάση, απαιτείται η ανάπτυξη τοπικών παραγωγικών ρευμάτων και η ενίσχυση της τεχνικής κατάρτισης, προκειμένου να δημιουργηθούν θέσεις εργασίας και εξειδικευμένες γνώσεις στον τομέα της αιολικής ενέργειας (Kaldellis & Apostolou, 2017).

Η οικονομική αυτή και τεχνολογική εικόνα υπογραμμίζει τη σημασία της πολιτικής στήριξης και του σχεδιασμού που θα ενσωματώνει την προώθηση της εγχώριας καινοτομίας και παραγωγής, παράλληλα με τη διασφάλιση επενδυτικής σταθερότητας. Η ελληνική κυβέρνηση έχει ήδη ξεκινήσει πρωτοβουλίες προς αυτή την κατεύθυνση, μέσω της απλοποίησης των αδειοδοτικών διαδικασιών και της υιοθέτησης μοντέλων συνεργασίας μεταξύ δημοσίου και ιδιωτικού τομέα για την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων (ΕΛΕΤΑΕΝ, 2025).

Συνολικά, η οικονομική βιωσιμότητα και η τεχνολογική αυτοτέλεια αποτελούν κρίσιμους παράγοντες ώστε η αιολική ενέργεια να διαδραματίσει τον αναμενόμενο ρόλο της στην ενεργειακή μετάβαση της Ελλάδας. Η προσαρμογή της επενδυτικής στρατηγικής, η ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας μέσω της μείωσης κόστους και η ενσωμάτωση τοπικών παραγωγικών δυνατοτήτων θα είναι καθοριστικές για την επίτευξη των φιλόδοξων στόχων της χώρας για το 2030 και πέραν αυτού.

2.1.2 Θεσμικό Πλαίσιο και Αδειοδότηση

Το θεσμικό πλαίσιο για την αιολική ενέργεια στην Ελλάδα έχει εξελιχθεί σημαντικά, με στόχο την ενίσχυση της διαφάνειας, την επιτάχυνση των διαδικασιών και την ενσωμάτωση των ευρωπαϊκών κατευθύνσεων. Η χώρα έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για το 2030, προβλέποντας ότι οι ΑΠΕ θα καλύπτουν το 66% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής

ενέργειας. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, απαιτείται η αύξηση της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος στα 7.000 MW, δηλαδή η προσθήκη 250–300 MW νέας ισχύος ετησίως.

Η ψήφιση του νομοθετικού πλαισίου για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα τον Ιούλιο του 2022 αποτέλεσε σημαντικό βήμα προς αυτή την κατεύθυνση. Η νέα νομοθεσία προβλέπει ότι το κράτος καθορίζει τις περιοχές ανάπτυξης, ενώ οι επενδυτές επιλέγουν την τελική τοποθεσία και αναλαμβάνουν τη διαδικασία αδειοδότησης. Ο στόχος είναι η ανάπτυξη 2 GW υπεράκτιας ισχύος έως το 2030, με πιλοτικά έργα 600 MW να ξεκινούν νωρίτερα (ΕΛΕΤΑΕΝ, 2025).

Παρά τις θετικές εξελίξεις, η διαδικασία αδειοδότησης παραμένει χρονοβόρα και πολύπλοκη. Η μέση διάρκεια αδειοδότησης φτάνει τα 8–10 έτη, σε αντίθεση με τον ευρωπαϊκό στόχο των 2 ετών. Η ελληνική κυβέρνηση έχει ξεκινήσει την αναθεώρηση του πλαισίου, με στόχο την ψηφιοποίηση των υπηρεσιών, την ενοποίηση των αδειοδοτικών σταδίων και τη μείωση της γραφειοκρατίας. Η επιτυχής εφαρμογή αυτών των μεταρρυθμίσεων θα καθορίσει σε μεγάλο βαθμό την ικανότητα της χώρας να ανταποκριθεί στους στόχους του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ). Η επιτυχής εφαρμογή αυτών των μεταρρυθμίσεων δεν αφορά μόνο την επιτάχυνση των διαδικασιών, αλλά και τη διασφάλιση της ποιότητας των περιβαλλοντικών αξιολογήσεων, της διαφάνειας στη λήψη αποφάσεων και της ισόρροπης χωροταξικής κατανομής των έργων. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2023), η Ελλάδα οφείλει να εναρμονίσει τις αδειοδοτικές της διαδικασίες με τις βέλτιστες πρακτικές της Ε.Ε., ώστε να επιτύχει τους στόχους της Πράσινης Συμφωνίας και να ενισχύσει την ελκυστικότητα του επενδυτικού της περιβάλλοντος.

Επιπλέον, η ενσωμάτωση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων στο θεσμικό πλαίσιο αποτελεί στρατηγική επιλογή με σημαντικές προοπτικές. Η υπεράκτια αιολική ενέργεια προσφέρει υψηλότερο και σταθερότερο αιολικό δυναμικό, μειωμένες συγκρούσεις χρήσεων γης και μεγαλύτερη κοινωνική αποδοχή. Ωστόσο, απαιτεί εξειδικευμένες τεχνικές λύσεις, ενίσχυση των υποδομών και σαφή καθορισμό των θαλάσσιων ζωνών ανάπτυξης. Η ΕΛΕΤΑΕΝ (2025) επισημαίνει ότι η επιτυχής υλοποίηση των πιλοτικών έργων των 600 MW θα αποτελέσει δοκιμασία για την ετοιμότητα της χώρας να εισέλθει δυναμικά στον υπεράκτιο τομέα.

2.1.3 Προοπτικές Ανάπτυξης

Οι προοπτικές για την αιολική ενέργεια στην Ελλάδα είναι ιδιαίτερα θετικές, καθώς η χώρα διαθέτει πλούσιο αιολικό δυναμικό, ισχυρή επενδυτική κινητικότητα και σαφές θεσμικό πλαίσιο. Το 2023 καταγράφηκε ως η δεύτερη καλύτερη χρονιά για τον κλάδο, με την ολοκλήρωση και διασύνδεση σημαντικών έργων. Το 2025 αναμένεται να ενισχυθεί περαιτέρω η ανάπτυξη, με έμφαση σε τρεις στρατηγικούς άξονες: την επιτάχυνση της αδειοδότησης, την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων και τη διαχείριση των ανεμογεννητριών στο τέλος της ζωής τους.

Η κυκλική διαχείριση των ανεμογεννητριών αποτελεί νέο πεδίο περιβαλλοντικής πολιτικής, καθώς η διάρκεια ζωής των εγκαταστάσεων πλησιάζει τα 20–25 έτη. Η ανακύκλωση των πτερυγίων, τα οποία κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά όπως ίνες γυαλιού και ρητίνες, παραμένει τεχνικά απαιτητική. Η IRENA (2023) υπογραμμίζει την ανάγκη για ανάπτυξη τεχνολογιών ανακύκλωσης και την ενσωμάτωση αρχών οικολογικού σχεδιασμού

(eco-design) ήδη από το στάδιο της κατασκευής. Η Ελλάδα οφείλει να προετοιμαστεί για την επερχόμενη «πρώτη γενιά» αποσυναρμολόγησης ανεμογεννητριών, ενισχύοντας τις υποδομές και το θεσμικό πλαίσιο για την κυκλική οικονομία.

Παράλληλα, η κοινωνική αποδοχή των έργων παραμένει κρίσιμος παράγοντας για την επιτυχία της ενεργειακής μετάβασης. Η θεσμοθετημένη απόδοση 3% των εσόδων των έργων ΑΠΕ στις τοπικές κοινότητες (EEA, 2023) αποτελεί σημαντικό εργαλείο ενίσχυσης της κοινωνικής συνοχής και της συμμετοχής των πολιτών. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω ενίσχυση των μηχανισμών διαβούλευσης, διαφάνειας και λογοδοσίας, ώστε να διασφαλιστεί η ισόρροπη ανάπτυξη και η αποφυγή συγκρούσεων χρήσεων γης.

Τέλος, η ενίσχυση της έρευνας και της καινοτομίας στον τομέα της αιολικής ενέργειας, η εκπαίδευση εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού και η ενσωμάτωση των πανεπιστημιακών και τεχνολογικών ιδρυμάτων στην παραγωγική διαδικασία αποτελούν αναγκαίες προϋποθέσεις για τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα του κλάδου. Η Ελλάδα διαθέτει το επιστημονικό δυναμικό και τις τεχνικές δυνατότητες να εξελιχθεί σε περιφερειακό κόμβο αιολικής τεχνολογίας, αρκεί να υπάρξει στρατηγική συνέπεια και θεσμική στήριξη.

2.2 Πλεονεκτήματα της αιολικής ενέργειας

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μία από τις σημαντικότερες και πιο αναπτυσσόμενες τεχνολογίες παραγωγής ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως, με αρκετά σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο σε ενεργειακό, περιβαλλοντικό όσο και οικονομικό επίπεδο. Στην Ελλάδα, η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας έχει επιταχυνθεί τα τελευταία χρόνια λόγω του μεγάλης έκτασης αιολικού δυναμικού της χώρας, καθώς και της ανάγκης μείωσης της εξάρτησης από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα (ΕΛΕΤΑΕΝ, 2025).

Καταρχάς, η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ανεμογεννητριών εκπέμπει περίπου 9 έως 12 γραμμάρια ισοδύναμου CO₂ ανά κιλοβατώρα (gCO₂/kWh) κατά μέσο όρο στον κύκλο ζωής της, συμπεριλαμβανομένης της κατασκευής, της εγκατάστασης, της λειτουργίας και της απόσυρσης (Bashir, 2021; Lelek et al., 2021). Αυτή η τιμή είναι έναντι πολλών τάξεων μεγέθους χαμηλότερη από τις εκπομπές ενός λιγνιτικού ή φυσικού αερίου σταθμού παραγωγής, γεγονός που καθιστά την αιολική ενέργεια βασικό πυλώνα της προσπάθειας μείωσης των παγκόσμιων εκπομπών και της αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022).

Επιπλέον, η αιολική ενέργεια είναι οικονομικά ανταγωνιστική και συχνά εκλαμβάνεται ως μία από τις πλέον συμφέρουσες επιλογές καθαρής ενέργειας. Η μείωση του κόστους τεχνολογιών ανεμογεννητριών, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη αποδοτικότητα και την εμπειρία εγκατάστασης, έχει καταστήσει την αιολική ενέργεια εξαιρετικά ελκυστική για επενδύσεις. Πέραν από τα χαμηλά λειτουργικά έξοδα, η αιολική ενέργεια δεν απαιτεί το κόστος καυσίμου, προσφέροντας οικονομική σταθερότητα μακροχρόνια.

Ένα ακόμα θετικό χαρακτηριστικό της αιολικής τεχνολογίας είναι ο δυναμισμός της χωροθέτησης και η ευελιξία χρήσης γης. Οι ανεμογεννήτριες καταλαμβάνουν σχετικά μικρή

έκταση γης ως προς την άμεση κατασκευή τους, επιτρέποντας τη συνύπαρξη με άλλες γεωργικές ή κτηνοτροφικές δραστηριότητες, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για τις αγροτικές περιοχές της Ελλάδας. Η δυνατότητα συνύπαρξης αυτή περιορίζει τον ανταγωνισμό στη χρήση γης, προσφέροντας προστιθέμενη αξία στην τοπική ανάπτυξη χωρίς να αλλοιώνει ριζικά την παραδοσιακή χρήση γης.

Επίσης, η αιολική ενέργεια συνεισφέρει σημαντικά στην ενεργειακή ασφάλεια της χώρας, μειώνοντας την εξάρτηση από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα και τους γεωπολιτικούς κινδύνους που συνδέονται με αυτά. Η εγχώρια παραγωγή ενέργειας από αέρα διαθέτει σταθερό κόστος παραγωγής που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις των διεθνών αγορών καυσίμων, προσφέροντας έτσι μεγαλύτερη σταθερότητα στο ενεργειακό σύστημα (Bhattacharya et al., 2015; Kaldellis, 2019).

Τέλος, η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας επιφέρει σημαντικά κοινωνικοοικονομικά οφέλη, όπως η δημιουργία θέσεων εργασίας στη φάση κατασκευής, εγκατάστασης και συντήρησης των αιολικών πάρκων, καθώς και η ενίσχυση της περιφερειακής οικονομίας μέσω των επενδύσεων και των φόρων. Ιδιαίτερα για την Ελλάδα, η οποία επιδιώκει την ισόρροπη ανάπτυξη των περιφερειών και την ενδυνάμωση της τοπικής κοινωνίας, η αιολική ενέργεια μπορεί να αποτελέσει σημαντικό μοχλό βιώσιμης ανάπτυξης.

2.3 Μειονεκτήματα της αιολικής ενέργειας

2.3.1 Οικονομικές επιπτώσεις

Παρόλο που η αιολική ενέργεια αποτελεί μία από τις πλέον υποσχόμενες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με θετικές επιπτώσεις στην ενεργειακή ασφάλεια και στο περιβάλλον, παρουσιάζει και ορισμένες σημαντικές οικονομικές προκλήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη στον στρατηγικό ενεργειακό σχεδιασμό.

Αρχικά, η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα υψηλό αρχικό επενδυτικό κόστος. Συγκεκριμένα, περίπου το 75% του συνολικού κόστους ενός έργου αιολικής ενέργειας σχετίζεται με τη φάση της εγκατάστασης, περιλαμβάνοντας το κόστος της ανεμογεννήτριας, των θεμελιώσεων, της σύνδεσης στο ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς και άλλων υποστηρικτικών υποδομών. Το γεγονός αυτό καθιστά την αιολική ενέργεια μια έντονα κεφαλαιουχική τεχνολογία, γεγονός που επιβαρύνει σημαντικά τη χρηματοδότηση των έργων, ιδιαίτερα σε αγορές με ασταθές ρυθμιστικό περιβάλλον.

Επιπλέον, παρόλο που το κόστος λειτουργίας και συντήρησης των αιολικών σταθμών θεωρείται χαμηλό σε σύγκριση με άλλες μορφές ενέργειας (περίπου 1,2-1,5 €/kWh), αποτελεί ένα σημαντικό ποσοστό των συνολικών δαπανών του κύκλου ζωής του έργου. Πέραν της τεχνικής συντήρησης, στις δαπάνες αυτές περιλαμβάνονται και οι ασφαλίσσεις, τα ενοίκια γης, καθώς και τα γενικά λειτουργικά έξοδα.

Ένα ακόμη βασικό οικονομικό μειονέκτημα σχετίζεται με τη μεταβλητότητα της αιολικής παραγωγής. Η στοχαστική φύση του ανέμου καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη μηχανισμών εξισορρόπησης ισχύος, οι οποίοι εξασφαλίζουν τη σταθερότητα του συστήματος ηλεκτρισμού. Το πρόσθετο αυτό κόστος, γνωστό ως κόστος εξισορρόπησης, μπορεί να φτάσει έως και τα 4

€/MWh όταν η αιολική ενέργεια συμμετέχει με ποσοστό έως 20% στο ενεργειακό μείγμα. Παράλληλα, η ανάγκη ενίσχυσης ή αναβάθμισης του δικτύου μεταφοράς, προκειμένου να ενσωματωθούν οι αιολικοί σταθμοί -ιδιαίτερα όταν αυτοί βρίσκονται σε απομακρυσμένες ή θαλάσσιες περιοχές- προσθέτει επιπλέον οικονομική επιβάρυνση.

Αξίζει επίσης να επισημανθεί ο κίνδυνος που απορρέει από τη θεσμική και ρυθμιστική αβεβαιότητα. Οι μεταβαλλόμενες πολιτικές και ρυθμιστικές συνθήκες στις αγορές ενέργειας δημιουργούν ένα ασταθές πλαίσιο για επενδύσεις, το οποίο επηρεάζει δυσανάλογα τις τεχνολογίες με υψηλό αρχικό κόστος, όπως η αιολική ενέργεια. Οι επενδυτές και κυρίως οι μικρότερου μεγέθους φορείς, αντιμετωπίζουν αυξημένο ρίσκο σε περιβάλλοντα με απρόβλεπτες αλλαγές στις τιμολογιακές πολιτικές ή στα συστήματα ενίσχυσης.

Τέλος, η χρονική ασυμφωνία μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης ενέργειας αποτελεί έναν ακόμα παράγοντα που μειώνει τη χρηματοοικονομική απόδοση των αιολικών έργων. Η παραγωγή αιολικής ενέργειας κορυφώνεται συχνά σε χρονικές περιόδους όπου η ζήτηση είναι χαμηλή, όπως κατά τη διάρκεια της νύχτας ή τους χειμερινούς μήνες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πτώση της αγοραίας αξίας της παραγόμενης ενέργειας, γεγονός που περιορίζει τα οικονομικά οφέλη των παραγωγών. (European Wind Energy Association et al., 2009)

2.3.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Η ανάπτυξη αιολικών πάρκων έχει σημαντικές επιπτώσεις στην πανίδα, με κύριες ανησυχίες να περιλαμβάνουν τη σύγκρουση πτηνών με ανεμογεννήτριες, τον εκτοπισμό ειδών, την τροποποίηση των οικοτόπων και την πιθανή διατάραξη των μεταναστευτικών διαδρομών.

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που σχετίζονται με την αιολική ενέργεια είναι η θνησιμότητα των πτηνών λόγω συγκρούσεων με τις ανεμογεννήτριες. Ο κίνδυνος αυτός εξαρτάται από παράγοντες όπως η τοποθεσία του αιολικού πάρκου, το ύψος πτήσης των πτηνών και οι καιρικές συνθήκες. Έρευνες δείχνουν ότι τα μεγάλα πτηνά, όπως οι αετοί και οι γύπες, καθώς και τα θαλασσοπούλια, διατρέχουν αυξημένο κίνδυνο λόγω της χαμηλής ευελιξίας τους στον αέρα (Drewitt & Langston, 2006). Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα παρουσιάζουν ακόμη μεγαλύτερο κίνδυνο για τα μεταναστευτικά πουλιά, καθώς ένα σημαντικό ποσοστό πετά σε ύψη που τα εκθέτουν στη ζώνη κινδύνου των πτερυγίων των ανεμογεννητριών (Desholm et al., 2006).

Η παρουσία ανεμογεννητριών μπορεί επίσης να επηρεάσει τις μεταναστευτικές διαδρομές των πτηνών. Τα πουλιά αποφεύγουν τις περιοχές όπου έχουν εγκατασταθεί ανεμογεννήτριες, γεγονός που μπορεί να τα αναγκάσει να αλλάξουν πορεία, να καταναλώσουν περισσότερη ενέργεια και, σε ορισμένες περιπτώσεις, να αντιμετωπίσουν μεγαλύτερο κίνδυνο θνησιμότητας (Hürpp et al., 2006). Η αναγκαστική αλλαγή διαδρομών μπορεί να έχει σωρευτικές επιπτώσεις στις πληθυσμιακές δυναμικές ορισμένων ειδών, ιδιαίτερα αν τα

αιολικά πάρκα βρίσκονται κατά μήκος των μεγάλων μεταναστευτικών διαδρομών (Drewitt & Langston, 2006).

