

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΤΥΧΙΑΚΉ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Συγκριτική μελέτη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και
προοπτικές»**



Του φοιτητή
Τερψόπουλου Μιχαήλ
Αρ. Μητρώου: 513306

Επιβλέπων
Ιορδάνης Κιοσκερίδης
Καθηγητής

Τίτλος Δ.Ε. Συγκριτική μελέτη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και προοπτικές
Κωδικός Π.Ε. 25350
Ονοματεπώνυμο φοιτητή: Τερψοπούλου Μιχαήλ
Ονοματεπώνυμο εισηγητή Ιορδάνης Κιοσκερίδης
Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 3/11/25
Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 31/1/26

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του Τερψόπουλου Μιχαήλ που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Η παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση προς ένα σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις του 21ου αιώνα. Η αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και η ανάγκη ενίσχυσης της ενεργειακής ασφάλειας έχουν καταστήσει τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας βασικό πυλώνα των σύγχρονων ενεργειακών πολιτικών. Στο πλαίσιο αυτό, η επιλογή και η ανάπτυξη ενεργειακών τεχνολογιών δεν μπορεί πλέον να βασίζεται σε μεμονωμένα κριτήρια, αλλά απαιτεί ολοκληρωμένη προσέγγιση που να συνδυάζει οικονομικούς, τεχνικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς παράγοντες. Η κατανόηση των συγκριτικών πλεονεκτημάτων και περιορισμών των επιμέρους τεχνολογιών ΑΠΕ είναι κρίσιμη για τον σχεδιασμό βιώσιμων και ανθεκτικών ενεργειακών συστημάτων.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε με στόχο να συμβάλει σε αυτήν τη συζήτηση, μέσω μιας συστηματικής και πολυκριτηριακής συγκριτικής ανάλυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται δε όχι μόνο στη θεωρητική αξιολόγηση των τεχνολογιών, αλλά και στην εφαρμογή των αποτελεσμάτων στο ευρωπαϊκό και ελληνικό ενεργειακό πλαίσιο, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες δομικές και χωρικές συνθήκες. Η εργασία φιλοδοξεί να αποτελέσει ένα τεκμηριωμένο εργαλείο κατανόησης και υποστήριξης αποφάσεων για τον ενεργειακό σχεδιασμό, αναδεικνύοντας τη σημασία της συστημικής προσέγγισης στη μετάβαση προς ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζει συγκριτικά τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), με στόχο την αξιολόγηση της καταλληλότητάς τους στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης και του ενεργειακού σχεδιασμού. Αρχικά, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της ενεργειακής μετάβασης και αναδεικνύεται η ανάγκη για ορθολογική επιλογή ενεργειακών τεχνολογιών, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο οικονομικά αλλά και τεχνικά, περιβαλλοντικά, κοινωνικά και χωροταξικά κριτήρια. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται ένα πολυκριτηριακό πλαίσιο σύγκρισης, το οποίο εφαρμόζεται στις βασικές τεχνολογίες ΑΠΕ, με έμφαση σε δείκτες όπως το κόστος παραγωγής (LCOE), ο συντελεστής φορτίου, οι εκπομπές CO₂ και οι επιπτώσεις χρήσης γης.

Η ποσοτική και ποιοτική ανάλυση αναδεικνύει ότι η ηλιακή και η αιολική ενέργεια αποτελούν τις πλέον οικονομικά ανταγωνιστικές επιλογές, χωρίς ωστόσο να επαρκούν από μόνες τους για τη διασφάλιση της ευστάθειας του ενεργειακού συστήματος λόγω της μεταβλητότητάς τους. Η εφαρμογή της ανάλυσης στην Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση δείχνει ότι η «βέλτιστη επιλογή» δεν ταυτίζεται με μία μεμονωμένη τεχνολογία, αλλά με έναν συνδυασμό ΑΠΕ, αποθήκευσης ενέργειας και κατάλληλων υποδομών. Τέλος, εξετάζονται μελλοντικές προοπτικές, σενάρια ενεργειακού μείγματος και προτάσεις πολιτικής, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η επιτυχία της ενεργειακής μετάβασης προϋποθέτει ολοκληρωμένο, συστημικό και προσαρμοστικό ενεργειακό σχεδιασμό.

«Comparative Study of Renewable Energy Sources and Prospects»

Abstract

This thesis provides a comparative analysis of Renewable Energy Sources (RES) with the aim of assessing their suitability within the context of energy transition and long-term energy planning. The study initially outlines the theoretical framework of the global and European energy transition, emphasizing the complexity of selecting energy technologies under multiple and often conflicting criteria. A dedicated multi-criteria evaluation framework is developed, incorporating technical, economic, environmental, social, and spatial parameters, including levelized cost of energy (LCOE), capacity factor, life-cycle CO₂ emissions, land use, and social acceptance.

The framework is applied to the main RES technologies, enabling both qualitative and quantitative comparisons. The results indicate that solar and wind energy are currently the most economically competitive options for new electricity generation. However, their variable nature limits their ability to ensure system stability when deployed in isolation. Technologies with higher controllability, along with energy storage and grid infrastructure, are therefore identified as essential complementary components.

The analysis is further applied to the energy profiles of Greece and the European Union, highlighting how national characteristics, resource availability, and system constraints influence the optimal deployment of RES. The findings demonstrate that the concept of a “best” renewable technology is context-dependent and system-specific rather than universal.

Finally, future energy scenarios, technological developments, and policy implications are examined. The study concludes that an effective energy transition requires an integrated, system-oriented and adaptive energy planning approach that balances cost efficiency, reliability, environmental performance, and social feasibility.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω και να αφιερώσω αυτήν την πτυχιακή στους γονείς μου για όλη την στήριξη που μου προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Καθώς και τον επιβλέποντα καθηγητή μου Ιορδάνη κιοσκερίδη.

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 Ενεργειακή μετάβαση και ρόλος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	9
1.2 Το πρόβλημα της επιλογής ενεργειακής τεχνολογίας.....	10
1.3 Στόχοι και ερευνητικά ερωτήματα	11
1.4 Δομή της διπλωματικής	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	13
2.1 Τεχνικά κριτήρια	14
2.2 Οικονομικά κριτήρια	16
2.3 Περιβαλλοντικά κριτήρια.....	18
2.4 Κοινωνικά και χωροταξικά κριτήρια	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	22
3.1 Ηλιακή ενέργεια: αξιολόγηση βάσει κριτηρίων	23
3.2 Αιολική ενέργεια: αξιολόγηση βάσει κριτηρίων.....	24
3.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια: αξιολόγηση βάσει κριτηρίων	25
3.4 Βιομάζα και γεωθερμία: αξιολόγηση βάσει κριτηρίων	26
3.5 Συγκεντρωτικός πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΕ.....	29
4.1 Σύγκριση κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (LCOE)	30
4.2 Σύγκριση αποδοτικότητας και συντελεστή φορτίου (capacity factor).....	31
4.3 Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	33
4.3.1 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (gCO ₂ /kWh).....	33
4.3.2 Χρήση γης.....	34
4.4 Σύνθεση αποτελεσμάτων ποσοτικής συγκριτικής ανάλυσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΕ ΕΛΛΑΔΑ & ΕΕ	37
5.1 Ενεργειακό προφίλ Ελλάδας	38
5.2 Ενεργειακό προφίλ Ευρωπαϊκής Ένωσης	40
5.3 Συγκριτική ανάλυση Ελλάδας – ΕΕ	42

5.5 Προτάσεις πολιτικής και τεχνικές προτεραιότητες για την Ελλάδα	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ & ΣΕΝΑΡΙΑ	50
6.1 Τεχνολογικές εξελίξεις	51
6.2 Σενάρια ενεργειακού μείγματος (2030–2050)	52
6.3 Ρόλος αποθήκευσης ενέργειας και υδρογόνου στο μελλοντικό ενεργειακό σύστημα	54
6.4 Περιορισμοί και αβεβαιότητες	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	56
7.1 Συνοπτικά συμπεράσματα σύγκρισης	57
7.2 Προτάσεις για ενεργειακό σχεδιασμό	59
7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	61
ΠΗΓΕΣ	62

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Σύνοψη τεχνικών κριτηρίων	15
Πίνακας 2: Σύνοψη οικονομικών κριτηρίων	17
Πίνακας 3: Σύνοψη περιβαλλοντικών κριτηρίων	19
Πίνακας 4: Σύνοψη κοινωνικών και χωροταξικών κριτηρίων	21
Πίνακας 5: Συγκεντρωτική Τεχνική Αξιολόγηση ΑΠΕ	29
Πίνακας 6: Συγκεντρωτική Οικονομική Αξιολόγηση ΑΠΕ	29
Πίνακας 7: Συγκεντρωτική Περιβαλλοντική Αξιολόγηση ΑΠΕ	30
Πίνακας 8: Συγκεντρωτική Κοινωνική & Χωροταξική Αξιολόγηση ΑΠΕ	30
Πίνακας 9: Εύρη εξομοιωμένου κόστους ενέργειας (LCOE) ανά τεχνολογία ΑΠΕ	31
Πίνακας 10: Συνοπτική οικονομική αποτύπωση ΑΠΕ βάσει LCOE.....	32
Πίνακας 11: Εύρη συντελεστή φορτίου (capacity factor) ανά τεχνολογία ΑΠΕ ...	33
Πίνακας 12: Συνοπτική αποτύπωση αποδοτικότητας ΑΠΕ βάσει capacity factor	33
Πίνακας 13: Εκπομπές CO ₂ κύκλου ζωής ανά τεχνολογία ΑΠΕ.....	35
Πίνακας 14: Συγκριτική αποτύπωση χρήσης γης ανά τεχνολογία ΑΠΕ	35
Πίνακας 15: Συνοπτική περιβαλλοντική εικόνα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	36
Πίνακας 16: Συγκεντρωτική σύνοψη οικονομικών, τεχνικών και περιβαλλοντικών δεικτών ΑΠΕ	37
Πίνακας 17: Ποιοτική σύνθεση πλεονεκτημάτων και περιορισμών ανά τεχνολογία	37
Πίνακας 18: Βασικοί δείκτες ενεργειακού προφίλ Ελλάδας	41
Πίνακας 19: Βασικοί δείκτες ενεργειακού προφίλ Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	43
Πίνακας 20: Ελλάδα vs ΕΕ (βασικοί δείκτες και δομικές διαφορές).....	45
Πίνακας 21: «Βέλτιστη επιλογή» ανά κριτήριο για την Ελλάδα (συνθετική αξιολόγηση)	48
Πίνακας 22: Προτάσεις πολιτικής & τεχνικές προτεραιότητες για την Ελλάδα.....	51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ενεργειακή μετάβαση και ρόλος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Η ενεργειακή μετάβαση συνιστά μια πολυδιάστατη και μακροχρόνια διαδικασία μετασχηματισμού των ενεργειακών συστημάτων, με στόχο τη μετάβαση από ένα μοντέλο βασισμένο στα ορυκτά καύσιμα σε ένα μοντέλο χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών άνθρακα. Η διαδικασία αυτή δεν αφορά αποκλειστικά την αντικατάσταση των πηγών ενέργειας, αλλά περιλαμβάνει ευρύτερες τεχνολογικές, οικονομικές και θεσμικές αλλαγές που επηρεάζουν την παραγωγή, τη μεταφορά και την κατανάλωση ενέργειας.

Κεντρικό ρόλο στην ενεργειακή μετάβαση διαδραματίζουν οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), καθώς προσφέρουν τη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας με σημαντικά μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύγκριση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας. Η αξιοποίησή τους συμβάλλει άμεσα στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, στον περιορισμό της εξάρτησης από εισαγόμενα καύσιμα και στη βελτίωση της ενεργειακής ασφάλειας σε εθνικό και υπερεθνικό επίπεδο. Παράλληλα, οι ΑΠΕ ενισχύουν τη διαφοροποίηση του ενεργειακού μείγματος, μειώνοντας την ευαλωτότητα των οικονομιών σε διακυμάνσεις τιμών και γεωπολιτικές αστάθειες.

Η αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ στα σύγχρονα ενεργειακά συστήματα συνδέεται άμεσα με την πρόοδο της τεχνολογίας και τη σταδιακή μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Τεχνολογίες όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια έχουν καταστεί ανταγωνιστικές έναντι των συμβατικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, γεγονός που επιταχύνει την υιοθέτησή τους τόσο σε ανεπτυγμένες όσο και σε αναπτυσσόμενες οικονομίες. Ωστόσο, η μεταβλητότητα της παραγωγής τους και η ανάγκη για ευέλικτα και ανθεκτικά ενεργειακά δίκτυα καθιστούν αναγκαία τη συμπληρωματική ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και έξυπνων δικτύων.

Πέρα από τη συμβολή τους στην περιβαλλοντική προστασία, οι ΑΠΕ αποτελούν και σημαντικό μοχλό οικονομικής ανάπτυξης. Η ανάπτυξη σχετικών τεχνολογιών και υποδομών δημιουργεί νέες επενδυτικές ευκαιρίες και θέσεις εργασίας, ενώ ενισχύει την καινοτομία και τη βιομηχανική δραστηριότητα. Στο πλαίσιο αυτό, η ενεργειακή μετάβαση δεν αντιμετωπίζεται μόνο ως περιβαλλοντική αναγκαιότητα, αλλά και ως στρατηγική επιλογή με ευρύτερες κοινωνικοοικονομικές προεκτάσεις.

Συνεπώς, ο ρόλος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην ενεργειακή μετάβαση είναι καθοριστικός, καθώς αποτελούν τη βασική συνιστώσα για τη διαμόρφωση ενός βιώσιμου,

αποδοτικού και ανθεκτικού ενεργειακού συστήματος. Η συστηματική ανάλυση και σύγκρισή τους, με βάση τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια, κρίνεται απαραίτητη για τη διαμόρφωση τεκμηριωμένων ενεργειακών πολιτικών και στρατηγικών ανάπτυξης, γεγονός που αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας μελέτης.

1.2 Το πρόβλημα της επιλογής ενεργειακής τεχνολογίας

Η επιλογή της κατάλληλης ενεργειακής τεχνολογίας αποτελεί ένα σύνθετο και πολυπαραγοντικό πρόβλημα, το οποίο αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης. Σε αντίθεση με το παρελθόν, όπου η ενεργειακή πολιτική επικεντρωνόταν κυρίως στη διασφάλιση της επάρκειας καυσίμων και στη μείωση του κόστους παραγωγής, οι σύγχρονες ενεργειακές αποφάσεις καλούνται να ενσωματώσουν ένα ευρύ φάσμα τεχνικών, οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων. Η πολυπλοκότητα αυτή καθιστά την επιλογή ενεργειακής τεχνολογίας ένα πρόβλημα στρατηγικού σχεδιασμού, στο οποίο δεν υπάρχει μία καθολικά βέλτιστη λύση, αλλά πολλαπλές εναλλακτικές με διαφορετικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς.

Ένας από τους βασικούς παράγοντες που δυσχεραίνουν τη διαδικασία επιλογής είναι η ετερογένεια των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας ως προς τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά. Κάθε τεχνολογία παρουσιάζει διαφορετικό βαθμό ωριμότητας, απόδοσης και αξιοπιστίας, ενώ επηρεάζεται σε διαφορετικό βαθμό από φυσικούς και γεωγραφικούς περιορισμούς. Για παράδειγμα, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζονται από υψηλή μεταβλητότητα στην παραγωγή, γεγονός που απαιτεί την ύπαρξη ευέλικτων μηχανισμών εξισορρόπησης και αποθήκευσης ενέργειας. Αντίθετα, τεχνολογίες όπως η υδροηλεκτρική ενέργεια ή η βιομάζα μπορούν να προσφέρουν μεγαλύτερη προβλεψιμότητα, αλλά συχνά συνοδεύονται από περιορισμούς που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα φυσικών πόρων ή τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Παράλληλα, η οικονομική διάσταση διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη λήψη αποφάσεων. Το αρχικό κόστος επένδυσης, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, καθώς και το συνολικό κόστος κύκλου ζωής μιας ενεργειακής τεχνολογίας διαφοροποιούνται σημαντικά μεταξύ των διαθέσιμων επιλογών. Αν και πολλές ανανεώσιμες τεχνολογίες παρουσιάζουν χαμηλό μεταβλητό κόστος λειτουργίας, απαιτούν συχνά υψηλές αρχικές επενδύσεις, γεγονός που μπορεί να λειτουργήσει αποτρεπτικά για ορισμένες οικονομίες ή επενδυτές. Επιπλέον, η οικονομική βιωσιμότητα μιας τεχνολογίας εξαρτάται από εξωτερικούς παράγοντες, όπως τα ρυθμιστικά πλαίσια, τα συστήματα επιδότησης και οι μηχανισμοί στήριξης της αγοράς, οι οποίοι διαφέρουν σημαντικά από χώρα σε χώρα.

Η περιβαλλοντική διάσταση, αν και αποτελεί βασικό κίνητρο για την προώθηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, δεν είναι μονοδιάστατη. Η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μιας ενεργειακής τεχνολογίας δεν περιορίζεται στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τη φάση λειτουργίας της, αλλά επεκτείνεται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής της, συμπεριλαμβανομένης της εξόρυξης πρώτων υλών, της κατασκευής, της εγκατάστασης και της τελικής απόσυρσης. Ορισμένες τεχνολογίες, παρά το χαμηλό λειτουργικό τους αποτύπωμα, ενδέχεται να επιβαρύνουν το περιβάλλον μέσω αυξημένης χρήσης γης, αλλοίωσης τοπικών οικοσυστημάτων ή παραγωγής αποβλήτων, γεγονός που καθιστά αναγκαία μια συνολική και ισορροπημένη αξιολόγηση.

Επιπρόσθετα, η κοινωνική διάσταση της επιλογής ενεργειακής τεχνολογίας αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη βαρύτητα. Η αποδοχή των ενεργειακών έργων από τις τοπικές κοινωνίες, η χωροταξική συμβατότητα και οι επιπτώσεις στην απασχόληση και στην τοπική ανάπτυξη αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την επιτυχή υλοποίηση των ενεργειακών πολιτικών. Η έλλειψη κοινωνικής συναίνεσης μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις ή ακόμη και σε ακύρωση έργων, ανεξαρτήτως της τεχνικής ή οικονομικής τους σκοπιμότητας. Συνεπώς, η επιλογή ενεργειακής τεχνολογίας δεν μπορεί να εξετάζεται αποκλειστικά με τεχνοκρατικά κριτήρια, αλλά απαιτεί τη συνεκτίμηση των κοινωνικών και θεσμικών παραμέτρων.

Στο πλαίσιο αυτό, η επιλογή ενεργειακής τεχνολογίας αναδεικνύεται ως ένα κατεξοχήν πολυκριτηριακό πρόβλημα, στο οποίο η λήψη αποφάσεων προϋποθέτει τη συστηματική σύγκριση εναλλακτικών λύσεων με βάση σαφώς ορισμένα και μετρήσιμα κριτήρια. Η ανάγκη για δομημένες μεθοδολογίες αξιολόγησης καθίσταται επιτακτική, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι οι ενεργειακές επιλογές είναι τεχνικά εφικτές, οικονομικά βιώσιμες, περιβαλλοντικά υπεύθυνες και κοινωνικά αποδεκτές. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί τη βάση για τη συγκριτική ανάλυση που αναπτύσσεται στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας.

1.3 Στόχοι και ερευνητικά ερωτήματα

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως βασικό στόχο τη συστηματική και τεκμηριωμένη συγκριτική ανάλυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, με σκοπό την αξιολόγηση της καταλληλότητάς τους στο πλαίσιο της σύγχρονης ενεργειακής μετάβασης. Η έρευνα δεν περιορίζεται στην περιγραφική παρουσίαση των επιμέρους τεχνολογιών, αλλά εστιάζει στη διερεύνηση των διαφορών και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια. Μέσα από αυτήν την προσέγγιση επιδιώκεται η ανάπτυξη ενός συνεκτικού πλαισίου αξιολόγησης, το οποίο μπορεί να υποστηρίξει τη λήψη αποφάσεων στον ενεργειακό σχεδιασμό και τη διαμόρφωση στρατηγικών πολιτικής.

Ειδικότερος στόχος της εργασίας είναι η αποτύπωση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών κάθε ανανεώσιμης ενεργειακής τεχνολογίας, όχι ως απομονωμένων λύσεων, αλλά ως στοιχείων ενός ευρύτερου ενεργειακού συστήματος. Η ανάλυση επιδιώκει να αναδείξει τον τρόπο με τον οποίο οι διαφορετικές τεχνολογίες μπορούν να συνδυαστούν συμπληρωματικά, προκειμένου να ενισχυθεί η αξιοπιστία και η ανθεκτικότητα του ενεργειακού μείγματος. Παράλληλα, εξετάζεται ο βαθμός στον οποίο η τεχνολογική ωριμότητα και το κόστος επηρεάζουν τη δυνατότητα ευρείας υιοθέτησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο.

Στο πλαίσιο αυτό, η εργασία αποσκοπεί επίσης στην αξιολόγηση της πρακτικής εφαρμογής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε διαφορετικά γεωγραφικά και θεσμικά περιβάλλοντα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ανάλυση της συμβατότητας των επιμέρους τεχνολογιών με τα χαρακτηριστικά της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όπως το φυσικό δυναμικό, η υφιστάμενη ενεργειακή υποδομή και το ρυθμιστικό πλαίσιο. Μέσω της σύγκρισης αυτής επιδιώκεται η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη βέλτιστη αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε διαφορετικά επίπεδα ενεργειακού σχεδιασμού.

