



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

**«Πυρηνική Ενέργεια και Περιβάλλον: Σύγκριση με Συμβατικές
Τεχνολογίες Παραγωγής Ενέργειας, Προκλήσεις και Προοπτικές»**

**«Nuclear Energy and the Environment: Comparison with
Conventional Power Generation Technologies, Challenges and
Prospects»**

Υπό

ΡΟΥΜΠΙΑΖΑΝΗ ΣΤΥΛΙΑΝΗ

Πτυχιακή Εργασία

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

Λάρισα, 2024

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. Παπαγεωργίου Ελπινίκη
Καθηγήτρια, 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	ΡΟΥΜΠΙΑΖΑΝΗ
ΟΝΟΜΑ	ΣΤΥΛΙΑΝΗ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	2920102
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	03/09/2025
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).

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας μου, κ. Νικόλαο Παπανδριανό, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Τέλος, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Κατερίνα και Φανούριο, και την αδερφή μου Νίκη για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην οικογένειά μου.

Περίληψη

Η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται διαρκώς, ενώ η κλιματική αλλαγή και οι περιβαλλοντικές συνέπειες από τη χρήση συμβατικών πηγών ενέργειας, όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, προκαλούν έντονες ανησυχίες σε επιστημονικό, πολιτικό και κοινωνικό επίπεδο. Η αναζήτηση εναλλακτικών μορφών ενέργειας, φιλικότερων προς το περιβάλλον, είναι πλέον επιτακτική. Σε αυτό το πλαίσιο, η πυρηνική ενέργεια προβάλλει ως μία τεχνολογία που μπορεί να προσφέρει υψηλή ενεργειακή απόδοση με χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, η αξιοποίησή της συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις, όπως η ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων, η διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων και η κοινωνική αποδοχή.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία επιδιώκει να εξετάσει αν και σε ποιο βαθμό η πυρηνική ενέργεια μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη και περιβαλλοντικά αποδεκτή λύση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες. Τα βασικά ερωτήματα που τίθενται είναι: Ποιες είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της πυρηνικής ενέργειας σε σχέση με τις συμβατικές μορφές; Ποιες τεχνικές, κοινωνικές και πολιτικές προκλήσεις συνοδεύουν την εφαρμογή της; Ποιες είναι οι μελλοντικές προοπτικές για την ασφαλέστερη και αποδοτικότερη αξιοποίησή της; Στόχος της εργασίας είναι να πραγματοποιηθεί συγκριτική ανάλυση της πυρηνικής ενέργειας και των παραδοσιακών μεθόδων παραγωγής, τόσο από περιβαλλοντική όσο και από τεχνολογική σκοπιά. Οι επιμέρους σκοποί περιλαμβάνουν τη μελέτη των επιπτώσεων στο περιβάλλον, την κατανόηση των προκλήσεων που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια (όπως η διαχείριση αποβλήτων και τα ζητήματα ασφάλειας) καθώς και την αξιολόγηση των προοπτικών αυτής της τεχνολογίας στο μέλλον.

Η εργασία βασίζεται στην υπόθεση ότι, υπό κατάλληλες συνθήκες τεχνολογικής και θεσμικής εξέλιξης, η πυρηνική ενέργεια μπορεί να αποτελέσει ένα ουσιαστικό εργαλείο για τη μετάβαση σε ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα, μειώνοντας τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σχέση με τις συμβατικές πηγές.

Τα κεφάλαια της εργασίας εξετάζουν διεξοδικά τις διαφορετικές πτυχές του θέματος, ξεκινώντας με την παρουσίαση του θεωρητικού πλαισίου που αφορά τόσο την πυρηνική ενέργεια όσο και τις συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση των χαρακτηριστικών της πυρηνικής ενέργειας σε σχέση με τις παραδοσιακές αλλά και τις πιο σύγχρονες, βιώσιμες μορφές ενέργειας. Έμφαση δίνεται στις προκλήσεις που προκύπτουν από τη χρήση της πυρηνικής τεχνολογίας —όπως η ασφάλεια, η διαχείριση αποβλήτων και η κοινωνική αποδοχή— καθώς και στις μελλοντικές της προοπτικές στον ενεργειακό τομέα. Η εργασία ολοκληρώνεται με την παρουσίαση συμπερασμάτων, βασισμένων σε επιστημονικά δεδομένα και σύγχρονες μελέτες, προσφέροντας μια τεκμηριωμένη αποτίμηση του ρόλου της πυρηνικής ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό μέλλον.

Abstract

Global energy demand is constantly increasing, while climate change and the environmental consequences of the use of conventional energy sources, such as coal, oil and natural gas, are causing strong concerns at a scientific, political and social level. The search for alternative forms of energy, more environmentally friendly, is now imperative. In this context, nuclear energy emerges as a technology that can offer high energy efficiency with low greenhouse gas emissions. However, its use is accompanied by significant challenges, such as the safety of nuclear facilities, the management of radioactive waste and the social acceptance of the technology.

This thesis seeks to examine whether and to what extent nuclear energy can be a sustainable and environmentally acceptable solution to produce electricity compared to conventional technologies. The main questions raised are: What are the environmental impacts of nuclear energy in relation to conventional forms? What technical, social and political challenges accompany its implementation? And what are the future prospects for its safer and more efficient use?

The aim of the work is to carry out a comparative analysis of nuclear energy and traditional production methods, both from an environmental and technological perspective. The individual objectives include the study of the impacts on the environment, the understanding of the challenges associated with nuclear energy (such as waste management and safety issues) and the assessment of the prospects of this technology in the future.

The work is based on the hypothesis that, under appropriate conditions of technological and institutional development, nuclear energy can be an essential tool for the transition to a sustainable energy system, reducing the negative environmental impacts compared to conventional sources.

The chapters of the work thoroughly examine the different aspects of the subject, starting with the presentation of the theoretical framework concerning both nuclear energy and conventional production technologies. Then, a comparative analysis of the characteristics of nuclear energy is carried out in relation to traditional and more

modern, sustainable forms of energy. Emphasis is placed on the challenges arising from the use of nuclear technology —such as safety, waste management and social acceptance— as well as its future prospects in the energy sector. The paper concludes with the presentation of conclusions, based on scientific data and modern studies, offering a documented assessment of the role of nuclear energy in the future of global energy.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract.....	7
Πίνακας Εικόνων (List of Figures).....	12
1. Εισαγωγή.....	14
1.1 Σκοπός και Στόχοι της Έρευνας	14
1.2 Δομή της Εργασίας	15
1.3 Ιστορική αναδρομή χρήσης της πυρηνικής ενέργειας	15
1.3.1 Εφαρμογές της Πυρηνικής Ενέργειας στη Βιομηχανία και στην Επιστήμη	15
1.3.2 Εφαρμογές της Πυρηνικής Ενέργειας στη Βιομηχανία και στην Επιστήμη	18
1.4 Βασικά χαρακτηριστικά της πυρηνικής ενέργειας	19
1.4.1 Πυρηνική Σχάση	19
1.4.2 Πυρηνική σύντηξη	22
1.4.3 Τύποι αντιδραστήρων πυρηνικής ενέργειας	23
1.4.4 Πυρηνικοί Αντιδραστήρες Υποβρυχίων – Πλοίων	34
1.5 Περιβαλλοντικός Αντίκτυπος της Πυρηνικής Ενέργειας	38
1.5.1 Διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων.....	38
1.5.2. Πιθανές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.....	43
2 Συμβατικές Τεχνολογίες Παραγωγής Ενέργειας.....	45
2.1 Καύση άνθρακα και λιγνίτη	45
2.2 Καύση πετρελαίου	46
2.3 Καύση φυσικού αερίου	46
2.4 Ιστορική και Παρούσα κατανομή των τεχνολογιών παραγωγής Ενέργειας	48
2.4.1 Ιστορική εξέλιξη	48
2.4.2 Σύγχρονη κατάσταση και Τάσεις.....	52
2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή επιλογή	52
2.5.1 Οικονομικοί Παράγοντες	52
2.5.2 Πολιτικοί Παράγοντες.....	55
2.5.3 Τεχνολογικοί Παράγοντες	56
2.6 Κλιματική αλλαγή και ανάγκη ενεργειακής μετάβασης.....	57
2.6.1 Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής	57

2.6.2 Πράσινες τεχνολογίες και βιώσιμα ενεργειακά μοντέλα	57
3. Πυρηνική Ενέργεια - Προκλήσεις και Προοπτικές	59
3.1 Οικονομικές πτυχές της πυρηνικής ενέργειας	59
3.1.1 Κόστος Κατασκευής και Λειτουργίας	59
3.1.2 Οικονομικά Οφέλη και Προκλήσεις	65
3.2 Ζητήματα Πυρηνικής Ασφάλειας	66
3.2.1 Διαχείριση Κινδύνων και Ατυχημάτων	66
3.2.2 Προληπτικά Μέτρα και Πολιτικές Ασφάλειας	70
3.3 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις της πυρηνικής ενέργειας	76
3.3.1 Συγκριτική Ανάλυση με Συμβατικές Τεχνολογίες	76
3.3.2 Μακροπρόθεσμες Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις	81
3.4 Διαθεσιμότητα και Αξιοποίηση Πόρων	85
3.4.1 Αποθέματα Ουρανίου και Άλλων Πόρων	85
3.4.2 Τεχνολογικές Καινοτομίες και Βελτιώσεις	89
3.5 Συνολική Σύγκριση Πυρηνικής και Συμβατικών Τεχνολογιών	92
3.5.1 Ενεργειακή Απόδοση	92
3.5.2 Οικονομική	93
3.5.3 Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα	95
4. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις	96
4.1 Συνοπτική Αποτίμηση των Επιλογών Ενέργειας	96
4.1.1 Ενεργειακή Απόδοση: Πυρηνική vs. Συμβατικές	96
4.1.2 Οικονομική Ανάλυση	96
4.1.3 Περιβαλλοντική Επίδραση	96
4.2 Προκλήσεις και Περιορισμοί της Πυρηνικής Ενέργειας	97
4.2.1 Τεχνικοί, περιβαλλοντικοί και κοινωνικοί περιορισμοί	97
4.2.2 Ζητήματα ασφαλείας και αποδοχής από την κοινωνία	97
4.3 Μελλοντικές Προοπτικές και Στρατηγικές Ανάπτυξης	98
4.3.1 Προϋποθέσεις και Απαιτήσεις για Ευρεία Χρήση	98
4.3.2 Δυνατότητες και περιορισμοί	99
4.4 Συνολική Αξιολόγηση και Συμπεράσματα	99
4.4.1 Συνολική κρίση και τοποθέτηση	99
4.4.2 Ενδείξεις για το μέλλον	100
4.4.3 Πιθανές κατευθύνσεις για περαιτέρω μελέτη	101

Βιβλιογραφία.....	102
Βιβλιογραφία εικόνων	106
Βιβλιογραφία πινάκων.....	108

Πίνακας Εικόνων (List of Figures)

Εικόνα 1 – Οι Lise Meitner και Otto Hahn στο εργαστήριό τους στο Βερολίνο	16
Εικόνα 2 – Η πρώτη φωτογραφία της ατομικής βόμβας	18
Εικόνα 3 – Απεικόνιση της αντίδρασης πυρηνικής σχάσης	20
Εικόνα 4 – Το μοντέλο της υγρής σταγόνας	21
Εικόνα 5 – Πυρηνικός Αντιδραστήρας Υπερπίεσης	26
Εικόνα 6– Πυρηνικός Αντιδραστήρας βρασμού	27
Εικόνα 7 – Αντιδραστήρας Βαρέου ύδατος	28
Εικόνα 8 – Αντιδραστήρας ψυχρού αερίου	30
Εικόνα 9 – Γρήγορος πυρηνικός αντιδραστήρας	31
Εικόνα 10-Αντιδραστήρας λιωμένου άλατος.....	32
Εικόνα 11- Μικρός πυρηνικός αντιδραστήρας	34
Εικόνα 12- Απεικόνιση της εσωτερικής δομής ενός πυρηνικού υποβρυχίου βαλλιστικών πυραύλων	38
Εικόνα 13- Δεξαμενή υγρής αποθήκευσης πυρηνικών αποβλήτων.....	41
Εικόνα 14-Ειδικό κάδοι ξηρής απόθεσης πυρηνικών αποβλήτων.....	42
Εικόνα 15- Σχεδιάγραμμα των δομών και επιπέδων μιας βάσης ταφής πυρηνικών αποβλήτων	43
Εικόνα 16 – Διακύμανση της χρήσης ορυκτών καυσίμων από τη Βιομηχανική Επανάσταση έως σήμερα.....	45
Εικόνα 17 – Ανάλυση της σχέσης μεταξύ της χρήσης καθαρών και συμβατικών πηγών ενέργειας	48
Εικόνα 18 – Η εξάπλωση της Βιομηχανικής Επανάστασης από τη Βρετανία στην υπόλοιπη Ευρώπη.....	50
Εικόνα 19- Πέντε σημαντικά γεγονότα κατά τη Βιομηχανική επανάσταση	50
Εικόνα 20- Διάγραμμα της διακύμανσης της χρήσης διαφόρων πηγών ενέργειας.....	51
Εικόνα 21- Πτώση του κόστους ηλιακής και αιολικής ενέργειας από τη δεκαετία του 80 έως σήμερα.....	53
Εικόνα 22- Σύγκριση κόστους ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ορυκτά καύσιμα	55
Εικόνα 23- Το κόστος κεφαλαίου, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι τόκοι ή άλλες επιβαρύνσεις, για τη κατασκευή ενός πυρηνικού εργοστασίου σε διάφορες χώρες...	61
Εικόνα 24- Ανάλυση των ποσοστών κοστών	62
Εικόνα 25 – Σύγκριση των ποσοστών κόστους εργοστασίων παραγωγής ενέργειας από διάφορες μορφές.....	64
Εικόνα 26- Διάγραμμα επείγουσας λειτουργικής διαδικασίας (EOP)	67
Εικόνα 27- Σύστημα έκτακτης χρήσης νερού από φρεάτιο ελέγχου	68
Εικόνα 28- Σύστημα ενσωματωμένων αισθητήρων υψηλής θερμοκρασίας	69
Εικόνα 29- Περιστατικά θανάτων στις βιομηχανίες ενέργειας.....	71
Εικόνα 30 – Διεθνής κλίμακα αξιολόγησης της σοβαρότητας πυρηνικών ατυχημάτων	72
Εικόνα 31- Κατασκευή νέου μοντέλου πυρηνικού αντιδραστήρα με εξελιγμένο σχέδιο	73

Εικόνα 32- Μέσες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂) κατά τον κύκλο ζωής για διάφορες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	80
.....	81
Εικόνα 33- Η επιτυχημένη μείωση εναερίων ρύπων ανά τα χρόνια χάρη στις ΑΠΕ..	81
Εικόνα 34- Η χρήση νερού από κάθε τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.	85
Εικόνα 35- Κοιτάσματα ουρανίου ανά χώρα.....	87
Εικόνα 36- Ακατέργαστο ουράνιο.....	87
Εικόνα 37- Πρώιμος πειραματικός πυρηνικός αντιδραστήρας με βάση το θόριο.....	89

Πίνακας Πινάκων (List of Figures)

Πίνακας 1 Ετήσια κατανάλωση ενέργειας στην Αγγλία και την Ουαλία	49
Πίνακας 2 Απαιτήσεις υποδομής για τη προμήθεια της παγκόσμιας ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές το 2030.....	Error! Bookmark not defined.
Πίνακας 3 Ανάλυση του κόστους κεφαλαίου πυρηνικής εγκατάστασης ως προς την εργασία	60

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός και Στόχοι της Έρευνας

Κάθε ερευνητική εργασία χρειάζεται σαφή οριοθέτηση του σκοπού και των στόχων της, ώστε να αναδεικνύεται η κατεύθυνση και το εύρος της μελέτης. Η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται στην πυρηνική ενέργεια, ένα πεδίο με ιδιαίτερη επιστημονική, τεχνολογική και κοινωνική σημασία. Η διατύπωση του σκοπού και των επιμέρους στόχων είναι απαραίτητη για να καθοριστούν οι βασικοί άξονες ανάλυσης, να δομηθεί η μεθοδολογική προσέγγιση και να αποσαφηνιστεί το αναμενόμενο ερευνητικό όφελος. Με αυτόν τον τρόπο, η μελέτη αποκτά συνοχή και κατευθύνεται προς την παραγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων που μπορούν να συμβάλουν στον ευρύτερο διάλογο για την αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας στο σύγχρονο ενεργειακό τοπίο.

Ο σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η αναλυτική μελέτη της πυρηνικής ενέργειας ως πηγής παραγωγής ηλεκτρισμού, με στόχο την κατανόηση των τεχνικών, οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων που τη συνοδεύουν, καθώς και η συγκριτική αξιολόγησή της σε σχέση με άλλες μορφές ενέργειας, τόσο συμβατικές όπως τα ορυκτά καύσιμα όσο και ανανεώσιμες όπως η αιολική, η ηλιακή, η υδροηλεκτρική και η γεωθερμική.

Η μελέτη αποσκοπεί στην ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της πυρηνικής τεχνολογίας, στην εξέταση των προοπτικών εξέλιξής της και στον προσδιορισμό του ρόλου που μπορεί να διαδραματίσει στο ενεργειακό μείγμα του μέλλοντος. Στο πλαίσιο αυτό, επιδιώκεται η παρουσίαση της αρχής λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων σχάσης και σύντηξης, η ανάλυση σύγχρονων τεχνολογικών καινοτομιών όπως οι Μικροί Αρθρωτοί Αντιδραστήρες (SMRs) και η πυρηνική σύντηξη, καθώς και η συγκριτική αξιολόγησή τους με άλλες μορφές ενέργειας ως προς την ενεργειακή απόδοση, το κόστος, την ασφάλεια, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τη διαθεσιμότητα πόρων.

Επιπλέον, η έρευνα εξετάζει ζητήματα όπως η σταθερότητα παροχής, η μηδενική εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα κατά τη λειτουργία, η διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων και οι κίνδυνοι ατυχημάτων, ενώ διερευνά τις τρέχουσες ερευνητικές και τεχνολογικές τάσεις, συμπεριλαμβανομένης της εφαρμογής τεχνητής νοημοσύνης για τη βελτιστοποίηση και την ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων.

Τέλος, περιλαμβάνεται η κοινωνικοοικονομική διάσταση της πυρηνικής ενέργειας, με έμφαση στην κάλυψη ενεργειακών αναγκών, στη δημιουργία θέσεων εργασίας και στις κοινωνικές αντιλήψεις που επηρεάζουν την αποδοχή ή την απόρριψη της τεχνολογίας, με στόχο τη διαμόρφωση μιας ολοκληρωμένης και τεκμηριωμένης εικόνας για τον ρόλο της στην ενεργειακή μετάβαση.

1.2 Δομή της Εργασίας

Η εργασία αποτελείται από τέσσερα διακριτά κεφάλαια, τα οποία οργανώνονται με τρόπο ώστε να προσφέρουν μια ολοκληρωμένη και συστηματική προσέγγιση στο θέμα της πυρηνικής ενέργειας και της σύγκρισής της με άλλες μορφές παραγωγής ενέργειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο της μελέτης, όπου αναλύονται ο σκοπός και οι στόχοι της έρευνας, η ιστορική αναδρομή της πυρηνικής ενέργειας, τα βασικά χαρακτηριστικά της και οι περιβαλλοντικές της επιπτώσεις.

Το δεύτερο κεφάλαιο επικεντρώνεται στις συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας, εξετάζοντας την καύση άνθρακα, λιγνίτη, πετρελαίου και φυσικού αερίου, καθώς και την ιστορική και σύγχρονη κατανομή τους. Επιπλέον, αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τις ενεργειακές επιλογές και αναδεικνύεται η σχέση τους με την κλιματική αλλαγή και την ανάγκη ενεργειακής μετάβασης.

Στο τρίτο κεφάλαιο εξετάζεται η πυρηνική ενέργεια με έμφαση στις οικονομικές της πτυχές, τα ζητήματα ασφάλειας, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τη διαθεσιμότητα πόρων. Ακολουθεί συγκριτική ανάλυση με τις συμβατικές τεχνολογίες, ώστε να αξιολογηθεί συνολικά η θέση της πυρηνικής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα.

Τέλος, το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα της έρευνας και τις μελλοντικές κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα, αποτιμώνται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της πυρηνικής ενέργειας, ενώ παράλληλα διερευνώνται οι προοπτικές της με βάση τις τεχνολογικές εξελίξεις, τις επενδυτικές τάσεις και τις κοινωνικές αντιλήψεις που επηρεάζουν την αποδοχή ή την απόρριψή της.

1.3 Ιστορική αναδρομή χρήσης της πυρηνικής ενέργειας

1.3.1 Εφαρμογές της Πυρηνικής Ενέργειας στη Βιομηχανία και στην Επιστήμη

Οι πρώτες μελέτες, πειράματα και θεωρίες γύρω από το άτομο και τις ιδιότητές του συνέβαλαν καθοριστικά στην κατανόηση της δομής του και στην ανάπτυξη της πυρηνικής επιστήμης. Η πορεία της μελέτης και της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας ξεκινά το 1789 με την ανακάλυψη του ουρανίου (U) από τον Γερμανό χημικό Martin Klaproth, ο οποίος μελετούσε τις ιδιότητες του ατόμου. Ο Klaproth έδωσε στο στοιχείο το όνομα του πλανήτη Ουρανού, που είχε ανακαλυφθεί λίγα χρόνια νωρίτερα (World Nuclear Association, 2025).

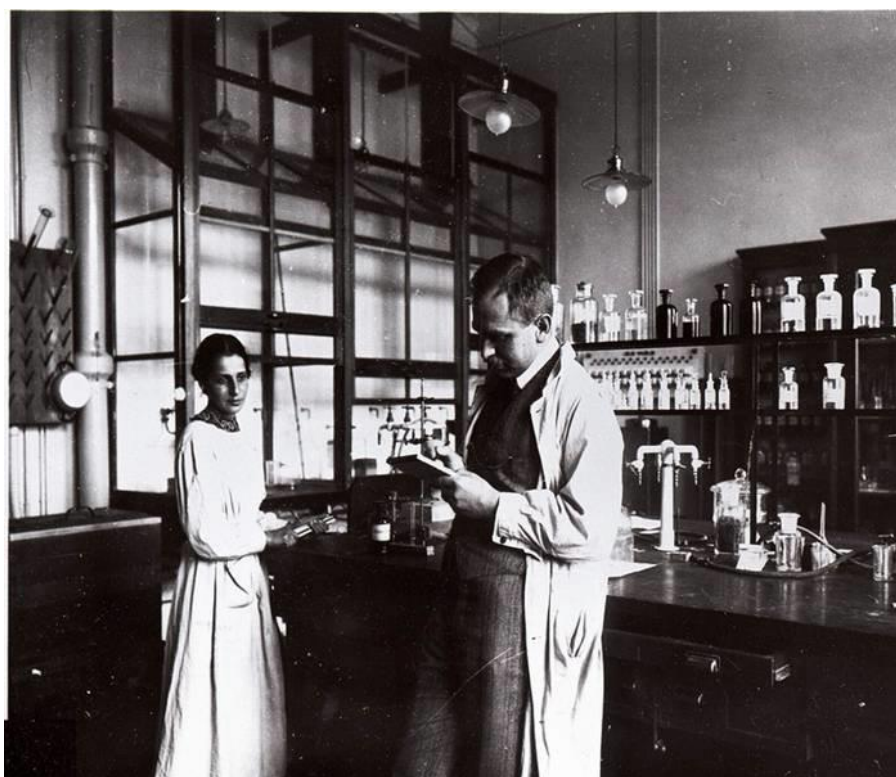
Το 1895, ο Wilhelm Röntgen ανακάλυψε την ιοντίζουσα ακτινοβολία κατά τη διάρκεια ενός πειράματος όπου μετέφερε ηλεκτρικό ρεύμα μέσα από έναν σωλήνα κενού, παράγοντας έτσι τις ακτίνες X. Έναν χρόνο αργότερα, το 1896, ο Henri Becquerel ανακάλυψε πως το ορυκτό πίσσα-ουρανίτης (που περιέχει ουράνιο και ράδιο) μπορούσε να σκοτεινιάσει μια φωτογραφική πλάκα, εξαιτίας της εκπομπής β ακτινοβολίας (ηλεκτρονίων). Την ίδια χρονιά, οι Pierre και Marie Curie ονόμασαν αυτό

το φαινόμενο «ραδιενέργεια» και το 1898 απομόνωσαν το πολώνιο και το ράδιο. (Υπουργείο Ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών, 2002).

Το 1902, ο Ernest Rutherford απέδειξε ότι μέσω της ραδιενέργειας και της εκπομπής σωματιδίων άλφα ή βήτα από τον πυρήνα, δημιουργείται ένα νέο, διαφορετικό στοιχείο (World Nuclear Association, 2025). Οι μελέτες του Rutherford και του Niels Bohr τις επόμενες δεκαετίες, έως και τη δεκαετία του 1940, έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη της πυρηνικής φυσικής και στην κατανόηση της δομής του ατόμου και των ηλεκτρονίων. Έτσι, προετοίμασαν το έδαφος για πιο λεπτομερείς και ακριβείς ανακαλύψεις από τους μελλοντικούς επιστήμονες.

Ανακάλυψη της πυρηνικής σχάσης

Η πυρηνική σχάση ανακαλύφθηκε από μία ομάδα χημικών (Fritz Strassmann, Otto Hahn) και φυσικών (Lise Meitner και Otto Frisch) τον Δεκέμβριο του 1938. Η ανακάλυψη έγινε κατά τη διάρκεια διεξαγωγής ενός πειράματος από τους συνεργάτες Otto Hahn και Fritz Strassmann, οι οποίοι επιβεβαίωσαν πως τα προϊόντα της αντίδρασης ενός βαρέος πυρήνα με ένα νετρόνιο είναι ραδιενεργά ισότοπα βαρίου. Με την συμβολή των Lise Meitner και Otto Frisch, παρείχαν την επιστημονική εξήγηση για το φαινόμενο που στη συνέχεια ονομάστηκε «πυρηνική σχάση». Η ανακάλυψη αυτή θεωρείται μία από τις πιο καθοριστικές της ιστορίας, καθώς έπαιξε κρίσιμο ρόλο στην εισαγωγή του σύγχρονου κόσμου στην πυρηνική εποχή (Max Planck Institute, 2025).



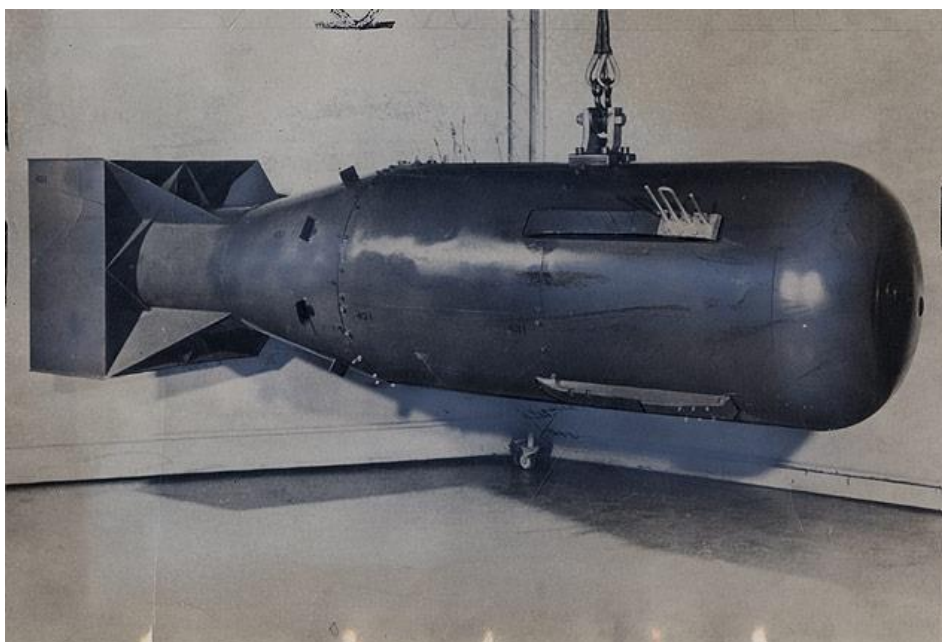
Εικόνα 1 – Οι Lise Meitner και Otto Hahn στο εργαστήριό τους στο Βερολίνο, 1913 (US Department of Energy)

Η διαπίστωση πυροδότησε έντονο ενδιαφέρον για τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας, οδηγώντας πολλούς επιστήμονες να επικεντρωθούν σε πειράματα που διερευνούσαν τις δυνατότητες του φαινομένου. Με την επιτυχή κατασκευή του Chicago Pile-1, του πρώτου πυρηνικού αντιδραστήρα από την ομάδα του Ενρίκο Φέρμι το 1942, κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, η επιστημονική έρευνα εστίασε στην ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας με σκοπό τη χρήση της ως στρατηγικό όπλο (World Nuclear Association, 2025).

Η κατασκευή της πρώτης ατομικής βόμβας – Project Manhattan

Υπό τον φόβο ότι η ναζιστική Γερμανία θα ανέπτυσσε πυρηνικά όπλα, οι Ηνωμένες Πολιτείες σε συνεργασία με τη Βρετανία ξεκίνησαν το 1942 το μυστικό ερευνητικό πρόγραμμα «Manhattan Project». Στόχος του ήταν η ανάπτυξη της πρώτης ατομικής βόμβας (Stanford University, 2012). Στις 16 Ιουλίου 1945 πραγματοποιήθηκε η πρώτη δοκιμή στο Νέο Μεξικό (*Trinity test*). Λίγες εβδομάδες αργότερα, στις 6 και 9 Αυγούστου 1945, οι ΗΠΑ έριξαν δύο ατομικές βόμβες στις ιαπωνικές πόλεις Χιροσίμα και Ναγκασάκι, προκαλώντας τον θάνατο περίπου 220.000 ανθρώπων και σοβαρά μακροχρόνια προβλήματα υγείας στους επιζώντες (Manhattan Project National Historical Park, 2025).

Η χρήση της ατομικής βόμβας άνοιξε μια νέα, αμφιλεγόμενη εποχή για την ανθρωπότητα. Προκάλεσε διεθνή συζήτηση για τα ηθικά όρια της επιστήμης, ενώ ταυτόχρονα εδραίωσε τα πυρηνικά όπλα ως κεντρικό στοιχείο της στρατηγικής ισχύος στον 20ό αιώνα. Παράλληλα, αύξησε το ακαδημαϊκό και τεχνολογικό ενδιαφέρον για την πυρηνική φυσική, προετοιμάζοντας το έδαφος για την ειρηνική αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας στις δεκαετίες που ακολούθησαν. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το σχήμα και η δομή της βόμβας.



Εικόνα 2 – Η πρώτη φωτογραφία της ατομικής βόμβας (National Archives and Records Administration Archives)

Κατά τη διάρκεια του ψυχρού πολέμου (1947-1980) οι ΗΠΑ και η Σοβιετική Ένωση συνέχισαν να επενδύουν σε πυρηνικά όπλα. Οι ΗΠΑ δοκίμασαν πυρηνικές εκρήξεις σε θωρηκτά, ενώ η Σοβιετική Ένωση πραγματοποίησε την πρώτη της πυρηνική δοκιμή το 1949. Και οι δύο υπερδυνάμεις άρχισαν να αναπτύσσουν βόμβες υδρογόνου, με τις ΗΠΑ να δοκιμάζουν την πρώτη το 1952, και τη Σοβιετική Ένωση να ακολουθεί με μια ισχυρότερη. Τη δεκαετία του 1950, άρχισαν έρευνες για διηπειρωτικούς πυραύλους, αυξάνοντας την παγκόσμια ανησυχία καθώς όλο και περισσότερες χώρες ακολούθησαν το παράδειγμά τους αναπτύσσοντας τα δικά τους πυρηνικά όπλα (World Nuclear Association, 2025).

1.3.2 Εφαρμογές της Πυρηνικής Ενέργειας στη Βιομηχανία και στην Επιστήμη

Οι σημαντικές επιστημονικές ανακαλύψεις του 2^{ου} Παγκοσμίου πολέμου, έστρεψαν το κοινό ενδιαφέρον και προς την εμπορική χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Η κυβέρνηση των ΗΠΑ προώθησε την ανάπτυξη της για ειρηνικούς σκοπούς και το 1946 ιδρύεται η Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (AEC), η οποία έδωσε την έγκριση για την κατασκευή του Πειραματικού Αντιδραστήρα Αναπαραγωγής I στο Αϊντάχο. Ο αντιδραστήρας παρήγαγε την πρώτη ηλεκτρική ενέργεια από πυρηνική πηγή στις 20 Δεκεμβρίου 1951. Ο Ένρικο Φέρμι ηγήθηκε της ομάδας που πραγματοποίησε την πρώτη αυτοσυντηρούμενη πυρηνική αλυσιδωτή αντίδραση στις 2 Δεκεμβρίου 1942 (US Department of Energy, 2019).

Κατά τη δεκαετία του 1960 και του 1970, η πυρηνική ενέργεια άρχισε να διαδίδεται σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς οι αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες και η ταχεία βιομηχανοποίηση ώθησαν πολλές χώρες να επενδύσουν σε αυτήν ως αξιόπιστη πηγή

ενέργειας. Η Γαλλία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Σοβιετική Ένωση και οι Ηνωμένες Πολιτείες ήταν πρωτοπόρες σε αυτόν τον τομέα, με δεκάδες νέους αντιδραστήρες να τίθενται σε λειτουργία (ΙΑΕΑ, 1987).

Στη δεκαετία του 1970, η πυρηνική ενέργεια απέκτησε ακόμη μεγαλύτερη σημασία λόγω της πετρελαϊκής κρίσης του 1973. Η κρίση αυτή προκλήθηκε από την έλλειψη πετρελαίου και την απότομη αύξηση των τιμών των ορυκτών καυσίμων, γεγονός που ανάγκασε πολλές χώρες να αναζητήσουν εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Η πυρηνική ενέργεια αναδείχθηκε ως μια τέτοια λύση, προσφέροντας μια οικονομικά αποδοτική και σταθερή πηγή ενέργειας, η οποία μπορούσε να καλύψει τις αυξανόμενες ανάγκες, ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις στις τιμές των ορυκτών καυσίμων (ΙΑΕΑ, 1987).

1.4 Βασικά χαρακτηριστικά της πυρηνικής ενέργειας

1.4.1 Πυρηνική Σχάση

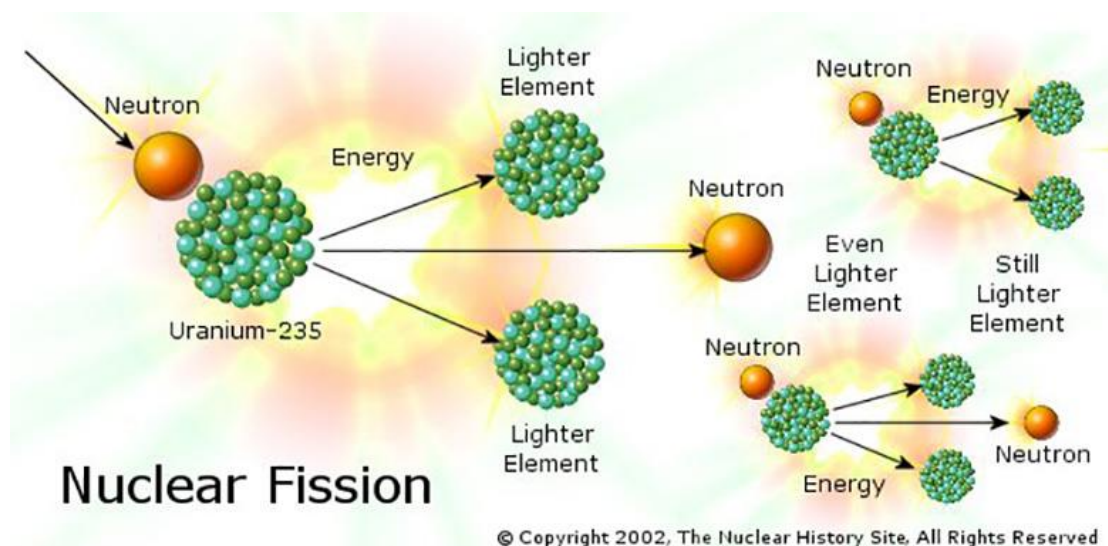
Η πυρηνική σχάση ανακαλύφθηκε από μία ομάδα χημικών (Fritz Strassmann, Otto Hahn) και φυσικών (Lise Meitner και Otto Frisch) τον Δεκέμβριο του 1938. Η ανακάλυψη έγινε κατά τη διάρκεια ενός πειράματος που διεξάχθηκε στο Ινστιτούτο Χημείας Kaiser Wilhelm από τους συνεργάτες Otto Hahn και Fritz Strassmann οι οποίοι όσο ακτινοβολούσαν έναν πυρήνα Ουρανίου (U-235) με νετρόνια παρατήρησαν ότι ένα από τα προϊόντα που παραγόταν από την αντίδραση ήταν το στοιχείο Βάριο. Καθώς τα πειράματα ακτινοβολήσης του ουρανίου με νετρόνια του 1934 του Fermi ήταν εκείνα που ενέπνευσαν την ομάδα ερευνητών, για χρόνια οι Hahn, Meitner και Strassmann θεωρούσαν πως κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης σχηματιζόταν στοιχεία βαρύτερα του ουρανίου. Στις 19 Δεκεμβρίου του 1938 όμως, απέδειξαν πως τα προϊόντα της αντίδρασης είναι ραδιενεργά ισότοπα βαρίου. Ο Hahn εξέφρασε τη θεωρία πως οι ατομικοί πυρήνες εξερράγησαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, η οποία όμως θεωρία δεν συνάδει με όλες τις προηγούμενες υποθέσεις της εποχής (World Nuclear Association, 2025).

Η χημικός Lise Meitner και ο ανηψιός της Otto Frisch, παρουσίασαν την επιστημονική εξήγηση πίσω από το φαινόμενο. Παρομοίωσαν τον πυρήνα ουρανίου με μια ηλεκτρικά φορτισμένη σταγόνα υγρού, όπου η σύλληψη του επιπλέον νετρονίου προκαλεί τη μεγάλη ταλάντωση και διάσπαση του πυρήνα σε δύο παρόμοια, σχεδόν ίσα, μικρότερα κομμάτια. Η διαδικασία ονομάστηκε «πυρηνική σχάση». Κατά τη διάρκεια της πυρηνικής σχάσης παράγονται ακτίνες γ και απελευθερώνεται ένα μεγάλο ποσό ενέργειας. Η ανακάλυψη αυτή ήταν καθοριστική για την επιστήμη και άνοιξε τον δρόμο για την ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας. Το 1945, ο Otto Hahn τιμήθηκε με το Νόμπελ Χημείας για την ανακάλυψη της πυρηνικής σχάσης. Μετά την ανακάλυψη, οι Frisch, Hahn, Meitner, και Strassmann συνέχισαν τα πειράματα, συνειδητοποιώντας τις τεράστιες δυνατότητες της πυρηνικής σχάσης (World Nuclear Association, 2025).

Ορισμός της πυρηνικής σχάσης

Η πυρηνική σχάση είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα νετρόνιο συγκρούεται με τον πυρήνα ενός βαρέος ατόμου. Επειδή το νετρόνιο είναι ηλεκτρικά ουδέτερο και δεν επηρεάζεται από τις απωστικές δυνάμεις Coulomb που ασκούνται μεταξύ των πρωτονίων, μπορεί να εισέλθει στον πυρήνα χωρίς δυσκολία. Η σύγκρουση αυτή οδηγεί σε ανακατανομή της ενέργειας στον πυρήνα, ο οποίος καθίσταται ασταθής και τελικά διασπάται σε δύο μικρότερους και ελαφρύτερους πυρήνες, γνωστούς ως προϊόντα σχάσης. Κατά τη διάσπαση απελευθερώνεται τεράστια ποσότητα ενέργειας και παράγονται επιπλέον νετρόνια.

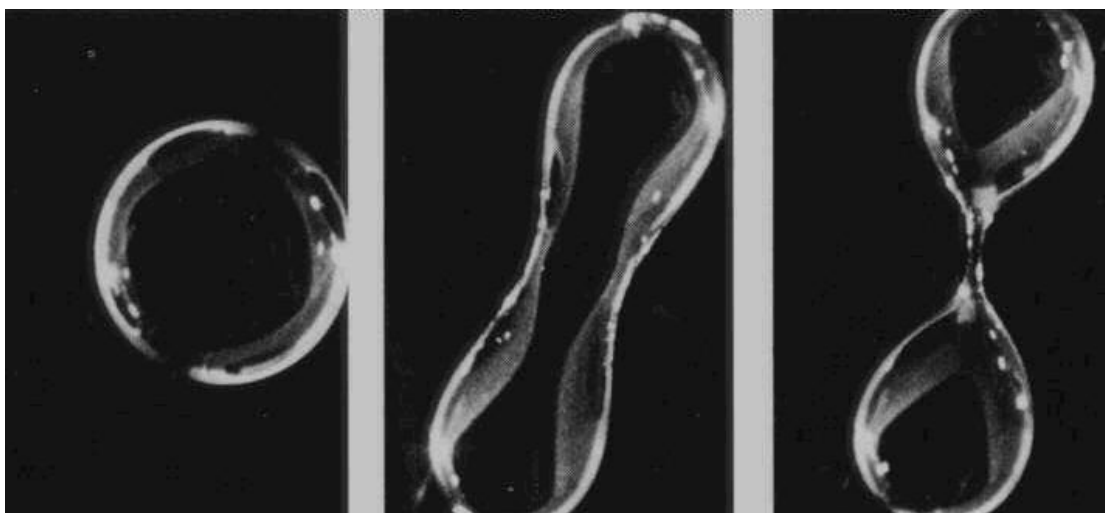
Τα νετρόνια αυτά μπορούν να προκαλέσουν νέες σχάσεις σε γειτονικούς πυρήνες, δημιουργώντας μια αλυσιδωτή αντίδραση. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3, κάθε σχάση οδηγεί σε επόμενες, με αποτέλεσμα η διαδικασία να αυτοδιαιωνίζεται και να παράγει ακόμη περισσότερη ενέργεια (Britannica, 2025).



Εικόνα 3 – Απεικόνιση της αντίδρασης πυρηνικής σχάσης σε έναν πυρήνα ουρανίου (International Journal of Innovative Science and Research Technology)

Το μοντέλο της υγρής σταγόνας

Το μοντέλο της υγρής σταγόνας, στη πυρηνική φυσική, είναι μια περιγραφή των ατομικών πυρήνων όπου τα νουκλεόνια (νετρόνια και πρωτόνια στον πυρήνα του ατόμου) συμπεριφέρονται όπως τα μόρια σε μια σταγόνα υγρού (Hermann Weigmann, 1991). Εάν δοθεί επαρκής επιπλέον ενέργεια (όπως με την απορρόφηση ενός νετρονίου), ο σφαιρικός πυρήνας μπορεί να παραμορφωθεί σε διάφορα σχήματα και στη συνέχεια να σπάσει στη μέση, δημιουργώντας δύο σχεδόν ίσα θραύσματα, απελευθερώνοντας ενέργεια. Παρόλο που το μοντέλο δεν επαρκεί για να εξηγήσει όλα τα πυρηνικά φαινόμενα, η θεωρία που το υποστηρίζει παρέχει εξαιρετικές εκτιμήσεις των μέσων χαρακτηριστικών των πυρήνων. Ο Ρώσος φυσικός George Gamow διατύπωσε το μοντέλο το 1929, και οι Αυστριακοί φυσικοί Lise Meitner και Otto Frisch το χρησιμοποίησαν το 1938 για να εξηγήσουν τη πυρηνική σχάση (Columbian College of Arts and Sciences, 2000).



Εικόνα 4 – Το μοντέλο της υγρής σταγόνας (R. E. Apfel, Yale University)

Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της πυρηνικής σχάσης είναι εξαιρετικά μεγάλη και περιγράφεται από τον τύπο του Αϊνστάιν, $E = mc^2$. Σύμφωνα με αυτή τη φόρμουλα, όπου το E αντιπροσωπεύει την ενέργεια που εκλύεται, το m είναι η μάζα που χάνεται κατά τη διαδικασία, και το c είναι η ταχύτητα του φωτός, συνδέονται οι έννοιες της ενέργειας και της μάζας. Η εξίσωση δείχνει πως η απώλεια μάζας του πυρήνα (m) που παρατηρείται κατά τη διαδικασία της σχάσης μετατρέπεται σε μια τεράστια ποσότητα ενέργειας. Το τετράγωνο της ταχύτητας του φωτός (c^2) αναδεικνύει τη δραματική αύξηση της ενέργειας που προκύπτει από τη μικρή ποσότητα μάζας που χάνεται (National Science Teaching Association, 2021). Στοιχεία που προέκυψαν από έρευνες (Hajare, B. et al, 2018), επιβεβαιώνουν ότι σε κάθε πυρηνική σχάση η κύρια ποσότητα ενέργειας που απελευθερώνεται είναι η κινητική ενέργεια των θραυσμάτων, η οποία αντιστοιχεί σχεδόν στο 83% της συνολικής ενέργειας. Επιπλέον, από το υπόλοιπο 17% της ενέργειας, το 2,5% απελευθερώνεται ως κινητική ενέργεια των νετρονίων, το 3,5% απελευθερώνεται με τη μορφή γάμμα ακτίνων που εκπέμπονται άμεσα, και το 11% απελευθερώνεται ως επακόλουθες γάμμα και βήτα αποσυνθέσεις των θραυσμάτων σχάσης. Συνεπώς η πυρηνική σχάση θεωρείται ένα από τα πιο σημαντικά φαινόμενα της φυσικής, κυρίως λόγω των επιπτώσεών και προοπτικών της σε διάφορους τομείς.

Στη διαδικασία της πυρηνικής σχάσης απαιτείται η χρήση βαρέων στοιχείων, τα οποία έχουν πιο ασταθείς πυρήνες και είναι πιο εύκολο να διασπαστούν μετά τη πρόσληψη ενός νετρονίου. Για αυτόν τον λόγο τα πιο συχνά στοιχεία είναι τα ισότοπα (χημικά στοιχεία με ίδιο αριθμό πρωτονίων αλλά διαφορετικό αριθμό νετρονίων στον πυρήνα) Ουράνιο-235 και Πλουτώνιο-239, τα οποία μετά το τέλος της σχάσης μετατρέπονται σε Ουράνιο-236 και Πλουτώνιο-240 αντίστοιχα, τα οποία είναι ιδιαίτερα ασταθή και διασπώνται άμεσα σε μικρότερους πυρήνες, απελευθερώνοντας ενέργεια και νέα νετρόνια. Μετά την ολοκλήρωση της αντίδρασης, τα προϊόντα της σχάσης αντιμετωπίζονται ως πυρηνικά απόβλητα, τα οποία πρέπει να διαχειρίζονται με προσοχή και σύμφωνα με αυστηρά πρωτόκολλα ασφαλείας για την ορθή απόρριψή τους (Atomic Heritage Foundation, 2014).

Έκκλιση ενέργειας

Η τεράστια ποσότητα ενέργειας που απελευθερώνεται από τη διαδικασία της σχάσης βαρέων ατόμων — περίπου 200 MeV ή 3.20436×10^{-11} joules — την καθιστά κρίσιμη για τη σύγχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, η συνεχής πρόοδος στη επιστήμη και την τεχνολογία δείχνει ότι η πυρηνική σχάση δεν περιορίζεται μόνο στην παραγωγή ενέργειας, αλλά αποτελεί μια θεμελιώδη διαδικασία στη φυσική, με προοπτικές για εφαρμογή σε πολλές περιοχές της επιστήμης (Centre national de la recherche scientifique, 2025).