Επιπλέον, τα αιολικά πάρκα, τόσο τα χερσαία όσο και τα υπεράκτια, μπορούν να οδηγήσουν στην απώλεια και την τροποποίηση φυσικών οικοτόπων. Η δημιουργία υποδομών, όπως δρόμοι πρόσβασης, θεμελιώσεις ανεμογεννητριών και δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να επηρεάσει τη διαθεσιμότητα κατάλληλων περιοχών για την αναπαραγωγή και την τροφοληψία πολλών ειδών. Στα υπεράκτια αιολικά πάρκα, οι ανεμογεννήτριες μπορεί να λειτουργήσουν ως τεχνητοί ύφαλοι, αλλάζοντας τη δυναμική των τοπικών οικοσυστημάτων και επηρεάζοντας τη συμπεριφορά των θαλάσσιων οργανισμών.

Ειδικά για τα θαλάσσια οικοσυστήματα, οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες μπορούν να έχουν επιπτώσεις στους θαλάσσιους οργανισμούς μέσω του υποβρύχιου θορύβου που παράγεται κατά την κατασκευή και λειτουργία τους. Η αυξημένη ανθρώπινη δραστηριότητα στις θαλάσσιες περιοχές όπου αναπτύσσονται αιολικά πάρκα μπορεί να διαταράξει τις μεταναστευτικές διαδρομές των ψαριών και των θαλάσσιων θηλαστικών, επηρεάζοντας τη συνολική οικολογική ισορροπία.

Για την ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων της αιολικής ενέργειας στην πανίδα, έχουν προταθεί διάφορες στρατηγικές. Η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών είναι κρίσιμη για την προστασία των πτηνών και των μεταναστευτικών διαδρομών. Επιπλέον, η χρήση τεχνολογιών αποτροπής σύγκρουσης, όπως ειδικός φωτισμός, ακουστικά σήματα και τροποποίηση της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων, μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο πρόσκρουσης. Η συνεχής παρακολούθηση της συμπεριφοράς της πανίδας μέσω συστημάτων ραντάρ και θερμικών καμερών μπορεί να παρέχει πολύτιμα δεδομένα για την αξιολόγηση και τη βελτίωση των μέτρων μετριασμού των επιπτώσεων. Επιπλέον, η διακοπή της λειτουργίας των ανεμογεννητριών σε περιόδους αυξημένης μεταναστευτικής δραστηριότητας μπορεί να μειώσει δραστικά τον κίνδυνο σύγκρουσης για τα πτηνά. (Drewitt & Langston, 2006).

2.4 Κοινωνική αποδοχή και συγκρούσεις χρήσεων γης

Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας έχει προκαλέσει έντονες αντιπαραθέσεις σχετικά με τη χρήση γης και την κοινωνική αποδοχή της εγκατάστασης ανεμογεννητριών. Η συνεχής επέκταση των αιολικών πάρκων επηρεάζει τις τοπικές κοινότητες, δημιουργώντας συγκρούσεις μεταξύ διαφόρων κοινωνικών ομάδων και φορέων. Οι επιπτώσεις στο τοπίο, τα οικονομικά οφέλη και η διανομή τους, καθώς και η αίσθηση δικαιοσύνης στη διαδικασία ανάπτυξης των έργων, παίζουν καθοριστικό ρόλο στη στάση των κατοίκων απέναντι στις ανεμογεννήτριες.

Σε πολλές περιπτώσεις, οι ανεμογεννήτριες εγκαθίστανται σε περιοχές όπου υπάρχουν άλλες, ήδη καθιερωμένες, χρήσεις γης, προκαλώντας αντιδράσεις από τις τοπικές κοινωνίες. Μια ανάλυση περιπτώσεων από την Ισπανία και την Τσεχία έδειξε ότι οι αντιδράσεις προέρχονται από έξι βασικούς παράγοντες: την προστασία της φύσης, τη διανομή των

ωφελειών, την ιδιοκτησία και τις ανέσεις, τις ανησυχίες για την αισθητική του τοπίου. Αυτές οι συγκρούσεις δεν είναι ομοιόμορφες, αλλά διαφέρουν ανάλογα με τη γεωγραφικά περιοχή και τις κοινωνικές δυναμικές κάθε κοινότητας. Σε πολλές περιπτώσεις, αναπτύσσονται έντονες διαφωνίες μεταξύ γειτόνων, εντός των ίδιων δημοτικών αρχών ή μεταξύ τοπικών και κρατικών φορέων, γεγονός που δυσχεραίνει τη διαδικασία ανάπτυξης των έργων (Frantál et al., 2023).

Οι συγκρούσεις που σχετίζονται με την αιολική ενέργεια δεν περιορίζονται μόνο στις τοπικές κοινότητες, αλλά αποκτούν και ευρύτερη περιβαλλοντική και κοινωνική διάσταση. Η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε διάφορες περιοχές του κόσμου έχει αναδείξει ζητήματα περιβαλλοντικής δικαιοσύνης, καθώς ο τρόπος με τον οποίο επιλέγονται οι τοποθεσίες και η διανομή των ωφελειών δεν είναι πάντα δίκαιος. Σε πολλές περιπτώσεις, οι τοπικές κοινότητες αισθάνονται ότι δεν έχουν λόγο στη διαδικασία λήψης αποφάσεων και ότι η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών επιβάλλεται από εξωτερικούς φορείς, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι ανάγκες και οι ανησυχίες τους. Η άνιση ανάπτυξη των αιολικών πάρκων συχνά δημιουργεί εντάσεις, ειδικά όταν οι ενεργειακές υποδομές τοποθετούνται σε περιοχές με χαμηλό κοινωνικοοικονομικό επίπεδο. Χωρίς οι κάτοικοι να επωφελούνται άμεσα από την παραγόμενη ενέργεια (Avila, 2018).

Πιο συγκεκριμένα, στην Ελλάδα, ένας από τους βασικότερους παράγοντες που διαμορφώνουν την στάση των κατοίκων απέναντι στα αιολικά έργα είναι η εμπιστοσύνη προς τους φορείς υλοποίησης. Όταν οι κάτοικοι αισθάνονται ότι οι επενδυτές και οι αρμόδιες αρχές δρουν με διαφάνεια, οι αντιδράσεις μειώνονται σημαντικά. Η έλλειψη ενημέρωσης και η αίσθηση ότι οι αποφάσεις λαμβάνονται χωρίς τη συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών δημιουργούν δυσπιστία και ενισχύουν τις αντιδράσεις.

Παρά την κοινή πεποίθηση ότι το φαινόμενο NIMBY (Not In My Back Yard) είναι η κύρια αιτία αντίστασης στα αιολικά πάρκα, ευρήματα έρευνας δείχνουν ότι αυτό δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο στην Ελλάδα. Αντίθετα, καθοριστικοί παράγοντες αποδοχής είναι η διαφάνεια στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, η συμμετοχή των κατοίκων στον σχεδιασμό των έργων, καθώς και τα αντιληπτά οφέλη για την τοπική οικονομία. Όταν οι πολίτες αισθάνονται ότι τα αιολικά πάρκα μπορούν να ενισχύσουν την ανάπτυξη της περιοχής τους, όπως μέσω της δημιουργίας θέσεων εργασίας ή της παροχής αντισταθμιστικών οφελών, η αποδοχή τους αυξάνεται.

Επιπλέον, η στάση των κατοίκων επηρεάζεται από την οπτική και ηχητική όχληση των ανεμογεννητριών, καθώς και από την αντίληψη τους για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των έργων. Σε περιοχές με έντονο φυσικό και πολιτιστικό ενδιαφέρον, οι αντιδράσεις είναι εντονότερες, ιδιαίτερα όταν θεωρείται ότι η εγκατάσταση ανεμογεννητριών αλλοιώνει το τοπίο. (Skiniti et al., 2022).

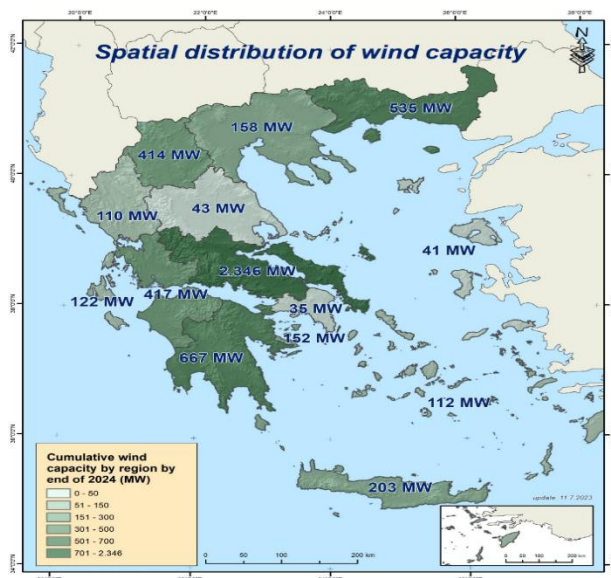
Η αιολική ενέργεια έχει τη δυνατότητα να συμβάλει στη μετάβαση προς ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό σύστημα, αλλά η επιτυχία της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο με τον οποίο αναπτύσσονται τα έργα και τη συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών. Οι συγκρούσεις χρήσεων γης και η κοινωνική αποδοχή αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την επιτυχή υλοποίηση των αιολικών πάρκων. Οι ορθές πρακτικές, όπως η διαφανής λήψη αποφάσεων, η δίκαιη κατανομή των ωφελειών και η συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών στη διαδικασία

σχεδιασμού, μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση των αντιδράσεων και στη διασφάλιση μιας ισορροπημένης ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας.

2.5 Παραδείγματα έργων

Η εξέλιξη της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιόδους: την περίοδο ελέγχου από το κράτος (1982-1998), την περίοδο με βάση την τιμή εγγυημένης αποδοχής (FIT) και τον ιδιωτικό έλεγχο (1998-2018) και την τρέχουσα περίοδο με την τιμή προσαύξησης (FIP), όπου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας από αιολική ενέργεια καθορίζεται κυρίως από την οριακή τιμή της τοπικής αγοράς.

Όσον αφορά την γεωγραφική κατανομή των υπαρχόντων αιολικών πάρκων, η πλειονότητα τους βρίσκεται στην Κεντρική Ελλάδα και στην Εύβοια (1863 MW), στην Πελοπόννησο (639 MW), και στην Ανατολική Μακεδονία και Θράκη (535 MW) (ΗΑΕΕ, 2022). Δυστυχώς, ο αριθμός των αιολικών πάρκων στο Βόρειο και Νότιο Αιγαίο παραμένει μικρός για πολλά χρόνια (περίπου 120 MW), παρά το εξαιρετικό αιολικό δυναμικό και το εξαιρετικά υψηλό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα περισσότερα νησιά. Από την άλλη πλευρά, η Κρήτη αποτελεί μια ειδική περίπτωση, καθώς το νησί είναι πρωτοπόρο στην αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας από τη δεκαετία του 1990. Ωστόσο, η αιολική ενέργεια στην Κρήτη έχει σταθεροποιηθεί κοντά στα 200 MW τα τελευταία 5 χρόνια, λόγω των περιορισμών που επιβάλλονται από τη σταθερότητα του τοπικού δικτύου (Kaldellis, 2019).

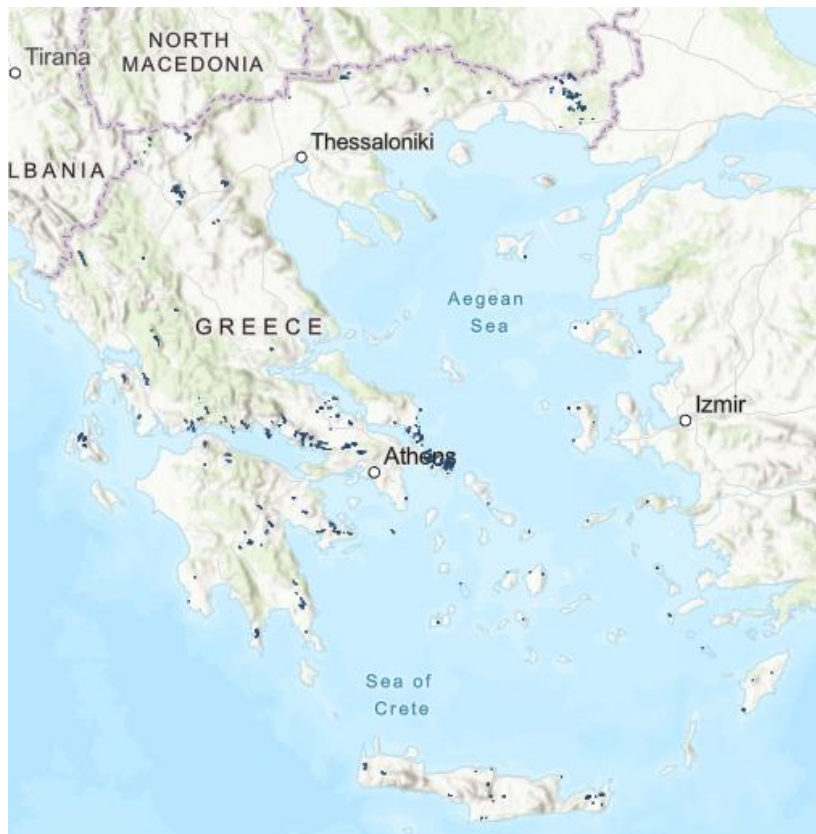


Εικόνα 1 Χωρική κατανομή της αιολικής ισχύος στην Ελλάδα έως το τέλος του 2024 Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ

Παρόλο που η χώρα διαθέτει πλούσιο αιολικό δυναμικό, ειδικά στα νησιά και στις παραθαλάσσιες περιοχές, η αξιοποίηση αυτού του δυναμικού περιορίζεται εν μέρει από θεσμικά, κοινωνικά και τεχνικά εμπόδια.

Ένα από τα σημαντικά εμπόδια είναι η χρονοβόρα διαδικασία αδειοδότησης, η οποία σε συνδυασμό με τις τοπικές αντιδράσεις και τη γραφειοκρατία εμποδίζει την υλοποίηση πολλών

έργων. Παρά το γεγονός ότι η αιολική ενέργεια θεωρείται πλέον η φθηνότερη μορφή νέας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, λιγότερο από το 13% των έργων που διαθέτουν ή αναμένουν προσφορά σύνδεσης στο δίκτυο αφορούν αιολικά πάρκα. Αντίθετα, το 85% αφορά φωτοβολταϊκά έργα.



Εικόνα 2 Χάρτης εν λειτουργία Αιολικών Πάρκων Πηγή : ΕΛΕΤΑΕΝ

Το μέλλον της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα φαίνεται να επεκτείνεται και προς την ανάπτυξη υπεράκτιων (offshore) αιολικών πάρκων. Το 2022 θεσμοθετήθηκε το απαραίτητο ρυθμιστικό πλαίσιο, δημιουργώντας τις προϋποθέσεις για μελλοντικές επενδύσεις σε θαλάσσιες περιοχές με υψηλό δυναμικό. Ωστόσο, η χώρα εξακολουθεί να υστερεί σημαντικά σε σχέση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες ως προς την αξιοποίηση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, λόγω τεχνικών, γεωπολιτικών και θεσμικών δυσκολιών (ΗΑΕΕ, 2022).

Κεφάλαιο 3ο: Φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα

3.1 Τρέχουσα κατάσταση και προοπτικές ανάπτυξης

Η Ελλάδα βρίσκεται σε μια μεταβατική περίοδο όσον αφορά την ενεργειακή της πολιτική, με τα φωτοβολταϊκά συστήματα να διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στη καθαρή ενεργειακή μετάβαση της χώρας. Αυτή τη στιγμή, η ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι ραγδαία, με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών να αυξάνεται εξαιτίας της σταθερής μείωσης του κόστους των φωτοβολταϊκών πάνελ και της ιδιαίτερα ευνοϊκής ηλιοφάνειας που επικρατεί στη χώρα.

Σύμφωνα με τον Εθνικό Σχεδιασμό για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΝΠΕΚ), αναμένεται ότι μέχρι το 2050, τα φωτοβολταϊκά θα καλύπτουν το 32,47% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Η ενεργειακή αυτή πηγή αναμένεται να αποτελέσει πάνω από το 50% της εγκατεστημένης ισχύος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, προσδιορίζοντας τη σημασία τους για την επίτευξη των στόχων για καθαρές εκπομπές CO₂ μέχρι το 2050.

Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σήμερα γίνεται κυρίως σε στέγες κτιρίων και στο έδαφος. Ωστόσο, οι νέες μέθοδοι εγκατάστασης, όπως τα φωτοβολταϊκά πάνελ σε βάσεις νερού και αγροβολταϊκά συστήματα που επιτρέπουν την ταυτόχρονη παραγωγή τροφίμων και ηλεκτρικής ενέργειας, αυξάνουν τις δυνατότητες ανάπτυξης. Η υψηλή ηλιοφάνεια της χώρας και το χαμηλό κόστος των φωτοβολταϊκών πάνελ ενισχύουν την ανταγωνιστικότητα αυτής της τεχνολογίας σε σύγκριση με τις άλλες πηγές ενέργειας.

3.2 Πλεονεκτήματα

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων αποτελεί μία από τις πιο ελπιδοφόρες και πρακτικές λύσεις για την μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μοντέλο. Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας δεν περιορίζονται μόνο στο περιβάλλον, αλλά επεκτείνονται και στην οικονομία και τη δημόσια υγεία.

Αρχικά, σε οικονομικό επίπεδο, τα φωτοβολταϊκά προσφέρουν τη δυνατότητα σημαντικής εξοικονόμησης στο κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος. Σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ, η παραγωγή ενέργειας από ηλιακά πάνελ επιτρέπει τη μείωση των λογαριασμών, ενώ παράλληλα αυξάνει την αξία του ακινήτου στο οποίο έχουν εγκατασταθεί. Όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά, η προσθήκη ενός συστήματος ηλιακής ενέργειας σε ένα σπίτι θεωρείται αναβάθμιση υψηλής αξίας, παρόμοια με την ανακαίνιση μιας κουζίνας ή ενός μπάνιου, ενώ το κόστος εγκατάστασης μπορεί να αποσβεστεί σε διάστημα λίγων ετών, ανάλογα με την κατανάλωση και τις τοπικές τιμές ρεύματος. (*Benefits of Residential Solar Electricity*, 2015)

Πέρα από οικονομικό όφελος, σημαντικά είναι και τα οφέλη για την υγεία και το περιβάλλον. Μελέτη που δημοσιεύθηκε από το Resources for the Future και βασίζεται σε δεδομένα από τη Χιλή, αναδεικνύει τον θετικό αντίκτυπο της ηλιακής ενέργειας στη δημόσια υγεία. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά οδήγησε σε μείωση των εισαγωγών σε νοσοκομεία για αναπνευστικά προβλήματα. Το φαινόμενο αυτό ήταν ιδιαίτερα έντονο σε περιοχές κοντά σε μονάδες παραγωγής ενέργειας από άνθρακα, οι οποίες αντικαταστάθηκαν σταδιακά από ηλιακά συστήματα (Graff Zivin et al., 2023). Αυτό το παράδειγμα δείχνει με ξεκάθαρο τρόπο πώς η ηλιακή ενέργεια δεν συμβάλει μόνο στην πράσινη μετάβαση, αλλά έχει και άμεση θετική επίδραση στην ποιότητα ζωής των ανθρώπων.