Με βάση τους παραπάνω στόχους, η παρούσα μελέτη διαρθρώνεται γύρω από συγκεκριμένα ερευνητικά ερωτήματα, τα οποία καθοδηγούν την ανάλυση και τη μεθοδολογική προσέγγιση της εργασίας. Ενδεικτικά, τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα που τίθενται είναι τα εξής: ποια είναι τα κύρια τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά των βασικών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και πώς διαφοροποιούνται μεταξύ τους; σε ποιον βαθμό οι διαφορετικές ενεργειακές τεχνολογίες ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της ενεργειακής μετάβασης ως προς την αποδοτικότητα, το κόστος και τη βιωσιμότητα; ποιοι παράγοντες επηρεάζουν καθοριστικά την επιλογή μιας ενεργειακής τεχνολογίας σε επίπεδο εθνικού και ευρωπαϊκού ενεργειακού σχεδιασμού; και κατά πόσο η συγκριτική αξιολόγηση μπορεί να συμβάλει στη διαμόρφωση τεκμηριωμένων και αποτελεσματικών ενεργειακών πολιτικών.

1.4 Δομή της πτυχιακής

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε επτά κεφάλαια, τα οποία διαρθρώνονται με τρόπο ώστε να εξυπηρετούν τη σταδιακή ανάπτυξη της ερευνητικής προβληματικής και τη συστηματική προσέγγιση της συγκριτικής ανάλυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Η δομή της εργασίας έχει σχεδιαστεί με στόχο τη σαφή μετάβαση από το θεωρητικό και εννοιολογικό πλαίσιο προς την αναλυτική αξιολόγηση και τη σύνθεση συμπερασμάτων, διασφαλίζοντας τη συνοχή και τη λογική αλληλουχία των επιμέρους κεφαλαίων.

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο της μελέτης. Εισάγεται η έννοια της ενεργειακής μετάβασης και αναλύεται ο ρόλος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο

σύγχρονο ενεργειακό σύστημα. Παράλληλα, προσδιορίζεται το πρόβλημα της επιλογής ενεργειακής τεχνολογίας, διατυπώνονται οι στόχοι και τα ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας και περιγράφεται συνοπτικά η δομή της διπλωματικής.

Το **Κεφάλαιο 2** επικεντρώνεται στον καθορισμό των κριτηρίων συγκριτικής αξιολόγησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Παρουσιάζονται τα τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται στη μελέτη, καθώς και οι δείκτες που επιλέγονται για την ποσοτική αποτύπωσή τους. Το κεφάλαιο αυτό θέτει το μεθοδολογικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο βασίζεται η περαιτέρω ανάλυση.

Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύονται οι βασικές Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας με βάση τα κριτήρια που έχουν οριστεί. Η προσέγγιση δεν είναι περιγραφική, αλλά εστιάζει στην αξιολόγηση των επιμέρους τεχνολογιών ως προς τα βασικά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς τους, προετοιμάζοντας το έδαφος για τη συγκριτική ανάλυση που ακολουθεί.

Το **Κεφάλαιο 4** αποτελεί τον πυρήνα της εργασίας, καθώς αναπτύσσεται η ποσοτική και πολυκριτηριακή συγκριτική ανάλυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Μέσα από πίνακες και συγκριτικά σχήματα παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των τεχνολογιών, ενώ επιχειρείται η σύνθεση των αποτελεσμάτων και η κατάταξή τους με βάση τα επιλεγμένα κριτήρια.

Στο **Κεφάλαιο 5** εφαρμόζεται το συγκριτικό πλαίσιο στην περίπτωση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Εξετάζεται η υφιστάμενη κατάσταση του ενεργειακού μείγματος και αξιολογείται ο βαθμός καταλληλότητας των διαφορετικών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε σχέση με τα γεωγραφικά, θεσμικά και τεχνολογικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων περιοχών.

Το **Κεφάλαιο 6** επικεντρώνεται στις μελλοντικές προοπτικές και στα πιθανά σενάρια εξέλιξης του ενεργειακού συστήματος. Αναλύονται οι τεχνολογικές τάσεις, οι προκλήσεις και οι αβεβαιότητες που σχετίζονται με τη διεύθυνση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, καθώς και ο ρόλος νέων τεχνολογιών, όπως η αποθήκευση ενέργειας.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας και διατυπώνονται προτάσεις που προκύπτουν από τη συγκριτική ανάλυση. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με προτάσεις για μελλοντική έρευνα, αναδεικνύοντας πιθανά πεδία περαιτέρω διερεύνησης στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Τεχνικά κριτήρια

Τα τεχνικά κριτήρια αποτελούν θεμελιώδη παράγοντα στη συγκριτική αξιολόγηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, καθώς συνδέονται άμεσα με τη λειτουργική απόδοση, την αξιοπιστία και την ένταξη κάθε τεχνολογίας στο ενεργειακό σύστημα. Η τεχνική αξιολόγηση δεν περιορίζεται στην ονομαστική ισχύ μιας εγκατάστασης, αλλά εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο η τεχνολογία αποδίδει υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, τη σταθερότητα της παραγόμενης ενέργειας και τον βαθμό τεχνολογικής της ωριμότητας. Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στον συντελεστή απόδοσης, στη διαθεσιμότητα της παραγωγής και στο επίπεδο τεχνολογικής ωρίμανσης των επιμέρους ενεργειακών λύσεων.

Τεχνικό κριτήριο	Ορισμός	Μονάδα
Capacity factor	Λόγος πραγματικής προς θεωρητική παραγωγή	%
Διαθεσιμότητα	Βαθμός παροχής ενέργειας όταν ζητείται	Ποιοτικό
Μεταβλητότητα	Χρονική διακύμανση παραγωγής	Ποιοτικό
Ωριμότητα τεχνολογίας	Στάδιο τεχνολογικής ανάπτυξης	Ποιοτικό

Πίνακας 1: Σύνοψη τεχνικών κριτηρίων

Απόδοση (Capacity Factor)

Ο συντελεστής απόδοσης (capacity factor) αποτελεί έναν από τους πλέον καθιερωμένους δείκτες αξιολόγησης της απόδοσης μιας ενεργειακής τεχνολογίας. Ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα προς τη μέγιστη θεωρητική ενέργεια που θα μπορούσε να παραχθεί, εάν η μονάδα λειτουργούσε συνεχώς στη μέγιστη ονομαστική της ισχύ. Ο δείκτης αυτός επιτρέπει τη ρεαλιστική σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών, καθώς λαμβάνει υπόψη τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και όχι μόνο τα ονομαστικά τεχνικά χαρακτηριστικά.

Στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, ο συντελεστής απόδοσης επηρεάζεται έντονα από εξωγενείς παράγοντες, όπως οι καιρικές συνθήκες και τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης. Για παράδειγμα, η αιολική και η ηλιακή ενέργεια παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στον capacity factor ανάλογα με το αιολικό δυναμικό ή τη

διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, ενώ η υδροηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα υδάτινων πόρων. Κατά συνέπεια, ο δείκτης αυτός δεν εκφράζει μόνο την τεχνική αποδοτικότητα της τεχνολογίας, αλλά και την καταλληλότητά της σε συγκεκριμένα χωρικά και περιβαλλοντικά πλαίσια.

Διαθεσιμότητα και μεταβλητότητα παραγωγής

Η διαθεσιμότητα της παραγωγής αναφέρεται στον βαθμό στον οποίο μια ενεργειακή τεχνολογία μπορεί να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια όταν αυτή ζητείται από το σύστημα. Στο πλαίσιο των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, η έννοια αυτή συνδέεται στενά με τη μεταβλητότητα της παραγωγής, δηλαδή με τις χρονικές διακυμάνσεις στην παραγόμενη ισχύ. Τεχνολογίες όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζονται από στοχαστική και μη πλήρως προβλέψιμη παραγωγή, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει προκλήσεις στην εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μεταβλητότητα δεν αποτελεί απαραίτητα τεχνικό μειονέκτημα, αλλά παράγοντα που απαιτεί κατάλληλο σχεδιασμό του ενεργειακού συστήματος. Η ένταξη υψηλών ποσοστών μεταβλητών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας προϋποθέτει την ύπαρξη ευέλικτων μονάδων παραγωγής, συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και επαρκών υποδομών δικτύου. Αντίθετα, τεχνολογίες με υψηλότερη προβλεψιμότητα, όπως η υδροηλεκτρική ενέργεια ή η βιομάζα, μπορούν να συμβάλουν στη σταθεροποίηση του συστήματος, προσφέροντας μεγαλύτερο βαθμό ελέγχου της παραγωγής. Συνεπώς, η αξιολόγηση της διαθεσιμότητας και της μεταβλητότητας είναι κρίσιμη για την κατανόηση του ρόλου κάθε τεχνολογίας στο συνολικό ενεργειακό μείγμα.

Ωριμότητα τεχνολογίας

Η ωριμότητα τεχνολογίας αναφέρεται στο στάδιο ανάπτυξης και εμπορικής εφαρμογής μιας ενεργειακής τεχνολογίας και επηρεάζει άμεσα την αξιοπιστία, το κόστος και τον επενδυτικό κίνδυνο που συνδέεται με αυτήν. Οι ώριμες τεχνολογίες χαρακτηρίζονται από εκτεταμένη εμπειρία εφαρμογής, σταθερά τεχνικά πρότυπα και προβλέψιμη λειτουργική συμπεριφορά. Αντίθετα, τεχνολογίες που βρίσκονται σε πρώιμο ή μεταβατικό στάδιο ανάπτυξης ενδέχεται να παρουσιάζουν αυξημένη τεχνική αβεβαιότητα, αλλά ταυτόχρονα προσφέρουν προοπτικές μελλοντικής βελτίωσης και καινοτομίας.

Στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, παρατηρείται διαφοροποίηση ως προς την τεχνολογική ωριμότητα. Η υδροηλεκτρική ενέργεια και η χερσαία αιολική ενέργεια θεωρούνται τεχνολογίες υψηλής ωριμότητας, με μακρά ιστορία εφαρμογής και καθιερωμένες πρακτικές λειτουργίας. Αντίθετα, τεχνολογίες όπως τα υπεράκτια αιολικά πάρκα ή ορισμένες

μορφές προηγμένων φωτοβολταϊκών βρίσκονται σε φάση ταχείας ανάπτυξης, με συνεχή βελτίωση της απόδοσης και μείωση του κόστους. Η αξιολόγηση της τεχνολογικής ωριμότητας είναι συνεπώς απαραίτητη για τη ρεαλιστική σύγκριση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και για την εκτίμηση της δυνατότητάς τους να συμβάλουν άμεσα και μακροπρόθεσμα στην ενεργειακή μετάβαση.

2.2 Οικονομικά κριτήρια

Τα οικονομικά κριτήρια αποτελούν βασικό άξονα στη συγκριτική αξιολόγηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, καθώς επηρεάζουν άμεσα τη βιωσιμότητα, την ελκυστικότητα και τη δυνατότητα ευρείας εφαρμογής κάθε ενεργειακής τεχνολογίας. Στο πλαίσιο του ενεργειακού σχεδιασμού, οι οικονομικές παράμετροι δεν εξετάζονται απομονωμένα, αλλά σε συνδυασμό με τα τεχνικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών, καθώς και με το θεσμικό και χρηματοδοτικό περιβάλλον εντός του οποίου υλοποιούνται τα ενεργειακά έργα. Η ανάλυση των οικονομικών κριτηρίων επιτρέπει τη σύγκριση εναλλακτικών τεχνολογιών υπό όρους κόστους και απόδοσης, συμβάλλοντας στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων.

Οικονομικό κριτήριο	Περιγραφή	Μονάδα
Κόστος εγκατάστασης	Αρχική επένδυση ανά ισχύ	€/MW
LCOE	Μέσο κόστος ενέργειας κύκλου ζωής	€/MWh
Κόστος συντήρησης	Ετήσιο κόστος λειτουργίας	€/MW·έτος

Πίνακας 2: Σύνοψη οικονομικών κριτηρίων

Κόστος εγκατάστασης (€/MW)

Το κόστος εγκατάστασης αναφέρεται στη συνολική κεφαλαιουχική δαπάνη που απαιτείται για την κατασκευή και θέση σε λειτουργία μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος. Περιλαμβάνει δαπάνες που σχετίζονται με τον εξοπλισμό, τα έργα πολιτικού μηχανικού, τη σύνδεση με το δίκτυο, καθώς και το κόστος μελετών και αδειοδοτήσεων. Το συγκεκριμένο μέγεθος αποτελεί κρίσιμο δείκτη για την αξιολόγηση της αρχικής οικονομικής επιβάρυνσης μιας ενεργειακής τεχνολογίας και επηρεάζει άμεσα την απόφαση επένδυσης, ιδίως σε περιβάλλοντα περιορισμένης χρηματοδοτικής δυνατότητας.

Στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, το κόστος εγκατάστασης παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των τεχνολογιών, αλλά και εντός της ίδιας τεχνολογίας, ανάλογα με

το μέγεθος του έργου, τη γεωγραφική τοποθεσία και τις τοπικές συνθήκες. Επιπλέον, το κόστος αυτό έχει παρουσιάσει έντονη πτωτική τάση τα τελευταία χρόνια, κυρίως λόγω της τεχνολογικής προόδου, της μαζικής παραγωγής εξοπλισμού και της ωρίμανσης των αγορών. Παρά τη μείωση αυτή, το κόστος εγκατάστασης εξακολουθεί να αποτελεί σημαντικό εμπόδιο για ορισμένες τεχνολογίες ή περιοχές, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη συνεκτίμησή του στη συγκριτική ανάλυση.

Εξομοιωμένο κόστος ενέργειας (LCOE)

Το εξομοιωμένο κόστος ενέργειας (Levelized Cost of Energy – LCOE) αποτελεί έναν από τους πλέον διαδεδομένους δείκτες οικονομικής αξιολόγησης ενεργειακών τεχνολογιών. Εκφράζει το μέσο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής μιας εγκατάστασης, λαμβάνοντας υπόψη το αρχικό κόστος επένδυσης, τα λειτουργικά και συντηρητικά κόστη, το κόστος καυσίμου (όπου εφαρμόζεται), καθώς και τον χρόνο ζωής και τον συντελεστή απόδοσης της μονάδας. Ο δείκτης αυτός επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών σε κοινή βάση, ανεξάρτητα από το μέγεθος ή τη χρονική κατανομή των δαπανών.

Παρότι το LCOE αποτελεί ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο, η ερμηνεία του απαιτεί προσοχή. Η τιμή του επηρεάζεται από παραμέτρους όπως το κόστος κεφαλαίου, το επιτόκιο χρηματοδότησης και οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της εγκατάστασης. Επιπλέον, το LCOE δεν αποτυπώνει πλήρως ζητήματα που σχετίζονται με τη χρονική κατανομή της παραγωγής ή την αξία της ενέργειας στο σύστημα, όπως η μεταβλητότητα ή η ανάγκη για εφεδρική ισχύ. Ωστόσο, παρά τους περιορισμούς του, παραμένει βασικό κριτήριο για την οικονομική σύγκριση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και χρησιμοποιείται ευρέως στη διεθνή βιβλιογραφία και στον ενεργειακό σχεδιασμό.

Κόστος λειτουργίας και συντήρησης

Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης αφορά τις δαπάνες που προκύπτουν κατά τη διάρκεια ζωής μιας ενεργειακής εγκατάστασης και σχετίζονται με τη διατήρηση της ομαλής και αξιόπιστης λειτουργίας της. Περιλαμβάνει τόσο σταθερά κόστη, όπως η τακτική συντήρηση και η διαχείριση της εγκατάστασης, όσο και μεταβλητά κόστη που εξαρτώνται από το επίπεδο παραγωγής ή τις απαιτήσεις επισκευής. Σε πολλές Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, το κόστος αυτό είναι σχετικά χαμηλό σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες, κυρίως λόγω της απουσίας καυσίμου και της απλούστερης λειτουργίας.

Ωστόσο, το κόστος συντήρησης μπορεί να διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με την τεχνολογία και τις συνθήκες λειτουργίας. Παράγοντες όπως η προσβασιμότητα της εγκατάστασης, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και η ηλικία του εξοπλισμού επηρεάζουν το συνολικό κόστος και τη μακροχρόνια αξιοπιστία της μονάδας. Για τον λόγο αυτό, η συνεκτίμηση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης είναι απαραίτητη για την ολοκληρωμένη οικονομική αξιολόγηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και για τη ρεαλιστική εκτίμηση της απόδοσης μιας επένδυσης σε βάθος χρόνου.

2.3 Περιβαλλοντικά κριτήρια

Τα περιβαλλοντικά κριτήρια αποτελούν βασικό πυλώνα στη συγκριτική αξιολόγηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, καθώς συνδέονται άμεσα με τον κεντρικό στόχο της ενεργειακής μετάβασης, δηλαδή τη μείωση των περιβαλλοντικών πιέσεων και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η περιβαλλοντική αξιολόγηση δεν περιορίζεται στην αποτύπωση των άμεσων εκπομπών κατά τη λειτουργία μιας εγκατάστασης, αλλά εξετάζει το συνολικό αποτύπωμα των ενεργειακών τεχνολογιών, λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις που προκύπτουν σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους. Η συστηματική ανάλυση των περιβαλλοντικών κριτηρίων είναι απαραίτητη για την αντικειμενική σύγκριση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και για την τεκμηρίωση της συμβολής τους στη βιώσιμη ανάπτυξη.

Περιβαλλοντικό κριτήριο	Περιγραφή	Μονάδα
Εκπομπές CO ₂	Εκπομπές κύκλου ζωής	gCO ₂ /kWh
Χρήση γης	Απαιτούμενη έκταση	m ² /MWh
Επιπτώσεις οικοσυστημάτων	Ποιοτική εκτίμηση	Ποιοτικό

Πίνακας 3: Σύνοψη περιβαλλοντικών κριτηρίων

Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (gCO₂/kWh)

Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν έναν από τους πλέον διαδεδομένους δείκτες περιβαλλοντικής επίδοσης των ενεργειακών τεχνολογιών. Ο δείκτης αυτός εκφράζει την ποσότητα CO₂ που αντιστοιχεί στην παραγωγή ενός κιλοβατώρας ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιείται ευρέως για τη σύγκριση διαφορετικών μορφών ενέργειας. Στην περίπτωση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, οι

άμεσες εκπομπές κατά τη φάση λειτουργίας είναι ιδιαίτερα χαμηλές ή μηδενικές, γεγονός που αποτελεί βασικό τους πλεονέκτημα έναντι των συμβατικών τεχνολογιών.

Ωστόσο, για μια ολοκληρωμένη περιβαλλοντική αξιολόγηση, οι εκπομπές CO₂ εξετάζονται σε επίπεδο κύκλου ζωής, συμπεριλαμβάνοντας τα στάδια κατασκευής, μεταφοράς, εγκατάστασης, λειτουργίας και τελικής απόσυρσης των εγκαταστάσεων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη ρεαλιστική σύγκριση των τεχνολογιών, καθώς αναδεικνύει τις έμμεσες εκπομπές που συνδέονται με την παραγωγή υλικών και εξοπλισμού. Συνεπώς, ο δείκτης gCO₂/kWh αποτελεί ένα αντικειμενικό μέτρο της συνολικής συμβολής κάθε τεχνολογίας στην κλιματική αλλαγή.

Χρήση γης

Η χρήση γης αναφέρεται στην έκταση που απαιτείται για την εγκατάσταση και λειτουργία μιας ενεργειακής τεχνολογίας και αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό και χωροταξικό κριτήριο. Στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, η απαίτηση σε γη διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με την τεχνολογία και τον τρόπο εγκατάστασης. Για παράδειγμα, οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις και τα αιολικά πάρκα απαιτούν σχετικά μεγάλες εκτάσεις, ενώ άλλες τεχνολογίες, όπως η υδροηλεκτρική ενέργεια, μπορούν να επηρεάσουν εκτεταμένες περιοχές μέσω της δημιουργίας ταμιευτήρων.

Η αξιολόγηση της χρήσης γης δεν περιορίζεται στην ποσοτική αποτύπωση της απαιτούμενης έκτασης, αλλά εξετάζει και τη δυνατότητα συνδυαστικής χρήσης του χώρου. Σε πολλές περιπτώσεις, οι ενεργειακές εγκαταστάσεις μπορούν να συνυπάρχουν με άλλες δραστηριότητες, όπως η γεωργία ή η κτηνοτροφία, περιορίζοντας έτσι τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Παρά ταύτα, η αυξημένη χρήση γης ενδέχεται να δημιουργήσει ανταγωνισμό με άλλες χρήσεις ή να οδηγήσει σε αλλαγές χρήσεων γης, γεγονός που καθιστά το κριτήριο αυτό ιδιαίτερα σημαντικό στον ενεργειακό σχεδιασμό.

Επιπτώσεις σε οικοσυστήματα

Οι επιπτώσεις των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στα οικοσυστήματα αποτελούν κρίσιμο στοιχείο της περιβαλλοντικής αξιολόγησης, καθώς η ανάπτυξη ενεργειακών υποδομών μπορεί να επηρεάσει τη βιοποικιλότητα, τα υδάτινα συστήματα και τις φυσικές ισορροπίες. Οι επιπτώσεις αυτές διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με την τεχνολογία, την κλίμακα του έργου και την τοποθεσία εγκατάστασης. Για παράδειγμα, τα υδροηλεκτρικά έργα μπορούν να μεταβάλλουν τη φυσική ροή ποταμών και να επηρεάσουν υδάτινα οικοσυστήματα, ενώ τα αιολικά πάρκα ενδέχεται να έχουν επιπτώσεις στην ορνιθοπανίδα.

