



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Πυρηνική ενέργεια και περιβάλλον Nuclear Energy and Environment

Υπό
ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥΣ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

Πτυχιακή Εργασία

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

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

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

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

ΕΠΩΝΥΜΟ	ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥΣ
ΟΝΟΜΑ	ΧΡΙΣΤΙΝΑ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	2919129
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	27.06.2025
ΥΠΟΓΡΑΦΗ	

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζει τη σύνθετη και συχνά αμφιλεγόμενη σχέση μεταξύ της πυρηνικής ενέργειας και του περιβάλλοντος, αναδεικνύοντας τόσο τις δυνατότητες που προσφέρει ως ενεργειακή λύση χαμηλών εκπομπών άνθρακα όσο και τους σημαντικούς περιβαλλοντικούς κινδύνους που τη συνοδεύουν. Αφετηρία της ανάλυσης αποτελεί η ιστορική πορεία της πυρηνικής τεχνολογίας, από τις πρώτες ελεγχόμενες σχάσεις και την ανάπτυξη των πυρηνικών όπλων έως τη μετεξέλιξή της σε μέσο ειρηνικής ενεργειακής αξιοποίησης. Ακολουθεί τεχνική παρουσίαση των χαρακτηριστικών των πυρηνικών αντιδραστήρων, της λειτουργίας του πυρηνικού κύκλου καυσίμου και των τεχνολογιών που στοχεύουν στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και στη μείωση της ραδιενεργού επιβάρυνσης του περιβάλλοντος.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων, που αποτελεί έναν από τους βασικότερους προβληματισμούς αναφορικά με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα της πυρηνικής ενέργειας. Αναλύονται οι διαθέσιμες τεχνικές αποθήκευσης, τα προβλήματα μακροχρόνιας ασφαλείας και οι γεωπολιτικές επιπλοκές που προκύπτουν από την ανακύκλωση ή τη διάδοση του πυρηνικού υλικού. Στο πλαίσιο αυτό, αξιολογούνται και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τα σοβαρότερα πυρηνικά ατυχήματα, όπως του Τσερνόμπιλ και της Φουκουσίμα, καθώς και η κληρονομιά που άφησαν στον άνθρωπο και τα οικοσυστήματα. Επιπλέον, διερευνώνται οι κανονιστικές στρατηγικές των διεθνών οργανισμών, η συμμόρφωση των κρατών με τα πρότυπα ασφαλείας και οι τεχνολογικές καινοτομίες που επιδιώκουν την πρόληψη μελλοντικών περιβαλλοντικών καταστροφών.

Η εργασία εξετάζει επίσης τη θέση της πυρηνικής ενέργειας στο σύγχρονο ενεργειακό μείγμα και τις προοπτικές συμβατότητάς της με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης. Συγκρίνονται τα περιβαλλοντικά οφέλη και μειονεκτήματα της πυρηνικής ενέργειας έναντι των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης και της αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής. Τέλος, αναλύονται οι κοινωνικές, πολιτικές και οικονομικές προϋποθέσεις για την αποδοχή της πυρηνικής τεχνολογίας, καθώς και οι ηθικές διαστάσεις που σχετίζονται με την περιβαλλοντική ευθύνη και την προστασία των μελλοντικών γενεών.

ABSTRACT

This thesis explores the complex and often controversial relationship between nuclear energy and the environment, highlighting both its potential as a low-carbon energy solution and the significant environmental risks it entails. The analysis begins with the historical development of nuclear technology, from the first controlled fission reactions and the advent of nuclear weapons to its evolution into a means of peaceful energy production. A technical overview follows, addressing the characteristics of nuclear reactors, the functioning of the nuclear fuel cycle, and the technologies aimed at improving energy efficiency while minimizing radioactive environmental impacts.

Particular emphasis is placed on the management of radioactive waste, which remains one of the most critical challenges concerning the environmental sustainability of nuclear energy. Available storage and disposal methods are examined, along with the long-term safety concerns and the geopolitical implications of fuel recycling and the potential proliferation of nuclear materials. In this context, the thesis assesses the environmental consequences of the most severe nuclear accidents, such as those at Chernobyl and Fukushima, as well as the long-lasting impacts on human health and ecosystems. Furthermore, the role of international regulatory bodies is investigated, alongside the compliance of states with safety standards and the technological innovations designed to prevent future environmental disasters.

The thesis also examines the role of nuclear energy in the modern energy mix and its compatibility with the principles of sustainable development. Environmental benefits and drawbacks of nuclear energy are compared with those of renewable energy sources, within the broader framework of energy transition and climate change mitigation. Finally, the work considers the social, political, and economic conditions necessary for public acceptance of nuclear technology, as well as the ethical dimensions relating to environmental responsibility and the protection of future generations.

Through an interdisciplinary approach that combines historical, technical, environmental, and policy-related perspectives, the study provides a comprehensive assessment of the role of nuclear energy in shaping a sustainable energy future. It concludes that while nuclear power may contribute to reducing greenhouse gas emissions, its environmental risks, particularly in terms of waste management and accident preparedness, demand rigorous regulation, transparent governance, and long-term planning. Only under such conditions can nuclear energy be integrated responsibly into a sustainable and environmentally conscious global energy strategy.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	5
Κατάλογος πινάκων.....	10
Κατάλογος εικόνων	10
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	12
1.1 Βασικές Αρχές Ατομικής Δομής και Πυρηνικής Ενέργειας	12
1.2 Ραδιενέργεια και Ραδιοϊσότοπα	12
1.2.1 Ισότοπα και Σταθερότητα Πυρήνων	12
1.2.2 Ραδιοϊσότοπα και Κατηγορίες τους	13
1.2.3 Χρόνος Ημιζωής και η σημασία του.....	13
1.2.4 Μονάδες Μέτρησης Ραδιενέργειας.....	14
1.3 Πυρηνική σχάση	14
1.3.1 Θεμελιώδεις Αρχές Πυρηνικής Σχάσης και Αλυσιδωτών Αντιδράσεων	14
1.3.2 Είδη ραδιενεργού ακτινοβολίας	15
1.2.3 Ελεγχόμενη και αυθόρμητη σχάση – Ρόλος της ενέργειας και των νετρονίων.....	19
1.4 Ισότοπα ουρανίου και τεχνικές εμπλουτισμού	20
1.5 Ραδιενεργές πηγές από το γεωλογικό περιβάλλον-Το παράδειγμα του ραδονίου	21
1.6 Πυρηνική σύντηξη	22
2. Η ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΟΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ.....	25
2.1 Ανάπτυξη της πυρηνικής τεχνολογίας.	25
2.1.1 Η πρώτη ελεγχόμενη σχάση και το Σχέδιο Μανχάταν	25
2.1.2 Από τη Χιροσίμα στην ειρηνική χρήση της πυρηνικής ενέργειας.....	26
2.3. Πυρηνικά όπλα και πυρηνικές βόμβες.	26
2.3.1. Τυπολογία Πυρηνικών Όπλων: Ατομικά και Θερμοπυρηνικά.....	27
Στρατηγικά πυρηνικά όπλα	29
2.3.2. Πρώτες δοκιμές πυρηνικών και θερμοπυρηνικών όπλων - περιβαλλοντικές συνέπειες.....	30
2.3.3. Περίπτωση Νησιών Μάρσαλ.....	31
2.3.4. Μηχανισμοί δράσης και καταστροφική ισχύς των πυρηνικών όπλων.....	32
2.4 Βιολογικές επιπτώσεις της ραδιενέργειας στον άνθρωπο	37
2.5 Επιπτώσεις από μια πυρηνική αντιπαράθεση και ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης	38
3. ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ.....	41
3.1 Ατύχημα Three Mile Island, ΗΠΑ.....	41

3.2 Ατύχημα στον Πυρηνικό Σταθμό του Τσερνόμπιλ: Χαρακτηριστικά του Αντιδραστήρα και Αιτίες Καταστροφής	43
3.2.1 Επιπτώσεις του Πυρηνικού Ατυχήματος στην Υγεία και στο Περιβάλλον	44
3.2.2 Έκταση της ραδιενεργής ρύπανσης στην Ευρώπη.....	46
3.2.3 Κοινωνικές επιπτώσεις και πολιτικές συνέπειες – η εξέλιξη των μηχανισμών ασφάλειας και παρακολούθησης	47
3.2.4 Επιπτώσεις στην Ελλάδα	48
3.3 Ο σεισμός και το τσουνάμι του 2011-Fukushima, Ιαπωνία	49
3.3.1 Η κατάσταση των αντιδραστήρων στη Fukushima τη στιγμή του σεισμού.....	49
3.3.2 Η καταστροφική επίδραση από το τσουνάμι και η απώλεια της ψύξης.....	50
3.3.4 Εξέλιξη της τήξης και εκρήξεις υδρογόνου στους αντιδραστήρες	51
3.3.5 Ζώνη εκκένωσης και επιπτώσεις στον πληθυσμό	51
3.3.6 Έκθεση εργαζομένων στη ραδιενέργεια	52
3.3.7 Εκτιμήσεις του ΙΑΕΑ για τα αίτια και τη σοβαρότητα του ατυχήματος.....	53
3.3.8 Αιτίες και εξέλιξη του ατυχήματος.....	54
3.3.9 Επιπτώσεις στην υγεία και στο περιβάλλον από το ατύχημα της Fukushima.....	54
3.3.10 Ψυχολογικές συνέπειες του ατυχήματος της Fukushima	55
3.3.11 Επιπτώσεις στην πρωτογενή παραγωγή: γεωργία, κτηνοτροφία και αλιεία	56
3.3.12 Συνεχιζόμενες επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον: διαρροές ραδιενέργειας στον Ειρηνικό	56
3.3.13 Συγκριτική Αξιολόγηση των Επιπτώσεων Τσερνόμπιλ και Φουκουσίμα.....	57
3.4 Ατύχημα Tokaimura, Ιαπωνία.	58
3.4.1 Παραβίαση Πρωτοκόλλων και Κρίσιμη Μάζα: Το Ατύχημα στην Tokaimura.....	59
3.4.2 Ραδιενεργή έκθεση και ανθρώπινο κόστος του ατυχήματος Tokaimura	59
3.4.3 Ανάλυση Αιτίων και Διαχείριση του Ατυχήματος Tokaimura	60
3.5 Το Ατύχημα του Kyshtym (1957) και οι Πρώτες Πυρηνικές Καταστροφές.....	61
3.6 Ατύχημα Windscale, Μεγάλη Βρετανία.	66
3.7 Δυστυχήματα σε στρατιωτικές πυρηνικές μονάδες και οι συνέπειές τους στο θαλάσσιο περιβάλλον	70
3.7.1 Καταγραφή και κατηγοριοποίηση στρατιωτικών πυρηνικών ατυχημάτων με περιβαλλοντικές επιπτώσεις στη θάλασσα	72
4. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΣΥΝΕΠΕΙΩΝ....	79
4.1. Πυρηνικά απόβλητα και διαχείριση.	79
4.1.1 Ορισμός και Προέλευση των Πυρηνικών Αποβλήτων	79
4.2. Τεχνολογίες Ασφαλούς Αποθήκευσης Ραδιενεργών Αποβλήτων.	84
4.3. Ανακύκλωση καυσίμων.....	91
4.4. Εναλλακτικές πηγές ενέργειας και πράσινες τεχνολογίες.....	94

4.5. Διεθνές Ρυθμιστικό Πλαίσιο και Συνθήκες για την Ασφαλή Χρήση της Πυρηνικής Ενέργειας.....	103
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	105
6.1 Η Πυρηνική Ενέργεια ως Περιβαλλοντικά Βιώσιμη Επιλογή στο Ενεργειακό Μείγμα	105
6.2 Εκτίμηση των προκλήσεων και των πιθανών λύσεων.	106
6.3 Προοπτικές Τεχνολογικής Εξέλιξης και Έρευνας στην Πυρηνική Ενέργεια.	107
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	109

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Κατανομή PBq του ραδιενεργού ισότοπου ^{90}Sr 39 χρόνια μετά το πυρηνικό ατύχημα στο Kyshtym της Ρωσίας (πηγή: The Vintage News: Hisashi Ouchi).....	62
Πίνακας 2: Τα ποσά ραδιενέργειας, που εκλύθηκαν από τα ραδιενεργά ισότοπα ^{90}Sr και ^{137}Cs εκφρασμένα σε mSv/y σε φαγητά, ψάρια, νερό κλπ (Πηγή: The Vintage News: Hisashi Ouchi).....	644
Πίνακας 3: Άτομα που εκτέθηκαν σε ραδιενέργεια στον θυροειδή και τα οποία δεν ήταν κοντά στον τόπο του συμβάντος ή δεν ήταν εργαζόμενοι στον χώρο (πηγή: F. Loutit, G. Marley, S. Russel, The Nuclear Reactor Accident at Windscale)	69
Πίνακας 4: Τα ποσοστά μεταστοιχείωσης σημαντικών ακτινίδων, όταν αυτές σχάζονται με «θερμικά» και «ταχεία» νετρόνια αντίστοιχα(πηγή: World Nuclear Association).....	100

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Αναπαράσταση μιας αλυσιδωτής αντίδρασης σχάσεων. (πηγή: Πετρόπουλος Ν., Εισαγωγή στην πυρηνική τεχνολογία, 2019)	15
Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση 2 διαφορετικών τύπων πυρηνικής διάσπασης. Διάσπαση α και διάσπαση β-.....	17
Εικόνα 3: Τυπικό ενεργειακό φάσμα σωματιδίων που εκπέμπονται κατά την διάσπαση β με NE το πλήθος των ηλεκτρονίων συναρτήσει της κινητικής ενέργειας E. (πηγή: Πετρόπουλος Ν., Εισαγωγή στην πυρηνική τεχνολογία, 2019).....	18
Εικόνα 4: Ποσοστό των σχάσεων που παράγουν πυρήνες-προϊόντα μαζικού αριθμού A για σχάσεις ουρανίου ^{235}U με θερμικά νετρόνια και νετρόνια ενέργειας 14 MeV.....	20
Εικόνα 5: Αναπαράσταση πυρηνικής σύντηξης ισωτόπων υδρογόνου σε Ήλιο και εκλυόμενης ενέργειας. Όπου Q η διαφορά τιμής ανάμεσα στις μάζες (amu) των αρχικών δρώντων (πυρήνες Δευτέρου + Τρίτιου), με τις μάζες των τελικών προϊόντων (πυρήνας Ηλίου + νετρόνιο) $\times c^2$, εκφρασμένη σε μονάδες ενέργειας στο υποατομικό πεδίο (MeV). (πηγή: nuclear-power.com).	24
Εικόνα 6: Ο Γερμανός χημικός Otto Hahn.....	25
Εικόνα 7: Οι ισοπεδωτικές καταστροφές από την ρίψη ατομικών βομβών σε Χιροσίμα και Ναγκασάκι (πηγή: alfavita.gr).	27
Εικόνα 8: Η βασική δομή λειτουργίας και πυροδότησης της ατομικής βόμβας “Little Boy”, όπως είχαν ονομάσει την ατομική βόμβα ουρανίου (βόμβα πυρηνικής σχάσης) που έπληξε την Χιροσίμα, οι Αμερικανοί ειδικοί (πηγή: Ελληνικό Κέντρο Ελέγχου Όπλων).	28
Εικόνα 9: Τυπική αναπαράσταση της κατασκευαστικής δομής μιας θερμοπυρηνικής βόμβας (βόμβα υδρογόνου).	30
Εικόνα 14: Πυρηνική εγκατάσταση Three Mile Island(πηγή: energy.gov -U S Energy Department).....	42
Εικόνα 15: Συνολική άποψη του κτηρίου, ύστερα από την έκρηξη (πηγή: Πετρόπουλος Ν., Εισαγωγή στην πυρηνική τεχνολογία, 2019).	44
Εικόνα 16: Η ερημωμένη φύση, γύρω από τις εγκαταστάσεις ύστερα από το ατύχημα στο Chernobyl.	46
Εικόνα 17: Χάρτης ραδιενέργειας ανά τον κόσμο για το έτος 2015.....	47
Εικόνα 18: Επιχείρηση πυρόσβεσης του πυρηνικού σταθμού της Fukushima.	49
Εικόνα 19: Αναπαράσταση συστήματος πυρηνικού αντιδραστήρα BWR.....	50

Εικόνα 20: Χρωματική απεικόνιση με την συγκέντρωση της ραδιενέργειας μεταξύ Ιαπωνίας και Αλάσκας μετά από 2,5 χρόνια από το πυρηνικό ατύχημα (πηγή: Yukiya Amano, <i>The Fukushima Daiichi Accident</i>).....	53
Εικόνα 21. Σχηματική απεικόνιση πηγών ^{137}Cs που προέρχεται από το πυρηνικό ατύχημα στη Fukushima, εμφανίζοντας σε PBq την άμεση έκλυση που πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον.....	58
Εικόνα 22: Η πυρηνική εγκατάσταση στο Tokaimura και οι θανατηφόρες συνέπειες του ατυχήματος (πηγή:Patrick Kiger, 2022), ...	59
Εικόνα 23: Η έκταση που ακτινοβολήθηκε περισσότερο από το πυρηνικό ατύχημα στην Ρωσία (πηγή:A. Aarkog et al. 2000)	66
Εικόνα 24: Πυρηνικό εργοστάσιο Windscale (πηγή:Consequences of the Fukushima nuclear accident – IAEA Report of 2015).	66
Εικόνα 25: Ποσά ραδιενέργειας που εντοπίστηκαν στην ατμόσφαιρα, ύστερα από το πυρηνικό ατύχημα στο Windscale της Μεγάλης Βρετανίας. Η μέτρηση είναι στην παλαιότερη μονάδα μέτρησης mCi/m ³ (πηγή: F. Loutit, G. Marley, S. Russel, <i>The Nuclear Reactor Accident at Windscale</i>).	68
Εικόνα 26: Το σοβιετικό πυρηνοκίνητο υποβρύχιο K-159 (1962 – 1989), στις 28/8/2003.	77
Εικόνα 27: Τεμαχισμένα υπολείμματα επένδυσης Zircaloy (εξωτερικό περίβλημα ράβδων καυσίμου), που περιβάλλει τα πέλλετ καυσίμου σε αντιδραστήρες, τα οποία δέχονται για πάνω από 2 χρόνια, την ραδιενέργεια που εκπέμπεται κατά την σχάση. Θεωρούνται συνήθως πυρηνικά (ραδιενεργά) απόβλητα μεσαίου επιπέδου (ILW) (πηγή: Radioactivity.eu.com).....	81
Εικόνα 28: Ποσοστιαία κατανομή συμμετοχής ανά κατηγορία πυρηνικών αποβλήτων (χαμηλού, μέσου και υψηλού επιπέδου επικινδυνότητας) και αντίστοιχη ποσοστιαία συμμετοχή στην ραδιενέργεια που συνολικά περικλείουν.....	82
Εικόνα 29: Κεντρική Εγκατάσταση Ενδιάμεσης Αποθήκευσης σε δεξαμενή νερού, αναλωμένου καυσίμου (CLAB), Σουηδία.(πηγή: World Nuclear Association).	88
Εικόνα 30: Βαρέλια ξηράς αποθήκευσης ράβδων αναλωμένου καυσίμου	90
Εικόνα 31: Τυπική αναπαράσταση διαδικασίας τελικής διάθεσης πολλαπλών φραγμών, για αναλωμένο καύσιμο.	91
Εικόνα 32: Καλλιτεχνική απεικόνιση της μηχανής πυρηνικής σύντηξης (tokamak) του προγράμματος ITER.....	103

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

1.1 Βασικές Αρχές Ατομικής Δομής και Πυρηνικής Ενέργειας

Τα άτομα αποτελούν τα θεμελιώδη δομικά στοιχεία της ύλης και συγκροτούνται από υποατομικά σωματίδια: τα θετικά φορτισμένα πρωτόνια και τα ηλεκτρικά ουδέτερα νετρόνια που συγκροτούν τον πυρήνα, καθώς και τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια που περιφέρονται γύρω του σε ενεργειακά επίπεδα. Η συνοχή του πυρήνα διασφαλίζεται από τις ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις, οι οποίες υπερνικούν τις ηλεκτροστατικές απωστικές δυνάμεις μεταξύ των πρωτονίων, καθιστώντας δυνατή τη σταθερή ύπαρξη της ατομικής δομής.

Η ενέργεια που είναι εγκλωβισμένη στον πυρήνα του ατόμου ονομάζεται πυρηνική ενέργεια και μπορεί να απελευθερωθεί μέσω συγκεκριμένων πυρηνικών διεργασιών. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι η πυρηνική σχάση και η πυρηνική σύντηξη, οι οποίες συνεπάγονται μεταβολές στη σύσταση του πυρήνα, συνοδεύονται από έκλυση σημαντικών ποσοτήτων ενέργειας και υπερτερούν εκείνων που παράγονται σε συμβατικές χημικές αντιδράσεις. Οι αντιδράσεις αυτές συχνά συνδέονται με το φαινόμενο της μεταστοιχείωσης, δηλαδή την αλλαγή του ατομικού αριθμού και συνεπώς του χημικού στοιχείου.

Κατά την έκλυση πυρηνικής ενέργειας παρατηρείται εκπομπή σωματιδίων (όπως ακτινοβολίες α και β) και ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας (ακτίνες γ), γνωστή ως ραδιενέργεια. Η ραδιενεργός ακτινοβολία, λόγω της διεισδυτικότητάς της και των ιοντισμών που προκαλεί στο άτομο, θα μπορούσε να είναι παράγοντας κινδύνου για τη δημόσια υγεία και το φυσικό περιβάλλον, αναδεικνύοντας τη σημασία της αυστηρής ρύθμισης και ασφαλούς διαχείρισης της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας (World Nuclear Association, 2023).

1.2 Ραδιενέργεια και Ραδιοϊσότοπα

1.2.1 Ισότοπα και Σταθερότητα Πυρήνων

Στη φύση απαντώνται ισότοπα, τα οποία συνιστούν διαφορετικές πυρηνικές μορφές του ίδιου χημικού στοιχείου. Ορίζονται ως πυρήνες που φέρουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων (ατομικός αριθμός, Z) αλλά διαφέρουν ως προς τον αριθμό νετρονίων, με αποτέλεσμα να έχουν διαφορετικό μαζικό αριθμό (A). Αν και παρουσιάζουν διαφορές στη μάζα, τα ισότοπα ενός στοιχείου εμφανίζουν σχεδόν πανομοιότυπες χημικές ιδιότητες — με εξαίρεση ορισμένες περιπτώσεις, όπως τα ισότοπα του υδρογόνου — δεδομένου ότι η χημική συμπεριφορά καθορίζεται πρωτίστως από τη διαμόρφωση της ηλεκτρονιακής στοιβάδας και όχι από τη σύνθεση του πυρήνα (Zumdahl & Zumdahl, 2019).

Ορισμένα ισότοπα είναι σταθερά — γνωστά και ως αρχέγονα — και βρίσκονται στο φυσικό περιβάλλον. Η σταθερότητα των πυρήνων αυτών αποδίδεται στο γεγονός ότι η συνολική μάζα των νουκλεονίων τους είναι μικρότερη από το άθροισμα των μαζών των επιμέρους σωματιδίων τους σε ελεύθερη κατάσταση. Η ενέργεια σύνδεσης που τους συγκρατεί μέσω της ισχυρής πυρηνικής δύναμης υπερβαίνει την ενέργεια που θα

απαιτούνταν για την ενδεχόμενη διάσπασή τους, γεγονός που εξηγεί την ενεργειακή ευστάθεια και τη μακροχρόνια ύπαρξή τους (Krane, 1987).

1.2.2 Ραδιοϊσότοπα και Κατηγορίες τους

Τα ισότοπα που εμφανίζουν αστάθεια στον πυρήνα τους και μεταπίπτουν αυθόρμητα σε σταθερότερες μορφές εκπέμποντας ακτινοβολία, ονομάζονται ραδιοϊσότοπα. Η πυρηνική αυτή αστάθεια οφείλεται συνήθως σε δυσανάλογη αναλογία πρωτονίων προς νετρόνια ή σε περίσσεια ενέργειας στον πυρήνα. Κατά τη διαδικασία της ραδιενεργού διάσπασης, ο πυρήνας απελευθερώνει ενέργεια είτε με τη μορφή σωματιδίων (π.χ. ακτινοβολία α , β) είτε με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας (ακτινοβολία γ), μέχρι να επιτευχθεί μια σταθερότερη πυρηνική κατάσταση (Knoll, 2010).

Τα ραδιοϊσότοπα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Φυσικά ραδιοϊσότοπα: Απαντώνται στη φύση, κυρίως στον φλοιό της Γης και σε βαθύτερα γεωλογικά στρώματα, όπου εντοπίζονται σε μεταλλεύματα και ορυκτές ενώσεις. Πρόκειται κυρίως για βαριά στοιχεία, όπως το Ουράνιο ($^{235}\text{U}_{92}$ και $^{238}\text{U}_{92}$) και το Θόριο ($^{232}\text{Th}_{90}$) (IAEA, 2020).
2. Τεχνητά ραδιοϊσότοπα είναι τα ραδιενεργά νουκλίδια που δεν απαντώνται στη φύση, αλλά παράγονται υπό ελεγχόμενες εργαστηριακές ή βιομηχανικές συνθήκες, κυρίως ως παροδικά προϊόντα εξαναγκασμένων πυρηνικών αντιδράσεων. Συνήθως προκύπτουν από πυρηνική σχάση ή βομβαρδισμό με νετόνια σε αντιδραστήρες ή επιταχυντές σωματιδίων. Οι πυρήνες που σχηματίζονται είναι ραδιενεργοί και υφίστανται διαδοχικές ραδιενεργές διασπάσεις, έως ότου σταθεροποιηθούν μετατρέπόμενοι σε μη ραδιενεργές μορφές.

Αξίζει να σημειωθεί ότι όλα τα χημικά στοιχεία με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του μολύβδου (Pb, $Z = 82$) διαθέτουν τουλάχιστον ένα ραδιενεργό ισότοπο. Επιπλέον, τα στοιχεία με ατομικό αριθμό από 89 έως 103, τα οποία ανήκουν στην οικογένεια των ακτινιδών — ονομάστηκε έτσι από το πρώτο στοιχείο της σειράς, το ακτίνιο (Ac, $Z = 89$) — στερούνται σταθερών ισotόπων και απαντούν αποκλειστικά ως ραδιενεργά νουκλίδια (Cotton et al., 1999).

1.2.3 Χρόνος Ημιζωής και η σημασία του

Η διάσπαση του πυρήνα ενός ραδιενεργού νουκλιδίου (ή ραδιοϊσοτόπου) και η σταδιακή μεταστοιχείωσή του σε σταθερότερα (μη ραδιενεργά) προϊόντα μπορεί να διαρκεί από ελάχιστα κλάσματα του δευτερολέπτου έως και εκατομμύρια χρόνια. Η χρονική αυτή διάρκεια εκφράζεται μέσω της έννοιας του χρόνου ημιζωής ($t_{1/2}$) ή χρόνου υποδιπλασιασμού.

Ο χρόνος ημιζωής είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε να διασπαστεί το 50% των αρχικά διαθέσιμων πυρήνων ενός συγκεκριμένου νουκλιδίου. Η τιμή του είναι σταθερή για κάθε ραδιοϊσότοπο, καθώς εξαρτάται αποκλειστικά από την εσωτερική δομή του πυρήνα — δηλαδή τον βαθμό αστάθειας ή ευστάθειας — και δεν επηρεάζεται από εξωτερικές συνθήκες, όπως η πίεση ή η θερμοκρασία.

Όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος ημιζωής ($t_{1/2}$) ενός ραδιενεργού πυρήνα, τόσο μεγαλύτερη θεωρείται η πυρηνική του σταθερότητα, υπό την έννοια ότι αποδομείται με βραδύτερο ρυθμό. Ωστόσο, η αυξημένη διάρκεια ημιζωής δεν συνεπάγεται

μειωμένη επικινδυνότητα από περιβαλλοντική σκοπιά. Αντιθέτως, τα ραδιοϊσότοπα με μεγάλο χρόνο ημιζωής παραμένουν ενεργά στο περιβάλλον για εκτεταμένες χρονικές περιόδους, διατηρώντας τη δυνατότητα εκπομπής ιοντίζουσας ακτινοβολίας και παρατείνοντας την έκθεση έμβιων οργανισμών και οικοσυστημάτων σε πιθανώς βλαπτικά επίπεδα ακτινοβολίας (Krane, 1988; IAEA, 2009).