Στον τεχνολογικό τομέα, η πρόοδος στην απόδοση των φωτοβολταϊκών είναι αξιοσημείωτη. Νέα ερευνητικά δεδομένα που δημοσιεύθηκαν στο Scientific Reports επιβεβαιώνουν ότι οι τεχνικές παρακολούθησης του μέγιστου σημείου ισχύος (MPPT), τόσο

μέσω συμβατικών μεθόδων όσο και μέσω τεχνητής νοημοσύνης, αυξάνουν την αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η μελέτη έδειξε πως αυτές οι μέθοδοι μπορούν να προβλέψουν με μεγάλη ακρίβεια την παραγόμενη ισχύ, προσαρμόζοντας σε πραγματικό χρόνο την απόδοση του συστήματος και αξιοποιώντας καλύτερα την ηλιακή ακτινοβολία (Aklilu et al., 2024).

Συνολικά, τα φωτοβολταϊκά συνδυάζουν τρία βασικά πλεονεκτήματα: συμβάλλουν στην προστασία του περιβάλλοντος μειώνοντας τις εκπομπές ρύπων, προσφέρουν οικονομικά οφέλη τόσο για τα νοικοκυριά όσο και για τις επιχειρήσεις, και ενισχύουν την υγεία των πολιτών, περιορίζοντας τις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Με την τεχνολογία να εξελίσσεται και την πρόσβαση στα φωτοβολταϊκά να γίνεται ολοένα και πιο προσιτή, η επένδυση στην ηλιακή ενέργεια δεν αποτελεί απλώς μια περιβαλλοντικά υπεύθυνη επιλογή, αλλά και μια στρατηγική απόφαση με πολύπλευρα οφέλη.

3.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Η ηλιακή ενέργεια θεωρείται από τις πιο υποσχόμενες μορφές καθαρής ενέργειας, και τα φωτοβολταϊκά συστήματα παίζουν κομβικό ρόλο στη σταδιακή απανθρακοποίηση του ενεργειακού μας μείγματος. Ωστόσο, παρότι η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά δεν παράγει ρύπους κατά τη λειτουργία τους, η συνολική περιβαλλοντική επίπτωση δεν είναι αμελητέα. Τα στάδια παραγωγής, χρήσης και τελικής διαχείρισης των πάνελ συνδέονται με σημαντικές περιβαλλοντικές προκλήσεις, τις οποίες οφείλουμε να αντιμετωπίσουμε με ρεαλισμό και βιώσιμες λύσεις.

Κατά την κατασκευή των φωτοβολταϊκών, απαιτείται σημαντική ενέργεια καθώς και χρήση διαφόρων υλικών, πολλά από τα οποία είναι σπάνια ή τοξικά. Η διαδικασία καθαρισμού του πυριτίου- του βασικού υλικού των περισσότερων πάνελ- περιλαμβάνει χημικά όπως το φθοριούχο υδρογόνο, το οποίο μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία. Επιπλέον, ορισμένα πάνελ περιλαμβάνουν βαρέα μέταλλα όπως το κάδμιο και μόλυβδο, γεγονός που εγείρει ανησυχίες για τη ρύπανση του εδάφους και του νερού σε περίπτωση κακής διαχείρισης των αποβλήτων τους. (Tawalbeh et al., 2021).

Ταυτόχρονα, η αυξημένη παγκόσμια ζήτηση για φωτοβολταϊκά έχει δημιουργήσει μεγάλη πίεση στην εξόρυξη πρώτων υλών όπως το πυρίτιο, ασήμι και αλουμίνιο. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι ροές πυριτίου μεταξύ βασικών παραγωγικών κέντρων κυρίως ΗΠΑ και Κίνα- εντείνουν τον ανταγωνισμό για μη ανανεώσιμους πόρους, ενώ η επεξεργασία αυτών των υλικών προκαλεί ενεργειακή κατανάλωση και περιβαλλοντική επιβάρυνση (Zhang et al., 2024). Παράλληλα, η υπερκατανάλωση υλικών οδηγεί σε σπατάλη πρώτων υλών, καθώς μεγάλο μέρος των αποβλήτων από τις διαδικασίες κοπής και μορφοποίησης των πάνελ δεν επαναχρησιμοποιείται (Cellura et al., 2023).

Ένα ιδιαίτερα κρίσιμο θέμα είναι η διαχείριση των φωτοβολταϊκών στο τέλος της ζωής τους. Τα πάνελ έχουν διάρκεια ζωής περίπου 25-30 έτη, και όταν φτάσουν στο τέλος τους, μετατρέπονται σε μια ιδιαίτερη μορφή ηλεκτρονικών αποβλήτων (e-waste). Αν δεν ανακυκλωθούν σωστά, μπορεί να καταλήξουν σε χώρους υγειονομικής ταφής, απελευθερώνοντας επικίνδυνες ουσίες και επιβαρύνοντας το περιβάλλον (U.S. Energy Information Administration, n.d.).

Η τεχνολογία και η ανακύκλωση φωτοβολταϊκών βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο. Παρά το γεγονός ότι είναι τεχνικά εφικτή η ανάκτηση υλικών όπως το γυαλί, το πυρίτιο και το αλουμίνιο, το υψηλό κόστος και η έλλειψη υποδομών καθιστούν τη διαδικασία μη βιώσιμη οικονομικά. Σε πολλές χώρες απουσιάζει ένα σαφές ρυθμιστικό πλαίσιο που να ενθαρρύνει ή να επιβάλλει την ανακύκλωση, με αποτέλεσμα η πλειονότητα των πάνελ να μην επαναχρησιμοποιείται ή να οδηγείται σε ανεξέλεγκτη απόρριψη (Guo et al., 2020; Cao et al., 2023).

Ενδιαφέρουσα εναλλακτική αποτελεί η επαναχρησιμοποίηση παλαιών πάνελ για εφαρμογές μικρής κλίμακας ή σε αναπτυσσόμενες χώρες. Ωστόσο, αυτή η λύση δεν είναι μακροπρόθεσμα βιώσιμη, καθώς τέτοια πάνελ έχουν μειωμένη απόδοση και συχνά εξακολουθούν να περιέχουν επιβλαβή υλικά (Cellura et al., 2023).

3.4 Κοινωνική αποδοχή και συγκρούσεις χρήσεων γης

Η κοινωνική αποδοχή της ηλιακής ενέργειας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την επιτυχία των έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ιδιαίτερα των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Αν και η ηλιακή ενέργεια χαίρει γενικής υποστήριξης σε μακροπολιτικό επίπεδο, αυτό δεν σημαίνει ότι η τοπική κοινωνία αποδέχεται πάντα την εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων στην περιοχή της. Η κοινωνική αποδοχή δεν είναι ενιαία έννοια, αλλά διακρίνεται σε τρία επίπεδα: μακροπολιτικό (γενική στήριξη των πολιτών προς τις ΑΠΕ), κοινωνικοπολιτικό (υποστήριξη από θεσμούς, οργανισμούς και κοινωνικούς φορείς) και τοπικό (συγκατάθεση των κοινοτήτων που επηρεάζονται άμεσα). Τοπικές αντιδράσεις, συχνά με την μορφή του φαινομένου «όχι στην αυλή μου» (NIMBY), μπορούν να προκαλέσουν καθυστερήσεις ή ακόμα και ματαιώσεις έργων, όταν οι κάτοικοι θεωρούν ότι θίγεται η ποιότητα ζωής ή η χρήση γης τους (Wüstenhagen et al., 2007).

Οι εντάσεις αυτές γίνονται πιο έντονες όταν τα έργα ηλιακής ενέργειας εγκαθίστανται σε περιοχές αγροτικής παραγωγής, δημιουργώντας συγκρούσεις χρήσεων γης. Η κατανόηση αυτών των συγκρούσεων προϋποθέτει την εφαρμογή της έννοιας της ενεργειακής δικαιοσύνης, η οποία περιλαμβάνει τόσο τη διαδικαστική διάσταση (δηλαδή το αν και πώς συμμετέχουν οι τοπικές κοινωνίες στη λήψη αποφάσεων) όσο και την κατανομητική διάσταση, που αφορά το πώς μοιράζονται τα οφέλη και τα βάρη των έργων. Εάν οι τοπικές κοινότητες νιώθουν ότι δεν έχουν φωνή ή ότι τα έργα επιβάλλονται χωρίς ουσιαστικό διάλογο, τότε η αποδοχή μειώνεται σημαντικά, ακόμη και αν τα έργα είναι τεχνικά και περιβαλλοντικά βιώσιμα (Sovacool & Dworkin, 2015).

Μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση για την αντιμετώπιση των συγκρούσεων αυτών είναι το μοντέλο των αγροβολταϊκών, το οποίο συνδυάζει την παραγωγή ενέργειας με την γεωργική εκμετάλλευση της γης. Αυτή η πρακτική όχι μόνο μειώνει την πίεση για την αλλαγή χρήσης γης, αλλά ενισχύει και τη σχέση εμπιστοσύνης με τις τοπικές κοινωνίες, αφού προσφέρει άμεσα οφέλη στους παραγωγούς, όπως βελτιωμένες συνθήκες καλλιέργειας και

αποδοτικότερη χρήση του νερού. Επιπλέον, συμβάλλει στη μείωση της θερμοκρασίας του εδάφους και ενισχύει τη βιοποικιλότητα, καθιστώντας τα αγροβολταϊκά μια λύση με περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη (Barron-Gafford et al., 2019).

Τα αγροβολταϊκά συστήματα, παρά τα πολλαπλά περιβαλλοντικά και ενεργειακά οφέλη τους, παρουσιάζουν ως σημαντικό μειονέκτημα την «κατάληψη» της αγροτικής γης, η οποία οδηγεί σε άμεση ή έμμεση στέρηση γης από την αγροτική παραγωγή. Επιστημονικές μελέτες συστηματικής ανασκόπησης καταδεικνύουν ότι, ακόμη και όταν η χρήση της γης είναι ταυτόχρονη, η παρουσία των πάνελ περιορίζει τη διαθέσιμη επιφάνεια φύτευσης, επηρεάζει τις παραδοσιακές αγροτικές πρακτικές, και προκαλεί πιθανές πτώσεις απόδοσης σε ορισμένες καλλιέργειες που δεν είναι κατάλληλες για σκιερό ή ημισκιερό μικροκλίμα (Barron-Gafford et al., 2019; IEA-PVPS, 2025).

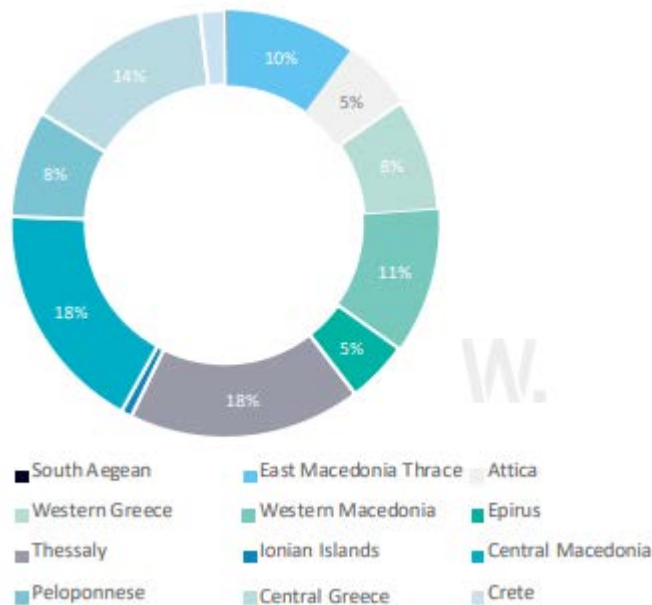
Επιπλέον, η εγκατάσταση αγροβολταϊκών μεταβάλλει το τοπικό μικροκλίμα, τροποποιώντας τη διαθεσιμότητα φωτός, υγρασίας και θερμοκρασίας, παράγοντες που έχουν κρίσιμη σημασία για τη βέλτιστη ανάπτυξη πολλών καλλιεργειών (Weselek et al., 2019). Επισημαίνεται ότι, για να αποτραπούν απώλειες παραγωγής και θιγόμενη βιοποικιλότητα, είναι απαραίτητη η σωστή χωροθέτηση των πάνελ και η προσεκτική επιλογή των αγροτικών ειδών που θα καλλιεργηθούν κάτω από τα φωτοβολταϊκά (Dupraz et al., 2011; The Global Environment Facility [GEF], 2024).

Εν κατακλείδι, αν και τα αγροβολταϊκά χαρακτηρίζονται ως «ήπια» συμβιβαστική λύση για την ενεργειακή αξιοποίηση αγροτικής γης, η επιστημονική βιβλιογραφία επισημαίνει ότι δεν επιλύουν πλήρως το πρόβλημα της εντατικής κατάληψης αγροτικού εδάφους, ιδιαίτερα όταν εφαρμόζονται σε γαίες υψηλής παραγωγικότητας, και ότι η εφαρμογή τους πρέπει να βασίζεται σε στοχευμένη περιβαλλοντική και αγρονομική ανάλυση (Dupraz et al., 2011; Weselek et al., 2019).

3.5 Παραδείγματα έργων

Η ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα παρουσιάζει ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα τα τελευταία χρόνια, τόσο ως προς την εγκατεστημένη ισχύ όσο και ως προς την γεωγραφική της διασπορά. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών στο τέλος του 2019 ανήλθε στα 2.288 MW, με την συντριπτική πλειονότητα αυτών να προέρχεται από μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις (<100 kW), οι οποίες κατείχαν το 35,5% της συνολικής ισχύος, ενώ μόλις το 7,6% προερχόταν από μεγάλης κλίμακας μονάδες (άνω των 5 MW). Αυτή η τάση, ωστόσο, μεταβάλλεται, καθώς η είσοδος μεγάλων επενδυτών και οι τεχνολογικές εξελίξεις οδηγούν σε στροφή προς πιο εκτεταμένα έργα μεγάλης ισχύος.

Γεωγραφικά, τα φωτοβολταϊκά έργα είναι σχεδόν ομοιόμορφα κατανεμημένα στην ηπειρωτική Ελλάδα, με σημαντικές συγκεντρώσεις στην Κεντρική Μακεδονία (18% των εγκαταστάσεων), τη Θεσσαλία (18%) και την Κεντρική Ελλάδα (14%). Ακολουθούν η Κρήτη, η Πελοπόννησος και η Δυτική Ελλάδα .



Εικόνα 3 Ποσοστό ηλιακών έργων που εγκαταστάθηκαν ανά περιοχή Πηγή: Hellenic Association for Energy Economics (HAEE), 2022.

Η διασπορά αυτή ενισχύεται από τις ιδιαίτερα ευνοϊκές ηλιακές συνθήκες της χώρας, καθώς το ετήσιο οριζόντιο ηλιακό δυναμικό κυμαίνεται μεταξύ 1400 και 1800 kWh/m², τοποθετώντας την Ελλάδα ανάμεσα στις χώρες με τη μεγαλύτερη ηλιοφάνεια στην Ευρώπη. Οι περιοχές με το υψηλότερο ηλιακό δυναμικό είναι η Πελοπόννησος, η Κρήτη και τα Δωδεκάνησα, όπως καταδεικνύει και ο σχετικός χάρτης ηλιακής ακτινοβολίας.

Η στρατηγική ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα ενισχύεται περαιτέρω από τη σύμπτωση της υψηλής ηλιοφάνειας με τις αυξημένες ενεργειακές ανάγκες λόγω τουρισμού κατά τους θερινούς μήνες, γεγονός που δημιουργεί μια εποχική ισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης.

Κεφάλαιο 4ο: Δείκτες Αξιολόγησης Περιβαλλοντικής Βιωσιμότητας

4.1 Εισαγωγή στη Μεθοδολογία Δεικτών

Η αξιολόγηση της βιωσιμότητας των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί μια πολυδιάστατη διαδικασία. Δεν είναι αρκετό να εξετάσουμε μόνο πόση ενέργεια παράγεται

ή μόνο πόσες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αποφεύγονται. Αντίθετα, απαιτείται μια **ολιστική προσέγγιση** που να λαμβάνει υπόψη την ενεργειακή, περιβαλλοντική και κοινωνικοοικονομική διάσταση κάθε τεχνολογίας. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η διεθνής βιβλιογραφία επιμένει στη χρήση ενός συνόλου δεικτών, που μπορούν να αποτυπώσουν τις διαφορετικές πλευρές της βιωσιμότητας (Zhao et al., 2024).

Το βασικό μεθοδολογικό πλαίσιο που χρησιμοποιείται διεθνώς είναι η **Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA)**. Η LCA εξετάζει κάθε στάδιο ζωής μιας τεχνολογίας, ξεκινώντας από την εξόρυξη και επεξεργασία των πρώτων υλών, συνεχίζοντας με την παραγωγή του εξοπλισμού και την εγκατάσταση, και φτάνοντας μέχρι τη λειτουργία, τη συντήρηση και την τελική απόσυρση ή ανακύκλωση. Αυτό σημαίνει ότι η LCA δεν περιορίζεται μόνο στη φάση λειτουργίας (όπου οι ΑΠΕ εμφανίζουν σχεδόν μηδενικές εκπομπές), αλλά αποκαλύπτει και τις «κρυφές» περιβαλλοντικές και ενεργειακές δαπάνες που προηγούνται και έπονται.

Τα πρότυπα **ISO 14040 και 14044** αποτελούν τον οδηγό για την υλοποίηση μιας σωστής LCA (Root Sustainability, n.d.). Χάρη σε αυτά διασφαλίζεται η διαφάνεια και η δυνατότητα σύγκρισης των μελετών μεταξύ διαφορετικών χωρών και τεχνολογιών. Στην πράξη, η LCA βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε βάσεις δεδομένων, όπως το **Ecoinvent (Wernet et al., 2016)**, οι οποίες περιέχουν στοιχεία για χιλιάδες βιομηχανικές διεργασίες. Ωστόσο, η χρήση τέτοιων διεθνών βάσεων δημιουργεί και περιορισμούς, καθώς δεν αντικατοπτρίζουν πάντα τις τοπικές ιδιαιτερότητες, όπως θα δούμε παρακάτω στην περίπτωση της Ελλάδας.

Στην παρούσα μελέτη, οι δείκτες ομαδοποιούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- **Ενεργειακοί δείκτες**, που δείχνουν αν μια τεχνολογία είναι ενεργειακά αποδοτική.
- **Περιβαλλοντικοί δείκτες**, που μετρούν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε κρίσιμους τομείς.
- **Κοινωνικοοικονομικοί δείκτες**, που αναδεικνύουν τις κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις.