Η αξιολόγηση των επιπτώσεων στα οικοσυστήματα απαιτεί τη συνεκτίμηση τόσο των άμεσων όσο και των έμμεσων επιδράσεων, καθώς και τη χρονική τους διάρκεια. Στο πλαίσιο αυτό, η εφαρμογή μέτρων πρόληψης και μετριασμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπως η κατάλληλη χωροθέτηση και η περιβαλλοντική παρακολούθηση, αποτελεί βασικό στοιχείο της βιώσιμης ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Συνεπώς, η ενσωμάτωση του κριτηρίου των οικοσυστημικών επιπτώσεων στη συγκριτική ανάλυση συμβάλλει στην πληρέστερη και ισορροπημένη αξιολόγηση των ενεργειακών τεχνολογιών.

2.4 Κοινωνικά και χωροταξικά κριτήρια

Τα κοινωνικά και χωροταξικά κριτήρια αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της συγκριτικής αξιολόγησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, καθώς επηρεάζουν άμεσα τη δυνατότητα υλοποίησης και βιώσιμης λειτουργίας των ενεργειακών έργων. Παρότι οι τεχνικές και οικονομικές παράμετροι είναι καθοριστικές για τον σχεδιασμό ενός ενεργειακού συστήματος, η επιτυχία των ενεργειακών πολιτικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον βαθμό αποδοχής των έργων από την κοινωνία και από τη συμβατότητά τους με τον χωρικό σχεδιασμό. Η παράβλεψη των κοινωνικών και χωροταξικών διαστάσεων μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις, αντιδράσεις ή ακόμη και στην ακύρωση έργων, ανεξαρτήτως της τεχνικής ή οικονομικής τους επάρκειας.

Κριτήριο	Περιγραφή	Τύπος
Κοινωνική αποδοχή	Αντίδραση τοπικών κοινωνιών	Ποιοτικό
Θέσεις εργασίας	Απασχόληση κύκλου ζωής	Ποσοτικό/Ποιοτικό
Χωροταξικοί περιορισμοί	Περιορισμοί χωροθέτησης	Ποιοτικό

Πίνακας 4: Σύνοψη κοινωνικών και χωροταξικών κριτηρίων

Κοινωνική αποδοχή

Η κοινωνική αποδοχή αναφέρεται στον βαθμό στον οποίο οι τοπικές κοινωνίες και το ευρύτερο κοινωνικό σύνολο αποδέχονται την ανάπτυξη και λειτουργία ενεργειακών έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Η αποδοχή αυτή επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων, όπως η αντίληψη για τα περιβαλλοντικά οφέλη, οι επιπτώσεις στο τοπίο, η διαφάνεια των διαδικασιών αδειοδότησης και η συμμετοχή των πολιτών στη λήψη αποφάσεων. Σε αρκετές περιπτώσεις, ακόμη και έργα με σαφή περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα αντιμετωπίζουν κοινωνικές

αντιδράσεις, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της κοινωνικής διάστασης στον ενεργειακό σχεδιασμό.

Η κοινωνική αποδοχή δεν αποτελεί στατικό μέγεθος, αλλά μεταβάλλεται δυναμικά ανάλογα με το τοπικό πλαίσιο και τον τρόπο υλοποίησης των έργων. Η έγκαιρη ενημέρωση, η διαβούλευση με τις τοπικές κοινωνίες και η πρόβλεψη ανταποδοτικών οφελών μπορούν να ενισχύσουν τη θετική στάση απέναντι στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Συνεπώς, η αξιολόγηση της κοινωνικής αποδοχής είναι κρίσιμη για την κατανόηση της πραγματικής δυνατότητας ανάπτυξης των ενεργειακών τεχνολογιών.

Θέσεις εργασίας

Η δημιουργία θέσεων εργασίας αποτελεί σημαντικό κοινωνικοοικονομικό όφελος που συνδέεται με την ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Οι ενεργειακές τεχνολογίες συμβάλλουν στη δημιουργία απασχόλησης σε διάφορα στάδια του κύκλου ζωής τους, όπως η κατασκευή, η εγκατάσταση, η λειτουργία και η συντήρηση των υποδομών. Επιπλέον, η ανάπτυξη του τομέα των ΑΠΕ ενισχύει την τοπική οικονομία και μπορεί να συμβάλει στη διαφοροποίηση των παραγωγικών δραστηριοτήτων, ιδίως σε αγροτικές ή απομακρυσμένες περιοχές.

Ωστόσο, ο αριθμός και η ποιότητα των θέσεων εργασίας διαφοροποιούνται ανάλογα με την τεχνολογία και την κλίμακα των έργων. Ορισμένες τεχνολογίες δημιουργούν υψηλότερη απασχόληση κατά τη φάση κατασκευής, ενώ άλλες προσφέρουν σταθερότερες θέσεις εργασίας κατά τη φάση λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση της συμβολής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην απασχόληση απαιτεί προσεκτική ανάλυση και δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά σε ποσοτικούς δείκτες.

Χωροταξικοί περιορισμοί

Οι χωροταξικοί περιορισμοί αναφέρονται στους γεωγραφικούς, περιβαλλοντικούς και θεσμικούς περιορισμούς που επηρεάζουν τη χωροθέτηση των ενεργειακών εγκαταστάσεων. Η διαθεσιμότητα κατάλληλων εκτάσεων, η προστασία ευαίσθητων περιοχών και η συμβατότητα με υφιστάμενες χρήσεις γης αποτελούν βασικούς παράγοντες που καθορίζουν τη δυνατότητα ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Οι περιορισμοί αυτοί διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με την τεχνολογία, καθώς κάθε μορφή ενέργειας απαιτεί διαφορετικές χωρικές και περιβαλλοντικές προϋποθέσεις.

Η ενσωμάτωση των χωροταξικών κριτηρίων στον ενεργειακό σχεδιασμό είναι απαραίτητη για την αποφυγή συγκρούσεων με άλλες δραστηριότητες και για τη διασφάλιση της βιώσιμης ανάπτυξης. Η κατάλληλη χωροθέτηση μπορεί να περιορίσει τις περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις, ενώ παράλληλα να διευκολύνει την αποδοχή των έργων από τις τοπικές κοινωνίες. Συνεπώς, οι χωροταξικοί περιορισμοί αποτελούν κρίσιμο στοιχείο της συγκριτικής αξιολόγησης, καθώς επηρεάζουν άμεσα την πρακτική εφαρμοσιμότητα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

3.1 Ηλιακή ενέργεια: αξιολόγηση βάσει κριτηρίων

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες και ταχέως αναπτυσσόμενες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο, γεγονός που οφείλεται τόσο στη μεγάλη διαθεσιμότητα του ηλιακού δυναμικού όσο και στη σημαντική τεχνολογική πρόοδο που έχει επιτευχθεί τα τελευταία χρόνια. Η αξιολόγηση της ηλιακής ενέργειας στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιείται με βάση τα τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά-χωροταξικά κριτήρια που ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 2, με στόχο τη συστηματική και συγκρίσιμη αποτύπωση των χαρακτηριστικών της.

Από τεχνικής άποψης, η ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλό συντελεστή απόδοσης (capacity factor) σε σύγκριση με άλλες μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, καθώς η παραγωγή εξαρτάται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία και περιορίζεται χρονικά στις ώρες ημέρας. Η μεταβλητότητα της παραγωγής αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό της τεχνολογίας, επηρεαζόμενο από εποχικές και μετεωρολογικές συνθήκες. Παρά ταύτα, η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων θεωρείται υψηλής ωριμότητας, με εκτεταμένη εμπορική εφαρμογή και συνεχή βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας του εξοπλισμού.

Σε οικονομικό επίπεδο, η ηλιακή ενέργεια παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Το κόστος εγκατάστασης έχει μειωθεί δραστικά τις τελευταίες δεκαετίες, καθιστώντας τα φωτοβολταϊκά συστήματα ιδιαίτερα ανταγωνιστικά. Το εξομοιωμένο κόστος ενέργειας (LCOE) είναι πλέον από τα χαμηλότερα μεταξύ των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ιδίως σε περιοχές με υψηλό ηλιακό δυναμικό. Επιπλέον, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης παραμένει χαμηλό, καθώς η τεχνολογία δεν απαιτεί καύσιμα και διαθέτει περιορισμένο αριθμό κινούμενων μερών.

Από περιβαλλοντική σκοπιά, η ηλιακή ενέργεια εμφανίζει πολύ χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε επίπεδο κύκλου ζωής, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα ελκυστική στο πλαίσιο της κλιματικής πολιτικής. Ωστόσο, η χρήση γης μπορεί να αποτελέσει περιοριστικό παράγοντα, ιδίως στην περίπτωση μεγάλων φωτοβολταϊκών πάρκων, όπου απαιτούνται εκτεταμένες επιφάνειες. Οι επιπτώσεις στα οικοσυστήματα θεωρούνται γενικά περιορισμένες σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες, υπό την προϋπόθεση της κατάλληλης χωροθέτησης και της τήρησης περιβαλλοντικών όρων.

Σε κοινωνικό και χωροταξικό επίπεδο, η ηλιακή ενέργεια παρουσιάζει υψηλό βαθμό κοινωνικής αποδοχής, κυρίως λόγω της χαμηλής όχλησης και της δυνατότητας εγκατάστασης σε υφιστάμενες δομημένες επιφάνειες, όπως στέγες κτιρίων. Η τεχνολογία συμβάλλει στη

δημιουργία θέσεων εργασίας, κυρίως κατά τη φάση εγκατάστασης, ενώ οι χωροταξικοί περιορισμοί θεωρούνται σχετικά διαχειρίσιμοι, ιδιαίτερα όταν αξιοποιούνται μη παραγωγικές ή ήδη ανεπτυγμένες εκτάσεις.

3.2 Αιολική ενέργεια: αξιολόγηση βάσει κριτηρίων

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μία από τις βασικότερες τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο σύγχρονο ενεργειακό μείγμα, με σημαντική συμβολή στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τόσο σε εθνικό όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Η αξιολόγησή της πραγματοποιείται με βάση τα κριτήρια που ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 2, με στόχο την αντικειμενική αποτύπωση των τεχνικών, οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών-χωροταξικών χαρακτηριστικών της και τη δυνατότητα συγκρίσιμης ανάλυσης με τις λοιπές τεχνολογίες.

Από τεχνικής πλευράς, η αιολική ενέργεια παρουσιάζει υψηλότερο συντελεστή απόδοσης σε σύγκριση με την ηλιακή ενέργεια, ιδιαίτερα σε περιοχές με ισχυρό και σταθερό αιολικό δυναμικό. Η παραγωγή της εξαρτάται από τη διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου, γεγονός που εισάγει μεταβλητότητα στο ενεργειακό σύστημα. Ωστόσο, η στοχαστική φύση της αιολικής παραγωγής χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη χρονική εξάπλωση σε σχέση με την ηλιακή, καθώς μπορεί να παράγει ενέργεια τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας. Η τεχνολογία των χερσαίων αιολικών πάρκων θεωρείται υψηλής ωριμότητας, με μακρά εμπειρία εφαρμογής και αξιόπιστα λειτουργικά χαρακτηριστικά, ενώ τα υπεράκτια αιολικά συστήματα βρίσκονται σε φάση ταχείας τεχνολογικής εξέλιξης.

Σε οικονομικό επίπεδο, η αιολική ενέργεια εμφανίζει ανταγωνιστικό κόστος εγκατάστασης και ιδιαίτερα χαμηλό εξομοιωμένο κόστος ενέργειας, ιδίως στις χερσαίες εφαρμογές. Η μείωση του κόστους εξοπλισμού, σε συνδυασμό με την αύξηση του μεγέθους και της απόδοσης των ανεμογεννητριών, έχει ενισχύσει σημαντικά την οικονομική βιωσιμότητα της τεχνολογίας. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης παραμένει σχετικά χαμηλό, αν και επηρεάζεται από παράγοντες όπως η προσβασιμότητα των εγκαταστάσεων και οι περιβαλλοντικές συνθήκες, ιδιαίτερα στις υπεράκτιες εφαρμογές.

Από περιβαλλοντική σκοπιά, η αιολική ενέργεια παρουσιάζει πολύ χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε επίπεδο κύκλου ζωής, καθιστώντας την μία από τις πλέον φιλικές προς το κλίμα τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, η χρήση γης χαρακτηρίζεται ως σχετικά αποδοτική, καθώς οι εγκαταστάσεις επιτρέπουν τη συνύπαρξη με άλλες δραστηριότητες, όπως η γεωργία ή η κτηνοτροφία. Ωστόσο, οι επιπτώσεις στα οικοσυστήματα, και ειδικότερα στην ορνιθοπανίδα, αποτελούν παράγοντα που απαιτεί προσεκτική αξιολόγηση και κατάλληλη χωροθέτηση των έργων.

Σε κοινωνικό και χωροταξικό επίπεδο, η αιολική ενέργεια παρουσιάζει μεταβλητό βαθμό κοινωνικής αποδοχής. Παρότι αναγνωρίζεται ευρέως η συμβολή της στην ενεργειακή μετάβαση, η οπτική όχληση και η χωροθέτηση σε περιοχές ιδιαίτερου φυσικού ή πολιτιστικού ενδιαφέροντος συχνά προκαλούν αντιδράσεις από τις τοπικές κοινωνίες. Η τεχνολογία συμβάλλει στη δημιουργία θέσεων εργασίας τόσο κατά τη φάση κατασκευής όσο και κατά τη λειτουργία των εγκαταστάσεων, ενώ οι χωροταξικοί περιορισμοί θεωρούνται σημαντικοί, ιδίως σε περιοχές με αυξημένη περιβαλλοντική προστασία.

3.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια: αξιολόγηση βάσει κριτηρίων

Η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μία από τις παλαιότερες και πλέον εδραιωμένες μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη σταθερότητα των ηλεκτρικών συστημάτων. Η αξιολόγησή της στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται με βάση τα τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά-χωροταξικά κριτήρια που έχουν οριστεί, με στόχο την αποτύπωση τόσο των πλεονεκτημάτων όσο και των περιορισμών της στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης.

Από τεχνικής άποψης, η υδροηλεκτρική ενέργεια χαρακτηρίζεται από υψηλό συντελεστή απόδοσης και υψηλή διαθεσιμότητα παραγωγής, καθώς η παραγωγή μπορεί να ελεγχθεί σε μεγάλο βαθμό μέσω της διαχείρισης των υδάτινων πόρων. Σε αντίθεση με άλλες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, η υδροηλεκτρική ενέργεια παρουσιάζει χαμηλή μεταβλητότητα και μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως βασικό φορτίο όσο και ως μονάδα αιχμής. Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, τα οποία ενισχύουν τη λειτουργική ευελιξία του συστήματος και συμβάλλουν στην εξισορρόπηση της μεταβλητής παραγωγής από ηλιακές και αιολικές πηγές. Η τεχνολογία θεωρείται υψηλής ωριμότητας, με μακροχρόνια εμπειρία εφαρμογής και αποδεδειγμένη αξιοπιστία.

Σε οικονομικό επίπεδο, η υδροηλεκτρική ενέργεια χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος εγκατάστασης, το οποίο συνδέεται με τα εκτεταμένα έργα υποδομής και τις απαιτήσεις πολιτικού μηχανικού. Ωστόσο, το υψηλό αρχικό κόστος αντισταθμίζεται από τη μεγάλη διάρκεια ζωής των εγκαταστάσεων και το χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Το εξομοιωμένο κόστος ενέργειας (LCOE) παραμένει ανταγωνιστικό σε μακροχρόνιο ορίζοντα, ιδιαίτερα για μεγάλης κλίμακας έργα, γεγονός που καθιστά την υδροηλεκτρική ενέργεια οικονομικά βιώσιμη υπό κατάλληλες συνθήκες.

Από περιβαλλοντική σκοπιά, η υδροηλεκτρική ενέργεια παρουσιάζει χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε επίπεδο κύκλου ζωής. Παρά ταύτα, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μπορεί να είναι σημαντικές σε τοπικό επίπεδο, καθώς η κατασκευή φραγμάτων και ταμιευτήρων επηρεάζει τη φυσική ροή ποταμών, τα υδάτινα οικοσυστήματα και τη

βιοποικιλότητα. Η χρήση γης είναι υψηλή, ιδιαίτερα στην περίπτωση μεγάλων ταμιευτήρων, γεγονός που καθιστά την περιβαλλοντική αξιολόγηση και τη σωστή χωροθέτηση κρίσιμους παράγοντες για τη βιώσιμη ανάπτυξη της τεχνολογίας.

Σε κοινωνικό και χωροταξικό επίπεδο, η υδροηλεκτρική ενέργεια παρουσιάζει μεικτό βαθμό κοινωνικής αποδοχής. Από τη μία πλευρά, αναγνωρίζονται τα οφέλη που σχετίζονται με την παραγωγή καθαρής ενέργειας, τη διαχείριση υδάτων και την αντιπλημμυρική προστασία. Από την άλλη πλευρά, οι κοινωνικές επιπτώσεις που συνδέονται με τη μεταβολή τοπικών χρήσεων γης ή την αναγκαστική μετεγκατάσταση πληθυσμών μπορεί να προκαλέσουν αντιδράσεις. Οι χωροταξικοί περιορισμοί θεωρούνται υψηλοί, καθώς η ανάπτυξη υδροηλεκτρικών έργων εξαρτάται άμεσα από τη γεωμορφολογία και τη διαθεσιμότητα υδάτινων πόρων.

3.4 Βιομάζα και γεωθερμία: αξιολόγηση βάσει κριτηρίων

Η βιομάζα και η γεωθερμία αποτελούν Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, οι οποίες διαφοροποιούνται σημαντικά από την ηλιακή, την αιολική και την υδροηλεκτρική ενέργεια. Και οι δύο τεχνολογίες παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της ελεγχόμενης και προβλέψιμης παραγωγής, γεγονός που τις καθιστά σημαντικές για τη σταθερότητα του ενεργειακού συστήματος. Η αξιολόγησή τους πραγματοποιείται ενιαία, καθώς μοιράζονται κοινά λειτουργικά πλεονεκτήματα, αλλά και περιορισμούς που σχετίζονται με τη χωρική διαθεσιμότητα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Από τεχνικής άποψης, η βιομάζα χαρακτηρίζεται από υψηλή διαθεσιμότητα και χαμηλή μεταβλητότητα, καθώς η παραγωγή ενέργειας μπορεί να προγραμματιστεί ανεξάρτητα από καιρικές συνθήκες, εφόσον υπάρχει επάρκεια πρώτης ύλης. Ο συντελεστής απόδοσης θεωρείται μέτριος, ενώ η τεχνολογία είναι υψηλής ωριμότητας, με ευρεία εφαρμογή σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και συμπαραγωγής. Η γεωθερμία, αντίστοιχα, παρουσιάζει πολύ υψηλή διαθεσιμότητα και εξαιρετικά χαμηλή μεταβλητότητα, καθώς βασίζεται στη σταθερή θερμική ενέργεια του υπεδάφους. Η τεχνολογία θεωρείται ώριμη για εφαρμογές χαμηλής και μέσης ενθαλπίας, ενώ οι εφαρμογές υψηλής ενθαλπίας είναι γεωγραφικά περιορισμένες.

Σε οικονομικό επίπεδο, οι δύο τεχνολογίες παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις. Η βιομάζα απαιτεί μέτριο κόστος εγκατάστασης, ωστόσο το κόστος λειτουργίας επηρεάζεται από τη διαθεσιμότητα και το κόστος της πρώτης ύλης, γεγονός που αυξάνει την οικονομική αβεβαιότητα. Το εξομοιωμένο κόστος ενέργειας είναι συνήθως μέτριο. Η γεωθερμία χαρακτηρίζεται από υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης, κυρίως λόγω των γεωτρήσεων και της αβεβαιότητας που αυτές συνεπάγονται, αλλά παρουσιάζει χαμηλό κόστος λειτουργίας και σταθερό LCOE σε μακροχρόνιο ορίζοντα.

Από περιβαλλοντική σκοπιά, η γεωθερμία εμφανίζει πολύ χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε επίπεδο κύκλου ζωής και περιορισμένη χρήση γης. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι γενικά χαμηλές, υπό την προϋπόθεση της σωστής διαχείρισης των γεωθερμικών ρευστών. Η βιομάζα, αν και θεωρείται ανανεώσιμη, παρουσιάζει υψηλότερες εκπομπές CO₂ σε σύγκριση με άλλες ΑΠΕ, καθώς η καύση οργανικής ύλης παράγει αέρια του θερμοκηπίου. Παρά ταύτα, οι εκπομπές αυτές μπορούν να θεωρηθούν κλιματικά ουδέτερες υπό προϋποθέσεις βιώσιμης διαχείρισης της πρώτης ύλης. Οι επιπτώσεις στα οικοσυστήματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την προέλευση και τη μεταφορά της βιομάζας.

Σε κοινωνικό και χωροταξικό επίπεδο, η βιομάζα μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην τοπική ανάπτυξη και στη δημιουργία θέσεων εργασίας, ιδιαίτερα σε αγροτικές περιοχές. Ωστόσο, ζητήματα όπως οι οσμές, οι μεταφορές πρώτης ύλης και η τοπική περιβαλλοντική όχληση ενδέχεται να επηρεάσουν την κοινωνική αποδοχή. Η γεωθερμία παρουσιάζει γενικά υψηλό βαθμό κοινωνικής αποδοχής, καθώς οι εγκαταστάσεις έχουν μικρό οπτικό αποτύπωμα, αλλά οι χωροταξικοί περιορισμοί είναι ιδιαίτερα αυστηροί λόγω της περιορισμένης γεωγραφικής διαθεσιμότητας κατάλληλων πεδίων.