1.4.2 Πυρηνική σύντηξη

Η πυρηνική σύντηξη ορίζεται ως η διαδικασία κατά την οποία δύο ελαφροί ατομικοί πυρήνες ενώνονται και σχηματίζουν έναν βαρύτερο πυρήνα, απελευθερώνοντας τεράστια ποσά ενέργειας (Cambridge Dictionary, 2025). Ο νέος πυρήνας έχει μικρότερη μάζα από το άθροισμα των δύο αρχικών, και η διαφορά μετατρέπεται σε ενέργεια, σύμφωνα με την εξίσωση του Αϊνστάιν ($E=mc^2$). Η επιστημονική κοινότητα συνεχίζει εντατικά την έρευνα ώστε να καταστεί δυνατή η αξιοποίηση αυτής της σχεδόν ανεξάντλητης και καθαρής πηγής ενέργειας..

Ιστορική αναδρομή

Το 1926, ο Άρθουρ Έντινγκτον διατύπωσε την υπόθεση ότι τα άστρα παράγουν ενέργεια μέσω σύντηξης υδρογόνου σε ήλιο, γεγονός που αύξησε το παγκόσμιο ενδιαφέρον για την κατανόηση της σύντηξης. Στη δεκαετία του 1950, οι κυβερνήσεις αναγνώρισαν τις τεράστιες τεχνικές προκλήσεις για την παραγωγή ενέργειας από σύντηξη. Το 1958, στο Δεύτερο Συνέδριο των Ηνωμένων Εθνών για τις Ειρηνικές Χρήσεις της Ατομικής Ενέργειας στη Γενεύη, παρουσιάστηκαν τέσσερις βασικές προσεγγίσεις για τον έλεγχο των θερμοπυρηνικών αντιδράσεων: τοκάμακ, pinch, μαγνητικός καθρέφτης και στελαρατέρ. Την ίδια χρονιά ιδρύθηκε η Διεθνής Υπηρεσία Ατομικής Ενέργειας (IAEA), ενισχύοντας τη διεθνή συνεργασία..

Η δεκαετία του 1970 υπήρξε καίρια για την έρευνα στη σύντηξη, με ισχυρή κυβερνητική υποστήριξη στις ΗΠΑ και σχέδια για μελλοντικούς αντιδραστήρες. Στα τέλη της δεκαετίας, η IAEA ανέλαβε κεντρικό ρόλο στον συντονισμό της έρευνας, ενώ παράλληλα διεξήχθησαν περιβαλλοντικές και ασφάλειας μελέτες. Η δεκαετία του 1980 χαρακτηρίστηκε από περιορισμό των αμερικανικών φιλοδοξιών λόγω οικονομικών δυσκολιών, αν και η βασική έρευνα συνεχίστηκε. Το 1985, οι ΗΠΑ και η Σοβιετική Ένωση υπέγραψαν ιστορική συμφωνία συνεργασίας, η οποία οδήγησε στην ανάπτυξη του ITER στη Γαλλία, ενός διεθνούς έργου στο οποίο συμμετέχουν 35 χώρες (Barbarino, M. , 2020).

Σήμερα, η ανάγκη για καθαρή και αξιόπιστη ενέργεια καθιστά τη σύντηξη προτεραιότητα. Η τεχνολογία προχωρά, η βιομηχανία αναπτύσσεται ταχύτατα και η κλιματική αλλαγή ενισχύει περαιτέρω τη σημασία της έρευνας (Dale Meade, 2009).

Σχάση και σύντηξη: διαφορές και ομοιότητες

Η σχάση και η σύντηξη συχνά συγχέονται, ωστόσο αποτελούν δύο διαφορετικές πυρηνικές διαδικασίες. Στη σχάση, βαρείς πυρήνες όπως το ουράνιο-235 και το πλουτόνιο-239 διασπώνται σε ελαφρύτερους πυρήνες, ενώ στη σύντηξη ελαφροί πυρήνες, όπως του υδρογόνου, ενώνονται σχηματίζοντας βαρύτερους. Και οι δύο διαδικασίες εκλύουν τεράστια ποσά ενέργειας σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα. Η σύντηξη, ωστόσο, έχει το πλεονέκτημα ότι δεν παράγει ραδιενεργά απόβλητα υψηλού επιπέδου ούτε υλικά που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για πυρηνικά όπλα. (ΙΑΕΑ, 2023)

Σύντηξη δευτερίου–τρίτιου (D-T)

Η πιο υποσχόμενη αντίδραση σύντηξης είναι αυτή του δευτερίου με το τρίτιο. Κατά τη διαδικασία, τα δύο ισότοπα του υδρογόνου συγχωνεύονται και σχηματίζουν ήλιο-4 (α-σωματίδιο), απελευθερώνοντας 17,6 MeV κινητικής ενέργειας (Lehigh University, 2022). Το δευτέριο υπάρχει σε αφθονία στο νερό, ενώ το τρίτιο μπορεί να παραχθεί από το λίθιο, το οποίο απαντάται σε χερσαία κοιτάσματα και σε θαλασσινό νερό. Ένα φορτηγό γεμάτο δευτέριο μπορεί να αποδώσει ενέργεια ισοδύναμη με περίπου 2 εκατομμύρια τόνους άνθρακα (21.000 βαγόνια τρένου). Επιπλέον, τα νετρόνια που εκλύονται από την αντίδραση μπορούν να μετατρέψουν το λίθιο σε τρίτιο, ανατροφοδοτώντας έτσι τη διαδικασία.

Δυσκολίες στην υλοποίηση

Βασικό στοιχείο της θερμοπυρηνικής σύντηξης είναι το πλάσμα, η τέταρτη κατάσταση της ύλης. Το πλάσμα σχηματίζεται όταν ένα αέριο θερμανθεί ή υποβληθεί σε ισχυρά ηλεκτρικά/μαγνητικά πεδία, με αποτέλεσμα την ιονισμένη του μορφή (Princeton Plasma Physics Laboratory, 2025). Στην κατάσταση αυτή, οι θετικά φορτισμένοι πυρήνες μπορούν να υπερνικήσουν τις ηλεκτροστατικές απωστικές δυνάμεις και να συγχωνευτούν. Για να επιτευχθεί η σύντηξη απαιτούνται τρεις βασικές συνθήκες: εξαιρετικά υψηλή θερμοκρασία (έως 100 εκατομμύρια °C), μεγάλη συγκέντρωση ιόντων και επαρκής χρόνος συγκράτησης.

Η επίτευξη και η διατήρηση αυτών των συνθηκών είναι εξαιρετικά δύσκολη. Παρά την πρόοδο σε εργαστηριακά πειράματα, μέχρι σήμερα η παραγόμενη ενέργεια δεν έχει ξεπεράσει την ενέργεια που απαιτείται για την έναρξη της αντίδρασης (University of Rochester's Laboratory for Laser Energetics, 2018). Αυτό καθιστά την έρευνα στη σύντηξη απαιτητική αλλά και κρίσιμη για το μέλλον της ενέργειας (Zekuan Guo, 2024).

1.4.3 Τύποι αντιδραστήρων πυρηνικής ενέργειας

Θεμελιώδες κομμάτι της πυρηνικής ενέργειας αποτελούν οι πυρηνικοί αντιδραστήρες, οι εγκαταστάσεις όπου μέσω μιας περίπλοκης διαδικασίας και εξελιγμένης τεχνολογίας, η θερμότητα που εκλύεται από αντιδράσεις πυρηνικής σχάσης, χρησιμοποιείται για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, τα πυρηνικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν ελεγχόμενες αντιδράσεις πυρηνικής σχάσης για τη δημιουργία ατμού ο οποίος κινεί μια τουρμπίνα, για τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μηχανική. Η τουρμπίνα αποτελεί διασυνδεδεμένο σύστημα με τη γεννήτρια, καθώς μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική (Pablo Fernandez – Arias, 2020). Στον πυρήνα του αντιδραστήρα περιέχεται το σχάσιμο υλικό της πυρηνικής αντίδρασης – το πιο ευρέως διαδεδομένο είναι το ειδικά επεξεργασμένο ουράνιο – στη μορφή κεραμικών σφαιριδίων τοποθετημένων σε σφραγισμένους σωλήνες που ονομάζονται ράβδοι καυσίμου. Συνήθως, περισσότερες από 200 ομαδοποιημένες ράβδοι αποτελούν μονάδες καυσίμου και τοποθετούνται στο νερό που βρίσκεται εντός του πυρήνα του αντιδραστήρα και τις περιβάλλει, σκοπός της χρήσης τους είναι η απορρόφηση της περίσσειας νετρονίων κατά την αντίδραση της σχάσης για να αποφευχθεί μια ανεξέλεγκτη αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης (Office of Nuclear Energy, 2025). Κάθε αντιδραστήρας ανάλογα με την προβλεπόμενη ισχύ αποτελείται από κάποιες εκατοντάδες στοιχισμένες μονάδες καυσίμου. Το νερό έχει διπλή δράση καθώς χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο, που απορροφά τη θερμότητα που εκλύεται από την αντίδραση της πυρηνικής σχάσης όταν ένα άτομο ουρανίου συγκρούεται με ένα νετρόνιο. Η διάσπαση του σχάσιμου υλικού σε δύο μικρότερους πυρήνες απελευθερώνει νετρόνια, τα οποία στη συνέχεια προσβάλλουν γειτονικούς πυρήνες σχηματίζοντας με αυτόν τον τρόπο μια αλυσιδωτή αυτοσυντηρούμενη αντίδραση που για να ελεγχθεί απαιτεί επίσης την χρήση του νερού ως επιβραδυντή, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο στους επιστήμονες την ευκαιρία να διαχειριστούν και να σταθεροποιήσουν την ταχύτητα της αλυσιδωτής αντίδρασης. Κατά τη διάρκεια της αντίδρασης απελευθερώνονται τεράστια ποσά θερμότητας, και το νερό που εμπεριέχει τις ράβδους καυσίμου απορροφά τη θερμότητα τους μετατρέπεται με τρόπους που διαφέρουν ανά τύπο πυρηνικού αντιδραστήρα σε ατμό. Ο ατμός στη συνέχεια διοχετεύεται σε τουρμπίνες στις οποίες δρα ως κινητήρια δύναμη για τις λεπίδες, κατά τη περιστροφή η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική. Το σύστημα είναι κατά συνέχεια συνδεδεμένο με μια γεννήτρια στην οποία η εισερχόμενη μηχανική ενέργεια μετά τη διαδικασία της κίνησης του άξονά της και υπακούοντας στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής παράγει ηλεκτρική ενέργεια υψηλής τάσης (World Nuclear Association, 2022). Η λειτουργία ενός πυρηνικού αντιδραστήρα στηρίζεται στην ομαλή λειτουργία και συνεργασία πληθώρας μηχανισμών που φροντίζουν για την ασφαλή και παραγωγική διεξαγωγή της πυρηνικής σχάσης, την ορθή μεταφορά της ενέργειας μεταξύ των μηχανών, τη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων που παράγονται και τη διασφάλιση καταλλήλων τιμών των απαραίτητων μεγεθών της θερμοκρασίας και της πίεσης. Η συνδυασμένη γνώση του προσωπικού σε τομείς όπως η πυρηνική φυσική, η θερμοδυναμική και η μηχανική ρευστών διασφαλίζει την ορθή λειτουργία των πυρηνικών σταθμών.

Πυρηνικοί αντιδραστήρες

Τον 21^ο αιώνα, το 9% της ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως προέρχεται από πυρηνικούς σταθμούς, με χώρες όπως τις Ηνωμένες Πολιτείες, το Ηνωμένο Βασίλειο και την Ιαπωνία να επενδύουν στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών πυρηνικών

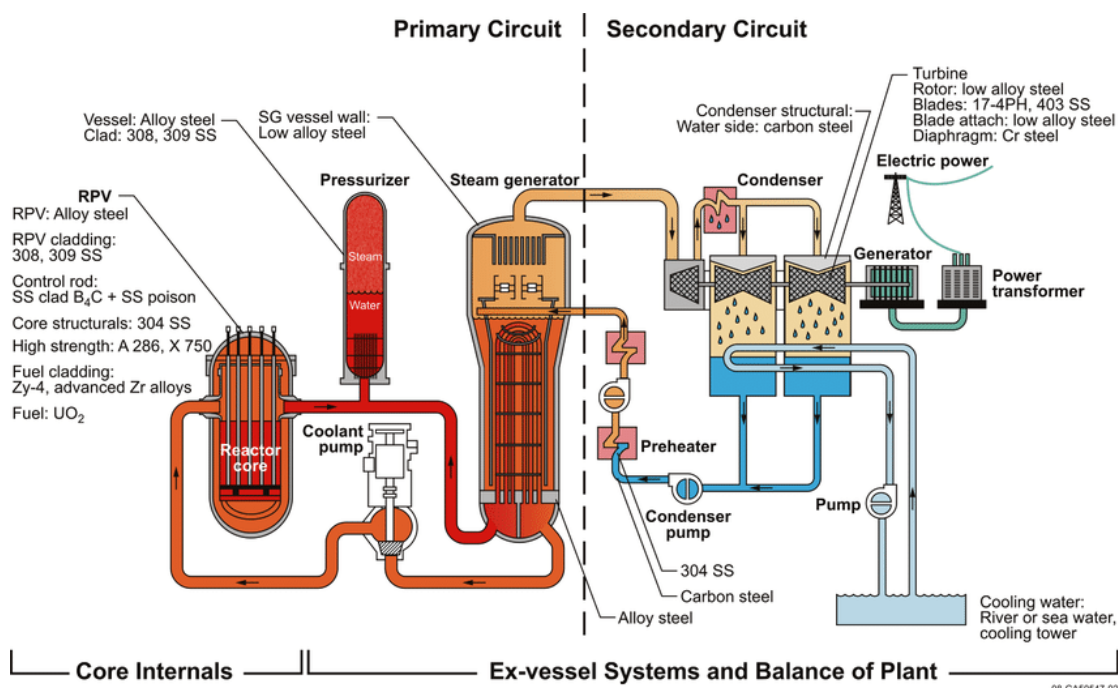
αντιδραστήρων (World Nuclear Association, 2025). Κυβερνητικά προγράμματα, όπως το Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear (GAIN) στις ΗΠΑ και το Advanced Modular Reactor (AMR) στο Ηνωμένο Βασίλειο, στηρίζουν ενεργά την εξέλιξη αυτών των τεχνολογιών, ενώ στην Ιαπωνία το πρόσφατο πυρηνικό ατύχημα της Φουκουσίμα το 2011 ώθησε τη χώρα στη προώθηση της έρευνας και της τεχνολογικής εξέλιξης, με σκοπό τη εξασφάλιση της ασφάλειας, της βιωσιμότητας και τη μείωση αποβλήτων της πυρηνικής ενέργειας. Απόρροια είναι η ύπαρξη πληθώρας πυρηνικών αντιδραστήρων που βασίζονται στο φυσικό φαινόμενο της πυρηνικής σχάσης, παρουσιάζουν όμως σημαντικές διαφορές στη δομή και τη λειτουργία, καθώς διαφοροποιούνται με βάση τη μορφή του καύσιμου υλικού και του ψυκτικού μέσου που χρησιμοποιείται για την επιβράδυνση της αντίδρασης της σχάσης.

Οι πιο ευρέως διαδεδομένοι τύποι πυρηνικού αντιδραστήρα μπορούν να καταχωρηθούν σε έξι βασικές κατηγορίες, τους αντιδραστήρες ψυχόμενους με νερό (water cooled reactors), τους αντιδραστήρες ψυχόμενους με αέριο (gas cooled reactors), τους γρήγορους αντιδραστήρες (fast reactors), τους αντιδραστήρες λιωμένου άλατος (molten salt reactors) και τέλος τους αντιδραστήρες SMR (World Nuclear Association, 2025). Οι αντιδραστήρες με ψυχόμενο νερό είναι το πιο διαδεδομένο είδος αντιδραστήρα που χρησιμοποιείται και αποτελούν το 95% των πολιτικών πυρηνικών αντιδραστήρων που λειτουργούν παγκοσμίως. Επιπλέον, η πλειονότητα των πυρηνικών αντιδραστήρων που βρίσκονται υπό ανάπτυξη ή κατασκευή βασίζονται επίσης στην ψύξη με νερό.

Οι αντιδραστήρες ψυχόμενου νερού χρησιμοποιούν το νερό ως ψυκτικό μέσο και επιβραδυντή των νετρονίων, το νερό είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο και απομάκρυνσης της θερμότητας από το σχάσιμο υλικό στον πυρήνα του αντιδραστήρα, καθώς στη συνέχεια μετατρέπεται σε ατμό που χρησιμοποιείται για να κινήσει τη συνδεδεμένη με γεννήτρια τουρμπίνα και να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Ανάλογα με τον τρόπο που χρησιμοποιείται το νερό οι αντιδραστήρες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWR – Light Water Reactors) και τους αντιδραστήρες βαρέου ύδατος (HBWR – Heavy Boiling Water Reactors), (Nuclear Energy Agency, 1989). Οι αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος, που επίσης χωρίζονται σε δύο είδη, τον Πυρηνικό Αντιδραστήρα Υπερπίεσης (PWR) και τον πυρηνικό Αντιδραστήρα Βρασμού (BWR), χρησιμοποιούν συνηθισμένο νερό για την ψύξη του σχάσιμου υλικού και η διαφορά τους παρουσιάζεται στον τρόπο διαχείρισης και μεταφοράς του νερού κατά τη διάρκεια της ατμοποίησης.

Ειδικότερα, στους Αντιδραστήρες Υπερπίεσης το νερό που έχει θερμανθεί από τη διαδικασία της σχάσης σε υψηλή θερμοκρασία υπό πίεση ώστε να μην βράζει, μεταφέρεται μέσω του πρωτεύον κλειστού κυκλώματος στον ατμοπαραγωγό. Οι σωλήνες περιβάλλονται από ένα δευτερεύον σύστημα σωληνώσεων όπου και μεταφέρεται η θερμότητα του πρώτου, χωρίς όμως να έρχονται σε επαφή ή να αναμιγνύονται τα περιεχόμενα των δύο συστημάτων. Αποτέλεσμα είναι το νερό του δευτερεύον κυκλώματος να εισέρχεται σε έναν ατμοπαραγωγό και να βράζει, μετατρέπεται με αυτόν τον τρόπο σε ατμό ο οποίος μεταφέρεται στις τουρμπίνες, τις

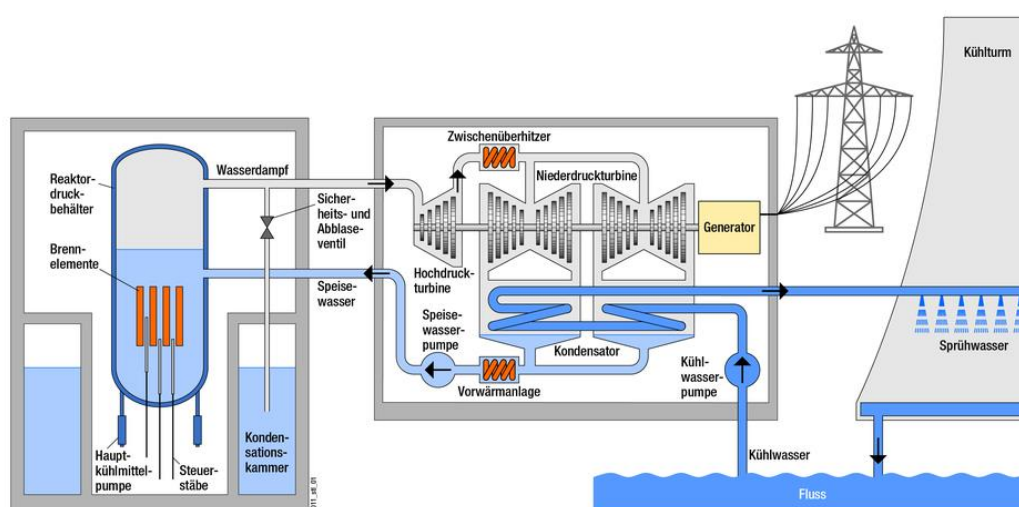
κινεί και παράγει μηχανική ενέργεια. Μετά τη περιστροφή της τουρμπίνας, ο θερμός ατμός εισέρχεται σε τρίτο κλειστό κύκλωμα και περνά πάνω από σωλήνες που περιέχουν κρύο νερό από εξωτερική πηγή (όπως ποτάμια, θάλασσα), υγροποιείται και επιστρέφει ξανά στον ατμοπαραγωγό. Το νερό που δρα ως ψυκτικό μέσο είναι κομμάτι ενός ανοιχτού κυκλώματος και επιστρέφει στην πηγή άντλησης (ποτάμι, θάλασσα, πύργος ψύξης), (Nuclear Information Center, 2012). Παρακάτω απεικονίζεται αναλυτικά ένας αντιδραστήρας υπερπίεσης.



Εικόνα 5 – Πυρηνικός Αντιδραστήρας Υπερπίεσης (Jeremy T. Busby, Randy Nanstad, 2010)

Σε αντίθεση, στους πυρηνικούς αντιδραστήρες βρασμού, η θερμότητα που απορροφά το κύριο σύστημα τροφοδότησης νερού από τη διαδικασία της σχάσης επαρκεί για να οδηγήσει το νερό σε θερμοκρασία βρασμού χωρίς την ανάγκη χρήσης συστήματος παραγωγής ατμού. Έχοντας μόνο δύο συστήματα νερού, σε αυτό το είδος αντιδραστήρα το μείγμα ατμού και νερού ανεβαίνει προς την κορυφή του αντιδραστήρα απορροφώντας θερμότητα και υποβάλλεται σε δύο στάδια διαχωρισμού υγρασίας. Πριν εισέλθει στη γραμμή μεταφοράς ατμού, αφαιρούνται από το μείγμα τα σταγονίδια νερού, ενώ στη συνέχεια μέσω της γραμμής μεταφοράς ο ατμός οδηγείται στον στρόβιλο ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τη γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Μετά τη κίνηση του στρόβιλου ο ατμός επιστρέφει στον συμπυκνωτή όπου με τη χρήση νερού ως ψυκτικό μέσο συμπυκνώνεται σε νερό (U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2023). Το νερό στη συνέχεια αντλείται με μια σειρά από αντλίες, θερμαίνεται ξανά και μέσω αντλίας τροφοδοτείται στον πυρήνα του αντιδραστήρα όπου η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Όπως και στον αντιδραστήρα υπερπίεσης, τα

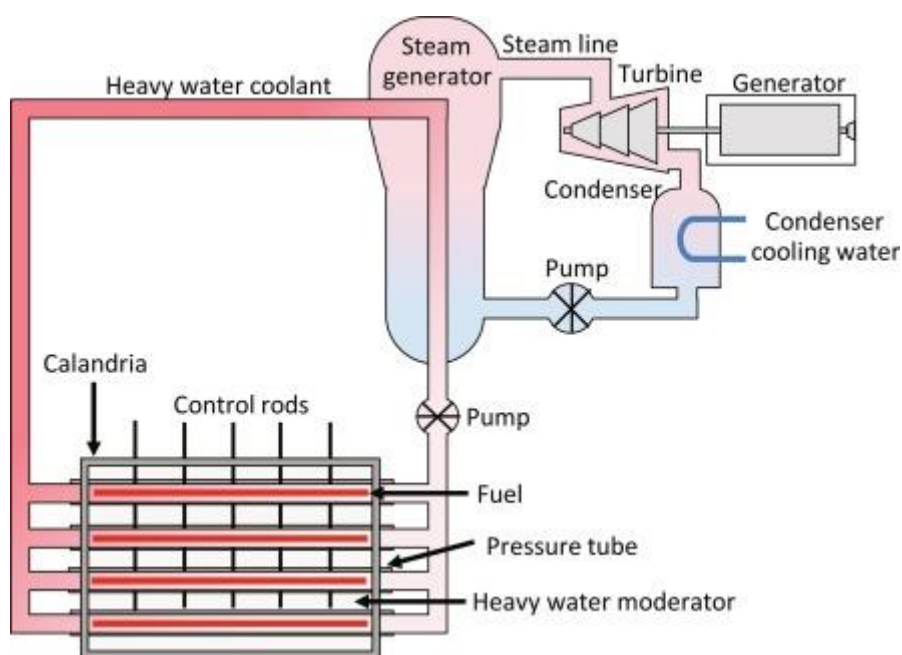
συστήματα διαχείρισης νερού δεν αναμειγνύονται.



Εικόνα 6– Πυρηνικός Αντιδραστήρας βρασμού (Federal Ministry for the Environment, Climate Action, Nature Conservation und Nuclear Safety)

Η άλλη υποκατηγορία αντιδραστήρα ψυχόμενου νερού, οι αντιδραστήρες βαρέου ύδατος (Heavy Water Reactors) παρουσιάζουν διαφορά στη σύσταση του νερού που χρησιμοποιείται. Το νερό που δρα ως ψυκτικό μέσο και επιβραδυντής είναι «εμπλουτισμένο», καθώς τα μόρια του υδρογόνου που εμπεριέχονται στο νερό περιέχουν περισσότερο από 99% δευτέριο, ένα βαρύτερο ισότοπο του υδρογόνου. Χάρη στη χρήση εμπλουτισμένου νερού, οι συγκεκριμένοι αντιδραστήρες έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν ως σχάσιμο υλικό μη επεξεργασμένο ουράνιο, γεγονός που διευκολύνει την υλοποίηση της διαδικασίας καθώς δεν χρήζει απαραίτητη η ειδική επεξεργασία του ορυκτού. Η εσωτερική διεργασία στον πυρήνα του αντιδραστήρα δε διαφέρει από τους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος, το νερό – κανονικό ή εμπλουτισμένο– θερμαίνεται από την αντίδραση της σχάσης, το νερό μεταφέρεται σε ένα δευτερεύον κύκλωμα νερού, όπως στους αντιδραστήρες υπερπίεσης, όπου μετατρέπεται σε ατμό και διοχετεύεται στην τουρμπίνα συνδεδεμένη με γεννήτρια. Μετά το πέρας της διαδικασίας, όπως και στους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος το νερό ανατροφοδοτείται στον πυρήνα του αντιδραστήρα όπου ακολουθεί την ίδια διαδρομή, αποτελώντας έτσι μια κυκλική διαδικασία. Η βασική διαφορά που παρουσιάζεται είναι το νερό που εργαλιολογείται και κατά συνέπεια, οι διαφορές που παρουσιάζονται στα κόστη κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης των αντιδραστήρων καθώς και στην ασφάλεια αυτών (IAEA, 2002). Λόγω της χρήσης βαρέου ύδατος αυτή η υποκατηγορία αντιδραστήρων παρουσιάζει αυξημένα κόστη προμήθειας και διαχείρισης του δυσεύρετου εμπλουτισμένου νερού, έχει όμως μεγαλύτερη αποδοτικότητα καθώς γίνεται καλύτερη οικονομία και διαχείριση νετρονίων, που οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα. Το πιο διαδεδομένο είδος αντιδραστήρα βαρέου ύδατος, οι αντιδραστήρες CANDU εφευρέθηκαν στον Καναδά

και χρησιμοποιούνται σε πολλές χώρες λόγω της ευελιξίας πρώτης ύλης ενέργειας, όπως ακατέργαστο ουράνιο, ειδικά σε χώρες που δεν έχουν ευχέρεια επεξεργασίας του καυσίμου.



Εικόνα 7 – Αντιδραστήρας Βαρέου ύδατος (Saeed A. Alameri, Ahmed,K. Alkaabi 2020)

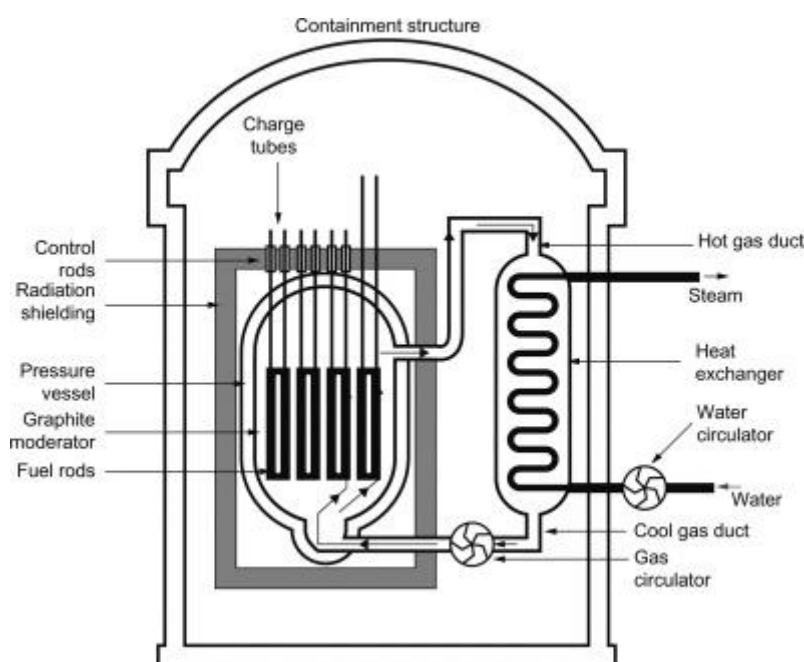
Οι ψυχόμενοι με αέριο αντιδραστήρες χρησιμοποιούνται εμπορικά μόνο στο Ηνωμένο Βασίλειο, και αποτελούν αρκετά μικρό ποσοστό της ολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, περίπου 3%, παρατηρείται όμως αύξηση του ενδιαφέροντος (IAEA, 2012) . Η βασική αρχή λειτουργίας αυτού του αντιδραστήρα είναι η χρήση ενός αερίου, όπως διοξείδιο του άνθρακα ή ήλιο ως ψυκτικό υγρό. Όπως και οι αντιδραστήρες βαρέου ύδατος, σκοπός είναι η χρήση φυσικού, ακατέργαστου ουρανίου. Μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο σε χώρες όπως η Γαλλία και η Αγγλία η ανάγκη εργαλιοποίησης του ουρανίου χωρίς επιπρόσθετη επεξεργασία οδήγησε την ανάπτυξη του σχεδίου του αντιδραστήρα με χρήση αερίου ως ψυκτικό υγρό. Στην αρχή, η πυρηνική διάσπαση στο εσωτερικό του πυρήνα παράγει θερμότητα. Αυτή η θερμότητα απορροφάται από το αέριο ψυκτικό μέσο, το οποίο κυκλοφορεί γύρω από τις ράβδους καυσίμου, και μεταφέρεται προς τον εξωτερικό κύκλο του αντιδραστήρα. Η θερμότητα έπειτα μεταφέρεται σε ένα δευτερεύον σύστημα, όπου το νερό θερμαίνεται και μετατρέπεται σε ατμό. Ο ατμός κινεί τουρμπίνες, οι οποίες συνδέονται με ηλεκτρογεννήτριες για την παραγωγή ενέργειας. Ο ατμός στη συνέχεια περνά από έναν συμπυκνωτή, όπου ψύχεται και επιστρέφει στον εναλλάκτη θερμότητας για να ξαναχρησιμοποιηθεί, συντηρώντας με αυτόν τον τρόπο τον κυκλικό χαρακτήρα του κυκλώματος (World Nuclear Association, 2025). Το Ηνωμένο Βασίλειο εξέλιξε, επένδυσε και καινοτόμησε στον τομέα αυτό της πυρηνικής ενέργειας καθώς παρουσίασε το πρώτο μοντέλο αντιδραστήρα ψυχόμενου με αέριο, τον αντιδραστήρα Magnox, που στη συνέχεια εξελίχθηκε σε ένα πιο σύγχρονο σχέδιο, τον Προηγμένο Αντιδραστήρα Ψυχρού Αερίου

(AGR - Advanced Gas-Cooled Reactor). Το πρώτο είδος αντιδραστήρα ψυχρού αερίου, ο αντιδραστήρας Magnox, που λειτούργησε στην Αγγλία και Σκωτία, με αποδοτικότητα 50MW με τροποποιήσεις και συγκεκριμένες αλλαγές για τη σωστή λειτουργία ανάλογα με ιδιαίτερες ανάγκες των αντιδραστήρων σε κάθε πυρηνικό εργοστάσιο η αποδοτικότητα αυξήθηκε στα 490 MW, στην Wylfa, μια πυρηνική εγκατάσταση στο νησί Anglesey της Ουαλίας. Οι αντιδραστήρες Magnox αντιμετώπιζαν περιορισμούς λόγω του κράματος μαγνησίου-αλουμινίου που χρησιμοποιούνταν στον πυρήνα του αντιδραστήρα για τη προστασία των ράβδων καυσίμου. Το κράμα είχε χαμηλή απορρόφηση νετρονίων και ήταν άκρως αποδοτικό και χρήσιμο για την εποχή του, χαρακτηριστικά όμως όπως η μεγάλη διάβρωση λόγω της επαφής με το νερό και η αντοχή του υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες, περιόριζαν την απόδοση και απαιτούσαν επαναεπεξεργασία του καυσίμου, γεγονός που οδήγησε στην εγκατάλειψη του μοντέλου (World Nuclear Association, 2025).

Ακολούθησε ο αντιδραστήρας AGR (Advanced Gas-cooled Reactor) καθώς ήταν μια δεύτερη γενιά αντιδραστήρα με γραφίτη ως μέσο διαμόρφωσης και διοξείδιο του άνθρακα ως ψυκτικό υγρό, που αναπτύχθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο. Ήταν εξέλιξη του Magnox, και είχε στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητας, δουλεύοντας σε υψηλότερες θερμοκρασίες, πιέσεις και με μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας στον πυρήνα του, προκειμένου να μειωθούν τα αρχικά κόστη και να βελτιωθεί η οικονομία του. Η βασική αλλαγή στον AGR ήταν η αντικατάσταση του καυσίμου και του καλύμματος των ράβδων καυσίμου του Magnox. Η αλλαγή αυτή απαιτούσε εμπλουτισμένο ουράνιο και τη χρήση ανοξείδωτου χάλυβα για τις ράβδους καυσίμου. Επίσης, η δυνατότητα να γίνει ανεφοδιασμός καυσίμου κατά τη διάρκεια λειτουργίας του αντιδραστήρα ήταν μία από τις καινοτομίες του. Η αποδοτικότητα του AGR ήταν του ποσοστού 42%, το αυξημένο όμως κόστος κατασκευής καθώς και το μηδαμινό ενδιαφέρον από χώρες του εξωτερικού, οδήγησε το Ηνωμένο Βασίλειο στην στροφή προς τη χρήση του Αμερικανικού σχεδίου αντιδραστήρα υπερπίεσης (PWR), (Erik Nonbel, 1996).

Ο Υψηλής Θερμοκρασίας Αντιδραστήρας Ψυχρού Αερίου (High-Temperature Gas-cooled Reactor) έχει χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας, μειώνοντας τον κίνδυνο υπερθέρμανσης και επιτρέποντας καλύτερη θερμική διαχείριση. Παρά τις προκλήσεις σε κλίμακα και κόστος, παραμένουν σημαντικοί στην πυρηνική ενέργεια, προσφέροντας ευελιξία και ασφάλεια, ειδικά για απομακρυσμένες περιοχές ή βιομηχανικές εφαρμογές (Jim Iwatsuki, 2021). Ο αντιδραστήρας HTGR χρησιμοποιεί τον γραφίτη ως μέσο επιβράδυνσης και ήλιο (He) ως ψυκτικό υγρό. Η σχεδίαση του περιλαμβάνει δύο βασικούς τύπους: Pebble-bed (Αντιδραστήρας κοίλων σφαιριδίων) και Prismatic HTGR (Πρισματικός αντιδραστήρας υψηλής θερμοκρασίας), με τη βασική διαφορά στη μορφή των καυσίμων (σβώλοι ή κυλινδρικοί σωλήνες). Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι σφαιρίδια ουρανίου σε μικρό μέγεθος, που ονομάζεται TRISO (τριστρωματικό) και προσφέρει ιδιαίτερα υψηλή αντοχή στην αύξηση της θερμοκρασίας αλλά και ασφάλεια (U.S. Department of Energy, 2015). Η θερμότητα από τη διάσπαση του καυσίμου αφαιρείται με τη ροή του ήλιου σε ένα κλειστό σύστημα κυκλικής ροής και κατευθύνεται προς τον θερμοδυναμικό κύκλο, όπου χρησιμοποιείται για να κινήσει έναν στροβίλο (σε κύκλο Brayton) ή να παράγει

ατμό για την κίνηση ενός ατμοστρόβιλου (σε κύκλο Rankine), όπου η μηχανική ενέργεια μέσω γεννήτριας μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Μετά την απόδοση της θερμότητας, το ψυχόμενο ήλιο επιστρέφει στον πυρήνα για να συνεχίσει τον κύκλο, διατηρώντας ένα κλειστό κύκλωμα. Το σύστημα αυτό προσφέρει παθητική ασφάλεια, καθώς η θερμότητα απομακρύνεται χωρίς την ανάγκη ενεργών συστημάτων και προσφέρει ευελιξία στην παραδοχή τόσο ηλεκτρικής ενέργειας όσο και θερμότητας. Η υψηλή θερμοδυναμική απόδοση, σε συνδυασμό με το μικρό μέγεθος των μονάδων, καθιστά τους HTGR ελκυστικούς για απομακρυσμένες και εκτός δικτύου εφαρμογές. Οι αντιδραστήρες ψυχρού αερίου παρουσιάζουν επίσης χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας, μειώνοντας τον κίνδυνο υπερθέρμανσης και επιτρέποντας καλύτερη θερμική διαχείριση. Το αυξημένο κόστος κατασκευής και η κλίμακα δεν αποτρέπουν την χρήση τους σε απομακρυσμένες ή βιομηχανικές περιοχές. Εκτός από τον HTGR, άλλοι σημαντικοί αεριοψυκτικοί αντιδραστήρες, όπως ο VHTR, που λειτουργεί σε ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες, και ο GT-MHR, που χρησιμοποιεί διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και αεριοστρόβιλο αξιοποιούν υψηλές θερμοκρασίες και αεριοψύξη για την παραγωγή ενέργειας και τη βιομηχανική χρήση, προσφέροντας ασφάλεια, αποδοτικότητα και ευελιξία.

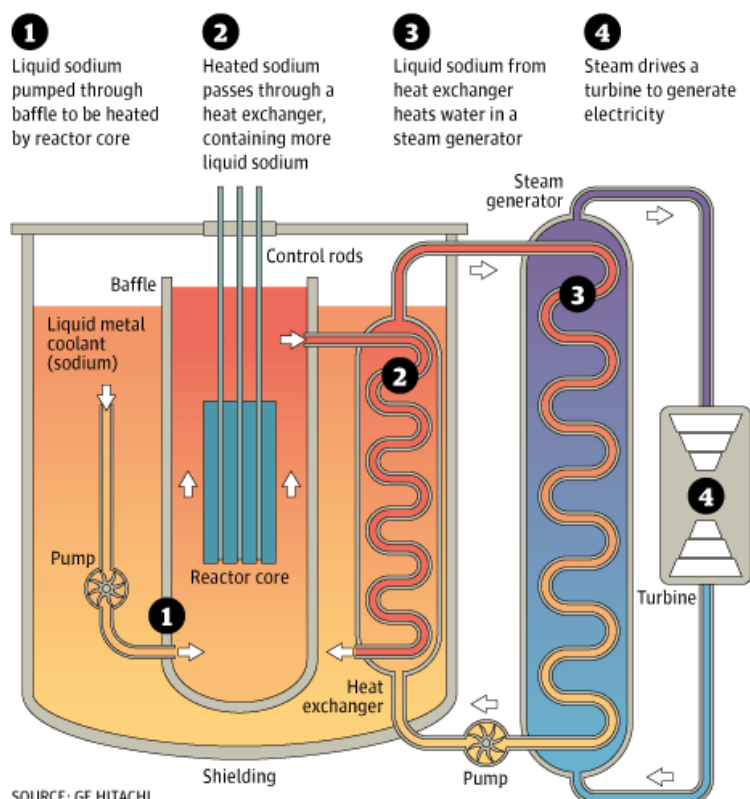


Εικόνα 8 – Αντιδραστήρας ψυχρού αερίου (Boris Kvizda et al, 2019)

Οι γρήγοροι πυρηνικοί αντιδραστήρες (Fast Neutron Reactors) λειτουργούν χρησιμοποιώντας γρήγορα νετρόνια, τα οποία διατηρούν την υψηλή τους ενέργεια χωρίς επιβραδυντές, επιτρέποντας τη σχάση πυρήνων όπως το πλουτώνιο-239 και την παραγωγή νέου σχάσιμου υλικού από το ουράνιο-238. Το καύσιμο, που περιλαμβάνει ουράνιο-238 και πλουτώνιο-239, βρίσκεται σε έναν συμπαγή πυρήνα, συχνά περιβαλλόμενο από ζώνη αναπαραγωγής για τη μετατροπή ουρανίου σε πλουτώνιο. Το ψυκτικό υγρό, όπως υγρό νάτριο ή μόλυβδος, δεν επηρεάζει την ταχύτητα των νετρονίων και μεταφέρει τη θερμότητα σε εναλλάκτες για την παραγωγή ατμού και ηλεκτρικής ενέργειας (World Nuclear Association, 2025). Η αλυσιδωτή αντίδραση

ελέγχεται μέσω ράβδων ελέγχου που απορροφούν νετρόνια, διασφαλίζοντας την ασφάλεια και τη σταθερότητα. Σε αντίθεση με τους θερμικούς αντιδραστήρες, οι γρήγοροι αντιδραστήρες δεν χρησιμοποιούν επιβραδυντές και επιτυγχάνουν έως και 60 φορές περισσότερη ενεργειακή απόδοση από το αρχικό ουράνιο. Παρά τη μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και το κόστος τους, είναι εξαιρετικά αποδοτικοί, μειώνουν τα πυρηνικά απόβλητα και μπορούν να παράγουν περισσότερο σχάσιμο υλικό από όσο καταναλώνουν (C. P Zaleski, 1998). Στην εικόνα 9 παρουσιάζεται αναλυτικά το εσωτερικό ενός γρήγορου πυρηνικού αντιδραστήρα.

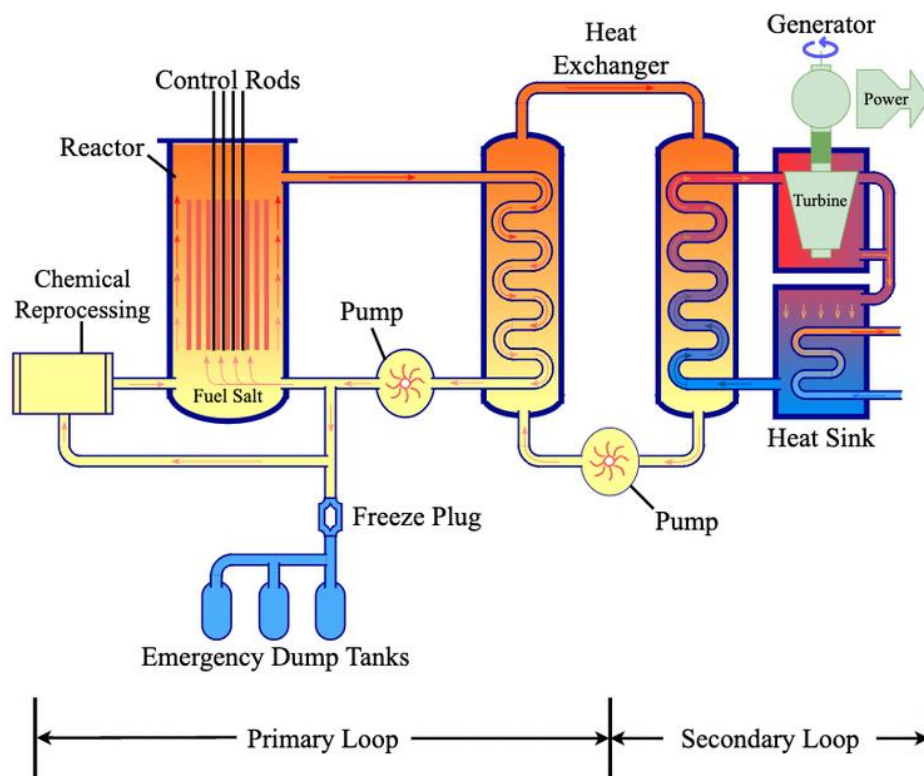
Inside a fast reactor



Εικόνα 9 – Γρήγορος πυρηνικός αντιδραστήρας (Nuclear Regulatory Commission, 2019)

Μια άλλη κατηγορία είναι οι αντιδραστήρες λιωμένου άλατος (Molten Salt Reactors ή MSRs), αρχικά αναπτυγμένοι τη δεκαετία του 1950, αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία λόγω της υψηλής αποδοτικότητας και της μειωμένης παραγωγής αποβλήτων. Λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, που αυξάνουν την αποδοτικότητα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και σε χαμηλές πιέσεις, μειώνοντας τον κίνδυνο ατυχημάτων. Δεν απαιτούν στερεό καύσιμο, εξαλείφοντας την ανάγκη παραγωγής και διάθεσής του, ενώ μπορούν να προσαρμοστούν σε ποικίλους κύκλους καυσίμου, επεκτείνοντας τους διαθέσιμους πόρους. Επιπλέον, μπορούν να σχεδιαστούν ως "καυστήρες" πυρηνικών αποβλήτων ή αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες, παρέχοντας υψηλή θερμότητα για την παραγωγή ηλεκτρισμού και άλλες εφαρμογές. Οι αντιδραστήρες λιωμένου άλατος λειτουργούν χρησιμοποιώντας λιωμένα άλατα είτε ως ψυκτικό είτε ως μέσο που περιέχει το καύσιμο, προσφέροντας έναν μοναδικό μηχανισμό λειτουργίας (David LeBlanc, 2010). Σε σχέδια με υγρά καύσιμα, το

καύσιμο, όπως το ουράνιο ή το θόριο, διαλύεται μέσα στο λιωμένο άλας, το οποίο κυκλοφορεί στον αντιδραστήρα. Σε άλλες περιπτώσεις, οι ράβδοι στερεού καυσίμου χρησιμοποιούνται παραδοσιακά, ενώ το λιωμένο άλας λειτουργεί αποκλειστικά ως ψυκτικό που αφαιρεί τη θερμότητα από τις ράβδους. Η πυρηνική σχάση παράγει θερμότητα, η οποία μεταφέρεται μέσω του λιωμένου άλατος σε έναν εναλλάκτη θερμότητας, όπου θερμαίνει έναν δεύτερο κύκλο, όπως νερό ή άλλο αέριο, για την παραγωγή ατμού. Ο ατμός στη συνέχεια κινεί μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Τα λιωμένα άλατα λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά χαμηλές πιέσεις, μειώνοντας τον κίνδυνο διαρροών ή εκρήξεων και βελτιώνοντας την ασφάλεια. Επίσης, η υγρή μορφή του καυσίμου επιτρέπει την απομάκρυνση προϊόντων σχάσης σε πραγματικό χρόνο, μειώνοντας τα πυρηνικά απόβλητα και αυξάνοντας την αποδοτικότητα. Επιπλέον, τα λιωμένα άλατα είναι θερμικά σταθερά και προσαρμόζονται σε διάφορους κύκλους καυσίμου, όπως τον θοριακό ή τον ουρανίου-πλουτωνίου, καθιστώντας τους MSR's εξαιρετικά αποδοτικούς, ευέλικτους και ασφαλείς. Σύμφωνα με την IAEA (2025) θεωρείται μια πολλά υποσχόμενη κατηγορία πυρηνικού αντιδραστήρα που θα συμβάλει σημαντικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο μέλλον, καθώς έχει πολλές προοπτικές εξέλιξης και βελτίωσης.