Με αυτή την τριπλή κατηγοριοποίηση αποφεύγεται η μονοδιάστατη ανάλυση και δημιουργείται μια πιο ολοκληρωμένη βάση για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

4.2 Ενεργειακοί Δείκτες

4.2.1 Energy Payback Time (EPBT)

Ο δείκτης **Energy Payback Time (EPBT)** είναι ίσως ο πιο κατανοητός δείκτης για να εξηγηθεί σε μη ειδικούς, γιατί δείχνει κάτι απλό: σε πόσο χρόνο μια ενεργειακή εγκατάσταση παράγει τόση ενέργεια όση καταναλώθηκε για να κατασκευαστεί, να μεταφερθεί και να

εγκατασταθεί. Με άλλα λόγια, είναι το σημείο στο οποίο η «ενεργειακή επένδυση» επιστρέφεται (CleanEnergyBusinessCouncil, 2024).

Η σημασία του δείκτη έγκειται στο ότι μπορεί να μας δείξει αν μια τεχνολογία αξίζει ενεργειακά. Για παράδειγμα, αν ένα φωτοβολταϊκό πάνελ έχει διάρκεια ζωής 30 χρόνια και EPBT 2 χρόνια, αυτό σημαίνει ότι τα υπόλοιπα 28 χρόνια λειτουργεί με καθαρό ενεργειακό όφελος. Αυτή η εικόνα είναι πολύ σημαντική σε επίπεδο ενεργειακής πολιτικής, γιατί δείχνει πόσο «αποδοτικά» αξιοποιείται η αρχική δαπάνη πόρων.

Ωστόσο, ο EPBT δεν είναι ίδιος για όλες τις τεχνολογίες ούτε για όλες τις περιοχές. Στα φωτοβολταϊκά, οι τιμές κυμαίνονται διεθνώς από 1 έως 4 χρόνια (Althaus, 2013). Οι μονοκρυσταλλικές τεχνολογίες έχουν συνήθως μεγαλύτερο EPBT γιατί απαιτούν περισσότερη ενέργεια στην παραγωγή, ενώ τα thin film εμφανίζουν μικρότερους χρόνους, αν και έχουν άλλα μειονεκτήματα (π.χ. μικρότερη διάρκεια ζωής) (Fthenakis et al., 2020). Στην Ελλάδα, λόγω της υψηλής ηλιοφάνειας, οι τιμές είναι στο χαμηλότερο άκρο του φάσματος, κάτι που επιβεβαιώνει τη στρατηγική σημασία της χώρας για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών.

Αντίθετα, τα αιολικά συστήματα είναι ακόμη πιο εντυπωσιακά. Σε πολλές περιπτώσεις, ο EPBT είναι μικρότερος από έναν χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι μια ανεμογεννήτρια «ξεπληρώνει» την ενεργειακή της επένδυση πριν ολοκληρώσει τον πρώτο χρόνο λειτουργίας της, ενώ η διάρκεια ζωής της μπορεί να ξεπεράσει τα 20 χρόνια. Έτσι, για πάνω από το 95% της διάρκειας ζωής της λειτουργεί με καθαρό ενεργειακό κέρδος.

Φυσικά, ο δείκτης έχει και όρια. Δεν λέει τίποτα για τις εκπομπές άνθρακα ή για τη χρήση γης. Μπορεί, δηλαδή, δύο τεχνολογίες να έχουν παρόμοιο EPBT αλλά πολύ διαφορετικά περιβαλλοντικά αποτυπώματα. Γι' αυτό και ο EPBT πρέπει να χρησιμοποιείται ως ένα κομμάτι της εικόνας και όχι ως ο μοναδικός δείκτης βιωσιμότητας.

4.2.2 Energy Return on Investment (EROI)

Αν ο EPBT μας δείχνει τον χρόνο, ο δείκτης **Energy Return on Investment (EROI)** μας δείχνει το μέγεθος του «κέρδους». Ο EROI υπολογίζει την αναλογία ενέργειας που παράγεται στη διάρκεια ζωής μιας εγκατάστασης σε σχέση με την ενέργεια που καταναλώθηκε για την παραγωγή της. Ένας υψηλός EROI σημαίνει ότι η τεχνολογία είναι εξαιρετικά αποδοτική (Dupont et al., 2021).

Στα φωτοβολταϊκά, οι τιμές EROI κυμαίνονται από 8 έως 34. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε μονάδα ενέργειας που δαπανάται στην παραγωγή ενός συστήματος, αυτό παράγει 8 έως 34 μονάδες ενέργειας κατά τον κύκλο ζωής του. Η διακύμανση είναι μεγάλη και εξαρτάται από τον τύπο του πάνελ, την τεχνολογία κατασκευής και, κυρίως, τις συνθήκες λειτουργίας. Ένα πάνελ που τοποθετείται σε μια χώρα με λίγη ηλιοφάνεια θα έχει χαμηλότερο EROI από ένα που λειτουργεί σε συνθήκες έντονης ηλιοφάνειας, όπως στην Ελλάδα (Palmer & Floyd, 2017).

Τα αιολικά, από την άλλη, παρουσιάζουν ακόμη υψηλότερους δείκτες. Σε πολλές περιπτώσεις ο EROI υπερβαίνει το 50:1, γεγονός που τα καθιστά από τις πιο αποδοτικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας παγκοσμίως. Για να γίνει πιο σαφές, ένας σταθμός άνθρακα έχει EROI γύρω στο 10:1, ενώ τα κοιτάσματα πετρελαίου εμφανίζουν ακόμη χαμηλότερες τιμές. Έτσι, βλέπουμε ότι οι ΑΠΕ δεν είναι μόνο φιλικές στο περιβάλλον αλλά και πιο αποδοτικές ενεργειακά (Dupont et al., 2021).

Ωστόσο, και ο EROI έχει περιορισμούς. Δεν αποτυπώνει κοινωνικές παραμέτρους, όπως η αποδοχή από τις τοπικές κοινωνίες, ούτε περιβαλλοντικές λεπτομέρειες, όπως η χρήση σπάνιων υλικών. Συνεπώς, χρειάζεται πάντα να ερμηνεύεται σε συνδυασμό με άλλους δείκτες (Carbajales-Dale, 2019).

4.3 Περιβαλλοντικοί Δείκτες

Η περιβαλλοντική βιωσιμότητα των έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) απαιτεί την εφαρμογή σύνθετου πλαισίου δεικτών που επιτρέπουν τη συγκριτική μελέτη των διαφορετικών τεχνολογιών. Το πλαίσιο αυτό καλύπτει όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής των έργων, από την εξαγωγή πρώτων υλών, την κατασκευή και λειτουργία μέχρι και την αποξήλωση ή ανακύκλωση, ενώ λαμβάνει υπόψη και τις κοινωνικές και χωροταξικές παραμέτρους που επηρεάζουν την αποδοχή και ενσωμάτωση των έργων στον τοπικό ιστό (Kolati & Raghutla, 2025).

4.3.1 Εκπομπές ισοδύναμου CO₂

Οι εκπομπές ισοδύναμου CO₂ ανά παραγόμενη κιλοβατώρα (kWh) αποτελούν έναν από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους δείκτες περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, καθώς συνδέονται άμεσα με την κλιματική αλλαγή και την αποδοτικότητα του ενεργειακού μείγματος. Ο δείκτης αυτός αποτυπώνει το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα μιας τεχνολογίας παραγωγής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής της: από την εξόρυξη πρώτων υλών και την κατασκευή, έως τη λειτουργία και την απόσυρση (Chen et al., 2023; NREL, 2024; Portillo et al., 2024). Η χρήση του ως βασικός δείκτης επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και συμβατικών μορφών παραγωγής ενέργειας, όπως οι θερμικοί σταθμοί λιγνίτη και φυσικού αερίου, όπου οι εκπομπές CO₂ είναι πολλαπλάσιες.

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα μεγάλης κλίμακας (utility-scale), οι εκπομπές ισοδύναμου CO₂ κυμαίνονται μεταξύ 3,9 και 36 g CO₂-eq/kWh, ανάλογα με την τεχνολογία (π.χ. μονοκρυσταλλικά ή thin-film), τον τύπο των πάνελ, την ενεργειακή ένταση της παραγωγής, την τοποθεσία εγκατάστασης και τις τοπικές συνθήκες ηλιοφάνειας (Chen et al., 2023; NREL, 2024; Portillo et al., 2024). Μελέτες σε ευρωπαϊκές χώρες, όπως η Γαλλία και η Ισπανία, υπολογίζουν μέσες τιμές γύρω στα 12,5–12,8 g CO₂-eq/kWh (Arcos-Vargas & Riviere, 2018). Τα χειρσαία αιολικά συστήματα παρουσιάζουν διάμεση τιμή περίπου 12 g CO₂-eq/kWh, με συνήθεις τιμές από 10 έως 15 g CO₂-eq/kWh, γεγονός που τα καθιστά μία από τις πλέον καθαρές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας (Bashir, 2021; NYSERDA & UC Davis, 2019; UNECE, 2021).

Η σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες είναι εντυπωσιακή. Ένας λιγνιτικός σταθμός μπορεί να εκπέμπει πάνω από 900 g CO₂-eq/kWh, ανάλογα με την τεχνολογία καύσης και την αποδοτικότητα του σταθμού (Lelek et al., 2021). Η διαφορά αυτή υπογραμμίζει τη σημασία της μετάβασης προς ΑΠΕ, όχι μόνο για τη μείωση των εκπομπών αλλά και για την επίτευξη των εθνικών και διεθνών δεσμεύσεων για την κλιματική ουδετερότητα.

Στην Ελλάδα, η σημασία του δείκτη αυτού είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς το παραδοσιακό ενεργειακό μείγμα βασιζόταν σε μεγάλο βαθμό στον λιγνίτη. Η σταδιακή ενσωμάτωση ΑΠΕ, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, έχει ήδη συμβάλει στη μείωση των εκπομπών CO₂, ενισχύοντας την επίτευξη των εθνικών στόχων για κλιματική ουδετερότητα και τη συμμόρφωση με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs) (Kolati & Raghutla, 2025). Η εφαρμογή του δείκτη εκπομπών ισοδύναμου CO₂, σε συνδυασμό με άλλους περιβαλλοντικούς και χωροταξικούς δείκτες, αποτελεί εργαλείο-κλειδί για τον σχεδιασμό, την αξιολόγηση και τη βελτιστοποίηση έργων ΑΠΕ σε τοπικό και εθνικό επίπεδο.

4.3.2 Αποτύπωμα νερού

Η κατανάλωση νερού αποτελεί έναν δείκτη περιβαλλοντικής βιωσιμότητας που συχνά υποτιμάται, παρά το γεγονός ότι έχει σημαντικές επιπτώσεις, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονο υδατικό στρες. Παρόλο που η παραγωγή ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) χαρακτηρίζεται γενικά ως χαμηλού κόστους σε φυσικούς πόρους, δεν είναι εντελώς «ανέξοδη» όσον αφορά τη χρήση νερού, ο οποίος παραμένει κρίσιμος παράγοντας για την οικολογική και κοινωνικοοικονομική βιωσιμότητα των έργων (Bhattacharjee & Roy, 2024). Η αξιολόγηση του υδατικού αποτυπώματος επιτρέπει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για τη χωροθέτηση και τεχνολογική επιλογή των έργων, διασφαλίζοντας ότι δεν θα επιβαρυνθούν οι περιορισμένοι υδατικοί πόροι, ιδιαίτερα σε άνυδρες ή αγροτικές περιοχές.

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα, η κατανάλωση νερού εξαρτάται σημαντικά από την τεχνολογία παραγωγής. Οι μονάδες μονοκρυσταλλικού πυριτίου ενδέχεται να καταναλώνουν έως και 30 L water-eq/kWh, κυρίως λόγω των ενεργοβόρων διεργασιών καθαρισμού των πάνελ και ψύξης κατά την παραγωγή των κυψελών (Yang et al., 2022). Αντίθετα, οι τεχνολογίες thin-film, όπως τα πάνελ Cadmium Telluride (CdTe), παρουσιάζουν πολύ χαμηλότερη κατανάλωση, μόλις 2–3 L water-eq/kWh, λόγω της απλούστερης διαδικασίας παραγωγής και της μειωμένης ενεργειακής απαίτησης (Kim et al., 2012). Σημαντικό είναι ότι η κύρια κατανάλωση νερού των φωτοβολταϊκών παρατηρείται κατά τη φάση κατασκευής, καθώς και σε περιοδικές εργασίες καθαρισμού των πάνελ, χωρίς να επιβαρύνει ουσιαστικά τους τοπικούς υδατικούς πόρους (Portillo et al., 2024).

Στα αιολικά συστήματα, η κατανάλωση νερού είναι σχεδόν μηδενική, καθώς δεν απαιτείται νερό ούτε κατά την παραγωγή των ανεμογεννητριών ούτε κατά τη λειτουργία τους (Bashir, 2022). Το γεγονός αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα, ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένους υδατικούς πόρους, και καθιστά τα αιολικά έργα ιδιαίτερα φιλικά προς το υδάτινο περιβάλλον σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας.

Στην ελληνική πραγματικότητα, το ζήτημα αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς αρκετές περιοχές, όπως οι Κυκλάδες, η Ανατολική Κρήτη και τα Δωδεκάνησα, αντιμετωπίζουν έντονο υδατικό στρες. Η επιλογή τεχνολογιών ΑΠΕ με χαμηλό υδατικό αποτύπωμα καθίσταται

κρίσιμη για την ολοκληρωμένη βιωσιμότητα των έργων και για τη διατήρηση των φυσικών πόρων σε περιόδους ξηρασίας (Bhattacharjee & Roy, 2024). Επομένως, ενώ τα φωτοβολταϊκά παραμένουν ενεργειακά αποδοτικά, οι τεχνολογίες με υψηλή κατανάλωση νερού μπορεί να μην είναι οι πλέον κατάλληλες για άνυδρες περιοχές, και η τελική επιλογή πρέπει να γίνεται με βάση λεπτομερή τοπικά περιβαλλοντικά δεδομένα και εκτιμήσεις των υδατικών αναγκών.

4.3.3 Χρήση γης και βιοποικιλότητα

Η χρήση γης αποτελεί έναν από τους πιο αμφιλεγόμενους δείκτες περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, καθώς επηρεάζει άμεσα την τοπική κοινωνία, την αγροτική παραγωγή και τη βιοποικιλότητα. Ο χωρικός σχεδιασμός και η ορθολογική διαχείριση των γαιών αποκτούν κρίσιμη σημασία, ιδίως σε περιοχές όπου η γεωργία, η κτηνοτροφία ή τα ευαίσθητα οικοσυστήματα συνυπάρχουν με ενεργειακές υποδομές.

Ένας βασικός δείκτης που αξιολογεί τη χρήση γης είναι το χωρικό αποτύπωμα, δηλαδή η απαιτούμενη έκταση γης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα, το χωρικό αποτύπωμα κυμαίνεται κατά μέσο όρο μεταξύ 1,5 και 3 εκταρίων ανά MW, ανάλογα με την τεχνολογία στήριξης, την πυκνότητα εγκατάστασης και τις συνθήκες του εδάφους (IEA-PVPS, 2021). Αντίθετα, τα αιολικά πάρκα καταλαμβάνουν πολύ μικρότερη άμεση επιφάνεια στο έδαφος, καθώς οι ανεμογεννήτριες απαιτούν περιορισμένο χώρο και επιτρέπουν τη συνύπαρξη με άλλες χρήσεις γης, όπως η γεωργία και η κτηνοτροφία. Μετρήσεις από υλοποιημένα έργα στην Ελλάδα δείχνουν ότι το φωτοβολταϊκό πάρκο στην Κοζάνη καταλαμβάνει περίπου 2,15 ha/MW, ενώ το αντίστοιχο έργο στην Πτολεμαΐδα απαιτεί μόλις 1,82 ha/MW, γεγονός που υποδηλώνει βελτιστοποίηση στη χρήση γης και υψηλή αποδοτικότητα (EBRD, 2020; PPC Renewables, 2024).

Τα φωτοβολταϊκά πάρκα μπορεί να προκαλέσουν συγκρούσεις χρήσεων γης, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη γεωργική δραστηριότητα. Ωστόσο, η ανάπτυξη της τεχνολογίας των αγροφωτοβολταϊκών (agrivoltaics) προσφέρει βιώσιμες λύσεις διπλής χρήσης, επιτρέποντας την ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας και γεωργικών προϊόντων. Μελέτες έχουν δείξει ότι η σκίαση από τα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορεί να μειώσει την εξάτμιση του νερού, να βελτιώσει την υγρασία του εδάφους και, κατά συνέπεια, να αυξήσει την απόδοση των καλλιεργειών σε ξηρές περιοχές, συμβάλλοντας ταυτόχρονα στη βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων.

Στην περίπτωση των αιολικών εγκαταστάσεων, αν και οι ανεμογεννήτριες καταλαμβάνουν μικρότερη επιφάνεια στο έδαφος, έχουν τεκμηριωθεί αρνητικές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα, κυρίως λόγω συγκρούσεων με πτηνά και νυχτερίδες, αλλά και αλλοίωσης του τοπίου. Οι επιπτώσεις αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές στην Ελλάδα, η οποία αποτελεί διαδρομή μεταναστευτικών πτηνών και φιλοξενεί ευαίσθητα οικοσυστήματα υψηλής οικολογικής αξίας. Η αποφυγή εγκατάστασης σε περιοχές του δικτύου Natura 2000, καθώς και η εφαρμογή τεχνικών μετριασμού, όπως η προσωρινή διακοπή λειτουργίας των ανεμογεννητριών σε περιόδους υψηλής δραστηριότητας της πανίδας ή η χρήση συστημάτων αποτροπής, είναι απαραίτητες για τον περιορισμό των επιπτώσεων (Georgiakakis et al., 2012; IPCC, 2022).

Συνολικά, η ορθολογική χωροθέτηση των έργων ΑΠΕ, η χρήση εργαλείων όπως η χαρτογράφηση ευαισθησίας και η προσαρμογή των τεχνολογικών λύσεων στις τοπικές

περιβαλλοντικές συνθήκες αποτελούν κρίσιμες πρακτικές για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στη χρήση γης και τη βιοποικιλότητα. Η ενσωμάτωση αυτών των παραμέτρων στο σχεδιασμό των έργων συμβάλλει τόσο στην περιβαλλοντική όσο και στην κοινωνική βιωσιμότητα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

4.3.4 Κυκλικότητα και διαχείριση τέλους ζωής

Πέραν των περιβαλλοντικών δεικτών, η **κυκλικότητα και η διαχείριση του τέλους ζωής** των τεχνολογιών ΑΠΕ αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της βιώσιμης ανάπτυξης. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες υπάγονται στο ευρωπαϊκό καθεστώς διαχείρισης αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (WEEE Directive 2012/19/EU), το οποίο επιβάλλει την ευθύνη στον παραγωγό για την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση των υλικών. Στις ανεμογεννήτριες, ανακτώνται κυρίως μεταλλικά στοιχεία, ενώ τα πτερύγια, λόγω της σύνθετης δομής τους, απαιτούν την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης, με έμφαση στην καινοτομία και τη βιομηχανική συνεργασία (European Union, 2012; Helarco, 2023).