3.5 Συγκεντρωτικός πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Η παρούσα ενότητα λειτουργεί ως μεταβατικό στάδιο μεταξύ της ποιοτικής ανάλυσης του Κεφαλαίου 3 και της ποσοτικής-συγκριτικής προσέγγισης που ακολουθεί στο Κεφάλαιο 4. Για τον λόγο αυτό, η σύγκριση πραγματοποιείται μέσω συγκεντρωτικών πινάκων, οι οποίοι συνοψίζουν τα βασικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων τεχνολογιών με ενιαίο και συγκρίσιμο τρόπο.

Τεχνολογία	Capacity factor	Διαθεσιμότητα παραγωγής	Μεταβλητότητα	Ωριμότητα τεχνολογίας
Ηλιακή	Χαμηλός-μέτριος	Περιορισμένη χρονικά	Υψηλή	Υψηλή
Αιολική	Μέτριος-υψηλός	Μεταβλητή	Μέτρια	Υψηλή
Υδροηλεκτρική	Υψηλός	Υψηλή	Χαμηλή	Πολύ υψηλή
Βιομάζα	Μέτριος	Υψηλή	Χαμηλή	Υψηλή

Γεωθερμία	Υψηλός	Πολύ υψηλή	Πολύ χαμηλή	Υψηλή (τοπικά)
------------------	--------	------------	-------------	-------------------

Πίνακας 5: Συγκεντρωτική Τεχνική Αξιολόγηση ΑΠΕ

Τεχνολογία	Κόστος εγκατάστασης	LCOE	Κόστος λειτουργίας & συντήρησης
Ηλιακή	Μέτριο	Χαμηλό	Χαμηλό
Αιολική	Μέτριο	Χαμηλό	Χαμηλό–μέτριο
Υδροηλεκτρική	Υψηλό	Μέτριο–χαμηλό	Χαμηλό
Βιομάζα	Μέτριο	Μέτριο	Μέτριο–υψηλό
Γεωθερμία	Υψηλό	Μέτριο–χαμηλό	Χαμηλό

Πίνακας 6: Συγκεντρωτική Οικονομική Αξιολόγηση ΑΠΕ

Τεχνολογία	Εκπομπές CO ₂ (κύκλος ζωής)	Χρήση γης	Επιπτώσεις σε οικοσυστήματα
Ηλιακή	Πολύ χαμηλές	Μέτρια–υψηλή	Χαμηλές
Αιολική	Πολύ χαμηλές	Χαμηλή–μέτρια	Μέτριες
Υδροηλεκτρική	Χαμηλές	Υψηλή	Μέτριες–υψηλές
Βιομάζα	Μέτριες	Μέτρια	Μέτριες
Γεωθερμία	Πολύ χαμηλές	Χαμηλή	Χαμηλές

Πίνακας 7: Συγκεντρωτική Περιβαλλοντική Αξιολόγηση ΑΠΕ

Τεχνολογία	Κοινωνική αποδοχή	Θέσεις εργασίας	Χωροταξικοί περιορισμοί
Ηλιακή	Υψηλή	Μέτριες	Χαμηλοί–μέτριοι

Αιολική	Μέτρια	Μέτριες	Μέτριοι–υψηλοί
Υδροηλεκτρική	Μέτρια	Μέτριες	Υψηλοί
Βιομάζα	Μέτρια	Υψηλές	Μέτριοι
Γεωθερμία	Υψηλή	Μέτριες	Υψηλοί

Πίνακας 8: Συγκεντρωτική Κοινωνική & Χωροταξική Αξιολόγηση ΑΠΕ

Οι ποιοτικοί χαρακτηρισμοί (χαμηλό–μέτριο–υψηλό) χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για σκοπούς συγκρισιμότητας και δεν συνιστούν τελική κατάταξη των τεχνολογιών. Η ποσοτικοποίηση και η τελική συγκριτική αξιολόγηση θα πραγματοποιηθούν στο Κεφάλαιο 4 μέσω συγκεκριμένων δεικτών και πολυκριτηριακής ανάλυσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΕ

4.1 Σύγκριση κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (LCOE)

Στην παρούσα εργασία, η σύγκριση του LCOE βασίζεται σε δεδομένα από διεθνώς αναγνωρισμένες πηγές, όπως οι IEA και IRENA, και αφορά εύρη τιμών που προκύπτουν από συγκεντρωτικές μελέτες για σύγχρονες εμπορικές εφαρμογές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Η ανάλυση δεν αποσκοπεί στον ακριβή υπολογισμό του LCOE για συγκεκριμένο έργο ή περιοχή, αλλά στη συγκριτική αποτύπωση της οικονομικής ανταγωνιστικότητας των τεχνολογιών σε γενικό επίπεδο. Για τον λόγο αυτό, τα δεδομένα παρουσιάζονται ως εύρη, τα οποία αντανακλούν διαφοροποιήσεις που οφείλονται σε παράγοντες όπως η γεωγραφική τοποθεσία, το κόστος κεφαλαίου και οι τοπικές συνθήκες λειτουργίας. Τα εύρη τιμών προέρχονται από πρόσφατες εκθέσεις κόστους των IEA και IRENA και αναφέρονται σε παγκόσμιες ή ευρύτερες περιφερειακές αγορές (OECD/EE), λαμβάνοντας υπόψη έργα διαφορετικής κλίμακας.

Τεχνολογία	Εύρος LCOE (€/MWh)	Πηγή
Ηλιακή (φωτοβολταϊκά)	25 – 60	IRENA
Αιολική (χερσαία)	30 – 70	IRENA / IEA
Υδροηλεκτρική	40 – 90	IEA
Βιομάζα	60 – 120	IEA
Γεωθερμία	45 – 100	IRENA

Πίνακας 9: Εύρη εξομοιωμένου κόστους ενέργειας (LCOE) ανά τεχνολογία ΑΠΕ

Από τη συγκριτική εξέταση των εύρων LCOE προκύπτει ότι η ηλιακή και η χερσαία αιολική ενέργεια παρουσιάζουν, κατά μέσο όρο, το χαμηλότερο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Η εξέλιξη αυτή συνδέεται άμεσα με τη σημαντική μείωση του κόστους εξοπλισμού, τη βελτίωση της τεχνολογικής απόδοσης και την ευρεία εμπορική τους διείσδυση τα τελευταία έτη. Ως αποτέλεσμα, οι συγκεκριμένες τεχνολογίες αποτελούν βασικούς πυλώνες της ενεργειακής μετάβασης από οικονομική σκοπιά. Αντίθετα, η βιομάζα και η γεωθερμία εμφανίζουν υψηλότερα και ευρύτερα εύρη LCOE, γεγονός που αντικατοπτρίζει τη διαφοροποίηση του κόστους πρώτης ύλης στην περίπτωση της

βιομάζας και το αυξημένο αρχικό επενδυτικό ρίσκο που σχετίζεται με τις γεωτρήσεις στη γεωθερμία. Η υδροηλεκτρική ενέργεια καταλαμβάνει ενδιάμεση θέση, καθώς χαρακτηρίζεται από υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης, το οποίο όμως αντισταθμίζεται από τη μεγάλη διάρκεια ζωής των έργων και το χαμηλό κόστος λειτουργίας σε μακροχρόνιο ορίζοντα.

Για λόγους συνοπτικής παρουσίασης, η οικονομική εικόνα των τεχνολογιών βάσει του LCOE αποτυπώνεται και σε ποιοτική μορφή, χωρίς να συνιστά τελική κατάταξη ή αξιολόγηση υπεροχής.

Τεχνολογία	Οικονομική ανταγωνιστικότητα
Ηλιακή	Πολύ υψηλή
Αιολική	Πολύ υψηλή
Υδροηλεκτρική	Μέτρια–υψηλή
Βιομάζα	Μέτρια
Γεωθερμία	Μεταβλητή

Πίνακας 10: Συνοπτική οικονομική αποτύπωση ΑΠΕ βάσει LCOE

Συμπερασματικά, η ανάλυση του LCOE αναδεικνύει σαφείς διαφοροποιήσεις στο κόστος παραγωγής μεταξύ των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, χωρίς ωστόσο να επαρκεί από μόνη της για την εξαγωγή ολοκληρωμένων συμπερασμάτων σχετικά με την καταλληλότητα κάθε τεχνολογίας. Η οικονομική αξιολόγηση μέσω του LCOE αποτελεί αναγκαία αλλά όχι ικανή συνθήκη για τη συνολική σύγκριση των ΑΠΕ και συμπληρώνεται στις επόμενες ενότητες από τεχνικά και περιβαλλοντικά κριτήρια.

4.2 Σύγκριση αποδοτικότητας και συντελεστή φορτίου (capacity factor)

Η σύγκριση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας βασίζεται σε δευτερογενή δεδομένα από διεθνώς αναγνωρισμένους οργανισμούς, όπως οι IEA και ENTSO-E. Τα στοιχεία παρουσιάζονται ως εύρη τιμών, καθώς ο συντελεστής φορτίου επηρεάζεται έντονα από γεωγραφικούς, κλιματικούς και τεχνικούς παράγοντες. Η ανάλυση δεν στοχεύει στον προσδιορισμό συγκεκριμένων τιμών για μεμονωμένα έργα ή χώρες, αλλά στη συγκριτική αποτύπωση της αποδοτικότητας των τεχνολογιών σε γενικό επίπεδο.

Τεχνολογία	Capacity factor (%)	Πηγή δεδομένων
Ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκά)	10 – 25	IEA / ENTSO-E
Αιολική ενέργεια (χερσαία)	25 – 45	IEA
Υδροηλεκτρική ενέργεια	30 – 60	IEA
Ενέργεια από βιομάζα	60 – 85	IEA
Γεωθερμική ενέργεια	70 – 90	IEA

Πίνακας 11: Εύρη συντελεστή φορτίου (capacity factor) ανά τεχνολογία ΑΠΕ

Η σύγκριση των δεδομένων δείχνει ότι οι τεχνολογίες που βασίζονται σε ελεγχόμενους ή σταθερούς ενεργειακούς πόρους, όπως η γεωθερμία και η βιομάζα, παρουσιάζουν υψηλούς συντελεστές φορτίου. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι οι συγκεκριμένες τεχνολογίες μπορούν να λειτουργούν σχεδόν συνεχώς, προσφέροντας σταθερή και προβλέψιμη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίστοιχα, η υδροηλεκτρική ενέργεια εμφανίζει σχετικά υψηλό συντελεστή φορτίου, ο οποίος εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα υδάτινων πόρων και τη διαχείριση των ταμιευτήρων. Αντίθετα, η αιολική και κυρίως η ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζονται από χαμηλότερους συντελεστές φορτίου, καθώς η παραγωγή τους εξαρτάται άμεσα από στοχαστικούς φυσικούς παράγοντες, όπως η ένταση του ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία. Παρά το χαμηλότερο capacity factor, οι τεχνολογίες αυτές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο ενεργειακό μείγμα, λόγω του χαμηλού κόστους παραγωγής και της μεγάλης διαθεσιμότητας των αντίστοιχων φυσικών πόρων. Για λόγους συνοπτικής παρουσίασης και συγκρισιμότητας, η αποδοτικότητα των τεχνολογιών αποτυπώνεται και σε ποιοτική μορφή, χωρίς να υπονοείται αξιολογική κατάταξη ή υπεροχή.

Τεχνολογία	Επίπεδο αποδοτικότητας
Γεωθερμική ενέργεια	Πολύ υψηλή
Ενέργεια από βιομάζα	Υψηλή
Υδροηλεκτρική ενέργεια	Μέτρια–υψηλή
Αιολική ενέργεια	Μέτρια
Ηλιακή ενέργεια	Χαμηλή–μέτρια

Πίνακας 12: Συνοπτική αποτύπωση αποδοτικότητας ΑΠΕ βάσει capacity factor

Συμπερασματικά, ο συντελεστής φορτίου αναδεικνύει σημαντικές διαφοροποιήσεις στην πραγματική αξιοποίηση της εγκατεστημένης ισχύος μεταξύ των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Ωστόσο, όπως και στην περίπτωση του LCOE, ο δείκτης αυτός δεν επαρκεί από μόνος του για την εξαγωγή ολοκληρωμένων συμπερασμάτων, καθώς δεν αποτυπώνει οικονομικές, περιβαλλοντικές ή κοινωνικές παραμέτρους. Για τον λόγο αυτό, η τεχνική αξιολόγηση συμπληρώνεται στην επόμενη ενότητα από την ανάλυση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

4.3 Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Στην παρούσα ενότητα, η σύγκριση επικεντρώνεται σε δύο βασικούς και διεθνώς αποδεκτούς δείκτες:

- (α) τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας και
- (β) τη χρήση γης, οι οποίοι επιτρέπουν την αποτύπωση τόσο των κλιματικών όσο και των χωρικών επιπτώσεων των τεχνολογιών.

Η ανάλυση βασίζεται σε δεδομένα ανάλυσης κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – LCA), ώστε να λαμβάνονται υπόψη όχι μόνο οι άμεσες εκπομπές κατά τη λειτουργία, αλλά και οι έμμεσες επιπτώσεις που προκύπτουν από τα στάδια κατασκευής, εγκατάστασης, συντήρησης και απόσυρσης των ενεργειακών υποδομών. Τα δεδομένα αντλούνται από διεθνώς αναγνωρισμένες πηγές, όπως οι εκθέσεις της IPCC, του IEA και βάσεις δεδομένων όπως το Our World in Data.

4.3.1 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (gCO₂/kWh)

Οι εκπομπές CO₂ ανά παραγόμενη κιλοβατώρα αποτελούν βασικό δείκτη για την αξιολόγηση της συμβολής των ενεργειακών τεχνολογιών στην κλιματική αλλαγή. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, οι εκπομπές εξετάζονται σε επίπεδο κύκλου ζωής, γεγονός που επιτρέπει τη συγκρίσιμη αποτύπωση τεχνολογιών με διαφορετικά τεχνικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά.

Τεχνολογία

Εκπομπές CO₂
(gCO₂/kWh)

Πηγή δεδομένων

Ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκά)	20 – 60	IPCC / Our World in Data
Αιολική ενέργεια (χερσαία)	10 – 20	IPCC
Υδροηλεκτρική ενέργεια	5 – 30	IPCC
Ενέργεια από βιομάζα	20 – 120	IPCC / IEA
Γεωθερμική ενέργεια	10 – 40	IPCC

Πίνακας 13: Εκπομπές CO₂ κύκλου ζωής ανά τεχνολογία ΑΠΕ

Η σύγκριση των δεδομένων δείχνει ότι η αιολική, η υδροηλεκτρική και η γεωθερμική ενέργεια παρουσιάζουν τις χαμηλότερες εκπομπές CO₂ σε επίπεδο κύκλου ζωής. Η ηλιακή ενέργεια εμφανίζει ελαφρώς υψηλότερες τιμές, οι οποίες συνδέονται κυρίως με την ενεργοβόρα διαδικασία κατασκευής των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η βιομάζα παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα, καθώς το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα εξαρτάται άμεσα από την προέλευση, τη μεταφορά και τη βιωσιμότητα της πρώτης ύλης.

4.3.2 Χρήση γης

Η χρήση γης αποτελεί κρίσιμο περιβαλλοντικό και χωροταξικό δείκτη, καθώς επηρεάζει τη διαθεσιμότητα χώρου, τη βιοποικιλότητα και τη συμβατότητα με άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες. Η απαίτηση σε γη διαφοροποιείται σημαντικά μεταξύ των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και εξαρτάται τόσο από την τεχνολογία όσο και από τη χωρική διάταξη των εγκαταστάσεων.

Τεχνολογία	Χρήση γης	Πηγή δεδομένων
Ηλιακή ενέργεια	Μέτρια–υψηλή	IPCC
Αιολική ενέργεια	Χαμηλή–μέτρια	IPCC / IEA
Υδροηλεκτρική ενέργεια	Υψηλή	IPCC
Ενέργεια από βιομάζα	Μέτρια	IEA

Πίνακας 14: Συγκριτική αποτύπωση χρήσης γης ανά τεχνολογία ΑΠΕ

Η ανάλυση δείχνει ότι η γεωθερμική και η αιολική ενέργεια παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη χωρική αποδοτικότητα, ενώ η υδροηλεκτρική ενέργεια απαιτεί σημαντικές εκτάσεις λόγω της δημιουργίας ταμιευτήρων. Η ηλιακή ενέργεια εμφανίζει αυξημένες απαιτήσεις σε γη σε

μεγάλες κεντρικές εγκαταστάσεις, γεγονός που μπορεί να μετριαστεί μέσω της αξιοποίησης δομημένων επιφανειών, όπως στέγες κτιρίων.

Συμπερασματικά, η περιβαλλοντική σύγκριση καταδεικνύει ότι όλες οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας παρουσιάζουν σαφώς χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σχέση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας, ωστόσο δεν είναι περιβαλλοντικά ισοδύναμες. Η διαφοροποίηση στις εκπομπές CO₂ και στη χρήση γης υπογραμμίζει την ανάγκη συνδυαστικής αξιολόγησης των τεχνολογιών και επιβεβαιώνει ότι η επιλογή ενεργειακής τεχνολογίας δεν μπορεί να βασίζεται σε έναν μόνο περιβαλλοντικό δείκτη.

Τεχνολογία	Εκπομπές CO ₂	Χωρικό αποτύπωμα
Ηλιακή ενέργεια	Χαμηλές	Μέτριο–υψηλό
Αιολική ενέργεια	Πολύ χαμηλές	Χαμηλό
Υδροηλεκτρική ενέργεια	Πολύ χαμηλές	Υψηλό
Βιομάζα	Μεταβλητές	Μέτριο
Γεωθερμική ενέργεια	Πολύ χαμηλές	Χαμηλό

Πίνακας 15: Συνοπτική περιβαλλοντική εικόνα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

4.4 Σύνθεση αποτελεσμάτων ποσοτικής συγκριτικής ανάλυσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται η σύνθεση των αποτελεσμάτων της ποσοτικής συγκριτικής ανάλυσης που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες του Κεφαλαίου 4. Η σύνθεση βασίζεται στα οικονομικά (LCOE), τεχνικά (capacity factor) και περιβαλλοντικά κριτήρια (εκπομπές CO₂ και χρήση γης), όπως αυτά τεκμηριώθηκαν μέσω διεθνώς αναγνωρισμένων πηγών. Στόχος της ενότητας δεν είναι η ιεράρχηση ή η ανάδειξη «βέλτιστης» τεχνολογίας, αλλά η συγκεντρωτική αποτύπωση των βασικών πλεονεκτημάτων και περιορισμών κάθε Ανανεώσιμης Πηγής Ενέργειας.

Τεχνολογία	LCOE (€/MWh)	Capacity factor (%)	Εκπομπές CO ₂ (gCO ₂ /kWh)	Χρήση γης
Ηλιακή	25 – 60	10 – 25	20 – 60	Μέτρια– υψηλή

Αιολική (χερσαία)	30 – 70	25 – 45	10 – 20	Χαμηλή– μέτρια
Υδροηλεκτρική	40 – 90	30 – 60	5 – 30	Υψηλή
Βιομάζα	60 – 120	60 – 85	20 – 120	Μέτρια
Γεωθερμία	45 – 100	70 – 90	10 – 40	Χαμηλή

Πίνακας 16: Συγκεντρωτική σύνοψη οικονομικών, τεχνικών και περιβαλλοντικών δεικτών ΑΠΕ

Η συγκεντρωτική παρουσίαση αναδεικνύει ότι οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας εμφανίζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς το κόστος παραγωγής, την αποδοτικότητα και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η ηλιακή και η αιολική ενέργεια παρουσιάζουν χαμηλό κόστος παραγωγής, γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικές από οικονομική σκοπιά, ωστόσο χαρακτηρίζονται από χαμηλότερους συντελεστές φορτίου σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες. Αντίθετα, η γεωθερμία και η βιομάζα εμφανίζουν υψηλότερη αποδοτικότητα αξιοποίησης της εγκατεστημένης ισχύος, αλλά παρουσιάζουν αυξημένες απαιτήσεις σε αρχικό κόστος ή μεγαλύτερη περιβαλλοντική μεταβλητότητα.

Τεχνολογία	Κύρια πλεονεκτήματα	Βασικοί περιορισμοί
Ηλιακή	Χαμηλό κόστος, ευρεία διαθεσιμότητα, χαμηλές εκπομπές	Χαμηλός capacity factor, χρήση γης
Αιολική	Χαμηλό κόστος, πολύ χαμηλές εκπομπές	Μεταβλητότητα, χωροταξικοί περιορισμοί
Υδροηλεκτρική	Υψηλή αποδοτικότητα, σταθερή παραγωγή	Υψηλή χρήση γης, οικοσυστημικές επιπτώσεις
Βιομάζα	Υψηλός capacity factor, τοπική ανάπτυξη	Εξάρτηση από πρώτη ύλη, μεταβλητές εκπομπές
Γεωθερμία	Πολύ υψηλή αποδοτικότητα, χαμηλό αποτύπωμα	Περιορισμένη γεωγραφική διαθεσιμότητα

Πίνακας 17: Ποιοτική σύνθεση πλεονεκτημάτων και περιορισμών ανά τεχνολογία

Η σύνθεση των αποτελεσμάτων καταδεικνύει ότι καμία Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας δεν υπερέχει σε όλα τα εξεταζόμενα κριτήρια. Αντιθέτως, κάθε τεχνολογία εμφανίζει ένα ιδιαίτερο προφίλ πλεονεκτημάτων και περιορισμών, το οποίο καθορίζει τη συμβολή της στο ενεργειακό σύστημα. Το γεγονός αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη συνδυαστικής αξιοποίησης διαφορετικών

Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, με στόχο τη διαμόρφωση ενός ισορροπημένου, αποδοτικού και περιβαλλοντικά βιώσιμου ενεργειακού μίγματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΕ ΕΛΛΑΔΑ & ΕΕ

5.1 Ενεργειακό προφίλ Ελλάδας

Το ενεργειακό προφίλ της Ελλάδας διαμορφώνεται από τρεις δομικούς άξονες: (α) υψηλή εξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα, (β) σημαντικό δυναμικό ΑΠΕ—ιδίως ηλιακής και αιολικής—και (γ) ιδιαίτερη γεωγραφία (νησιωτικότητα, έντονο ανάγλυφο) που επηρεάζει άμεσα τόσο το κόστος όσο και τη λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος. Η κατανόηση αυτών των χαρακτηριστικών είναι κρίσιμη, γιατί καθορίζει ποια τεχνολογία ΑΠΕ “ταιριάζει” καλύτερα στις ελληνικές συνθήκες και ποια συστημικά μέτρα (δίκτυα, αποθήκευση, διασυνδέσεις) απαιτούνται ώστε η διείσδυση των ΑΠΕ να είναι λειτουργικά και οικονομικά βιώσιμη.