1.2.4 Μονάδες Μέτρησης Ραδιενέργειας

Ο ρυθμός διάσπασης ενός ραδιενεργού νουκλιδίου μετράται στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) με τη μονάδα Becquerel (Bq), που αντιστοιχεί σε μία διάσπαση ανά δευτερόλεπτο ($1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$). Παρόλο που έχει επισήμως αντικατασταθεί, η μονάδα Curie (Ci) εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ευρέως στην πράξη. Ορίζεται ως ο ρυθμός διάσπασης ενός γραμμαρίου ^{226}Ra , και ισούται με: $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ ή 37 GBq (Knoll, 2010; ICRU, 2005).

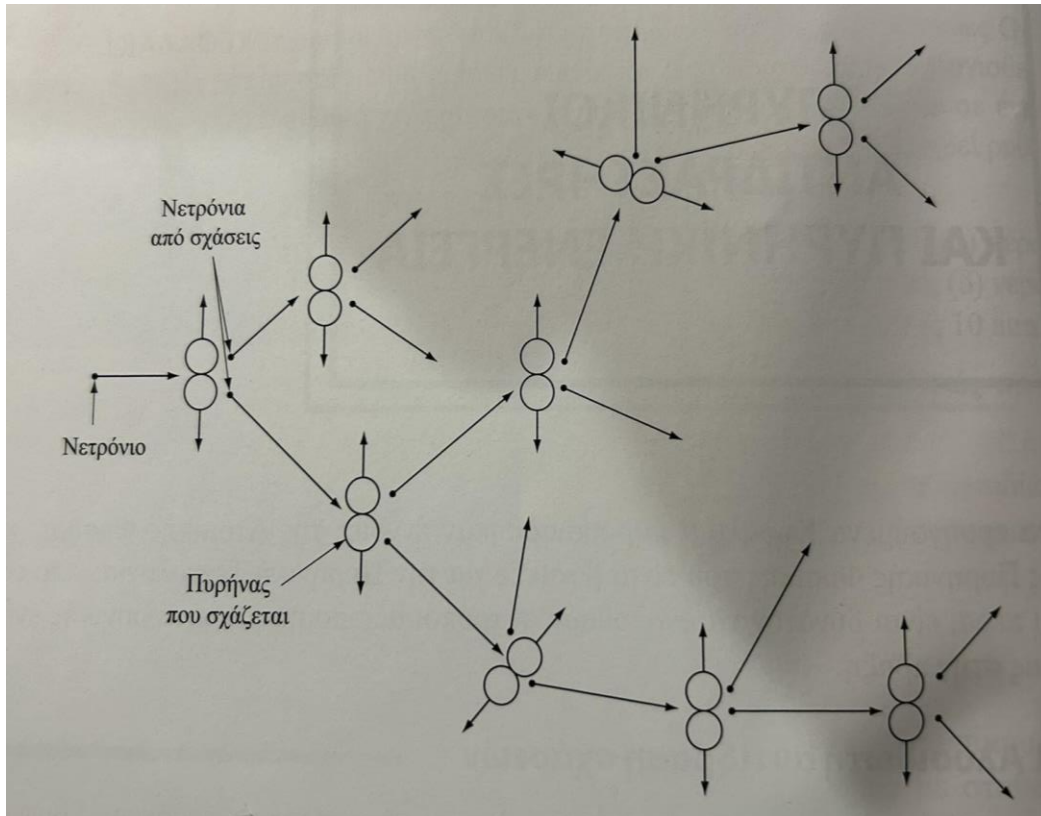
1.3 Πυρηνική σχάση

1.3.1 Θεμελιώδεις Αρχές Πυρηνικής Σχάσης και Αλυσιδωτών Αντιδράσεων

Η πυρηνική σχάση αποτελεί ειδική μορφή ραδιενεργού διάσπασης, κατά την οποία ένας ασταθής πυρήνας μετατρέπεται σε σταθερότερο με ταυτόχρονη εκπομπή σωματιδιακής ή/και ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ένας πυρήνας θεωρείται σταθερός όταν η ενέργεια σύνδεσής του — δηλαδή η ενέργεια που συγκρατεί τα νουκλεονία του — είναι μεγαλύτερη από εκείνη των πιθανών προϊόντων διάσπασής του. Αντιθέτως, σε βαρείς πυρήνες με μεγάλο αριθμό νουκλεονίων, οι ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις μειώνουν την αποτελεσματικότητά τους λόγω της αυξημένης απόστασης μεταξύ των πρωτονίων, με αποτέλεσμα οι απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις να κυριαρχούν και ο πυρήνας να καθίσταται ασταθής (Serway et al., 2014).

Η ραδιενεργός διάσπαση είναι φαινόμενο στατιστικής φύσης και δεν εξαρτάται από εξωτερικές συνθήκες. Η χρονική στιγμή κατά την οποία ένας ασταθής πυρήνας θα διασπαστεί δεν μπορεί να προβλεφθεί, καθώς η διαδικασία υπακούει σε πιθανοκρατικούς κανόνες και κάθε νουκλίδιο έχει καθορισμένη πιθανότητα διάσπασης. Αντίθετα, η πυρηνική σχάση, αν και αποτελεί μορφή διάσπασης, δεν πραγματοποιείται αυθόρμητα αλλά προκαλείται από την επίδραση εξωτερικού παράγοντα, όπως η πρόσκρουση ενός νετρονίου σε έναν βαρύ πυρήνα, π.χ. ουράνιο-235 (Lamarsh and Baratta, 2001). Η διαδικασία αυτή οδηγεί στη θραύση του πυρήνα σε δύο μικρότερους πυρήνες και στην απελευθέρωση ενέργειας και νέων νετρονίων.

Τα νετρόνια που εκλύονται κατά τη σχάση είναι δυνατόν να προσκρούσουν σε άλλους πυρήνες, προκαλώντας νέες σχάσεις. Η διαδοχική αυτή διαδικασία ονομάζεται αλυσιδωτή αντίδραση και η εξέλιξή της εξαρτάται από τον συντελεστή πολλαπλασιασμού νετρονίων (k). Όταν $k < 1$, η αντίδραση εξασθενεί, ενώ όταν $k = 1$, η διαδικασία διατηρείται σταθερή — συνθήκη επιθυμητή για την ομαλή λειτουργία ενός πυρηνικού αντιδραστήρα. Αν $k > 1$, η αντίδραση ενισχύεται εκθετικά, οδηγώντας σε ανεξέλεγκτη αύξηση του αριθμού των σχάσεων, όπως συμβαίνει σε πυρηνικές εκρήξεις ή σε περιπτώσεις δυσλειτουργίας. Ο έλεγχος του k είναι κρίσιμος για την ασφαλή και αποδοτική εκμετάλλευση της πυρηνικής ενέργειας (World Nuclear Association, 2021).



Εικόνα 1: Αναπαράσταση μιας αλυσιδωτής αντίδρασης σχάσεων (πηγή: Πετρόπουλος Ν., Εισαγωγή στην πυρηνική τεχνολογία, 2019).

1.3.2 Είδη ραδιενεργού ακτινοβολίας

Η ραδιενεργή ακτινοβολία που εκπέμπεται κατά τη διάρκεια πυρηνικών διασπάσεων — συμπεριλαμβανομένης της πυρηνικής σχάσης — εμφανίζεται σε διάφορες μορφές, ανάλογα με τη φύση της διάσπασης και τα προϊόντα που προκύπτουν. Οι βασικοί τύποι ραδιενεργής ακτινοβολίας είναι οι εξής:

- Ακτινοβολία α (άλφα)
- Ακτινοβολία β (β^- και β^+)
- Ακτινοβολία γ (γάμα)

Οι μορφές αυτές αντιστοιχούν σε διαφορετικούς μηχανισμούς διάσπασης και εκπέμπονται σε ποικίλους συνδυασμούς, ανάλογα με τη δομή και την ενεργειακή κατάσταση του πυρήνα.

Αν και υπάρχουν και άλλες πιο σπάνιες μορφές ραδιενεργής ακτινοβολίας, όπως η εκπομπή νετρονίων, φωτονίων υψηλής ενέργειας από ισομερείς καταστάσεις, ή εκπομπές βαρέων ιόντων, στην παρούσα εργασία εστιάζουμε στους τρεις κυριότερους τύπους, καθώς αποτελούν τις συχνότερα παρατηρούμενες μορφές τόσο από πλευράς συχνότητας εμφάνισης όσο και από άποψη ποσότητας εκπομπής ενέργειας.

➤ Ακτινοβολία τύπου α

Η ακτινοβολία α είναι σωματιδιακή μορφή ιονίζουσας ακτινοβολίας, κατά την οποία ο ασταθής πυρήνας εκπέμπει σωματίδιο α , δηλαδή έναν πυρήνα ηλίου-4 (^4He), αποτελούμενο από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια, χωρίς ηλεκτρόνια. Κατά την

εκπομπή, ο ατομικός αριθμός του πυρήνα μειώνεται κατά δύο και ο μαζικός κατά τέσσερις, οδηγώντας σε μεταστοιχείωση. Η διάσπαση α παρατηρείται κυρίως σε βαριά, ασταθή στοιχεία ($A > 140$) και συνοδεύεται από απελευθέρωση ενέργειας λόγω διαφοράς μάζας (mass defect).

Εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους και του διπλού θετικού φορτίου, τα σωματίδια α έχουν ισχυρή ιονιστική ικανότητα αλλά πολύ μικρή εμβέλεια – μερικά εκατοστά στον αέρα ή λίγα μικρόμετρα σε ιστό. Μπορούν να ανασχεθούν πλήρως από φύλλο χαρτιού ή την κερατινοποιημένη στιβάδα του δέρματος, καθιστώντας τα μη επικίνδυνα εξωτερικά. Αν όμως εισέλθουν στον οργανισμό (π.χ. μέσω εισπνοής, κατάποσης ή τραύματος), προκαλούν έντονη βιολογική βλάβη λόγω της υψηλής ενεργειακής απόθεσης ανά μονάδα μήκους (LET). Η κοσμική ακτινοβολία περιλαμβάνει επίσης σωματίδια α ηλιακής προέλευσης, τα οποία όμως απορροφώνται σε μεγάλο βαθμό από τη γήινη ατμόσφαιρα.

➤ Ακτινοβολία τύπου β^- (βήτα μείον)

Η διάσπαση β αποτελεί μορφή ιονίζουσας σωματιδιακής ακτινοβολίας και περιλαμβάνει τρεις κύριους μηχανισμούς: τη διάσπαση β^- , τη διάσπαση β^+ και τη σύλληψη ηλεκτρονίου. Και στις τρεις περιπτώσεις παρατηρείται μετατροπή ενός νετρονίου σε πρωτόνιο ή αντιστρόφως, γεγονός που διατηρεί αμετάβλητο τον μαζικό αριθμό (A), αλλά μεταβάλλει τον ατομικό αριθμό (Z) κατά μία μονάδα, προκαλώντας μεταστοιχείωση του πυρήνα σε διαφορετικό στοιχείο.

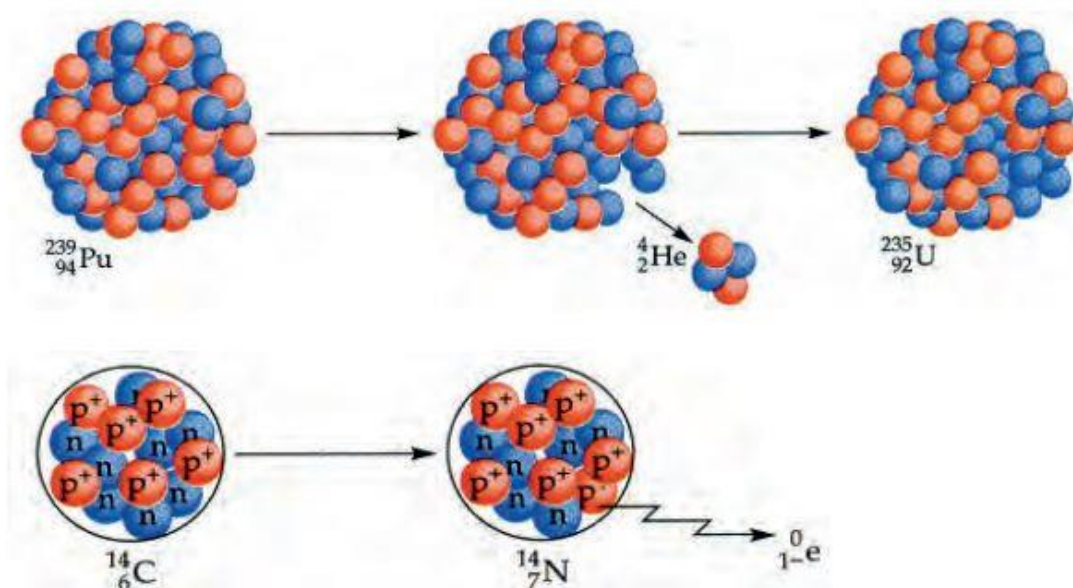
Στη διάσπαση β^- , η οποία συγκαταλέγεται στις συχνότερες μορφές ραδιενεργού διάσπασης, ένας πυρήνας με περίσσεια νετρονίων μετατρέπει ένα νετρόνιο σε πρωτόνιο. Ως αποτέλεσμα, αυξάνεται ο ατομικός αριθμός κατά μία μονάδα ($Z \rightarrow Z+1$), ενώ ο μαζικός αριθμός παραμένει σταθερός.

Η διάσπαση συνοδεύεται από την εκπομπή:

- ενός ηλεκτρονίου (β^- σωματίο) και
- ενός αντινετρίνου ηλεκτρονίου, το οποίο είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, έχει αμελητέα μάζα και σπιν $\frac{1}{2}$.

Το ηλεκτρόνιο δεν προϋπάρχει στον πυρήνα, αλλά δημιουργείται κατά τη στιγμή της διάσπασης προκειμένου να διατηρηθεί το ηλεκτρικό φορτίο, δεδομένου ότι η δημιουργία του νέου πρωτονίου προσθέτει θετικό φορτίο στον πυρήνα. Η εκπομπή του αντινετρίνου είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της στροφορμής και της ενέργειας, ενώ εξηγεί το συνεχές φάσμα ενεργειών που παρατηρείται στα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια, σύμφωνα με τις προβλέψεις της κβαντικής θεωρίας.

Η ενέργεια Q που απελευθερώνεται κατά τη διάσπαση β^- προκύπτει από τη διαφορά μάζας μεταξύ του μητρικού και του θυγατρικού νουκλιδίου (Krane, 1987).



Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση 2 διαφορετικών τύπων πυρηνικής διάσπασης. Επάνω: Διάσπαση α. Ένας μητρικός πυρήνας Πλουτωνίου 239 μετασχηματίζεται (διασπάται) σε θυγατρικό πυρήνα Ουρανίου 235 με ταυτόχρονη εκπομπή ενός πυρήνα Ηλίου 4. Κάτω: Σε μία διάσπαση τύπου β- ένας πυρήνας Άνθρακα 14 μεταπίπτει σε πυρήνα Αζώτου 14 με την μετατροπή ενός νετρονίου του αρχικού πυρήνα σε πρωτόνιο και την ταυτόχρονη εκπομπή ενός ηλεκτρονίου και ενός αντineutrίνου.

➤ Ακτινοβολία τύπου β^+

Η διάσπαση β^+ αποτελεί αντιστροφή της διάσπασης β^- και λαμβάνει χώρα σε πυρήνες με περίσσεια πρωτονίων. Σε αυτή τη διαδικασία, ένα πρωτόνιο μετατρέπεται σε νετρόνιο, μειώνοντας τον ατομικό αριθμό του πυρήνα κατά μία μονάδα ($Z \rightarrow Z-1$), ενώ ο μαζικός αριθμός (A) παραμένει αμετάβλητος.

Για τη διατήρηση του ηλεκτρικού φορτίου και της ενέργειας, εκπέμπονται:

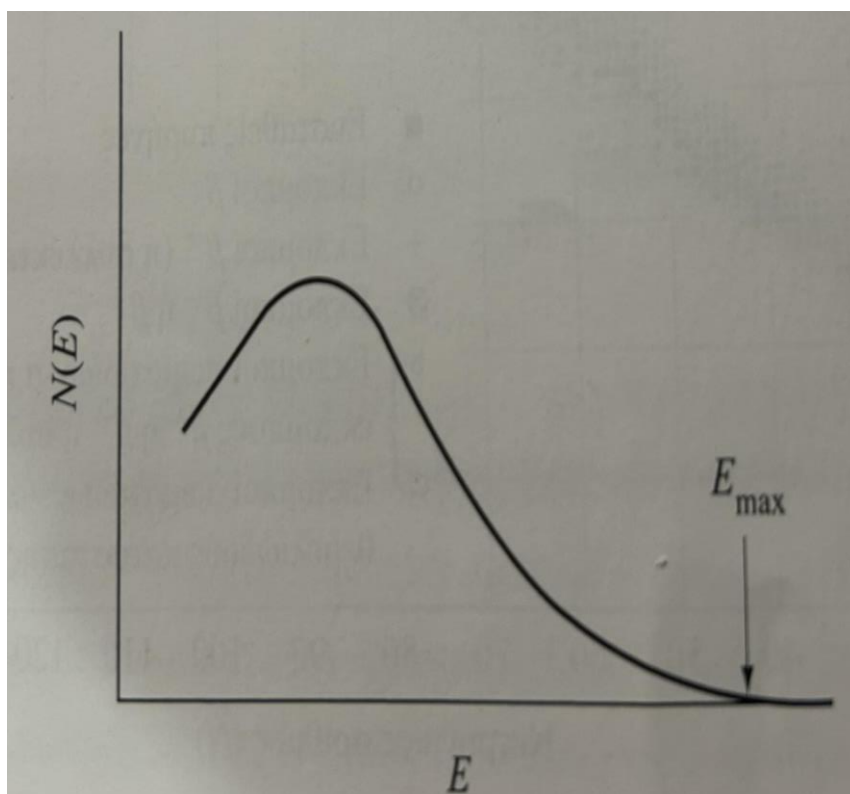
- Ένα ποζιτρόνιο (e^+), δηλαδή το αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου, με θετικό φορτίο.
- Ένα ηλεκτρονιακό νεutrίνο, σωματίδιο σχεδόν άμαζο, ουδέτερο και με σπιν $\frac{1}{2}$.

Το ποζιτρόνιο, αμέσως μετά την εκπομπή του, αλληλεπιδρά με ηλεκτρόνια της ύλης προκαλώντας εκμηδενισμό (annihilation), διαδικασία κατά την οποία η μάζα των δύο σωματιδίων μετατρέπεται πλήρως σε δύο φωτόνια των 511 keV. Η εκπομπή αυτή αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα της διάσπασης β^+ και αξιοποιείται στη τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (PET).

Η ενέργεια διάσπασης (Q) προκύπτει, όπως και στη διάσπαση β^- , από τη διαφορά μάζας μεταξύ του μητρικού και του θυγατρικού νουκλιδίου. Η διάσπαση είναι εφικτή μόνο όταν η διαφορά αυτή επαρκεί για τη δημιουργία ποζιτρονίου (ενέργεια κατώτατου ορίου $\approx 1,022$ MeV).

Τόσο τα ποζιτρόνια όσο και τα ηλεκτρόνια της διάσπασης β^- διαθέτουν μεγαλύτερη διεισδυτικότητα από τα σωματίδια α , λόγω της μικρότερης μάζας και της υψηλής ταχύτητάς τους. Παρά ταύτα, η ιονιστική τους δράση μπορεί να είναι σημαντική,

ιδιαίτερα σε παρατεταμένη ή υψηλής έντασης έκθεση, επηρεάζοντας ευαίσθητους ιστούς, τόσο εξωτερικά (δέρμα, οφθαλμικός επιπεφυκότας) όσο και εσωτερικά, μέσω εισπνοής ή κατάποσης ραδιοϊσοτόπων (Knoll, G. F. 2010).



14. Εικόνα 3: Τυπικό ενεργειακό φάσμα σωματιδίων που εκπέμπονται κατά την διάσπαση β με ΝΕ το πλήθος των ηλεκτρονίων συναρτήσει της κινητικής ενέργειας E (πηγή: Πετρόπουλος Ν., Εισαγωγή στην πυρηνική τεχνολογία, 4η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα, 904, 2019).

➤ Ακτινοβολία τύπου γ

Η ακτινοβολία γ είναι μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας, που αποτελείται από φωτόνια πολύ μικρού μήκους κύματος (περίπου 10^{-10} έως 10^{-14} m) και υψηλής συχνότητας, χωρίς να περιλαμβάνει σωματίδια (Knoll, 2010). Εκπέμπεται κυρίως ως δευτερογενές προϊόν πυρηνικών διασπάσεων τύπου α και β , καθώς και της πυρηνικής σχάσης, όταν ο θυγατρικός πυρήνας παραμένει σε διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση.

Κατά την αποδιέγερση αυτή, η πλεονάζουσα ενέργεια εκπέμπεται υπό μορφή φωτονίου γ , χωρίς να αλλάζει ο ατομικός ή ο μαζικός αριθμός του πυρήνα, αλλά μόνο η ενεργειακή του κατάσταση (Krane, 1987). Η ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου ισούται με τη διαφορά μεταξύ της διεγερμένης και της σταθερής κατάστασης του πυρήνα.

Η ακτινοβολία γ εκπέμπεται όταν η ενέργεια διέγερσης δεν επαρκεί για την εκπομπή σωματιδίων α ή β και η αποδιέγερση πραγματοποιείται αποκλειστικά με την εκπομπή φωτονίου. Στη Γη, πηγές ακτίνων γ περιλαμβάνουν τις πυρηνικές διασπάσεις, την

κοσμική ακτινοβολία από τον Ήλιο και το διάστημα, καθώς και την αυθόρμητη διάσπαση φυσικών ραδιοϊσοτόπων (Martin & Harbison, 2018).

Ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υψηλής ενέργειας, η ακτινοβολία γ έχει μεγάλη διεισδυτικότητα. Για την αποτελεσματική θωράκισή της απαιτούνται παχιά στρώματα υλικών υψηλής πυκνότητας, όπως μόλυβδος ή σκυρόδεμα (ICRP, 2007). Η έκθεση σε ακτινοβολία γ μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βιολογικές βλάβες, όπως καταστροφή κυττάρων, αλλοιώσεις στο DNA, ή ακόμα και θάνατο σε περίπτωση υψηλής δόσης ή παρατεταμένης έκθεσης (Hall & Giaccia, 2018). Η σοβαρότητα των επιπτώσεων εξαρτάται από την απορροφούμενη δόση και τη διάρκεια της έκθεσης.

1.2.3 Ελεγχόμενη και αυθόρμητη σχάση – Ρόλος της ενέργειας και των νετρονίων

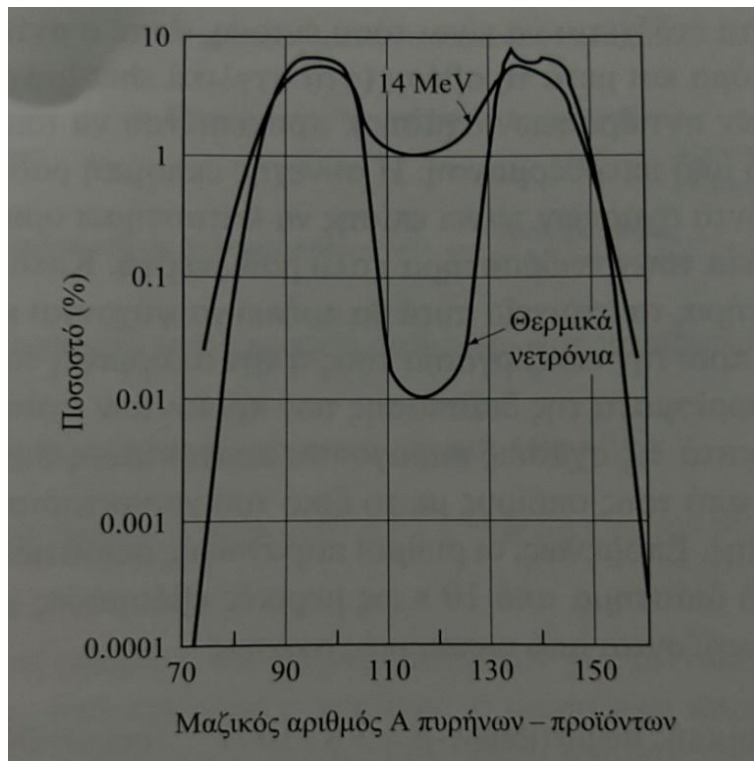
Η σχάση βαρέων πυρήνων αποτελεί εξώθερμη πυρηνική αντίδραση, κατά την οποία απελευθερώνεται σημαντική ποσότητα ενέργειας, κυρίως υπό μορφή θερμότητας, ως αποτέλεσμα της διάσπασης ασταθών πυρήνων (Krane, 1988). Πυρήνες με ατομικό αριθμό $Z > 90$, όπως το ουράνιο και το πλουτόνιο, παρουσιάζουν υψηλή αστάθεια και μπορούν να υποστούν αυτόματη σχάση (spontaneous fission) χωρίς εξωτερικό ερέθισμα. Πρόκειται όμως για σπάνιο φαινόμενο, με πολύ μικρό ρυθμό διάσπασης, και ως εκ τούτου δεν είναι αξιοποιήσιμο για πρακτικές ενεργειακές εφαρμογές (Glasstone & Sesonske, 1994).

Αντιθέτως, η ελεγχόμενη σχάση, όπως εφαρμόζεται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες, απαιτεί την απορρόφηση εξωτερικού νετρονίου που παρέχει στον πυρήνα την αναγκαία κρίσιμη ενέργεια (critical energy) για να υπερκεραστεί η έλξη των ισχυρών πυρηνικών δυνάμεων και να επικρατήσουν οι απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις μεταξύ των πρωτονίων, οδηγώντας σε διάσπαση (Knoll, 2010).

Η απορρόφηση νετρονίων προτιμάται καθώς, λόγω της ηλεκτρικής ουδετερότητάς τους, τα νετρόνια διεισδύουν ευκολότερα στον πυρήνα και αυξάνουν την αστάθειά του. Η επαγόμενη σχάση είναι κατά κανόνα ασύμμετρη, δηλαδή τα θυγατρικά προϊόντα έχουν άνισους μαζικούς αριθμούς. Σε θερμική σχάση ουρανίου-235, για παράδειγμα, τα προϊόντα συγκεντρώνονται σε δύο κορυφές μαζικού αριθμού, μία κοντά στο 95 και μία κοντά στο 140 (OECD/NEA, 2008).

Η κατανομή των προϊόντων σχάσης εξαρτάται από την ενέργεια των νετρονίων που προκαλούν τη σχάση. Σε υψηλότερες ενέργειες (π.χ. ~ 14 MeV), όπως παρατηρείται σε πειράματα με ταχεία νετρόνια, η κατανομή γίνεται πιο συμμετρική ως προς τον μαζικό αριθμό (Möller et al., 2001). Αυτό αποτυπώνεται σε λογαριθμικά διαγράμματα κατανομής, με τις καμπύλες να αποκτούν μορφή κοίλη προς τα κάτω σε σύγκριση με την έντονα διπλοκορυφική μορφή της θερμικής σχάσης.

Τέλος, τα προϊόντα της σχάσης συνοδεύονται από περίσσεια νετρονίων, καθώς οι θυγατρικοί πυρήνες είναι συνήθως μακριά από τη γραμμή σταθερότητας. Αυτό διευκολύνει περαιτέρω μεταστοιχειώσεις και αποδιεγέρσεις, μέσω εκπομπής γ -ακτινοβολίας ή επιπρόσθετων νετρονίων, ενισχύοντας έτσι την αλυσιδωτή αντίδραση σε ένα λειτουργικό αντιδραστήρα (IAEA, 2018).



Εικόνα 4: Ποσοστό των σχέσεων που παράγουν πυρήνες-προϊόντα μαζικού αριθμού A για σχέσεις ουρανίου ^{235}U με θερμικά νετρόνια και νετρόνια ενέργειας 14 MeV.

1.4 Ισότοπα ουρανίου και τεχνικές εμπλουτισμού

Το ουράνιο είναι το πλέον διαδεδομένο φυσικό στοιχείο με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του 90 και αποτελεί βασική πρώτη ύλη για την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας (Krane, 1988). Στη φύση απαντάται κυρίως υπό μορφή δύο ισοτόπων: του ουρανίου-238 (^{238}U), που καταλαμβάνει περίπου το 99,27% του φυσικού ουρανίου, και του ουρανίου-235 (^{235}U), το οποίο αντιστοιχεί μόλις στο 0,72% (IAEA, 2018). Υπάρχει επίσης και το εξαιρετικά σπάνιο ισότοπο ουρανίου-234 (^{234}U), με ποσοστό 0,0055%, το οποίο είναι προϊόν της ραδιενεργού αποσύνθεσης του ^{238}U .

Το ^{235}U είναι σχάσιμο με θερμικά νετρόνια και έχει την ιδιότητα να υφίσταται επαγόμενη σχάση με υψηλή πιθανότητα, δημιουργώντας αλυσιδωτές αντιδράσεις. Αντιθέτως, το ^{238}U δεν είναι άμεσα σχάσιμο από θερμικά νετρόνια, αν και μπορεί να μετατραπεί σε πλουτόνιο-239 (^{239}Pu) μέσω απορρόφησης νετρονίου και επακόλουθης β -διάσπασης (Glasstone & Sesonske, 1994).

Η σπανιότητα του ^{235}U στη φύση δημιουργεί την ανάγκη για εμπλουτισμό του φυσικού ουρανίου, δηλαδή αύξηση του ποσοστού του σχάσιμου ισοτόπου πάνω από το φυσικό 0,72%. Η συγκέντρωση του ^{235}U καθορίζει και τη χρήση του ουρανίου:

- Φυσικό ουράνιο (natural uranium): ~0,72% ^{235}U
- Χαμηλού εμπλουτισμού (LEU): 3–5% ^{235}U (τυπικό για πυρηνικούς αντιδραστήρες)
- Υψηλού εμπλουτισμού (HEU): >20% ^{235}U (χρήση σε ερευνητικούς αντιδραστήρες ή στρατιωτικούς σκοπούς)

Οι τεχνικές εμπλουτισμού έχουν εξελιχθεί σημαντικά και περιλαμβάνουν:

- Διαχυτική μέθοδος (gaseous diffusion): Ιστορική τεχνική, βασισμένη στη διαφορά μοριακής μάζας μεταξύ UF_6 που περιέχει ^{235}U και UF_6 με ^{238}U .
- Φυγοκέντρωση αερίου (gas centrifugation): Σύγχρονη, πιο αποδοτική μέθοδος, όπου το εξαφθοριούχο ουράνιο (UF_6) διαχωρίζεται σε κυλίνδρους που περιστρέφονται με πολύ υψηλές ταχύτητες.
- Μέθοδοι λέιζερ (AVLIS, MLIS): Υπό ανάπτυξη για υψηλή επιλεκτικότητα και απόδοση, βασισμένες σε φασματοσκοπικές διαφορές των ισοτόπων (World Nuclear Association, 2023).

Ο εμπλουτισμός του ουρανίου αποτελεί κρίσιμο στάδιο για την πυρηνική τεχνολογία και υπόκειται σε αυστηρή διεθνή ρύθμιση, ώστε να διασφαλίζεται η ειρηνική χρήση του και να αποτρέπεται η διάδοση πυρηνικών όπλων (IAEA, 2021).

1.5 Ραδιενεργές πηγές από το γεωλογικό περιβάλλον-Το παράδειγμα του ραδονίου

Η πυρηνική σχάση αξιοποιείται τεχνολογικά εδώ και περίπου 80 έτη, με εφαρμογές τόσο στον τομέα της ειρηνικής χρήσης της πυρηνικής ενέργειας (όπως στην ηλεκτροπαραγωγή μέσω πυρηνικών αντιδραστήρων), όσο και στον στρατιωτικό τομέα, με τη μορφή της ανεξέλεγκτης σχάσης σε πυρηνικά όπλα (Krane, 1988).

Ωστόσο, εκτός από τις τεχνητές πηγές, σημαντική είναι και η φυσική ραδιενέργεια του γεωλογικού περιβάλλοντος, η οποία προκύπτει από την παρουσία ραδιενεργών στοιχείων στο υπέδαφος και τα πετρώματα. Τα πλέον διαδεδομένα φυσικά ραδιοϊσότοπα είναι το ουράνιο (^{238}U), το ράδιο (^{226}Ra) και το θόριο (^{232}Th), τα οποία απαντώνται σε μεταλλεύματα και φυσικά πετρώματα (IAEA, 2016). Μέσω της φυσικής ραδιενεργού διάσπασης τους, παράγονται θυγατρικά στοιχεία, μεταξύ των οποίων και ραδιενεργά ευγενή αέρια, όπως το ραδόνιο (^{222}Rn).

Το ραδόνιο είναι προϊόν της αλυσίδας διάσπασης του ^{238}U και προέρχεται από τη διάσπαση του ραδίου-226. Ανήκει στα ευγενή αέρια, έχει ατομικό αριθμό 86 και είναι ραδιενεργό αέριο, με χρόνο ημιζωής περίπου 3,8 ημέρες. Η διάσπασή του είναι τύπου α, με εκπομπή σωματιδίων α σταθερών και χαρακτηριστικών ενεργειών, τα οποία είναι μοναδικά για κάθε ισότοπο της διάσπασης.

Η εκπομπή σωματιδίων α από το ραδόνιο δεν είναι συνεχής, αλλά λαμβάνει χώρα σε διακριτές ενεργειακές στάθμες, όπως ορίζεται από την κβαντική θεωρία πυρηνικών ενεργειακών επιπέδων. Το φάσμα αυτών των εκπομπών θυμίζει τα γραμμικά φάσματα φωτονίων στην ατομική φυσική, με την κάθε ενεργειακή γραμμή να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη πυρηνική μετάπτωση (Knoll, 2010).

Η παρουσία του ραδονίου στην επιφάνεια της Γης προκύπτει κυρίως μέσω μεταφοράς από το υπέδαφος, ιδίως σε περιοχές με γρανιτικά ή πλουτώνια πετρώματα και υψηλή περιεκτικότητα σε ουράνιο. Λόγω της χημικής του αδράνειας, δεν συνδέεται με το έδαφος και διαχέεται εύκολα στον αέρα, συσσωρεύεται δε σε κλειστούς χώρους (π.χ. υπόγεια, κατοικίες), όπου η εισπνοή του αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία, καθώς τα σωματίδια α που εκπέμπει είναι έντονα ιονίζοντα και μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στον πνευμονικό ιστό (WHO, 2009).

1.6 Πυρηνική σύντηξη

➤ Ορισμός και Βασικές Αρχές

Η πυρηνική σύντηξη είναι η διεργασία κατά την οποία δύο ελαφροί πυρήνες ενώνονται και σχηματίζουν έναν βαρύτερο πυρήνα, απελευθερώνοντας παράλληλα μεγάλα ποσά ενέργειας [5, 6, 15]. Σε αντίθεση με την πυρηνική σχάση —όπου πολύ βαρείς πυρήνες διασπώνται σε ελαφρύτερους— η σύντηξη αφορά την αντίστροφη διαδικασία: τη συγχώνευση πυρήνων με μικρό ατομικό αριθμό, κυρίως ισοτόπων του υδρογόνου.

Συνηθέστερα, η αντίδραση πραγματοποιείται μεταξύ δευτερίου (^2H) και τριτίου (^3H), οδηγώντας στη δημιουργία πυρήνα ηλίου (^4He) και ταυτόχρονη απελευθέρωση νετρονίων και ενέργειας. Τα ενεργειακά αποθέματα που αποδίδονται από μια αντίδραση σύντηξης είναι κατά τάξεις μεγέθους μεγαλύτερα από εκείνα μιας αντίδρασης σχάσης, γεγονός που καθιστά τη σύντηξη ιδανική, θεωρητικά, για παραγωγή ενέργειας με υψηλή απόδοση και χωρίς ραδιενεργά απόβλητα μεγάλης διάρκειας ζωής.

➤ Η Σύντηξη στον Ήλιο και η Σημασία της για τη Ζωή

Στο Ηλιακό μας σύστημα, ο Ήλιος λειτουργεί ως ένα φυσικό εργαστήριο συνεχούς πυρηνικής σύντηξης. Περίπου 75% της μάζας του Ήλιου αποτελείται από υδρογόνο, το οποίο υφίσταται θερμοπυρηνικές αντιδράσεις στο εσωτερικό του, δημιουργώντας ήλιο και εκλύοντας τεράστια ποσά ηλιακής ακτινοβολίας προς το Διάστημα. Το υπόλοιπο περίπου 25% αποτελείται από ήλιο, που είναι το προϊόν των αντιδράσεων σύντηξης. Οι αντιδράσεις αυτές λαμβάνουν χώρα κάθε κλάσμα του δευτερολέπτου, διατηρώντας τη λαμπρότητα και τη θερμική ενέργεια του Ήλιου επί δισεκατομμύρια χρόνια.

Η ζωή στη Γη εξαρτάται άμεσα από τη διαρκώς αυτοτροφοδοτούμενη διαδικασία της πυρηνικής σύντηξης που λαμβάνει χώρα στο άστρο του ηλιακού μας συστήματος. Η διαδικασία αυτή αναμένεται να συνεχιστεί για τουλάχιστον ακόμη 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια, μέχρις ότου εξαντληθεί το απόθεμα υδρογόνου στον Ήλιο.

Οι πρώτες προσπάθειες του ανθρώπου να αναπαραγάγει τεχνητά τις συνθήκες πυρηνικής σύντηξης δεν στόχευαν στην ειρηνική αξιοποίησή της, αλλά αντίθετα στην κατασκευή θερμοπυρηνικών όπλων, με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα τη βόμβα υδρογόνου (θερμοπυρηνική βόμβα), όπως θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

➤ Τεχνικές Προϋποθέσεις και Δυσκολίες

Αξίζει να σημειωθεί ότι η συνένωση δύο πυρήνων ελαφριάς μάζας είναι εφικτή μόνο όταν αποκτήσουν πολύ μεγάλη κινητική ενέργεια πριν από τη σύγκρουση και συγχώνευσή τους. Ωστόσο, ακόμη και τότε, απαιτούνται ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας (εκατομμύρια βαθμοί Κελσίου) και πίεσης, ώστε να ξεπεραστεί η ισχυρή ηλεκτροστατική άπωση μεταξύ των θετικά φορτισμένων πυρήνων.

Σήμερα, η επίτευξη ελεγχόμενης πυρηνικής σύντηξης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τεχνολογικούς στόχους της επιστημονικής κοινότητας, με συνεχή πειραματική προσπάθεια για την υλοποίησή της. Σκοπός είναι η παραγωγή άφθονης, καθαρής και σχεδόν ανεξάντλητης ενέργειας, με χρονική προοπτική που ξεπερνά τις τρέχουσες ανθρώπινες δυνατότητες αντίληψης.

Ο βασικός στόχος της έρευνας επικεντρώνεται στην ανάπτυξη τεχνολογιών που θα επιτρέψουν την ασφαλή και οικονομικά βιώσιμη λειτουργία αντιδραστήρων σύντηξης, καθώς και στην παραγωγή νέων υλικών με ικανότητα αντοχής στις εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις που απαιτούνται για τη διατήρηση του φαινομένου της σύντηξης.

➤ Το Πρόγραμμα ITER

Το πρόγραμμα ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor – Διεθνής Θερμοπυρηνικός Πειραματικός Αντιδραστήρας) αποτελεί τη σημαντικότερη μέχρι σήμερα διεθνή ερευνητική προσπάθεια για την επίτευξη ελεγχόμενης πυρηνικής σύντηξης. Εδρεύει στην περιοχή Cadarache της νότιας Γαλλίας και περιλαμβάνει τη συνεργασία 35 κρατών, μεταξύ των οποίων οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Ρωσία, η Κίνα, η Ινδία, η Ιαπωνία και η Νότια Κορέα.

Ο βασικός στόχος του ITER είναι να αποδείξει, μέσω καινοτόμων τεχνικών μεθόδων, ότι η πυρηνική σύντηξη μπορεί να εφαρμοστεί με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα για την παραγωγή ενέργειας. Αν επιτευχθεί αυτό, θα πρόκειται για μία ενεργειακή πηγή σχεδόν απεριόριστη, με ελάχιστες εκπομπές CO₂, χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και προοπτική βιώσιμης και οικονομικά αποδοτικής λειτουργίας.

Το ITER έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο τόσο σε επίπεδο επιστημονικής κατανόησης των φαινομένων της θερμοπυρηνικής σύντηξης, όσο και στην τεχνολογική ανάπτυξη κρίσιμων υποδομών. Ειδικότερα, έχει γίνει μεγάλη πρόοδος στον τομέα του ελέγχου της διαδικασίας της αλυσιδωτής σύντηξης και στη διαχείριση των εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών που απαιτούνται (άνω των 150 εκατομμυρίων βαθμών Κελσίου).

Για την επίτευξη αυτών των στόχων, έχουν αναπτυχθεί νέα σύνθετα υλικά, ικανά να αντέχουν ακραίες θερμοκρασίες, καθώς και μαγνητικά συστήματα περιορισμού (όπως το Tokamak) για τη διατήρηση του πλάσματος στο εσωτερικό του αντιδραστήρα χωρίς να έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα.

Παρά το γεγονός ότι η εμπορική εκμετάλλευση της σύντηξης παραμένει σε ερευνητικό στάδιο και δεν έχει ακόμη κατασκευαστεί πλήρως λειτουργικός αντιδραστήρας παραγωγής ενέργειας, το ITER αποτελεί ένα τεράστιο επιστημονικό και τεχνολογικό άλμα προς αυτή την κατεύθυνση. Επιπλέον, προάγει τη διεθνή συνεργασία στον τομέα της έρευνας και προσφέρει ευκαιρίες συνεκπαίδευσης και ανταλλαγής τεχνογνωσίας ανάμεσα σε επιστήμονες και μηχανικούς από όλο τον κόσμο.

➤ Προοπτικές

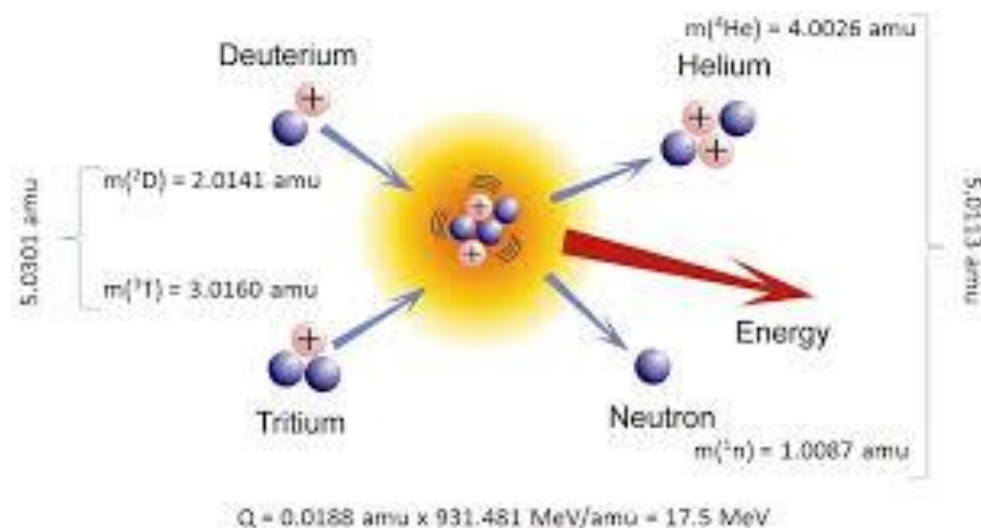
Αξίζει να τονιστεί ότι η πυρηνική σύντηξη αποτελεί μια εξαιρετικά σύνθετη και τεχνικά απαιτητική διαδικασία, της οποίας η πλήρης αξιοποίηση ως πηγή ενέργειας απαιτεί ακόμη εκτεταμένη έρευνα, τεχνολογική πρόοδο και σημαντικούς οικονομικούς πόρους. Παρόλο που τα μέχρι σήμερα πειραματικά δεδομένα είναι ενθαρρυντικά, η επίτευξη σταθερής, ελεγχόμενης σύντηξης σε βιομηχανική κλίμακα εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση.

Ωστόσο, η σύντηξη παρουσιάζει σαφή πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες πυρηνικές τεχνολογίες, όπως η σχάση, κυρίως ως προς την περιβαλλοντική ασφάλεια, τη μειωμένη παραγωγή ραδιενεργών αποβλήτων και την εξαιρετικά υψηλή ενεργειακή απόδοση. Αν τελικά καταστεί εφικτή, θα προσφέρει σχεδόν απεριόριστη, ασφαλή και

καθαρή ενέργεια, με θεμελιώδη συμβολή στην ενεργειακή μετάβαση και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

Παρά τα παραπάνω, η επίτευξη λειτουργικής πυρηνικής σύντηξης παραμένει ανοικτό επιστημονικό και τεχνολογικό ζήτημα, που μελετάται συστηματικά διεθνώς, στοχεύοντας στην υπέρβαση των τεχνικών και φυσικών περιορισμών της.

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζεται συμβολική απεικόνιση της διαδικασίας πυρηνικής σύντηξης, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της αρχής λειτουργίας της.



Εικόνα 5: Αναπαράσταση πυρηνικής σύντηξης ισотόπων υδρογόνου σε Ήλιο και εκλυόμενης ενέργειας. Όπου Q η διαφορά τιμής ανάμεσα στις μάζες (amu) των αρχικών δρώντων (πυρήνες Δευτέριου + Τρίτιου), με τις μάζες των τελικών προϊόντων (πυρήνας Ηλίου + νετρόνιο) $\times c^2$, εκφρασμένη σε μονάδες ενέργειας στο υποατομικό πεδίο (MeV). (πηγή: nuclear-power.com).

2. Η ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΟΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

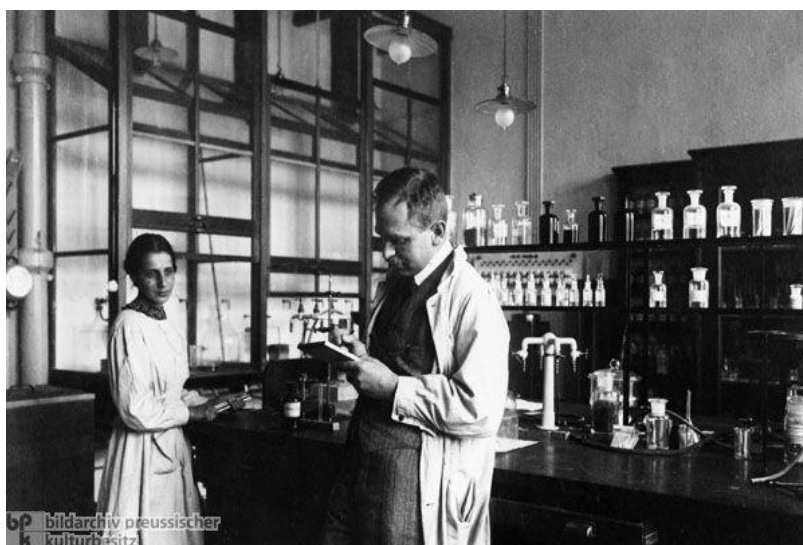
2.1 Ανάπτυξη της πυρηνικής τεχνολογίας.

2.1.1 Η πρώτη ελεγχόμενη σχάση και το Σχέδιο Μανχάταν.

Η πυρηνική σχάση, δηλαδή η διάσπαση βαρέων πυρήνων υπό την επίδραση νετρονίων, αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη της πυρηνικής τεχνολογίας. Η ανακάλυψη του φαινομένου το 1938 από τον Otto Hahn και τον Fritz Strassmann, και η ορθή του ερμηνεία από τους Lise Meitner και Otto Frisch, οδήγησε στην κατανόηση της τεράστιας ποσότητας ενέργειας που απελευθερώνεται κατά τη διάσπαση των πυρήνων [IAEA, 2022].

Ο Enrico Fermi, ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του 1930, είχε επισημάνει τη σημασία των θερμικών νετρονίων για την επίτευξη σχάσης σε ισότοπα όπως το ουράνιο-235. Το συγκεκριμένο ισότοπο αποδείχθηκε ιδανικό, λόγω της ικανότητάς του να διασπάται με χαμηλής ενέργειας νετρόνια, ξεκινώντας αλυσιδωτές αντιδράσεις μεγάλης απόδοσης ενέργειας [Fermi, 1935].

Το 1942, στο πλαίσιο του Σχεδίου Μανχάταν, κατασκευάστηκε ο πρώτος πυρηνικός αντιδραστήρας στο Σικάγο, με την ενεργή συμμετοχή του Fermi. Το σχέδιο, υπό την επιστημονική διεύθυνση του Robert Oppenheimer, αποτέλεσε τομή στην εφαρμοσμένη πυρηνική φυσική και είχε ως στόχο την κατασκευή των πρώτων πυρηνικών όπλων [Rhodes, 1986].



Εικόνα 6: Ο Γερμανός χημικός Otto Hahn.

2.1.2 Από τη Χιροσίμα στην ειρηνική χρήση της πυρηνικής ενέργειας

Η πρώτη πολεμική χρήση της πυρηνικής ενέργειας πραγματοποιήθηκε τον Αύγουστο του 1945, με τη ρίψη ατομικών βομβών στις ιαπωνικές πόλεις Χιροσίμα και Ναγκασάκι. Οι επιπτώσεις ήταν δραματικές, τόσο από άποψη άμεσης καταστροφής όσο και μακροπρόθεσμων ραδιενεργών επιβαρύνσεων στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία [UNSCEAR, 2000].

Ωστόσο, μόλις λίγα χρόνια αργότερα, ξεκίνησε η ειρηνική αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας. Στις 27 Ιουνίου 1954, στο Ομπνίνσκ της Σοβιετικής Ένωσης, λειτούργησε για πρώτη φορά αντιδραστήρας συνδεδεμένος με ηλεκτρικό δίκτυο, αποδεικνύοντας ότι η πυρηνική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών, χωρίς καταστροφικές συνέπειες όταν ελέγχεται σωστά [World Nuclear Association, 2023]. .

Διάδοση της πυρηνικής τεχνολογίας στον κόσμο

Από τη δεκαετία του 1950 και εξής, η εξάπλωση της πυρηνικής ενέργειας υπήρξε ραγδαία. Πέρα από τον στρατιωτικό τομέα, δόθηκε έμφαση στις ειρηνικές εφαρμογές, κυρίως στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η Διεθνής Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ) καταγράφει σήμερα 440 πυρηνικούς αντιδραστήρες σε 32 χώρες, με συνολική ισχύ άνω των 390 GW. Αυτοί οι αντιδραστήρες καλύπτουν περίπου το 10% της παγκόσμιας ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια, μειώνοντας σε σημαντικό βαθμό την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα [ΙΑΕΑ, 2023].

2.3. Πυρηνικά όπλα και πυρηνικές βόμβες.

Όταν ο άνθρωπος συνειδητοποίησε τη τεράστια ποσότητα ενέργειας που μπορεί να απελευθερωθεί μέσω της τεχνητά προκληθείσας και ανεξέλεγκτης πυρηνικής σχάσης, η πρώτη εφαρμογή που επιδιώχθηκε ήταν η στρατιωτική αξιοποίησή της, με στόχο τη δημιουργία πυρηνικών όπλων. Τα όπλα αυτά είτε δοκιμάστηκαν πειραματικά από μεγάλες δυνάμεις στο πλαίσιο πυρηνικών δοκιμών, είτε — ευτυχώς μόνο μία φορά στην ιστορία — χρησιμοποιήθηκαν σε πραγματικές συνθήκες πολέμου.

Η πρώτη δοκιμή πυρηνικού όπλου πραγματοποιήθηκε πριν από τη λήξη του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, στις 16 Ιουλίου 1945, στο πεδίο βολής Alamogordo στην Πολιτεία Νέο Μεξικό των Ηνωμένων Πολιτειών. Επρόκειτο για μια βόμβα πλουτωνίου ισχύος περίπου 18,6 κιλοτόνων ισοδύναμου TNT, παρόμοιας τεχνολογίας με εκείνη που χρησιμοποιήθηκε αργότερα στην επίθεση στο Ναγκασάκι (Rhodes, 1986).

Σύμφωνα με τον ορισμό της Απόφασης 1653 (XVI) της Γενικής Συνέλευσης του ΟΗΕ (1961), «πυρηνικό όπλο είναι οποιαδήποτε συσκευή ικανή να απελευθερώσει κατά τρόπο ανεξέλεγκτο πυρηνική ενέργεια και να διαθέτει τα αναγκαία χαρακτηριστικά για χρήση σε πολεμικές επιχειρήσεις» (United Nations, 1961).

Στις 6 Αυγούστου 1945, χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην ιστορία πυρηνικό όπλο σε εμπόλεμη σύρραξη: μια βόμβα ουρανίου-235 (^{235}U), ισχύος περίπου 15 κιλοτόνων, ρίφθηκε στην ιαπωνική πόλη Χιροσίμα, η οποία αριθμούσε περίπου 255.000 κατοίκους. Τρεις ημέρες αργότερα, στις 9 Αυγούστου, πραγματοποιήθηκε η δεύτερη πυρηνική επίθεση, αυτή τη φορά στην πόλη Ναγκασάκι, με πληθυσμό περίπου

195.000 κατοίκων, μέσω της ρίψης βόμβας πλουτωνίου-239 (^{239}Pu), ισχύος 21 κιλοτόνων (Hersey, 1946; Glasstone & Dolan, 1977).

Οι συνέπειες των επιθέσεων υπήρξαν καταστροφικές. Εκτιμάται ότι περισσότεροι από 210.000 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους εντός των πρώτων μηνών, ενώ χιλιάδες επιζώντες υπέστησαν σοβαρές μακροχρόνιες βλάβες, κυρίως καρκινικές νόσους και γενετικές μεταλλάξεις λόγω της έκθεσης στη ιονίζουσα ακτινοβολία. Οι επιπτώσεις αυτές δεν περιορίστηκαν μόνο στους επιζώντες, αλλά μεταδόθηκαν και στις επόμενες γενιές μέσω κληρονομικών βλαβών, η πλήρης έκταση των οποίων παραμένει αδύνατον να υπολογιστεί με ακρίβεια μέχρι σήμερα (Yamazaki, 1995; UNSCEAR, 2000).



Εικόνα 7: Οι ισοπεδωτικές καταστροφές από την ρίψη ατομικών βομβών σε Χιροσίμα και Ναγκασάκι [34].

2.3.1. Τυπολογία Πυρηνικών Όπλων: Ατομικά και Θερμοπυρηνικά

Ατομικά όπλα (A-bombs)

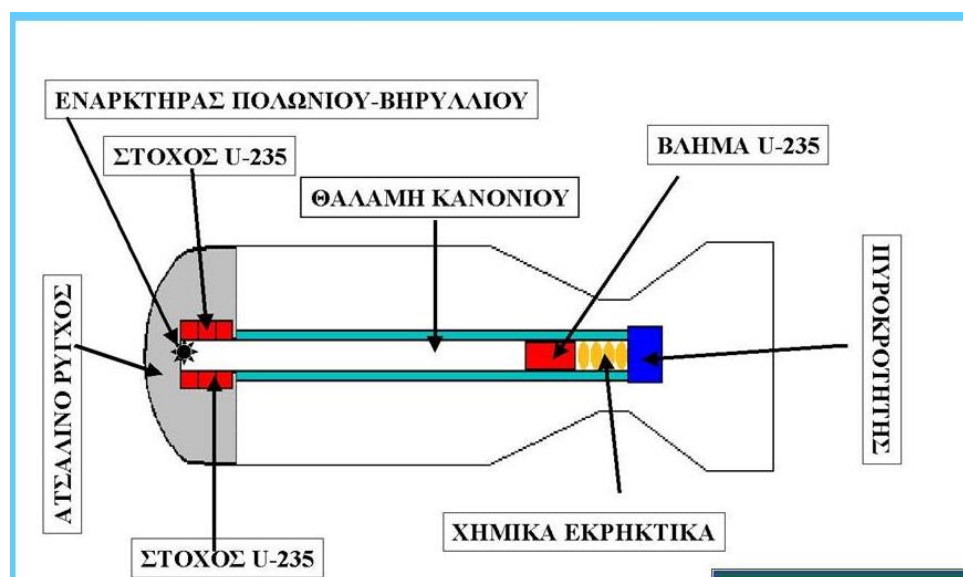
α πυρηνικά όπλα αυτού του τύπου βασίζονται αποκλειστικά στην ανεξέλεγκτη αλυσιδωτή αντίδραση πυρηνικής σχάσης. Η έκρηξη προκαλείται όταν μια κρίσιμη μάζα σχάσιμου υλικού — συνήθως ουρανίου-235 (^{235}U) ή πλουτωνίου-239 (^{239}Pu) — φτάσει τις κατάλληλες συνθήκες ώστε να ξεκινήσει και να διατηρηθεί η αντίδραση με αυτοτροφοδοτούμενο τρόπο (Glasstone & Dolan, 1977).

Οι βόμβες που χρησιμοποιήθηκαν στη Χιροσίμα και στο Ναγκασάκι τον Αύγουστο του 1945 αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτού του τύπου. Η εκλυόμενη ενέργεια περιορίζεται στο δυναμικό της σχάσης του πυρηνικού υλικού, προκαλώντας μεν εκτεταμένες καταστροφές, αλλά με σαφώς χαμηλότερη ισχύ σε σύγκριση με τα μεταγενέστερα θερμοπυρηνικά (ή υδρογονοβόλα) όπλα, τα οποία βασίζονται σε πυρηνική σύντηξη (Rhodes, 1986).

Θερμοπυρηνικά όπλα (H-bombs)

Τα θερμοπυρηνικά όπλα, γνωστά και ως βόμβες υδρογόνου (H-bombs), λειτουργούν με διπλό μηχανισμό πυρηνικής έκρηξης:

1. Αρχικό στάδιο σχάσης, όπου ενεργοποιείται μια μικρού μεγέθους ατομική βόμβα (A-bomb), προκαλώντας εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις.
2. Δευτερογενές στάδιο σύντηξης, κατά το οποίο οι συνθήκες αυτές προκαλούν πυρηνική σύντηξη ισοτόπων υδρογόνου, όπως δευτέριο (^2H) και τρίτιο (^3H), που βρίσκονται σε ένωση με υδρίδιο λιθίου (LiD) εντός μεταλλικού θαλάμου (Glasstone & Dolan, 1977; Hansen, 2001).



Εικόνα 8: Η βασική δομή λειτουργίας και πυροδότησης της ατομικής βόμβας "Little Boy", όπως είχαν ονομάσει την ατομική βόμβα ουρανίου (βόμβα πυρηνικής σχάσης) που έπληξε την Χιροσίμα, οι Αμερικανοί ειδικοί. (πηγή: Ελληνικό Κέντρο Ελέγχου Όπλων – 2013)..

Η πυρηνική σύντηξη —όπως αυτή που λαμβάνει χώρα στον Ήλιο— απελευθερώνει πολλαπλάσια ενέργεια σε σύγκριση με τη σχάση, αυξάνοντας κατακόρυφα την καταστροφική ισχύ της έκρηξης. Έτσι, τα θερμοπυρηνικά όπλα θεωρούνται πολύ ισχυρότερα από τα συμβατικά ατομικά (Rhodes, 1986).

Στα σύγχρονα θερμοπυρηνικά όπλα προστίθεται και τρίτο στάδιο, που αφορά το μεταλλικό περίβλημα του όπλου, συνήθως κατασκευασμένο από απεμπλουτισμένο ουράνιο (^{238}U). Αν και το ^{238}U δεν είναι σχάσιμο με θερμικά νετρόνια, στο εξαιρετικά θερμό περιβάλλον της έκρηξης και υπό την επίδραση ταχέων νετρονίων — προϊόντων της σύντηξης δευτερίου-τρίτιου — υποβάλλεται σε δευτερογενή σχάση (Gowing, 1964; Glasstone & Dolan, 1977). Αυτή η διαδικασία ενισχύει σημαντικά τη συνολική ισχύ του όπλου, συμβάλλοντας σε πάνω από το 50% της τελικής εκλυόμενης ενέργειας, ενώ παράγει επιπλέον ραδιενεργά κατάλοιπα, επιδεινώνοντας τη ραδιενεργό ρύπανση (fallout).

Η ενεργοποίηση των σύγχρονων πυρηνικών όπλων ξεκινά με τη χρήση χημικών εκρηκτικών (π.χ. TNT), τα οποία περιβάλλουν μια κοίλη, υποκρίσιμη μάζα από ουράνιο-235 ή πλουτώνιο-239 (εμπλουτισμένου σε >90%). Η τεχνική συγκλίνουσας έκρηξης (implosion) συμπιέζει το σχάσιμο υλικό, αυξάνοντας την πυκνότητά του μέχρι να γίνει υπερκρίσιμο. Παράλληλα, ειδική πηγή νετρονίων (όπως πολώνιο-210 με

βηρύλλιο) πυροδοτεί την αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης, η οποία οδηγεί στην απελευθέρωση τεράστιας ποσότητας ενέργειας (Smyth, 1945).

Στα πρώτης γενιάς ατομικά όπλα, όπως αυτά του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, χρησιμοποιήθηκε διαφορετικός μηχανισμός: δύο υποκρίσιμες μάζες σχάσιμου υλικού διατηρούνταν χωριστές και, κατά την έκρηξη, η μία εκτοξευόταν με μεγάλη ταχύτητα προς την άλλη, σχηματίζοντας στιγμιαία κρίσιμη μάζα και ξεκινώντας τη σχάση (Rhodes, 1986).

Ο διαχωρισμός μεταξύ «ατομικών» και «θερμοπυρηνικών» όπλων έχει σήμερα κυρίως ιστορική σημασία. Και οι δύο κατηγορίες βασίζονται σε πυρηνικές αντιδράσεις – είτε σχάσης είτε σύντηξης – και όχι σε χημικές διεργασίες, γεγονός που τις κατατάσσει συνολικά ως πυρηνικά όπλα.

Η εκρηκτική ισχύς των πυρηνικών όπλων μετράται σε κιλοτόνους (kt) και μεγατόνους (Mt), με 1 kt να ισοδυναμεί με 1.000 τόνους TNT και 1 Mt με 1.000.000 τόνους TNT.

Τα θερμοπυρηνικά όπλα παρουσιάζουν πολλαπλάσια ισχύ σε σχέση με τα ατομικά: οι πρώτες αποδίδονται συνήθως σε μεγατόνους, ενώ οι δεύτερες σε κιλοτόνους. Η τεχνολογική πρόοδος οδήγησε στην κατασκευή συμπαγών και πιο αποτελεσματικών θερμοπυρηνικών όπλων.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η βόμβα B83 των ΗΠΑ, θερμοπυρηνική βόμβα ελεύθερης πτώσης με ισχύ 1,2 Mt, περίπου 80 φορές ισχυρότερη από τη βόμβα της Χιροσίμα (15 kt), παρά το γεγονός ότι έχουν παρόμοιες διαστάσεις (U.S. DoD, 2004). Η B83 έχει μήκος 3,7 m και διάμετρο 46 cm, ενώ ζυγίζει περίπου 1.100 kg – πολύ μικρότερη από τα 4.400 kg της πρώτης ατομικής βόμβας.

Τέλος, τα πυρηνικά όπλα διακρίνονται σε στρατηγικά και τακτικά, αναλόγως του στόχου και της επιχειρησιακής τους χρήσης.

Στρατηγικά πυρηνικά όπλα

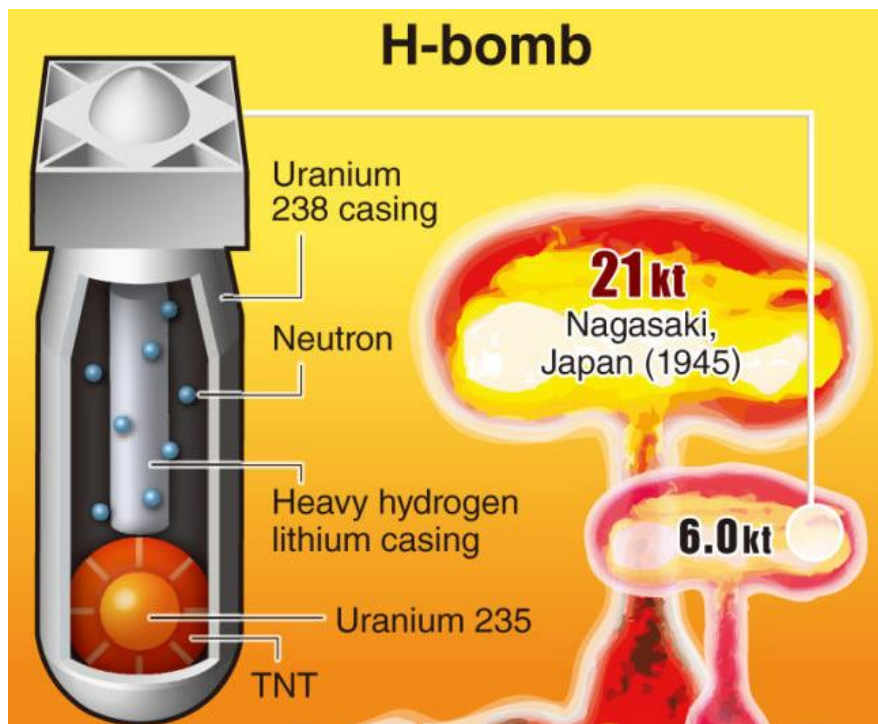
Αποτελούν μέσα μαζικής καταστροφής μεγάλης ισχύος, σχεδιασμένα για να πλήξουν στόχους υψηλής αξίας σε εθνικό ή υπερεθνικό επίπεδο. Οι στόχοι τους περιλαμβάνουν αστικά κέντρα, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, υποδομές ενέργειας και επικοινωνιών, καθώς και τον γενικό πληθυσμό. Σκοπός τους είναι η ολική κατάρρευση της εχθρικής οικονομίας, της κοινωνικής συνοχής και των δομών διακυβέρνησης.

Μεταφέρονται συνήθως μέσω διηπειρωτικών βαλλιστικών πυραύλων (ICBMs), πυραύλων πλεύσης (cruise missiles), στρατηγικών βομβαρδιστικών και πυρηνικών υποβρυχίων, και διαθέτουν μεγάλη εμβέλεια, συχνά άνω των 500 χλμ.

Τακτικά πυρηνικά όπλα

Αντίθετα, τα τακτικά πυρηνικά όπλα προορίζονται για χρήση στο πεδίο της μάχης, ενάντια σε στρατιωτικούς στόχους μικρότερης κλίμακας. Έχουν σχεδιαστεί για την εξουδετέρωση εχθρικών δυνάμεων, την καταστροφή στρατιωτικών βάσεων, αρμάτων μάχης, ναυτικών μονάδων και άλλων μέσων μάχης.

Χαρακτηρίζονται από μικρότερη εμβέλεια (έως 500 χλμ.) και χαμηλότερη εκρηκτική ισχύ, ώστε να είναι πιο ευέλικτα και εύχρηστα σε τακτικό επίπεδο, μέσα στο πλαίσιο μιας στρατιωτικής επιχείρησης.



Εικόνα 9: Τυπική αναπαράσταση της κατασκευαστικής δομής μιας θερμοπυρηνικής βόμβας (βόμβας υδρογόνου) (πηγή: The Korea Herald).

2.3.2. Πρώτες δοκιμές πυρηνικών και θερμοπυρηνικών όπλων - περιβαλλοντικές συνέπειες

Το 1949, η Σοβιετική Ένωση πραγματοποίησε την πρώτη της πυρηνική δοκιμή, σηματοδοτώντας την έναρξη του πυρηνικού ανταγωνισμού του Ψυχρού Πολέμου. Ακολούθησε το Ηνωμένο Βασίλειο το 1952, ενώ την ίδια χρονιά οι Ηνωμένες Πολιτείες πραγματοποίησαν την πρώτη δοκιμή θερμοπυρηνικής βόμβας, γνωστή ως Operation Ivy Mike, με ισχύ που ξεπέρασε τα 10 μεγατόνους TNT (Rhodes, 1986· Glasstone & Dolan, 1977). Ένα χρόνο αργότερα, το 1953, η Σοβιετική Ένωση ακολούθησε με τη δική της θερμοπυρηνική δοκιμή (Hansen, 2001).

Μετά τη λήξη του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου και για περίπου τρεις δεκαετίες, οι κύριες πυρηνικές δυνάμεις — Ηνωμένες Πολιτείες, Σοβιετική Ένωση, Κίνα, Γαλλία και Ηνωμένο Βασίλειο — διεξήγαγαν ατμοσφαιρικές δοκιμές σε απομονωμένες ή αποικιακές περιοχές. Ενδεικτικά, η Γαλλία πραγματοποίησε δοκιμές στην Αλγερινή Σαχάρα, ενώ το Ηνωμένο Βασίλειο στη Νότια Αυστραλία και στα νησιά του Ειρηνικού (Moruroa, Christmas Island) (Firth, 1986· UNSCEAR, 2000).

Οι περιοχές αυτές συνεχίζουν να υφίστανται τις μακροπρόθεσμες περιβαλλοντικές και υγειονομικές συνέπειες της ραδιενεργού μόλυνσης, με ρύπανση του εδάφους, του νερού και της τροφικής αλυσίδας. Πλήθος μελετών έχουν καταγράψει αυξημένα ποσοστά καρκίνων, γενετικών ανωμαλιών και μακροχρόνιων επιδράσεων στην υγεία των τοπικών πληθυσμών και των στρατιωτικών που συμμετείχαν στις δοκιμές (Yamazaki, 1995· Makhijani et al., 1991· Simon et al., 2006).

2.3.3. Περίπτωση Νησιών Μάρσαλ

Μία από τις πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις ανεξέλεγκτης ραδιενεργού ρύπανσης από πυρηνικές δοκιμές αποτελεί η εμπειρία των Νησιών Μάρσαλ, μιας μικρής νησιωτικής χώρας στον Ειρηνικό Ωκεανό. Στο πλαίσιο του Ψυχρού Πολέμου, οι Ηνωμένες Πολιτείες πραγματοποίησαν στην περιοχή 67 πυρηνικές δοκιμές μεταξύ 1946 και 1958, κυρίως στις ατόλες Μπικίνι (Bikini) και Ενεγουετάκ (Enwetak), που βρίσκονται στην επικράτεια της χώρας (U.S. Department of Energy 1982).

Αν και πολλές από τις δοκιμές διεξήχθησαν σε μη κατοικημένα νησιά, οι ραδιενεργές αποθέσεις (fallout) έπληξαν άμεσα κατοικημένες περιοχές. Οι κάτοικοι των παρακείμενων ατολλών Ρονγκελάπ (Rongelap) και Ουτρίκ (Utirik), ανυποψίαστοι και χωρίς επαρκή μέτρα προστασίας, εκτέθηκαν σε υψηλές δόσεις ιονίζουσας ακτινοβολίας. Στην πράξη λειτούργησαν ως άτυπα «πειραματόζωα» για την καταγραφή βιολογικών επιπτώσεων της ακτινοβολίας (Barker, H. M. 2012, Simon, S. L., et al. 2010).

Η πλέον καταστροφική δοκιμή ήταν η Castle Bravo, που πραγματοποιήθηκε την 1η Μαρτίου 1954 στον ατόλλο Μπικίνι. Επρόκειτο για τη δοκιμή θερμοπυρηνικής βόμβας ισχύος 15 μεγατόνων – περίπου 1.000 φορές ισχυρότερη από αυτή της Χιροσίμα. Η δοκιμή αυτή είχε ανεξέλεγκτες συνέπειες, καθώς οι επιστήμονες είχαν υποτιμήσει τη συμμετοχή του ισοτόπου λιθίου-7 (^7Li) στη σύντηξη, με αποτέλεσμα η πραγματική απόδοση της βόμβας να είναι σχεδόν διπλάσια από την προβλεπόμενη (Rhodes, R. 1986).

Ως αποτέλεσμα, εκτεταμένες ποσότητες ραδιενέργειας μεταφέρθηκαν με τους ανέμους και κάλυψαν τα κοντινά νησιά με ραδιενεργή σκόνη. Οι κάτοικοι υπέστησαν εγκαύματα από βήτα ακτινοβολία και, αργότερα, εμφάνισαν διαταραχές του θυρεοειδούς, λευχαιμία, καρκίνους και γενετικές ανωμαλίες. Οι επιπτώσεις διαπιστώθηκαν τόσο στις αρχικές όσο και στις επόμενες γενιές, μέσω μεταλλάξεων DNA και επιγενετικών μηχανισμών (National Research Council (U.S.) 2005, Johnston, B. R., et al. 2007).

Παρά τις επαναλαμβανόμενες αποζημιώσεις και υποσχέσεις αποκατάστασης, οι κάτοικοι πολλών ατολλών δεν μπόρεσαν να επιστρέψουν με ασφάλεια στα εδάφη τους. Οι ραδιενεργές αποθέσεις, σε συνδυασμό με την περιορισμένη δυνατότητα ιατρικής παρακολούθησης και την έλλειψη πλήρους διαφάνειας από τις αρχές, δημιούργησαν μια συστημική περιβαλλοντική αδικία που συνεχίζει να επιδρά έως σήμερα.

Το παράδειγμα των Νησιών Μάρσαλ δεν αποτελεί απλώς ιστορική περίπτωση, αλλά και σύμβολο των μακροπρόθεσμων κινδύνων των πυρηνικών δοκιμών, τόσο για την ανθρώπινη υγεία όσο και για την παγκόσμια οικολογική ισορροπία.

Βιβλιογραφία (συμπληρωματικά για την υποενότητα 2.3.3)

- [1] U.S. Department of Energy. (1982). *United States Nuclear Tests: July 1945 through September 1992*. Nevada Operations Office.
- [2] Barker, H. M. (2012). *Bravo for the Marshallese: Regaining Control in a Post-Nuclear, Post-Colonial World*. Cengage Learning.
- [3] Simon, S. L., et al. (2010). "Radiation doses and cancer risks in the Marshall Islands: National Cancer Institute Report." *Health Physics*, 99(2), 157–176.

- [4] Rhodes, R. (1986). *The Making of the Atomic Bomb*. Simon & Schuster.
- [5] National Research Council (U.S.). (2005). *Radiation Source Use and Replacement: Abbreviated Version*. National Academies Press.
- [6] Johnston, B. R., et al. (2007). *Half-lives and Half-truths: Confronting the Radioactive Legacies of the Cold War*. School for Advanced Research Press.

2.3.4. Μηχανισμοί δράσης και καταστροφική ισχύς των πυρηνικών όπλων.

Η καταστροφική ισχύς ενός πυρηνικού όπλου καθορίζεται από έναν σύνθετο συνδυασμό παραμέτρων. Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την έκταση και την ένταση των επιπτώσεων διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

1. Τεχνικά χαρακτηριστικά του ίδιου του όπλου, όπως:
 - ο τύπος και η ονομαστική ισχύς του,
 - ο αριθμός των πυρηνικών κεφαλών που φέρει,
 - το υψόμετρο πυροδότησης σε σχέση με το έδαφος.
2. Εξωτερικές συνθήκες του στόχου, οι οποίες περιλαμβάνουν:
 - τη γεωγραφική και πολεοδομική μορφολογία (π.χ. πυκνότητα πληθυσμού, αστικοποίηση, στρατιωτική οχύρωση),
 - τη φυσιογραφία της περιοχής (ανάγλυφο, βλάστηση, ύπαρξη υψηλών κατασκευών),
 - και τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες (άνεμοι, θερμοκρασία, πίεση) (Glasstone & Dolan, 1977· Kearny, 1986).

Ωστόσο, τέσσερις είναι οι βασικότεροι προσδιοριστικοί άξονες της καταστροφικής απόδοσης:

α) Τύπος πυρηνικής κεφαλής και πλατφόρμα μεταφοράς

Ο τύπος της κεφαλής (σχάσης ή θερμοπυρηνικής) και η πλατφόρμα εκτόξευσης αποτελούν κρίσιμους καθοριστικούς παράγοντες. Τα θερμοπυρηνικά όπλα, ιδίως εκείνα με πολλαπλά στάδια, διαθέτουν εξ ορισμού πολλαπλάσια ισχύ σε σύγκριση με τα απλά όπλα σχάσης (Rhodes, 1986).

Παράλληλα, οι σύγχρονες πλατφόρμες εκτόξευσης — όπως οι διηπειρωτικοί βαλλιστικοί πύραυλοι (ICBM), τα στρατηγικά βομβαρδιστικά αεροσκάφη και τα πυρηνοκίνητα υποβρύχια — επιτρέπουν τη μεταφορά πολλαπλών ανεξάρτητα κατευθυνόμενων κεφαλών (MIRV). Ενδεικτικά, ο Minuteman III (ΗΠΑ) μπορεί να φέρει έως και δέκα θερμοπυρηνικές κεφαλές τύπου W87 mod 0, καθεμία με ισχύ 300 κιλοτόνων TNT. Οι κεφαλές μπορούν να πλήξουν διακριτούς στόχους, επιτυγχάνοντας ευρεία διασπορά **και** συνδυαστικό καταστροφικό αποτέλεσμα (Hansen, 2001· U.S. DoD, 2018).

β) Ύψος πυροδότησης της πυρηνικής κεφαλής

Το ύψος πυροδότησης μιας πυρηνικής κεφαλής αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη συνολική της καταστροφική απόδοση. Το ωστικό και θερμικό κύμα που δημιουργείται από το "σημείο μηδέν" (ground zero) ευθύνεται για το 60% έως 85% των άμεσων καταστροφών, τόσο σε ανθρώπινες απώλειες όσο και σε κατασκευές (Glasstone & Dolan, 1977· UNSCEAR, 2000).

Η μέγιστη καταστροφική εμβέλεια επιτυγχάνεται όταν η έκρηξη πραγματοποιείται σε συγκεκριμένο ύψος πάνω από το έδαφος, που καθορίζεται από την ισχύ του όπλου και τα χαρακτηριστικά του στόχου. Για παράδειγμα, μια θερμοπυρηνική βόμβα ισχύος 1 Mt, όταν εκρήγνυται σε ύψος περίπου 850 μέτρων, δημιουργεί πυρηνική πύρινη σφαίρα που δεν έρχεται σε επαφή με το έδαφος. Σε αυτή την περίπτωση, το ωστικό και θερμικό κύμα εξαπλώνονται ακτινικά με μέγιστη ταχύτητα και ένταση, προκαλώντας ευρύτερη καταστροφή (Glasstone & Dolan, 1977).

Ενδεικτικά: Η βόμβα της Χιροσίμα, ισχύος 15 KT, εξερράγη στα 600 μέτρα πάνω από το έδαφος, ενώ η βόμβα του Ναγκασάκι, ισχύος 21 KT, στα 470 μέτρα.

Αντιθέτως, για την πρόκληση μέγιστης ραδιενεργού επιμόλυνσης, προτιμάται πυροδότηση κοντά στην επιφάνεια ή επιφανειακή έκρηξη. Παρότι σε αυτές τις περιπτώσεις η άμεση καταστροφή είναι μικρότερη, τα υλικά του εδάφους (οικοδομικά, φυτικά ή και οργανικά) εξαυλώνονται, εμπλουτίζονται ραδιενεργά και διασπείρονται ως σωματιδιακό νέφος στην ατμόσφαιρα. Το νέφος αυτό, γνωστό και ως ραδιενεργός κατακρημνισμός (fallout), μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις μέσω ανέμων και επικάθεται εν τέλει στο έδαφος, προκαλώντας μακροχρόνια ραδιενεργό μόλυνση σε εκτεταμένες περιοχές (Simon et al., 2006).

Οι επιπτώσεις ενισχύονται ακόμη περισσότερο σε συνθήκες βροχόπτωσης, κατά τις οποίες παρατηρείται το φαινόμενο της λεγόμενης «μαύρης βροχής», όπως καταγράφηκε στη Χιροσίμα και στη Φουκουσίμα (Yamazaki, 1995· WHO, 2016).

Οι εκτιμήσεις αυτές επιβεβαιώνονται από δεδομένα που προκύπτουν από περισσότερες από 500 ατμοσφαιρικές και 1500 υπόγειες πυρηνικές δοκιμές που διεξήχθησαν από το 1945 έως τα τέλη της δεκαετίας του 1970, με ορισμένες δοκιμές να συνεχίζονται περιορισμένα ακόμη και σήμερα (UNSCEAR, 2000· CTBTO, 2020).

γ) Καταστροφική ισχύς σε σχέση με το είδος του στόχου και τις περιβάλλουσες δομές

Η φύση και η θέση του στόχου διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στο μέγεθος της καταστροφής που προκαλείται από ένα πυρηνικό πλήγμα. Οι αστικοποιημένες περιοχές υψηλής πυκνότητας, όπως οι μεγάλες πόλεις, είναι ιδιαίτερα ευάλωτες, καθώς παρουσιάζουν μεγάλη συγκέντρωση πληθυσμού και υψηλό βαθμό εξάρτησης από κρίσιμες υποδομές (UNSCEAR, 2000).

Επιπλέον, η φυσιογραφία και το περιβάλλον γύρω από τον στόχο μπορεί να ενισχύσει ή να περιορίσει τις συνέπειες. Για παράδειγμα, περιοχές με εκτεταμένη βλάστηση ή δάση, σε συνδυασμό με την έντονη θερμική ακτινοβολία μιας πυρηνικής έκρηξης, είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε πυρκαγιές μεγάλης κλίμακας. Οι πυρκαγιές αυτές λειτουργούν συνδυαστικά με το θερμικό και ωστικό κύμα, αυξάνοντας την υλική καταστροφή και τις ανθρώπινες απώλειες (Glasstone & Dolan, 1977· McNeill, 2000).

Αντίστοιχα, βιομηχανικοί στόχοι με παρουσία εύφλεκτων, τοξικών ή ραδιενεργών υλικών, όπως διυλιστήρια, χημικά εργοστάσια, πυρηνικοί σταθμοί, φράγματα υδροηλεκτρικών έργων ή μονάδες παραγωγής ενέργειας, παρουσιάζουν υψηλό δυναμικό δευτερογενούς καταστροφής. Ακόμη και αν οι άμεσες απώλειες είναι μικρότερες, λόγω π.χ. μικρότερης πληθυσμιακής πυκνότητας, η οικολογική και τεχνολογική καταστροφή μπορεί να είναι εκτεταμένη και μη αντιστρεπτή.

Ενδεικτικά, η καταστροφή φράγματος μεγάλης χωρητικότητας μπορεί να προκαλέσει μαζική πλημμύρα με συνέπειες αντίστοιχες ενός φυσικού κατακλυσμού, ενώ η καταστροφή πυρηνικού σταθμού σε συνδυασμό με πυρηνική έκρηξη αυξάνει ραγδαία τη διασπορά ραδιονουκλιδίων, με μακροχρόνιες επιπτώσεις στο περιβάλλον, την υγεία και την οικονομία (IAEA, 2006· WHO, 2016).

Οι επιδράσεις αυτές καθιστούν την επιλογή στόχου κρίσιμη παράμετρο τόσο για τη στρατηγική σχεδίαση ενός πλήγματος, όσο και για την αξιολόγηση των εν δυνάμει επιπτώσεων, περιβαλλοντικών και ανθρωπιστικών.

δ) Κατανομή της Εκλυόμενης Ενέργειας και Εξέλιξη της Έκρηξης Πυρηνικής Κεφαλής

Κατά την πυροδότηση μιας πυρηνικής κεφαλής – είτε πρόκειται για όπλο σχάσης, είτε για συνδυασμένο όπλο σχάσης και σύντηξης – η απελευθέρωση ενέργειας πραγματοποιείται μέσα σε ελάχιστα εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου. Το αποτέλεσμα είναι ο σχηματισμός μιας υπερθερμικής, υπέρλαμπρης σφαίρας ενέργειας, που συχνά παρομοιάζεται με έναν «τεχνητό ήλιο». Η σφαίρα αυτή συγκεντρώνει τεράστιες ποσότητες ενέργειας σε έναν εξαιρετικά περιορισμένο χώρο, ενώ διογκώνεται ραγδαία, καταστρέφοντας πλήρως κάθε μορφή ύλης εντός της ακτίνας δράσης της.

Στα πρώτα τρία δευτερόλεπτα από την έκρηξη, η πύρινη σφαίρα μπορεί να καλύψει ακτίνα έως και 2.000 μέτρων, εξαϋλώνοντας πλήρως οποιοδήποτε αντικείμενο βρεθεί εντός αυτής. Οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό της ξεπερνούν τα δεκάδες εκατομμύρια βαθμούς Κελσίου, ενώ η πίεση μπορεί να υπερβαίνει τις εκατοντάδες ατμοσφαιρών (Glasstone & Dolan, 1977· Rhodes, 1986).

Καθώς η σφαίρα θερμού αερίου ανυψώνεται, λόγω της διαφοράς πυκνότητας με τον περιβάλλοντα αέρα, σχηματίζεται ο χαρακτηριστικός «πυρηνικός μανιταρόμορφος» σωρός, που ολοκληρώνεται μέσα σε λίγα λεπτά.

Η συνολική ενέργεια που εκλύεται κατά την πυρηνική έκρηξη κατανέμεται σε τρεις κύριες μορφές: μηχανική, θερμική και ακτινοβολία. Σε τυπική ατμοσφαιρική έκρηξη που πραγματοποιείται σε ύψος περίπου 15 χιλιομέτρων, η ενεργειακή κατανομή εκτιμάται ως εξής: περίπου 50% αποδίδεται στο ωστικό κύμα, 35% στο θερμικό κύμα και 15% στη ραδιενεργό ακτινοβολία (U.S. Department of Defense, 2004).

Η αναλογία αυτή επηρεάζεται από παράγοντες όπως το υψόμετρο της πυροδότησης, η ισχύς του όπλου, ο τύπος του μηχανισμού έκρηξης και τα φυσικά χαρακτηριστικά του στόχου.

Το ωστικό κύμα προκαλεί άμεση καταστροφή σε κτίρια και ανθρώπους, ενώ η θερμική ακτινοβολία ευθύνεται για εκτεταμένες πυρκαγιές και σοβαρούς εγκαυματικούς

τραυματισμούς. Η ραδιενέργεια, αν και μικρότερη ποσοτικά σε σχέση με τα δύο προηγούμενα φαινόμενα, είναι αυτή που ευθύνεται για τις μακροχρόνιες βιολογικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις (UNSCEAR, 2000· WHO, 2016).

Η αλληλεπίδραση αυτών των τριών συνιστωσών – ωστικού, θερμικού και ακτινοβολιακού φορτίου – καθορίζει το συνολικό μέγεθος της καταστροφής, τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και σε βάθος δεκαετιών

Ωστικό Κύμα

Το ωστικό κύμα είναι μία από τις κύριες μορφές καταστρεπτικής ενέργειας που εκλύονται κατά την πυρηνική έκρηξη. Δημιουργείται από την απότομη και τεράστια αύξηση της ατμοσφαιρικής πίεσης, καθώς η πυρίνη σφαίρα θερμαίνεται και συμπιέζει βίαια τον αέρα, παράγοντας ένα αόρατο αλλά εξαιρετικά ισχυρό μέτωπο πίεσης που διαδίδεται ακτινικά προς όλες τις κατευθύνσεις (Glasstone & Dolan, 1977).

Το ωστικό κύμα απομακρύνεται από το «σημείο μηδέν» με ταχύτητα που συχνά υπερβαίνει τα 350 μέτρα ανά δευτερόλεπτο, δηλαδή μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ήχου. Ακολουθείται από ένα ισχυρό ρεύμα αντίθετης κατεύθυνσης (ανεμοστρόβιλος υποπίεσης), το οποίο δημιουργείται από τη ροή αέρα που προσπαθεί να καλύψει το κενό πίσω από το μέτωπο πίεσης. Η διαδοχική δράση υπερπίεσης και υποπίεσης ενισχύει δραματικά την καταστροφική ικανότητα του ωστικού κύματος.

Η δύναμή του είναι ικανή να καταστρέψει σχεδόν κάθε ανθρώπινη κατασκευή: πολυώροφα κτίρια, γέφυρες, βαρέα οχήματα, υποδομές κοινής ωφέλειας. Το μέγεθος της ζημίας σχετίζεται άμεσα με την ισχύ του όπλου και την απόσταση από το επίκεντρο. Ενδεικτικά, μια πυρηνική κεφαλή ισχύος 1 μεγατόνου TNT μπορεί να ισοπεδώσει πλήρως τις κατασκευές σε ακτίνα έως 6 χιλιομέτρων από το σημείο έκρηξης (Rhodes, 1986· U.S. DoD, 2004).

Εκτός από τις πρωτογενείς ζημιές, το ωστικό κύμα ευθύνεται και για δευτερογενείς επιπτώσεις: πτώση ερειπίων, εκτοξεύσεις θραυσμάτων, καταρρεύσεις τοίχων και πυλώνων. Οι περισσότεροι θάνατοι προκύπτουν από τα συνδυασμένα αυτά αίτια. Η πιθανότητα επιβίωσης αυξάνεται με την απόσταση, αλλά ακόμα και πέρα από την άμεση ζώνη πλήγματος, σημειώνονται συχνά τραυματισμοί λόγω θραυσμάτων και κατάρρευσης κτισμάτων (UNSCEAR, 2000).

Το ωστικό κύμα λειτουργεί ουσιαστικά ως αέριος καταστροφέας μεγάλης κλίμακας, η ένταση του οποίου μειώνεται σταδιακά όσο απομακρύνεται από την έκρηξη. Ωστόσο, σε συνδυασμό με το θερμικό κύμα και τη ραδιενεργό ακτινοβολία, συνιστά έναν από τους κύριους μηχανισμούς μαζικής απώλειας ζώων και καταστροφής υποδομών.

Θερμικό Κύμα

Το θερμικό κύμα είναι η δεύτερη κύρια μορφή ενέργειας μιας πυρηνικής έκρηξης, μετά το ωστικό κύμα. Εκδηλώνεται ως εκτυφλωτική λάμψη και ταχύτατα διογκούμενη πυρίνη σφαίρα, με θερμοκρασίες που ξεπερνούν τα εκατομμύρια βαθμούς Κελσίου, ικανές να προκαλέσουν άμεσες αναφλέξεις, εξαϋλώση υλικών και θανάσιμα εγκαύματα (Glasstone & Dolan, 1977· Rhodes, 1986).

Η ένταση και η εμβέλεια εξαρτώνται από την ισχύ της βόμβας. Σε έκρηξη 1 Mt, εγκαύματα τρίτου βαθμού προκαλούνται σε αποστάσεις έως 8 χλμ., ενώ προσωρινή τύφλωση μπορεί να σημειωθεί ακόμη και σε απόσταση 20–80 χλμ. (ανάλογα με τη διαύγεια και την ώρα της ημέρας). Η Tsar Bomba των 50 Mt θα μπορούσε να προκαλέσει εγκαύματα ακόμα και 100 χλμ. μακριά (Hansen, 2001).

Εκτός από τους άμεσους τραυματισμούς, το θερμικό κύμα προκαλεί κλίμακας πυρκαγιές μεγάλης, που οδηγούν σε τοξική ρύπανση, απελευθέρωση ραδιενεργών σωματιδίων, και σοβαρή οικολογική υποβάθμιση (McNeill, 2000· WHO, 2016).

Ραδιενεργή ακτινοβολία και ραδιενεργό νέφος

Κατά την έκρηξη μιας πυρηνικής κεφαλής, εκλύεται σημαντική ποσότητα ιοντίζουσας ακτινοβολίας, είτε σωματιδιακής (άλφα, βήτα, νετρόνια) είτε ηλεκτρομαγνητικής (κυρίως ακτίνες γ). Η ακτινοβολία αυτή μπορεί να αντιστοιχεί σε έως και 15% της συνολικής εκλυόμενης ενέργειας (Glasstone & Dolan, 1977).

Οι **ακτίνες γ** είναι οι πιο διεισδυτικές και επικίνδυνες, καθώς επηρεάζουν τους ιστούς σε κυτταρικό και μοριακό επίπεδο, προκαλώντας νεκρώσεις, γενετικές βλάβες και καρκινογενέσεις. Αντίστοιχα, τα σωματίδια α και β έχουν μικρότερη διεισδυτικότητα, αλλά είναι ιδιαίτερα τοξικά όταν εισέλθουν στον οργανισμό (UNSCEAR, 2000).

Μετά την έκρηξη, σχηματίζεται το λεγόμενο ραδιενεργό νέφος (fallout), το οποίο περιέχει προϊόντα σχάσης και σύντηξης (ραδιονουκλίδια όπως το ^{131}I , το ^{137}Cs και το ^{90}Sr). Το νέφος αυτό μπορεί να μεταφερθεί σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από την έκρηξη, ειδικά υπό συνθήκες ανέμων ή βροχοπτώσεων, όπως συνέβη με τη «μαύρη βροχή» στη Χιροσίμα (Yamazaki, 1995).

Η υπολειμματική ακτινοβολία, που προέρχεται από την καθίζηση αυτών των σωματιδίων, ενέχει μακροχρόνιους κινδύνους τόσο για το περιβάλλον όσο και για την ανθρώπινη υγεία. Η έκθεση μπορεί να είναι εξωτερική (π.χ. μέσω εδάφους ή σκόνης) ή εσωτερική (μέσω εισπνοής ή κατανάλωσης τροφής/νερού). Οι επιπτώσεις περιλαμβάνουν λευχαιμίες, θηλώδη καρκίνο του θυρεοειδούς, μεταλλάξεις DNA και γενετικές βλάβες (WHO, 2016· IAEA, 2006).

Η βιολογική επίδραση μετράται σε Sievert (Sv), λαμβάνοντας υπόψη το είδος της ακτινοβολίας και την ευαισθησία των ιστών. Για σύγκριση, η θανατηφόρα δόση θεωρείται περίπου 5 Sv, ενώ η μέση ετήσια έκθεση ενός πολίτη στην Ελλάδα είναι περίπου 2,7 mSv (EEAE, 2024).

2.4 Βιολογικές επιπτώσεις της ραδιενέργειας στον άνθρωπο

Η ιοντίζουσα ακτινοβολία αποτελεί έναν από τους σοβαρότερους βιολογικούς κινδύνους σε περίπτωση πυρηνικής έκρηξης, καθώς είναι ικανή να προκαλέσει εκτεταμένες βλάβες τόσο σε κυτταρικό όσο και σε μοριακό επίπεδο. Η επίδρασή της εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος της ακτινοβολίας (σωματιδιακή ή ηλεκτρομαγνητική), η απορροφούμενη δόση, η διάρκεια και ο ρυθμός έκθεσης, αλλά και από χαρακτηριστικά του εκτιθέμενου ατόμου, όπως η ηλικία, η γενική κατάσταση υγείας και η ευαισθησία των ιστών (UNSCEAR, 2000· WHO, 2016).

Η βιολογική δράση της ραδιενέργειας εκδηλώνεται είτε άμεσα, μέσω της οξείας ακτινοβολικής νόσου που εμφανίζεται σε υψηλές δόσεις (άνω του 1 Sv), είτε έμμεσα, μέσω μακροχρόνιων επιπτώσεων που μπορεί να εμφανιστούν χρόνια μετά την έκθεση. Στις άμεσες επιδράσεις περιλαμβάνονται η ναυτία, η αιμορραγική διάθεση, η καταστολή του ανοσοποιητικού συστήματος και, σε ακραίες περιπτώσεις, ο θάνατος εντός ημερών ή εβδομάδων. Οι μακροχρόνιες συνέπειες περιλαμβάνουν την εμφάνιση κακοηθειών, όπως λευχαιμίες και καρκίνοι του θυρεοειδούς, των πνευμόνων και του ήπατος, καθώς και τη γένεση μεταλλάξεων στο γενετικό υλικό, με δυνατότητα κληρονομικής μετάδοσης (Hall & Giaccia, 2018· Yamazaki, 1995).

Ο μηχανισμός της βλάβης οφείλεται κυρίως στον ιονισμό των βιομορίων, όπως το DNA, μέσω άμεσης απορρόφησης ενέργειας ή της δημιουργίας ελευθέρων ριζών στο κυτταρόπλασμα. Οι βλάβες αυτές, αν δεν επιδιορθωθούν αποτελεσματικά, οδηγούν σε αποπτωτικό κυτταρικό θάνατο ή σε καρκινογένεση.

Η βιολογική δράση της ακτινοβολίας ποσοτικοποιείται με τη μονάδα Sievert (Sv), η οποία λαμβάνει υπόψη τόσο την ποσότητα της απορροφούμενης ενέργειας όσο και τον συντελεστή βιολογικής αποτελεσματικότητας, δηλαδή τη βλάβη που προκαλείται ανάλογα με το είδος της ακτινοβολίας και το είδος του ιστού. Για συγκριτικούς σκοπούς, η μέση ετήσια ενεργός δόση ακτινοβολίας που δέχεται ένας πολίτης στην Ελλάδα από φυσικές και τεχνητές πηγές είναι περίπου 2,7 mSv, ενώ μια απλή ακτινογραφία θώρακος αντιστοιχεί σε 0,02 mSv (EEAE, 2024). Αντίθετα, η θανατηφόρα δόση έχει προσδιοριστεί στα 5 Sv, εφόσον απορροφηθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα (Glasstone & Dolan, 1977· ICRP, 2007).

Η έκθεση σε τέτοιες δόσεις χωρίς επαρκή προστασία, ακόμη και σε απόσταση αρκετών χιλιομέτρων από το επίκεντρο μιας πυρηνικής έκρηξης, μπορεί να προκαλέσει βαρύτατες σωματικές βλάβες, είτε άμεσα είτε με καθυστέρηση, με σοβαρές επιπτώσεις όχι μόνο στην ατομική υγεία αλλά και στη δημόσια υγεία και στην κοινωνία συνολικά.

Υπολειμματική ραδιενέργεια και μακροχρόνιες συνέπειες

Η υπολειμματική ραδιενέργεια είναι το ραδιενεργό φορτίο που παραμένει στο περιβάλλον μετά από μια πυρηνική έκρηξη. Αποτελεί τη βασική πηγή της συνολικής ακτινοβολίας μετά την αρχική έκλαμψη και αποδίδεται κυρίως στο ραδιενεργό νέφος (fallout), το οποίο περιέχει σημαντικές ποσότητες ραδιονουκλιδίων που παράγονται από τις αντιδράσεις σχάσης και από την ενεργοποίηση υλικών του περιβάλλοντος (UNSCEAR, 2000· IAEA, 2005).

Τα ραδιονουκλίδια επικάθονται στο έδαφος, εισχωρούν στο υδάτινο περιβάλλον ή απορροφώνται από φυτά και ζώα, επηρεάζοντας άμεσα και έμμεσα το οικοσύστημα και την ανθρώπινη υγεία (IAEA, 2015). Η μετάδοση της ραδιενέργειας γίνεται τόσο εξωτερικά, μέσω της συνεχούς εκπομπής ιοντίζουσας ακτινοβολίας από σωματίδια που παραμένουν στο περιβάλλον, όσο και εσωτερικά, μέσω της εισπνοής, της κατάποσης ή της απορρόφησης από το δέρμα (WHO, 2016· Hall & Giaccia, 2018).

Η ένταση και η έκταση της επιμόλυνσης εξαρτώνται από τον τύπο της έκρηξης, τη σύσταση του νέφους, τη μετεωρολογική κατάσταση και το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής. Τα βαρύτερα σωματίδια καθιζάνουν κοντά στο σημείο της έκρηξης, ενώ τα ελαφρύτερα μπορούν να μεταφερθούν μέσω αέριων ρευμάτων σε αποστάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων, προκαλώντας μακροχρόνια ραδιενεργό επιβάρυνση σε γεωγραφικά απομακρυσμένες περιοχές (Glasstone & Dolan, 1977· ICRP, 2007).

Η συσσώρευση ραδιοϊσοτόπων, όπως το καίσιο-137 (^{137}Cs) και το στρόντιο-90 (^{90}Sr), σε βιολογικούς οργανισμούς και τροφικές αλυσίδες οδηγεί σε μακροχρόνια έκθεση πληθυσμών. Αυτή η χρόνια επιβάρυνση έχει συσχετιστεί με αυξημένα ποσοστά καρκίνου, γενετικές ανωμαλίες, μεταλλάξεις στο DNA και υπογονιμότητα, ιδίως σε ευπαθείς ομάδες (UNSCEAR, 2020· Yamazaki, 1995).

Η χρήση πυρηνικών όπλων, ακόμη και περιορισμένη, συνεπάγεται ανυπολόγιστες καταστροφές όχι μόνο στον άνθρωπο, αλλά και στο φυσικό και κοινωνικό περιβάλλον. Η καταστροφική τους ισχύς δεν εξαντλείται στην αρχική έκρηξη, αλλά εκτείνεται στον χρόνο μέσω της υπολειμματικής ραδιενέργειας, η οποία επιβαρύνει το οικοσύστημα και απειλεί τη δημόσια υγεία για δεκαετίες. Οι βιολογικές συνέπειες της ιοντίζουσας ακτινοβολίας, είτε άμεσες είτε καθυστερημένες, καθιστούν την ύπαρξη και τη χρήση τέτοιων όπλων παγκόσμιο κίνδυνο. Η επιστημονική κατανόηση των επιπτώσεων αυτών αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για τη διαμόρφωση πολιτικών αποτροπής και διεθνούς ελέγχου της πυρηνικής τεχνολογίας.

2.5 Επιπτώσεις από μια πυρηνική αντιπαράθεση και ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης

Από το 1945 και μετά, η διεθνής κοινότητα άρχισε σταδιακά να συνειδητοποιεί τις σοβαρές συνέπειες των πυρηνικών δοκιμών στο περιβάλλον και τη δημόσια υγεία. Οι επιπτώσεις της ραδιενεργού μόλυνσης —όπως η ραδιενεργή βροχή, η συσσώρευση ραδιονουκλιδίων και η αύξηση περιστατικών καρκίνου— έγιναν εμφανείς ήδη από τις πρώτες δεκαετίες των δοκιμών, προκαλώντας έντονες αντιδράσεις στην επιστημονική και πολιτική κοινότητα (UNSCEAR, 2000· IAEA, 2015).

Ήδη από τη δεκαετία του 1950, κύματα διεθνών διαμαρτυριών και κοινωνικών κινημάτων πυρηνικού αφοπλισμού εμφανίστηκαν σε πολλές χώρες, με τη συμμετοχή πολιτών, επιστημόνων, ακτιβιστών, ακόμη και κυβερνήσεων. Το αίτημα για τον περιορισμό των δοκιμών απέκτησε προοδευτικά διεθνή πολιτική νομιμοποίηση, οδηγώντας στην καθιέρωση σημαντικών συμφωνιών.

Μια από τις πρώτες ήταν η Συνθήκη Μερικής Απαγόρευσης Πυρηνικών Δοκιμών (Partial Test Ban Treaty - PTBT), που υπογράφηκε το 1963, απαγορεύοντας τις δοκιμές στην ατμόσφαιρα, στον υποθαλάσσιο χώρο και στο διάστημα. Οι υπόγειες δοκιμές,

ωστόσο, εξακολουθούσαν να επιτρέπονται. Ακολούθησε η Συνθήκη Μη Διάδοσης Πυρηνικών Όπλων (Non-Proliferation Treaty - NPT) το 1970, η οποία αποτέλεσε σημείο καμπής, δεσμεύοντας τις πυρηνικές δυνάμεις να μην μεταβιβάζουν τεχνογνωσία και υλικά σε άλλες χώρες, και καλώντας τα κράτη χωρίς πυρηνικά όπλα να απέχουν από την απόκτησή τους, με αντάλλαγμα την πρόσβαση στην ειρηνική χρήση της πυρηνικής ενέργειας (IAEA, 2020· Sagan, 1996).

Η κορύφωση των διεθνών προσπαθειών καταγράφεται με την υπογραφή της Συνθήκης Πλήρους Απαγόρευσης Πυρηνικών Δοκιμών (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty - CTBT) το 1996, η οποία επιδιώκει την καθολική απαγόρευση κάθε μορφής πυρηνικής δοκιμής. Παρ' όλα αυτά, η εφαρμογή της παραμένει ημιτελής, καθώς ορισμένες πυρηνικές δυνάμεις —όπως οι ΗΠΑ, η Κίνα, η Ινδία και η Βόρεια Κορέα— δεν την έχουν επικυρώσει ή δεν τηρούν τις διατάξεις της (CTBTO, 2023).

Η διαμόρφωση αυτών των θεσμικών πλαισίων αντανακλά μια σταδιακή αλλαγή στη στάση της διεθνούς κοινής γνώμης: από την ανοχή και τον φόβο, στη διεκδίκηση ελέγχου, διαφάνειας και τελικά κατάργησης των πυρηνικών δοκιμών. Παρά τις προόδους, οι προκλήσεις της εποχής, η γεωπολιτική αστάθεια και η τεχνολογική πρόοδος υπενθυμίζουν την ανάγκη διαρκούς επαγρύπνησης.

Η Πολυπλοκότητα του Πυρηνικού Αφοπλισμού: Κέρδη και Εμπόδια

Η συνολική εικόνα αποδεικνύει πως το ζήτημα του πυρηνικού αφοπλισμού και της απαγόρευσης των δοκιμών αποτελεί ένα εξαιρετικά σύνθετο και δυσεπίλυτο πρόβλημα, στο οποίο συγκρούονται τα συμφέροντα της παγκόσμιας ασφάλειας, της επιστημονικής πρόοδου και της γεωπολιτικής ισχύος.

Παρότι έχουν σημειωθεί πρόοδοι σε επίπεδο νομικής κατοχύρωσης και διεθνούς ευαισθητοποίησης, η πλήρης εξάλειψη των πυρηνικών δοκιμών συνεχίζει να αποτελεί ανεκπλήρωτο στόχο, με καθοριστική σημασία για το μέλλον της ανθρωπότητας και του φυσικού περιβάλλοντος.

Στατιστικά Στοιχεία για τα Πυρηνικά Όπλα στις Αναγνωρισμένες Πυρηνικές Δυνάμεις

Από την άλλη πλευρά, έως και τους πρώτους μήνες του 2024, σύμφωνα με έκθεση της Ομοσπονδίας Αμερικανών Επιστημόνων (Federation of American Scientists), η οποία δημοσιεύθηκε τον Μάρτιο του 2023 [70], τα εκτιμώμενα αποθέματα πυρηνικών κεφαλών των εννέα κρατών που διαθέτουν επισήμως πυρηνικά όπλα ανέρχονται σε περίπου 21.100. Από αυτές, οι 9.583 θεωρούνται ενεργές (δηλαδή λειτουργικές και δυνητικά αξιοποιήσιμες), ενώ οι υπόλοιπες, αν και παραμένουν ακέραιες, βρίσκονται σε διαδικασία αποσυναρμολόγησης, καθώς χαρακτηρίζονται τεχνολογικά ξεπερασμένες. Από το σύνολο των ενεργών κεφαλών, περίπου 2.000 είναι «ετοιμοπόλεμες» —δηλαδή σε άμεση επιχειρησιακή διαθεσιμότητα— και αυτός ο αριθμός αφορά αποκλειστικά τις Ηνωμένες Πολιτείες, το Ηνωμένο Βασίλειο, τη Γαλλία και τη Ρωσία. Για την Κίνα, καθώς και για τις υπόλοιπες μικρότερες πυρηνικές δυνάμεις (Ινδία, Πακιστάν, Βόρεια Κορέα και Ισραήλ), δεν υπάρχουν επίσημα διαθέσιμα στοιχεία για το πόσες κεφαλές βρίσκονται σε ανάλογη επιχειρησιακή ετοιμότητα. Σημειώνεται ότι όλοι οι παραπάνω αριθμοί βασίζονται σε εκτιμήσεις από ανοιχτές πηγές πληροφόρησης, καθώς οι πραγματικές δυνατότητες των πυρηνικών οπλοστασίων κάθε χώρας παραμένουν απόρρητες.

Πληθυσμιακές και Οικοσυστημικές Επιπτώσεις από μια ενδεχόμενη Πυρηνική Αντιπαράθεση

Η χρήση του υπάρχοντος πυρηνικού οπλοστασίου σε γενικευμένη σύρραξη δεν θα σήμαινε απλώς την άμεση εξόντωση ενός μεγάλου μέρους του παγκόσμιου πληθυσμού, αλλά θα προκαλούσε επίσης κατάρρευση των οικοσυστημάτων και διατάραξη των βασικών λειτουργιών της βιόσφαιρας. Οι επιστημονικές προσομοιώσεις δείχνουν ότι μια εκτεταμένη ανταλλαγή πυρηνικών πληγμάτων θα μπορούσε να οδηγήσει σε έναν «πυρηνικό χειμώνα», με μαζικές πυρκαγιές να εκτοξεύουν αιθάλη και τέφρα στη στρατόσφαιρα, μειώνοντας δραματικά τη θερμοκρασία του πλανήτη και εμποδίζοντας τη φωτοσύνθεση (Robock et al., 2007· Toon et al., 2014). Το αποτέλεσμα θα ήταν η κατάρρευση της πρωτογενούς παραγωγής, η επισιτιστική κρίση και η απειλή λιμού σε παγκόσμια κλίμακα (Helfand, 2013).

Παράλληλα, η διάρρηξη της στιβάδας του όζοντος από τη ραδιενεργό ακτινοβολία και τα προϊόντα της έκρηξης θα επέτρεπε την ανεμπόδιστη διείσδυση υπεριώδους ακτινοβολίας, προκαλώντας σοβαρές βιολογικές βλάβες στο DNA, αύξηση των καρκίνων του δέρματος και γενετικές ανωμαλίες (Coupe et al., 2019). Οι συνέπειες αυτές δεν θα περιορίζονταν στις εμπόλεμες περιοχές, αλλά θα επηρέαζαν ολόκληρο τον πλανήτη, χωρίς γεωγραφικά σύνορα (Turco et al., 1983).

Αν και όλα αυτά βασίζονται σε υπολογιστικά μοντέλα και όχι σε εμπειρικά δεδομένα —ευτυχώς—, η κοινή λογική υπαγορεύει ότι τέτοιου είδους «πειράματα» δεν πρέπει ποτέ να επιχειρηθούν στην πράξη. Η ανθρωπότητα διαθέτει σήμερα τη δύναμη να καταστρέψει την πολιτισμική της πρόοδο, το οικοσύστημα που τη στηρίζει, ακόμη και τις βάσεις της ίδιας της ζωής. Η κατανόηση των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων δεν είναι απλώς επιστημονική ανάγκη· αποτελεί ηθική επιταγή και πολιτική ευθύνη (UNSCEAR, 2008).

3.ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Κατά την δεκαετία 1950–1960, η ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας αποτέλεσε κεντρικό πολιτικό και οικονομικό στόχο για πολλές χώρες. Η αξιοποίησή της για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας φάνταζε ως λύση στις αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες, ενώ παράλληλα υποσχόταν ενεργειακή ανεξαρτησία και οικονομική ενίσχυση. Πολλά κράτη επένδυσαν στην εγκατάσταση πυρηνικών σταθμών, με το όραμα της ειρηνικής χρήσης της πυρηνικής τεχνολογίας (World Nuclear Association).

Ωστόσο, η δημόσια αποδοχή αυτής της τεχνολογίας δεν ήταν καθολική. Από την αρχή, διατυπώθηκαν σοβαροί προβληματισμοί για τους πιθανούς κινδύνους, με έμφαση στην πιθανότητα ατυχημάτων και στις περιβαλλοντικές συνέπειες. Η ανησυχία αυτή ενισχύθηκε σταδιακά, καθώς η πρακτική εμπειρία αποκάλυψε τις αδυναμίες ασφαλείας και διαχείρισης των ραδιενεργών υλικών (IAEA).

Πράγματι, από τη δεκαετία του 1950 και έπειτα σημειώθηκαν αρκετά πυρηνικά ατυχήματα, ποικίλης σοβαρότητας. Για την αξιολόγηση και την ταξινόμησή τους, καθιερώθηκε το 1990 η Διεθνής Κλίμακα Πυρηνικών Γεγονότων (INES - International Nuclear Event Scale) από τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας. Η κλίμακα αυτή περιλαμβάνει επτά επίπεδα, από μικρές ανωμαλίες (επίπεδο 1) έως πολύ σοβαρά ατυχήματα (επίπεδο 7), με εκθετική αύξηση της καταστροφικότητας ανά επίπεδο.

Αρχικά, η INES αφορούσε κυρίως τους πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, αλλά από το 2006 επεκτάθηκε ώστε να περιλαμβάνει και συμβάντα μεταφοράς, αποθήκευσης και χρήσης ραδιολογικών υλικών, εκτός των στρατιωτικών εφαρμογών. Δύο ατυχήματα έχουν μέχρι σήμερα ταξινομηθεί ως επιπέδου 7: το Τσερνόμπιλ (1986) και η Φουκουσίμα (2011), τα οποία σηματοδότησαν κρίσιμες καμπές στην αντίληψη για την ασφάλεια της πυρηνικής ενέργειας (UNSCEAR, IAEA).

Επιπλέον, άλλα γνωστά ατυχήματα, όπως στο Three Mile Island (ΗΠΑ, 1979), στο Windscale (Ηνωμένο Βασίλειο, 1957), στο Kyshtym (Ρωσία, 1957) και στο Tokaimura (Ιαπωνία, 1999), αν και μικρότερης έκτασης, συνέβαλαν σημαντικά στη διαμόρφωση κανονιστικών πλαισίων και μέτρων ασφαλείας. Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει αυτά τα περιστατικά, αναλύοντας τις τεχνικές τους αιτίες, τις επιπτώσεις στο περιβάλλον και τις κοινωνικές τους προεκτάσεις.

3.1 Ατύχημα Three Mile Island, ΗΠΑ.

Στις 28 Μαρτίου 1979 σημειώθηκε σοβαρό πυρηνικό ατύχημα στον αντιδραστήρα TMI-2 του σταθμού Three Mile Island (TMI), κοντά στην πόλη Harrisburg των ΗΠΑ. Ο αντιδραστήρας, τύπου PWR (Pressurized Water Reactor), λειτουργούσε σχεδόν στη μέγιστη ισχύ του (900 MW) όταν συνέβη η βλάβη, η οποία οφειλόταν σε αλληλουχία τεχνικών σφαλμάτων και αποτυχημένης συντήρησης που είχε προηγηθεί (Walker 2004).



Εικόνα 10: Πυρηνική εγκατάσταση Three Mile Island (πηγή: U.S. Department of Energy:(2022), 5 facts to know about Three Mile Island).

Η αρχική δυσλειτουργία αφορούσε την αποτυχία παροχής νερού στις ατμογεννήτριες. Παρότι σε τέτοιες περιπτώσεις προβλέπεται η ενεργοποίηση εφεδρικών κυκλωμάτων, αυτά δεν λειτούργησαν λόγω συντηρητικών σφαλμάτων. Η απώλεια ψύξης οδήγησε σε υπερθέρμανση του πυρήνα και αύξηση της πίεσης, με ενεργοποίηση της βαλβίδας εκτόνωσης. Ακολούθησε LOCA (Loss of Coolant Accident) και παραγωγή υδρογόνου, καθώς οι ράβδοι καυσίμου από Zircaloy αντέδρασαν με το νερό, ανεβάζοντας τη θερμοκρασία του πυρήνα πάνω από τους 2.300°C (IAEA 2008).

Περίπου το 45% του πυρηνικού καυσίμου υπέστη μερική τήξη, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση ευγενών αερίων και ραδιενεργών ισοτόπων (κυρίως ιώδιο και καίσιο). Παρά τις εκπομπές, τα επίπεδα ραδιενέργειας που δέχθηκε ο πληθυσμός θεωρήθηκαν χαμηλότερα από τα επικίνδυνα όρια (NRC 1980). Ο αντίκτυπος του ατυχήματος στην ανθρώπινη υγεία παραμένει αντικείμενο επιστημονικής διαφωνίας. Κάποιες μελέτες αναφέρουν αύξηση καρκινογενέσεων και επιπτώσεις στο περιβάλλον (Wing et al. 1997), ενώ άλλες υποβαθμίζουν τη μακροπρόθεσμη σημασία του συμβάντος (Boice 2011).

Η καταστροφή του TMI-2 είχε σημαντικές συνέπειες για την πυρηνική πολιτική των ΗΠΑ: οδήγησε σε αναστολή έγκρισης νέων μονάδων, ενίσχυση κανονισμών ασφαλείας και αυστηρότερη εποπτεία από τις ρυθμιστικές αρχές (U.S. GAO 1981). Σύμφωνα με την INES, το ατύχημα κατατάχθηκε στο επίπεδο 5 («σοβαρό συμβάν»).

3.2 Ατύχημα στον Πυρηνικό Σταθμό του Τσερνόμπιλ: Χαρακτηριστικά του Αντιδραστήρα και Αιτίες Καταστροφής

Το πυρηνικό ατύχημα του Τσερνόμπιλ συνέβη στις 26 Απριλίου 1986 στον αντιδραστήρα RBMK-1000, τύπου θερμικών νετρονίων, που χρησιμοποιούσε γραφίτη ως επιβραδυντή και νερό ως ψυκτικό. Οι RBMK είναι αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος με καναλισμένη δομή, εντός της οποίας βρίσκονται οι ράβδοι πυρηνικού καυσίμου (IAEA, 2006). Ο σταθμός διέθετε τέσσερις τέτοιους αντιδραστήρες και βρισκόταν κοντά στον ποταμό Pripjat, περίπου 3 χλμ. από τον ομώνυμο οικισμό (Holloway, 1994).

Το ατύχημα σημειώθηκε στον αντιδραστήρα 4 κατά τη διάρκεια δοκιμής ασφαλείας κατά την προγραμματισμένη σβέση του. Λανθασμένος σχεδιασμός της δοκιμής και συνδυασμός χειριστικών σφαλμάτων προκάλεσαν υπερκρισιμότητα, απότομη αύξηση ισχύος, τήξη του πυρήνα και καταστροφική έκρηξη (INSAG, 1992). Η εγγενής αδυναμία των RBMK ενίσχυσε τη σοβαρότητα του ατυχήματος, κυρίως λόγω του θετικού συντελεστή κενού, της αυξημένης αντιδραστικότητας κατά την είσοδο των ράβδων ελέγχου και της ανεπαρκούς αρνητικής αντιδραστικότητας (Medvedev, 1990).

Οι ράβδοι ελέγχου του RBMK περιείχαν γραφίτη στο κάτω μέρος και βίαιη είσοδός τους προκαλούσε προσωρινή αύξηση της ισχύος αντί για μείωση. Το τμήμα γραφίτη αντικαθιστούσε στήλη νερού που απορροφούσε νετρόνια, αυξάνοντας απότομα την τοπική αντιδραστικότητα (IAEA, 1992). Αυτή η σχεδιαστική αδυναμία συνέβαλε στην απότομη κλιμάκωση της ισχύος όταν ενεργοποιήθηκε το σύστημα επείγουσας διακοπής (AZ-5).

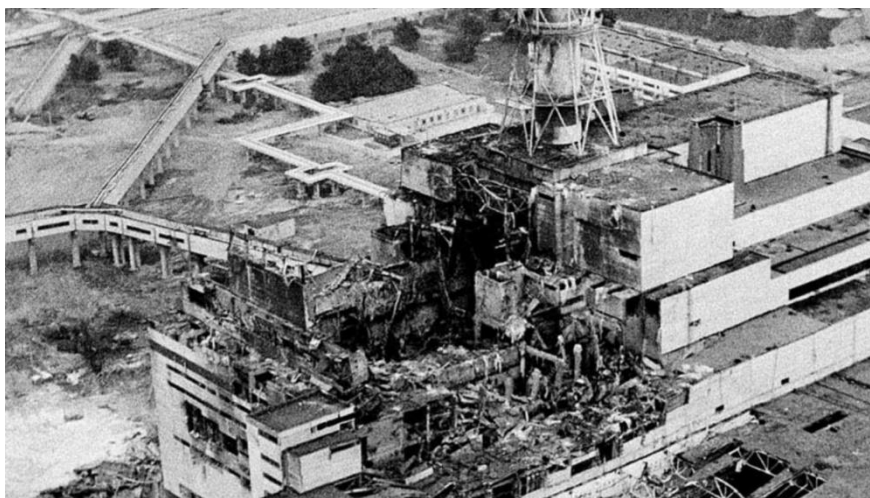
Το φαινόμενο δηλητηρίασης του αντιδραστήρα (reactor poisoning), λόγω συσσώρευσης ξένου, περιόριζε την ισχύ κάτω από τα 700 MW. Για να αντισταθμιστεί, αφαιρέθηκε μεγάλος αριθμός ράβδων ελέγχου, οδηγώντας τον αντιδραστήρα σε οριακή αστάθεια. Κατά την είσοδό τους, οι ράβδοι αντί να καταστείλουν την αντίδραση, επιδείνωσαν την κατάσταση, προκαλώντας ισχυρή έκρηξη και πυρκαγιά (Medvedev, 1990).

Η έκρηξη κατέστρεψε πλήρως το άνω μέρος του αντιδραστήρα και προκάλεσε ανάφλεξη του γραφίτη. Η φωτιά διέσπειρε ραδιενεργά ισότοπα στο περιβάλλον. Εκτιμάται ότι εκλύθηκε το 3,5% του πυρηνικού καυσίμου, το 100% των ευγενών αερίων, το 50% του Ιωδίου-131 και το 33% του Καΐσιου-137 (UNSCEAR, 2000).

Η πόλη Πρίπιατ εκκενώθηκε εντός 36 ωρών. Οι πυροσβέστες και στρατιωτικοί αντιμετώπισαν την πυρκαγιά με πρόχειρα μέσα και χωρίς ατομική προστασία. Πάνω από 130 άτομα υπέστησαν οξεία ακτινοβολία και 28 εξ αυτών κατέληξαν εντός εβδομάδων. Καταγράφηκαν δόσεις έως και 13 Gy, που ξεπερνούν κατά πολύ το θανατηφόρο όριο (WHO, 2006).

Για την αποτροπή περαιτέρω διαρροής, κατασκευάστηκε το 1986 η πρώτη «Σαρκοφάγος», ενώ το 2016 τέθηκε σε λειτουργία νέα υπερκατασκευή (New Safe Confinement), με προηγμένα συστήματα παρακολούθησης και στεγανοποίησης. Παρά την πρόοδο, το σημείο παραμένει εξαιρετικά επικίνδυνο, και η μακροπρόθεσμη

συμπεριφορά των εγκλωβισμένων ραδιοϊσοτόπων παραμένει αβέβαιη (Fairlie and Sumner, 2006).



Εικόνα 11: Συνολική άποψη του κτηρίου, ύστερα από την έκρηξη (πηγή: Πετρόπουλος Ν., Εισαγωγή στην πυρηνική τεχνολογία, 4η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα, 904, 2019).

3.2.1 Επιπτώσεις του Πυρηνικού Ατυχήματος στην Υγεία και στο Περιβάλλον

Ο πληθυσμός που βρισκόταν κοντά στο σημείο του ατυχήματος εκτέθηκε σε σημαντικές ποσότητες ιονίζουσας ακτινοβολίας, κυρίως από ραδιοϊσότοπα όπως το Ιώδιο-131 (^{131}I), το οποίο έχει μικρή διάρκεια ημιζωής (~8 ημέρες), και το Καίσιο-137 (^{137}Cs), που χαρακτηρίζεται από ημιζωή περίπου 30 ετών. Αυτά τα ισότοπα εκλύθηκαν μαζικά κατά την έκρηξη του αντιδραστήρα και την επακόλουθη πυρκαγιά. Όταν εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό, η ακτινοβολία τους είναι ικανή να προκαλέσει σοβαρές βιολογικές βλάβες, συμπεριλαμβανομένων γενετικών μεταλλάξεων και καταστροφής υγιών κυττάρων (UNSCEAR, 2000).

Ως άμεση αντίδραση στο ατύχημα, οι σοβιετικές αρχές προχώρησαν σε εκκένωση των περιοχών με υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας. Η πόλη Πρίπιατ εκκενώθηκε την επόμενη ημέρα και ακολούθησαν κι άλλες περιοχές, καθώς συνεχείς μετρήσεις αποκάλυπταν επικίνδυνη ραδιενεργό επιβάρυνση (IAEA, 2006). Με την πάροδο του χρόνου, στις πληγείσες περιοχές της Ουκρανίας, της Λευκορωσίας και της Ρωσίας παρατηρήθηκε αύξηση διαφόρων ασθενειών, ιδίως ψυχοσωματικών όπως η κατάθλιψη και το χρόνιο άγχος, αλλά και σωματικών, όπως χρόνια βρογχίτιδα, υπέρταση και διαβήτης. Αν και οι παθήσεις αυτές δεν μπορούν να αποδοθούν απευθείας στη ραδιενέργεια, θεωρούνται αποτέλεσμα του τραύματος από τον βίαιο εκτοπισμό και τη διατάραξη του φυσικού και κοινωνικού περιβάλλοντος των κατοίκων (WHO, 2006; Havenaar, Cwikel and Bromet, 2002).

Η κοινωνικοοικονομική κατάσταση επιδεινώθηκε δραματικά με τη διάλυση της Σοβιετικής Ένωσης, τρία χρόνια μετά το ατύχημα, γεγονός που επηρέασε άμεσα τη δημόσια υγεία. Η κατάρρευση των υποδομών, η υποβάθμιση του συστήματος υγείας και η αδυναμία πρόσβασης σε ιατρική φροντίδα συνδέονται με την αύξηση λοιμωδών νοσημάτων, όπως η φυματίωση, χωρίς όμως άμεση σχέση με τη ραδιενέργεια (Petryna, 2002).

Αντίθετα, υπάρχουν σαφώς τεκμηριωμένα δεδομένα για την αύξηση των περιπτώσεων καρκίνου του θυρεοειδούς, ιδίως στον παιδικό πληθυσμό. Στη Λευκορωσία, την Ουκρανία και τη Ρωσία, ο αριθμός παιδικών περιπτώσεων θυρεοειδικού καρκίνου αυξήθηκε κατακόρυφα την δεκαετία μετά το ατύχημα: από 39 περιπτώσεις την πενταετία 1981–1985 σε 565 περιπτώσεις την περίοδο 1986–1995. Η κύρια θεραπεία είναι η χειρουργική αφαίρεση του θυρεοειδούς, με ικανοποιητικά αποτελέσματα, ωστόσο απαιτείται δια βίου ορμονική υποκατάσταση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ιδιαίτερα στη Λευκορωσία, σημειώθηκαν και θάνατοι, γεγονός που αποδίδεται σε πιο επιθετικές μορφές καρκίνου, ενδεχομένως εξαιτίας ραδιενεργών μεταλλάξεων (Cardis et al., 2006).

Σε περιβαλλοντικό επίπεδο, υπολογίζεται ότι περίπου 125.000 τετραγωνικά μίλια γης στην Ουκρανία, τη Λευκορωσία και τη Ρωσία επηρεάστηκαν από υψηλές δόσεις ραδιενέργειας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την πρόκληση αναπαραγωγικών διαταραχών σε καλλιεργούμενα είδη όπως το σιτάρι, καθώς και τη ρύπανση του εδάφους και των υδάτινων πόρων. Η παρουσία ραδιονουκλεϊδίων στα υπόγεια ύδατα οδήγησε σε εκτεταμένη υδάτινη ρύπανση και σε επιβάρυνση της τροφικής αλυσίδας. Τα ραδιοϊσότοπα απορροφήθηκαν από τα φυτά, μεταφέρθηκαν στα ζώα και τελικά στον άνθρωπο, προκαλώντας δευτερογενείς επιπτώσεις στην υγεία, όπως χημικές δηλητηριάσεις από την κατανάλωση γεωργικών προϊόντων (Møller and Mousseau, 2013; Yablokov, Nesterenko and Nesterenko, 2009).

Η ρύπανση εντοπίστηκε σε μη καλλιεργούμενα βρώσιμα φυτά, όπως μούρα,μανιτάρια, λειχήνες και φτέρες, ενώ επηρέασε και φυτά με ρηχές ρίζες, λόγω μεγαλύτερης απορροφητικότητας. Μολυσμένα φρούτα, όπως μήλα, καταγράφηκαν ακόμη και τρία χρόνια μετά το ατύχημα στη ζώνη αποκλεισμού των 30 χιλιομέτρων. Ο βαθμός μόλυνσης των εδαφών διαφοροποιήθηκε ανάλογα με τη χρήση τους: τα λιβάδια και οι βοσκότοποι εμφάνισαν έως και πέντε φορές μεγαλύτερη συγκέντρωση ραδιενέργειας σε σχέση με καλλιέργειες όπως καλαμπόκι και πατάτες, λόγω της ετήσιας ανανέωσής τους (Fesenko, Alexakhin and Sanzharova, 2001).

Όσον αφορά τις γενετικές επιπτώσεις στη χλωρίδα, οι επιστημονικές απόψεις διίστανται. Η αρμόδια επιτροπή της Λευκορωσίας δεν εντόπισε σαφείς βιοχημικές μεταβολές, ωστόσο νεότερες μελέτες αναφέρουν αλλαγές στη σύνθεση της φυτικής κάλυψης, με επικράτηση ειδών ανθεκτικότερων στη ραδιενέργεια. Παράλληλα, καταγράφηκε μείωση της φωτοσυνθετικής ικανότητας σε εδάφη με υψηλή επιβάρυνση (Kozubov and Taskaev, 1990).

Στην πανίδα, επηρεάστηκαν έντονα τα ζώα που εκτρέφονταν σε δασικές περιοχές, καθώς τα δάση μολύνθηκαν περισσότερο από τα βοσκοτόπια. Τα σαρκοφάγα άγρια ζώα, όπως οι λύκοι και οι αλεπούδες, παρουσίασαν ραδιενεργή επιβάρυνση έως και 12 φορές μεγαλύτερη από τα φυτοφάγα θηράματά τους, γεγονός που αποδίδεται στη βιοσυσσώρευση μέσω της τροφικής αλυσίδας (Hinton et al., 2005). Όσον αφορά τις μεταλλάξεις, η μόνη τεκμηριωμένη περίπτωση αφορά την εμφάνιση μερικού αλμπινισμού σε χελιδόνια. Παρότι έχουν καταγραφεί ενδείξεις αύξησης της άγριας ζωής λόγω της απομάκρυνσης του ανθρώπου, ερευνητές επισημαίνουν ότι η επίδραση της ραδιενέργειας εξακολουθεί να προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα μέχρι σήμερα (Moller and Mousseau, 2009).



Εικόνα 12: Η ερημωμένη φύση, γύρω από τις εγκαταστάσεις ύστερα από το ατύχημα στο Chernobyl.

3.2.2 Έκταση της ραδιενεργής ρύπανσης στην Ευρώπη

Η ραδιενεργός ρύπανση που προκλήθηκε από το ατύχημα του Τσερνόμπιλ το 1986 δεν περιορίστηκε στη Σοβιετική Ένωση. Έρευνες έδειξαν σημαντική ραδιενεργή επιβάρυνση σε περιοχές της ανατολικής και βόρειας Ευρώπης. Ενδεικτικά, στη λίμνη Kojanovskoe, 250 χλμ. από το σημείο του ατυχήματος, καταγράφηκαν επίπεδα ραδιενέργειας στα ψάρια έως και 60 φορές πάνω από τα ευρωπαϊκά όρια ασφαλείας (IAEA, 2006).

Η διασπορά της ραδιενέργειας επηρέασε το έδαφος, το νερό και την ατμόσφαιρα μέσω κυμάτων έκλυσης, επηρεάζοντας ολόκληρη την τροφική αλυσίδα (UNSCEAR, 2000). Η γεωγραφική εξάπλωση επηρεάστηκε από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Υπολογίζεται ότι πάνω από το 50% των εκλυθέντων ραδιενεργών ισοτόπων μεταφέρθηκαν εκτός Ε.Σ.Σ.Δ., με χώρες όπως η Γερμανία, η Σουηδία, η Νορβηγία και η Φινλανδία να δέχονται ποσότητες καϊσίου-137 (^{137}Cs) άνω του 1 PBq (10^{15} Bq) (WHO, 2006). Περίπου το 40% της ευρωπαϊκής έκτασης εμφάνισε επιβάρυνση >4.000 Bq/m², ενώ το 2,3% ξεπέρασε τα 40.000 Bq/m² (Fairlie and Sumner, 2006).

Από τη συνολική δόση ακτινοβολίας παγκοσμίως, το 36% αφορούσε κατοίκους της Ρωσίας, Ουκρανίας και Λευκορωσίας, ενώ το 53% τον υπόλοιπο ευρωπαϊκό πληθυσμό (UNSCEAR, 2000). Παρά τη χρονική απόσταση, αρκετοί περιορισμοί παραμένουν σε ισχύ. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, μέχρι πρόσφατα εφαρμόζονταν υγειονομικά μέτρα σε εκατοντάδες φάρμες προβάτων. Στη Νορβηγία και τη Σουηδία, ισχύουν ακόμη περιορισμοί στη θήρα ταράνδων και άλλων ειδών που ζουν ελεύθερα (IAEA, 2006).

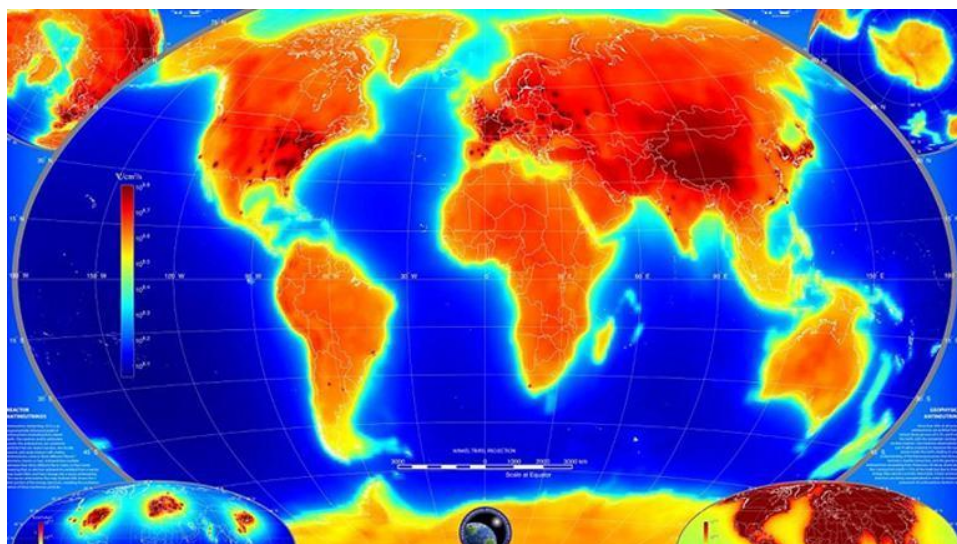
Στη Γερμανία και σε άλλες βόρειες χώρες, εξακολουθούν να ανιχνεύονται αυξημένες συγκεντρώσεις ^{137}Cs , κυρίως σε αγριόχοιρους. Τιμές της τάξης των 6.800 Bq/kg — ποσοστά δεκαπλάσια του επιτρεπτού — επιβεβαιώνουν τη μακροχρόνια βιοσυσσωρευση στο οικοσύστημα (Møller and Mousseau, 2011).

Το ^{131}I που διέφυγε από το Τσερνόμπιλ εντοπίστηκε σε περιοχές εκτός Ε.Σ.Σ.Δ., όπως το Ηνωμένο Βασίλειο και η Τσεχία, ενώ παρατηρήθηκε αύξηση καρκίνου του θυρεοειδούς, ιδίως σε ευαίσθητες πληθυσμιακές ομάδες (Cardis et al., 2006).

Εντούτοις, η μακροχρόνια αξιολόγηση των καρκινογόνων επιπτώσεων είναι περίπλοκη, καθώς οι περισσότερες μορφές καρκίνου εμφανίζονται δεκαετίες μετά την έκθεση (WHO, 2006).

Μεμονωμένες έρευνες κατέγραψαν αυξημένα περιστατικά παιδικής λευχαιμίας στη Δυτική Γερμανία, την Ελλάδα και τη Λευκορωσία, χωρίς όμως επαρκή στατιστική τεκμηρίωση για αιτιώδη σχέση (UNSCEAR, 2000). Σύμφωνα με νεότερους χάρτες ραδιενεργής ρύπανσης (2015), πολλές περιοχές της Ευρώπης εξακολουθούν να εμφανίζουν υψηλές συγκεντρώσεις ^{137}Cs , γεγονός που επιβεβαιώνει τη μακροχρόνια περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Το ατύχημα του Τσερνόμπιλ συνεχίζει να επηρεάζει το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία. Παρότι οι συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων μειώνονται με τον χρόνο, η αβεβαιότητα για τις επιπτώσεις τους παραμένει. Το εύρος των συνεπειών αναδεικνύει τους σοβαρούς κινδύνους που συνδέονται με τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας σε περιβάλλοντα χωρίς απόλυτο έλεγχο ασφαλείας.



Εικόνα 13: Χάρτης ραδιενέργειας ανά τον κόσμο για το έτος 2015.

3.2.3 Κοινωνικές επιπτώσεις και πολιτικές συνέπειες – η εξέλιξη των μηχανισμών ασφάλειας και παρακολούθησης

Το πυρηνικό ατύχημα του Τσερνόμπιλ προκάλεσε ευρύτατες κοινωνικές και πολιτικές επιπτώσεις, επηρεάζοντας θεσμούς, μηχανισμούς ασφάλειας και πολιτικής προστασίας σε όλη την Ε.Σ.Σ.Δ. Οι επιπτώσεις δεν περιορίστηκαν στο τοπικό ή περιφερειακό επίπεδο, αλλά αναδιαμόρφωσαν τις διοικητικές και επιστημονικές δομές παρακολούθησης της ραδιενέργειας (IAEA, 2006). Σοβιετικοί και διεθνείς φορείς κατέγραψαν και εξακολουθούν να παρακολουθούν τα επίπεδα ραδιενέργειας σε καλλιέργειες, προϊόντα, ύδατα και κατοικημένες περιοχές των Ουκρανίας, Λευκορωσίας και Ρωσίας.

Η δειγματοληψία εδάφους και τροφίμων οργανώθηκε βάσει χρήσης γης και επιπέδου έκθεσης, με σκοπό την αποτύπωση της μόλυνσης. Ωστόσο, η προκαταρκτική αποφυγή των «θερμών σημείων» – περιοχών με υπερσυγκέντρωση ραδιενέργειας – οδήγησε σε

υποεκτίμηση της πραγματικής επιβάρυνσης. Μετρήσεις στην Πολωνία ήδη από το 1986 αποκάλυψαν εκτεταμένες περιοχές με ακτινοβολία πολλαπλάσια των γειτονικών τους (Fairlie and Sumner, 2006).

Λίγο μετά το ατύχημα, εφαρμόστηκε ζώνη αποκλεισμού 30 χλμ. γύρω από τον αντιδραστήρα, στην οποία απαγορεύτηκε κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα. Εξαιρέσεις δόθηκαν μόνο για προσωπικό απαραίτητο στη λειτουργία των εναπομεινάντων αντιδραστήρων και για την επιστημονική παρακολούθηση της μόλυνσης. Περίπου 350.000–400.000 κάτοικοι αναγκάστηκαν να εγκαταλείψουν τις εστίες τους, ενώ πολλοί ηλικιωμένοι αρνήθηκαν να αποχωρήσουν (UNDP, 2002).

Η αναγκαστική μετακίνηση πληθυσμών και η εγκατάλειψη περιοχών οδήγησαν σε ραγδαίες δημογραφικές μεταβολές. Οι περιοχές που επλήγησαν αντιμετώπισαν μείωση γεννήσεων, αύξηση θνησιμότητας και φυγή εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της υγειονομικής και εκπαιδευτικής υποδομής και τη διακοπή λειτουργίας πολλών επιχειρήσεων (WHO, 2006).

Στα μέσα της δεκαετίας του 1990, Ουκρανία και Λευκορωσία υλοποίησαν προγράμματα οικονομικής ανάκαμψης των πληγισών περιοχών, χωρίς όμως να επιτύχουν ουσιαστική αποκατάσταση. Οι προσπάθειες κοινωνικής ενσωμάτωσης των εκτοπισμένων συναντούσαν αντίσταση από τις τοπικές κοινωνίες, οι οποίες συχνά αντιμετώπιζαν τους μετεγκατεστημένους ως «μολυσμένους». Αυτό οδήγησε σε κοινωνικές εντάσεις, αποκλεισμούς και στερεοτυπικές αντιλήψεις, με τους φόβους για γενετικές επιπτώσεις να επηρεάζουν τις διαπροσωπικές σχέσεις, ιδιαίτερα στους νέους (UNDP, 2002).

3.2.4 Επιπτώσεις στην Ελλάδα

Το ραδιενεργό νέφος από το Τσερνόμπιλ έφτασε στην Ελλάδα λίγες ημέρες μετά το ατύχημα, προκαλώντας πανικό στον πληθυσμό, κυρίως λόγω της αβεβαιότητας για την ασφάλεια τροφίμων και γεωργικών προϊόντων. Ο κρατικός μηχανισμός συνέστησε προληπτικά την αποφυγή κατανάλωσης φρέσκου γάλακτος και τον σχολαστικό καθαρισμό φρούτων και λαχανικών από τις 5 Μαΐου 1986 και εξής (Petridou et al., 1996). Οι περιοχές που επηρεάστηκαν περισσότερο ήταν η Βόρεια Ελλάδα και η Θεσσαλία, όπου καταγράφηκαν τιμές καισίου-137 (^{137}Cs) έως 65 kBq/m² —πολύ υψηλότερες από το διεθνές όριο των 5 kBq/m² (UNSCEAR, 2000).

Αν και τα επίσημα επιδημιολογικά δεδομένα δεν κατέγραψαν αξιοσημείωτη αύξηση λευχαιμιών ή καρκίνων του θυρεοειδούς, παρατηρήθηκαν κοινωνικές και ψυχολογικές συνέπειες. Ενδεικτικά, πραγματοποιήθηκαν περίπου 2.500 τεχνητές εκτρώσεις το 1986 λόγω φόβου για γενετικές βλάβες στα έμβρυα (Ellul et al., 1989). Επιπλέον, ιατρικές εκτιμήσεις απέδωσαν περίπου 1.500 κρούσματα καρκίνου που καταγράφηκαν μεταξύ 1986–1996 σε πιθανή επίδραση της ραδιενέργειας, αν και η αιτιώδης συσχέτιση παραμένει αβέβαιη (WHO, 2006).

Το ατύχημα κατατάσσεται στην υψηλότερη βαθμίδα (επίπεδο 7) της Διεθνούς Κλίμακας Πυρηνικών Συμβάντων (INES), στο ίδιο επίπεδο με αυτό της Φουκουσίμα (IAEA, 2006). Παρά το γεγονός ότι συνέβη σε αντιδραστήρα ειρηνικής χρήσης, οι συνέπειες ήταν συγκρίσιμες με εκείνες από τη χρήση πυρηνικών όπλων. Ειδικότερα, η

ραδιενεργός κατακρήμνιση από το Τσερνόμπιλ εκτιμάται ότι ήταν έως και 400 φορές μεγαλύτερη από αυτή της ατομικής βόμβας στη Χιροσίμα (Fairlie and Sumner, 2006).

Το γεγονός αυτό ενίσχυσε διεθνώς τις αμφιβολίες για τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας, ακόμη και για ειρηνικούς σκοπούς. Το Τσερνόμπιλ κατέδειξε πως οι αποτυχίες σε τεχνολογικά συστήματα υψηλού κινδύνου, όπως οι πυρηνικοί σταθμοί, μπορούν να έχουν απρόβλεπτες και μακροχρόνιες συνέπειες σε περιβαλλοντικό, υγειονομικό και κοινωνικό επίπεδο.

3.3 Ο σεισμός και το τσουνάμι του 2011-Fukushima, Ιαπωνία.

Την Παρασκευή 11 Μαρτίου 2011 σημειώθηκε ένας από τους ισχυρότερους σεισμούς που έχουν καταγραφεί παγκοσμίως, ανοιχτά της ανατολικής ακτής της Ιαπωνίας. Το φαινόμενο, γνωστό ως «Μέγας Σεισμός της Ανατολικής Ιαπωνίας», είχε εκτιμώμενο μέγεθος 9,0 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ. Περίπου 45 λεπτά μετά τον σεισμό, ένα καταστροφικό τσουνάμι έπληξε τις ανατολικές ακτές της χώρας, κυρίως βόρεια του Τόκιο, προκαλώντας εκτεταμένες καταστροφές και έναν τραγικά μεγάλο αριθμό θυμάτων.

Οι εκτιμήσεις κάνουν λόγο για περίπου 25.000 θανάτους, ενώ οι οικονομικές ζημιές ανήλθαν σε αρκετές εκατοντάδες δισεκατομμύρια δολάρια [39]. Επιστημονικές μελέτες κατέγραψαν ότι το ιαπωνικό νησί Χονσού μετατοπίστηκε κατά 25 εκατοστά ανατολικά, ενώ η ίδια η Γη μετακινήθηκε κατά 2 εκατοστά από την κανονική της τροχιά. Αυτά τα δεδομένα κατατάσσουν το συγκεκριμένο σεισμικό γεγονός μεταξύ των πιο ακραίων που έχουν παρατηρηθεί και καταγραφεί στην ιστορία της ανθρωπότητας.



Εικόνα 14: Επιχείρηση πυρόσβεσης του πυρηνικού σταθμού της Fukushima.

3.3.1 Η κατάσταση των αντιδραστήρων στη Fukushima τη στιγμή του σεισμού

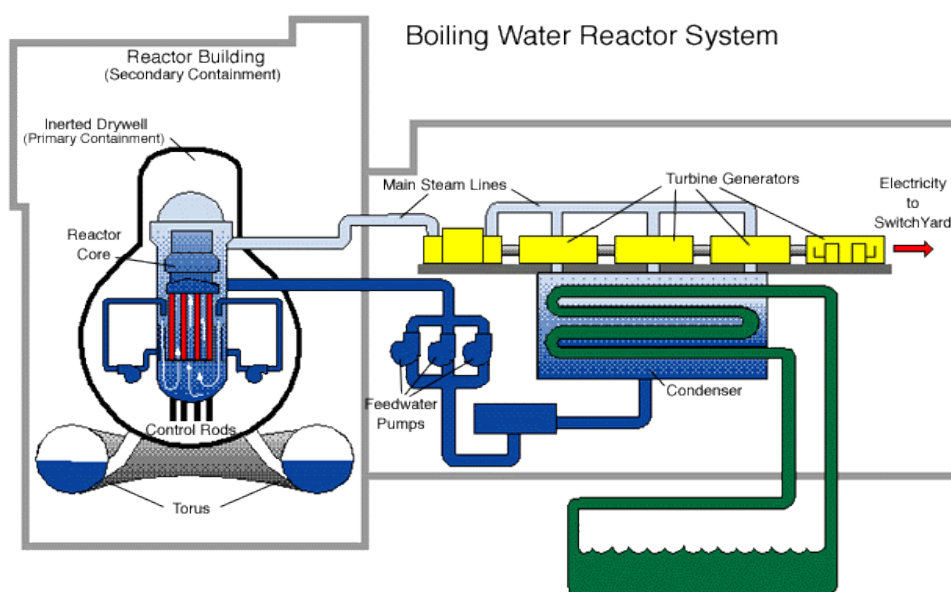
Τη στιγμή του σεισμού, στο παραλιακό πυρηνικό εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Fukushima Daiichi (Fukushima I), που βρίσκεται στην ανατολική ακτή της Ιαπωνίας, βρίσκονταν σε λειτουργία τρεις από τους έξι πυρηνικούς αντιδραστήρες του σταθμού: οι αντιδραστήρες 1, 2 και 3. Οι αντιδραστήρες 4, 5 και 6 ήταν ήδη εκτός λειτουργίας, καθώς βρίσκονταν σε διαφορετικά στάδια αντικατάστασης του πυρηνικού καυσίμου τους.

Όλοι οι αντιδραστήρες του σταθμού ήταν τύπου BWR (Boiling Water Reactor) — αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος — παρόμοιας κατασκευής με εκείνους που είχαν εγκατασταθεί στις Ηνωμένες Πολιτείες από τη General Electric. Ο αντιδραστήρας 1 ήταν τύπου BWR-3, οι αντιδραστήρες 2 έως 5 τύπου BWR-4, ενώ ο αντιδραστήρας 6, νεότερης σχεδίασης, ήταν τύπου BWR-5.

Οι αντιδραστήρες 1–5 διέθεταν καμπανόσχημο περίβλημα προστασίας του πυρήνα και δεξαμενή καταστολής πίεσης τύπου Mark I, με μορφή κυκλικού δακτυλίου και κυλινδρική διατομή. Ο αντιδραστήρας 6 ήταν εξοπλισμένος με νεότερου τύπου περίβλημα Mark II.

Ο σεισμός ενεργοποίησε, όπως προβλεπόταν από τον σχεδιασμό, την αυτόματη διαδικασία σβέσης (scram) όλων των αντιδραστήρων. Ωστόσο, οι σοβαρές ζημιές που προκλήθηκαν στο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας της περιοχής διέκοψαν την παροχή από εξωτερικές πηγές προς τον σταθμό. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ενεργοποίηση των εφεδρικών ηλεκτροπαραγωγών ζευγών (diesel generators), προκειμένου να συνεχίσουν να λειτουργούν τα κυκλώματα ψύξης των αντιδραστήρων, τα οποία είναι κρίσιμα για τη σταθερότητα της κατάστασής τους.

Στη συνέχεια, παρατίθεται σχηματική αναπαράσταση ενός αντιδραστήρα τύπου BWR, παρόμοιου με αυτούς του σταθμού Fukushima Daiichi.



Εικόνα 15: Αναπαράσταση συστήματος πυρηνικού αντιδραστήρα BWR.

3.3.2 Η καταστροφική επίδραση από το τσουνάμι και η απώλεια της ψύξης

Τα πραγματικά προβλήματα στον πυρηνικό σταθμό Fukushima Daiichi ξεκίνησαν με την έλευση του τσουνάμι, που ακολούθησε τον σεισμό. Το κύμα, ύψους περίπου 20 μέτρων, ξεπέρασε κατά πολύ το ύψος των αντιπλημμυρικών αναχωμάτων του σταθμού και πλημμύρισε τις εγκαταστάσεις του.

Το θαλασσινό νερό κατέστρεψε τα κρίσιμα υποστηρικτικά συστήματα, διακόπτοντας τη λειτουργία των εφεδρικών ηλεκτρογεννητριών, διαλύοντας τις δεξαμενές καυσίμων που τις τροφοδοτούσαν και καταστρέφοντας τα συστήματα των συσσωρευτών

(μπαταριών). Από όλα τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, μόνο ένα συνέχισε να λειτουργεί, παρέχοντας ισχύ στους αντιδραστήρες 5 και 6.

Για τους αντιδραστήρες 1 έως 4, η πλήρης απώλεια ηλεκτρικής ισχύος οδήγησε, σταδιακά και ανάλογα με τις συνθήκες κάθε αντιδραστήρα, σε διακοπή της λειτουργίας όλων των κυκλωμάτων ψύξης, τόσο των βασικών όσο και των εφεδρικών. Καθώς η θερμότητα δεν μπορούσε πλέον να απομακρυνθεί, οι πυρήνες των αντιδραστήρων υπερθερμάνθηκαν και ξεκίνησε η τήξη του πυρηνικού καυσίμου.

Η υπερθέρμανση προκάλεσε την παραγωγή ατμού σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Το Zircaloy, το κράμα ζirkονίου που επικάλυπτε τις ράβδους καυσίμου, αντέδρασε χημικά με τον ατμό, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση υδρογόνου, τόσο εντός του δοχείου πίεσης, όσο και στα κυκλώματα ψύξης — φαινόμενο που επρόκειτο να οδηγήσει σύντομα σε εκρήξεις υδρογόνου.

3.3.4 Εξέλιξη της τήξης και εκρήξεις υδρογόνου στους αντιδραστήρες

Την επόμενη ημέρα, 12 Μαρτίου, εκτιμάται ότι το τήγμα (λιωμένο υλικό σε θερμοκρασίες εκατοντάδων βαθμών Κελσίου) του πυρήνα στον αντιδραστήρα 1 διέρρηξε τον πυθμένα του δοχείου πίεσης, απελευθερώνοντας υδρογόνο ως αποτέλεσμα της χημικής αντίδρασης του ζirkονίου (Zircaloy) με το νερό. Το υδρογόνο μετακινήθηκε στο εσωτερικό του προστατευτικού περιβλήματος και στη συνέχεια προς το επάνω τμήμα του κτιρίου του αντιδραστήρα. Εκεί σημειώθηκε έκρηξη, η οποία κατέστρεψε τα εξωτερικά τοιχώματα του άνω ορόφου, στο οποίο βρισκόταν η δεξαμενή του αναλωμένου πυρηνικού καυσίμου.

Στις 13 Μαρτίου, ξεκίνησε η τήξη του πυρήνα και στον αντιδραστήρα 3, και οι αντίστοιχες εκρήξεις υδρογόνου σημειώθηκαν αργότερα την ίδια ημέρα. Αντίστοιχα, στις 14 Μαρτίου παρατηρήθηκε τήξη πυρήνα στον αντιδραστήρα 2, με επακόλουθες εκρήξεις υδρογόνου, που ακολούθησαν τον ίδιο μηχανισμό. Στις 15 Μαρτίου, σημειώθηκαν επίσης εκρήξεις υδρογόνου και στον αντιδραστήρα 4. Η αιτία αυτών των εκρήξεων παραμένει ασαφής μέχρι σήμερα, καθώς ο αντιδραστήρας 4 βρισκόταν σε κατάσταση σβέσης (shutdown) κατά τη στιγμή του συμβάντος.

Λόγω των εκτεταμένων καταστροφών στο πυρηνικό καύσιμο και στα περιβλήματα των αντιδραστήρων 1 έως και 4, μεγάλες ποσότητες ραδιενέργειας απελευθερώθηκαν στο περιβάλλον, προκαλώντας σοβαρή ρύπανση στην ευρύτερη περιοχή. Τα κυριότερα ραδιοϊσότοπα που εκλύθηκαν ήταν το Ιώδιο-131 (^{131}I), το Καίσιο-134 (^{134}Cs) και το Καίσιο-137 (^{137}Cs). Περιφερειακά εντοπίστηκε επίσης παρουσία Πλουτωνίου (Pu-239), Νεπθυνίου (Np-239) και Στροντίου (Sr-90).

Επιπλέον, θεωρείται εύλογο ότι, λόγω των ρηγμάτων που δημιουργήθηκαν στις εγκαταστάσεις, ολόκληρο το περιεχόμενο των ραδιενεργών ευγενών αερίων από τους πυρήνες όλων των αντιδραστήρων εκλύθηκε στην ατμόσφαιρα.

3.3.5 Ζώνη εκκένωσης και επιπτώσεις στον πληθυσμό

Οι εκλύσεις ραδιενέργειας που διαπιστώθηκαν οδήγησαν τις αρμόδιες αρχές της Ιαπωνίας στη δημιουργία ζώνης εκκένωσης ακτίνας 20 km γύρω από τον σταθμό. Από τη ζώνη αυτή απομακρύνθηκαν αναγκαστικά περίπου 156.000 άτομα.

Αρκετές μελέτες της Επιστημονικής Επιτροπής των Ηνωμένων Εθνών για τις Επιπτώσεις της Ατομικής Ακτινοβολίας (United Nations Scientific Committee on the

Effects of Atomic Radiation – UNSCEAR) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι δεν αναμένεται να προκύψουν θάνατοι στον πληθυσμό λόγω της έκθεσης στη ραδιενέργεια. Παρ' όλα αυτά, ορισμένοι μεμονωμένοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι ήδη παρατηρήθηκαν θάνατοι, οι οποίοι σχετίζονται κυρίως με τις συνθήκες της εκκένωσης και όχι με την ακτινοβολία αυτή καθαυτή.

Για παράδειγμα, μελέτη της Σχολής Δημόσιας Υγείας του Πανεπιστημίου Harvard (Harvard School of Public Health) διαπίστωσε αυξημένο ποσοστό θανάτων σε ηλικιωμένους που υποχρεώθηκαν να αλλάξουν τόπο κατοικίας εξαιτίας του ατυχήματος.

Χωρίς επαρκή πληροφόρηση και τεκμηρίωση, η Ρυθμιστική Αρχή για τη Ραδιενέργεια των Η.Π.Α. (NRC) συνέστησε εσφαλμένα στο Υπουργείο Εξωτερικών των Η.Π.Α. την εκκένωση των Αμερικανών πολιτών σε ακτίνα 80 km από τον σταθμό. Το σφάλμα αυτό οφειλόταν στην ανεπαρκή κατανόηση τόσο των τεχνικών χαρακτηριστικών του σταθμού, όσο και των συνθηκών του ατυχήματος. (Παρόμοιο σφάλμα είχε σημειωθεί και σε παλαιότερη εκτίμηση της NRC για το ατύχημα στο Three Mile Island.)

Τα παραπάνω δείχνουν ότι υπάρχει ακόμη σημαντικό περιθώριο βελτίωσης στον τρόπο αξιολόγησης των δεδομένων και των προβλεπόμενων συνεπειών των πυρηνικών ατυχημάτων, τόσο από πλευράς επιστημονικής τεκμηρίωσης όσο και από πλευράς πολιτικής διαχείρισης κρίσεων.

3.3.6 Έκθεση εργαζομένων στη ραδιενέργεια

Οι εργαζόμενοι στον πυρηνικό σταθμό της Φουκουσίμα, τόσο κατά τη διάρκεια του ατυχήματος όσο και τις πρώτες ημέρες μετά από αυτό, απορρόφησαν σαφώς υψηλότερες δόσεις ραδιενέργειας σε σχέση με τον γενικό πληθυσμό. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (World Health Organization – WHO) εκτίμησε ότι η υψηλότερη δόση προσβλήθηκε από μια μικρή ομάδα εργαζομένων που δραστηριοποιήθηκε υπό ειδικές έκτακτες συνθήκες. Η δόση αυτή εκτιμήθηκε περίπου στα 700 mSv (μιλισίβερτ), δηλαδή 70 rem.

Για τους υπόλοιπους εργαζομένους, η απορροφηθείσα δόση κυμάνθηκε μεταξύ 5 και 200 mSv (500 mrem έως 20 rem). Συγκεκριμένα, περίπου τα 2/3 του προσωπικού προσέλαβαν 5 mSv, ενώ το υπόλοιπο 1/3 εκτιμάται ότι έλαβε δόσεις έως και 30 mSv (3 rem).

Οι εργαζόμενοι που απορρόφησαν τις υψηλότερες δόσεις (700 mSv), δέχθηκαν τη μεγαλύτερη ακτινοβολία στον θυρεοειδή αδένα, κυρίως λόγω της έκθεσης στο ραδιενεργό ιώδιο-131 (^{131}I), το οποίο συσσωρεύεται εκλεκτικά σε αυτό το όργανο. Αντίθετα, οι δόσεις στα υπόλοιπα όργανα του σώματος ήταν σημαντικά χαμηλότερες.

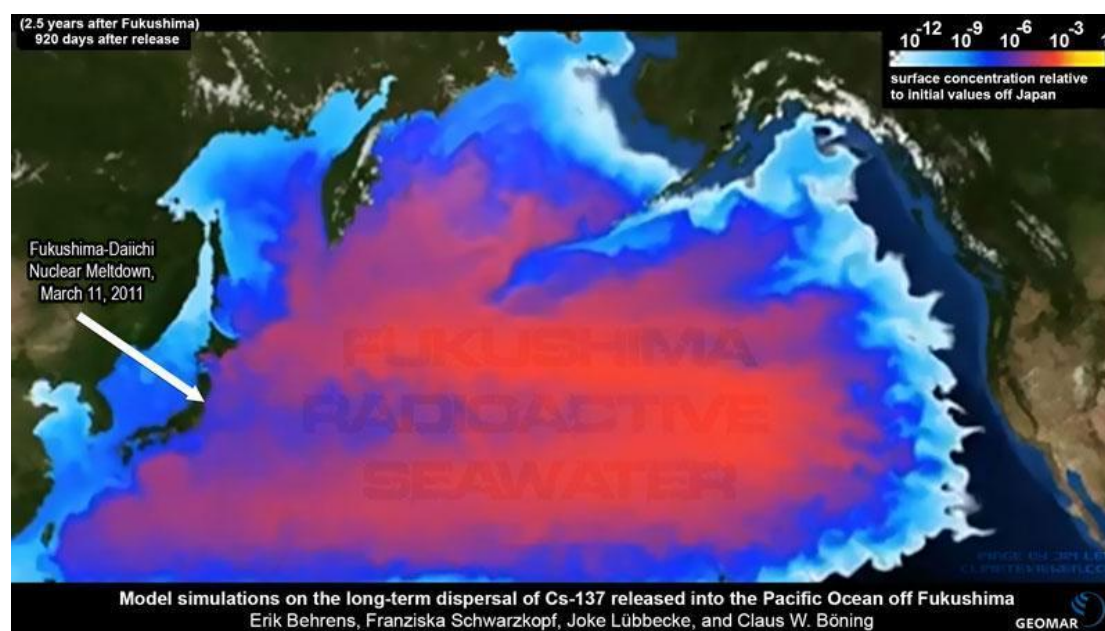
Από τις 13 Μαρτίου, δηλαδή από τη δεύτερη ημέρα μετά την έναρξη της κατάρρευσης των αντιδραστήρων, όσοι είχαν εκτεθεί σε ^{131}I χορηγήθηκαν χάπια ιωδίου, ώστε να μειωθεί η πρόσληψη ραδιενεργού ιωδίου από τον θυρεοειδή. Σύμφωνα με τα μέχρι τότε δεδομένα του WHO, δεν είχε παρατηρηθεί εμφάνιση κακοήθειας στον θυρεοειδή σε κανέναν από τους εργαζομένους που εκτέθηκαν κατά τις πρώτες φάσεις του ατυχήματος.

3.3.7 Εκτιμήσεις του ΙΑΕΑ για τα αίτια και τη σοβαρότητα του ατυχήματος

Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ) αποδίδει τα βαθύτερα αίτια και τη σοβαρότητα του πυρηνικού ατυχήματος στη Φουκουσίμα σε έναν συνδυασμό οργανωτικών αδυναμιών και ανθρώπινων σφαλμάτων (ΙΑΕΑ, 2015). Κεντρικό ρόλο διαδραμάτισε η ευρέως διαδεδομένη πεποίθηση ότι ένα ατύχημα τέτοιας κλίμακας ήταν εξαιρετικά απίθανο, λόγω του υψηλού τεχνολογικού επιπέδου και της θεωρητικά άρτιας λειτουργίας των ιαπωνικών πυρηνικών εγκαταστάσεων (Lehmann, 2016). Η εσφαλμένη αυτή αίσθηση ασφάλειας οδήγησε σε σοβαρές παραλείψεις στον σχεδιασμό αντιμετώπισης καταστάσεων πλήρους απώλειας ισχύος, γεγονός που αποδείχθηκε κρίσιμο όταν σημειώθηκε η αποσύνδεση όλων των εφεδρικών πηγών ενέργειας μετά τον σεισμό και το τσουνάμι του 2011 (ΙΑΕΑ, 2015).

Επιπλέον, το ρυθμιστικό σύστημα της Ιαπωνίας χαρακτηριζόταν από κατακερματισμό αρμοδιοτήτων και ασαφή κατανομή ευθυνών μεταξύ κρατικών φορέων, γεγονός που οδήγησε σε καθυστερήσεις, ελλιπή εποπτεία και αδυναμία συντονισμένης αντίδρασης κατά την εξέλιξη της κρίσης (Lehmann, 2016). Η εμπειρία της Φουκουσίμα οδήγησε στη θέσπιση μεταρρυθμίσεων, με στόχο την ενίσχυση της ανεξαρτησίας των ρυθμιστικών αρχών και τη συμμόρφωση με τα διεθνή πρότυπα πυρηνικής ασφάλειας (ΙΑΕΑ, 2015).

Η σημαντική ποσότητα ραδιενέργειας που απελευθερώθηκε στο περιβάλλον προκάλεσε παγκόσμια ανησυχία, καθώς τα ραδιενεργά ισότοπα μεταφέρθηκαν μέσω της ατμόσφαιρας σε μεγάλη γεωγραφική έκταση, υπογραμμίζοντας και πάλι τις διακρατικές διαστάσεις ενός πυρηνικού ατυχήματος και τις δυσκολίες ελέγχου των επιπτώσεών του.



Εικόνα 16: Χρωματική απεικόνιση με την συγκέντρωση της ραδιενέργειας μεταξύ Ιαπωνίας και Αλάσκας μετά από 2,5 χρόνια από το πυρηνικό ατύχημα (πηγή: Yukiya Amano, *The Fukushima Daiichi Accident*, ΙΑΕΑ, 2015).

3.3.8 Αιτίες και εξέλιξη του ατυχήματος

Το ατύχημα στον πυρηνικό σταθμό Fukushima Daiichi ξεκίνησε με τον καταστροφικό σεισμό μεγέθους 9 Ρίχτερ και το επακόλουθο τσουνάμι της 11ης Μαρτίου 2011, που προκάλεσαν σοβαρές ζημιές στις εγκαταστάσεις και οδήγησαν σε εκρήξεις υδρογόνου σε τέσσερις αντιδραστήρες, συνοδευόμενες από σημαντική διαρροή ραδιενέργειας στο περιβάλλον (IAEA, 2015). Η κύρια αιτία της κρίσης ήταν η πλήρης απώλεια ψύξης του αντιδραστήρα (LOCA), λόγω της καταστροφής τόσο της εξωτερικής ηλεκτροδότησης όσο και των εφεδρικών γεννητριών. Οι σχεδιαστικές αδυναμίες έναντι ακραίων φυσικών καταστροφών αποδείχθηκαν κρίσιμες, ιδίως η ανεπαρκής προστασία από κύματα υψηλότερα των αντιπλημμυρικών αναχωμάτων (Funabashi and Kitazawa, 2012).

Ο εξοπλισμός των αντιδραστήρων ήταν τεχνολογίας BWR (Boiling Water Reactor) δεύτερης γενιάς, με τον παλαιότερο να λειτουργεί από το 1971. Η τεχνολογική του παλαιότητα και η διαπιστωμένη φθορά συνέβαλαν στην έκταση του ατυχήματος (Acton and Hibbs, 2012). Η ανεπαρκής συντήρηση, σε συνδυασμό με τις οικονομικές περικοπές και την πίεση στην πυρηνική βιομηχανία, είχαν ήδη θέσει σε δεύτερη μοίρα την ασφάλεια, όπως είχε παρατηρηθεί και σε προηγούμενα περιστατικά (IAEA, 2015).

Οι αντιδραστήρες ανταποκρίθηκαν στον σεισμό, αλλά το τσουνάμι προκάλεσε κατάρρευση του συστήματος ψύξης, οδηγώντας σε υπερθέρμανση. Ελήφθη απόφαση για χρήση θαλασσινού νερού για την ψύξη, προκαλώντας ανησυχίες για περιβαλλοντική ρύπανση. Επιπλέον, σχεδιαστικές επιλογές όπως η τοποθέτηση της δεξαμενής καυσίμων σε ψηλό σημείο του κτιρίου επιδείνωσαν την κατάσταση, καθώς εμπόδισαν την απρόσκοπτη ψύξη και συνέβαλαν στην εκδήλωση εκρήξεων (NISA, 2011).

Η απουσία νερού οδήγησε σε αύξηση θερμοκρασίας και παραγωγή υδρογόνου από την αντίδραση ζιρκονίου με νερό, το οποίο συσσωρεύτηκε και εξερράγη, απελευθερώνοντας ραδιενεργά ισότοπα, κυρίως Ιώδιο-131 (^{131}I). Το ραδιενεργό νέφος εξαπλώθηκε μέχρι την Ευρώπη σε διάστημα περίπου 8–10 ημερών, αν και η δραστητικότητα είχε μειωθεί σημαντικά κατά την άφιξή του (WHO, 2013).

Η αποτυχία των συστημάτων ελέγχου και η ανεπαρκής πρόβλεψη ακραίων σεναρίων αποκάλυψαν τα όρια του τεχνολογικού σχεδιασμού. Ως αποτέλεσμα, η Ιαπωνία προχώρησε σε ριζικές μεταρρυθμίσεις ενίσχυσης της πυρηνικής ασφάλειας και επανεξέτασης της στρατηγικής της στον τομέα της ενέργειας (IAEA, 2015).