4.3.5 Κοινωνική διάσταση και διακυβέρνηση

Τέλος, η **κοινωνική διάσταση και η διακυβέρνηση** των έργων ΑΠΕ είναι καθοριστικές για την επιτυχία και την αποδοχή τους. Στην Ελλάδα, έχει θεσμοθετηθεί η απόδοση ποσοστού 3% των εσόδων των έργων ΑΠΕ στις τοπικές κοινότητες, ενισχύοντας την κοινωνική συνοχή και την ενεργή συμμετοχή των πολιτών στη μετάβαση προς την καθαρή ενέργεια (EEA, 2023).

Ιδιαίτερη σημασία έχει το **Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο** για τις ΑΠΕ, το οποίο θεσμοθετήθηκε με το ΦΕΚ Β' 2464/2008 και αποτελεί το βασικό εργαλείο χωρικού σχεδιασμού για την ανάπτυξη ενεργειακών υποδομών στον εθνικό χώρο. Το πλαίσιο αυτό καθορίζει τις προϋποθέσεις και τους περιορισμούς για τη χωροθέτηση έργων ΑΠΕ, με στόχο την εναρμόνισή τους με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης, την προστασία του φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος, καθώς και τη διασφάλιση της κοινωνικής αποδοχής. Ωστόσο, η εφαρμογή του έχει καταστεί σταδιακά ανεπαρκής, λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων για επιτάχυνση της ενεργειακής μετάβασης και της ανάγκης ενσωμάτωσης νέων δεδομένων, όπως η προστασία των περιοχών Natura 2000 και η συμβατότητα με το νέο θεσμικό πλαίσιο για την κλιματική ουδετερότητα. Για τον λόγο αυτό, το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ) έχει δρομολογήσει τη διαδικασία αναθεώρησης του πλαισίου, με στόχο την επικαιροποίηση των χωροταξικών κατευθύνσεων, την απλοποίηση των αδειοδοτικών διαδικασιών και την ενίσχυση της διαφάνειας και της συμμετοχικότητας (ΥΠΕΝ, 2024; CAN Europe, 2023). Η αναθεώρηση αυτή κρίνεται κρίσιμη για την επίτευξη των εθνικών στόχων ΑΠΕ και την ομαλή ενσωμάτωση των έργων στον κοινωνικό και περιβαλλοντικό ιστό.

4.4 Εφαρμογή στην Ελλάδα και Περιορισμοί

Η εφαρμογή των δεικτών αξιολόγησης της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην Ελλάδα αντιμετωπίζει ορισμένες προκλήσεις που απορρέουν από τις ειδικές γεωγραφικές, τεχνολογικές και θεσμικές ιδιαιτερότητες της χώρας. Παρά το γεγονός ότι οι διεθνείς βάσεις δεδομένων και μελέτες παίζουν θεμελιώδη ρόλο

στη διαμόρφωση του πλαισίου αξιολόγησης, η απουσία εθνικών δεδομένων περιορίζει την ακρίβεια των εκτιμήσεων και τη δυνατότητα ορθολογικής εφαρμογής τους σε τοπικό επίπεδο.

Πρωταρχικό ζήτημα αποτελεί η έλλειψη μιας συγκεντρωτικής ελληνικής βάσης δεδομένων κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment - LCA) για τις τεχνολογίες ΑΠΕ. Οι διεθνείς βάσεις όπως το Ecoinvent παρέχουν γενικευμένα δεδομένα που συχνά δεν ενσωματώνουν τα τοπικά χαρακτηριστικά της ελληνικής αγοράς, όπως η διασπορά της αιολικής ισχύος σε μικρά νησιά με διαφορετικό αιολικό προφίλ ή η υψηλή ηλιοφάνεια σε συγκεκριμένες περιοχές που επηρεάζει την ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών (Wernet et al., 2016; Kaldellis & Zafirakis, 2011). Η ενσωμάτωση όμως τοπικών δεδομένων θα μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά την αξιοπιστία των εκτιμήσεων για δείκτες όπως ο EPBT και ο EROI, καθώς και τις επιπτώσεις στην κατανάλωση νερού και τη χρήση γης.

Επιπλέον, η νησιωτική ιδιαιτερότητα της Ελλάδας δημιουργεί σημαντικές διαφοροποιήσεις στο ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα των έργων ΑΠΕ. Τα νησιά χαρακτηρίζονται από περιορισμένες ενεργειακές υποδομές, αυξημένο κόστος μεταφοράς καυσίμων και πιο έντονο υδατικό και περιβαλλοντικό στρες. Έτσι, για παράδειγμα, ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ή αιολικό πάρκο που εγκαθίσταται σε νησί του Αιγαίου θα παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά EPBT και περιβαλλοντικού αποτυπώματος σε σχέση με αντίστοιχα έργα στην ηπειρωτική χώρα, λόγω διαφορών στις κλιματικές συνθήκες, τη διαχείριση αποβλήτων και το ενεργειακό μείγμα (Bhattacharjee & Roy, 2024; Kolati & Raghutla, 2025).

Παραμένει επίσης περιορισμένη η διαθεσιμότητα και η ποιότητα δεδομένων που αφορούν το τέλος ζωής των εγκαταστάσεων. Ειδικότερα, στην Ελλάδα, το πεδίο της διαχείρισης και ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ και των ανεμογεννητριών, και ειδικότερα των πτερυγίων τους, είναι ακόμη υπό ανάπτυξη. Η έλλειψη οργανωμένου συστήματος ανακύκλωσης και κατασκευαστικών αρχών που να λαμβάνουν υπόψη τον οικολογικό σχεδιασμό (eco-design) περιορίζει το περιβαλλοντικό όφελος που θα μπορούσε να αποδοθεί στα έργα ΑΠΕ στην πλήρη διάρκεια ζωής τους (Helapco, 2023; IRENA, 2023). Αυτή η αδυναμία επιφέρει δυσμενείς επιπτώσεις στην κυκλική οικονομία και στην προσέγγιση της βιωσιμότητας υπό το πρίσμα του κύκλου ζωής.

Το θεσμικό πλαίσιο αποτελεί μια ακόμη πρόκληση. Αν και η Ελλάδα διαθέτει ειδικό χωροταξικό πλαίσιο για την ανάπτυξη ΑΠΕ (ΦΕΚ Β' 2464/2008), αυτό κρίνεται σήμερα ανεπαρκές, καθώς δεν λαμβάνει πλήρως υπόψη τις νέες επιστημονικές και κοινωνικές απαιτήσεις, όπως η προστασία περιοχών Natura 2000 και η ανάγκη για επιτάχυνση των αδειοδοτήσεων (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας [ΥΠΕΝ], 2024). Η αναθεώρηση του πλαισίου βρίσκεται σε εξέλιξη με στόχο την ενσωμάτωση περιβαλλοντικών κριτηρίων, τη βελτίωση της διαφάνειας και τη διευκόλυνση της κοινωνικής συμμετοχής, οι οποίες θεωρούνται καθοριστικές για τη βελτίωση της βιωσιμότητας και της κοινωνικής αποδοχής των έργων (CAN Europe, 2023).

Τέλος, η διαχείριση των κοινωνικών και οικονομικών παραμέτρων της βιωσιμότητας παραμένει περιορισμένης εμβέλειας έως σήμερα. Η εφαρμογή μηχανισμών «benefit sharing», όπως η απόδοση ποσοστού 3% των εσόδων στις τοπικές κοινότητες, αποτελεί θετικό βήμα,

αλλά δεν καλύπτει πλήρως τις προκλήσεις που σχετίζονται με τη δίκαιη κατανομή των οφελών και την ενίσχυση της ενεργειακής δημοκρατίας. Απαιτείται η ενσωμάτωση πιο ολοκληρωμένων κοινωνικών δεικτών στην αξιολόγηση της βιωσιμότητας, με έμφαση στην κοινωνική συναίνεση, τη διαφάνεια και τη συμμετοχή των πολιτών στη διαχείριση των έργων ΑΠΕ (Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος [EEA], 2023; Skiniti et al., 2022).

Συνοψίζοντας, η εφαρμογή δεικτών περιβαλλοντικής βιωσιμότητας για ΑΠΕ στην Ελλάδα είναι μια διαδικασία που χρειάζεται περαιτέρω βελτιώσεις όσον αφορά την εθνική αποτύπωση δεδομένων, την προσαρμογή στις τοπικές ιδιαιτερότητες, την ολοκληρωμένη διαχείριση του τελικού κύκλου ζωής και την ενίσχυση του θεσμικού και κοινωνικού πλαισίου. Μόνο μέσα από μια ολιστική και προσαρμοσμένη σε εθνικό επίπεδο προσέγγιση μπορεί να διασφαλιστεί η πραγματική βιωσιμότητα και η επιτυχής μετάβαση της χώρας προς ένα καθαρό ενεργειακό σύστημα.

Κεφάλαιο 5ο: Πολιτικές και Κανονιστικό Πλαίσιο για την Ελλάδα

5.1 Εθνικές πολιτικές για τις ΑΠΕ και οι στόχοι για το 2030

Η Ελλάδα έχει διαμορφώσει ένα φιλόδοξο και ολοκληρωμένο πλαίσιο πολιτικών για την προώθηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), με βασικό εργαλείο το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), το οποίο επικαιροποιήθηκε το 2023. Οι εθνικές πολιτικές αποσκοπούν στη μετάβαση της χώρας σε ένα ενεργειακό σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα, με επίκεντρο την απανθρακοποίηση, την ενεργειακή ασφάλεια και τη βιώσιμη οικονομική ανάπτυξη. Η στρατηγική αυτή εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (EU Green Deal) και υλοποιείται μέσω ενός συνδυασμού εθνικών και ευρωπαϊκών πολιτικών, όπως η Οδηγία 2018/2001/ΕΕ για την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ΑΠΕ (Renewable Energy Directive) και η Οδηγία 2012/27/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση (Energy Efficiency Directive).

Η πολιτική στρατηγική της χώρας εστιάζει κυρίως στη σταδιακή αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με ΑΠΕ, την προώθηση της αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας, την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και την ενίσχυση της συμμετοχής των πολιτών μέσω των ενεργειακών κοινοτήτων, όπως προβλέπεται από το θεσμικό πλαίσιο που διέπει τις ενεργειακές κοινότητες. Παράλληλα, ο Νόμος 4951/2022 εισήγαγε σημαντικές μεταρρυθμίσεις για την απλοποίηση της αδειοδότησης έργων ΑΠΕ και την ενίσχυση της αποθήκευσης ενέργειας.

Μέχρι το 2030, το επικαιροποιημένο ΕΣΕΚ θέτει συγκεκριμένους και δεσμευτικούς στόχους: το 35% της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης θα πρέπει να καλύπτεται από ΑΠΕ, με έμφαση σε ποσοστά που αγγίζουν το 60% στην ηλεκτροπαραγωγή, το 42,5% στη θέρμανση και ψύξη, και το 19% στις μεταφορές. Παράλληλα, η Ελλάδα σχεδιάζει να φτάσει τα 25 GW εγκατεστημένης ισχύος από ΑΠΕ έως το 2030, με κυρίαρχο ρόλο για τα φωτοβολταϊκά (14,1

GW) και τα αιολικά (7 GW). Στο ίδιο πλαίσιο, προωθούνται νέες τεχνολογίες όπως η αποθήκευση ενέργειας (5,6 GW) και το πράσινο υδρογόνο, καθώς και ο εκσυγχρονισμός του δικτύου, με στόχο την ενίσχυση της ευστάθειας και της ευφυΐας του συστήματος.

Οι πολιτικές αυτές ενισχύονται από ευρωπαϊκές οδηγίες, όπως οι προαναφερθείσες Οδηγίες 2018/2001/ΕΕ και 2012/27/ΕΕ, και από το Green Deal της Ε.Ε., το οποίο περιλαμβάνει σειρά νομοθετικών και χρηματοδοτικών εργαλείων. Μεταξύ αυτών συγκαταλέγονται ο Κανονισμός 2021/1119/ΕΕ για την Ευρωπαϊκή Κλιματική Νομοθεσία (European Climate Law), το σχέδιο REPowerEU για την επιτάχυνση της απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα, ο μηχανισμός εμπορίας εκπομπών EU ETS, ο Μηχανισμός Συνοριακής Προσαρμογής Άνθρακα (Carbon Border Adjustment Mechanism - CBAM), ο Κανονισμός για τη Βιομηχανία Μηδενικών Εκπομπών (Net-Zero Industry Act), ο Κανονισμός για τις Κρίσιμες Πρώτες Ύλες (Critical Raw Materials Act), καθώς και τα χρηματοδοτικά εργαλεία Just Transition Fund και Social Climate Fund. Επιπλέον, το Σχέδιο Δράσης για Μηδενική Ρύπανση (Zero Pollution Action Plan) προωθεί την κυκλική οικονομία και τη μείωση των περιβαλλοντικών πιέσεων.

Η επίτευξη αυτών των στόχων δεν είναι μόνο τεχνική ή ενεργειακή πρόκληση, αλλά αποτελεί έναν κρίσιμο άξονα για τη βιώσιμη ανάπτυξη της χώρας. Το ΕΣΕΚ ενσωματώνει, επίσης, πολιτικές για την ηλεκτροκίνηση, την αναβάθμιση κτιρίων —μέσω προγραμμάτων όπως το «Εξοικονομώ»— και την ανάπτυξη έξυπνων δικτύων, δίνοντας έμφαση σε μια δίκαιη και κοινωνικά αποδεκτή ενεργειακή μετάβαση. Η Ελλάδα, με βάση τις πολιτικές αυτές, φιλοδοξεί να αναδειχθεί σε περιφερειακό κόμβο πράσινης ενέργειας στην Ανατολική Μεσόγειο και τα Βαλκάνια.

5.2 Σύνδεση με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΣΒΑ)

Η ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην Ελλάδα βρίσκεται σε στενή συνέργεια με την επίτευξη των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΣΒΑ) του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών, που θέτουν ένα ευρύ πλαίσιο για την ολοκληρωμένη περιβαλλοντική, κοινωνική και οικονομική ευημερία έως το 2030. Η εναρμόνιση της εθνικής ενεργειακής πολιτικής με τους ΣΒΑ αποτελεί πυλώνα για μια δίκαιη και βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση, η οποία υπερβαίνει τον απλό τεχνολογικό και οικονομικό μετασχηματισμό.

Στο πλαίσιο του επικαιροποιημένου Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), οι ΑΠΕ προβάλλουν ως βασικό εργαλείο για την εκπλήρωση του ΣΒΑ 7, που αφορά την εξασφάλιση καθαρής, προσιτής και αξιόπιστης ενέργειας για όλους. Συγκεκριμένα, το εθνικό πλαίσιο θέτει ως στόχο τη συμμετοχή των ΑΠΕ σε ποσοστό τουλάχιστον 35% της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης έως το 2030, με ιδιαίτερη έμφαση στην ηλεκτροπαραγωγή όπου το ποσοστό προβλέπεται να ξεπεράσει το 60%. Η επίτευξη αυτών των στόχων όχι μόνο συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αλλά ενισχύει παράλληλα την ενεργειακή ασφάλεια και τη σταθερότητα του ενεργειακού συστήματος της χώρας (Υπουργική Απόφαση 4/2019, ΦΕΚ 4893/Β/31.12.2019).

Παράλληλα, οι επενδύσεις στις ΑΠΕ υποστηρίζουν τον ΣΒΑ 13, που αφορά τη δράση για το κλίμα, μέσω της ελάττωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 42% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Η προώθηση καθαρών τεχνολογιών και η μετάβαση σε ένα ενεργειακό

σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα συμμορφώνεται με τις διεθνείς δεσμεύσεις που απορρέουν από τη Συμφωνία του Παρισιού και την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, ενισχύοντας έτσι την περιβαλλοντική βιωσιμότητα της χώρας (European Commission, 2020; Kolati & Raghutla, 2025).

Επιπλέον, η προώθηση καινοτόμων υποδομών και έξυπνων δικτύων συμβάλλει στην επίτευξη του ΣΒΑ 9 («Καινοτομία, Βιομηχανία και Υποδομές»), ενώ η ενίσχυση της ενεργειακής αποδοτικότητας και η προώθηση πολιτικών που στοχεύουν σε βιώσιμες πόλεις και κοινότητες αναφέρονται στο ΣΒΑ 11. Η Ελλάδα εστιάζει επίσης στην ενίσχυση της κοινωνικής διάστασης της ενεργειακής μετάβασης, ενεργειακής δημοκρατίας και περιφερειακής συνοχής, που συνδέονται με τους ΣΒΑ 8 («Αξιοπρεπής εργασία και οικονομική ανάπτυξη») και 10 («Μείωση των ανισοτήτων»), προωθώντας προγράμματα ενεργειακών κοινοτήτων και πολιτικές benefit sharing που διαχέουν τα οφέλη της ενέργειας σε τοπικό επίπεδο (Bhattacharya et al., 2015; Skiniti et al., 2022).

Η ενσωμάτωση των ΣΒΑ στην εθνική ενεργειακή πολιτική σηματοδοτεί μια συνολική προσέγγιση που ενοποιεί το περιβαλλοντικό όφελος με την κοινωνική δικαιοσύνη και τη βιώσιμη οικονομική ανάπτυξη. Η ολιστική αυτή προσέγγιση αναγνωρίζει την αλληλεξάρτηση μεταξύ ενέργειας, κλίματος, απασχόλησης και κοινωνικής συνοχής, καθιστώντας την ενεργειακή μετάβαση μέσο επίτευξης ευρύτερων αναπτυξιακών στόχων (UNDP, 2023).

Εν κατακλείδι, η ενεργειακή στρατηγική της Ελλάδας, μέσω του ΕΣΕΚ και της ευθυγράμμισης με τους ΣΒΑ, αναδεικνύει τις ΑΠΕ ως βασικό μοχλό βιώσιμης ανάπτυξης, που όχι μόνο συμβάλλει στην αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης, αλλά και στην προώθηση ενός πιο δίκαιου, ανθεκτικού και οικονομικά ισχυρού μέλλοντος για τη χώρα.

5.3 Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και επιπτώσεις στην Ελλάδα

Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal) συνιστά τη βασική στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050, καθώς και για την προώθηση μιας βιώσιμης, ανθεκτικής και καινοτόμου οικονομίας. Η πρωτοβουλία αυτή, η οποία ανακοινώθηκε το 2019 και εγκρίθηκε από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο, αποτελεί τον πυρήνα των πολιτικών της Ε.Ε. για την αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης και τη μετάβαση σε ένα νέο αναπτυξιακό πρότυπο που εδράζεται στον οικολογικό και κοινωνικό μετασχηματισμό.

Βασικός στόχος της Πράσινης Συμφωνίας είναι η σταδιακή εξάλειψη των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, με ενδιάμεσο σταθμό τη μείωση κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, και τελικό στόχο την επίτευξη μηδενικών εκπομπών έως το 2050. Παράλληλα, δίνεται έμφαση στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, στην ταχεία ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στην καθιέρωση μιας πλήρους κυκλικής οικονομίας και στην προστασία της βιοποικιλότητας, καθώς και της δημόσιας υγείας. Η Συμφωνία δεν αφορά μόνο την περιβαλλοντική διάσταση, αλλά διαπερνά όλους τους τομείς πολιτικής της Ε.Ε., από τις μεταφορές και τη γεωργία έως τη βιομηχανία και τη

χρηματοδότηση (“Ο Πράσινος Μετασχηματισμός Της Ευρώπης: Προκλήσεις, Ευκαιρίες Και Η Πορεία Προς Τα Εμπρός,” 2023).