Κεντρικό χαρακτηριστικό της ελληνικής ενεργειακής εικόνας είναι η υψηλή ενεργειακή εξάρτηση. Η χώρα, ιστορικά, καλύπτει μεγάλο μέρος των ενεργειακών της αναγκών μέσω εισαγωγών (πετρέλαιο και φυσικό αέριο), γεγονός που δημιουργεί ευπάθεια σε διακυμάνσεις διεθνών τιμών και σε γεωπολιτικούς κινδύνους. Η εξάρτηση αυτή δεν είναι απλώς μακροοικονομικός δείκτης· επηρεάζει άμεσα το κόστος ηλεκτροπαραγωγής (ιδίως όταν η οριακή μονάδα είναι φυσικού αερίου), τη σταθερότητα τιμών στη χονδρεμπορική αγορά και, τελικά, την ανταγωνιστικότητα της οικονομίας. Σε πρόσφατες αποτιμήσεις που στηρίζονται σε επίσημη στατιστική (Eurostat, δείκτης ενεργειακής εξάρτησης), η ενεργειακή εξάρτηση της Ελλάδας αποτυπώνεται περίπου στο ~73% (δηλαδή περίπου τα 3/4 των ενεργειακών αναγκών καλύπτονται μέσω καθαρών εισαγωγών).

Στη δομή της τελικής κατανάλωσης ενέργειας, οι μεταφορές έχουν διαχρονικά ισχυρή βαρύτητα στην Ελλάδα, γεγονός που “κλειδώνει” μεγάλο μέρος της ενεργειακής ζήτησης σε υγρά καύσιμα και δυσκολεύει τη συνολική απανθρακοποίηση χωρίς εκτεταμένο εξηλεκτρισμό και εναλλακτικά καύσιμα. Παράλληλα, σημαντικό μερίδιο κατανάλωσης εμφανίζεται στα κτίρια (οικιακός/τριτογενής τομέας) μέσω θέρμανσης/ψύξης, άρα η απόδοση κτιρίων και οι αντλίες θερμότητας αποκτούν στρατηγική σημασία: δεν επηρεάζουν μόνο τις εκπομπές, αλλά και την αιχμή ζήτησης στο ηλεκτρικό σύστημα.

Στον ηλεκτροπαραγωγικό τομέα, η Ελλάδα τα τελευταία χρόνια βρίσκεται σε ταχεία μετάβαση με δύο παράλληλες τάσεις: περιορισμό του λιγνίτη και ισχυρή αύξηση των ΑΠΕ, με το φυσικό αέριο να λειτουργεί συχνά ως “γέφυρα” για την κάλυψη ζήτησης και την εξισορρόπηση μεταβλητής παραγωγής. Το 2024, σύμφωνα με ανάλυση βασισμένη σε δεδομένα του ΑΔΜΗΕ, η “καθαρή ενέργεια” κάλυψε 50,5% της ζήτησης· ειδικότερα, οι ΑΠΕ (αιολικά+φωτοβολταϊκά)

κάλυψαν 44,4% και τα μεγάλα υδροηλεκτρικά 6,1%, ενώ στα ορυκτά καύσιμα κυριάρχησε το φυσικό αέριο με 37,5% και ακολούθησαν πετρέλαιο 6,8% και λιγνίτης 5,7%. Η εικόνα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη διπλωματική σου, γιατί δείχνει μετρήσιμα ότι η Ελλάδα ήδη κινείται προς ένα σύστημα όπου οι ΑΠΕ είναι κεντρικός πυλώνας, αλλά παραμένει σημαντική η εξάρτηση από φυσικό αέριο για λόγους ευελιξίας και επάρκειας.

Η Ελλάδα διαθέτει ισχυρό συγκριτικό πλεονέκτημα σε ηλιακή και αιολική ενέργεια λόγω φυσικών πόρων: υψηλή ηλιοφάνεια και αξιόλογο αιολικό δυναμικό σε νησιωτικές και ορεινές περιοχές. Αυτό εξηγεί γιατί οι δύο αυτές τεχνολογίες αποτελούν τον κορμό της αύξησης ΑΠΕ. Ταυτόχρονα, η γεωγραφία της χώρας δημιουργεί και περιορισμούς: η νησιωτικότητα ανεβάζει την πολυπλοκότητα (και ιστορικά το κόστος) ηλεκτροδότησης, ενώ η χωροθέτηση—ιδίως για αιολικά—συχνά συναντά κοινωνικές/περιβαλλοντικές αντιστάσεις. Έτσι, το ελληνικό προφίλ δεν “επιτρέπει” να αξιολογούνται οι τεχνολογίες μόνο με βάση το LCOE· απαιτείται και συστημική οπτική (δίκτυα, αποθήκευση, διασυνδέσεις, ευελιξία).

Στο σημείο αυτό αναδεικνύεται η έννοια της συστημικής καταλληλότητας: για την Ελλάδα, η ηλιακή και η αιολική είναι οικονομικά ελκυστικές και διαθέσιμες, όμως η περαιτέρω διείσδυση τους εξαρτάται από (α) ενίσχυση δικτύων, (β) αποθήκευση (π.χ. αντλησιοταμίευση/μπαταρίες), (γ) διαχείριση ζήτησης και (δ) πρόοδο σε διασυνδέσεις—ιδίως νησιών—ώστε να μειώνεται η ανάγκη θερμικών εφεδρειών και να απορροφάται η μεταβλητή παραγωγή χωρίς περικοπές. Σε αυτό το πλαίσιο, οι υδροηλεκτρικές υποδομές λειτουργούν ως πόρος ευελιξίας, ενώ τεχνολογίες όπως βιομάζα/γεωθερμία—παρότι δεν είναι κυρίαρχες—μπορούν να έχουν ρόλο σε τοπικές εφαρμογές και σε παραγωγή πιο ελεγχόμενη/προγραμματιζόμενη, όπου υπάρχει διαθέσιμο δυναμικό.

Πεδίο	Δείκτης/Εύρη (όπου διαθέσιμο)	Σημείωση/Ερμηνεία
Ενεργειακή εξάρτηση	~73%	Υψηλή εξάρτηση από καθαρές εισαγωγές ενέργειας
Κάλυψη ζήτησης ηλεκτρισμού (2024)	Καθαρή ενέργεια 50,5%	“Καθαρή” = ΑΠΕ + μεγάλα υδροηλεκτρικά, με βάση στοιχεία ΑΔΜΗΕ
Κάλυψη ζήτησης ηλεκτρισμού (2024)	ΑΠΕ (αιολικά+Φ/Β) 44,4%	Κυρίαρχος ρόλος μεταβλητών ΑΠΕ στην κάλυψη ζήτησης
Κάλυψη ζήτησης ηλεκτρισμού (2024)	Μεγάλα υδροηλεκτρικά 6,1%	Ρόλος ευελιξίας/εξισορρόπησης

Κάλυψη ζήτησης ηλεκτρισμού (2024)	Φυσικό αέριο 37,5%	Μεταβατικός ρόλος + ευελιξία συστήματος
Κάλυψη ζήτησης ηλεκτρισμού (2024)	Λιγνίτης 5,7%	Πολύ μειωμένος ρόλος σε σχέση με το παρελθόν

Πίνακας 18: Βασικοί δείκτες ενεργειακού προφίλ Ελλάδας

5.2 Ενεργειακό προφίλ Ευρωπαϊκής Ένωσης

Το ενεργειακό προφίλ της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) χαρακτηρίζεται από μεγάλη ετερογένεια, καθώς περιλαμβάνει κράτη-μέλη με διαφορετικά επίπεδα οικονομικής ανάπτυξης, ενεργειακούς πόρους και ιστορικά διαμορφωμένα ενεργειακά μείγματα. Παρά τη διαφοροποίηση αυτή, η ΕΕ διαμορφώνει ενιαία ενεργειακή και κλιματική πολιτική, με στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, την ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας και την αύξηση της συμμετοχής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Ως αποτέλεσμα, το ενεργειακό προφίλ της Ένωσης αποτελεί συνδυασμό εθνικών ιδιαιτεροτήτων και κοινών στρατηγικών κατευθύνσεων.

Κεντρικό χαρακτηριστικό της ΕΕ είναι η υψηλή, αλλά μειούμενη ενεργειακή εξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα. Η Ένωση εισάγει σημαντικές ποσότητες πετρελαίου και φυσικού αερίου, γεγονός που την καθιστά ευάλωτη σε διεθνείς διακυμάνσεις τιμών και σε γεωπολιτικές εξελίξεις. Ωστόσο, σε αντίθεση με την ελληνική περίπτωση, η ΕΕ διαθέτει μεγαλύτερη διαφοροποίηση προμηθευτών και ενεργειακών πηγών, καθώς και ισχυρότερη διασύνδεση μεταξύ των εθνικών συστημάτων. Σύμφωνα με επίσημα στοιχεία της Eurostat, ο δείκτης ενεργειακής εξάρτησης της ΕΕ ανέρχεται περίπου στο ~58%, παρουσιάζοντας πτωτική τάση τα τελευταία έτη, κυρίως λόγω της αυξημένης διείσδυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και της μείωσης της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων.

Η τελική κατανάλωση ενέργειας στην ΕΕ παρουσιάζει πιο ισορροπημένη κατανομή μεταξύ των τομέων σε σύγκριση με την Ελλάδα. Οι μεταφορές εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικό καταναλωτή ενέργειας, όμως ο βιομηχανικός τομέας διατηρεί υψηλή συμμετοχή, αντανακλώντας τη βιομηχανική βάση της Ένωσης. Παράλληλα, ο κτιριακός τομέας (οικιακός και τριτογενής) καταλαμβάνει σημαντικό μερίδιο, γεγονός που έχει οδηγήσει την ΕΕ να δώσει ιδιαίτερη έμφαση στην ενεργειακή απόδοση κτιρίων, στη θέρμανση/ψύξη και στην ηλεκτροκίνηση.

Στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει σημειώσει ουσιαστική πρόοδο στη μετάβαση προς ένα σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας αποτελούν πλέον τον μεγαλύτερο πυλώνα της ηλεκτροπαραγωγής, με κυρίαρχο

ρόλο της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας. Η υδροηλεκτρική ενέργεια διατηρεί σταθερή, αλλά γεωγραφικά άνιση συμμετοχή, ενώ η βιομάζα αξιοποιείται σε μεγαλύτερη κλίμακα σε σύγκριση με την Ελλάδα, κυρίως σε χώρες με ανεπτυγμένο δασικό ή αγροτικό τομέα. Παράλληλα, η πυρηνική ενέργεια εξακολουθεί να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο σε ορισμένα κράτη-μέλη, προσφέροντας χαμηλών εκπομπών αλλά μη ανανεώσιμη ηλεκτροπαραγωγή.

Σε επίπεδο ποσοστών, οι ΑΠΕ καλύπτουν πλέον περίπου 45% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ, γεγονός που καταδεικνύει τη μετατόπιση του ενεργειακού συστήματος προς καθαρότερες μορφές ενέργειας. Το φυσικό αέριο εξακολουθεί να έχει σημαντική συμμετοχή ως καύσιμο ευελιξίας, ενώ η χρήση άνθρακα και λιγνίτη βρίσκεται σε σταθερή υποχώρηση, με σαφή τάση απόσυρσης σε πολλά κράτη-μέλη. Η εξέλιξη αυτή ενισχύεται από το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (EU ETS), το οποίο αυξάνει το κόστος των ανθρακικών τεχνολογιών.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του ενεργειακού προφίλ της ΕΕ είναι το υψηλό επίπεδο διαφοροποίησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Σε αντίθεση με την Ελλάδα, όπου κυριαρχούν η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, το ευρωπαϊκό ενεργειακό μείγμα περιλαμβάνει σημαντική συμμετοχή υδροηλεκτρικών έργων (Σκανδιναβία, Άλπεις), βιομάζας (Κεντρική και Βόρεια Ευρώπη) και, σε μικρότερο βαθμό, γεωθερμίας. Η διαφοροποίηση αυτή ενισχύει τη σταθερότητα του συστήματος και μειώνει την εξάρτηση από μία μόνο τεχνολογία.

Παρά τη σημαντική πρόοδο, το ενεργειακό σύστημα της ΕΕ αντιμετωπίζει προκλήσεις που σχετίζονται με την αυξανόμενη διείσδυση μεταβλητών ΑΠΕ. Η ανάγκη για ενίσχυση των διασυνοριακών διασυνδέσεων, ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και ενσωμάτωση έξυπνων δικτύων αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη διατήρηση της αξιοπιστίας του συστήματος. Σε αυτό το πλαίσιο, η ΕΕ υιοθετεί ολοκληρωμένη προσέγγιση που συνδυάζει ΑΠΕ, αποθήκευση, διαχείριση ζήτησης και περιφερειακή συνεργασία.

Συνολικά, το ενεργειακό προφίλ της Ευρωπαϊκής Ένωσης χαρακτηρίζεται από προχωρημένο στάδιο ενεργειακής μετάβασης, υψηλό βαθμό θεσμικής ωρίμανσης και έντονη διαφοροποίηση τεχνολογιών. Τα χαρακτηριστικά αυτά δημιουργούν ένα σαφώς διαφορετικό πλαίσιο εφαρμογής της συγκριτικής ανάλυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε σχέση με την ελληνική περίπτωση, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμη τη συστηματική σύγκριση των δύο επιπέδων στην επόμενη ενότητα.

Πεδίο

Δείκτης / Επίπεδο

Ερμηνεία

Πηγή

Ενεργειακή εξάρτηση	~58%	Υψηλή αλλά μειούμενη, χαμηλότερη από Ελλάδα	Eurostat
Συμμετοχή ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή	~45%	Κυρίαρχος πυλώνας ηλεκτροπαραγωγής	Eurostat / IEA
Κυρίαρχες ΑΠΕ	Αιολική, Ηλιακή, Υδροηλεκτρική	Μεγάλη τεχνολογική διαφοροποίηση	Eurostat
Ρόλος φυσικού αερίου	Σημαντικός	Καύσιμο ευελιξίας	IEA
Ρόλος άνθρακα/λιγνίτη	Φθίνων	Σταδιακή απόσυρση	Ευρωπαϊκή Επιτροπή
Τεχνολογική διαφοροποίηση ΑΠΕ	Υψηλή	Συνδυασμός πολλών τεχνολογιών	IEA

Πίνακας 19: Βασικοί δείκτες ενεργειακού προφίλ Ευρωπαϊκής Ένωσης

5.3 Συγκριτική ανάλυση Ελλάδας – ΕΕ

Η σύγκριση Ελλάδας και Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι ουσιαστική, γιατί δείχνει αν τα συμπεράσματα της ποσοτικής συγκριτικής ανάλυσης «μεταφράζονται» με τον ίδιο τρόπο σε διαφορετικά ενεργειακά συστήματα. Παρότι Ελλάδα και ΕΕ κινούνται προς την ίδια στρατηγική κατεύθυνση (απανθρακοποίηση, αύξηση ΑΠΕ, ενεργειακή ασφάλεια), διαφέρουν ως προς: (α) το επίπεδο και τη φύση της εξάρτησης από εισαγωγές, (β) τη δομή του ηλεκτρικού μίγματος, (γ) τον βαθμό διαφοροποίησης τεχνολογιών και (δ) τις υποδομές/γεωγραφικούς περιορισμούς που καθορίζουν τη «συστημική καταλληλότητα» των τεχνολογιών.

Ενεργειακή εξάρτηση και ασφάλεια εφοδιασμού

Σε επίπεδο ΕΕ, η ενεργειακή εξάρτηση παραμένει υψηλή, αλλά τεκμηριώνεται επίσημα ότι το 2023 ο δείκτης ενεργειακής εξάρτησης ήταν 58,4%, με τάση να κινείται διαχρονικά γύρω από το εύρος 56–60% (με εξαίρεση την κορύφωση του 2022). Αντίθετα, η Ελλάδα εμφανίζει εντονότερη ευπάθεια λόγω του προφίλ εισαγωγών (ιδίως πετρέλαιο/φυσικό αέριο), κάτι που αποτυπώνεται και σε αξιολογήσεις πολιτικής από διεθνείς οργανισμούς: η ηλεκτροπαραγωγή με φυσικό αέριο έχει κρίσιμο ρόλο και η χώρα στηρίζεται σημαντικά σε εισαγόμενα καύσιμα (με μεγάλη σημασία των θαλάσσιων εισαγωγών). Η πρακτική συνέπεια είναι ότι, για την Ελλάδα, η μετάβαση σε ΑΠΕ συνδέεται πιο άμεσα με στόχους ενεργειακής ασφάλειας και μείωσης έκθεσης σε διεθνή κόστη.

Μείγμα ηλεκτροπαραγωγής και διείσδυση ΑΠΕ

Η ΕΕ έχει ήδη πετύχει πολύ υψηλή συμμετοχή ΑΠΕ στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας: το 2024 οι ΑΠΕ αντιστοιχούσαν στο **47,5%** της ακαθάριστης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ (αύξηση από το 2023). Στην Ελλάδα, τα πιο πρόσφατα συγκεντρωτικά στοιχεία που βασίζονται σε δεδομένα ΑΔΜΗΕ δείχνουν ότι το 2024 η «καθαρή ενέργεια» κάλυψε **50,5%** της ζήτησης, με **44,4%** από αιολικά+φωτοβολταϊκά και **6,1%** από μεγάλα υδροηλεκτρικά. Η σύγκριση δείχνει ότι η Ελλάδα βρίσκεται σε επίπεδα συγκρίσιμα με την ΕΕ ως προς την τάξη μεγέθους της διείσδυσης ΑΠΕ, αλλά με διαφορετικό «προφίλ στήριξης» του συστήματος.

Ρόλος φυσικού αερίου και στερεών καυσίμων

Στο επίπεδο ΕΕ, το φυσικό αέριο λειτουργεί ευρέως ως καύσιμο ευελιξίας/εφεδρείας, ενώ η χρήση στερεών ορυκτών καυσίμων μειώνεται σταθερά, στο πλαίσιο πολιτικών απανθρακοποίησης και κόστους άνθρακα (EU ETS). Στην Ελλάδα, το 2024 το φυσικό αέριο παρέμεινε ο κυρίαρχος «ορυκτός» πυλώνας στην κάλυψη ζήτησης με **37,5%**, ενώ ο λιγνίτης περιορίστηκε στο **5,7%** (πετρέλαιο 6,8%). Άρα, αν και τα δύο συστήματα μειώνουν στερεά καύσιμα, η ελληνική εξάρτηση από φυσικό αέριο ως συμπληρωματικό πυλώνα εμφανίζεται πιο «ορατή» στην κάλυψη ζήτησης.

Διαφοροποίηση τεχνολογιών και συστημική λειτουργία

Η ΕΕ χαρακτηρίζεται από υψηλότερη τεχνολογική διαφοροποίηση: πέρα από αιολικά/φωτοβολταϊκά, σημαντικό ρόλο έχουν υδροηλεκτρικά σε συγκεκριμένες περιοχές, βιομάζα σε άλλα κράτη-μέλη, καθώς και (σε αρκετές χώρες) πυρηνική παραγωγή που επηρεάζει τη λειτουργία του συστήματος χαμηλών εκπομπών. Η διαφοροποίηση λειτουργεί ως «μαξιλάρι» απέναντι στη μεταβλητότητα, αν και δημιουργεί ανάγκες για ισχυρές διασυνδέσεις και ευελιξία. Στην Ελλάδα, η εικόνα είναι πιο συγκεντρωμένη στις μεταβλητές ΑΠΕ (PV/αιολικά) και στη συμβολή του φυσικού αερίου για ευελιξία, ενώ τα μεγάλα υδροηλεκτρικά παίζουν κρίσιμο αλλά περιορισμένο ρόλο εξισορρόπησης.