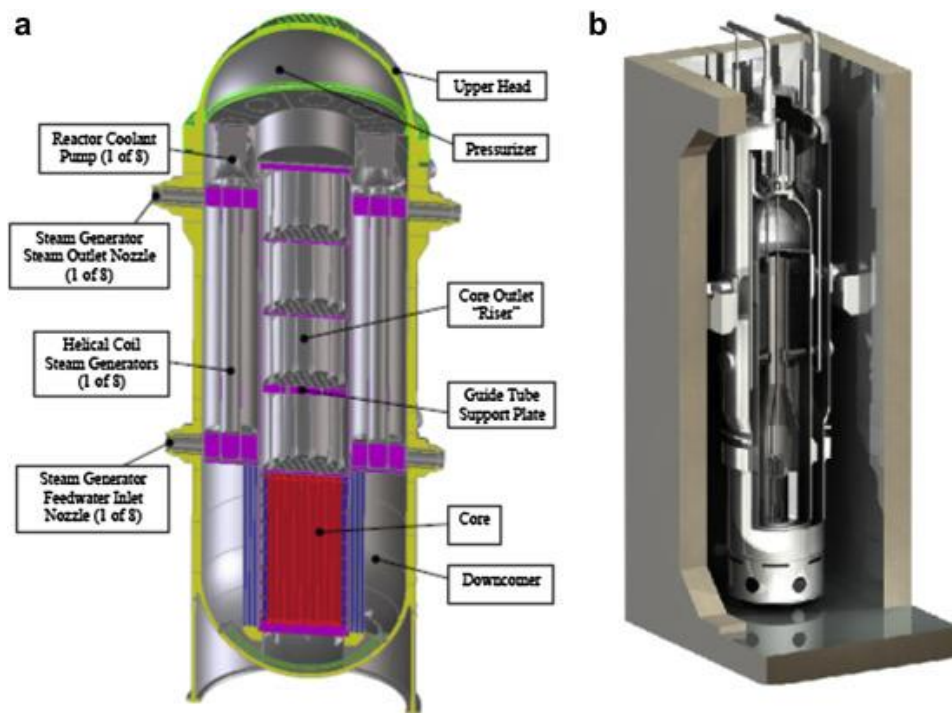
Εικόνα 10-Αντιδραστήρας λιωμένου άλατος (Yuling Wang et al, 2024)

Τέλος, οι μικροί πυρηνικοί αντιδραστήρες (Small Modular Reactors – SMRs) αποτελούν μια από τις βασικές κατηγορίες όπου κατατάσσονται οι πυρηνικοί αντιδραστήρες. Περιλαμβάνουν μονάδες που κατασκευάζονται και συναρμολογούνται σε εργοστάσιο, προσφέροντας διάφορες διαμορφώσεις και επίπεδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι περίπου 1/10 έως 1/4 του μεγέθους ενός παραδοσιακού

πυρηνικού εργοστασίου, με σχέδια που είναι πιο συμπαγή και απλοποιημένα, ενώ ενσωματώνουν προηγμένα συστήματα ασφαλείας (Idaho National Laboratory, 2025). Οι SMRs μπορούν να διαφέρουν σε μέγεθος ανάλογα με την επιλεγμένη διαμόρφωση ενώ η δομή τους επιτρέπει τη διαμόρφωση, συναρμολόγηση ή πρόσθεση επιπλέον τμημάτων στον αντιδραστήρα στο χώρο εγκατάστασής τους, εάν αυτό κριθεί απαραίτητο, μειώνοντας το κόστος και το χρόνο κατασκευής σε σύγκριση με τους συμβατικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες. Η σχεδιάσή τους επιτρέπει την ασφαλή λειτουργία τους χωρίς την ανάγκη πολύπλοκων συστημάτων ψύξης και κάνουν τη χρήση εξελιγμένων, αλλά απλών, συστημάτων ασφαλείας (Zhitao Liu, Jihong Fan, 2014).

Οι SMRs είναι ιδανικοί για περιοχές με περιορισμένη πρόσβαση σε ενέργεια, όπως απομακρυσμένες περιοχές ή στρατιωτικές βάσεις, ενώ μπορούν να συνδυαστούν με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Λόγω του μικρού τους μεγέθους, η παραγωγή ενέργειας μπορεί να επεκταθεί με την προσθήκη επιπλέον μονάδων. Συνήθως αποτελούν ένα προηγμένο είδος αντιδραστήρα νερού ή αερίου με σημαντικές μετατροπές ώστε να εξυπηρετεί πολύ συγκεκριμένες ανάγκες. Χρησιμοποιούν διαφορετικά ψυκτικά μέσα, όπως νερό ή αέριο, για τη μεταφορά θερμότητας και τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για βιομηχανική θερμότητα, αφαλάντωση και άλλες εφαρμογές και θεωρούνται άκρως σημαντικοί για το μέλλον της ενέργειας (IAEA, 2024).

Συνολικά, οι SMRs παρέχουν μια καινοτόμο λύση για την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας, με γρηγορότερους χρόνους κατασκευής, μικρότερο κόστος και μεγαλύτερη ασφάλεια, ευελιξία και οικονομικότητα σε σχέση με παραδοσιακούς αντιδραστήρες. Οι SMRs μπορεί να ανταποκριθούν καλύτερα σε αγορές με μικρότερα ενεργειακά δίκτυα, ενώ η συνδυασμένη ανάπτυξή τους με ανανεώσιμες πηγές θα μπορούσε να υποστηριχθεί στο πλαίσιο της κλιματικής ουδετερότητας (T. Murakami, 2021).



Εικόνα 11- Μικρός πυρηνικός αντιδραστήρας (University of California, 2016)

1.4.4 Πυρηνικοί Αντιδραστήρες Υποβρυχίων – Πλοίων

Ως πυρηνικό πλοίο και υποβρύχιο ορίζεται κάθε σκάφος και ναυς που χρησιμοποιεί την πυρηνική ενέργεια για να εκπληρώσει και να τροφοδοτήσει τις ενεργειακές ανάγκες των συστημάτων του (Britannica, 2025). Η ανάπτυξη της καινοτόμου για τη ναυτιλία τεχνολογίας ξεκίνησε τη δεκαετία του 1940, με το πρόγραμμα Nautilus, το οποίο έγινε το πρώτο πυρηνικό υποβρύχιο, ανοίγοντας το δρόμο για τη χρήση πυρηνικής ενέργειας στη ναυσιπλοΐα και προσφέροντας αόριστη διάρκεια υποβρύχιας λειτουργίας χωρίς την ανάγκη ανεφοδιασμού (Benjamin B. Weybrew, 1991). Το 1960, το USS Triton ολοκλήρωσε την πρώτη υποβρύχια περιήγηση γύρω από τον κόσμο, αποδεικνύοντας την ικανότητά του για παρατεταμένη υποθαλάσσια λειτουργία. Την ίδια χρονιά, το USS George Washington έγινε το πρώτο πυρηνικό υποβρύχιο με δυνατότητα εκτόξευσης βαλλιστικών πυραύλων, ενισχύοντας τη στρατηγική αποτροπή του Ψυχρού Πολέμου. Τα πυρηνικά υποβρύχια απέδειξαν τη σημασία τους σε πολλά κρίσιμα ιστορικά γεγονότα, όπως κατά τη διάρκεια της κρίσης των πυραύλων στην Κούβα το 1962, όπου η παρουσία των πυρηνικών υποβρυχίων διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην αποτροπή κλιμάκωσης της σύγκρουσης. Η δυνατότητά τους να παραμένουν σε υπόγεια κατάσταση για μεγάλες χρονικές περιόδους, χωρίς να εντοπίζονται, ήταν καθοριστική για τη διασφάλιση της στρατηγικής ισορροπίας των υπερδυνάμεων και απέτρεψε την άμεση στρατιωτική κλιμάκωση. Στη δεκαετία του 1970, η ανάπτυξη των πυρηνικών υποβρυχίων άρχισε να ελέγχεται μέσω διεθνών συμφωνιών, όπως η Συνθήκη για τη Μη Διάδοση Πυρηνικών Όπλων (NPT). Αργότερα, κατά την δεκαετία του 1980, το βρετανικό υποβρύχιο HMS Conqueror, χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες του πυρηνικού του κινητήρα, κατέστρεψε το αργεντίνικο θωρηκτό General Belgrano κατά τον πόλεμο των Φαλκλανδών, αποδεικνύοντας την τακτική αξία των πυρηνικών

υποβρυχίων και την ικανότητά τους να παρακολουθούν και να εξουδετερώνουν εχθρικές δυνάμεις χωρίς να ανιχνεύονται. Αυτό το επεισόδιο ανέδειξε την ικανότητα των πυρηνικών υποβρυχίων να εκτελούν ακριβείς στρατηγικές αποστολές ακόμα και σε περίοδο κρίσης, αποδεικνύοντας την αξία τους πέρα από την παραδοσιακή στρατηγική αποτροπής. Ανάλογες επιχειρησιακές αποδείξεις, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ανάγκη για στρατηγική αποτροπή κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου, εδραίωσαν τη θέση των πυρηνικών υποβρυχίων ως αναπόσπαστο τμήμα των ναυτικών δυνάμεων των ΗΠΑ, της Σοβιετικής Ένωσης και άλλων μεγάλων δυνάμεων, διασφαλίζοντας μια ισχυρή στρατηγική θέση και αποτρεπτική ικανότητα.

Κατά τις επόμενες δεκαετίες, τα πυρηνικά υποβρύχια εκσυγχρονίστηκαν, υιοθετώντας πιο αποδοτικούς αντιδραστήρες και ενισχύοντας τις δυνατότητές τους με νέα μοντέλα. Σήμερα, παραμένουν βασικό εργαλείο στις στρατιωτικές δυνάμεις χωρών όπως οι ΗΠΑ, η Ρωσία, η Κίνα, η Γαλλία και η Βρετανία, αποτελώντας κρίσιμο στοιχείο για τη στρατηγική άμυνα και αποτροπή (World Nuclear Association, 2025).

Τα πυρηνικά υποβρύχια και αεροπλανοφόρα λειτουργούν με πυρηνικούς αντιδραστήρες που βρίσκονται στο εσωτερικό τους. Στους αντιδραστήρες, η διαδικασία παραγωγής ενέργειας είναι η ίδια με τους χερσαίους σταθμούς παραγωγής ενέργειας, η διάσπαση ατόμων παράγει θερμότητα, η οποία χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ατμού υψηλής πίεσης. Το υποβρύχιο αντλεί θαλασσινό νερό και το καθαρίζει μέσω μιας διαδικασίας αφαλάτωσης. Ένα μέρος αυτού του καθαρού νερού χρησιμοποιείται για τη παραγωγή του απαραίτητου για τη διαδικασία ατμού αλλά και για πόση, για την παραγωγή οξυγόνου μέσω ηλεκτρόλυσης και για τον καθαρισμό του CO₂ ή άλλων ρύπων από τον αέρα. Ο ατμός αυτός κινεί τουρμπίνες προώθησης, οι οποίες δίνουν την απαραίτητη ισχύ για την περιστροφή της προπέλας κίνησης, ενώ άλλες τουρμπίνες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για το πλοίο. Καθώς ο ατμός ψύχεται και μετατρέπεται ξανά σε νερό, το νερό ανακυκλώνεται στο σύστημα, επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία (The Guardian, 2021). Οι ναυτικοί πυρηνικοί αντιδραστήρες, είναι κυρίως τύποι πίεσης νερού (PWR), οι οποίοι χρησιμοποιούν πολύ εμπλουτισμένο ουράνιο (συνήθως πάνω από 20% U-235). Αυτοί οι αντιδραστήρες μπορούν να παράγουν μεγάλη ισχύ από μικρούς όγκους και έχουν μακρά διάρκεια ζωής, απαιτώντας ανανέωση καυσίμου μόνο κάθε 10-50 χρόνια. Η θερμική απόδοση είναι μικρότερη σε σχέση με τους πολιτικούς αντιδραστήρες λόγω περιορισμένων χώρων και ανάγκης ευελιξίας στην παραγωγή ισχύος. Οι σύγχρονοι γαλλικοί αντιδραστήρες χρησιμοποιούν καύσιμο χαμηλού εμπλουτισμού (7,5% U-235) και η Γαλλία προχωρά σε αλλαγές στρατηγικής καυσίμου με το Barracuda-class υποβρύχιο να χρησιμοποιεί καύσιμο 5%. Οι ρωσικοί και αμερικανικοί στόλοι χρησιμοποιούν αντιδραστήρες PWR, ενώ άλλες χώρες όπως η Κίνα και η Γαλλία εισάγουν τις δικές τους καινοτομίες στον χώρο των πυρηνικών υποβρυχίων, με κοινή βάση τη χρήση της τεχνολογίας πυρηνικών αντιδραστήρων πίεσης.

Εσωτερικά, ο αντιδραστήρας είναι θωρακισμένος για την προστασία του πληρώματος από ακτινοβολία, ενώ η πρόσβαση σε αυτόν απαγορεύεται όσο είναι ενεργός και σε λειτουργία. Οι μηχανικοί του αντιδραστήρα φορούν ειδικές συσκευές που

παρακολουθούν τα επίπεδα ακτινοβολίας και ελέγχονται τακτικά. Επιπλέον, εφαρμόζουν αυστηρές διαδικασίες ασφαλείας, εργάζονται σε βάρδιες και προγραμματίζουν προσεκτικά τις δραστηριότητές τους για να μειώσουν την έκθεση στην ακτινοβολία. Οι δόσεις ακτινοβολίας που δέχονται τα πληρώματα των πυρηνικών πλοίων είναι πολύ χαμηλές, με το μέσο επίπεδο έκθεσης στις ΗΠΑ το 2013 να είναι 0,06 mSv ανά άτομο ετησίως (EPA, 2024).

Τα πυρηνικά υποβρύχια είναι σημαντικά για διάφορους λόγους, κυρίως λόγω των στρατηγικών και τακτικών τους πλεονεκτημάτων στον ναυτικό πόλεμο. Σε αντίθεση με τα υποβρύχια ντιζελ-ηλεκτρικά, που πρέπει να αναδύονται περιοδικά για να ανανεώσουν τις μπαταρίες τους, τα υποβρύχια που στηρίζονται στην πυρηνική ενέργεια για τη λειτουργία τους μπορούν να παραμένουν κάτω από το νερό για παρατεταμένες περιόδους, καθώς οι αντιδραστήρες τους δεν απαιτούν οξυγόνο. Αυτό τους επιτρέπει να λειτουργούν κάτω από την επιφάνεια του νερού επ' αόριστον. Η εισαγωγή των πυρηνικών υποβρυχίων έχει επαναστατήσει τον αντιυποβρυχιακό πόλεμο, καθιστώντας τα κύρια όπλα κατά των εχθρικών υποβρυχίων, και η ικανότητά τους να επιχειρούν κοντά σε βάσεις του αντιπάλου και να παραμένουν αδιάκριτοι τα καθιστά αναντικατάστατους στη ναυτική στρατηγική. Χώρες όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Ρωσία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Γαλλία, η Κίνα και η Ινδία διαθέτουν πυρηνικά υποβρύχια, επισημαίνοντας τη σημασία τους στην παγκόσμια ναυτική παρουσία και την εξασφάλιση της εθνικής ασφάλειας. Συνολικά, προσφέρουν απaráμιλλη αντοχή, μυστικότητα και στρατηγικά πλεονεκτήματα, καθιστώντας τους αναπόσπαστο κομμάτι των σύγχρονων ναυτικών δυνάμεων. Στο τέλος του Ψυχρού Πολέμου, το 1989, υπήρχαν πάνω από 400 πυρηνικά υποβρύχια σε λειτουργία ή υπό κατασκευή. Από αυτά, περισσότερα από 300 έχουν πλέον καταστραφεί ή ακυρωθεί λόγω των προγραμμάτων μείωσης των όπλων. Σήμερα, ο συνολικός αριθμός των πυρηνικών πολεμικών πλοίων είναι γύρω από 150, περιλαμβάνοντας και τα νέα που έχουν παραγγελθεί.

Η Ινδία, το 2009, λάνσαρε το πρώτο της πυρηνικό υποβρύχιο, το Arihant SSBN, το οποίο διαθέτει ισχυρό πυρηνικό αντιδραστήρα και προγραμματίζει να κατασκευάσει περισσότερα από την ίδια σειρά. Οι ΗΠΑ διατηρούν τον μεγαλύτερο στόλο από πυρηνικά αεροπλανοφόρα και υποβρύχια στον κόσμο, με πάνω από 6000 αντιδραστήρες και καμία αναφορά ατυχήματος από το 1950. Η Ρωσία έχει επίσης αποκτήσει σημαντική εμπειρία στη χρήση πυρηνικών αντιδραστήρων για τον ναυτικό της στόλο. Η Κίνα διαθέτει περίπου 12 πυρηνικά υποβρύχια και κατασκευάζει άλλα 21, ενώ η Γαλλία έχει ένα πυρηνικό αεροπλανοφόρο και 10 πυρηνικά υποβρύχια. Το Ηνωμένο Βασίλειο έχει 12 πυρηνικά υποβρύχια (World Nuclear Association, 2023).

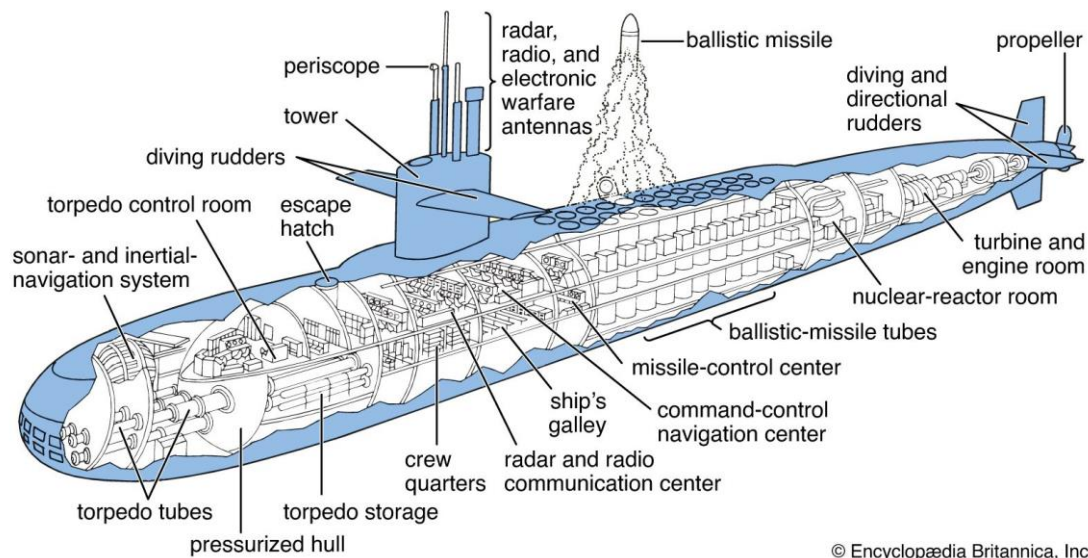
Τα πυρηνικά υποβρύχια και πυρηνικά πλοία έχουν αναδείξει ως σημαντικές και καινοτόμες τεχνολογίες με πολλές εφαρμογές που ξεπερνά τον κλάδο της πολεμικής βιομηχανίας και προσφέρει σημαντικές υπηρεσίες όπως η ηλεκτρική ενέργεια σε δύσβατες περιοχές. Τα πλωτά πυρηνικά εργοστάσια (Floating Nuclear Power Plants, ή FNPP) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί πυρηνικούς αντιδραστήρες

τοποθετημένους σε πλοία ή πλωτές πλατφόρμες για την παραγωγή ενέργειας, κυρίως σε απομακρυσμένες ή δύσκολα προσβάσιμες περιοχές. Αυτά τα εργοστάσια χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, όπως για την παροχή ενέργειας σε στρατιωτικές βάσεις, απομακρυσμένες κοινότητες, και έργα εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου (World Nuclear Association, 2025). Ένα από τα πιο γνωστά παραδείγματα είναι το πλωτό πυρηνικό εργοστάσιο MH-1A, το οποίο χρησιμοποίησε ένα παλιό αμερικανικό πλοίο του Β' Παγκοσμίου Πολέμου και παρείχε ενέργεια στην περιοχή της Διώρυγας του Παναμά από το 1967 έως το 1976.

Η σύνδεση αυτών των πλωτών πυρηνικών εργοστασίων με τα πυρηνικά υποβρύχια είναι κυρίως στην τεχνολογία των αντιδραστήρων. Τα πυρηνικά υποβρύχια χρησιμοποιούν συστήματα πυρηνικής ενέργειας για να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς να χρειάζονται ανεφοδιασμό καυσίμου, κάτι που είναι επίσης ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των πλωτών πυρηνικών εργοστασίων. Τα ρωσικά υποβρύχια, για παράδειγμα, έχουν χρησιμοποιήσει την τεχνολογία πυρηνικών αντιδραστήρων που εξελίχθηκε για υποβρύχια, και αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται επίσης σε πλωτά εργοστάσια.

Μελλοντικά τα πυρηνικά υποβρύχια αναμένεται να εξελιχθούν καθώς υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για βελτίωση των τεχνολογιών και αποδόσεών τους για πολεμική αλλά και για εμπορική χρήση. Οι μελλοντικές τεχνολογίες για τα πυρηνικά υποβρύχια εστιάζουν στην ενίσχυση της αόρατης ικανότητας, στη βελτίωση των συστημάτων προώθησης, καθώς και στην ανάπτυξη όπλων και αισθητήρων. Τα υποβρύχια του μέλλοντος αναμένεται να χρησιμοποιούν εξελιγμένα υλικά για μείωση της ανιχνευσιμότητάς τους, ενώ θα διαθέτουν πιο αθόρυβες συσκευές προώθησης, με πυρηνικούς αντιδραστήρες φυσικής κυκλοφορίας, οι οποίοι είναι πιο ήσυχοι από τους παραδοσιακούς. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες θα βελτιώνονται, προσφέροντας μεγαλύτερη αποδοτικότητα και μειώνοντας τα ηχητικά ίχνη τους. Τα συστήματα θα γίνουν πιο ακριβή και ευαίσθητα, ενώ θα αναπτυχθούν νέες μέθοδοι ανίχνευσης μέσω λέιζερ και υπέρυθρων ακτίνων. Τέλος, αναμένεται να έχουν δυνατότητες πυρηνικής προώθησης πλοίων σε μια προσπάθεια πράσινης μετάβασης του τομέα της ναυτιλίας. Η παγκόσμια εμπορική ναυτιλία, με συνολική ισχύ 410 GWt, αποτελεί το ένα τρίτο της ισχύος των πυρηνικών εργοστασίων παγκοσμίως και είναι υπεύθυνη για το 3% των εκπομπών CO₂, καταναλώνοντας σημαντικό ποσοστό της παγκόσμιας παραγωγής πετρελαίου. Το 2018, ο Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας (IMO) έθεσε τον στόχο να μειωθούν οι εκπομπές CO₂ από τη ναυτιλία κατά 50% έως το 2050. Η Ρωσία διαθέτει το μόνο πυρηνικό εμπορικό πλοίο και υπήρξαν πρωτοβουλίες για τη χρήση πυρηνικών αντιδραστήρων για την προώθηση εμπορικών πλοίων, όμως οι προσπάθειες αυτές απέτυχαν λόγω του ατυχήματος στη Φουκουσίμα. Παρόλα αυτά η ανάγκη ανάδειξης βιώσιμων λύσεων προς μια πιο πράσινη και κυκλική οικονομία θα ξανανοίξουν τις συζητήσεις για την επένδυση στη εξέλιξη της τεχνολογίας των πυρηνικών υποβρυχίων και πλοίων (World Nuclear Association, 2025). Τα βασικά κομμάτια ενός πυρηνικού υποβρυχίου παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα:

Basic parts of a ballistic-missile submarine



Εικόνα 12- Απεικόνιση της εσωτερικής δομής ενός πυρηνικού υποβρυχίου βαλλιστικών πυραύλων (Britannica, 2018)

1.5 Περιβαλλοντικός Αντίκτυπος της Πυρηνικής Ενέργειας

1.5.1 Διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων

Τα πυρηνικά απόβλητα είναι ακτινοβολούμενα υλικά χωρίς περαιτέρω χρήση, που περιέχουν ραδιονουκλίδια και εκπέμπουν ραδιενέργεια μέσω της ραδιοδιάσπασης (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2019). Μπορεί να βρίσκονται σε αέρια, υγρή ή στερεή μορφή και να ακτινοβολούν από λίγες ώρες έως εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια (IAEA, 2018). Η διαχείρισή τους είναι κρίσιμη για την προστασία της υγείας και του περιβάλλοντος, καθώς η ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες και μόλυνση για μεγάλες χρονικές περιόδους.

Τα ραδιενεργά απόβλητα προκύπτουν κυρίως από πυρηνικούς σταθμούς, αλλά και από ιατρική, γεωπονία και ερευνητικά εργαστήρια, και υπόκεινται σε διεθνείς κανονισμούς από οργανισμούς όπως η IAEA και η Ευρωπαϊκή Ένωση, που διασφαλίζουν αυστηρές δικλίδες ασφαλείας.

Τα απόβλητα κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την ακτινοβολία: υψηλού επιπέδου (High Level Waste), μεσαίου (Intermediate Level Waste) και χαμηλού επιπέδου (Low Level Waste). Τα HLW περιλαμβάνουν το χρησιμοποιημένο πυρηνικό καύσιμο, που παραμένει εξαιρετικά θερμό και ραδιενεργό, ενώ τα LLW προέρχονται από λειτουργίες αντιδραστήρων και άλλες εφαρμογές (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2019).

Το χρησιμοποιημένο καύσιμο αποτελείται από ουράνιο-235 σε μεταλλικές ράβδους, οι οποίες κατά τη χρήση παράγουν ραδιενεργά ισότοπα όπως καίσιο-137 και στροντίου-90, καθώς και πλουτόνιο που διατηρείται ραδιενεργό για χιλιάδες χρόνια. Τα HLW

αποτελούν μόνο το 3% του συνολικού όγκου αποβλήτων, αλλά περιέχουν το 95% της ραδιενέργειας, και η ασφαλής διαχείρισή τους είναι κρίσιμη για την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος (UNDRR, 2019). Παρά την ύπαρξη τεχνολογιών επανεπεξεργασίας, η εμπορική χρήση τους έχει διακοπεί, καθιστώντας τη διαχείριση και απόθεση των HLW ένα αμφιλεγόμενο ζήτημα.

Τα απόβλητα ενδιάμεσου επιπέδου (ILW) είναι πιο ραδιενεργά σε σχέση με τα απόβλητα χαμηλού επιπέδου (LLW), αλλά η θερμότητα που παράγουν ($<2 \text{ kW/m}^3$) δεν είναι αρκετή για να επηρεάσει το σχεδιασμό ή την επιλογή των εγκαταστάσεων αποθήκευσης και διάθεσης. Λόγω όμως των υψηλότερων επιπέδων ραδιενέργειας, απαιτείται κάποια θωράκιση για την ασφαλής διαχείρισή τους.

Τα ILW περιλαμβάνουν συνήθως ρητίνες, χημικές λάσπες και μεταλλικά περιβλήματα καυσίμου, καθώς και μολυσμένα υλικά από την απομάκρυνση πυρηνικών αντιδραστήρων. Μικρότερα αντικείμενα ή μη στερεά υλικά ενδέχεται να στερεοποιηθούν σε σκυρόδεμα ή πίσσα πριν την απόρριψή τους. Αντιπροσωπεύουν περίπου το 7% του συνολικού όγκου και το 4% της συνολικής ραδιενέργειας όλων των ραδιενεργών αποβλήτων.

Τα απόβλητα χαμηλού επιπέδου (LLW) περιλαμβάνουν αντικείμενα μολυσμένα με ραδιενέργεια ή ραδιενεργά λόγω έκθεσης σε νεutronιακή ακτινοβολία. Η ραδιενέργειά τους δεν υπερβαίνει τα 4 GBq/τόνο για ακτινοβολία άλφα ή τα 12 GBq/τόνο για βήτα-γάμμα, γι' αυτό δεν απαιτούν θωράκιση κατά τη διαχείριση και τη μεταφορά, και μπορούν να αποτίθενται σε επιφανειακές εγκαταστάσεις. Προέρχονται από νοσοκομεία, βιομηχανίες, γεωπονία και τον πυρηνικό κύκλο καυσίμου και περιλαμβάνουν υλικά όπως χαρτιά, ρούχα, φίλτρα κ.ά., που συνήθως αποσυντίθενται γρήγορα. Συχνά συμπίεζονται ή καίγονται για μείωση όγκου πριν απόρριψη. Αν και αποτελούν περίπου το 90% του όγκου των ραδιενεργών αποβλήτων, αντιπροσωπεύουν μόλις το 1% της συνολικής ραδιενέργειας (World Nuclear Association, 2022).

Η απόθεση ραδιενεργών αποβλήτων από πυρηνικούς αντιδραστήρες, στρατιωτική βιομηχανία και άλλες χρήσεις προκαλεί έντονες ανησυχίες και διχάζει την κοινή γνώμη λόγω του κινδύνου μόλυνσης ζωτικών πόρων όπως το νερό και η ατμόσφαιρα. Πυρηνικά ατυχήματα στο παρελθόν έχουν αναδείξει τη σοβαρότητα των συνεπειών, προκαλώντας φόβο και ανασφάλεια στους πολίτες. Ενδεικτικά, μια δημοσκόπηση που διεξήχθη το 2008 στην ΕΕ έδειξε ότι το 72% των πολιτών θεωρούσε πως δεν υπάρχει ασφαλής τρόπος διαχείρισης των υψηλού επιπέδου ραδιενεργών αποβλήτων. Ωστόσο, το 93% συμφώνησε ότι πρέπει να βρεθεί λύση άμεσα, χωρίς να μετατεθεί στις μελλοντικές γενιές (Ευρωπαϊκή Ένωση, 2008).

Το ζήτημα της απόθεσης πυρηνικών αποβλήτων παρουσιάζει περιβαλλοντικές, κοινωνικές και τεχνικές προκλήσεις, καθώς απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός λόγω της επικινδυνότητας της ακτινοβολίας, που παραμένει επιβλαβής όσο τα υλικά είναι ραδιενεργά. Το χρησιμοποιημένο ραδιενεργό υλικό αποθηκεύεται αρχικά υποβρύχια για χρόνια ή δεκαετίες ώστε να μειωθούν θερμότητα και ακτινοβολία, ενώ ακολούθως μπορεί να μεταφερθεί σε ξηρούς κάδους, είτε στον ίδιο τον αντιδραστήρα είτε σε

κεντρικές εγκαταστάσεις. Οι περισσότερες χώρες διατηρούν μεγάλες ποσότητες καυσίμου αποθηκευμένου στους χώρους των αντιδραστήρων.

Για μακροχρόνια απομόνωση, προτείνεται η υπόγεια ταφή σε γεωλογικά αποθετήρια (π.χ. γρανίτης, αργιλικό χώμα), μια ιδέα που υποστηρίζεται επιστημονικά από το 1957 και θεωρείται από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ ως η πιο ασφαλής και οικονομική μέθοδος διαχείρισης αποβλήτων υψηλού επιπέδου. Ωστόσο, τα αποθέματα παραμένουν ραδιενεργά για εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια και τα δοχεία στα οποία φυλάσσονται θα διαβρωθούν, αυξάνοντας τον κίνδυνο διαρροής ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον (World Nuclear Association, 2022).

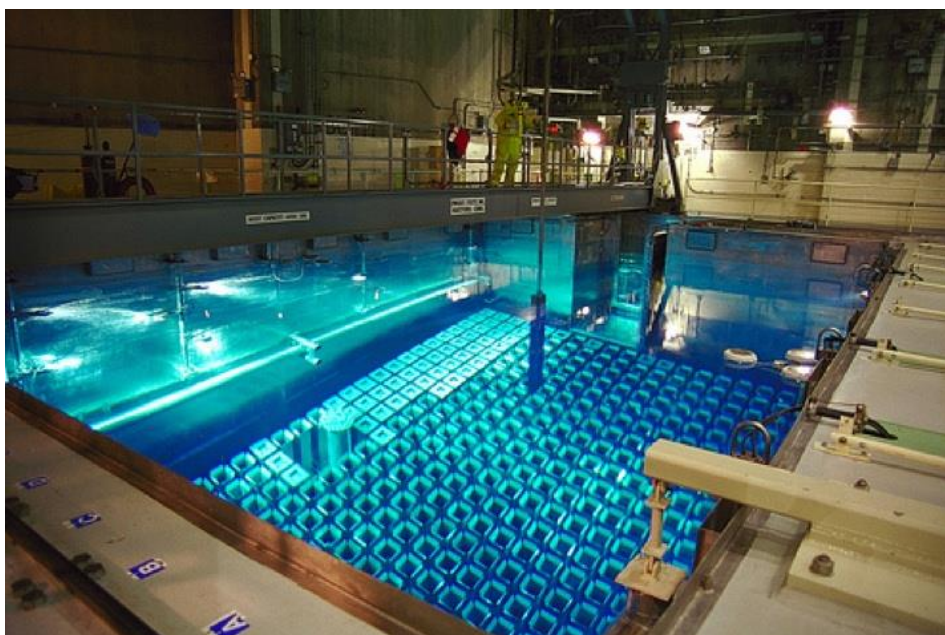
Παρά τις διαβεβαιώσεις οργανισμών όπως η Παγκόσμια Ένωση Πυρηνικής Ενέργειας για την ασφάλεια των τελικών μεθόδων απόθεσης, υπάρχει αβεβαιότητα λόγω έλλειψης εμπειρικών δεδομένων για τόσο μεγάλα χρονικά διαστήματα. Όπως επισημαίνεται, (M. V. Ramana, 2018), οι πιθανότητες αστοχίας λόγω ανθρώπινου λάθους και ανεπαρκούς σχεδιασμού, καθώς και η πολυπλοκότητα των αποθετηρίων, αυξάνουν τον κίνδυνο ατυχημάτων και μόλυνσης του φυσικού περιβάλλοντος. Παραδείγματα όπως το αποθετήριο Asse στη Γερμανία και το αμερικανικό WIPP, όπου σημειώθηκαν πλημμύρες και εκρήξεις αντίστοιχα, δείχνουν τις δυσκολίες στην πρόβλεψη και αποφυγή αποτυχιών σε μακροχρόνια κλίμακα. Ακαδημαϊκοί από το Πανεπιστήμιο του Stanford τονίζουν την πολυπλοκότητα της αξιολόγησης αποτυχιών για αποθετήρια που θα λειτουργούν για χιλιετίες, ενώ τα πρώτα προβλήματα έχουν ήδη εμφανιστεί σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Η εκτίμηση της συμπεριφοράς των γεωλογικών αποθετηρίων για ραδιενεργά απόβλητα συνοδεύεται από σημαντικές αβεβαιότητες, καθώς πρόκειται για πολύπλοκα συστήματα που υφίστανται χημικές και φυσικές αλλαγές σε περιβάλλοντα που μεταβάλλονται δραματικά σε εξαιρετικά μεγάλα χρονικά διαστήματα. Παράγοντες όπως η κλιματική αλλαγή, η ηφαιστειακή δραστηριότητα και η εισροή νερού λόγω χημικών μεταβολών αυξάνουν την πολυπλοκότητα. Επιπλέον, τα ραδιενεργά απόβλητα παράγουν θερμότητα, που επηρεάζει τις ιδιότητες του αποθετηρίου, ενώ η διαδικασία τοποθέτησης προκαλεί ρωγμές και μετακινήσεις υδάτων. Υπάρχουν άγνωστες παράμετροι, όπως η επίδραση μικροβίων, και αβεβαιότητες σχετικά με τη μελλοντική ανθρώπινη συμπεριφορά και παρεμβάσεις. Οι εκτιμήσεις ασφάλειας βασίζονται σε εικασίες για συνθήκες χιλιάδων ετών, οπότε δεν μπορούν να θεωρηθούν απόλυτες (M. V. Ramana, 2018).

Παρόλα αυτά, οι σύγχρονες μέθοδοι απόθεσης πυρηνικών αποβλήτων στοχεύουν στην ασφαλή απομόνωση από το περιβάλλον και την ανθρώπινη δραστηριότητα, με την επεξεργασία να προσαρμόζεται ανάλογα με την ακτινοβολία, τη μορφή και την προέλευση των αποβλήτων. Οι βασικές μέθοδοι χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες: προσωρινή αποθήκευση, επιφανειακή απόθεση, χρήση γεωλογικών αποθετηρίων, μετατροπή και ανακύκλωση υλικού, και απόθεση σε υδάτινα σώματα (π.χ. ωκεανό), (Moeller Dietmar, Bielecki Rolf, 2011).

Η προσωρινή αποθήκευση αποτελεί μεταβατική μέθοδο διαχείρισης μέχρι την οριστική διάθεση και βασίζεται σε τεχνολογίες ψύξης και απομόνωσης με συνεχή παρακολούθηση για την αποφυγή διαρροών. Συνήθως εφαρμόζεται για απόβλητα με μικρότερο χρόνο ημιζωής και μπορεί να διαρκέσει από λίγα χρόνια έως δεκαετίες, ανάλογα με τον τύπο των αποβλήτων. Περιλαμβάνει υγρή αποθήκευση σε δεξαμενές νερού που λειτουργούν ως ψυκτικό μέσο και θωράκιση ακτινοβολίας, και ξηρή αποθήκευση σε ανθεκτικούς κάδους, κατάλληλη για ήδη ψυχθέντα απόβλητα. Αν και παρέχει χρόνο και ευελιξία στη μείωση της ραδιενέργειας, δεν είναι μόνιμη λύση και απαιτεί σταθερή συντήρηση και παρακολούθηση.

Η υγρή αποθήκευση (Spent fuel pools) αποτελεί προσωρινή λύση, όπου τα απόβλητα φυλάσσονται σε δεξαμενές γεμάτες με νερό. Σε αυτή τη περίπτωση το νερό καλύπτει δύο ανάγκες καθώς χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο για τη μείωση της θερμότητας που εκπέμπουν τα ραδιενεργά υλικά και αφετέρου ως φυσικό εμπόδιο, περιορίζοντας την ακτινοβολία που εκπέμπεται στο περιβάλλον. (Dr Melvin A, 2020). Οι δεξαμενές, όπως εκείνη της εικόνας 13, κατασκευάζονται από ανθεκτικά υλικά και παρακολουθούνται συνεχώς για λόγους ασφαλείας. Αυτή η μέθοδος ενδείκνυται για πρόσφατα απομακρυσμένα απόβλητα από αντιδραστήρες, που εξακολουθούν να εκπέμπουν υψηλή θερμότητα και ακτινοβολία. Παρόλα αυτά, η υγρή αποθήκευση θεωρείται προσωρινή, καθώς απαιτεί συνεχή επίβλεψη και δεν μπορεί να αποτελέσει μακροπρόθεσμη λύση.



Εικόνα 13- Δεξαμενή υγρής αποθήκευσης πυρηνικών αποβλήτων (IAEA, 2019)

Η ξηρή αποθήκευση σε κάδους (Dry casks storage) αποτελεί μέθοδο προσωρινής φύλαξης πυρηνικών αποβλήτων που έχουν ψυχθεί μέσω υγρής αποθήκευσης για τουλάχιστον έναν χρόνο. Τα απόβλητα τοποθετούνται σε ειδικούς κάδους από ατσάλι ή σκυρόδεμα, οι οποίοι περιέχουν αδρανές αέριο και παρέχουν προστασία από την ακτινοβολία, αποτρέποντας τη διαρροή ραδιενεργών υλικών. Οι κάδοι σφραγίζονται αεροστεγώς με συγκόλληση ή βίδες, εξασφαλίζοντας την ασφαλή συγκράτηση του

καυσίμου. Είναι σχεδιασμένοι να αντέχουν σε εξωτερικές συνθήκες και δεν απαιτούν νερό για ψύξη, γεγονός που απλοποιεί τη διαχείρισή τους. Συχνά φυλάσσονται κοντά σε πυρηνικούς αντιδραστήρες ή σε ειδικά σχεδιασμένες εγκαταστάσεις.

Τα συστήματα ξηρής αποθήκευσης παρουσιάζουν διάφορες εκδοχές: σε ορισμένα σχέδια, οι κύλινδροι τοποθετούνται κάθετα σε θαλάμους από σκυρόδεμα που προσφέρουν προστασία από ακτινοβολία, ενώ σε άλλα τοποθετούνται οριζόντια. Επιπλέον, σε μερικά μοντέλα οι ατσάλινοι κύλινδροι τοποθετούνται κάθετα σε βάσεις και προστατεύονται με μεταλλικά και εξωτερικά στρώματα (Stanford University, 2013). Παρότι η ξηρή αποθήκευση αποτελεί ασφαλή και ευέλικτη λύση, προορίζεται κυρίως για ενδιάμεση διαχείριση και δεν είναι μόνιμη, καθώς αναμένεται να αντικατασταθεί από πιο μακροπρόθεσμες λύσεις. Μια ενδεικτική εικόνα των κυλίνδρων ξηρής αποθήκευσης είναι η εικόνα 14, όπου αποθηκεύονται πυρηνικά απόβλητα με σκοπό την απομόνωση από το περιβάλλον.



Εικόνα 14-Ειδικό κάδο ξηρής απόθεσης πυρηνικών αποβλήτων (World Nuclear Association, 2019)

Η επιφανειακή απόθεση αφορά την εναπόθεση ραδιενεργών υλικών σε μικρό βάθος, συνήθως σε χώματα ή αμμώδη εδάφη, και εφαρμόζεται κυρίως σε απορρίμματα χαμηλής ραδιενέργειας (Dr. Shyama Prasad Mukherjee, 2020). Τα απόβλητα τοποθετούνται σε λάκκους και καλύπτονται με χώμα ή άλλα υλικά για απομόνωση και μείωση της ακτινοβολίας. Στην περίπτωση υλικών από ορυχεία, δημιουργούνται σωροί καλυμμένοι με μη διαπερατό υλικό όπως πηλός, ενώ απαιτείται συνεχής παρακολούθηση για αποφυγή μόλυνσης εδάφους και υδροφόρου ορίζοντα.

Η γεωλογική απόθεση αφορά την τοποθέτηση αποβλήτων σε βάθος μη προσβάσιμο στον άνθρωπο, κυρίως για απόβλητα υψηλού επιπέδου (Moeller, Dietmar, 2011). Απαιτείται κατάλληλη στερέωση και προστασία για αποφυγή διαρροών και αντοχή σε φυσικές καταστροφές, καθώς υπάρχει κίνδυνος μόλυνσης υδάτων και αμφιβολίες για τη μακροχρόνια σταθερότητα των αποβλήτων στο έδαφος. Οι μέθοδοι διάθεσης στοχεύουν στην ασφαλή διαχείριση όλων των κατηγοριών πυρηνικών αποβλήτων.

Low-Level Radioactive Waste Disposal



Εικόνα 15- Σχεδιάγραμμα των δομών και επιπέδων μιας βάσης ταφής πυρηνικών αποβλήτων (American Nuclear Society, 2022)

Η ανακύκλωση ραδιενεργού υλικού συνδέεται με τους αντιδραστήρες τέταρτης γενιάς, όπου το χρησιμοποιημένο καύσιμο και το εξαντλημένο ουράνιο γίνονται πηγή νέου καυσίμου, μειώνοντας την εξόρυξη ουρανίου (R Taylor, 2015). Η διαδικασία περιλαμβάνει ψύξη του καυσίμου, χημική επεξεργασία (PUREX) για διαχωρισμό πλουτωνίου και ουρανίου, που ανακυκλώνονται, ενώ τα υπόλοιπα απόβλητα αποθηκεύονται μακροπρόθεσμα. Περίπου το 30% από 400.000 τόνους χρησιμοποιημένου καυσίμου έχει ανακυκλωθεί.

Η απόθεση στον ωκεανό, που εφαρμόστηκε από τη δεκαετία του 1940 έως το 1970 για χαμηλής και μεσαίας ραδιενέργειας απόβλητα, σταμάτησε λόγω περιβαλλοντικών κινδύνων και διεθνών απαγορεύσεων (Calmet, 1989; Σύμβαση Λονδίνου, 1972). Εναλλακτικές προτάσεις όπως η απόθεση στο διάστημα ή σε βαθύ βυθό απορρίφθηκαν λόγω κόστους και κινδύνων, ενώ η μόνιμη υπέργεια αποθήκευση θεωρείται λιγότερο ασφαλής από τις υπόγειες ταφές.

Παρά τα τεχνικά και κοινωνικά εμπόδια στη διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων (Baverstock, 1996), η τεχνολογική πρόοδος προσφέρει ελπίδα για πιο ασφαλείς και βιώσιμες λύσεις στο μέλλον.

1.5.2. Πιθανές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

Η πυρηνική ενέργεια προσφέρει καθαρή και αποδοτική παραγωγή ηλεκτρισμού, μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και συμβάλλοντας στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, ενώ παράλληλα έχει σημαντικές εφαρμογές στην ιατρική (π.χ. απεικόνιση, θεραπείες καρκίνου). Ωστόσο, οι κίνδυνοι από ατυχήματα (Τσερνόμπιλ, Φουκουσίμα) και η πρόκληση περιβαλλοντικής μόλυνσης από τα πυρηνικά απόβλητα παραμένουν σοβαρές προκλήσεις. Επίσης, υπάρχει ανησυχία για τη σύνδεση της τεχνολογίας με τη διάδοση πυρηνικών όπλων. Η

ισορροπία μεταξύ οφελών και κινδύνων απαιτεί προσεκτική διαχείριση και τεχνολογική καινοτομία.

Η ιονίζουσα ακτινοβολία μελετάται από τις αρχές του 20ού αιώνα, με γνωστές βιολογικές επιπτώσεις, όπως καρκίνος και γενετικές βλάβες. Όλοι εκτιθέμεθα σε φυσική ραδιενέργεια και κοσμική ακτινοβολία, με μέση δόση περίπου 100 mrem ετησίως, ενώ η ανθρωπογενής έκθεση προέρχεται κυρίως από ιατρικές εφαρμογές. Η συμβολή της πυρηνικής ενέργειας στην ετήσια δόση είναι πολύ μικρή (0,15–4 mrem) και χαμηλότερη από τα όρια ασφαλείας. Οι βιολογικές βλάβες εμφανίζονται σε υψηλές δόσεις, ενώ σε χαμηλές δόσεις δεν ανιχνεύονται επιπτώσεις (A Hasegawa, 2015).

Η σχέση δόσης-αποτελέσματος στην καρκινογένεση και τις γενετικές μεταλλάξεις από ακτινοβολία δείχνει ότι η πιθανότητα εμφάνισης αυτών των επιδράσεων αυξάνεται με τη δόση, αλλά το είδος της βλάβης παραμένει το ίδιο, ανεξάρτητα από τη δόση (A Hasegawa, 2015). Από τη δεκαετία του 1950, η προστασία από χαμηλές δόσεις ακτινοβολίας αποτέλεσε προτεραιότητα λόγω του σοβαρού αντίκτυπου ακόμα και σπάνιων επιδράσεων.

Η βασική πηγή δεδομένων για την καρκινογένεση προέρχεται από τους επιζώντες των ατομικών βομβών στη Χιροσίμα και το Ναγκασάκι. Εκεί καταγράφηκε αύξηση της λευχαιμίας και άλλων καρκίνων, με λανθάνουσα περίοδο από 5 έως 30 χρόνια, ενώ οι επιπτώσεις ήταν πιο έντονες σε όσους εκτέθηκαν πριν τα 20 έτη. Τα δεδομένα δείχνουν αυξημένο κίνδυνο κυρίως για δόσεις άνω των 100 rad, χωρίς σαφή κατώφλι σε κάποιες περιπτώσεις (World Nuclear Association, 2024).

Επαγγελματικές μελέτες, όπως των ακτινολόγων, επιβεβαιώνουν την αύξηση κινδύνου λευχαιμίας πριν από το 1946, ενώ μετά την εφαρμογή κανόνων προστασίας η συχνότητα μειώθηκε σημαντικά. Οι καρκινογόνες επιδράσεις διαφέρουν ανάλογα με το είδος ιστών και την έκθεση, ενώ για χαμηλές δόσεις οι εκτιμήσεις κινδύνου είναι αβέβαιες λόγω στατιστικής αδυναμίας (M. Tubiana 2000).