Στο πλαίσιο αυτό, η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία συνοδεύεται από μια σειρά στοχευμένων στρατηγικών, όπως η “Στρατηγική για τη Βιοποικιλότητα”, η “Στρατηγική για το Μηδενικό Καθαρό Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα”, η “Στρατηγική για τη Βιώσιμη και Έξυπνη Κινητικότητα” και το “Κύμα Ανακαινίσεων” για τον κτιριακό τομέα. Επιπλέον, μέσω του “Μηχανισμού Δίκαιης Μετάβασης” και του ταμείου “NextGenerationEU”, διατίθενται σημαντικοί χρηματοδοτικοί πόροι προς τα κράτη-μέλη για την υλοποίηση των απαραίτητων μεταρρυθμίσεων και επενδύσεων.

Στην περίπτωση της Ελλάδας, η εφαρμογή της Πράσινης Συμφωνίας συνεπάγεται σημαντικές αλλαγές και προκλήσεις, αλλά ταυτόχρονα δημιουργεί ευκαιρίες για έναν συνολικό μετασχηματισμό της οικονομίας και της κοινωνίας. Ήδη, μέσω του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), η χώρα έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για το 2030, όπως η αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο 44% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας και πάνω από 80% στην ηλεκτροπαραγωγή. Η επίτευξη αυτών των στόχων απαιτεί τη μαζική ανάπτυξη έργων αιολικής και ηλιακής ενέργειας, την εγκατάσταση υποδομών αποθήκευσης και την αναβάθμιση των δικτύων μεταφοράς και διανομής.

Παράλληλα, η πράσινη μετάβαση αναμένεται να λειτουργήσει ως μοχλός οικονομικής ανάπτυξης, προσφέροντας νέες ευκαιρίες απασχόλησης και ενίσχυσης της ανταγωνιστικότητας. Οι τομείς της καθαρής ενέργειας, της βιώσιμης γεωργίας, της κυκλικής οικονομίας και του τουρισμού εμφανίζουν ισχυρές προοπτικές ανάπτυξης. Επιπλέον, οι χρηματοδοτήσεις από την Ε.Ε., όπως μέσω του Ταμείου Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας ή του Μηχανισμού Δίκαιης Μετάβασης, μπορούν να υποστηρίξουν καθοριστικά επενδύσεις και πολιτικές που ενισχύουν τη βιωσιμότητα και μειώνουν τις κοινωνικές ανισότητες που ενδέχεται να προκύψουν από τη μετάβαση.

Ωστόσο, οι αλλαγές που απαιτούνται δεν είναι εύκολες. Η σταδιακή απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, ιδιαίτερα από τον λιγνίτη, επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις σε περιοχές όπως η Δυτική Μακεδονία και η Μεγαλόπολη, που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη λιγνιτική παραγωγή. Η μετάβαση σε ένα νέο παραγωγικό πρότυπο σε αυτές τις περιοχές χρειάζεται ισχυρό κοινωνικό σχεδιασμό, συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών, καθώς και στοχευμένα μέτρα στήριξης για τους εργαζόμενους και τις επιχειρήσεις.

Εξίσου σημαντική είναι και η περιβαλλοντική διάσταση της Συμφωνίας. Η Ελλάδα, με το πλούσιο φυσικό της κεφάλαιο – τα δάση, τους υδροτόπους, τη βιοποικιλότητα και τη μοναδική γεωμορφολογία της – καλείται να ενισχύσει τις πολιτικές προστασίας του περιβάλλοντος και να αξιοποιήσει το συγκριτικό της πλεονέκτημα για την ανάδειξη μοντέλων βιώσιμης διαχείρισης των φυσικών πόρων. Η μετάβαση σε πιο οικολογικές μορφές γεωργίας και η αποκατάσταση οικοσυστημάτων εντάσσονται επίσης στις βασικές προτεραιότητες.

Κεφάλαιο 6ο : Μελέτη Περίπτωσης στην Ελλάδα

6.1 Επιλεγμένα έργα αιολικής ενέργειας και φωτοβολταϊκών

Η Ελλάδα αποτελεί μια από τις πιο ενδιαφέρουσες περιπτώσεις μελέτης στην περιοχή της Νοτιοανατολικής Ευρώπης όσον αφορά την ανάπτυξη έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, χάρη στο ιδιαίτερα υψηλό αιολικό και ηλιακό δυναμικό της, αλλά και στη στρατηγική της επιλογή να προχωρήσει ταχύτερα στην απανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής. Η γεωγραφική θέση της χώρας, με την εκτεταμένη ηπειρωτική ακτογραμμή, τα πολυάριθμα νησιά και την ηλιοφάνεια που συγκαταλέγεται στις υψηλότερες της Ευρώπης, δημιουργεί ιδανικές συνθήκες για την ανάπτυξη τόσο της αιολικής όσο και της ηλιακής ενέργειας. Η πολιτική ώθηση που δόθηκε με το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), καθώς και η σταδιακή εγκατάλειψη του λιγνίτη στη Δυτική Μακεδονία, ενίσχυσαν ακόμη περισσότερο την κατεύθυνση προς μεγάλες επενδύσεις στον τομέα των ΑΠΕ, με αποτέλεσμα η Ελλάδα να έχει ήδη επιτύχει σημαντική πρόοδο στην παραγωγή καθαρής ενέργειας.

6.1.1 Αιολικό Πάρκο Καφηρέα

Το Αιολικό Πάρκο Καφηρέα, το οποίο βρίσκεται στο νότιο άκρο της Εύβοιας, αποτελεί το μεγαλύτερο χερσαίο αιολικό έργο στην Ελλάδα και ένα από τα μεγαλύτερα της νοτιοανατολικής Ευρώπης. Το έργο έχει εγκατεστημένη ισχύ που υπερβαίνει τα 330 MW και περιλαμβάνει περισσότερες από 70 ανεμογεννήτριες τελευταίας τεχνολογίας, με ετήσια παραγωγή που εκτιμάται σε περίπου 480–500 GWh, ποσότητα ικανή να καλύψει τις ανάγκες ηλεκτροδότησης περισσότερων από 130.000 νοικοκυριών (Enel Green Power, 2019). Η υλοποίησή του συνοδεύτηκε από την κατασκευή νέων δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και άλλων τεχνικών υποδομών, καθώς η περιοχή δεν διέθετε την απαιτούμενη διασύνδεση με το εθνικό δίκτυο.

Από ενεργειακής πλευράς, το έργο θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς συμβάλλει καθοριστικά στην αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ στο εθνικό μείγμα ηλεκτροπαραγωγής και στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Εκτιμάται ότι αποτρέπει την έκλυση περισσότερων από 500.000 τόνων CO₂ ετησίως σε σύγκριση με τη χρήση ορυκτών καυσίμων (Solaun & Cerdá, 2019). Παράλληλα, με βάση μελέτες κύκλου ζωής, η αιολική ενέργεια εμφανίζει από τους χαμηλότερους χρόνους ενεργειακής αποπληρωμής, κάτω του ενός έτους, ενώ ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης (EROI) ξεπερνά το 20, καθιστώντας τα μεγάλα χερσαία αιολικά έργα από τις πιο βιώσιμες τεχνολογίες σε διεθνές επίπεδο (Tawalbeh et al., 2021).

Ωστόσο, η χωροθέτηση του έργου προκάλεσε σημαντικές αντιδράσεις και αντιπαραθέσεις. Η περιοχή του Καφηρέα χαρακτηρίζεται από υψηλή βιολογική αξία, καθώς αποτελεί τμήμα μεταναστευτικού διαδρόμου για πτηνά και φιλοξενεί πληθυσμούς αρπακτικών ειδών, όπως αετών και γερακιών. Η διεθνής βιβλιογραφία έχει καταγράψει ότι τα αιολικά πάρκα μπορούν να επιφέρουν αυξημένη θνησιμότητα πτηνών και νυχτερίδων λόγω πρόσκρουσης στα πτερύγια, ενώ παράλληλα οδηγούν σε κατακερματισμό οικοτόπων (Drewitt & Langston, 2006). Παρά τις δράσεις περιβαλλοντικής αντιστάθμισης, όπως αναδασώσεις και

έργα υποδομής που υλοποιήθηκαν από την εταιρεία, οι οικολογικές πιέσεις παραμένουν ζήτημα που προκαλεί προβληματισμό στην επιστημονική κοινότητα.

6.1.2 Φωτοβολταϊκό Πάρκο Κοζάνης

Το Φωτοβολταϊκό Πάρκο Κοζάνης αποτελεί το μεγαλύτερο φωτοβολταϊκό έργο στην Ελλάδα και ένα από τα μεγαλύτερα στην Ευρώπη, με εγκατεστημένη ισχύ 204 MWp. Το έργο υλοποιήθηκε από τη ΔΕΗ Ανανεώσιμες και καλύπτει έκταση περίπου 4.500 στρεμμάτων σε ανενεργές εκτάσεις λιγνιτωρυχείου, οι οποίες αποκαταστάθηκαν και αξιοποιήθηκαν για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η ετήσια παραγωγή του ανέρχεται σε περίπου 350 GWh, ποσότητα ικανή να καλύψει τις ανάγκες περισσότερων από 75.000 νοικοκυριών, συμβάλλοντας σημαντικά στην ενίσχυση της διείσδυσης της ηλιακής ενέργειας στο εθνικό μείγμα ηλεκτροπαραγωγής (ΔΕΗ Ανανεώσιμες, 2022).

Η σημασία του έργου δεν περιορίζεται μόνο στην ενεργειακή του διάσταση, αλλά συνδέεται άμεσα με τη στρατηγική απολιγνιτοποίησης της Δυτικής Μακεδονίας. Η περιοχή της Κοζάνης υπήρξε για δεκαετίες το επίκεντρο της λιγνιτικής παραγωγής της χώρας, γεγονός που οδήγησε σε σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η ρύπανση του αέρα και η εκτεταμένη υποβάθμιση της γης (Kaldellis & Apostolou, 2017). Η αξιοποίηση των πρώην ορυχείων για την εγκατάσταση ενός μεγάλου φωτοβολταϊκού πάρκου αποτελεί παράδειγμα κυκλικής προσέγγισης στη χρήση γης, καθώς μετατρέπει μια επιβαρυνμένη έκταση σε πηγή καθαρής ενέργειας (European Commission, 2020).

Από περιβαλλοντική άποψη, τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν μεγαλύτερο χρόνο ενεργειακής αποπληρωμής σε σχέση με τα αιολικά, ο οποίος κυμαίνεται από 1 έως 2,5 έτη, ενώ οι εκπομπές CO₂ καθ' όλο τον κύκλο ζωής τους κυμαίνονται μεταξύ 40–60 gCO₂/kWh, επίπεδα σαφώς χαμηλότερα από τα ορυκτά καύσιμα (Tawalbeh et al., 2021). Στην περίπτωση του έργου της Κοζάνης, οι εκπομπές που αποφεύγονται εκτιμώνται σε περισσότερους από 300.000 τόνους CO₂ ετησίως. Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή συνδέεται και με ένα μεγαλύτερο αποτύπωμα νερού σε σχέση με την αιολική, λόγω της ενεργοβόρας διαδικασίας παραγωγής των φωτοβολταϊκών πλαισίων και της κατανάλωσης νερού για τον καθαρισμό τους (Cellura et al., 2023).

Κοινωνικά και οικονομικά, το έργο θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικό. Κατά τη φάση κατασκευής απασχόλησε εκατοντάδες εργαζομένους, ενώ δημιούργησε νέες θέσεις εργασίας και υποστηρικτικές υπηρεσίες στην τοπική αγορά. Παράλληλα, η ανάπτυξή του συνέβαλε στη βελτίωση της εικόνας της περιοχής, η οποία συνδέεται πλέον όχι μόνο με τον λιγνίτη, αλλά και με την παραγωγή καθαρής ενέργειας (Karasmanaki & Tsantopoulos, 2019). Η κοινωνική αποδοχή υπήρξε γενικά θετική, καθώς η τοπική κοινωνία αναγνωρίζει την ανάγκη μετάβασης σε ένα βιώσιμο μοντέλο ανάπτυξης που θα μετριάσει τις συνέπειες της απολιγνιτοποίησης. Ωστόσο, παραμένουν προκλήσεις που σχετίζονται με την ανάγκη για δίκαιη μετάβαση, δηλαδή τη διασφάλιση ότι τα οικονομικά οφέλη των νέων ενεργειακών έργων θα κατανέμονται ισότιμα σε όλες τις κοινωνικές ομάδες.

6.1.3 Φωτοβολταϊκά: Σύμπλεγμα Ptolemaida 550 MW

Ένα από τα πλέον εμβληματικά έργα που υλοποιούνται στην Πτολεμαΐδα είναι το Φωτοβολταϊκό Συγκρότημα ισχύος 550 MW, το οποίο αναπτύσσεται από τη ΔΕΗ Ανανεώσιμες. Το έργο κατασκευάζεται εντός του πρώην λιγνιτωρυχείου της ΔΕΗ, στο Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας, αξιοποιώντας εκτάσεις που μέχρι πρότινος φιλοξενούσαν δραστηριότητες εξόρυξης και καύσης λιγνίτη. Η μετατροπή αυτών των εκτάσεων σε πεδία παραγωγής καθαρής ενέργειας αποτελεί συμβολική και ουσιαστική πράξη περιβαλλοντικής αποκατάστασης και ενεργειακής αναδιάρθρωσης.

Το συγκρότημα καλύπτει έκταση περίπου 10.000 στρεμμάτων και περιλαμβάνει την εγκατάσταση 950.000 φωτοβολταϊκών πλαισίων διπλής όψης (bifacial), τα οποία τοποθετούνται σε συστήματα ιχνηλάτησης μονού άξονα (single-axis trackers). Η συγκεκριμένη τεχνολογία επιτρέπει την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και από τις δύο επιφάνειες των πάνελ, αυξάνοντας σημαντικά την ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Η εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται σε 1 TWh, ποσότητα ικανή να καλύψει τις ανάγκες περίπου 200.000 νοικοκυριών, ενώ η ετήσια μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα υπολογίζεται σε 550.000 τόνους, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην επίτευξη των εθνικών και ευρωπαϊκών στόχων για την κλιματική ουδετερότητα.

Η χρηματοδότηση του έργου πραγματοποιείται μέσω συνδυασμού δημόσιων και ιδιωτικών πόρων, με συνολικό προϋπολογισμό που ανέρχεται σε 368 εκατομμύρια ευρώ. Από το ποσό αυτό, τα 184 εκατομμύρια προέρχονται από το Ταμείο Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας (RRF – Greece 2.0), ενώ τα 110,4 εκατομμύρια καλύπτονται μέσω τραπεζικού δανεισμού. Τα υπόλοιπα 73,6 εκατομμύρια αποτελούν ίδια κεφάλαια της ΔΕΗ Ανανεώσιμες. Η ολοκλήρωση του έργου προβλέπεται εντός του έτους 2025, ενώ εντάσσεται στον στρατηγικό σχεδιασμό της ΔΕΗ για την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ σε επίπεδα που υπερβαίνουν τα 5 GW σε ορίζοντα πενταετίας.

Η υλοποίηση του Φωτοβολταϊκού Συγκροτήματος στην Πτολεμαΐδα δεν αποτελεί απλώς ένα τεχνικό έργο μεγάλης κλίμακας, αλλά ένα πρότυπο ενεργειακής μετάβασης και περιφερειακής ανασυγκρότησης. Η αξιοποίηση πρώην λιγνιτικών περιοχών για την παραγωγή καθαρής ενέργειας ενισχύει την τοπική οικονομία, δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας, και σηματοδοτεί την στροφή της χώρας προς ένα βιώσιμο και αποκεντρωμένο ενεργειακό μοντέλο. Παράλληλα, το έργο ενισχύει την ενεργειακή ασφάλεια της Ελλάδας, μειώνει την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα και συμβάλλει στην επίτευξη των δεσμεύσεων της χώρας στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας.

6.2 Εφαρμογή δεικτών βιωσιμότητας και συγκριτική ανάλυση στην Ελλάδα

6.2.1 Εφαρμογή Δεικτών σε Ελληνικές Περιπτώσεις

Η αξιολόγηση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) απαιτεί την εφαρμογή ενός πολυκριτηριακού πλαισίου, το οποίο επιτρέπει τη

συγκριτική ανάλυση διαφορετικών τεχνολογιών και έργων με βάση ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά. Στο πλαίσιο αυτό, επιλέχθηκαν τρία αντιπροσωπευτικά έργα ΑΠΕ στην Ελλάδα, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς την τεχνολογία, την ισχύ και τη γεωγραφική τους θέση: το αιολικό πάρκο Καφηρέας στην Εύβοια, το φωτοβολταϊκό συγκρότημα στην Κοζάνη και το φωτοβολταϊκό έργο στην Πτολεμαΐδα. Η επιλογή των έργων έγινε με γνώμονα την αντιπροσωπευτικότητα, την τεχνική ωριμότητα και τη διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων.

Η αξιολόγηση βασίστηκε σε πέντε θεμελιώδεις δείκτες: I_1 (εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου – GHG), I_2 (χρήση γης), I_3 (επίδραση στη βιοποικιλότητα), I_4 (κυκλικότητα και διαχείριση τέλους ζωής) και I_5 (κοινωνικό όφελος και διακυβέρνηση). Η στάθμιση των δεικτών πραγματοποιήθηκε με βάση τη σχετική σημασία κάθε παραμέτρου, όπως προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία και τις ευρωπαϊκές πολιτικές βιωσιμότητας: I_1 30%, I_2 20%, I_3 25%, I_4 15% και I_5 10%. Η βαθμολόγηση κάθε έργου πραγματοποιήθηκε σε κλίμακα 0–100, με βάση επίσημα δεδομένα από τεχνικές εκθέσεις και περιβαλλοντικές αξιολογήσεις (Enel Green Power, 2020; EBRD, 2020; PPC Renewables, 2024; NYSERDA & UC Davis, 2019).

Έργο	Τεχνολογία	I_1 GHG	I_2 χρήση γης	I_3 βιοποικιλότητα	I_4 κυκλικ ότητα	I_5 κοιν. όφελος	Σύνολο
Kafireas	Αιολικά 167,9 MW	86	95	60	70	80	78,3
Kozani	Φ/Β 204,3 MW	68	50	80	90	80	71,9
Ptolemaida	Φ/Β 550 MW	68	60	75	90	80	72,6

Πίνακας 1 Υπολογισμός Δεικτών Βιωσιμότητας για Επιλεγμένα Έργα ΑΠΕ στην Ελλάδα

6.2.2 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Η συγκριτική αποτίμηση των έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας μέσω του πλαισίου δεικτών βιωσιμότητας αποκαλύπτει την πολυπλοκότητα της περιβαλλοντικής και κοινωνικής τους επίδρασης. Η ανάλυση των πέντε βασικών παραμέτρων—εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, χρήση γης, επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα, κυκλικότητα και κοινωνικό όφελος—καθιστά σαφές ότι η περιβαλλοντική απόδοση δεν είναι μονοδιάστατη, αλλά εξαρτάται από την αλληλεπίδραση τεχνικών, χωρικών και θεσμικών παραγόντων.