Διάσταση σύγκρισης

Ελλάδα

Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ)

Ενεργειακή εξάρτηση	Υψηλή εξάρτηση από εισαγωγές· μεγάλη σημασία εισαγόμενων καυσίμων στο σύστημα	58,4% (2023)
ΑΠΕ στην ηλεκτρική κατανάλωση/ζήτηση	«Καθαρή ενέργεια» κάλυψε 50,5% ζήτησης (2024)· Αιολικά+Φ/Β 44,4%, μεγάλα Υ/Η 6,1%	ΑΠΕ 47,5% της ακαθ. κατανάλωσης ηλεκτρισμού (2024)
Ρόλος φυσικού αερίου	Πολύ ισχυρός στην κάλυψη ζήτησης: 37,5% (2024)	Σημαντικός, μείγμα-εξαρτώμενος ανά χώρα· συνολικά η ΕΕ παραμένει εισαγωγέας με πολιτικές μείωσης κατανάλωσης
Ρόλος λιγνίτη/στερεών καυσίμων	Πολύ μειωμένος: λιγνίτης 5,7% (2024)	Πτωτική τάση στην ΕΕ, με μεγάλες αποκλίσεις ανά κράτος-μέλος
Δομή ΑΠΕ	Έμφαση σε PV/αιολικά, υδροηλεκτρικά ως συμπλήρωμα/ευελιξία	Υψηλότερη διαφοροποίηση (αιολικά/ηλιακά + υδρο + βιομάζα, και σε κάποιες χώρες πυρηνική χαμηλών εκπομπών)
Κύρια «στενά σημεία» μετάβασης	Δίκτυα, αποθήκευση, διασυνδέσεις (ιδίως λόγω νησιωτικότητας), κοινωνικο-χωροταξικά ζητήματα	Διασυνοριακές διασυνδέσεις, ευελιξία, αποθήκευση, περιφερειακός συντονισμός

Πίνακας 20: Ελλάδα vs ΕΕ (βασικοί δείκτες και δομικές διαφορές)

5.4 Ποια ΑΠΕ είναι «βέλτιστη επιλογή» για την Ελλάδα;

Ο όρος «βέλτιστη επιλογή» στην Ελλάδα δεν μπορεί να ερμηνευθεί ως *μία* τεχνολογία που υπερέχει σε όλα τα κριτήρια. Η βέλτιστη επιλογή, με αυστηρά επιστημονικούς όρους, προκύπτει ως βέλτιστος συνδυασμός τεχνολογιών που ελαχιστοποιεί κόστος και εκπομπές, ενώ ταυτόχρονα μεγιστοποιεί την αξιοπιστία του συστήματος και λαμβάνει υπόψη περιορισμούς δικτύου, χωροθέτησης και κοινωνικής αποδοχής. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για την Ελλάδα, όπου

(α) το δυναμικό ηλιακής/αιολικής είναι υψηλό, (β) η γεωγραφία (νησιωτικότητα, ορεινότητα) εντείνει ζητήματα δικτύων και ευελιξίας, και (γ) ήδη εμφανίζονται φαινόμενα περικοπών (curtailments) παραγωγής ΑΠΕ, άρα η «βέλτιστη» επιλογή δεν είναι μόνο «τι παράγει φθηνά», αλλά και «τι απορροφάται αποτελεσματικά από το σύστημα». Σε μηνιαίες αναλύσεις του ΑΔΜΗΕ/Green Tank για το 2025 καταγράφονται σημαντικές περικοπές ΑΠΕ (π.χ. ~14,7% της μηνιαίας παραγωγής ΑΠΕ τον Μάιο 2025).

Στο πλαίσιο του αναθεωρημένου ΕΣΕΚ/NECP, η Ελλάδα έχει θέσει πολύ υψηλούς στόχους για τη συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή μέχρι το 2030 (δημοσιεύσεις γύρω από 76,8%–82% ανά παρουσίαση/πηγή), ενώ προβλέπονται επίσης μεγάλες επενδύσεις σε αποθήκευση (π.χ. συνολικός στόχος ισχύος αποθήκευσης της τάξης των αρκετών GW). Αυτό ενισχύει την ιδέα ότι η «βέλτιστη» επιλογή για την Ελλάδα δεν είναι απλώς «περισσότερα φωτοβολταϊκά», αλλά περισσότερα φωτοβολταϊκά/αιολικά + υποδομές ευελιξίας, ώστε να μειώνονται περικοπές και να διατηρείται η επάρκεια ισχύος.

Με βάση τα κριτήρια του Κεφαλαίου 4 και το ελληνικό προφίλ (Κεφ. 5.1), η εικόνα διαμορφώνεται ως εξής:

1. **Ηλιακή ενέργεια (PV):** Βέλτιστη για γρήγορη και οικονομική αύξηση ισχύος. Η Ελλάδα διαθέτει υψηλή ηλιοφάνεια και η τεχνολογία PV είναι οικονομικά ανταγωνιστική. Ωστόσο, η υψηλή διείσδυση PV αυξάνει την πιθανότητα μεσημεριανών αιχμών παραγωγής και περικοπών χωρίς αποθήκευση/διαχείριση ζήτησης. Η «βέλτιστη» μορφή PV για την Ελλάδα είναι ολοένα και περισσότερο η διασπορά (στέγες/αυτοπαραγωγή) και τα υβριδικά σχήματα (PV + μπαταρίες), που μειώνουν πίεση στο δίκτυο και αυξάνουν την ιδιοκατανάλωση.
2. **Αιολική ενέργεια (χερσαία):** Βέλτιστη για συμπλήρωση της ηλιακής και βελτίωση συστημικού προφίλ. Η αιολική παραγωγή συχνά έχει διαφορετική χρονική κατανομή από την ηλιακή (συμπληρωματικότητα), κάτι που βοηθά τη συνολική εξομάλυνση. Παρόλα αυτά, στην Ελλάδα το μεγαλύτερο εμπόδιο δεν είναι τεχνικό, αλλά χωροταξικό/κοινωνικό (αντιδράσεις, προστατευόμενες περιοχές, οπτική όχληση), άρα η «βέλτιστη» αιολική ανάπτυξη απαιτεί ισχυρή χωροταξική τεκμηρίωση και δικτυακή ετοιμότητα.
3. **Υδροηλεκτρικά και αντλησιοταμίευση:** Βέλτιστα ως ευελιξία/αποθήκευση, όχι ως μαζική επέκταση νέας παραγωγής. Τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έχουν περιορισμένο περιθώριο περαιτέρω επέκτασης λόγω περιβαλλοντικών/χωροταξικών περιορισμών, όμως είναι κρίσιμα για ευελιξία. Η αντλησιοταμίευση είναι ιδιαίτερα πολύτιμη σε σύστημα με υψηλά PV/αιολικά (μετατόπιση ενέργειας και παροχή υπηρεσιών

εξισορρόπησης), άρα λειτουργεί ως «βέλτιστη υποδομή-συνοδός» των μεταβλητών ΑΠΕ.

4. **Βιομάζα:** Βέλτιστη ως τοπική/στοχευμένη λύση όπου υπάρχει διαθέσιμη αλυσίδα τροφοδοσίας. Η βιομάζα μπορεί να παρέχει πιο ελεγχόμενη παραγωγή, αλλά εξαρτάται από την εφοδιαστική αλυσίδα και από τη βιώσιμη προέλευση πρώτης ύλης. Για την Ελλάδα, η «βέλτιστη» αξιοποίηση της βιομάζας δεν είναι ως γενικευμένη κεντρική ηλεκτροπαραγωγή, αλλά ως τοπικές εφαρμογές (π.χ. αγροτοβιομηχανικά υπολείμματα, απόβλητα) όπου τεκμηριώνεται περιβαλλοντικό όφελος.
5. **Γεωθερμία:** Βέλτιστη όπου υπάρχει πραγματικό πεδίο, κυρίως στη θερμική χρήση. Η γεωθερμία έχει ισχυρό προφίλ σταθερότητας, αλλά είναι γεωγραφικά περιορισμένη. Στην Ελλάδα, η βέλτιστη αξιοποίησή της συχνά αφορά θέρμανση/τηλεθέρμανση/αγροτικές εφαρμογές σε κατάλληλες περιοχές, και όχι απαραίτητα μεγάλης κλίμακας ηλεκτροπαραγωγή.

Συνεπώς, αν απαιτείται «μία πρόταση» με επιστημονική ακρίβεια: η βέλτιστη επιλογή για την Ελλάδα είναι ο συνδυασμός “Ηλιακή + Αιολική” ως κύριος όγκος νέας παραγωγής, με παράλληλη ανάπτυξη “Αποθήκευσης/Υδροελεξίας + Δικτύων/Διασυνδέσεων”, και στοχευμένη αξιοποίηση Βιομάζας/Γεωθερμίας όπου υπάρχει τεκμηριωμένο τοπικό πλεονέκτημα. Η ανάγκη για αυτόν τον συνδυασμό ενισχύεται από τις καταγεγραμμένες περικοπές ΑΠΕ και από τους υψηλούς στόχους διείσδυσης ΑΠΕ στο 2030.

Τεχνολογία	Γιατί είναι «βέλτιστη» στην Ελλάδα	Κύριος περιορισμός στην Ελλάδα	Συστημική προϋπόθεση για να είναι πραγματικά βέλτιστη
Ηλιακή (PV)	Πολύ υψηλό δυναμικό και γρήγορη/ανταγωνιστική ανάπτυξη	Μεσημεριανές αιχμές → περικοπές	Αποθήκευση, ευφυής διαχείριση ζήτησης, ενίσχυση δικτύων
Αιολική (χερσαία)	Συμπληρώνει την ηλιακή χρονικά, ισχυρό δυναμικό	Χωροταξία/κοινωνική αποδοχή	Καλύτερη χωροθέτηση, δίκτυα/διασυνδέσεις

Υδροηλεκτρική / Αντλησιοταμίευση	Ευελιξία/εξισορρόπηση συστήματος υψηλών ΑΠΕ	Περιβαλλοντικοί/χωροταξικοί περιορισμοί νέων έργων	Επενδύσεις σε αποθήκευση και αγορές ευελιξίας
Βιομάζα	Τοπική ελεγχόμενη παραγωγή όπου υπάρχει τροφοδοσία	Εξάρτηση από πρώτη ύλη/κόστη	Βιώσιμη αλυσίδα τροφοδοσίας, τοπική αποδοχή
Γεωθερμία	Σταθερή ενέργεια, ιδιαίτερα σε θερμικές χρήσεις	Περιορισμένη χωρική διαθεσιμότητα	Στοχευμένη ανάπτυξη σε κατάλληλα πεδία

Πίνακας 21: «Βέλτιστη επιλογή» ανά κριτήριο για την Ελλάδα (συνθετική αξιολόγηση)

5.5 Προτάσεις πολιτικής και τεχνικές προτεραιότητες για την Ελλάδα

Η ελληνική ενεργειακή μετάβαση έχει ήδη περάσει από τη φάση της «απλής ανάπτυξης ΑΠΕ» στη φάση της ενσωμάτωσης υψηλών ποσοστών ΑΠΕ σε πραγματικές συνθήκες συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι η επιτυχία δεν θα κριθεί μόνο από το πόσα MW φωτοβολταϊκών/αιολικών εγκαθίστανται, αλλά από το αν το σύστημα μπορεί να τα απορροφήσει χωρίς υπερβολικές περικοπές παραγωγής, χωρίς αύξηση κόστους εξισορρόπησης και χωρίς νέες εξαρτήσεις από εισαγόμενα καύσιμα. Στο πλαίσιο αυτό, οι προτάσεις πολιτικής και οι τεχνικές προτεραιότητες πρέπει να αντιμετωπίζουν ταυτόχρονα: (α) υποδομές (δίκτυα–διασυνδέσεις–ευελιξία), (β) αγορές/ρυθμίσεις (μακροχρόνια σήματα επένδυσης), (γ) επιτάχυνση αδειοδοτήσεων με περιβαλλοντική ασφάλεια και κοινωνική νομιμοποίηση, και (δ) εξοικονόμηση/εξηλεκτρισμό τελικών χρήσεων ώστε η αύξηση ΑΠΕ να μεταφράζεται σε πραγματική μείωση εκπομπών και εισαγωγών.

Πρώτη και πιο κρίσιμη τεχνική προτεραιότητα είναι η αναβάθμιση και επέκταση των δικτύων μεταφοράς και διανομής. Η Ελλάδα χρειάζεται ισχυρότερο δίκτυο για να συνδέσει νέα έργα ΑΠΕ, να μειώσει συμφόρηση, να μεταφέρει παραγωγή από περιοχές υψηλού δυναμικού προς κέντρα κατανάλωσης και να περιορίσει τις περικοπές παραγωγής. Ειδικά οι νησιωτικές διασυνδέσεις έχουν στρατηγική αξία: μειώνουν το κόστος ηλεκτροδότησης, επιτρέπουν περισσότερες ΑΠΕ και ενισχύουν την ασφάλεια εφοδιασμού. Η πρόοδος έργων διασύνδεσης (π.χ. Κυκλάδων) εντάσσεται ακριβώς σε αυτή τη λογική, καθώς ενισχύει την αξιοπιστία και επιτρέπει μεγαλύτερη διείσδυση ΑΠΕ.

Δεύτερη θεμελιώδης προτεραιότητα είναι η ευελιξία του συστήματος μέσω αποθήκευσης, διαχείρισης ζήτησης και κατάλληλων αγορών επικουρικών υπηρεσιών. Η αποθήκευση

(μπαταρίες και αντλησιοταμίευση) δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως «συμπλήρωμα», αλλά ως βασικό εργαλείο μείωσης περικοπών ΑΠΕ και κάλυψης αιχμών. Οι στόχοι που αποτυπώνονται σε ευρωπαϊκές/εθνικές κατευθύνσεις και σε NECP-συναφείς αξιολογήσεις δείχνουν ότι η Ελλάδα σχεδιάζει σημαντική κλιμάκωση αποθήκευσης έως το 2030 (σε επίπεδα αρκετών GW, συμπεριλαμβανομένων μπαταριών και αντλησιοταμίευσης). Παράλληλα, η διαχείριση ζήτησης (demand response) πρέπει να περάσει από πιλοτικό στάδιο σε συστηματική εφαρμογή: βιομηχανία, μεγάλοι καταναλωτές, αλλά και συσσωρευτές (aggregators) που θα μπορούν να προσφέρουν ευελιξία στην αγορά.

Τρίτη προτεραιότητα είναι η σταθερότητα κανόνων επένδυσης και η μετάβαση σε πιο ώριμα χρηματοδοτικά/συμβατικά εργαλεία. Η πρόσφατη ευρωπαϊκή μεταρρύθμιση του σχεδιασμού της αγοράς ηλεκτρισμού (Electricity Market Design) δίνει έμφαση σε μακροχρόνια συμβόλαια, όπως PPAs και διμερή CfDs, ώστε να μειώνεται η μεταβλητότητα εσόδων, να πέφτει το κόστος κεφαλαίου και να επιταχύνονται επενδύσεις σε ΑΠΕ και ευελιξία. Για την Ελλάδα αυτό σημαίνει πρακτικά: σαφές πλαίσιο για PPAs (ιδίως βιομηχανικών), διαφανείς μηχανισμούς CfDs όπου εφαρμόζονται, και ενίσχυση της προθεσμιακής αγοράς ώστε να υπάρχει αντιστάθμιση κινδύνου.

Τέταρτη προτεραιότητα είναι η αδειοδοτική και χωροταξική αποτελεσματικότητα με πραγματική περιβαλλοντική αξιολόγηση και κοινωνική νομιμοποίηση. Η εμπειρία δείχνει ότι οι καθυστερήσεις δεν οφείλονται μόνο στη διοικητική διαδικασία, αλλά και στην αβεβαιότητα χωροθέτησης και στη χαμηλή κοινωνική αποδοχή σε συγκεκριμένες περιοχές. Άρα απαιτείται: επικαιροποίηση χωροταξικών κανόνων για ΑΠΕ, διαφάνεια στα δεδομένα (π.χ. περιοχές κορεσμού δικτύου), ταχύτερες αλλά τεκμηριωμένες περιβαλλοντικές διαδικασίες, καθώς και μηχανισμοί τοπικής ανταποδοτικότητας που να συνδέουν έργα με οφέλη για τις κοινότητες (ενεργειακές κοινότητες, τιμολόγια, τοπικές υποδομές).

Πέμπτη προτεραιότητα είναι ο εξηλεκτρισμός τελικών χρήσεων και η ενεργειακή απόδοση, ώστε η αύξηση ΑΠΕ να μεταφράζεται σε πραγματική μείωση εισαγόμενων καυσίμων. Για την Ελλάδα αυτό σημαίνει: επιτάχυνση αναβαθμίσεων κτιρίων, αντλίες θερμότητας, έξυπνοι μετρητές/τιμολόγηση που ενθαρρύνει μετατόπιση φορτίου, και υποδομές ηλεκτροκίνησης με διαχείριση φόρτισης. Η πολιτική λογική είναι απλή: περισσότερες ΑΠΕ χωρίς μείωση τελικής κατανάλωσης ορυκτών (ιδίως στις μεταφορές και στη θέρμανση) περιορίζει τα καθαρά οφέλη της μετάβασης.

Τέλος, ως στρατηγική προτεραιότητα μεσο-μακροπρόθεσμα, η Ελλάδα πρέπει να αντιμετωπίσει το υδρογόνο και τα καθαρά καύσιμα ως στοχευμένα εργαλεία για τους «δύσκολους τομείς» (βαριά βιομηχανία, ορισμένες μεταφορές), όχι ως υποκατάστατο της άμεσης ανάπτυξης ΑΠΕ και αποθήκευσης στον ηλεκτρικό τομέα. Το εθνικό πλαίσιο σχεδιασμού, όπως αποτυπώνεται στο τελικό επικαιροποιημένο NECP που έχει δημοσιευθεί

από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, αποτελεί τη βάση για να οριστούν προτεραιότητες (πού έχει νόημα, τότε και με ποιες υποδομές).

Άξονας	Προτεραιότητα	Στόχος/Αποτέλεσμα	Κρίσιμη προϋπόθεση
Δίκτυα & Διασυνδέσεις	Ενίσχυση μεταφοράς/διανομής και επιτάχυνση νησιωτικών διασυνδέσεων	Μείωση συμφόρησης, λιγότερες περικοπές ΑΠΕ, χαμηλότερο κόστος συστήματος	Ωρίμανση έργων, συντονισμός ΑΔΜΗΕ/ΔΕΔΔΗΕ, κοινωνική αποδοχή έργων δικτύου
Ευελιξία	Αποθήκευση (μπαταρίες + αντλησιοταμίευση) και αγορές επικουρικών	Απορρόφηση μεταβλητών ΑΠΕ, εξισορρόπηση, μείωση ανάγκης θερμικών εφεδρειών	Σαφές πλαίσιο εσόδων, χωροθέτηση, σύνδεση στο δίκτυο
Αγορές & Χρηματοδότηση	Μακροχρόνια συμβόλαια (PPAs/CfDs) και ενίσχυση προθεσμιακής αγοράς	Μείωση κόστους κεφαλαίου, επενδυτική σταθερότητα, προστασία καταναλωτών από ακραίες τιμές	Εναρμόνιση με EU market design & εφαρμοστικές ρυθμίσεις
Αδειοδότηση & Χωροθέτηση	Απλούστευση με ισχυρή περιβαλλοντική τεκμηρίωση και μηχανισμούς ανταποδοτικότητας	Μείωση καθυστερήσεων, αύξηση κοινωνικής αποδοχής	Επικαιροποιημένο χωροταξικό, διαφάνεια δεδομένων, συμμετοχή τοπικών φορέων
Ζήτηση & Απανθρακοποίηση	Ενεργειακή απόδοση κτιρίων, αντλίες θερμότητας, ηλεκτροκίνηση με smart charging	Μείωση καυσίμων, χαμηλότερη αιχμή/κόστος, καλύτερη αξιοποίηση ΑΠΕ	Τιμολόγια/κίνητρα, έξυπνοι μετρητές, υποδομές φόρτισης

<p>Υδρογόνο (στοχευμένα)</p>	<p>Πιλοτική και κλιμακούμενη ανάπτυξη για δύσκολους τομείς</p>	<p>Απανθρακοποίηση βιομηχανίας/ειδικών μεταφορών, εποχική ευελιξία (όπου χρειάζεται)</p>	
---	--	--	--

Πίνακας 22: Προτάσεις πολιτικής & τεχνικές προτεραιότητες για την Ελλάδα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ & ΣΕΝΑΡΙΑ

6.1 Τεχνολογικές εξελίξεις

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της ενέργειας αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για τη διαμόρφωση των μελλοντικών προοπτικών των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και επηρεάζουν άμεσα τόσο την οικονομική όσο και τη συστημική τους βιωσιμότητα. Η ταχύτητα με την οποία εξελίσσονται οι ενεργειακές τεχνολογίες τα τελευταία χρόνια δεν περιορίζεται πλέον μόνο στη βελτίωση της απόδοσης των επιμέρους μονάδων παραγωγής, αλλά επεκτείνεται σε ολόκληρο το ενεργειακό σύστημα, περιλαμβάνοντας την αποθήκευση, τα δίκτυα, τη διαχείριση ζήτησης και την ψηφιοποίηση. Στο πλαίσιο αυτό, οι τεχνολογικές εξελίξεις δεν λειτουργούν απομονωμένα, αλλά ως αλληλοσυνδεδεμένα στοιχεία ενός μετασχηματιζόμενου ενεργειακού οικοσυστήματος.

Στον τομέα της ηλιακής ενέργειας, η τεχνολογική πρόοδος επικεντρώνεται τόσο στη βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών κυψελών όσο και στη μείωση του κόστους παραγωγής και εγκατάστασης. Νέες αρχιτεκτονικές κυψελών, η χρήση προηγμένων υλικών και η ανάπτυξη τεχνολογιών διπλής όψης (bifacial) ενισχύουν την ενεργειακή απόδοση, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία. Παράλληλα, η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε δομημένες επιφάνειες, όπως κτίρια και υποδομές μεταφορών, διευρύνει τις δυνατότητες εφαρμογής της τεχνολογίας, μειώνοντας ταυτόχρονα τις απαιτήσεις σε γη. Οι εξελίξεις αυτές καθιστούν την ηλιακή ενέργεια όχι μόνο οικονομικά ανταγωνιστική, αλλά και περισσότερο προσαρμόσιμη στις ανάγκες διαφορετικών ενεργειακών συστημάτων.

Αντίστοιχα, στον τομέα της αιολικής ενέργειας, η τεχνολογική εξέλιξη επικεντρώνεται στην αύξηση του μεγέθους και της απόδοσης των ανεμογεννητριών, καθώς και στη βελτίωση της αξιοπιστίας τους. Η ανάπτυξη ανεμογεννητριών μεγαλύτερης ισχύος, με αυξημένο ύψος πύργων και διάμετρο ρότορα, επιτρέπει την εκμετάλλευση αιολικών πόρων σε περιοχές με χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου, διευρύνοντας το πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας. Παράλληλα, η πρόοδος σε συστήματα ελέγχου και πρόγνωσης ανέμου συμβάλλει στη μείωση της αβεβαιότητας της παραγωγής και στη βελτιωμένη ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας στο ηλεκτρικό σύστημα. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, ιδιαίτερη σημασία αποκτά και η υπεράκτια αιολική ενέργεια, η οποία, αν και απαιτεί υψηλότερες αρχικές επενδύσεις, προσφέρει υψηλότερους συντελεστές φορτίου και μεγαλύτερη προβλεψιμότητα παραγωγής.

Ιδιαίτερη βαρύτητα στις μελλοντικές προοπτικές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας έχει η εξέλιξη των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Η αποθήκευση θεωρείται κρίσιμη τεχνολογία-κλειδί για την αντιμετώπιση της μεταβλητότητας της ηλιακής και αιολικής

παραγωγής και για τη διασφάλιση της ευστάθειας του συστήματος. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου παρουσιάζουν συνεχή βελτίωση ως προς την ενεργειακή πυκνότητα, τη διάρκεια ζωής και το κόστος, γεγονός που διευκολύνει τη μαζική τους εγκατάσταση τόσο σε κεντρικό όσο και σε αποκεντρωμένο επίπεδο. Παράλληλα, αναπτύσσονται εναλλακτικές τεχνολογίες αποθήκευσης, όπως οι αντλησιοταμιεύσεις, οι θερμικές μορφές αποθήκευσης και οι προηγμένες χημικές λύσεις, οι οποίες ενισχύουν τη δυνατότητα μακροχρόνιας εξισορρόπησης του ενεργειακού συστήματος.

Οι τεχνολογικές εξελίξεις επεκτείνονται και στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία μετασχηματίζονται σταδιακά σε «έξυπνα» δίκτυα (smart grids). Η ψηφιοποίηση, η εγκατάσταση αισθητήρων, τα συστήματα αυτόματου ελέγχου και οι προηγμένοι αλγόριθμοι διαχείρισης επιτρέπουν την καλύτερη πρόβλεψη της παραγωγής, την ταχύτερη απόκριση σε διαταραχές και την ενεργό συμμετοχή των καταναλωτών. Μέσω αυτών των τεχνολογιών, οι καταναλωτές μετατρέπονται σταδιακά σε «παραγωγούς-καταναλωτές» (prosumers), συμβάλλοντας στη συνολική ευελιξία και ανθεκτικότητα του ενεργειακού συστήματος.

Τέλος, αναδύομενες τεχνολογίες, όπως το υδρογόνο χαμηλών εκπομπών και οι συνθετικοί ενεργειακοί φορείς, αναμένεται να διαδραματίσουν συμπληρωματικό ρόλο στις μελλοντικές ενεργειακές στρατηγικές. Αν και οι τεχνολογίες αυτές βρίσκονται ακόμη σε φάση ωρίμανσης, προσφέρουν τη δυνατότητα αποθήκευσης και μεταφοράς ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα, καθώς και την απανθρακοποίηση τομέων που είναι δύσκολο να εξηλεκτριστούν πλήρως. Η εξέλιξή τους ενδέχεται να επηρεάσει ουσιαστικά τον ρόλο και τη σχετική σημασία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο συνολικό ενεργειακό σύστημα των επόμενων δεκαετιών.

6.2 Σενάρια ενεργειακού μείγματος (2030–2050)

Τα σενάρια ενεργειακού μείγματος για την περίοδο 2030–2050 αποτελούν βασικό εργαλείο στρατηγικού σχεδιασμού, καθώς επιτρέπουν τη διερεύνηση εναλλακτικών διαδρομών μετάβασης προς ένα σύστημα χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών. Σε αντίθεση με τις βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, τα μακροχρόνια σενάρια δεν αποσκοπούν στην ακριβή πρόβλεψη μελλοντικών μεγεθών, αλλά στη συστηματική αποτύπωση τάσεων, τεχνολογικών επιλογών και πολιτικών αποφάσεων που μπορούν να διαμορφώσουν διαφορετικές εκβάσεις. Στο πλαίσιο αυτό, διεθνείς οργανισμοί όπως η International Energy Agency και η European Commission χρησιμοποιούν σενάρια για να αξιολογήσουν την επάρκεια των υφιστάμενων πολιτικών και να προσδιορίσουν τις απαιτούμενες παρεμβάσεις για την επίτευξη κλιματικών στόχων.

Για το ορόσημο του 2030, τα περισσότερα σενάρια συγκλίνουν στην ανάγκη για ταχεία αύξηση της συμμετοχής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή, με την ηλιακή

και την αιολική ενέργεια να αποτελούν τον βασικό κορμό του μείγματος. Η περίοδος έως το 2030 χαρακτηρίζεται ως φάση επιτάχυνσης, κατά την οποία οι ΑΠΕ καλούνται να αντικαταστήσουν κυρίως τις πιο ρυπογόνες μονάδες ορυκτών καυσίμων, ενώ το φυσικό αέριο διατηρεί μεταβατικό ρόλο για την εξασφάλιση επάρκειας και ευελιξίας. Τα σενάρια αυτής της περιόδου προϋποθέτουν έντονη ανάπτυξη δικτύων, αποθήκευσης ενέργειας και μηχανισμών διαχείρισης ζήτησης, ώστε να αντιμετωπιστεί η αυξανόμενη μεταβλητότητα της παραγωγής.

Καθώς η ανάλυση επεκτείνεται προς το 2040, τα σενάρια διαφοροποιούνται περισσότερο, καθώς αυξάνεται η αβεβαιότητα σχετικά με τον ρυθμό τεχνολογικής ωρίμανσης και την κοινωνικοπολιτική αποδοχή των απαιτούμενων αλλαγών. Σε αυτή τη φάση, τα περισσότερα «σενάρια πολιτικής συνέχειας» προβλέπουν περαιτέρω αύξηση των ΑΠΕ, αλλά με σημαντική διατήρηση θερμικών μονάδων για λόγους ευστάθειας του συστήματος. Αντίθετα, τα «επιταχυνόμενα σενάρια απανθρακοποίησης» δίνουν έμφαση στην εκτεταμένη αποθήκευση ενέργειας, στη διασύνδεση αγορών και στη σταδιακή υποκατάσταση του φυσικού αερίου από καθαρότερα ενεργειακά μέσα, όπως το υδρογόνο χαμηλών εκπομπών. Η περίοδος αυτή θεωρείται κρίσιμη, διότι οι επιλογές υποδομών που θα γίνουν έως το 2040 θα καθορίσουν σε μεγάλο βαθμό τη δυνατότητα επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας το 2050.

Για τον χρονικό ορίζοντα του 2050, τα σενάρια συγκλίνουν περισσότερο σε ό,τι αφορά τον τελικό στόχο, αν και διαφέρουν ως προς τα μέσα επίτευξής του. Τα σενάρια κλιματικής ουδετερότητας προβλέπουν ηλεκτροπαραγωγή σχεδόν μηδενικών εκπομπών, με τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας να κατέχουν τη συντριπτική πλειονότητα του ενεργειακού μείγματος. Σε αυτά τα σενάρια, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια συνδυάζονται με μεγάλης κλίμακας αποθήκευση, διασυνωριακές διασυνδέσεις και προηγμένα συστήματα διαχείρισης. Ο ρόλος των ορυκτών καυσίμων περιορίζεται δραστικά ή εξαλείφεται, με όποιες εναπομένουσες εκπομπές να αντισταθμίζονται μέσω τεχνολογιών δέσμευσης άνθρακα ή φυσικών Καταβροθρών.

Ιδιαίτερη σημασία στα σενάρια 2050 αποκτά η τομεακή σύζευξη (sector coupling), δηλαδή η στενή διασύνδεση ηλεκτρισμού, θέρμανσης, μεταφορών και βιομηχανίας. Η αυξημένη ηλεκτροδότηση των τελικών χρήσεων, σε συνδυασμό με την παραγωγή καθαρών καυσίμων από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, μεταβάλλει ριζικά τη δομή της ενεργειακής ζήτησης. Τα σενάρια αυτά υπογραμμίζουν ότι το ενεργειακό μείγμα του 2050 δεν θα κρίνεται μόνο από το ποσοστό συμμετοχής κάθε πηγής, αλλά από την ικανότητα του συστήματος να λειτουργεί αξιόπιστα, αποδοτικά και κοινωνικά αποδεκτά υπό συνθήκες υψηλής μεταβλητότητας.

Συνολικά, η ανάλυση των σεναρίων ενεργειακού μείγματος για την περίοδο 2030–2050 αναδεικνύει ότι η ενεργειακή μετάβαση δεν είναι γραμμική διαδικασία, αλλά δυναμική πορεία με εναλλακτικές διαδρομές. Παρά τις διαφοροποιήσεις, τα σενάρια συγκλίνουν στην καθοριστική σημασία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, της αποθήκευσης και των δικτύων

ως βασικών πυλώνων του μελλοντικού ενεργειακού συστήματος. Η επιτυχία κάθε σεναρίου εξαρτάται τελικά από τον συνδυασμό τεχνολογικής προόδου, συνεκτικών πολιτικών και κοινωνικής αποδοχής, στοιχεία που καθορίζουν αν οι μακροχρόνιοι στόχοι θα μετατραπούν σε πραγματικότητα.

6.3 Ρόλος αποθήκευσης ενέργειας και υδρογόνου στο μελλοντικό ενεργειακό σύστημα

Η αυξανόμενη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, και ιδιαίτερα της ηλιακής και της αιολικής, εισάγει υψηλό βαθμό μεταβλητότητας στην ηλεκτροπαραγωγή, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ύπαρξη μηχανισμών εξισορρόπησης και αποθήκευσης ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία και η ευστάθεια του συστήματος. Στο πλαίσιο αυτό, η αποθήκευση και το υδρογόνο δεν λειτουργούν ανταγωνιστικά προς τις ΑΠΕ, αλλά ως συμπληρωματικές τεχνολογίες που επιτρέπουν τη μέγιστη αξιοποίησή τους.

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτει ένα ευρύ φάσμα χρονικών κλιμάκων, από την εξισορρόπηση λεπτών και ωρών έως την κάλυψη ημερών ή και εποχικών αναγκών. Οι μπαταρίες, και ιδιαίτερα οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, έχουν αποκτήσει κεντρικό ρόλο στη βραχυχρόνια αποθήκευση λόγω της ταχείας απόκρισης, της υψηλής απόδοσης και της συνεχούς μείωσης του κόστους τους. Η αξιοποίησή τους επιτρέπει τη μείωση περικοπών παραγωγής ΑΠΕ, την εξομάλυνση αιχμών ζήτησης και την παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο. Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή παρουσιάζει περιορισμούς όσον αφορά την οικονομικά βιώσιμη αποθήκευση ενέργειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη συμπληρωματική χρήση άλλων μορφών αποθήκευσης.

Σε αυτό το σημείο, ιδιαίτερη σημασία αποκτούν οι τεχνολογίες μεγάλης κλίμακας και μακράς διάρκειας, όπως η αντλησιοταμίευση, η θερμική αποθήκευση και οι αναδυόμενες μορφές χημικής αποθήκευσης. Η αντλησιοταμίευση θεωρείται ώριμη και αξιόπιστη λύση για την εξισορρόπηση συστημάτων με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, καθώς συνδυάζει μεγάλη χωρητικότητα και μακροχρόνια διάρκεια ζωής. Παρά τους χωροταξικούς και περιβαλλοντικούς περιορισμούς που συνοδεύουν την ανάπτυξή της, εξακολουθεί να αποτελεί βασικό στοιχείο ενεργειακών σεναρίων υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ, ιδίως σε περιοχές με κατάλληλη γεωμορφολογία.

Το υδρογόνο, από την άλλη πλευρά, εισάγει μια διαφορετική διάσταση στην έννοια της αποθήκευσης, καθώς λειτουργεί όχι μόνο ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας, αλλά και ως ενεργειακός φορέας με δυνατότητα χρήσης σε πολλαπλούς τομείς. Η παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας επιτρέπει τη μετατροπή πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική μορφή, η οποία μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα και να αξιοποιηθεί όταν απαιτείται. Με τον

τρόπο αυτό, το υδρογόνο προσφέρει λύσεις σε περιπτώσεις εποχικής ανισορροπίας μεταξύ παραγωγής και ζήτησης, όπου οι συμβατικές μορφές αποθήκευσης δεν επαρκούν.

Ιδιαίτερη σημασία του υδρογόνου εντοπίζεται και στη δυνατότητά του να συμβάλει στην απανθρακοποίηση τομέων που είναι δύσκολο να εξηλεκτριστούν άμεσα, όπως η βαριά βιομηχανία, οι μεταφορές μεγάλων αποστάσεων και ορισμένες εφαρμογές θέρμανσης. Στο πλαίσιο αυτό, το υδρογόνο λειτουργεί ως κρίκος σύνδεσης μεταξύ του ηλεκτρικού τομέα και των υπόλοιπων ενεργειακών τομέων, ενισχύοντας την έννοια της τομεακής σύζευξης. Διεθνείς οργανισμοί, όπως η International Energy Agency, επισημαίνουν ότι η ανάπτυξη του υδρογόνου δεν υποκαθιστά τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, αλλά προϋποθέτει τη μαζική ανάπτυξή τους, καθώς η περιβαλλοντική του αξία εξαρτάται άμεσα από την προέλευση της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του.

Παρά τις σημαντικές προοπτικές, τόσο η αποθήκευση όσο και το υδρογόνο συνοδεύονται από προκλήσεις. Το κόστος επενδύσεων, οι απώλειες μετατροπής ενέργειας και οι ανάγκες σε υποδομές (δίκτυα, εγκαταστάσεις αποθήκευσης, σταθμοί μετατροπής) αποτελούν κρίσιμους παράγοντες που θα καθορίσουν τον ρυθμό και την έκταση της υιοθέτησής τους. Επιπλέον, η ανάπτυξη του υδρογόνου απαιτεί σαφές ρυθμιστικό πλαίσιο και μακροπρόθεσμο σχεδιασμό, ώστε να αποφευχθούν τεχνολογικά αδιέξοδα ή επενδύσεις που δεν ευθυγραμμίζονται με τους στόχους κλιματικής ουδετερότητας.

6.4 Περιορισμοί και αβεβαιότητες

Η ανάλυση των μελλοντικών προοπτικών του ενεργειακού συστήματος και των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας συνοδεύεται αναπόφευκτα από σημαντικούς περιορισμούς και αβεβαιότητες, οι οποίοι πρέπει να αναγνωρίζονται ρητά ώστε τα συμπεράσματα να ερμηνεύονται με επιστημονική επιφύλαξη. Οι αβεβαιότητες αυτές δεν αναιρούν την αξία των σεναρίων και των συγκριτικών αναλύσεων, αλλά υπογραμμίζουν ότι τα αποτελέσματα δεν συνιστούν προβλέψεις, αλλά τεκμηριωμένες εκτιμήσεις βασισμένες σε υποθέσεις που ενδέχεται να μεταβληθούν στο μέλλον.

Ένας βασικός περιορισμός αφορά την αβεβαιότητα των τεχνολογικών εξελίξεων. Παρότι οι τάσεις μείωσης κόστους και βελτίωσης απόδοσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, της αποθήκευσης και του υδρογόνου είναι σαφείς, ο ακριβής ρυθμός αυτών των εξελίξεων δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια. Τεχνολογικές ανακαλύψεις, αλλά και απρόβλεπτα εμπόδια (π.χ. ελλείψεις πρώτων υλών, γεωπολιτικές εντάσεις, περιορισμοί στην εφοδιαστική αλυσίδα) μπορούν να επιταχύνουν ή να επιβραδύνουν την υιοθέτηση συγκεκριμένων τεχνολογιών. Ιδιαίτερα για τεχνολογίες που βρίσκονται ακόμη σε φάση ωρίμανσης, όπως το υδρογόνο ή οι

μορφές μακράς διάρκειας αποθήκευσης, η αβεβαιότητα είναι μεγαλύτερη και επηρεάζει ουσιαστικά τη διαμόρφωση ρεαλιστικών σεναρίων.

Επιπλέον, σημαντικοί περιορισμοί σχετίζονται με την οικονομική αβεβαιότητα. Οι μελλοντικές τιμές ενέργειας, το κόστος κεφαλαίου, τα επιτόκια χρηματοδότησης και οι μηχανισμοί στήριξης επενδύσεων αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους που επηρεάζουν άμεσα τη βιωσιμότητα των ενεργειακών έργων. Μεταβολές στο διεθνές οικονομικό περιβάλλον ή στις αγορές πρώτων υλών μπορούν να μεταβάλουν σημαντικά την ανταγωνιστικότητα των τεχνολογιών και να επηρεάσουν τις επενδυτικές αποφάσεις. Συνεπώς, ακόμη και σενάρια που βασίζονται σε σημερινές τάσεις κόστους ενδέχεται να αποκλίνουν από την πραγματικότητα σε βάθος χρόνου.

Ιδιαίτερη αβεβαιότητα εισάγεται και από τον θεσμικό και πολιτικό παράγοντα. Η ενεργειακή μετάβαση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συνέπεια και τη μακροχρόνια σταθερότητα των πολιτικών επιλογών. Αλλαγές στη νομοθεσία, στο ρυθμιστικό πλαίσιο ή στις προτεραιότητες ενεργειακής πολιτικής μπορούν να επηρεάσουν τον ρυθμό ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και των συνοδευτικών υποδομών. Επιπλέον, σε υπερεθνικό επίπεδο, η ευθυγράμμιση των κρατών-μελών σε κοινές στρατηγικές δεν είναι πάντα δεδομένη, γεγονός που ενδέχεται να δημιουργήσει ασυνέχειες στην εφαρμογή των σεναρίων.

Ένας ακόμη κρίσιμος περιορισμός αφορά την κοινωνική αποδοχή και τους χωροταξικούς περιορισμούς. Η υλοποίηση έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, δικτύων και υποδομών αποθήκευσης συχνά συναντά αντιδράσεις σε τοπικό επίπεδο, οι οποίες μπορούν να καθυστερήσουν ή να ακυρώσουν έργα που είναι τεχνικά και οικονομικά βιώσιμα. Οι κοινωνικοί αυτοί παράγοντες είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν και συχνά υποεκτιμώνται στα θεωρητικά σενάρια, παρότι στην πράξη διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο.

Τέλος, πρέπει να επισημανθεί η μεθοδολογική αβεβαιότητα που συνοδεύει κάθε σεναριακή ανάλυση. Τα σενάρια βασίζονται σε υποθέσεις σχετικά με τη ζήτηση ενέργειας, τη συμπεριφορά των καταναλωτών, τον ρυθμό εξηλεκτρισμού και τη διαθεσιμότητα τεχνολογιών. Μικρές αποκλίσεις στις αρχικές υποθέσεις μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα σε βάθος χρόνου. Για τον λόγο αυτό, τα σενάρια δεν θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως «οδικοί χάρτες ακριβείας», αλλά ως εργαλεία κατανόησης πιθανών εξελίξεων και εντοπισμού κρίσιμων σημείων παρέμβασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συνοπτικά συμπεράσματα σύγκρισης

Η συγκριτική ανάλυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας που αναπτύχθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια οδηγεί σε ένα βασικό, αλλά συχνά παρεξηγημένο συμπέρασμα: δεν υπάρχει μία τεχνολογία ΑΠΕ που να είναι καθολικά “η καλύτερη”. Η υπεροχή ή η καταλληλότητα μιας τεχνολογίας εξαρτάται από το κριτήριο που εξετάζεται (οικονομικό, τεχνικό, περιβαλλοντικό, κοινωνικό/χωροταξικό), από τις συνθήκες εφαρμογής (πόρος, δίκτυο, ωριμότητα αγοράς) και από τον ρόλο που καλείται να επιτελέσει στο σύστημα (όγκος παραγωγής, ευελιξία, σταθερότητα, τοπική κάλυψη). Επομένως, η συγκριτική αξιολόγηση πρέπει να ερμηνεύεται ως εργαλείο σχεδιασμού για βέλτιστο συνδυασμό τεχνολογιών και όχι ως διαδικασία ανάδειξης ενός “νικητή”.

Σε οικονομικό επίπεδο, η σύγκριση μέσω του LCOE επιβεβαιώνει ότι οι ηλιακές και αιολικές τεχνολογίες έχουν πλέον εδραιωθεί ως οι πιο ανταγωνιστικές επιλογές για νέες εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής σε διεθνές επίπεδο. Η οικονομική τους ελκυστικότητα προκύπτει από τη μεγάλη μείωση του κόστους εξοπλισμού και την ωρίμανση της εφοδιαστικής αλυσίδας, γεγονός που τις καθιστά βασικό μοχλό ταχείας αύξησης παραγωγής χαμηλών εκπομπών. Ωστόσο, το ίδιο οικονομικό πλεονέκτημα δεν μεταφράζεται αυτόματα σε “βέλτιστη” επιλογή στο επίπεδο συστήματος, διότι το LCOE δεν ενσωματώνει με πληρότητα το κόστος ευελιξίας, τις ανάγκες δικτύου, τις περικοπές παραγωγής και τις υπηρεσίες εξισορρόπησης. Έτσι, η οικονομική σύγκριση είναι αναγκαία για την κατανόηση της ανταγωνιστικότητας, αλλά δεν επαρκεί για να περιγράψει την πραγματική αξία κάθε τεχνολογίας στο ενεργειακό σύστημα.

Σε τεχνικό επίπεδο, ο συντελεστής φορτίου (capacity factor) αναδεικνύει μια δεύτερη, καθοριστική διάσταση: οι τεχνολογίες που βασίζονται σε ελεγχόμενους ή σταθερούς πόρους—όπως η γεωθερμία, η βιομάζα και, σε μεγάλο βαθμό, η υδροηλεκτρική—παρέχουν υψηλότερη αξιοποίηση της εγκατεστημένης ισχύος και συνεπώς πιο προβλέψιμη συμβολή στην κάλυψη της ζήτησης. Αυτό σημαίνει ότι, για την παραγωγή της ίδιας ετήσιας ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτούν γενικά μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ σε σχέση με τεχνολογίες χαμηλότερου συντελεστή φορτίου. Αντίθετα, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια—παρά την οικονομική τους υπεροχή—χαρακτηρίζονται από μεταβλητότητα και μειωμένη προβλεψιμότητα σε συγκεκριμένες χρονικές κλίμακες, γεγονός που αυξάνει την ανάγκη για εφεδρείες, αποθήκευση, ισχυρά δίκτυα και αποτελεσματική πρόγνωση παραγωγής. Με άλλα λόγια, η τεχνική σύγκριση δείχνει ότι οι μεταβλητές ΑΠΕ είναι ιδανικές για τον “όγκο” της καθαρής παραγωγής, αλλά δεν αρκούν μόνες τους για τη διασφάλιση της ευστάθειας του συστήματος.

Σε περιβαλλοντικό επίπεδο, η ανάλυση κύκλου ζωής επιβεβαιώνει ότι οι ΑΠΕ έχουν σαφώς χαμηλότερο αποτύπωμα εκπομπών σε σχέση με τις συμβατικές πηγές, αλλά και ότι δεν είναι περιβαλλοντικά ισοδύναμες μεταξύ τους. Η αιολική και η γεωθερμική ενέργεια εμφανίζουν εξαιρετικά χαμηλές εκπομπές κύκλου ζωής, ενώ η ηλιακή παρουσιάζει επίσης χαμηλές εκπομπές, με το κύριο περιβαλλοντικό βάρος να μετατοπίζεται στη φάση παραγωγής του εξοπλισμού. Η υδροηλεκτρική ενέργεια διατηρεί χαμηλές εκπομπές, αλλά η περιβαλλοντική της αποτίμηση δεν μπορεί να γίνει μονοδιάστατα, καθώς συνδέεται με σημαντικές επιπτώσεις σε οικοσυστήματα, αλλαγές χρήσεων γης και υδρολογικές μεταβολές. Η βιομάζα παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα: σε ορισμένα σχήματα βιώσιμης πρώτης ύλης μπορεί να είναι ωφέλιμη, σε άλλα όμως μπορεί να εμφανίσει σημαντικές εκπομπές και πιέσεις στο περιβάλλον. Συνεπώς, το περιβαλλοντικό συμπέρασμα είναι διπλό: οι ΑΠΕ είναι συνολικά ευνοϊκές για το κλίμα, αλλά η “πράσινη” ταυτότητα μιας τεχνολογίας εξαρτάται από τον τρόπο υλοποίησης και το πλαίσιο εφαρμογής.

Ιδιαίτερη βαρύτητα αποκτά το χωρικό και κοινωνικό επίπεδο, διότι εκεί συχνά κρίνεται η πραγματική δυνατότητα ανάπτυξης. Η χρήση γης και οι χωροταξικοί περιορισμοί διαφοροποιούν έντονα τις τεχνολογίες: τα φωτοβολταϊκά σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις απαιτούν σημαντικές εκτάσεις, ενώ η αιολική έχει μεν μικρότερο “αποτύπωμα θεμελίωσης”, αλλά συχνά συγκρούεται με ζητήματα οπτικής όχλησης, προστατευόμενων περιοχών και τοπικής αποδοχής. Η υδροηλεκτρική μπορεί να επιφέρει μεγάλες χωρικές μεταβολές λόγω ταμιευτήρων. Η γεωθερμία έχει περιορισμένο χωρικό αποτύπωμα, αλλά ο κύριος περιορισμός της είναι η γεωγραφική διαθεσιμότητα κατάλληλων πεδίων. Η βιομάζα, τέλος, εξαρτάται από μια λειτουργική και βιώσιμη αλυσίδα τροφοδοσίας και συχνά αντιμετωπίζει τοπικές αντιδράσεις λόγω μεταφορών, οσμών ή περιβαλλοντικών ανησυχιών. Άρα, η κοινωνική/χωροταξική διάσταση λειτουργεί ως “φίλτρο υλοποιησιμότητας”: ακόμη και μια τεχνολογία με υψηλή οικονομική ή περιβαλλοντική επίδοση μπορεί να συναντήσει εμπόδια που καθορίζουν τελικά τον ρυθμό και την κλίμακα ανάπτυξής της.

Συνδυάζοντας τα παραπάνω, η συνολική συγκριτική εικόνα οδηγεί σε μια αρχή σχεδιασμού που επαναλαμβάνεται σε όλα τα σύγχρονα ενεργειακά συστήματα: ο βέλτιστος ενεργειακός σχεδιασμός είναι πολυτεχνολογικός. Η ηλιακή και η αιολική ενέργεια αποτελούν την κύρια βάση αύξησης καθαρής παραγωγής λόγω κόστους και διαθεσιμότητας πόρων. Η υδροηλεκτρική και οι μορφές αποθήκευσης/ευελιξίας ενισχύουν την αξιοπιστία και την προσαρμοστικότητα του συστήματος. Η βιομάζα και η γεωθερμία μπορούν να προσφέρουν στοχευμένη, ελεγχόμενη παραγωγή όπου υπάρχουν οι προϋποθέσεις. Το κρίσιμο σημείο είναι ότι οι τεχνολογίες πρέπει να αξιολογούνται όχι μόνο ως μεμονωμένες μονάδες, αλλά ως στοιχεία ενός ολοκληρωμένου συστήματος που απαιτεί ισορροπία μεταξύ κόστους, αποδοτικότητας, περιβαλλοντικής επίδοσης και κοινωνικής αποδοχής.

Η εφαρμογή της ανάλυσης στο ελληνικό και ευρωπαϊκό πλαίσιο ενισχύει τα συμπεράσματα αυτά. Η Ελλάδα διαθέτει ισχυρό συγκριτικό πλεονέκτημα σε ηλιακή και αιολική ενέργεια, όμως η πραγματική “βέλτιστη επιλογή” προσδιορίζεται από τη δυνατότητα του συστήματος να ενσωματώσει υψηλή μεταβλητή παραγωγή μέσω δικτύων, διασυνδέσεων, αποθήκευσης και μηχανισμών διαχείρισης ζήτησης. Στην ΕΕ, η μεγαλύτερη τεχνολογική διαφοροποίηση και οι ισχυρότερες διασυνδέσεις προσφέρουν καλύτερες συνθήκες εξομάλυνσης μεταβλητότητας, αν και οι ίδιες ανάγκες ευελιξίας παραμένουν καθοριστικές όσο αυξάνει η συμμετοχή των ΑΠΕ. Συνεπώς, η συγκριτική ανάλυση δεν οδηγεί απλώς σε τεχνικοοικονομικές διαπιστώσεις, αλλά αναδεικνύει ότι η επιτυχία της ενεργειακής μετάβασης εξαρτάται από τη σύζευξη τεχνολογίας και συστήματος: παραγωγή, δίκτυα, αποθήκευση, αγορές και κοινωνική συναίνεση πρέπει να εξελίσσονται παράλληλα.

Τέλος, ένα ουσιαστικό συμπέρασμα είναι ότι όσο προχωρά η ενεργειακή μετάβαση, μεταβάλλεται και το “κριτήριο επιτυχίας”. Στα πρώτα στάδια, προτεραιότητα έχει η εγκατάσταση νέας καθαρής ισχύος με ανταγωνιστικό κόστος. Στα προχωρημένα στάδια, προτεραιότητα γίνεται η βέλτιστη ένταξη: η μείωση περικοπών, η διαχείριση αιχμών, η ασφάλεια εφοδιασμού, η επάρκεια ισχύος και η αποδοτική λειτουργία της αγοράς. Με αυτή τη λογική, η σύγκριση των ΑΠΕ δεν είναι στατική· η «καταλληλότητα» κάθε τεχνολογίας μεταβάλλεται ανάλογα με το ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ, τις υποδομές και τους στόχους πολιτικής. Αυτό ακριβώς καθιστά αναγκαία την ολοκληρωμένη, πολυκριτηριακή προσέγγιση που υιοθετήθηκε στην εργασία: όχι για να δώσει μία απάντηση, αλλά για να δώσει ένα τεκμηριωμένο πλαίσιο λήψης αποφάσεων.

7.2 Προτάσεις για ενεργειακό σχεδιασμό

Οι προτάσεις για τον ενεργειακό σχεδιασμό που προκύπτουν από τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας δεν μπορούν να περιοριστούν σε αποσπασματικά μέτρα ή σε μονοδιάστατες τεχνολογικές επιλογές. Αντιθέτως, απαιτούν έναν ολιστικό και μακροπρόθεσμο σχεδιασμό, ο οποίος να λαμβάνει υπόψη τη δυναμική φύση της ενεργειακής μετάβασης, τις ιδιαιτερότητες του ελληνικού ενεργειακού συστήματος και τη συνεχή αλληλεπίδραση μεταξύ τεχνολογίας, αγοράς και κοινωνίας. Ο ενεργειακός σχεδιασμός οφείλει να μετατοπιστεί από τη λογική της απλής επίτευξης ποσοτικών στόχων εγκατεστημένης ισχύος προς μια προσέγγιση που δίνει έμφαση στη λειτουργική επάρκεια, την ανθεκτικότητα και τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος.

Κεντρική πρόταση αποτελεί η υιοθέτηση ενός πολυτεχνολογικού ενεργειακού μίγματος, στο οποίο οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας δεν αντιμετωπίζονται ως ανταγωνιστικές μεταξύ τους, αλλά ως συμπληρωματικά στοιχεία ενός ενιαίου συστήματος. Η ηλιακή και η αιολική ενέργεια

πρέπει να συνεχίσουν να αποτελούν τον βασικό άξονα αύξησης της καθαρής παραγωγής, λόγω του υψηλού δυναμικού και της οικονομικής τους ανταγωνιστικότητας. Ωστόσο, ο σχεδιασμός πρέπει να ενσωματώνει εξαρχής τη συμπληρωματική συμβολή τεχνολογιών ευελιξίας, όπως η αποθήκευση ενέργειας και τα υδροηλεκτρικά έργα, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία δομικών ανισοροπιών στο σύστημα και η αύξηση περικοπών παραγωγής.

Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στον συστημικό σχεδιασμό δικτύων και υποδομών. Η ανάπτυξη ΑΠΕ χωρίς αντίστοιχη ενίσχυση των δικτύων μεταφοράς και διανομής οδηγεί σε συμφόρηση, καθυστερήσεις συνδέσεων και μειωμένη αξιοποίηση του εγκατεστημένου δυναμικού. Ο ενεργειακός σχεδιασμός οφείλει να συντονίζει χρονικά την ανάπτυξη νέας παραγωγής με τις επενδύσεις σε δίκτυα, διασυνδέσεις και ψηφιακές υποδομές, ώστε η μετάβαση να είναι τεχνικά βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική. Στο ελληνικό πλαίσιο, οι νησιωτικές διασυνδέσεις και η ενίσχυση του κορμού μεταφοράς αποτελούν στρατηγικές επιλογές με πολλαπλά οφέλη. Παράλληλα, ο ενεργειακός σχεδιασμός πρέπει να ενσωματώνει τη ζήτηση ως ενεργό παράγοντα και όχι ως παθητικό μέγεθος. Η ενεργειακή απόδοση, ο εξηλεκτρισμός τελικών χρήσεων και η διαχείριση ζήτησης αποτελούν κρίσιμα εργαλεία για τη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα και για την καλύτερη αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ. Η προώθηση αντλιών θερμότητας, η αναβάθμιση του κτιριακού αποθέματος και η ευφυής φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να σχεδιάζονται συντονισμένα με τη διαθεσιμότητα καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να ενισχύεται η ευελιξία του συστήματος και να μειώνονται οι αιχμές ζήτησης.

Μια ακόμη κρίσιμη διάσταση αφορά τον χρονικό ορίζοντα του σχεδιασμού. Ο ενεργειακός σχεδιασμός πρέπει να διακρίνει σαφώς μεταξύ βραχυπρόθεσμων, μεσοπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων στόχων. Βραχυπρόθεσμα, η προτεραιότητα είναι η ταχεία αντικατάσταση των πιο ρυπογόνων τεχνολογιών. Μεσοπρόθεσμα, απαιτείται η ενίσχυση της ευελιξίας και η ωρίμανση των αγορών. Μακροπρόθεσμα, ο σχεδιασμός πρέπει να προετοιμάζει το σύστημα για πολύ υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, όπου η αποθήκευση μεγάλης διάρκειας, η τομεακή σύζευξη και οι καθαρές μορφές καυσίμων θα διαδραματίζουν αυξανόμενο ρόλο. Η σύγχυση αυτών των χρονικών επιπέδων μπορεί να οδηγήσει είτε σε υπερβολικές επενδύσεις είτε σε δομικά ελλείμματα υποδομών. Ιδιαίτερη σημασία έχει και η σταθερότητα και προβλεψιμότητα του θεσμικού πλαισίου. Ο ενεργειακός σχεδιασμός πρέπει να παρέχει σαφή και μακροχρόνια σήματα προς τους επενδυτές, ώστε να μειώνεται το κόστος κεφαλαίου και να ενθαρρύνονται επενδύσεις όχι μόνο στην παραγωγή, αλλά και στις υποδομές και την αποθήκευση. Η ύπαρξη σταθερών κανόνων αγοράς, διαφανών μηχανισμών στήριξης και αποτελεσματικών διαδικασιών αδειοδότησης αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επιτυχία κάθε σχεδίου ενεργειακής μετάβασης.

Τέλος, ο ενεργειακός σχεδιασμός οφείλει να ενσωματώνει συστηματικά τη διάσταση της κοινωνικής αποδοχής. Η ενεργειακή μετάβαση δεν είναι μόνο τεχνικό ή οικονομικό εγχείρημα, αλλά και κοινωνική διαδικασία. Η έγκαιρη ενημέρωση, η συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών και η δίκαιη κατανομή των οφελών και των επιβαρύνσεων αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη βιωσιμότητα του σχεδιασμού. Ένας ενεργειακός σχεδιασμός που αγνοεί αυτές τις παραμέτρους κινδυνεύει να παραμείνει θεωρητικά άρτιος αλλά πρακτικά ανεφάρμοστος.

7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία ανέδειξε τη σημασία της πολυκριτηριακής και συστημικής προσέγγισης στη συγκριτική αξιολόγηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Παρά την εκτενή ανάλυση, προκύπτουν σαφώς πεδία στα οποία η μελλοντική έρευνα μπορεί να εμβαθύνει, να βελτιώσει τη μεθοδολογία και να προσφέρει πιο εξειδικευμένα εργαλεία υποστήριξης ενεργειακού σχεδιασμού. Οι προτάσεις που ακολουθούν δεν αποτελούν απλή επέκταση της παρούσας μελέτης, αλλά κατευθύνσεις που ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες απαιτήσεις ενός ενεργειακού συστήματος σε μετάβαση.

Μια βασική κατεύθυνση μελλοντικής έρευνας αφορά την ενσωμάτωση δυναμικών μοντέλων ενεργειακού συστήματος. Η παρούσα ανάλυση βασίστηκε κυρίως σε συγκριτικούς δείκτες και στατικές αποτιμήσεις, οι οποίες είναι χρήσιμες για τη γενική αξιολόγηση τεχνολογιών, αλλά δεν αποτυπώνουν πλήρως τη χρονική μεταβλητότητα της παραγωγής και της ζήτησης. Η ανάπτυξη και χρήση μοντέλων που λειτουργούν σε ωριαία ή υποωριαία βάση θα επέτρεπε την ακριβέστερη αποτίμηση της συμβολής κάθε τεχνολογίας ΑΠΕ στην ευστάθεια του συστήματος, καθώς και τον ποσοτικό προσδιορισμό των αναγκών σε αποθήκευση και εφεδρείες. Επιπλέον, σημαντικό πεδίο έρευνας αποτελεί η συστημική αποτίμηση του κόστους πέραν του LCOE. Αν και το LCOE αποτελεί ευρέως χρησιμοποιούμενο δείκτη, δεν ενσωματώνει το κόστος ευελιξίας, τις επενδύσεις σε δίκτυα, τις περικοπές παραγωγής και τις επικουρικές υπηρεσίες. Μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να επικεντρωθούν σε δείκτες «συστημικού κόστους», οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη το σύνολο των επιπτώσεων μιας τεχνολογίας στο ενεργειακό σύστημα και επιτρέπουν πιο ρεαλιστική σύγκριση μεταξύ μεταβλητών και ελεγχόμενων πηγών ενέργειας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η περαιτέρω έρευνα στον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας και των τεχνολογιών μεγάλης διάρκειας. Καθώς η διείσδυση των ΑΠΕ αυξάνεται, η ανάγκη για αποθήκευση δεν περιορίζεται πλέον στη βραχυχρόνια εξισορρόπηση, αλλά επεκτείνεται σε εποχικές κλίμακες. Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εξετάσει συγκριτικά διαφορετικές τεχνολογίες μακράς διάρκειας αποθήκευσης, τόσο από τεχνική όσο και από

οικονομική σκοπιά, καθώς και τη βέλτιστη ένταξή τους σε εθνικά και περιφερειακά ενεργειακά συστήματα.

Ένα ακόμη κρίσιμο πεδίο αφορά τη σχέση ενεργειακής μετάβασης και κοινωνικής αποδοχής. Παρότι οι τεχνικοοικονομικές αναλύσεις είναι απαραίτητες, συχνά δεν επαρκούν για να εξηγήσουν καθυστερήσεις ή αποτυχίες υλοποίησης έργων ΑΠΕ. Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να συνδυάσουν ποσοτικές και ποιοτικές μεθόδους, διερευνώντας κοινωνικούς, πολιτισμικούς και θεσμικούς παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοχή των ενεργειακών έργων, καθώς και μηχανισμούς ενίσχυσης της συμμετοχής των τοπικών κοινωνιών. Επιπρόσθετα, η τομεακή σύζευξη συνιστά ένα αναδυόμενο πεδίο με σημαντικά ερευνητικά ερωτήματα. Η αλληλεπίδραση μεταξύ ηλεκτρισμού, θέρμανσης, μεταφορών και βιομηχανίας μεταβάλλει τη φύση της ενεργειακής ζήτησης και απαιτεί νέες μεθοδολογίες ανάλυσης. Μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να εξετάσουν πώς η αυξημένη ηλεκτροδότηση και η χρήση καθαρών καυσίμων επηρεάζουν τη βέλτιστη σύνθεση του ενεργειακού μείγματος και τις ανάγκες υποδομών.

Τέλος, ιδιαίτερα χρήσιμη θα ήταν η ανάπτυξη συγκριτικών μελετών μεταξύ χωρών ή περιφερειών με παρόμοια ή διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η σύγκριση της ελληνικής περίπτωσης με άλλα κράτη της Νότιας Ευρώπης ή με χώρες που έχουν ήδη υψηλή διείσδυση ΑΠΕ θα μπορούσε να αναδείξει καλές πρακτικές, αλλά και μεταβιβάσιμα ή μη μεταβιβάσιμα στοιχεία ενεργειακής πολιτικής. Τέτοιες μελέτες θα ενίσχυαν τη δυνατότητα γενίκευσης των συμπερασμάτων και θα παρείχαν πολύτιμες κατευθύνσεις για τον μελλοντικό ενεργειακό σχεδιασμό.

ΠΗΓΕΣ

- [1]. Ang, T. Z., Salem, M., Kamarol, M., Das, H. S., Nazari, M. A., & Prabakaran, N. (2022). A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. *Energy strategy reviews*, 43, 100939.
- [2]. Shen, W., Chen, X., Qiu, J., Hayward, J. A., Sayeef, S., Osman, P., ... & Dong, Z. Y. (2020). A comprehensive review of variable renewable energy levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110301.
- [3]. Sobczuk, S., Jaroń, A., Mazur, M., & Borucka, A. (2025). Renewable Energy and CO2 Emissions: Analysis of the Life Cycle and Impact on the Ecosystem in the Context of Energy Mix Changes. *Energies*, 18(13), 3332.
- [4]. Luo, J., Yang, H., Zhang, L., Liu, H., Wang, Y., & Hao, C. (2024). A comparative study on the combination of life cycle assessment and ecological footprints: solar photovoltaic power generation vs. coal power generation in Ningxia. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1375820.
- [5]. Turconi, R., Boldrin, A., & Astrup, T. (2013). Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renewable and sustainable energy reviews*, 28, 555-565.
- [6]. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_statistics_-_an_overview
- [7]. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics
- [8]. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_dependence
- [9]. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20260114-1>
- [10]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- [11]. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [12]. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5dc74a29-c4cb-4cde-97e0-9e218c58c6fd/Greece2023.pdf>
- [13]. <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>
- [14]. <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
- [15]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- [16]. <https://www.admie.gr/en>
- [17]. <https://www.admie.gr/en/node/742>
- [18]. <https://thegreentank.gr/en/2025/01/30/admie-dec2024/>
- [19]. <https://thegreentank.gr/en/2025/07/02/admie-may25-en/>

- [20]. https://commission.europa.eu/publications/greece-final-updated-necp-2021-2030-submitted-2025_en
- [21]. <https://www.greeknewsagenda.gr/greece-revised-national-energy-and-climate-plan/>
- [22]. https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/electricity-market-design_en
- [23]. https://www.kepe.gr/images/oikonomikes_ekselikseis/issue-51-en/the-greek-energy-sector-and-the-impact-of-natural-gas-prices-on-domestic.pdf