Η γραμμική σχέση δόσης-επιπτώσεων παραμένει η πιο συντηρητική προσέγγιση στην εκτίμηση κινδύνου, αν και θεωρητικές και πειραματικές μελέτες δείχνουν πιθανώς μικρότερο κίνδυνο σε χαμηλές δόσεις (4-10 φορές χαμηλότερο). Η επίδραση της ακτινοβολίας μειώνεται όταν χορηγείται σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

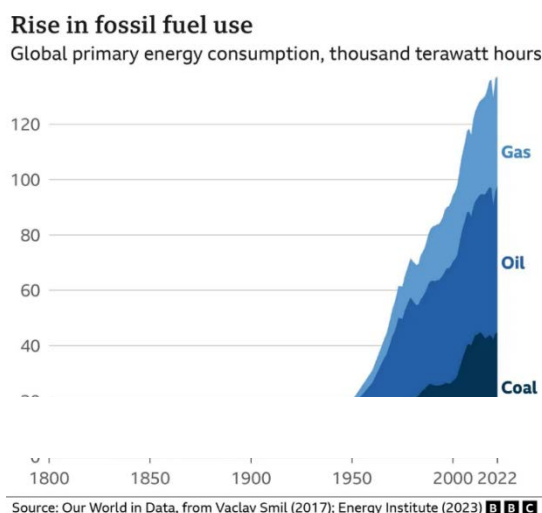
Σε ό,τι αφορά τις γενετικές βλάβες, ο κίνδυνος από ακτινοβολία είναι μικρότερος από όσο πιστευόταν, καθώς μηχανισμοί του οργανισμού αποβάλλουν τα περισσότερα έμβρυα με σοβαρές ανωμαλίες. Ο συνολικός κίνδυνος καρκίνου και γενετικών ελαττωμάτων είναι σχετικά χαμηλός ($1,3 \times 10^{-4}$ ανά rem). Για παράδειγμα, στη Γαλλία οι θάνατοι από ακτινοβολία στον πυρηνικό τομέα είναι πολύ λίγοι συγκριτικά με άλλους παράγοντες (καπνίσμα, γενικό καρκίνο).

Παρότι οι κίνδυνοι από ατυχήματα πυρηνικής ενέργειας μπορεί να αυξηθούν, αυτά είναι σπάνια και τα μέτρα ασφαλείας αυστηρά. Συνολικά, η πυρηνική ενέργεια έχει χαμηλότερους κινδύνους σε σχέση με άλλες μορφές παραγωγής ενέργειας, παρά την αρνητική αντίληψη του κοινού λόγω της φύσης της (A Hasegawa, 2015).

2 Συμβατικές Τεχνολογίες Παραγωγής Ενέργειας

2.1 Καύση άνθρακα και λιγνίτη

(Περιγραφή, χρήση και κατανομή σε σχέση με τις υπόλοιπες συμβατικές τεχνικές.) Τα ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας, το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο, αποτελούν εδώ και αιώνες τον βασικό πυλώνα της παγκόσμιας ενεργειακής παραγωγής. Από τη Βιομηχανική Επανάσταση μέχρι σήμερα, έχουν διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην οικονομική ανάπτυξη, την τεχνολογική πρόοδο και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής. Η χρήση τους έχει επιτρέψει τη λειτουργία βιομηχανιών, τη θέρμανση των σπιτιών, τη μετακίνηση ανθρώπων και αγαθών, καθώς και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με την εικόνα 16 για αρκετές δεκαετίες παρατηρείται συνεχής αύξηση της χρήσης ορυκτών καυσίμων



Εικόνα 16 – Διακύμανση της χρήσης ορυκτών καυσίμων από τη Βιομηχανική Επανάσταση έως σήμερα (BBC, 2024)

Τα ορυκτά καύσιμα προέρχονται από οργανική ύλη όπως φυτά και μικροοργανισμούς που, θαμμένα κάτω από τη γη για εκατομμύρια χρόνια, υπό την επίδραση θερμοκρασίας και πίεσης χωρίς οξυγόνο μετατράπηκαν σε πηγές ενέργειας. Οι τρεις βασικές κατηγορίες στον τομέα της ενέργειας είναι ο άνθρακας (λιγνίτης και ανθρακίτης), το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, που χρησιμοποιούνται κυρίως στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τη θέρμανση και τις μεταφορές (National Geographic, 2025).

Ο άνθρακας είναι ιζηματογενές πέτρωμα, εύφλεκτο, με σκοτεινό χρώμα και περιεκτικότητα άνω του 50% σε άνθρακα κατά βάρος. Δημιουργείται από φυτικά υπολείμματα που συμπίεστηκαν και μετασχηματίστηκαν χημικά και θερμικά. Βρίσκεται σε περιοχές με προϊστορικά δάση και έλη και εξορύσσεται σε όλο τον κόσμο,

αν και η εξόρυξή του δεν είναι πάντα οικονομικά βιώσιμη. Η μαζική χρήση του άνθρακα ξεκίνησε στη βιομηχανική επανάσταση και παραμένει σημαντική έως σήμερα (USGS, 2024).

Εξόρυξη άνθρακα

Η υπόγεια εξόρυξη άνθρακα γίνεται κυρίως με τις μεθόδους δωματίου-πυλώνα, όπου δημιουργούνται δωμάτια αφήνοντας στήλες άνθρακα για στήριξη της οροφής, και μακροτοίχισης (longwall mining), που επιτρέπει την ελεγχόμενη καθίζηση του εδάφους με υδραυλικές υποστηρίξεις. Τα πετρώματα απόβλητα συχνά αποτίθενται στο κενό για μείωση της καθίζησης (Stanley R. Michalski, 2011).

2.2 Καύση πετρελαίου

Το πετρέλαιο (oil) είναι ένα μείγμα υδρογονανθράκων, που σε συνδυασμό με άλλες υγρές ουσίες και μετά από ειδική επεξεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο υλικό για την παραγωγή ενέργειας, τη τροφοδότηση μεταφορικών μέσων (κηροζίνη), τη θέρμανση και για βιομηχανική χρήση (Kathleen J. Hancock, 2020). Τον 19ο αιώνα ξεκίνησε η σύγχρονη πετρελαϊκή βιομηχανία (National Geographic, 2024), ενώ η Βιομηχανική Επανάσταση σε συνδυασμό και με την εφεύρεση του αυτοκινήτου, οδήγησαν σε ραγδαία αύξηση της ζήτησης. Το αργό πετρέλαιο βρίσκεται υπόγεια υπό πίεση και συχνά περιέχει φυσικό αέριο και νερό. Μετά τον διαχωρισμό, αποθηκεύεται σε ειδικές δεξαμενές. Η μεταφορά του γίνεται μέσω αγωγών, βυτιοφόρων, σιδηροδρομικών βαγονιών και δεξαμενόπλοιων (Britannica Dictionary, 2025). Σήμερα, το πετρέλαιο αποτελεί βασική πηγή ενέργειας και χρησιμοποιείται σε καθημερινά προϊόντα, όπως καύσιμα, πλαστικά, καλλυντικά και ιατρικά είδη. Η παραγωγή και κατανάλωση πετρελαίου είναι τεράστια, επηρεάζοντας την παγκόσμια οικονομία και την απασχόληση.

Εξόρυξη πετρελαίου

Η μεγαλύτερη ποσότητα πετρελαίου συγκεντρώνεται σε ένα κοίτασμα, όμως μόνο ένα μέρος του μπορεί να εξαχθεί και να επεξεργαστεί, γνωστό ως πετρελαϊκά αποθέματα. Η γεώτρηση μπορεί να είναι αναπτυξιακή (σε ήδη γνωστά κοιτάσματα), ερευνητική (σε άγνωστες περιοχές με υψηλό ρίσκο) ή κατευθυνόμενη (με αλλαγή γωνίας του τρυπανιού για πρόσβαση σε επιπλέον πόρους). Οι γεωτρήσεις γίνονται με εξέδρες γεώτρησης στη στεριά και πλατφόρμες στη θάλασσα. Ανάλογα με το κοίτασμα, χρησιμοποιούνται διάφορες αντλίες, όπως υποβρύχιες και αντλίες αέρα για την άντληση πετρελαίου (International Journal of Engineering Technology and Sciences, 2022).

2.3 Καύση φυσικού αερίου

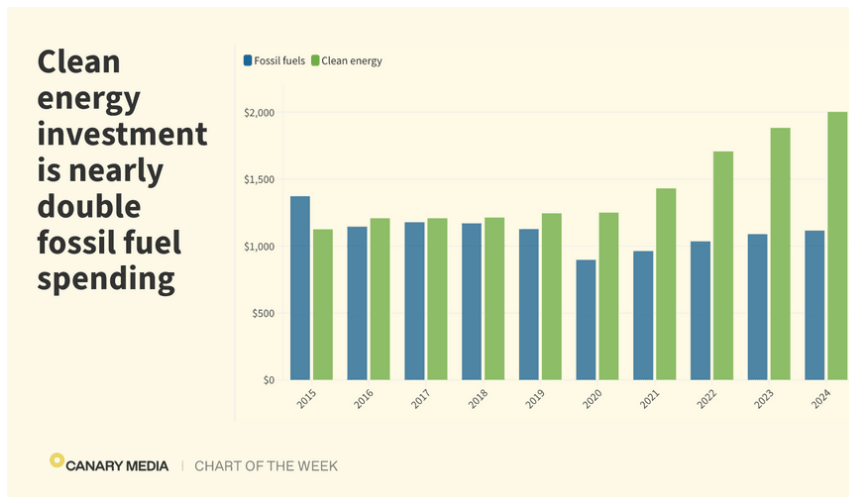
Το φυσικό αέριο (natural gas) είναι ένα ορυκτό καύσιμο, κυρίως μεθάνιο, που περιέχει και άλλα αέρια. Χρησιμοποιείται πρωτίστως για θέρμανση, παραγωγή ηλεκτρικής

ενέργειας και ως πρώτη ύλη στη βιομηχανία. Θεωρείται πιο καθαρή μορφή ενέργειας σε σχέση με τον άνθρακα και το πετρέλαιο. Παράγεται από κοιτάσματα, τα οποία διακρίνονται σε συμβατικό και μη συμβατικό. Αρχικά, το φυσικό αέριο χρησιμοποιούνταν κυρίως για φωτισμό, αλλά η εφεύρεση του λύχνου Bunsen το 1885 άνοιξε νέες δυνατότητες χρήσης. Με την ανάπτυξη αγωγών τον 20ό αιώνα, η χρήση του επεκτάθηκε σε θέρμανση, βιομηχανικές εφαρμογές και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (National Geographic, 2023). Το φυσικό αέριο καλύπτει το 22% της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης και σχεδόν το ένα τέταρτο της ηλεκτροπαραγωγής, ενώ αποτελεί και βασική πρώτη ύλη για τη βιομηχανία. Η ευελιξία του ως καύσιμο, σε συνδυασμό με τα συγκριτικά περιβαλλοντικά του πλεονεκτήματα έναντι άλλων ορυκτών καυσίμων, συμβάλλει στην αυξανόμενη χρήση του, ιδιαίτερα λόγω των χαμηλότερων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και της θετικής του επίδρασης στην ποιότητα του αέρα (Palash Panja, 2022).

Εξόρυξη φυσικού αερίου

Οι μέθοδοι εξερεύνησης του φυσικού αερίου βασίζονται κυρίως στην προέλευσή του, η οποία μπορεί να οφείλεται σε θερμογενείς, βιογενείς ή άλλες διεργασίες. Για τον προσδιορισμό της προέλευσης του φυσικού αερίου, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές οι οποίες κατηγοριοποιούν το προϊόν ανάλογα με τη χημική του σύσταση, δομή και περιεκτικότητα. Η επεξεργασία του φυσικού αερίου περιλαμβάνει τον διαχωρισμό πολύτιμων συστατικών, την απομάκρυνση ανεπιθύμητων στοιχείων και την υγροποίησή του για μεταφορά ή αποθήκευση (National Geographic, 2023). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται εξαρτώνται από τη σύσταση του αερίου και τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Οι διαδικασίες αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν απορρόφηση, προσρόφηση ή βιολογικές διεργασίες. Επιπλέον, τα απομακρυνόμενα συστατικά μπορούν να ανακτηθούν και να αξιοποιηθούν, παράγοντας χρήσιμα υλικά, όπως υγρό φυσικό αέριο, θείο, υδρογόνο και ήλιο. Το φυσικό αέριο αποτελεί το πιο φιλικό προς το περιβάλλον ορυκτό καύσιμο καθώς η εξόρυξη επεξεργασία και χρήση του απελευθερώνει το μικρότερο ποσοστό διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (Faramawy, S. , 2016).

Στο παρελθόν, τα ορυκτά καύσιμα, όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας και το φυσικό αέριο, αποτελούσαν θεμελιώδη αγαθά της κοινωνίας, ως βασική πηγή ενέργειας για τη βιομηχανία, τις μεταφορές και την καθημερινή ζωή. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου, οι επιπτώσεις της μαζικής χρήσης τους αναδείχθηκαν, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα συνέβαλαν σημαντικά στην υπερθέρμανση του πλανήτη και καθώς η κλιματική κρίση αποτελεί μια από τις κυριότερες απειλές του σύγχρονου κόσμου, ο περιορισμός της χρήσης τους κρίνεται αναγκαίος. Σήμερα, τα ορυκτά καύσιμα συνεχίζουν να αποτελούν σημαντικό κομμάτι της παγκόσμιας οικονομίας, με τις συνέπειές τους όμως να είναι εμφανής, η τεχνολογία αναζητά πιθανές εναλλακτικές επιλογές σε πιο βιώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική, που θεωρούνται πιο φιλικές προς το περιβάλλον.



- *Εικόνα 17 – Ανάλυση της σχέσης μεταξύ της χρήσης καθαρών και συμβατικών πηγών ενέργειας, παρατηρείται σταδιακή αύξηση της χρήσης ΑΠΕ και σταθεροποίηση της χρήσης ορυκτών καυσίμων (Val Hyginus Udoka Eze et al, 2023)*

2.4 Ιστορική και Παρούσα κατανομή των τεχνολογιών παραγωγής Ενέργειας

2.4.1 Ιστορική εξέλιξη

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ορίζονται ως εκείνες που μπορούν να αναπληρωθούν, να αναπαραχθούν και να αποκατασταθούν, χωρίς να εξαντλούνται με τη χρήση τους. Η παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω της συλλογής διαφόρων μορφών ενέργειας από ποικίλες πηγές, όπως η ηλιακή, η αιολική, η βιομάζα, η υδροηλεκτρική, η γεωθερμική και η παλιρροϊκή. Η ενέργεια αυτή μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί άμεσα είτε να αποθηκευτεί σε μπαταρίες.

Για την κατανόηση της ιστορικής εξέλιξης της κατανομής των πηγών ενέργειας, διακρίνονται τρεις βασικές περίοδοι, η Προ Βιομηχανικής Επανάστασης, η Πρώτη και Δεύτερη Βιομηχανική Επανάσταση και τέλος η περίοδο από τις αρχές του 20ού αιώνα έως σήμερα.

Προ Βιομηχανικής Επανάστασης

Από την αρχαιότητα έως και τον 17^ο αιώνα, η ανανεώσιμη ενέργεια- κυρίως ηλιακή ακτινοβολία, αιολική και υδροηλεκτρική – ήταν η βασική πηγή ενέργειας. Το ξύλο κυριάρχησε για χιλιετίες, ενώ ζώα χρησιμοποιούνταν για εργασία και μικρές ποσότητες πετρελαίου για ειδικές χρήσεις. Ο άνθρακας εξορύχθηκε πρώιμα σε Κίνα και Ευρώπη, αλλά περιορίστηκε από το κόστος μεταφοράς. Η Ολλανδία τον 17^ο αιώνα ήταν η πρώτη χώρα όπου ορυκτό καύσιμο (τύρφη) αντικατέστησε το ξύλο. Στην αναγέννηση αναπτύχθηκαν τεχνολογίες αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας (Bent Sorensen, 1991).

Πρώτη Βιομηχανική Επανάσταση (1750-1830)

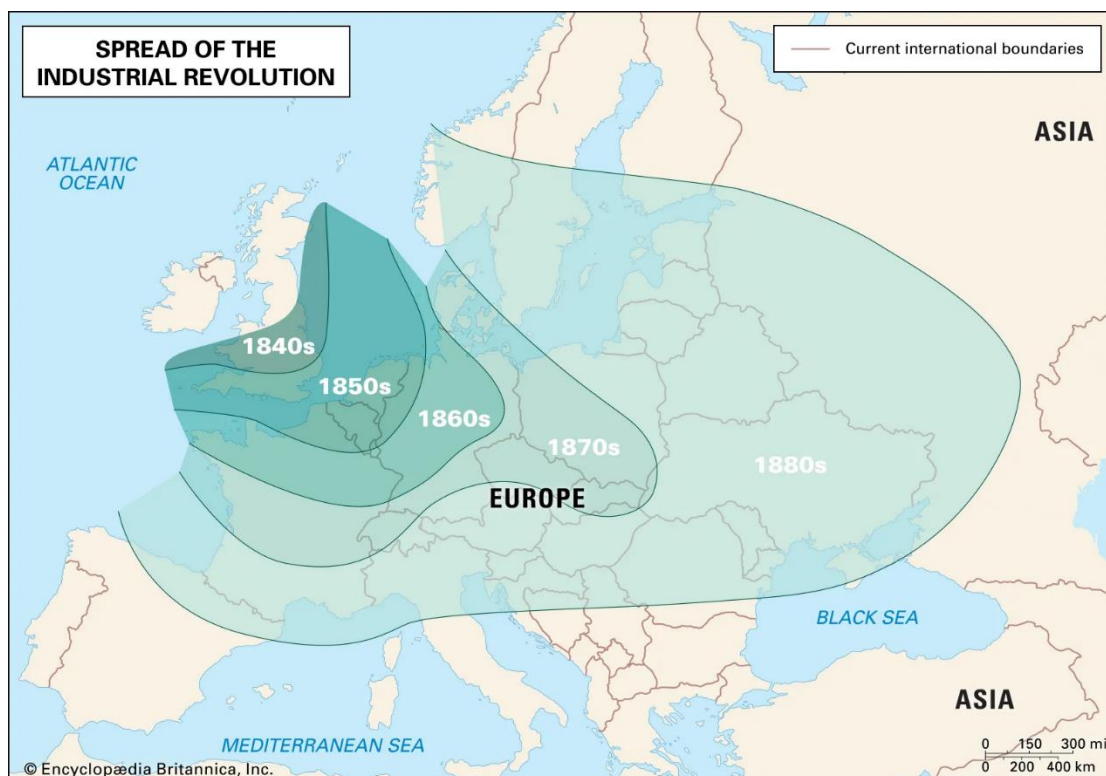
Η Πρώτη Βιομηχανική Επανάσταση σηματοδότησε τη μετάβαση από το ξύλο στον άνθρακα ως κύρια πηγή ενέργειας, εξέλιξη που ξεκίνησε στη Βρετανία γύρω στο 1700. Η βελτίωση της ατμομηχανής από τον Τζέιμς Βατ το 1776 επέτρεψε την ευρεία χρήση της στη βιομηχανία, τα πλοία και τους σιδηρόδρομους, αυξάνοντας την παραγωγικότητα και μειώνοντας την εξάρτηση από την τοπικά περιορισμένη υδροηλεκτρική ισχύ. Ο άνθρακας αναδείχθηκε σε κεντρικό ενεργειακό πόρο, τροφοδοτώντας τη μηχανοποίηση της υφαντουργίας και τη παραγωγή σιδήρου. Η εκβιομηχάνιση έφερε μαζική αστικοποίηση, κοινωνικές και οικονομικές αλλαγές, αλλά και αντιδράσεις από τους εργαζόμενους που επηρεάζονται από τις νέες τεχνολογίες. Η ανάπτυξη των σιδηρόδρομων και η εισαγωγή του ατμού στη ναυσιπλοΐα ενίσχυσαν τη χρήση άνθρακα, εδραιώνοντας τον ως την κυρίαρχη πηγή ενέργειας της εποχής (Jianfeng Yang et al, 2004). Η συνολική μεταβολή της χρήσης διαφόρων πηγών ενέργειας για την Αγγλία και Ουαλία παρατίθεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 1 Ετήσια κατανάλωση ενέργειας στην Αγγλία και την Ουαλία (Wringley 2010)

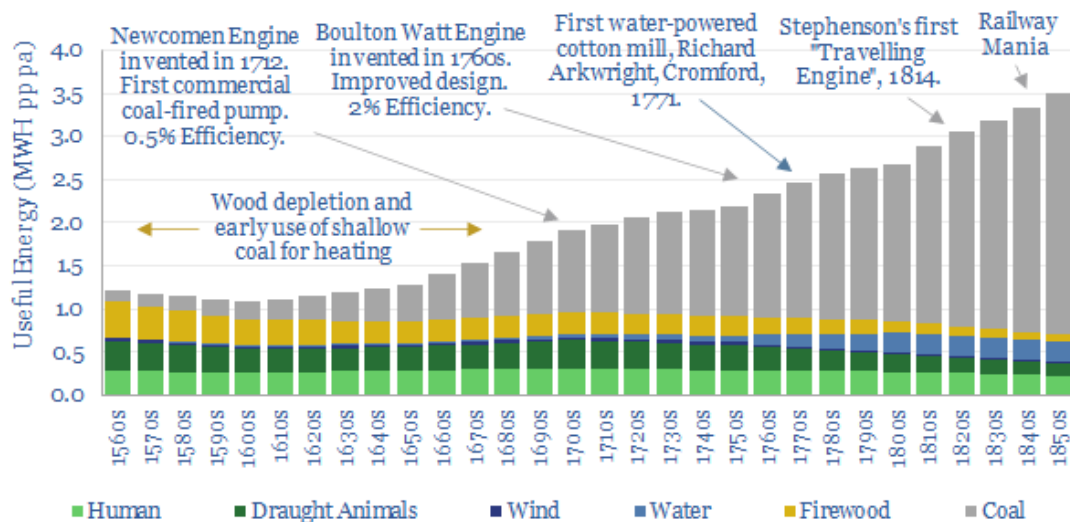
Ετήσια κατανάλωση ενέργειας (terajoules)	Ανθρώπινη	Ζωική	Ξυλεία	Άνεμος	Νερό	Άνθρακας	Σύνολο
1561-70	14,860	21,100	21,490	200	550	6,930	65,130
1600-9	19,190	21,430	21,810	390	700	14,540	78,060
1650-9	26,080	27,700	22,200	880	900	39,060	116,820
1700-9	27,330	32,780	22,480	1,360	990	84,000	168,940
1750-9	29,730	33,640	22,560	2,810	1,300	140,810	230,850
1800-9	41,810	34,290	18,540	12,660	1,100	408,680	517,080
1850-9	67,800	50,090	2,240	24,360	1,700	1,689,100	1,835,300

Δεύτερη Βιομηχανική Επανάσταση (1870-1913)

Η Δεύτερη Βιομηχανική Επανάσταση σηματοδεύτηκε από την εμφάνιση ηλεκτρικών δικτύων και του κινητήρα εσωτερικής καύσης, που συνέχισαν να βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Ο άνθρακας διατήρησε την κυριαρχία του στις ανεπτυγμένες χώρες, ενώ η αυξανόμενη παραγωγή πετρελαίου οδήγησε στη δημιουργία της πετροχημικής βιομηχανίας και στην ευρεία χρήση χημικών λιπασμάτων στη γεωργία. Η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε αρχικά για φωτισμό, με τον λαμπτήρα του Έντισον (1879) να σηματοδοτεί την έναρξη της εμπορικής αξιοποίησής της. Οι πρώτες γεννήτριες κινούνταν από ατμομηχανές, όμως η εφεύρεση του ατμοστρόβιλου από τον Parsons (1884) αύξησε σημαντικά την απόδοση. Η υιοθέτηση του εναλλασσόμενου ρεύματος επέτρεψε την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ τα τέλη του 19^{ου} αιώνα η Δανία δημιούργησε τα πρώτα αιολικά πάρκα (Jianfeng Yang et al, 2004).



Εικόνα 18 – Η εξάπλωση της Βιομηχανικής Επανάστασης από τη Βρετανία στην υπόλοιπη Ευρώπη (Britannica, 2025)



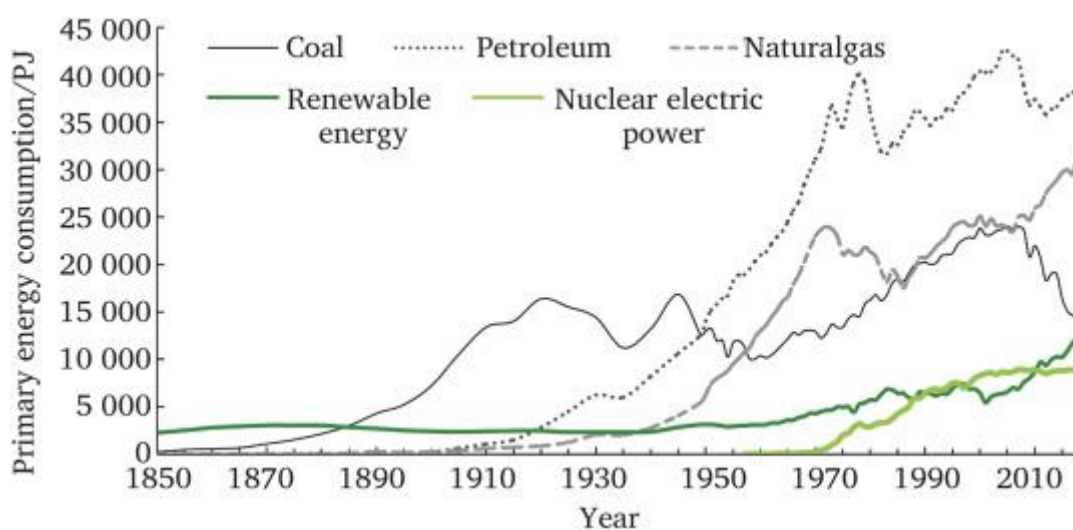
Εικόνα 19- Πέντε σημαντικά γεγονότα κατά τη Βιομηχανική επανάσταση (Clemson University, 2023)

Από τον 20ό αιώνα έως σήμερα

Στις αρχές του 20ού αιώνα, ο ανταγωνισμός μεταξύ αιολικής ενέργειας και άνθρακα, ιδιαίτερα στη Δανία, έληξε με την επικράτηση του άνθρακα λόγω χαμηλότερου κόστους και μεγαλύτερης αξιοπιστίας. Η παγκόσμια παραγωγή άνθρακα αυξήθηκε θεαματικά, με τις ΗΠΑ να ξεπερνούν την Ευρώπη σε κατανάλωση, ενώ το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο άρχισαν να κερδίζουν έδαφος. Οι ανανεώσιμες πηγές υποχώρησαν,

με εξαίρεση την υδροηλεκτρική ενέργεια, που συχνά ήταν φθηνότερη. Ο Α Παγκόσμιος Πόλεμος ενίσχυσε τη χρήση πετρελαίου στις μεταφορές, ενώ η περίοδος 1913-1950 είδε διπλασιασμό της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων με τις ΗΠΑ να καταναλώνουν σχεδόν το μισό της παγκόσμιας εμπορικής ενέργειας.

Κατά τον Β Παγκόσμιο Πόλεμο, τα ορυκτά καύσιμα χρησιμοποιήθηκαν μαζικά για πολεμικούς σκοπούς, ενώ η αιολική περιορίστηκε σε έκτακτες περιπτώσεις. Μετά τον πόλεμο, η υποδομή και η βιομηχανία βασίστηκαν κυρίως σε άνθρακα, πετρέλαιο, και φυσικό αέριο, που κυριάρχησαν παγκοσμίως. Η πετρελαϊκή κρίση του 1973, με τη ραγδαία αύξηση τιμών, ώθησε κυβερνήσεις να προωθήσουν τον άνθρακα ως εναλλακτική και να επενδύσουν στην έρευνα για ανανεώσιμες πηγές. Η κρίση αναζωπύρωσε το ενδιαφέρον για τεχνολογίες όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, οδηγώντας σε σημαντική τεχνολογική πρόοδο και καθιστώντας τις βιώσιμες και ανταγωνιστικές, εφόσον οι συνθήκες της αγοράς το επέτρεπα (Bent Sorensen, 1991). Μετά την Βιομηχανική επανάσταση οι διακυμάνσεις και αλλαγές που παρατηρήθηκαν στην χρήση πηγών ενέργειας, εμφανίζονται αναλυτικά στην εικόνα 20.



Εικόνα 20- Διάγραμμα της διακύμανσης της χρήσης διαφόρων πηγών ενέργειας από τη Βιομηχανική Επανάσταση και μετά (Yang, J et al, 2021)

Στον 21ο αιώνα, η αυξημένη χρήση ορυκτών καυσίμων επιδεινώνει την κλιματική αλλαγή, την ρύπανση και την υγεία. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική, προβάλλουν ως βιώσιμη λύση με μειωμένο κόστος, μείωση εκπομπών και ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας. Η υιοθέτησή τους στηρίζει την τοπική οικονομία, δημιουργεί θέσεις εργασίας και προστατεύει το περιβάλλον. Η ανάπτυξη των ΑΠΕ επεκτείνεται σε πολλούς τομείς, με την έρευνα και την τεχνολογία να παίζουν καθοριστικό ρόλο για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και την αντιμετώπιση προκλήσεων (Md Kashif Gohar Deshmukh et al, 2020).

2.4.2 Σύγχρονη κατάσταση και Τάσεις

Η παγκόσμια ενεργειακή κατάσταση βρίσκεται σε κρίσιμη φάση, καθώς η αύξηση των ενεργειακών αναγκών, η κλιματική αλλαγή και οι γεωπολιτικές εντάσεις επηρεάζουν την παγκόσμια οικονομία και την ενεργειακή ασφάλεια (Zheng Li et al, 2022). Η ενεργειακή μετάβαση προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προχωρά γρήγορα, με ρεκόρ ανάπτυξης το 2023, ενώ η γεωπολιτική σημασία των ορυκτών καυσίμων παραμένει υψηλή, όπως αναδεικνύεται από τις επιπτώσεις της ενεργειακής κρίσης του 2022-2023 και τις εξελίξεις στον πόλεμο της Ουκρανίας.

Η Ευρώπη έχει μειώσει την εξάρτησή της από το ρωσικό φυσικό αέριο, αλλά δημιουργούνται νέες ενεργειακές εξαρτήσεις από άλλους παραγωγούς. Παράλληλα, χώρες όπως η Κίνα και η Ινδία αυξάνουν τις εισαγωγές ρωσικού πετρελαίου, αλλά και κυριαρχούν στην παραγωγή κρίσιμων τεχνολογιών καθαρής ενέργειας, προκαλώντας γεωπολιτικές προκλήσεις. Το 2023 προστέθηκαν πάνω από 560 GW νέας ανανεώσιμης ισχύος, με επενδύσεις σε καθαρές τεχνολογίες να ξεπερνούν τα 2 τρισ. δολάρια, ξεπερνώντας αυτές σε ορυκτά καύσιμα.

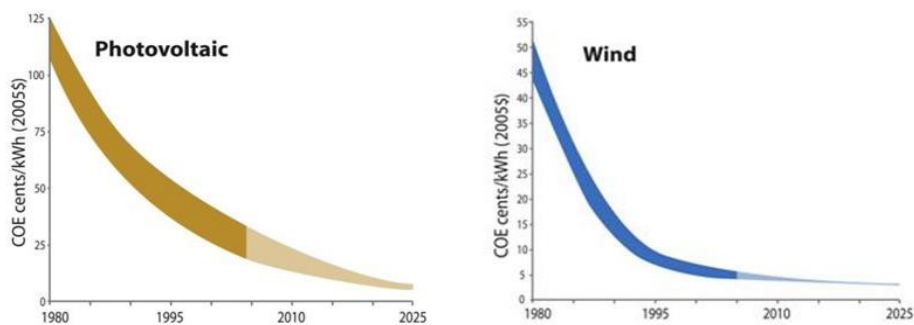
Παρότι η παραγωγή από ΑΠΕ αναμένεται να διπλασιαστεί έως το 2030, τα ορυκτά καύσιμα εξακολουθούν να καλύπτουν το 66% της παγκόσμιας ζήτησης το 2023. Η πυρηνική ενέργεια ανακτά το ρόλο της στην απανθρακοποίηση, με τις χαμηλών εκπομπών πηγές να προβλέπεται να καλύψουν πάνω από το 50% της ηλεκτρικής παραγωγής πριν το 2030. Ωστόσο, η ανεπαρκής επένδυση σε δίκτυα και αποθήκευση, η ενεργειακή φτώχεια και οι γεωπολιτικές εντάσεις αποτελούν σημαντικές προκλήσεις (Bloomberg, 2024).

Η επιτυχής ενεργειακή μετάβαση απαιτεί διεθνή συνεργασία, στρατηγικές επενδύσεις και καινοτομίες, με την επίτευξη των στόχων του 2030 να εξαρτάται από την προσαρμοστικότητα κυβερνήσεων και επιχειρήσεων (Andreas Goldthau, 2011).

2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή επιλογή

2.5.1 Οικονομικοί Παράγοντες

Επί του παρόντος, το μεγαλύτερο ποσοστό της παγκόσμιας ενεργειακής παραγωγής προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, καθώς αυτά εξακολουθούν να προσφέρουν την πιο οικονομική λύση. Ωστόσο, το κόστος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μειώνεται συνεχώς, με αποτέλεσμα ορισμένες από αυτές να μπορούν ήδη να ανταγωνιστούν τα ορυκτά καύσιμα αποκλειστικά σε οικονομικούς όρους. Οι προβλέψεις δείχνουν ότι οι δαπάνες για ανανεώσιμες πηγές θα συνεχίσουν να μειώνονται, ενώ αντίθετα, οι τιμές των ορυκτών καυσίμων είναι πιθανό να αυξηθούν (International Renewable Energy Agency, 2025).



Εικόνα 21- Πτώση του κόστους ηλιακής και αιολικής ενέργειας από τη δεκαετία του 80 έως σήμερα (Arent D.J. et al, 2011)

Για να συγκριθεί το κόστος διαφορετικών πηγών ενέργειας, χρησιμοποιείται η έννοια του επιπέδου κόστους ενέργειας (Level of Cost Of Energy ή LCOE). Ο υπολογισμός αυτός λαμβάνει υπόψη την παρούσα αξία της κατασκευής και λειτουργίας μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της, εκφρασμένη σε πραγματικούς όρους ώστε να εξουδετερωθεί η επίδραση του πληθωρισμού. Το συνολικό κόστος κατασκευής και λειτουργίας διαιρείται στη συνέχεια με την παραγόμενη ενέργεια, επιτρέποντας άμεσες συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών.

Για να θεωρηθούν οι ανανεώσιμες πηγές οικονομικά ανταγωνιστικές, το κόστος τους πρέπει να μειωθεί σε επίπεδα αντίστοιχα της τιμής χονδρικής του ηλεκτρικού ρεύματος, δηλαδή της τιμής στην οποία πωλείται η ηλεκτρική ενέργεια από τα συμβατικά εργοστάσια στο δίκτυο. Ορισμένες ανανεώσιμες πηγές, όπως η υδροηλεκτρική ενέργεια και η βιομάζα, έχουν ήδη φτάσει σε αυτό το επίπεδο. Τα στοιχεία δείχνουν ότι η αιολική και η γεωθερμική ενέργεια πλησιάζουν την ανταγωνιστικότητα σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές, ενώ η ηλιακή ενέργεια εξακολουθεί να είναι πιο δαπανηρή. Παρ' όλα αυτά, δεδομένου ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν από μεμονωμένους καταναλωτές, το κόστος τους πρέπει να φτάσει μόνο στο επίπεδο της τιμής λιανικής του ηλεκτρικού ρεύματος, καθιστώντας έτσι την ηλιακή ενέργεια πιο προσιτή για τους τελικούς χρήστες.

Τα ορυκτά καύσιμα παραμένουν η κύρια πηγή ενέργειας παγκοσμίως λόγω της υψηλής ενεργειακής τους πυκνότητας και της ευκολίας χρήσης τους. Ωστόσο, η εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων απαιτεί όλο και περισσότερη ενέργεια, μειώνοντας την καθαρή ενέργεια που απομένει για χρήση.

Ο δείκτης "καθαρής ενέργειας" (Net Energy Ratio, ή EROI) μετρά την ποσότητα ενέργειας που λαμβάνεται σε σχέση με την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή της. Ορισμένες πηγές, όπως η υδροηλεκτρική ενέργεια, έχουν εξαιρετικά υψηλές τιμές EROI, ενώ τα περισσότερα ανανεώσιμα καύσιμα, όπως τα βιοκαύσιμα, εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές. Ένα βασικό μειονέκτημα των ανανεώσιμων πηγών είναι η διαλείπουσα παραγωγή τους (intermittency), δηλαδή η αδυναμία τους να ανταποκριθούν άμεσα στη ζήτηση. Η ηλιακή και αιολική ενέργεια εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες, ενώ η υδροηλεκτρική παραγωγή μειώνεται σε περιόδους ξηρασίας. Η γεωθερμική, η πυρηνική και η βιομάζα είναι πιο αξιόπιστες, καθώς μπορούν να παράγουν ενέργεια όποτε χρειάζεται (David Timmons et al, 2014).

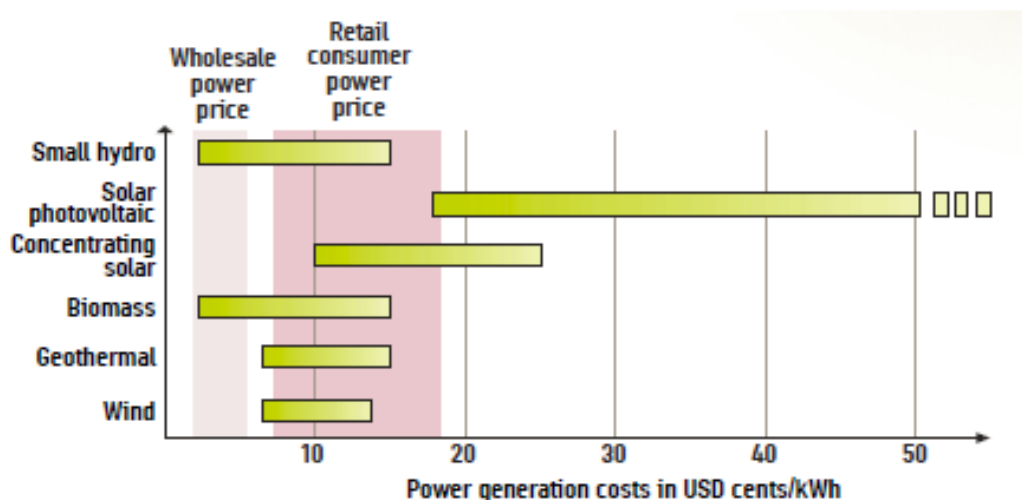
Η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού μπορεί να γίνει μέσω ενεργειακής ποικιλομορφίας (συνδυασμός διαφορετικών πηγών, π.χ. ηλιακή και αιολική για εποχική εξισορρόπηση) ή μέσω αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες). Ωστόσο, η αποθήκευση αυξάνει το συνολικό κόστος της ανανεώσιμης ενέργειας, γεγονός που αποτελεί σημαντική πρόκληση για τη βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση.

Ένας άλλος τρόπος εξισορρόπησης της ενεργειακής προσφοράς είναι η πλεονάζουσα παραγωγική ικανότητα. Οι συντάκτες της παγκόσμιας αξιολόγησης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προτείνουν την κατασκευή μεγάλων εγκαταστάσεων αιολικής και ηλιακής ενέργειας, με την πλεονάζουσα παραγωγή να αξιοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης. Το υδρογόνο μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση ή για παραγωγή ηλεκτρισμού σε περιόδους χαμηλής διαθεσιμότητας ανανεώσιμης ενέργειας. Το κόστος ενός τέτοιου συστήματος αφορά κυρίως την υποδομή που απαιτείται για την παραγωγή, αποθήκευση και καύση του υδρογόνου.

Παράλληλα, ένα ισχυρό και εκτεταμένο ηλεκτρικό δίκτυο (εθνικό ή ακόμα και διεθνές) αποτελεί έναν επιπλέον μηχανισμό αντιμετώπισης της διαλείπουσας παραγωγής των ανανεώσιμων πηγών. Αν και ο άνεμος μπορεί να μην φυσάει σε μία συγκεκριμένη περιοχή ανά πάσα στιγμή, είναι πιθανό να φυσάει κάπου αλλού. Ένα εκτεταμένο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας επιτρέπει τη μεταφορά ηλεκτρισμού από περιοχές υψηλής παραγωγής σε περιοχές υψηλής ζήτησης. Ωστόσο, η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις απαιτεί σημαντικές επενδύσεις στο δίκτυο μεταφοράς. Πολιτικές που υποστηρίζουν την ανάπτυξη τέτοιων υποδομών θα είναι πιθανώς αναγκαίες για την περαιτέρω αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών.

Το μεταβλητό κόστος της ανανεώσιμης ενέργειας εξαρτάται σημαντικά από τις επικρατούσες συνθήκες. Σε περιόδους χαμηλής παραγωγής από αιολική, υδροηλεκτρική και ηλιακή ενέργεια, το οριακό κόστος της ανανεώσιμης ενέργειας θα είναι πολύ υψηλό. Ένα σύστημα μεταβλητής τιμολόγησης ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με έξυπνους μετρητές θα μπορούσε να προσαρμόζει την τιμή του ηλεκτρισμού ανάλογα με τη διαθεσιμότητα. Οι καταναλωτές θα είχαν τη δυνατότητα να περιορίσουν τη χρήση τους σε περιόδους υψηλού κόστους ή να προγραμματίσουν ηλεκτρικές συσκευές, όπως τους θερμοσίφωνες, να λειτουργούν όταν η τιμή είναι χαμηλή (Energy Systems Integration Group, 2024).

Τέλος, η πλήρης μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές θα απαιτήσει αρκετά χρόνια. Στο μεσοδιάστημα, τα ορυκτά καύσιμα θα συνεχίσουν να παίζουν σημαντικό ρόλο, κυρίως στην εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης. Ειδικά η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για αυτόν τον σκοπό, καθώς οι τουρμπίνες φυσικού αερίου μπορούν να ενεργοποιηθούν και να σταματήσουν γρήγορα, προσαρμοζόμενες στις ανάγκες του δικτύου.



Εικόνα 22- Σύγκριση κόστους ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ορυκτά καύσιμα (Gerpielke, J. 2009)

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) απαιτούν υψηλές αρχικές επενδύσεις, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα όπως το φυσικό αέριο, όπου το κόστος καυσίμου κατανέμεται μακροπρόθεσμα χωρίς ανάγκη δανεισμού στην έναρξη. Η ανταγωνιστικότητα των ΑΠΕ επηρεάζεται σημαντικά από τις διακυμάνσεις των επιτοκίων, καθώς τα υψηλά επιτόκια μειώνουν την ελκυστικότητά τους, ενώ τα χαμηλά την ενισχύουν. Η επιλογή της ενεργειακής πηγής εξαρτάται από το κόστος εγκατάστασης, τα λειτουργικά έξοδα, την τεχνολογική πρόοδο, τις πολιτικές και τη διαθεσιμότητα πόρων. Παρά το αρχικό κόστος, οι ΑΠΕ προσφέρουν μακροπρόθεσμα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, με τη συνεχή τεχνολογική εξέλιξη και την παγκόσμια στροφή προς βιώσιμες λύσεις να ενισχύουν τη μελλοντική τους αποδοτικότητα και τη μετάβαση σε καθαρότερο ενεργειακό σύστημα (David Timmons et al, 2014).

2.5.2 Πολιτικοί Παράγοντες

Η μελέτη της ενεργειακής πολιτικής επικεντρώνεται στην κατανόηση των φορέων που επηρεάζουν τη χάραξή της και τις αλληλεπιδράσεις τους, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις εσωτερικές διαδικασίες όσο και τις διεθνείς αγορές ενέργειας (Llewelyn Hughes et al, 2013). Η αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση, οι κλιματικές αλλαγές και γεωπολιτικές κρίσεις, όπως ο πόλεμος στην Ουκρανία, καθιστούν αναγκαία τον σχεδιασμό βιώσιμων και οικονομικά προσιτών πολιτικών ενέργειας (IEA, 2010).

Η ενεργειακή πολιτική επηρεάζεται από ποικίλους φορείς με διαφορετικά συμφέροντα, ενώ η μετάβαση στις ΑΠΕ εξαρτάται από το πολιτικό και κοινωνικό περιβάλλον κάθε χώρας. Η πολιτική αστάθεια, όπως διαφθορά και συγκρούσεις, αποτελεί σημαντικό εμπόδιο στην καινοτομία των ΑΠΕ, ενώ η δημοκρατία ευνοεί την ανάπτυξή τους (Jun-Zhuo Wang et al, 2024). Σε ολιγαρχικά καθεστώτα, υψηλές στρατιωτικές δαπάνες επιβραδύνουν την καινοτομία στις ΑΠΕ, ενώ χαμηλές δαπάνες την ενισχύουν. Παραδείγματα χωρών όπως η Τουρκία και η Ουκρανία δείχνουν ότι η πολιτική αστάθεια αποθαρρύνει τις επενδύσεις στις ΑΠΕ, ενώ χώρες με σταθερό πολιτικό περιβάλλον όπως η Φινλανδία και η Ελβετία πρωτοστατούν στην καινοτομία, με σημαντική δημόσια χρηματοδότηση.

Επιπλέον, σε περιόδους ακραίων πολιτικών φαινομένων και κοινωνικών αναταραχών (τρομοκρατικές επιθέσεις, πραξικοπήματα, πολεμικές συγκρούσεις), η χρήση και εξέλιξη των ανανεώσιμων τεχνολογιών μειώνεται σημαντικά (Erdal Arslan et al, 2023). Η πολιτική αστάθεια θέτει σε κίνδυνο τη βιώσιμη παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας, δυσχεραίνοντας την οικονομική ανάπτυξη και κοινωνική ευημερία. Συνεπώς, η σταθερότητα και η αυξημένη δημόσια χρηματοδότηση για έρευνα και ανάπτυξη είναι κρίσιμες για την προώθηση της καινοτομίας στις ΑΠΕ.

2.5.3 Τεχνολογικοί Παράγοντες

Η αύξηση της ενεργειακής ζήτησης και οι περιβαλλοντικοί-οικονομικοί παράγοντες επιβάλλουν μια μετάβαση προς τις ΑΠΕ, όπου η τεχνολογία παίζει καθοριστικό ρόλο. Καινοτομίες στην αιολική και ηλιακή ενέργεια, η πρόοδος στην αποθήκευση ενέργειας και η ανάπτυξη έξυπνων δικτύων βελτιώνουν την αποδοτικότητα, μειώνουν το κόστος και αυξάνουν τη σταθερότητα των συστημάτων ΑΠΕ. Η τεχνολογία καθιστά τις ανανεώσιμες πηγές πιο προσιτές και βιώσιμες, επιτρέποντας τη σταδιακή αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων (Poul Alberg Ostergaard et al, 2020).

Η βελτίωση στην ενεργειακή απόδοση των νέων ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών πάνελ, καθώς και η μείωση του κόστους παραγωγής, προωθούν την ευρύτερη υιοθέτηση των ΑΠΕ. Επιπλέον, η αποθήκευση ενέργειας μέσω μπαταριών λιθίου και τεχνολογιών υδρογόνου, σε συνδιασμό με τα ψηφιακά έξυπνα δίκτυα, αντιμετωπίζουν τη διαλείπουσα φύση της παραγωγής και βελτιώνουν τη διαχείριση ενέργειας.

Τεχνολογικές καινοτομίες επηρεάζουν και τη βιομηχανική παραγωγή, με παραδείγματα τη χρήση υδρογόνου, βιοκαυσίμων και δέσμευσης άνθρακα, συμβάλλοντας στη μείωση εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα και προωθώντας τη βιώσιμη ανάπτυξη. Συνολικά η τεχνολογία αποτελεί βασικό παράγοντα για τη μετάβαση σε ένα πιο καθαρό και αποδοτικό ενεργειακό μέλλον (Bamati et al, 2020).