Ως προς τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, τα χερσαία αιολικά συστήματα εμφανίζουν σαφώς ευνοϊκότερη επίδοση, με τιμές που προσεγγίζουν τα 12 g CO₂e/kWh, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις των NREL (2024) και NYSERDA & UC Davis (2019). Η χαμηλή ενεργειακή ένταση της κατασκευής και λειτουργίας των ανεμογεννητριών, σε συνδυασμό με τη μεγάλη διάρκεια ζωής τους, συμβάλλει στη μείωση του συνολικού ανθρακικού

αποτυπώματος. Αντίθετα, τα φωτοβολταϊκά συστήματα, αν και επίσης χαμηλών εκπομπών, παρουσιάζουν ελαφρώς υψηλότερες τιμές, με μέση τιμή περίπου 19 g CO₂e/kWh, λόγω της ενεργοβόρας παραγωγής των πάνελ και της εξάρτησης από πρώτες ύλες υψηλής ενεργειακής έντασης.

Η χρήση γης αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους δείκτες, ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένη διαθεσιμότητα ή υψηλή οικολογική αξία. Τα φωτοβολταϊκά έργα στη Δυτική Μακεδονία καταλαμβάνουν εκτάσεις μεταξύ 1,8 και 2,2 εκταρίων ανά MW εγκατεστημένης ισχύος, με το έργο της Πτολεμαΐδας να εμφανίζει βελτιστοποιημένη χωρική απόδοση (1,82 ha/MW), όπως καταγράφεται από την PPC Renewables (2024). Αντιθέτως, τα αιολικά έργα χαρακτηρίζονται από ελάχιστο άμεσο χωρικό αποτύπωμα, καθώς οι ανεμογεννήτριες καταλαμβάνουν περιορισμένο χώρο και επιτρέπουν την παράλληλη χρήση της γης για γεωργικές ή κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Η χωροταξική ευελιξία των αιολικών ενισχύει τη συμβατότητά τους με τοπικά αναπτυξιακά μοντέλα, χωρίς να απαιτείται πλήρης μεταβολή της χρήσης γης.

Η επίδραση στη βιοποικιλότητα διαφοροποιείται σημαντικά μεταξύ των τεχνολογιών. Τα αιολικά έργα ενέχουν τεκμηριωμένο οικολογικό κίνδυνο, κυρίως λόγω προσκρούσεων νυχτερίδων και αρπακτικών πτηνών στις ανεμογεννήτριες, ιδίως όταν χωροθετούνται σε περιοχές Natura 2000 ή σε μεταναστευτικούς διαδρόμους (Georgiakakis et al., 2012; IPCC, 2022). Αν και υπάρχουν τεχνικές μετριασμού, όπως η προσωρινή διακοπή λειτουργίας ή η χρήση συστημάτων αποτροπής, η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από την τοπική οικολογική δυναμική και την εφαρμογή τους σε πραγματικές συνθήκες. Τα φωτοβολταϊκά έργα, από την άλλη πλευρά, παρουσιάζουν περιορισμένη άμεση επίδραση στη πανίδα, αλλά ενδέχεται να επηρεάζουν τη μικροπανίδα και τη δομή των οικοσυστημάτων μέσω της αλλαγής της χρήσης γης και της δημιουργίας θερμικών νησίδων.

Η κυκλικότητα και η διαχείριση του τέλους ζωής των τεχνολογιών ΑΠΕ αποτελούν αναδυόμενο πεδίο περιβαλλοντικής πολιτικής. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες υπάγονται στο ευρωπαϊκό πλαίσιο WEEE (Directive 2012/19/EU), το οποίο προβλέπει την ευθύνη του παραγωγού για την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση των υλικών. Η τεχνολογική πρόοδος στον τομέα της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών πάνελ επιτρέπει την ανάκτηση πολύτιμων υλικών, όπως πυρίτιο, γυαλί και μέταλλα, μειώνοντας το περιβαλλοντικό φορτίο και ενισχύοντας την κυκλική οικονομία. Αντιθέτως, στα αιολικά έργα, η ανακύκλωση των πτερυγίων παραμένει τεχνικά και οικονομικά απαιτητική, λόγω της σύνθετης δομής τους και της χρήσης υλικών όπως οι σύνθετες ρητίνες και οι ίνες γυαλιού. Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών ανακύκλωσης και η ενσωμάτωση σχεδιαστικών λύσεων για το τέλος ζωής των ανεμογεννητριών αποτελούν προτεραιότητα για την ενίσχυση της κυκλικής επίδοσης της τεχνολογίας.

Η κοινωνική διάσταση των έργων ΑΠΕ ενισχύεται από τη θεσμοθετημένη απόδοση ποσοστού 3% των εσόδων στις τοπικές κοινότητες, όπως προβλέπεται από την ελληνική νομοθεσία και επιβεβαιώνεται από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος (EEA, 2023). Η ρύθμιση αυτή συμβάλλει στην ενίσχυση της κοινωνικής αποδοχής, στη βελτίωση των τοπικών υποδομών και στην ενδυνάμωση της συμμετοχής των πολιτών στη διαδικασία της ενεργειακής

μετάβασης. Επιπλέον, η ύπαρξη θεσμικών μηχανισμών διαβούλευσης και η ενσωμάτωση των τοπικών κοινωνιών στον σχεδιασμό των έργων ενισχύουν τη διαφάνεια και τη λογοδοσία, δημιουργώντας συνθήκες κοινωνικής συναίνεσης και μακροπρόθεσμης σταθερότητας.

Συνοψίζοντας, η περιβαλλοντική βιωσιμότητα των έργων ΑΠΕ δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, αλλά από τη συνδυαστική επίδοση σε πολλαπλές παραμέτρους, οι οποίες αλληλοεπιδρούν με τοπικά, θεσμικά και οικολογικά χαρακτηριστικά. Η εφαρμογή ενός σταθμισμένου πλαισίου αξιολόγησης επιτρέπει την ορθολογική σύγκριση και την τεκμηριωμένη επιλογή έργων που ανταποκρίνονται στις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης, της περιβαλλοντικής ευθύνης και της κοινωνικής δικαιοσύνης. Η ενίσχυση της διαφάνειας, η βελτίωση των τεχνικών προδιαγραφών και η ενσωμάτωση της κοινωνικής συμμετοχής αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την επιτυχία της ενεργειακής μετάβασης σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο.

Κεφάλαιο 7ο : Συμπεράσματα και Συστάσεις

7.1 Κύρια ευρήματα της μελέτης

Η έρευνα αυτή επιδίωξε να αξιολογήσει τη βιωσιμότητα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην Ελλάδα με εστίαση στην αιολική ενέργεια και τα φωτοβολταϊκά, οι οποίες αποτελούν τις δύο τεχνολογίες με τη μεγαλύτερη διείσδυση στο ελληνικό ενεργειακό μείγμα. Η ανάλυση επικεντρώθηκε αφενός σε περιβαλλοντικούς δείκτες βιωσιμότητας και αφετέρου σε πραγματικά έργα μεγάλης κλίμακας, προκειμένου να αποτυπωθεί με πιο ρεαλιστικό τρόπο η απόδοσή τους αλλά και οι προκλήσεις που δημιουργούν.

Ένα από τα σημαντικότερα ευρήματα είναι ότι και οι δύο τεχνολογίες παρουσιάζουν σαφές ενεργειακό και περιβαλλοντικό πλεονέκτημα έναντι των ορυκτών καυσίμων. Τα αιολικά πάρκα και τα φωτοβολταϊκά συμβάλλουν καθοριστικά στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και αποτελούν βασικούς μοχλούς για την επίτευξη των στόχων της Ε.Ε. και της Ελλάδας για κλιματική ουδετερότητα έως το 2050. Η συμβολή τους στην ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας είναι επίσης καθοριστική, καθώς μειώνουν την εξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα, γεγονός που αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο ασταθές διεθνές γεωπολιτικό περιβάλλον.

Ταυτόχρονα, η μελέτη έδειξε ότι οι δύο τεχνολογίες δεν είναι ισοδύναμες σε όλες τις διαστάσεις. Τα αιολικά έργα υπερτερούν σε όρους ενεργειακής απόδοσης και γρήγορης απόσβεσης της ενέργειας που καταναλώθηκε για την κατασκευή τους, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα αποδοτικά σε χώρες με υψηλό αιολικό δυναμικό όπως η Ελλάδα. Παράλληλα, όμως, εμφανίζουν περισσότερες περιβαλλοντικές και κοινωνικές προκλήσεις, κυρίως εξαιτίας των πιέσεων που ασκούν στη βιοποικιλότητα και της περιορισμένης κοινωνικής αποδοχής σε ορισμένες περιοχές. Στον αντίποδα, τα φωτοβολταϊκά έργα χαρακτηρίζονται από μικρότερες επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον, αλλά η εγκατάστασή τους συνεπάγεται αυξημένες απαιτήσεις σε γη, ενώ η κατασκευή των πάνελ συνδέεται με σημαντική κατανάλωση ενέργειας και πόρων.

Σε κοινωνικό επίπεδο, τα ευρήματα δείχνουν μια αντίφαση που αποτυπώνει με ενάργεια τη σημασία της τοπικής διάστασης. Η περίπτωση του Φωτοβολταϊκού Πάρκου Κοζάνης ανέδειξε ότι η χωροθέτηση σε ανενεργά λιγνιτωρυχεία, σε συνδυασμό με τα οικονομικά και κοινωνικά οφέλη που δημιουργήσε, οδήγησε σε υψηλή αποδοχή από την τοπική κοινωνία. Αντίθετα, το Αιολικό Πάρκο Καφηρέα στην Εύβοια αντιμετώπισε έντονες αντιδράσεις, παρά τα θετικά ενεργειακά του χαρακτηριστικά, γεγονός που καταδεικνύει ότι η κοινωνική αποδοχή εξαρτάται από το κατά πόσο τα έργα εντάσσονται αρμονικά στο τοπικό περιβάλλον και εάν συνοδεύονται από δίκαιη κατανομή των ωφελειών.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι ΑΠΕ στην Ελλάδα είναι αναμφισβήτητα βιώσιμες τεχνολογίες και θα πρέπει να αποτελέσουν τη βάση για ένα ενεργειακό σύστημα χαμηλών εκπομπών. Παράλληλα, όμως, η μελέτη κατέδειξε ότι η επιτυχία τους δεν είναι αυτονόητη και εξαρτάται από κρίσιμες παραμέτρους: την ορθολογική χωροθέτηση ώστε να αποφεύγονται συγκρούσεις με τη βιοποικιλότητα, την ουσιαστική εμπλοκή των τοπικών κοινωνιών ώστε να ενισχύεται η αποδοχή, καθώς και την ανάπτυξη στρατηγικών δίκαιης μετάβασης ώστε τα οφέλη να διαχέονται ισότιμα.

7.2 Προτάσεις για βιώσιμη ανάπτυξη αιολικών και φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα

Με βάση τα ευρήματα της μελέτης, προκύπτει ότι η Ελλάδα διαθέτει σημαντικό δυναμικό τόσο στην αιολική όσο και στη φωτοβολταϊκή ενέργεια, αλλά η αξιοποίηση αυτού του δυναμικού απαιτεί έναν πιο ολοκληρωμένο σχεδιασμό που θα λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τις ενεργειακές και περιβαλλοντικές παραμέτρους αλλά και τις κοινωνικές διαστάσεις. Η βιώσιμη ανάπτυξη των ΑΠΕ προϋποθέτει επομένως μια ισορροπημένη προσέγγιση, στην οποία η αύξηση της παραγωγής καθαρής ενέργειας θα συνδυάζεται με την προστασία της βιοποικιλότητας, την ορθή διαχείριση των φυσικών πόρων και την ενεργή συμμετοχή των πολιτών.

Μια πρώτη πρόταση αφορά τη χωροθέτηση των έργων. Όπως έδειξαν οι περιπτώσεις του Καφηρέα και της Κοζάνης, η επιλογή του τόπου εγκατάστασης καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την περιβαλλοντική και κοινωνική αποδοχή ενός έργου. Η εγκατάσταση αιολικών σε περιοχές με υψηλή οικολογική αξία οδηγεί σε εντάσεις και αντιδράσεις, ενώ αντίθετα η αξιοποίηση υποβαθμισμένων εκτάσεων για φωτοβολταϊκά ενισχύει την κοινωνική συναίνεση (Skiniti, Daras, & Tsoutsos, 2022). Επομένως, απαιτείται αυστηρότερος χωροταξικός σχεδιασμός, που

θα αποτρέπει την ανάπτυξη έργων σε περιοχές Natura 2000 ή σε μεταναστευτικούς διαδρόμους πτηνών, και θα δίνει προτεραιότητα σε πρώην βιομηχανικές εκτάσεις, εγκαταλελειμμένα ορυχεία και στέγες κτηρίων.

Δεύτερη πρόταση αποτελεί η ενίσχυση της κοινωνικής συμμετοχής. Η βιβλιογραφία έχει δείξει ότι η αποδοχή των έργων ΑΠΕ εξαρτάται από το βαθμό στον οποίο οι τοπικές κοινωνίες αισθάνονται ότι συμμετέχουν ενεργά και απολαμβάνουν απτά οφέλη (Devine-Wright, 2007). Στην Ελλάδα, η προώθηση ενεργειακών κοινοτήτων μπορεί να ενισχύσει αυτή τη διάσταση, καθώς δίνει στους πολίτες τη δυνατότητα να συμμετέχουν ως μέτοχοι ή συνιδιοκτήτες έργων ΑΠΕ, ενισχύοντας την αίσθηση δικαιοσύνης και συνεργασίας. Παράλληλα, η παροχή αντισταθμιστικών ωφελειών, όπως η μείωση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας για τις τοπικές κοινωνίες, μπορεί να ενισχύσει την αποδοχή και να περιορίσει τις αντιδράσεις.

Επιπλέον, προτείνεται η βελτίωση των τεχνολογικών λύσεων με στόχο τον περιορισμό των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στα αιολικά πάρκα, η χρήση συστημάτων αποτροπής συγκρούσεων πτηνών και η ανάπτυξη νέων σχεδίων ανεμογεννητριών με μειωμένο θόρυβο έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικά στη διεθνή πρακτική (Drewitt & Langston, 2006). Στα φωτοβολταϊκά, η επένδυση σε νέες τεχνολογίες, όπως τα πάνελ λεπτών υμενίων ή τα πλήρως ανακυκλώσιμα φωτοβολταϊκά, μπορεί να μειώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής τους (Cellura et al., 2023). Η προώθηση αγροβολταϊκών συστημάτων, όπου η παραγωγή ενέργειας συνδυάζεται με γεωργικές καλλιέργειες, αποτελεί επίσης μια καινοτόμο λύση που μπορεί να περιορίσει τον ανταγωνισμό στη χρήση γης και να αυξήσει τη συνολική αποδοχή των έργων (Dupraz et al., 2011).

Μια ακόμη κρίσιμη διάσταση αφορά τη διαχείριση του κύκλου ζωής των υποδομών. Η ανακύκλωση των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών πάνελ στο τέλος της ζωής τους πρέπει να αποτελέσει προτεραιότητα, καθώς διαφορετικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των έργων μπορεί να αυξηθεί σημαντικά. Ήδη η Ε.Ε. έχει θεσπίσει κανονισμούς για την ανακύκλωση ηλεκτρονικού εξοπλισμού, στους οποίους εντάσσονται και τα φωτοβολταϊκά, ωστόσο απαιτείται μεγαλύτερη έμφαση στην εφαρμογή και ενίσχυση των σχετικών πρακτικών στην Ελλάδα (European Commission, 2020).

Η διαχείριση των μη ανακυκλώσιμων τμημάτων ανεμογεννητριών συμβάλλει καθοριστικά στην ανάπτυξη της κυκλικής οικονομίας του ενεργειακού κλάδου. Τα πτερύγια ανεμογεννητριών, που αποτελούνται από σύνθετα υλικά (fiber-reinforced composites) παρουσιάζουν αυξημένη δυσκολία ανακύκλωσης λόγω του υλικού και της κατασκευής τους, περιορίζοντας την παραδοσιακή ανακύκλωση (IEA Wind Task 45, 2023).

Ωστόσο, η ανάδειξη καινοτόμων πρακτικών επαναχρησιμοποίησης αποτελεί μια ελπιδοφόρα λύση. Η εταιρεία Blade-Made στην Ολλανδία έχει υλοποιήσει πρωτοποριακά έργα όπου τα παλαιά πτερύγια μετατρέπονται σε παιδικές χαρές, δημόσιο εξοπλισμό και ποδηλατοστάσια, προσφέροντας βιώσιμες και λειτουργικές λύσεις αστικού εξοπλισμού (Blade-Made, 2024). Σε αυτές τις κατασκευές γίνεται αξιοποίηση της υψηλής ανθεκτικότητας και ελαφρότητας των υλικών, ενώ παράλληλα ενισχύεται η κοινωνική αποδοχή των ανεμογεννητριών ως οικολογικά φιλικών τεχνολογιών (Brightvibes, 2024).

Παρόμοιες προσεγγίσεις υποστηρίζονται και από άλλες ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες, όπως η ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση υλικών πτερυγίων στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού προγράμματος Horizon Europe (MRO, 2023). Η σύνθετη δομή των υλικών των πτερυγίων απαιτεί εξειδικευμένες μεθόδους αποσυναρμολόγησης και επεξεργασίας, οι οποίες αναπτύσσονται σταδιακά και προβλέπεται να εφαρμόζονται σε μεγάλη κλίμακα μέσα στην επόμενη δεκαετία (IEA Wind Task 45, 2023).

Επιπλέον, η επαναχρησιμοποίηση αυτών των πτερυγίων σε αστικές υποδομές – όπως παιδικές χαρές ή καθιστικά σε δημόσιους χώρους – μειώνει δραστικά την περιβαλλοντική επιβάρυνση που θα προκαλούσε η ταφή ή καύση τους, ενισχύοντας την ιδέα της κυκλικής οικονομίας και προάγοντας ταυτόχρονα την περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση των τοπικών κοινοτήτων (BBC News, 2021).

Τέλος, η βιώσιμη ανάπτυξη των ΑΠΕ απαιτεί μια στρατηγική που θα ενσωματώνει την αρχή της «δίκαιης μετάβασης». Αυτό σημαίνει ότι τα έργα θα πρέπει να συνδέονται με την τοπική οικονομία, δημιουργώντας νέες θέσεις εργασίας και ευκαιρίες ανάπτυξης, ώστε να αντισταθμίζεται η απώλεια δραστηριοτήτων από τον λιγνίτη και τα ορυκτά καύσιμα. Η εμπειρία της Κοζάνης έδειξε ότι όταν ένα έργο εντάσσεται σε μια ευρύτερη πολιτική περιφερειακής ανάπτυξης, τυγχάνει μεγαλύτερης αποδοχής και συμβάλλει ουσιαστικά στην κοινωνική συνοχή (Karasmanaki & Tsantopoulos, 2019).

