



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

**«Η Συμβολή της Πυρηνικής Ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα και ο ρόλος της σε
συνδυασμό με τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας»**

**«The Contribution of Nuclear Energy to the Energy Mix and Its Role in Combination with
Renewable Energy Sources»**

Υπό

Ιάσων Αρβανιτογιάννης AM 2919010

Πτυχιακή Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Πτυχίου του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας

Λάρισα, 2025

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

Πρώτος Εξεταστής	Δρ. Παπανδριανός Νικόλαος (Επιβλέπων) Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Θεοδοσίου Θεοδόσιος Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Κωτσόπουλος Σπυρίδων Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή Τεχνολογίας Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

Με το παρόν κείμενο βεβαιώνω ότι ο κάτωθι υπογράφων είμαι συγγραφέας της παρούσης πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και η οποία παραδόθηκε, μετά από έγκριση του επιβλέποντας καθηγητή μου, σε έντυπη και ψηφιακή μορφή στη Γραμματεία του Τμήματος. Επίσης δηλώνω πως κάθε πηγή που χρησιμοποίησα (βιβλιογραφία, αρθρογραφία, δικτυογραφία), για την υποστήριξη των υποθέσεων της μελέτης και της ερευνάς μου, είναι πλήρως συμβατή με τα ακολουθούμενα επιστημονικά πρότυπα και, επιπλέον, αναφέρεται ρητά, υπό μορφή αναφοράς-παραπομπής, σε όλο το φάσμα κειμένων της παρούσης εργασίας. Το αυτό ισχύει για τη χρήση δευτερογενών δεδομένων (πινάκων, διαγραμμάτων και εικόνων), ιδεών και λέξεων, τα οποία και αναφέρονται είτε ακριβώς όπως υπάρχουν στις πηγές είτε μεθερμηνεύονται από εμένα.

ΕΠΩΝΥΜΟ	Αρβανιτογιάννης
ΟΝΟΜΑ	Ιάσων
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	2919010
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	27.06.2025
ΥΠΟΓΡΑΦΗ	

© 2023. ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΗ

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας της Σχολής Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ενεργειακή μετάβαση αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις του 21ου αιώνα, καθώς η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας συνοδεύεται από την ανάγκη περιορισμού των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Η παρούσα εργασία διερευνά τη συμβολή της πυρηνικής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα και τις δυνατότητες συνδυασμού της με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) για την επίτευξη ενός βιώσιμου και ασφαλούς ενεργειακού μέλλοντος.

Αρχικά, εξετάζεται η έννοια του ενεργειακού μείγματος και η σημασία της βιώσιμης ανάπτυξης. Οι ΑΠΕ, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, προσφέρουν σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, αλλά παρουσιάζουν στοχαστικότητα στην παραγωγή. Αντιθέτως, η πυρηνική ενέργεια εξασφαλίζει σταθερή και υψηλής απόδοσης ηλεκτροπαραγωγή, με σχεδόν μηδενικές εκπομπές CO₂ καθ' όλη τη διάρκεια ζωής των εγκαταστάσεων.

Η εργασία αναλύει τις τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας, όπως οι Μικροί Αρθρωτοί Αντιδραστήρες (SMRs) και η προοπτική της σύντηξης, καθώς και τα ζητήματα ασφάλειας, διαχείρισης αποβλήτων και ρυθμιστικού ελέγχου. Παράλληλα, υπογραμμίζεται η σημασία τεχνολογιών αποθήκευσης, όπως οι μπαταρίες και το πράσινο υδρογόνο, για την ενίσχυση της αξιοπιστίας των ΑΠΕ.

Η συνολική αξιολόγηση καταδεικνύει ότι η συμπληρωματική αξιοποίηση πυρηνικής ενέργειας και ΑΠΕ μπορεί να οδηγήσει σε ένα σταθερό, καθαρό και βιώσιμο ενεργειακό σύστημα. Η επιτυχία της μετάβασης προϋποθέτει επενδύσεις στην καινοτομία, διακρατική συνεργασία και αποτελεσματικά ρυθμιστικά πλαίσια, με στόχο τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τη διασφάλιση ενεργειακής επάρκειας.

ABSTRACT

The energy transition is one of the greatest challenges of the 21st century, as the rising global energy demand coincides with the urgent need to reduce CO₂ emissions. This thesis explores the role of nuclear energy in the energy mix and its potential synergy with renewable energy sources (RES) for a sustainable and secure energy future.

It begins with an overview of the energy mix concept and the importance of sustainable development. RES, such as solar and wind energy, provide significant environmental benefits but are characterized by variability. In contrast, nuclear energy ensures stable and high-efficiency electricity production with nearly zero CO₂ emissions throughout its lifecycle.

The study examines technological advances in nuclear energy, including Small Modular Reactors (SMRs) and the future potential of nuclear fusion, as well as key issues of safety, waste management, and international regulatory frameworks. The importance of energy storage technologies, such as batteries and green hydrogen, is also highlighted.

The overall assessment shows that nuclear energy and RES are not mutually exclusive but complementary. Their combined use can lead to a reliable, clean, and resilient energy system. Achieving this transition requires investment in innovation, international cooperation, and effective regulatory policies aimed at reducing environmental impact and ensuring energy security.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πίνακας εικόνων.....	9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
2. ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΕΙΓΜΑ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ.....	12
2.1 Ορισμός και έννοια του ενεργειακού μείγματος	12
2.2 Η ανάγκη για βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση	12
2.3 Κλιματική αλλαγή και οι επιπτώσεις της στο ενεργειακό μείγμα	13
2.4 Ο ρόλος της πυρηνικής ενέργειας και των ΑΠΕ στη μείωση των εκπομπών CO ₂	14
3. ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ: ΕΞΕΛΙΞΗ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΡΟΛΟΣ ΣΤΟ ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΕΙΓΜΑ.....	16
3.1 Ιστορική αναδρομή και ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας.....	16
3.2. Τεχνολογίες και εξελίξεις στην πυρηνική ενέργεια	17
3.2.1. Αντιδραστήρες Πρώτης, Δεύτερης και Τρίτης Γενιάς.....	17
3.2.2. Αντιδραστήρες Τέταρτης Γενιάς	19
3.2.3. Μικροί Αρθρωτοί Αντιδραστήρες (SMRs)	21
3.2.4. Τεχνολογία Σύντηξης και Σχάσης.....	23
3.2.5. Διαχείριση Πυρηνικών Αποβλήτων.....	25
3.2.6. Συστήματα Παθητικής Ασφάλειας.....	27
3.2.7. Τεχνολογίες Ανακύκλωσης Καυσίμων.....	28
3.3. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Πυρηνικής Ενέργειας.....	30
3.4 Περιβαλλοντικές και κοινωνικές ανησυχίες.....	32
3.5 Ρυθμιστικά πλαίσια και διεθνής συνεργασία.....	34
3.5.1 Ρυθμιστικό Πλαίσιο στις Ηνωμένες Πολιτείες.....	36
3.5.2 Ρυθμιστικό Πλαίσιο στην Ευρωπαϊκή Ένωση.....	37
4. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ) ΚΑΙ Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥΣ.....	39
4.1. Ηλιακή Ενέργεια- Φωτοβολταϊκά Συστήματα	40
4.1.2 Λειτουργία φωτοβολταϊκών συστημάτων	41
4.1.3 Θετικές και αρνητικές περιβαλλοντικές και κοινωνικοπολιτικές επιπτώσεις της χρήσης ηλιακής ενέργειας στους ηλιοθερμικούς σταθμούς	43

4.1.4 Θετικές και αρνητικές περιβαλλοντικές και κοινωνικοπολιτικές επιπτώσεις της χρήσης ηλιακής ενέργειας στα ηλιακά θερμικά συστήματα.....	44
4.1.5 Προκλήσεις στον τομέα τις ηλιακής ενέργειας.....	46
4.2. Αιολική ενέργεια -Ανεμογεννήτριες.....	47
4.2.1. Τρόπος λειτουργίας των ανεμογεννητριών.....	48
4.2.2. Θετικές και αρνητικές επιπτώσεις της χρήσης αιολικής ενέργειας.....	50
4.2.3. Συμπεράσματα και Προτάσεις Πολιτικής για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη της Αιολικής Ενέργειας.....	52
4.3. Υδροηλεκτρική ενέργεια.....	53
4.3.1. Τρόπος λειτουργίας υδροηλεκτρικών σταθμών.....	54
4.3.2. Αρνητικές και θετικές επιπτώσεις της χρήσης της υδροηλεκτρικής ενέργειας.....	55
4.3.3 Προκλήσεις και Λύσεις στην Υδροηλεκτρική Ενέργεια.....	57
4.4 Βιομάζα.....	58
4.4.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα.....	59
4.4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της βιομάζας.....	61
4.4.3 Προκλήσεις και Λύσεις στη χρήση της Βιομάζας.....	62
5. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ: ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΝΑΝΤΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	64
5.1 Κριτήρια σύγκρισης.....	64
5.1.1 Κόστος Κατασκευής και Λειτουργίας.....	65
5.1.2 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις.....	66
5.1.3 Σταθερότητα και Αποδοτικότητα Παραγωγής.....	67
5.1.4 Ασφάλεια και Κοινωνική Αποδοχή.....	68
5.2 Ο ρόλος της πυρηνικής ενέργειας ως βασικό φορτίο.....	69
5.3 Συμπληρωματικότητα και πιθανές συνέργειες.....	70
6. ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΝΑ ΠΙΟ ΒΙΩΣΙΜΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΕΛΛΟΝ.....	73
6.1 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.....	73
6.1.1 Αποθήκευση ενέργειας σε χημική μορφή– Τεχνολογία μπαταριών.....	73
6.1.2 Τεχνολογία υδρογόνου.....	76
6.1.3 Πεπιεσμένος αέρας η σύστημα συμπίεσης αέρα.....	78
6.2 Οφέλη από τον συνδυασμό πυρηνικής ενέργειας και ΑΠΕ.....	80
6.3 Ο ρόλος των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMRs).....	81
6.4 Εφαρμοσμένα Παραδείγματα και Case Studies.....	82

6.5 Πυρηνική Ενέργεια και ΑΠΕ σε μια Βιώσιμη Συνύπαρξη	84
7. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.....	86
7.1 Οικονομικά οφέλη και κόστος των Πυρηνικών και των ΑΠΕ	86
7.2 Πολιτικές και κίνητρα για τη στήριξη βιώσιμων τεχνολογιών.....	87
7.2.1.Κανονιστικό Πλαίσιο και Ρυθμίσεις.....	88
Συγκριτικός Πίνακας Οικονομικών και Ρυθμιστικών Παραμέτρων.....	90
7.3 Διεθνείς πρωτοβουλίες και συνεργασίες.....	90
7.3.1.Συμφωνίες για το Κλίμα και τις Εκπομπές CO ₂	91
7.3.2.Ευρωπαϊκές Πρωτοβουλίες.....	91
7.3.3.Εθνικές Συνεργασίες.....	92
8. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΤΑΒΑΣΗ: ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ, ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ	93
8.1 Παγκόσμιες και Ευρωπαϊκές Πρωτοβουλίες για ένα Βιώσιμο Ενεργειακό Μέλλον.....	93
8.2 Πιθανές τεχνολογικές εξελίξεις σε πυρηνικά και ΑΠΕ.....	94
8.3 Κοινωνικές και πολιτικές προκλήσεις.....	96
8.4 Η επίδραση της ενεργειακής μετάβασης στην κοινωνία και στην οικονομία.....	97
8.4.1 Οικονομικές επιπτώσεις.....	98
8.4.2 Κοινωνικές επιπτώσεις.....	99
9.1 Συνοπτική Παρουσίαση των Βασικών Ευρημάτων.....	102
9.2 Προτάσεις για τη Βέλτιστη Αξιοποίηση των Πυρηνικών και των ΑΠΕ	102
9.3 Κατευθύνσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	103
10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	105

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1 <i>Εγκατεστημένα ή υπό ανάπτυξη έργα SMR παγκοσμίως</i>	23
Εικόνα 2 <i>Απεικόνιση του πειράματος πυρηνικής σύντηξης NIF...</i>	25
Εικόνα 3 <i>Φωτοβολταϊκό πάρκο 100 MW στη Λεμεσό</i>	42
Εικόνα 4 <i>Αιολικό πάρκο</i>	50
Εικόνα 5 <i>υδροηλεκτρικοί σταθμός</i>	55
Εικόνα 6 <i>Είδη στερεής βιομάζας</i>	61
Εικόνα 7 <i>Μπαταρία ιόντων λιθίου 48V</i>	75
Εικόνα 8 <i>Το πρώτο εργοστάσιο συμπιεσμένου αέρα για αποθήκευση ενέργειας σε βιομηχανική κλίμακα στον κόσμο βόρεια Γερμανία (1978).</i>	79

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενεργειακή κρίση, οι περιβαλλοντικές ανησυχίες και η ανάγκη για βιώσιμη ανάπτυξη έχουν στρέψει το ενδιαφέρον παγκοσμίως στη διαφοροποίηση του ενεργειακού μείγματος. Οι χώρες αναζητούν λύσεις που μπορούν να υποστηρίξουν αξιόπιστα την ενεργειακή ζήτηση, ενώ παράλληλα μειώνουν τις εκπομπές άνθρακα και περιορίζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στο πλαίσιο αυτό, η πυρηνική ενέργεια και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν δύο βασικούς άξονες. Η πυρηνική ενέργεια χαρακτηρίζεται από τη δυνατότητά της να παράγει σταθερά και σε μεγάλες ποσότητες ενέργεια χωρίς να παράγει CO₂, ενώ οι ΑΠΕ, όπως η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια, στηρίζονται σε φυσικούς πόρους με ελάχιστη περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο να εξετάσει τη συμβολή της πυρηνικής ενέργειας και των ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό μείγμα και να διερευνήσει πώς αυτές οι δύο τεχνολογίες μπορούν να συνδυαστούν για να επιτευχθεί ένα βιώσιμο και αξιόπιστο ενεργειακό μέλλον. Συγκεκριμένα, η εργασία θα αναλύσει τις δυνατότητες της πυρηνικής ενέργειας ως σταθερής πηγής, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των ΑΠΕ και τις προοπτικές που προσφέρουν για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών χωρίς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τελικός στόχος είναι η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να συνεργαστούν και να συμβάλουν στη βιώσιμη ανάπτυξη.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, θα χρησιμοποιηθούν βιβλιογραφική ανασκόπηση και ανάλυση παραδειγμάτων χωρών που έχουν εφαρμόσει και τις δύο τεχνολογίες στο ενεργειακό τους μείγμα. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει:

- **Συλλογή Δεδομένων και Βιβλιογραφίας:** Εξερεύνηση επιστημονικών άρθρων, εκθέσεων και μελετών περίπτωσης για την πυρηνική ενέργεια και τις ΑΠΕ.
- **Συγκριτική Ανάλυση:** Σύγκριση της απόδοσης, του κόστους, των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της πυρηνικής ενέργειας σε σχέση με τις ΑΠΕ.

- **Case Studies:** Ανάλυση χωρών που χρησιμοποιούν και τις δύο πηγές (π.χ., Γαλλία) και των αποτελεσμάτων τους.

Η εργασία είναι δομημένη σε 10 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εισαγωγή, ενώ στα επόμενα κεφάλαια αναλύονται τα ακόλουθα:

- **Κεφάλαιο 2:** Περιγράφεται η έννοια του ενεργειακού μείγματος και η ανάγκη για βιώσιμη ανάπτυξη.
- **Κεφάλαιο 3:** Εξετάζεται η πυρηνική ενέργεια στο σύγχρονο ενεργειακό μείγμα.
- **Κεφάλαιο 4:** Παρουσιάζονται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η ανάπτυξή τους.
- **Κεφάλαιο 5:** Γίνεται συγκριτική ανάλυση της πυρηνικής ενέργειας έναντι των ΑΠΕ.
- **Κεφάλαιο 6:** Αναλύονται οι συνέργειες και οι συνδυαστικές λύσεις για ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον.
- **Κεφάλαιο 7:** Περιγράφεται η οικονομική ανάλυση και οι πολιτικές διαστάσεις.
- **Κεφάλαιο 8:** Παρουσιάζονται οι προοπτικές για το μέλλον.
- **Κεφάλαιο 9:** Συμπεράσματα και προτάσεις για τη βέλτιστη χρήση των ενεργειακών πηγών.
- **Κεφάλαιο 10:** Παρατίθενται οι βιβλιογραφικές αναφορές.

2. ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΕΙΓΜΑ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

2.1 Ορισμός και έννοια του ενεργειακού μείγματος

Ο όρος *ενεργειακό μείγμα* αναφέρεται στο σύνολο των πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μια χώρα για την κάλυψη των ενεργειακών της αναγκών, με έμφαση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πηγές αυτές περιλαμβάνουν ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (όπως η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική), πυρηνική ενέργεια, καθώς και συμβατικά ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο).

Ο σχεδιασμός ενός ενεργειακού μείγματος αποσκοπεί στην εξισορρόπηση μεταξύ ενεργειακής επάρκειας, περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και οικονομικής αποδοτικότητας. Η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) αποτελεί καθοριστικό κριτήριο στον ενεργειακό σχεδιασμό, ιδίως στο πλαίσιο της παγκόσμιας προσπάθειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

Ο συνδυασμός πυρηνικής ενέργειας και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θεωρείται σήμερα μία από τις πλέον αποτελεσματικές στρατηγικές για την επίτευξη ενός ενεργειακού συστήματος χαμηλών εκπομπών, το οποίο να είναι ταυτόχρονα αξιόπιστο και περιβαλλοντικά βιώσιμο (1).

2.2 Η ανάγκη για βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση

Η βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση αναφέρεται στη διαδικασία αλλαγής του ενεργειακού συστήματος μιας κοινωνίας από ρυπογόνες και μη ανανεώσιμες πηγές (όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο) σε καθαρές, ανανεώσιμες και βιώσιμες πηγές ενέργειας (όπως η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική και η γεωθερμική).

Η ανάγκη για αυτή τη μετάβαση προκύπτει από τις σοβαρές περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα. Η καύση τους συμβάλλει σημαντικά στην κλιματική αλλαγή, μέσω της εκπομπής μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), γεγονός που οδηγεί σε ακραία καιρικά φαινόμενα, άνοδο της στάθμης της θάλασσας και υποβάθμιση των οικοσυστημάτων. Επιπλέον, οι πόροι αυτοί είναι πεπερασμένοι και η εξόρυξή τους καθίσταται όλο και πιο δαπανηρή και ενεργοβόρα,

επιβαρύνοντας την ενεργειακή ασφάλεια και το οικονομικό κόστος. Αντίθετα, η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών, στην προστασία της δημόσιας υγείας και στην ενίσχυση της σταθερότητας του ενεργειακού εφοδιασμού. Παρά τις αρχικές προκλήσεις κόστους, οι τεχνολογίες βιώσιμης ενέργειας προσφέρουν οικονομικά οφέλη, όπως η δημιουργία θέσεων εργασίας σε αναδυόμενους τομείς και η μείωση των δαπανών υγειονομικής περίθαλψης που σχετίζονται με τη ρύπανση.

Με τη στήριξη καινοτομίας και τεχνολογιών, όπως τα έξυπνα δίκτυα και το blockchain, η βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερη διαφάνεια και αποδοτικότητα στη διαχείριση ενέργειας, συμβάλλοντας παράλληλα στη δημιουργία ενός πιο ανθεκτικού παγκόσμιου οικονομικού συστήματος. Αυτή η προσέγγιση διασφαλίζει ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον, επιτρέποντας τη συνεχιζόμενη οικονομική ανάπτυξη και μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις για τις μελλοντικές γενιές (2).

2.3 Κλιματική αλλαγή και οι επιπτώσεις της στο ενεργειακό μείγμα

Η κλιματική αλλαγή αναφέρεται στις μεταβολές που προκύπτουν από την υπερβολική αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Η εκπομπή αερίων όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και το μεθάνιο (CH₄) οδηγεί στην παγίδευση θερμότητας, προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας της Γης. Αν και το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι κρίσιμο για τη σταθερότητα της θερμοκρασίας, η υπερβολική ρύπανση επιβαρύνει τον πλανήτη.

Οι συνέπειες περιλαμβάνουν την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, την εκδήλωση ακραίων καιρικών φαινομένων και την υποχώρηση των πάγων, γεγονότα που καταδεικνύουν την ανάγκη για διεθνείς πρωτοβουλίες, όπως το Πρωτόκολλο του Κιότο. Αυτό το διεθνές συμφωνητικό, που υιοθετήθηκε το 1997 στην Ιαπωνία και τέθηκε σε εφαρμογή το 2005, αποσκοπεί στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από ανεπτυγμένες χώρες, προκειμένου να περιοριστεί η παγκόσμια υπερθέρμανση. Σύμφωνα με το Πρωτόκολλο, οι χώρες δεσμεύονται να περιορίσουν τις εκπομπές τους κατά περίπου 5% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 για την περίοδο 2008-2012. Οι αλλαγές που προκαλεί η υπερθέρμανση του πλανήτη επηρεάζουν τόσο τα οικοσυστήματα όσο και τη

βιοποικιλότητα, με σοβαρές κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες. Η κλιματική αλλαγή έχει σημαντικές επιπτώσεις στο ενεργειακό μείγμα, οδηγώντας σε ανακατατάξεις στις πηγές ενέργειας και προωθώντας την ανάπτυξη καθαρών και ανανεώσιμων πηγών. Οι συνέπειες περιλαμβάνουν αυξημένη ζήτηση ενέργειας λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων, αλλαγές στην απόδοση των ενεργειακών υποδομών και ενίσχυση της μετάβασης σε ανανεώσιμες πηγές που μειώνουν τις εκπομπές CO₂ και την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα.

Αν και η **πυρηνική ενέργεια** δεν κατατάσσεται στις ανανεώσιμες πηγές, συμβάλλει επίσης στη μείωση των εκπομπών άνθρακα και ενισχύει τη σταθερότητα του ενεργειακού μείγματος. Έτσι, καθαρές τεχνολογίες ενέργειας, τόσο ανανεώσιμες όσο και χαμηλών εκπομπών CO₂, διαδραματίζουν ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στη διαμόρφωση της ενεργειακής πολιτικής (3).

2.4 Ο ρόλος της πυρηνικής ενέργειας και των ΑΠΕ στη μείωση των εκπομπών CO₂

Η πυρηνική ενέργεια και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν βασικούς πυλώνες για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και τη μετάβαση προς ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα. Η πυρηνική ενέργεια προσφέρει σταθερή και υψηλής απόδοσης παραγωγή ηλεκτρισμού, με ελάχιστες έμμεσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τη ζήτηση ενέργειας, ακόμη και σε περιόδους μειωμένης διαθεσιμότητας των ΑΠΕ λόγω μεταβλητών καιρικών συνθηκών.

Από την άλλη πλευρά, οι ΑΠΕ μειώνουν την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και επιτρέπουν την αποκέντρωση της παραγωγής ενέργειας, αξιοποιώντας εγχώριους φυσικούς πόρους. Η συμπληρωματική χρήση πυρηνικής ενέργειας και ΑΠΕ επιτρέπει την εξισορρόπηση της προσφοράς, την αποδοτική κάλυψη της ζήτησης και τη σημαντική μείωση των συνολικών εκπομπών.

Ο συνδυασμός των δύο τεχνολογιών προσφέρει:

1. **Ενεργειακή σταθερότητα και αποδοτικότητα:** Η πυρηνική ενέργεια λειτουργεί ως πηγή βάσης, καλύπτοντας τις ανάγκες σε ηλεκτρισμό όταν οι ΑΠΕ δεν

επαρκούν, ενώ οι ΑΠΕ προσφέρουν ευελιξία και συμβάλλουν στην αποκεντρωμένη παραγωγή.

2. **Μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων:** Ο συνδυασμός οδηγεί σε δραστική υποκατάσταση του άνθρακα, του πετρελαίου και του φυσικού αερίου.
3. **Ενίσχυση της αειφορίας και της ενεργειακής ασφάλειας:** Η συνδυαστική προσέγγιση επιταχύνει τη μετάβαση σε ένα ενεργειακό μέλλον χαμηλών εκπομπών, ενισχύοντας παράλληλα την ανθεκτικότητα του συστήματος (3) (4).

3. ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ: ΕΞΕΛΙΞΗ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΡΟΛΟΣ ΣΤΟ ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΕΙΓΜΑ

3.1 Ιστορική αναδρομή και ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας

Η ιστορική εξέλιξη της πυρηνικής ενέργειας αποτελεί σημαντικό κεφάλαιο στην επιστημονική πρόοδο του 20ού και 21ου αιώνα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά ορόσημα:

- **1896:** Ο Henri Becquerel ανακαλύπτει το φαινόμενο της ραδιενέργειας.
- **1898–1903:** Η Marie Curie, μαζί με τον Pierre Curie, απομονώνουν το ράδιο και το πολώνιο [5].
- **1938:** Οι Otto Hahn και Fritz Strassmann ανακαλύπτουν την πυρηνική σχάση. Ο Lise Meitner ερμηνεύει θεωρητικά το φαινόμενο (6).
- **1942–1945:** Εκτελείται το Πρόγραμμα Μανχάταν υπό τον Robert Oppenheimer, με στόχο την κατασκευή πυρηνικών όπλων (5), (7).
- **1945:** Ρίψη ατομικών βομβών σε Χιροσίμα και Ναγκασάκι. Εκκινείται διεθνής συζήτηση για την ειρηνική χρήση της πυρηνικής ενέργειας (5), (7).
- **1951:** Ξεκινά το πρόγραμμα "**Atoms for Peace**", το οποίο δρομολογεί τις πρώτες ειρηνικές χρήσεις της πυρηνικής τεχνολογίας (8).
- **1953:** Ο Dwight D. Eisenhower παρουσιάζει επισήμως την πρωτοβουλία στον ΟΗΕ (7).
- **1954:** Λειτουργεί ο πρώτος εμπορικός πυρηνικός αντιδραστήρας στο Obninsk της Σοβιετικής Ένωσης (8).
- **1960–1980:** Επέκταση της πυρηνικής ενέργειας ως βασικής πηγής ηλεκτρισμού σε πολλές χώρες.
- **1979:** Το ατύχημα στο **Three Mile Island** (ΗΠΑ) προκαλεί έντονη δημόσια ανησυχία και νέες ρυθμίσεις.

- **1986:** Το ατύχημα στο **Τσερνόμπιλ** επηρεάζει καθοριστικά τη διεθνή στάση απέναντι στην πυρηνική ενέργεια (9).
- **1990–2000:** Επιβράδυνση επενδύσεων και αυξημένος δημόσιος σκεπτικισμός.
- **2000–σήμερα:** Αναζωπύρωση ενδιαφέροντος για πυρηνική ενέργεια λόγω κλιματικής κρίσης και ανάγκης για απανθρακοποίηση.
- **Σύγχρονες τεχνολογίες:** Εμφάνιση μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMRs) και προγράμματα σύντηξης όπως το ITER (10).

3.2. Τεχνολογίες και εξελίξεις στην πυρηνική ενέργεια

3.2.1. Αντιδραστήρες Πρώτης, Δεύτερης και Τρίτης Γενιάς

Η εξέλιξη των πυρηνικών αντιδραστήρων οργανώνεται σε γενιές, καθεμία εκ των οποίων σηματοδοτεί σημαντικές βελτιώσεις τόσο σε τεχνικά όσο και σε λειτουργικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά. Η κατάταξη αυτή αντικατοπτρίζει την πρόοδο της τεχνολογίας και την ενσωμάτωση σύγχρονων μέτρων ασφάλειας, αποδοτικότητας και περιβαλλοντικής συμμόρφωσης.

Οι πρώτοι εμπορικοί αντιδραστήρες, που αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1950 και 1960, κατατάσσονται στην πρώτη γενιά. Οι αντιδραστήρες αυτοί βασίστηκαν κυρίως στην τεχνολογία των αντιδραστήρων ελαφρού ύδατος (Light Water Reactors – LWR) και αποτέλεσαν προσαρμογές στρατιωτικών ναυτικών πρωτοτύπων. Ήταν κατά κύριο λόγο πειραματικοί σταθμοί, σχεδιασμένοι για περιορισμένο χρόνο λειτουργίας και χωρίς αυστηρά κριτήρια οικονομικής αποδοτικότητας ή διαχείρισης αποβλήτων. Παρά την ιστορική σημασία τους, οι αντιδραστήρες πρώτης γενιάς παρουσίαζαν περιορισμένη ασφάλεια, μικρή διάρκεια ζωής και υψηλό κόστος συντήρησης. Σταδιακά αποσύρθηκαν ή αντικαταστάθηκαν από εξελιγμένα συστήματα δεύτερης γενιάς.

Η δεύτερη γενιά πυρηνικών αντιδραστήρων, η οποία κυριάρχησε από τη δεκαετία του 1970 έως και τις αρχές του 1990, αποτέλεσε τη βάση για την εμπορική εξάπλωση της πυρηνικής ενέργειας. Οι αντιδραστήρες αυτής της γενιάς ήταν πλέον τυποποιημένοι και κατασκευάζονταν σε μεγάλη κλίμακα, με βελτιώσεις στην απόδοση και την ασφάλεια. Οι

κυριότεροι τύποι ήταν οι PWR (Pressurized Water Reactor) και οι BWR (Boiling Water Reactor), οι οποίοι χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό και επιβραδυντή. Τα βασικά χαρακτηριστικά περιλάμβαναν ενισχυμένα συστήματα ελέγχου, εξελιγμένα μέτρα ασφαλείας και αυξημένη απόδοση. Ιδιαίτερη σημασία είχε η εισαγωγή των συστημάτων ψύξης έκτακτης ανάγκης, τα οποία επέτρεπαν την αποτροπή τήξης του πυρήνα σε περίπτωση βλάβης του πρωτεύοντος κυκλώματος. Παρότι οι αντιδραστήρες αυτοί αποτέλεσαν τη ραχοκοκαλιά του πυρηνικού δυναμικού πολλών χωρών, παρέμεναν ευάλωτοι σε ανθρώπινα σφάλματα και εξωτερικούς κινδύνους, όπως αποδείχθηκε στο ατύχημα του Three Mile Island το 1979.

Οι αντιδραστήρες τρίτης γενιάς, που εμφανίστηκαν από τη δεκαετία του 1990 και εξής, ενσωμάτωσαν κρίσιμες τεχνολογικές καινοτομίες με στόχο την περαιτέρω αύξηση της ασφάλειας, της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας. Εκτός από τις τεχνικές βελτιώσεις στον σχεδιασμό και τα υλικά, καθιερώθηκαν παθητικά συστήματα ασφαλείας – μηχανισμοί που λειτουργούν αυτόματα χωρίς την ανάγκη εξωτερικής παροχής ενέργειας ή ανθρώπινης επέμβασης σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Αυτά βασίζονται σε φυσικές διαδικασίες, όπως η φυσική κυκλοφορία του ψυκτικού ή η θερμική διαστολή, ώστε να αποτρέπεται η υπερθέρμανση και να διατηρείται η ψύξη του πυρήνα.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της γενιάς είναι οι αντιδραστήρες EPR (European Pressurized Reactor) και AP1000. Οι EPR διαθέτουν διπλά συστήματα ασφαλείας και ενισχυμένα συστήματα περιορισμού της ραδιενέργειας, ενώ οι AP1000 χρησιμοποιούν πλήρως παθητικά συστήματα για τα πρώτα 72 κρίσιμα ώρες ενός ατυχήματος. Αυτοί οι αντιδραστήρες χαρακτηρίζονται από αυξημένη διάρκεια ζωής (έως και 60 έτη), μειωμένα κόστη λειτουργίας λόγω τυποποιημένων σχεδιασμών και ενισχυμένη ανθεκτικότητα σε ακραίες καταστάσεις, περιλαμβανομένων σεισμών και απωλειών ισχύος. Πολλές από τις τεχνολογίες τρίτης γενιάς αποτέλεσαν τη βάση για τον σχεδιασμό των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMRs) και τη μετεξέλιξη στην τέταρτη γενιά αντιδραστήρων.

Η πορεία εξέλιξης από την πρώτη προς την τρίτη γενιά αποτυπώνει τη συνεχή πρόοδο στον τομέα της πυρηνικής τεχνολογίας, με έμφαση στην ασφάλεια, τη λειτουργικότητα και τη δημόσια αποδοχή. Παράλληλα, αποτελεί θεμέλιο για τις μελλοντικές εξελίξεις και την

ενσωμάτωση της πυρηνικής ενέργειας σε ένα βιώσιμο και ασφαλές ενεργειακό μείγμα (7), (10).

3.2.2. Αντιδραστήρες Τέταρτης Γενιάς

Η τέταρτη γενιά πυρηνικών αντιδραστήρων (Generation IV – Gen-IV) αποτελεί αντικείμενο εντατικής έρευνας και διεθνούς συνεργασίας, με στόχο την ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων που θα ανταποκρίνονται στις σύγχρονες ανάγκες για αυξημένη πυρηνική ασφάλεια, βελτιωμένη απόδοση και μακροχρόνια βιωσιμότητα. Οι Gen-IV αντιδραστήρες σχεδιάζονται με βάση έξι βασικά κριτήρια: αυξημένη ασφάλεια, ελαχιστοποίηση ραδιενεργών αποβλήτων, ανθεκτικότητα στη διάδοση πυρηνικών υλικών, βελτιστοποίηση της χρήσης πόρων, οικονομική ανταγωνιστικότητα και ευελιξία ως προς τις χρήσεις τους, όπως παραγωγή υδρογόνου, τηλεθέρμανση και θερμική ενέργεια για βιομηχανικές διεργασίες.

Η σημαντικότερη καινοτομία τους έγκειται στην ενσωμάτωση εγγενών και παθητικών χαρακτηριστικών ασφαλείας. Οι μηχανισμοί αυτοί βασίζονται σε φυσικά φαινόμενα, όπως η θερμική διαστολή, η φυσική κυκλοφορία ψυκτικών ρευστών και η βαρύτητα, με αποτέλεσμα την αυτονομία των αντιδραστήρων σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης χωρίς την ανάγκη εξωτερικής παρέμβασης. Έτσι, μειώνεται ο κίνδυνος ατυχημάτων τύπου Τσερνόμπιλ ή Φουκουσίμα και ενισχύεται η εμπιστοσύνη του κοινού στην πυρηνική τεχνολογία.

Παράλληλα, εξελίσσονται τεχνολογίες που αξιοποιούν εναλλακτικά καύσιμα, όπως το ανακυκλωμένο πλουτώνιο ή το θόριο, αυξάνοντας τη βιωσιμότητα των πόρων και μειώνοντας τη ραδιοτοξικότητα των αποβλήτων. Καινοτόμα ψυκτικά μέσα, όπως το υγρό νάτριο, τα τήγματα αλάτων και το ήλιο, επιτρέπουν λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες με υψηλότερη θερμοδυναμική απόδοση και χαμηλότερη πίεση, ενισχύοντας την ασφάλεια και την οικονομική αποδοτικότητα (11).

Οι κύριοι τύποι αντιδραστήρων που αναπτύσσονται στο πλαίσιο της Gen-IV περιλαμβάνουν:

- Ταχέως νετρονίων αντιδραστήρες (Fast Neutron Reactors – FNR), οι οποίοι επιτρέπουν την καύση πλουτωνίου και την αναπαραγωγή καυσίμου από ουράνιο-238.
- Αντιδραστήρες υγρών αλάτων (Molten Salt Reactors – MSR), που χρησιμοποιούν καύσιμο διαλυμένο σε ρευστό άλας, προσφέροντας χαμηλή πίεση λειτουργίας και δυνατότητα άμεσης διακοπής της αντίδρασης.
- Αερόψυκτοι υψηλής θερμοκρασίας αντιδραστήρες (High Temperature Gas-cooled Reactors – HTGR), οι οποίοι χρησιμοποιούν ήλιο ως ψυκτικό και παρέχουν θερμοκρασίες κατάλληλες για παραγωγή υδρογόνου.
- Αντιδραστήρες ψύξης με υγρά μέταλλα (Lead-cooled ή Sodium-cooled Fast Reactors – LFR/SFR), που επιτυγχάνουν υψηλή αποδοτικότητα και αντοχή σε ακτινοβολία.

Οι τεχνολογίες αυτές παρέχουν δυνατότητα για κλειστό κύκλο καυσίμου, μέσω ανακύκλωσης πυρηνικών υλικών και μείωσης της ανάγκης για αποθήκευση υψηλά ραδιενεργών αποβλήτων. Αν και καμία εξ αυτών δεν έχει ακόμη υιοθετηθεί σε πλήρη εμπορική κλίμακα, σημαντικά πιλοτικά έργα βρίσκονται σε εξέλιξη, ιδίως στην Κίνα (π.χ. CFR-600), τις ΗΠΑ (Natrium project) και τη Ρωσία (BREST-OD-300).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση συμμετέχει ενεργά μέσω της πλατφόρμας SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform), με σκοπό την ενοποίηση ρυθμιστικών πλαισίων και την προώθηση καινοτομίας. Οι Gen-IV αντιδραστήρες αναμένεται να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο σε ένα μέλλον ενεργειακής ουδετερότητας ως σταθερές και καθαρές πηγές ενέργειας, ιδίως σε συνδυασμό με τις διαλειμματικές ανανεώσιμες πηγές.

Η καινοτομία των Gen-IV αντιδραστήρων ενισχύει τη σταθερότητα των ενεργειακών δικτύων, περιορίζει την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και προσφέρει μία μακροπρόθεσμη και αξιόπιστη λύση στην παγκόσμια ενεργειακή πρόκληση (11), (12).

3.2.3. Μικροί Αρθρωτοί Αντιδραστήρες (SMRs)

Οι Μικροί Αρθρωτοί Αντιδραστήρες (Small Modular Reactors – SMRs) αποτελούν καινοτόμο τεχνολογία της πυρηνικής ενέργειας, σχεδιασμένη να προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία, αυξημένη ασφάλεια και μειωμένο κόστος εγκατάστασης. Πρόκειται για αντιδραστήρες χαμηλής ισχύος (έως 300 MWe), οι οποίοι κατασκευάζονται εργοστασιακά και μεταφέρονται ως προκατασκευασμένες μονάδες στο σημείο εγκατάστασης, μειώνοντας έτσι τον χρόνο κατασκευής και τις απαιτήσεις χωροθέτησης.

Η τεχνολογική εξέλιξη των SMRs εστιάζει στη χρήση παθητικών συστημάτων ασφάλειας, την ενσωμάτωση των κύριων συστατικών σε ενιαίο κέλυφος (integral design) και την αυξημένη θερμική ευστάθεια. Παρά την ελαφρώς μειωμένη θερμική απόδοση ορισμένων σχεδιασμών (ιδίως στους LWR-SMR), το μικρό τους μέγεθος ενισχύει την ψύξη και μειώνει τις απαιτήσεις για ζώνες έκτακτης ανάγκης.

Οι βασικές κατηγορίες SMRs περιλαμβάνουν:

1. Μοναδιαίους LWR-SMRs, που χρησιμοποιούν καθιερωμένη τεχνολογία ελαφρού ύδατος.
2. Πολυ-μονάδιους LWR-SMRs, οι οποίοι ενσωματώνουν πολλούς αντιδραστήρες σε κοινή υποδομή.
3. Κινητούς/μεταφερόμενους SMRs, κατάλληλους για απομακρυσμένες περιοχές ή στρατιωτικές εφαρμογές.
4. Αντιδραστήρες Τέταρτης Γενιάς (Gen IV SMRs), που χρησιμοποιούν υγρό μέταλλο ή τήγματα αλάτων ως ψυκτικό μέσο.
5. Μικροαντιδραστήρες (Micro Modular Reactors – MMRs), πολύ μικρής ισχύος, για περιοχές χωρίς πρόσβαση σε κεντρικό δίκτυο.

Ανάμεσα στα πιο ώριμα σχέδια περιλαμβάνονται ο CAREM (Αργεντινή), ο ACPR50S (Κίνα), και ο KLT-40S (Ρωσία), με τον τελευταίο να βρίσκεται ήδη σε λειτουργία σε πλωτή μονάδα. Πολλά σχέδια βρίσκονται σήμερα σε διαδικασία αδειοδότησης και αναμένεται να τεθούν σε λειτουργία έως το 2030.

Σύμφωνα με στοιχεία του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ), περισσότερα από 70 σχέδια SMRs βρίσκονται σε φάσεις ανάπτυξης, με ποσοστιαία αύξηση της τάξης του 40% από το 2018, γεγονός που καταδεικνύει την αυξανόμενη διεθνή αποδοχή της τεχνολογίας.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των SMRs περιλαμβάνουν:

- Ενοποιημένα συστήματα: Όλα τα επιμέρους εξαρτήματα του κυκλώματος ατμού βρίσκονται σε κοινό δοχείο, απλοποιώντας τη λειτουργία και συντήρηση.
- Εγγενής ασφάλεια: Η αυξημένη αναλογία επιφάνειας/όγκου ενισχύει την παθητική ψύξη και την ασφάλεια σε περίπτωση διακοπής ισχύος.
- Μικρότερη χρήση καυσίμου: Περιορίζει την έκλυση ραδιενέργειας και μειώνει τις ζώνες προστασίας.
- Αρθρωτή σχεδίαση: Ευκολότερη μεταφορά και συναρμολόγηση, μειωμένα κόστη έργου.
- Ευελιξία στην εγκατάσταση: Μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στους τελικούς χρήστες, π.χ. σε απομονωμένες κοινότητες ή βιομηχανικές μονάδες.

Επιπρόσθετα, οι SMRs θεωρούνται κατάλληλοι για υβριδικά ενεργειακά σχήματα, όπως η συμπαραγωγή υδρογόνου, η αφαλάτωση θαλασσινού νερού και η υποστήριξη μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (VREs). Η δυνατότητά τους να ρυθμίζουν την παραγωγή ενέργειας τα καθιστά σημαντικό εργαλείο για τη σταθερότητα των ηλεκτρικών δικτύων και τη διαχείριση ζήτησης.

Συνολικά, οι SMRs συνδυάζουν τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα και μπορούν να διαδραματίσουν ουσιαστικό ρόλο στη βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση (13).



Εικόνα 1 *Εγκατεστημένα ή υπό ανάπτυξη έργα SMR παγκοσμίως. (Πηγή: [11])*

3.2.4. Τεχνολογία Σύντηξης και Σχάσης

Η πυρηνική ενέργεια μπορεί να παραχθεί μέσω δύο θεμελιωδών διαδικασιών: της πυρηνικής σχάσης και της πυρηνικής σύντηξης.

Η πυρηνική σχάση είναι η τεχνολογία που χρησιμοποιείται σήμερα σε όλους τους εμπορικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη διάσπαση ενός βαρέος πυρήνα, όπως του ουρανίου-235 ή του πλουτωνίου-239, σε δύο ελαφρύτερους πυρήνες, με ταυτόχρονη απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και νετρονίων. Αυτά τα νετρόνια μπορούν να προκαλέσουν νέες σχάσεις, οδηγώντας σε αλυσιδωτή αντίδραση. Το φαινόμενο αξιοποιείται για την παραγωγή θερμότητας, η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω συμβατικών συστημάτων ατμοστροβίλων.

Παρότι η τεχνολογία της σχάσης είναι ώριμη και εκτενώς εφαρμοσμένη, συνοδεύεται από σοβαρές προκλήσεις: τη διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων, τον κίνδυνο ατυχημάτων (όπως στα Τσερνόμπιλ και Φουκουσίμα) και τις ανησυχίες για εξάπλωση πυρηνικών υλικών. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, έχουν αναπτυχθεί προηγμένες τεχνολογίες αντιδραστήρων με ενσωματωμένα συστήματα ασφάλειας, καθώς και προγράμματα για την ανακύκλωση καυσίμων και την ελαχιστοποίηση αποβλήτων.

Αντιθέτως, η πυρηνική σύντηξη βασίζεται στην ένωση δύο ελαφρών πυρήνων (π.χ. δευτέρου και τριτίου) σε έναν βαρύτερο (ήλιο), με ταυτόχρονη απελευθέρωση τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας. Η διαδικασία αυτή μιμείται τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στον ήλιο και στα άστρα. Τα βασικά πλεονεκτήματα της σύντηξης περιλαμβάνουν:

- Μεγάλη ενεργειακή απόδοση (πολλαπλάσια της σχάσης),
- Ελάχιστα και βραχύβια ραδιενεργά απόβλητα,
- Απουσία κινδύνου αλυσιδωτής αντίδρασης και εγγενής ασφάλεια (αν διακοπεί η αντίδραση, σταματά αυτόματα).

Ωστόσο, η τεχνολογία παραμένει πειραματική, κυρίως λόγω των εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων που απαιτούνται για την επίτευξη σταθερής σύντηξης. Ερευνητικές προσπάθειες, όπως το ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) στη Γαλλία — ένα από τα μεγαλύτερα διεθνή επιστημονικά εγχειρήματα — αποσκοπούν στην επίτευξη θετικής ενεργειακής απόδοσης ($Q > 1$) και σταδιακά στην εμπορική αξιοποίηση της σύντηξης.

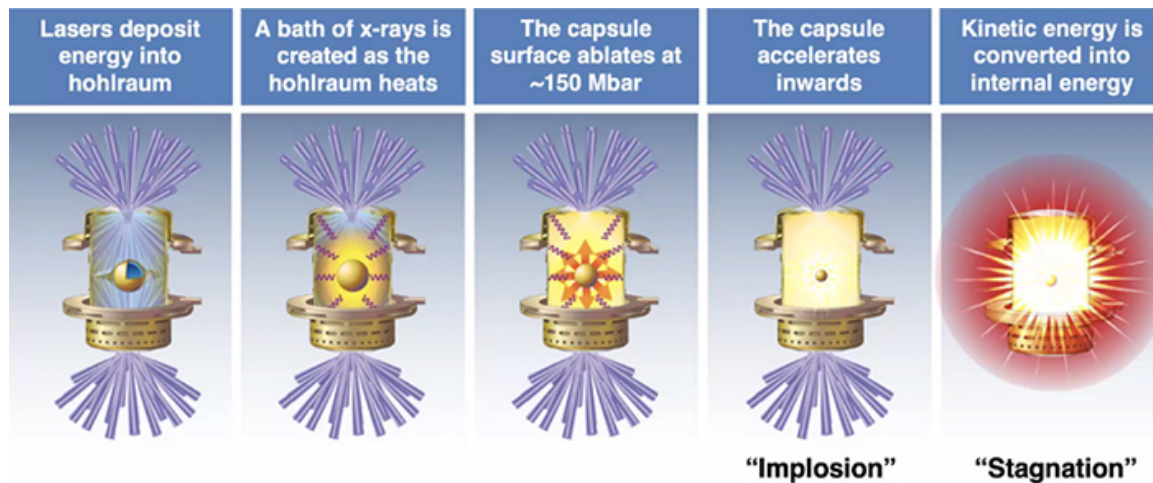
Επιπλέον, εναλλακτικές τεχνολογίες σύντηξης βρίσκονται υπό μελέτη, όπως:

- Μαγνητική συγκράτηση πλάσματος (π.χ. tokamaks και stellarators),
- Αδρανειακή σύντηξη με λέιζερ (π.χ. NIF στις ΗΠΑ),
- Προσεγγίσεις μικρής κλίμακας από νεοφυείς επιχειρήσεις (fusion startups) που εστιάζουν στην επιτάχυνση της καινοτομίας με ευέλικτα μοντέλα.

Παρόλο που η εμπορική χρήση της σύντηξης προβλέπεται για τα επόμενα 20–30 χρόνια, οι πρόσφατες επιτυχίες σε εργαστηριακά πειράματα (όπως η επίτευξη καθαρού ενεργειακού κέρδους από το NIF το 2022) δημιουργούν αισιοδοξία για το μέλλον της τεχνολογίας.

Συμπερασματικά, η τεχνολογία της σχάσης παραμένει η βάση της σημερινής πυρηνικής παραγωγής ενέργειας, ενώ η σύντηξη αντιπροσωπεύει μια ελπιδοφόρα αλλά ακόμη υπό

ανάπτυξη λύση για την αντιμετώπιση των ενεργειακών και περιβαλλοντικών προκλήσεων του μέλλοντος (14), (15).



Εικόνα 2 Απεικόνιση του πειράματος πυρηνικής σύντηξης NIF. (Πηγή: [2])

3.2.5. Διαχείριση Πυρηνικών Αποβλήτων

Η διαχείριση πυρηνικών αποβλήτων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους και πιο ευαίσθητους τομείς της πυρηνικής τεχνολογίας, καθώς σχετίζεται άμεσα με την ασφάλεια του περιβάλλοντος, τη δημόσια υγεία και την κοινωνική αποδοχή της πυρηνικής ενέργειας.

Τα πυρηνικά απόβλητα είναι υλικά που περιέχουν ραδιενεργά ισότοπα και προέρχονται κυρίως από τον πυρηνικό κύκλο καυσίμου, δηλαδή τη λειτουργία των αντιδραστήρων, την επεξεργασία και την αποσυναρμολόγηση εγκαταστάσεων. Χωρίζονται σε χαμηλής, μέσης και υψηλής ραδιενέργειας απόβλητα, ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας και τη διάρκεια ζωής τους. Τα υψηλής ραδιενέργειας απόβλητα, όπως τα χρησιμοποιημένα καύσιμα, παραμένουν επικίνδυνα για χιλιάδες χρόνια.

Τα ραδιενεργά απόβλητα εκπέμπουν διάφορες μορφές ακτινοβολίας (άλφα, βήτα, γάμμα), με διαφορετική διεισδυτικότητα και βιολογική επίδραση. Αν και τα σωματίδια άλφα δεν διαπερνούν το ανθρώπινο δέρμα, γίνονται εξαιρετικά επικίνδυνα εάν εισπνευστούν ή

καταποθούν. Επιπλέον, η θερμότητα που εκλύεται από τη διάσπαση των ραδιονουκλεϊδίων μπορεί να προκαλέσει θερμική ρύπανση στο υπέδαφος και αλλαγές στη γεωχημεία του χώρου αποθήκευσης.

Οι κίνδυνοι για την υγεία περιλαμβάνουν αυξημένο κίνδυνο λευχαιμίας, καρκίνου, καρδιαγγειακών νόσων και γενετικών ανωμαλιών, ιδιαίτερα όταν υπάρχει ανεπαρκής απομόνωση των αποβλήτων από το οικοσύστημα. Η πιθανή διαρροή ραδιενεργών υλικών προς τα υπόγεια ύδατα αποτελεί βασική πηγή ανησυχίας, γι' αυτό και η γεωλογική σταθερότητα των αποθετικών σχηματισμών είναι καθοριστική.

Η σύγχρονη τεχνολογική προσέγγιση περιλαμβάνει:

- Προσωρινή αποθήκευση σε ειδικά διαμορφωμένες δεξαμενές ή "ξηρές κάψουλες" σε επιφανειακές εγκαταστάσεις,
- Μακροπρόθεσμη απομόνωση σε γεωλογικά βαθιές αποθήκες (deep geological repositories),
- Καινοτόμες τεχνικές όπως η πυρηνική μεταστοιχείωση (nuclear transmutation), μέσω της οποίας ραδιενεργά ισότοπα μετατρέπονται σε σταθερότερα, μικρότερης διάρκειας ζωής προϊόντα,
- Ανακύκλωση καυσίμων (π.χ. MOX – μεικτά οξείδια ουρανίου-πλουτωνίου) με στόχο τη μείωση του όγκου και της τοξικότητας των αποβλήτων.

Η πυρηνική μεταστοιχείωση, παρόλο που βρίσκεται ακόμη υπό έρευνα, θεωρείται πολλά υποσχόμενη, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα δραστηκής μείωσης της διάρκειας ζωής και της ραδιοτοξικότητας ορισμένων μακροβίων ισοτόπων.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, έχουν αναπτυχθεί ή βρίσκονται σε εξέλιξη υπόγειες γεωλογικές εγκαταστάσεις αποθήκευσης. Παραδείγματα αποτελούν:

- η Onkalo στη Φινλανδία (η πρώτη πλήρως αδειοδοτημένη γεωλογική αποθήκη),
- το CIGEO στη Γαλλία,
- οι υποδομές της Σουηδίας και του Ηνωμένου Βασιλείου.

Αυτές οι εγκαταστάσεις βρίσκονται σε βάθη άνω των 400 μέτρων, εντός γεωλογικά σταθερών σχηματισμών, ώστε να εξασφαλίζεται η παθητική απομόνωση των ραδιενεργών υλικών χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης για χιλιάδες χρόνια.

Η διαχείριση πυρηνικών αποβλήτων αποτελεί τεχνολογικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό στοίχημα. Η ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών, η διεθνής συνεργασία, καθώς και η διαφάνεια προς το κοινό, είναι απαραίτητα στοιχεία για τη βιώσιμη διαχείριση της πυρηνικής ενέργειας στο μέλλον (16).

3.2.6. Συστήματα Παθητικής Ασφάλειας

Τα συστήματα παθητικής ασφάλειας αποτελούν μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στην τεχνολογία των σύγχρονων πυρηνικών αντιδραστήρων. Σε αντίθεση με τα ενεργά συστήματα ασφάλειας, τα οποία απαιτούν εξωτερική τροφοδοσία ενέργειας, αυτόματους μηχανισμούς ή ανθρώπινη παρέμβαση, τα παθητικά συστήματα βασίζονται σε απλές φυσικές αρχές, όπως η βαρύτητα, η πίεση, η θερμική διαστολή και η φυσική κυκλοφορία ρευστών.

Ο κύριος σκοπός των συστημάτων αυτών είναι η διατήρηση της θερμικής ισορροπίας του πυρήνα και η αποτροπή φαινομένων υπερθέρμανσης και λιώσιμου του καυσίμου σε περιπτώσεις απώλειας ισχύος (station blackout). Η ανάγκη για παθητικά μέτρα ασφάλειας αναδείχθηκε ιδιαίτερα μετά το ατύχημα της Φουκουσίμα (2011), όπου η απώλεια εξωτερικής ηλεκτροδότησης και η αποτυχία των ενεργών συστημάτων ψύξης οδήγησαν σε μερική τήξη των πυρήνων.

Στις τεχνολογίες παθητικής ασφάλειας περιλαμβάνονται:

- Παθητικοί συμπυκνωτές ατμού, οι οποίοι επιτρέπουν την απομάκρυνση θερμότητας χωρίς μηχανικά μέσα,
- Δεξαμενές ψυκτικού υγρού τοποθετημένες σε υπερυψωμένες θέσεις, ώστε να επιτυγχάνεται φυσική ροή ψύξης προς τον πυρήνα μέσω βαρύτητας,
- Συστήματα φυσικής συναγωγής σε θερμικούς εναλλάκτες ή επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας (π.χ. θωρακισμένα τοιχώματα), τα οποία απομακρύνουν τη θερμότητα

προς το περιβάλλον μέσω θερμικής αγωγής και ακτινοβολίας, χωρίς μηχανικά μέσα,

- Αυτόματοι μηχανισμοί ασφαλείας που ενεργοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως βαλβίδες τήξεως, καθώς και σχεδιαστικά χαρακτηριστικά με αρνητικό συντελεστή αντιδραστικότητας, τα οποία ενισχύουν τη σταθερότητα του αντιδραστήρα σε περιπτώσεις υπερθέρμανσης.

Τα παθητικά συστήματα σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν χωρίς εξωτερική παρέμβαση για αρκετές ώρες ή και ημέρες, προσφέροντας πολύτιμο χρόνο στους χειριστές για την αποκατάσταση της λειτουργίας του αντιδραστήρα ή την ασφαλή απενεργοποίησή του. Αυτό συνεισφέρει ουσιαστικά στην ενίσχυση της ασφάλειας των εγκαταστάσεων και στην αύξηση της κοινωνικής αποδοχής της πυρηνικής ενέργειας.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο αντιδραστήρας AP1000 της Westinghouse, ο οποίος μπορεί να διατηρήσει αυτόνομη παθητική ψύξη για τουλάχιστον 72 ώρες χωρίς εξωτερική παροχή ενέργειας ή ανθρώπινη παρέμβαση. Παρόμοια χαρακτηριστικά ενσωματώνουν και αντιδραστήρες τρίτης+ και τέταρτης γενιάς, όπως οι VVER-1200, ESBWR, και NuScale SMR.

Τα συστήματα παθητικής ασφάλειας αναμένεται να αποτελέσουν θεμέλιο της σχεδίασης όλων των μελλοντικών αντιδραστήρων, συνδυάζοντας απλότητα, αξιοπιστία και ανθεκτικότητα, και προσφέροντας έναν πιο ανθεκτικό και ασφαλή πυρηνικό σχεδιασμό στον 21ο αιώνα (17).

3.2.7. Τεχνολογίες Ανακύκλωσης Καυσίμων

Η ανακύκλωση πυρηνικών καυσίμων αποτελεί κρίσιμο πεδίο τεχνολογικής ανάπτυξης στον πυρηνικό κύκλο, με στόχο τόσο τη μείωση των ραδιενεργών αποβλήτων όσο και τη βέλτιστη αξιοποίηση των πυρηνικών πόρων. Αντί να απορρίπτονται τα χρησιμοποιημένα καύσιμα ως απόβλητα, επιδιώκεται η ανάκτηση χρήσιμων υλικών και η επανεισαγωγή τους στο ενεργειακό σύστημα. Οι βασικές τεχνολογίες ανακύκλωσης περιλαμβάνουν:

1. Επαναεμπλουτισμός και επαναχρησιμοποίηση ουρανίου: το ουράνιο που παραμένει στα χρησιμοποιημένα καύσιμα μπορεί να επανακτηθεί και να υποβληθεί σε επαναεμπλουτισμό για επαναχρησιμοποίηση σε αντιδραστήρες. Η διαδικασία αυτή μειώνει την ανάγκη για εξόρυξη και επεξεργασία νέου φυσικού ουρανίου και ενισχύει τη βιωσιμότητα του πυρηνικού κύκλου.
2. Καύσιμα μικτής οξείδωσης (MOX – Mixed Oxide Fuel): Τα MOX αποτελούνται από μίγμα διοξειδίου ουρανίου (UO_2) και διοξειδίου πλουτωνίου (PuO_2), το οποίο προέρχεται από επανεπεξεργασία χρησιμοποιημένων καυσίμων. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την αξιοποίηση του πλουτωνίου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας παράλληλα τον όγκο των αποβλήτων. Έχει ευρεία εφαρμογή σε χώρες όπως η Γαλλία και η Ιαπωνία.
3. Διαχωρισμός και μεταστοιχείωση (Partitioning and Transmutation): Η προσέγγιση αυτή συνίσταται στον επιλεκτικό διαχωρισμό των πιο επικίνδυνων μακρόβιων ραδιονουκλεϊδίων (όπως τα αμερίκιο, κούριο και νεπτύνιο) και την έκθεσή τους σε έντονες ροές νετρονίων για μεταστοιχείωση σε σταθερότερα ή βραχύβια ισότοπα. Παρότι βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο, η τεχνολογία υπόσχεται δραστική μείωση της μακροχρόνιας ραδιενέργειας και της ραδιοτοξικότητας των αποβλήτων.
4. Ανακύκλωση μέσω αντιδραστήρων τέταρτης γενιάς: Οι αντιδραστήρες τέταρτης γενιάς, όπως οι ταχείς πυρηνικοί αντιδραστήρες (fast reactors), είναι σχεδιασμένοι για την αποτελεσματική καύση πλουτωνίου και μεικτών καυσίμων, ενώ επιτρέπουν πολλαπλές ανακυκλώσεις του καυσίμου. Αυτό οδηγεί σε σημαντική μείωση του όγκου και της τοξικότητας των αποβλήτων και βελτιώνει τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα της πυρηνικής ενέργειας.
5. Απομακρυσμένα και αυτοματοποιημένα συστήματα επεξεργασίας: Οι νέες τεχνολογίες στοχεύουν στην απομακρυσμένη, ασφαλή και ρομποτικά υποβοηθούμενη επεξεργασία πυρηνικών καυσίμων, ελαχιστοποιώντας την ανθρώπινη έκθεση σε ραδιενέργεια. Παράλληλα, επιδιώκουν τη βελτιστοποίηση

της απόδοσης και τη μείωση περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ενισχύοντας την τεχνική και κοινωνική αποδοχή της ανακύκλωσης.

Η συνεχής πρόοδος στις τεχνολογίες ανακύκλωσης καυσίμων συνδέεται στενά με την ανάπτυξη ασφαλέστερων, αποδοτικότερων και περιβαλλοντικά φιλικών πυρηνικών συστημάτων. Στο πλαίσιο ενός βιώσιμου ενεργειακού μείγματος, η ενίσχυση της ανακύκλωσης συμβάλλει καθοριστικά στην ενεργειακή αυτάρκεια, στη μείωση του πυρηνικού αποτυπώματος και στην υπεύθυνη διαχείριση των ραδιενεργών υλικών (18),(19).

3.3. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Πυρηνικής Ενέργειας

Η πυρηνική ενέργεια αποτελεί μια τεχνολογική επιλογή υψηλής στρατηγικής σημασίας, η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής, θερμικής και μηχανικής ενέργειας, ενώ βρίσκει εφαρμογές και σε άλλους τομείς, όπως η ιατρική και η γεωργία. Η χρήση της, ωστόσο, δεν περιορίζεται αποκλειστικά στην κάλυψη βασικών ανθρώπινων αναγκών, αλλά έχει ιστορικά αξιοποιηθεί και για στρατιωτικούς σκοπούς, γεγονός που καθιστά τη συζήτηση γύρω από αυτήν σύνθετη και συχνά διχαστική. Η τεχνολογία της πυρηνικής ενέργειας περιβάλλεται από αντιφάσεις, καθώς συνοδεύεται τόσο από σημαντικά πλεονεκτήματα όσο και από ιδιαίτερα κρίσιμα μειονεκτήματα, που προκαλούν προβληματισμό σε παγκόσμιο επίπεδο.

Πλεονεκτήματα:

- Μηδενικές ή ελάχιστες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου: Η διαδικασία της πυρηνικής σχάσης δεν παράγει διοξείδιο του άνθρακα ούτε άλλους ρύπους που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, με αποτέλεσμα την παραγωγή σχεδόν καθαρής ενέργειας, κυρίως με τη μορφή υδρατμών.
- Εξαιρετικά υψηλή ενεργειακή απόδοση: Από μικρές ποσότητες ουρανίου μπορεί να παραχθεί πολύ μεγάλη ποσότητα ενέργειας, γεγονός που καθιστά την πυρηνική ενέργεια ιδιαίτερα αποδοτική σε σύγκριση με άλλες πηγές. Το ενεργειακό

περιεχόμενο ενός κιλού ουρανίου είναι εκατομμύρια φορές μεγαλύτερο από εκείνο των συμβατικών καυσίμων.

- Σταθερότητα και αξιοπιστία στην παροχή ενέργειας: Οι πυρηνικοί σταθμοί μπορούν να λειτουργούν αδιάκοπα, ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών ή εναλλαγών ημέρας και νύχτας, παρέχοντας συνεχή και αξιόπιστη κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης.
- Ικανότητα κάλυψης μαζικών ενεργειακών αναγκών: Ένας και μόνο πυρηνικός αντιδραστήρας είναι σε θέση να καλύψει τις ανάγκες ολόκληρων πόλεων ή ακόμα και περιφερειών, γεγονός που τον καθιστά ιδανική επιλογή για περιοχές με υψηλές απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Μειωμένη εξάρτηση από φυσικούς πόρους: Παρόλο που το ουράνιο δεν είναι ανανεώσιμη πρώτη ύλη, οι απαιτούμενες ποσότητες είναι μικρές και τα υπάρχοντα αποθέματα επαρκούν για την κάλυψη της παγκόσμιας ζήτησης για αρκετές δεκαετίες ή και αιώνες (20).

Μειονεκτήματα:

- Προβληματική διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων: Τα απόβλητα από την πυρηνική παραγωγή διατηρούν τη ραδιενέργειά τους για χιλιάδες χρόνια, απαιτώντας εξειδικευμένες, μακροπρόθεσμες λύσεις αποθήκευσης, οι οποίες προς το παρόν παραμένουν τεχνικά και κοινωνικά αμφιλεγόμενες.
- Κίνδυνος σοβαρών ατυχημάτων: Παρά τα υψηλά επίπεδα ασφάλειας, ατυχήματα όπως αυτά στο Τσερνόμπιλ και τη Φουκουσίμα υπενθυμίζουν τη δυνατότητα καταστροφικών συνεπειών με παγκόσμιο αντίκτυπο.
- Ευαλωτότητα σε εξωτερικές απειλές: Οι πυρηνικές εγκαταστάσεις ενδέχεται να πληγούν από φυσικές καταστροφές, όπως σεισμούς και πλημμύρες, ή να καταστούν στόχοι σε περιόδους πολέμου και τρομοκρατίας, με ανυπολόγιστες επιπτώσεις.

- Υψηλό οικονομικό κόστος: Η κατασκευή, η λειτουργία, η συντήρηση, και ιδιαίτερα η αποξήλωση πυρηνικών σταθμών απαιτούν τεράστιους οικονομικούς πόρους, ενώ η επιστροφή της επένδυσης μπορεί να καθυστερήσει για δεκαετίες (21),(22).

Η ανάλυση των παραπάνω φανερώνει ότι η πυρηνική ενέργεια, αν και προσφέρει λύσεις υψηλής απόδοσης, συνοδεύεται από κινδύνους και αβεβαιότητες που απαιτούν συνεχή επαναξιολόγηση στο πλαίσιο μιας παγκόσμιας στρατηγικής βιώσιμης ανάπτυξης.

3.4 Περιβαλλοντικές και κοινωνικές ανησυχίες

Η αξιολόγηση της πυρηνικής ενέργειας δεν περιορίζεται μόνο στα τεχνολογικά και οικονομικά της χαρακτηριστικά. Όπως έχει ήδη καταδειχθεί μέσα από τις προηγούμενες ενότητες για την τεχνολογική εξέλιξη, την ασφάλεια και τη διαχείριση αποβλήτων, είναι αναγκαίο να ληφθούν υπόψη και οι περιβαλλοντικές και κοινωνικές διαστάσεις που επηρεάζουν καθοριστικά τόσο τη δημόσια αντίληψη όσο και τις πολιτικές αποφάσεις. Η συζήτηση γύρω από την πυρηνική τεχνολογία παραμένει διεθνώς διχασμένη, καθώς κινείται μεταξύ τεχνικής αποτελεσματικότητας και κοινωνικής αμφισβήτησης.

Τα ιστορικά γεγονότα, οι γεωπολιτικές ισορροπίες και η αυξανόμενη παγκόσμια ευαισθητοποίηση απέναντι στη βιωσιμότητα και την κλιματική αλλαγή, έχουν διαμορφώσει ένα πεδίο πολωμένης και συχνά αμφιλεγόμενης στάσης απέναντι στην πυρηνική ενέργεια.

Η καταστροφή του Τσερνόμπιλ (1986) και το πυρηνικό ατύχημα της Φουκουσίμα (2011) αποτέλεσαν ιστορικά ορόσημα που επηρέασαν ριζικά την ενεργειακή στρατηγική πολλών χωρών. Κράτη όπως η Γερμανία, η Ιταλία και η Ελβετία αποφάσισαν τη σταδιακή απεξάρτηση από την πυρηνική ενέργεια, αναθεωρώντας τη σχέση τους με αυτή υπό το πρίσμα της πρόληψης κινδύνων και της κοινωνικής συναίνεσης. Αντιθέτως, χώρες όπως η Κίνα, η Ινδία και η Ρωσία επενδύουν μαζικά στην επέκταση του πυρηνικού τους

δυναμικού, επιδιώκοντας ενεργειακή αυτάρκεια, ακόμη και υπό συνθήκες περιορισμένης διαφάνειας και θεσμικού ελέγχου.

Τα πυρηνικά ατυχήματα — και ιδίως το Τσερνόμπιλ — ανέδειξαν με τον πιο τραγικό τρόπο τις μακροχρόνιες και διαγενεακές συνέπειες της ανεξέλεγκτης ραδιενέργειας. Η έκρηξη του αντιδραστήρα και η έκλυση ραδιενεργών υλικών οδήγησαν όχι μόνο σε ανθρώπινες απώλειες, αλλά και σε μαζικές οικολογικές καταστροφές, εκτεταμένη περιβαλλοντική ρύπανση, και σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία. Οι τερατογενέσεις, οι καρκινογενέσεις, και οι χρόνιες οργανικές δυσλειτουργίες που καταγράφηκαν κυρίως στην Ουκρανία και τη Λευκορωσία αποτελούν ζωντανή υπενθύμιση του μακροχρόνιου κινδύνου της ραδιενέργειας.

Παρά τις περιβαλλοντικές και κοινωνικές αντιδράσεις, η αυξανόμενη παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση, ιδίως σε ταχέως αναπτυσσόμενες περιοχές, διατηρεί ζωντανό το ενδιαφέρον για την πυρηνική ενέργεια ως μια σταθερή και φαινομενικά οικονομικά αποδοτική λύση. Χώρες όπως η Νότια Κορέα, η Γαλλία και η Ρωσία συνεχίζουν να επενδύουν στρατηγικά στην πυρηνική τεχνολογία. Η Γαλλία, χαρακτηριστικά, καλύπτει περίπου το 75% των ενεργειακών της αναγκών από πυρηνική ενέργεια, επιτυγχάνοντας ενεργειακή αυτάρκεια τόσο στον οικιακό όσο και στον βιομηχανικό τομέα.

Ωστόσο, η γήρανση των ευρωπαϊκών πυρηνικών σταθμών, πολλοί εκ των οποίων έχουν ξεπεράσει τα 40 έτη λειτουργίας, δημιουργεί έντονες ανησυχίες ως προς την ασφάλεια και τη βιωσιμότητα των υποδομών. Το υψηλό κόστος συντήρησης (συντά 400–500 εκατομμύρια ευρώ ανά μονάδα), η αυξανόμενη πιθανότητα αστοχίας, καθώς και η απειλή από φυσικές καταστροφές ή τρομοκρατικές επιθέσεις, ενισχύουν τη ρητορική υπέρ της σταδιακής κατάργησης των παλαιών αντιδραστήρων (22).

Η κοινωνική αντίσταση εντείνεται, όχι μόνο από οργανωμένα κινήματα πολιτών και περιβαλλοντικές ΜΚΟ, αλλά και μέσω διακρατικών ενστάσεων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, κράτη προσφεύγουν σε διεθνείς νομικές διαδικασίες κατά της εγκατάστασης ή λειτουργίας πυρηνικών σταθμών σε γειτονικές χώρες, επικαλούμενα την πιθανή διασυνοριακή απειλή.

Παράλληλα, η ανάδειξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) ως βιώσιμη εναλλακτική δημιουργεί νέα δυναμική στον ενεργειακό διάλογο. Πολλές κυβερνήσεις στρέφονται προς σενάρια χαμηλού πυρηνικού αποτυπώματος, ενσωματώνοντας ΑΠΕ σε συνδυασμό με ψηφιακή διαχείριση ζήτησης, αποθήκευση ενέργειας και αποκεντρωμένα δίκτυα.

Συνολικά, η πυρηνική ενέργεια παραμένει ένα τεχνολογικό εργαλείο υψηλού ρίσκου, με πολύπλευρες επιπτώσεις που υπερβαίνουν την τεχνολογία και την οικονομία. Η απουσία διεθνούς συναίνεσης, η γεωπολιτική πολυπλοκότητα και οι ηθικές διαστάσεις της χρήσης της επιβεβαιώνουν την ανάγκη για πολυδιάστατη, ορθολογική και δημοκρατικά θεμελιωμένη αξιολόγηση, ιδίως στο πλαίσιο της παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης και της επιδίωξης κλιματικής ουδετερότητας (23).

3.5 Ρυθμιστικά πλαίσια και διεθνής συνεργασία

Η ανάπτυξη και εφαρμογή ρυθμιστικών πλαισίων σε εθνικό και διεθνές επίπεδο αποτελεί θεμέλιο λίθο για τη διασφάλιση της ασφαλούς, υπεύθυνης και ειρηνικής χρήσης της πυρηνικής ενέργειας. Δεδομένων των σοβαρών κινδύνων που συνδέονται με την τεχνολογία αυτή, απαιτείται σταθερή εποπτεία, συμμόρφωση με αυστηρά τεχνικά και νομικά πρότυπα, καθώς και ενίσχυση της διακρατικής συνεργασίας.

Σε διεθνές επίπεδο, οι βασικοί οργανισμοί που επιβλέπουν και καθοδηγούν τη ρύθμιση της πυρηνικής δραστηριότητας είναι ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ), η Διεθνής Επιτροπή Ραδιολογικής Προστασίας (ICRP) και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, μέσω του πλαισίου της Ευρωπαϊκής Κοινότητας Ατομικής Ενέργειας (EURATOM) για τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Οι φορείς αυτοί διαμορφώνουν κατευθυντήριες γραμμές που καλύπτουν όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής μιας πυρηνικής εγκατάστασης: από τον σχεδιασμό και την αδειοδότηση έως την κατασκευή, τη λειτουργία, την επιτήρηση και την αποξήλωση.

Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας έχει υιοθετήσει πληθώρα διεθνών συμβάσεων, με πλέον καθοριστική τη Σύμβαση για την Πυρηνική Ασφάλεια, η οποία απαιτεί από τα συμβαλλόμενα κράτη να εφαρμόζουν υψηλά πρότυπα ασφάλειας, να προωθούν τη διαφάνεια και την τακτική ανταλλαγή τεχνικών πληροφοριών. Ο ΙΑΕΑ παρέχει επίσης τεχνική υποστήριξη, μεταφορά τεχνογνωσίας και μηχανισμούς συντονισμένης απόκρισης σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Μέσω αυτών των μέσων, ο Οργανισμός ενισχύει τις ικανότητες των κρατών-μελών και συμβάλλει στη διεθνή πυρηνική ασφάλεια (24),(25).

Στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η Συνθήκη EURATOM αποτελεί τον θεσμικό πυρήνα του ρυθμιστικού πλαισίου για την πυρηνική ενέργεια. Σκοπός της είναι η διασφάλιση της ακτινοπροστασίας, η υπεύθυνη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων, η προώθηση της έρευνας και της καινοτομίας, καθώς και η εφαρμογή κοινών ρυθμίσεων σε όλα τα κράτη-μέλη. Η Ε.Ε. επιδιώκει την υιοθέτηση αυστηρών τεχνικών και περιβαλλοντικών προτύπων, ενισχύοντας τον ρόλο της ως πρότυπο διεθνούς ρύθμισης (26).

Παράλληλα, η διεθνής συνεργασία περιλαμβάνει και τον κρίσιμο τομέα της αποτροπής εξάπλωσης των πυρηνικών όπλων. Η Συνθήκη για τη Μη Διάδοση των Πυρηνικών Όπλων (NPT) αποτελεί τη βάση του νομικού πλαισίου για τον περιορισμό της κατοχής και διασποράς πυρηνικών οπλοστασίων, ενώ ταυτόχρονα προωθεί την ειρηνική χρήση της πυρηνικής τεχνολογίας. Οι διεθνείς συμφωνίες υπό την αιγίδα του ΙΑΕΑ ενθαρρύνουν τη συμμετοχή σε αξιολογήσεις ομοτίμων (peer reviews), την υιοθέτηση ομοιογενών τεχνικών προτύπων και τη συνεχή βελτίωση των εθνικών πολιτικών.

Μέσα από τη θεσμοθετημένη ανταλλαγή τεχνογνωσίας, την αυστηρή εποπτεία και την προώθηση κοινών αρχών, διαμορφώνεται ένα σύστημα πολυμερούς διακυβέρνησης που αυξάνει τη διαφάνεια και ενδυναμώνει την πολιτική κουλτούρα πρόληψης και ασφάλειας. Η διεθνής συνεργασία δεν αποτελεί απλώς ένα ρυθμιστικό μέσο, αλλά έναν θεμελιώδη μηχανισμό ενίσχυσης της συλλογικής ασφάλειας, οικοδόμησης εμπιστοσύνης και διαχείρισης κινδύνων σε παγκόσμιο επίπεδο (24).

3.5.1 Ρυθμιστικό Πλαίσιο στις Ηνωμένες Πολιτείες

Το ρυθμιστικό πλαίσιο που διέπει την πυρηνική ενέργεια στις Ηνωμένες Πολιτείες αποτελεί ένα από τα πλέον εκτεταμένα και αυστηρά συστήματα παγκοσμίως, αποσκοπώντας στην πλήρη διασφάλιση της δημόσιας υγείας, της περιβαλλοντικής προστασίας και της εθνικής ασφάλειας. Η εποπτεία και ρύθμιση του πυρηνικού τομέα ασκείται κυρίως από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Πυρηνικής Ρύθμισης (U.S. Nuclear Regulatory Commission – NRC), η οποία ιδρύθηκε το 1974 με βάση το Energy Reorganization Act.

Η NRC φέρει την κύρια αρμοδιότητα για την αδειοδότηση και την εποπτεία της ειρηνικής χρήσης της πυρηνικής ενέργειας στις ΗΠΑ. Ο θεσμικός της ρόλος καλύπτει ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται η έκδοση αδειών λειτουργίας για πυρηνικές εγκαταστάσεις, η ρύθμιση της χρήσης ραδιενεργών υλικών, η εφαρμογή προτύπων ακτινοπροστασίας και η παρακολούθηση της συμμόρφωσης των φορέων με τις απαιτήσεις ασφαλείας. Το βασικό νομικό πλαίσιο της NRC ενσωματώνεται στον Τίτλο 10 του Κώδικα Ομοσπονδιακών Κανονισμών (10 CFR), ο οποίος περιλαμβάνει ειδικές διατάξεις για κάθε στάδιο του πυρηνικού κύκλου (27).

Η διαδικασία ρύθμισης από την NRC δεν περιορίζεται μόνο στη χορήγηση αδειών, αλλά επεκτείνεται στην προληπτική διαχείριση κινδύνων, στη διαρκή επιθεώρηση εγκαταστάσεων και στη διασφάλιση της επιβολής κυρώσεων σε περιπτώσεις παραβίασης. Οι κανονισμοί της NRC εφαρμόζονται τόσο σε πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας όσο και σε ερευνητικούς αντιδραστήρες, εγκαταστάσεις εμπλουτισμού καυσίμων, αποθήκες αποβλήτων και εγκαταστάσεις με ιατρικές, βιομηχανικές ή ακαδημαϊκές χρήσεις ραδιενεργών υλικών (28), (29).

Πέραν της κανονιστικής εποπτείας, η NRC εκδίδει επίσης κατευθυντήριες πολιτικές δηλώσεις, όπως την Enforcement Policy, η οποία προσδιορίζει το πλαίσιο εφαρμογής πειθαρχικών μέτρων και καθοδηγεί τις διαδικασίες επιβολής της συμμόρφωσης. Οι δηλώσεις αυτές καλύπτουν κρίσιμους τομείς, όπως η προστασία των εργαζομένων, η

δημόσια υγεία, η ασφάλεια εγκαταστάσεων και η αποτροπή κακόβουλης χρήσης πυρηνικών υλικών. Επιπλέον, η NRC διατηρεί θεσμοθετημένες συνεργασίες με επιμέρους Πολιτείες των ΗΠΑ μέσω ειδικών συμφωνιών, οι οποίες μεταβιβάζουν ορισμένες ρυθμιστικές αρμοδιότητες σε τοπικό επίπεδο, υπό την προϋπόθεση ότι τα πολιτειακά συστήματα ρύθμισης πληρούν τα ομοσπονδιακά πρότυπα.

Παρά τις μεταβιβάσεις αρμοδιοτήτων, η NRC διατηρεί την αποκλειστική δικαιοδοσία σε ζητήματα εθνικής σημασίας, όπως η λειτουργία πυρηνικών σταθμών, οι εξαγωγές ραδιενεργών υλικών και η συμμετοχή των ΗΠΑ σε διεθνείς συνθήκες. Η ύπαρξη σαφώς προσδιορισμένων μηχανισμών ρύθμισης και εποπτείας καθιστά το αμερικανικό πλαίσιο ένα από τα πλέον δομημένα και αυστηρά, προσφέροντας παράλληλα ένα πρότυπο για άλλες χώρες που επιδιώκουν την ενίσχυση της πυρηνικής τους διακυβέρνησης (30), (31).

3.5.2 Ρυθμιστικό Πλαίσιο στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Η Ευρωπαϊκή Ένωση διαθέτει ένα από τα πιο αυστηρά και ολοκληρωμένα ρυθμιστικά πλαίσια στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας, το οποίο έχει ως στόχο την προστασία των πολιτών και του περιβάλλοντος, την ενίσχυση της δημόσιας ασφάλειας και τη διασφάλιση της υπεύθυνης και βιώσιμης χρήσης της πυρηνικής τεχνολογίας. Η νομική βάση του ευρωπαϊκού ρυθμιστικού συστήματος εντοπίζεται στη Συνθήκη της Ευρωπαϊκής Κοινότητας Ατομικής Ενέργειας (EURATOM), η οποία τέθηκε σε ισχύ το 1958 και εξακολουθεί να λειτουργεί ως ο θεσμικός κορμός της ευρωπαϊκής πυρηνικής πολιτικής.

Η Συνθήκη EURATOM καθορίζει θεμελιώδεις αρχές για τη διασφάλιση της ακτινοπροστασίας, τη διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων, την εποπτεία της πυρηνικής ασφάλειας και την προώθηση της επιστημονικής έρευνας. Ένας από τους σημαντικότερους ρόλους της Συνθήκης είναι η δυνατότητα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής να διεξάγει επιθεωρήσεις στις πυρηνικές εγκαταστάσεις των κρατών-μελών, προκειμένου να διασφαλιστεί η συμμόρφωση με τα ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα ασφαλείας (32).

Η ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων ρυθμίζεται μέσω ευρωπαϊκών Οδηγιών που καθορίζουν κοινά υποχρεωτικά πρότυπα για όλα τα κράτη-μέλη. Η Οδηγία 2009/71/Euratom αποτελεί τη βασική νομική πράξη για τη θέσπιση ενός ενιαίου ρυθμιστικού πλαισίου ασφαλείας, ενώ η αναθεωρημένη Οδηγία 2014/87/Euratom ενσωματώνει αυστηρότερα μέτρα με αφορμή το πυρηνικό ατύχημα της Φουκουσίμα, εστιάζοντας στην αρχή της πολλαπλής προστασίας (defence-in-depth), σύμφωνα με την οποία λαμβάνονται πολυεπίπεδα μέτρα πρόληψης και περιορισμού των συνεπειών πιθανών ατυχημάτων (33).

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων, η οποία συνιστά έναν από τους πλέον ευαίσθητους τομείς της πυρηνικής πολιτικής. Η Οδηγία 2011/70/Euratom απαιτεί από τα κράτη-μέλη να καταρτίσουν εθνικά προγράμματα για τη μακροπρόθεσμη διαχείριση τόσο των αποβλήτων όσο και του αναλωμένου καυσίμου. Τα προγράμματα αυτά πρέπει να είναι διαφανή, να περιλαμβάνουν συμμετοχή του κοινού στη διαδικασία λήψης αποφάσεων και να δίνουν προτεραιότητα στη δημιουργία γεωλογικών αποθεμάτων για την ασφαλή αποθήκευση αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας (34).

Στον τομέα της ακτινοπροστασίας, η Οδηγία 2013/59/Euratom καθορίζει τις βασικές απαιτήσεις για την προστασία εργαζομένων, πολιτών και περιβάλλοντος από τις επιπτώσεις της ιονίζουσας ακτινοβολίας. Η Οδηγία θέτει πρότυπα για την πρόληψη της έκθεσης, την παρακολούθηση ραδιενεργών πηγών και την αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, διαμορφώνοντας ένα ενιαίο και αυστηρό πλαίσιο προστασίας της ανθρώπινης υγείας (35).

Η διεθνής συνεργασία αποτελεί επίσης θεμελιώδες στοιχείο του ευρωπαϊκού ρυθμιστικού πλαισίου. Η Ε.Ε. συμμετέχει ενεργά σε διεθνείς οργανισμούς όπως ο ΙΑΕΑ, καθώς και σε συνθήκες όπως η Σύμβαση για την Πυρηνική Ασφάλεια και η Συνθήκη για τη Μη Διάδοση των Πυρηνικών Όπλων. Παράλληλα, εφαρμόζει διαδικασίες αξιολόγησης από ομοτίμους (peer reviews), μέσω των οποίων ελέγχεται η συμμόρφωση των κρατών-μελών με τα διεθνή πρότυπα και προωθείται η συνεχής βελτίωση των εθνικών πολιτικών.

Συνολικά, το ρυθμιστικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης συνδυάζει αυστηρούς κανόνες, διαφάνεια, επιστημονική τεκμηρίωση και πολυεπίπεδη συνεργασία. Η Ε.Ε. επιχειρεί να εξισορροπήσει την αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας με την προστασία του δημόσιου συμφέροντος, θέτοντας ως στόχο τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα, την ενεργειακή ασφάλεια και τη συμμόρφωση με τις αρχές της περιβαλλοντικής δικαιοσύνης (36).

4. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ) ΚΑΙ Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥΣ

Στο πλαίσιο της παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης και υπό το βάρος των προβληματισμών που συνοδεύουν τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αναδύονται ως μια βιώσιμη, περιβαλλοντικά φιλική και κοινωνικά αποδεκτή εναλλακτική λύση. Η ανάπτυξή τους εντάσσεται σε έναν ευρύτερο στρατηγικό σχεδιασμό, που αποσκοπεί στη δημιουργία ενός κλιματικά ουδέτερου, ενεργειακά αυτόνομου και τεχνολογικά καινοτόμου συστήματος.

Οι ΑΠΕ βασίζονται σε ανεξάντλητες φυσικές ροές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική, η γεωθερμική και η θαλάσσια, καθώς και στην αξιοποίηση οργανικών υλικών μέσω βιομάζας ή βιοκαυσίμων. Αποτελούν εναλλακτική λύση έναντι των ρυπογόνων ορυκτών καυσίμων και συμβάλλουν καθοριστικά:

- στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου,
- στην ενεργειακή ανεξαρτησία των κρατών,
- και στον περιορισμό της εξάρτησης από ευμετάβλητες διεθνείς αγορές καυσίμων.

Σύμφωνα με επίσημα στοιχεία, το 2022 οι ανανεώσιμες πηγές αντιπροσώπευαν το 23% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Το 2023, η Ε.Ε. αύξησε τον στόχο συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας από 32% σε 42,5% έως το 2030, με εκτίμηση να φτάσει ακόμη και το 45% (37).

Οι βασικοί τύποι ΑΠΕ περιλαμβάνουν:

- **Ηλιακή ενέργεια:** Αξιοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία είτε για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων, είτε για θερμικές εφαρμογές, όπως η θέρμανση νερού με ηλιακούς θερμοσίφωνες.
- **Αιολική ενέργεια:** Βασίζεται στην κινητική ενέργεια του ανέμου, η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω ανεμογεννητριών, με συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση στις ενεργειακές αγορές παγκοσμίως.
- **Υδροηλεκτρική ενέργεια:** Παράγεται από την κίνηση υδάτινων μαζών σε ποτάμια ή φράγματα, μέσω της οποίας μετατρέπεται η κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική με τη χρήση υδροστροβίλων.
- **Βιομάζα:** Αξιοποιεί οργανικά υλικά (γεωργικά, δασικά και αστικά υπολείμματα) για παραγωγή ενέργειας μέσω καύσης, αναερόβιας χώνευσης ή άλλων χημικών και θερμοχημικών διεργασιών (38).

4.1. Ηλιακή Ενέργεια- Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας κατέχει εξέχουσα θέση στο πλαίσιο των ΑΠΕ, με τα φωτοβολταϊκά συστήματα να αποτελούν την πιο διαδεδομένη τεχνολογία. Η βασική αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ημιαγωγών, που ενεργοποιούνται από το φάσμα του ηλιακού φωτός. Τα συστήματα αυτά είναι ιδιαίτερα φιλικά προς το περιβάλλον, έχουν μηδενικές εκπομπές κατά τη λειτουργία τους και διαθέτουν υψηλή διάρκεια ζωής, που φθάνει έως και τα 25 χρόνια.

Η εφαρμογή τους επεκτείνεται από την ατομική κατοικία έως τη βιομηχανική κλίμακα, γεγονός που τα καθιστά ευέλικτα και πολυδιάστατα μέσα για την επίτευξη ενεργειακής αυτάρκειας. Στις υποενότητες που ακολουθούν, αναλύονται οι τεχνικές πτυχές της λειτουργίας τους, οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον και οι κυριότερες προκλήσεις που συνοδεύουν τη χρήση της ηλιακής ενέργειας (39).

4.1.2 Λειτουργία φωτοβολταϊκών συστημάτων

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυψελών (ηλιακών στοιχείων) βασίζεται στη χρήση ημιαγωγών υλικών, συνήθως πυριτίου, τα οποία διαμορφώνονται σε ζεύγη θετικής και αρνητικής φόρτισης (p-n junctions). Η ένωση αυτή λειτουργεί ως ηλεκτροδίοδος ευρείας επιφάνειας, που αποτελεί τον πυρήνα της μετατροπής του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει στην επιφάνεια του ημιαγωγού τύπου n, διεγείρονται ηλεκτρόνια τα οποία στη συνέχεια κατευθύνονται μέσω του επάνω ηλεκτροδίου προς το εξωτερικό κύκλωμα. Το κάτω μέρος της κυψέλης, αποτελούμενο από ημιαγωγό τύπου p, παραλαμβάνει αυτά τα ηλεκτρόνια μέσω ενός κλειστού ηλεκτρικού κυκλώματος.

Το άνω ηλεκτρόδιο έχει συνήθως τη μορφή λεπτού πλέγματος (σχάρας), ώστε να επιτρέπεται η διέλευση φωτός προς τον ημιαγωγό, ενώ το κάτω μπορεί να είναι είτε παρόμοιας κατασκευής είτε να αποτελείται από πλήρες μεταλλικό φύλλο, αναλόγως του επιθυμητού βαθμού διαπερατότητας στο φως. Επιπλέον, το άνω τμήμα της κυψέλης καλύπτεται με διαφανές και προστατευτικό υλικό, συνήθως γυαλί ή ανθεκτικό συνθετικό, το οποίο μειώνει την ανακλαστικότητα και προστατεύει τη δομή από τις καιρικές συνθήκες.

Η ηλεκτρική απόδοση μιας μεμονωμένης φωτοβολταϊκής κυψέλης είναι περιορισμένη, με μέση τιμή τάσης περίπου 0,5 V και ισχύ 1 W. Για τον λόγο αυτό, οι κυψέλες συνδέονται σε συστοιχίες (modules), προκειμένου να καλύψουν μεγαλύτερες ενεργειακές ανάγκες. Στις σειριακές συνδέσεις, το κάτω ηλεκτρόδιο της μίας κυψέλης ενώνεται με το άνω της επόμενης, αυξάνοντας τη συνολική τάση, ενώ η ισχύς παραμένει ίδια. Αντιθέτως, στην παράλληλη σύνδεση, τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια συνδέονται μεταξύ τους, διατηρώντας σταθερή την τάση και αυξάνοντας την ισχύ.

Ο σχεδιασμός κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτάται από παράγοντες όπως η θέση εγκατάστασης, ο διαθέσιμος χώρος, οι απαιτήσεις ισχύος και ο βαθμός ηλιοφάνειας της περιοχής. Η ενεργειακή απόδοση μειώνεται σε συνθήκες περιορισμένης ηλιακής ακτινοβολίας – φαινόμενο που μπορεί να αντιμετωπιστεί με την εφαρμογή υβριδικών

λύσεων, όπως η συνδυαστική χρήση με άλλες ΑΠΕ ή συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (39).



Εικόνα 3 Φωτοβολταϊκό πάρκο 100 MW στη Λεμεσό. (Πηγή: [\[31\]](#))

4.1.3 Θετικές και αρνητικές περιβαλλοντικές και κοινωνικοπολιτικές επιπτώσεις της χρήσης ηλιακής ενέργειας στους ηλιοθερμικούς σταθμούς

Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί αποτελούν μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια αξιοποιώντας τη θερμική ενέργεια του ήλιου. Η τεχνολογία τους βασίζεται στη χρήση παραβολικών καθρεπτών, ηλιοστατών ή ηλιακών πύργων για τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα σημείο, όπου θερμαίνεται κάποιο ρευστό μέσο, όπως λάδι, νερό ή λιωμένο άλας. Η παραγόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού, ο οποίος στη συνέχεια θέτει σε λειτουργία τουρμπίνες, οδηγώντας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω συμβατικού θερμοδυναμικού κύκλου.

Η τεχνολογία αυτή έχει ορισμένες περιβαλλοντικές συνέπειες, οι οποίες απαιτούν προσεκτική διαχείριση. Καταρχάς, οι ηλιοθερμικοί σταθμοί καταλαμβάνουν εκτεταμένες εκτάσεις γης, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει τη φυσική χλωρίδα και πανίδα της περιοχής, προκαλώντας διατάραξη της οικολογικής ισορροπίας και απώλειες στη βιοποικιλότητα. Οι επιπτώσεις αυτές είναι ανάλογες με εκείνες που παρατηρούνται σε μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα. Επιπλέον, η εντατική κατανάλωση νερού – τόσο για την ψύξη των συστημάτων όσο και για την πλύση των ανακλαστικών επιφανειών ή τη χρήση του ως θερμικό ρευστό – ενδέχεται να οδηγήσει σε υποβάθμιση της ποιότητας και διαθεσιμότητας του νερού στις γύρω περιοχές, ιδίως σε άνυδρες ή ημιάνυδρες ζώνες.

Μια ακόμη κρίσιμη περιβαλλοντική πρόκληση συνδέεται με την επικινδυνότητα των ανακλώμενων ηλιακών ακτίνων, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν σοβαρά εγκαύματα σε πτηνά που πετούν πλησίον των εγκαταστάσεων. Για τον περιορισμό αυτού του φαινομένου, προτείνεται η εγκατάσταση ηλιοθερμικών μονάδων σε ακατοίκητες ή ερημικές περιοχές, όπου η ανθρώπινη και οικολογική παρέμβαση είναι περιορισμένη. Ωστόσο, ακόμη και εκεί, η απαίτηση για μεγάλες γήινες επιφάνειες ενδέχεται να δημιουργεί ανταγωνισμό με άλλες χρήσεις γης, ιδίως σε περιοχές με περιορισμένη διαθεσιμότητα κατάλληλων εκτάσεων.

Παρά τις ανωτέρω προκλήσεις, οι ηλιοθερμικοί σταθμοί παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Αποτελούν πηγή σταθερής και αξιόπιστης ηλεκτροπαραγωγής,

παρόμοιας με εκείνη των ατμοηλεκτρικών σταθμών, καθιστώντας τους κατάλληλους για την υποστήριξη βασικών ενεργειακών αναγκών μικρών και μεσαίων πόλεων. Η τεχνολογική πολυπλοκότητα των συστημάτων αυτών απαιτεί εξειδικευμένο ανθρώπινο δυναμικό, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία περισσότερων θέσεων εργασίας σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκά. Επιπλέον, οι ηλιοθερμικοί σταθμοί μπορούν να ενσωματωθούν σε υβριδικά συστήματα, συνδυαζόμενοι με μονάδες παραγωγής που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο, επιτρέποντας την παραγωγή ενέργειας ακόμα και τη νύχτα ή σε περιόδους συννεφιάς. Η δυνατότητα αυτή ενισχύει τη σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου και μειώνει την εξάρτηση από μεταβλητές πηγές.

Τέλος, η συμβολή των ηλιοθερμικών σταθμών στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα είναι ιδιαίτερα σημαντική. Μέσω της αξιοποίησης της ηλιακής θερμότητας, μειώνεται η χρήση ορυκτών καυσίμων και κατά συνέπεια περιορίζεται το αποτύπωμα άνθρακα. Ως εκ τούτου, οι ηλιοθερμικοί σταθμοί αναγνωρίζονται ως τεχνολογία με υψηλό δυναμικό συνεισφοράς στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και στην επίτευξη των στόχων της πράσινης μετάβασης (4), (40).

4.1.4 Θετικές και αρνητικές περιβαλλοντικές και κοινωνικοπολιτικές επιπτώσεις της χρήσης ηλιακής ενέργειας στα ηλιακά θερμικά συστήματα.

Τα ηλιακά θερμικά συστήματα αξιοποιούν αποκλειστικά την ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή θερμικής ενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για την κάλυψη αναγκών θέρμανσης νερού. Πρόκειται για τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς δεν απαιτούν καύση ορυκτών καυσίμων, περιορίζοντας έτσι τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρυπογόνων αερίων. Η χρήση τους εντάσσεται πλήρως στις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης, αποτελώντας μία καθαρή, ανανεώσιμη και ενεργειακά αποδοτική επιλογή για οικιακές και μικρής κλίμακας εφαρμογές.

Ωστόσο, η λειτουργικότητά τους εξαρτάται άμεσα από τη διαθεσιμότητα ηλιακής ακτινοβολίας. Σε περιοχές με περιορισμένη ηλιοφάνεια ή κατά τις χειμερινές περιόδους, η αποδοτικότητά τους μειώνεται σημαντικά. Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαία τη χρήση

μονωμένων δοχείων αποθήκευσης θερμότητας, ώστε να εξασφαλίζεται η κάλυψη των αναγκών σε θερμό νερό ακόμη και κατά τις νυχτερινές ώρες ή σε συνθήκες συννεφιάς. Παράλληλα, σε πολλές περιπτώσεις εφαρμόζονται υβριδικές λύσεις, στις οποίες η ηλιακή ενέργεια συνδυάζεται με συμπληρωματικές πηγές, όπως το φυσικό αέριο, προκειμένου να διασφαλίζεται η συνέχεια της παροχής θερμικής ενέργειας.

Η εγκατάσταση συλλεκτών ενδέχεται να απαιτεί τη χρήση ελεύθερων επιφανειών γης, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει τοπικές χωρικές συγκρούσεις, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές ή σε τοποθεσίες με περιορισμένη διαθέσιμη έκταση. Παρά την περιορισμένη περιβαλλοντική τους επίδραση συγκριτικά με άλλες ενεργειακές τεχνολογίες, είναι απαραίτητο να διασφαλίζεται η ορθολογική χωροθέτηση των συστημάτων αυτών, ώστε να αποφεύγεται η αλλοίωση του αστικού ή αγροτικού τοπίου.

Σε κοινωνικοοικονομικό επίπεδο, η κατασκευή, η εγκατάσταση και η συντήρηση των ηλιακών θερμικών συστημάτων δημιουργούν θέσεις εργασίας και προωθούν την τοπική οικονομία, κυρίως σε τομείς όπως η μηχανολογία, η ενεργειακή διαχείριση και οι κατασκευές. Στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, τα ηλιακά θερμικά συστήματα συχνά ενσωματώνονται σε συνδυασμένες εφαρμογές με φωτοβολταϊκά συστήματα, γεγονός που ενισχύει την ενεργειακή αυτονομία και αυξάνει την οικονομική αποδοτικότητα των επενδύσεων. Κατά τη θερινή περίοδο, τα οφέλη είναι ιδιαίτερα εμφανή, καθώς συμβάλλουν στη σημαντική μείωση του κόστους θέρμανσης νερού, προσφέροντας άμεσο οικονομικό όφελος για τα νοικοκυριά και τις επιχειρήσεις (41).

Παρ' όλα αυτά, ένα από τα βασικά εμπόδια για τη μαζική υιοθέτηση των ηλιακών θερμικών τεχνολογιών παραμένει το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, το οποίο μπορεί να αποθαρρύνει την εγκατάσταση από ιδιώτες ή μικρές επιχειρήσεις, ιδίως όταν δεν υπάρχει πρόσβαση σε επιδοτήσεις ή μηχανισμούς χρηματοδότησης. Ως εκ τούτου, απαιτείται ενίσχυση των υποστηρικτικών πολιτικών και διευκόλυνση της πρόσβασης σε οικονομικά εργαλεία, ώστε να καταστεί η τεχνολογία αυτή ευρύτερα προσβάσιμη και αποδοτική για το σύνολο της κοινωνίας.

4.1.5 Προκλήσεις στον τομέα της ηλιακής ενέργειας

Παρά τον καίριο ρόλο της ηλιακής ενέργειας στη μετάβαση προς ένα καθαρότερο και βιωσιμότερο ενεργειακό μέλλον, η πλήρης αξιοποίησή της εξακολουθεί να παρεμποδίζεται από μία σειρά δομικών, οικονομικών και κοινωνικών προκλήσεων. Σύμφωνα με τη Διεθνή Υπηρεσία Ενέργειας (IEA), τα βασικά εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν για την ευρύτερη εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής σχετίζονται τόσο με το ρυθμιστικό περιβάλλον όσο και με τις επενδυτικές προοπτικές.

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα αφορά την αστάθεια των πολιτικών κατευθύνσεων και τις καθυστερήσεις στην προσαρμογή οικονομικών μηχανισμών. Η απουσία συνεκτικών, μακροπρόθεσμων και προβλέψιμων πολιτικών για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ενδέχεται να αποθαρρύνει τους ιδιώτες επενδυτές και να περιορίσει τη δυναμική του κλάδου. Η IEA επισημαίνει ότι η αβεβαιότητα όσον αφορά τη φορολόγηση, τις επιδοτήσεις ή τα θεσμικά κίνητρα δυσχεραίνει τη στρατηγική ανάπτυξη έργων ηλιακής ενέργειας, ιδίως σε περιόδους ταχείας μεταβολής του οικονομικού περιβάλλοντος.

Εξίσου κρίσιμη είναι η ανεπάρκεια επενδύσεων σε σύγχρονες και εκτεταμένες ενεργειακές υποδομές. Τα φωτοβολταϊκά και άλλα ηλιακά συστήματα απαιτούν αποδοτική και σταθερή σύνδεση με τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να διασφαλίζεται η απορρόφηση και διανομή της παραγόμενης ενέργειας. Η έλλειψη αναβαθμισμένων δικτύων, ιδιαίτερα σε περιφερειακές ή αγροτικές περιοχές, αποτελεί εμπόδιο για την ταχεία ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα.

Προσκόμματα παρουσιάζονται επίσης στο διοικητικό επίπεδο. Η περίπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία αδειοδότησης, σε συνδυασμό με τις συχνές αντιδράσεις τοπικών κοινωνιών απέναντι στην εγκατάσταση μεγάλων ηλιακών έργων, μπορεί να προκαλέσει καθυστερήσεις ή και ματαιώσεις. Η κοινωνική αποδοχή είναι κρίσιμος παράγοντας επιτυχίας, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου προκύπτουν αντιθέσεις ως προς τη χρήση γης, την αισθητική του τοπίου ή τις επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον.

Τέλος, η περιορισμένη πρόσβαση στη χρηματοδότηση, κυρίως σε χώρες με αναδυόμενες οικονομίες, συνιστά ένα από τα σημαντικότερα εμπόδια για την ανάπτυξη ηλιακών έργων εκεί όπου οι ανάγκες για ενεργειακή αυτάρκεια είναι μεγαλύτερες. Η IEA τονίζει ότι η έλλειψη κεφαλαίων και τεχνικής υποστήριξης επιβραδύνει την πρόοδο των ανανεώσιμων τεχνολογιών, παρά το υψηλό δυναμικό εφαρμογής τους στις περιοχές αυτές (42).

Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτεί συνεργασία μεταξύ κυβερνήσεων, διεθνών οργανισμών και ιδιωτικών επενδυτών. Η διαμόρφωση σταθερού και ευνοϊκού ρυθμιστικού πλαισίου, η ενίσχυση των επενδύσεων σε ενεργειακές υποδομές, η απλοποίηση των διαδικασιών αδειοδότησης και η εξασφάλιση χρηματοδοτικών μηχανισμών για τις αναπτυσσόμενες χώρες μπορούν να δημιουργήσουν ένα βιώσιμο περιβάλλον για την περαιτέρω ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας και την επιτάχυνση της ενεργειακής μετάβασης.

4.2.Αιολική ενέργεια -Ανεμογεννήτριες

Η αξιοποίηση της ενέργειας του ανέμου από τον άνθρωπο αποτελεί μία από τις αρχαιότερες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, με ιστορικές εφαρμογές που εντοπίζονται ήδη από την αρχαιότητα. Τυπικά παραδείγματα αυτής της πρώιμης χρήσης είναι τα ιστιοφόρα πλοία και οι ανεμόμυλοι, οι οποίοι αξιοποιούσαν την κινητική δύναμη του ανέμου για σκοπούς μετακίνησης και άλεσης, αντίστοιχα. Η εξέλιξη αυτών των τεχνολογιών οδήγησε στη σύγχρονη ανάπτυξη των ανεμογεννητριών (Α/Γ), οι οποίες σήμερα αποτελούν τον βασικό μηχανισμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την αιολική πηγή.

Οι ανεμογεννήτριες είναι πολύπλοκα μηχανολογικά συστήματα που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ενέργεια, και στη συνέχεια, μέσω γεννήτριας, σε ηλεκτρική ενέργεια. Η τεχνολογία αυτή ενσωματώνεται σε χερσαία ή θαλάσσια αιολικά πάρκα και χρησιμοποιείται είτε για την κάλυψη των τοπικών ενεργειακών αναγκών είτε για την ενίσχυση της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής σε εθνικό ή διακρατικό επίπεδο. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μπορεί να καταναλωθεί επιτόπου ή να διοχετευθεί στο

ηλεκτρικό δίκτυο, ενισχύοντας τη σταθερότητα του συστήματος και μειώνοντας την εξάρτηση από συμβατικές πηγές.

Η αποδοτικότητα των ανεμογεννητριών εξαρτάται από παράγοντες όπως η ένταση και η σταθερότητα του ανέμου, το υψόμετρο, η απόσταση από εμπόδια (π.χ. βουνά ή κτίρια), και η τεχνολογική διαμόρφωση του εξοπλισμού. Σήμερα, χρησιμοποιούνται εξελιγμένα συστήματα προσανατολισμού και αυτόματης ρύθμισης, τα οποία επιτρέπουν στις ανεμογεννήτριες να ευθυγραμμίζονται με τη φορά του ανέμου και να προσαρμόζουν τις λεπίδες τους για βέλτιστη απόδοση (43).

Η αιολική ενέργεια συγκαταλέγεται πλέον ανάμεσα στις ταχύτερα αναπτυσσόμενες ανανεώσιμες πηγές παγκοσμίως. Η συνεχής πτώση του κόστους εγκατάστασης και η τεχνολογική πρόοδος έχουν καταστήσει τα αιολικά πάρκα ιδιαίτερα ανταγωνιστικά, ακόμη και σε σύγκριση με παραδοσιακές μονάδες παραγωγής ενέργειας. Η Ελλάδα, χάρη στη γεωγραφική της διαμόρφωση και την υψηλή μέση ταχύτητα ανέμου σε πολλές περιοχές, διαθέτει σημαντικό αιολικό δυναμικό, το οποίο αξιοποιείται ολοένα και περισσότερο στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης και των δεσμεύσεων για μείωση των εκπομπών ρύπων.

4.2.1. Τρόπος λειτουργίας των ανεμογεννητριών

Η βασική λειτουργία των ανεμογεννητριών βασίζεται στη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια, μέσω μιας αλληλουχίας μηχανικών και ηλεκτρικών διεργασιών. Η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται σε δύο κύριες φάσεις: αρχικά, η πτερωτή (ή στροφείο) περιστρέφεται υπό την επίδραση της δύναμης του ανέμου, μετατρέποντας έτσι την κινητική ενέργεια σε μηχανική. Στη συνέχεια, η παραγόμενη μηχανική ενέργεια μεταφέρεται μέσω ενός συστήματος μετάδοσης κίνησης στη γεννήτρια, η οποία την μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια, κατάλληλη προς χρήση ή διοχέτευση στο δίκτυο.

Μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια αποτελείται από συγκεκριμένα βασικά υποσυστήματα. Ο ρότορας (ή στροφέιο), που φέρει συνήθως δύο ή τρία πτερύγια, αποτελεί το βασικό σημείο πρόσπτωσης του ανέμου και μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε περιστροφική μηχανική κίνηση. Το κιβώτιο ταχυτήτων, εφόσον υπάρχει, συνδέει τον ρότορα με τη γεννήτρια και αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής σε επίπεδα κατάλληλα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η γεννήτρια, τοποθετημένη στο εσωτερικό της κεφαλής της ανεμογεννήτριας, επιτελεί τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

Ολόκληρο το σύστημα υποστηρίζεται από τον πύργο, ο οποίος υψώνει τον μηχανισμό σε σημείο όπου οι άνεμοι είναι ισχυρότεροι και σταθερότεροι, ενισχύοντας την ενεργειακή αποδοτικότητα. Επιπλέον, ένα σύστημα προσανατολισμού (yaw system) επιτρέπει την περιστροφή της κεφαλής ώστε να κατευθύνεται προς τη διεύθυνση του ανέμου, ενώ το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί συνεχώς την ταχύτητα του ανέμου, την απόδοση του συστήματος και άλλες λειτουργικές παραμέτρους, διασφαλίζοντας την ασφαλή και βέλτιστη λειτουργία της εγκατάστασης (43).

Σε περιπτώσεις όπου η παραγόμενη ενέργεια υπερβαίνει τις άμεσες ενεργειακές ανάγκες, εφαρμόζονται τεχνολογίες αποθήκευσης, προκειμένου να εξομαλυνθεί η παροχή. Οι ηλεκτρικές μπαταρίες χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικρής κλίμακας αυτόνομες μονάδες, οι οποίες δεν είναι συνδεδεμένες με το κεντρικό δίκτυο. Αντιθέτως, σε μεγαλύτερες μονάδες χρησιμοποιείται η μέθοδος της αντλησιοταμίευσης, κατά την οποία η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για την άντληση νερού προς τεχνητές λίμνες σε υψηλό υψόμετρο, ώστε αργότερα να ανακτάται μέσω υδροηλεκτρικής παραγωγής.

Η Ελλάδα διαθέτει υψηλό αιολικό δυναμικό, χάρη στη γεωγραφική της διαμόρφωση και την παρουσία ισχυρών και σταθερών ανέμων σε πολλές περιοχές. Ενδεικτικά, η Κρήτη, η Πελοπόννησος, η Εύβοια και τα νησιά του Αιγαίου συγκεντρώνουν μεγάλο αριθμό αιολικών πάρκων, τα οποία αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών διατεταγμένες έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση αξιοποίησης του διαθέσιμου ανέμου. Η

χωροθέτηση και διαχείριση αυτών των πάρκων βασίζεται σε μελέτες αιολικού δυναμικού, περιβαλλοντικών επιπτώσεων και ενεργειακής ζήτησης (44).



Εικόνα 4 Αιολικό πάρκο. (Πηγή: [\[4\]](#))

4.2.2. Θετικές και αρνητικές επιπτώσεις της χρήσης αιολικής ενέργειας

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μία σχεδόν ανεξάντλητη και φιλική προς το περιβάλλον μορφή ενέργειας, η οποία διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη μετάβαση προς ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα. Η αξιοποίησή της στην Ελλάδα, αλλά και διεθνώς, σε συνδυασμό με τη συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών, συμβάλλει σημαντικά στην προστασία του περιβάλλοντος, στη μείωση των εκπομπών ρύπων και στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

Στο επίπεδο των θετικών επιπτώσεων, η αιολική ενέργεια συμβάλλει καθοριστικά στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, δεδομένου ότι δεν παράγει ρύπους κατά τη λειτουργία της. Η αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο, με την αιολική ενέργεια συνεπάγεται σημαντική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), ενισχύοντας τις προσπάθειες για τον περιορισμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Επιπλέον, ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, ο άνεμος

θεωρείται ανεξάντλητος, γεγονός που προσδίδει στην αιολική ενέργεια χαρακτήρα βιώσιμης και σταθερής ενεργειακής επιλογής.

Η ανάπτυξη αιολικών πάρκων συνδέεται επίσης με οφέλη σε επίπεδο τοπικής οικονομίας, καθώς δημιουργούνται νέες θέσεις εργασίας κατά την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρησή τους. Παράλληλα, οι επενδύσεις σε απομακρυσμένες περιοχές λειτουργούν ενισχυτικά για την οικονομική τους ανάπτυξη. Σημαντικό όφελος αποτελεί και η ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας, μέσω της μείωσης της εξάρτησης από εισαγόμενα καύσιμα, γεγονός που περιορίζει τις επιπτώσεις από διακυμάνσεις στις διεθνείς τιμές ενέργειας. Τέλος, η λειτουργία των ανεμογεννητριών δεν απαιτεί υδάτινους πόρους ή πρώτες ύλες καύσης, συμβάλλοντας έτσι στη διατήρηση φυσικών πόρων και στον περιορισμό της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης.

Ωστόσο, η χρήση της αιολικής ενέργειας συνοδεύεται και από αρνητικές περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Η εγκατάσταση ανεμογεννητριών μπορεί να αλλοιώσει την αισθητική του τοπίου, ιδιαίτερα σε περιοχές φυσικού κάλλους ή πολιτιστικού ενδιαφέροντος. Η έντονη οπτική τους παρουσία ενδέχεται να προκαλέσει αντιδράσεις από τοπικές κοινότητες και επισκέπτες, επηρεάζοντας ενδεχομένως την τουριστική εικόνα μιας περιοχής. Παράλληλα, η περιστροφή των πτερυγίων μπορεί να αποβεί μοιραία για την ορνιθοπανίδα, ειδικά σε περιοχές με μεταναστευτικά είδη πτηνών, ενώ και άλλες μορφές πανίδας ενδέχεται να διαταραχθούν λόγω της αλλαγής του μικροπεριβάλλοντος.

Σημαντικό ζήτημα αποτελεί επίσης η ηχητική όχληση που προκαλείται από τις ανεμογεννήτριες, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η εγκατάστασή τους βρίσκεται σε μικρή απόσταση από κατοικίες. Ο θόρυβος χαμηλής συχνότητας, αν και συχνά υποτιμημένος, μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα ζωής των κατοίκων, ιδίως κατά τις νυχτερινές ώρες. Επιπλέον, η εγκατάσταση των αιολικών πάρκων απαιτεί σημαντικά έργα υποδομής, όπως δρόμους πρόσβασης και γραμμές μεταφοράς ενέργειας, τα οποία μπορεί να έχουν προσωρινές ή και μόνιμες περιβαλλοντικές συνέπειες.

Η διαχείριση της ενέργειας που παράγεται από τον άνεμο παρουσιάζει επίσης προκλήσεις, λόγω της στοχαστικής φύσης του φαινομένου. Η μεταβλητότητα της έντασης και της

διαθεσιμότητας του ανέμου καθιστά αναγκαία την ύπαρξη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας ή την υποστήριξη από εφεδρικές μονάδες συμβατικών πηγών ενέργειας. Τέλος, η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε περιοχές με κατοικημένο ή τουριστικό χαρακτήρα μπορεί να προκαλέσει κοινωνικές αντιδράσεις, ιδίως όταν έρχονται σε σύγκρουση με άλλες χρήσεις γης ή δημιουργούνται ανησυχίες για υποβάθμιση της ποιότητας ζωής των κατοίκων (43),(44).

4.2.3. Συμπεράσματα και Προτάσεις Πολιτικής για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη της Αιολικής Ενέργειας

Η αιολική ενέργεια συγκαταλέγεται στις πλέον υποσχόμενες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, προσφέροντας σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Η ηλεκτροπαραγωγή χωρίς χρήση ορυκτών καυσίμων μειώνει δραστικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και συμβάλλει ουσιαστικά στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής. Παράλληλα, η ανάπτυξη αιολικών πάρκων ενισχύει την ενεργειακή ανεξαρτησία και την οικονομική δραστηριότητα, κυρίως σε απομακρυσμένες περιοχές.

Ωστόσο, η αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού συνοδεύεται από περιβαλλοντικές και κοινωνικές προκλήσεις, οι οποίες καθιστούν αναγκαία την εφαρμογή μιας ισορροπημένης στρατηγικής ανάπτυξης. Για την αντιμετώπιση των κυριότερων ζητημάτων, προτείνονται τα εξής:

α) Η υιοθέτηση ολοκληρωμένου χωροταξικού σχεδιασμού, ο οποίος να προβλέπει την εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε περιοχές με μειωμένη οικιστική πυκνότητα, βιομηχανικές ζώνες ή εδάφη περιορισμένου περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος. Με τον τρόπο αυτό, περιορίζονται οι αρνητικές επιδράσεις στην οπτική ποιότητα του τοπίου και στην ακουστική επιβάρυνση των τοπικών κοινωνιών.

β) Η εφαρμογή μέτρων προστασίας της ορνιθοπανίδας, ιδίως σε περιοχές με αυξημένη οικολογική σημασία. Τέτοιες παρεμβάσεις περιλαμβάνουν την αξιοποίηση τεχνολογιών εντοπισμού πτηνών και αυτόματης παύσης λειτουργίας των πτερυγίων, καθώς και την

προσεκτική επιλογή τοποθεσιών εγκατάστασης βάσει δεδομένων μεταναστευτικών διαδρομών.

γ) Η ενίσχυση της τεχνολογικής καινοτομίας, μέσω της ανάπτυξης πιο αποδοτικών, αθόρυβων και αισθητικά εναρμονισμένων ανεμογεννητριών, καθώς και προηγμένων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Ιδιαίτερη σημασία έχει η βελτίωση της διαχείρισης της στοχαστικής φύσης του ανέμου, ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα του ενεργειακού δικτύου ακόμη και σε περιόδους χαμηλής παραγωγής (44).

Συνοψίζοντας, η αιολική ενέργεια, υπό την προϋπόθεση της ορθής σχεδίασης, της κοινωνικής αποδοχής και της τεχνολογικής προσαρμογής, μπορεί να αποτελέσει θεμέλιο λίθο της ενεργειακής μετάβασης προς ένα βιώσιμο μέλλον. Η ισόρροπη ανάπτυξή της είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση τόσο της περιβαλλοντικής προστασίας όσο και της ενεργειακής επάρκειας.

4.3. Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μία από τις πιο αξιόπιστες και αποδοτικές μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, αξιοποιώντας τη δυναμική και κινητική ενέργεια του νερού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στους Υδροηλεκτρικούς Σταθμούς (ΥΗΣ), το νερό διοχετεύεται μέσω αγωγών σε υδροστρόβιλους, οι οποίοι, περιστρεφόμενοι, κινούν γεννήτριες που μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται κυρίως σε περιοχές με επαρκείς υδατικούς πόρους και σημαντικές υψομετρικές διαφορές, εξασφαλίζοντας υψηλή απόδοση και δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας μέσω ταμιευτήρων.

Παρότι θεωρείται «καθαρή» πηγή ενέργειας, η υδροηλεκτρική τεχνολογία ενέχει και περιβαλλοντικές ή κοινωνικές προκλήσεις, όπως η αλλοίωση οικοσυστημάτων και η ανάγκη για κατασκευή υποδομών μεγάλης κλίμακας. Παρ' όλα αυτά, με την κατάλληλη περιβαλλοντική διαχείριση και την πρόοδο της τεχνολογίας, μπορεί να συνεχίσει να διαδραματίζει κεντρικό ρόλο σε ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον (40).

4.3.1. Τρόπος λειτουργίας υδροηλεκτρικών σταθμών

Η λειτουργία των υδροηλεκτρικών σταθμών βασίζεται στην εκμετάλλευση της δυναμικής και κινητικής ενέργειας του νερού, το οποίο, καθώς ρέει μέσω ειδικά διαμορφωμένων υποδομών, κινεί υδροστρόβιλους συνδεδεμένους με ηλεκτρικές γεννήτριες. Η διαδικασία αυτή μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια του νερού σε ηλεκτρική με ιδιαίτερα υψηλό βαθμό απόδοσης — συχνά υπερβαίνει το 90%.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι υδροηλεκτρικών σταθμών, ανάλογα με τον τρόπο διαχείρισης του νερού:

- **Σταθμοί ροής ποταμού (Run-of-River):** Εκμεταλλεύονται τη συνεχή ροή ενός ποταμού, χωρίς σημαντική αποθήκευση νερού. Είναι συνήθως μικρής κλίμακας και λειτουργούν ως μονάδες βασικού φορτίου, αλλά επηρεάζονται έντονα από την εποχικότητα των υδατικών πόρων.
- **Σταθμοί με ταμιευτήρες:** Βασίζονται στη δημιουργία φραγμάτων που συγκρατούν μεγάλες ποσότητες νερού. Η αποθηκευμένη αυτή ενέργεια απελευθερώνεται με ελεγχόμενο τρόπο, ανάλογα με τη ζήτηση. Οι σταθμοί αυτοί εξυπηρετούν συχνά πολλαπλές χρήσεις, όπως ύδρευση, άρδευση και αντιπλημμυρική προστασία.
- **Σταθμοί αντλησιοταμίευσης:** Το νερό κυκλοφορεί μεταξύ δύο ταμιευτήρων σε διαφορετικό υψόμετρο. Κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης, το νερό αντλείται προς τον άνω ταμιευτήρα, ενώ κατά τις ώρες αιχμής αφήνεται να ρεύσει προς τα κάτω, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Πρόκειται για τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας, η οποία ενισχύει τη σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου.

Η απόδοση των υδροηλεκτρικών σταθμών εξαρτάται άμεσα από τη διαθεσιμότητα υδάτινων πόρων, γεγονός που τους καθιστά ευάλωτους στις κλιματικές διακυμάνσεις και στις μεταβολές των ετήσιων βροχοπτώσεων (45).



Εικόνα 5 Υδροηλεκτρικός σταθμός. (Πηγή: [5])

4.3.2. Αρνητικές και θετικές επιπτώσεις της χρήσης της υδροηλεκτρικής ενέργειας

Η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μία από τις πιο ώριμες και ευρέως διαδεδομένες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, προσφέροντας σημαντικά περιβαλλοντικά, ενεργειακά και κοινωνικά οφέλη. Ωστόσο, η κατασκευή και λειτουργία υδροηλεκτρικών σταθμών, ιδιαίτερα όταν περιλαμβάνουν μεγάλης κλίμακας φράγματα και τεχνητούς ταμιευτήρες, συνοδεύεται από πολύπλευρες περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις.

Αρνητικές επιπτώσεις καταγράφονται σε πολλαπλά επίπεδα. Σε περιβαλλοντικό επίπεδο, η μετατροπή ποταμών σε τεχνητές λίμνες προκαλεί μόνιμες αλλαγές στο τοπίο, απώλεια γεωργικής γης και υποβάθμιση της αισθητικής αξίας. Οι φυσικοί οικοτόποι κατακερματίζονται, περιορίζοντας τη δυνατότητα μετανάστευσης υδρόβιων ειδών και οδηγώντας σε μείωση της βιοποικιλότητας. Επιπλέον, η αποσύνθεση οργανικής ύλης στους ταμιευτήρες ευνοεί τον ευτροφισμό και τη μείωση του διαλυμένου οξυγόνου, με αρνητικές συνέπειες για την ποιότητα του νερού και τη βιωσιμότητα της υδρόβιας ζωής.

Σε κλιματικό επίπεδο, οι ταμιευτήρες μπορούν να επιφέρουν μικροκλιματικές αλλαγές, όπως αύξηση της υγρασίας και τοπικές μεταβολές της θερμοκρασίας. Ιδίως σε δασικές περιοχές, η αποσύνθεση βλάστησης υπό αναερόβιες συνθήκες μπορεί να οδηγήσει στην έκλυση μεθανίου, ενός ισχυρού αερίου του θερμοκηπίου (46),(47).

Από κοινωνική σκοπιά, τα υδροηλεκτρικά έργα ενδέχεται να προκαλέσουν τον αναγκαστικό εκτοπισμό πληθυσμών, με συνέπειες για την κοινωνική συνοχή και το βιοτικό επίπεδο. Επιπλέον, επηρεάζονται χρήσεις γης και παραδοσιακές δραστηριότητες όπως η γεωργία και η αλιεία, μεταβάλλοντας τοπικά οικοσυστήματα και οικονομίες.

Σε γεωλογικό επίπεδο, η πίεση που ασκεί το αποθηκευμένο νερό στα υπεδάφη ενδέχεται να προκαλέσει μικροσεισμική δραστηριότητα. Παράλληλα, η παρεμπόδιση της φυσικής ροής των φερτών υλικών οδηγεί σε διάβρωση των ποταμών, καθιζήσεις και απώλεια εδαφών. Σε περίπτωση αστοχίας φράγματος, οι επιπτώσεις μπορεί να είναι καταστροφικές, προκαλώντας πλημμύρες και σοβαρές απώλειες σε ανθρώπινες ζωές και υποδομές.

Παρά τις παραπάνω προκλήσεις, η υδροηλεκτρική ενέργεια παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Όπως επισημαίνουν οι Γεωργιόπουλος και Δήμου, πρόκειται για μια από τις πλέον αξιόπιστες μορφές ενέργειας, με δυνατότητα άμεσης απόκρισης και ευελιξίας στην κάλυψη της ζήτησης. Οι ταμιευτήρες συμβάλλουν επιπλέον στην αντιπλημμυρική προστασία και τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, εξασφαλίζοντας σταθερή παροχή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους (48).

Η χρήση των ταμιευτήρων για ύδρευση και άρδευση ενισχύει την αγροτική παραγωγή και διασφαλίζει τη διαθεσιμότητα πόσιμου νερού. Ορισμένες μελέτες αναφέρουν θετικές επιπτώσεις των τεχνητών λιμνών, οι οποίες – υπό προϋποθέσεις – μπορούν να λειτουργήσουν ως νέοι υγρότοποι με υψηλή βιοποικιλότητα. Επίσης, οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις μπορεί να ενισχύσουν την τοπική οικονομία, μέσω της δημιουργίας θέσεων εργασίας, της τουριστικής ανάπτυξης και της προώθησης του ναυταθλητισμού σε παραλίμνιες περιοχές (48),(49).

Συνοψίζοντας, η υδροηλεκτρική ενέργεια μπορεί να συνδυάσει ενεργειακή αποδοτικότητα με περιβαλλοντική και κοινωνική υπευθυνότητα, υπό την προϋπόθεση της προσεκτικής χωροθέτησης, της διαφανούς περιβαλλοντικής διαχείρισης και της ουσιαστικής συμμετοχής των τοπικών κοινωνιών στον σχεδιασμό και την υλοποίηση των έργων.

4.3.3 Προκλήσεις και Λύσεις στην Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Η αξιοποίηση της υδροηλεκτρικής ενέργειας, παρότι χαρακτηρίζεται από υψηλή απόδοση και χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα κατά τη λειτουργία, συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις σε περιβαλλοντικό, κοινωνικό, τεχνικό και οικονομικό επίπεδο. Οι επιπτώσεις των φραγμάτων και των ταμιευτήρων εκτείνονται σε πολλαπλές διαστάσεις, απαιτώντας στοχευμένες λύσεις και τεκμηριωμένη διαχείριση.

Σε οικολογικό επίπεδο, η διακοπή της φυσικής ροής των ποταμών οδηγεί στον κατακερματισμό των υδρόβιων οικοσυστημάτων, δυσχεραίνοντας τη μετανάστευση ειδών και απειλώντας τη βιοποικιλότητα. Για την αντιμετώπιση του ζητήματος εφαρμόζονται τεχνικές παρεμβάσεις, όπως τα περάσματα ψαριών (*fish ladders*), που επιτρέπουν τη διατήρηση της οικολογικής συνέχειας. Παράλληλα, οι ταμιευτήρες επηρεάζουν το μικροκλίμα της περιοχής, προκαλώντας μεταβολές στην υγρασία και τη θερμοκρασία. Η διαχείριση της παραποτάμιας βλάστησης και η παρακολούθηση των μικροκλιματικών μεταβολών αποτελούν ουσιώδη μέτρα μετριασμού αυτών των επιδράσεων.

Η συσσώρευση οργανικών υλών στους ταμιευτήρες προκαλεί φαινόμενα ευτροφισμού και μείωση του διαλυμένου οξυγόνου, με αρνητικές συνέπειες για την υδρόβια ζωή. Η εφαρμογή εξελιγμένων τεχνικών διαχείρισης υδάτων και ο περιορισμός της επιφανειακής απορροής οργανικών ουσιών αποτελούν κρίσιμες πρακτικές για τη διατήρηση της ποιότητας του νερού.

Σε κοινωνικό επίπεδο, η δημιουργία φραγμάτων συνδέεται συχνά με τον αναγκαστικό εκτοπισμό κοινοτήτων και την απώλεια παραγωγικών εκτάσεων. Για την ομαλή μετάβαση απαιτείται η χάραξη κοινωνικά ευαίσθητων πολιτικών επανεγκατάστασης, μεριμνώντας για αποζημιώσεις, υποστήριξη νέων επαγγελματικών δραστηριοτήτων και ενίσχυση της κοινωνικής συνοχής. Η απώλεια γεωργικής γης μπορεί να μετριαστεί με την προστασία κρίσιμων αγροτικών περιοχών και την ανάπτυξη εναλλακτικών δραστηριοτήτων, όπως ο οικοτουρισμός ή ο αγροτουρισμός.

Τεχνικές προκλήσεις περιλαμβάνουν τη σεισμική επιβάρυνση που ενδέχεται να προκαλέσει η πίεση των υδάτων στα γεωλογικά στρώματα, κάτι που προλαμβάνεται με λεπτομερείς γεωτεχνικές μελέτες και χρήση κατάλληλων δομικών υλικών. Επιπλέον, οι πιθανές αστοχίες φραγμάτων αντιμετωπίζονται μέσω συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης, συστηματικής συντήρησης και εφαρμογής σχεδίων έκτακτης ανάγκης. Η παλαίωση του εξοπλισμού περιορίζεται με στοχευμένες επενδύσεις σε αναβαθμίσεις και ενσωμάτωση καινοτόμων τεχνολογιών.

Σε οικονομικό επίπεδο, η κατασκευή υδροηλεκτρικών έργων χαρακτηρίζεται από υψηλό αρχικό κόστος, το οποίο μπορεί να εξισορροπηθεί μέσω συμπράξεων δημόσιου και ιδιωτικού τομέα ή διεθνών επενδυτικών σχημάτων. Η μεταβλητότητα της ενεργειακής παραγωγής, ως αποτέλεσμα των κλιματικών μεταβολών και της μεταβολής των βροχοπτώσεων, μπορεί να αντιμετωπιστεί μέσω υβριδικών ενεργειακών σχημάτων που συνδυάζουν υδροηλεκτρική, αιολική και ηλιακή ενέργεια για μεγαλύτερη σταθερότητα (48),(49).

Συνολικά, η υδροηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποτελέσει πυλώνα της ενεργειακής μετάβασης προς ένα πιο βιώσιμο και αποκεντρωμένο μοντέλο παραγωγής ενέργειας. Η επιτυχία της, ωστόσο, εξαρτάται από την ικανότητα διαχείρισης των επιπτώσεών της, με στρατηγικές που ενσωματώνουν περιβαλλοντική ισορροπία, κοινωνική δικαιοσύνη και τεχνική καινοτομία. Με την κατάλληλη πολιτική βούληση, διατομεακή συνεργασία και ενεργό συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών, μπορεί να επιτύχει τον συνδυασμό ενεργειακής απόδοσης και βιώσιμης ανάπτυξης.

4.4 Βιομάζα

Η βιομάζα αποτελεί μία από τις πλέον ευέλικτες και προσβάσιμες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, προερχόμενη από οργανικής προέλευσης υλικά. Πρόκειται για την αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια σε μορφή χημικής ενέργειας, που βρίσκεται σε φυτικούς, ζωικούς ή οργανικούς βιομηχανικούς πόρους. Η αξιοποίησή της συνδέεται με την ανάγκη διαχείρισης αποβλήτων, τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την

υποκατάσταση συμβατικών πηγών ενέργειας, ιδίως σε αγροτικές και αποκεντρωμένες περιοχές.

Η βιομάζα περιλαμβάνει ευρύ φάσμα πρώτων υλών, όπως γεωργικά υπολείμματα (άχυρο, στελέχη καλαμποκιού, φλοιούς ρυζιού), δασικά υπολείμματα (υπολείμματα υλοτομίας, κλαδέματα), ενεργειακές καλλιέργειες (ιτιά, ευκάλυπτος, καλάμι) και οργανικά απόβλητα (κοπριά, υπολείμματα τροφίμων, χαρτί, ξύλο). Η σημασία της δεν περιορίζεται μόνο στην παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά επεκτείνεται και στην παραγωγή βιοκαυσίμων, όπως το βιοαέριο και η βιοαιθανόλη.

Η δημιουργία βιομάζας οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία, μέσω της οποίας τα φυτά, με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, δεσμεύουν CO₂ από την ατμόσφαιρα και παράγουν οργανική ύλη. Έτσι, η βιομάζα ενσωματώνει τον κύκλο του άνθρακα και αποτελεί μια μορφή ενέργειας ουδέτερη ως προς τις εκπομπές, εφόσον η καύση ή η αποδόμησή της συνοδεύεται από ισόποση απορρόφηση CO₂ κατά τη φάση παραγωγής της.

Η χρήση της βιομάζας παρουσιάζει ποικιλία πλεονεκτημάτων, ιδίως ως προς τη δυνατότητα τοπικής αξιοποίησης, την υποστήριξη της κυκλικής οικονομίας και την αποδοτική χρήση πόρων που διαφορετικά θα κατέληγαν ως απόβλητα. Ωστόσο, η αποδοτική και περιβαλλοντικά ορθή χρήση της απαιτεί ορθό σχεδιασμό, τεχνολογική υποστήριξη και αυστηρή διαχείριση των πρώτων υλών.

Η ανάλυση που ακολουθεί εστιάζει στον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων αξιοποίησης βιομάζας, στις περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις, καθώς και στις προκλήσεις και τις ευκαιρίες που σχετίζονται με την ενσωμάτωσή της στο ενεργειακό μείγμα (50).

4.4.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα

Η βιομάζα αποτελεί μία από τις πλέον ευέλικτες και προσβάσιμες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, καθώς προέρχεται από οργανικής προέλευσης υλικά. Πρόκειται για

αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια σε μορφή χημικής ενέργειας, η οποία εμπεριέχεται σε φυτικούς, ζωικούς ή οργανικούς βιομηχανικούς πόρους. Η αξιοποίησή της σχετίζεται με τη διαχείριση αποβλήτων, τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την υποκατάσταση συμβατικών πηγών ενέργειας, ιδίως σε αγροτικές και αποκεντρωμένες περιοχές (51).

Η βιομάζα περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα πρώτων υλών, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται γεωργικά υπολείμματα, όπως άχυρο, στελέχη καλαμποκιού και φλοιοί ρυζιού· δασικά υπολείμματα, όπως υπολείμματα υλοτομίας και κλαδέματα· ενεργειακές καλλιέργειες, όπως ιτιά, ευκάλυπτος και καλάμι· καθώς και οργανικά απόβλητα, όπως κοπριά, υπολείμματα τροφίμων, χαρτί και ξύλο. Η σημασία της βιομάζας δεν περιορίζεται μόνο στην παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά επεκτείνεται και στην παραγωγή βιοκαυσίμων, όπως το βιοαέριο και η βιοαιθανόλη.

Η δημιουργία της βιομάζας βασίζεται στη φωτοσύνθεση, μέσω της οποίας τα φυτά δεσμεύουν διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) από την ατμόσφαιρα και παράγουν οργανική ύλη. Κατά συνέπεια, η βιομάζα ενσωματώνει τον κύκλο του άνθρακα και μπορεί να θεωρηθεί ενεργειακή επιλογή ουδέτερη ως προς τις εκπομπές, υπό την προϋπόθεση ότι η καύση ή η αποδόμησή της συνοδεύεται από ισόποση απορρόφηση CO_2 στη φάση παραγωγής της.

Η χρήση της βιομάζας προσφέρει πλεονεκτήματα, όπως η δυνατότητα τοπικής αξιοποίησης, η ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας και η αποδοτική χρήση υλικών που διαφορετικά θα κατέληγαν ως απόβλητα. Ωστόσο, η αποτελεσματική και περιβαλλοντικά ορθή χρήση της προϋποθέτει ορθό σχεδιασμό, τεχνολογική υποστήριξη και αυστηρή διαχείριση των πρώτων υλών, ώστε να διασφαλίζεται η βιωσιμότητα των εφαρμογών.

Η ανάλυση που ακολουθεί επικεντρώνεται στον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων αξιοποίησης της βιομάζας, στις περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις, καθώς και στις προκλήσεις και τις ευκαιρίες που συνδέονται με την ενσωμάτωσή της στο ενεργειακό μείγμα (52).



Εικόνα 6 Είδη στερεής βιομάζας. (Πηγή: [\[6\]](#))

4.4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της βιομάζας

Η χρήση της βιομάζας για την παραγωγή ενέργειας παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, που την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική στο πλαίσιο της πράσινης μετάβασης. Καταρχάς, η βιομάζα συμβάλλει στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, καθώς κατά την καύση της εκπέμπεται διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) το οποίο είχε προηγουμένως απορροφηθεί από τα φυτά μέσω της φωτοσύνθεσης. Εφόσον η παραγωγή και καύση της βιομάζας ακολουθούν βιώσιμες πρακτικές, η συνολική επίπτωση στο ισοζύγιο του CO_2 μπορεί να είναι ουδέτερη. Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, η βιομάζα δεν περιέχει σημαντικές ποσότητες θείου, γεγονός που περιορίζει τις εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO_2), υπεύθυνου για το φαινόμενο της όξινης βροχής.

Επιπλέον, η βιομάζα ενισχύει την ενεργειακή αυτονομία, καθώς βασίζεται σε τοπικά διαθέσιμους πόρους —όπως γεωργικά και δασικά υπολείμματα— μειώνοντας την ανάγκη εισαγόμενων καυσίμων και ενισχύοντας τις τοπικές οικονομίες. Η ανάπτυξη σχετικών τεχνολογιών δημιουργεί θέσεις εργασίας, ιδίως στην ύπαιθρο, τόσο στη συλλογή και μεταφορά πρώτων υλών όσο και στην κατασκευή και λειτουργία εγκαταστάσεων. Παράλληλα, η χρήση βιομάζας συνιστά αποτελεσματική στρατηγική διαχείρισης απορριμμάτων, καθώς οργανικά υλικά που θα κατέληγαν σε χώρους υγειονομικής ταφής

μετατρέπονται σε χρήσιμη ενέργεια, περιορίζοντας τη συνολική περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Ωστόσο, η ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας ενέχει και προκλήσεις. Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, λόγω της ανάγκης για εξειδικευμένο εξοπλισμό και υποδομές. Επιπλέον, η συλλογή, μεταφορά και αποθήκευση των πρώτων υλών παρουσιάζουν τεχνικές και οικονομικές δυσκολίες, εξαιτίας του μεγάλου όγκου, της συχνής υγρασίας και της αστάθειας στην προμήθεια. Η γεωγραφική διασπορά και η εποχικότητα των πρώτων υλών μπορεί να οδηγήσουν σε διακυμάνσεις στην τροφοδοσία, επηρεάζοντας τη σταθερή λειτουργία των μονάδων (51),(52) .

Τέλος, η αξιοποίηση της βιομάζας προϋποθέτει τον συντονισμό διαφορετικών τεχνολογικών και διαχειριστικών συστημάτων, τόσο σε επίπεδο παραγωγής όσο και διανομής ενέργειας. Η πολυπλοκότητα αυτή αυξάνει το συνολικό κόστος και απαιτεί μακροπρόθεσμη στρατηγική, διατομεακή συνεργασία και επαρκή θεσμική υποστήριξη.

4.4.3 Προκλήσεις και Λύσεις στη χρήση της Βιομάζας

Η αξιοποίηση της βιομάζας ως ανανεώσιμης πηγής ενέργειας αποτελεί κρίσιμο πυλώνα για τη βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση, αλλά συνοδεύεται από ένα ευρύ φάσμα προκλήσεων, που εκτείνονται στο περιβαλλοντικό, τεχνολογικό και κοινωνικοοικονομικό επίπεδο. Μία από τις βασικές προκλήσεις είναι η ανάγκη ιεράρχησης των χρήσεων της βιομάζας, δεδομένης της ετερογένειας των πόρων σε συνάρτηση με τη γεωμορφολογία, τις καλλιεργητικές πρακτικές και τις κλιματικές συνθήκες κάθε περιοχής. Η εντατική αξιοποίηση των αγροοικοσυστημάτων για παραγωγή βιομάζας ενδέχεται να επιτείνει την πίεση σε φυσικούς πόρους, όπως το έδαφος και το νερό, και να απειλήσει τη βιοποικιλότητα, οδηγώντας σε μείωση της γονιμότητας και διαταραχές της οικολογικής ισορροπίας.

Επιπλέον, η εισαγωγή ενεργειακών καλλιεργειών σε συστήματα αμειψισποράς ενδέχεται να επηρεάσει αρνητικά την αποδοτικότητα των βασικών τροφικών καλλιεργειών, ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά τους υδατικούς πόρους. Σε περιοχές χωρίς προηγούμενη εμπειρία στην ενσωμάτωση της βιομάζας στον παραγωγικό κύκλο, η αυξημένη ζήτηση ενδέχεται να οδηγήσει σε υπερβολική χρήση λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και αρδευτικού νερού. Επιπροσθέτως, η κλιματική αλλαγή εντείνει τη μεταβλητότητα στη διαθεσιμότητα και ποιότητα πρώτων υλών, αυξάνοντας τον κίνδυνο ξηρασίας και υποβάθμισης των εδαφών (53).

Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων προϋποθέτει στρατηγική προσέγγιση με έμφαση στη βιωσιμότητα και την καινοτομία. Προτείνονται λύσεις όπως η δημιουργία τοπικών κέντρων συλλογής και επεξεργασίας βιομάζας με χρήση βελτιστοποιημένων τεχνολογιών και συνεργασία με τοπικούς φορείς. Παράλληλα, η ενίσχυση της έρευνας και ανάπτυξης μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποδοτικά και περιβαλλοντικά φιλικά συστήματα μετατροπής βιομάζας σε ενέργεια. Σημαντική είναι και η χάραξη πολιτικών που προωθούν την ορθολογική χρήση των πόρων, την εκπαίδευση των αγροτικών κοινοτήτων και την παροχή κινήτρων για την αξιοποίηση αποβλήτων αντί ενεργειακών καλλιεργειών (53),(54) .

Η διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου πλαισίου κατανόησης των δυνατοτήτων της βιομάζας είναι καθοριστικής σημασίας. Η αξιολόγηση των τρεχουσών χρήσεων σε συνδυασμό με την πρόβλεψη μελλοντικών περιορισμών —ιδίως υπό το πρίσμα της κλιματικής κρίσης— επιτρέπει τον σχεδιασμό ρεαλιστικών, μακροπρόθεσμων και αποδοτικών παρεμβάσεων. Συνολικά, η βιώσιμη αξιοποίηση της βιομάζας δεν στηρίζεται αποκλειστικά στην τεχνολογία, αλλά απαιτεί ολιστική προσέγγιση που ενσωματώνει περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές παραμέτρους. Μόνο υπό αυτές τις συνθήκες μπορεί η βιομάζα να συμβάλει ουσιαστικά στην ενεργειακή μετάβαση και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (55).

5. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ: ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΝΑΝΤΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1 Κριτήρια σύγκρισης

Η συγκριτική αξιολόγηση της πυρηνικής ενέργειας και των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία που βασίζεται σε πολλαπλά και αλληλοσυμπληρούμενα κριτήρια. Τα βασικά πεδία ανάλυσης περιλαμβάνουν την οικονομική βιωσιμότητα, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, την τεχνολογική ωριμότητα και ασφάλεια, καθώς και την κοινωνική αποδοχή και τις πολιτικές διαστάσεις. Κάθε πηγή ενέργειας αξιολογείται όχι μόνο βάσει των εγγενών χαρακτηριστικών της, αλλά και στο πλαίσιο της συνολικής ενεργειακής στρατηγικής και των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης.

Από οικονομικής άποψης, εξετάζονται το κόστος επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης, ο χρόνος απόσβεσης και το κόστος παραγωγής ανά MWh. Η πυρηνική ενέργεια εμφανίζει υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης, αλλά χαμηλό λειτουργικό κόστος μακροπρόθεσμα. Αντίθετα, αρκετές μορφές ΑΠΕ – όπως τα φωτοβολταϊκά και η αιολική ενέργεια – διαθέτουν πλέον ανταγωνιστικό κόστος τόσο εγκατάστασης όσο και παραγωγής.

Στο περιβαλλοντικό πεδίο, η σύγκριση αφορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, τη διαχείριση αποβλήτων, την αισθητική επιβάρυνση και τις επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα. Οι ΑΠΕ θεωρούνται "καθαρές" μορφές ενέργειας, καθώς δεν παράγουν ρύπους κατά την παραγωγή. Η πυρηνική ενέργεια, αν και απαλλαγμένη από εκπομπές CO₂ κατά τη λειτουργία, δημιουργεί προκλήσεις ως προς τα ραδιενεργά απόβλητα και τον ενδεχόμενο κίνδυνο ατυχημάτων.

Εξίσου σημαντική είναι η τεχνολογική διάσταση, η οποία αφορά την ωριμότητα, την αποδοτικότητα και την ασφάλεια. Η πυρηνική τεχνολογία θεωρείται ώριμη, σταθερή και ικανή να καλύψει βασικό φορτίο, απαιτεί όμως υψηλό επίπεδο τεχνικής εξειδίκευσης και αυστηρές προδιαγραφές ασφαλείας. Οι ΑΠΕ, μολονότι επηρεάζονται από τη μεταβλητότητα των καιρικών συνθηκών, έχουν σημειώσει μεγάλη πρόοδο σε θέματα αποδοτικότητας και αποθήκευσης ενέργειας.

Στο κοινωνικό επίπεδο, κεντρικά ζητήματα αποτελούν η κοινωνική αποδοχή, η ενεργός συμμετοχή των πολιτών και η δυνατότητα περιφερειακής ανάπτυξης. Οι ΑΠΕ προωθούν την ενεργειακή δημοκρατία και την αποκέντρωση, ενώ η πυρηνική ενέργεια αντιμετωπίζεται συχνά με σκεπτικισμό λόγω ιστορικών ατυχημάτων και προβληματικής διαχείρισης αποβλήτων.

Τέλος, τα γεωπολιτικά και στρατηγικά κριτήρια – όπως η ενεργειακή ασφάλεια, η εξάρτηση από πρώτες ύλες και η εθνική αυτάρκεια – αποκτούν αυξανόμενη σημασία. Η πυρηνική ενέργεια προσφέρει σταθερή παραγωγή ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών, αλλά απαιτεί εμπλουτισμένα καύσιμα και εξειδικευμένες υποδομές. Αντιθέτως, οι ΑΠΕ ενισχύουν την ενεργειακή αυτονομία σε περιοχές με αφθονία φυσικών πόρων (50),(56).

Συνολικά, η πολυκριτηριακή ανάλυση συμβάλλει στην τεκμηριωμένη ανάδειξη των συγκριτικών πλεονεκτημάτων και αδυναμιών κάθε μορφής ενέργειας, υποστηρίζοντας τον σχεδιασμό ισορροπημένων και στρατηγικά τεκμηριωμένων ενεργειακών πολιτικών για το μέλλον.

5.1.1 Κόστος Κατασκευής και Λειτουργίας

Η πυρηνική ενέργεια χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα υψηλό αρχικό κόστος, γεγονός που αποδίδεται τόσο στην πολυπλοκότητα της τεχνολογίας όσο και στις αυστηρές προδιαγραφές ασφαλείας. Το κόστος κατασκευής ενός πυρηνικού σταθμού κυμαίνεται μεταξύ 6 και 9 δισεκατομμυρίων δολαρίων, ανάλογα με τον τύπο του αντιδραστήρα, τη γεωγραφική περιοχή και το ρυθμιστικό πλαίσιο. Παρά το υψηλό επενδυτικό κόστος, το λειτουργικό κόστος παραμένει σχετικά χαμηλό, χάρη στη μεγάλη διάρκεια ζωής των εγκαταστάσεων (40–60 έτη) και στην υψηλή ενεργειακή πυκνότητα του ουρανίου, η οποία καθιστά το κόστος καυσίμου σημαντικά χαμηλότερο σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα (56).

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα της πυρηνικής ενέργειας είναι η τιμολογιακή σταθερότητα, καθώς η εξάρτησή της από εξωτερικούς παράγοντες – όπως γεωπολιτικές κρίσεις ή διακυμάνσεις στις διεθνείς τιμές καυσίμων – είναι περιορισμένη. Το

χαρακτηριστικό αυτό επιτρέπει καλύτερο προγραμματισμό του ενεργειακού κόστους σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα.

Αντιθέτως, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν επιτύχει, μέσω τεχνολογικής εξέλιξης και οικονομιών κλίμακας, σημαντική μείωση του κόστους εγκατάστασης. Ενδεικτικά, την περίοδο 2010–2020, το κόστος της ηλιακής φωτοβολταϊκής ενέργειας μειώθηκε κατά 82%, ενώ της αιολικής ενέργειας κατά 39%. Οι ΑΠΕ παρουσιάζουν επίσης εξαιρετικά χαμηλό λειτουργικό κόστος, καθώς δεν απαιτούν προμήθεια καυσίμων για τη λειτουργία τους.

Ωστόσο, η ανάγκη για εκτεταμένες εγκαταστάσεις, αποθηκευτικά συστήματα ενέργειας και ενισχυμένα δίκτυα μεταφοράς μπορεί να επιφέρει σημαντικές έμμεσες δαπάνες, ιδιαίτερα σε περιοχές με ασταθή καιρικά φαινόμενα ή υποανάπτυκτες ενεργειακές υποδομές (56),(57).

Εν γένη, ενώ η πυρηνική ενέργεια απαιτεί υψηλές αρχικές επενδύσεις με μακροπρόθεσμα οφέλη, οι ΑΠΕ καθίστανται περισσότερο προσβάσιμες σε μικρότερης κλίμακας επενδύσεις και τοπικές κοινωνίες, αλλά προϋποθέτουν πιο σύνθετη και ευέλικτη ενεργειακή διαχείριση.

5.1.2 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Η πυρηνική ενέργεια, παρά τις αυστηρές προδιαγραφές ασφαλείας, κατατάσσεται μεταξύ των ενεργειακών τεχνολογιών με τις χαμηλότερες άμεσες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) κατά τη φάση της λειτουργίας. Η χαρακτηριστική αυτή ιδιότητα την καθιστά ελκυστική επιλογή στο πλαίσιο των πολιτικών για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, οι σημαντικότερες περιβαλλοντικές ανησυχίες σχετίζονται με τη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων, τα οποία έχουν εξαιρετικά μακρά διάρκεια ζωής και απαιτούν εξειδικευμένες υποδομές μόνιμης αποθήκευσης για χιλιάδες έτη. Η ασφαλής διαχείρισή τους αποτελεί μέχρι σήμερα ένα τεχνικά σύνθετο και πολιτικά ευαίσθητο ζήτημα. Επιπλέον, τα σπάνια αλλά ιδιαίτερα σοβαρά πυρηνικά ατυχήματα — όπως το δυστύχημα στη Φουκουσίμα το 2011 — εντείνουν τη δημόσια ανησυχία

αναφορικά με τις περιβαλλοντικές και υγειονομικές επιπτώσεις της πυρηνικής τεχνολογίας.

Από την άλλη πλευρά, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) χαρακτηρίζονται από σχεδόν μηδενικές εκπομπές κατά την παραγωγή ενέργειας, συμβάλλοντας σημαντικά στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, το πλήρες περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα πρέπει να εξετάζεται διαχρονικά και συνολικά. Η κατασκευή φωτοβολταϊκών πάνελ και ανεμογεννητριών απαιτεί την εξόρυξη σπάνιων γαιών και μετάλλων, διαδικασία που συνοδεύεται από περιβαλλοντική υποβάθμιση, απώλεια εδαφικών και υδατικών πόρων και εκπομπές ρύπων. Επιπλέον, η εγκατάσταση ανεμογεννητριών μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη βιοποικιλότητα, ιδιαίτερα την πτηνοπανίδα και τις νυχτερίδες, ενώ η εκτεταμένη χρήση γης για μεγάλης κλίμακας έργα ΑΠΕ ενδέχεται να οδηγήσει σε κατακερματισμό οικοσυστημάτων και απώλεια βιοτόπων (57),(58).

Συνεπώς, αν και οι ΑΠΕ θεωρούνται γενικά περιβαλλοντικά φιλικότερες, τόσο αυτές όσο και η πυρηνική ενέργεια ενέχουν περιβαλλοντικές προκλήσεις, κυρίως όταν αξιολογούνται με βάση τον πλήρη κύκλο ζωής τους — από την εξόρυξη πρώτων υλών και την κατασκευή έως την αποσυναρμολόγηση και την τελική διαχείριση αποβλήτων.

5.1.3 Σταθερότητα και Αποδοτικότητα Παραγωγής

Η πυρηνική ενέργεια χαρακτηρίζεται από υψηλή σταθερότητα και αξιοπιστία στην παραγωγή ηλεκτρισμού, γεγονός που την καθιστά ιδανική για την κάλυψη του βασικού φορτίου σε ένα εθνικό ή διασυνδεδεμένο ενεργειακό σύστημα. Ο συντελεστής χρησιμοποίησης των πυρηνικών σταθμών υπερβαίνει συστηματικά το 90%, υποδεικνύοντας ότι οι μονάδες λειτουργούν σχεδόν αδιάλειπτα κατά τη διάρκεια του έτους, ανεξαρτήτως καιρικών ή εποχικών μεταβολών. Αυτή η δυνατότητα συνεχούς και προβλέψιμης παραγωγής ενέργειας ενισχύει την ενεργειακή ασφάλεια και μειώνει την ανάγκη για εφεδρικά ή επικουρικά συστήματα παραγωγής (59).

Αντιθέτως, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, παρουσιάζουν διαλείπουσα παραγωγή, με σημαντικά χαμηλότερους συντελεστές χρησιμοποίησης, που συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 20% και 35%, ανάλογα

με την τεχνολογία και τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες (60). Η εξάρτηση από τον καιρό και το φως του ήλιου οδηγεί σε αστάθεια της παροχής, δημιουργώντας την ανάγκη για προηγμένα συστήματα εξομάλυνσης των διακυμάνσεων. Τέτοια μέσα περιλαμβάνουν τεχνολογίες αποθήκευσης, όπως μπαταρίες λιθίου και αντλησιοταμιευτικά συστήματα, καθώς και τη διατήρηση συμβατικών μονάδων φυσικού αερίου σε εφεδρεία. Παρά την πρόοδο στον τομέα της αποθήκευσης και της διαχείρισης φορτίου, η ανάγκη για ενισχυμένες υποδομές αυξάνει το συνολικό επενδυτικό και λειτουργικό κόστος, προσθέτοντας πολυπλοκότητα στη λειτουργία των ενεργειακών δικτύων (61).

5.1.4 Ασφάλεια και Κοινωνική Αποδοχή

Η ασφάλεια αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στη διαμόρφωση της κοινής γνώμης και της κοινωνικής αποδοχής κάθε ενεργειακής τεχνολογίας. Παρά την ύπαρξη αυστηρών διεθνών πρωτοκόλλων, πλαισίων ρυθμιστικής εποπτείας και την πρόοδο σε επίπεδο τεχνολογικών μηχανισμών ασφαλείας, οι πυρηνικοί σταθμοί εξακολουθούν να προκαλούν έντονη καχυποψία στον γενικό πληθυσμό. Η συλλογική μνήμη ιστορικών πυρηνικών ατυχημάτων μεγάλης κλίμακας, όπως το Τσερνόμπιλ (1986) και η Φουκουσίμα (2011), έχει αφήσει ανεξίτηλο αποτύπωμα στην αντίληψη του κοινού για την πυρηνική ενέργεια. Επιπλέον, ζητήματα που αφορούν τη μακροχρόνια διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων και τους πιθανούς κινδύνους από σκόπιμες επιθέσεις ή φυσικές καταστροφές ενισχύουν τον δημόσιο σκεπτικισμό, οδηγώντας σε περιορισμένη κοινωνική αποδοχή της τεχνολογίας σε πολλές χώρες (62).

Αντιθέτως, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) τυγχάνουν γενικά υψηλότερης κοινωνικής αποδοχής, καθώς συνδέονται με ήπιες τεχνολογίες, περιβαλλοντική ευαισθησία και τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης. Ειδικότερα, η απουσία ρυπογόνων ή επικίνδυνων αποβλήτων και η αποκεντρωμένη φύση τους ενισχύουν το θετικό πρόσημο στη συνείδηση των πολιτών. Ωστόσο, και οι ΑΠΕ δεν είναι απολύτως απαλλαγμένες από κοινωνικές εντάσεις: σε τοπικό επίπεδο καταγράφονται συχνά αντιδράσεις που σχετίζονται με την αισθητική αλλοίωση του τοπίου (όπως στις περιπτώσεις ανεμογεννητριών), την ηχορύπανση ή την αλλαγή στη χρήση γης – ιδίως σε περιοχές με ιδιαίτερο περιβαλλοντικό ή πολιτιστικό χαρακτήρα. Παρά ταύτα, η γενική τάση παραμένει

θετική, καθώς οι πολίτες αντιλαμβάνονται τις ΑΠΕ ως περισσότερο ασφαλείς και συμβατές με τις ανάγκες της περιβαλλοντικής προστασίας (63),(64).

Συγκριτικός πίνακας ορισμένων χαρακτηριστικών μεταξύ ΑΠΕ – Πυρηνικής Ενέργειας

Κριτήριο	Πυρηνική Ενέργεια	ΑΠΕ
Κόστος Κατασκευής	Πολύ υψηλό	Μεσαίο-Υψηλό (εξαρτάται από την ΑΠΕ)
Λειτουργικό Κόστος	Σταθερό και χαμηλό	Χαμηλό
Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις	Ρύπανση από πυρηνικά απόβλητα	Μηδενικές εκπομπές CO ₂
Ασφάλεια	Κίνδυνος ατυχημάτων (Τσερνομπίλ, Φουκουσίμα)	Πολύ ασφαλής
Σταθερότητα Παραγωγής	Σταθερή	Μεταβλητή (ανάλογα με τον καιρό)
Ενεργειακή Απόδοση	Πολύ υψηλή	Μέτρια-Υψηλή

5.2 Ο ρόλος της πυρηνικής ενέργειας ως βασικό φορτίο

Η πυρηνική ενέργεια διαδραματίζει κεντρικό ρόλο ως πηγή βασικού φορτίου στο ενεργειακό μείγμα πολλών χωρών. Ο όρος «βασικό φορτίο» (base load) αναφέρεται στη σταθερή και αδιάλειπτα απαιτούμενη ποσότητα ηλεκτρικής ισχύος που πρέπει να είναι διαθέσιμη στο δίκτυο ηλεκτροδότησης καθ' όλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου, ανεξαρτήτως διακυμάνσεων στη ζήτηση ή εξωτερικών παραγόντων, όπως οι καιρικές συνθήκες ή η εποχικότητα.

Η πυρηνική ενέργεια ξεχωρίζει για την υψηλή αξιοπιστία, τη συνεχή παραγωγή και τη χαμηλή εξάρτηση από μεταβλητούς περιβαλλοντικούς παράγοντες. Οι πυρηνικοί σταθμοί

έχουν σχεδιαστεί ώστε να λειτουργούν με ελάχιστες διακοπές, εξασφαλίζοντας σταθερή τροφοδοσία του δικτύου και συνεισφέροντας καίρια στην ενεργειακή ασφάλεια. Η ικανότητά τους να παράγουν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας με σταθερό ρυθμό είναι κρίσιμη για τη διατήρηση του ενεργειακού ισοζυγίου, ιδίως σε περιόδους χαμηλής παραγωγής από διαλείπουσες πηγές, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια.

Οι συντελεστές χρησιμοποίησης (capacity factors) των πυρηνικών μονάδων υπερβαίνουν συστηματικά το 90%, γεγονός που καταδεικνύει τη συνεχή λειτουργία τους σχεδόν στο μέγιστο της δυναμικότητας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Αντίθετα, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), όπως η ηλιακή και η αιολική, εξαρτώνται άμεσα από φυσικούς πόρους, οι οποίοι παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις. Ως εκ τούτου, η πυρηνική ενέργεια προσφέρει προβλεψιμότητα και σταθερότητα στην παραγωγή, στοιχεία κρίσιμα για τη συνολική αξιοπιστία του ενεργειακού συστήματος (60).

Η σταθερή παροχή ισχύος καθιστά την πυρηνική τεχνολογία απαραίτητο πυλώνα για την κάλυψη του φορτίου βάσης, ιδιαίτερα σε δίκτυα με μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ. Η ικανότητά της να συνδυάζει υψηλή ενεργειακή απόδοση με χαμηλές εκπομπές CO₂ ενισχύει τη θέση της στις στρατηγικές αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής.

Ωστόσο, η αξιοποίησή της ως βασική τεχνολογία προϋποθέτει ευρεία κοινωνική αποδοχή, θεσμική σταθερότητα, αυστηρό ρυθμιστικό πλαίσιο και προηγμένα συστήματα διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων. Η επιτυχής ενσωμάτωσή της στο ενεργειακό μείγμα απαιτεί έναν ολοκληρωμένο σχεδιασμό που θα εξισορροπεί την ενεργειακή ασφάλεια με τη βιωσιμότητα και τη διαφάνεια προς την κοινωνία (65).

5.3 Συμπληρωματικότητα και πιθανές συνέργειες

Η πυρηνική ενέργεια αποτελεί στρατηγικής σημασίας τεχνολογία για την υποστήριξη της ενεργειακής μετάβασης, ιδίως λόγω της ικανότητάς της να λειτουργεί ως σταθερή βάση (baseload) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αντίθεση με τις περισσότερες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), οι οποίες παρουσιάζουν διακυμάνσεις λόγω

εξάρτησης από καιρικές και ημερήσιες μεταβλητές, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες μπορούν να λειτουργούν με υψηλό συντελεστή χρησιμοποίησης, εξασφαλίζοντας σταθερότητα στην ηλεκτροδότηση.

Η βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση απαιτεί συνδυαστική αξιοποίηση διαφορετικών τεχνολογιών. Οι ΑΠΕ, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, προσφέρουν καθαρή και χαμηλού κόστους ηλεκτρική ενέργεια, ωστόσο η στοχαστική φύση τους δημιουργεί προκλήσεις όσον αφορά τη συνεχή και αξιόπιστη παροχή. Σε αυτό το σημείο, η πυρηνική ενέργεια μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά, καλύπτοντας το ενεργειακό "κενό" που δημιουργείται όταν η απόδοση των ΑΠΕ υπολείπεται των αναγκών.

Σε ένα υποθετικό ενεργειακό μίγμα όπου το 40% της παραγωγής προέρχεται από ΑΠΕ και το 30% από πυρηνική ενέργεια, η δεύτερη μπορεί να απορροφήσει τις διακυμάνσεις της πρώτης, μειώνοντας την ανάγκη για ρυπογόνες εφεδρικές λύσεις, όπως οι μονάδες φυσικού αερίου ή οι μπαταρίες. Παραδείγματα από χώρες όπως η Γαλλία και η Σουηδία καταδεικνύουν την πρακτική εφαρμογή αυτής της προσέγγισης, ειδικά σε περιόδους κρίσης, όπως η πρόσφατη ενεργειακή αστάθεια λόγω του πολέμου στην Ουκρανία.

Επιπλέον, σύμφωνα με μελέτη του MIT (2020), ένα ενεργειακό σενάριο στο οποίο η πυρηνική ενέργεια καλύπτει το 20–30% του ενεργειακού μείγματος και οι ΑΠΕ το 50–60%, οδηγεί σε μείωση των εκπομπών κατά 85–90% σε σχέση με τα σενάρια βασισμένα σε ορυκτά καύσιμα, επιτυγχάνοντας ουσιαστική πρόοδο προς τους στόχους της κλιματικής ουδετερότητας (65).

Ωστόσο, η επίτευξη αυτής της λειτουργικής συνέργειας μεταξύ πυρηνικής ενέργειας και ΑΠΕ προϋποθέτει ορισμένες θεμελιώδεις προϋποθέσεις. Αρχικά, απαιτείται η ανάπτυξη ευέλικτων και "έξυπνων" δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας (smart grids), ικανών να διαχειρίζονται αποδοτικά τόσο τις σταθερές όσο και τις διαλείπουσες πηγές. Παράλληλα, κρίσιμος είναι ο ρόλος της αποθήκευσης ενέργειας, μέσω τεχνολογιών όπως οι μπαταρίες, τα υδρογονοκίνητα συστήματα και τα αντλησιοταμιευτικά έργα, για την εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης.

Εξίσου σημαντική είναι η κοινωνική αποδοχή της πυρηνικής ενέργειας, η οποία παραμένει ζητούμενο σε πολλές χώρες. Η διαχείριση των ανησυχιών σχετικά με την ασφάλεια και τα ραδιενεργά απόβλητα, καθώς και η ενίσχυση της διαφάνειας, αποτελούν βασικούς παράγοντες για την ενίσχυση της δημόσιας εμπιστοσύνης.

Τέλος, η τεχνολογική καινοτομία διαδραματίζει κομβικό ρόλο στη διαμόρφωση μιας αποτελεσματικής συνέργειας. Η ανάπτυξη αντιδραστήρων τέταρτης γενιάς, όπως οι Μικροί Μονάδες Πυρηνικών Αντιδραστήρων (Small Modular Reactors – SMRs), παρέχει νέες δυνατότητες για ασφαλέστερες, πιο ευέλικτες και οικονομικά αποδοτικές εφαρμογές, προσαρμοσμένες στις απαιτήσεις του σύγχρονου ενεργειακού συστήματος (66) .

6. ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΝΑ ΠΙΟ ΒΙΩΣΙΜΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΕΛΛΟΝ

6.1 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

Η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη μετάβαση σε ένα βιώσιμο και ευέλικτο ενεργειακό σύστημα, ιδιαίτερα ενόψει της αυξανόμενης διείσδυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο ενεργειακό μείγμα. Η διαλείπουσα φύση πηγών όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια καθιστά επιτακτική την ανάγκη για αξιόπιστες λύσεις αποθήκευσης, προκειμένου να εξασφαλίζεται η συνεχής και σταθερή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών ή ωρών αιχμής.

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης επιτρέπουν τη συλλογή της πλεονάζουσας ενέργειας που παράγεται σε περιόδους υψηλής απόδοσης – για παράδειγμα κατά τη διάρκεια ηλιοφάνειας ή ισχυρών ανέμων – και την επανατροφοδότησή της στο δίκτυο όταν η ζήτηση υπερβαίνει την προσφορά ή όταν οι συνθήκες παραγωγής είναι δυσμενείς. Με αυτόν τον τρόπο, συμβάλλουν στην εξισορρόπηση του ενεργειακού φορτίου, στη μείωση των διακυμάνσεων και στην ενίσχυση της αξιοπιστίας του συστήματος ηλεκτροδότησης (61).

Επιπλέον, η αποθήκευση ενέργειας επιτρέπει την καλύτερη αξιοποίηση των υφιστάμενων ενεργειακών υποδομών, μειώνει τις απώλειες μεταφοράς και διευκολύνει την ενσωμάτωση αποκεντρωμένων μονάδων παραγωγής, όπως τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά και τα μικρά αιολικά συστήματα. Καθώς τα ενεργειακά δίκτυα εξελίσσονται σε πιο σύνθετα και αποκεντρωμένα συστήματα, η αποθήκευση ενέργειας αποκτά στρατηγική σημασία όχι μόνο για την τεχνική σταθερότητα και την αποδοτικότητα του συστήματος, αλλά και για την ενίσχυση της ενεργειακής αυτονομίας, της ανθεκτικότητας και της βιωσιμότητας σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα.

6.1.1 Αποθήκευση ενέργειας σε χημική μορφή– Τεχνολογία μπαταριών

Η ανάπτυξη τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας επικεντρώνεται κυρίως στις μπαταρίες, οι οποίες επιτρέπουν τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική και αντίστροφα. Κάθε τεχνολογία διαφέρει ως προς τη δομή, την απόδοση, τις εφαρμογές και τον

περιβαλλοντικό της αντίκτυπο. Οι βασικές αρχές λειτουργίας περιλαμβάνουν δύο ηλεκτρόδια (άνοδο και κάθοδο), έναν ηλεκτρολύτη ως αγωγίμο μέσο, και έναν διαχωριστή για την ηλεκτρική μόνωση. Κατά την εκφόρτιση, τα ηλεκτρόνια ρέουν από την άνοδο προς την κάθοδο μέσω του εξωτερικού κυκλώματος, ενώ κατά τη φόρτιση η διαδικασία αντιστρέφεται.

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος χρησιμοποιούν μολύβδο, διοξείδιο του μολύβδου και θειικό οξύ. Πλεονεκτούν λόγω χαμηλού κόστους (50–150 €/kWh), απλής εγκατάστασης και χαμηλής αυτοεκφόρτισης (2–5% ανά μήνα), ενώ μειονεκτούν ως προς τον περιορισμένο αριθμό κύκλων ζωής (300–1.500), τη μέτρια ενεργειακή πυκνότητα (30 Wh/kg) και την τοξικότητα του μολύβδου. Εφαρμόζονται κυρίως σε φωτοβολταϊκά συστήματα και εφεδρικές πηγές ισχύος. Οι VRLA εκδόσεις τους απαιτούν λιγότερη συντήρηση αλλά έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής.

Οι αλκαλικές μπαταρίες περιλαμβάνουν τεχνολογίες όπως NiCd, NiMH και NiZn. Οι NiCd χρησιμοποιούν νικέλιο και κάδμιο, ενώ οι NiMH νικέλιο και κράμα μετάλλων, και οι NiZn ψευδάργυρο. Χαρακτηρίζονται από ανθεκτικότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες (έως -50°C) και ικανοποιητική ενεργειακή πυκνότητα, ειδικά οι NiMH (80 Wh/kg). Ωστόσο, έχουν υψηλό κόστος (200–750 €/kWh), οι NiCd περιέχουν τοξικό κάδμιο και οι περισσότερες τεχνολογίες εμφανίζουν απόδοση μεταξύ 60% και 91%. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε ιατρικό εξοπλισμό και ηλεκτρικά οχήματα.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion και Li-Polymer) αποτελούν την κυρίαρχη τεχνολογία σε φορητές συσκευές, ηλεκτρικά οχήματα και μελλοντικά ενεργειακά δίκτυα. Αποτελούνται από άνοδο γραφίτη, κάθοδο με οξείδια μετάλλων (όπως το LiCoO₂) και υγρό ή στερεό ηλεκτρολύτη. Προσφέρουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα (80–150 Wh/kg), υψηλή απόδοση (90–100%) και χαμηλή αυτοεκφόρτιση (<5% ανά μήνα). Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, παρουσιάζουν ευαισθησία σε υπερθέρμανση και απαιτούν προστατευτικά κυκλώματα, ενώ το κόστος τους παραμένει υψηλό (>420 €/kWh).



Εικόνα 7 Μπαταρία ιόντων λιθίου 48V . (Πηγή: [7])

Οι μπαταρίες νατρίου-θείου (NaS) λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες (περίπου 300°C), έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα (150–240 Wh/kg), μεγάλη διάρκεια ζωής (2.500–4.500 κύκλοι) και υψηλή απόδοση (~90%). Παρ' όλα αυτά, απαιτούν συστήματα θερμικού ελέγχου για την αποτροπή κινδύνων και χρησιμοποιούνται κυρίως για αποθήκευση αιολικής ενέργειας και σταθεροποίηση δικτύων.

Οι μπαταρίες ροής, όπως οι τύποι Zinc-Bromine και Vanadium Redox, βασίζονται σε υγρούς ηλεκτρολύτες που αποθηκεύονται σε εξωτερικές δεξαμενές. Παρέχουν δυνατότητα κλιμακούμενης χωρητικότητας, μακρά διάρκεια εκφόρτισης (σε ώρες) και σχετικά χαμηλό κόστος υλικών. Εντούτοις, έχουν μέτρια απόδοση (περίπου 75%) και απαιτούν συντήρηση, κυρίως λόγω της λειτουργίας αντλιών. Χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας, όπως το σύστημα 120 MWh στο Ηνωμένο Βασίλειο .

Οι μπαταρίες μετάλλου-αέρα, όπως οι Zn-Air και Al-Air, χρησιμοποιούν μεταλλικό υλικό και οξυγόνο από την ατμόσφαιρα. Διακρίνονται για την εξαιρετικά υψηλή ενεργειακή πυκνότητα (110–420 Wh/kg) και την περιβαλλοντική τους ασφάλεια. Ωστόσο,

παρουσιάζουν δυσκολία επαναφόρτισης και χαμηλή απόδοση (~50%), περιορίζοντας τη χρήση τους σε πειραματικά συστήματα και εφαρμογές εφεδρείας.

Συγκριτικά, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος αποτελούν την πιο οικονομική επιλογή, ενώ οι τεχνολογίες λιθίου και νατρίου-θείου προσφέρουν υψηλότερη ενεργειακή απόδοση. Η απόδοση των μπαταριών λιθίου φτάνει το 90–100%, ενώ οι NaS φτάνουν το 90%, οι μολύβδου-οξέος κυμαίνονται στο 60–95% και οι ροής γύρω στο 75%. Αναφορικά με τις εφαρμογές, οι μπαταρίες λιθίου και NiMH είναι κατάλληλες για μικρής κλίμακας χρήσεις, ενώ οι NaS και οι ροής είναι ιδανικές για εφαρμογές δικτύου. Σε εξειδικευμένες περιπτώσεις, οι NiCd προτιμώνται σε ψυχρά κλίματα, ενώ οι μπαταρίες μετάλλου-αέρα υπερέχουν ως προς την ενεργειακή πυκνότητα (67),(68).

Από περιβαλλοντική σκοπιά, οι μπαταρίες μετάλλου-αέρα και οι NaS θεωρούνται ασφαλέστερες, ενώ οι NiCd απαιτούν προσοχή λόγω τοξικότητας. Η έρευνα επικεντρώνεται στη μείωση του κόστους των λιθίου, την αύξηση της διάρκειας ζωής και τη βιωσιμότητα μέσω ανακύκλωσης. Οι τεχνολογίες ροής και NaS εκτιμάται ότι θα αποτελέσουν βασικούς πυλώνες της αποθήκευσης ανανεώσιμης ενέργειας στο μέλλον.

6.1.2 Τεχνολογία υδρογόνου

Το υδρογόνο αποτελεί μια δευτερογενή μορφή ενέργειας και όχι πρωτογενές καύσιμο, καθώς απαιτείται ενέργεια για την παραγωγή του από άλλες πηγές, όπως τα ορυκτά καύσιμα, τη πυρηνική ενέργεια, τη βιομάζα και κυρίως τις ανανεώσιμες πηγές, όπως η ηλιακή και η αιολική. Αν και η τεχνολογία παραγωγής υδρογόνου είναι γνωστή εδώ και δεκαετίες – με χαρακτηριστικό παράδειγμα τις πρώτες ηλεκτρολυτικές εγκαταστάσεις του 1929 στη Νορβηγία και το δίκτυο αγωγών υδρογόνου στη Γερμανία από τη δεκαετία του 1930 – τα τελευταία χρόνια έχει αναδειχθεί ως βασική τεχνολογία αποθήκευσης και μεταφοράς ενέργειας στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης.

Η χρήση του υδρογόνου ως φορέα ενέργειας κρίνεται ιδιαίτερα υποσχόμενη, κυρίως για τις μεταφορές, καθώς η καύση του δεν παράγει διοξείδιο του άνθρακα ή άλλους αέριους

ρύπους, αλλά μόνο νερό. Σήμερα, το μεγαλύτερο μέρος του υδρογόνου παράγεται από φυσικό αέριο μέσω της διαδικασίας ατμομετατροπής μεθανίου, γεγονός που εξακολουθεί να επιβαρύνει το περιβάλλον. Ωστόσο, η παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές εξαλείφει αυτό το μειονέκτημα, καθιστώντας το ένα καύσιμο μηδενικών εκπομπών.

Οι βασικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου από ΑΠΕ είναι δύο. Πρώτον, η θερμική διάσπαση του νερού, η οποία επιτυγχάνεται είτε μέσω εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών – περίπου 2000°C – με τη χρήση συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών, είτε με χημικές αντιδράσεις που απαιτούν χαμηλότερες θερμοκρασίες. Δεύτερον, η ηλεκτρόλυση του νερού, κατά την οποία η ηλεκτρική ενέργεια – ιδανικά από φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες ή υδροηλεκτρικά συστήματα – χρησιμοποιείται για τη διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο.

Το παραγόμενο υδρογόνο μπορεί να αξιοποιηθεί με διάφορους τρόπους: για την αντικατάσταση του συμβατικού υδρογόνου που παράγεται από φυσικό αέριο, για την ενσωμάτωσή του στα υπάρχοντα δίκτυα φυσικού αερίου με στόχο τη μείωση των εκπομπών CO₂, για χρήση ως καύσιμο σε μέσα μεταφοράς όπως λεωφορεία και αεροσκάφη, καθώς και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κυψελών καυσίμου. Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν μια τεχνολογία με σημαντικές δυνατότητες, καθώς μετατρέπουν το υδρογόνο σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα, χωρίς ρύπους και με μοναδικό παραπροϊόν το νερό. Η εφαρμογή τους εκτείνεται από τα ηλεκτρικά οχήματα έως τις οικιακές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Υπάρχουν πολλοί τύποι κυψελών, οι οποίοι διαφέρουν ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά και το πεδίο εφαρμογής, καλύπτοντας ανάγκες από φορητές συσκευές μέχρι μεγάλες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής.

Η αποθήκευση του υδρογόνου, ωστόσο, παραμένει τεχνικά απαιτητική. Μπορεί να αποθηκευτεί σε συμπιεσμένη αέρια μορφή υπό υψηλή πίεση, σε υγρή μορφή υπό κρυογενικές συνθήκες (κάτω από -250°C), ή να απορροφηθεί ως υβρίδιο μετάλλου. Παρά τις προκλήσεις που συνδέονται με την ασφάλεια, την ενεργειακή πυκνότητα και το κόστος, η τεχνολογική πρόοδος οδηγεί σε ολοένα και πιο αποδοτικές και ασφαλείς λύσεις αποθήκευσης.

Στο πλαίσιο αυτό, παγκόσμιες πρωτοβουλίες, όπως το HYSOLAR PROJECT, στοχεύουν στην ενσωμάτωση της παραγωγής υδρογόνου με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, με σκοπό τη βιώσιμη μεταφορά και χρήση του. Παρά τα υφιστάμενα τεχνικά και οικονομικά εμπόδια, η ερευνητική πρόοδος και η πολιτική βούληση καθιστούν το υδρογόνο έναν βασικό υποψήφιο για την επίτευξη ενός καθαρού, ασφαλούς και βιώσιμου ενεργειακού καυσίμου του μέλλοντος (69),(70).

6.1.3 Πεπιεσμένος αέρας η σύστημα συμπίεσης αέρα

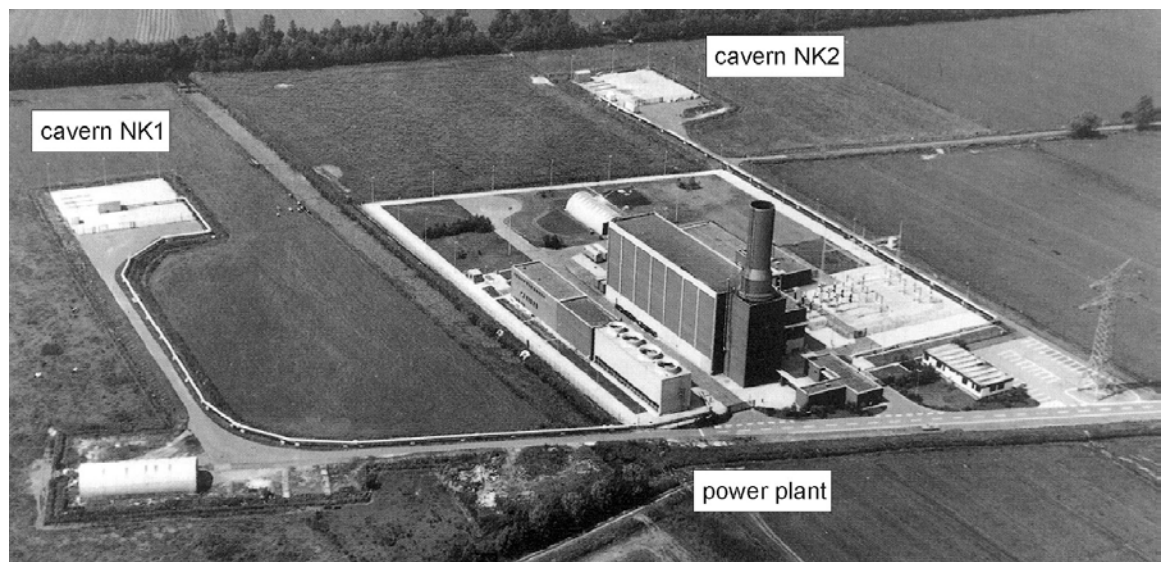
Η αποθήκευση ενέργειας με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage – CAES) αποτελεί μια προηγμένη τεχνολογία που επιτρέπει την αποθήκευση πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της συμπίεσης αέρα σε υπόγειες δεξαμενές, όπως σπήλαια αλατιού. Το σύστημα αυτό λειτουργεί αποθηκεύοντας αέρα υπό υψηλή πίεση, συνήθως μεταξύ 800 και 1600 psi, και στη συνέχεια τον απελευθερώνει ώστε να κινήσει έναν αεριοστρόβιλο, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια σε περιόδους αυξημένης ζήτησης. Μέχρι σήμερα, μόνο δύο εγκαταστάσεις CAES λειτουργούν παγκοσμίως: μία στη Γερμανία (Huntorf) και μία στις Ηνωμένες Πολιτείες (McIntosh), και οι δύο βασισμένες σε υπόγεια κοιτάσματα αλατιού.

Ένα πλήρες σύστημα CAES περιλαμβάνει μονάδα παραγωγής ισχύος, στην οποία περιλαμβάνονται ο προθερμαντήρας, ο αεριοστρόβιλος, ο στρόβιλος καύσης και η ηλεκτρογεννήτρια· μονάδα συμπίεσης με ηλεκτρικό κινητήρα, αξονικούς και φυγοκεντρικούς συμπιεστές και συστήματα ψύξης· υπόγειο αποθηκευτικό χώρο για τη διατήρηση του πεπιεσμένου αέρα· σύστημα ελέγχου που ρυθμίζει τη λειτουργία μεταξύ αποθήκευσης και εκφόρτισης· και βοηθητικό εξοπλισμό, όπως καυστήρες και εναλλάκτες θερμότητας.

Η διαδικασία συμπίεσης του αέρα πραγματοποιείται σε πολλαπλά στάδια με ενδιάμεση ψύξη, προκειμένου να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας και να αποφευχθεί η υγρασία. Ο αποθηκευμένος αέρας διατηρείται σε γεωλογικούς σχηματισμούς όπως υπόγεια σπήλαια, υδροφόροι ορίζοντες ή τεχνητές δεξαμενές. Κατά την εκφόρτιση, ο αέρας προθερμαίνεται

και διοχετεύεται σε σύστημα αεριοστρόβιλου, το οποίο μετατρέπει την κινητική του ενέργεια σε ηλεκτρική. Δεδομένου ότι η εκτόνωση προκαλεί πτώση της θερμοκρασίας, απαιτείται πρόσθετη θέρμανση, είτε μέσω καύσης φυσικού αερίου είτε μέσω ανάκτησης θερμότητας από προηγούμενα στάδια της διαδικασίας.

Τα CAES συμβάλλουν σημαντικά στη σταθεροποίηση του ηλεκτρικού δικτύου, καθώς απορροφούν την ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και την αποδίδουν όταν αυτή αυξάνεται. Οι σημαντικότερες υφιστάμενες εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν την εγκατάσταση στο Huntorf της Γερμανίας, με ισχύ 290 MW και λειτουργία από το 1979, καθώς και την εγκατάσταση στο McIntosh της Αλαμπάμα των ΗΠΑ, με ισχύ 110 MW και λειτουργία από το 1991 (69).



Εικόνα 8 Το πρώτο εργοστάσιο συμπιεσμένου αέρα για αποθήκευση ενέργειας σε βιομηχανική κλίμακα στον κόσμο στη βόρεια Γερμανία το (1978). (Πηγή: [\[8\]](#))

Αν και η τεχνολογία CAES δεν έχει ακόμη διαδοθεί ευρέως, αναμένονται σημαντικές εξελίξεις. Η ανάπτυξη της αδιαβατικής συμπίεσης, η οποία δεν απαιτεί χρήση φυσικού αερίου, αποτελεί ένα παράδειγμα τεχνολογικής προόδου που μπορεί να αυξήσει την ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος. Η τεχνολογία CAES παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως το σχετικά χαμηλό κόστος αποθήκευσης και τη δυνατότητα

αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για παρατεταμένες χρονικές περιόδους. Ωστόσο, εξακολουθούν να υφίστανται προκλήσεις, κυρίως σε σχέση με το υψηλό κόστος εγκατάστασης και τη γεωλογική καταλληλότητα των υπόγειων σχηματισμών (68).

Παρά τις τεχνικές και οικονομικές δυσκολίες, η τεχνολογία CAES θεωρείται πολλά υποσχόμενη λύση για την αποθήκευση ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Μπορεί να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στην ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο δίκτυο και στη μετάβαση προς ένα πιο βιώσιμο και σταθερό ενεργειακό σύστημα.

6.2 Οφέλη από τον συνδυασμό πυρηνικής ενέργειας και ΑΠΕ

Ο συνδυασμός της πυρηνικής ενέργειας με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συνιστά μια καινοτόμο στρατηγική για την ενίσχυση της βιωσιμότητας και της σταθερότητας των σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων. Η ανάγκη για δραστική ενεργειακή μετάβαση, λόγω της επιταχυνόμενης κλιματικής αλλαγής και της σταδιακής εξάλειψης των ορυκτών καυσίμων, καθιστά τη συμπληρωματική αξιοποίηση αυτών των δύο πηγών απαραίτητη. Δεδομένου ότι τόσο η πυρηνική ενέργεια όσο και οι ΑΠΕ χαρακτηρίζονται από χαμηλές ή μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, η συνδυασμένη χρήση τους δύναται να συμβάλει σημαντικά στη μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Σε πολλές χώρες, η ηλεκτροπαραγωγή εξακολουθεί να βασίζεται σε ρυπογόνες μονάδες άνθρακα και φυσικού αερίου, αποτελώντας τη βασική πηγή εκπομπών CO₂. Η σταδιακή υποκατάσταση αυτών των πηγών με έναν συνδυασμό πυρηνικής ενέργειας και ΑΠΕ μπορεί να επιταχύνει την απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και να ενισχύσει την ανθεκτικότητα των ενεργειακών συστημάτων.

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του συνδυασμού έγκειται στην ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, που λειτουργούν ως γέφυρα μεταξύ διαλείπουσας παραγωγής από ΑΠΕ και σταθερής παροχής ενέργειας από πυρηνικούς σταθμούς. Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν τις μπαταρίες, οι οποίες επιτρέπουν την προσωρινή αποθήκευση της ενέργειας από ηλιακά ή αιολικά συστήματα, καθώς και το υδρογόνο, το οποίο μπορεί να παραχθεί μέσω ηλεκτρόλυσης με αξιοποίηση της πλεονάζουσας

ηλεκτρικής ενέργειας. Εξίσου σημαντική είναι και η τεχνολογία αποθήκευσης με πεπιεσμένο αέρα, που προσφέρει δυνατότητες μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης. Σε περιόδους χαμηλής παραγωγής από ΑΠΕ, η πυρηνική ενέργεια λειτουργεί ως αξιόπιστη και σταθερή πηγή, ενώ η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη αιχμών της ζήτησης. Η εξέλιξη αυτών των τεχνολογιών αποθήκευσης συμβάλλει καθοριστικά στην ενίσχυση της ευελιξίας και της αξιοπιστίας του ενεργειακού συστήματος, καθιστώντας δυνατή τη συνεχή εξισορρόπηση μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας (71).

6.3 Ο ρόλος των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMRs)

Παρά τα προφανή πλεονεκτήματα, ο συνδυασμός πυρηνικής ενέργειας και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) αντιμετωπίζει κρίσιμες προκλήσεις που δυσχεραίνουν την πλήρη αξιοποίησή του. Ένα από τα βασικά τεχνικά εμπόδια είναι η περιορισμένη ευελιξία των παραδοσιακών πυρηνικών σταθμών, οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί για σταθερή λειτουργία βάσης (base load generation) και παρέχουν συνεχή ροή ηλεκτρικής ενέργειας, ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις στη ζήτηση. Αντιθέτως, οι ΑΠΕ χαρακτηρίζονται από υψηλή μεταβλητότητα, καθώς εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες και συχνά παρουσιάζουν απρόβλεπτα πρότυπα παραγωγής. Η ασυμβατότητα αυτή μπορεί να οδηγήσει είτε σε πλεονάζουσα παραγωγή ενέργειας, όταν η συνολική προσφορά υπερβαίνει τη ζήτηση, είτε σε ελλείμματα ενέργειας, όταν η παραγωγή από ΑΠΕ δεν επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών.

Η αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης προϋποθέτει την ανάπτυξη πυρηνικών τεχνολογιών με μεγαλύτερη ευελιξία και προσαρμοστικότητα στις διακυμάνσεις του ενεργειακού συστήματος. Οι Μικροί Αρθρωτοί Αντιδραστήρες (Small Modular Reactors – SMRs) συνιστούν μια πολλά υποσχόμενη λύση, καθώς έχουν σχεδιαστεί ώστε να μπορούν να μεταβάλλουν δυναμικά την ισχύ παραγωγής τους, προσφέροντας δυνατότητα λειτουργίας σε μεταβλητό φορτίο (load-following capability). Σε αντίθεση με τους συμβατικούς αντιδραστήρες, οι SMRs είναι μικρότερου μεγέθους, κατασκευάζονται κατά κανόνα σε εργοστασιακό περιβάλλον, και εγκαθίστανται με αρθρωτό τρόπο, γεγονός που μειώνει το

κόστος και τον χρόνο κατασκευής. Η ευελιξία τους τους καθιστά ιδανικούς για συνδυασμό με ΑΠΕ, καθώς μπορούν να λειτουργούν ως συμπληρωματική πηγή ενέργειας, εξισορροπώντας τις αυξομειώσεις της παραγωγής από ηλιακά ή αιολικά συστήματα.

Η πρόοδος στις τεχνολογίες ελέγχου και αυτοματισμού επιτρέπει στους SMRs να ενσωματώνονται με μεγαλύτερη αποδοτικότητα σε υβριδικά ενεργειακά συστήματα που περιλαμβάνουν ΑΠΕ. Παράλληλα, η ενίσχυση της αποδοτικότητας του συνδυασμού ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω της παράλληλης χρήσης συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες, το υδρογόνο και ο πεπιεσμένος αέρας, τα οποία επιτρέπουν την αντιστάθμιση ανισορροπιών μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο. Η εξέλιξη αυτών των τεχνολογιών αυξάνει τη λειτουργική ευελιξία του ενεργειακού μείγματος και υποστηρίζει την ομαλή ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο δίκτυο, χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η ενεργειακή ασφάλεια (13),(66).

Συνεπώς, η ανάπτυξη ευέλικτων πυρηνικών τεχνολογιών, όπως οι SMRs, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχή συνύπαρξη πυρηνικής ενέργειας και ΑΠΕ στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης. Η τεχνολογική καινοτομία, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ζήτηση για καθαρές και αξιόπιστες ενεργειακές λύσεις, υποδεικνύει ότι οι SMRs μπορούν να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στη διαμόρφωση ενός βιώσιμου και ευέλικτου παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος.

6.4 Εφαρμοσμένα Παραδείγματα και Case Studies

Η υλοποίηση συνδυαστικών λύσεων για ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον έχει ήδη ξεκινήσει σε διάφορες χώρες, επιβεβαιώνοντας την πρακτική δυνατότητα σύζευξης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), πυρηνικής ενέργειας και προηγμένων τεχνολογιών αποθήκευσης. Παραδείγματα από τη βιομηχανία, την ηλεκτροπαραγωγή και την τεχνολογική καινοτομία αναδεικνύουν τη δυναμική αυτής της πολυτροπικής προσέγγισης.

Ένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το πρόγραμμα Hybrit στη Σουηδία, μια πρωτοβουλία συνεργασίας των εταιρειών SSAB, LKAB και Vattenfall, που στοχεύει στην

παραγωγή χάλυβα μηδενικών εκπομπών άνθρακα. Αντί της χρήσης ορυκτών καυσίμων, εφαρμόζεται πράσινο υδρογόνο που παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης με ΑΠΕ. Η αποθήκευση ενέργειας παίζει κρίσιμο ρόλο στη σταθεροποίηση της διαδικασίας, μειώνοντας δραστικά τις εκπομπές CO₂ στον βιομηχανικό τομέα (72).

Στη Γαλλία, όπου η πυρηνική ενέργεια καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρικού φορτίου, εφαρμόζεται πλέον υβριδικό ενεργειακό μοντέλο, στο οποίο η Electricité de France (EDF) ενσωματώνει φωτοβολταϊκά και αιολικά πάρκα σε περιοχές πλησίον πυρηνικών σταθμών. Αυτή η συνέργεια ενισχύει την ευστάθεια του δικτύου, αξιοποιώντας την εγγύτητα και τη συμπληρωματικότητα των πηγών για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και την ελαχιστοποίηση των εκπομπών (73).

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, το έργο McIntosh CAES Project στην Αλαμπάμα παρουσιάζει ένα πρωτοποριακό παράδειγμα αποθήκευσης ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα. Η περίσσεια ενέργεια από ΑΠΕ αποθηκεύεται σε υπόγειες κοιλότητες αλατιού και αξιοποιείται αργότερα για ηλεκτροπαραγωγή με τουρμπίνες. Η τεχνολογία αυτή επιτυγχάνει εξομάλυνση των διακυμάνσεων της παραγωγής, λειτουργώντας ως γέφυρα μεταξύ διαλείπουσας και σταθερής παραγωγής (74).

Στον Καναδά, η Ontario Power Generation, σε συνεργασία με την κυβέρνηση, προωθεί την ανάπτυξη Μικρών Αρθρωτών Αντιδραστήρων (SMRs). Οι SMRs προσφέρουν ευέλικτη και καθαρή ηλεκτροπαραγωγή, ενώ η δυνατότητα εγκατάστασής τους σε απομακρυσμένες περιοχές και ο συνδυασμός τους με ΑΠΕ τους καθιστούν κατάλληλους για τοπικά ενεργειακά δίκτυα με υψηλή σταθερότητα και χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα (75).

Τα παραπάνω παραδείγματα καταδεικνύουν την καθοριστική σημασία της τεχνολογικής καινοτομίας και της πολυπαραγοντικής προσέγγισης για την ενεργειακή μετάβαση. Ο συνδυασμός ΑΠΕ, πυρηνικής ενέργειας και τεχνολογιών αποθήκευσης ενισχύει τη βιωσιμότητα και την ενεργειακή ασφάλεια, προσφέροντας ένα λειτουργικά σταθερό και περιβαλλοντικά φιλικό ενεργειακό σύστημα, ικανό να ανταποκριθεί στις προκλήσεις του μέλλοντος.

6.5 Πυρηνική Ενέργεια και ΑΠΕ σε μια Βιώσιμη Συνύπαρξη

Καθώς η παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση επιταχύνεται υπό την πίεση της κλιματικής αλλαγής και της ανάγκης για απανθρακοποίηση, η επιλογή μεταξύ πυρηνικής ενέργειας και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) καθίσταται μια πολυπαραγοντική απόφαση, άρρηκτα συνδεδεμένη με τις εκάστοτε εθνικές προτεραιότητες, τις κοινωνικοοικονομικές δυνατότητες και τους φυσικούς πόρους. Οι πυρηνικοί σταθμοί προσφέρουν υψηλή ενεργειακή απόδοση, δυνατότητα σταθερής παραγωγής καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και συμβολή στην ενεργειακή ασφάλεια. Ωστόσο, συνοδεύονται από σημαντικές προκλήσεις, όπως το υψηλό αρχικό κόστος, η διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων και η δημόσια δυσπιστία λόγω ιστορικών ατυχημάτων και μακροχρόνιων επιπτώσεων.

Αντίθετα, οι ΑΠΕ συνδέονται άρρηκτα με την έννοια της βιωσιμότητας, της περιβαλλοντικής ευθύνης και της ενεργειακής δημοκρατίας, καθώς επιτρέπουν αποκεντρωμένα μοντέλα παραγωγής και ενίσχυση της τοπικής ανάπτυξης. Παρ' όλα αυτά, η στοχαστική φύση πολλών μορφών ΑΠΕ – όπως η ηλιακή και η αιολική – δημιουργεί την ανάγκη για αποδοτικά συστήματα αποθήκευσης, έξυπνα δίκτυα και συνδυασμό με εφεδρικές μονάδες.

Μία μακροπρόθεσμα βιώσιμη και ρεαλιστική ενεργειακή στρατηγική θα μπορούσε να βασιστεί σε έναν υβριδικό ενεργειακό συνδυασμό, ο οποίος αξιοποιεί τις τεχνολογικές και λειτουργικές συμπληρωματικότητες μεταξύ πυρηνικής ενέργειας και ΑΠΕ. Η ενσωμάτωση της σταθερότητας και της ενεργειακής πυκνότητας της πυρηνικής τεχνολογίας με τη χαμηλή περιβαλλοντική επιβάρυνση και την καινοτομία των ΑΠΕ μπορεί να αποτελέσει τη βάση για ένα ανθεκτικό και ευέλικτο ενεργειακό σύστημα.

Η τελική επιλογή ενεργειακού μείγματος θα πρέπει να βασίζεται σε συστημική ανάλυση που λαμβάνει υπόψη μεταβλητές όπως:

- οι διαθέσιμοι φυσικοί πόροι και η γεωγραφία της χώρας,
- το κοινωνικό και πολιτικό περιβάλλον,

- οι επενδυτικές δυνατότητες και το τεχνολογικό δυναμικό,
- οι διεθνείς περιβαλλοντικές δεσμεύσεις και οι στόχοι για ουδετερότητα άνθρακα.

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η πρόκληση δεν είναι η απόλυτη επιλογή μεταξύ των δύο τεχνολογιών, αλλά η βέλτιστη συμπληρωματική τους ενσωμάτωση, υπό όρους τεχνικής βιωσιμότητας, κοινωνικής συναίνεσης και περιβαλλοντικής ισορροπίας (70),(71).

7. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

7.1 Οικονομικά οφέλη και κόστος των Πυρηνικών και των ΑΠΕ

Η σύγκριση μεταξύ πυρηνικής ενέργειας και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) από την άποψη του οικονομικού κόστους και των σχετικών ωφελειών είναι καθοριστική για τη χάραξη ορθολογικής και μακροπρόθεσμα βιώσιμης ενεργειακής πολιτικής.

Η πυρηνική ενέργεια συνοδεύεται από υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, που περιλαμβάνει την ανάπτυξη τεχνολογίας, την κάλυψη αυστηρών ρυθμιστικών απαιτήσεων και την κατασκευή σύνθετων υποδομών ασφαλείας. Σύμφωνα με τη Διεθνή Υπηρεσία Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ), το κόστος κατασκευής ενός πυρηνικού σταθμού μπορεί να ξεπεράσει τα 6-9 δισεκατομμύρια ευρώ, ανάλογα με τη χώρα και την τεχνολογία. Ωστόσο, η λειτουργία των πυρηνικών σταθμών είναι οικονομικά αποδοτική, καθώς το πυρηνικό καύσιμο έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και οι εγκαταστάσεις παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια ζωής, συνήθως άνω των 40–60 ετών. Η μέση τιμή κόστους παραγωγής ενέργειας (LCOE) για την πυρηνική ενέργεια υπολογίζεται από τον ΟΟΣΑ στα 70–110 €/MWh (56).

Αντίθετα, οι ΑΠΕ, όπως τα φωτοβολταϊκά και οι ανεμογεννήτριες, διαθέτουν χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης – κατά μέσο όρο 800–1.200 €/kW για φωτοβολταϊκά και 1.300–1.800 €/kW για αιολικά – αλλά απαιτούν πρόσθετες επενδύσεις για συντήρηση και αποθήκευση ενέργειας λόγω της μεταβλητής παραγωγής τους. Το κόστος αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες ιόντων λιθίου κυμαίνεται στα 120–200 €/kWh, προσθέτοντας ένα σημαντικό οικονομικό βάρος σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις ΑΠΕ.

Η διάρκεια ζωής των συστημάτων ΑΠΕ είναι μικρότερη, κυμαινόμενη από 20 έως 30 έτη, αλλά προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως το μηδενικό κόστος καυσίμου και οι περιορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη λειτουργία. Παράλληλα, η λειτουργία πυρηνικών σταθμών εξασφαλίζει σταθερή παραγωγή ενέργειας, καθιστώντας τους κατάλληλους για βασικό φορτίο, με συντελεστή χρησιμοποίησης που υπερβαίνει το 90%, έναντι 25–35% για τα αιολικά και 15–25% για τα φωτοβολταϊκά.

Η συμβολή των δύο τεχνολογιών στην οικονομική ανάπτυξη είναι επίσης αξιοσημείωτη. Οι πυρηνικές επενδύσεις ενισχύουν την απασχόληση σε τομείς υψηλής εξειδίκευσης, ενώ παράλληλα υποστηρίζουν τις τοπικές οικονομίες μέσω έμμεσων θέσεων εργασίας. Σύμφωνα με έκθεση του ΟΟΣΑ, κάθε πυρηνική μονάδα πλήρους κλίμακας δημιουργεί περίπου 500–700 άμεσες θέσεις εργασίας και έως 2.000 έμμεσες, κατά τη διάρκεια κατασκευής και λειτουργίας. Οι ΑΠΕ, από την πλευρά τους, δημιουργούν εκτεταμένες ευκαιρίες απασχόλησης στον τομέα της εγκατάστασης, της λειτουργίας και της συντήρησης, κυρίως σε τοπικό επίπεδο. Μελέτη του Πανεπιστημίου Πειραιώς επισημαίνει ότι η ανάπτυξη έργων ΑΠΕ έχει θετικό αντίκτυπο στην απασχόληση και την περιφερειακή οικονομία (58),(76).

7.2 Πολιτικές και κίνητρα για τη στήριξη βιώσιμων τεχνολογιών

Η προώθηση της βιώσιμης ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις πολιτικές στήριξης και τα χρηματοδοτικά εργαλεία που θέτουν σε εφαρμογή οι εθνικές κυβερνήσεις και υπερεθνικοί οργανισμοί. Η μετάβαση προς καθαρές ενεργειακές λύσεις απαιτεί όχι μόνο τεχνολογική καινοτομία αλλά και στοχευμένη πολιτική βούληση.

Σε πολλές χώρες, οι πολιτικές στήριξης των ΑΠΕ περιλαμβάνουν φορολογικές απαλλαγές, επιδοτήσεις εγκατάστασης, χαμηλότοκα δάνεια και συστήματα τιμολόγησης (feed-in tariffs). Οι ενισχύσεις αυτές καθιστούν πιο προσιτή την πρόσβαση των πολιτών και των επιχειρήσεων σε καθαρές τεχνολογίες. Για παράδειγμα, στην Ευρωπαϊκή Ένωση, κατά την περίοδο 2021–2027, περισσότερα από 86 δισεκατομμύρια ευρώ προβλέπονται για επενδύσεις σχετικές με την πράσινη μετάβαση, στο πλαίσιο του Μηχανισμού Δίκαιης Μετάβασης και άλλων ταμείων. Επίσης, μελέτες έχουν δείξει ότι κάθε 1 εκατομμύριο ευρώ δημόσιας επένδυσης σε έργα ΑΠΕ μπορεί να δημιουργήσει 7,5–9,8 θέσεις εργασίας σε σχέση με μόνο 2,7–3,3 θέσεις στις ορυκτές πηγές.

Στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας, η κρατική παρέμβαση επικεντρώνεται κυρίως στη χρηματοδότηση της έρευνας και ανάπτυξης (R&D), καθώς και στην υποστήριξη των υψηλών λειτουργικών και ρυθμιστικών απαιτήσεων. Οι δημόσιες δαπάνες R&D για πυρηνική τεχνολογία στην ΕΕ υπερβαίνουν τα 2 δισ. ευρώ ετησίως, ενώ το κόστος

υποστήριξης έργων μεγάλης κλίμακας πυρηνικής ενέργειας εκτιμάται ότι ανέρχεται σε 3–5 δισ. ευρώ ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος 1 GW, ανάλογα με τη χώρα και το ρυθμιστικό πλαίσιο.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί τη χρήση ΑΠΕ μέσω πολιτικών όπως η Οδηγία RED II, η οποία θέτει δεσμευτικούς στόχους για το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στο συνολικό ενεργειακό μείγμα. Επίσης, υλοποιούνται στρατηγικές για την ενεργειακή αποδοτικότητα, οι οποίες ενισχύονται με φορολογικά κίνητρα για ιδιώτες και επιχειρήσεις που υιοθετούν βιώσιμες πρακτικές. Μέχρι το 2030, η RED II προβλέπει την επίτευξη τουλάχιστον 42,5% συμμετοχής ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας στην ΕΕ, με επιπλέον στόχο το 45% ως ενδεικτικό όριο.

Στην Ελλάδα, εφαρμόζονται στοχευμένα μέτρα, όπως οι επιδοτήσεις εγκατάστασης και η δυνατότητα υπεραπόσβεσης επενδύσεων μέσω του προγράμματος «Ελλάδα 2.0». Σκοπός είναι η στήριξη μικρομεσαίων επιχειρήσεων για την προσαρμογή στην πράσινη μετάβαση και την ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας. Συγκεκριμένα, ο προϋπολογισμός για πράσινες επενδύσεις μέσω του Ταμείου Ανάκαμψης ανέρχεται σε περισσότερα από 6 δισ. ευρώ, με σημαντικό ποσοστό να αφορά έργα ΑΠΕ και ενεργειακής αναβάθμισης (77),(78).

Παράλληλα, το Υπουργείο Ανάπτυξης και Επενδύσεων ενισχύει στρατηγικές επενδύσεις μέσω ειδικών φορολογικών και αναπτυξιακών κινήτρων για έργα μεγάλης κλίμακας, περιλαμβανομένων αυτών που σχετίζονται με ΑΠΕ. Οι πολιτικές στήριξης αποτελούν βασικό μοχλό επιτάχυνσης της ενεργειακής μετάβασης, εφόσον συνδυάζονται με αποτελεσματική διοίκηση, διαφανή διαδικασίες και μακροπρόθεσμο σχεδιασμό (79).

7.2.1.Κανονιστικό Πλαίσιο και Ρυθμίσεις

Οι κανονισμοί ασφαλείας που διέπουν τις πυρηνικές εγκαταστάσεις είναι ιδιαίτερα αυστηροί και απαιτούν μακροχρόνιες διαδικασίες αδειοδότησης και συμμόρφωσης, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά την ταχύτητα ανάπτυξης νέων αντιδραστήρων. Η κατασκευή ενός πυρηνικού σταθμού ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση μπορεί να διαρκέσει 10 έως 15 έτη, λόγω των ρυθμιστικών καθυστερήσεων. Η ανάγκη διαχείρισης

ραδιενεργών αποβλήτων και η τήρηση διεθνών προτύπων ασφαλείας αυξάνουν το αρχικό κόστος κατά περίπου 20–30% σε σχέση με την αρχική εκτίμηση έργου.

Αντιθέτως, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), όπως τα φωτοβολταϊκά και οι ανεμογεννήτριες, υπόκεινται σε ευκολότερες διαδικασίες αδειοδότησης, με μέσο χρόνο ολοκλήρωσης έργου 1–3 έτη. Ωστόσο, προϋποθέτουν σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές αποθήκευσης (π.χ. μπαταρίες λιθίου, αντλησιοταμιευτικά συστήματα) και εκσυγχρονισμό του δικτύου μεταφοράς. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εκτιμά ότι έως το 2030 θα απαιτηθούν επενδύσεις άνω των 584 δισ. ευρώ μόνο για την αναβάθμιση των ενεργειακών δικτύων και την ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο ευρωπαϊκό σύστημα (80).

Η μεταβλητότητα της παραγωγής από ΑΠΕ επιβάλλει τη θεσμοθέτηση τεχνικών λύσεων, όπως τα έξυπνα δίκτυα (smart grids), η αποκεντρωμένη διαχείριση ενέργειας και η δημιουργία αγορών εξισορρόπησης (balancing markets). Η ΕΕ προωθεί κανονισμούς που επιτρέπουν την ανταλλαγή ενέργειας σε τοπικές κοινότητες (peer-to-peer energy trading), ενισχύοντας τον ρόλο των πολιτών ως παραγωγών–καταναλωτών (prosumers).

Στην Ελλάδα, έχουν υιοθετηθεί εργαλεία για την επιτάχυνση των πράσινων επενδύσεων. Ενδεικτικά:

- Το Εθνικό Σχέδιο Ηλεκτροκίνησης προβλέπει επιδότηση έως 6.000 ευρώ ανά όχημα και έως 40% επιχορήγηση για σταθμούς φόρτισης.
- Ο Νόμος 4951/2022 απλοποιεί τις διαδικασίες αδειοδότησης για έργα ΑΠΕ, περιορίζοντας τον χρόνο από 5 έτη σε 14–18 μήνες.
- Η Εθνική Στρατηγική για τη Βιώσιμη και Δίκαιη Ανάπτυξη 2030 προγραμματίζει συνολικές επενδύσεις 10 δισ. ευρώ έως το 2030, εκ των οποίων σημαντικό ποσοστό κατευθύνεται σε ενεργειακές κοινότητες και αποθήκευση ενέργειας.

Τέλος, οι αυστηρές ρυθμίσεις στην πυρηνική ενέργεια, αν και κοστοβόρες, εξασφαλίζουν υψηλά επίπεδα ασφάλειας και διαφάνειας. Αντίστοιχα, η ελαστικότητα του κανονιστικού πλαισίου στις ΑΠΕ διευκολύνει τις επενδύσεις, αλλά απαιτεί πιο ενεργή εποπτεία ώστε να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα και η δικαιοσύνη στη μετάβαση (78),(79).

Συγκριτικός Πίνακας Οικονομικών και Ρυθμιστικών Παραμέτρων

Κριτήριο	Πυρηνική Ενέργεια	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)
Αρχικό Κόστος Επένδυσης	Πολύ Υψηλό (π.χ. >€6-10 δις/μονάδα)	Μέτριο (~€0,5–2 δις/μονάδα εγκατεστημένης ισχύος)
Κόστος Λειτουργίας (€/MWh)	Χαμηλό (~€40–50/MWh)	Ποικίλλει (~€30–80/MWh)
Διάρκεια Ζωής	40–60 έτη	20–30 έτη
Ετήσιο Κόστος Συντήρησης	Μέτριο	Χαμηλό έως μέτριο
Κόστος Αποθήκευσης Ενέργειας	Χαμηλό (λόγω σταθερής παραγωγής)	Υψηλό (απαραίτητο για σταθερότητα δικτύου)
Απασχόληση	Υψηλής εξειδίκευσης, μακροπρόθεσμες	Εντοπισμένη και ευρεία
Ρυθμιστικό Πλαίσιο	Αυστηρό και δαπανηρό	Ευέλικτο και ευνοϊκό
Ταχύτητα Αδειοδότησης	Αργή (~10–15 έτη)	Γρήγορη (~2–4 έτη)

7.3 Διεθνείς πρωτοβουλίες και συνεργασίες

Η επίτευξη των στόχων της βιώσιμης ανάπτυξης και της ενεργειακής μετάβασης προϋποθέτει συντονισμένες διεθνείς δράσεις και διακρατικές συνεργασίες. Οι παγκόσμιες

και ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες διαμορφώνουν το ρυθμιστικό, χρηματοδοτικό και πολιτικό πλαίσιο για την υιοθέτηση καθαρών μορφών ενέργειας, τη μείωση των εκπομπών και την επιτάχυνση της πράσινης μετάβασης.

7.3.1. Συμφωνίες για το Κλίμα και τις Εκπομπές CO₂

Η Ατζέντα 2030 για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη των Ηνωμένων Εθνών (2015) προωθεί έναν ολοκληρωμένο σχεδιασμό που συνδυάζει κοινωνική ευημερία, περιβαλλοντική προστασία και οικονομική πρόοδο, μέσα από 17 Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΣΒΑ) και 169 ειδικότερους στόχους. Η εφαρμογή της απαιτεί ενσωμάτωση αρχών βιωσιμότητας στις εθνικές πολιτικές και ενεργοποίηση διεθνών μηχανισμών συνεργασίας.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal) αποτελεί θεμελιώδη στρατηγική, στοχεύοντας σε κλιματική ουδετερότητα έως το 2050. Προβλέπει τη μετάβαση σε καθαρές μορφές ενέργειας, ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας και επενδύσεις ύψους τουλάχιστον 1 τρισεκατομμυρίου ευρώ έως το 2030, μέσω συνδυασμένων δημόσιων και ιδιωτικών πόρων (81),(82),(83).

7.3.2. Ευρωπαϊκές Πρωτοβουλίες

Η ΕΕ ενισχύει την ενεργειακή μετάβαση μέσω χρηματοδοτικών εργαλείων, όπως το πρόγραμμα «Ορίζοντας Ευρώπη» (Horizon Europe), με προϋπολογισμό 95,5 δισ. ευρώ για την περίοδο 2021–2027. Το πρόγραμμα στοχεύει στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, την προώθηση της καινοτομίας στην ενέργεια και την ενίσχυση της ευρωπαϊκής ανταγωνιστικότητας.

Το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Καινοτομίας και Τεχνολογίας (EIT) συμβάλλει επίσης στη μετάβαση μέσω της δημιουργίας Κοινοτήτων Γνώσης και Καινοτομίας (ΚΓΚ), που φέρνουν κοντά πανεπιστήμια, ερευνητικά ιδρύματα και επιχειρήσεις για την ανάπτυξη λύσεων σε τομείς όπως η ενέργεια, το κλίμα και οι ψηφιακές τεχνολογίες (84).

7.3.3.Εθνικές Συνεργασίες

Στην Ελλάδα έχουν δρομολογηθεί εθνικές πρωτοβουλίες που ενισχύουν την ενεργειακή αποδοτικότητα και τη βιώσιμη ανάπτυξη. Ενδεικτικά, το πρόγραμμα «Εξοικονομώ 2025» χρηματοδοτεί την ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων, ενώ τα προγράμματα «Αλλάζω Σύστημα Θέρμανσης» και «Αλλάζω Θερμοσίφωνα» ενθαρρύνουν την αντικατάσταση ενεργοβόρων συστημάτων.

Οι δράσεις αυτές υλοποιούνται με τη συνεργασία φορέων όπως το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΤΕΕ) και η Επιτελική Δομή ΕΣΠΑ του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Παράλληλα, το Υπουργείο έχει δρομολογήσει επτά βασικά έργα για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας, συνολικού προϋπολογισμού άνω των 200 εκατομμυρίων ευρώ.

Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι Ενεργειακές Κοινότητες, που θεσπίστηκαν με τον Νόμο 4513/2018, επιτρέποντας τη συμμετοχή πολιτών, ΟΤΑ και μικρομεσαίων επιχειρήσεων στην παραγωγή και διαχείριση ενέργειας από ΑΠΕ, ενισχύοντας την ενεργειακή δημοκρατία και την τοπική ανάπτυξη (85),(86).

Τέλος, η σύμπραξη του ιδιωτικού και δημόσιου τομέα αντανακλάται στην πρωτοβουλία «TITAN Digital Accelerator», μεταξύ του Ομίλου TITAN, του ΕΚΕΤΑ και του ΔΙΠΑΕ, με έδρα τη Θεσσαλονίκη. Η δράση επικεντρώνεται στην εφαρμοσμένη έρευνα για ψηφιακές λύσεις στα δομικά υλικά, ενισχύοντας τον ρόλο της περιοχής στην καινοτομία και τη βιώσιμη βιομηχανική ανάπτυξη (87).

8. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΤΑΒΑΣΗ: ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ, ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

8.1 Παγκόσμιες και Ευρωπαϊκές Προτοβουλίες για ένα Βιώσιμο Ενεργειακό Μέλλον

Η παγκόσμια ενεργειακή κρίση και οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για μετάβαση προς ένα νέο, βιώσιμο ενεργειακό μοντέλο. Οι πολιτικές στρατηγικές που αναπτύσσονται σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο στοχεύουν στη διασφάλιση της ενεργειακής επάρκειας, της περιβαλλοντικής προστασίας και της οικονομικής ανθεκτικότητας. Η μετάβαση αυτή δεν είναι μόνο τεχνολογικό εγχείρημα, αλλά και βαθιά πολιτικό και κοινωνικό ζήτημα που απαιτεί πολυεπίπεδες παρεμβάσεις (88).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει υιοθετήσει φιλόδοξες στρατηγικές για τη βιώσιμη ανάπτυξη και την απανθρακοποίηση της οικονομίας. Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal) αποτελεί τον πυρήνα αυτής της πολιτικής, με στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050. Στο πλαίσιο αυτό, η ΕΕ έχει εγκρίνει την Ευρωπαϊκή Νομοθεσία για το Κλίμα, καθιστώντας τον στόχο της ουδετερότητας νομικά δεσμευτικό, ενώ υιοθετεί πολιτικές όπως:

- Η Οδηγία RED II (Renewable Energy Directive), που προβλέπει υποχρεωτικούς εθνικούς στόχους για τη συμμετοχή των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα.
- Ο μηχανισμός “Fit for 55”, που περιλαμβάνει πακέτο νομοθετικών μέτρων για μείωση των εκπομπών κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990.
- Η ενίσχυση του Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών (EU ETS), με επέκταση σε νέους τομείς όπως η ναυτιλία και τα κτίρια (89).

Σε διεθνές επίπεδο, η Ατζέντα 2030 για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη των Ηνωμένων Εθνών και η Συμφωνία των Παρισίων για το Κλίμα αποτελούν βασικούς πυλώνες διεθνούς συνεργασίας για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την ενίσχυση της βιωσιμότητας. Στο πλαίσιο αυτό, τα κράτη-μέλη υποβάλλουν Εθνικά Καθορισμένες

Συνεισφορές (NDCs) που καθορίζουν τα εθνικά τους σχέδια για την επίτευξη των στόχων της συμφωνίας.

Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται και στη γεωπολιτική διάσταση της ενεργειακής μετάβασης, καθώς οι πολιτικές διαφοροποίησης του ενεργειακού εφοδιασμού έχουν αποκτήσει στρατηγική σημασία. Ο πόλεμος στην Ουκρανία ανέδειξε την ανάγκη απεξάρτησης της Ευρώπης από τα ρωσικά ορυκτά καύσιμα, επιταχύνοντας την εφαρμογή του σχεδίου REPowerEU, το οποίο στοχεύει στην ενίσχυση των ΑΠΕ και στη μείωση της εξάρτησης από εξωτερικούς προμηθευτές (90).

Η Ελλάδα, ευθυγραμμισμένη με τις ευρωπαϊκές κατευθύνσεις, έχει καταρτίσει το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), το οποίο προβλέπει:

- Σημαντική αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα έως το 2030.
- Σταδιακή απόσυρση των λιγνιτικών μονάδων.
- Ενίσχυση της ενεργειακής αποδοτικότητας και προώθηση των “έξυπνων” ενεργειακών τεχνολογιών.
- Ανάπτυξη υποδομών αποθήκευσης και διασύνδεσης των νησιών με το ηπειρωτικό σύστημα.

Οι πολιτικές στρατηγικές λειτουργούν ως καταλύτης για την ενεργειακή μετάβαση, διαμορφώνοντας το θεσμικό και χρηματοδοτικό πλαίσιο στο οποίο μπορούν να ευδοκιμήσουν οι τεχνολογικές καινοτομίες, οι επενδύσεις και η κοινωνική συναίνεση (86),(88).

8.2 Πιθανές τεχνολογικές εξελίξεις σε πυρηνικά και ΑΠΕ

Οι τεχνολογικές εξελίξεις τόσο στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας όσο και στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχία της ενεργειακής μετάβασης. Στον πυρηνικό τομέα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι αντιδραστήρες τέταρτης γενιάς, οι οποίοι υπόσχονται αυξημένη ασφάλεια, υψηλότερη

ενεργειακή απόδοση και δυνατότητα χρήσης ανακυκλωμένων πυρηνικών καυσίμων. Αντιδραστήρες όπως οι υψίστης θερμοκρασίας αερίου (HTGR), οι αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων με υγρό μέταλλο (LMFR), καθώς και οι πυρηνικοί μικροαντιδραστήρες (Small Modular Reactors – SMRs), αποτελούν υποσχόμενες λύσεις για την αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας με μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και περιορισμένα απόβλητα.

Παράλληλα, η τεχνολογία της πυρηνικής σύντηξης, παρότι ακόμη σε πειραματικό στάδιο, εξελίσσεται ραγδαία. Το διεθνές εγχείρημα ITER αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα συντονισμένης προσπάθειας για την αξιοποίηση της σύντηξης ως καθαρής και σχεδόν ανεξάντλητης πηγής ενέργειας. Ο στόχος του ITER είναι η επίτευξη καθαρής παραγωγής ενέργειας μέσω σύντηξης μέχρι το 2035 (91),(92).

Στον τομέα των ΑΠΕ, σημαντική πρόοδος καταγράφεται στις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι συσσωρευτές λιθίου, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης και οι τεχνολογίες θερμικής αποθήκευσης, οι οποίες συμβάλλουν στην εξομάλυνση της παραγωγής από μεταβλητές πηγές. Ταυτόχρονα, καινοτομίες όπως τα φωτοβολταϊκά κύτταρα perovskite υπόσχονται υψηλότερη απόδοση και χαμηλότερο κόστος παραγωγής. Επιπλέον, η ταχεία ανάπτυξη των πλωτών αιολικών πάρκων επιτρέπει την αξιοποίηση θαλάσσιων περιοχών με υψηλό αιολικό δυναμικό και περιορισμένης χρήσης ξηρά (93),(94).

Οι εξελίξεις αυτές, εφόσον υποστηριχθούν με κατάλληλες πολιτικές και επενδύσεις, μπορούν να μειώσουν το συνολικό κόστος παραγωγής ενέργειας, να αυξήσουν την ενεργειακή απόδοση και να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα του ενεργειακού συστήματος σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα.

8.3 Κοινωνικές και πολιτικές προκλήσεις

Η ενεργειακή μετάβαση συνοδεύεται από πολυδιάστατες κοινωνικές και πολιτικές προκλήσεις, οι οποίες επηρεάζουν την αποδοχή, τη χάραξη πολιτικής και την ταχύτητα υλοποίησης των σχετικών έργων. Σε κοινωνικό επίπεδο, η έννοια της ενεργειακής δικαιοσύνης αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία, καθώς απαιτείται δίκαιη πρόσβαση όλων των κοινωνικών ομάδων σε καθαρές μορφές ενέργειας, χωρίς διακρίσεις ή επιπρόσθετες οικονομικές επιβαρύνσεις. Η μετάβαση σε ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα ενδέχεται να προκαλέσει οικονομική επιβάρυνση στα χαμηλότερα εισοδηματικά στρώματα, ειδικά σε περιπτώσεις αυξημένων τιμολογίων λόγω επενδύσεων σε νέες τεχνολογίες (95).

Η κοινωνική αποδοχή νέων ενεργειακών τεχνολογιών —ιδιαίτερα της πυρηνικής ενέργειας— επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από ιστορικά γεγονότα (π.χ. Τσερνόμπιλ, Φουκουσίμα), ζητήματα διαφάνειας και εμπιστοσύνης προς τους θεσμούς. Οι πρωτοβουλίες για διαβούλευση με τις τοπικές κοινωνίες, η ενίσχυση της περιβαλλοντικής εκπαίδευσης και η ενεργή συμμετοχή των πολιτών στη λήψη αποφάσεων αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την κοινωνική συναίνεση.

Σε πολιτικό επίπεδο, η ετερογένεια μεταξύ των κρατών ως προς τις ενεργειακές προτεραιότητες, τις οικονομικές δυνατότητες και τις τεχνολογικές υποδομές, δημιουργεί εμπόδια στον συντονισμό και την υλοποίηση κοινών πολιτικών. Η υιοθέτηση πολυεπίπεδων πολιτικών —σε εθνικό, περιφερειακό και τοπικό επίπεδο— κρίνεται απαραίτητη για την ευθυγράμμιση των στόχων με τις τοπικές ανάγκες και συνθήκες. Επιπλέον, η γεωπολιτική αστάθεια και η εξάρτηση από εισαγόμενες πρώτες ύλες (π.χ. σπάνιες γαίες για φωτοβολταϊκά και μπαταρίες) ενισχύουν την ανάγκη για ενεργειακή κυριαρχία και διαφοροποίηση των πηγών προμήθειας (96).

Η επιτυχία της ενεργειακής μετάβασης απαιτεί, συνεπώς, τη συνύπαρξη τεχνολογικής καινοτομίας με πολιτική βούληση, κοινωνική συμμετοχή και ευρεία συνεργασία. Μόνο μέσω συντονισμένων προσπάθειών μπορεί να εξασφαλιστεί η επίτευξη των στόχων της κλιματικής ουδετερότητας με κοινωνικά δίκαιο και πολιτικά βιώσιμο τρόπο.

8.4 Η επίδραση της ενεργειακής μετάβασης στην κοινωνία και στην οικονομία

Η ενεργειακή μετάβαση από τις παραδοσιακές μορφές ενέργειας, όπως τα ορυκτά καύσιμα, προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) συνιστά μία από τις πλέον κρίσιμες παγκόσμιες προκλήσεις του 21ου αιώνα. Οι επιπτώσεις της είναι πολυδιάστατες, καθώς δεν περιορίζονται μόνο στο τεχνολογικό ή περιβαλλοντικό πεδίο, αλλά επεκτείνονται βαθιά στην κοινωνική και οικονομική ζωή των ανθρώπων, επηρεάζοντας τον τρόπο παραγωγής, κατανάλωσης και κατανομής των ενεργειακών πόρων.

Σε κοινωνικό επίπεδο, η μετάβαση προς τις ΑΠΕ συνδέεται με την προώθηση της περιβαλλοντικής δικαιοσύνης, αλλά και με την πρόκληση διαχείρισης των κοινωνικών ανισοτήτων. Οι πιο ευάλωτες κοινωνικές ομάδες αντιμετωπίζουν μεγαλύτερους κινδύνους αποκλεισμού από τις ωφέλειες της ενεργειακής μετάβασης, είτε λόγω γεωγραφικής θέσης, είτε λόγω περιορισμένης πρόσβασης σε πληροφορίες, τεχνολογία ή οικονομικούς πόρους. Η ενεργειακή φτώχεια, δηλαδή η αδυναμία κάλυψης βασικών ενεργειακών αναγκών, αποτελεί χαρακτηριστικό φαινόμενο αυτής της ανισότητας, το οποίο ενδέχεται να ενταθεί σε περιόδους ενεργειακής κρίσης ή υψηλών τιμών καυσίμων.

Οικονομικά, η μετάβαση επιφέρει σημαντικές ανακατατάξεις τόσο στο επίπεδο της παραγωγής όσο και της απασχόλησης. Η απόσυρση των παραδοσιακών ενεργειακών τεχνολογιών συνεπάγεται την απώλεια θέσεων εργασίας σε τομείς που σχετίζονται με την εξόρυξη και την καύση ορυκτών καυσίμων, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί νέες ευκαιρίες στους τομείς των ΑΠΕ, της αποθήκευσης ενέργειας, της ενεργειακής αποδοτικότητας και των έξυπνων δικτύων. Αυτή η μεταβολή απαιτεί ένα καλά σχεδιασμένο πλαίσιο στήριξης για την επανεκπαίδευση του εργατικού δυναμικού, προκειμένου να διασφαλιστεί η δίκαιη μετάβαση και η κοινωνική συνοχή (97).

Η επίδραση στην τοπική και περιφερειακή ανάπτυξη είναι επίσης αξιοσημείωτη. Η εγκατάσταση ΑΠΕ, όπως αιολικά ή φωτοβολταϊκά πάρκα, μπορεί να αναζωογονήσει

απομακρυσμένες περιοχές, ενισχύοντας την απασχόληση και την τοπική οικονομία. Ωστόσο, η επιτυχία αυτών των έργων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κοινωνική αποδοχή και τη συμμετοχικότητα στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Όταν οι τοπικές κοινότητες έχουν ενεργό ρόλο στη διαχείριση και την ωφέλεια από τα έργα ΑΠΕ, αυξάνονται οι πιθανότητες για βιώσιμα και αποδεκτά αποτελέσματα.

Τέλος, η επίτευξη των διεθνών στόχων για την κλιματική ουδετερότητα —όπως προβλέπεται από τη Συμφωνία του Παρισιού και την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία— επιβάλλει μεταρρυθμίσεις σε πολλαπλά επίπεδα της οικονομίας και της κοινωνίας. Αυτές περιλαμβάνουν την αναθεώρηση των φορολογικών και επενδυτικών πολιτικών, την ενίσχυση της πράσινης επιχειρηματικότητας και την ενσωμάτωση της βιωσιμότητας στη βιομηχανική παραγωγή και την κατανάλωση. Η μετάβαση σε ένα κλιματικά ουδέτερο μοντέλο ανάπτυξης απαιτεί τη συντονισμένη δράση όλων των εμπλεκόμενων φορέων — κρατών, επιχειρήσεων, πολιτών— με κοινό στόχο την προστασία του πλανήτη και τη διασφάλιση της κοινωνικής ευημερίας για τις επόμενες γενιές (89).

8.4.1 Οικονομικές επιπτώσεις

Η ενεργειακή μετάβαση επιφέρει σημαντικές μεταβολές στην αγορά εργασίας και στη δομή της παγκόσμιας οικονομίας. Καθώς οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) κερδίζουν έδαφος έναντι των ορυκτών καυσίμων, δημιουργούνται νέες θέσεις εργασίας σε τομείς όπως η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια. Σύμφωνα με μελέτες του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA), έως το 2030 οι θέσεις απασχόλησης στον τομέα των ΑΠΕ αναμένεται να υπερβούν τις απώλειες στον τομέα των ορυκτών καυσίμων. Παράλληλα, η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί κατά περίπου 25% έως το 2050, κυρίως λόγω της οικονομικής ανάπτυξης και της πληθυσμιακής αύξησης σε αναδυόμενες οικονομίες (98).

Ειδικότερα, ο τομέας της καθαρής ενέργειας σημείωσε αύξηση κατά 4,7 εκατομμύρια θέσεις εργασίας παγκοσμίως μεταξύ 2019 και 2022, φτάνοντας τα 35 εκατομμύρια. Αντιθέτως, οι θέσεις εργασίας στα ορυκτά καύσιμα αυξήθηκαν με βραδύτερο ρυθμό,

παραμένοντας περίπου 1,3 εκατομμύρια κάτω από τα προ πανδημίας επίπεδα, στα 32 εκατομμύρια. Ωστόσο, η μετάβαση ενδέχεται να προκαλέσει προκλήσεις για τους εργαζόμενους στους παραδοσιακούς ενεργειακούς τομείς, οι οποίοι ενδέχεται να βρεθούν σε δυσμενή θέση χωρίς την υποστήριξη επαρκών προγραμμάτων ανακατάρτισης και επανεκπαίδευσης.

Επιπλέον, η στροφή προς τις ΑΠΕ προϋποθέτει σημαντικές επενδύσεις σε καινοτόμες τεχνολογίες, όπως η αποθήκευση ενέργειας, τα έξυπνα δίκτυα και η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας. Σύμφωνα με την Παγκόσμια Τράπεζα, κατά τα τελευταία οκτώ χρόνια έχουν δεσμευθεί 1,3 δισεκατομμύρια δολάρια για έργα ηλεκτροδότησης εκτός δικτύου σε 24 χώρες, με το 90% των έργων αυτών να βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κυρίως στην ηλιακή (99).

Στο ευρωπαϊκό πλαίσιο, η Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων έχει υποστηρίξει έργα ανανεώσιμης ενέργειας στην Ελλάδα, χρηματοδοτώντας την παραγωγή καθαρής ενέργειας τόσο στα νησιά όσο και στην ηπειρωτική χώρα. Αυτές οι επενδύσεις συμβάλλουν όχι μόνο στην ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας, αλλά και στην τόνωση της οικονομικής ανάπτυξης, προσφέροντας ευκαιρίες καινοτομίας και ενδυνάμωσης της ανταγωνιστικότητας των επιχειρήσεων, μέσα από την έρευνα, την τεχνολογική πρόοδο και την ανάπτυξη νέων αγορών (100).

8.4.2 Κοινωνικές επιπτώσεις

Η ενεργειακή μετάβαση επιφέρει βαθιές κοινωνικές αλλαγές, επηρεάζοντας την καθημερινότητα των πολιτών, την πρόσβαση στην ενέργεια, τις κοινωνικές ανισότητες και τη συνοχή των κοινοτήτων. Καθώς τα κράτη υιοθετούν ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μοντέλο, αναδεικνύονται πολυεπίπεδες προκλήσεις που σχετίζονται με την ενεργειακή φτώχεια, τις μεταβολές στον τρόπο ζωής και την κοινωνική αποδοχή των νέων τεχνολογιών.

Μία από τις πλέον κρίσιμες κοινωνικές διαστάσεις είναι η ενεργειακή φτώχεια, δηλαδή η αδυναμία κάλυψης των βασικών ενεργειακών αναγκών. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εκτιμά ότι περίπου 34 εκατομμύρια πολίτες στην Ευρώπη δυσκολεύονται να έχουν πρόσβαση σε οικονομικά προσιτή και αξιόπιστη ενέργεια. Αν και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) δύνανται να μειώσουν μακροπρόθεσμα το κόστος ηλεκτροπαραγωγής, το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης και η ανάγκη ανάπτυξης νέων υποδομών επιβαρύνουν τα νοικοκυριά, ιδιαίτερα τα πλέον ευάλωτα. Για την άμβλυνση του φαινομένου απαιτούνται στοχευμένες πολιτικές, όπως επιδοτήσεις για ενεργειακές αναβαθμίσεις κατοικιών, κρατική στήριξη για λογαριασμούς ενέργειας και κοινωνικά προγράμματα προστασίας των ευάλωτων ομάδων (70),(98).

Η μετάβαση σε νέα ενεργειακά μοντέλα μεταβάλλει και την καθημερινότητα των πολιτών. Τεχνολογίες όπως τα έξυπνα δίκτυα (Smart Grids) και οι μετρητές κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο ενισχύουν την ενεργειακή διαχείριση και μειώνουν τη σπατάλη. Τα οικιακά φωτοβολταϊκά και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας ενθαρρύνουν τη συμμετοχή των καταναλωτών και την ενεργειακή αυτονομία μέσω του μοντέλου «prosumer». Ωστόσο, η άνιση πρόσβαση σε τέτοιες τεχνολογίες εντείνει τις κοινωνικές ανισότητες, καθώς τα νοικοκυριά χαμηλού εισοδήματος συχνά δεν έχουν την οικονομική δυνατότητα να επενδύσουν σε αυτές τις λύσεις (70).

Η κοινωνική αποδοχή της ενεργειακής μετάβασης αποτελεί ακόμη έναν κρίσιμο παράγοντα επιτυχίας. Παρά τη γενική υποστήριξη των ΑΠΕ, δεν είναι σπάνιο φαινόμενο οι τοπικές κοινωνίες να εκδηλώνουν αντιδράσεις στην εγκατάσταση αιολικών ή ηλιακών πάρκων. Οι αντιρρήσεις εστιάζονται σε ζητήματα περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αισθητικής αλλοίωσης του τοπίου και αλλαγής της χρήσης γης, κυρίως σε περιοχές με τουριστικό ή αγροτικό χαρακτήρα. Παραδείγματα κινητοποιήσεων καταγράφονται σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες, όπου η εγκατάσταση ανεμογεννητριών αμφισβητείται λόγω επιπτώσεων στη βιοποικιλότητα. Για τη διασφάλιση της κοινωνικής συναίνεσης απαιτούνται διαφανείς διαδικασίες διαβούλευσης, συμμετοχή των τοπικών φορέων στη λήψη αποφάσεων και εφαρμογή αντισταθμιστικών πολιτικών, όπως οικονομική ενίσχυση των περιοχών φιλοξενίας ενεργειακών έργων (3).

Επιπλέον, η απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα επηρεάζει τη δομή των τοπικών κοινωνιών και της απασχόλησης, ιδίως σε περιοχές που εξαρτώνται οικονομικά από τη λιγνιτική παραγωγή. Περιοχές όπως η Δυτική Μακεδονία στην Ελλάδα, η Σιλεσία στην Πολωνία και η Ρουρ στη Γερμανία αντιμετωπίζουν απώλειες θέσεων εργασίας και ενδεχόμενο οικονομικό μαρασμό χωρίς στρατηγικές υποστήριξης.

Για την αντιμετώπιση αυτών των κοινωνικών προκλήσεων, η έννοια της «δίκαιης μετάβασης» (Just Transition) αναδεικνύεται ως κεντρική. Η Διεθνής Οργάνωση Εργασίας (ILO, 2022) επισημαίνει την ανάγκη ανακατάρτισης και επανεκπαίδευσης των εργαζομένων, ώστε να απασχοληθούν σε τομείς όπως οι ΑΠΕ και οι πράσινες τεχνολογίες. Παράλληλα, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει το Ταμείο Δίκαιης Μετάβασης, που χρηματοδοτεί περιοχές οι οποίες πλήττονται από την ενεργειακή αλλαγή, ενισχύοντας την ανάπτυξη εναλλακτικών οικονομικών δραστηριοτήτων και τη δημιουργία βιώσιμων θέσεων εργασίας (25, 98).

Συνοψίζοντας, η ενεργειακή μετάβαση διαμορφώνει νέες κοινωνικές πραγματικότητες, με προοπτικές και κινδύνους. Η εξασφάλιση κοινωνικής δικαιοσύνης, η ελαχιστοποίηση των ανισοτήτων και η ενδυνάμωση των κοινοτήτων αποτελούν κρίσιμες προϋποθέσεις για την επιτυχή και βιώσιμη εφαρμογή της.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

9.1 Συνοπτική Παρουσίαση των Βασικών Ευρημάτων

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η συμβολή της πυρηνικής ενέργειας και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στο σύγχρονο ενεργειακό μείγμα, με έμφαση στα πλεονεκτήματα, τους περιορισμούς και τις προκλήσεις που συνοδεύουν την κάθε τεχνολογία. Η ανάλυση κατέδειξε ότι η σύζευξη πυρηνικής ενέργειας και ΑΠΕ αποτελεί την πιο ρεαλιστική και αποτελεσματική στρατηγική για την επίτευξη ενός ασφαλούς, βιώσιμου και χαμηλών εκπομπών ενεργειακού συστήματος.

Η πυρηνική ενέργεια προσφέρει συνεχή, σταθερή και προβλέψιμη ηλεκτροπαραγωγή, με σχεδόν μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε όλο τον κύκλο ζωής της. Εντούτοις, παραμένουν σοβαρές προκλήσεις, όπως το υψηλό αρχικό κόστος, η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων και τα ζητήματα ασφάλειας. Αντίστοιχα, οι ΑΠΕ προσφέρουν φιλική προς το περιβάλλον ενέργεια από ανεξάντλητους φυσικούς πόρους, ωστόσο η στοχαστική φύση τους δημιουργεί ανάγκες για συστήματα αποθήκευσης και έξυπνα δίκτυα, ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία του εφοδιασμού.

Συνεπώς, η συμπληρωματική χρήση πυρηνικής ενέργειας και ΑΠΕ κρίνεται ως ο πλέον ενδεδειγμένος τρόπος για την κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης, τη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα και την επίτευξη των διεθνών κλιματικών στόχων.

9.2 Προτάσεις για τη Βέλτιστη Αξιοποίηση των Πυρηνικών και των ΑΠΕ

Η ενεργειακή πολιτική των κρατών και των διεθνών οργανισμών οφείλει να στραφεί προς έναν ολοκληρωμένο σχεδιασμό που θα ενισχύει τη συνέργεια πυρηνικής ενέργειας και ΑΠΕ. Ο συνδυασμός αυτών των τεχνολογιών μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά, με την πυρηνική ενέργεια να καλύπτει τη βασική ζήτηση και τις ΑΠΕ να καλύπτουν τις διακυμάνσεις του φορτίου.

Απαραίτητη είναι η ενίσχυση των επενδύσεων σε τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες μεγάλης χωρητικότητας, το πράσινο υδρογόνο και η αντλησιοταμίευση, ώστε να εξομαλύνεται η στοχαστικότητα των ΑΠΕ και να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.

Η ανάπτυξη και εμπορική εφαρμογή Μικρών Αρθρωτών Αντιδραστήρων (SMRs) συνιστά μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογική καινοτομία που μειώνει τον χρόνο κατασκευής, το κόστος και τον επιχειρησιακό κίνδυνο, προσφέροντας ευελιξία στον ενεργειακό σχεδιασμό.

Εξίσου κρίσιμος είναι ο εκσυγχρονισμός του ρυθμιστικού πλαισίου. Απαιτείται διακρατική συνεργασία για την επιτάχυνση των αδειοδοτήσεων, την ενίσχυση της ασφάλειας, την υιοθέτηση κοινών προτύπων και τη διασφάλιση της κοινωνικής αποδοχής.

Τέλος, η συνεχής επένδυση στην έρευνα και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, όπως η πυρηνική σύντηξη και οι αναδυόμενες τεχνολογίες αποθήκευσης, είναι καθοριστικής σημασίας για την ενεργειακή αυτάρκεια του μέλλοντος.

Η υλοποίηση των παραπάνω στρατηγικών μπορεί να διασφαλίσει τη βιωσιμότητα του ενεργειακού συστήματος, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και ενισχύοντας την ενεργειακή ασφάλεια.

9.3 Κατευθύνσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η περαιτέρω έρευνα κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να ενισχυθεί η τεκμηρίωση και να στηριχθούν επιστημονικά οι αποφάσεις για την ενεργειακή μετάβαση. Πρωταρχική προτεραιότητα αποτελεί η επιτάχυνση της τεχνολογικής ανάπτυξης στην πυρηνική σύντηξη, η οποία υπόσχεται ασφαλή, καθαρή και σχεδόν ανεξάντλητη μορφή ενέργειας.

Επιπλέον, η έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση των τεχνολογιών αποθήκευσης, ώστε να διασφαλίζεται η αξιοποίηση των ΑΠΕ ακόμη και κατά τις περιόδους χαμηλής παραγωγής.

Σημαντικός είναι επίσης ο σχεδιασμός υβριδικών ενεργειακών συστημάτων που ενσωματώνουν έξυπνες τεχνολογίες διαχείρισης, προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση από τη σύζευξη πυρηνικής ενέργειας και ΑΠΕ.

Τέλος, απαιτούνται κοινωνικές και οικονομικές μελέτες για τις επιπτώσεις της ενεργειακής μετάβασης, με έμφαση στη δίκαιη μετάβαση και την αντιμετώπιση ανισοτήτων, καθώς και στη βελτίωση της διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων μέσω καινοτόμων μεθόδων ανακύκλωσης και ασφαλούς αποθήκευσης.

Η μελλοντική έρευνα θα αποτελέσει θεμέλιο για τον επανασχεδιασμό της ενεργειακής στρατηγικής σε παγκόσμιο επίπεδο, με στόχο τη διαμόρφωση ενός ενεργειακού τοπίου προς ένα βιώσιμο, δίκαιο και τεχνολογικά προηγμένο ενεργειακό μέλλον.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Pan, X., Shao, T., Zheng, X., Zhang, Y., Ma, X. and Zhang, Q. (2023) *Energy and sustainable development nexus: A review*, Energy Strategy Reviews, 43, 2–4.
2. Lv, Y. (2023) *Transitioning to sustainable energy: opportunities, challenges, and the potential of blockchain technology*, Frontiers in Energy Research, 11, Article 1258044.
3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023) *The Intergovernmental Panel on Climate Change*, διαθέσιμο στο: <https://www.ipcc.ch/>, (ανακτήθηκε 2/2/2025).
4. International Atomic Energy Agency (IAEA) *Nuclear Power and Climate Change*, διαθέσιμο στο: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-power-and-climate-change> (ανακτήθηκε 1/2/2025).
5. Rhodes, R. *The Making of the Atomic Bomb*, Simon & Schuster, New York, 1986.
6. Hewlett, R.G. and D.F. *Nuclear Navy, 1946–1962*, University of Chicago Press, 1969.
7. Κατσιπης, Μ. Ι. (2013) *Πυρηνικοί Αντιδραστήρες Συντήρησης*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ.
8. Hewlett, R.G. and Holl, H.J.M. (1961) *Atoms for Peace and War, 1953–1961*, University of California Press, pp. 80–95.
9. Pope, D. (2008) *Nuclear Implosions: The Rise and Fall of the Washington Public Power Supply System*, Cambridge University Press, pp. 145–187.
10. Καραγιάννη, Α. (2017) *Η χρήση της Πυρηνικής Ενέργειας ως εναλλακτική μορφή ενέργειας και τα ηθικά διλήμματα που προκύπτουν στο πλαίσιο αυτής της χρήσης*, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.

11. Generation IV International Forum (GIF), 2022. *Annual Report 2022*. [online] OECD Nuclear Energy Agency. Available at: <https://www.gen-4.org> [Accessed 2 June 2025].
12. World Nuclear Association (WNA), 2023. *Generation IV Nuclear Reactors*. [online] Available at: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/generation-iv-nuclear-reactors.aspx> [Accessed 2 June 2025].
13. Μωρός, Α. (2018) *Πυρηνικός Αντιδραστήρας Ισχύος, τύπου SMR*, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.
14. Τριανταφυλλίδης, Α. (2022) *Τι είναι η σύντηξη και πώς θα αλλάξει τον κόσμο μας*; Ανακτήθηκε 24/4/2025 από: [https://sciencegg.gr/...](https://sciencegg.gr/)
15. Physicsgg. (2023) *Πυρηνική σύντηξη με απόδοση πάνω από 170%*. Ανακτήθηκε 24/4/2025 από: [https://physicsgg.me/...](https://physicsgg.me/)
16. Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ). *Διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων*. Ανακτήθηκε 1/2/2025 από: <https://eeae.gr/>
17. World Nuclear Association (WNA), 2023. *Generation III and III+ Reactors*. [online] Available at: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/generation-iii-iii-nuclear-reactors.aspx> [Accessed 2 June]
18. Nuclear Energy Agency (NEA). *Management of Recyclable Fissile and Fertile Materials*. Ανακτήθηκε 28/4/2025 από: <https://www.oecd-nea.org>
19. Nuclear Energy Agency (NEA). *Mixed-oxide (MOX) Fuel Performance Benchmark*. Ανακτήθηκε 28 Απριλίου 2025, από: <https://www.oecd-nea.org>.
20. Hilliard, H.G. (2014). *A New Day for Nuclear: The Impact of Nuclear Energy and Its Effects*. Liberty University.

21. Ρυζιώτης, Γ. (2019) Διαχείριση Ηθικών Διλημάτων σε Πυρηνικά Ατυχήματα, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Διατριβή, Τμήμα Ιατρικής, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.
22. Βαζαίου, Α. (2022) Πυρηνικά ατυχήματα μεγάλης κλίμακας: Αίτια, επιπτώσεις στην υγεία και στο περιβάλλον και διορθωτικά μέτρα, Πτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.
23. International Atomic Energy Agency (IAEA), Convention on Nuclear Safety, Vienna. [<https://www.iaea.org/topics/nuclear-safety-conventions/convention-nuclear-safety>, ανακτήθηκε 3/3/2025].
24. International Atomic Energy Agency (IAEA), Safety Standards, [<https://www.iaea.org/resources/safety-standards>, ανακτήθηκε 6/3/2025].
25. European Parliament, Ευρωπαϊκή Ένωση – Πυρηνική ενέργεια, [https://www.europarl.europa.eu/erpl-app-public/factsheets/pdf/el/FTU_2.4.10.pdf, ανακτήθηκε 16/2/2025].
26. European Parliament, Ευρωπαϊκή Ένωση – Πυρηνική ενέργεια, [<https://www.europarl.europa.eu/factsheets/el/sheet/70/renewable-energy>, ανακτήθηκε 20/1/2025].
27. U.S. Nuclear Regulatory Commission (2025), Code of Federal Regulations (CFR) Documents - U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), [<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/>, ανακτήθηκε 20/1/2025].
28. U.S. Nuclear Regulatory Commission (2025), NRC Regulatory Rulemaking - U.S. Nuclear Regulatory Commission, [<https://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/rulemaking.html>, ανακτήθηκε 20/1/2025].
29. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2011), The International Legal Framework for Nuclear Security, International Law Series No. 4, IAEA, Vienna.

30. U.S. Nuclear Regulatory Commission (2025), Commission Policy Statements, [<https://www.nrc.gov/about-nrc/policy-making/policy-statements.html>, ανακτήθηκε 16/2/2025].
31. European Commission (1957), Treaty establishing the European Atomic Energy Community, European Commission, Brussels.
32. European Commission (2014), Directive 2014/87/Euratom on Nuclear Safety, European Commission, Brussels.
33. European Commission (2011), Directive 2011/70/Euratom on the Management of Radioactive Waste, European Commission, Brussels.
34. European Commission (2013), Directive 2013/59/Euratom on Ionizing Radiation Protection, European Commission, Brussels.
35. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2023), Convention on Nuclear Safety, International Atomic Energy Agency, Vienna.
36. European Parliament (2025), Renewable Energy, European Parliament. [<https://www.europarl.europa.eu/factsheets/el/sheet/70/renewable-energy>, ανακτήθηκε 16/2/2025].
37. Μπουργκούδη, Α. (2009). Συγκριτική αξιολόγηση εφαρμογής τεχνολογιών ΑΠΕ. Τοπογράφος Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
38. Καντσαούλη, Ε. Δ. (2008). Εφαρμογές Τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε Χώρες της Μεσογείου με Έμφαση στην Ηλιακή Ενέργεια. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

39. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – Ηλιακή Ενέργεια και Φωτοβολταϊκά. [<https://www.ypen.gr>, ανακτήθηκε 6/3/2025].
40. Σώφλος, Δ. (2020). Θετικές και αρνητικές επιπτώσεις της χρήσης των ΑΠΕ στο φυσικό περιβάλλον. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
41. Karagiorgas, M., Botzios, A. and Tsoutsos, T., 2001. Industrial solar thermal applications in Greece: Economic evaluation, quality requirements and case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5(2), pp.157–173
42. International Energy Agency (IEA) (2023) Renewables 2023 – Executive Summary. [<https://www.iea.org/reports/renewables-2023/executive-summary>, ανακτήθηκε 20/1/2025].
43. Νικολόπουλος, Α. (2017) Ανεμογεννήτριες: Δομικά Υλικά και Απαραίτητα Στοιχεία Λειτουργίας κατά τον κύκλο ζωής τους, Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
44. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2025) Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – Αιολική [Internet]. [<https://ypen.gov.gr/energeia/ape/technologies/aioliki/>, ανακτήθηκε 20/1/2025].
45. Παναγιώτης Παπασταματίου ΠΛΑΒΑΑ. Ανάλυση Επιπτώσεων από την Εγκατάσταση και Λειτουργία Αιολικών Πάρκων. 2009.
46. Μένου, Ε. (2023) Τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα της Ελλάδας και οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

47. Πασσιάς, Η. (2019) Υδροηλεκτρική Ενέργεια, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.
48. Γεωργιόπουλος, Δ. και Δήμου, Χ.Κ., 2017. *Υδροηλεκτρικά έργα 2015–2040 – Ανάπτυξη και προοπτικές*. Στο: Πρακτικά 3ου Συνεδρίου Φραγμάτων και Ταμιευτήρων, Αθήνα, 13–15 Οκτωβρίου 2017. Διαθέσιμο στο:
https://www.researchgate.net/publication/320416678_O_Rolos_ton_Ydroelektrik_on_sten_diasphalise_tes_eustatheias_tou_Systematos_Elektrikes_Energeias_-_The_Role_of_Hydro_Power_in_ensuring_the_stability_of_the_Electric_Grid_in_Greek
49. Τζιτζής, Σ.Π. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οφέλη από την κατασκευή των μεγάλων φραγμάτων της ΔΕΗ ΑΕ. Πρακτικά Συνεδρίου ΤΕΕ – Φράγματα: Περιβαλλοντικές και Τεχνικές Προσεγγίσεις, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα.
50. Σώφλος, Δ. (2020) Θετικές και αρνητικές επιπτώσεις της χρήσης των ΑΠΕ στο φυσικό περιβάλλον, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
51. Μεντζέλου, Χ. (2016) Ενέργεια από Βιομάζα, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε., ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας.
[<http://repository.library.teimes.gr/xmlui/handle/123456789/XXXX>, ανακτήθηκε 21/1/2025].
52. Κορμάζος, Β.Γ. (2018) Παραγωγή Ενέργειας από Βιομάζα, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανολογίας και Υδάτινων Πόρων, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας.

53. Τσούκος, Σ. και Κατηφόρη, Μ. (2016) Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Βιομάζα, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.
54. European Environment Agency. (2023).
<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/the-european-biomass-puzzle>
(EEA Report) [ανακτήθηκε 3/2/2025].
55. Σακελλαρίου, Ι. (2023) Logistics της Βιομάζας, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Πειραιώς.
56. World Nuclear Association. (2023) Economics of Nuclear Power. [www.world-nuclear.org, ανακτήθηκε 28/01/2025].
57. Lempriere, M., 2020. *Solar PV costs fall 82% over the last decade, says IRENA*. Solar Power Portal, 3 June 2020. [online] Available at:
https://www.solarpowerportal.co.uk/solar_pv_costs_fall_82_over_the_last_decade_says_irena/ [ανακτήθηκε 4/2/2025]
58. International Renewable Energy Agency. (2020) Renewable Power Generation Costs in 2020. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020_Summary.pdf, ανακτήθηκε 28/01/2025].
59. World Nuclear Association. USA Nuclear Power. 2023 [cited 2025 Jan 28].
Available from: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-power>
60. Fthenakis, V. and Kim, H.C. (2009) Land use and electricity generation: A life-cycle analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 (6–7), 1465–1474.

61. Σαγάνη, Α. (2009) Η Ανάγκη Αποθήκευσης Ενέργειας – Μέθοδοι Αποθήκευσης και Εφαρμογές, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ
62. Sovacool, B.K. (2008) The costs of failure: A preliminary assessment of major energy accidents, 1907–2007. *Energy Policy*, 36 (5), 1802–1820.
63. Devine-Wright, P. (2005) Beyond NIMBYism: Towards an integrated framework for understanding public perceptions of wind energy. *Wind Energy*, 8 (2), 125–139.
64. European Commission, 2023. *The development of renewable energy in the electricity market*. Brussels: European Commission. Available at: <https://economy-finance.ec.europa.eu> [ανακτήθηκε 29/1/2025].
65. MIT Energy Initiative (2018) The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World. [<https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2018/09/The-Future-of-Nuclear-Energy-in-a-Carbon-Constrained-World.pdf>, ανακτήθηκε 29/1/2025].
66. World Nuclear Association (2024) Small Nuclear Power Reactors. [<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors>, ανακτήθηκε 29/1/2025].
67. Πασσιάς, Γ. (2023) Αξιολόγηση Τεχνολογιών Αποθήκευσης Ενέργειας (μπαταρίες) με εφαρμογή σε Συστήματα ΑΠΕ, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.
68. Τέγος, Ε. (2011) Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας παραγόμενης από ΑΠΕ, Πτυχιακή Εργασία, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Ηλεκτρολογίας, ΤΕΙ Αθήνας.

69. Κάγιος, Α. (2021) Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας, Πτυχιακή Εργασία, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
70. European Commission (2021) Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, [<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0660>, ανακτήθηκε 14/2/2025].
71. International Atomic Energy Agency (IAEA) (2021) Nuclear Energy for a Net Zero World, Vienna, Austria [<https://www.iaea.org/sites/default/files/21/10/nuclear-energy-for-a-net-zero-world.pdf>, ανακτήθηκε 14/2/2025].
72. HYBRIT (2023) LKAB will be responsible for the construction of the demonstration plant in Gällivare [<https://www.hybritdevelopment.se/en/hybrit-lkab-will-be-responsible-for-the-construction-of-the-demonstration-plant-in-gallivare/>, ανακτήθηκε 16/2/2025].
73. EDF (2023) Producing a climate-friendly energy [<https://www.edf.fr/en/the-edf-group/producing-a-climate-friendly-energy>, ανακτήθηκε 16/2/2025].
74. Siemens Energy Bobby Bailie. Compressed Air Energy Storage (CAES) [Internet]. 2021 [cited 2025 Feb 16]. Available from: https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/21TMCES_Bailie.pdf
75. Ontario Power Generation (2023) The Future of SMRs in Canada [<https://www.opg.com/projects-services/projects/nuclear/smr/>, ανακτήθηκε 16/2/2025].

76. European Commission Renewable Energy Directive
[https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en, ανακτήθηκε 17/2/2025].
77. Γενική Γραμματεία Συντονισμού Ελλάδα 2.0 | Εθνικό Σχέδιο Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας [<https://gsco.gov.gr/rfp-reforms/>, ανακτήθηκε 16/2/2025].
78. ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ Κατηγορίες και Κίνητρα [<https://ependyseis.mindev.gov.gr/el/stratigikes/p/katigories-kai-kinitra?>, ανακτήθηκε 16/2/2025].
79. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας Εθνικό Σχέδιο Ηλεκτροκίνησης, 2023.
80. European Commission (2020) Fifth report on the State of the Energy Union. COM(2020)950, Directorate-General for Energy, European Commission, 14 October.[https://energy.ec.europa.eu/strategy/energy-union/fifth-report-state-energy-union_en, ανακτήθηκε: 20/5/2025].
81. Ηνωμένα Έθνη Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης <https://unric.org/el/17-%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%87%CE%BF%CE%B9-%CE%B2%CE%B9%CF%89%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%B7%CF%83-%CE%B1%CE%BD%CE%B1%CF%80%CF%84%CF%85%CE%BE%CE%B7%CF%83/>
82. Council of the European Union European Green Deal - Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης [<https://www.consilium.europa.eu/el/policies/green-deal/>] ανακτήθηκε 17/2/2025].
83. Σύνδεσμος Επιχειρήσεων και Βιομηχανιών (ΣΕΒ) Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία: Στρατηγική και προκλήσεις, 2021.

84. Εθνικό Σημείο Επαφής Horizon Europe Horizon Europe - Εθνικό Σημείο Επαφής για το Πρόγραμμα Ορίζοντας Ευρώπη [<https://horizoneurope.gr/?> ανακτήθηκε 17/2/2025].
85. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας Προγράμματα ενεργειακής αναβάθμισης – Χρήσιμες πληροφορίες [<https://ypen.gov.gr/programmata-energeiakis-anavathmisis-chrisimes-plirofories-ypourgeiou-perivallontos-kai-energeias/>? ανακτήθηκε 19/2/2025].
86. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας Οι 7 πρωτοβουλίες του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας [<https://ypen.gov.gr/oi-7-protovoulies-tou-ypourgeiou-perivallontos-kai-energeias-gia-tin-antimetopisi-tis-leipsydrias/>? ανακτήθηκε 19/2/2025].
87. Όμιλος TITAN TITAN Digital Accelerator [<https://www.titan.gr/el/newsroom/nea-kai-deltia-typou/neo?item=1695&utm> ανακτήθηκε 17/2/2025].
88. Ταρνάρης, Ι. Επισκόπηση Προγραμμάτων και Πολιτικών Εξοικονόμησης Ενέργειας στην Ελλάδα, την Ευρώπη και τον Κόσμο – Συμβολή Τεχνολογιών Πληροφορικής & Επικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πειραιά.
89. European Council & Council of the EU. (2023) Timeline - European Green Deal and Fit for 55. [<https://www.consilium.europa.eu/el/policies/european-green-deal/timeline-european-green-deal-and-fit-for-55/?utm>, ανακτήθηκε 24/2/2025].
90. Κουντούρη, Φ. (2023) Ο πράσινος μετασχηματισμός της Ευρώπης: προκλήσεις, ευκαιρίες και η πορεία προς τα εμπρός. [<https://www.eliamep.gr/wp-content/uploads/2023/12/Policy-briefs-special-edition-Leventis-EL-final-with-logo-2.pdf?utm>, ανακτήθηκε 24/2/2025].

91. World Nuclear Association, 2023. *Advanced nuclear power reactors*.
[<https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>. ανακτήθηκε 25/2/2025]
92. ITER Organization, 2022. *ITER – The way to new energy*. [<https://www.iter.org>. ανακτήθηκε 22/4/2025].
93. International Energy Agency (IEA), 2023. *Global energy storage outlook*. [<https://www.iea.org/reports/energy-storage>. ανακτήθηκε 24/2/2025]
94. International Renewable Energy Agency (IRENA), 2022. *Future of floating wind*.
[<https://www.irena.org/publications>. ανακτήθηκε 29/4/2025]
95. European Commission, 2021. *Delivering the European Green Deal*. [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en. ανακτήθηκε 4/3/2025].
96. International Energy Agency (IEA), 2022. *The role of critical minerals in clean energy transitions*. [<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>. ανακτήθηκε 24/2/2025].
97. Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2019) Ανακοίνωση της Επιτροπής - Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία. [<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?from=FR&uri=CELEX%3A52019DC0640>, ανακτήθηκε 24/2/2025].
98. IAE. (2023) World Energy Employment 2023.
[https://iea.blob.core.windows.net/assets/8934984a-0d66-444f-a36f-641a4a3ef7de/World_Energy_Employment_2023.pdf, ανακτήθηκε 26/2/2025].

99. Ειδική Υπηρεσία Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης (ΕΥΔΑΜ). (2021)
Πρόγραμμα Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης (ΠΔΑΜ) 2021-2027.
[<https://eydam.gr/programm-dam-2021-2027/>, ανακτήθηκε 24/2/2025].
100. European Investment Bank. Η Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων στηρίζει
επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε ελληνικά νησιά.
[<https://www.eib.org/en/press/all/2017-393-european-investment-bank-backs-renewable-energy-investment-across-greek-islands.htm?lang=el&utm>,
ανακτήθηκε 26/2/2025].

11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

- 1) [1] Εικόνα 1: Εγκατεστημένα ή υπό ανάπτυξη έργα SMR παγκοσμίως. Πηγή: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/small-modular-reactor-smr-global-tracker>
- 2) [2] Εικόνα 2: Απεικόνιση του πειράματος πυρηνικής σύντηξης NIF. Πηγή: <https://physicsgg.me/2023/08/07/%CF%80%CF%85%CF%81%CE%B7%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CF%83%CF%8D%CE%BD%CF%84%CE%B7%CE%BE%CE%B7-%CE%BC%CE%B5-%CE%B1%CF%80%CF%8C%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%B7-%CF%80%CE%AC%CE%BD%CF%89-%CE%B1%CF%80%CF%8C/>
- 3) [3] Εικόνα 3: Φωτοβολταϊκό πάρκο 100 MW στη Λεμεσό. Πηγή: <https://inbusinessnews.reporter.com.cy/images/A-zKRLRBqtifVv2X-EvTfLYNMxQ=/809378/width-750/2024/09/10/asgatafotovoltaiko2.jpg>
- 4) [4] Εικόνα 4: Αιολικό πάρκο. Πηγή: https://www.newmoney.gr/wp-content/uploads/2022/03/aiolika2_27-1.jpg
- 5) [5] Εικόνα 5: Υδροηλεκτρικοί σταθμοί. Πηγή: https://energypress.gr/sites/default/files/styles/crop_620x300/public/article/images/ydroilektrika_foto_nice_picture_1.jpg?h=aa8380b0&itok=Pt6IAGju
- 6) [6] Εικόνα 6: Είδη στερεής βιομάζας. Πηγή: http://www.agroenergy.gr/sites/default/files/biomass_1.png
- 7) [7] Εικόνα 7: Μπαταρία ιόντων λιθίου 48V. Πηγή: <https://www.smartpropel.com/wp-content/uploads/2022/05/power-walls.png>
- 8) [8] Εικόνα 8: Το πρώτο εργοστάσιο συμπιεσμένου αέρα για αποθήκευση ενέργειας σε βιομηχανική κλίμακα στη βόρεια Γερμανία (1978). Πηγή: <https://3.bp.blogspot.com/-eTnJBdOZXOE/UDiTQ4TbmzI/AAAAAAAAAB0/cZSP14qWnbs/s1600/3.jpg>