2.6 Κλιματική αλλαγή και ανάγκη ενεργειακής μετάβασης

2.6.1 Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής

Από τον 20ό αιώνα, η κυριαρχία των ορυκτών καυσίμων στην παραγωγή ενέργειας έχει προκαλέσει σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η κλιματική αλλαγή, τα ακραία καιρικά φαινόμενα και η αύξηση των ρύπων, με σημαντική ευθύνη τομείς όπως η ενέργεια και η βιομηχανία. Η μετάβαση στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί πλέον αναγκαίο βήμα όχι μόνο για την προστασία του περιβάλλοντος αλλά και για τη βιώσιμη ανάπτυξη της οικονομίας. Κυβερνήσεις και διεθνείς οργανισμοί, μέσω πολιτικών και συμφωνιών όπως η Συμφωνία του Παρισιού, προωθούν την ενεργειακή μετάβαση με μέτρα όπως οικονομικά κίνητρα, επιδοτήσεις και αυστηρότερες ρυθμίσεις κατά των ορυκτών καυσίμων. Η κλιματική αλλαγή, η ενεργειακή ασφάλεια, οι οικονομικές δυνατότητες από την τεχνολογία και οι διεθνείς δεσμεύσεις καθιστούν την ανάπτυξη των ΑΠΕ αναπόφευκτη. Η επιτυχία αυτής της μετάβασης απαιτεί συνεργασία μεταξύ κυβερνήσεων, επιχειρήσεων και κοινωνίας, καθώς και καινοτόμες λύσεις για ένα βιώσιμο και ανθεκτικό μέλλον (International Renewable Energy Agency, 2017).

Επιπλέον, η ατμοσφαιρική ρύπανση από αιωρούμενα σωματίδια, διοξείδιο του θείου (SO_2), οξείδια του αζώτου (NO_x) και άλλους ρύπους, που προέρχονται κυρίως από βιομηχανικές δραστηριότητες και σταθμούς παραγωγής ενέργειας με ορυκτά καύσιμα, έχει σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων, προκαλώντας αναπνευστικά και καρδιαγγειακά νοσήματα, αλλά και πρόωρους θανάτους (WHO, 2021). Η ρύπανση αυτή επηρεάζει επίσης την ποιότητα του εδάφους και των υδάτων, επηρεάζοντας τη βιοποικιλότητα και την αγροτική παραγωγή. Η εξόρυξη και η μεταφορά ορυκτών καυσίμων επιβαρύνουν περαιτέρω το περιβάλλον, καταστρέφοντας φυσικά τοπία, προκαλώντας ρύπανση υδάτων και εδαφών, και οδηγώντας σε απώλεια οικοτόπων και ειδών. Η εξάρτηση από αυτές τις πηγές ενέργειας εντείνει τα περιβαλλοντικά και κοινωνικά προβλήματα, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη για μετάβαση σε πιο καθαρές και βιώσιμες μορφές ενέργειας.

2.6.2 Πράσινες τεχνολογίες και βιώσιμα ενεργειακά μοντέλα

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν βασικό πυλώνα για τη βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση, προσφέροντας καθαρή, ανεξάντλητη ενέργεια που μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τα ορυκτά καύσιμα. Η ηλιακή ενέργεια, που προέρχεται από την ακτινοβολία του Ήλιου, διαθέτει τεράστιο δυναμικό, αρκετό να καλύψει τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες, και χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρισμού μέσω φωτοβολταϊκών, αλλά και για θέρμανση νερού και παθητική θέρμανση κτιρίων (Ashok, et al, 2019). Παρότι η διακοπτόμενη φύση της (εξάρτηση από ώρα, καιρικές συνθήκες) αποτελεί πρόκληση, η τεχνολογική εξέλιξη και η ευρεία εγκατάσταση την καθιστούν ολοένα πιο ανταγωνιστική.

Η αιολική ενέργεια, που δημιουργείται από την κίνηση του αέρα λόγω της άνισης θέρμανσης της Γης, αξιοποιείται κυρίως μέσω ανεμογεννητριών σε χερσαίες και υπεράκτιες εγκαταστάσεις, προσφέροντας σημαντική δυνατότητα μείωσης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (IRENA, 2022). Η αυξανόμενη διείσδυσή της στα ηλεκτρικά δίκτυα και οι τεχνολογικές βελτιώσεις μειώνουν το κόστος και ενισχύουν την ενεργειακή ασφάλεια.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια αξιοποιεί την κινητική ενέργεια του νερού και αποτελεί την πιο διαδεδομένη ανανεώσιμη πηγή ηλεκτρισμού παγκοσμίως, καλύπτοντας το 71% της παραγωγής από ΑΠΕ (National Geographic, 2025). Η χρήση της χρονολογείται από την αρχαιότητα και σήμερα συνεισφέρει σημαντικά στη βιώσιμη ανάπτυξη, παρότι απαιτεί μεγάλα έργα υποδομών και σχετική προσοχή στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Άλλες βιώσιμες μορφές ενέργειας περιλαμβάνουν τη γεωθερμική ενέργεια, που εκμεταλλεύεται τη θερμότητα από το εσωτερικό της γης για θέρμανση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και τη βιομάζα, η οποία βασίζεται στη βιολογική προέλευση οργανικών υλικών για παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρισμού ή βιοκαυσίμων (REN21, 2023). Αυτές οι πηγές συνεισφέρουν στην ενεργειακή ποικιλία και στην αύξηση της ενεργειακής αυτονομίας.

Συνολικά, οι ΑΠΕ συμβάλλουν ουσιαστικά στη μείωση των εκπομπών ρύπων, στην προστασία του κλίματος και στην προώθηση ενός καθαρού ενεργειακού μέλλοντος. Η επιτυχία τους εξαρτάται από την τεχνολογική πρόοδο, τις πολιτικές στήριξης και τη διεθνή συνεργασία για βιώσιμη ανάπτυξη και ενεργειακή δικαιοσύνη.

3. Πυρηνική Ενέργεια - Προκλήσεις και Προοπτικές

3.1 Οικονομικές πτυχές της πυρηνικής ενέργειας

3.1.1 Κόστος Κατασκευής και Λειτουργίας

Η πυρηνική ενέργεια αποτελεί μια από τις βασικές επιλογές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς προσφέρει υψηλή απόδοση, σταθερότητα στην παροχή και χαμηλές εκπομπές άνθρακα. Ωστόσο, η οικονομική της βιωσιμότητα αποτελεί ένα σύνθετο ζήτημα, που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το κόστος κατασκευής και συντήρησης, η τιμή των καυσίμων καθώς και το απαιτούμενο κόστος διαχείρισης των ραδιενεργών αποβλήτων.

Η Παγκόσμια Πυρηνική Ένωση (World Nuclear Association, 2023) σε σχετικό άρθρο της για τα οικονομικά της πυρηνικής ενέργειας κατατάσσει τα κόστη σε τέσσερις βασικές κατηγορίες. Μια από τις πιο βασικές παραμέτρους της οικονομικής ανάλυσης μιας πυρηνικής μονάδας είναι το κόστος επένδυσης ή χρηματοδότηση του έργου (Capital Cost and Financing), και ορίζεται ως το σύνολο των άμεσων και έμμεσων δαπανών ολόκληρης της μονάδας ισχύος, συμπεριλαμβανομένων των δαπανών ιδιοκτήτη, απρόβλεπτων και τόκων, κατά την κατασκευή. Στη περίπτωση της πυρηνικής ενέργειας, η τεχνική πολυπλοκότητα των σταθμών, που παρουσιάζουν σχετικά υψηλούς κινδύνους κατά την κατασκευή έχει ως αποτέλεσμα το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με άλλες μονάδες παραγωγής ενέργειας. Επιπλέον παράμετροι όπως τυχόν καθυστερήσεις και υπερβάσεις κόστους – φαινόμενα που παρατηρήθηκαν κατά την διεύρυνση της πυρηνικής ενέργειας στις δεκαετίες του 70 και του 80 – μπορούν επίσης να αυξήσουν τις αρχικές δαπάνες του έργου.

Το κόστος κεφαλαίου είναι ένας από τους κυριότερους παράγοντες στο συνολικό κεφαλαιουχικό κόστος των πυρηνικών έργων. Η μακρά περίοδος κατασκευής, από την αρχή έως τη σύνδεση με το δίκτυο, και οι μεγάλες καθυστερήσεις αυξάνουν σημαντικά το κόστος χρηματοδότησης. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το κόστος χρηματοδότησης έχει ιδιαίτερη σημασία για την οικονομική βιωσιμότητα των πυρηνικών σταθμών, λόγω της μεγάλης κεφαλαιακής επένδυσης που απαιτούν.

Κατά τη μακρά περίοδο κατασκευής ενός πυρηνικού έργου, όπου δεν υπάρχουν έσοδα, οι τόκοι από τα δανεισμένα κεφάλαια μπορεί να συσσωρευτούν σε μεγάλα ποσά, αυξάνοντας το συνολικό κόστος κεφαλαίου. Σύμφωνα με το Ερευνητικό Κέντρο Andlinger του Πανεπιστημίου Πρίνστον, το κόστος κεφαλαίου επηρεάζει άμεσα και άλλα έξοδα, όπως χρηματοοικονομικά έξοδα, απόσβεση, ασφάλιση και φόρους, που υπολογίζονται με βάση έναν ετήσιο συντελεστή κεφαλαιακής επιβάρυνσης περίπου 15%. Επιπλέον, η έκθεση του 2020 της Παγκόσμιας Πυρηνικής Ένωσης αναλύει λεπτομερώς το κόστος κεφαλαίου ανά δραστηριότητα, καθώς και τη συνεισφορά της εργασίας, των αγαθών και των υλικών στην οικονομική βιωσιμότητα των έργων. Η αύξηση του κόστους κεφαλαίου μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τη βιωσιμότητα των

πυρηνικών σταθμών λόγω των υψηλών επενδυτικών απαιτήσεων (World Nuclear Association, 2023).

Πίνακας 2 Ανάλυση του κόστους κεφαλαίου πυρηνικής εγκατάστασης ως προς την εργασία (Federal Energy Regulatory Commission, 2024)

Σχεδιασμός, αρχιτεκτονική, μηχανική και αδειοδότηση	5%
Μηχανική έργων, διαχείριση προμηθειών και κατασκευή	7%
Εργασίες κατασκευής και εγκατάστασης: Πυρηνικό νησί	28%
Συμβατικό νησί	15%
Ισοζύγιο	18%
Ανάπτυξη εργοταξίου και πολιτικά έργα	20%
Μεταφορικά	2%
Θέση σε λειτουργία και πρώτη φόρτωση καυσίμου	5%
Σύνολο	100%

Πίνακας 3 Ανάλυση του κόστους κεφαλαίου πυρηνικής εγκατάστασης ως προς τα αγαθά και τα υλικά (Federal Energy Regulatory Commission, 2024)

Σύστημα παροχής ατμού	12%
Ηλεκτρικός και ηλεκτροπαραγωγικός εξοπλισμός	12%
Μηχανολογικός εξοπλισμός	16%
Σύστημα οργάνων και ελέγχου (συμπεριλαμβανομένου λογισμικού)	8%
Υλικά κατασκευής	12%
Εργασία στο χώρο	25%
Υπηρεσίες διαχείρισης έργου	10%
Άλλες υπηρεσίες	2%
Πρώτο φορτίο καυσίμου	3%
Σύνολο	100%

Έχοντας αναφέρει τα χαρακτηριστικά του κόστους κεφαλαίου, τις παραμέτρους από τις οποίες επηρεάζεται καθώς και τη μέθοδο υπολογισμού του, αξίζει να σημειωθεί πως το κόστος κατασκευής ενός νέου πυρηνικού σταθμού είναι ιδιαίτερα αβέβαιο, καθώς οι δαπάνες για σταθμούς που έχουν κατασκευαστεί στο παρελθόν παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις. Αυτές οι διαφορές οφείλονται εν μέρει σε παράγοντες όπως η προηγούμενη εμπειρία, τα επιτόκια, οι τιμές γης, οι τοπικές συνθήκες και οι ρυθμιστικές απαιτήσεις. Ενδεικτικά, παραθέτονται στοιχεία για το κόστος πυρηνικών σταθμών των ΗΠΑ (\$/MWh σε δολάρια 2017)

Η μελέτη του Πανεπιστημίου Carnegie Mellon (2013), με τη συμμετοχή 16 ειδικών στην κατασκευή πυρηνικών σταθμών, εκτίμησε το άμεσο κεφαλαιουχικό κόστος μελλοντικών πυρηνικών εγκαταστάσεων. Η ανάλυση, βασισμένη σε τιμές του 2012, περιλάμβανε μόνο το κόστος μηχανικής, προμήθειας και κατασκευής, εξαιρώντας χρηματοδοτικά και άλλα πρόσθετα έξοδα. Οι εκτιμήσεις αφορούσαν εργοστάσια στη νοτιοανατολική Αμερική, με ήδη ολοκληρωμένα στάδια σχεδιασμού και

αδειοδότησης, υπό ευνοϊκές ρυθμιστικές συνθήκες. Η πλειοψηφία των ειδικών (13/16) υπολόγισε το κόστος κατασκευής από 4.100 έως 6.100 δολάρια ανά εγκατεστημένο κιλοβάτ. Συγκεκριμένα, στην εικόνα 23 γίνεται σύγκριση των κοστών πυρηνικών εγκαταστάσεων σε διάφορες χώρες που παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές.

Nuclear Power Cost Comparison

Average construction cost (inflation adjusted million GBP) per MW for all plants with reliable cost data built since 2000.

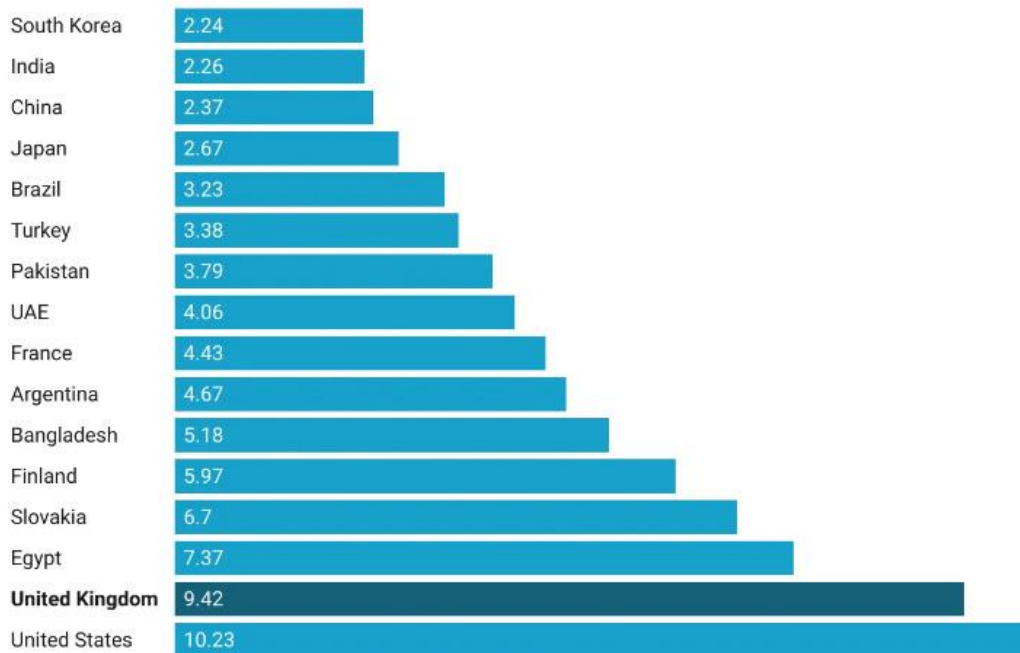


Chart: Britain Remade • Created with Datawrapper

Εικόνα 23- Το κόστος κεφαλαίου, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι τόκοι ή άλλες επιβαρύνσεις, για τη κατασκευή ενός πυρηνικού εργοστασίου σε διάφορες χώρες (Britain Remade, 2024)

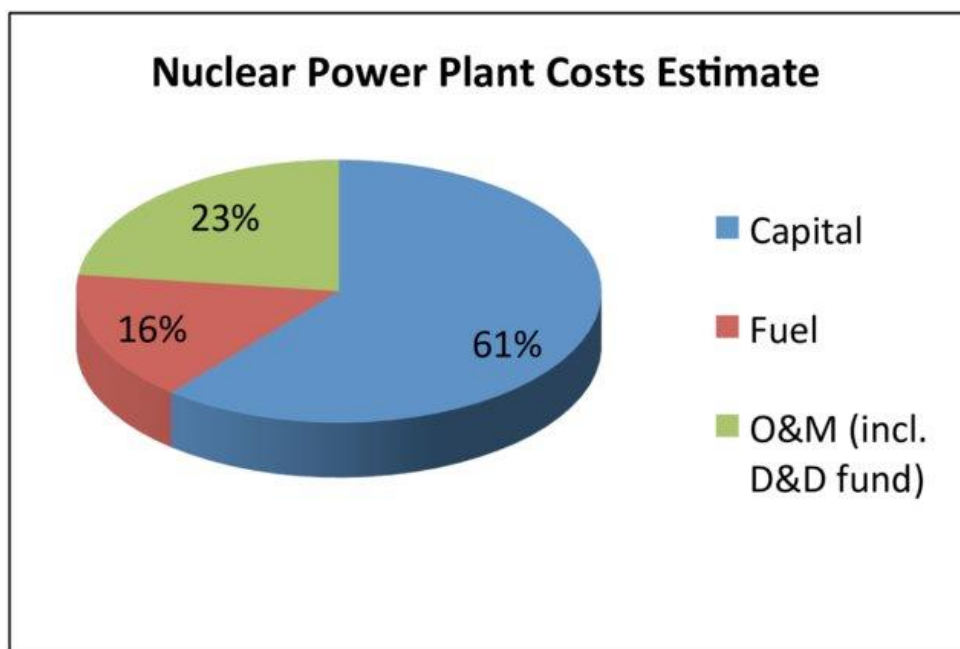
Λειτουργικά Κόστη

Για την ομαλή λειτουργία ενός πυρηνικού εργοστασίου, τα λειτουργικά κόστη παίζουν σημαντικό ρόλο στη βιωσιμότητα και την κοστολόγηση της παραγόμενης ενέργειας. Αυτά περιλαμβάνουν τα έξοδα για καύσιμα, λειτουργία και συντήρηση, καθώς και τη χρηματοδότηση του παροπλισμού και της διαχείρισης των αποβλήτων. Τα κόστη διακρίνονται σε πάγια, που υπάρχουν ανεξάρτητα από την παραγωγή ενέργειας, και μεταβλητά, που εξαρτώνται από την παραγόμενη ποσότητα. Το συνολικό κόστος λειτουργίας υπολογίζεται μέσω του εξισωμένου κόστους ενέργειας (LCOE), το οποίο εκφράζει την τιμή που πρέπει να έχει η ηλεκτρική ενέργεια ώστε το έργο να καλύπτει τα έξοδά του και να παραμένει βιώσιμο, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα κόστη, τον πληθωρισμό και το κόστος ευκαιρίας του κεφαλαίου (Kalvin Wang, 2018).

Τα λειτουργικά κόστη μιας πυρηνικής μονάδας περιλαμβάνουν το κόστος καυσίμου καθώς και τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης. Στα κόστη καυσίμου

συνυπολογίζονται η διαχείριση του χρησιμοποιημένου καυσίμου και η τελική διάθεση των αποβλήτων.

Το ποσοστό των δαπανών καυσίμου στο συνολικό κόστος διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την τεχνολογία παραγωγής ενέργειας. Οι πυρηνικοί σταθμοί χαρακτηρίζονται από υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης αλλά σχετικά χαμηλά έξοδα καυσίμου, ενώ το αντίθετο ισχύει για τις μονάδες φυσικού αερίου, όπου το κύριο κόστος προέρχεται από την προμήθεια καυσίμου. Συγκεκριμένα, τα κόστη μιας πυρηνικής εγκατάστασης υπολογίζονται ως εξής:



Εικόνα 24- Ανάλυση των ποσοστών κοστών, όπου το 61% καταλαμβάνει το κόστος κατασκευής, 23% τα λειτουργικά κόστη και κόστη συντήρησης και 16% τα κόστη καυσίμου (Sherrell Greene et al, 2009)

Τα χαμηλά έξοδα καυσίμου προσφέρουν στην πυρηνική ενέργεια ανταγωνιστικό πλεονέκτημα έναντι μονάδων άνθρακα και φυσικού αερίου, παρά το κόστος επεξεργασίας και διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων, που αντιστοιχεί περίπου στο 50% του κόστους καυσίμου (ΟΟΣΑ-NEA, 2020). Το κόστος ηλεκτροπαραγωγής των πυρηνικών μονάδων επηρεάζεται ελάχιστα από μεγάλες αυξομειώσεις στο κόστος καυσίμου, ενώ οι μονάδες φυσικού αερίου και άνθρακα είναι πιο ευαίσθητες σε αυτές τις διακυμάνσεις (ΟΟΣΑ-NEA, 2020). Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης κυμαίνεται μεταξύ 40% και 70% του συνολικού κόστους, με το O&M στις ΗΠΑ να βρίσκεται στο ανώτερο όριο (ΟΟΣΑ-NEA, 2020). Η γήρανση του εργατικού δυναμικού και η έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού αποτελούν σημαντικές προκλήσεις σε Ευρώπη, Βόρεια Αμερική και αναπτυσσόμενες οικονομίες (Kalvin Wang, Stanford). Η ανάγκη για συνεχείς αξιολογήσεις των πυρηνικών μονάδων και η εφαρμογή μη καταστροφικών δοκιμών (NDT) αυξάνονται, ώστε να μειωθούν οι κίνδυνοι «εκπλήξεων» κατά τις διακοπές λειτουργίας (Kalvin Wang, 2018). Η υλοποίηση on-line monitoring και συντήρησης βάσει πραγματικών συνθηκών βελτιώνει την ασφάλεια και μειώνει το κόστος (Kalvin Wang, Stanford). Επίσης, νέες

τεχνολογίες στα συστήματα ελέγχου και παρακολούθησης, όπως τα προγράμματα προληπτικής συντήρησης στο Palo Verde, οδηγούν σε σημαντικές οικονομίες και εξοικονόμηση άνω του 1 δισ. δολαρίων ετησίως. Η εξέλιξη προς τους αντιδραστήρες Gen IV απαιτεί λιγότερες και σύντομες διακοπές λειτουργίας, ενώ τα κόστη λειτουργίας έχουν μειωθεί σημαντικά μεταξύ 2012 και 2020, κυρίως λόγω βελτιώσεων στη διαχείριση και υπηρεσίες υποστήριξης (ΟΟΣΑ-NEA, 2020).

Εξωτερικά Κόστη

Τα εξωτερικά κόστη είναι οι δαπάνες που επιβαρύνουν την κοινωνία από τη λειτουργία των σταθμών παραγωγής ενέργειας, αλλά δεν περιλαμβάνονται στο κόστος λειτουργίας ή κατασκευής και δεν καλύπτονται από τους καταναλωτές (OECD, 2020). Στην περίπτωση της πυρηνικής ενέργειας, αυτά τα κόστη θεωρούνται συνήθως μηδενικά, καθώς οι φορείς λειτουργίας υποχρεούνται να εσωτερικεύουν το κόστος διαχείρισης αποβλήτων και αποξήλωσης (NEA, 2022). Ωστόσο, υπάρχει το ενδεχόμενο σοβαρού ατυχήματος, το οποίο υπερβαίνει την ασφαλιστική κάλυψη και θα πρέπει να καλυφθεί από το κράτος (IPPNW, 2019). Αντίθετα, η παραγωγή από ορυκτά καύσιμα δεν εσωτερικεύει το κόστος των εκπομπών ρύπων, με αποτέλεσμα τα εξωτερικά κόστη να επιβαρύνουν την κοινωνία συνολικά (WHO, 2018). Όταν συμπεριλαμβάνονται αυτά τα κόστη στις συγκρίσεις, ενισχύεται η ανταγωνιστικότητα της πυρηνικής ενέργειας και άλλων χαμηλών εκπομπών τεχνολογιών (IEA, 2021). Οι επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον από τα ορυκτά καύσιμα λειτουργούν ως έμμεσες επιδοτήσεις, ενώ η πυρηνική ενέργεια εσωτερικεύει τα περισσότερα από τα κόστη της, καθιστώντας τα εξωτερικά κόστη ελάχιστα (OECD, 2020). Συνολικά, η πλήρης αξιολόγηση του κοινωνικού κόστους απαιτεί την ενσωμάτωση αυτών των εξωτερικών παραγόντων στην ανάλυση κόστους-οφέλους των διαφόρων μορφών ενέργειας (NEA, 2022).



Εικόνα 25 – Σύγκριση των ποσοστών κόστους εργοστασίων παραγωγής ενέργειας από διάφορες μορφές. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα, σε αντίθεση με τις περιπτώσεις του φυσικού αερίου (*natural gas*) και του άνθρακα (*coal*), η πυρηνική ενέργεια παρουσιάζει πολύ μικρότερα κόστη καυσίμου (Dawson, 2017)

Λοιπά Κόστη

Τελευταίος σημαντικός παράγωντας στην οικονομική βιωσιμότητα ενός πυρηνικού εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα λοιπά κόστη που είναι πιθανό να προκύψουν. Για να διασφαλιστεί η αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτείται εφεδρική δυναμικότητα ώστε να καλύπτεται ο χρόνος εκτός λειτουργίας των σταθμών για ανεφοδιασμό ή συντήρηση, όπως και εφεδρική παραγωγή για διακοπές στη λειτουργία των διακοπτόμενων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, όταν οι καιρικές συνθήκες δεν επιτρέπουν τη λειτουργία τους. Επιπλέον, πρέπει να προβλέπεται και η μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας από το σημείο παραγωγής στο σημείο κατανάλωσης. Τα κόστη που προκύπτουν από την ανάγκη για εφεδρείες και μεταφορά ονομάζονται συστημικά κόστη.

Η ενσωμάτωση ενεργειακών τεχνολογιών στο δίκτυο συνεπάγεται συστημικά κόστη, τα οποία δεν περιλαμβάνονται στο κόστος κατασκευής ή λειτουργίας, αλλά επιβαρύνουν τον καταναλωτή μέσω των χρεώσεων δικτύου. Οι μονάδες σταθερής βάσης όπως η πυρηνική ενέργεια έχουν πολύ χαμηλότερα συστημικά κόστη (\$1–\$3/MWh), συγκριτικά με τις διακοπόμενες ανανεώσιμες (έως \$50/MWh), εξαιτίας της προβλεψιμότητας και της σταθερής παραγωγής τους.

Η υψηλή διεύθυνση ΑΠΕ μειώνει τη βιωσιμότητα των θερμικών μονάδων λόγω χαμηλότερης αξιοποίησης και ασταθών τιμών στην αγορά, ενώ η έλλειψη μακροπρόθεσμων συμβολαίων δημιουργεί επενδυτική αβεβαιότητα για τεχνολογίες με υψηλό αρχικό κόστος όπως η πυρηνική. Παρά το χαμηλό LCOE της πυρηνικής, η παραμόρφωση της αγοράς υπέρ των ΑΠΕ την καθιστά λιγότερο ανταγωνιστική. Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής καλούνται να διασφαλίσουν αξιόπιστο ενεργειακό εφοδιασμό, ενισχύοντας τις επενδύσεις σε σταθερή παραγωγή, είτε μέσω αγορών εφεδρείας είτε με συμβόλαια ισχύος.

3.1.2 Οικονομικά Οφέλη και Προκλήσεις

Η εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα δημιουργεί σημαντικά οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά προβλήματα, που καθιστούν την πυρηνική ενέργεια μια ελκυστική επιλογή για βιώσιμη και φιλική προς το κλίμα παραγωγή ενέργειας (MIT, 2018). Η πυρηνική ενέργεια προσφέρει συνεχή και ανεξάρτητη από περιβαλλοντικούς παράγοντες παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας με σχετικά χαμηλό κόστος καυσίμων. Ωστόσο, το υψηλό αρχικό κόστος κατασκευής, οι μακροχρόνιες περίοδοι κατασκευής και η αβεβαιότητα στο κόστος κεφαλαίου περιορίζουν τη διάδοση νέων αντιδραστήρων (MIT, 2018). Οι καθυστερήσεις στην κατασκευή, τα προβλήματα στην εφοδιαστική αλυσίδα και η έλλειψη εξειδικευμένης βιομηχανίας σε κάποιες χώρες δυσχεραίνουν την ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας (IEA, 2021).

Η πιθανότητα σοβαρού ατυχήματος, όπως αυτά στα Τσερνόμπιλ και Φουκουσίμα, έχει δημιουργήσει αρνητική δημόσια εικόνα, επηρεάζοντας αρνητικά την αποδοχή της πυρηνικής τεχνολογίας (IPPNW, 2019). Επιπλέον, η αναδιάρθρωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, με έμφαση στον ανταγωνισμό, έχει μεταφέρει τους οικονομικούς κινδύνους στους επενδυτές, που προτιμούν τεχνολογίες με χαμηλότερο αρχικό κόστος και μεγαλύτερη ευελιξία (OECD, 2020).

Η σύγκριση κόστους γίνεται πλέον με το εξισωμένο κόστος ενέργειας (LCOE), που περιλαμβάνει όλα τα έξοδα κατασκευής, λειτουργίας, καυσίμων, διαχείρισης αποβλήτων και αποξήλωσης (NEA, 2022). Τρεις παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά την οικονομική βιωσιμότητα της πυρηνικής ενέργειας: το άμεσο κόστος κατασκευής, η διάρκεια κατασκευής και το προεξοφλητικό επιτόκιο (IEA, 2021).

Παρά τις δυσκολίες, η τεχνολογική πρόοδος μπορεί να μειώσει τα κόστη και να διευκολύνει την ευρύτερη χρήση της πυρηνικής ενέργειας στο μέλλον (MIT, 2018). Ωστόσο, οι υψηλές τρέχουσες εκτιμήσεις κόστους από τις εταιρείες κοινής ωφέλειας και οι προειδοποιήσεις οργανισμών πιστοληπτικής ικανότητας υπογραμμίζουν τους οικονομικούς κινδύνους των νέων επενδύσεων (Moody's, 2020).

3.2 Ζητήματα Πυρηνικής Ασφάλειας

3.2.1 Διαχείριση Κινδύνων και Ατυχημάτων

Οι πυρηνικές μονάδες παραγωγής ενέργειας παράγουν μεγάλα ποσά ενέργειας με χαμηλό λειτουργικό κόστος και μικρές διακυμάνσεις στην παραγωγή, ενώ ο χαμηλός περιβαλλοντικός τους αντίκτυπος τις καθιστά βιώσιμη επιλογή (Wheatley et al, 2016). Παρόλα αυτά, ο κίνδυνος πυρηνικού ατυχήματος, που μπορεί να προκαλέσει σοβαρές υλικές, περιβαλλοντικές και υγειονομικές ζημιές, έχει οδηγήσει σε στιγματισμό και αποφυγή της τεχνολογίας (IAEA, 2023). Μελέτη έδειξε μείωση της συχνότητας ατυχημάτων από το 1952 και σταθεροποίηση σε πολύ χαμηλά επίπεδα μετά τη δεκαετία του 1970, ως αποτέλεσμα της βελτίωσης των πρωτοκόλλων ασφαλείας (Wheatley et al, 2016).

Ωστόσο, παρά τη μείωση σε αριθμό, η σοβαρότητα των ατυχημάτων αυξάνεται, με τα Τσερνόμπιλ και Φουκουσίμα να αντιπροσωπεύουν το 84% της συνολικής ζημίας (Wheatley et al., 2016). Η έλλειψη αξιόπιστων και πλήρων δεδομένων για όλα τα πυρηνικά συμβάντα, συμπεριλαμβανομένων των «παραλίγο» ατυχημάτων, δυσκολεύει την ακριβή εκτίμηση του κινδύνου και την ανάπτυξη αποτελεσματικών πρωτοκόλλων (IAEA, 2023).

Για την ελαχιστοποίηση των κινδύνων, εφαρμόζονται αυστηρά μέτρα ασφαλείας και πολυεπίπεδα συστήματα προστασίας, σχεδιασμένα να διαχειρίζονται ευρύ φάσμα καταστάσεων, ενώ οι χειριστές ακολουθούν κατευθυντήριες οδηγίες που υποστηρίζονται από τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (IAEA, 2023). Η αρχή της «Πολλαπλής Στρατηγικής Άμυνας» (Defence in Depth) εξασφαλίζει πολλαπλά επίπεδα προστασίας έναντι ανθρώπινων λαθών και εξωτερικών παραγόντων (IAEA, 2023).

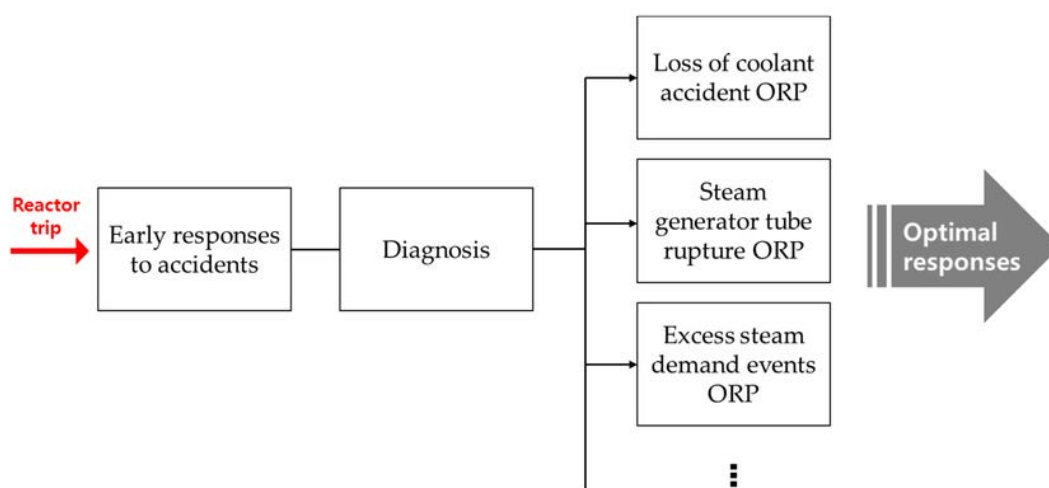
Παρά τη σπανιότητα σοβαρών ατυχημάτων, η συνεχής αναθεώρηση και βελτίωση των προγραμμάτων διαχείρισης κρίσεων και η συνεργασία των αρμόδιων φορέων είναι κρίσιμες για την ασφαλή λειτουργία των πυρηνικών σταθμών και την προστασία του πληθυσμού και του περιβάλλοντος (IAEA, 2023).

Οδηγίες Λειτουργίας Έκτακτης Ανάγκης

Οι Οδηγίες Λειτουργίας Έκτακτης Ανάγκης (Emergency Operation Plans EOPs), λειτουργούν ως πρόσθετο επίπεδο άμυνας έναντι ζημιών στον πυρήνα και καλύπτουν τόσο σχεδιασμένες καταστάσεις έκτακτης ανάγκης (Design Basis Accidents – DBAs) όσο και απρόβλεπτα περιστατικά (Beyond Design Basis Accidents – BDBAs). Περιλαμβάνουν τόσο διαδικασίες βασισμένες στο συμβάν όσο και στη φυσική κατάσταση του σταθμού. Ο IAEA έχει θεσπίσει πρότυπα ασφαλείας, με στόχο την προστασία της υγείας και τη μείωση των κινδύνων από την πυρηνική ενέργεια.

Οι διαδικασίες επείγουσας λειτουργίας (EOPs) αποτελούν κρίσιμο στοιχείο στην απόκριση των χειριστών των πυρηνικών σταθμών σε μη φυσιολογικές καταστάσεις.

Λειτουργούν ως πρόσθετη γραμμή άμυνας έναντι πιθανής βλάβης του πυρήνα μετά από απρόβλεπτες μεταβολές στη λειτουργία του αντιδραστήρα. Ο ΙΑΕΑ τονίζει την ανάγκη για σαφείς, συνοπτικές και επιβεβαιωμένες οδηγίες, οι οποίες καλύπτουν όχι μόνο τις τυπικές λειτουργικές συνθήκες αλλά και σχεδιασμένα και μη σχεδιασμένα ατυχήματα. Οι διαδικασίες αυτές διακρίνονται σε εξαρτώμενες από το σενάριο και ανεξάρτητες, με σκοπό την κάλυψη τόσο συγκεκριμένων συμβάντων όσο και γενικών λειτουργιών ασφαλείας, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα EOP που ακολουθεί.



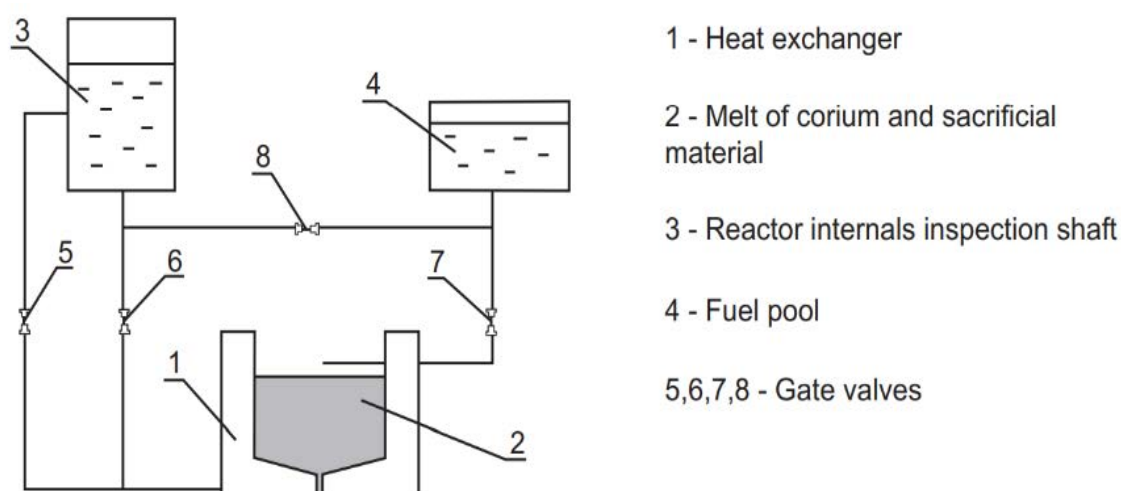
Εικόνα 26- Διάγραμμα επείγουσας λειτουργικής διαδικασίας (EOP), βάσει συμπτωμάτων δυσλειτουργίας, μετά τη καταγραφή (early response) και τη διάγνωση του προβλήματος (diagnosis), λαμβάνονται τα μέτρα που θεωρούνται κατάλληλα (Choi Jeonghun et al, 2020)

Η ανάπτυξη και εφαρμογή τους, βασίζεται είτε σε συμπτωματικές και καταστασιακές προσεγγίσεις και δοκιμάζονται μέσω αυστηρών διαδικασιών επιβεβαίωσης και επικύρωσης. Συγκεκριμένα, οι EOPs περιλαμβάνουν διαδικασίες για την έγχυση νερού στους ατμογεννήτριες (Steam Generator Injection) και στο κύριο ψυκτικό σύστημα του αντιδραστήρα (Reactor Coolant System Injection) προκειμένου να αποτραπεί η υπερθέρμανση του πυρήνα. Η συμμόρφωση με τις διεθνείς προδιαγραφές ασφαλείας, όπως αυτές που ορίζονται από τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ), διασφαλίζει ότι οι EOPs ανταποκρίνονται στις σύγχρονες απαιτήσεις για την προστασία του προσωπικού, του πληθυσμού και του περιβάλλοντος.

Οδηγίες Διαχείρισης Σοβαρών Ατυχημάτων

Οι Οδηγίες Διαχείρισης Σοβαρών Ατυχημάτων (Severe Accident Guidelines – SAGs) Οι Severe Accident Management Guidelines (SAMGs) είναι κατευθυντήριες οδηγίες που εφαρμόζονται σε περίπτωση σοβαρού ατυχήματος σε έναν πυρηνικό σταθμό, όταν οι Διαδικασίες Επείγουσας Λειτουργίας (EOPs) δεν επαρκούν για την αποτροπή ζημιάς στον πυρήνα του αντιδραστήρα. Έχουν στόχο την αποτροπή ζημιάς στον πυρήνα, τη

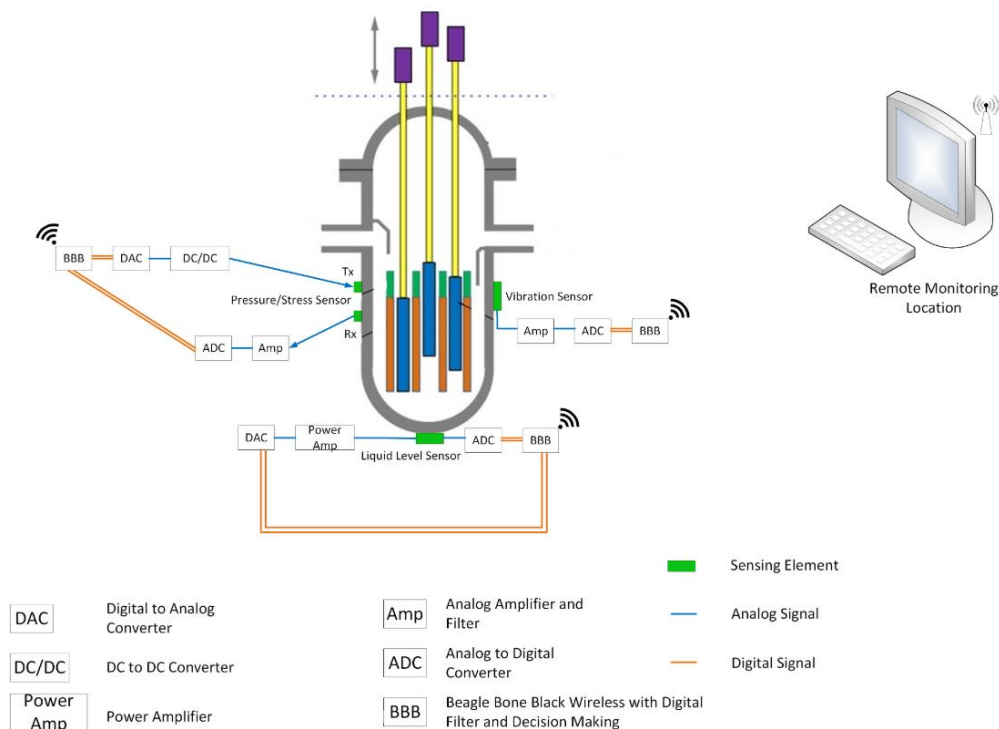
διακοπή της εξέλιξης της ζημιάς και τη διατήρηση του πυρήνα εντός του δοχείου του αντιδραστήρα, τη διατήρηση της ακεραιότητας του κελύφους περιορισμού για όσο το δυνατόν περισσότερο και τον περιορισμό των εκπομπών στο περιβάλλον (Jaehyun Cho et al, 2022). Οι οδηγίες αυτές βασίζονται σε διαγνωστικά διαγράμματα ροής (Diagnostic Flowcharts - DFCs), τα οποία καθοδηγούν το προσωπικό του Κέντρου Ελέγχου (MCR - Main Control Room) και του Τεχνικού Κέντρου Υποστήριξης (TSC - Technical Support Center) στη λήψη των κατάλληλων μέτρων. Οι κύριες στρατηγικές των SAMGs περιλαμβάνουν την έγχυση νερού στις ατμογεννήτριες και στο κύριο ψυκτικό σύστημα, την αποσυμπίεση του πρωτεύοντος κυκλώματος μέσω της εκτόνωσης πίεσης, την ψύξη του περιβλήματος, τον έλεγχο των συνθηκών συγκράτησης και του υδρογόνου στο κέλυφος περιορισμού, καθώς και τη μείωση της απελευθέρωσης προϊόντων σχάσης (Nan Zhao et al, 2022). Οι SAMGs διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διαχείριση καταστάσεων που ξεπερνούν τα όρια σχεδιασμού του αντιδραστήρα, βοηθώντας στην προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας.



Εικόνα 27- Σύστημα έκτακτης χρήσης νερού από φρεάτιο ελέγχου (Sehgal, B.R., 2012.)

Όργανα Μέτρησης και Παρακολούθησης

Τα όργανα μέτρησης και παρακολούθησης είναι κρίσιμα συστήματα που χρησιμοποιούνται στους πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας για τη συνεχή καταγραφή και αξιολόγηση σημαντικών παραμέτρων λειτουργίας. Ένας πυρηνικός σταθμός παραγωγής ενέργειας (Nuclear Power Plant) περιλαμβάνει χιλιάδες εξαρτήματα και συστήματα, όπως κινητήρες, αντλίες και βαλβίδες, τα οποία πρέπει να λειτουργούν με απόλυτο συντονισμό. Ο συντονισμός αυτός επιτυγχάνεται μέσω των συστημάτων οργάνων και ελέγχου (I&C - Instrumentation and Control), τα οποία επιτρέπουν στο προσωπικό να παρακολουθεί την κατάσταση του σταθμού, να βελτιώνει την απόδοση του εξοπλισμού και να προβλέπει και διαχειρίζεται πιθανά προβλήματα. Ο βασικός ρόλος αυτών των συστημάτων είναι να διασφαλίζουν την αξιόπιστη λειτουργία του πυρηνικού σταθμού μέσω του ελέγχου των διεργασιών του. Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν αισθητήρες, ανιχνευτές, αναλυτές και άλλες συσκευές που παρακολουθούν φυσικές και χημικές μεταβλητές, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, τα επίπεδα ραδιενέργειας, η στάθμη του νερού στους αντιδραστήρες και η συγκέντρωση αερίων και αποτελούν το Κεντρικό Νευρικό Σύστημα ενός Πυρηνικού Σταθμού ή I&C (IAEA, 2023). Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ένα σύστημα ενσωματωμένων αισθητήρων υψηλής θερμοκρασίας για απομακρυσμένη παρακολούθηση συστημάτων αντιδραστήρα και κύκλου καυσίμου



Εικόνα 28- Σύστημα ενσωματωμένων αισθητήρων υψηλής θερμοκρασίας για απομακρυσμένη παρακολούθηση συστημάτων αντιδραστήρα και κύκλου καυσίμου (NC State University)

Η αρχιτεκτονική του συστήματος I&C, σε συνδυασμό με το προσωπικό λειτουργίας του σταθμού, λειτουργεί ως το «κεντρικό νευρικό σύστημα» του πυρηνικού σταθμού. Μέσω των επιμέρους στοιχείων του, όπως αισθητήρες, πομποί, κινητήρες και βαλβίδες, το σύστημα αυτό ανιχνεύει και παρακολουθεί κρίσιμες παραμέτρους του σταθμού, ενσωματώνει πληροφορίες και πραγματοποιεί αυτόματες προσαρμογές στη λειτουργία του σταθμού όταν απαιτείται. Παράλληλα, αντιδρά σε βλάβες και ανωμαλίες, συμβάλλοντας στην αποδοτική παραγωγή ενέργειας και στην ενίσχυση της ασφάλειας.

Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στον σχεδιασμό, τις δοκιμές, τη συντήρηση, την αδειοδότηση και τον εκσυγχρονισμό αυτών των συστημάτων. Καθώς πολλοί πυρηνικοί σταθμοί επεκτείνουν τη διάρκεια ζωής τους, η συντήρηση παλαιωμένων ή απαρχαιωμένων εξαρτημάτων μπορεί να μην είναι οικονομικά συμφέρουσα. Για τον λόγο αυτό, η βιομηχανία πυρηνικής ενέργειας αντικαθιστά σταδιακά τα αναλογικά συστήματα I&C με ψηφιακά, τόσο σε υφιστάμενους όσο και σε νέους σταθμούς. Αυτά τα προηγμένα συστήματα βελτιώνουν τη συνολική απόδοση, αυξάνουν την ασφάλεια και ενισχύουν την οικονομική αποδοτικότητα των πυρηνικών εγκαταστάσεων. Αναγνωρίζοντας τη σημασία των συστημάτων I&C για την ασφάλεια και την οικονομική απόδοση των πυρηνικών σταθμών, ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ) διευκολύνει την ανταλλαγή γνώσεων και εμπειριών μέσω συνεδρίων, τεχνικών συναντήσεων, εκπαιδευτικών σεμιναρίων και ερευνητικών προγραμμάτων. Παράλληλα, αναπτύσσει κατευθυντήριες οδηγίες και τεχνικές δημοσιεύσεις σχετικά με διάφορες πτυχές των συστημάτων I&C.

Εκπαίδευση και Ασκήσεις

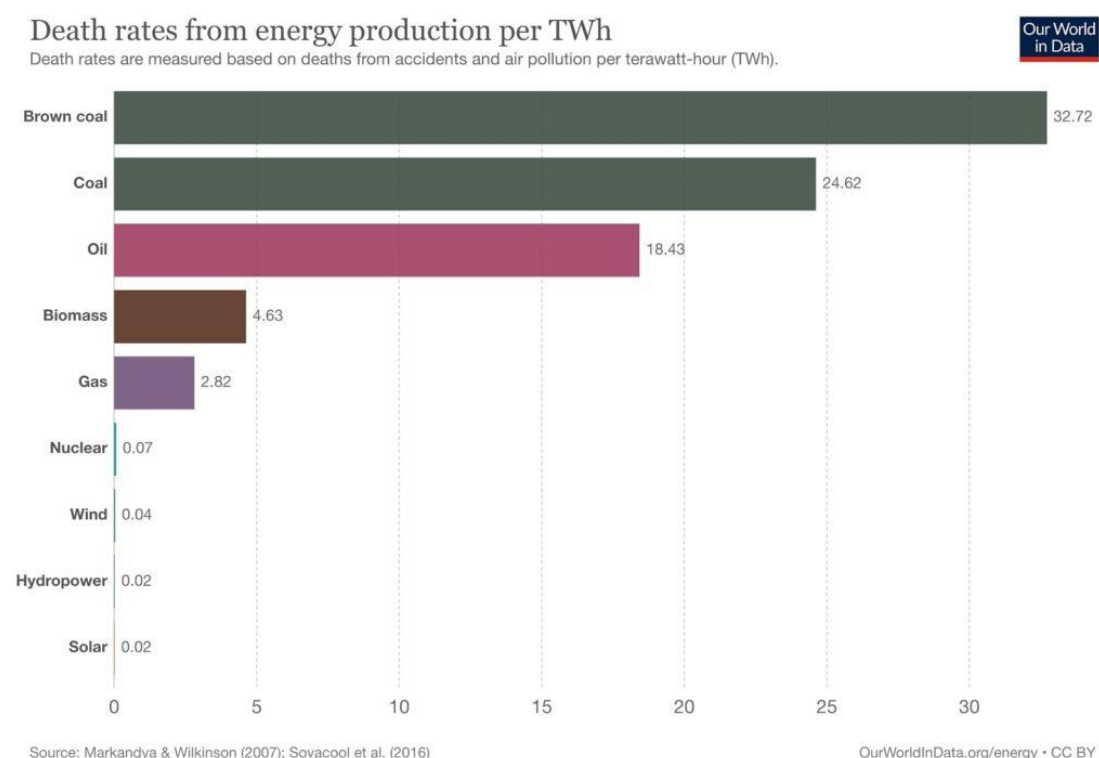
Η συνεχής εκπαίδευση και οι τακτικές ασκήσεις αποτελούν ακρογωνιαίο λίθο για την αποτελεσματική διαχείριση πυρηνικών ατυχημάτων. Οι εκπαιδευτικές διαδικασίες είναι σχεδιασμένες ώστε να καλύπτουν τόσο τη συμπεριφορά των χειριστών υπό συνθήκες πίεσης όσο και την επιστημονική κατανόηση των φυσικών φαινομένων που σχετίζονται με τα σοβαρά ατυχήματα. Η εκπαίδευση βασίζεται σε δύο άξονες: την εκπαίδευση δεξιοτήτων (skill-oriented training), η οποία βοηθά το προσωπικό να ανταποκρίνεται σε απρόβλεπτες και στρεσογόνες καταστάσεις, και την εκπαίδευση γνώσεων (knowledge-based training), που ενισχύει την κατανόηση των τεχνικών και φυσικών διαδικασιών ενός πυρηνικού ατυχήματος. Επιπλέον, οργανώνονται συστηματικές ασκήσεις, κατά τις οποίες ελέγχεται η ετοιμότητα των ομάδων έκτακτης ανάγκης, η αποτελεσματικότητα της συνεργασίας μεταξύ τοπικών και εθνικών φορέων, καθώς και η επικοινωνία με το κοινό και τις αρμόδιες αρχές (ΙΑΕΑ, 2023).

3.2.2 Προληπτικά Μέτρα και Πολιτικές Ασφάλειας

Η πυρηνική ενέργεια αποτελεί μια από τις σημαντικότερες πηγές ηλεκτροπαραγωγής παγκοσμίως, καθώς προσφέρει υψηλή απόδοση και χαμηλές εκπομπές ρύπων. Ωστόσο,

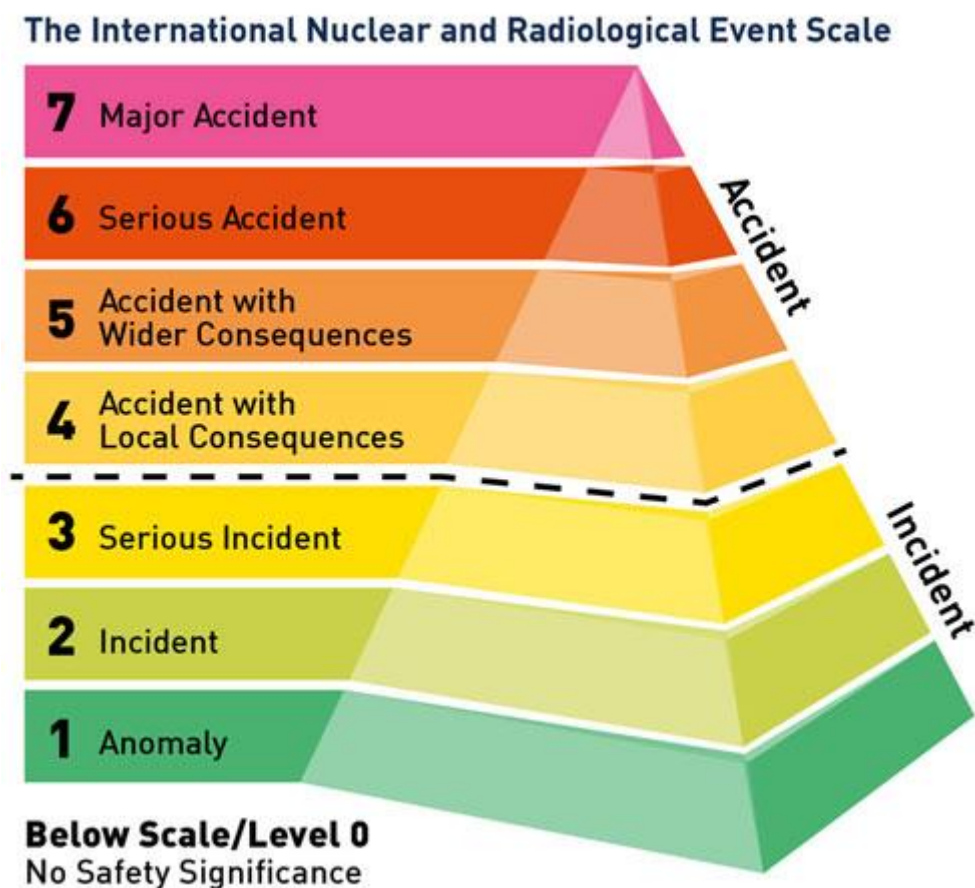
η χρήση της απαιτεί αυστηρά προληπτικά μέτρα και εξειδικευμένες πολιτικές ασφάλειας, ώστε να διασφαλιστεί η προστασία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος (World Nuclear Association, 2025). Οι διεθνείς οργανισμοί, οι εθνικές ρυθμιστικές αρχές και οι πυρηνικές βιομηχανίες εφαρμόζουν προηγμένα συστήματα ασφαλείας, παρακολούθησης και διαχείρισης κινδύνων, προκειμένου να αποτρέψουν ατυχήματα και να διαχειριστούν πιθανές καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Καμία βιομηχανία δεν είναι απαλλαγμένη από ατυχήματα, όμως όλες μαθαίνουν από αυτά. Στην περίπτωση της πυρηνικής ενέργειας, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα καθιστά εμφανή την πιθανή επικινδυνότητα, γεγονός που έχει ληφθεί υπόψη από τον σχεδιασμό των πυρηνικών σταθμών. Τα λίγα πυρηνικά ατυχήματα που έχουν σημειωθεί υπήρξαν εντυπωσιακά και προσέλκυσαν την προσοχή των μέσων ενημέρωσης, ωστόσο είχαν ελάχιστες επιπτώσεις σε ανθρώπινες απώλειες. Σε αντίθεση με άλλα βιομηχανικά ατυχήματα, που λαμβάνουν περιορισμένη δημοσιότητα, τα πυρηνικά ατυχήματα συνεχίζουν να διατηρούν υψηλή ειδησεογραφική αξία λόγω της σχετικής καινοτομίας και της δημόσιας ευαισθητοποίησης (World Nuclear Association, 2025). Η πυρηνική ενέργεια είναι συχνά συνδεδεμένη με υψηλό κίνδυνο ατυχημάτων, μόλυνσης ή ακόμα και θανάτων, κυρίως λόγω προηγούμενων παρόμοιων περιστατικών, σύμφωνα όμως με το παρακάτω διάγραμμα η πυρηνική ενέργεια είναι πολύ πιο ασφαλής από άλλες πηγές.



Εικόνα 29- Περιστατικά θανάτων στις βιομηχανίες ενέργειας, τα μεγαλύτερα ποσοστά παρατηρούνται στα ορυκτά καύσιμα ενώ η πυρηνική ενέργεια σημειώνει ποσοστό 0,07% (Idaho National Laboratory, 2023)

Η τήξη του πυρήνα ενός πυρηνικού αντιδραστήρα αποτελεί ένα σοβαρό σενάριο ατυχήματος, το οποίο έχει μελετηθεί εκτενώς για τις φυσικές, χημικές και βιολογικές του επιπτώσεις. Στη Δύση, έχουν γίνει μεγάλες προσπάθειες για την αποτροπή τέτοιων ατυχημάτων, καθώς θεωρείται ότι μπορούν να προκαλέσουν σοβαρούς κινδύνους για τη δημόσια ασφάλεια. Παρά τους κινδύνους, η βιομηχανία της πυρηνικής ενέργειας έχει καταφέρει να διατηρήσει υψηλά επίπεδα ασφάλειας, με μόλις τρία σοβαρά ατυχήματα σε πάνω από 60 χρόνια λειτουργίας και 18.500 σωρευτικά έτη αντιδραστήρων (World Nuclear Association, 2025).



Εικόνα 30 – Διεθνής κλίμακα αξιολόγησης της σοβαρότητας πυρηνικών ατυχημάτων. Τα γεγονότα μεγαλύτερης σημασίας για την ασφάλεια ονομάζονται ατυχήματα και τα γεγονότα μικρότερης σημασίας ονομάζονται συμβάντα (NRC, 2017)

Σχεδιασμός και Τεχνολογία Αντιδραστήρων

Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, οι απαιτήσεις κατασκευής, συντήρησης και λειτουργίας των πυρηνικών μονάδων αναβαθμίζονται συνεχώς, με στόχο την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εξάλειψη της πιθανότητας πυρηνικού ατυχήματος. Η βιομηχανία της πυρηνικής ενέργειας συνεχίζει να εργάζεται εντατικά για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας ενός ατυχήματος τήξης πυρήνα, ωστόσο, είναι πλέον σαφές ότι μια τέτοια τήξη δεν συνεπάγεται απαραίτητα μια καταστροφική κρίση δημόσιας υγείας. Το ατύχημα στη Φουκουσίμα το 2011 επιβεβαίωσε αυτήν την άποψη, καθώς παρά τις τρεις

τήξεις πυρήνα, δεν υπήρξαν θάνατοι ή σοβαρές δόσεις ακτινοβολίας, ενώ εκατοντάδες εργαζόμενοι παρέμειναν στο σημείο για να περιορίσουν τις επιπτώσεις. Σημαντικός είναι επίσης ο ρόλος της τεχνολογικής εξέλιξης και σχεδιασμού των πυρηνικών αντιδραστήρων, όπως φαίνεται και στην εικόνα 31, καθώς τα νέα και σύγχρονα μοντέλα διασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία των πυρηνικών εγκαταστάσεων.



Εικόνα 31- Κατασκευή νέου μοντέλου πυρηνικού αντιδραστήρα με εξελεγμένο σχέδιο (MIT, 2024)

Έρευνες πολλών δεκαετιών έδειξαν ότι διαφεύγει λιγότερη ραδιενέργεια από λιωμένο καύσιμο απ' ό,τι αρχικά υποτίθετο, καθώς το μεγαλύτερο μέρος του ραδιενεργού υλικού παραμένει εντός των εσωτερικών δομών. Ακόμη και αν διαρραγεί η κατασκευαστική θωράκιση των αντιδραστήρων, όπως συνέβη στη Φουκουσίμα, η εκπομπή ραδιενέργειας είναι περιορισμένη. Οι κανονισμοί ασφαλείας απαιτούν συγκεκριμένα πρότυπα για τη θεωρητική πιθανότητα βλάβης πυρήνα, με τα σύγχρονα σχέδια αντιδραστήρων να επιτυγχάνουν ιδιαίτερα χαμηλές πιθανότητες τέτοιων ατυχημάτων (World Nuclear Association, 2025).

Το ατύχημα του Three Mile Island το 1979 αρχικά θεωρήθηκε ότι δεν περιλάμβανε τήξη πυρήνα, καθώς δεν υπήρχαν ενδείξεις σοβαρής ακτινοβολίας, αλλά αργότερα αποκαλύφθηκε ότι είχε λιώσει περίπου το μισό του πυρήνα. Στη Φουκουσίμα, οι τρεις αντιδραστήρες υπέστησαν τήξη μέσα σε λίγες ημέρες, με διαφυγή ραδιενεργών στοιχείων, κυρίως ιωδίου και καυσίου, στο περιβάλλον. Αν και η ακριβής έκταση της διαρροής δεν έχει ακόμη πλήρως καθοριστεί, το ατύχημα αυτό κατέδειξε ότι ορισμένα σχέδια αντιδραστήρων δεν μπορούν να αποτρέψουν πλήρως την εξωτερική έκθεση σε ακτινοβολία σε περίπτωση τήξης πυρήνα.

Παρά τα ατυχήματα στο Τσερνόμπιλ και τη Φουκουσίμα, ο πυρηνικός τομέας έχει επιτύχει σημαντική πρόοδο στην ασφάλεια, με τους νέους αντιδραστήρες να απαιτούν περιορισμό των επιπτώσεων της τήξης μόνο εντός των εγκαταστάσεων, χωρίς την

ανάγκη εκκένωσης κατοίκων. Η κύρια ανησυχία παραμένει η ανεξέλεγκτη διαρροή ραδιενεργών υλικών, αλλά οι σύγχρονες μελέτες δείχνουν ότι ακόμη και σοβαρά ατυχήματα είναι απίθανο να οδηγήσουν σε εκτεταμένη καταστροφή (World Nuclear Association, 2025).

Συστήματα Έκτακτης Ανάγκης

Για το ενδεχόμενο να παρουσιαστεί κάποιο πρόβλημα ή κάποια επιπλοκή που ξεπερνά τα μέτρα και κανόνες ασφαλείας, οι πυρηνικοί σταθμοί διατηρούν πρωτόκολλα αντιμετώπισης των κρίσεων. Ανάλογα με τη κρισιμότητα της κατάστασης μπαίνουν σε εφαρμογή οι Οδηγίες Λειτουργίας Έκτακτης Ανάγκης (EOPs) ή οι κατευθυντήριες οδηγίες για τη διαχείριση και τον μετριασμό σοβαρών ατυχημάτων (SAMG). Αυτές οι οδηγίες τέθηκαν σε εφαρμογή μετά το ατύχημα στη Φουκουσίμα, όπου το προσωπικό αντιμετώπισε σοβαρές προκλήσεις λόγω της έλλειψης ηλεκτρικής ισχύος και της αδυναμίας λειτουργίας των συστημάτων ψύξης μετά το χτύπημα του τσουνάμι. Σύμφωνα με τη Παγκόσμια Πυρηνική Ένωση, τα διδάγματα από το ατύχημα εφαρμόζονται πλέον όχι μόνο στον σχεδιασμό των αντιδραστήρων, αλλά και στη βελτίωση αυτών των κατευθυντήριων οδηγιών, ενώ οι αξιολογήσεις από ομοτίμους δίνουν μεγαλύτερη έμφαση σε αυτές (IAEA, 2011).

Το 2011, το Κέντρο Συμβάντων και Έκτακτης Ανάγκης της Διεθνούς Υπηρεσίας Ατομικής Ενέργειας (IAEA) εγκαινίασε μια διαδικτυακή πλατφόρμα επικοινωνίας, το Ενοποιημένο Σύστημα Ανταλλαγής Πληροφοριών για Συμβάντα και Έκτακτες Καταστάσεις (USIE), για την απλούστευση και τον συντονισμό της ανταλλαγής πληροφοριών κατά τη διάρκεια πυρηνικών ή ραδιολογικών καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Το σύστημα αυτό βρισκόταν υπό ανάπτυξη από το 2009, αλλά τέθηκε σε λειτουργία κατά τη διάρκεια της αντίδρασης στο ατύχημα της Φουκουσίμα. Τόσο στο ατύχημα του Three Mile Island (TMI) το 1979 όσο και σε εκείνο της Φουκουσίμα το 2011, τα προβλήματα ξεκίνησαν αφού οι αντιδραστήρες είχαν τεθεί εκτός λειτουργίας. Στο TMI, τα προβλήματα εμφανίστηκαν αμέσως, ενώ στη Φουκουσίμα ξεκίνησαν μία ώρα αργότερα, όταν το τσουνάμι κατέστρεψε τις γεννήτριες εφεδρικής ισχύος. Και στις δύο περιπτώσεις, η αδυναμία απομάκρυνσης της υπολειμματικής θερμότητας από τον πυρήνα οδήγησε σε μερική τήξη του καυσίμου μέσα σε λίγες ώρες. Για την ψύξη απαιτείται κυκλοφορία νερού και ένας εξωτερικός θερμικός αποδέκτης. Εάν οι αντλίες δεν λειτουργούν λόγω διακοπής ρεύματος, μπορεί να βασιστεί κανείς στη βαρύτητα, αλλά αυτό δεν είναι αρκετό για να διοχετεύσει το νερό σε ένα σύστημα υπό πίεση. Για αυτόν τον λόγο, υπάρχει πρόβλεψη για μείωση της πίεσης, μέσω συστήματος εξαερισμού, το οποίο όμως πρέπει να λειτουργεί και να ελέγχεται ακόμη και χωρίς ηλεκτρική ισχύ.

Μετά το ατύχημα της Φουκουσίμα, πολλοί αντιδραστήρες εξοπλίστηκαν με φίλτρα εξαερισμού του περιβλήματος (FCVS), τα οποία εμποδίζουν την καταστροφική αστοχία της κατασκευής συγκράτησης, επιτρέποντας την εκτόνωση ατμού, αέρα και αερίων, όπως το υδρογόνο, στην ατμόσφαιρα με ελάχιστη διαρροή ραδιενεργών

υλικών. Το ατύχημα του Three Mile Island ανέδειξε τη σημασία των εγγενών χαρακτηριστικών ασφαλείας. Παρά την τήξη περίπου του μισού πυρήνα του αντιδραστήρα, τα ραδιενεργά υλικά συγκρατήθηκαν κυρίως στο εσωτερικό του συστήματος ή διαλύθηκαν σε συμπυκνωμένο ατμό, ενώ το περίβλημα του αντιδραστήρα αποδείχθηκε αποτελεσματικό στην αποτροπή σημαντικής διαρροής. Το ατύχημα αποδόθηκε σε μηχανική αστοχία και σε λανθασμένες ενέργειες των χειριστών. Ως αποτέλεσμα, η εκπαίδευση των χειριστών αναβαθμίστηκε σημαντικά, ενώ βελτιώθηκαν και τα συστήματα ελέγχου και μέτρησης.

Τα περισσότερα πυρηνικά εργοστάσια διαθέτουν Κατευθυντήριες Οδηγίες Μετριασμού Σοβαρών Ατυχημάτων (SAMG), οι οποίες καλύπτουν καταστάσεις που υπερβαίνουν το αρχικό πλαίσιο σχεδιασμού και περιλαμβάνουν σενάρια όπου πολλά συστήματα ασφαλείας ενδέχεται να έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας (IAEA, 2009).

Το 2007, η Αμερικανική Επιτροπή Ρυθμιστικού Ελέγχου Πυρηνικής Ενέργειας (NRC) ξεκίνησε ένα ερευνητικό πρόγραμμα για την αξιολόγηση των πιθανών συνεπειών ενός σοβαρού πυρηνικού ατυχήματος. Η έκθεση που δημοσιεύθηκε έναν χρόνο μετά το ατύχημα στη Φουκουσίμα επιβεβαίωσε ότι ένα σοβαρό ατύχημα σε έναν αμερικανικό πυρηνικό σταθμό δεν θα προκαλούσε άμεσους θανάτους, ενώ ο κίνδυνος θανατηφόρων καρκίνων θα ήταν ελάχιστος σε σχέση με τον γενικό κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου στον πληθυσμό. Σύμφωνα με την ανάλυση, ακόμη και αν ένα ατύχημα εξελισσόταν χωρίς μετριαστικά μέτρα, θα υπήρχε αρκετός χρόνος για αντίδραση, κάτι που αποδείχθηκε στη Φουκουσίμα, όπου υπήρξε περιθώριο τριών ημερών για εκκένωση πριν από σημαντικές διαρροές ραδιενέργειας.

Το 2015, η Καναδική Επιτροπή Πυρηνικής Ασφάλειας (CNSC) δημοσίευσε μελέτη σχετικά με τις συνέπειες ενός υποθετικού σοβαρού πυρηνικού ατυχήματος και την αποτελεσματικότητα των μέτρων μετριασμού. Η έρευνα διεξήχθη μετά από ανησυχίες που εκφράστηκαν κατά τις δημόσιες ακροάσεις του 2012 για την περιβαλλοντική αξιολόγηση της ανακαίνισης του πυρηνικού σταθμού Darlington στο Οντάριο. Η μελέτη προσομοίωσε μια μεγάλη ατμοσφαιρική διαρροή ραδιενεργών ουσιών και ανέλυσε τις πιθανές δόσεις ακτινοβολίας σε διαφορετικές αποστάσεις, λαμβάνοντας υπόψη μέτρα προστασίας όπως η εκκένωση. Τα αποτελέσματα κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι δεν θα υπήρχαν ανιχνεύσιμες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία ή αύξηση του κινδύνου καρκίνου.

Συνεχής Παρακολούθηση και Έλεγχος

Κάθε πυρηνικός σταθμός, απαρτίζεται από έμπειρο προσωπικό με γνώσεις σωστού χειρισμού του εξοπλισμού και των λειτουργιών του εργοστασίου. Τα καθήκοντά τους περιλαμβάνουν τη διεξαγωγή συχνών δοκιμών και τεστ, έτσι ώστε να είναι ικανοί να διαχειριστούν ένα πιθανό σοβαρό περιστατικό, αλλά και τυχόν ανωμαλίες στη λειτουργία του συστήματος. Ιδιαίτερα μετά το πυρηνικό ατύχημα στη Φουκουσίμα, το 2011, τα μέτρα ασφαλείας αλλά και οι ενδεδειγμένοι έλεγχοι αυξήθηκαν, καθώς η

Ευρωπαϊκή Ένωση προχώρησε σε εκτεταμένες αξιολογήσεις της ασφάλειας των πυρηνικών σταθμών της, γνωστές ως «δοκιμές καταπόνησης». Αυτές οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν από τον Ιούνιο του 2011 έως τον Απρίλιο του 2012 και εξέτασαν την αντοχή των αντιδραστήρων σε ακραία φυσικά φαινόμενα, όπως σεισμοί και πλημμύρες, καθώς και την ικανότητά τους να διαχειριστούν απώλειες ηλεκτρικής ισχύος και σοβαρά ατυχήματα. Η διαδικασία κινητοποίησε 500 ανθρωποέτη τεχνογνωσίας και εποπτεύθηκε από τις εθνικές ρυθμιστικές αρχές σε συνεργασία με την Ευρωπαϊκή Ομάδα Ρυθμιστών Πυρηνικής Ασφάλειας. Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε 147 πυρηνικούς αντιδραστήρες σε 15 χώρες της ΕΕ, καθώς και σε 15 αντιδραστήρες στην Ουκρανία και 5 στην Ελβετία. Επιπλέον, επτά χώρες εκτός ΕΕ (Αρμενία, Λευκορωσία, Κροατία, Ρωσία, Ελβετία, Τουρκία, Ουκρανία) υιοθέτησαν το ευρωπαϊκό μοντέλο αξιολόγησης. Η διαδικασία περιλάμβανε ανάλυση ακραίων σεναρίων, όπου τα συστήματα ασφαλείας θεωρούνταν σταδιακά εκτός λειτουργίας, ώστε να εξεταστούν τα όρια αντοχής κάθε αντιδραστήρα. Τα αποτελέσματα των αξιολογήσεων έδειξαν ότι οι ευρωπαϊκοί πυρηνικοί σταθμοί διέθεταν ικανοποιητικό επίπεδο ασφαλείας, χωρίς να απαιτείται άμεση διακοπή λειτουργίας κάποιου αντιδραστήρα, ωστόσο επισημάνθηκαν ανάγκες βελτίωσης στην εκτίμηση φυσικών κινδύνων, στην περιοδική αναθεώρηση της ασφάλειας, στην προστασία της ακεραιότητας των αντιδραστήρων και στην πρόληψη και διαχείριση ατυχημάτων από ακραία φυσικά φαινόμενα (European Nuclear Safety Regulators Group, 2011).

Οι αξιολογήσεις οδήγησαν στη διαμόρφωση ενός ευρωπαϊκού σχεδίου δράσης για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των πυρηνικών εγκαταστάσεων. Στις ΗΠΑ, η Ρυθμιστική Επιτροπή Πυρηνικών (NRC) απαίτησε το 2012 την εφαρμογή άμεσων βελτιώσεων ασφαλείας, με συνολικό κόστος περίπου 100 εκατομμυρίων δολαρίων, ενώ στην Ιαπωνία η επανεκκίνηση αντιδραστήρων καθυστέρησε έως ότου εφαρμοστούν αυστηρότερα πρότυπα ασφαλείας. Η διαδικασία στην ΕΕ ολοκληρώθηκε το 2012, με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή να επιβεβαιώνει την επάρκεια των ευρωπαϊκών πυρηνικών σταθμών, ενώ παράλληλα τόνισε την ανάγκη για περαιτέρω βελτιώσεις και συνεχή επαγρύπνηση στον τομέα της πυρηνικής ασφάλειας (World Nuclear Association, 2025).

3.3 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις της πυρηνικής ενέργειας

3.3.1 Συγκριτική Ανάλυση με Συμβατικές Τεχνολογίες

Σε θεμελιώδες επίπεδο, η ανταγωνιστική θέση της πυρηνικής ενέργειας από την οπτική της βιώσιμης ανάπτυξης είναι ισχυρή, λόγω της υψηλής ενεργειακής της πυκνότητας και της εσωτερίκευσης του κόστους για την υγεία και το περιβάλλον. Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας προσφέρει πλεονεκτήματα ως προς τη βιωσιμότητα σε σύγκριση με άλλες διαθέσιμες επιλογές, γεγονός που εξηγεί τον διευρυνόμενο ρόλο της σε σχεδόν όλες τις βασικές μελέτες που χαρτογραφούν ρεαλιστικές πορείες προς ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον. Η ανάλυση των χαρακτηριστικών της πυρηνικής ενέργειας μέσα από το πρίσμα της βιώσιμης ανάπτυξης δείχνει ότι η στρατηγική που ακολουθείται

στον τομέα αυτό συνάδει με τον βασικό στόχο της βιώσιμης ανάπτυξης: τη μεταβίβαση πολύτιμων πόρων στις επόμενες γενιές, με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και επιβαρύνσεων (World Nuclear Association, 2014).

Εναέριοι ρύποι

Η σύγκριση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος διαφόρων πηγών ενέργειας αποτελεί κρίσιμο ζήτημα στο πλαίσιο της παγκόσμιας προσπάθειας για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την επίτευξη βιώσιμης ανάπτυξης. Ένας από τους βασικότερους δείκτες αξιολόγησης της περιβαλλοντικής απόδοσης των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και άλλων αερίων του θερμοκηπίου. Αν και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή, συχνά θεωρούνται "καθαρές", το συνολικό αποτύπωμα τους πρέπει να εκτιμηθεί μέσα από μια ολιστική προσέγγιση που περιλαμβάνει τον πλήρη κύκλο ζωής της τεχνολογίας. Στον αντίποδα, η πυρηνική ενέργεια, αν και αμφιλεγόμενη, παρουσιάζει ιδιαίτερα χαμηλές εκπομπές CO₂ σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα και πολλές μορφές ΑΠΕ, καθιστώντας την έναν αξιόλογο υποψήφιο στη μάχη κατά της κλιματικής αλλαγής. Συγκεκριμένα, για να διεξαχθεί μια ολοκληρωμένη συγκριτική μελέτη ανάμεσα στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της πυρηνικής ενέργειας σε σχέση με τις ΑΠΕ, χρησιμοποιείται η Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment ή LCA). Η LCA, είναι μια διαδικασία αξιολόγησης των επιπτώσεων που έχει ένα προϊόν στο περιβάλλον καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του, αυξάνοντας έτσι την αποδοτικότητα χρήσης πόρων και μειώνοντας τις υποχρεώσεις (Ευρωπαϊκή Περιβαλλοντική Υπηρεσία). Λαμβάνοντας υπόψη τα περιβαλλοντικά φορτία που εμπλέκονται (π.χ. την ενέργεια και τις πρώτες ύλες που καταναλώνονται, τις εκπομπές και τα απόβλητα που παράγονται), η LCA καταφέρνει να αξιολογεί τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτών των φορτίων αλλά και τις διαθέσιμες επιλογές για τη μείωση αυτών των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (European Environment Agency, 1998).

Έρευνα (Giambattista Guidi et al, 2023), χρησιμοποίησε δεδομένα καθώς και τη μέθοδο LCA για να συγκρίνει τους αέριους ρύπους διαφόρων πηγών ενέργειας. Τα ευρήματα επιβεβαιώνουν την ανάγκη στροφής και συνδυασμού των ΑΠΕ, καθώς και τον κυρίαρχο ρόλο που πρέπει να έχει η πυρηνική ενέργεια στην βιώσιμη ανάπτυξη. Συγκεκριμένα:

Ορυκτά καύσιμα

Οι εκπομπές από την καύση ορυκτών καυσίμων, όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, αποτελούν μία από τις κυριότερες αιτίες της επιδείνωσης της κλιματικής κρίσης. Όταν αυτά τα καύσιμα καίγονται για την παραγωγή ενέργειας, ηλεκτρισμού ή για τις μεταφορές, απελευθερώνονται μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και άλλων αερίων του θερμοκηπίου, τα οποία συσσωρεύονται στην ατμόσφαιρα και παγιδεύουν τη θερμότητα (Διοίκηση Ενεργειακών Πληροφοριών των Η.Π.Α.). Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη, η τήξη των πάγων, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας και η εντατικοποίηση ακραίων

καιρικών φαινομένων, όπως οι καύσωνες, οι πλημμύρες και οι ξηρασίες. Επιπλέον, η καύση ορυκτών καυσίμων προκαλεί σοβαρή ατμοσφαιρική ρύπανση, η οποία επηρεάζει την ανθρώπινη υγεία, προκαλώντας αναπνευστικά προβλήματα, καρδιοπάθειες και πρόωρους θανάτους. Για να περιοριστούν αυτές οι αρνητικές συνέπειες, είναι απαραίτητη η μετάβαση σε πιο καθαρές μορφές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια, καθώς και η υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών στον τρόπο ζωής και παραγωγής. Η μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα είναι κρίσιμο βήμα για την προστασία του περιβάλλοντος και τη διασφάλιση ενός υγιούς και βιώσιμου μέλλοντος για τις επόμενες γενιές (Giambattista Guidi et al, 2023).

Αιολική ενέργεια

Μέχρι το τέλος του 2022, η χερσαία αιολική ενέργεια αντιπροσώπευε το 93% της παγκόσμιας αιολικής ισχύος (835,6 GW), ενώ η υπεράκτια μόνο το 7% (63,2 GW). Οι τιμές GHG που καταγράφηκαν μέσω LCA ποικίλλουν σημαντικά, με μέσες εκπομπές για χερσαία πάρκα από 0.4 έως και 46 gCO₂eq/kWh, και για υπεράκτια έως 45.2 gCO₂eq/kWh. Η πλειονότητα των εκπομπών προέρχεται από τις προεπιχειρησιακές φάσεις, όπως η παραγωγή πρώτων υλών και η κατασκευή. Συνολικά, οι εκπομπές GHG της αιολικής ενέργειας είναι σημαντικά χαμηλότερες από εκείνες των ορυκτών καυσίμων και συγκρίσιμες με άλλες ανανεώσιμες πηγές. Η ανάλυση των προαναφερθέντων μελετών δείχνει ότι τα μεγαλύτερα αιολικά πάρκα, εξοπλισμένα με μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες και ιδιαίτερα με υψηλότερους συντελεστές απόδοσης, αποφέρουν χαμηλότερες εκπομπές CO₂ ανά παραγόμενη κιλοβατώρα, καθώς η αύξηση της συνολικής ισχύος (scaling) και η αύξηση του μεγέθους των ανεμογεννητριών συμβάλλουν στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και αυξάνουν την εκμεταλλεύσιμη κινητική ενέργεια.

Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί παγκοσμίως τη μεγαλύτερη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας από άποψη εγκατεστημένης ισχύος. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι υδροηλεκτρικών σταθμών: οι μικρής κλίμακας (run-of-river) μονάδες και οι μεγάλες μονάδες με ταμιευτήρα. Οι δεύτερες έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας μέσω αντλησιοταμίευσης, γεγονός που τις καθιστά πιο ευέλικτες αλλά και πιο ενεργοβόρες κατά την κατασκευή. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την υδροηλεκτρική παραγωγή παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα τεχνικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά κάθε έργου. Όπως και στην περίπτωση της αιολικής ενέργειας, οι σημαντικότερες εκπομπές προέρχονται από τη φάση της κατασκευής, κυρίως λόγω των μεταφορών και των υλικών (σκυρόδεμα και χάλυβας), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρείται σημαντική συμβολή και από τη φάση της αποξήλωσης. Διεθνείς μελέτες δείχνουν πως η μέση τιμή εκπομπών για τα υδροηλεκτρικά κυμαίνεται από 10 έως 25 gCO₂eq/kWh, με χαμηλότερες τιμές για έργα σε ορεινές περιοχές και υψηλότερες σε μεγάλες φραγματικές μονάδες. Συγκριτικά με άλλες μορφές ενέργειας, η υδροηλεκτρική ενέργεια εμφανίζει σημαντικά χαμηλότερες εκπομπές από τα ορυκτά καύσιμα και είναι συγκρίσιμη με άλλες ανανεώσιμες

τεχνολογίες, καθιστώντας την μια από τις πλέον βιώσιμες επιλογές στο ενεργειακό μείγμα.

Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια αποτελεί τη δεύτερη μεγαλύτερη πηγή ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως μετά την υδροηλεκτρική. Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) έχει ωριμάσει σημαντικά την τελευταία δεκαετία και αναπτύσσεται ταχύτερα από κάθε άλλη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας, καθώς εξελίσσονται συνεχώς οι τρόποι εγκατάστασης, η μορφή σύνδεσης και η απόδοσή τους. Συνεπώς, τα Φ/Β συστήματα συμβάλλουν καθοριστικά στη μείωση των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG), και σύμφωνα με τον IEA, η επίτευξη μηδενικών εκπομπών ως το 2050 απαιτεί σημαντική αύξηση της παραγωγής Φ/Β, με ετήσια εγκατάσταση 630 GW μεταξύ 2030 και 2050.

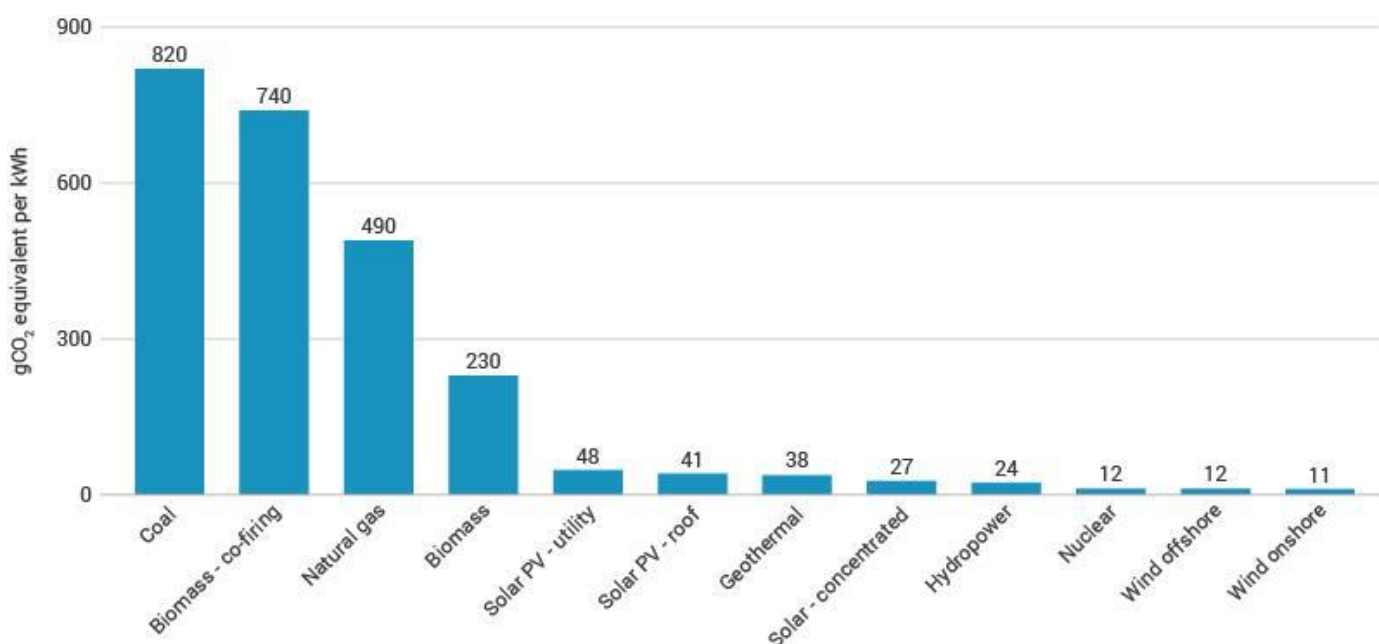
Η περιβαλλοντική επίπτωση των Φ/Β τεχνολογιών εξαρτάται από τον τύπο τεχνολογίας, τη γεωγραφική τοποθεσία και τον τύπο εγκατάστασης. Οι εκπομπές CO₂ ανά παραγόμενη kWh κυμαίνονται ευρέως, από 2.89 έως και 497.2 gCO₂eq/kWh, με τις τιμές για τις εμπορικές τεχνολογίες να κυμαίνονται κυρίως μεταξύ 8 και 88 gCO₂eq/kWh. Ορισμένα συστήματα (λεπτών υμενίων) παρουσιάζουν χαμηλότερες εκπομπές λόγω της απλούστερης και λιγότερο ενεργοβόρας διαδικασίας παραγωγής, ενώ οι πυριτικές τεχνολογίες έχουν υψηλότερες εκπομπές κυρίως λόγω της εντατικής διαδικασίας παραγωγής πυριτίου. Η φάση πριν από τη λειτουργία (π.χ. εξόρυξη πρώτων υλών και κατασκευή) ευθύνεται για το μεγαλύτερο μέρος των συνολικών εκπομπών (έως και 90%). Οι συνεχείς τεχνολογικές βελτιώσεις έχουν οδηγήσει σε σημαντική μείωση των εκπομπών ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας, ενώ η υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών και κυκλικής οικονομίας σε όλη την αλυσίδα αξίας του Φ/Β τομέα κρίνεται απαραίτητη για τη μελλοντική περιβαλλοντική του βιωσιμότητα.

Γεωθερμική ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια αποτελεί μια αξιόπιστη και σχετικά καθαρή πηγή ανανεώσιμης ενέργειας, με παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύ που έφτανε τα 15 GW μέχρι το τέλος του 2022, αντιπροσωπεύοντας μόλις το 0,44% της παγκόσμιας ανανεώσιμης παραγωγής. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) από γεωθερμικούς σταθμούς ποικίλλουν σημαντικά, κυμαινόμενες από πολύ χαμηλά επίπεδα (π.χ. 6,97–9,15 gCO₂eq/kWh στη Γαλλία) έως πολύ υψηλά (400–1100 gCO₂eq/kWh σε binary μονάδες στην Τουρκία), κυρίως λόγω της γεωλογικής σύστασης και της παρουσίας φυσικών αερίων. Η κατασκευαστική φάση συχνά ευθύνεται για σημαντικό ποσοστό των εκπομπών, ιδιαίτερα στα ενισχυμένα γεωθερμικά συστήματα και στα Οργανικού Κύκλου Rankine συστήματα. Τεχνολογικές λύσεις όπως τα συστήματα καθαρισμού εκπομπών (AMIS), η δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (CCS) και η χρήση ψυκτικών υγρών χαμηλού GWP μπορούν να μειώσουν ουσιαστικά τις εκπομπές. Συνολικά, η γεωθερμική ενέργεια παρουσιάζει χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα συγκριτικά με τα ορυκτά καύσιμα, αλλά απαιτεί προσεκτική τεχνολογική και γεωγραφική επιλογή για τη μεγιστοποίηση των περιβαλλοντικών της οφελών.

Πυρηνική Ενέργεια

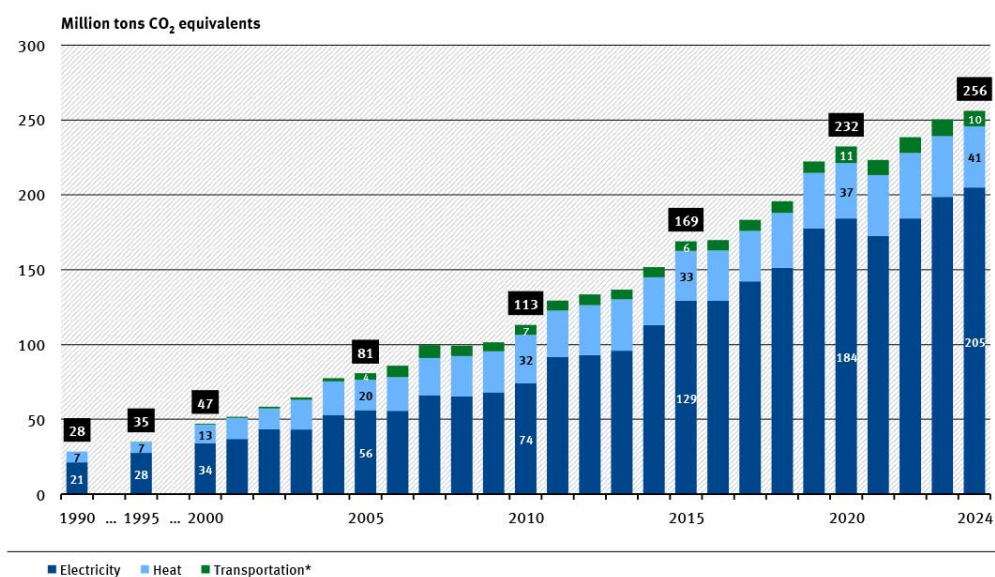
Η πυρηνική ενέργεια αποτελεί μία σημαντική πηγή χαμηλών εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας, με 411 πυρηνικούς σταθμούς σε λειτουργία παγκοσμίως έως το τέλος του 2022, συνολικής ισχύος 371 GW. Το 90% της ισχύος προέρχεται από αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWR), κυρίως υπό πίεση (PWR) και βρασμού (BWR). Η συμβολή της πυρηνικής ενέργειας στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρισμού ήταν περίπου 10%. Στο πλαίσιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA), οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την πυρηνική ενέργεια κυμαίνονται γενικά σε πολύ χαμηλά επίπεδα (Qiang Wang et al, 2021). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (JRC) και ο ΟΗΕ (UNECE) αναφέρουν τιμές μεταξύ 4,6–6,4 gCO₂eq/kWh, λαμβάνοντας υπόψη όλο τον κύκλο καυσίμου, με τον



Εικόνα 32- Μέσες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) κατά τον κύκλο ζωής για διάφορες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Semin Joo et al, 2024)

εμπλουτισμό ουρανίου να είναι ο κυριότερος συντελεστής εκπομπών ενώ για τους μικρότερου μεγέθους αντιδραστήρες (SMRs), οι εκπομπές υπολογίζονται μεταξύ 4,6–13,2 gCO₂eq/kWh. Η χρήση πιο αποδοτικών τεχνολογιών εμπλουτισμού, μειώνει αισθητά τις εκπομπές σε σχέση με παλαιότερες μεθόδους. Συνολικά, η μέση τιμή των εκπομπών για την πυρηνική ενέργεια κυμαίνεται γύρω στα 5–30 gCO₂eq/kWh, καθιστώντας την μία από τις πιο φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, υπό την προϋπόθεση της σωστής διαχείρισης των αποβλήτων και της ασφάλειας. Συμπερασματικά, μέσω της σύγκρισης δεδομένων και σύγκρισης ανάλυσης ζωής (LCA) τη τελευταία δεκαετία, τα αποτελέσματα δείχνουν πως η ατομική και η πυρηνική ενέργεια αποτελούν τα πιο φιλικά προς το περιβάλλον συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς οι παραγόμενοι ρύποι είναι ελάχιστοι, ενώ συνολικά, οι αέριοι ρύποι που εκπέμπονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι λιγότεροι από τα ορυκτά καύσιμα (National Renewable Energy Laboratory, 2025).

Avoided greenhouse gas emission by the use of renewable energies



* exclusively biogenic fuels in transportation (without agriculture, forestry, construction and military).
 Calculation based on preliminary data by Federal Office for Agriculture and Food (BLE) for year 2023
 and fossil base values according to § 3 and § 10 of the 38. BImSchV

Source: German Environment Agency (UBA) based on UBA, AGEE-Stat: "Time series
 for the development of renewable energies in Germany" (as of 02/2025)

Εικόνα 33- Η επιτυχημένη μείωση εναερίων ρύπων ανά τα χρόνια χάρη στις ΑΠΕ
 (German Environment Agency , 2025)

3.3.2 Μακροπρόθεσμες Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Ορυκτά καύσιμα

Η εκτεταμένη χρήση ορυκτών καυσίμων συμβάλλει σημαντικά στη ρύπανση του νερού. Διαδικασίες όπως εξόρυξη, η επεξεργασία και η καύση, καθώς και η συμβολή στην κλιματική αλλαγή μεταβάλλουν τους κύκλους του νερού και αυξάνουν τον κίνδυνο ακραίων καιρικών φαινομένων. Με έρευνά και βάσει επικαιροποιημένων δεδομένων για την ένταση χρήσης νερού και την κατανάλωση ενέργειας (Vengosh Avner et al, 2021), αναφέρεται πως η συνολική παγκόσμια άντληση νερού για την παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα αυξήθηκε από 283 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα στις αρχές της δεκαετίας του 1990 σε 642 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα το 2019. Παράλληλα, η κατανάλωση νερού αυξήθηκε από 33,9 σε 57,8 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα. Αυτές οι αναθεωρημένες εκτιμήσεις είναι σημαντικά υψηλότερες από προηγούμενες, γεγονός που αντανακλά την ταχεία αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας και ιδιαίτερα την εντατική χρήση μη συμβατικών μεθόδων εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου.