Συμπερασματικά, η βιώσιμη ανάπτυξη των αιολικών και φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα δεν περιορίζεται στη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Αντίθετα, προϋποθέτει μια ολιστική προσέγγιση που θα ενσωματώνει περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές παραμέτρους. Η χωροθέτηση, η κοινωνική συμμετοχή, οι τεχνολογικές καινοτομίες, η ανακύκλωση και η δίκαιη μετάβαση αποτελούν τους πέντε βασικούς άξονες πάνω στους οποίους μπορεί να οικοδομηθεί ένα πραγματικά βιώσιμο ενεργειακό μέλλον για τη χώρα.

7.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα εργασία κατέδειξε ότι οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, και ιδιαίτερα η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την επίτευξη της βιώσιμης ανάπτυξης στην Ελλάδα. Ωστόσο, όπως σε κάθε μελέτη που εστιάζει σε συγκεκριμένους δείκτες και σε ορισμένες περιπτώσεις έργων, υπάρχουν ζητήματα τα οποία παραμένουν ανοιχτά και προσφέρουν πρόσφορο έδαφος για περαιτέρω ερευνητική διερεύνηση.

Καταρχάς, θα ήταν χρήσιμη μια πιο ολοκληρωμένη αποτίμηση του κύκλου ζωής των ΑΠΕ σε εθνικό επίπεδο, η οποία θα περιλαμβάνει όχι μόνο τις φάσεις παραγωγής και λειτουργίας αλλά και τη διαδικασία αποξήλωσης και ανακύκλωσης των υλικών στο τέλος ζωής τους. Η διεθνής βιβλιογραφία έχει αναδείξει ότι η διάσταση αυτή είναι κρίσιμη για την πλήρη κατανόηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των ΑΠΕ (Stolz et al., 2021). Στην ελληνική περίπτωση, η απουσία ενός οργανωμένου συστήματος ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ και ανεμογεννητριών αναδεικνύει την ανάγκη για στοχευμένη έρευνα που θα καθοδηγήσει μελλοντικές πολιτικές.

Εξίσου σημαντική είναι η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σχετικά με την κοινωνική διάσταση της ενεργειακής μετάβασης. Αν και η παρούσα εργασία ανέδειξε τις αντιφατικές στάσεις της κοινωνίας απέναντι στις ΑΠΕ, απαιτούνται πιο εκτεταμένες εμπειρικές μελέτες που θα εξετάζουν τις στάσεις των πολιτών σε διαφορετικές περιοχές της χώρας και θα ερευνούν τους παράγοντες που διαμορφώνουν την κοινωνική αποδοχή. Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι ζητήματα όπως η δικαιοσύνη στην κατανομή των ωφελειών, η διαφάνεια στη διαδικασία λήψης αποφάσεων και η συμμετοχή των πολιτών μπορούν να καθορίσουν το επίπεδο αποδοχής (Wüstenhagen, Wolsink, & Bürer, 2007). Στην ελληνική πραγματικότητα, η συστηματική μελέτη αυτών των παραμέτρων παραμένει περιορισμένη και αποτελεί σημαντικό πεδίο έρευνας.

Επιπλέον, απαιτείται περισσότερη διερεύνηση γύρω από τις χωροταξικές προκλήσεις που συνδέονται με την ανάπτυξη των ΑΠΕ. Οι συγκρούσεις με τη βιοποικιλότητα, η πίεση σε αγροτικές εκτάσεις και η χωρική αλληλεπίδραση με άλλες χρήσεις γης είναι θέματα που δεν έχουν ακόμη αποτυπωθεί με λεπτομέρεια στην ελληνική βιβλιογραφία. Μελλοντικές έρευνες μπορούν να αξιοποιήσουν γεωχωρικά εργαλεία (GIS) και τεχνικές χωρικής μοντελοποίησης ώστε να προτείνουν βέλτιστες πρακτικές χωροθέτησης, που θα μειώνουν τις περιβαλλοντικές συγκρούσεις και θα ενισχύουν τη βιωσιμότητα των έργων (Perpiña Castillo et al., 2019).

Τέλος, ένα ακόμη σημαντικό πεδίο περαιτέρω μελέτης αφορά την ενσωμάτωση καινοτόμων τεχνολογιών και πρακτικών, όπως τα αγροβιολογικά, τα θαλάσσια αιολικά πάρκα και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να προσφέρουν λύσεις σε υφιστάμενα προβλήματα, όπως ο ανταγωνισμός στη χρήση γης και η διαλειπτικότητα των ΑΠΕ, αλλά στην Ελλάδα παραμένουν ελάχιστα μελετημένες και ακόμα λιγότερο εφαρμοσμένες (Azzopardi et al., 2013). Συνεπώς, η συστηματική μελέτη της τεχνικής, περιβαλλοντικής και κοινωνικής τους διάστασης θα μπορούσε να εμπλουτίσει την εθνική στρατηγική για τις ΑΠΕ και να ανοίξει νέους δρόμους για βιώσιμη ανάπτυξη.

Συνοψίζοντας, η παρούσα εργασία αποτελεί ένα βήμα προς την κατανόηση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα, αλλά αναδεικνύει παράλληλα ότι υπάρχουν πολλά ακόμη ζητήματα που απαιτούν εις βάθος διερεύνηση. Μελλοντική έρευνα θα πρέπει να εστιάσει σε πιο ολοκληρωμένες μελέτες κύκλου ζωής, στην κοινωνική αποδοχή, στη βελτιστοποίηση της χωροθέτησης και στη διερεύνηση νέων τεχνολογιών, ώστε να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο που θα διασφαλίζει την πραγματική βιωσιμότητα των ΑΠΕ.

Βιβλιογραφία

Akrofi, M. M., Okitasari, M., & Kandpal, R. (2022). Recent trends on the linkages between energy, SDGs and the Paris Agreement: A review of policy-based studies. *Discover Sustainability*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s43621-022-00100-y>

Alhodaib, A., Yahya, Z., Khan, O., Equbal, A., Equbal, M. S., Parvez, M., Yadav, A. K., & Idrisi, M. J. (2024). Sustainable coatings for green solar photovoltaic cells: Performance and environmental impact of recyclable biomass digestate polymers. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62048-5>

Althaus, H.-J., & LCA expert / scientific coordinator. (2013). Calculation of energy payback time of PV and its determinants. *Swiss Photonics Workshop*. <https://www.swissphotonics.net/libraries.files/Althaus.pdf>

Arcos-Vargas, Á., & Riviere, L. (2018). Carbon footprint of photovoltaic energy. In *SpringerBriefs in Energy* (pp. 67–79). https://doi.org/10.1007/978-3-030-06064-0_6

Avila, S. (2018). Environmental justice and the expanding geography of wind power conflicts. *Sustainability Science*, 13(3), 21–45.

Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., et al. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2, 848–855. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>

Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., ... & Macknick, J. E. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2(9), 848–855. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>

Bashir, M. B. A. (2021). Principle parameters and environmental impacts that affect the performance of wind turbine: An overview. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(7), 7891–7909. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06357-1>

BBC News. (2021, September 30). Could Scotland's unwanted wind turbines be turned into playgrounds? <https://www.bbc.com/news/uk-scotland-58542905>

Bhattacharjee, J., & Roy, S. (2024). Significance of renewable energy in water management and irrigation. In *Water Resources Development and Management* (pp. 235–252). https://doi.org/10.1007/978-981-99-8639-2_12

Bhattacharya, M., Paramati, S. R., Ozturk, I., & Bhattacharya, S. (2015). The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. *Applied Energy*, 162, 733–741. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.104>

Blade-Made. (2024). Urban furniture from decommissioned windmill blades. <https://blade-made.com>

Brightvibes. (2024). 'Blade Made' turns discarded wind turbine blades into playgrounds and street furniture. <https://www.brightvibes.com>

CAN Europe. (2023). *Accelerating renewable energy deployment in Natura 2000 areas: Policy recommendations for Greece*.

Carbajales-Dale, M. (2019). When is EROI not EROI? *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 4(4). <https://doi.org/10.1007/s41247-019-0065-8>

Cellura, M., Luu, L. Q., Guarino, F., & Longo, S. (2023). A review on life cycle environmental impacts of emerging solar cells. *The Science of the Total Environment*, 908, 168019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168019>

Chen, S., Lu, X., Nielsen, C. P., McElroy, M. B., He, G., Zhang, S., He, K., Yang, X., Zhang, F., & Hao, J. (2023). Deploying solar photovoltaic energy first in carbon-intensive regions brings gigatons more carbon mitigations to 2060. *Communications Earth & Environment*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01006-x>

Desholm, M., Fox, A. D., Beasley, P. D. L., & Kahlert, J. (2006). Remote techniques for counting and estimating the number of bird–wind turbine collisions at sea: A review. *Ibis*, 148(s1), 76–89. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919x.2006.00509.x>

Devine-Wright, P., Grubb, J. (Ed.), & Pollitt, U. (Ed.) (2007). Reconsidering public acceptance of renewable energy technologies: A critical review. In *Taking Climate Change Seriously: A Low Carbon Future for the Electricity Sector*. Cambridge University Press.

Drewitt, A. L., & Langston, R. H. W. (2006). Assessing the impacts of wind farms on birds. *Ibis*, 148, 29–42. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2006.00516.x>

Dupont, E., Germain, M., & Jeanmart, H. (2021). Estimate of the societal energy return on investment (EROI). *Biophysical Economics and Sustainability*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s41247-021-00084-9>

Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36(10), 2725–2732.

Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36(10), 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>

EBRD. (2020). Environmental and social impact assessment – Kozani solar project. *European Bank for Reconstruction and Development*.

EEA. (2023). Renewable energy and local communities: Revenue sharing and social acceptance. *European Environment Agency*.

ENVECO SA. (2020). 204,23 MW solar park in Kozani, Greece. In *Non-Technical Summary of Environmental and Social Assessment Report*.

Escobar, A. (2015). Degrowth, postdevelopment and transitions: A preliminary conversation. *Sustainability Science*, 10(3), 451–462. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11625-015-0297-5>

European Commission. (2012). Directive 2012/19/EU on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). *Official Journal of the European Union*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0019>

European Commission. (2018). Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources. *Official Journal of the European Union*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001>

European Commission. (2021). Proposal for a regulation establishing a social climate fund. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0568>

European Commission. (2021). Regulation (EU) 2021/1119 establishing the European Climate Law. *Official Journal of the European Union*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32021R1119>

European Commission. (2022). REPowerEU Plan. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu_en

European Commission. (2023a). Proposal for a regulation establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials (Critical Raw Materials Act). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023PC0160>

European Commission. (2023b). Proposal for a regulation on establishing a framework of measures for strengthening Europe's net-zero technology manufacturing ecosystem (Net-Zero Industry Act). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023PC0161>

European Commission. (2023c). Renewable energy progress report.

European Union. (2012). Directive 2012/27/EU on energy efficiency. *Official Journal of the European Union*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0027>

Frantál, B., Frolova, M., & Liñán-Chacón, J. (2023). Conceptualizing the patterns of land use conflicts in wind energy development: Towards a typology and implications for practice. *Journal of Environmental Planning and Management*, 66(2), 10–25.

Georgiakakis, P., et al. (2012). Impacts of wind farms on birds and bats in Greece: A review. *Hellenic Ornithological Society*.

Golroudbary, S. R., Lundström, M., & Wilson, B. P. (2024). Analogical environmental cost assessment of silicon flows used in solar panels by the US and China. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60270-9>

HAEE, Hellenic Association for Energy Economics, National Bank of Greece, & Andriosopoulos, K. (n.d.). *Greek Energy Market Report*.

Helapco. (2023). End-of-life management of photovoltaic panels in Greece. *Ελληνικός Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών*.

Hüppop, O., Dierschke, J., Exo, K.-M., Fredrich, E., & Hill, R. (2006). Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines. *Ibis*, 148, 90–109. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2006.00536.x>

Iberdrola. (2022). Iberdrola's capacity in Greece rises to over 420 MW as Askio II and Rokani wind farms are fully commissioned. <https://www.iberdrola.com/press-room/news/detail/iberdrolas-capacity-in-greece-rises-to-over-420-mw-as-askio-ii-and-rokani-wind-farmas-are-fully-commissioned>

IEA Wind Task 45. (2023). *Deliverable 2.1: Review of blade design and novel materials for improved recyclability of wind turbine blades*. Fraunhofer IWES.

IEA Wind TCP. (2023). *Annual report 2023 – Greece*. https://www.iea-wind.org/wp-content/uploads/2024/11/Greece_2023.pdf

IEA-PVPS. (2025). *Dual Land Use for Agriculture and Solar Power Production: Overview and Performance of Agrivoltaic Systems*. IEA PVPS Task 13 Report T13-29:2025. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2025/03/IEA-PVPS-T13-29-2025-REPORT-Dual-Land-Use.pdf>

IRENA. (2023). End-of-life management: Wind turbine blade recycling. *International Renewable Energy Agency*.

Kaldellis, J. K. (2019). What is the wind energy progress in Greece? Prospects and problems. In *Innovative renewable energy* (pp. 23–40). https://doi.org/10.1007/978-3-030-26446-8_3

Kim, H., Cha, K., Kim, B., Fthenakis, V. M., & Hur, T. (2012). Life cycle assessment of CDTE photovoltaic system. In *Springer eBooks* (pp. 1018–1020). https://doi.org/10.1007/978-94-007-3010-6_215

Kubiszewski, I., Cleveland, C. J., & Endres, P. K. (2009). Meta-analysis of net energy return for wind power systems. *Renewable Energy*, 35(1), 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.01.012>

Lelek, L., Kulczycka, J., & The Author(s). (2021). Life cycle assessment of opencast lignite mining. *International Journal of Coal Science & Technology*, 8(6), 1272–1287. <https://doi.org/10.1007/s40789-021-00467-9>

MRO. (2023). *A comprehensive review of circular repurposing options for composite wind turbine blades*. Massey Research Online.

NREL. (2024). Life cycle greenhouse gas emissions from solar photovoltaics. *National Renewable Energy Laboratory*.

NYSERDA & UC Davis. (2019). Life cycle assessment of wind energy systems. *New York State Energy Research and Development Authority & University of California, Davis*.

Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A. M., Hefny, M., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb, A. H., & Rooney, D. W. (2022). Correction to: Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(3), 2213. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01432-x>

Palmer, G., & Floyd, J. (n.d.). An exploration of divergence in EPBT and EROI for solar photovoltaics. *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 2–15.

Portillo, M., et al. (2024). Environmental performance of utility-scale solar projects: Updated metrics and regional comparisons. *Journal of Renewable Energy Systems*.

PPC Renewables. (2024). Ptolemaida Photovoltaic Complex 550 MW – Project information. *Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Ανανεώσιμες*.

Renewables Now. (2025). Greece's installed wind power capacity tops 5.5 GW. <https://renewablesnow.com/news/greeces-installed-wind-power-capacity-tops-5-5-gw-1278474/>

Reve. (2025, January 27). Greece now has 5,355 MW of wind power. *REVE News of the wind sector in Spain and in the world*. <https://www.evwind.es/2025/01/27/greece-now-has-5355-mw-of-wind-power/104063>

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., et al. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472–475. <https://www.nature.com/articles/461472a>

Sarang, S. A., Raza, M. A., Panhwar, M., Khan, M., Abbas, G., Touti, E., Altamimi, A., & Wijaya, A. A. (2024). Maximizing solar power generation through conventional and digital MPPT techniques: A comparative analysis. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59776-z>

Skiniti, G., Daras, T., & Tsoutsos, T. (2022). Analysis of the community acceptance factors for potential wind energy projects in Greece. *Sustainability*, 14(23), 16009. <https://doi.org/10.3390/su142316009>

Solaun, K., & Cerdá, E. (2019). Climate change impacts on renewable energy generation: A review of quantitative projections. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, 109415. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109415>

Sovacool, B. K., & Dworkin, M. H. (2015). Energy justice: Conceptual insights and practical applications. *Applied Energy*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.002>

Stefanatos, N., Center for Renewable Energy Sources and Saving (CRES), & Hellenic Wind Energy Association HWEA. (2021). IEA WIND TCP Germany 2021.

Tawalbeh, M., Al-Othman, A., Kafiah, F., Abdelsalam, E., Almomani, F., & Alkasrawi, M. (2020c). Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. *The Science of the Total Environment*, 759, 143528. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528>

Team, E. (2025, January 27). Δελτίο Τύπου: Η στατιστική της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα για το 2024. *ΕΛΕΤΑΕΝ*. <https://eletaen.gr/deltio-typou-i-statistiki-tis-aioliki-energeias-stin-ellada-2024/>

The Global Environment Facility (2024). AGRIVOLTAICS. https://www.thegef.org/sites/default/files/documents/2024-01/EN_GEF.STAP_C.66.Inf_04_Agrivoltaics.pdf

The Kafiareas wind farm, Evia, Greece. (n.d.). *Enel Green Power*. <https://www.enelgreenpower.com/our-projects/operating/kafiareas-wind-farm>

Todorović, I. (2024, October 1). Hellenic Petroleum inaugurates Europe's biggest solar park with two-sided panels. *Balkan Green Energy News*. <https://balkangreenenergynews.com/hellenic-petroleum-inaugurates-europes-biggest-solar-park-with-two-sided-panels/>

Twidell, J. (2022). *Renewable energy resources* (4th ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429452161>

Van Den Bergh, J. C. J. M. (1996). *Ecological economics and sustainable development: Theory, methods and applications*. Edward Elgar Publishing.

Verma, A. (2019, October 16). Enel commissions largest wind energy facility in Greece. *Saur Energy*. <https://www.saurenergy.com/solar-energy-news/enel-commissions-largest-wind-energy-facility-greece>

Villalba, U. (2013). Buen vivir vs development: A paradigm shift in the Andes. *Third World Quarterly*, 34(8), 1427–1442. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01436597.2013.831594>

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). Agrivoltaic systems: *Applications, challenges, and opportunities. A review. Agronomy for Sustainable Development*, 39, 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>

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. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.001>

Yang, P., Chua, L. H. C., Irvine, K. N., Nguyen, M. T., & Low, E. (2022). Impacts of a floating photovoltaic system on temperature and water quality in a shallow tropical reservoir. *Limnology*, 23(3), 441–454. <https://doi.org/10.1007/s10201-022-00698-y>

Zhang, F., Yao, C., Xu, J., Zhu, L., Peng, G., & Li, D. (2020). Composition, spatial distribution and sources of plastic litter on the East China Sea floor. *The Science of the Total Environment*, 742, 140525. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140525>

Zhao, X., Mignone, B. K., Wise, M. A., & McJeon, H. C. (2024). Trade-offs in land-based carbon removal measures under 1.5 °C and 2 °C futures. *Nature Communications*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46575-3>

Ελληνική Κυβέρνηση. (2019). *Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ)*. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-01/el_final_necp_main_el_0.pdf

Ευρωπαϊκή Ένωση. (2021). *Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία*. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_el

ΥΠΕΝ. (2024). *Αναθεώρηση Ειδικού Χωροταξικού Πλαισίου για τις ΑΠΕ – Δημόσια Διαβούλευση*. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας.