



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

**«Πυρηνική Ενέργεια Και Διαχείριση Αποβλήτων»
«Nuclear Energy And Nuclear Waste Management»**

Υπό
ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΙΑΣΩΝ

Πτυχιακή Εργασία

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

Λάρισα, 2025

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

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

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

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

ΕΠΩΝΥΜΟ	ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ
ΟΝΟΜΑ	ΙΑΣΩΝ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	2919040
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	07/02/2025
ΥΠΟΓΡΑΦΗ	

© 2025. ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΙΑΣΩΝ

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 της διπλωματικής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Παπανδριανό Νικόλαο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας μου.

Ευχαριστώ τους συναδέλφους και φίλους μου Ξύλου Σοφία και Γρίβα Ζαχαρία για την ηθική και πρακτική υποστήριξή τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Γεώργιο και Ωραιοζήλη για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην μητέρα μου, στον πατέρα μου και στην πολυαγαπημένη μου αδερφή.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία παρέχει μια ολοκληρωμένη εξέταση της πυρηνικής ενέργειας και της διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων, διερευνώντας την ιστορική εξέλιξη, τα επιστημονικά θεμέλια, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τα πλαίσια πολιτικής. Ξεκινώντας με μια ιστορική αναδρομή, η διατριβή παρακολουθεί την εξέλιξη της πυρηνικής τεχνολογίας από την πρώιμη ανακάλυψή της έως τον σημερινό της ρόλο στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας, επισημαίνοντας βασικά ορόσημα και προκλήσεις που διαμόρφωσαν την πορεία της. Στη συνέχεια εμβαθύνει στις βασικές αρχές της πυρηνικής φυσικής, στις αρχές που διέπουν τους πυρηνικούς αντιδραστήρες και στους μηχανισμούς μέσω των οποίων αξιοποιείται η πυρηνική ενέργεια. Πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση της πυρηνικής ενέργειας και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για να αξιολογηθεί ο ρόλος της στην αντιμετώπιση της παγκόσμιας ενεργειακής κρίσης και στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Ακολουθεί διεξοδική διερεύνηση των πυρηνικών αποβλήτων, της ταξινόμησής τους και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη διαχείρισή τους, με ιδιαίτερη έμφαση στη γεωλογική διάθεση και την επανεπεξεργασία. Η πτυχιακή εργασία εξετάζει τις συνέπειες της πυρηνικής ενέργειας για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία, συμπεριλαμβανομένων των κινδύνων έκθεσης σε ακτινοβολία και των μακροπρόθεσμων προκλήσεων που θέτουν τα ραδιενεργά απόβλητα.

Η συγκριτική μελέτη της γεωλογικής διάθεσης και της επανεπεξεργασίας παρέχει πληροφορίες σχετικά με τα οφέλη, τους περιορισμούς και τις μελλοντικές δυνατότητες αυτών των στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων, χρησιμοποιώντας μελέτες περιπτώσεων από τη Φινλανδία και τη Γαλλία. Τέλος, η διατριβή αναλύει τις πολιτικές και τους κανονισμούς που διέπουν τη διαχείριση της πυρηνικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, δίνοντας έμφαση στο ρόλο τους στη διασφάλιση της ασφάλειας, της βιωσιμότητας και της συμμόρφωσης με τα διεθνή πρότυπα. Συνθέτοντας τις επιστημονικές, περιβαλλοντικές και πολιτικές προοπτικές, η παρούσα πτυχιακή εργασία υποστηρίζει την προσεκτική αλλά υπεύθυνη χρήση της πυρηνικής ενέργειας, αναγνωρίζοντας τα δυνητικά οφέλη της και αντιμετωπίζοντας παράλληλα τους κινδύνους που εγκυμονεί για την ανθρωπότητα και το περιβάλλον.

Λέξεις-κλειδιά: Πυρηνική Ενέργεια, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Διαχείριση Αποβλήτων, Πυρηνική Σχάση, Πυρηνικός Αντιδραστήρας.

Abstract

This thesis provides a comprehensive examination of nuclear energy and nuclear waste management, exploring the historical development, scientific foundations, environmental impacts and policy frameworks. Beginning with a historical review, the thesis traces the evolution of nuclear technology from its early discovery to its current role in global energy production, highlighting key milestones and challenges that have shaped its trajectory. It then delves into the basic principles of nuclear physics, the principles underlying nuclear reactors and the mechanisms through which nuclear energy is harnessed. A comparative analysis of nuclear energy and renewable energy sources is carried out to assess its role in addressing the global energy crisis and mitigating climate change. This is followed by a thorough investigation of nuclear waste, its classification and the methods used for its management, with particular emphasis on geological disposal and reprocessing. The thesis examines the environmental and human health consequences of nuclear power, including the risks of radiation exposure and the long-term challenges posed by radioactive waste.

The comparative study of geological disposal and reprocessing provides information on the benefits, limitations and future potential of these waste management strategies, using case studies from Finland and France. Finally, the thesis analyses the policies and regulations governing nuclear energy management in the European Union, with an emphasis on their role in ensuring safety, sustainability and compliance with international standards. Synthesizing scientific, environmental and policy perspectives, this thesis advocates the careful but responsible use of nuclear energy, recognizing its potential benefits while addressing the risks it poses to humanity and the environment.

Key words: Nuclear Energy, Renewable Energy Sources, Waste Management, Nuclear Fission, Nuclear Reactor

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Ιστορική αναδρομή	1
2 Πυρηνική ενέργεια	3
2.1 Ορισμοί	3
2.1.1 Δομή του ατόμου	4
2.1.2 Ακτινοβολία.....	5
2.1.3 Ραδιενέργεια.....	6
2.1.4 Έλλειμμα μάζας και ενέργεια σύνδεσης.....	7
2.2 Πυρηνικές αντιδράσεις	8
2.2.1 Πυρηνική σχάση.....	8
2.2.2 Αλυσιδωτή αντίδραση.....	9
2.2.3 Μοντέλο Υγρής Σταγόνας.....	10
2.2.4 Πυρηνική σύντηξη.....	11
2.3 Βασική δομή πυρηνικού αντιδραστήρα.....	12
2.3.1 Καύσιμο και καρδιά του αντιδραστήρα.....	12
2.3.2 Ρύθμιση της αντίδρασης.....	13
2.3.3 Θωράκιση και ασφάλεια.....	14
2.4 Τύποι πυρηνικών αντιδραστήρων.....	15
2.4.1 Αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWR)	16
2.4.2 Αντιδραστήρες βαρέος ύδατος (HWR).....	18
2.4.3 Αερόψυκτοι αντιδραστήρες (GCR)	19
2.4.4 Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες (BR)	20
3 Ανανεώσιμες και μη Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	21
3.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	21
3.2 Μη Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΜΑΠ)	23
3.3 Προβληματισμοί και περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την χρήση ΑΠΕ και μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	25
3.4 Πλεονεκτήματα και ανησυχίες από την χρήση πυρηνικής ενέργειας.....	27
3.5 Συγκριτικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ΠΕ έναντι των υπόλοιπων μορφών ενέργειας.....	33
4 Αποβλήτα.....	34
4.1 Ορισμός πυρηνικών αποβλήτων.....	34
4.2 Τύποι Πυρηνικών Αποβλήτων.....	40
4.3 Μέθοδοι απόρριψης Πυρηνικών Αποβλήτων.....	43
4.4 Δυσκολίες σχετιζόμενες με την διαχείριση των αποβλήτων	48
5 Πολιτικές Και Κανονισμοί Σχετικά με την Διαχείριση ΠΑ.....	50
5.1 Ευρωπαϊκό Πλαίσιο	50
5.2 Πολιτικές και κανονισμοί στην Ελλάδα	52
6 Επιπτώσεις ΠΑ στην υγεία και το Περιβάλλον.....	57
6.1 Πιθανές επιπτώσεις των ΠΑ στο περιβάλλον.....	57
6.1.1 Ρύπανση του εδάφους.....	58
6.1.2 Ρύπανση των υδάτων	60
6.2 Πιθανές επιπτώσεις ΠΑ στην υγεία.....	61
6.3 Μακροχρόνιες επιπτώσεις στο περιβάλλον	67
7 Σύγκριση διαφορετικών μεθόδων διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων	69

7.1	Οι βασικότερες πρακτικές διάθεσης ΠΑ	69
7.2	Κύρια χαρακτηριστικά των δύο μεθόδων	70
7.2.1	Γεωλογική Διάθεση	70
7.2.2	Επανεπεξεργασία και ανακύκλωση.....	72
7.3	Σύγκριση γεωλογικής διάθεσης και επανεπεξεργασίας πυρηνικών αποβλήτων 74	
7.3.1	Η περίπτωση της Φιλανδίας και της Γαλλίας	74
7.3.2	Συμπεράσματα.....	75
8	Συμπεράσματα.....	77
9	Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	79

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ακτινοβολιών [10].	6
Εικόνα 2: Σχάση του πυρήνα του ουρανίου [2].....	9
Εικόνα 3: Πυρηνική σύντηξη δευτέρου και τρίτου [7].	12
Εικόνα 4: Αντιδραστήρας CANDU [16].	18

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Πρωτογενείς ενεργειακές πηγές [23]	24
Πίνακας 2: Δευτερογενείς ενεργειακές πηγές [23].....	24

Συντομογραφίες

ΠΕ	Πυρηνική Ενέργεια
ΠΑ	Πυρηνικά Απόβλητα
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΜΑΠ	Μη Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η Πυρηνική Ενέργεια (Π.Ε.) προέρχεται από τη διάσπαση και τον μετασχηματισμό των πυρήνων των ατόμων. Κατά τη διαδικασία της πυρηνικής σχάσης, ένας βαρύς πυρήνας διασπάται σε δύο ελαφρύτερους, απελευθερώνοντας σημαντική ποσότητα ενέργειας. Αυτή η ενέργεια είναι εγκλωβισμένη στους πυρήνες των ατόμων λόγω της ισχυρής πυρηνικής δύναμης, η οποία είναι υπεύθυνη για τη συγκράτηση των σωματιδίων που συνθέτουν τον πυρήνα [1]. Η Π.Ε. χρησιμοποιείται ευρέως στους πυρηνικούς αντιδραστήρες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με το πλεονέκτημα των χαμηλών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τη διαδικασία παραγωγής, σε σύγκριση με άλλες πηγές ενέργειας, όπως τα ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων και η διασφάλιση της ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων αποτελούν προκλήσεις και αντικείμενο σημαντικής ανησυχίας [2].

Ο Λιούις Στράους διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας (Π.Ε.) στις Ηνωμένες Πολιτείες και υπήρξε ιδιαίτερα αισιόδοξος σχετικά με την εξέλιξη της πυρηνικής τεχνολογίας και τη συμβολή της στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στην κοινωνία. Κατά τον 20ό αιώνα, η Π.Ε. γνώρισε μεγάλη άνθιση, καθώς ξεκίνησε η μαζική χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η εξέλιξη οδήγησε σε σημαντική αύξηση της διαθεσιμότητας ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλές περιοχές, προσφέροντας παράλληλα οικονομική αποδοτικότητα σε σύγκριση με άλλες πηγές ενέργειας [3].

Ο Ότο Χαν και η Λίτζε Μάιτνερ πραγματοποίησαν την πρώτη εργαστηριακή πυρηνική σχάση το 1938, στο εργαστήριο του Χαν στο Πανεπιστήμιο του Βερολίνου. Οι δύο επιστήμονες πέτυχαν τη σχάση του ουρανίου με τη χρήση νετρονίων, γεγονός που αποτέλεσε καθοριστική ανακάλυψη για την κατανόηση των πυρηνικών αντιδράσεων. Η ανακάλυψη αυτή είχε τεράστια σημασία, καθώς άνοιξε τον δρόμο για την ανάπτυξη της πυρηνικής φυσικής και της τεχνολογίας, περιλαμβανομένων των πυρηνικών αντιδραστήρων και των πυρηνικών όπλων [4].

Κατά τη διάρκεια αυτής της πειραματικής ανακάλυψης, οι επιστήμονες χρησιμοποίησαν νετρόνια για να βομβαρδίσουν πυρήνες ουρανίου. Ενώ περίμεναν να δημιουργηθεί ένα νέο στοιχείο με ατομικό αριθμό 93, διαπίστωσαν ότι το παραγόμενο στοιχείο είχε ιδιότητες πολύ διαφορετικές από αυτές που ανέμεναν. Το παραγόμενο στοιχείο ήταν το πρώτο της ομάδας των ακτινιδίων (Actinides) και αναγνωρίστηκε αργότερα ως πλουτόνιο (Plutonium), με ατομικό αριθμό 94. Το πλουτόνιο έχει ευρεία εφαρμογή, όπως η χρήση του σε πυρηνικά όπλα και πυρηνικούς αντιδραστήρες [3].

Επιπλέον, οι επιστήμονες ανακάλυψαν ένα ακόμη παραγόμενο στοιχείο με ατομικό αριθμό 56, το οποίο αναγνωρίστηκε ως βάριο (Barium). Αρχικά, το νέο στοιχείο θεωρήθηκε ότι ήταν "εκτεταμένο υδρογόνο" (Extended Hydrogen), αλλά αργότερα επιβεβαιώθηκε ότι πρόκειται για βάριο. Αυτή η τολμηρή ανακάλυψη έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην κατανόηση των πυρηνικών αντιδράσεων και της πυρηνικής σχάσης [2].

Το 1938, η Λίζε Μάιτνερ, λόγω του αντισημιτισμού που επικρατούσε στη ναζιστική Γερμανία, αναγκάστηκε να εγκαταλείψει τη χώρα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη διακοπή της συνεργασίας της με τον Ότο Χαν, ο οποίος συνέχισε τις έρευνές του μαζί με τον Φριτς Στράσμαν. Ο Φριτς Στράσμαν, σε συνεργασία με τον Ότο Χαν, συνέβαλε καθοριστικά στην περαιτέρω κατανόηση των πυρηνικών αντιδράσεων και των αλληλεπιδράσεων στους πυρήνες των ατόμων. Η ανακάλυψη της πυρηνικής σχάσης και η επακόλουθη έρευνα στον τομέα της πυρηνικής φυσικής είχαν τεράστια σημασία για την ανάπτυξη της πυρηνικής τεχνολογίας και των πυρηνικών όπλων. Ωστόσο, είναι αξιοσημείωτο ότι ο Φριτς Στράσμαν αργότερα εξέφρασε έντονες ανησυχίες για τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας στον στρατιωτικό τομέα, καθώς και για την επικίνδυνη φύση των πυρηνικών όπλων [2].

Το 1941, οι Enrico Fermi και Leó Szilárd πρότειναν έναν πιθανό σχεδιασμό για έναν αλυσιδωτό αντιδραστήρα ουρανίου. Ένα χρόνο αργότερα, το 1942, πραγματοποιήθηκε η πρώτη ελεγχόμενη και αυτοσυντηρούμενη πυρηνική αλυσιδωτή αντίδραση στο Πανεπιστήμιο του Σικάγο. Η αλυσιδωτή πυρηνική αντίδραση, που αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό της πυρηνικής σχάσης, βασίζεται στο γεγονός ότι όταν ένας πυρήνας ουρανίου διασπάται, απελευθερώνονται ενέργεια και νετρόνια.

Αυτά τα νετρόνια μπορούν στη συνέχεια να προκαλέσουν τη σχάση άλλων πυρήνων ουρανίου, με αποτέλεσμα την παραγωγή περισσότερης ενέργειας και περισσότερων νετρονίων. Η διαδικασία αυτή οδηγεί σε εκθετική αύξηση της παραγόμενης ενέργειας και των νετρονίων και αποτελεί τη θεμελιώδη αρχή της πυρηνικής εκρηκτικότητας [5].

Το φαινόμενο της αλυσιδωτής αντίδρασης είναι ζωτικής σημασίας και για ειρηνικές εφαρμογές, καθώς αποτελεί τη βάση για τη λειτουργία ενός πυρηνικού αντιδραστήρα. Χωρίς αυτήν, ή καλύτερα χωρίς τον έλεγχό της, η λειτουργία ενός πυρηνικού σταθμού θα ήταν αδύνατη. Παρ' όλα αυτά, η ίδια τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή πυρηνικών όπλων, γεγονός που προκαλεί ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια και τη διάδοση των πυρηνικών υλικών [6].

Επιπλέον, η πυρηνική ενέργεια (Π.Ε.) αντιμετωπίζει πολλές ενστάσεις, κυρίως λόγω των καταστροφικών συνεπειών που μπορεί να έχει ένα πυρηνικό ατύχημα, αλλά και του υψηλού κόστους των εγκαταστάσεων. Συνεπώς, η πρόβλεψη του Λιούις Στράους για «υπερβολικά φτηνή» ηλεκτρική ενέργεια αποδείχθηκε υπερβολική. Παρ' όλα αυτά, η Π.Ε. εξακολουθεί να αποτελεί σημαντική πηγή ενέργειας, προσφέροντας πλεονεκτήματα αλλά και αντιμετωπίζοντας προκλήσεις [2].

Το 1951, η Π.Ε. χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για μη στρατιωτικούς σκοπούς. Στη συνέχεια, το 1954, σημειώθηκε ένα ακόμη σημαντικό ορόσημο, όταν ένας πυρηνικός αντιδραστήρας συνδέθηκε για πρώτη φορά με ένα εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, παρέχοντας ηλεκτρικό ρεύμα σε μόνιμη βάση [3].

2 ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.1 Ορισμοί

Η πυρηνική ενέργεια (Π.Ε.) είναι η ενέργεια που αποθηκεύεται στους πυρήνες των ατόμων και προκύπτει από την ισχυρή πυρηνική δύναμη που συγκρατεί τα σωματίδια του πυρήνα. Αυτή η ενέργεια μπορεί να απελευθερωθεί μέσω δύο τύπων αντιδράσεων: της σχάσης και της σύντηξης. Υπό κατάλληλες συνθήκες, η απελευθερωμένη ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά [7].

Σε αυτή την ενότητα θα δοθούν ορισμοί και κάποια βασικά στοιχεία τα οποία θα βοηθήσουν στην κατανόηση των προαναφερθέντων αντιδράσεων.

2.1.1 Δομή του ατόμου

Το άτομο αποτελείται από τρία βασικά σωματίδια: τα πρωτόνια, που έχουν θετικό ηλεκτρικό φορτίο, τα νετρόνια, που είναι ηλεκτρικά ουδέτερα, και τα ηλεκτρόνια, που φέρουν αρνητικό φορτίο. Σύμφωνα με το ατομικό πρότυπο του Bohr, τα ηλεκτρόνια κινούνται σε κυκλικές τροχιές γύρω από τον πυρήνα, λόγω των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων Coulomb. Ο πυρήνας αποτελείται από τα πρωτόνια και τα νετρόνια, τα οποία ονομάζονται συλλογικά νουκλεόνια. Με βάση τις δυνάμεις Coulomb, η συνοχή του πυρήνα φαίνεται παράδοξη, καθώς τα θετικά φορτισμένα πρωτόνια θα έπρεπε να απωθούνται μεταξύ τους, ενώ τα ουδέτερα νετρόνια δεν επηρεάζονται από ηλεκτροστατικές δυνάμεις. Ωστόσο, η συνοχή του πυρήνα καθίσταται δυνατή χάρη στην ύπαρξη της ισχυρής πυρηνικής δύναμης, η οποία υπερνικά τις απωστικές δυνάμεις μεταξύ των πρωτονίων[8] [9].

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι οι κυκλικές τροχιές των ηλεκτρονίων δεν είναι τυχαίες, καθώς τα ηλεκτρόνια μπορούν να έχουν μόνο διακριτές στάθμες ενέργειας. Τα ηλεκτρόνια τείνουν να βρίσκονται στη στάθμη με τη μικρότερη δυνατή ενέργεια, γεγονός που αντιστοιχεί σε τροχιά με μικρότερη ακτίνα [8].

Ένα άτομο, στο οποίο τα ηλεκτρόνια του βρίσκονται στη χαμηλότερη δυνατή ενεργειακή στάθμη, λέγεται ότι βρίσκεται στη θεμελιώδη του κατάσταση και είναι ευσταθές. Όταν ένα άτομο απορροφά ενέργεια, κάποια ηλεκτρόνια μεταβαίνουν σε τροχιές με υψηλότερες ενεργειακές στάθμες, αφήνοντας το άτομο σε κατάσταση διέγερσης. Το άτομο σε αυτήν την κατάσταση δεν είναι ευσταθές και τείνει να επιστρέψει στη θεμελιώδη του κατάσταση, καθώς η χαμηλή ενέργεια συνδέεται με μεγαλύτερη σταθερότητα.[8]. Μετά από ένα χρονικό διάστημα, το άτομο πραγματοποιεί μετάπτωση, επιστρέφοντας στη θεμελιώδη του κατάσταση. Κατά τη διαδικασία αυτή, τα ηλεκτρόνια επιστρέφουν στις αρχικές τους τροχιές, απελευθερώνοντας την απορροφηθείσα ενέργεια υπό τη μορφή φωτονίου. Η εκπομπή φωτονίων ονομάζεται ακτινοβολία [9].

2.1.2 Ακτινοβολία

Ακτινοβολία είναι η διάδοση της ενέργειας στον χώρο ή στο κενό με διάφορες μορφές [10]. Η διάδοση αυτή είναι πιθανό να γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ή με την μορφή σωματιδίων. Ανάλογα την επίδρασή της στους ζωντανούς οργανισμούς διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες, την ιοντίζουσα και την μη ιοντίζουσα, καθώς και σε τεχνητή ή φυσική ανάλογα την πηγή προέλευσης της.

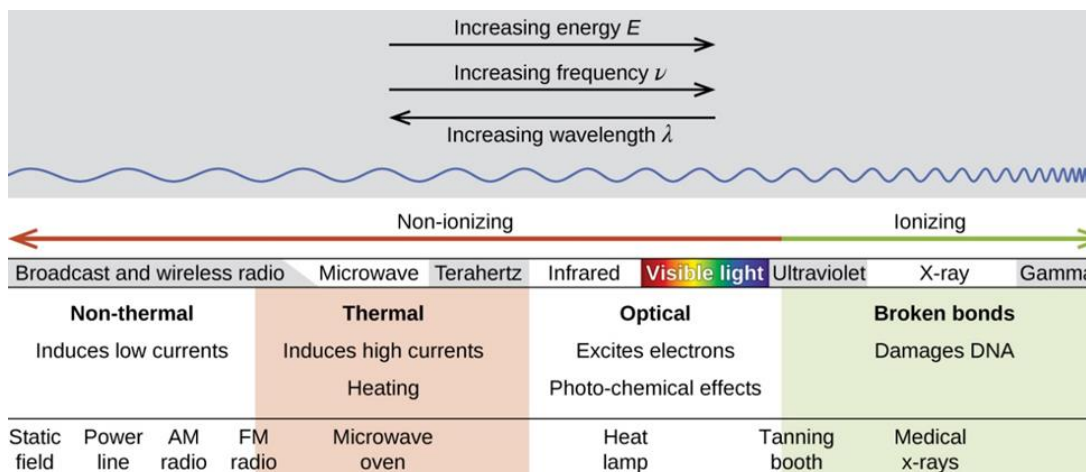
Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα περιλαμβάνει τις ακτινοβολίες με τις οποίες ερχόμαστε σε επαφή και διακρίνεται σε ιοντίζουσα και μη ιοντίζουσα ακτινοβολία. Η μελέτη του φάσματος μας επιτρέπει να αντλήσουμε σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τις ιδιότητες και τις επιδράσεις αυτών των ακτινοβολιών.

- **Ιοντίζουσα ακτινοβολία:** Πρόκειται για ακτινοβολία υψηλής ενέργειας και συχνότητας. Τα μεγάλα ποσά ενέργειας που διαθέτει την καθιστούν ικανή να απομακρύνει ηλεκτρόνια από τα άτομα, προκαλώντας τον σχηματισμό ιόντων (ιονισμός). Ο ιονισμός μπορεί να επιφέρει σοβαρές επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό, καθώς μπορεί να διαταράξει τη δομή του DNA, οδηγώντας σε μεταλλάξεις [9]. Παρά τους κινδύνους της ανεξέλεγκτης έκθεσης, η ιοντίζουσα ακτινοβολία έχει ευρεία χρήση, ιδιαίτερα στην ιατρική (π.χ., ακτίνες X) και στη βιομηχανία.

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι ακτίνες X, οι ακτίνες γ, η σωματιδιακή ακτινοβολία (άλφα και βήτα) καθώς και η ακτινοβολία νετρονίων. Όσον αφορά τη διεισδυτικότητα, η ακτινοβολία γ έχει τη μεγαλύτερη ικανότητα διείσδυσης, ακολουθεί η σωματιδιακή ακτινοβολία βήτα και τέλος η άλφα. Αντίστροφα, ως προς τη δυνατότητα ιονισμού, η σειρά είναι η εξής: άλφα, βήτα, και τέλος γ [10].

- **Μη ιοντίζουσα ακτινοβολία:** Η μη ιοντίζουσα ακτινοβολία έχει σημαντικά χαμηλότερη ενέργεια από την ιοντίζουσα και μεγαλύτερο μήκος κύματος. Λόγω της χαμηλής της ενέργειας, δεν είναι ικανή να προκαλέσει ιονισμό, αλλά μπορεί να προκαλέσει θέρμανση [10]. Πρόκειται για τον τύπο ακτινοβολίας που συναντάμε συχνότερα, καθώς προέρχεται από τον ήλιο, τα κινητά τηλέφωνα, τα ραδιοκύματα και τις μικροκυματικές συσκευές. Στην κατηγορία

αυτή περιλαμβάνονται η υπεριώδης και υπέρυθρη ακτινοβολία, το ορατό φως, τα μικροκύματα και τα ραδιοκύματα[9] [10].



Εικόνα 1: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ακτινοβολιών [10].

2.1.3 Ραδιενέργεια

Ραδιενέργεια ονομάζουμε την ιδιότητα ορισμένων υλικών να εκπέμπουν ιοντίζουσα ακτινοβολία, λόγω της παρουσίας ασταθών πυρήνων με υψηλή ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, όταν ένας ασταθής πυρήνας υφίσταται διάσπαση, χάνει ενέργεια μέσω της εκπομπής στοιχειωδών σωματιδίων. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται ραδιενεργή διάσπαση [11]. Η ραδιενεργή διάσπαση οδηγεί σε μεταστοιχείωση του πυρήνα, δηλαδή σε αλλαγή του ατομικού αριθμού, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νέου πυρήνα, ο οποίος ανήκει σε διαφορετικό χημικό στοιχείο [9]. Οι νέοι πυρήνες που προκύπτουν είναι συνήθως πιο σταθεροί από τον αρχικό ραδιενεργό πυρήνα, ωστόσο, ενδέχεται να υποστούν και αυτοί περαιτέρω διασπάσεις.

Είναι σημαντικό να τονιστεί πως ραδιενεργός διάσπαση μπορεί να προκύψει είτε φυσικά είτε τεχνητά [12]. Στην περίπτωση των φυσικών ραδιενεργών πυρήνων, οι κύριοι τρόποι διάσπασης είναι οι εξής: [11]

- **Εκπομπή σωματιδίων άλφα (α):** Πρόκειται για την εκπομπή πυρήνων ηλίου (δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια), η οποία μειώνει τον ατομικό αριθμό κατά 2 και τη μαζική μονάδα κατά 4.

- **Εκπομπή σωματιδίων βήτα (β):** Συμβαίνει όταν ένα νετρόνιο μετατρέπεται σε πρωτόνιο, εκπέμποντας ένα ηλεκτρόνιο και ένα αντινεutrino. Αυτή η διαδικασία αυξάνει τον ατομικό αριθμό κατά 1.
- **Εκπομπή ποζιτρονίου (β⁺):** Παράγεται όταν ένα πρωτόνιο μετατρέπεται σε νετρόνιο, εκπέμποντας ένα ποζιτρόνιο (αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου) και ένα νεutrino. Αυτή η διαδικασία μειώνει τον ατομικό αριθμό κατά 1.
- **Ακτινοβολία γ:** Πρόκειται για εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας, η οποία δεν αλλάζει τον ατομικό αριθμό ή τη μάζα του πυρήνα, αλλά εκπέμπεται για τη σταθεροποίηση της ενέργειας του πυρήνα μετά από άλλη διάσπαση.

2.1.4 Έλλειμμα μάζας και ενέργεια σύνδεσης

Είναι σημαντικό να τονιστεί πως η μάζα ενός πυρήνα δεν ισούται με το άθροισμα των μαζών των νουκλεονίων, όπως θα ήταν εύκολο να υποθέσει κανείς. Αντιθέτως η μάζα του πυρήνα είναι πάντα μικρότερη από το συνολικό άθροισμα των μαζών των νουκλεονίων, πράγμα που ορίζεται ως έλλειμμα μάζας και εκφράζεται από την σχέση:

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_p$$

Όπου:

- Z είναι ο αριθμός πρωτονίων,
- m_p είναι η μάζα του πρωτονίου,
- N είναι ο αριθμός νετρονίων,
- m_n είναι η μάζα του νετρονίου και
- M_p είναι η μάζα του πυρήνα. διαφορά της μάζας του πυρήνα από το άθροισμα των μαζών των ελεύθερων νουκλεονίων [12].

Το έλλειμμα μάζας προκύπτει διότι όταν τα νουκλεόνια συνενώνονται για να σχηματίσουν έναν πυρήνα, βρίσκονται σε ευσταθέστερη κατάσταση συγκριτικά με το αν ήταν ελεύθερα. Η κατάσταση ευστάθειας συνοδεύεται από χαμηλότερη ενέργεια. Σύμφωνα με τη διάσημη εξίσωση του Einstein $E=mc^2$, η ενέργεια είναι ανάλογη της μάζας, επομένως η χαμηλότερη ενέργεια συνεπάγεται και χαμηλότερη μάζα [8].

Η διαφορά ανάμεσα στη συνολική ενέργεια μάζας των ελεύθερων νουκλεονίων και στην ενέργεια μάζας του πυρήνα ονομάζεται **ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα**. Η

ενέργεια σύνδεσης εκφράζει ουσιαστικά την ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να απομακρυνθούν όλα τα νουκλεόνια ενός πυρήνα, ώστε να πάψουν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους [8].

2.2 Πυρηνικές αντιδράσεις

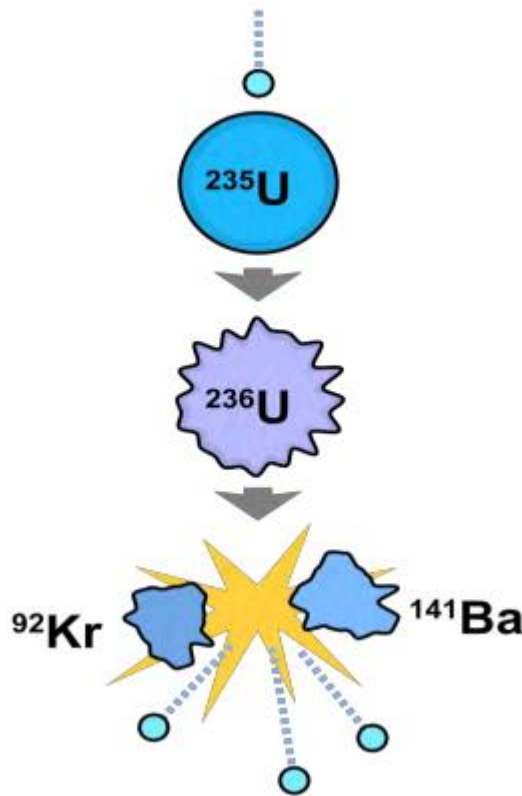
2.2.1 Πυρηνική σχάση

Η πυρηνική σχάση (Π.Σ.) είναι μία από τις σημαντικότερες πυρηνικές αντιδράσεις, καθώς αποτελεί τον βασικό μηχανισμό που χρησιμοποιείται τόσο στα πυρηνικά όπλα όσο και στους πυρηνικούς αντιδραστήρες για την παραγωγή ενέργειας. Η διαδικασία αφορά στη διάσπαση ενός βαρέος πυρήνα σε δύο μικρότερους πυρήνες-θραύσματα, τα οποία είναι συνήθως παρόμοια σε μέγεθος. Κατά τη διάσπαση, απελευθερώνεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας, ενώ εκλύονται ελαφρά σωματίδια, όπως νετρόνια, σωματίδια β και φωτόνια [7].

Η πυρηνική σχάση μπορεί να συμβεί αυθόρμητα σε ορισμένους βαρείς πυρήνες, όπως το πλουτώνιο-239, αλλά συχνότερα προκαλείται από ανθρώπινη παρέμβαση. Η ανθρώπινη παρέμβαση περιλαμβάνει τον βομβαρδισμό του πυρήνα με νετρόνια κατάλληλης ενέργειας, προκαλώντας την αντίδραση [12].

Η διαδικασία της πυρηνικής σχάσης περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- **Απορρόφηση νετρονίων:** Ένα νετρόνιο απορροφάται από έναν βαρύ πυρήνα, καθιστώντας τον ασταθή.
- **Διάσπαση του πυρήνα:** Ο ασταθής πυρήνας διασπάται σε δύο ή περισσότερους μικρότερους πυρήνες, γνωστούς ως θραύσματα σχάσης. Κατά τη διάσπαση, απελευθερώνονται πλήθος νετρονίων, μεγάλα ποσά ενέργειας υπό τη μορφή κινητικής ενέργειας των θραυσμάτων, καθώς και ακτινοβολία γ . Η κινητική ενέργεια που απελευθερώνεται υπολογίζεται μέσω της διάσημης εξίσωσης του Einstein $E=mc^2$, όπου m είναι η μάζα που μετατρέπεται σε ενέργεια και c η ταχύτητα του φωτός.
- **Συνέχιση ή διακοπή της σχάσης:** Τα νετρόνια που απελευθερώνονται κατά τη διάσπαση μπορούν να προσπέσουν σε κοντινούς πυρήνες, προκαλώντας περαιτέρω σχάσεις. Αυτή η διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε μια αλυσιδωτή αντίδραση, εφόσον οι συνθήκες είναι κατάλληλες.



Εικόνα 2: Σχάση του πυρήνα του ουρανίου [2]

2.2.2 Αλυσιδωτή αντίδραση

Η συνέχιση σχάσεων μετά την αρχική, από τα νετρόνια που απελευθερώνονται κατά τη διαδικασία, αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές λειτουργίες ενός πυρηνικού αντιδραστήρα. Η διατήρηση μιας αυτοσυντηρούμενης ακολουθίας σχάσεων ονομάζεται **αλυσιδωτή αντίδραση** [2]. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι αν η αλυσιδωτή αντίδραση δεν ελεγχθεί, μπορεί να προκληθεί έκρηξη ή σοβαρή καταστροφή ενός πυρηνικού αντιδραστήρα, λόγω της τεράστιας ποσότητας παραγόμενης θερμότητας και ενέργειας [7].

Για τη διατήρηση μιας αλυσιδωτής αντίδρασης, ο αριθμός των νετρονίων που απελευθερώνονται σε κάθε σχάση πρέπει να είναι ίσος ή μεγαλύτερος από τον αριθμό των νετρονίων της προηγούμενης γενιάς. Η **κρίσιμη μάζα** είναι η ελάχιστη ποσότητα σχάσιμου υλικού που απαιτείται για την επίτευξη αυτής της αναλογίας.

Ένα ακόμη σημαντικό μέγεθος για την ποσοτική περιγραφή μιας αλυσιδωτής αντίδρασης είναι ο **πολλαπλασιαστικός παράγοντας k**. Ο παράγοντας αυτός

εκφράζει τον λόγο του αριθμού των νετρονίων των σχάσεων της τρέχουσας γενιάς προς τον αριθμό των νετρονίων της προηγούμενης γενιάς [8]. Οι τιμές του k έχουν την εξής σημασία:

- $k > 1$: Υπάρχει αύξηση των σχάσεων από γενιά σε γενιά, με συνεπακόλουθη αύξηση της παραγόμενης ενέργειας με την πάροδο του χρόνου. Το σύστημα που χαρακτηρίζεται από αυτή την κατάσταση ονομάζεται **υπερκρίσιμο**.
- $k < 1$: Υπάρχει μείωση των σχάσεων από γενιά σε γενιά, με αντίστοιχη μείωση της παραγόμενης ενέργειας με την πάροδο του χρόνου. Το σύστημα σε αυτή την κατάσταση ονομάζεται **υποκρίσιμο**.
- $k = 1$: Η αντίδραση βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση, με σταθερή έκλυση ενέργειας. Το σύστημα σε αυτή την κατάσταση ονομάζεται **κρίσιμο**.

2.2.3 Μοντέλο Υγρής Σταγόνας

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.2.1 τα βασικά στάδια της σχάσης είναι τρία. Για την ανάλυση αυτού του πολύπλοκου φαινομένου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το **μοντέλο της υγρής σταγόνας**, το οποίο περιγράφει τη σχάση ενός βαρέος πυρήνα, όπως το ουράνιο-235 (^{235}U).

Αρχικά, ο πυρήνας του ουρανίου-235 απορροφά ένα νετρόνιο, γεγονός που αυξάνει τον μαζικό του αριθμό και οδηγεί στον σχηματισμό του ασταθούς ισοτόπου **ουράνιο-236** (^{236}U). Η απορρόφηση του νετρονίου προκαλεί αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του ασταθούς πυρήνα, ίση με το άθροισμα της κινητικής ενέργειας του νετρονίου και της ενέργειας σύνδεσής του. Αυτή η αύξηση της ενέργειας προκαλεί ταλάντωση του πυρήνα, ο οποίος μπορεί να παραμορφωθεί. Οι ταλαντώσεις αυτές οδηγούν σε δύο πιθανές περιπτώσεις:

- **Επιστροφή στην αρχική κατάσταση:** Εάν η αύξηση της εσωτερικής ενέργειας δεν είναι αρκετή για να ξεπεράσει το κατώφλι ενέργειας της σχάσης, ο σύνθετος πυρήνας επιστρέφει στο αρχικό του σχήμα. Η παραπανίσια ενέργεια αποβάλλεται μέσω εκπομπής ακτινοβολίας.
- **Σχάση του πυρήνα:** Εάν η αύξηση της εσωτερικής ενέργειας υπερβεί το κατώφλι ενέργειας της σχάσης, δημιουργούνται δύο πόλοι μαζών. Αυτοί οι πόλοι, υπό την επίδραση των απωστικών δυνάμεων, απομακρύνονται

σταδιακά και τελικά διαχωρίζονται πλήρως. Τα δύο τμήματα που προκύπτουν είναι τα **θραύσματα της σχάσης**.

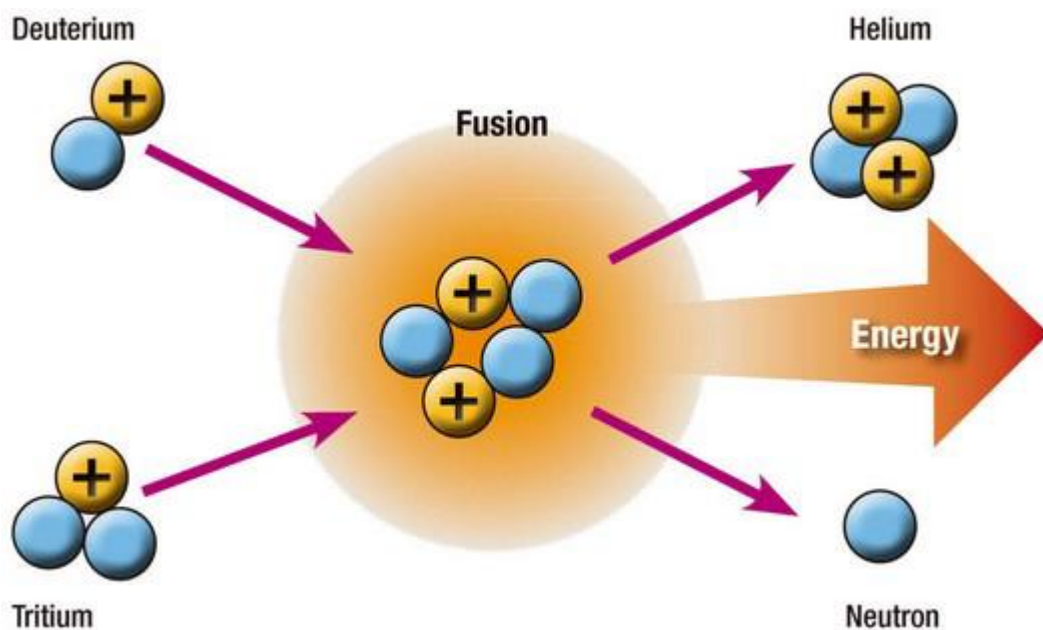
Στη δεύτερη περίπτωση, τα θραύσματα της σχάσης είναι ασταθή, καθώς περιέχουν μεγάλο αριθμό νετρονίων. Για να επιτύχουν ισορροπία, αποβάλλουν νετρόνια μέσω ραδιενεργών διασπάσεων βήτα (β), έως ότου ο αριθμός των νετρονίων και των πρωτονίων εξισορροπηθεί [12].

2.2.4 Πυρηνική σύντηξη

Η πυρηνική σύντηξη πρόκειται για μια διαδικασία που είναι ουσιαστικά αντίθετη της σχάσης. Κατά την σύντηξη δύο ελαφριοί πυρήνες με ίδιο μαζικό αριθμό ενώνονται δημιουργώντας έναν βαρύτερο πυρήνα απελευθερώνοντας ταυτόχρονα ενέργεια [13]. Η παραγόμενη ενέργεια οφείλεται στο «περίσσειμα» ενέργειας που προκύπτει από τη δημιουργία του βαρύτερου πυρήνα, ο οποίος έχει μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο [7].

Η πιο κοινή αντίδραση σύντηξης αφορά την ένωση **τρίτιου (^3H)** και **δευτέριου (^2H)**, η οποία παράγει έναν πυρήνα **ηλίου (^4He)**. Ο πυρήνας του ηλίου έχει μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο από το συνολικό άθροισμα των ενεργειών σύνδεσης των ελαφρύτερων πυρήνων. Παρόλα αυτά, η διαδικασία είναι εξαιρετικά δύσκολη, καθώς οι θετικά φορτισμένοι πυρήνες απωθούνται λόγω των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων. Για να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο και να καταστεί δυνατή η σύντηξη, απαιτούνται ειδικές συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, ώστε οι πυρήνες να πλησιάσουν αρκετά για να αρχίσει να δρα η **ισχυρή πυρηνική δύναμη**, η οποία υπερνικά τις απωστικές δυνάμεις [13].

Η πυρηνική σύντηξη είναι ιδιαίτερα ελκυστική ως πηγή ενέργειας, καθώς το **δευτέριο** είναι άφθονο στη θάλασσα και το **τρίτιο**, που προέρχεται από το λίθιο, μπορεί να παραχθεί σε εκμεταλλεύσιμες ποσότητες για περίπου 20.000 χρόνια. Επιπλέον, η σύντηξη είναι μια αντίδραση με **μηδενικές εκπομπές ρύπων**, ενώ η ασφάλεια των αντιδραστήρων είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με εκείνη των αντιδραστήρων σχάσης, καθώς το παραγόμενο **ήλιο** είναι ακίνδυνο [13].



Εικόνα 3: Πυρηνική σύντηξη δευτέρου και τρίτιου [7].

2.3 Βασική δομή πυρηνικού αντιδραστήρα

Ο **πυρηνικός αντιδραστήρας (Π.Α.)** είναι ένα σύστημα σχεδιασμένο για την ελεγχόμενη εξέλιξη μιας αλυσιδωτής αντίδρασης με ασφαλή τρόπο [8]. Η πιο συνηθισμένη δομή ενός πυρηνικού αντιδραστήρα αποτελείται από δύο κυκλώματα:

1. **Πρώτο κύκλωμα:** Περιλαμβάνει την καρδιά του αντιδραστήρα, όπου πραγματοποιούνται οι σχάσεις. Στην καρδιά περιέχονται οι ράβδοι καυσίμου, οι ράβδοι ελέγχου, ο επιβραδυντής, ο ανακλαστής, καθώς και οι θωρακίσεις [14].
2. **Δεύτερο κύκλωμα:** Αποτελείται από τη γεννήτρια ατμού και άλλες διατάξεις που είναι υπεύθυνες για τη μετατροπή του παραγόμενου ατμού σε ηλεκτρική ενέργεια.

2.3.1 Καύσιμο και καρδιά του αντιδραστήρα

Το καύσιμο που χρησιμοποιείται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες είναι συνήθως εμπλουτισμένο ουράνιο-235 ή πλουτώνιο-239. Το ουράνιο-235 είναι το φυσικό ισότοπο του ουρανίου που είναι ικανό να υποστεί πυρηνική σχάση, αλλά σε φυσική

μορφή αποτελεί μόλις το 0,7% του ουρανίου που εξορύσσεται. Για αυτόν τον λόγο, το ουράνιο εμπλουτίζεται, αυξάνοντας την περιεκτικότητά του σε ουράνιο-235 έως και 3%-5%, ώστε να μπορεί να διατηρηθεί η αλυσιδωτή αντίδραση.

Το εμπλουτισμένο καύσιμο τοποθετείται σε μεταλλικές ράβδους, γνωστές ως **ράβδοι καυσίμου**. Αυτές οι ράβδοι οργανώνονται σε συστάδες που ονομάζονται **συστοιχίες καυσίμου** και εισάγονται στην καρδιά του αντιδραστήρα. Η καρδιά του αντιδραστήρα είναι η περιοχή όπου πραγματοποιούνται οι πυρηνικές σχάσεις και απελευθερώνεται ενέργεια με τη μορφή θερμότητας.

Γύρω από τις ράβδους καυσίμου βρίσκεται ο **επιβραδυντής**, ο οποίος είναι απαραίτητος για τη διατήρηση της αλυσιδωτής αντίδρασης. Τα νετρόνια που απελευθερώνονται από τις σχάσεις είναι πολύ υψηλής ταχύτητας (ταχεία νετρόνια), τα οποία δεν είναι αποτελεσματικά για τη διατήρηση της αντίδρασης. Ο επιβραδυντής επιβραδύνει τα νετρόνια μέσω ελαστικών συγκρούσεων, μετατρέποντάς τα σε θερμικά νετρόνια, τα οποία είναι πιο πιθανό να προκαλέσουν σχάσεις στους πυρήνες του ουρανίου ή του πλουτωνίου.

Ο επιβραδυντής είναι συνήθως νερό, βαρύ ύδωρ (που περιέχει δευτέριο αντί υδρογόνου) ή γραφίτης, ανάλογα με τον τύπο του αντιδραστήρα. Το νερό, πέρα από τον ρόλο του ως επιβραδυντής, χρησιμοποιείται συχνά και ως ψυκτικό μέσο για τη μεταφορά της παραγόμενης θερμότητας από την καρδιά του αντιδραστήρα στο πρώτο κύκλωμα.

Η επιλογή του καυσίμου, του επιβραδυντή και του σχεδιασμού της καρδιάς του αντιδραστήρα είναι κρίσιμη για την ασφάλεια, την απόδοση και τη σταθερότητα του αντιδραστήρα. Η καρδιά του αντιδραστήρα έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η ομοιόμορφη κατανομή των σχάσεων και η σταθερή λειτουργία σε κρίσιμη κατάσταση [8].

2.3.2 Ρύθμιση της αντίδρασης

Η αλυσιδωτή αντίδραση ρυθμίζεται από τις **ράβδους ελέγχου**, οι οποίες μπορούν να εισέρχονται ή να αποσύρονται από την καρδιά του αντιδραστήρα. Οι ράβδοι ελέγχου

είναι κατασκευασμένες από υλικά όπως χάλυβας βορίου, κάδμιο, ασήμι και τα κράματά τους, τα οποία απορροφούν νετρόνια, επιτρέποντας τον έλεγχο του ρυθμού της αντίδρασης [12].

Η καρδιά του αντιδραστήρα περικλείεται από τον **ανακλαστήρα**, ο οποίος μειώνει τις απώλειες νετρονίων μέσω ανάκλασης, επιστρέφοντάς τα στον πυρήνα. Με τη μείωση των απωλειών νετρονίων, η απόδοση του αντιδραστήρα αυξάνεται και απαιτείται λιγότερο καύσιμο για να διατηρηθεί ο αντιδραστήρας στην **κρίσιμη κατάσταση** [14].

2.3.3 Θωράκιση και ασφάλεια

Όλα τα παραπάνω στοιχεία βρίσκονται μέσα στο **δοχείο του αντιδραστήρα**, το οποίο αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους μηχανισμούς ασφαλείας του πυρηνικού αντιδραστήρα. Το δοχείο είναι κατασκευασμένο από χάλυβα υψηλής αντοχής, σχεδιασμένο να αντέχει σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα.

Το δοχείο περικλείεται από δύο είδη θωράκισης:

- **Θερμική θωράκιση:** Κατασκευασμένη από υλικά που έχουν υψηλή θερμική αντοχή, η θερμική θωράκιση απορροφά τη θερμότητα που παράγεται από τις αντιδράσεις σχάσης, προστατεύοντας τα εξωτερικά συστήματα από υπερθέρμανση. Αυτός ο μηχανισμός διασφαλίζει τη σταθερή λειτουργία του αντιδραστήρα, αποτρέποντας τη θερμική αστάθεια.
- **Βιολογική θωράκιση:** Συνήθως αποτελείται από παχύ στρώμα σκυροδέματος ή άλλων απορροφητικών υλικών και έχει ως κύριο σκοπό την απορρόφηση νετρονίων και ακτινοβολίας γ. Αυτή η θωράκιση προστατεύει το προσωπικό του σταθμού και το περιβάλλον από την επικίνδυνη ακτινοβολία που παράγεται κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα.

Πέρα από τις θωρακίσεις, το **εξωτερικό περίβλημα** του αντιδραστήρα λειτουργεί ως μια πρόσθετη δικλείδα ασφαλείας. Είναι κατασκευασμένο για να αντέχει σε σενάρια ατυχημάτων, όπως εκρήξεις ή ραγίσματα στο δοχείο, και αποτρέπει τη

διαρροή ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον. Σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος, το περίβλημα περιορίζει την εξάπλωση των πυρηνικών αποβλήτων, προστατεύοντας τόσο τον ανθρώπινο πληθυσμό όσο και το οικοσύστημα. Η προσεκτική σχεδίαση και τα πολλαπλά επίπεδα προστασίας των πυρηνικών αντιδραστήρων καθιστούν τη λειτουργία τους ασφαλή, εφόσον τηρούνται αυστηρά οι κανόνες λειτουργίας και συντήρησης.

2.4 Τύποι πυρηνικών αντιδραστήρων

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες (Π.Α.) έχουν κατηγοριοποιηθεί σε γενιές για να αποτυπώνεται η πρόοδος της τεχνολογίας και να διευκολύνεται η κατανόηση της εξέλιξής τους. Οι γενιές αυτές είναι::

- **Πρώτη γενιά:** Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τους πρώτους πυρηνικούς αντιδραστήρες που αναπτύχθηκαν στα μέσα του 20ού αιώνα. Οι αντιδραστήρες αυτοί είχαν κυρίως στρατιωτική ή πειραματική χρήση και αποτέλεσαν τη βάση για την κατανόηση της πυρηνικής σχάσης και της ευρύτερης λειτουργίας ενός πυρηνικού αντιδραστήρα. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα είναι ο **Experimental Breeder Reactor 1 (EBR-1)** στις ΗΠΑ και ο **Calder Hall** στην Αγγλία. Από το 2012, η λειτουργία αντιδραστήρων αυτής της γενιάς έχει διακοπεί [6].
- **Δεύτερη γενιά:** Οι αντιδραστήρες της δεύτερης γενιάς τέθηκαν σε λειτουργία κυρίως τη δεκαετία του 1960 και 1970. Αυτοί οι αντιδραστήρες σηματοδότησαν την εμπορική χρήση της πυρηνικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Περιλαμβάνουν αντιδραστήρες ελαφρού και βαρέος ύδατος, όπως τους **Pressurized Water Reactors (PWR)** και **CANDU**. Παρόλο που αυτοί οι αντιδραστήρες χρησιμοποιούνται ευρέως μέχρι και σήμερα, ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα οδήγησαν στην ανάπτυξη της επόμενης γενιάς [6].

- **Τρίτη γενιά:** Η τρίτη γενιά αντιδραστήρων άρχισε να λειτουργεί λίγο πριν το 2000. Αυτοί οι αντιδραστήρες ενσωματώνουν προηγμένα συστήματα ασφαλείας, βελτιωμένους μηχανισμούς ελέγχου και τεχνολογίες καυσίμων που μειώνουν τα παραγόμενα απόβλητα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της γενιάς είναι ο **Advanced Boiling Water Reactor (ABWR)** και ο **Advanced Pressurized Water Reactor (APWR)**, προηγμένος αντιδραστήρας με νερό βρασμού και προηγμένος αντιδραστήρας με νερό υπό πίεση, αντίστοιχα [6].
- **Τέταρτη γενιά:** Η τέταρτη γενιά πυρηνικών αντιδραστήρων βρίσκεται ακόμη σε φάση ανάπτυξης και αντιπροσωπεύει την τελευταία λέξη της τεχνολογίας. Αυτοί οι αντιδραστήρες στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της απόδοσης, στη μείωση και καλύτερη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων και στην αύξηση της ασφάλειας. Σημαντικοί τύποι αυτής της γενιάς είναι οι **μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες (SMR)**, οι **αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων (FNR)** και οι **αντιδραστήρες τηγμένου άλατος (MSR)** [6] [8].

Οι εξελίξεις αυτές υπογραμμίζουν τη διαρκή προσπάθεια για βελτίωση της αποδοτικότητας, της ασφάλειας και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας της πυρηνικής ενέργειας.

2.4.1 Αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWR)

Οι αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWR) είναι οι πιο διαδεδομένοι πυρηνικοί αντιδραστήρες παγκοσμίως. Το κοινό χαρακτηριστικό τους είναι ότι το **νερό** χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο, επιβραδυντής και ανακλαστής [8] [15]. Η λειτουργία τους βασίζεται στην βράση του νερού που προέρχεται από την παραγόμενη θερμότητα της σχάσης, έτσι ώστε ο ατμός που θα δημιουργηθεί να παράξει τελικά ηλεκτρική ενέργεια όπως θα συνέβαινε σε κάποιον ατμοηλεκτρικό σταθμό. Η μεγάλη απορροφητικότητα νετρονίων του νερού εμποδίζει τους

αντιδραστήρες αυτούς να λειτουργούν με φυσικό ουράνιο U-238 και έτσι ο εμπλουτισμός με U-235 είναι αναγκαίος. Οι LWR χωρίζονται σε :

- **Αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος (PWR):** Στους PWR, το νερό ρέει σε κλειστό κύκλωμα μέσα από τον αντιδραστήρα, χωρίς να βράζει, και θερμαίνεται σε θερμοκρασίες περίπου 325°C. Η πίεση διατηρείται σταθερή περίπου στα 150 bar για να αποτραπεί ο βρασμός του νερού. Το θερμό νερό εξέρχεται από τον αντιδραστήρα και οδηγείται σε ατμογεννήτριες, όπου θερμαίνει νερό σε ξεχωριστό κύκλωμα για να παραχθεί ατμός, ο οποίος κινεί τις τουρμπίνες[8] [6].

Πλεονεκτήματα PWR:

1. Οι PWR έχουν χαμηλότερα επίπεδα ακτινοβολίας καθώς το νερό δεν έρχεται σε επαφή με τον πυρήνα του αντιδραστήρα, μειώνοντας έτσι τις πιθανότητες ραδιενεργούς μόλυνσης [8].
2. Μικρότερη πιθανότητα μόλυνσης των τουρμπίνων με ραδιενέργεια, αφού ο ατμός παράγεται σε ξεχωριστό κύκλωμα [7].
3. Ο κίνδυνος αστάθειας του πυρήνα είναι μικρότερος καθώς οι PWR είναι πιο ικανοί στην διαχείριση των υψηλών πιέσεων [8] [7].

- **Αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος (BWR):** Στους BWR, το νερό βράζει μέσα στον ίδιο τον πυρήνα του αντιδραστήρα, παράγοντας ατμό που οδηγείται απευθείας στις τουρμπίνες. Αυτή η απλότητα στη σχεδίαση μειώνει το κόστος, αλλά το νερό και ο ατμός έρχονται σε επαφή με το καύσιμο και γίνονται ραδιενεργοί, απαιτώντας πρόσθετα μέτρα θωράκισης και ασφάλειας [15] [8].

Πλεονεκτήματα BWR:

1. Απλότητα στον σχεδιασμό καθώς δεν υπάρχει ξεχωριστή ατμογεννήτρια κάτι που οδηγεί σε χαμηλότερο κόστος [7].
2. Το πάχος του δοχείου πίεσεως είναι μικρότερο καθώς η πίεση του ψυκτικού νερού είναι η μισή σε σχέση με έναν PWR [8].
3. Λειτουργία σε χαμηλότερη θερμοκρασία πυρηνικού καυσίμου, μειώνοντας τη φθορά [7].

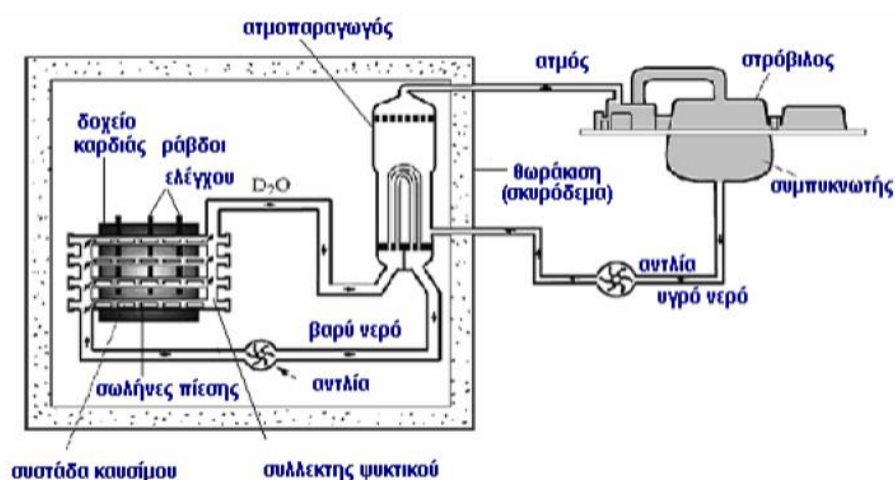
2.4.2 Αντιδραστήρες βαρέος ύδατος (HWR)

Οι αντιδραστήρες βαρέος ύδατος (HWR) διαφέρουν από τους LWR, καθώς χρησιμοποιούν **βαρύ νερό (D_2O)** ως επιβραδυντή και ψυκτικό μέσο. Το βαρύ νερό είναι οξείδιο του δευτέρου και επιτρέπει τη χρήση φυσικού, μη εμπλουτισμένου ουρανίου ($U-238$) ως καύσιμο, κάτι που διαφοροποιεί σημαντικά τους HWR από τους LWR.

Οι HWR αναπτύχθηκαν ιδιαίτερα στον Καναδά, όπου τα μεγάλα κοιτάσματα φυσικού ουρανίου και το ακρωνύμιο **CANDU (Canada Deuterium Uranium)** αντικατοπτρίζουν τη συμβολή τους στην τεχνολογία [8].

Το βαρύ νερό δεν επιβραδύνει τα νετρόνια τόσο αποτελεσματικά όσο το ελαφρύ ύδωρ, αυτό δημιουργεί σχεδιαστικά προβλήματα καθώς αν ακολουθούνταν ο σχεδιασμός τύπου LWR, ο αντιδραστήρας που θα προέκυπτε θα ήταν πολύ μεγάλου όγκου [8]. Έτσι οι CANDU, για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, διαθέτουν έναν ειδικό πυρήνα, γνωστό ως **calandria**, ο οποίος είναι ένα μεγάλο δοχείο όπου οι ράβδοι καυσίμου τοποθετούνται σε οριζόντιους σωλήνες.

Το **βαρύ ύδωρ** λειτουργεί τόσο ως επιβραδυντής όσο και ως ψυκτικό μέσο. Ρέει μέσα στους σωλήνες σε πίεση περίπου 1 bar, διατηρώντας τη θερμοκρασία στους $310^{\circ}C$. Το θερμαινόμενο ψυκτικό οδηγείται σε ατμογεννήτριες, όπου η παραγωγή ατμού γίνεται παρόμοια με τους PWR [8], [16].



Εικόνα 4: Αντιδραστήρας CANDU [16].

Σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του τύπου αντιδραστήρα είναι η χρήση φυσικού ουρανίου, που εξαλείφει την ανάγκη εμπλουτισμού, η ευκολία στον ανεφοδιασμό καυσίμου κατά τη λειτουργία, χωρίς να απαιτείται διακοπή, η υψηλότερη απόδοση καυσίμου, λόγω της αποτελεσματικής χρήσης του φυσικού ουρανίου [7] , [15].

2.4.3 Αερόψυκτοι αντιδραστήρες (GCR)

Οι αερόψυκτοι αντιδραστήρες (Gas-Cooled Reactors - GCR) χρησιμοποιούν **αδρανή αέρια** ως ψυκτικά μέσα για την απομάκρυνση της θερμότητας που παράγεται κατά την πυρηνική σχάση. Συνήθως, χρησιμοποιούν **γραφίτη** ως επιβραδυντή, ο οποίος βοηθά στην επιβράδυνση των ταχέων νετρονίων, επιτρέποντας τη διατήρηση της αλυσιδωτής αντίδρασης.

Η επιλογή αδρανών αερίων, όπως το **ήλιο** ή το **διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)**, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα:

1. **Υψηλή θερμική απόδοση:** Τα αέρια αυτά επιτρέπουν τη λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες, βελτιώνοντας την απόδοση της θερμικής μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια.
2. **Μειωμένη χρήση νερού:** Η εξάρτηση από το νερό ως ψυκτικό μέσο περιορίζεται σημαντικά, γεγονός που καθιστά τους GCR ιδανικούς για περιοχές με περιορισμένους υδάτινους πόρους.
3. **Χαμηλή χημική δραστηριότητα:** Τα αδρανή αέρια μειώνουν τον κίνδυνο ανεπιθύμητων χημικών αντιδράσεων σε περίπτωση διαρροής [6] [15].

Οι GCR χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με τον σχεδιασμό και τη χρήση τους:

- **Αντιδραστήρες Γραφίτη-Αερίου:** Χρησιμοποιούν γραφίτη ως επιβραδυντή και διοξείδιο του άνθρακα ως ψυκτικό μέσο.
- **Αερόψυκτοι αντιδραστήρες βαρέος ύδατος:** Συνδυάζουν βαρύ ύδωρ ως επιβραδυντή και αδρανή αέρια ως ψυκτικό.

- **Αερόψυκτοι αντιδραστήρες υψηλής θερμοκρασίας (HTGR):**
Λειτουργούν σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες, επιτρέποντας την παραγωγή υδρογόνου εκτός από την ηλεκτρική ενέργεια.
- **Προηγμένοι αερόψυκτοι αντιδραστήρες (AGR):** Περιλαμβάνουν τεχνολογικές βελτιώσεις για αυξημένη ασφάλεια και απόδοση.

Οι αερόψυκτοι αντιδραστήρες, ιδιαίτερα οι **HTGR**, έχουν προσελκύσει ενδιαφέρον ως πιθανή λύση για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, χάρη στην ικανότητά τους να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες και να ενσωματώνονται σε βιομηχανικές διεργασίες όπως η παραγωγή υδρογόνου.

2.4.4 Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες (BR)

Ως **αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες (Breeder Reactors - BR)**, χαρακτηρίζονται οι αντιδραστήρες αυτοί που παράγουν περισσότερο σχάσιμο υλικό από αυτό που καταναλώνουν [17]. Οι BR βασίζονται στην απορρόφηση των ταχέων νετρονίων τα οποία παράγονται κατά την αλυσιδωτή αντίδραση από το γόνιμο υλικό μετατρέποντας το σε σχάσιμο. Τα κυριότερα γόνιμα υλικά είναι το U-238 και το θόριο Th-232, στην περίπτωση απορρόφησης νετρονίου διεγείρονται σε U-239 και Th-233. Επειδή τα διεγερμένα ισότοπα θα αποσυντεθούν προκύπτουν τα σχάσιμα ουράνιο U-233 και πλουτώνιο Pu-239, τα οποία έχουν μεγάλες ομοιότητες στην συμπεριφορά τους με το U-235 [8] [17]. Μερικοί από τους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες είναι οι :

- Αναπαραγωγικός αντιδραστήρας υγρού μετάλλου (LMFBR), που κάνουν χρήση υγρού νατρίου ως ψυκτικό υγρό.
- Αερόψυκτος αναπαραγωγικός αντιδραστήρας (GCFR), έχουν ως ψυκτικό μέσο το ήλιο και χρησιμοποιούν ως καύσιμο ένα μίγμα ουρανίου και πλουτωνίου.
- Αναπαραγωγικός αντιδραστήρας λιωμένου άλατος (MSBR).
- Αναπαραγωγικός αντιδραστήρας ελαφρού ύδατος.

Η ανεξαρτητοποίηση από το U-235 είναι σημαντική καθώς υπολογισμοί έχουν δείξει ότι τα αποθέματα του έχουν πεπερασμένο χρόνο ζωής και δεν θα μπορούν να

τροφοδοτούν τα πυρηνικά εργοστάσια επ' άπειρον. Έτσι η επιστημονική κοινότητα έχει εκφράσει ενδιαφέρον για τους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες, αν και υπάρχει και η άποψη πως η ανάπτυξη αυτών των αντιδραστήρων δεν είναι τόσο επιθυμητή καθώς είναι πιθανό να υπάρχουν περισσότερα κοιτάσματα ουρανίου από όσα υπολογίζονται. Ακόμη υπάρχει σοβαρός προβληματισμός που αφορά στη διάδοση αυτών των σχάσιμων υλικών για πυρηνικά όπλα [8].

3 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΚΑΙ ΜΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) είναι πηγές ενέργειας που ανανεώνονται συνεχώς μέσω φυσικών διαδικασιών και δεν εξαντλούν τους πόρους τους στο ίδιο χρονικό διάστημα που χρησιμοποιούνται. Το κύριο χαρακτηριστικό της ενέργειας που προέρχεται από ΑΠΕ είναι ότι η παραγωγή της απελευθερώνει σημαντικά μειωμένους, ή και καθόλου, ρύπους και αέρια του θερμοκηπίου [18].

Η στρέψη των αρμόδιων φορέων και το ενδιαφέρον για τις ΑΠΕ είχε ως κύρια αφετηρία την πετρελαϊκή κρίση του 1973, με τρανταχτό παράδειγμα την ίδρυση της Διεθνούς Επιτροπής Ενέργειας την επόμενη χρονιά [19]. Ακόμη θα πρέπει να τονιστεί πως η χρήση ΑΠΕ αποτελεί κύριο πυλώνα για την επίτευξη των στόχων της **συμφωνίας του Παρισιού**, μιας συμφωνίας που υπογράφηκε στο τέλος του 2015 και τέθηκε σε ισχύ τον Νοέμβριο του 2016 και επικεντρώνεται σε ζητήματα ενεργειακής κρίσης και κλιματικής αλλαγής. Πιο συγκεκριμένα η συμφωνία θέτει τους εξής στόχους:

Α) Συγκράτηση της αύξησης της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας σε πολύ κάτω από 2 °C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα και η συνέχιση των προσπαθειών για τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας σε 1,5 °C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα, αναγνωρίζοντας ότι αυτό θα μείωνε σημαντικά τους κινδύνους και τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής [20].

Β) Αύξηση της ικανότητας προσαρμογής στις δυσμενείς επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και ενίσχυση της κλιματικής ανθεκτικότητας και ανάπτυξη με χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, κατά τρόπο που δεν απειλεί την παραγωγή τροφίμων [20].

Γ) Να συνάδουν οι χρηματοδοτικές ροές με μια πορεία προς χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να υπάρχει κλιματικά ανθεκτική ανάπτυξη [20].

Ορισμένες από τις κύριες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν:

- **Ηλιακή Ενέργεια:** Η χρήση του ηλίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (φωτοβολταϊκά πάνελ) και θερμότητας (ηλιακοί θερμοσίφωνες) είναι ευρέως διαδεδομένη. Η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη και φιλική προς το περιβάλλον.
- **Αιολική Ενέργεια:** Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του αέρα σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι μια ανανεώσιμη πηγή με χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.
- **Υδροηλεκτρική Ενέργεια:** Η χρήση της κίνησης του νερού, όπως ποτάμια και λίμνες, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι μια σταθερή πηγή ενέργειας, αλλά μπορεί να επηρεαστεί από την ποσότητα του νερού.
- **Βιομάζα και Βιοκαύσιμα:** Η χρήση οργανικών υλικών, όπως ξύλο, φυτικά καύσιμα και βιοαέριο, για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Γεωθερμική Ενέργεια:** Η χρήση της θερμότητας που προέρχεται από το εσωτερικό της Γης για θέρμανση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [21].

Είναι προφανές ότι η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ είναι κάτι που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα και τους διεθνείς φορείς έντονα τα τελευταία 20 χρόνια περίπου. Πιο συγκεκριμένα η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) εξέδωσε την πρώτη της οδηγία όσο αναφορά τις ΑΠΕ το 2001, δημιουργώντας έτσι τους πρώτους προβληματισμούς ανάμεσα στα κράτη μέλη σε ό,τι αφορά την προέλευση της ενέργειας τους. Το 2018 προχώρησε στην εισήγηση της οδηγίας Renewable Energy Directive II (RED II) η οποία θέτει ως στόχο το 32% της ενέργειας που θα καταναλώνεται στην ΕΕ έως το 2030 να είναι ανανεώσιμη [22].

Οι στόχοι αυτοί δεν είναι απλό να πραγματοποιηθούν, παρ'όλα τα σημαντικά τους οφέλη όπως η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η ανεξαρτησία από τις περιορισμένες ορυκτές πηγές ενέργειας και η δημιουργία θέσεων εργασίας. Προφανώς οι ΑΠΕ παρουσιάζουν και ορισμένες προκλήσεις. Οι πιο κύριες από αυτές είναι το υψηλό αρχικό κόστος των εγκαταστάσεων, η διασφάλιση σταθερής παροχής ενέργειας, αλλά και η δυσκολία στην αποθήκευσή της [23].

3.2 Μη Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΜΑΠ)

Ως μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ορίζονται αυτές που προέρχονται από φυσικούς πόρους οι οποίοι είναι εξαντλήσιμοι. Παρόλο που η διαδικασία παραγωγής τέτοιων πηγών ενέργειας δεν σταματά πρακτικά, η ολοκλήρωση του σχηματισμού τους απαιτεί εκατομμύρια χρόνια για αυτό και σε ανθρώπινη κλίματα θεωρούνται εξαντλήσιμες. Έτσι υπάρχει προβληματισμός γύρω από το χρονικό διάστημα που απομένει για την εκμετάλλευση των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς η εξάντληση τους θα προκαλέσει σοβαρό πρόβλημα για την ενεργειακή κάλυψη. Ορισμένες από τις κύριες μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν:

- Ορυκτά Καύσιμα:** Αυτά περιλαμβάνουν το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και τον άνθρακα. Χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανση, κίνηση και βιομηχανικές διεργασίες. Η εξάντλησή τους έχει σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην οικονομία.

- Πυρηνική Ενέργεια:** Αν και η Π.Ε. δεν είναι ακριβώς "πεπερασμένη" στον ίδιο βαθμό με τα ορυκτά καύσιμα, η παραγωγή Π.Ε. απαιτεί τη χρήση σπάνιων πυρηνικών υλικών που είναι περιορισμένα στη φύση [24].

Οι ΜΑΠ που αναφέρθηκαν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: πρωτογενείς και δευτερογενείς πηγές ενέργειας. Με τον όρο **πρωτογενής ενέργεια**, δηλώνουμε ότι μια μορφή ενέργειας που προέρχεται απευθείας από την φύση, συχνά από τον ήλιο, δεν είναι αναγκαία η περαιτέρω επεξεργασία της για να μεταβεί σε χρήσιμη ενέργεια.

Δευτερογενής ενέργεια είναι η μορφή ενέργειας που προκύπτει από τη μετατροπή της πρωτογενούς ενέργειας μέσω διαφόρων φυσικών ή χημικών διαδικασιών. Για παράδειγμα, το ηλεκτρικό ρεύμα και τα καύσιμα που προέρχονται από διύλιση

πετρελαίου αποτελούν δευτερογενείς μορφές ενέργειας. [23]. Κάνοντας τον διαχωρισμό αυτό προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 1: Πρωτογενείς ενεργειακές πηγές [23].

Κατηγορία ΜΑΠ	Πρωτογενής Ενέργεια
Ορυκτά	• Γαιάνθρακας • Τύρφη • Αργό πετρέλαιο • Φυσικό αέριο
Πυρηνικά	• Ουράνιο • Θόριο • Δευτέριο • Λίθιο • Βηρύλλιο

Πίνακας 2: Δευτερογενείς ενεργειακές πηγές [23].

Κατηγορία ΜΑΠ	Δευτερογενής Ενέργεια
Ορυκτά καύσιμα από γαιάνθρακα	• Κοκ • Αέριο παραγωγής • Μπρικέτες • Πολφοί γαιάνθρακα • Αεριοποίηση γαιάνθρακα • Μεθανόλη από γαιάνθρακα • Υπόλειμμα
Ορυκτά καύσιμα από πετρέλαιο	• Βενζίνη • Κηροζίνη • Πετρέλαιο κίνησης • Υγροποιημένο φυσικό αέριο • Προπάνιο

	• Βουτάνιο
Πυρηνικά	• Τρίτιο • Πλουτόνιο

3.3 Προβληματισμοί και περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την χρήση ΑΠΕ και μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Η χρήση ΑΠΕ, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, έχει πολλά οφέλη για το περιβάλλον και την αειφορία του πλανήτη, αλλά ταυτόχρονα υπάρχουν και προβληματισμοί και περιβαλλοντικές επιπτώσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη [21]. Ανάμεσα σε αυτές συμπεριλαμβάνονται:

- ❖ **Χρήση χώρου και επίδραση στο τοπίο:** Η εγκατάσταση μεγάλων αιολικών και ηλιακών πάρκων απαιτεί μεγάλη έκταση γης, η οποία μπορεί να έχει επιπτώσεις στο τοπίο και την οικολογική ισορροπία. Ορισμένες φορές αυτό μπορεί να συμπεριλαμβάνει την απώλεια φυσικών οικοσυστημάτων και την αλλαγή στην τοπογραφία.
- ❖ **Επίδραση στην πανίδα:** Η χρήση ανεμογεννητριών δημιουργεί έναν κίνδυνο για την τοπική πανίδα και κυρίως τα πτηνά αυτής διότι μπορεί να υπάρξει θανάτωσή τους από τα πτερύγια ή τα καλώδια λόγω ηλεκτροπληξίας. Βέβαια ο αριθμός θανάτων είναι μικρός και η κύρια ανησυχία εστιάζεται στην αλλαγή των μεταναστευτικών συνηθειών των πτηνών λόγω της ενόχλησής τους.
- ❖ **Κατανάλωση Εδαφικών Πόρων:** Η παραγωγή και εγκατάσταση των συστημάτων ΑΠΕ απαιτεί πόρους όπως μέταλλα, γυαλί και πλαστικά, η εξόρυξη και η επεξεργασία αυτών των πόρων συχνά είναι βλαβερή για το περιβάλλον με αποτέλεσμα τα έργα ΑΠΕ να έχουν και αυτά ένα ποσοστό ρύπανσης.
- ❖ **Ανακύκλωση και Απόρριψη:** Οι παλιοί πάνελ ηλιακής ενέργειας και άλλα στοιχεία των συστημάτων ΑΠΕ πρέπει να ανακυκλώνονται σωστά για να μειωθούν τα απορρίμματα και η ρύπανση.
- ❖ **Εξάρτηση από τις καιρικές συνθήκες:** Η τροφοδοσία μιας περιοχής με ενέργεια θα πρέπει να είναι σταθερή και για λόγους ευκολίας στην χρήση και για λόγους ασφάλειας. Η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ όμως εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον καιρό με αποτέλεσμα να υπάρχουν ενεργειακές

διαταραχές. Έτσι υπάρχει ο κίνδυνος μια ΑΠΕ να μην μπορεί να ανταπεξέλθει σε μια χρονική στιγμή που υπάρχει μεγάλη ζήτηση ενέργειας [21].

Παρόλο που υπάρχουν αυτοί οι προβληματισμοί, η χρήση ΑΠΕ παραμένει σημαντική για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την μετάβαση σε μια πιο βιώσιμη ενεργειακή παραγωγή. Ο σωστός σχεδιασμός, η τεχνολογική καινοτομία και η προσεκτική διαχείριση μπορούν να βοηθήσουν στην μείωση των αρνητικών επιπτώσεων των συστημάτων ΑΠΕ στο περιβάλλον [25].

Όσο αφορά τη χρήση των ΜΑΠ, όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και ο άνθρακας, υπάρχουν πολλοί προβληματισμοί και σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς συνδέεται με την αυξημένη εξάρτηση από τις ορυκτές πηγές καυσίμων και την μεγιστοποίηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου [19]. Ορισμένοι από αυτούς τους προβληματισμούς και τις επιπτώσεις περιλαμβάνουν:

- ❖ **Κλιματική Αλλαγή:** Η καύση ορυκτών καυσίμων εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και άλλα αέρια του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, προκαλώντας την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη και την κλιματική αλλαγή.
- ❖ **Ρύπανση Ατμοσφαίρας και Υδάτων:** Πέραν της κλιματικής αλλαγής η απελευθέρωση ρυπογόνων ουσιών, όπως οξείδια του αζώτου (NO_x) και διοξείδιο του θείου (SO_2), που μπορούν να προκαλέσουν ατμοσφαιρική ρύπανση και όξινη βροχή, επηρεάζοντας την ποιότητα του αέρα, του εδάφους και των υδάτων [26].
- ❖ **Εξόρυξη και Καύση:** Η εξόρυξη των ορυκτών καυσίμων και η καύση τους έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, όπως την αποψίλωση δασών, την ρύπανση του εδάφους και τον κίνδυνο διαρροής πετρελαίου σε θαλάσσιες περιοχές.
- ❖ **Ενεργειακή Εξάρτηση:** Η εξάρτηση από εισαγωγές πετρελαίου και φυσικού αερίου μπορεί να δημιουργήσει πολιτική εξάρτηση και συγκρούσεις για τις χώρες που εισάγουν αυτούς τους πόρους. Με πρόσφατο παράδειγμα τον πόλεμο στην Ουκρανία είδαμε πως οι χώρες που εισάγουν πόρους μπορεί να έρθουν αντιμέτωπες με σοβαρά ζητήματα αν η χώρα που εξάγει τους πόρους αποφασίσει να ανεβάσει τις τιμές ή να μην εξάγει καθόλου πηγές ενέργειας.

- ❖ **Επιπτώσεις στην Υγεία:** Η καύση ορυκτών καυσίμων προκαλεί την εκπομπή τοξικών ρύπων που μπορούν να επηρεάσουν την υγεία του ανθρώπου, προκαλώντας αναπνευστικά προβλήματα και άλλες ασθένειες.
- ❖ **Κίνδυνος Ατυχημάτων:** Οι δραστηριότητες που σχετίζονται με την εξόρυξη, τη μεταφορά και την επεξεργασία των ορυκτών καυσίμων ενέχουν τον κίνδυνο ατυχημάτων, όπως πετρελαϊκές διαρροές και εκρήξεις [19].

Οι παραπάνω προβληματισμοί και περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθιστούν σαφές ότι η αντικατάσταση των ΜΑΠ με ΑΠΕ είναι κρίσιμη για την προστασία του περιβάλλοντος και τη μείωση των επιπτώσεων της ανθρώπινης δραστηριότητας στον πλανήτη [23].

3.4 Πλεονεκτήματα και ανησυχίες από την χρήση πυρηνικής ενέργειας

Ο άνθρωπος με την πρόοδο της τεχνολογίας κατάφερε να αξιοποιήσει την ΠΕ και να την χρησιμοποιήσει σε διάφορους τομείς με κυριότερο την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Στην παρούσα χρονική περίοδο όπου ο κόσμος μάχεται για την μετρίαση της κλιματικής αλλαγής και την απομάκρυνση από ρυπογόνες πηγές ενέργειας η ΠΕ προσφέρει λύσεις, καθώς έχει μεγάλη ενεργειακή απόδοση και ελάχιστες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ενδεικτικά η ενέργεια που παράγεται από μια σχέση πυρήνα ουρανίου είναι 50 εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη από την ενέργεια που θα παραχθεί από την καύση ενός ατόμου άνθρακα [27]. Παρακάτω θα αναφερθούν τα **κυριότερα πλεονεκτήματα της ΠΕ** τα οποία συμπεριλαμβάνουν:

- **Χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου:** Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της Π.Ε. είναι οι χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες δεν εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και άλλα αέρια του θερμοκηπίου κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό τους καθιστά μια καθαρή πηγή ενέργειας από περιβαλλοντικής άποψης και συμβάλλει στη μείωση του ανθρώπινου αποτυπώματος άνθρακα και στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής [14]. Επομένως, η Π.Ε. αποτελεί μία εναλλακτική επιλογή που συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του

θερμοκηπίου και την προσπάθεια για βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον παραγωγή ενέργειας.

- **Σταθερή Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας:** Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα της Π.Ε. είναι η σταθερή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες μπορούν να παράγουν σταθερή και συνεχή ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες ή τη διαθεσιμότητα του ανέμου ή του ηλίου. Μπορούν να λειτουργούν σε σταθερό ρυθμό για μεγάλα χρονικά διαστήματα, συνήθως για περίοδο αρκετών χρόνων, χωρίς τις αισθητές διακυμάνσεις στην παραγωγή που μπορεί να παρουσιάσουν οι ΑΠΕ [28].
- **Υψηλή Ενεργειακή Απόδοση:** Η Π.Ε. διακρίνεται για την υψηλή ενεργειακή απόδοση. Ένα μικρό ποσό πυρηνικού καυσίμου μπορεί να παράγει μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στην υψηλή ενεργειακή πυκνότητα του πυρηνικού καυσίμου όπου κατά την διάσπαση ή σύντηξη, απελευθερώνεται τεράστια ποσότητα ενέργειας από τον πυρήνα των ατόμων. Αυτή η υψηλή απόδοση καθιστά την Π.Ε. αποτελεσματική από άποψη ενεργειακής παραγωγής, μειώνει τις ανάγκες για μεγάλες ποσότητες καυσίμων και επιτρέπει στους πυρηνικούς αντιδραστήρες να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα πριν απαιτηθεί η αντικατάσταση του πυρηνικού καυσίμου, κάτι που συμβάλλει στη σταθερή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [28].

Παρόλο που το αρχικό κόστος κατασκευής ενός πυρηνικού εργοστασίου είναι ιδιαίτερα υψηλό, οι έρευνες δείχνουν ότι οι πυρηνικές εγκαταστάσεις είναι **οικονομικά ανταγωνιστικές** σε σχέση με τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα [29]. Αυτό οφείλεται κυρίως:

- Στο **χαμηλό κόστος λειτουργίας** των πυρηνικών εργοστασίων, καθώς τα πυρηνικά καύσιμα είναι διαθέσιμα σε σημαντικά αποθέματα και έχουν σχετικά χαμηλή τιμή.
- Στο **μεγάλο προσδόκιμο ζωής** των πυρηνικών σταθμών, που επιτρέπει την απόσβεση του αρχικού κόστους κατασκευής σε βάθος χρόνου.

- Στην **επιβολή περιβαλλοντικών φόρων** στις συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, γεγονός που ενισχύει την ανταγωνιστικότητα της πυρηνικής ενέργειας.

Επιπλέον, η κατασκευή πυρηνικών σταθμών μπορεί να έχει **θετικές οικονομικές επιπτώσεις** στις τοπικές κοινωνίες. Η άνθιση των κατασκευαστικών εταιρειών, καθώς και η αυξημένη ζήτηση για σκυρόδεμα και χάλυβα, ενισχύουν τη δραστηριότητα των σχετικών βιομηχανιών, δημιουργώντας θέσεις εργασίας και συμβάλλοντας στην **οικονομική ανάπτυξη των τοπικών επιχειρήσεων**[28].

Παρόλα αυτά, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η Π.Ε. συνοδεύεται και από **μειονεκτήματα και ανησυχίες**, όπως η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων, ο κίνδυνος πυρηνικών ατυχημάτων και η κοινωνική αποδοχή. Επίσης, η ανάπτυξη νέων πυρηνικών τεχνολογιών και η ασφαλής λειτουργία των αντιδραστήρων είναι σημαντικά θέματα προς εξέταση και βελτίωση. Ορισμένα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν:

- **Υγειονομικοί και περιβαλλοντικοί κίνδυνοι:** Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες μπορούν να προκαλέσουν διαρροές ραδιενεργών υλικών καθώς και απρόσμενα προβλήματα στην λειτουργία τους τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε κάποιο ατύχημα. Τέτοια ατυχήματα μπορούν να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων και το περιβάλλον. Οι υγειονομικοί και περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που σχετίζονται με την Π.Ε. περιλαμβάνουν:
 - **Ακτινοβολία:** Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες μπορεί να έχουν διαρροή ραδιενεργής ακτινοβολίας, η οποία αποτελεί υγειονομικό κίνδυνο για τους ανθρώπους και το περιβάλλον. Εκτεθειμένοι σε υπερβολική ακτινοβολία μπορεί να αντιμετωπίσουν ασθένειες, όπως ο καρκίνος [9].
 - **Ατυχήματα:** Ανώτερα από όλα, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες μπορεί να υποστούν ατυχήματα ή βλάβες, όπως εκείνα που συνέβησαν στο Τσερνομπίλ και τη Φουκουσίμα. Αυτά τα ατυχήματα μπορούν να έχουν σοβαρές συνέπειες για την υγεία των εργαζομένων και του πληθυσμού, καθώς και για το περιβάλλον [30].
 - **Δινητικός στόχος στρατιωτικών επιθέσεων:** Όπως έγινε πρόσφατα στον πόλεμο μεταξύ της Ρωσίας και της Ουκρανίας, ένα πυρηνικό εργοστάσιο

μπορεί να γίνει στρατιωτικός στόχος με αποτέλεσμα την τρομοκράτηση του πληθυσμού. Η κλοπή ραδιενεργών υλικών ή η επίθεση εναντίον πυρηνικών εγκαταστάσεων μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες [31].

- **Απόβλητα Π.Ε.:** Η παραγωγή Π.Ε. προκαλεί τη δημιουργία ραδιενεργών αποβλήτων, τα οποία πρέπει να αποθηκεύονται και να διαχειρίζονται με προσοχή για πολλά χρόνια. Η ασφαλής διάθεση αυτών των αποβλήτων αποτελεί μια σημαντική πρόκληση. Τα ραδιενεργά απόβλητα αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα που συνδέονται με τη χρήση της Π.Ε. Τα κύρια θέματα που σχετίζονται με τα απόβλητα Π.Ε. είναι:

- *Υψηλή Ραδιενέργεια:* Τα απόβλητα αποδίδουν ραδιενέργεια, η οποία μπορεί να είναι επικίνδυνη για την υγεία των ανθρώπων και το περιβάλλον για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, ανάλογα με το είδος των αποβλήτων.
- *Μακροχρόνια Διατήρηση:* Οι αντιδραστήρες παράγουν απόβλητα που παραμένουν ραδιενεργά για εκατοντάδες ή ακόμη και χιλιάδες χρόνια. Αυτό απαιτεί την ανάπτυξη μακροχρόνιων σχεδίων διαχείρισης και αποθήκευσης.
- *Ανάγκη για Ασφαλή Αποθήκευση:* Τα ραδιενεργά απόβλητα πρέπει να αποθηκεύονται σε ασφαλείς τοποθεσίες. Η αποθήκευση αυτή πρέπει να προστατεύει το περιβάλλον και την υγεία του πληθυσμού από τυχόν διαρροές.
- *Διαχείριση και Μεταφορά:* Η μεταφορά των αποβλήτων από τον τόπο παραγωγής στον τόπο αποθήκευσης είναι μια ευαίσθητη διαδικασία, καθώς πρέπει να αποφεύγονται ατυχήματα και να υπάρχει εξαιρετική προσοχή από τους εργαζόμενους.
- *Δαπάνες:* Η αποτελεσματική διαχείριση των αποβλήτων Π.Ε. απαιτεί σημαντικούς οικονομικούς πόρους.
- *Ηθικά και Κοινωνικά Ζητήματα:* Η αποθήκευση αναλύεται ως ένα ηθικό και κοινωνικό ζήτημα, καθώς οι επόμενες γενεές θα πρέπει να διαχειριστούν αυτά τα απόβλητα.

- **Υψηλό κόστος κατασκευής:** Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες απαιτούν υψηλές επενδύσεις για την κατασκευή και τη συντήρησή τους. Το υψηλό αρχικό κόστος μπορεί να αποθαρρύνει τις χώρες από την επένδυση σε Π.Ε. [29]. Αυτό το κόστος προκύπτει από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των εξής:
 - ο *Υψηλές Τεχνολογικές Απαιτήσεις:* Η κατασκευή και λειτουργία ενός πυρηνικού αντιδραστήρα απαιτεί υψηλή τεχνολογική εξειδίκευση και αυστηρές προδιαγραφές ασφαλείας.
 - ο *Ασφάλεια:* Οι αυστηροί κανονισμοί και πρότυπα για την ασφάλεια σε πυρηνικά εργοστάσια καθιστούν την κατασκευή και την λειτουργία τους δαπανηρές. Η προστασία από πιθανούς κινδύνους είναι προτεραιότητα [7].
 - ο *Απαιτητικοί χρόνοι:* Η κατασκευή ενός πυρηνικού εργοστασίου απαιτεί πολλά χρόνια, αφού πρέπει να πληρούνται όλες οι τεχνικές και ασφαλιστικές προδιαγραφές.
 - ο *Διαχείριση Αποβλήτων:* Η δημιουργία αποβλήτων Π.Ε. αυξάνει το συνολικό κόστος, καθώς απαιτείται ασφαλής αποθήκευση και διαχείριση.

Ως εκ τούτου, το υψηλό κόστος κατασκευής ενός πυρηνικού εργοστασίου μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εμπόδιο για την υλοποίηση νέων πυρηνικών εγκαταστάσεων και επενδύσεων στον τομέα αυτόν.

- **Κίνδυνος πυρηνικής εξάπλωσης:** Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της Π.Ε. είναι ο κίνδυνος πυρηνικής εξάπλωσης, που αναφέρεται στον κίνδυνο διάδοσης τεχνολογίας, υλικών και γνώσης που σχετίζονται με την Π.Ε. προς χώρες ή τρομοκρατικές ομάδες που μπορεί να χρησιμοποιήσουν αυτήν την τεχνολογία για στρατιωτικούς σκοπούς. Η τεχνολογία της Π.Ε. μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για στρατιωτικούς σκοπούς, και η διάδοσή της μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο πυρηνικής εξάπλωσης. Αυτός ο κίνδυνος περιλαμβάνει τα εξής:
 - ο *Διάδοση πυρηνικών όπλων:* Η διάδοση της πυρηνικής τεχνολογίας και γνώσης μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη πυρηνικών όπλων από χώρες ή ομάδες που δεν συμμετέχουν σε διεθνείς συμφωνίες περί πυρηνικού αφοπλισμού ή δεν τηρούν αυστηρούς κανονισμούς [7].
 - ο *Κίνδυνος κλοπής υλικών:* Τα πυρηνικά υλικά είναι εξαιρετικά επικίνδυνα και, αν κλαπούν ή κατασχεθούν από τρομοκράτες ή εχθρικές κυβερνήσεις,

μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή πυρηνικών όπλων ή την πρόκληση μαζικών καταστροφών.

- Ο *Καταστροφικές συγκρούσεις*: Η διεθνής διάδοση της πυρηνικής τεχνολογίας μπορεί να δημιουργήσει περισσότερες διαταράξεις και κρίσεις μεταξύ χωρών που βρίσκονται σε εμπόλεμη κατάσταση ή έχουν κακές διπλωματικές σχέσεις [32].

Για να αντιμετωπιστεί αυτός ο κίνδυνος, υπάρχουν διεθνείς συμφωνίες και κανονισμοί, όπως η Συνθήκη Μη Διάδοσης των Πυρηνικών Όπλων (ΣΜΔΠΟ), που στοχεύουν στον περιορισμό της διάδοσης της πυρηνικής τεχνολογίας και την προώθηση του πυρηνικού αφοπλισμού. Παρ' όλα αυτά, ο κίνδυνος παραμένει και απαιτεί σταθερή παγκόσμια προσοχή και συνεργασία [14].

Η **δημόσια αντίληψη** για την πυρηνική ενέργεια (Π.Ε.) παραμένει διχασμένη, καθώς υπάρχουν τόσο ένθερμοι υποστηρικτές όσο και πολέμιοι της τεχνολογίας. Αυτή η διχογνωμία οφείλεται κυρίως σε δύο αντικρουόμενα χαρακτηριστικά της πυρηνικής ενέργειας:

- Από τη μία πλευρά, η Π.Ε. προσφέρει **καθαρή ενέργεια** με μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, συμβάλλοντας στη μείωση της κλιματικής αλλαγής.
- Από την άλλη πλευρά, η λειτουργία των πυρηνικών σταθμών συνοδεύεται από την παραγωγή **ραδιενεργών αποβλήτων**, η διαχείριση των οποίων εγείρει περιβαλλοντικές και κοινωνικές ανησυχίες.

Η **πολυπλοκότητα** της τεχνολογίας, σε συνδυασμό με την προβολή συχνά προκατειλημμένων ή δραματοποιημένων πληροφοριών από τα μέσα μαζικής ενημέρωσης (ΜΜΕ), μπορεί να οδηγήσει σε **παρανοήσεις** ή και σε αδικαιολόγητο φόβο (τρομοκρατία) από την πλευρά του κοινού [33].

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα από την ελληνική πραγματικότητα είναι η **αρνητική στάση** των κατοίκων της Αγίας Παρασκευής κατά τη δημιουργία του ερευνητικού πυρηνικού αντιδραστήρα στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Η στάση αυτή προηγήθηκε των πυρηνικών ατυχημάτων στο Τσερνόμπιλ και τη Φουκουσίμα, γεγονός που υπογραμμίζει την **ιστορική επιφυλακτικότητα** απέναντι στην πυρηνική

ενέργεια, ακόμη και σε περιβάλλοντα χωρίς έντονη εμπειρία αντίστοιχων κρίσεων [33].

3.5 Συγκριτικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ΠΕ έναντι των υπόλοιπων μορφών ενέργειας

Η πυρηνική ενέργεια έχει σημαντικά συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι των υπολοίπων μορφών ενέργειας, τα οποία περιλαμβάνουν:

- ❖ **Χαμηλές Εκπομπές Θερμοκηπίου:** Η πυρηνική ενέργεια δεν εκπέμπει αέρια του θερμοκηπίου κατά την παραγωγή ενέργειας, όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Αυτό σημαίνει ότι συμβάλλει στη μείωση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.
- ❖ **Υψηλή Ενεργειακή Πυκνότητα:** Παράγει μεγάλη ποσότητα ενέργειας από μικρό όγκο πυρηνικού υλικού, κάτι που την καθιστά αποτελεσματική και χωρίς την ανάγκη μεγάλων επιφανειακών εγκαταστάσεων.
- ❖ **Σταθερή Παραγωγή Ενέργειας:** Η πυρηνική ενέργεια παράγεται σχεδόν συνεχώς, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες, σε αντίθεση με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, οι οποίες εξαρτώνται από τον καιρό και τον ηλιακό ανεμιστήρα.
- ❖ **Μικρό Χώρο Αποθήκευσης:** Οι πυρηνικοί σταθμοί απαιτούν σχετικά λίγο χώρο σε σύγκριση με μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας από άλλες πηγές, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια.

Παρ' όλα αυτά, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η πυρηνική ενέργεια έχει και μειονεκτήματα, όπως:

- **Κίνδυνος Πυρηνικών Ατυχημάτων:** Τα πυρηνικά ατυχήματα, όπως αυτά που συνέβησαν στο Τσερνομπίλ και τη Φουκουσίμα, μπορούν να έχουν καταστροφικές συνέπειες για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία.
- **Διαχείριση Ραδιενεργών Αποβλήτων:** Η πυρηνική ενέργεια παράγει ραδιενεργά απόβλητα που πρέπει να αποθηκεύονται με ασφάλεια για

παραπάνω από χίλια χρόνια. Η διαχείριση αυτών των αποβλήτων είναι δύσκολη και δαπανηρή.

- **Υψηλό Κόστος Κατασκευής και Καύσης:** Οι πυρηνικοί σταθμοί απαιτούν υψηλές επενδύσεις για την κατασκευή και τη λειτουργία τους, και η διαδικασία καύσης πυρηνικού υλικού είναι δαπανηρή και περίπλοκη.
- **Μεγάλη Περίοδος Κατασκευής:** Οι πυρηνικοί σταθμοί απαιτούν πολλά χρόνια για την κατασκευή τους, και καθυστερήσεις είναι συνηθισμένες, προκαλώντας υψηλό κόστος χρηματοδότησης.
- **Διασφάλιση της Ασφάλειας:** Η πυρηνική ενέργεια απαιτεί υψηλά πρότυπα ασφαλείας και την αποφυγή ανθρώπινων λαθών για την αποφυγή ατυχημάτων.

Κατά συνέπεια, η πυρηνική ενέργεια προσφέρει καθαρή ενέργεια με χαμηλές εκπομπές CO₂, αλλά παραμένει συνδεδεμένη με πολλούς προβληματισμούς, όπως ο κίνδυνος ατυχημάτων, η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων και το υψηλό οικονομικό κόστος. Επιπλέον, υπάρχει συνεχής συζήτηση σχετικά με το αν η πυρηνική ενέργεια πρέπει να αναπτυχθεί ή όχι λόγω αυτών των παραμέτρων.

4 ΑΠΟΒΛΗΤΑ

4.1 Ορισμός πυρηνικών αποβλήτων

Τα πυρηνικά απόβλητα (ΠΑ) είναι υλικά που προκύπτουν μετά από την χρήση τους σε πυρηνικές διεργασίες. Αυτά τα υλικά είναι ραδιενεργά και αποτελούν δυνητικό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, λόγω της εκπομπής ιοντίζουσας ακτινοβολίας [34].

Τα ΠΑ δεν παράγονται μόνο κατά τη λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων αλλά και σε όλα τα στάδια του κύκλου πυρηνικών καυσίμων, όπως η εξόρυξη, η επεξεργασία, η επανεπεξεργασία και η ανακύκλωση του πυρηνικού καυσίμου[8].

Η έννοια των ΠΑ περιλαμβάνει τα υποπροϊόντα από τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε πυρηνικούς σταθμούς. Κατά την πυρηνική σχάση, ασταθή άτομα διασπώνται, απελευθερώνοντας ενέργεια και αφήνοντας πίσω τους ραδιενεργά

ισότοπα ως απόβλητα. Ανάλογα με τον χρόνο ημιζωής και τα επίπεδα ραδιενέργειάς τους, τα ισότοπα αυτά μπορεί να προκαλέσουν σοβαρούς κινδύνους.

Τα ΠΑ παράγονται επίσης από διάφορες άλλες δραστηριότητες::

- **Ιατρικές εφαρμογές:** Χρήση ραδιοϊσοτόπων για διαγνωστικές και θεραπευτικές διαδικασίες.
- **Ερευνητικές δραστηριότητες:** Εργαστήρια που εργάζονται με ραδιενεργά υλικά.
- **Στρατιωτικές εφαρμογές:** Παραγωγή πυρηνικών όπλων.

Η κύρια ανησυχία σχετικά με τα ΠΑ είναι η **μακροχρόνια επικινδυνότητά τους**. Τα ραδιενεργά ισότοπα που περιέχουν μπορούν να παραμείνουν επικίνδυνα για χιλιάδες χρόνια, ενώ, αν δεν γίνει σωστή διαχείριση, μπορούν να μολύνουν το έδαφος, το νερό και τον αέρα, με σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία, όπως:

- Καρκινογενέσεις.
- Γενετικές μεταλλάξεις.
- Ασθένειες που σχετίζονται με την ακτινοβολία [35].

Τα ραδιενεργά απόβλητα προέρχονται από διάφορες φάσεις λειτουργείας ενός πυρηνικού σταθμού, διαφοροποιούνται σε σύσταση και ποσότητα ανάλογα με την πηγή τους, καθώς και στο επίπεδο ραδιενέργειας που κατέχουν. Κατά συνέπεια, η διαχείριση και η αποθήκευσή τους πρέπει να γίνονται με προσεκτικό τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη τις ραδιενεργές ιδιότητές τους.

- **Διάθεση κοντά στο έδαφος:** Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για απόβλητα χαμηλής ραδιενέργειας, όπως μολυσμένα εργαλεία και ρούχα. Τα απόβλητα αυτά θάβονται σε ρηχούς χώρους υγειονομικής ταφής, οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι να τα απομονώνουν από το περιβάλλον έως ότου η ραδιενέργειά τους μειωθεί σε ασφαλή επίπεδα.
- **Βαθιά γεωλογική διάθεση:** Η μέθοδος αυτή προτιμάται για απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας, όπως τα αναλωμένα πυρηνικά καύσιμα, τα οποία παραμένουν επικίνδυνα για χιλιάδες χρόνια. Στη βαθιά γεωλογική διάθεση, τα

απόβλητα αποθηκεύονται σε σταθερούς γεωλογικούς σχηματισμούς βαθιά στο υπέδαφος, εξασφαλίζοντας μακροπρόθεσμο περιορισμό.

- **Διάθεση μεσαίου επιπέδου ραδιενέργειας:** Απόβλητα όπως εξαρτήματα αντιδραστήρων και χημικές λάσπες απαιτούν διάθεση σε εγκαταστάσεις που παρέχουν επαρκή θωράκιση, αν και αυτές δεν είναι τόσο βαθιές όσο οι εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται για τα υψηλής ραδιενέργειας απόβλητα.
- **Επανεπεξεργασία και ανακύκλωση:** Ορισμένα στοιχεία, όπως το πλουτόνιο και το ουράνιο, μπορούν να διαχωριστούν και να επαναχρησιμοποιηθούν, μειώνοντας έτσι τον όγκο και την τοξικότητα των αποβλήτων.
- **Προσωρινή αποθήκευση:** Τα απόβλητα μπορούν να αποθηκευτούν προσωρινά σε δεξαμενές ή ξηρά δοχεία. Αυτή η λύση εφαρμόζεται μέχρι να βρεθεί μια κατάλληλη μακροπρόθεσμη λύση για τη διαχείριση τους.

Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους έχει σχεδιαστεί ώστε να ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο μόλυνσης του περιβάλλοντος και να προστατεύει την ανθρώπινη υγεία κατά τα απαιτούμενα χρονικά διαστήματα [36].

Το **αναλωμένο πυρηνικό καύσιμο**, που αποτελεί ένα από τα πιο ραδιενεργά απόβλητα, απαιτεί ειδική μεταχείριση και αποθήκευση. Αρχικά, αποθηκεύεται προσωρινά σε ειδικά σχεδιασμένα δοχεία, τα οποία διασφαλίζουν την απομόνωσή του από το περιβάλλον. Σε δεύτερο στάδιο, μπορεί να υποβληθεί σε **μετεπεξεργασία** για τη μείωση της ραδιενέργειας ή για την εξαγωγή χρήσιμων υλικών, όπως το ουράνιο και το πλουτόνιο, τα οποία μπορούν να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν. Η τελική αποθήκευση του αναλωμένου καυσίμου πραγματοποιείται σε **ασφαλείς γεωλογικούς χώρους απόθεσης**, που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος κάτω από το έδαφος και εξασφαλίζουν μακροπρόθεσμο περιορισμό των ραδιενεργών υλικών.

Μια ακόμα ιδιαίτερη κατηγορία πυρηνικών αποβλήτων είναι ο **μολυσμένος εξοπλισμός προστασίας**, που χρησιμοποιείται σε πυρηνικές εγκαταστάσεις. Αυτός περιλαμβάνει γάντια, φόρμες, μάσκες και μπότες, τα οποία προστατεύουν τους εργαζομένους από την έκθεση σε ραδιενεργά υλικά. Μετά τη χρήση του, ο εξοπλισμός μετατρέπεται σε ραδιενεργό απόβλητο και πρέπει να διαχειρίζεται ως τέτοιο. Οι διαδικασίες διαχείρισης περιλαμβάνουν:

- **Απολύμανση** για τη μείωση της ραδιενέργειας,
- **Προσωρινή αποθήκευση** σε ασφαλείς χώρους, και
- **Τελική διάθεση** σε κατάλληλες εγκαταστάσεις, ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια του περιβάλλοντος και των εργαζομένων [37].

Τα **ραδιενεργά απόβλητα** παράγονται σε όλα τα στάδια του κύκλου πυρηνικών καυσίμων, από την εξόρυξη των υλικών που απαιτούνται για την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας (Π.Ε.) έως την τελική διάθεση τους. Τα στάδια αυτά περιλαμβάνουν [38]:

1. **Εξόρυξη:** Κατά την εξόρυξη του ουρανίου ή άλλων πυρηνικών καυσίμων, δημιουργούνται απόβλητα χαμηλής ραδιενέργειας, γνωστά ως ορυκτά υπολείμματα (*tailings*). Τα υπολείμματα αυτά αποτελούν τον πρώτο τύπο ραδιενεργών αποβλήτων στον κύκλο καυσίμου.
2. **Επεξεργασία καυσίμων:** Στη διαδικασία επεξεργασίας του πυρηνικού καυσίμου, προκύπτουν απόβλητα χαμηλής έως μεσαίας ραδιενέργειας. Μετά τη χρήση των καυσίμων στους αντιδραστήρες, προκύπτουν τα αναλωμένα καύσιμα, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας.
3. **Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας:** Κατά τη λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων, η σχάση του καυσίμου παράγει θερμότητα και, παράλληλα, υψηλής ραδιενέργειας απόβλητα, με κυριότερο παράδειγμα τα αναλωμένα καύσιμα.
4. **Επεξεργασία αποβλήτων:** Τα παραγόμενα ραδιενεργά απόβλητα υποβάλλονται σε κατάλληλη επεξεργασία για να διασφαλιστεί η ασφαλής διάθεσή τους. Αυτή μπορεί να περιλαμβάνει την απομόνωση, την ανακύκλωση ή τη φυσική εναπόθεση σε ασφαλείς χώρους.

Ο κύκλος του πυρηνικού καυσίμου διακρίνεται σε επιμέρους στάδια, τα οποία περιλαμβάνουν [38]:

1. **Εξόρυξη και επεξεργασία ουρανίου:** Το ουράνιο εξορύσσεται και επεξεργάζεται για να παραχθεί το βασικό καύσιμο που χρησιμοποιείται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες. Σε αυτό το στάδιο παράγονται υπολείμματα με χαμηλή ραδιενέργεια, γνωστά ως *tailings*.

2. **Εμπλουτισμός:** Το φυσικό ουράνιο εμπλουτίζεται για να αυξηθεί η συγκέντρωση του ισότοπου U-235, το οποίο είναι απαραίτητο για τη διατήρηση της πυρηνικής αλυσιδωτής αντίδρασης. Η διαδικασία αυτή αυξάνει τη συνολική απόδοση του καυσίμου.
3. **Χρήση στον αντιδραστήρα:** Το εμπλουτισμένο ουράνιο τοποθετείται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, όπου υποβάλλεται σε σχάση, παράγοντας θερμότητα που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του αντιδραστήρα, παράγονται προϊόντα σχάσης και αναλωμένα καύσιμα, τα οποία είναι υψηλής ραδιενέργειας.
4. **Επεξεργασία του χρησιμοποιημένου καυσίμου:** Το χρησιμοποιημένο πυρηνικό καύσιμο μπορεί να υποβληθεί σε επεξεργασία για την ανάκτηση χρήσιμων υλικών, όπως το πλουτώνιο και το ουράνιο, μειώνοντας παράλληλα τον όγκο και την τοξικότητα των αποβλήτων. Αυτή η διαδικασία συμβάλλει στη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων.
5. **Απόρριψη των αποβλήτων:** Τα τελικά ραδιενεργά απόβλητα, που δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, αποθηκεύονται σε ασφαλείς εγκαταστάσεις διάθεσης. Ανάλογα με την επικινδυνότητά τους, η αποθήκευση μπορεί να περιλαμβάνει γεωλογικά αποθέματα σε μεγάλο βάθος ή ειδικά σχεδιασμένες αποθήκες.

Εκτός από την αναλυτική κατηγοριοποίηση του κύκλου καυσίμου, υπάρχει μια γενικότερη προσέγγιση που χωρίζει τον κύκλο του πυρηνικού καυσίμου σε δύο βασικά μέρη, ως εξής [35]:

- **Εμπρόσθιο Άκρο:** Περιλαμβάνει τα στάδια από την εξόρυξη του ουρανίου, την επεξεργασία του για την παραγωγή πυρηνικών καυσίμων, τη χρήση τους στους πυρηνικούς αντιδραστήρες και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Οπίσθιο Άκρο:** Αφορά τη διαχείριση του χρησιμοποιημένου πυρηνικού καυσίμου, την ανάκτηση χρήσιμων υλικών (όπως ουράνιο και πλουτώνιο) και την αποθήκευση ή διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων σε ασφαλείς εγκαταστάσεις..

Εμπρόσθιο Άκρο

Τα απόβλητα που προκύπτουν από το εμπρόσθιο άκρο περιλαμβάνουν κυρίως υπολείμματα από την εξόρυξη και την επεξεργασία του ουρανίου. Το διοξείδιο του ουρανίου (UO_2), το οποίο αποτελεί βασικό συστατικό του καυσίμου, δεν εκπέμπει έντονη ραδιενεργή ακτινοβολία και θεωρείται σχετικά ακίνδυνο σε αυτή τη μορφή. Ωστόσο, κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα, το UO_2 μετατρέπεται σε ραδιενεργά προϊόντα μέσω πυρηνικών αντιδράσεων. Αυτά τα προϊόντα απαιτούν προσεκτική διαχείριση σύμφωνα με τους κανονισμούς ασφαλείας [35].

Η διαδικασία **εμπλουτισμού** του ουρανίου είναι κρίσιμη, καθώς αυξάνει την περιεκτικότητα του ισότοπου U-235, το οποίο είναι απαραίτητο για τη διατήρηση της αλυσιδωτής αντίδρασης. Μετά τον εμπλουτισμό, το ουράνιο μετατρέπεται σε κεραμικό οξείδιο του ουρανίου (UO_2), το οποίο χρησιμοποιείται στις ράβδους καυσίμου των πυρηνικών αντιδραστήρων. Το UO_2 είναι σταθερό και κατάλληλο για τις υψηλές θερμοκρασίες και τις ραδιενεργές συνθήκες που επικρατούν στον αντιδραστήρα [35].

Μετά τον εμπλουτισμό, το ουράνιο χρησιμοποιείται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες για την παραγωγή ενέργειας. Το εμπλουτισμένο U-235, με αυξημένη περιεκτικότητα στο ισότοπο αυτό, υφίσταται πυρηνική σχάση, παράγοντας θερμότητα. Η παραγόμενη θερμότητα στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ειδικών συστημάτων μετατροπής.

Το εμπλουτισμένο ουράνιο, το οποίο αρχικά βρίσκεται συνήθως σε μορφή αερίου εξαφθοριούχου ουρανίου (UF_6), μετατρέπεται σε στερεό κεραμικό οξείδιο του ουρανίου (UO_2). Αυτή η μετατροπή είναι απαραίτητη για την παραγωγή ράβδων καυσίμου, οι οποίες αποτελούν τις βασικές δομικές μονάδες του πυρηνικού αντιδραστήρα. Οι ράβδοι καυσίμου σχεδιάζονται για να συγκρατούν το καύσιμο, επιτρέποντας την ελεγχόμενη απελευθέρωση πυρηνικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του αντιδραστήρα.

Το κεραμικό οξείδιο του ουρανίου (UO_2) είναι εξαιρετικά κατάλληλο για χρήση σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, καθώς διαθέτει υψηλή θερμική σταθερότητα και μπορεί να αντέξει τις έντονες ραδιενεργές συνθήκες του περιβάλλοντος του αντιδραστήρα. Με τη μορφή αυτή, το UO_2 εισάγεται στον πυρηνικό αντιδραστήρα, όπου ξεκινά η

διαδικασία της πυρηνικής σχάσης, αποδεσμεύοντας ενέργεια που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [35].

Οπίσθιο Άκρο

Το οπίσθιο άκρο περιλαμβάνει τα αναλωμένα καύσιμα και τα προϊόντα σχάσης που προκύπτουν από τη λειτουργία του αντιδραστήρα. Αυτά τα απόβλητα χαρακτηρίζονται από υψηλή ραδιενέργεια και περιλαμβάνουν ισότοπα, όπως το ουράνιο-234, το ουράνιο-238, το πλουτόνιο-238, και το αμερίκιο-241. Οι εκπομπές νετρονίων και τα ραδιενεργά προϊόντα σχάσης απαιτούν εξειδικευμένη διαχείριση και αποθήκευση για να διασφαλιστεί η ασφάλεια.

Η τελική αποθήκευση περιλαμβάνει τη διάθεση των αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας σε γεωλογικές εγκαταστάσεις μεγάλου βάθους, όπου μπορούν να παραμείνουν απομονωμένα για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η σωστή αποθήκευση είναι ζωτικής σημασίας, καθώς οποιαδήποτε αστοχία στη διαχείριση μπορεί να επισκιάσει τα πλεονεκτήματα της πυρηνικής ενέργειας και να δημιουργήσει σοβαρούς περιβαλλοντικούς και υγειονομικούς κινδύνους [35].

4.2 Τύποι Πυρηνικών Αποβλήτων

A) Απόβλητα Ορυχείων

Τα απόβλητα ορυχείων προέρχονται από την εξόρυξη και την επεξεργασία ουρανίου. Κατά τη χημική εκχύλιση του ουρανίου από θρυμματισμένο μετάλλευμα, τα παραγόμενα απορρίμματα περιέχουν θυγατρικά νουκλίδια του ουρανίου, όπως το ράδιο, το οποίο έχει χρόνο ημιζωής που μπορεί να φτάσει μερικές χιλιάδες χρόνια. Αν και το επίπεδο ραδιενέργειας αυτών των αποβλήτων είναι σχετικά χαμηλό, απαιτείται κατάλληλη διαχείριση λόγω της μακροχρόνιας ραδιενεργής εκπομπής.

Στο πλαίσιο της διαχείρισης, ακολουθείται συνήθως η μέθοδος της αποθήκευσης επί τόπου (in situ). Για τον περιορισμό της ακτινοβολίας γάμμα και τη μείωση της εκπομπής ραδονίου, τα απόβλητα θάβονται κάτω από μια στρώση αποστειρωμένου πετρώματος. Αυτή η πρακτική εξασφαλίζει την απομόνωσή τους από το περιβάλλον και μειώνει τον κίνδυνο διαρροής ραδιενεργών υλικών [39].

B) Very low level waste (VLL)

Τα απόβλητα πολύ χαμηλής ραδιενέργειας (VLL) προέρχονται κυρίως από την αποσυναρμολόγηση πυρηνικών εγκαταστάσεων. Εντοπίζονται στα δομικά υλικά των εγκαταστάσεων, όπως ο χάλυβας, τα σίδερα και το σκυρόδεμα. Ο χρόνος ημιζωής αυτών των αποβλήτων είναι μεταβλητός, καθώς εξαρτάται από τα ραδιενεργά ισότοπα που περιέχονται στα υλικά.

Το επίπεδο ραδιενέργειας αυτών των αποβλήτων είναι εξαιρετικά χαμηλό, όπως υποδηλώνει και η ονομασία τους, και συγκρίνεται με εκείνο των αποβλήτων που προέρχονται από ορυχεία ουρανίου. Στο πλαίσιο της διαχείρισης, τα απόβλητα αυτά υπόκεινται σε διαδικασίες ταξινόμησης και απολύμανσης, όταν αυτό είναι εφικτό. Τελικά, αποθηκεύονται σε υπέργειες εγκαταστάσεις, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να παρέχουν κατάλληλη θωράκιση και να διασφαλίζουν την ασφαλή απομόνωσή τους από το περιβάλλον [39].

Γ) Low level short-lived waste (LL-SL)

Η κύρια πηγή αποβλήτων χαμηλού επιπέδου και βραχείας διάρκειας ζωής (LL-SL) είναι οι λειτουργικοί πυρηνικοί σταθμοί. Αυτά τα απόβλητα περιλαμβάνουν κυρίως «μολυσμένο» εξοπλισμό, όπως γάντια, μπότες των εργαζομένων, καθώς και φίλτρα της εγκατάστασης. Ο χρόνος ημιζωής τους κυμαίνεται από 10 έως 110 έτη, ενώ εντός 300 ετών η ραδιενέργεια τους εξασθενεί πλήρως σε ασφαλή επίπεδα.

Η συγκέντρωση ραδιενέργειας των αποβλήτων αυτών είναι μικρότερη από 3.7×10^8 Bq/kg. Στο πλαίσιο της διαχείρισης, τα απόβλητα αυτά συνήθως βυθίζονται σε τσιμέντο για σταθεροποίηση και ακολούθως αποθηκεύονται σε ειδικές εγκαταστάσεις κοντά στην επιφάνεια της γης. Οι εγκαταστάσεις αυτές επικαλύπτονται με στρώσεις αργίλου και χώματος για επιπλέον θωράκιση και προστασία από το περιβάλλον.

Μετά την αποθήκευση, ακολουθεί συνεχής παρακολούθηση και έλεγχος από τις αρμόδιες αρχές για την αποτροπή διαρροών. Παράλληλα, εφαρμόζονται μέτρα για την απαγόρευση πρόσβασης σε πολίτες, διασφαλίζοντας την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος [39].

Δ) Intermediate level long-lived waste (IL-LL)

Τα απόβλητα μεσαίου επιπέδου και μεγάλης διάρκειας ζωής (IL-LL) προέρχονται κυρίως από την επεξεργασία πυρηνικών καυσίμων. Σε αυτά περιλαμβάνονται υπολείμματα επεξεργασίας και επικαλύψεις καυσίμων. Ο χρόνος ημιζωής τους είναι εξαιρετικά μεγάλος, φτάνοντας έως και εκατομμύρια χρόνια. Το επίπεδο ραδιενέργειας χαρακτηρίζεται ως μέτριο, ενώ ένα σημαντικό χαρακτηριστικό αυτών των αποβλήτων είναι ότι δεν παράγουν θερμότητα.

Για τη σωστή διαχείριση, τα απόβλητα στερεοποιούνται σε υλικά όπως τσιμέντο, ασφαλτο ή γυαλί, προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος διαρροής. Στη συνέχεια, τοποθετούνται σε δοχεία ασφαλείας, τα οποία κατασκευάζονται από υλικά όπως ανοξείδωτος χάλυβας ή σκυρόδεμα. Αυτό προσφέρει ένα επιπλέον επίπεδο ασφάλειας και απομόνωσης από το περιβάλλον.

Όσον αφορά την τελική διάθεση, η πιο διαδεδομένη και μακροπρόθεσμη λύση είναι η βαθιά γεωλογική διάθεση. Αυτή πραγματοποιείται σε ειδικά σχεδιασμένες γεωλογικές αποθήκες, που βρίσκονται εκατοντάδες μέτρα κάτω από την επιφάνεια της γης. Οι αποθήκες αυτές είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να διατηρούν τα απόβλητα απομονωμένα για χρονικά διαστήματα που εκτείνονται από εκατοντάδες έως χιλιάδες χρόνια, διασφαλίζοντας την προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας [39].

Ε) High level long-lived waste (HL-LL)

Τα απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας και μεγάλης διάρκειας ζωής (HL-LL) προκύπτουν από τα χρησιμοποιημένα πυρηνικά καύσιμα. Αν τα καύσιμα αυτά υποβληθούν σε επεξεργασία, τότε λαμβάνουν τη μορφή γυάλινων μπλοκ, ενώ αν δεν επεξεργαστούν, παραμένουν ως συκροτήματα αναλωμένου καυσίμου. Ο χρόνος ημιζωής αυτών των αποβλήτων μπορεί να φτάσει έως και εκατομμύρια χρόνια. Πρόκειται για τα πιο ραδιενεργά απόβλητα, με επίπεδα ραδιενέργειας που αγγίζουν την τάξη των 10^{13} Bq/kg . Σε αντίθεση με τα

IL-LL απόβλητα, τα HL-LL συνεχίζουν να παράγουν σημαντικές ποσότητες θερμότητας λόγω των ενεργών ραδιενεργών ισοτόπων που περιέχουν.

Η διαχείρισή τους ξεκινά με την τοποθέτησή τους σε πισίνες ψύξης, αμέσως μετά την απομάκρυνσή τους από τον πυρηνικό αντιδραστήρα. Εκεί παραμένουν για χρονικό διάστημα 5 έως 10 ετών, προκειμένου να διασπαστούν ισότοπα μικρής διάρκειας ζωής και να μειωθεί η θερμοκρασία τους. Μετά τη διαδικασία ψύξης, τοποθετούνται σε ειδικά δοχεία αποθήκευσης, τα οποία είναι παρόμοιας κατασκευής με εκείνα που χρησιμοποιούνται για τα IL-LL, προσφέροντας προσωρινή λύση.

Η μακροχρόνια διάθεση των HL-LL αποβλήτων παραμένει αντικείμενο έρευνας και ανάπτυξης. Παρ' όλα αυτά, οι σύγχρονες πρακτικές περιλαμβάνουν την ταφή τους σε βαθύτατες γεωλογικές αποθήκες, πλήρως απομονωμένες από τη βιόσφαιρα. Αυτές οι εγκαταστάσεις σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζουν την ασφαλή αποθήκευση των αποβλήτων για χρονικές περιόδους που εκτείνονται σε εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια, αποτρέποντας πιθανές διαρροές ραδιενέργειας και διασφαλίζοντας την προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας [39].

4.3 Μέθοδοι απόρριψης Πυρηνικών Αποβλήτων

Η απόρριψη των πυρηνικών αποβλήτων αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα διαχείρισης πυρηνικής ενέργειας. Απαιτεί εξειδικευμένες και ασφαλείς μεθόδους, οι οποίες επιλέγονται βάσει της ραδιενεργής περιεκτικότητας, της κατηγορίας των αποβλήτων και των απαιτήσεων ασφαλείας. Οι κύριες μέθοδοι απόρριψης περιλαμβάνουν:

1. Αποθήκευση Αναλωμένων Πυρηνικών Καυσίμων (Spent Fuel Storage):

Τα αναλωμένα πυρηνικά καύσιμα είναι ραδιενεργά και θερμικά ζεστά μετά τη χρήση τους στους αντιδραστήρες, καθιστώντας αναγκαία την αποθήκευσή τους με ασφαλή τρόπο για την αποφυγή εκπομπών ακτινοβολίας και θερμότητας. Η προσωρινή αποθήκευση τους μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω δύο κύριων μεθόδων:

ο Υδάτινη Αποθήκευση (Wet Storage):

Σε αυτή τη μέθοδο, τα αναλωμένα πυρηνικά καύσιμα τοποθετούνται

σε ειδικά σχεδιασμένες πισίνες με νερό. Το νερό λειτουργεί ως ψυκτικό μέσο, απορροφώντας τη θερμότητα των καυσίμων και παρέχοντας προστασία από την ακτινοβολία. Η υδάτινη αποθήκευση είναι κατάλληλη για μεγάλες χρονικές περιόδους και χρησιμοποιείται ευρέως στις εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας.

ο **Ξηρή Αποθήκευση (Dry Storage):**

Στην ξηρή αποθήκευση, τα αναλωμένα πυρηνικά καύσιμα τοποθετούνται σε ειδικά δοχεία αποθήκευσης που περιέχουν αέρα ή άλλο απομονωτικό αέριο. Αυτά τα δοχεία είναι ανθεκτικά σε μηχανικές και περιβαλλοντικές καταπονήσεις και προστατεύουν από την ακτινοβολία. Οι δομές αυτές τοποθετούνται σε εγκαταστάσεις εδάφους ή σε υπερυψωμένες πλατφόρμες.

Και οι δύο μέθοδοι προσφέρουν ασφαλή προσωρινή αποθήκευση για τα αναλωμένα καύσιμα, με την επιλογή μεταξύ υδάτινης και ξηρής αποθήκευσης να εξαρτάται από τις ανάγκες του πυρηνικού σταθμού και τις τοπικές συνθήκες. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η αποθήκευση αυτή είναι προσωρινή. Η τελική διάθεση των αναλωμένων καυσίμων απαιτεί μακροχρόνιο σχεδιασμό και ανάπτυξη βιώσιμων λύσεων για την ασφαλή και μόνιμη απομόνωσή τους [6].

2. **Μεταφορά και Απόθεση σε Αποθήκες Απόρριψης:** Η μεταφορά και η απόθεση αναλωμένων πυρηνικών καυσίμων και άλλων πυρηνικών αποβλήτων σε ειδικές αποθήκες απόρριψης αποτελεί μία από τις βασικές μεθόδους διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων, ειδικά για τα μόνιμα απόβλητα. Οι αποθήκες αυτές συνήθως βρίσκονται σε γεωλογικά σταθερούς σχηματισμούς, όπως κοιτάσματα αλάτων ή βράχινες δομές, και έχουν σχεδιαστεί για να εξασφαλίζουν τη μακροπρόθεσμη απομόνωση των αποβλήτων από το περιβάλλον [39]. Η διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

ο **Μεταφορά:**

Τα πυρηνικά απόβλητα μεταφέρονται από την προσωρινή αποθήκευσή τους (όπως υδάτινες ή ξηρές μονάδες αποθήκευσης) στις εγκαταστάσεις απόρριψης. Η μεταφορά πραγματοποιείται με τη χρήση

ειδικά σχεδιασμένων μέσων, όπως κοντέινερ ή δοχεία υψηλής ασφάλειας, τα οποία είναι εξοπλισμένα για την προστασία από ακτινοβολία και τυχόν ατυχήματα κατά τη μεταφορά [39].

ο Απόθεση:

Μετά την άφιξη στις εγκαταστάσεις απόρριψης, τα πυρηνικά απόβλητα αποθηκεύονται με ασφαλή τρόπο. Οι αποθήκες απόρριψης βρίσκονται συνήθως σε βαθιά υπόγεια επίπεδα και είναι σχεδιασμένες για να απομονώνουν τα ραδιενεργά υλικά από το περιβάλλον. Τα απόβλητα τοποθετούνται μέσα σε ειδικά δοχεία ή κοντέινερ, τα οποία εγκαθίστανται σε προκαθορισμένες θέσεις, όπως ειδικές πλατφόρμες ή γεωλογικά σταθερές επιφάνειες [39].

ο Παρακολούθηση:

Μετά την απόθεση, τα πυρηνικά απόβλητα παρακολουθούνται τακτικά για να διασφαλιστεί η ασφαλής και σταθερή αποθήκευσή τους. Οι μετρήσεις ακτινοβολίας, η παρακολούθηση της θερμοκρασίας και άλλες διαδικασίες ελέγχου αποτελούν απαραίτητες πρακτικές για την αποφυγή διαρροών ή άλλων προβλημάτων. Αυτή η παρακολούθηση είναι κρίσιμη για την εξασφάλιση της προστασίας του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας [39].

3. **Ανακύκλωση και Επανεπεξεργασία:** Ορισμένα πυρηνικά απόβλητα μπορούν να υποβληθούν σε διαδικασίες ανακύκλωσης και επανεπεξεργασίας με σκοπό την ανάκτηση υλικών που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν στην παραγωγή Πυρηνικής Ενέργειας (Π.Ε.). Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένη για τα αναλωμένα πυρηνικά καύσιμα και συμβάλλει στη μείωση του όγκου και της τοξικότητας των αποβλήτων, ενώ εξοικονομεί πολύτιμους φυσικούς πόρους [35]. Οι κύριες διαδικασίες περιλαμβάνουν:

ο Ανακύκλωση Πυρηνικών Καυσίμων:

Τα αναλωμένα πυρηνικά καύσιμα μπορούν να υποβληθούν σε επανεπεξεργασία για την εξαγωγή υλικών όπως το ουράνιο και το πλουτώνιο, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκ νέου στην παραγωγή Π.Ε.. Αυτή η διαδικασία μειώνει τον όγκο των αποβλήτων

πυρηνικού καυσίμου και βελτιώνει την αποδοτικότητα στη χρήση φυσικών πόρων [35].

Ο Διασπορά και Προεπεξεργασία Αποβλήτων:

Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα πυρηνικά απόβλητα μπορεί να υποβληθούν σε διασπορά σε μεγάλες επιφάνειες ή σε προεπεξεργασία σε ειδικές εγκαταστάσεις. Αυτή η μέθοδος στοχεύει στη μετατροπή τους σε μικρότερα, λιγότερο επικίνδυνα απόβλητα, μειώνοντας τη ραδιενεργότητα και τον κίνδυνο που ενέχουν [35].

Ο Επανεπεξεργασία:

Η επανεπεξεργασία περιλαμβάνει χημικό διαχωρισμό και άλλες τεχνικές με στόχο τη μείωση της ραδιενεργότητας των αποβλήτων ή την ανάκτηση πολύτιμων υλικών που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν. Αυτές οι τεχνολογίες, αν και απαιτούν εξειδικευμένες υποδομές, έχουν τη δυνατότητα να συμβάλουν σημαντικά στη βιωσιμότητα της πυρηνικής βιομηχανίας.

Η ανακύκλωση και η επανεπεξεργασία είναι πολύτιμες πρακτικές για τη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων, καθώς προάγουν την αποδοτική χρήση των πόρων, ενώ παράλληλα μειώνουν τις περιβαλλοντικές και υγειονομικές επιπτώσεις των αποβλήτων [35].

4. **Απόθεση σε Γεωλογικά Καταστρώματα (Geological Disposal):** Η απόθεση πυρηνικών αποβλήτων σε γεωλογικά καταστρώματα αποτελεί μια από τις πιο ασφαλείς και αναγνωρισμένες μεθόδους για τη μακροπρόθεσμη διαχείριση υψηλής ραδιενέργειας αποβλήτων. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την τοποθέτηση των αποβλήτων σε φυσικά γεωλογικά σχηματισμούς, σε βάθη εκατοντάδων ή και χιλιάδων μέτρων κάτω από την επιφάνεια της γης, μακριά από την ανθρώπινη δραστηριότητα και το περιβάλλον.

Οι γεωλογικές αποθήκες σχεδιάζονται με βάση αυστηρές προδιαγραφές, ώστε να διασφαλίζεται η απομόνωση των αποβλήτων από την επιφάνεια και τα υδρολογικά συστήματα για χιλιάδες ή και εκατομμύρια χρόνια. Οι ιδιότητες που απαιτούνται για την επιλογή των γεωλογικών καταστρωμάτων περιλαμβάνουν:

Ο Στεγανότητα του εδάφους: Αποφυγή διαρροών ραδιενεργών υλικών.

- ο **Σταθερότητα του γεωλογικού σχηματισμού:** Αντοχή σε σεισμική δραστηριότητα ή άλλες γεωλογικές αλλαγές.
- ο **Απομόνωση από υδρολογικά συστήματα:** Αποφυγή επαφής με υπόγεια ύδατα, που θα μπορούσαν να μεταφέρουν ραδιενεργά υλικά.

Η διαδικασία απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό, αξιολόγηση του τόπου και υποβολή εκτενούς αίτησης άδειας. Οι γεωλογικές αποθήκες υπόκεινται σε συνεχή παρακολούθηση για να διασφαλιστεί η σταθερότητά τους και η μακροπρόθεσμη ασφάλεια. Στα τελικά στάδια, προβλέπεται το κλείσιμο των αποθηκών, με μέτρα που εξασφαλίζουν την αμετάκλητη απομόνωση των αποβλήτων.

Αν και η απόθεση σε γεωλογικά καταστρώματα θεωρείται ασφαλής, η διαδικασία είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και δαπανηρή. Για αυτόν τον λόγο, πολλές χώρες εφαρμόζουν προσωρινές λύσεις αποθήκευσης των πυρηνικών αποβλήτων, ενώ παράλληλα αναπτύσσουν μακροπρόθεσμες στρατηγικές για τη μόνιμη διάθεσή τους σε γεωλογικές εγκαταστάσεις [6], [35].

5. **Αποθήκευση Σειριακής Επεξεργασίας (Stepwise Storage):** Η μέθοδος αποθήκευσης σειριακής επεξεργασίας, γνωστή και ως *Stepwise Storage*, είναι μια προσέγγιση διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων που βασίζεται στην προσωρινή και σταδιακή αποθήκευση των αποβλήτων, ανάλογα με το επίπεδο ραδιενέργειας και τις απαιτήσεις ασφαλείας. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την προοδευτική διαχείριση των αποβλήτων, μειώνοντας την πίεση στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης και προετοιμάζοντας τα απόβλητα για την τελική τους διάθεση. Η διαδικασία είναι σχεδιασμένη ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλεια και η απομόνωση των αποβλήτων σε κάθε στάδιο, εξασφαλίζοντας παράλληλα την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας [40].

Η αποθήκευση σειριακής επεξεργασίας περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- ο **Προσωρινή Αποθήκευση:** Τα απόβλητα με την υψηλότερη ραδιενεργή δραστηριότητα αποθηκεύονται αρχικά σε προσωρινές εγκαταστάσεις. Αυτές οι αποθήκες σχεδιάζονται για να αντέχουν τη θερμότητα και τη ραδιενέργεια των αποβλήτων και να τα απομονώνουν για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα.

- ο **Ενδιάμεση Αποθήκευση:** Μετά την προσωρινή αποθήκευση, τα απόβλητα μεταφέρονται σε ενδιάμεσες αποθήκες, όπου παραμένουν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Αυτές οι εγκαταστάσεις παρέχουν αυξημένη θωράκιση και έχουν σχεδιαστεί για τη μεσοπρόθεσμη αποθήκευση.
- ο **Τελική Αποθήκευση:** Τέλος, τα απόβλητα που έχουν περάσει από τα προηγούμενα στάδια αποθηκεύονται σε γεωλογικά καταστρώματα ή αποθήκες βάθους. Αυτές οι εγκαταστάσεις προσφέρουν μακροχρόνια ασφάλεια και πλήρη απομόνωση των ραδιενεργών υλικών από το περιβάλλον.

Η αποθήκευση σειριακής επεξεργασίας απαιτεί σύνθετο σχεδιασμό, τεχνικές αξιολογήσεις και αυστηρή ρύθμιση για να διασφαλιστεί η ασφάλεια σε κάθε φάση της διαδικασίας. Επιπλέον, η εφαρμογή αυτής της μεθόδου συμβάλλει στη σταδιακή μείωση της επικινδυνότητας των πυρηνικών αποβλήτων και στην καλύτερη προσαρμογή τους στις απαιτήσεις τελικής διάθεσης.

Η μέθοδος αυτή αποτελεί έναν σημαντικό πυλώνα της σύγχρονης διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων, καθώς ενισχύει την ασφάλεια, μειώνει τον κίνδυνο διαρροών και προστατεύει το περιβάλλον από πιθανές μολύνσεις.

4.4 Δυσκολίες σχετιζόμενες με την διαχείριση των αποβλήτων

Η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων είναι μια πολύπλοκη και απαιτητική διαδικασία που συνοδεύεται από πλήθος προκλήσεων, οι οποίες οφείλονται κυρίως στη ραδιενεργή φύση των αποβλήτων και στις μακροπρόθεσμες συνέπειες που ενδέχεται να προκύψουν. Οι κυριότερες δυσκολίες περιλαμβάνουν:

- **Μακροπρόθεσμη Ασφάλεια:** Τα πυρηνικά απόβλητα διατηρούν τη ραδιενεργότητα τους για χιλιάδες ή ακόμη και εκατομμύρια χρόνια. Οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης και οι μέθοδοι διαχείρισης πρέπει να εξασφαλίζουν την ασφαλή απομόνωση από το περιβάλλον για αυτό το χρονικό διάστημα, γεγονός που απαιτεί καινοτόμο σχεδιασμό και προηγμένες τεχνολογίες.

- **Αποθηκευτικός Χώρος:** Οι μεγάλες ποσότητες πυρηνικών αποβλήτων δημιουργούν την ανάγκη για εκτεταμένους αποθηκευτικούς χώρους, οι οποίοι πρέπει να διαθέτουν την κατάλληλη υποδομή για την ασφαλή και μακροχρόνια αποθήκευσή τους.
- **Ανθρώπινος Παράγοντας:** Η σωστή διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων εξαρτάται από την ανθρώπινη παρέμβαση. Απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό που να είναι κατάλληλα εκπαιδευμένο και να ακολουθεί αυστηρά πρωτόκολλα ασφαλείας για την αποφυγή ατυχημάτων και τη διασφάλιση της λειτουργίας των αποθηκών.
- **Εθνικές και Διεθνείς Προδιαγραφές:** Οι αυστηροί κανονισμοί που διέπουν τη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο απαιτούν συνεχή συμμόρφωση και επιτήρηση. Αυτή η συμμόρφωση συνεπάγεται σημαντική διοικητική προσπάθεια και οργανωτική πειθαρχία.
- **Κόστος:** Η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων είναι εξαιρετικά δαπανηρή, περιλαμβάνοντας τη δημιουργία, τη συντήρηση και την ασφάλεια των εγκαταστάσεων αποθήκευσης, καθώς και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών.
- **Κοινωνική Αποδοχή:** Η κοινωνική αποδοχή αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχία οποιουδήποτε προγράμματος διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων. Απαιτείται εκτεταμένη ενημέρωση του κοινού σχετικά με τα οφέλη, τις προκλήσεις και τα μέτρα ασφαλείας για να οικοδομηθεί εμπιστοσύνη και υποστήριξη.
- **Πολιτική Σταθερότητα:** Η μακροχρόνια φύση της διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων την καθιστά ευάλωτη σε αλλαγές πολιτικής, προτεραιοτήτων ή χρηματοδότησης, οι οποίες μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο την αποτελεσματικότητα των σχετικών προγραμμάτων.

Η επιτυχής αντιμετώπιση αυτών των δυσκολιών απαιτεί διακρατική συνεργασία, συνεχή επιστημονική έρευνα και επενδύσεις σε τεχνολογίες αιχμής που εξασφαλίζουν την ασφαλή αποθήκευση και διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων για τις τρέχουσες και μελλοντικές γενιές.

5 ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΑ

5.1 Ευρωπαϊκό Πλαίσιο

Η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας (Euratom) ιδρύθηκε το 1957 με την υπογραφή της Συνθήκης της Ρώμης, μαζί με την ίδρυση της Ευρωπαϊκής Οικονομικής Κοινότητας (ΕΟΚ). Στόχος της ήταν η συνεργασία στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας για την ειρηνική χρήση της και η ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας των ιδρυτικών κρατών-μελών: Βέλγιο, Γαλλία, Γερμανία, Ιταλία, Λουξεμβούργο και Κάτω Χώρες. Η Euratom αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, προωθώντας την τεχνολογία, τη συνεργασία μεταξύ των κρατών-μελών και τη διαφάνεια στη χρήση της. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως η Euratom αποτελεί ξεχωριστή νομική οντότητα από την ΕΕ[11].

Οι στόχοι της αφορούν :

- Την εξασφάλιση της διάθεσης πυρηνικών υλικών για ειρηνική χρήση.
- Την ανάπτυξη της πυρηνικής έρευνας.
- Την προώθηση της πυρηνικής ασφάλειας.
- Την υποστήριξη της δημιουργίας κοινού νομικού πλαισίου για τη χρήση πυρηνικής ενέργειας.

Για να επιτευχθούν οι στόχοι αυτοί η Euratom εκδίδει οδηγίες τις οποίες καλεί τα κράτη-μέλη της ΕΕ να ακολουθήσουν. Ωστόσο κάθε κράτος-μέλος διαθέτει την ελευθερία να ακολουθήσει τις οδηγίες αυτές με τρόπο ο οποίος θα μπορεί να διαφέρει στην υλοποίηση καθώς δεν είναι υποχρεωμένο να συμπεριλάβει την πυρηνική ενέργεια στον ενεργειακό σχεδιασμό του.

Οι βασικότερες οδηγίες που έχουν εκδοθεί είναι οι [11] [52]:

1. Οδηγία 2009/71/Euratom για την Ασφάλεια Πυρηνικών Αντιδραστήρων, έχει ως περιεχόμενο της αξιολόγηση των πυρηνικών εγκαταστάσεων με βάση τις διεθνείς αρχές και τα πρότυπα ασφαλείας που έχουν οριστεί από την ΕΕ.
2. Οδηγία 2011/70/Euratom για τη Διαχείριση Ραδιενεργών Αποβλήτων και Ραδιενεργού Καυσίμου, αυτή η οδηγία υποχρεώνει τα κράτη-μέλη να έχουν

σύγχρονα πλάνα για την προσωρινή αποθήκευση αλλά και την τελική διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η ασφάλεια.

3. Οδηγία 2013/59/Euratom για τη Ραδιολογική Προστασία, είναι υπεύθυνη για τον καθορισμό των ορίων έκθεσης σε ραδιενεργά υλικά του εργατικού προσωπικού πυρηνικών εγκαταστάσεων καθώς και του πληθυσμού.
4. Οδηγία 2014/52/Euratom για την Περιβαλλοντική Αξιολόγηση των Πυρηνικών Εγκαταστάσεων, αυτή εισάγει πιο αυστηρά κριτήρια όσο αναφορά την περιβαλλοντική επιβάρυνση που μπορεί να προκαλέσει μια πυρηνική εγκατάσταση τονίζοντας έτσι την ανάγκη αξιολόγησης των εγκαταστάσεων.
5. Οδηγία 2014/87/Euratom για την Πυρηνική Ασφάλεια, αφορά την βελτίωση της ασφάλειας των εγκαταστάσεων με την εφαρμογή διεθνών προτύπων ασφαλείας θεσπίζοντας τακτικούς ελέγχους, βελτιστοποίηση των μέτρων ασφαλείας και κατάλληλη προετοιμασία σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.
6. Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Έρευνας και Κατάρτισης της Euratom (2021-2025), το πρόγραμμα αυτό αφορά την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών πάνω στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας και περιλαμβάνει και την χρηματοδότηση ερευνών πάνω στους μικρούς αρθρωτούς αντιδραστήρες (SMRs) καθώς και της πυρηνικής σύντηξης.

Πέρα από το Euratom στην ΕΕ λειτουργεί και το Ευρωπαϊκό Φόρουμ Πυρηνικής Ενέργειας (ENEF). Πρόκειται για μια πλατφόρμα που συγκεντρώνει σημαντικούς φορείς, όπως πολιτικούς, ειδικούς, εκπροσώπους της βιομηχανίας και της κοινωνίας των πολιτών, προκειμένου να συζητήσουν τον ρόλο της πυρηνικής ενέργειας στο ενεργειακό τοπίο της Ευρώπης. Ο κύριος στόχος του είναι να προάγει έναν ανοιχτό διάλογο για την πυρηνική ενέργεια, εξετάζοντας θέματα όπως η ασφάλεια, η βιωσιμότητα και η καινοτομία στις πυρηνικές τεχνολογίες.

Το 17^ο ENEF, το οποίο πραγματοποιήθηκε στην Πράγα στις 30 Σεπτεμβρίου και 1 Οκτωβρίου 2024, είχε ιδιαίτερη σημασία, καθώς έλαβε χώρα σε μια κρίσιμη περίοδο για τη μετάβαση της Ευρώπης στην ενεργειακή της στρατηγική. Οι συζητήσεις στο φόρουμ επικεντρώθηκαν στο μέλλον της πυρηνικής ενέργειας στο πλαίσιο των στόχων για την αποκαρβονικοποίηση, την ενεργειακή ασφάλεια και τις τεχνολογικές

εξελίξεις. Κεντρικά θέματα ήταν ο ρόλος της πυρηνικής ενέργειας στην επίτευξη των στόχων του Πράσινου Συμφώνου της ΕΕ, με την πυρηνική ενέργεια να αναγνωρίζεται ως πηγή χαμηλών εκπομπών που είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της ενεργειακής προσφοράς και τη μείωση των εκπομπών CO₂. Ένα σημαντικό θέμα ήταν η προώθηση των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMRs) ως μια υποσχόμενη τεχνολογία για την αποκεντρωμένη και ευέλικτη παραγωγή πυρηνικής ενέργειας.

Επιπλέον, το φόρουμ ασχολήθηκε με τα θέματα ασφαλείας, τα κανονιστικά πλαίσια και την αντίληψη του κοινού για την πυρηνική ενέργεια, τονίζοντας τη διαφάνεια και την ανάγκη για αυστηρά πρότυπα ασφαλείας. Οι ενδιαφερόμενοι φορείς στο ENEF 2024 αντιμετώπισαν επίσης τις προκλήσεις διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων και την ενσωμάτωση της πυρηνικής ενέργειας σε ένα δίκτυο που κυριαρχείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ως εκ τούτου, η εκδήλωση ανέδειξε τον εξελισσόμενο ρόλο της πυρηνικής ενέργειας ως ενδιάμεση ενεργειακή πηγή και ως μακροπρόθεσμο στοιχείο της βιώσιμης ενεργειακής στρατηγικής της Ευρώπης, ενώ υπογράμμισε την ανάγκη για συνεχιζόμενη καινοτομία, διεθνή συνεργασία και εμπιστοσύνη του κοινού [53].

5.2 Πολιτικές και κανονισμοί στην Ελλάδα

Η Ελλάδα, ως κράτος μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχει ενσωματώσει τις διατάξεις της Οδηγίας 2011/70/Euratom, η οποία καθορίζει τις απαιτήσεις για τη διαχείριση πυρηνικών αποβλήτων. Παρόλο που στην χώρα μας δεν λειτουργούν πυρηνικοί σταθμοί και η πυρηνική ενέργεια δεν έχει άμεση εφαρμογή, η χώρα υποχρεούται να διαχειρίζεται πυρηνικά απόβλητα που προκύπτουν από ιατρικές δραστηριότητες ή άλλες σχετικές χρήσεις. Στο πλαίσιο αυτό, η Ελλάδα οφείλει να εφαρμόζει κατάλληλες πολιτικές, διασφαλίζοντας ότι οι εμπλεκόμενοι φορείς συμμορφώνονται με τις ευρωπαϊκές αρχές και κανονισμούς για την πυρηνική ασφάλεια και τη διαχείριση αποβλήτων.

Η διαχείριση και ο έλεγχος των ραδιενεργών αποβλήτων που προέρχονται από τον τομέα της ιατρικής και της βιομηχανίας ανατίθεται στο Ινστιτούτο Πυρηνικών και

Ακτινολογικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ενέργειας και Ασφάλειας, το οποίο ανήκει στο Εθνικό Κέντρο Επιστημονικής Έρευνας (ΕΚΕΦΕ) «Δημόκριτος».

Ο «Δημόκριτος» διαθέτει εγκαταστάσεις προσωρινής αποθήκευσης και επεξεργασίας αποβλήτων, καθώς και έναν ερευνητικό πυρηνικό αντιδραστήρα ισχύος 5 MW. Ωστόσο, από το 2004, ο αντιδραστήρας βρίσκεται σε κατάσταση παρατεταμένης αδρανοποίησης. [54].

Οι βασικοί κανονισμοί και διαδικασίες που διέπουν τους πυρηνικούς αντιδραστήρες στην Ελλάδα περιλαμβάνουν:

- **Άδειες και Πιστοποιήσεις:** Οι εγκαταστάσεις Π.Ε. πρέπει να λάβουν τις αναγκαίες άδειες και πιστοποιήσεις για την κατασκευή και λειτουργία τους.
- **Διαχείριση Αποβλήτων:** Οι εγκαταστάσεις πρέπει να τηρούν κανόνες για τη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων που παράγουν.
- **Συντήρηση και Εποπτεία:** Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες υπόκεινται σε συνεχείς ελέγχους, συντήρηση και αναβαθμίσεις για τη διασφάλιση της λειτουργικής ασφάλειας.
- **Σχέδιο Έκτακτης Ανάγκης:** Κάθε πυρηνική εγκατάσταση πρέπει να έχει σχέδιο έκτακτης ανάγκης για τη διαχείριση πιθανών κρίσεων και ατυχημάτων.
- **Ασφάλεια Εργαζομένων:** Οι εργαζόμενοι στις πυρηνικές εγκαταστάσεις πρέπει να έχουν εκπαιδευτεί και πιστοποιηθεί για την εργασία τους, και πρέπει να τηρούνται προδιαγραφές ασφαλείας για την προστασία της υγείας τους.
- **Επιθεωρήσεις και Εποπτεία:** Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες υπόκεινται σε τακτικές επιθεωρήσεις και ελέγχους από τις αρμόδιες αρχές.
- **Διεθνής Συνεργασία:** Η Ελλάδα συμμετέχει σε διεθνείς οργανισμούς και συμφωνίες για την πυρηνική ασφάλεια και τη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων.

Οι μεγαλύτεροι φορείς και οργανισμοί που ασχολούνται με την πυρηνική ενέργεια στην Ελλάδα είναι [11]:

- ❖ **Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας:** Το Υπουργείο έχει την ευθύνη για την επίβλεψη της συμμετοχής της χώρας στις πολιτικές και τις οδηγίες που θεσπίζονται από την ΕΕ διασφαλίζοντας την συμμόρφωση με τις διεθνείς συμφωνίες.

- ❖ **Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ):** Μερικές από τις αρμοδιότητες της ΕΕΑΕ είναι η ρύθμιση των ραδιενεργών υλικών και αποβλήτων, η εποπτεία των ιατρικών, βιομηχανικών και ερευνητικών εφαρμογών της ακτινοβολίας καθώς και η παρακολούθηση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας.
- ❖ **Ινστιτούτο Πυρηνικών και Ακτινολογικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ενέργειας και Ασφάλειας του Εθνικού Κέντρου Επιστημονικής Έρευνας (ΕΚΕΦΕ) «Δημόκριτος»:** Πρόκειται για το μεγαλύτερο διεπιστημονικό Ερευνητικό Κέντρο της Ελλάδας, κατείχε ερευνητικό πυρηνικό αντιδραστήρα από το 1961 αλλά η λειτουργία του τερματίστηκε το 2004. Μετά από δεκαετίες λειτουργίας, η απόφαση να τεθεί εκτός λειτουργίας ελήφθη λόγω παλαιότητας της τεχνολογίας και αυξημένων απαιτήσεων για την αναβάθμιση της ασφάλειας. Έκτοτε, έχουν ληφθεί μέτρα για την ασφαλή απενεργοποίηση του αντιδραστήρα και τη διαχείριση των ραδιενεργών υλικών που συνδέονται με τη λειτουργία του.

Από το 2010 έχουν εκδοθεί Προεδρικά Διατάγματα τα οποία μεταφέρουν τις οδηγίες Euratom στην χώρα μας. Αυτά είναι τα Προεδρικά διατάγματα αριθ. 83, 60, 122 και μεταφέρουν τις οδηγίες 2006/117/Euratom του Συμβουλίου της 20ής Νοεμβρίου 2006, 2009/71/Euratom του Συμβουλίου της 25ης Ιουνίου 2009 και 2011/70/Euratom του Συμβουλίου της 19ης Ιουλίου 2011 αντίστοιχα [11].

Σύμφωνα με την *«Προσαρμογή της ελληνικής νομοθεσίας στην Οδηγία 2009/71/Euratom του Συμβουλίου της 25ης Ιουνίου 2009 περί θεσπίσεως εθνικού πλαισίου για την πυρηνική ασφάλεια πυρηνικών εγκαταστάσεων»*, η Οδηγία 2009/71/Euratom του Συμβουλίου της 25ης Ιουνίου 2009 αφορά τη θέσπιση ενός εθνικού πλαισίου για την πυρηνική ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων και αποσκοπεί στην ενίσχυση των πυρηνικών προτύπων ασφαλείας στα κράτη μέλη της ΕΕ.

Ακόμη, στα πλαίσια της Υπουργικής Απόφασης Π/112/305 *«Βασικές απαιτήσεις – αρχές πυρηνικής ασφάλειας και ρυθμιστικός έλεγχος ερευνητικών πυρηνικών αντιδραστήρων»* περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- **Σχεδιασμός και Κατασκευή:** Ο σχεδιασμός και η κατασκευή των ερευνητικών πυρηνικών αντιδραστήρων πρέπει να πληρούν υψηλά πρότυπα ασφαλείας. Αυτό περιλαμβάνει την ανάλυση των πιθανών κινδύνων και τη λήψη μέτρων για την πρόληψη ατυχημάτων.
- **Λειτουργία και Συντήρηση:** Η λειτουργία και η συντήρηση των αντιδραστήρων πρέπει να γίνονται με αυστηρούς κανόνες ασφαλείας και σύμφωνα με τον κατάλληλο εκπαιδευτικό και εκπαιδευτικό προσανατολισμό του προσωπικού.
- **Εκτίμηση Κινδύνων:** Πρέπει να γίνει συστηματική εκτίμηση των κινδύνων που σχετίζονται με τη λειτουργία των αντιδραστήρων και να ληφθούν μέτρα για την αντιμετώπισή τους.
- **Ανεξάρτητος Ρυθμιστικός Έλεγχος:** Οι ερευνητικοί πυρηνικοί αντιδραστήρες πρέπει να υπόκεινται σε ανεξάρτητο ρυθμιστικό έλεγχο από αρμόδιες αρχές πυρηνικής ασφάλειας. Αυτός ο έλεγχος εξασφαλίζει τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς ασφαλείας.
- **Διαχείριση Αποβλήτων:** Πρέπει να υπάρχει σχέδιο διαχείρισης των πυρηνικών αποβλήτων που προκύπτουν από τη λειτουργία του αντιδραστήρα, με σκοπό την ασφαλή αποθήκευση και διάθεσή τους.
- **Εκπαίδευση και Ευαισθητοποίηση:** Οι εργαζόμενοι και οι ενδιαφερόμενοι πρέπει να εκπαιδεύονται για τους κινδύνους της Π.Ε. και να ενημερώνονται για τις προφυλάξεις που πρέπει να λαμβάνονται.
- **Συνεργασία και Διεθνείς Συμφωνίες:** Οι χώρες πρέπει να συνεργάζονται και να τηρούν διεθνείς συμφωνίες για την πυρηνική ασφάλεια και την προστασία από τους κινδύνους της Π.Ε..

Αυτές οι αρχές και απαιτήσεις αποτελούν το θεμέλιο για την πυρηνική ασφάλεια στους ερευνητικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες και πρέπει να τηρούνται αυστηρά για την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας.

Στη πορεία, η τροποποίηση της απόφασης υπ' αριθμό Π/112/305/2012 αφορά την ενσωμάτωση της οδηγίας 2014/87/Euratom του Συμβουλίου, η οποία τροποποιεί την οδηγία 2009/71/Euratom περί θεσπίσεως κοινοτικού πλαισίου για την πυρηνική ασφάλεια πυρηνικών εγκαταστάσεων [11]. Οι τροποποιήσεις αυτές προβλέπουν

ενημερώσεις και βελτιώσεις στον τομέα της πυρηνικής ασφάλειας και αφορούν τις ακόλουθες πτυχές:

- **Αυστηρότερα πρότυπα ασφαλείας:** Οι τροποποιήσεις ενισχύουν τα πρότυπα ασφαλείας για τις πυρηνικές εγκαταστάσεις, προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλειά τους και η προστασία του περιβάλλοντος.
- **Ενίσχυση της ρύθμισης και της εποπτείας:** Οι αλλαγές προβλέπουν ενίσχυση των μηχανισμών ρύθμισης και εποπτείας για την πυρηνική ασφάλεια, περιλαμβανομένης της αυξημένης διαφάνειας και της ανεξαρτησίας των ρυθμιστικών αρχών.
- **Ενίσχυση της εποπτείας από την ΕΕ:** Οι τροποποιήσεις επιτρέπουν στην ΕΕ να διεξάγει αξιολόγηση της πυρηνικής ασφάλειας σε εγκαταστάσεις που βρίσκονται στα κράτη μέλη.

Οι αλλαγές αυτές επιδιώκουν τη βελτίωση και την ενίσχυση της πυρηνικής ασφάλειας στην ΕΕ, καθώς και την προστασία της υγείας και του περιβάλλοντος από τους κινδύνους που συνδέονται με τη χρήση της Π.Ε.

Η τροποποίηση της Π/112/305/2012 απόφασης (Β' 2877) γίνεται για την ενσωμάτωση της οδηγίας 2014/87/Euratom του Συμβουλίου της 8ης Ιουλίου 2014. Η οδηγία αυτή τροποποιεί την προηγούμενη οδηγία 2009/71/Euratom περί θεσπίσεως κοινοτικού πλαισίου για την πυρηνική ασφάλεια πυρηνικών εγκαταστάσεων [55].

Οι τροποποιήσεις που περιλαμβάνει η οδηγία 2014/87/Euratom στοχεύουν στη βελτίωση της πυρηνικής ασφάλειας και περιλαμβάνουν τα εξής:

- **Ενίσχυση της πυρηνικής ασφάλειας:** Η οδηγία ενισχύει τις απαιτήσεις για την ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων, καθώς και της χειριστικής τους ικανότητας κατά την αντιμετώπιση πιθανών κινδύνων.
- **Ενίσχυση της διαφάνειας και της ρύθμισης:** Η οδηγία επιβάλλει την αύξηση της διαφάνειας στις ενέργειες των ρυθμιστικών αρχών και την ενίσχυση του ρυθμιστικού ελέγχου.
- **Ενίσχυση της εποπτείας από την ΕΕ:** Η οδηγία επιτρέπει στην ΕΕ να διεξάγει αξιολόγηση της πυρηνικής ασφάλειας σε εγκαταστάσεις των κρατών μελών .

Συνολικά, οι τροποποιήσεις αυτές αποσκοπούν στη βελτίωση της πυρηνικής ασφάλειας στην ΕΕ και στην αύξηση της προστασίας της υγείας και του περιβάλλοντος από τους κινδύνους που σχετίζονται με τη χρήση της Π.Ε.

6 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΑ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

6.1 Πιθανές επιπτώσεις των ΠΑ στο περιβάλλον

Οι επιπτώσεις της ραδιενέργειας στο περιβάλλον είναι πολυδιάστατες και συχνά καταστροφικές. Η εναπόθεση ραδιονουκλιδίων στην ατμόσφαιρα αποτελεί τη διαδικασία κατά την οποία ραδιενεργά σωματίδια, προερχόμενα από φυσικές ή ανθρωπογενείς πηγές, μεταφέρονται και καταλήγουν στην επιφάνεια της γης. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσω δύο κύριων μηχανισμών: της ξηρής και της υγρής εναπόθεσης. Οι μηχανισμοί αυτοί διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διάχυση των ραδιονουκλιδίων στο περιβάλλον, επηρεάζοντας την ποιότητα του εδάφους, των υδάτων και της ατμόσφαιρας, καθώς και τη δημόσια υγεία. Η ξηρή εναπόθεση αφορά τη μεταφορά ραδιενεργών σωματιδίων στην επιφάνεια του εδάφους χωρίς την παρουσία υετού, ενώ η υγρή εναπόθεση συμβαίνει όταν τα ραδιενεργά σωματίδια ενσωματώνονται σε βροχή ή χιόνι [41].

Οι κύριοι μηχανισμοί της ξηρής εναπόθεσης είναι:

- **Καθίζηση λόγω βαρύτητας**, κατά την οποία τα μεγαλύτερα σωματίδια όπως ιώδιο-131 και πλουτόνιο-239 ελκύονται από την βαρύτητα με αποτέλεσμα να καταλήγουν στο έδαφος.
- **Πρόσκρουση σε επιφάνειες** Μικρότερα σωματίδια μεταφέρονται μέσω της κίνησης του αέρα και προσκολλώνται σε κοντινές επιφάνειες, όπως φυτά, κτίρια και το έδαφος.

Αντίστοιχα, οι μηχανισμοί της **υγρής εναπόθεσης** περιλαμβάνουν:

- **Καθίζηση σε υδάτινα σώματα:** Ραδιενεργά σωματίδια εναποτίθενται σε ωκεανούς, ποτάμια και λίμνες, μολύνοντας υδάτινους πόρους.
- **Απορρόφηση κατά τον κύκλο του νερού:** Τα ραδιενεργά σωματίδια μπορούν να απορροφηθούν από σύννεφα και να ενσωματωθούν στις υγρές σταγόνες που σχηματίζονται εντός αυτών.
- **Προσκόλληση στις σταγόνες της βροχής:** Πριν τα σωματίδια φθάσουν στο έδαφος, μπορούν να προσκολληθούν στις σταγόνες της βροχής, διευκολύνοντας την εναπόθεσή τους μέσω της βροχόπτωσης.

Αυτοί οι μηχανισμοί, τόσο της ξηρής όσο και της υγρής εναπόθεσης, παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διάδοση των ραδιονουκλιδίων στο περιβάλλον και συμβάλλουν στη ρύπανση του εδάφους, των υδάτων και της ατμόσφαιρας, με μακροπρόθεσμες συνέπειες για το οικοσύστημα και την ανθρώπινη υγεία.

6.1.1 Ρύπανση του εδάφους

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ραδιενέργειας είναι εκτεταμένες και μακροχρόνιες, με το έδαφος να αποτελεί ένα από τα πιο ευάλωτα συστατικά των οικοσυστημάτων. Το έδαφος λειτουργεί ως κρίσιμη διεπαφή μεταξύ των χερσαίων οικοσυστημάτων και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, επηρεάζοντας την ανάπτυξη φυτών, τα ενδιαίτημα των ζώων και τη γεωργική παραγωγικότητα. Η ραδιενεργός μόλυνση του εδάφους συμβαίνει μέσω **ατμοσφαιρικής απόθεσης** ή **άμεσης διαρροής** από πυρηνικά ατυχήματα και ακατάλληλη διάθεση αποβλήτων. Οι πυρηνικές καταστροφές του Τσερνομπίλ και της Φουκουσίμα παρέχουν χαρακτηριστικά παραδείγματα του τρόπου με τον οποίο η ραδιενεργός ρύπανση επηρεάζει το έδαφος, τα φυτά και τα ζώα [42].

Η μόλυνση του εδάφους με ραδιενεργά υλικά προκύπτει είτε μέσω ατμοσφαιρικής απόθεσης είτε από άμεσες διαρροές που ακολουθούν πυρηνικά ατυχήματα, καθώς και από τη διαχείριση αποβλήτων. Η διάρκεια παραμονής των ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος καθορίζεται από τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες, με βασικούς παράγοντες τον χρόνο ημιζωής τους και την αλληλεπίδρασή τους με τα συστατικά του εδάφους.

Τα πιο κοινά ραδιενεργά ισότοπα που συναντώνται σε μολυσμένα εδάφη είναι το **πλουτώνιο-239**, το **στρόντιο-90** και το **καίσιο-137**. Κάθε ισότοπο συμπεριφέρεται διαφορετικά ανάλογα με το είδος του εδάφους: το καίσιο-137 προσκολλάται σε αργιλικά ορυκτά, ενώ το στρόντιο-90 απορροφάται ευκολότερα από εδάφη πλούσια σε άνθρακα. Επιπλέον, οι **καιρικές συνθήκες** επηρεάζουν τη μεταφορά των ραδιονουκλιδίων, καθώς η απορρόφηση του νερού από το έδαφος μπορεί να τα μεταφέρει σε βαθύτερα στρώματα, ενώ η μεταφορά μολυσμένης σκόνης μέσω ανέμων μπορεί να μολύνει απομακρυσμένες περιοχές. Η φύση του εδάφους παίζει επίσης σημαντικό ρόλο: τα αργιλώδη εδάφη συγκρατούν τα ραδιονουκλίδια κοντά στην επιφάνεια, ενώ τα αμμώδη εδάφη επιτρέπουν τη βαθύτερη εισχώρησή τους [41] [30].

Το ραδιενεργά μολυσμένο έδαφος επιφέρει σοβαρές επιπτώσεις στη χλωρίδα και την πανίδα, κυρίως μέσω των φαινομένων της **βιοσυσσώρευσης (bioaccumulation)** και της **βιομεγέθυνσης (biomagnification)**.

- **Βιοσυσσώρευση:** Είναι η διαδικασία κατά την οποία μια ουσία, όπως μια τοξίνη ή ένας ρύπος, συσσωρεύεται στους ιστούς ενός οργανισμού με την πάροδο του χρόνου. Αυτό συμβαίνει όταν ο ρυθμός απορρόφησης ή πρόσληψης της ουσίας υπερβαίνει την ικανότητα του οργανισμού να την αποβάλλει. Ραδιενεργά ισότοπα, όπως το καίσιο-137 και το στρόντιο-90, απορροφώνται από το περιβάλλον και συσσωρεύονται στο λίπος, τους μυς ή άλλους ιστούς των οργανισμών.
- **Βιομεγέθυνση:** Αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία η συγκέντρωση μιας ουσίας αυξάνεται καθώς ανεβαίνει στην τροφική αλυσίδα. Όταν θηρευτές καταναλώνουν θήραμα που έχει συσσωρεύσει ρύπους, η συγκέντρωση της ουσίας μεγεθύνεται στους ιστούς τους. Αυτός ο μηχανισμός σημαίνει ότι οι κορυφικοί θηρευτές, συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπων, διατρέχουν τον μεγαλύτερο κίνδυνο έκθεσης σε τοξικά επίπεδα ρύπων, όπως ραδιενεργά υλικά.

Τα ραδιενεργά ισότοπα που συσσωρεύονται στους οργανισμούς μπορούν να προκαλέσουν μακροπρόθεσμες βλάβες, όπως γενετικές ανωμαλίες, καρκίνο και

δυσλειτουργίες στα αναπαραγωγικά συστήματα, αυξάνοντας τους κινδύνους για την επιβίωση ειδών και τη σταθερότητα των οικοσυστημάτων [41].

Τα ραδιονουκλίδια που αποτίθενται στο έδαφος απορροφώνται από τις ρίζες των φυτών, περνώντας έτσι στους ιστούς τους. Αυτό επηρεάζει τόσο τα άγρια φυτά όσο και τις γεωργικές καλλιέργειες, καθιστώντας τα ακατάλληλα για κατανάλωση. Τα ζώα που βόσκουν σε μολυσμένα εδάφη ή καταναλώνουν μολυσμένα φυτά συσσωρεύουν ραδιονουκλίδια στους ιστούς τους, κυρίως στους μύες και τα οστά στη συνέχεια, τα σαρκοφάγα ζώα που τρέφονται με φυτοφάγα λαμβάνουν ακόμη μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ραδιονουκλιδίων λόγω της βιομεγέθυνσης, αυξάνοντας έτσι τα επίπεδα ραδιενέργειας στη διατροφική αλυσίδα. Επιπλέον, προϊόντα ζωικής προέλευσης, όπως το γάλα και το κρέας, μπορεί να περιέχουν υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας, θέτοντας σε κίνδυνο την υγεία των ανθρώπων που τα καταναλώνουν. Αυτός ο μηχανισμός διάχυσης της ραδιενέργειας στη διατροφική αλυσίδα μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές μακροπρόθεσμες συνέπειες για τα οικοσυστήματα και τη δημόσια υγεία [41].

6.1.2 Ρύπανση των υδάτων

Η ραδιενεργή ρύπανση των υδάτινων οικοσυστημάτων μετά τα πυρηνικά ατυχήματα του Τσερνόμπιλ (1986) και της Φουκουσίμα (2011) είχε σοβαρές και μακροχρόνιες επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και στις πηγές πόσιμου νερού. Στο Τσερνόμπιλ, η απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων ραδιονουκλιδίων, όπως το καίσιο-137 και το στρόντιο-90, ρύπανε ποτάμια, λίμνες και άλλες γλυκές υδάτινες μάζες στην Ευρώπη, μέσω υγρής εναπόθεσης και επιφανειακών απορροών, οδηγώντας σε διαρκή μόλυνση. Στη Φουκουσίμα, το βασικό πρόβλημα ήταν η απευθείας απελευθέρωση ραδιενεργού νερού στον Ειρηνικό Ωκεανό, με υψηλές συγκεντρώσεις ιωδίου-131, καϊσίου-137 και τρίτιου.

Οι επιπτώσεις στα οικοσυστήματα ήταν καταστροφικές, καθώς τα ραδιενεργά στοιχεία εισχώρησαν στις τροφικές αλυσίδες μέσω της βιοσυσσώρευσης και της βιομεγέθυνσης. Τα υδρόβια φυτά και τα μικροοργανισμοί στους ποταμούς και τις λίμνες απορρόφησαν τα ραδιονουκλίδια, τα οποία στη συνέχεια πέρασαν σε ψάρια και άλλους οργανισμούς. Στη Φουκουσίμα, τα θαλάσσια οικοσυστήματα

επηρεάστηκαν επίσης σοβαρά, με ψάρια και θαλάσσια θηλαστικά να εμφανίζουν υψηλές συγκεντρώσεις καϊσίου-137. Αυτή η συσσώρευση είχε σοβαρές επιπτώσεις στην αλιεία, με πολλές χώρες να απαγορεύουν την εισαγωγή θαλασσινών από την Ιαπωνία [42] [30]. Αντίστοιχα, στα γλυκά νερά, η μόλυνση απείλησε άμεσα τις πηγές πόσιμου νερού, ιδιαίτερα στις περιοχές γύρω από το Τσερνόμπιλ, όπου οι κοινότητες εξαρτιόνταν από ποτάμια και λίμνες για ύδρευση.

Στη Φουκουσίμα, οι προσπάθειες περιορισμού περιλάμβαναν τη χρήση δεξαμενών αποθήκευσης ραδιενεργού νερού. Ωστόσο, η αργή διείσδυση και οι συνεχείς διαρροές έθεσαν σε κίνδυνο τοπικούς υδροφόρους ορίζοντες. Μακροπρόθεσμα, οι επιπτώσεις είναι ανησυχητικές, καθώς ραδιονουκλίδια όπως το καϊσίο-137, με μεγάλο χρόνο ημιζωής, παραμένουν στο περιβάλλον για δεκαετίες, επηρεάζοντας αρνητικά τη βιοποικιλότητα και την ασφάλεια του πόσιμου νερού [42] [30].

6.2 Πιθανές επιπτώσεις ΠΑ στην υγεία

Η έκθεση σε ακτινοβολία, είτε μέσω άμεσης έκθεσης είτε μέσω μόλυνσης, μπορεί να έχει βαθιές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η ιοντίζουσα ακτινοβολία επηρεάζει τον οργανισμό και τα συμπτώματα που εμφανίζονται μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό και τη διαχείριση αυτών των επιπτώσεων.

Η ιοντίζουσα ακτινοβολία μπορεί να είναι είτε ηλεκτρομαγνητική (ακτίνες X και ακτίνες γάμμα), είτε σωματιδιακή (άλφα, βήτα σωματίδια, νετρόνια). Λόγω των διαφορών που υπάρχουν μεταξύ αυτών των ακτινοβολιών ως προς την διεισδυτικότητα τους καθώς και των επιπέδων ενέργειας που διαθέτουν, οι βιολογικές επιδράσεις που θα έχουν κατά την έκθεση τους στο ανθρώπινο οργανισμό θα ποικίλουν. Ακόμα σημαντικό ρόλο στην διαφοροποίηση των βιολογικών επιδράσεων έχει η δόση, το επίπεδο της ενέργειας καθώς και η διάρκεια της έκθεσης. Η μονάδα μέτρησης που εκφράζει την ποσότητα απορροφούμενης δόσης ακτινοβολίας σε ένα υλικό, όπως και στον ανθρώπινο ιστό ονομάζεται Gray (Gy) [43].

Η ιοντίζουσα ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει τόσο βραχυπρόθεσμες όσο και μακροπρόθεσμες συνέπειες. Μία από τις σοβαρότερες άμεσες επιπτώσεις είναι το σύνδρομο οξείας ακτινοβολίας (ARS), γνωστό και ως ασθένεια από ακτινοβολία, το

οποίο εμφανίζεται μετά από έκθεση σε υψηλές δόσεις ακτινοβολίας σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η ακτινοβολία διεισδύει σε κύτταρα, ιστούς και όργανα, προκαλώντας βλάβες σε μοριακό επίπεδο και διαταράσσοντας ζωτικές κυτταρικές λειτουργίες, ιδιαίτερα σε ταχέως διαιρούμενα κύτταρα όπως αυτά του μυελού των οστών, του γαστρεντερικού συστήματος και του δέρματος.

Ιστορικά γεγονότα, όπως οι ατομικοί βομβαρδισμοί της Χιροσίμα και του Ναγκασάκι, καθώς και η καταστροφή του πυρηνικού σταθμού του Τσερνόμπιλ, έχουν αναδείξει τις σοβαρές επιπτώσεις του ARS, με τα θύματα και τους πρώτους ανταποκριτές να παρουσιάζουν έντονα συμπτώματα λόγω της άμεσης έκθεσης σε υψηλές δόσεις ακτινοβολίας.

Σε αντίθεση, η ραδιενεργή μόλυνση συνδέεται με παρατεταμένη έκθεση σε ραδιενεργό υλικό, είτε μέσω εξωτερικής επαφής με το δέρμα είτε μέσω εσωτερικής μόλυνσης από κατάποση, εισπνοή ή τραυματισμούς. Παρότι η μόλυνση συνήθως οδηγεί σε χρόνια έκθεση, υψηλά επίπεδα ρύπανσης μπορεί επίσης να προκαλέσουν οξείες συνέπειες, παρόμοιες με εκείνες της άμεσης ακτινοβολήσης [44].

Τα κύρια στάδια της ARS είναι [43]:

- Αρχική επίδραση: μέσα σε λίγα λεπτά έως ώρες από την έκθεση σε υψηλή ακτινοβολία, τα άτομα μπορεί να εμφανίσουν ναυτία και έμετο, κόπωση, πονοκέφαλο, ερυθρότητα του δέρματος.
- Ενδιάμεση κατάσταση: Αφού τα αρχικά συμπτώματα υποχωρήσουν, μπορεί να ακολουθήσει μια απατηλή περίοδος ευεξίας, η οποία διαρκεί από ώρες έως ημέρες. Ωστόσο, αυτή είναι προσωρινή και προηγείται της εμφάνισης πιο σοβαρών συμπτωμάτων.
- Εκδήλωση ασθένειας: σε αυτό το σημείο τα συμπτώματα εξαρτώνται από το σύστημα που έχει επηρεαστεί περισσότερο από την ακτινοβολία. Στο αιμοποιητικό σύστημα μπορεί να εκδηλωθεί βλάβη του μυελού των οστών οδηγεί σε σημαντική μείωση των λευκών αιμοσφαιρίων, αυξάνοντας τον κίνδυνο λοίμωξης, και των αιμοπεταλίων, προκαλώντας εύκολους μώλωπες και αιμορραγία. Στο γαστρεντερικό σύστημα επηρεάζεται το έντερο, με αποτέλεσμα σοβαρή διάρροια, αφυδάτωση και διαταραχές ηλεκτρολυτών.

Στο νευρολογικό σύστημα μπορεί να εμφανιστούν συμπτώματα όπως ζάλη, σύγχυση, επιληπτικές κρίσεις, ακόμη και απώλεια συνείδησης.

- **Τελικό στάδιο:** Αναλόγως της δόσης που λαμβάνεται και την αποτελεσματικότητα της ιατρικής παρέμβασης μπορεί να υπάρξει ίαση του ασθενή ή θάνατος. Χαμηλότερες δόσεις μπορεί να επιτρέψουν ανάκαμψη σε διάστημα εβδομάδων ή μηνών, ενώ υψηλότερες δόσεις συχνά οδηγούν σε θανατηφόρα οργανική ανεπάρκεια.

Το πως ορίζονται οι χαμηλές και οι υψηλές δόσεις κατηγοριοποιείται σε σχέση με τα Gy που έχει εκτεθεί ο οργανισμός [44] [43].

1. **Χαμηλές δόσεις (0.1 έως 1 Gy):** Εδώ υπάρχουν ήπια συμπτώματα όπως κόπωση, έμετος, πονοκέφαλος και ερεθισμός του δέρματος.
2. **Μέτριες δόσεις (1 έως 4 Gy):** Εμφανή συμπτώματα όπως στις χαμηλές δόσεις (κόπωση, εμετός, κτλπ) στα οποία προστίθενται η απώλεια όρεξης και ήπια διάρροια. Ακόμα εάν γίνεται άμεση έκθεση του δέρματος τότε υπάρχει πιθανότητα ξεφλουδίσματος. Μη εμφανή συμπτώματα όπως μείωση λευκών αιμοσφαιρίων καθώς και αιμοπεταλίων κάτι που προκαλεί σε δημιουργία πληγών και αιμορραγία.
3. **Υψηλές δόσεις (4 έως 6 Gy):** Έντονη ναυτία, εμετός, διάρροια, ζαλάδα καθώς και αποπροσανατολισμός. Σημαντική ανοσοκαταστολή που οφείλεται σε βλάβη του μυελού των οστών, αυξημένος κίνδυνος αιμορραγίας και σήψης. Έλκος ή φουσκάλες σε άμεσα εκτεθειμένες περιοχές του σώματος.
4. **Πολύ υψηλές δόσεις (6 έως 10 Gy):** Εδώ όλα τα παραπάνω εμφανή, μη εμφανή συμπτώματα και βλάβες παίρνουν πολύ έντονη και σοβαρή μορφή όπως κάψιμο του δέρματος και νέκρωση του ιστού στο σημείο το οποίο γίνεται η έκθεση. Η πιθανότητα σύντομου θανάτου είναι υψηλή εάν δεν υπάρξει άμεση ιατρική περίθαλψη.

Όπως αναφέραμε η έκθεση σε ιοντίζουσα ακτινοβολία επιφέρει και μακροχρόνιες επιπτώσεις. Οι επιπτώσεις αυτές εκδηλώνονται συχνά μήνες, χρόνια ή ακόμη και δεκαετίες μετά την έκθεση και επηρεάζονται από παράγοντες όπως η δόση, ο τύπος

και η διάρκεια της ακτινοβολίας, καθώς και η ατομική ευαισθησία. Οι μακροχρόνιες επιπτώσεις προκύπτουν κυρίως από τις βλάβες που προκαλεί η ιοντίζουσα ακτινοβολία στο DNA, τα κύτταρα και τους ιστούς, οδηγώντας σε ποικίλες καταστάσεις υγείας [9] [45]. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

1. Καρκίνος : Μία από τις σημαντικότερες και εκτενώς μελετημένες μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της έκθεσης σε ακτινοβολία είναι ο αυξημένος κίνδυνος καρκίνου. Η ιοντίζουσα ακτινοβολία αλληλεπιδρά με το κυτταρικό DNA, προκαλώντας σπασίματα στις αλυσίδες του DNA ή παράγοντας δραστικά είδη οξυγόνου (ROS) που προκαλούν μεταλλάξεις. Αυτές οι μεταλλάξεις μπορούν να ενεργοποιήσουν ογκογονίδια ή να αδρανοποιήσουν ογκοκατασταλτικά γονίδια, οδηγώντας σε ανεξέλεγκτη κυτταρική ανάπτυξη και, τελικά, σε σχηματισμό όγκων. Οι τύποι καρκίνου που συνδέονται συχνότερα με την έκθεση σε ακτινοβολία περιλαμβάνουν τη λευχαιμία, τον καρκίνο του θυρεοειδούς, τον καρκίνο του μαστού και τον καρκίνο του πνεύμονα. Η λευχαιμία, η οποία προσβάλλει το αίμα και τον μυελό των οστών, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην έκθεση σε ακτινοβολία λόγω της ταχείας εναλλαγής των κυττάρων του μυελού των οστών. Συχνά εμφανίζεται μέσα σε πέντε έως δέκα χρόνια μετά την έκθεση, γεγονός που την καθιστά έναν από τους πρώτους καρκίνους που εκδηλώνονται νωρίτερα. Ο καρκίνος του θυρεοειδούς είναι μια άλλη διαδεδομένη έκβαση, ιδίως σε άτομα που εκτίθενται σε ραδιενεργό ιώδιο, όπως οι επιζώντες πυρηνικών ατυχημάτων. Οι γυναίκες, ιδίως κατά την αναπαραγωγική τους ηλικία, διατρέχουν αυξημένο κίνδυνο καρκίνου του μαστού μετά από έκθεση σε ακτινοβολία, καθώς ο ιστός του μαστού είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στην ακτινοβολία. Ο καρκίνος του πνεύμονα, είναι ακόμη ένα είδος καρκίνου που έχει παρατηρηθεί πως εμφανίζεται λόγω ακτινοβολίας και συνδέεται στενά με την εισπνοή ραδιενεργών σωματιδίων, όπως το αέριο ραδόνιο ή η σκόνη που περιέχει ραδιενεργά στοιχεία, τα οποία συνήθως απαντώνται σε περιβάλλοντα ορυχείων.

2. Γονιμότητα: Η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί να έχει σοβαρές και μακροχρόνιες επιπτώσεις στη γονιμότητα και την αναπαραγωγική υγεία,

επηρεάζοντας τόσο τους άνδρες όσο και τις γυναίκες. Στους άνδρες, οι όρχεις είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στην ιοντίζουσα ακτινοβολία, με ακόμη και χαμηλές δόσεις να είναι ικανές να προκαλέσουν προσωρινή υπογονιμότητα λόγω βλάβης των σπερματογονίων, των πρόδρομων κυττάρων για την παραγωγή σπέρματος. Σε υψηλότερες δόσεις, συνήθως άνω των 5 Gy, μπορεί να εμφανιστεί μόνιμη στειρότητα ως αποτέλεσμα μη αναστρέψιμης βλάβης των γεννητικών κυττάρων. Η ακτινοβολία μπορεί επίσης να επηρεάσει την παραγωγή στους όρχεις, οδηγώντας ενδεχομένως σε ορμονικές ανισορροπίες και μειωμένη λίμπιντο. Για τις γυναίκες, οι ωοθήκες είναι εξίσου ευάλωτες. Τα ωοκύτταρα, που είναι υπεύθυνα για την παραγωγή ωαρίων, είναι μη ανανεώσιμα και ιδιαίτερα ευαίσθητα στην ακτινοβολία. Ακόμη και σχετικά χαμηλές δόσεις μπορούν να μειώσουν σημαντικά τα αποθέματα των ωοθηκών, ενώ δόσεις που υπερβαίνουν τα 5 Gy μπορούν να οδηγήσουν σε πρόωρη ωοθηκική ανεπάρκεια, οδηγώντας σε υπογονιμότητα και πρόωρη εμμηνόπαυση. Η έκθεση κατά τη διάρκεια της εγκυμοσύνης ενέχει πρόσθετους κινδύνους, όπως αποβολή, καθυστέρηση της ανάπτυξης του εμβρύου και συγγενείς ανωμαλίες. Η έκθεση κατά τη διάρκεια της κρίσιμης περιόδου οργανογένεσης της εγκυμοσύνης (δύο έως οκτώ εβδομάδες) είναι ιδιαίτερα επιβλαβής, με δόσεις μόλις 0,1 Gy να προκαλούν ενδεχομένως σημαντικά αναπτυξιακά προβλήματα.

- 3. Επιδράσεις στους πνεύμονες:** Η ιονίζουσα ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει τόσο οξεία όσο και χρόνια βλάβη στον πνευμονικό ιστό. Βραχυπρόθεσμα, μπορεί να αναπτυχθεί πνευμονίτιδα από ακτινοβολία - μια κατάσταση που χαρακτηρίζεται από φλεγμονή του πνευμονικού ιστού. Αν και θεραπεύσιμη σε ορισμένες περιπτώσεις, η μη θεραπευόμενη πνευμονίτιδα συχνά εξελίσσεται σε πνευμονική ίνωση, μια χρόνια και μη αναστρέψιμη κατάσταση που περιλαμβάνει ουλές και δυσκαμψία του πνευμονικού ιστού. Η πνευμονική ίνωση είναι ένα ιδιαίτερα εξουθενωτικό αποτέλεσμα, καθώς μειώνει την ελαστικότητα των πνευμόνων, επηρεάζει την ανταλλαγή οξυγόνου και οδηγεί σε προοδευτική αναπνευστική ανεπάρκεια. Η κατάσταση αυτή παρατηρείται συχνότερα σε ασθενείς που έχουν λάβει ακτινοθεραπεία

για καρκίνο του θώρακα ή σε εργαζόμενους που εκτίθενται σε ραδιενεργά σωματίδια όπως το ουράνιο ή το ραδόνιο σε περιβάλλοντα ορυχείων. Η χρόνια φλεγμονή και η ενδοθηλιακή βλάβη που προκαλούνται από την ακτινοβολία συμβάλλουν επίσης σε αγγειακές αλλαγές, οι οποίες μπορούν να επιδεινώσουν τα αναπνευστικά προβλήματα και να αυξήσουν την ευαισθησία στις λοιμώξεις. Οι μακροπρόθεσμες αναπνευστικές επιπτώσεις της έκθεσης σε ακτινοβολία μπορεί να επηρεάσουν σοβαρά την ποιότητα ζωής. Τα άτομα μπορεί να παρουσιάζουν επίμονη δύσπνοια, μειωμένη ικανότητα άσκησης και χρόνια κόπωση. Επιπλέον, η εισπνοή ραδιενεργών σωματιδίων, τα οποία κατακάθονται στον πνευμονικό ιστό και εκπέμπουν ακτινοβολία για παρατεταμένες περιόδους, αυξάνει τον κίνδυνο καρκίνου του πνεύμονα. Αυτή η διπλή απειλή της ίνωσης και του καρκίνου αναδεικνύει την ιδιαίτερη ευπάθεια των πνευμόνων στην έκθεση σε ακτινοβολία και την ανάγκη για προληπτικές στρατηγικές τόσο στο επαγγελματικό όσο και στο περιβαλλοντικό περιβάλλον.

4. **Ψυχική υγεία:** Οι ψυχολογικές επιπτώσεις των πυρηνικών ατυχημάτων, όπως καταγράφηκαν σε μελέτες για τη Φουκουσίμα και το Τσερνόμπιλ, είναι βαθιές και μακροχρόνιες, επηρεάζοντας σημαντικά την ψυχική υγεία και την ευημερία των πληγέντων. Τέτοιες καταστροφές προκαλούν έντονο φόβο και άγχος σχετικά με την έκθεση στην ακτινοβολία, συχνά ενισχυμένα από την έλλειψη κατανόησης των κινδύνων και την αβεβαιότητα γύρω από την αόρατη φύση της ακτινοβολίας. Στην περίπτωση του Τσερνόμπιλ, η παραπληροφόρηση και το κοινωνικό στίγμα που σχετίζονταν με τη «ραδιενεργό μόλυνση» οδήγησαν σε κοινωνικό αποκλεισμό και αύξηση περιστατικών κατάθλιψης, άγχους και μετατραυματικού στρες στους επιζώντες. Αντίστοιχα, στη Φουκουσίμα, οι εκκενωμένοι αντιμετώπισαν έντονη ψυχολογική πίεση λόγω του αιφνίδιου εκτοπισμού, της απώλειας των μέσων διαβίωσης και της αβεβαιότητας σχετικά με το ενδεχόμενο επιστροφής τους. Η ψυχική επιβάρυνση επιδεινώθηκε από κοινωνικές και οικονομικές πιέσεις, όπως ο στιγματισμός στις κοινότητες υποδοχής και η αποδυνάμωση των κοινωνικών δεσμών. Και στις δύο περιπτώσεις, σημαντικός παράγοντας

άγχους ήταν ο επίμονος φόβος για καρκίνο και πιθανές γενετικές βλάβες στις μελλοντικές γενιές, που επηρέασε ακόμη και άτομα με ελάχιστη ή καθόλου έκθεση στην ακτινοβολία. Επιπλέον, οι επιπτώσεις διαπερνούν γενεές, με τα παιδιά και τους εφήβους να εμφανίζουν αυξημένο άγχος και αλλαγές στη συμπεριφορά λόγω της διατάραξης της καθημερινότητάς τους. [46].

6.3 Μακροχρόνιες επιπτώσεις στο περιβάλλον

Η ραδιενεργός μόλυνση αποτελεί βαθιά και διαρκή απειλή για το περιβάλλον, με συνέπειες που μπορεί να επιμείνουν για δεκαετίες ή και αιώνες. Η μόλυνση αυτή προκύπτει από την απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών στα οικοσυστήματα λόγω πυρηνικών ατυχημάτων, δοκιμών όπλων, ακατάλληλης διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων ή φυσικών γεγονότων που αφορούν ραδιενεργές ουσίες. Τα υλικά αυτά εκπέμπουν ιοντίζουσα ακτινοβολία καθώς διασπώνται, προκαλώντας σημαντικές βιολογικές, χημικές και φυσικές αλλαγές στο περιβάλλον. Οι κύριες μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στο περιβάλλον περιλαμβάνουν [41] [30] [44]:

- 1. Παραμονή ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον:** Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα με τη ραδιενεργό μόλυνση είναι η μακροβιότητα των ραδιονουκλιδίων στο περιβάλλον. Τα ραδιονουκλίδια, όπως το καίσιο-137, το στρόντιο-90, το ιώδιο-131 και το πλουτώνιο-239, έχουν χρόνο ημιζωής που κυμαίνεται από μερικά χρόνια έως χιλιάδες χρόνια. Το καίσιο-137 έχει χρόνο ημιζωής περίπου 30 χρόνια, πράγμα που σημαίνει ότι παραμένει επικίνδυνο για αρκετούς αιώνες. Το πλουτώνιο-239 έχει χρόνο ημιζωής 24.100 ετών, καθιστώντας την παρουσία του στο περιβάλλον ουσιαστικά μόνιμη. Τα υλικά αυτά μπορούν να παραμείνουν στο έδαφος, το νερό και τον αέρα, εκπέμποντας συνεχώς ακτινοβολία και επηρεάζοντας τα οικοσυστήματα για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Οι μεγάλοι χρόνοι ημιζωής πολλών ραδιονουκλιδίων εξασφαλίζουν ότι οι επιπτώσεις τους παραμένουν ανησυχητικές για πολλές γενιές.
- 2. Υποβάθμιση του εδάφους λόγω της μόλυνσης:** Η ραδιενεργός μόλυνση μπορεί να έχει καταστροφικές επιπτώσεις στη γεωργία. Οι καλλιέργειες που

καλλιεργούνται σε μολυσμένο έδαφος ή αρδεύονται με μολυσμένο νερό μπορεί να απορροφήσουν ραδιονουκλίδια, καθιστώντας τα μη ασφαλή για κατανάλωση από τον άνθρωπο και τα ζώα. Οι μολυσμένες γεωργικές εκτάσεις συχνά καθίστανται άχρηστες για δεκαετίες, οδηγώντας σε οικονομικές απώλειες και επισιτιστική ανασφάλεια. Οι επιπτώσεις από πυρηνικά ατυχήματα, όπως το Τσέρνομπιλ, έδειξαν ότι τα γεωργικά εδάφη μπορούν να παραμείνουν μολυσμένα για γενεές, απαιτώντας αυστηρή παρακολούθηση και διαχείριση.

3. **Κλιματικές και ατμοσφαιρικές επιπτώσεις:** Από την υποβάθμιση του εδάφους είναι πιθανό να προκύψει τροποποίηση των λειτουργιών του οικοσυστήματος. Η ζημία που μπορεί να επέλθει στην βλάστηση και τους μικροοργανισμούς είναι δυνατόν να διαταράξει τον κύκλο του άνθρακα και άλλες οικολογικές διεργασίες, επηρεάζοντας ενδεχομένως τις τοπικές κλιματικές συνθήκες.
4. **Διατάραξη της γεωργίας:** Η ραδιενεργός μόλυνση μπορεί να έχει καταστροφικές επιπτώσεις στη γεωργία. Οι καλλιέργειες που καλλιεργούνται σε μολυσμένο έδαφος ή αρδεύονται με μολυσμένο νερό μπορεί να απορροφήσουν ραδιονουκλίδια, καθιστώντας τα μη ασφαλή για κατανάλωση από τον άνθρωπο και τα ζώα. Οι μολυσμένες γεωργικές εκτάσεις συχνά καθίστανται άχρηστες για δεκαετίες, οδηγώντας σε οικονομικές απώλειες και επισιτιστική ανασφάλεια. Οι επιπτώσεις από πυρηνικά ατυχήματα, όπως το Τσέρνομπιλ, έδειξαν ότι τα γεωργικά εδάφη μπορούν να παραμείνουν μολυσμένα για γενεές, απαιτώντας αυστηρή παρακολούθηση και διαχείριση.
5. **Επιπτώσεις στις ανθρώπινες κοινότητες:** Εξαιτίας της αχρήστευσης εκτάσεων από την ραδιενεργό μόλυνση, περιοχές μπορεί να καταστούν μη κατοικήσιμες, οδηγώντας σε εκτοπισμό των ανθρώπινων πληθυσμών, απώλεια της πολιτιστικής κληρονομιάς και κοινωνικοοικονομική αστάθεια.

7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

7.1 Οι βασικότερες πρακτικές διάθεσης ΠΑ

Έως τον Δεκέμβριο του 2024, υπάρχουν 419 λειτουργικοί πυρηνικοί αντιδραστήρες παγκοσμίως, με συνδυασμένη ηλεκτρική ισχύ 378,1 GW. . Χώρες όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Κίνα, η Ρωσία, ο Καναδάς, η Ουκρανία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Γερμανία, η Γαλλία και η Ιαπωνία αποτελούν πρωτοπόρους στον τομέα της ανάπτυξης της πυρηνικής ενέργειας και κατά συνέπεια ο τρόπος με τον οποίο διαχειρίζονται τα ΠΑ επηρεάζει όλες τις υπόλοιπες χώρες. Οι Ηνωμένες Πολιτείες έχουν αρχίσει να επιμηκύνουν τα έτη λειτουργίας των πυρηνικών τους εγκαταστάσεων και επιπλέον έχουν προσανατολιστεί στην ανάπτυξη μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων. Όσο αναφορά χώρες όπως η Γαλλία και το Ηνωμένο Βασίλειο αυτές εκφράζουν χώρες που κατέχουν πυρηνικές εγκαταστάσεις και αυξάνουν τον αριθμό τους χτίζοντας νέες, στην περίπτωση της Γαλλίας η πυρηνική τεχνογνωσία είναι αντικείμενο εξαγωγής στον υπόλοιπο κόσμο [47].

Η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων βασίζεται σε δύο κύριες παγκόσμιες πρακτικές. Η πρώτη ονομάζεται ανοικτός κύκλος και αντιμετωπίζει τα χρησιμοποιημένα πυρηνικά καύσιμα ως απόβλητα, η δεύτερη που ονομάζεται κλειστός κύκλος αντιμετωπίζει τα χρησιμοποιημένα πυρηνικά καύσιμα ως μια ουσία που μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί εάν προηγηθεί η κατάλληλη επεξεργασία. Η κυριότερη τεχνολογία του ανοικτού κύκλου είναι η βαθιά γεωλογική απόθεση ενώ του κλειστού η επανεπεξεργασία και ανακύκλωση. Βασικός εκφραστής του ανοικτού κύκλου σε παγκόσμιο επίπεδο είναι οι Ηνωμένες Πολιτείες ενώ σε ευρωπαϊκό η Φιλανδία, ενώ κυρίως εκφραστής του κλειστού είναι χώρες όπως η Ιαπωνία και η Γαλλία.

Η γεωλογική διάθεση επικεντρώνεται στην ασφαλή απομόνωση των ραδιενεργών υλικών στο υπέδαφος, σε σταθερούς σχηματισμούς, εξασφαλίζοντας μακροπρόθεσμη ασφάλεια και περιορισμό της ακτινοβολίας. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το αποθετήριο Onkalo στη Φινλανδία, το οποίο θεωρείται σημείο αναφοράς για την παγκόσμια λύση μόνιμης αποθήκευσης πυρηνικών αποβλήτων.

Αντίθετα, η επανεπεξεργασία και ανακύκλωση περιλαμβάνουν την ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση υλικών από τα χρησιμοποιημένα καύσιμα, επιμηκώνοντας τη διάρκεια ζωής των πυρηνικών υλικών. Η Γαλλία με την εγκατάσταση La Hague αποτελεί πρωτοπόρο σε αυτή τη μέθοδο, μειώνοντας τον όγκο των αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας, αλλά ταυτόχρονα αντιμετωπίζοντας κινδύνους διάδοσης.

Αυτές οι δύο μέθοδοι αντιπροσωπεύουν τις πιο προηγμένες λύσεις για τη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων και αντικατοπτρίζουν τις διαφοροποιημένες τεχνολογικές και πολιτικές προτεραιότητες της σύγχρονης εποχής [47].

7.2 Κύρια χαρακτηριστικά των δύο μεθόδων

7.2.1 Γεωλογική Διάθεση

Η βαθιά γεωλογική διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων είναι μια μέθοδος που περιλαμβάνει την απομόνωση των ραδιενεργών αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας (HLW) βαθιά στο υπέδαφος σε σταθερούς γεωλογικούς σχηματισμούς, με στόχο τη συγκράτησή τους για χιλιάδες έως εκατομμύρια χρόνια, έως ότου η ραδιενέργειά τους διασπαστεί σε επίπεδο που θεωρείται ασφαλές για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Η βασική αρχή αυτής της προσέγγισης είναι η αξιοποίηση των φυσικών φραγμών που παρέχουν οι γεωλογικοί σχηματισμοί, οι οποίοι μπορούν να λειτουργήσουν ως εγγύηση κατά της μετανάστευσης των ραδιονουκλιδίων στη βιόσφαιρα.

Η διαδικασία αρχίζει με την επιλογή ενός κατάλληλου χώρου, ο οποίος πρέπει να πληροί αυστηρά κριτήρια. Η γεωλογική σταθερότητα είναι υψίστης σημασίας, πράγμα που σημαίνει ότι η τοποθεσία πρέπει να βρίσκεται σε μια περιοχή με ελάχιστη σεισμική δραστηριότητα και χαμηλούς ρυθμούς τεκτονικής κίνησης. Το υπόβαθρο πρέπει να είναι απαλλαγμένο από μεγάλα ρήγματα ή ρωγμές, καθώς αυτά θα μπορούσαν ενδεχομένως να δημιουργήσουν διόδους για τη μετακίνηση ραδιενεργών υλικών. Επιπλέον, η τοποθεσία πρέπει να χαρακτηρίζεται από χαμηλά επίπεδα ροής υπόγειων υδάτων, καθώς το νερό θα μπορούσε να διευκολύνει τη μεταφορά ραδιονουκλιδίων με την πάροδο του χρόνου.

Μόλις επιλεγεί η τοποθεσία, το επόμενο βήμα περιλαμβάνει την κατασκευή της εγκατάστασης διάθεσης. Αυτή συνήθως αποτελείται από μια σειρά σηράγγων, φρεατίων και θαλάμων που κατασκευάζονται βαθιά κάτω από την επιφάνεια της γης, συνήθως σε βάθος 300 έως 1.000 μέτρων. Τα απόβλητα τοποθετούνται σε ειδικά σχεδιασμένα δοχεία κατασκευασμένα από υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση, συχνά χαλκό ή χάλυβα, ώστε να μην έρχονται σε άμεση επαφή με το περιβάλλον πέτρωμα. Αυτά τα δοχεία στη συνέχεια σφραγίζονται εντός της αποθήκης, η οποία περιβάλλεται από πολλαπλά στρώματα κατασκευασμένων φραγμών, όπως π.χ. πηλός μπεντονίτη, που χρησιμεύουν για την απορρόφηση και την παγίδευση οποιουδήποτε νερού ή μολυσματικών παραγόντων που επιχειρούν να εισέλθουν στα δοχεία [36].

Μια βασική πτυχή της βαθιάς γεωλογικής διάθεσης είναι η μακροπρόθεσμη ασφάλεια των αποβλήτων. Μόλις σφραγιστεί η αποθήκη, αναμένεται να παραμείνει σφραγισμένη για αιώνες ή και χιλιετίες. Θεωρητικά, τα ραδιενεργά υλικά θα διασπώνται με την πάροδο του χρόνου σε ασφαλέστερα επίπεδα, μειώνοντας τις πιθανές βλάβες τους. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή μπορεί να διαρκέσει δεκάδες χιλιάδες χρόνια, ανάλογα με τα συγκεκριμένα ισότοπα που εμπλέκονται, και γι' αυτό η διασφάλιση της ακεραιότητας του χώρου αποθήκευσης για τόσο μεγάλα χρονικά διαστήματα αποτελεί σημαντική πρόκληση. Οι δυνητικοί κίνδυνοι που συνδέονται με το αποθετήριο περιλαμβάνουν την πιθανότητα διείσδυσης υπόγειων υδάτων, σεισμικής δραστηριότητας ή ανθρώπινης παρέμβασης.

Προκειμένου να μετριαστούν αυτοί οι κίνδυνοι, διεξάγονται εκτεταμένες αξιολογήσεις ασφαλείας καθ' όλη τη διάρκεια των φάσεων σχεδιασμού και κατασκευής και πραγματοποιείται συνεχής παρακολούθηση κατά τη διάρκεια της περιόδου λειτουργίας. Επιπλέον, πολλές χώρες περιλαμβάνουν στα σχέδια διάθεσής τους μια φάση «μετά το κλείσιμο», κατά την οποία ο χώρος μπορεί να παρακολουθείται, αν και γενικά δεν προβλέπονται ενεργές παρεμβάσεις. Ο τελικός στόχος είναι να διασφαλιστεί ότι, μετά το κλείσιμο της αποθήκης, αυτή θα παραμείνει ένα ασφαλές και σταθερό περιβάλλον, με μικρή πιθανότητα διαφυγής ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον [37].

7.2.2 Επανεπεξεργασία και ανακύκλωση

Η επανεπεξεργασία και η ανακύκλωση των πυρηνικών αποβλήτων περιλαμβάνουν την ανάκτηση πολύτιμων υλικών, όπως ουράνιο και πλουτώνιο, από τα αναλωμένα πυρηνικά καύσιμα. Αυτά τα ανακτηθέντα υλικά μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ως καύσιμα, αυξάνοντας σημαντικά την αποτελεσματικότητα του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου. Οι δύο κύριες προσεγγίσεις για την επανεπεξεργασία των πυρηνικών αποβλήτων είναι οι υδατικές και οι μη υδατικές μεθοδολογίες. Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους χρησιμοποιεί διαφορετικές χημικές αρχές και τεχνολογίες, με διαφορετικά επίπεδα αποτελεσματικότητας, κόστους και εφαρμοστικότητας.

Η υδατική επανεπεξεργασία, η πιο καθιερωμένη και ευρέως χρησιμοποιούμενη από τις δύο μεθόδους, περιλαμβάνει τη διάλυση των αναλωμένων πυρηνικών καυσίμων σε διαλύτη για να διαχωριστούν το ουράνιο και το πλουτώνιο. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη υδατική μεθοδολογία είναι η διαδικασία PUREX (Plutonium and Uranium Redox Extraction). Η μέθοδος αυτή, που αναπτύχθηκε στα μέσα του 20ού αιώνα, αποτέλεσε τον ακρογωνιαίο λίθο των προγραμμάτων ανακύκλωσης πυρηνικών καυσίμων μεγάλης κλίμακας, ιδίως σε χώρες όπως η Γαλλία και η Ιαπωνία. Η διαδικασία PUREX ξεκινά με τη διάλυση των αναλωμένων καυσίμων σε διάλυμα νιτρικού οξέος, το οποίο διασπά το οξειδίο του ουρανίου και το οξειδίο του πλουτωνίου που υπάρχουν στα καύσιμα. Μόλις διαλυθεί το καύσιμο, εισάγεται ένας υγρός διαλύτης, συνήθως φωσφορικό τριβουτύλιο (TBP) διαλυμένο σε οργανικό διαλύτη. Αυτός ο διαλύτης εκχυλίζει επιλεκτικά το ουράνιο και το πλουτώνιο από το διαλυμένο καύσιμο, διαχωρίζοντάς τα από τα προϊόντα σχάσης και άλλα δευτερεύοντα ακτινίδια. Το διαχωρισμένο ουράνιο και το πλουτώνιο καθαρίζονται στη συνέχεια και μετατρέπονται σε κατάλληλες μορφές για επαναχρησιμοποίηση, όπως το καύσιμο MOX (Mixed Oxide), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αντιδραστήρες. Αυτό μειώνει την ανάγκη εξόρυξης φυσικού ουρανίου και συμβάλλει σε έναν πιο βιώσιμο κύκλο πυρηνικού καυσίμου. Η διαδικασία ελαχιστοποιεί επίσης τον όγκο των αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας, καθώς ένα σημαντικό ποσοστό των προϊόντων σχάσης διαχωρίζεται και μπορεί να διαχειριστεί χωριστά.

Ωστόσο, η PUREX απαιτεί σημαντικές χημικές εισροές, όπως νιτρικό οξύ και TBP, με αποτέλεσμα την παραγωγή δευτερογενών ρευμάτων αποβλήτων, όπως τα υγρά

απόβλητα, τα οποία πρέπει να υποβάλλονται σε προσεκτική επεξεργασία και να διατίθενται. Επιπλέον, ο διαχωρισμός του πλουτωνίου εγείρει ανησυχίες σχετικά με τη διάδοση των πυρηνικών όπλων, καθώς το πλουτόνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή πυρηνικών όπλων. Παρά τις προκλήσεις αυτές, η διεργασία PUREX παραμένει η κυρίαρχη υδατική μέθοδος επανεπεξεργασίας λόγω του καθιερωμένου τεχνολογικού της πλαισίου, της αποτελεσματικότητας και της επεκτασιμότητάς της [48].

Οι μη υδατικές μέθοδοι επανεπεξεργασίας, που συχνά αναφέρονται ως ξηρή επανεπεξεργασία, αποτελούν αναδυόμενες εναλλακτικές λύσεις έναντι των υδατικών μεθόδων. Μια από τις πιο μελετημένες και δυνητικά μετασχηματιστικές μη υδατικές τεχνικές είναι η πυροεπεξεργασία, η οποία χρησιμοποιεί υψηλές θερμοκρασίες και ηλεκτροχημικές μεθόδους για τον διαχωρισμό των συστατικών των αναλωμένων πυρηνικών καυσίμων. Σε αντίθεση με την υδατική επανεπεξεργασία, η οποία βασίζεται σε διαλύτες και χημικές ουσίες, η πυροεπεξεργασία περιλαμβάνει την τήξη των αναλωμένων καυσίμων σε λιωμένο άλας και τη χρήση ηλεκτροχημικών κυψελών για τον επιλεκτικό διαχωρισμό του ουρανίου, του πλουτωνίου και άλλων υλικών. Η πυροεπεξεργασία έχει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί μεγάλες ποσότητες χημικών διαλυτών, και μπορεί να προσαρμοστεί για να χειριστεί μια ευρύτερη ποικιλία καυσίμων αντιδραστήρων, συμπεριλαμβανομένων των μεταλλικών καυσίμων που χρησιμοποιούνται σε ταχείς αντιδραστήρες. Επιπλέον, η φύση της διεργασίας σε στερεά κατάσταση μειώνει την παραγωγή υγρών αποβλήτων, γεγονός που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των υδατικών μεθόδων. Η δυνατότητα ανάκτησης όχι μόνο ουρανίου και πλουτωνίου αλλά και δευτερευόντων ακτινιδίων από τα αναλωμένα καύσιμα αποτελεί ευκαιρία για τη μείωση της μακροπρόθεσμης ραδιοτοξικότητας των πυρηνικών αποβλήτων, η οποία αποτελεί βασικό περιβαλλοντικό πρόβλημα [49].

Παρά τις πολλά υποσχόμενες δυνατότητές της, η πυροεπεξεργασία βρίσκεται ακόμη σε φάση ανάπτυξης και δεν έχει την βιομηχανική ωριμότητα των υδατικών μεθόδων όπως η PUREX. Η τεχνολογία δεν έχει ακόμη αποδειχθεί σε μεγάλες κλίμακες και η οικονομική της σκοπιμότητα και η απόδοσή της σε διάφορους τύπους αντιδραστήρων παραμένουν υπό αξιολόγηση. Επιπλέον, οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας και η

ανάγκη για εξειδικευμένα υλικά που να αντέχουν στα λιωμένα άλατα θέτουν μηχανικές προκλήσεις [49].

7.3 Σύγκριση γεωλογικής διάθεσης και επανεπεξεργασίας πυρηνικών αποβλήτων

7.3.1 Η περίπτωση της Φινλανδίας και της Γαλλίας

Χώρες όπως η Φινλανδία και η Γαλλία παρέχουν πολύτιμα παραδείγματα, καθώς η Φινλανδία έχει υιοθετήσει τη γεωλογική διάθεση με το αποθετήριο Onkalo, ενώ η Γαλλία έχει επενδύσει σημαντικά στην επανεπεξεργασία και την ανακύκλωση των πυρηνικών αποβλήτων, ιδίως μέσω της διαδικασίας PUREX. Η σύγκριση αυτή αναδεικνύει τις διαφορετικές προτεραιότητες και στρατηγικές που εφαρμόζει κάθε χώρα στην προσπάθειά της για αποτελεσματική διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων.

Η Φινλανδία έχει αναδειχθεί σε παγκόσμιο ηγέτη στη γεωλογική διάθεση, η αποθήκη Onkalo, κοντά στον πυρηνικό σταθμό Olkiluoto, αποτελεί παράδειγμα της φινλανδικής δέσμευσης για τη μέθοδο αυτή. Η Φινλανδία ακολουθεί μια ιδιαίτερα εξελιγμένη στρατηγική για τη γεωλογική διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων, η οποία περιλαμβάνει τον εγκιβωτισμό των αποβλήτων σε ανθεκτικά στη διάβρωση δοχεία και την περιβάλλουσα τους με τεχνικά εμπόδια, όπως ο πηλός μπεντονίτη, για να αποτραπεί η διαρροή ραδιενέργειας. Αυτά τα απόβλητα ταφής τοποθετούνται σε βραχώδη πετρώματα σε βάθος άνω των 400 μέτρων, εξασφαλίζοντας την απομόνωση των ραδιενεργών υλικών από τη βιόσφαιρα για εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια. Η αποτελεσματικότητα αυτής της στρατηγικής βασίζεται στον μακροπρόθεσμο περιορισμό των αποβλήτων, καθώς ο σχεδιασμός της Φινλανδίας στηρίζεται σε εκτεταμένη γεωλογική έρευνα για να διασφαλιστεί ότι η σταθερότητα του μητρικού πετρώματος θα παραμείνει αδιατάρακτη από φυσική ή ανθρώπινη δραστηριότητα για χιλιετίες. Μόλις το αποθετήριο σφραγιστεί, ο χώρος αποθήκευσης δεν απαιτεί ενεργή συντήρηση, καθώς η ασφάλεια βασίζεται σε παθητικά χαρακτηριστικά που προστατεύουν το περιβάλλον. Αυτή η προσέγγιση μειώνει τον άμεσο κίνδυνο

διαρροής ραδιενέργειας, ελαχιστοποιεί την ανάγκη για συνεχή επίβλεψη και παρέχει μια σαφή, τελική λύση για τη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων. [47].

Η Γαλλία, αντίθετα, έχει πρωτοστατήσει στην επανεπεξεργασία και την ανακύκλωση των αναλωμένων πυρηνικών καυσίμων ως κεντρικό στοιχείο της στρατηγικής της για τη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων. Η εγκατάσταση της La Hague, είναι η μεγαλύτερη και πιο προηγμένη μονάδα επανεπεξεργασίας στον κόσμο. Με την ανάκτηση πολύτιμων υλικών, μειώνει την ανάγκη για νέα εξόρυξη και εμπλουτισμό ουρανίου, γεγονός που με τη σειρά του εξοικονομεί πόρους και μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η ανακύκλωση του πλουτωνίου σε καύσιμο MOX επιτρέπει επίσης πρόσθετη παραγωγή ενέργειας, καθιστώντας την επανεπεξεργασία ελκυστική επιλογή για χώρες με μεγάλης κλίμακας πυρηνικά προγράμματα. Επιπλέον, ο μειωμένος όγκος των αποβλήτων υψηλού επιπέδου ανακουφίζει την πίεση στους γεωλογικούς χώρους διάθεσης, παρέχοντας μια συμπληρωματική λύση στις προκλήσεις της μακροπρόθεσμης αποθήκευσης [47] [50].

7.3.2 Συμπεράσματα

Τόσο η γεωλογική διάθεση όσο και η επανεπεξεργασία επιδεικνύουν σημαντικές δυνατότητες για τη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων, ωστόσο καθεμία έχει εγγενή πλεονεκτήματα και αδυναμίες. Η μέθοδος γεωλογικής διάθεσης της Φινλανδίας υπερέχει ως προς τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης ασφάλειας και σταθερότητας, παρέχοντας μια παθητική και οριστική λύση για τα απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας. Ωστόσο, η εξάρτησή της από πολύπλοκες γεωλογικές εκτιμήσεις και το υψηλό αρχικό κόστος μπορεί να περιορίσουν τη δυνατότητα ευρύτερης παγκόσμιας υιοθέτησής της. Η στρατηγική επανεπεξεργασίας της Γαλλίας προσφέρει αποδοτικότητα των πόρων και ανάκτηση ενέργειας, παρουσιάζοντας μια δυναμική προσέγγιση στη διαχείριση των αποβλήτων που ευθυγραμμίζεται με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Ωστόσο, οι κίνδυνοι διάδοσης και το υψηλό λειτουργικό κόστος της επανεπεξεργασίας αποτελούν προκλήσεις για την ευρεία εφαρμογή της [51].

Στο ευρύτερο πλαίσιο της πυρηνικής ενέργειας, η βέλτιστη προσέγγιση μπορεί να έγκειται στην ενσωμάτωση στοιχείων και των δύο μεθόδων. Η επανεπεξεργασία μπορεί να μειώσει τον όγκο και τη ραδιενέργεια των αποβλήτων, ελαφρύνοντας την επιβάρυνση των γεωλογικών αποθηκών, ενώ η γεωλογική διάθεση παρέχει μια

ασφαλή και σταθερή λύση για τα υπολειμματικά απόβλητα. Καθώς η πυρηνική ενέργεια συνεχίζει να διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, η ανάγκη για προσαρμοστικές, ασφαλείς και βιώσιμες στρατηγικές διαχείρισης αποβλήτων θα παραμείνει ακρογωνιαίος λίθος της παγκόσμιας ενεργειακής πολιτικής [50] [51].

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία διερεύνησε ποικίλες διαστάσεις της πυρηνικής ενέργειας και της διαχείρισης των αποβλήτων της, υπογραμμίζοντας τόσο τις δυνατότητες όσο και τους κινδύνους που συνδέονται με τη συνεχιζόμενη χρήση της πυρηνικής τεχνολογίας. Η ιστορική εξέλιξη της πυρηνικής ενέργειας, τα φυσικά και τεχνικά της θεμέλια, καθώς και η θέση της σε σχέση με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αποκαλύπτουν ένα σύνθετο πεδίο. Σε αυτό το πλαίσιο, η πυρηνική ενέργεια προσφέρει σημαντικές προοπτικές, αλλά παράλληλα ενέχει ουσιώδεις κινδύνους. Σε μια εποχή όπου η ανθρωπότητα αντιμετωπίζει τις διπλές προκλήσεις της ενεργειακής ασφάλειας και της κλιματικής αλλαγής, η πυρηνική ενέργεια μπορεί να αποτελέσει βασικό στοιχείο για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και την παροχή αξιόπιστης, μεγάλης κλίμακας ενέργειας. Ωστόσο, όπως αναδεικνύεται στη διατριβή, η υιοθέτησή της απαιτεί προσεκτική και υπεύθυνη προσέγγιση. Η πυρηνική ενέργεια, από τη φύση της, περιλαμβάνει εγγενείς κινδύνους, οι οποίοι δεν μπορούν να αγνοηθούν. Η παραγωγή πυρηνικών αποβλήτων, που παραμένουν εξαιρετικά ραδιενεργά για χιλιάδες χρόνια, δημιουργεί μακροχρόνιες προκλήσεις στη διαχείριση και αποθήκευση. Παρά τις υπάρχουσες μεθόδους, όπως η γεωλογική διάθεση και η επανεπεξεργασία, που προσφέρουν ορισμένα πλεονεκτήματα, παραμένουν ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το ενδεχόμενο κακής χρήσης. Η αποτελεσματική διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη βιωσιμότητα της πυρηνικής ενέργειας. Είναι σαφές ότι απαιτείται συνεχής επιστημονική έρευνα και τεχνολογική πρόοδος, ώστε να διασφαλιστεί ότι οι μέθοδοι αυτές δεν θα επιφέρουν νέους κινδύνους στο μέλλον.

Επιπλέον, οι συνέπειες της πυρηνικής ενέργειας για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία δεν μπορούν να παραβλεφθούν. Αν και η πυρηνική ενέργεια δεν παράγει άμεσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, όπως τα ορυκτά καύσιμα, ο κίνδυνος έκλυσης ραδιενέργειας, είτε λόγω ατυχημάτων είτε λόγω ανεπαρκούς διαχείρισης, παραμένει σημαντικός. Τέτοια περιστατικά θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε καταστροφικές συνέπειες για τους ανθρώπινους πληθυσμούς και τα οικοσυστήματα. Ιστορικά παραδείγματα, όπως τα πυρηνικά ατυχήματα του Τσερνομπίλ και της Φουκουσίμα, ανέδειξαν τις σοβαρές επιπτώσεις που μπορεί να

προκύπτουν από αποτυχίες στην πυρηνική ασφάλεια. Αυτά τα γεγονότα υπογραμμίζουν την ανάγκη για συνεχή εγρήγορση από την παγκόσμια κοινότητα, ώστε να αποφευχθεί η επανάληψη παρόμοιων τραγωδιών στο μέλλον. Οι πολιτικές και οι κανονισμοί που διέπουν την πυρηνική ενέργεια, ιδιαίτερα σε περιοχές όπως η Ευρωπαϊκή Ένωση, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση και ανάπτυξη της. Τα υφιστάμενα κανονιστικά πλαίσια αποσκοπούν στην εξασφάλιση της ασφαλούς αξιοποίησης της πυρηνικής ενέργειας, επιβάλλοντας αυστηρά μέτρα για την ασφάλεια, τη διαχείριση των αποβλήτων και την προστασία του περιβάλλοντος. Ωστόσο, η συνεχής εξέλιξη της πυρηνικής τεχνολογίας και οι μεταβαλλόμενες συνθήκες στο παγκόσμιο πολιτικό τοπίο καθιστούν αναγκαία την τακτική αναθεώρηση και προσαρμογή αυτών των πολιτικών. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ότι παραμένουν επαρκώς ισχυρές για να ανταποκρίνονται στις νέες προκλήσεις και τους αναδυόμενους κινδύνους, διατηρώντας την πυρηνική ενέργεια ως βιώσιμη και ασφαλή επιλογή στο ενεργειακό μείγμα.

Το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας εξαρτάται τόσο από την ικανότητά της να ανταποκρίνεται στις αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας όσο και από την ικανότητα της κοινωνίας να διαχειρίζεται και να μετριάξει αποτελεσματικά τους κινδύνους που τη συνοδεύουν. Εάν η πυρηνική ενέργεια χρησιμοποιηθεί απερίσκεπτα ή χωρίς επαρκείς μηχανισμούς ασφαλείας, ενδέχεται να μετατραπεί σε σημαντική απειλή για την ανθρωπότητα. Αντίθετα, όταν αξιοποιηθεί με υπευθυνότητα και σεβασμό προς τις αρχές της ασφάλειας και της βιωσιμότητας, μπορεί να αποτελέσει κρίσιμο εργαλείο στη μετάβαση σε έναν κόσμο με μειωμένες εκπομπές άνθρακα. Επομένως, είναι ζωτικής σημασίας να διατηρηθεί μια προσεκτική ισορροπία ανάμεσα στην αξιοποίηση των δυνατοτήτων της πυρηνικής ενέργειας και στη λήψη μέτρων για την προστασία από τους κινδύνους της, εξασφαλίζοντας έτσι ένα βιώσιμο και ασφαλές ενεργειακό μέλλον.

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Armstrong, Robert C., et al. "The frontiers of energy." *Nature Energy* 1.1 (2016): 1-8.
- [2] Κ. Νικολαΐδης, «ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ,» Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογιστών, Βόλος, 2020.
- [3] U. D. o. Energy, THE HISTORY OF NUCLEAR ENERGY, Washington, D.C.: Office of Nuclear Energy, Science and Technology.
- [4] Μ. Αναστάσιος, «Η ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ,» Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Τμήμα Οικονομικής Επιστήμης, Πειραιάς, 2022.
- [5] S. Golub, «Nuclear Energy Past, Present and Future,» Purdue University, 2014.
- [6] Β. Κώτσος και Γ. Λάμπας, «Η ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΩΣ ΜΕΣΟ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ,» Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Κοζάνη, 2017.
- [7] Γ. Κωσταντίνος και Ε. Δασούκης, «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Από Πυρηνικούς Σταθμούς,» Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογιστών, Πάτρα, 2023.
- [8] J. R. Lamarsh και A. Baratta, Εισαγωγή στην ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ, Π. Νικόλαος, Επιμ., ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 2019.
- [9] Ε. Πετράκη, «Ραδιενεργοί Ρύποι και οι Επιπτώσεις τους στον Ανθρώπινο Οργανισμό,» Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2016.
- [10] Ν. Νέλη, Α. Ντουρμίσση, Έ. Ντουρμίσση και Σ. Λάρα, «Βιολογική δράση της ακτινοβολίας,» *Open Schools Journal for Open Science*, τόμ. 6, αρ. 1, 21 Ιανουάριου 2023.

- [11] Δ. Παυλοζάς, «ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΩΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΚΑΙ Η ΠΙΘΑΝΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ,» Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πάτρα, 2023.
- [12] Kazansky, Yury A. "Introduction to nuclear power technology." *Nuclear Reactor Technology Development and Utilization*. Woodhead Publishing, 2020. 1-26.
- [13] Freidberg, Jeffrey P. *Plasma physics and fusion energy*. Cambridge university press, 2008.
- [14] Α. Διαμανίδης, «Η ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΩΣ ΜΕΣΟ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ,» Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας Πολεοδομίας & Περιφεριακής Ανάπτυξης, 2022.
- [15] Α. Βοντζορίδης, «Εφαρμογές μικρών πυρηνικών αντιδραστήρων σε εγκαταστάσεις πρόωσης εμπορικών πλοίων,» Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών , Αιγάλεω, 2023.
- [16] Β. Χρυσούλης, «ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ,» Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογιστών, 2023.
- [17] Κ. Ερμείδης, «Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων,» Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής, Θεσσαλονίκη, 2016.
- [18] Zakhidov, R. A. "Central Asian countries energy system and role of renewable energy sources." *Applied Solar Energy* 44 (2008): 218-223.
- [19] Δ. Καραμάνης, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*, Αθήνα: ΚΑΛΛΙΠΟΣ, 2022.
- [20] United Nations, «ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT,» σε *PARIS AGREEMENT*, Παρίσι , 2015.
- [21] Χ. Κορωναίος, «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας,» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Δ.Π.Μ.Σ. "ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ", Αθήνα, 2012.
- [22] Commission European , «www.commission.europa.eu,» DECEMBER 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://joint-research-centre.ec.europa.eu/welcome-jec->

website/reference-regulatory-framework/renewable-energy-recast-2030-red-ii_en.
[Πρόσβαση 15 Δεκεμβρίου 2023].

[23] Ν. Ανδρίτσος, «ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ,» Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Βόλος, 2008.

[24] R. Radim, K. Dušan και M. Beer, «Selected problems of classification of energy sources – What are renewable energy sources?,» Acta Montanistica Slovaca, pp. 172-180, July 2015.

[25] Γ. Αικατερίνη, «ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ - ΣΥΓΚΡΙΣΗ,» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Δ.Π.Μ.Σ. "Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων", Αθήνα, 2012.

[26] A. Nicola και B. Vincenzo, «The legacy of fossil fuels,» Chemistry–An Asian Journal, p. 768 – 784, February 2011.

[27] Κ. Καλτσίδου, «Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από βιομηχανίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας,» Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Ευρωπαϊκό Πανεπιστήμιο Κύπρου, 2019.

[28] Ι. Ροδοκανάκης, «Μονάδες Παραγωγής Σε Σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας,» Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογιστών, Βόλος, 2018.

[29] World Nuclear Association. "Nuclear Power Economics and Project Structuring-2017 Edition." World Nuclear Association, London, Tech. Rep (2017).

[30] Κ. Κρεμμύδα, «Το πυρηνικό ατύχημα στη Φουκουσίμα της Ιαπωνίας και οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία,» Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Τμήμα Βιοϊατρικών Επιστημών, Αιγάλεω, 2022.

[31] R. Popeski και N. Starkov, «Russia, Ukraine accuse each other of plotting imminent attack on nuclear plant,» Reuters, Ιούλιος 2023.

[32] M. S. Bell, «Nuclear opportunism: A theory of how states use nuclear weapons in international politics,» Journal of Strategic Studies, αρ. 42, pp. 3-28, 2019.

- [33] Κ. Κωνσταντής, «Η Κοινωνική Υποδοχή της Πυρηνικής Ενέργειας στην Ελλάδα,» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογιστών, Αθήνα, 2019.
- [34] V. A. Petrov, M. Ojovan και S. Yudintsev, «Material Aspect of Sustainable Nuclear Waste Management,» Sustainability, 23 Αυγούστου 2023.
- [35] Μ. Λαγού, «Πυρηνικά απόβλητα, τύποι αποβλήτων, ιστορική αναδρομή, σημερινή κατάσταση, μελλοντικές τεχνολογίες διαχείρισης,» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Και Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Αθήνα, 2021.
- [36] Μ. Ι. Ojovan και H. J. Steinmetz, «Approaches to Disposal of Nuclear Waste,» energies, τόμ. 15, αρ. 20, pp. 1-23, 2022.
- [37] C. Corkhill και N. Hyatt, «Nuclear Waste Management,» Department of Materials Science and Engineering, University of Sheffield, Sheffield, 2018.
- [38] P. A. Baisden και G. R. Choppin, «NUCLEAR WASTE MANAGEMENT AND THE NUCLEAR FUEL CYCLE,» RADIOCHEMISTRY AND NUCLEAR CHEMISTRY, pp. 1-63, 2007.
- [39] D. G. Cacuci, Handbook of Nuclear Engineering, Springer Science & Business Media, 2010.
- [40] V. Anna και C. Pescatore, «Stepwise Approach to the Long-Term Management of Radioactive Waste,» Journal of Risk Research, pp. 13-40, 20 Αυγούστου 2006.
- [41] O. G. Korede, . A. Oluwaferanmi και Z. O. Adeyemi, «Environmental and ecological impact of radioactive waste disposal,» World Journal of Advanced Research and Reviews, 28 Μάιος 2023.
- [42] Μ. Ηλιοπούλου, «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΥΓΕΙΑ. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΘΕΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ,» ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ, ΙΑΤΡΙΚΗ ΣΧΟΛΗ, Αθήνα, 2023.

- [43] P. Arnautou, G. Guillaume , J. Maillot, J. Konopacki, M. Brachet, A. Bonnin, J.-C. Amabile και J.-V. Malfuson, «Management of acute radiation syndrome,» Science Direct, 16 Ιούλιος 2024.
- [44] Α. Βαζαίου, «“Πυρηνικά ατυχήματα μεγάλης κλίμακας: Αίτια, επιπτώσεις στην υγεία και στο περιβάλλον και διορθωτικά μέτρα”,» ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ, 2022.
- [45] A. Rosenberg, M. Dworkin, V. Murthy, S. Jayaraman, K. Takabe και I. Okano, «Direct and indirect health effects of the nuclear power plant disasters: a review for health care professionals,» International Journal Of Surgery: Global Health, Σεπτέμβριος 2022.
- [46] A. A. Gapor, I. H. Suhaimi και S. . A. Othman, «Nuclear Emergency and It’s Psychological Effects- A Short Review,» International Journal of Chemical and Biochemical Sciences, 2023.
- [47] P. Fernández-Arias, V. Diego και A.-S. Álvaro, «Global Review of International NuclearWaste Management,» energies, p. 6215, 27 Αυγούστου 2023.
- [48] M. L. Terranova και T. A. P. Odilon, «Trends and Perspectives on NuclearWaste Management: Recovering, Recycling, and Reusing,» Journal of Nuclear Engineering, pp. 299-317, 13 Αυγούστου 2024.
- [49] I. Kwangchae, L. Manseok και W. M. Seung, «Technical Overview of Pyro processing and Policy Considerations,» Korean Journal of Chemical Engineering, p. 2881–2899, 9 Σεπτεμβρίου 2024.
- [50] H. F. Alistair, H. Eccles, C. A. Sharrad και G. Kathryn, «Spent Nuclear Fuel—Waste or Resource? The Potential of Strategic Materials Recovery during Recycle for Sustainability and Advanced Waste Management,» Waste, pp. 249-263, 15 Ιανουαρίου 2023.
- [51] P. Andrea, J. M. Dodds, S. J. Palethorpe και P. Lettieri, «Reprocessing vs direct disposal of used nuclear fuels: The environmental,» Department of Chemical Engineering, University College London, Torrington Place, LondonWC1 E7JE, United Kingdom, Λονδίνο, 2021.

- [52] E. Commission, «www.commission.europa.eu,» European Commission, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe/euratom-research-and-training-programme_en. [Πρόσβαση 15 12 2024].
- [53] E. Commission, «www.commission.europa.eu,» European Commission, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://energy.ec.europa.eu/events/17th-european-nuclear-energy-forum-2024-09-30_en. [Πρόσβαση 15 12 2024].
- [54] E. «Δημόκριτος», «<https://inrastes.demokritos.gr/>,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://inrastes.demokritos.gr/el/laboratories/ergastirio-erevnikou-pyrinikou-antidrastra/>. [Πρόσβαση 25 Σεπτεμβρίου 2024].
- [55] E. E. A. ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, «<https://eeae.gr/>,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://eeae.gr/%CE%BF%CE%B4%CE%B7%CE%B3%CE%AF%CE%B5%CF%82-%CE%BA%CE%B1%CE%BD%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%BF%CE%AF/%CE%BD%CE%BF%CE%BC%CE%BF%CE%B8%CE%B5%CF%83%CE%AF%CE%B1?lawscategoryid=1&lawstypeid=0>. [Πρόσβαση 25 Σεπτεμβρίου 2024].