Η εξόρυξη και καύση άνθρακα αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος τόσο της άντλησης (62%) όσο και της κατανάλωσης (57%) νερού. Το αργό πετρέλαιο είχε επίσης σημαντικό αποτύπωμα στην κατανάλωση νερού (34%), ενώ η αυξανόμενη χρήση φυσικού αερίου συνέβαλε σημαντικά στην άντληση νερού (33%). Παράλληλα με τη χρήση νερού, εκτιμάται ότι το 2019 παρήχθησαν παγκοσμίως 43 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα αποβλήτων από τη βιομηχανία των ορυκτών καυσίμων. Από αυτά, τα λύματα από τον άνθρακα και το αργό πετρέλαιο αποτελούσαν το 52% και το 46%,

αντίστοιχα. Λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ρυπαντών, ακόμα και μικρές ποσότητες από αυτά τα απόβλητα, όταν διαρρέουν στο περιβάλλον λόγω ατυχημάτων ή ανεπαρκούς διαχείρισης, επιφέρουν σοβαρή υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων. Αυτή η μορφή "υποβαθμισμένης" υδατικής έντασης συχνά δεν λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση του ενεργειακού-υδατικού πλέγματος (Vengosh Avner et al, 2021).

Η αναθεώρηση αυτού του πλέγματος, με βάση όχι μόνο την ποσότητα αλλά και την ποιότητα του νερού, δείχνει ότι το υδατικό αποτύπωμα των ορυκτών καυσίμων είναι σημαντικό (και μεγαλύτερο από όσο είχε εκτιμηθεί), ενώ οικοσυστήματα και υδάτινοι ορίζοντες αναμένεται να συνεχίσουν να επιβαρύνονται για δεκαετίες, ακόμη και σε σενάρια σταδιακής μείωσης της χρήσης τους.

Ηλιακή ενέργεια

Οι ανάγκες νερού για τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του ηλίου ποικίλλουν, ανάλογα με τη τεχνολογία και τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Συγκεκριμένα, οι ηλιακοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας καταναλώνουν αρκετά μικρή ποσότητα νερού (περίπου 20 γαλόνια ανά μεγαβατώρα ή γαλόνι/MWh) για τη συντήρηση και τον καθαρισμό του απαραίτητου εξοπλισμού, καθώς και των εγκαταστάσεων, όπως καθρέφτες, ηλιοστάτες και φωτοβολταϊκά πάνελ (Ένωση Βιομηχανίας Ηλιακής Ενέργειας).

Αν και συχνά θεωρείται λανθασμένα ότι τα φωτοβολταϊκά (PV) συστήματα δεν έχουν απαιτήσεις για ψύξη, στην πραγματικότητα, οποιαδήποτε σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας των κυψελών μειώνει αισθητά την απόδοσή τους. Η απόδοση των PV είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη διατήρηση των κυψελών σε θερμοκρασία δωματίου. Η υδρόψυξη των φωτοβολταϊκών αποτελεί μια σχετικά οικονομική, αποδοτική και διαδεδομένη τεχνολογία (Malek Kamal, Hussien Rabaia, 2021). Η ενσωμάτωση μικρής κλίμακας διανεμημένων ηλιακών εγκαταστάσεων ή μεγάλων φωτοβολταϊκών και ηλιοθερμικών μονάδων έχει γενικά αμελητέες άμεσες επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα. Ωστόσο, οι μεγάλες εγκαταστάσεις σε πιο παρθένες περιοχές μπορεί να έχουν σημαντικές περιβαλλοντικές συνέπειες.

Κατά την κατασκευή και λειτουργία των μονάδων, γίνεται ισοπέδωση του εδάφους, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ζιζανιοκτόνα, προκαλώντας καταστροφή της βλάστησης. Αυτό οδηγεί σε απώλεια οικοτόπων, θνησιμότητα οργανισμών και πιθανή εξαφάνιση τοπικών ειδών. Σε ξηρές και ημιάνυδρες περιοχές, η βλάστηση συγκρατεί σκόνη και άμμο. Η απομάκρυνσή της από ηλιακές εγκαταστάσεις αυξάνει τη διάβρωση και την απώλεια εδάφους λόγω ανέμων και πλημμυρών. Επιπλέον, η υποδομή μπορεί να παρεμποδίσει τη μετακίνηση και τη μετανάστευση άγριων ζώων, διακόπτοντας τη γενετική ροή μεταξύ πληθυσμών και διαταράσσοντας την οικολογική ισορροπία.

Οι περισσότερες ηλιοθερμικές μονάδες κατασκευάζονται σε ερήμους, περιοχές με ευαίσθητο οικοσύστημα. Οι εγκαταστάσεις ενδέχεται να προκαλούν θανάτους εντόμων και πτηνών που πετούν κοντά στα σημεία συγκέντρωσης της ακτινοβολίας, αν και οι επιπτώσεις κρίνονται χαμηλές σε σχέση με άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες. Από την

άλλη, στις μονάδες, η κατάληψη γης επηρεάζει αισθητά την πανίδα και χλωρίδα, ενώ η σκίαση των πάνελ τροποποιεί το μικροκλίμα και τη φυτική βιοποικιλότητα. Εκτός από τις άμεσες επιπτώσεις, υπάρχουν και έμμεσες ή περιφερειακές συνέπειες. Για παράδειγμα, οι εκπομπές ρύπων από οχήματα ή καυστήρες μπορούν να ευνοήσουν την ανάπτυξη εισβολικών φυτών, αυξάνοντας τη συχνότητα πυρκαγιών. Χημικά όπως αντιψυκτικά, ζιζανιοκτόνα, κατασταλτικά σκόνης και αντισκωριακά, που χρησιμοποιούνται στη συντήρηση, ενδέχεται να έχουν μακροπρόθεσμες αρνητικές επιδράσεις στην τοπική και περιφερειακή βιοποικιλότητα. Επίσης, η δημιουργία τεχνητών καναλιών νερού για την προστασία από πλημμύρες επηρεάζει την ποσότητα και ποιότητα των ερημικών οικοτόπων (Tareq A. Hamed, 2022).

Αιολική ενέργεια

Η ενόχληση και θνησιμότητα πτηνών είναι μία από τις κυριότερες περιβαλλοντικές ανησυχίες για την αιολική ενέργεια, ιδίως όταν πρόκειται για απομακρυσμένες περιοχές με ευαίσθητα οικοσυστήματα και σπάνια είδη πτηνών. Ετησίως, η αιολική ενέργεια προκαλεί τον θάνατο εκατοντάδων χιλιάδων πτηνών και νυχτερίδων, καθώς και η καταστροφή και υποβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος (Patricia Mateo-Tomas, 2022).

Η άμεση επίπτωση των ανεμογεννητριών είναι οι συγκρούσεις πτηνών με τους πύργους ή τις έλικες, γεγονός που έχει οδηγήσει στη θανάτωση πλήθους ειδών παγκοσμίως. Αν και ορισμένες μελέτες δείχνουν ότι τα πτηνά προσαρμόζονται σχετικά γρήγορα στην παρουσία ανεμογεννητριών, το φαινόμενο τραυματισμού, ακρωτηριασμού και θανάτωσης τους από σύγκρουση με ανεμογεννήτριες είναι συχνό, ενώ λόγω της ανάγκης ισχυρών ανέμων, τα αιολικά πάρκα που κατασκευάζονται σε ορεινές συνήθως περιοχές, διακινδυνεύοντας την επιβίωση σπανίων και μεγάλης σημασίας ειδών. Παράγοντες σύγκρουσης των πτηνών με τις ανεμογεννήτριες αποτελούν κυρίως ο φωτισμός των πύργων καθώς και οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν (German Jordanian University, 2022). Τα φώτα ασφαλείας σε πύργους προσελκύουν πτηνά, ειδικά σε συνθήκες ομίχλης ή κακοκαιρίας, αυξάνοντας τον κίνδυνο σύγκρουσης ενώ κατά τη διάρκεια κακοκαιρίας, τα μεταναστευτικά πτηνά πετούν χαμηλότερα, γεγονός που αυξάνει την πιθανότητα σύγκρουσης με ανεμογεννήτριες.

Ταυτόχρονα, η ανάγκη προσβασιμότητας στις εγκαταστάσεις των αιολικών πάρκων, καθώς και τους ίδιους τους πύργους, δημιουργούν την ανάγκη διάνοιξης δρόμων, σε δύσβατες, ορεινές και πολλές φορές προστατευμένες περιοχές. Κατά τη διάρκεια των εργασιών απομακρύνονται πλούσιο για τη τοπική πανίδα είδη φυτών, συμβάλλοντας στην αλλαγή του τοπικού κλίματος μέσω των μεταβολών των καιρικών φαινομένων. Ταυτόχρονα, καθώς το έδαφος αδυνατεί να απορροφήσει το νερό των βροχοπτώσεων, παρατηρούνται φαινόμενα διάβρωσης ή ακόμα και μόλυνσης του εδάφους (Muhammad Shahzad Nazir, 2020).

Πυρηνική ενέργεια

Η αποτελεσματική διαχείριση του νερού αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη λειτουργία των πυρηνικών σταθμών παραγωγής ενέργειας (NPPs), καθώς το νερό χρησιμοποιείται

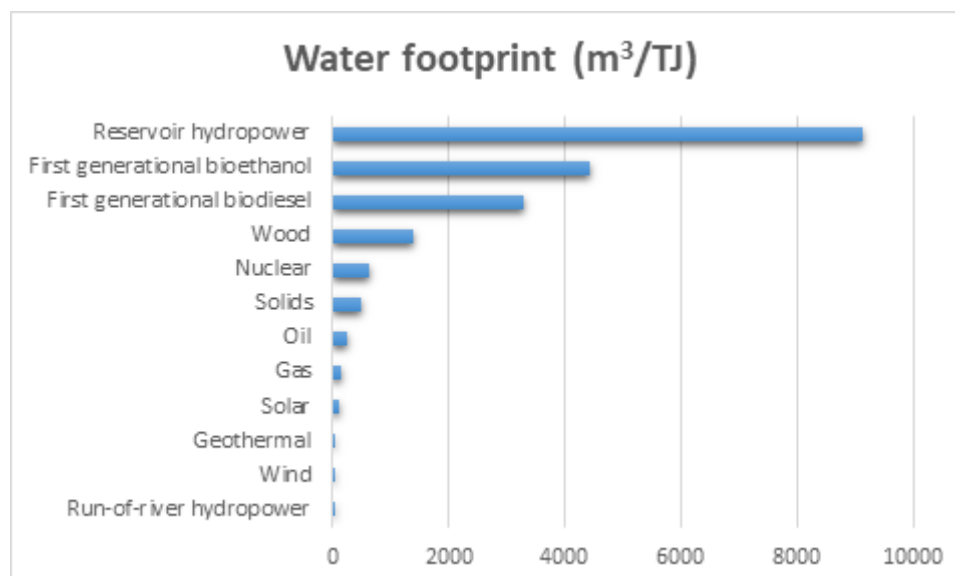
για ψύξη, παραγωγή ατμού και ασφαλή διαχείριση ραδιενεργών υλικών. Η αυξημένη παγκόσμια ζήτηση για χαμηλών εκπομπών άνθρακα ενέργεια καθιστά την πυρηνική ενέργεια αναπόσπαστο μέρος του ενεργειακού μείγματος. Ωστόσο, η μεγάλη κατανάλωση νερού που απαιτείται για την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας αποτελεί σημαντική πρόκληση, ιδιαίτερα σε περιοχές με έλλειψη νερού, περιβαλλοντικούς περιορισμούς και αυστηρούς κανονισμούς (Ravikumar Jayabal, 2025).

Η πλειονότητα των πυρηνικών σταθμών (κυρίως αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος) απαιτεί τεράστιες ποσότητες νερού για τη μετάδοση και απόρριψη θερμότητας, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε θερμική ρύπανση και εξάντληση υδάτινων πόρων. Η κλιματική αλλαγή επιτείνει το πρόβλημα με την εντεινόμενη ξηρασία και τα ακραία καιρικά φαινόμενα, γεγονός που καθιστά επιτακτική την υιοθέτηση βιώσιμων και αποδοτικών πρακτικών διαχείρισης νερού.

Η κακή διαχείριση του νερού στους πυρηνικούς σταθμούς μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες, όπως μείωση της αποδοτικότητας, αύξηση του κόστους λειτουργίας, περιβαλλοντική ρύπανση από ραδιενεργές ουσίες και καταστροφή οικοσυστημάτων. Παράλληλα, η αυστηροποίηση των κανονισμών για την κατανάλωση και απόρριψη νερού απαιτεί την εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών και συστημάτων. Περιβαλλοντικά, η θερμική ρύπανση και η πρόσκρουση ή έλξη θαλάσσιων οργανισμών κατά την άντληση νερού μπορούν να διαταράξουν την ισορροπία των υδάτινων οικοσυστημάτων. Οικονομικά, το υψηλό κόστος εφαρμογής προηγμένων τεχνολογιών και οι επιπτώσεις από τους κανονισμούς περιορίζουν τη βιωσιμότητα των πυρηνικών σταθμών, ειδικά σε περιοχές με περιορισμένους υδάτινους πόρους.

Συνολικά, η διαχείριση νερού στους πυρηνικούς σταθμούς αποτελεί μια σύνθετη πρόκληση που απαιτεί τεχνολογική καινοτομία, αυστηρή ρύθμιση και περιβαλλοντική ευαισθησία για τη διασφάλιση της βιωσιμότητας της πυρηνικής ενέργειας στο μέλλον.

Κλείνοντας το παρόν κεφάλαιο, διαπιστώνεται ότι τόσο η πυρηνική ενέργεια όσο και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον. Η πυρηνική ενέργεια προσφέρει υψηλή απόδοση με μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τη λειτουργία, ωστόσο συνδέεται με σοβαρούς περιβαλλοντικούς κινδύνους, όπως τα ραδιενεργά απόβλητα και η πιθανότητα ατυχημάτων. Από την άλλη πλευρά, οι ΑΠΕ όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια είναι πιο ασφαλείς και φιλικές προς το περιβάλλον σε καθημερινή λειτουργία, αλλά δεν στερούνται προβλημάτων: απαιτούν εκτεταμένες εκτάσεις γης, προκαλούν σημαντικές μεταβολές στα τοπικά οικοσυστήματα, ενώ η μεταβλητότητά τους δημιουργεί προκλήσεις για τη σταθερότητα του δικτύου. Συνεπώς, η αξιολόγηση των επιπτώσεων κάθε πηγής ενέργειας πρέπει να γίνεται ολιστικά, λαμβάνοντας υπόψη τον πλήρη κύκλο ζωής και τις ιδιαίτερες ανάγκες κάθε περιοχής, ενώ αναδύονται τα οφέλη του συνδυασμού διαφόρων πηγών ενέργειας.



Εικόνα 34- Η χρήση νερού από κάθε τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (The Joint Research Centre, 2019)

3.4 Διαθεσιμότητα και Αξιοποίηση Πόρων

3.4.1 Αποθέματα Ουρανίου και Άλλων Πόρων

Το ουράνιο (U) είναι ένα βαρύ μέταλλο που για περισσότερα από 60 χρόνια χρησιμοποιείται για τη παραγωγή τεράστιων ποσών ενέργειας. Ανακαλύφθηκε από τον Γερμανό φυσικό Μάρτιν Κλάπροθ το 1789 και με πυκνότητα 18.7 φορές μεγαλύτερη του νερού αποτελεί ένα από τα πιο βαριά φυσικά χημικά στοιχεία. Όπως και άλλα χημικά στοιχεία, το ουράνιο απαντάται στη φύση σε διάφορες μορφές που ονομάζονται «ισότοπα». Τα ισότοπα αυτά διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τον αριθμό των ουδέτερων σωματιδίων (νετρονίων) στον πυρήνα τους. Το φυσικό ουράνιο που βρίσκεται στο φλοιό της Γης αποτελείται κυρίως από δύο ισότοπα: το ουράνιο-238 (U-238), και το ουράνιο-235 (U-235).

Το ισότοπο U-235 μπορεί να διασπαστεί εύκολα, απελευθερώνοντας μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Για τον λόγο αυτό θεωρείται «σχάσιμο» και η χρήση του κρίνεται αναγκαία στη διαδικασία παραγωγής ενέργειας μέσω πυρηνικής σχάσης.

Συγκεκριμένα, στους πυρηνικούς σταθμούς η θερμότητα παράγεται από τη σχάση των ατόμων ουρανίου, το καύσιμο ουράνιο είναι διατεταγμένο έτσι ώστε να διατηρείται ελεγχόμενη η αλυσιδωτή αντίδραση. Η θερμότητα από τη σχάση των ατόμων U-235 μετατρέπει το νερό σε ατμό, ο οποίος κινεί τις τουρμπίνες και παράγει ηλεκτρική ενέργεια (World Nuclear Association, 2025).

Το ουράνιο, ως βασική πρώτη ύλη για την παραγωγή καυσίμου στους πυρηνικούς σταθμούς, είναι ιδιαίτερα πολύτιμο, καθώς παίζει κρίσιμο ρόλο στην κάλυψη της σταθερής ενεργειακής ζήτησης. Παρά τη σημασία του, η ζήτηση και οι τιμές του στην παγκόσμια αγορά έχουν παρουσιάσει πτώση τα τελευταία χρόνια, λόγω της

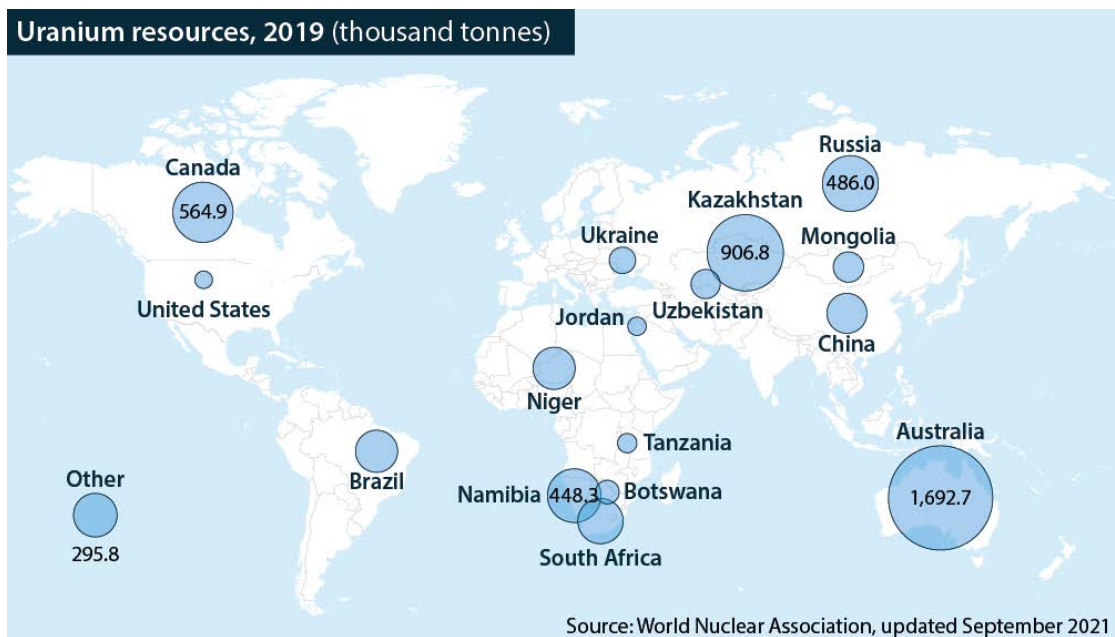
αβεβαιότητας γύρω από το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας και του αυξανόμενου ανταγωνισμού από άλλες πηγές, κυρίως το φυσικό αέριο. Αυτή η πτωτική τάση οδήγησε σε περικοπές στην παραγωγή και σε αναβολές σχεδίων ανάπτυξης ορυχείων σε διάφορες χώρες. Ωστόσο, μετά από μια δεκαετία με μειωμένη παραγωγή έως το 1993, η εξόρυξη ουρανίου έχει αυξηθεί σταθερά, καλύπτοντας σχεδόν εξ ολοκλήρου τη ζήτηση για ηλεκτροπαραγωγή (World Nuclear Association, 2019).

Το πρώτο στάδιο του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου είναι η εξερεύνηση κοιτασμάτων. Αν και σήμερα τα κοιτάσματα μπορούν να εντοπιστούν μόνο με ενδείξεις και όχι με ακριβείς προβλέψεις, οι νέες τεχνολογικές εξελίξεις και η βαθύτερη κατανόηση των γεωλογικών συνθηκών που οδηγούν στον σχηματισμό τους επιτρέπουν την ανάπτυξη καλύτερων μοντέλων πρόβλεψης. Οι μέθοδοι εξόρυξης είναι καθιερωμένες και περιλαμβάνουν την επιφανειακή εξόρυξη (open pit) όπως στη Ναμίμπια, τη Νιγηρία και την Αυστραλία, αλλά και την υπόγεια εξόρυξη (underground) στον Καναδά και τη Ρωσία. Επιπλέον, χρησιμοποιείται η τεχνική της επιτόπιας έκπλυσης (in-situ leaching, ISL), ιδιαίτερα στο Καζακστάν.

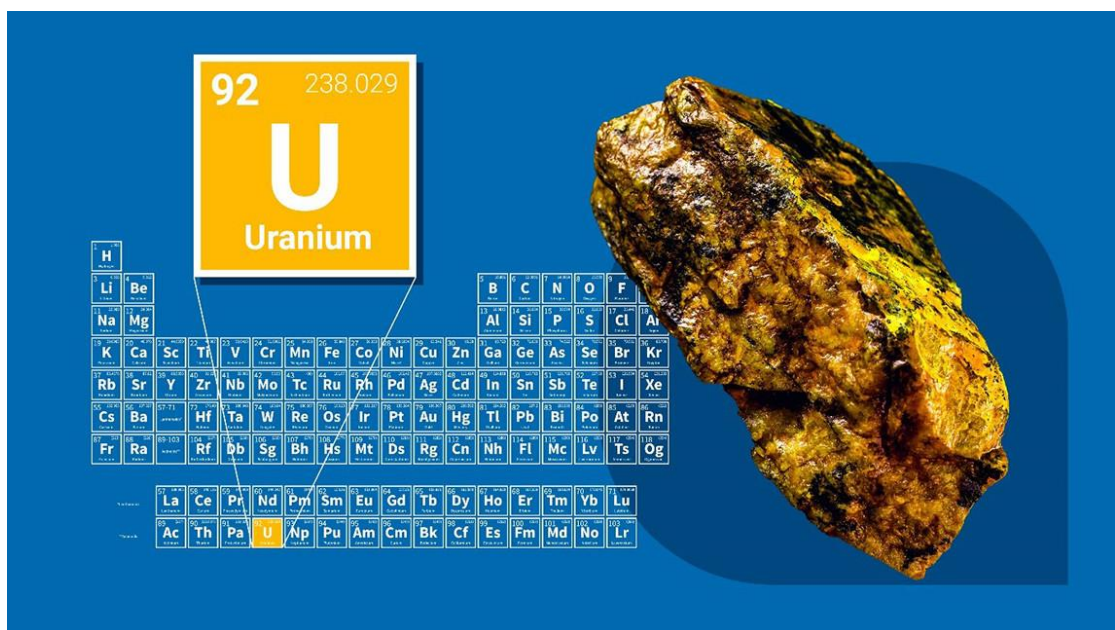
Οι κυριότερες μονάδες εξόρυξης το 2013 ήταν: McArthur River (Καναδάς, 13%, υπόγεια), Olympic Dam (Αυστραλία, 6%, υπόγεια), Somair (Νίγηρας, 5%, επιφανειακή), Tortukuduk (Καζακστάν, 4%, ISL), Priargunsky (Ρωσία, 4%, υπόγεια), Langer Heinrich (Ναμίμπια, 4%, επιφανειακή), και Ranger (Αυστραλία, 4%, επιφανειακή). Η συνολική παγκόσμια παραγωγή το 2013 ανήλθε σε περίπου 59.000 τόνους, καλύπτοντας το 92% της παγκόσμιας ζήτησης.

Από το 2006 έως το 2013, η παραγωγή ουρανίου αυξήθηκε σταθερά από 47.000 σε 70.000 τόνους. Παρόλα αυτά, η τρέχουσα πρακτική με ανοιχτό κύκλο καυσίμου και ελαφρούς υδατοπυρηνικούς αντιδραστήρες (LWR) ενδέχεται να οδηγήσει τη ζήτηση κοντά στους 100.000 τόνους. Η εξόρυξη θεωρείται βιώσιμη όσο παραμένει οικονομικά και περιβαλλοντικά αποδεκτή. Σύμφωνα με εκτιμήσεις του 2011, τα ανακτάσιμα αποθέματα ουρανίου ανέρχονταν σε 5,5 εκατομμύρια τόνους, με κυριότερες χώρες την Αυστραλία, το Καζακστάν, τη Ρωσία, τον Καναδά και την Νιγηρία (Claude Degueudre, 2020).

Ιδιαίτερη άνοδος καταγράφηκε στην παραγωγή του Καζακστάν, η οποία δεκαπλασιάστηκε από το 2000 έως το 2018, λόγω της εκτεταμένης χρήσης της μεθόδου ISL με θειικό οξύ. Άλλες χώρες παρουσιάζουν μεταβλητές τάσεις, με την Κίνα και την Ινδία να αυξάνουν την παραγωγή, ενώ η Αυστραλία παρουσιάζει μικρή μείωση. Συνολικά, τα παγκόσμια κοιτάσματα ουρανίου παρουσιάζονται στην εικόνα 35.



Εικόνα 35- Κοιτάσματα ουρανίου ανά χώρα (World Nuclear Association, 2021)



Εικόνα 36- Ακατέργαστο ουράνιο (IAEA, 2023)

Άλλοι Πόροι – θόριο

Το θόριο είναι ένα φυσικά απαντώμενο, ελαφρώς ραδιενεργό μέταλλο που ανακαλύφθηκε το 1828 από τον Σουηδό χημικό Jöns Jakob Berzelius, ο οποίος το ονόμασε προς τιμήν του θεού Θωρ της σκανδιναβικής μυθολογίας. Απαντάται σε μικρές ποσότητες στα περισσότερα πετρώματα και εδάφη, όπου είναι περίπου τρεις φορές πιο άφθονο από το ουράνιο. Το έδαφος περιέχει κατά μέσο όρο περίπου 6 μέρη ανά εκατομμύριο (ppm) θορίου και λόγω της χαμηλής του διαλυτότητας, το θόριο απαντάται συνήθως σε άμμους.

Στη φύση, το θόριο υπάρχει σχεδόν αποκλειστικά υπό τη μορφή του ισοτόπου Th-232, το οποίο είναι εξαιρετικά σταθερό, με χρόνο ημιζωής περίπου τριπλάσιο από την ηλικία της Γης. Η ραδιενεργή αποσύνθεσή του οδηγεί τελικά στο σταθερό μόλυβδο-208. Εξαιρετικά μικρές ποσότητες των ισοτόπων Th-228, Th-230 και Th-234 μπορεί να υπάρχουν μέσω των σειρών διάσπασης, αλλά είναι αμελητέες σε όρους μάζας (World Nuclear Association, 2024).

Το ThO₂ είναι σχετικά χημικά αδρανές και δεν οξειδώνεται περαιτέρω, σε αντίθεση με το UO₂. Παρουσιάζει υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα και χαμηλότερη θερμική διαστολή από το ουρανικό οξείδιο, ενώ έχει και σημαντικά υψηλότερο σημείο τήξης. Ως καύσιμο σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, προκαλεί πολύ μικρότερη απελευθέρωση αερίων σχάσης σε σχέση με το UO₂.

Η κύρια πηγή θορίου είναι το φωσφορικό ορυκτό των σπανίων γαιών, ο μοναζίτης, το οποίο περιέχει κατά μέσο όρο 6-7% φωσφορικό θόριο, με μέγιστες περιεκτικότητες έως 12%. Ο μοναζίτης απαντάται σε πυριγενή και άλλα πετρώματα, αλλά οι πλουσιότερες συγκεντρώσεις βρίσκονται σε αποθέσεις "πλάσέρ", οι οποίες σχηματίζονται από τη δράση κυμάτων και ρευμάτων μαζί με άλλα βαριά ορυκτά. Οι παγκόσμιοι πόροι μοναζίτη εκτιμώνται σε περίπου 16 εκατομμύρια τόνους, εκ των οποίων τα 12 εκατομμύρια βρίσκονται σε αμμώδεις αποθέσεις στις νότιες και ανατολικές ακτές της Ινδίας. Σημαντικά κοιτάσματα υπάρχουν και σε άλλες χώρες.

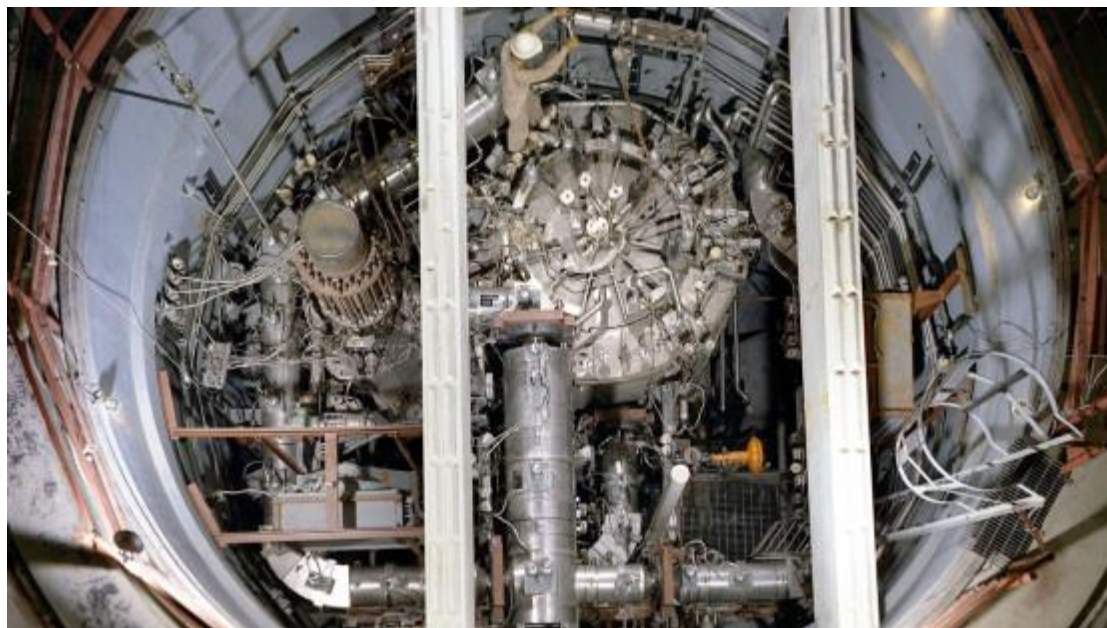
Η ανάκτηση του θορίου από τον μοναζίτη γίνεται συνήθως με κατεργασία με υδροξείδιο του νατρίου στους 140°C, ακολουθούμενη από περίπλοκες διεργασίες για την καταβύθιση καθαρού ThO₂. Ένα ακόμη κοινό ορυκτό του θορίου είναι το θορίτης (ThSiO₄). Σημαντικό φλεβικό κοίτασμα θορίου και σπανίων γαιών υπάρχει στην πολιτεία Αϊντάχο των ΗΠΑ.

Η κοινή έκδοση του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (IAEA) και του Οργανισμού Πυρηνικής Ενέργειας του ΟΟΣΑ (NEA, 2016) εκτιμά τους συνολικούς γνωστούς και προβλεπόμενους πόρους θορίου σε περίπου 6,2 εκατομμύρια τόνους. Η έκδοση του 2018 δεν παρέχει αντίστοιχες εκτιμήσεις. Τα στοιχεία για τους επιβεβαιωμένους και τεκμαρτούς πόρους που μπορούν να ανακτηθούν με κόστος έως 80 δολάρια/κιλό θορίου παρουσιάζονται σε σχετικό πίνακα, αν και για κάποιες περιοχές βασίζονται σε υποθέσεις και δευτερογενή δεδομένα (π.χ. μέση περιεκτικότητα μοναζίτη σε Θ), παρά σε άμεσες γεωλογικές εκτιμήσεις.

Υπάρχουν δυνατότητες εξόρυξης θορίου σε αρκετές χώρες. Στην Αυστραλία λειτουργούν αρκετά ορυχεία, κυρίως στη δυτική περιοχή, καθώς και στη Νέα Νότια Ουαλία. Αν και δεν υπάρχει αυτόνομη παραγωγή θορίου στην Αυστραλία, το στοιχείο απαντάται στον μοναζίτη που εξορύσσεται μαζί με άλλα ορυκτά, όπως το ζirkόνιο και το ξενοτίμιο, σύμφωνα με την Geoscience Australia (Claude Degueldre, 2020).

Η παραγωγή διοξειδίου του θορίου (ThO₂) σχετίζεται με την ενέργεια που απαιτείται για τις διαδικασίες εντοπισμού, εξόρυξης, μεταφοράς και προετοιμασίας του καυσίμου (U.S. Department of Energy, 2021). Ωστόσο, δεν υπάρχουν διαθέσιμα τυπικά στοιχεία για την απαιτούμενη ενέργεια ανά μονάδα μάζας του μεταλλεύματος θορίου. Επιπλέον,

το ThO_2 δεν χρησιμοποιείται ως καύσιμο στους σημερινούς θερμικούς αντιδραστήρες που είναι σχεδιασμένοι για ουράνιο· αντιθέτως, λειτουργεί ως "γονιμοποιήσιμο" υλικό, δηλαδή μπορεί να μετατραπεί σε σχάσιμο ουράνιο-233 (U-233) κυρίως στο πλαίσιο κύκλων καυσίμου που βασίζονται σε ταχείς αντιδραστήρες. Σήμερα, υπάρχουν παγκοσμίως κάποιοι πειραματικοί αντιδραστήρες με θόριο (εικόνα 37) οι οποίοι όμως είναι περιορισμένοι. Θα μπορούσε να καθοριστεί ένα όριο περιεκτικότητας για τα κοιτάσματα θορίου, το οποίο να προσδιορίζει την οικονομική βιωσιμότητα της εξόρυξής τους, όμως μια τέτοια εκτίμηση απαιτεί εκτενή αξιολόγηση, η οποία αποτελεί αντικείμενο μελλοντικής μελέτης (Nuclear Energy Agency, 2015).



Εικόνα 37- Πρώιμος πειραματικός πυρηνικός αντιδραστήρας με βάση το θόριο (IAEA, 2023)

3.4.2 Τεχνολογικές Καινοτομίες και Βελτιώσεις

Η παγκόσμια ηγεσία στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας μετατοπίζεται από τις ανεπτυγμένες οικονομίες προς την Κίνα και τη Ρωσία. Αν και οι ανεπτυγμένες χώρες κατέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό εγκατεστημένης ισχύος, η πλειοψηφία των νέων πυρηνικών έργων κατασκευής πραγματοποιείται σε αναδυόμενες οικονομίες, κυρίως με κινεζική ή ρωσική τεχνολογία. Από το 2017 έως το 2024 ξεκίνησαν 52 νέα έργα, εκ των οποίων τα 48 βασίζονται σε κινεζικά ή ρωσικά σχέδια. Μέχρι το τέλος του 2024, ήταν υπό κατασκευή 63 πυρηνικοί αντιδραστήρες συνολικής ισχύος 71 GW, με την Κίνα να πρωτοστατεί (33 GW). Η Ρωσία αποτελεί τον κύριο εξαγωγέα πυρηνικής τεχνολογίας, με έργα σε πολλές χώρες. Στις ανεπτυγμένες χώρες, λιγότερα έργα υλοποιούνται και βασίζονται σε εγχώρια τεχνολογία, ενώ η έκθεση της Διεθνούς Υπηρεσίας Ατομικής Ενέργειας αναφέρει αναλυτικά τις εξελίξεις στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας (International Energy Agency, 2025) .

Πολιτική – Νομοθεσία

Το μεταβαλλόμενο πολιτικό τοπίο ενισχύει τη δυναμική της πυρηνικής ενέργειας, καθώς όλο και περισσότερες κυβερνήσεις αναγνωρίζουν τον ρόλο της ως αξιόπιστης και χαμηλών εκπομπών πηγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Την τελευταία πενταετία, έχουν εγκριθεί παρατάσεις λειτουργίας σε 64 πυρηνικούς αντιδραστήρες σε 13 χώρες, συνολικής ισχύος περίπου 65 GW. Στις ΗΠΑ, η σχετική νομοθεσία βελτίωσε σημαντικά τα οικονομικά των υφιστάμενων μονάδων, ενώ στην Ιαπωνία και τη Γαλλία υιοθετήθηκαν νέες πολιτικές για επέκταση της διάρκειας ζωής των αντιδραστήρων. Ανάλογες αποφάσεις έλαβαν χώρες όπως το Βέλγιο, η Ουγγαρία, η Ισπανία, η Ρουμανία και η Νότια Αφρική. Παράλληλα, περισσότερες από 40 χώρες σχεδιάζουν νέες εγκαταστάσεις, ενώ πάνω από 30 εξετάζουν την ανάπτυξη μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMRs), με κυβερνητική στήριξη μέσω επενδυτικών και ερευνητικών προγραμμάτων σε Καναδά, ΗΠΑ και Γαλλία, (Chen, R., Su, G.H., Zhang, 2022)

SMRs - Μικρές Μονάδες Πυρηνικών Αντιδραστήρων

Η ανάπτυξη της πυρηνικής τεχνολογίας επιταχύνεται και μπορεί να αναδιαμορφώσει την παγκόσμια ηγεσία στην αγορά πυρηνικής ενέργειας. Οι Καινοτομίες στις Μικρές Μονάδες Πυρηνικών Αντιδραστήρων (SMRs) προχωρούν ραγδαία, με πάνω από 80 σχέδια να βρίσκονται σε στάδια ανάπτυξης παγκοσμίως. Οι SMRs υπόσχονται χαμηλότερο αρχικό κόστος, μικρότερο χρόνο κατασκευής και μειωμένο ρίσκο, ενώ επιτρέπουν ευρύτερη εφαρμογή της πυρηνικής ενέργειας, ακόμα και σε απομακρυσμένες περιοχές ή για βιομηχανικές χρήσεις όπως η αφαλάτωση και η τηλεθέρμανση (Liu Zhan, 2021). Εταιρείες σε προηγμένες οικονομίες, όπως οι Κίνα, ΗΠΑ, Ηνωμένο Βασίλειο, Καναδάς και Γαλλία, ηγούνται στην ανάπτυξη SMRs, γεγονός που ενδέχεται να επανακαθορίσει την παγκόσμια κατανομή ισχύος στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας. Παράλληλα, αναπτύσσονται και προηγμένοι μεγάλης κλίμακας αντιδραστήρες, με στόχο τη βελτίωση της ασφάλειας, της οικονομίας και της βιωσιμότητάς τους. Οι SMRs θεωρούνται ιδανικοί για την αντικατάσταση παλαιών μονάδων άνθρακα, αξιοποιώντας την υπάρχουσα υποδομή, μειώνοντας το κόστος και επιταχύνοντας τις αδειοδοτήσεις. Τέτοια παραδείγματα είναι το έργο Natrium στο Γουαϊόμινγκ των ΗΠΑ και η σχεδιαζόμενη μονάδα SMR στη Ρουμανία στο πρώην εργοστάσιο άνθρακα του Doicești (International Energy Agency, 2025).

Κέντρα και Βάσεις Δεδομένων

Τα κέντρα δεδομένων αναδεικνύονται ως μια νέα εξειδικευμένη αγορά για την πυρηνική ενέργεια, με τις τεχνολογικές εταιρείες να στρέφονται όλο και περισσότερο προς την πυρηνική ενέργεια – και ειδικότερα τους μικρούς αρθρωτούς αντιδραστήρες (SMRs) – για την κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών τους. Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τα κέντρα δεδομένων αναμένεται να αυξηθεί ραγδαία λόγω της ψηφιοποίησης και της ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνητής νοημοσύνης (AI). Μέχρι σήμερα, έχουν ανακοινωθεί σχέδια για κατασκευή έως και 25 GW ισχύος από SMRs για να καλύψουν τις ανάγκες του τομέα των κέντρων δεδομένων, κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες, αν και βρίσκονται σε διάφορα στάδια ωρίμανσης και υλοποίησης. Παγκοσμίως, τα κέντρα δεδομένων καταναλώνουν σήμερα περίπου 1% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας, ποσοστό που αναμένεται να αυξηθεί, αλλά ο ρόλος τους στη

συνολική αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης παραμένει μικρότερος σε σύγκριση με άλλους τομείς, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα και τα συστήματα κλιματισμού. Ωστόσο, τοπικά η επίδρασή τους γίνεται όλο και πιο έντονη. Για παράδειγμα, στην Ιρλανδία το 2023 τα κέντρα δεδομένων κατανάλωσαν το 20% της ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας, ενώ στην Πολιτεία της Βιρτζίνια των ΗΠΑ η κατανάλωση ξεπερνά το 25%. Σύμφωνα με μελέτη του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ (Δεκέμβριος 2024), η κατανάλωση ενέργειας των κέντρων δεδομένων στις ΗΠΑ αυξήθηκε από 58 TWh το 2014 σε 176 TWh το 2023, αντιπροσωπεύοντας το 4,4% της συνολικής ζήτησης, και εκτιμάται ότι θα φτάσει τα 325 TWh έως 580 TWh μέχρι το 2028, δηλαδή 6,7% έως 12% της συνολικής κατανάλωσης. Μόνο στο πρώτο εξάμηνο του 2024 ανακοινώθηκαν νέα κέντρα δεδομένων στις ΗΠΑ με συνολικές ανάγκες ισχύος περίπου 24 GW – τριπλάσιες σε σχέση με το ίδιο διάστημα το 2023. Πολλά από αυτά αναζητούν αποκλειστική ηλεκτρική παροχή από πυρηνικές μονάδες, κυρίως SMRs. Το 2024 υπήρξε αξιοσημείωτη αύξηση στις ανακοινώσεις τέτοιων έργων, με τις περισσότερες να βασίζονται σε νέα SMRs, ενώ κάποιες άλλες εξετάζουν την αξιοποίηση υφιστάμενων ή επαναλειτουργούμενων πυρηνικών μονάδων. Καθώς οι SMRs αναμένεται να διατεθούν εμπορικά προς το τέλος της δεκαετίας, η επαναλειτουργία παλαιών αντιδραστήρων αποτελεί προσωρινή λύση. Παράλληλα, κέντρα δεδομένων με πυρηνική ενέργεια σχεδιάζονται και στην Ινδία, την Ιαπωνία και τη Σουηδία. Σημαντική αλλαγή των τελευταίων δύο ετών είναι η ενεργή συμμετοχή των εταιρειών κέντρων δεδομένων στην υποστήριξη νέων πυρηνικών έργων, όχι μόνο ως αγοραστές ενέργειας, αλλά και ως συντελεστές στην ανάπτυξή τους (IAEA, 2024).

Ευκαιρίες για επαναλειτουργία πυρηνικών σταθμών

Η αυξημένη έμφαση στην ενεργειακή ασφάλεια και η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για καθαρή και σταθερή ηλεκτροπαραγωγή, λόγω της αυξημένης ζήτησης, έχουν αναζωπυρώσει το ενδιαφέρον για την επαναλειτουργία πυρηνικών αντιδραστήρων που είχαν κλείσει για οικονομικούς λόγους, κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η αναμενόμενη εκτόξευση της ζήτησης ενέργειας από τα κέντρα δεδομένων έχει οδηγήσει σε σχέδια επαναλειτουργίας αρκετών παροπλισμένων πυρηνικών μονάδων στις ΗΠΑ. Εξετάζεται επίσης η πιθανότητα επαναλειτουργίας πρόσφατα κλειστών αντιδραστήρων στη Γερμανία.

Η διαδικασία επαναλειτουργίας πυρηνικών αντιδραστήρων είναι τεχνικά πολύπλοκη και απαιτεί εκτενείς αξιολογήσεις ασφάλειας και περιβαλλοντικής συμβατότητας. Αρχικά, πρέπει να αξιολογηθεί η τεχνική κατάσταση του αντιδραστήρα, του συστήματος ψύξης και της υπόλοιπης κρίσιμης υποδομής. Έπειτα ακολουθεί η απαιτούμενη συντήρηση και οι επισκευές. Πολλά εξαρτήματα, όπως καλωδιώσεις ή τουρμπίνες, χρειάζονται αντικατάσταση λόγω διάβρωσης μετά από παρατεταμένη αδράνεια. Απαραίτητη είναι επίσης η λήψη νέων κανονιστικών εγκρίσεων, σύμφωνα με τα σημερινά πρότυπα αδειοδότησης.

Η εκπαίδευση και προετοιμασία εξειδικευμένου προσωπικού για την ασφαλή λειτουργία του σταθμού είναι κρίσιμη, ενώ σε χώρες με περιορισμένη πλέον πυρηνική παραγωγή αυτό μπορεί να αποτελεί εμπόδιο. Η διαβούλευση με τις τοπικές κοινότητες

και άλλους εμπλεκόμενους είναι επίσης απαραίτητη για τη διασφάλιση διαφάνειας και κοινωνικής αποδοχής της επαναλειτουργίας. Πριν την πλήρη επαναλειτουργία, απαιτούνται εκτενείς δοκιμές συστημάτων και σταδιακή επαναφορά της μονάδας σε πλήρη ισχύ, ώστε να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία.

Η εμπειρία στην επαναλειτουργία πυρηνικών αντιδραστήρων είναι περιορισμένη παγκοσμίως. Η Ιαπωνία αποτελεί την κύρια εξαίρεση, καθώς όλα τα πυρηνικά της εργοστάσια έκλεισαν μετά το ατύχημα στη Φουκουσίμα το 2011. Ωστόσο, οι ιαπωνικοί αντιδραστήρες είχαν διατηρηθεί σε καλή κατάσταση ώστε να μπορούν να επανεκκινήσουν στο μέλλον, κάτι που δεν ισχύει σε άλλες περιπτώσεις, όπου η έλλειψη συντήρησης ή η έναρξη αποσυναρμολόγησης αυξάνει τη δυσκολία και το κόστος. Το κόστος επαναλειτουργίας ενός αντιδραστήρα μπορεί να φτάσει αρκετά δισεκατομμύρια δολάρια, ανεξαρτήτως μεγέθους ή ηλικίας (IAEA, 2008).

Όσον αφορά το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας, είναι σαφές ότι η παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση προς ένα καθαρό και χαμηλών εκπομπών άνθρακα μοντέλο απαιτεί την ενίσχυση των προηγμένων τεχνολογιών. Πρώτον, η μετατροπή γόνιμων σε σχάσιμα υλικά μέσω ταχέων ή θορίου-βασισμένων αντιδραστήρων μπορεί να διασφαλίσει μακροχρόνια βιωσιμότητα καυσίμων. Δεύτερον, οι μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες με τα χαρακτηριστικά ασφάλειας, ευελιξίας και πολλαπλών χρήσεων (παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανση, υδρογόνο, αφαλάτωση) ενισχύουν τα ευφυή, ευέλικτα και χαμηλών εκπομπών ενεργειακά συστήματα. Τρίτον, απαιτείται εστίαση στην βασική και εφαρμοσμένη έρευνα – ιδιαίτερα σε υλικά, καύσιμα, μοντέλα προσομοίωσης, ανακύκλωση καυσίμων και ρυθμιστικά πλαίσια – ώστε να καταστούν τεχνικά εφικτές και εμπορικά εφαρμόσιμες αυτές οι τεχνολογίες. Τέλος, η διεθνής συνεργασία είναι κρίσιμη για την ενίσχυση της καινοτομίας και την από κοινού αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής μέσω προηγμένων πυρηνικών συστημάτων.

3.5 Συνολική Σύγκριση Πυρηνικής και Συμβατικών Τεχνολογιών

3.5.1 Ενεργειακή Απόδοση

Η σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης μεταξύ πυρηνικής ενέργειας και συμβατικών τεχνολογιών καύσης (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα για τη διαμόρφωση ενεργειακών πολιτικών με γνώμονα τη βιωσιμότητα και τη μακροπρόθεσμη ενεργειακή ασφάλεια. Η πυρηνική ενέργεια, αν και περιορίζεται από θερμοδυναμικούς νόμους στον κύκλο Rankine, παρουσιάζει μέση θερμική απόδοση μετατροπής της τάξης του 33–37% (World Nuclear Association, 2023). Η απόδοση αυτή είναι συγκρίσιμη με εκείνη των συμβατικών μονάδων καύσης άνθρακα (33–40%), αλλά υπολείπεται των πιο σύγχρονων μονάδων συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο, οι οποίες μπορούν να φθάσουν σε αποδόσεις έως και 60% (International Energy Agency, 2021). Ωστόσο, η αξιολόγηση της ενεργειακής αποδοτικότητας δεν πρέπει να περιορίζεται αποκλειστικά στη θερμική μετατροπή, αλλά να περιλαμβάνει και την

πυκνότητα ενέργειας του χρησιμοποιούμενου καυσίμου, τον κύκλο ζωής του συστήματος παραγωγής και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η πυρηνική ενέργεια υπερέχει συντριπτικά σε όρους ενεργειακής πυκνότητας: η σχάση ενός κιλού ουρανίου-235 μπορεί να αποδώσει περίπου 24.000.000 kWh, ενώ η αντίστοιχη ενεργειακή απόδοση ενός τόνου άνθρακα είναι περίπου 2.460 kWh (MIT Energy Initiative, 2018). Αυτή η τεράστια διαφορά καθιστά την πυρηνική τεχνολογία εξαιρετικά αποδοτική από άποψη ενεργειακού περιεχομένου ανά μονάδα καυσίμου, γεγονός που περιορίζει τις ανάγκες για μεταφορές, αποθήκευση και καύση μεγάλων ποσοτήτων υλικού, όπως συμβαίνει με τα ορυκτά καύσιμα. Επιπλέον, ενώ οι συμβατικές τεχνολογίες συμβάλλουν σημαντικά στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, καθώς και άλλων ρυπαντών (όπως SO₂, NO_x και μικροσωματιδίων), οι πυρηνικοί σταθμοί παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με σχεδόν μηδενικές άμεσες εκπομπές CO₂ κατά τη φάση λειτουργίας τους. Αυτό καθιστά την πυρηνική ενέργεια ένα από τα πιο αποτελεσματικά μέσα παραγωγής σταθερής και χαμηλών εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας, ιδίως σε χώρες που επιδιώκουν την επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας των Παρισιών για το κλίμα (World Nuclear Association, 2024).

Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η πυρηνική ενέργεια συνοδεύεται από ειδικές προκλήσεις, όπως η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων, το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης και τα θέματα ασφάλειας και κοινωνικής αποδοχής. Ωστόσο, από καθαρά ενεργειακή σκοπιά, το συγκριτικό πλεονέκτημα της πυρηνικής ενέργειας ως προς την ενεργειακή πυκνότητα, την περιορισμένη ανάγκη σε καύσιμο και τη μηδενική παραγωγή ρύπων κατά τη λειτουργία της, καθιστούν την τεχνολογία αυτή εξαιρετικά ανταγωνιστική έναντι των παραδοσιακών συμβατικών πηγών ενέργειας. Συνεπώς, η συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα πρέπει να εκτιμάται ολιστικά, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο τη θερμική απόδοση, αλλά και τη βιωσιμότητα, την εξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα, την ασφάλεια εφοδιασμού και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα κάθε τεχνολογίας.

3.5.2 Οικονομική αξιολόγηση

Η οικονομική αξιολόγηση της πυρηνικής ενέργειας έναντι των συμβατικών τεχνολογιών βασίζεται σε σύνθετους παράγοντες, όπως το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης, το κόστος καυσίμου, η διάρκεια ζωής των μονάδων και οι περιβαλλοντικές εξωτερικότητες (W.R. Stewart et al, 2022). Η πυρηνική ενέργεια χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης (Capital Expenditure), κυρίως λόγω της πολυπλοκότητας της τεχνολογίας, των αυστηρών ρυθμιστικών απαιτήσεων και των μακροχρόνιων διαδικασιών αδειοδότησης και κατασκευής. Ενδεικτικά, σύμφωνα με την Διεθνή Υπηρεσία Ενέργειας (IEA), το κόστος κατασκευής ενός νέου πυρηνικού σταθμού μπορεί να ξεπερνά τα 5.000–7.500 δολάρια ανά εγκατεστημένο kW, ενώ το αντίστοιχο κόστος για μονάδες φυσικού αερίου κυμαίνεται μεταξύ 500–1.000 δολάρια/kW (IEA, 2020). Ωστόσο, το λειτουργικό κόστος (Operational Expenditure – OPEX) των πυρηνικών σταθμών είναι σχετικά χαμηλό,

λόγω της μεγάλης διάρκειας καυσίμου και της σταθερής απόδοσης των μονάδων, με κόστος καυσίμου που συνεισφέρει μόλις το 10–15% στο συνολικό λειτουργικό κόστος (World Nuclear Association, 2023).

Αντιθέτως, οι συμβατικές τεχνολογίες, όπως οι σταθμοί άνθρακα και φυσικού αερίου, παρουσιάζουν χαμηλότερο αρχικό κόστος εγκατάστασης, καθιστώντας τους πιο ελκυστικούς για ιδιωτικές επενδύσεις σε αναπτυσσόμενες οικονομίες ή αγορές με βραχυπρόθεσμη ενεργειακή ζήτηση. Ωστόσο, το κόστος καυσίμου σε αυτές τις τεχνολογίες αποτελεί σημαντικό ποσοστό του συνολικού κόστους παραγωγής, ιδίως σε περιόδους αυξομείωσης των διεθνών τιμών (π.χ. φυσικό αέριο ή άνθρακας). Επιπλέον, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ορυκτών καυσίμων συνεπάγονται και εξωτερικά κόστη, που συχνά δεν υπολογίζονται απευθείας στο τιμολόγιο του ηλεκτρικού ρεύματος αλλά επιβαρύνουν την κοινωνία μέσω της δημόσιας υγείας και της περιβαλλοντικής αποκατάστασης. Σύμφωνα με μελέτη της European Commission (2021), όταν συνυπολογιστούν οι εξωτερικότητες από τις εκπομπές CO₂, οι τεχνολογίες καύσης άνθρακα και πετρελαίου έχουν σημαντικά υψηλότερο κόστος ανά παραγόμενη MWh σε σύγκριση με την πυρηνική ενέργεια, ακόμα και αν αυτή έχει υψηλότερο αρχικό κόστος.

Μια αξιόπιστη μέθοδος συγκριτικής οικονομικής αξιολόγησης είναι το εξισωμένο κόστος ενέργειας (Levelized Cost of Energy – LCOE), το οποίο υπολογίζει το συνολικό κόστος μιας μονάδας παραγωγής σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής της, ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με τα τελευταία δεδομένα του U.S. Energy Information Administration (EIA, 2023), το LCOE για νέες πυρηνικές μονάδες εκτιμάται στα 167 δολάρια/MWh, έναντι περίπου 45–75 δολάρια/MWh για μονάδες φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου και 100–120 δολάρια/MWh για μονάδες άνθρακα με τεχνολογία δέσμευσης CO₂. Αν και το LCOE της πυρηνικής ενέργειας παραμένει υψηλότερο, είναι ανταγωνιστικό όταν εξετάζεται σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, δεδομένου του χαμηλού κόστους λειτουργίας, της μεγάλης διάρκειας ζωής (συνήθως 60–80 έτη), και της σταθερότητας της τιμής του καυσίμου ουρανίου. Τέλος, σημαντικό πλεονέκτημα των πυρηνικών σταθμών είναι η προβλεψιμότητα και σταθερότητα του κόστους παραγωγής, γεγονός που προσφέρει ενεργειακή ασφάλεια και προστασία έναντι γεωπολιτικών κρίσεων ή αγορών καυσίμων υψηλής αστάθειας. Σε αντίθεση, οι συμβατικές μονάδες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις εισαγωγές καυσίμων, γεγονός που εντείνει την ευαλωτότητά τους σε εξωγενείς παράγοντες, όπως αποδείχθηκε κατά την ενεργειακή κρίση της Ευρώπης το 2022. Συνεπώς, αν και η πυρηνική ενέργεια προϋποθέτει σημαντικά κεφαλαιουχικά κονδύλια και μακρές περιόδους απόσβεσης, αποτελεί μακροπρόθεσμα μια από τις πιο σταθερές και προβλέψιμες μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με χαμηλό λειτουργικό κόστος και περιορισμένες εξαρτήσεις από αγορές πρώτων υλών (Nuclear Energy Institute, 2021).

3.5.3 Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα

Η περιβαλλοντική βιωσιμότητα αποτελεί έναν από τους πλέον καθοριστικούς παράγοντες αξιολόγησης των ενεργειακών τεχνολογιών, ιδιαίτερα στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής και της επιτακτικής ανάγκης για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η πυρηνική ενέργεια διακρίνεται για τη χαμηλή περιβαλλοντική της επιβάρυνση κατά τη φάση λειτουργίας, καθώς δεν εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), οξείδια του θείου (SO_2), οξείδια του αζώτου (NO_x) ή σωματίδια, σε αντίθεση με τις συμβατικές μονάδες καύσης ορυκτών καυσίμων, οι οποίες είναι υπεύθυνες για σημαντικό ποσοστό των παγκόσμιων εκπομπών CO_2 . Σύμφωνα με τη Διεθνή Υπηρεσία Ενέργειας (IEA, 2022), οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύση άνθρακα εκπέμπουν κατά μέσο όρο $820 \text{ g CO}_2\text{eq/kWh}$, ενώ οι μονάδες φυσικού αερίου περίπου $490 \text{ g CO}_2\text{eq/kWh}$, όταν η αντίστοιχη τιμή για την πυρηνική ενέργεια είναι μόλις $12 \text{ g CO}_2\text{eq/kWh}$, λαμβάνοντας υπόψη τον πλήρη κύκλο ζωής (από εξόρυξη ουρανίου έως αποξήλωση της μονάδας).

Επιπλέον, οι συμβατικές τεχνολογίες προκαλούν σοβαρές τοπικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως ρύπανση του αέρα, του εδάφους και των υδάτων, λόγω της εναπόθεσης τέφρας, της διαρροής καυσίμων και των παραπροϊόντων καύσης. Η χρήση άνθρακα συνοδεύεται από εκπομπές βαρέων μετάλλων (π.χ. υδράργυρος, αρσενικό) και ραδιενεργών στοιχείων, καθώς και από παραγωγή τεράστιων ποσοτήτων τέφρας και υπολειμμάτων καύσης. Αντιθέτως, η πυρηνική ενέργεια δεν προκαλεί άμεση ρύπανση των φυσικών πόρων, με την προϋπόθεση ότι τηρούνται αυστηρά οι κανόνες λειτουργίας και αποθήκευσης των ραδιενεργών υλικών. Το βασικό περιβαλλοντικό μειονέκτημα της πυρηνικής ενέργειας σχετίζεται με τη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων, τα οποία απαιτούν εξειδικευμένες εγκαταστάσεις αποθήκευσης και μακροχρόνια παρακολούθηση. Ωστόσο, η ποσότητα αυτών των αποβλήτων είναι εξαιρετικά μικρή σε σχέση με τον όγκο αποβλήτων των συμβατικών τεχνολογιών, και η τεχνολογία αποθήκευσής τους έχει εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια (NEA, 2021).

4. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

4.1 Συνοπτική Αποτίμηση των Επιλογών Ενέργειας

4.1.1 Ενεργειακή Απόδοση: Πυρηνική vs. Συμβατικές

Η πυρηνική ενέργεια ξεχωρίζει για την ιδιαίτερα υψηλή ενεργειακή της απόδοση σε σχέση με τις συμβατικές μορφές. Ένα μικρό ποσό ουρανίου μπορεί να παράγει τεράστια ποσά ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η θερμική της απόδοση φτάνει το 33–37%. Σε σύγκριση, οι σταθμοί άνθρακα έχουν απόδοση γύρω στο 33% και οι μονάδες φυσικού αερίου 40–60%, αλλά με σημαντικά υψηλότερες εκπομπές και αυξημένη κατανάλωση καυσίμων. Επιπλέον, η πυρηνική ενέργεια μπορεί να παρέχει σταθερή παραγωγή σε βασικό φορτίο (baseload), μειώνοντας τις μεταπτώσεις και την ανάγκη για εφεδρικές λύσεις. Παρότι πρέπει να συνυπολογιστούν οι ενεργειακές απαιτήσεις που σχετίζονται με την εξόρυξη, επεξεργασία και διαχείριση καυσίμων, η συνολική αποδοτικότητα παραμένει ιδιαίτερα υψηλή. Έτσι, η πυρηνική ενέργεια συνιστά μια σταθερή και αξιόπιστη λύση για τη μακροχρόνια κάλυψη ενεργειακών αναγκών.

4.1.2 Οικονομική Ανάλυση

Από οικονομικής πλευράς, η πυρηνική ενέργεια παρουσιάζει μακροχρόνια πλεονεκτήματα. Αν και η κατασκευή πυρηνικών σταθμών απαιτεί τεράστιες αρχικές επενδύσεις και πολύ χρόνο, τα λειτουργικά κόστη και το κόστος καυσίμου παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα. Αυτό προσδίδει στην πυρηνική τεχνολογία μια σταθερότητα που δεν έχουν οι συμβατικές πηγές, οι οποίες εξαρτώνται από συνεχείς αγορές καυσίμων και επηρεάζονται έντονα από τις διακυμάνσεις στις διεθνείς τιμές. Παράλληλα, το χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα της πυρηνικής ενέργειας μειώνει τις μελλοντικές επιβαρύνσεις από περιβαλλοντικές ρυθμίσεις. Ωστόσο, δεν πρέπει να παραβλέπονται οι κίνδυνοι που απορρέουν από πιθανές αστοχίες και ατυχήματα, καθώς και το υψηλό κόστος της διαχείρισης των ραδιενεργών αποβλήτων. Συνολικά, η πυρηνική ενέργεια φαίνεται πιο βιώσιμη οικονομικά σε βάθος χρόνου, ενώ οι συμβατικές πηγές, αν και πιο προσιτές στην αρχή, συχνά χάνουν την ανταγωνιστικότητά τους με την πάροδο του χρόνου.

4.1.3 Περιβαλλοντική Επίδραση

Η περιβαλλοντική επίδραση της πυρηνικής ενέργειας είναι αισθητά χαμηλότερη σε σύγκριση με τις συμβατικές μορφές. Οι πυρηνικοί σταθμοί δεν εκπέμπουν CO₂ κατά την παραγωγή, γεγονός που τους καθιστά από τις πιο «καθαρές» επιλογές όσον αφορά την κλιματική αλλαγή. Σε αντίθεση, οι μονάδες άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου ευθύνονται για μεγάλες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και ρύπανση που επηρεάζει αρνητικά την ατμόσφαιρα, τα ύδατα και τη βιοποικιλότητα. Παρόλα αυτά, η πυρηνική ενέργεια συνοδεύεται από δικές της προκλήσεις. Η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων παραμένει ζήτημα με τεράστιες απαιτήσεις ασφαλείας, ενώ τα ατυχήματα, αν και σπάνια, μπορούν να έχουν μακροχρόνιες και καταστροφικές συνέπειες για το περιβάλλον, όπως έδειξαν το Τσερνόμπιλ και η Φουκουσίμα. Επιπλέον, η εξόρυξη και επεξεργασία ουρανίου δημιουργεί πρόσθετο περιβαλλοντικό

αποτύπωμα. Παρ' όλα αυτά, σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές, η πυρηνική ενέργεια εξακολουθεί να αποτελεί πιο καθαρή λύση για τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής, υπό την προϋπόθεση ότι εφαρμόζεται υπεύθυνα και με αυστηρά μέτρα ασφαλείας.

4.2 Προκλήσεις και Περιορισμοί της Πυρηνικής Ενέργειας

4.2.1 Τεχνικοί, περιβαλλοντικοί και κοινωνικοί περιορισμοί

Η πυρηνική ενέργεια συνοδεύεται από σοβαρές τεχνικές και περιβαλλοντικές προκλήσεις. Ένα από τα βασικά προβλήματα αφορά το ουράνιο, το οποίο χρειάζεται εξόρυξη και επεξεργασία. Η διαδικασία αυτή, ιδιαίτερα σε χώρες χαμηλού εισοδήματος, δημιουργεί έντονα περιβαλλοντικά και κοινωνικά προβλήματα, όπως ρύπανση εδαφών και υδάτων, παρουσία βαρέων μετάλλων, αλλά και προβλήματα υγείας στους τοπικούς πληθυσμούς. Η έλλειψη αποτελεσματικών μηχανισμών ελέγχου και κανονισμών σε πολλές χώρες κάνει την κατάσταση ακόμη πιο δύσκολη.

Άλλο ένα κρίσιμο ζήτημα είναι η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων. Τα απόβλητα αυτά χρειάζονται πολύ προσεκτική και ασφαλή αποθήκευση. Χρησιμοποιούνται μέθοδοι όπως η προσωρινή φύλαξη σε ειδικές δεξαμενές νερού και η γεωλογική ταφή σε μεγάλα βάθη, που θεωρείται η πιο ασφαλής λύση. Παρά τις τεχνικές αυτές, οι κίνδυνοι από πιθανές διαρροές, ατυχήματα ή ανθρώπινα λάθη παραμένουν. Επιπλέον, το κόστος κατασκευής και συντήρησης τέτοιων εγκαταστάσεων είναι εξαιρετικά υψηλό, κάτι που επιβαρύνει την οικονομική βιωσιμότητα των έργων.

Η κατασκευή πυρηνικών εργοστασίων απαιτεί επίσης μεγάλες αρχικές επενδύσεις. Αν και το κόστος λειτουργίας τους είναι σχετικά χαμηλό σε σύγκριση με τα εργοστάσια άνθρακα ή φυσικού αερίου, το υψηλό κόστος κατασκευής αποτελεί τροχοπέδη για χώρες με ασθενέστερες οικονομίες. Έρευνες έχουν δείξει ότι τα κράτη με ισχυρότερη οικονομική βάση καταφέρνουν να ολοκληρώσουν ταχύτερα έργα πυρηνικών αντιδραστήρων και να τους εντάξουν πιο εύκολα στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Τέλος, υπάρχει συζήτηση για το κατά πόσο το πολιτικό σύστημα επηρεάζει την υιοθέτηση πυρηνικών έργων. Κάποιες μελέτες δείχνουν ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά ανάμεσα σε δημοκρατίες και αυταρχικά καθεστώτα ως προς την ταχύτητα ή την επιτυχία των έργων. Άλλες όμως υποστηρίζουν ότι χώρες με λιγότερο δημοκρατικά συστήματα είναι πιθανότερο να ξεκινήσουν πυρηνικά προγράμματα, καθώς έχουν τη δυνατότητα να παρακάμπτουν κοινωνικές αντιδράσεις και διαδικασίες διαβούλευσης.

4.2.2 Ζητήματα ασφαλείας και αποδοχής από την κοινωνία

Η ασφάλεια αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς περιορισμούς της πυρηνικής ενέργειας. Τα μεγάλα ατυχήματα, όπως στο Three Mile Island, στο Τσερνόμπιλ και στη Φουκουσίμα, έχουν αφήσει βαθύ αποτύπωμα στην κοινή γνώμη και στη διεθνή ενεργειακή πολιτική. Μελέτες δείχνουν ότι κάθε σοβαρό ατύχημα μείωσε σημαντικά την πιθανότητα κατασκευής νέων πυρηνικών σταθμών σε πολλές χώρες. Η επίδραση όμως δεν ήταν ίδια παντού. Σε αυταρχικά καθεστώτα τα ατυχήματα είχαν μικρότερη

πολιτική και κοινωνική επίδραση, ενώ στις δημοκρατίες η αντίδραση ήταν πιο έντονη, οδηγώντας σε καθυστερήσεις ή και ακυρώσεις έργων.

Η δυσπιστία της κοινωνίας απέναντι στην πυρηνική ενέργεια παραμένει ισχυρή. Ο φόβος για ατυχήματα, ραδιενέργεια και μακροχρόνιες περιβαλλοντικές συνέπειες οδηγεί σε αρνητική στάση, ακόμα κι αν τα πραγματικά στατιστικά στοιχεία δείχνουν περιορισμένη πιθανότητα σοβαρών περιστατικών. Το κοινό συχνά υπερεκτιμά τους κινδύνους και υποτιμά τα οφέλη, όπως οι χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με τις συμβατικές πηγές.

Τα ατυχήματα στο Τσερνόμπιλ και στη Φουκουσίμα ενίσχυσαν περαιτέρω αυτήν τη δυσπιστία, προκαλώντας κοινωνική και πολιτική αντίσταση στην ανάπτυξη νέων πυρηνικών έργων. Η έλλειψη διαφάνειας και επαρκούς πληροφόρησης από τις κυβερνήσεις και τις εταιρείες ενέργειας επιβαρύνει ακόμη περισσότερο την εικόνα της πυρηνικής τεχνολογίας.

Η κοινωνική αποδοχή αποτελεί τελικά κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχία των πυρηνικών προγραμμάτων. Η αρνητική στάση του κοινού μπορεί να επιβραδύνει ή και να ακυρώσει έργα, επηρεάζοντας επενδύσεις και πολιτικές αποφάσεις. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να ενισχυθεί η ενημέρωση, η διαφάνεια και η επικοινωνία με τους πολίτες, ώστε να περιοριστούν οι φόβοι και να διαμορφωθεί μια πιο ρεαλιστική εικόνα για τα οφέλη και τους κινδύνους της πυρηνικής ενέργειας.

4.3 Μελλοντικές Προοπτικές και Στρατηγικές Ανάπτυξης

4.3.1 Προϋποθέσεις και Απαιτήσεις για Ευρεία Χρήση

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας κάνει την πυρηνική ενέργεια μια από τις πιο σημαντικές επιλογές για το μέλλον. Η τεχνολογία των αντιδραστήρων εξελίσσεται με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης, τη μείωση του κόστους και την ενίσχυση της ασφάλειας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι αντιδραστήρες τέταρτης γενιάς, οι οποίοι επιδιώκουν όχι μόνο να παράγουν περισσότερη ενέργεια με μικρότερο κόστος, αλλά και να περιορίσουν την ποσότητα των αποβλήτων. Στη νέα αυτή γενιά περιλαμβάνονται διαφορετικοί τύποι αντιδραστήρων, όπως ο αερόψυκτος (GFR), ο ψυχόμενος με μόλυβδο (LFR), ο αντιδραστήρας τετηγμένου άλατος (MSR), ο νατρίοψυκτος (SFR), ο υπερκρίσιμος υδρόψυκτος (SCWR) και ο πολύ υψηλής θερμοκρασίας (VHTR). Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν καινοτόμα ψυκτικά μέσα, προηγμένα μέτρα παθητικής ασφάλειας και τεχνολογίες ανακύκλωσης καυσίμου, μειώνοντας έτσι τον συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο.

Στον τομέα του καυσίμου, βασικές επιλογές παραμένουν το ουράνιο, το θόριο και τα ανακυκλωμένα καύσιμα. Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνολογίες που βελτιώνουν την ασφάλεια και την απόδοση των αντιδραστήρων. Τα Καύσιμα Ανοχής σε Ατυχήματα (ATF) είναι σχεδιασμένα ώστε να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες και ακτινοβολία, μειώνοντας τον κίνδυνο σοβαρών αστοχιών. Το Υψηλής Ανάλυσης

Ουράνιο Χαμηλού Εμπλουτισμού (HALEU), με εμπλουτισμό 5–20%, αναμένεται να παίζει σημαντικό ρόλο στους μελλοντικούς αντιδραστήρες και στους μικρούς αρθρωτούς αντιδραστήρες (SMRs), καθώς προσφέρει μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα και παράγει λιγότερα απόβλητα. Άλλη καινοτομία είναι το καύσιμο TRISO, που προσφέρει αυξημένη ασφάλεια χάρη στη δομή του, καθιστώντας τον κύκλο του καυσίμου πιο βιώσιμο και αποδοτικό.

Η πρόοδος στις τεχνολογίες αυτές συνδυάζεται με αυστηρότερα μέτρα ασφαλείας και βελτιωμένα συστήματα ψύξης, τα οποία μειώνουν τον κίνδυνο ατυχημάτων. Η εκπαίδευση του προσωπικού και η συμμόρφωση με διεθνή πρότυπα, όπως αυτά του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (IAEA), ενισχύουν την εμπιστοσύνη της κοινωνίας και συμβάλλουν στη βιωσιμότητα της πυρηνικής ενέργειας ως καθαρής πηγής.

4.3.2 Δυνατότητες και περιορισμοί

Η πυρηνική ενέργεια έχει τη δυνατότητα να καλύψει τις αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες, προσφέροντας σταθερή και χαμηλών εκπομπών παραγωγή. Οι αντιδραστήρες τέταρτης γενιάς υπόσχονται μεγαλύτερη αποδοτικότητα και λιγότερα απόβλητα, ενώ οι καινοτομίες στον κύκλο καυσίμου δίνουν λύσεις σε μακροχρόνια ζητήματα, όπως η διαχείριση αποβλήτων και η ασφάλεια. Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή εξακολουθεί να αντιμετωπίζει περιορισμούς.

Η ασφάλεια παραμένει ένα από τα μεγαλύτερα εμπόδια. Παρά τις βελτιώσεις, μεγάλα ατυχήματα όπως αυτά στο Τσερνόμπιλ και στη Φουκουσίμα έχουν ενισχύσει τη δυσπιστία του κοινού. Επιπλέον, ο κίνδυνος διάδοσης πυρηνικών υλικών για στρατιωτικούς σκοπούς δημιουργεί ανάγκη για αυστηρούς διεθνείς ελέγχους και συνεργασία ανάμεσα στα κράτη.

Περιορισμούς δημιουργούν και πολιτικοί, κοινωνικοί και θεσμικοί παράγοντες. Σε πολλές χώρες, η αντίθεση των πολιτών μπορεί να καθυστερήσει ή να ακυρώσει έργα, ενώ οι διαδικασίες αδειοδότησης είναι συχνά μακροχρόνιες και περίπλοκες. Παράλληλα, η εξάρτηση από λίγους προμηθευτές πυρηνικού καυσίμου αυξάνει τη γεωπολιτική αβεβαιότητα, κάτι που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ενεργειακή ασφάλεια σε παγκόσμιο επίπεδο.

Συνολικά, η πυρηνική ενέργεια έχει μεγάλες δυνατότητες να συμβάλει στη μετάβαση σε ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα. Ωστόσο, η πρόοδός της θα εξαρτηθεί από την τεχνολογική καινοτομία, την αποτελεσματική διαχείριση των αποβλήτων, την ασφάλεια, τη διεθνή συνεργασία και, κυρίως, την κοινωνική αποδοχή.

4.4 Συνολική Αξιολόγηση και Συμπεράσματα

4.4.1 Συνολική κρίση και τοποθέτηση

Η πυρηνική ενέργεια είναι μία από τις πιο ισχυρές αλλά και πιο αμφιλεγόμενες μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Το κύριο πλεονέκτημά της είναι η ικανότητα να παράγει μεγάλες και σταθερές ποσότητες ενέργειας με χαμηλές άμεσες εκπομπές CO₂ σε

σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα. Η αξιοπιστία της είναι επίσης υψηλή, καθώς οι πυρηνικοί σταθμοί μπορούν να λειτουργούν αδιάκοπα για μήνες, προσφέροντας σταθερή ηλεκτροπαραγωγή και ενισχύοντας την ενεργειακή ασφάλεια. Στα θετικά στοιχεία της περιλαμβάνεται η συμβολή στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και η δυνατότητα να στηρίξει την παγκόσμια μετάβαση σε ένα ενεργειακό μείγμα χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Η τεχνολογική πρόοδος, όπως οι αντιδραστήρες τέταρτης γενιάς και τα καύσιμα ανοχής σε ατυχήματα (ATF), υπόσχεται ακόμη καλύτερη απόδοση και ασφάλεια στο μέλλον. Παρά τα πλεονεκτήματα, η πυρηνική ενέργεια έχει σημαντικές προκλήσεις. Η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων είναι ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα, καθώς απαιτείται ασφαλής αποθήκευση για χιλιάδες χρόνια. Το υψηλό κόστος κατασκευής και οι μακροχρόνιες διαδικασίες αδειοδότησης καθυστερούν νέες επενδύσεις, ενώ τα μεγάλης κλίμακας ατυχήματα, όπως στο Τσερνόμπιλ και στη Φουκουσίμα, έχουν ενισχύσει τη δυσπιστία της κοινωνίας απέναντι στην τεχνολογία. Συνοψίζοντας, η πυρηνική ενέργεια μπορεί να αποτελέσει έναν κρίσιμο πυλώνα της παγκόσμιας ενεργειακής στρατηγικής. Ωστόσο, η μελλοντική της ανάπτυξη θα εξαρτηθεί από τρεις βασικούς παράγοντες: τη βελτίωση της ασφάλειας, την αποτελεσματική διαχείριση αποβλήτων και την ενίσχυση της εμπιστοσύνης της κοινωνίας. Ένα ισορροπημένο ενεργειακό μίγμα, που θα συνδυάζει πυρηνική και ανανεώσιμες πηγές, φαίνεται η πιο βιώσιμη επιλογή.

4.4.2 Ενδείξεις για το μέλλον

Η πυρηνική ενέργεια βρίσκεται σε κρίσιμο σημείο ως προς τον ρόλο της στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα. Η ανάγκη για μείωση των εκπομπών και για ασφάλεια τροφοδοσίας δημιουργεί ισχυρά κίνητρα για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών. Οι αντιδραστήρες τέταρτης γενιάς στοχεύουν σε μεγαλύτερη απόδοση, ενισχυμένη ασφάλεια και λιγότερα απόβλητα, χρησιμοποιώντας καινοτόμα ψυκτικά μέσα και παθητικά συστήματα προστασίας. Παράλληλα, οι Μικροί Αρθρωτοί Αντιδραστήρες (SMRs) αναδεικνύονται σε μια πολλά υποσχόμενη λύση. Με χαμηλότερο κόστος και δυνατότητα εγκατάστασης σε μικρότερη κλίμακα, μπορούν να παρέχουν ενέργεια σε βιομηχανίες ή απομονωμένες περιοχές. Ταυτόχρονα, νέες μορφές καυσίμου, όπως το HALEU και τα ATF, αναμένεται να βελτιώσουν την ασφάλεια, να παρατείνουν τον χρόνο λειτουργίας και να μειώσουν την ποσότητα ραδιενεργών αποβλήτων. Ένας ακόμη μακροπρόθεσμος στόχος είναι η πυρηνική σύντηξη. Έργα όπως το ITER και το SPARC φιλοδοξούν να αποδείξουν ότι η σύντηξη μπορεί να προσφέρει σχεδόν απεριόριστη καθαρή ενέργεια χωρίς τα προβλήματα αποβλήτων της σχάσης. Ωστόσο, τα τεχνικά και οικονομικά εμπόδια παραμένουν μεγάλα. Παρά τις τεχνολογικές προοπτικές, το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας δεν εξαρτάται μόνο από την επιστήμη αλλά και από κοινωνικούς και πολιτικούς παράγοντες. Η κοινωνική αποδοχή, οι διεθνείς ρυθμίσεις και η αντιμετώπιση θεμάτων ασφάλειας θα καθορίσουν αν η πυρηνική ενέργεια θα συνεχίσει να επεκτείνεται ή θα παραμείνει στάσιμη. Ένας

συνδυασμός πυρηνικής και ανανεώσιμης ενέργειας είναι πιθανό να αποτελέσει την πιο σταθερή και βιώσιμη επιλογή για το μέλλον.

4.4.3 Πιθανές κατευθύνσεις για περαιτέρω μελέτη

Μικροί Αρθρωτοί Αντιδραστήρες (SMRs)

Οι SMRs είναι μικρότεροι, χαμηλών εκπομπών άνθρακα αντιδραστήρες ισχύος 20–300 MW. Η αρθρωτή τους κατασκευή επιτρέπει παραγωγή σε εργοστάσια, μειώνοντας το κόστος και επιταχύνοντας την εγκατάσταση. Προσφέρουν ευελιξία, επεκτασιμότητα και συνεχή λειτουργία, ενώ μπορούν να αξιοποιηθούν για την απανθρακοποίηση της βιομηχανίας ή ακόμη και για αφαλάτωση νερού. Σήμερα υπάρχουν περίπου 150 σχέδια παγκοσμίως, τα περισσότερα σε ερευνητικό ή αναπτυξιακό στάδιο, με τις ΗΠΑ, την Κίνα, τη Ρωσία και τη Νότια Κορέα να πρωτοστατούν. Το ενδιαφέρον μεγάλων εταιρειών όπως η Google και η Amazon δείχνει ότι υπάρχουν ισχυρές προοπτικές, εφόσον εξασφαλιστεί στήριξη από κράτη και επενδυτές.

Σύντηξη

Η σύντηξη θεωρείται το «ιερό δισκοπότηρο» της ενέργειας, αφού υπόσχεται υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, ελάχιστα απόβλητα και χρήση άφθονων καυσίμων όπως το δευτέριο και το τρίτιο. Το ITER στοχεύει να παράγει 500 MW με εισροή 50 MW ($Q=10$), ενώ το SPARC φιλοδοξεί να φτάσει ακόμη υψηλότερους συντελεστές απόδοσης. Οι βασικές προκλήσεις είναι οι εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες, η σταθερότητα του πλάσματος, η αντοχή των υλικών και η εξασφάλιση καυσίμων όπως το τρίτιο. Αν και οι δυσκολίες είναι μεγάλες, διεθνείς συνεργασίες και ιδιωτικές επενδύσεις δείχνουν ότι μέχρι τη δεκαετία του 2030 ίσως υπάρξουν εμπορικές εφαρμογές.

Τεχνητή Νοημοσύνη και Μηχανική Μάθηση (AI & ML)

Η εφαρμογή της AI στην πυρηνική ενέργεια αναπτύσσεται ραγδαία. Χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης αντιδραστήρων, την πρόβλεψη κρίσιμων παραμέτρων και τη διάγνωση βλαβών. Εξελικτικοί αλγόριθμοι βελτιώνουν τη διάταξη καυσίμου και τον σχεδιασμό θωράκισης, ενώ μοντέλα μηχανικής μάθησης προβλέπουν τη θερμοϋδραυλική συμπεριφορά των συστημάτων. Επίσης, συστήματα πρόγνωσης και διαχείρισης υγείας (PHM) επιτρέπουν συντήρηση μόνο όταν χρειάζεται, μειώνοντας κόστος και κινδύνους. Έτσι, η AI μπορεί να κάνει την πυρηνική ενέργεια πιο αποδοτική, ασφαλή και αξιόπιστη.

Βιβλιογραφία

- Ali Zamani Paydar, A., Ghasemi, H. & Houshmand, M., 2023. *Generation IV nuclear reactors: innovations in safety, sustainability and fuel cycles*. Journal of Nuclear Materials, 565, pp.1-15.
- Brutschin, E., Jewell, J., De Cian, E. & Wienges, S., 2021. *The political economy of nuclear energy in Europe*. Energy Policy, 149, p.112013.
- Chen, R., Su, G.H. & Zhang, Y., 2022. *Policy support and technological innovation for small modular reactors (SMRs)*. Progress in Nuclear Energy, 148, p.104256.
- Claude Degueudre, C., 2020. *Thorium fuel cycle and uranium resources: a comparative assessment*. Progress in Nuclear Energy, 125, p.103376.
- Cranmer, S., 2024. *Long-term nuclear waste management: risks and societal challenges*. Energy Research & Social Science, 104, p.103246.
- Csereklyei, Z., Varbanov, P. & Stern, D., 2015. *Energy and economic growth: the stylized facts*. Energy Journal, 36(2), pp.1-31.
- Csereklyei, Z., et al., 2014. *The global impact of the Chernobyl accident on nuclear energy policies*. Energy Policy, 74, pp.138-148.
- European Commission, 2021. *External costs of energy production*. Brussels: European Union.
- European Environment Agency, 1998. *Life Cycle Assessment: A guide to approaches, experiences and information sources*. Copenhagen: EEA.
- Fuhrmann, M., 2012. *Atomic assistance: How “Atoms for Peace” programs cause nuclear insecurity*. Cornell University Press.
- Gaurav Katoch, G., Sharma, S. & Lee, J., 2025. *High-temperature superconductors and fusion energy prospects*. Fusion Engineering and Design, 194, p.113274.
- German Jordanian University, 2022. *Wind energy and bird collision risks*. Amman: GJU Press.
- Giambattista Guidi, G., et al., 2023. *Comparative life-cycle assessment of renewable and nuclear energy systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 176, p.113184.
- Goodger, E.M., 1994. *Nuclear fuel cycles: Uranium, thorium and reprocessing options*. Energy Policy, 22(4), pp.347-354.
- Gourley, S., et al., 2013. *Public attitudes and nuclear accidents: implications for nuclear policy*. Energy Policy, 62, pp.745-754.
- IAEA, 2008. *Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation*. Vienna: International Atomic Energy Agency.

- IAEA, 2022. *Nuclear safety review*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- IAEA, 2024. *Emerging applications of nuclear energy in data centers*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- International Energy Agency (IEA), 2020. *Projected costs of generating electricity*. Paris: IEA.
- International Energy Agency (IEA), 2021. *Energy efficiency indicators*. Paris: IEA.
- International Energy Agency (IEA), 2022. *World Energy Outlook*. Paris: IEA.
- International Energy Agency (IEA), 2025. *Nuclear power and the global energy transition*. Paris: IEA.
- ITER Organization, 2023. *ITER: Building the way to fusion energy*. Cadarache: ITER.
- Jibran Iqbal, J., et al., 2021. *Risks of human error in long-term nuclear waste management*. Journal of Hazardous Materials, 416, p.125926.
- Krishna Kumar Yadav, K.K., et al., 2023. *Accident-tolerant fuels: design, development and challenges*. Progress in Nuclear Energy, 154, p.104483.
- Liu, Z., 2021. *Small modular reactors: design, economics and deployment*. Nuclear Engineering and Design, 380, p.111310.
- Malek, K. & Hussien, R., 2021. *Cooling technologies for photovoltaic systems: a review*. Renewable Energy, 170, pp.1240-1253.
- Muhammad Shahzad Nazir, M.S., 2020. *Soil and environmental impacts of wind farms*. Environmental Monitoring and Assessment, 192(8), pp.1-15.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2025. *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation*. Golden, CO: NREL.
- Neumann, J., et al., 2020. *Political regimes and nuclear energy adoption*. Energy Policy, 138, p.111234.
- Nuclear Energy Agency (NEA), 2015. *Thorium fuel cycle: potential benefits and challenges*. Paris: OECD/NEA.
- Nuclear Energy Agency (NEA), 2016. *Red Book: Uranium resources, production and demand*. Paris: OECD/NEA.
- Nuclear Energy Agency (NEA), 2021. *Managing radioactive waste safely*. Paris: OECD/NEA.
- Nuclear Energy Institute, 2021. *The cost of nuclear energy*. Washington, DC: NEI.
- OECD/NEA, 2021. *Nuclear Energy and Climate Change*. Paris: OECD/NEA.
- Patricia Mateo-Tomas, P., 2022. *Bird mortality and wind energy development*. Biological Conservation, 268, p.109532.

- Pidgeon, N., 2011. *Public perception and nuclear risk*. Nature Climate Change, 1, pp.326-329.
- Qiang Wang, Q., et al., 2021. *Greenhouse gas emissions from nuclear power: life cycle analysis*. Energy, 214, p.118910.
- Qingyu Huang, Q., et al., 2023. *Prognostics and health management in nuclear systems with AI integration*. Reliability Engineering & System Safety, 232, p.108980.
- Ravikumar Jayabal, R., 2025. *Water management challenges in nuclear power plants*. Desalination and Water Treatment, 295, pp.112-124.
- Sarkar, S., 2019. *Uranium mining and its socio-environmental impacts in Africa*. Environmental Science and Policy, 92, pp.124-132.
- Slovic, P., 1987. *Perception of risk*. Science, 236(4799), pp.280-285.
- Sovacool, B.K., et al., 2016. *Nuclear accidents and their consequences for human health and the environment*. Energy Policy, 94, pp.189-202.
- Sovacool, B.K., et al., 2020. *Public trust and nuclear energy after Fukushima*. Energy Research & Social Science, 68, p.101547.
- Turner, P., et al., 2014. *Economic strength and nuclear program adoption*. Energy Policy, 73, pp.113-123.
- Turner, P., et al., 2017. *Political regimes and nuclear construction timelines*. Energy Policy, 104, pp.48-58.
- U.S. Department of Energy (DOE), 2021. *Thorium fuel cycle overview*. Washington, DC: DOE.
- U.S. Department of Energy (DOE), 2024. *High-assay low-enriched uranium (HALEU) applications*. Washington, DC: DOE.
- Vengosh, A., et al., 2021. *The global water footprint of fossil fuels*. Environmental Research Letters, 16(11), p.114012.
- Visschers, V.H.M., et al., 2013. *Public acceptance of nuclear power: the role of trust and knowledge after Fukushima*. Risk Analysis, 33(2), pp.333-347.
- Whitfield, S.C., et al., 2009. *Nuclear power and public risk perception: a cross-national study*. Risk Analysis, 29(5), pp.766-779.
- World Nuclear Association, 2014. *Nuclear power and sustainable development*. London: WNA.
- World Nuclear Association, 2017. *Storage and disposal of radioactive waste*. London: WNA.
- World Nuclear Association, 2019. *Uranium production and demand*. London: WNA.

World Nuclear Association, 2023. *The performance of nuclear power plants*. London: WNA.

World Nuclear Association, 2024. *Small Modular Reactors (SMRs): an overview*. London: WNA.

World Nuclear Association, 2025. *Nuclear power in the world today*. London: WNA.

Βιβλιογραφία εικόνων

Εικόνα 1: Max Planck Institute for Chemistry (2013). *Die Entdeckung der Kernspaltung*.

Εικόνα 2: Harry Ransom Center, University of Texas (1960). *First photograph of the atomic bomb "Little Boy"*.

Εικόνα 3: MIT Nuclear Reactor Laboratory (2002). *The fission process in uranium nuclei*.

Εικόνα 4: Apfel, R. E. (1992) *1992 STS-50 Drop Dynamics Experiment*. Yale University.

Εικόνα 5: Busby, J. T. & Nanstad, R. (2010) *Materials Degradation in Light Water Reactors: Life After 60*. Oak Ridge National Laboratory.

Εικόνα 6: Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety / Länder (n.d.) *Nuclear safety: An information portal of the Federal government and the Länder*.

Εικόνα 7: Alameri, S. A. & Alkaabi, A. K. (2020) 'Fundamentals of nuclear reactors', *Nuclear Reactor Technology Development and Utilization*, Elsevier, pp. 27-60.

Εικόνα 8: Kvizda, B., Mayer, G., Vácha, P. & Malesa, J. (2019) 'ALLEGRO Gas-cooled Fast Reactor (GFR) demonstrator thermal hydraulic benchmark', *Nuclear Engineering and Design*

Εικόνα 9: U.S. Nuclear Regulatory Commission (2020) *ML20030B788. NRC Technical Report*.

Εικόνα 10: Wang, Y., Chen, W., Zhang, L. & Dinavahi, V. (2024) 'Small Modular Reactors: An Overview of Modeling, Control, Simulation, and Applications', *IEEE Access*, 12

Εικόνα 11: Kammen, D. (2016) Lecture 4: *What are the barriers to action? Class of 1935 Distinguished Professor of Energy, Energy and Resources Group, Goldman School of Public Policy, University of California, Berkeley*.

Εικόνα 12: Friedman, N. (2024) *Nuclear submarine*. *Encyclopaedia Britannica*

Εικόνα 13: Bulut Acar, B. (2019) *Turkey's Nuclear Power Program and Issues Related to Spent Fuel*. Department of Nuclear Engineering, Hacettepe University, Turkey .IAEA

Εικόνα 14: World Nuclear Association (2019) *How is used nuclear fuel managed?*

Εικόνα 15: Radwaste Solutions (2022) *Waste Management: NRC to consolidate LLW rulemaking*

Εικόνα 16: Poynting, M. & Rannard, G. (2024) *How is the world doing on tackling climate change? 19 November. BBC Climate & Science*

Εικόνα 17: Eze, V.H.U., Edozie, E., Umaru, K. & Okafor, W.O. (2023) *Overview of Renewable Energy Power Generation and Conversion (2015–2023). Kampala International University, Uganda; Muni University; Continental Transfer Technique. July 2023.*

Εικόνα 18: The Editors of Encyclopaedia Britannica (2025) *The first Industrial Revolution. Encyclopaedia Britannica.*

Εικόνα 19: Mack, P.E. (2023) *Clemson University.*

Εικόνα 20: Yang, J., Yu, Y., Ma, T., Zhang, C. & Wang, Q. (2021) 'Evolution of energy and metal demand driven by industrial revolutions and its trend analysis', *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 19(3), pp. 256–264.

Εικόνα 21: Arent, D.J., Wise, A. & Gelman, R. (2011) 'The status and prospects of renewable energy for combating global warming', *Energy Economics*, July, pp. 584–593.

Εικόνα 22: Gerpielke, J. (2009) *Integration of Biorefineries and Nuclear Cogeneration Power Plants – A Preliminary Analysis*

Εικόνα 23: Britain Remade (2024)

Εικόνα 24: Greene, S., Flanagan, G.F. & Borole, A. (2009) 'Integration of Biorefineries and Nuclear Cogeneration Power Plants - A Preliminary Analysis'

Εικόνα 25: Dawson, K. & Sabharwall, P. (2017) *A Review of Light Water Reactor Costs and Cost Drivers. Technical Report.*

Εικόνα 26: Choi, J. & Lee, S.J. (2020) 'A Sensor Fault-Tolerant Accident Diagnosis System', *Sensors*, 20(20), p. 5839.

Εικόνα 27: Sehgal, B.R., 2012. *Severe Accident Management. In: Nuclear Safety in Light Water Reactors: Severe Accident Phenomenology. Academic Press, pp. 519–588.*

Εικόνα 28: Jiang, X., Chow, M.-Y., Bourham, M., et al (2017–2022) *High Temperature Embedded/Integrated Sensors for Remote Monitoring of Reactor and Fuel Cycle Systems (HiTEIS)*. Department of Electrical and Computer Engineering, North Carolina State University

Εικόνα 29: Wald, M.L. (2023) 'Watching trends: How INL helps the NRC model risk and reliability', *Idaho National Laboratory,*

Εικόνα 30: Muhamad, L.H., Karim, M.K.A., Chew, M.T., Kechik, M.M.A., Shah, N.M., Ibahim, M.J. & Saeed, I.M. (2023) 'Atmospheric dispersion and dose

assessment of ^{137}Cs and ^{131}I from hypothetical incidents of nuclear power plant in Southeast Asia, *Radiation Physics and Chemistry*, 208, p. 110941.

Εικόνα 31: Crownhart, C. (2024) *'The next generation of nuclear reactors is getting more advanced. Here's how'*, MIT

Εικόνα 32: Joo, S., Song, S.H., Oh, S., Qvist, S. & Lee, J.I. (2024) *'Evaluation of Coal Repowering Option with Small Modular Reactor in South Korea'*, *Energies*, 17(24), p. 6493.

Εικόνα 33: German Environment Agency (2025) *Avoided greenhouse gas emission by the use of renewable energies*.

Εικόνα 34: Joint Research Centre (2019) *Water footprint of EU energy consumption: 1,301 litres per person per day*

Εικόνα 35: World Nuclear Association (2019) *Uranium resources*

Εικόνα 36: Tarakanov, V. (2023) *'What is Uranium?'*, *Nuclear Explained*, IAEA Office of Public Information and Communication

Εικόνα 37: Vlasov, A. (2023) *'Thorium's Long-Term Potential in Nuclear Energy'*, *Nuclear Innovations for Net Zero*, September.

Βιβλιογραφία πινάκων

Πίνακας 1: E. A. Wrigley (2010) *Energy and English Industrial Revolution* Wrigley, E.A., 2010 Cambridge: Cambridge University Press

Πίνακας 2: Federal Energy Regulatory Commission (2024) *Analysis of nuclear plant capital cost with respect to labor*. Washington, DC: Federal Energy Regulatory Commission.

Πίνακας 3: Federal Energy Regulatory Commission (2024) *Analysis of nuclear plant capital cost with respect to goods and materials*. Washington, DC: Federal Energy Regulatory Commission.