3.3.9 Επιπτώσεις στην υγεία και στο περιβάλλον από το ατύχημα της Fukushima

Οι εκτιμήσεις των διεθνών οργανισμών για τις επιπτώσεις στην υγεία από το ατύχημα της Fukushima υπολογίζουν ότι, σε μακροχρόνιο ορίζοντα, ενδέχεται να προκληθούν 180 έως 2.500 περιστατικά καρκίνου, κυρίως μεταξύ των εργαζομένων στον σταθμό, οι οποίοι εκτέθηκαν σε υψηλότερα επίπεδα ακτινοβολίας (UNSCEAR, 2014). Αν και οι προβλέψεις αυτές δεν προσεγγίζουν την κλίμακα του Τσερνόμπιλ —όπου σημειώθηκαν περίπου 6.000 περιπτώσεις καρκίνου του θυρεοειδούς, κυρίως σε παιδιά (WHO, 2006)— η διεθνής ανησυχία υπήρξε έντονη τις πρώτες εβδομάδες.

Ένα βασικό στοιχείο διαφοροποίησης μεταξύ των δύο ατυχημάτων είναι η κατανομή της ραδιενέργειας. Στη Fukushima, περίπου το 80% των εκπομπών κατευθύνθηκε προς τον Ειρηνικό Ωκεανό, περιορίζοντας τη ραδιενεργό επιβάρυνση της ξηράς και, κατά συνέπεια, τις άμεσες επιπτώσεις στον πληθυσμό της Ιαπωνίας (IAEA, 2015). Παρά την ανησυχία για θαλάσσια ρύπανση και επιπτώσεις στην τροφική αλυσίδα, η μεταφορά ραδιενεργών στοιχείων μέσω των ωκεάνιων ρευμάτων λειτούργησε εν μέρει ως φυσικός μηχανισμός αραίωσης.

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας εκτίμησε ελαφρώς αυξημένο κίνδυνο καρκίνου του θυρεοειδούς για κορίτσια που ήταν βρέφη ή μικρά παιδιά την περίοδο του ατυχήματος, καθώς και μικρότερη αύξηση για τα αγόρια (WHO, 2013). Ωστόσο, οι εκτιμώμενες δόσεις στον γενικό πληθυσμό ήταν σχετικά χαμηλές, κυμαινόμενες μεταξύ 12,5 και 25 mSv, επίπεδα που βρίσκονται κοντά στα ανώτατα επιτρεπτά όρια επαγγελματικής έκθεσης και δεν αναμένεται να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα υγείας στον γενικό πληθυσμό.

Η στατιστική τεκμηρίωση των επιπτώσεων είναι δύσκολη, καθώς η αναμενόμενη αύξηση των σχετικών μορφών καρκίνου —όπως ο καρκίνος του θυρεοειδούς στα θηλυκά βρέφη— εκτιμάται περίπου στο 1%, ποσοστό που εντάσσεται εντός των φυσιολογικών διακυμάνσεων και δεν επιτρέπει την εξαγωγή ισχυρών αιτιολογικών συμπερασμάτων (UNSCEAR, 2014; IAEA, 2015).

3.3.10 Ψυχολογικές συνέπειες του ατυχήματος της Fukushima

Πέρα από τις σωματικές επιπτώσεις, το πυρηνικό ατύχημα της Fukushima προκάλεσε σοβαρές ψυχολογικές διαταραχές στον πληθυσμό, με μακροχρόνιες συνέπειες. Η αβεβαιότητα γύρω από την έκθεση στη ραδιενέργεια, σε συνδυασμό με την υποχρεωτική εκκένωση, ενίσχυσε τον φόβο για την «αόρατη απειλή» και δημιούργησε συνθήκες έντονου άγχους, κυρίως σε γονείς με μικρά παιδιά (WHO, 2013). Όπως έχει παρατηρηθεί και σε παλαιότερα πυρηνικά συμβάντα —όπως στο Three Mile Island— η παρατεταμένη ψυχική ένταση συσχετίστηκε με αυξημένα ποσοστά καρδιαγγειακών επεισοδίων (Bromet et al., 2011).

Λίγο μετά το ατύχημα, επιστήμονες που επισκέφθηκαν μη εκκενωμένες περιοχές διαπίστωσαν σημάδια σοβαρού στρες, ακόμη και σε κοινότητες που δεν εκτέθηκαν άμεσα στη ραδιενέργεια. Οι μαρτυρίες ανέφεραν διαταραχές ύπνου, αισθήματα αδυναμίας και δυσπιστία προς τις αρχές, φαινόμενα που εντάσσονται στο φάσμα του μετατραυματικού στρες. Η ψυχολογική αυτή επιβάρυνση επιδεινώθηκε από τις αντιφατικές οδηγίες των ιαπωνικών και αμερικανικών αρχών σχετικά με την εκκένωση, οι οποίες υπονόμευσαν την εμπιστοσύνη των πολιτών προς τους θεσμούς (IAEA, 2015).

Σε ένα ήδη διαταραγμένο και ραδιενεργά επιβαρυνόμενο περιβάλλον, η επιβάρυνση της ψυχικής υγείας μετατράπηκε σε κρίσιμο πρόβλημα δημόσιας υγείας, ενισχύοντας τα ψυχοσωματικά συμπτώματα και μειώνοντας το αίσθημα ασφάλειας και σταθερότητας των πολιτών.

3.3.11 Επιπτώσεις στην πρωτογενή παραγωγή: γεωργία, κτηνοτροφία και αλιεία

Το πυρηνικό ατύχημα της Fukushima είχε σημαντικές επιπτώσεις στην πρωτογενή παραγωγή της Ιαπωνίας, επηρεάζοντας άμεσα τη γεωργία, την κτηνοτροφία και την αλιεία. Η ραδιενεργός ρύπανση του εδάφους οδήγησε σε μόλυνση γεωργικών εκτάσεων, ιδίως με καίσιο-137, και σε περιορισμούς στη διακίνηση γεωργικών και ζωικών προϊόντων, εξαιτίας υπερβάσεων των αποδεκτών ορίων ραδιενέργειας (IAEA, 2015). Περιοχές κοντά στη Fukushima εμφάνισαν συγκεντρώσεις άνω των 100.000 MBq ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, οδηγώντας σε αυστηρές απαγορεύσεις για την εμπορία τροφίμων (WHO, 2013).

Η γεωλογική ιδιομορφία της Ιαπωνίας, με επιφανειακά στρώματα πλούσια σε αργιλικά συστατικά που συγκρατούν το καίσιο, συνέβαλε στην παρατεταμένη παραμονή ραδιοϊσοτόπων στο αγροτικό περιβάλλον, πλήττοντας ιδιαίτερα την καλλιέργεια ρυζιού – το βασικότερο προϊόν διατροφής στη χώρα (UNSCEAR, 2014). Η μόλυνση επεκτάθηκε και στην κτηνοτροφία, με την καταγραφή ραδιενεργών ισοτόπων σε γάλα και κρέας.

Παράλληλα, η απελευθέρωση ραδιενέργειας στον Ειρηνικό Ωκεανό προκάλεσε ανησυχία για τα αλιεύματα. Αν και οι περισσότερες μετρήσεις σε ψάρια δεν υπερέβαιναν τα επιτρεπτά όρια, η εμπιστοσύνη των καταναλωτών είχε ήδη κλονιστεί, οδηγώντας σε δραστική μείωση της ζήτησης και σημαντικές οικονομικές απώλειες για τους παράκτιους πληθυσμούς και τους αλιευτικούς συνεταιρισμούς.

Σε σύγκριση με το ατύχημα του Τσερνόμπιλ, η έκλυση ραδιενέργειας στη Fukushima ήταν ποσοτικά μικρότερη και ποιοτικά διαφορετική, καθώς δεν παρατηρήθηκε εκτεταμένη πυρκαγιά στον πυρήνα ούτε διαρροή βαρέων ραδιοϊσοτόπων, όπως το πλουτόνιο. Εντούτοις, οι περιβαλλοντικές και οικονομικές συνέπειες παραμένουν σημαντικές και μακροχρόνιες, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο (IAEA, 2015).

3.3.12 Συνεχιζόμενες επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον: διαρροές ραδιενέργειας στον Ειρηνικό

Δύο χρόνια μετά το ατύχημα, το 2013, εντοπίστηκαν μολυσμένα υπόγεια νερά σε σημεία μεταξύ κτιριακών εγκαταστάσεων που είχαν υποστεί ζημιές στον πυρηνικό σταθμό της Fukushima. Ορισμένες από τις περιοχές αυτές είχαν άμεση ή έμμεση σύνδεση με τον Ειρηνικό Ωκεανό. Η εταιρεία Tokyo Electric Power Company (TEPCO), η μεγαλύτερη παραγωγός ενέργειας στην Ιαπωνία, πραγματοποίησε συμπληρωματικές μελέτες, οι οποίες κατέδειξαν ότι σημαντικό μέρος της ραδιενεργού ρύπανσης προερχόταν από υπόγειες τάφρους καλωδίων, οι οποίες φιλοξενούσαν συστήματα σύνδεσης με τις αντλίες κυκλοφορίας των εγκαταστάσεων.

Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (IAEA) και η TEPCO κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αιτία της ρύπανσης ήταν οι δομικές ζημιές από τον σεισμό του 2011. Ως συνέπεια αυτών των ζημιών, η πυρηνική μονάδα της Fukushima άρχισε να απελευθερώνει ραδιενεργά υλικά στον Ειρηνικό Ωκεανό — μια διαρροή που συνεχιζόταν για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Πέντε χρόνια μετά το ατύχημα, τα μολυσμένα ύδατα, παρασυρόμενα από τα θαλάσσια ρεύματα, είχαν εξαπλωθεί σχεδόν σε ολόκληρο τον Ειρηνικό Ωκεανό, φτάνοντας από τη Βόρεια Αμερική έως την Αυστραλία και την Παταγονία, στο νοτιότερο άκρο του Ατλαντικού Ωκεανού.

Η εξάπλωση αυτή επιβεβαιώθηκε και από το Ωκεανογραφικό Ίδρυμα Woods Hole, το οποίο, τον Νοέμβριο του 2014, εντόπισε ίχνη ραδιενεργής ρύπανσης από τη Fukushima, περίπου 150 χιλιόμετρα ανοικτά των ακτών της Eureka στην Καλιφόρνια.

3.3.13 Συγκριτική Αξιολόγηση των Επιπτώσεων Τσερνόμπιλ και Φουκουσίμα

Η σύγκριση μεταξύ των πυρηνικών ατυχημάτων του Τσερνόμπιλ και της Φουκουσίμα αναδεικνύει κρίσιμες διαφορές τόσο ως προς το μέγεθος της ραδιενεργού διαρροής όσο και ως προς τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις. Το Τσερνόμπιλ έχει τεκμηριωθεί ως το πιο καταστροφικό πυρηνικό ατύχημα, με εκτεταμένες επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και στο περιβάλλον. Αντίθετα, στη Φουκουσίμα η πλήρης αποτίμηση των συνεπειών είναι ακόμη σε εξέλιξη, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της ραδιενέργειας (81%) κατέληξε στον Ειρηνικό Ωκεανό και μόνο περιορισμένα ίχνη εντοπίστηκαν σε άλλες ηπείρους (IAEA, 2015· WHO, 2013).

Ενώ στο Τσερνόμπιλ εκατοντάδες χιλιάδες άτομα επηρεάστηκαν από την ακτινοβολία, στη Φουκουσίμα οι άμεσοι θάνατοι από ραδιενέργεια δεν έχουν επιβεβαιωθεί. Ωστόσο, μελέτες σε περισσότερα από 38.000 παιδιά της περιοχής κατέδειξαν ότι το 36% εμφάνιζε ανωμαλίες στον θυρεοειδή, κατάσταση που αποδίδεται στην απορρόφηση ^{131}I , ιδίως στα βρέφη, τα οποία είναι πιο ευάλωτα (ATA, 2014).

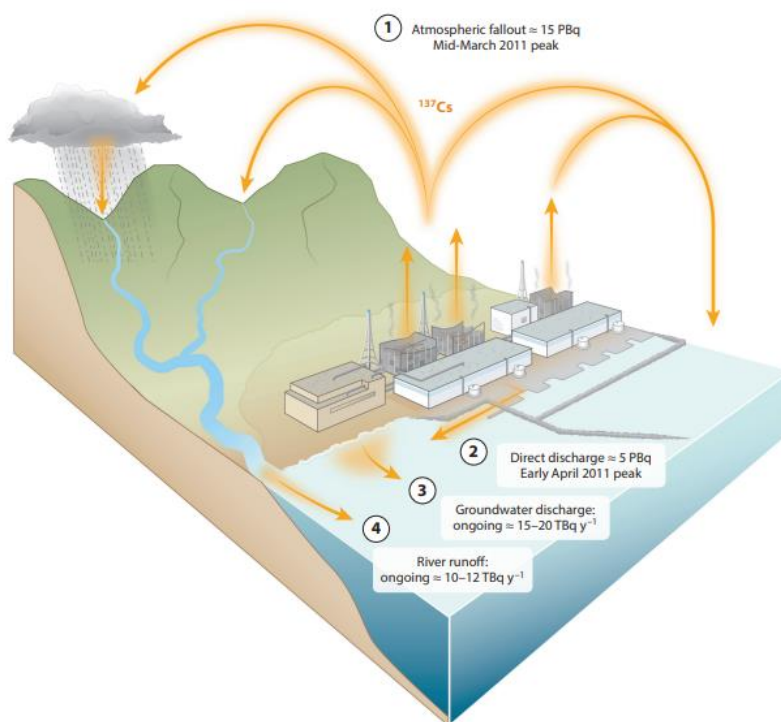
Η επίδραση στη βιοποικιλότητα ήταν επίσης σημαντική. Παρατηρήθηκαν γενετικές ανωμαλίες σε πτηνά, έντομα και θηλαστικά, με μεταλλάξεις να εντοπίζονται και σε πεταλούδες, όπως καθυστερημένη ανάπτυξη και μορφολογικές αλλοιώσεις, υποδεικνύοντας πιθανές επιδράσεις στο DNA και διαγενεακή μετάδοση (UNSCEAR, 2014). Ενδείξεις φυσικής επιλογής ορισμένων ειδών προς μεγαλύτερη αντοχή στη ραδιενέργεια έχουν αρχίσει να τεκμηριώνονται, παραπέμποντας σε εξελικτικά φαινόμενα.

Η διαρροή ραδιενεργών ισοτόπων στον θαλάσσιο χώρο προκάλεσε ρύπανση σε ψάρια και ιχθύματα. Μετρήσεις από το 2014 ανέδειξαν αυξημένα επίπεδα καϊσίου σε τόνους στον Ειρηνικό, ενώ από το 2016, οι συγκεντρώσεις Cs-137 και Cs-134 στον κόλπο του Τόκιο υπερέβαιναν κατά 1–2 τάξεις μεγέθους τις φυσιολογικές τιμές (IAEA, 2015). Η επιβάρυνση της θαλάσσιας ζωής θεωρείται σοβαρή, καθώς η αλυσιδωτή βιοσυσσώρευση ενδέχεται να επηρεάσει μακροπρόθεσμα και τον άνθρωπο.

Το ατύχημα της Φουκουσίμα ταξινομήθηκε στο υψηλότερο επίπεδο (βαθμίδα 7) της Διεθνούς Κλίμακας Πυρηνικών Συμβάντων (INES), όπως και το Τσερνόμπιλ. Ωστόσο, η πραγματική του αποτίμηση παραμένει ανοιχτή, λόγω της πολυπλοκότητας των κοινωνικών και περιβαλλοντικών παραγόντων που εξελίσσονται με τον χρόνο. Οι επιπτώσεις είναι όχι μόνο τεχνικές αλλά και βαθιά κοινωνικές, καθώς η ψυχολογική πίεση, η απώλεια εμπιστοσύνης στους θεσμούς και οι συνέπειες στην πρωτογενή παραγωγή διαμορφώνουν ένα διαρκές περιβάλλον κρίσης (WHO, 2013).

Τα πρόσφατα σεισμικά γεγονότα, όπως ο σεισμός των 7,5 Ρίχτερ στην Ιαπωνία το 2024, επανέφεραν στο προσκήνιο τους φόβους για την ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων. Η Ιαπωνία, όντας ιδιαίτερα σεισμογενής, αντιμετωπίζει δομικές δυσκολίες στη διαχείριση κινδύνου. Το πυρηνικό ατύχημα της Φουκουσίμα καταδεικνύει ότι τέτοιες κρίσεις δεν έχουν μόνο τοπική, αλλά εν δυνάμει παγκόσμια

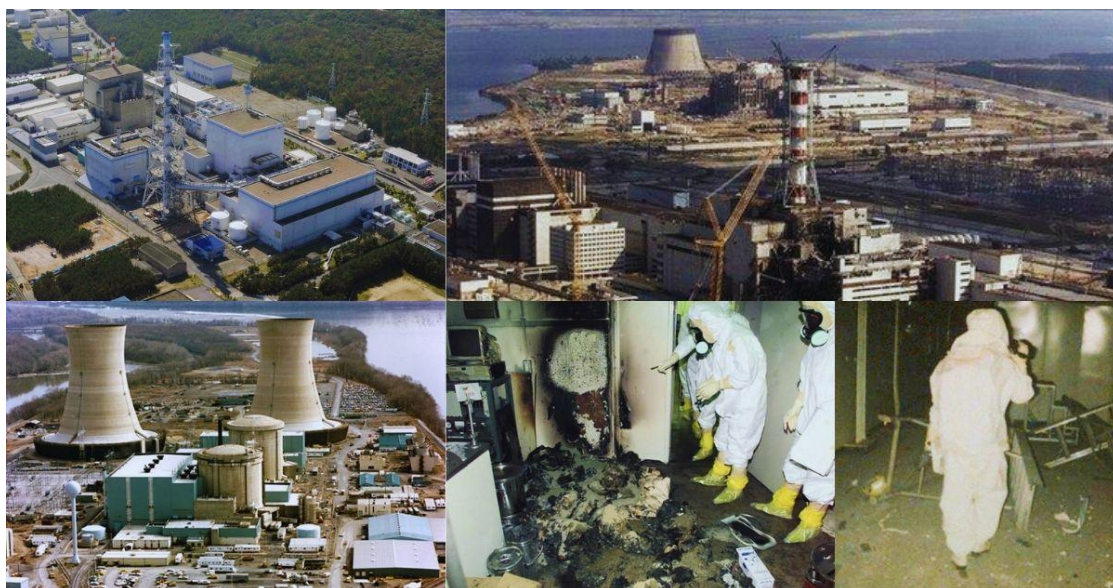
διάσταση, καθιστώντας αναγκαία τη διεθνή συνεργασία και ενίσχυση των μηχανισμών πρόληψης και ελέγχου (UNSCEAR, 2014· IAEA, 2015).



Εικόνα 17. Σχηματική απεικόνιση πηγών ^{137}Cs που προέρχεται από το πυρηνικό ατύχημα στη Fukushima, εμφανίζοντας σε PBq την άμεση έκλυση που πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον.

3.4 Ατύχημα Tokaimura, Ιαπωνία.

Η εγκατάσταση παραγωγής πυρηνικού καυσίμου Tokaimura, που ανήκε στην εταιρεία Japan Nuclear Fuel Conversion Co. (JCO), είχε ως κύρια δραστηριότητα τη μετατροπή εμπλουτισμένου ουρανίου σε μορφή κατάλληλη για χρήση σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Πιο συγκεκριμένα, στην εγκατάσταση αυτή πραγματοποιούνταν η χημική μετατροπή εξαφθοριούχου εμπλουτισμένου ουρανίου (UF_6) σε διοξείδιο του ουρανίου (UO_2), το οποίο αποτελεί την πιο διαδεδομένη μορφή καυσίμου στους θερμικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες (IAEA, 2000).



Εικόνα 18: Η πυρηνική εγκατάσταση στο Tokaimura και οι θανατηφόρες συνέπειες του ατυχήματος (πηγή: Patrick Kiger, (2022), Hisashi Ouchi Suffered an 83-day Death By Radiation Poisoning).

3.4.1 Παραβίαση Πρωτοκόλλων και Κρίσιμη Μάζα: Το Ατύχημα στην Tokaimura

Στις 30 Σεπτεμβρίου 1999, τρεις εργαζόμενοι της εταιρείας JCO εκτελούσαν διαδικασία παρασκευής καυσίμου για τον ιαπωνικό πειραματικό αναπαραγωγικό αντιδραστήρα JOYO, χρησιμοποιώντας ουράνιο εμπλουτισμένο κατά 18,8% σε ^{235}U . Παρότι είχαν ήδη καταγραφεί προηγούμενα παρόμοια περιστατικά τρία χρόνια πριν, δεν είχαν ληφθεί επαρκή μέτρα για την εκπαίδευση και την πιστοποίηση της τεχνικής επάρκειας του προσωπικού. Ως αποτέλεσμα, οι εργαζόμενοι που εκτελούσαν την εργασία δεν διέθεταν την απαιτούμενη εξειδίκευση για την ασφαλή τήρηση των προβλεπόμενων διαδικασιών (IAEA, 2000).

Στις 10:35 π.μ., παραβιάζοντας τα επίσημα τεχνικά πρωτόκολλα, οι εργαζόμενοι μετέφεραν και ανέμειξαν ποσότητα διαλύματος περίπου 40 κιλών, εκ των οποίων τα 16 κιλά περιείχαν εμπλουτισμένο ουράνιο. Το διάλυμα τοποθετήθηκε σε δεξαμενή με ακατάλληλη γεωμετρία για πυρηνική ασφάλεια, γεγονός που οδήγησε στην υπέρβαση της κρίσιμης μάζας και στην έναρξη ανεξέλεγκτης αλυσιδωτής αντίδρασης πυρηνικής σχάσης. Η διαμόρφωση της δεξαμενής ευνόησε την ταχεία συσσώρευση νετρονίων και τη δημιουργία υπερκρίσιμων συνθηκών, οδηγώντας σε σοβαρή ακτινοβολία και διαρροή ενέργειας (IAEA, 2000)..

3.4.2 Ραδιενεργή έκθεση και ανθρώπινο κόστος του ατυχήματος Tokaimura

Ως συνέπεια του ατυχήματος, τόσο οι εργαζόμενοι όσο και κάτοικοι της ευρύτερης περιοχής εκτέθηκαν σε σημαντικές δόσεις ιονίζουσας ακτινοβολίας. Οι τρεις εργαζόμενοι που συμμετείχαν άμεσα στις διαδικασίες προσβλήθηκαν από δόσεις ακτινοβολίας που κυμάνθηκαν από 1 έως 20 Sv (Sievert), τιμές εξαιρετικά υψηλές σε σχέση με τα επιτρεπτά επίπεδα. Για λόγους σύγκρισης, η μέση ετήσια επιτρεπόμενη δόση για τον γενικό πληθυσμό στην Ελλάδα είναι 2 mSv, ενώ μια ακτινογραφία θώρακος αντιστοιχεί σε περίπου 0,1 mSv (UNSCEAR, 2000). Δύο εκ των εργαζομένων τελικά υπέκυψαν λόγω της ραδιενεργούς έκθεσης (IAEA, 2000).

Οι υπόλοιποι εργαζόμενοι και κάτοικοι της περιοχής εκτέθηκαν σε χαμηλότερες δόσεις, της τάξης των 10–50 mSv. Συνολικά, περίπου 100 άτομα που διέμεναν πλησίον της εγκατάστασης εκτέθηκαν σε ραδιενέργεια και νοσηλεύτηκαν προληπτικά, ενώ παρατηρήθηκαν αναλογίες επιπτώσεων παρόμοιες με εκείνες που καταγράφηκαν και σε προηγούμενα πυρηνικά ατυχήματα, όπως αυτό του Τσερνόμπιλ (WHO, 2001).

Ως άμεσο μέτρο ασφαλείας, οι τοπικές αρχές διέταξαν την εκκένωση περιοχής ακτίνας 300 μέτρων από το εργοστάσιο, μεταφέροντας πάνω από 150 κατοίκους σε ασφαλέστερες τοποθεσίες (OECD/NEA, 2000).

Ιδιαίτερη δημοσιότητα έλαβε η περίπτωση του Hisashi Ouchi, 35 ετών, ο οποίος βρισκόταν πλησιέστερα στη δεξαμενή κατά τη στιγμή της κρίσιμης αντίδρασης. Εκτέθηκε σε δόση που ξεπέρασε τα 16–20 Sv και κατέληξε έπειτα από 83 ημέρες νοσηλείας, κατά τη διάρκεια των οποίων υποστηρίχθηκε τεχνητά, σύμφωνα με την επιθυμία της οικογένειάς του. Υπέστη πλήρη αποδιοργάνωση του αιμοποιητικού και ανοσοποιητικού του συστήματος, συνοδευόμενη από σταδιακή πολυοργανική ανεπάρκεια (Normile, 1999).

Ο δεύτερος εργαζόμενος, Masato Shinohara, 40 ετών, απεβίωσε επτά μήνες μετά το συμβάν. Η δόση που δέχθηκε ξεπέρασε κατά πολύ το ετήσιο επιτρεπόμενο όριο των 50 mSv για εργαζομένους στην Ιαπωνία. Σύμφωνα με Ιάπωνες ειδικούς, δόσεις άνω των 8 Sv θεωρούνται κατά κανόνα θανατηφόρες (ΙΑΕΑ, 2000).

3.4.3 Ανάλυση Αιτίων και Διαχείριση του Ατυχήματος Tokaimura

Το ατύχημα στην Tokaimura αποδίδεται πρωτίστως στην ανεπαρκή εφαρμογή των θεσπισμένων επαγγελματικών διαδικασιών από το προσωπικό, καθώς και στην έλλειψη κατάλληλης εκπαίδευσης σχετικά με τα κρίσιμα μέτρα ασφαλείας. Οι προβλεπόμενες τεχνικές οδηγίες και τα ισχύοντα πρωτόκολλα ασφαλείας, εφόσον είχαν τηρηθεί απαρέγκλιτα, θα μπορούσαν να είχαν αποτρέψει την αλυσίδα γεγονότων που οδήγησαν στην κρίσιμη αντίδραση (ΙΑΕΑ, 2000).

Το συμβάν κατατάχθηκε στο επίπεδο 4 της διεθνούς κλίμακας INES (International Nuclear and Radiological Event Scale), το οποίο αντιστοιχεί σε «ατύχημα με τοπικές συνέπειες». Παρά τη μέση βαθμολόγηση, οι επιπτώσεις τόσο στην υγεία των εργαζομένων όσο και στο περιβάλλον υπήρξαν άμεσες και σημαντικές (OECD/NEA, 2000).

Το ατύχημα της Tokaimura αποτελεί ενδεικτικό παράδειγμα ατυχήματος μεσαίας κλίμακας, παρόμοιου με αυτά που σημειώνονται σε βιομηχανικές μονάδες διαχείρισης πυρηνικών καυσίμων. Παρότι δεν συνοδεύτηκε από καταστροφικές εκρήξεις ή μαζικές απώλειες, ανέδειξε σοβαρά ελλείμματα στην εργασιακή κουλτούρα ασφαλείας και στην εποπτεία της πυρηνικής τεχνολογίας στην Ιαπωνία (Normile, 1999).

Σε ορισμένες περιπτώσεις, τέτοιου είδους συμβάντα δεν λαμβάνουν ευρεία δημοσιότητα, κυρίως για λόγους διοικητικής διαχείρισης και πολιτικής σκοπιμότητας. Συχνά επιχειρείται να περιοριστεί η δημόσια πληροφόρηση, ιδιαίτερα όταν η περιβαλλοντική επίδραση κρίνεται «ελεγχόμενη». Σύμφωνα με έκθεση της Αμερικανικής Ρυθμιστικής Επιτροπής για τα Πυρηνικά (U.S. NRC, 2000), στην εγκατάσταση της Tokaimura είχαν καταγραφεί συνολικά 21 περιστατικά παραβίασης κανόνων πυρηνικής ασφάλειας μεταξύ 1953 και 1997, πολλά εκ των οποίων δεν γνωστοποιήθηκαν δημοσίως.

3.5 Το Ατύχημα του Kyshtym (1957) και οι Πρώτες Πυρηνικές Καταστροφές

Το ατύχημα του Kyshtym, που σημειώθηκε στις 29 Σεπτεμβρίου 1957, είχε ως αποτέλεσμα τη ρύπανση μιας εκτεταμένης περιοχής με ραδιενεργές ουσίες (Medvedev, 1990). Μαζί με το μεταγενέστερο ατύχημα στο Windscale του Ηνωμένου Βασιλείου, αποτελεί μία από τις πρώτες μεγάλες πυρηνικές καταστροφές που σχετίζονται με εγκαταστάσεις διαχείρισης και αποθήκευσης ραδιενεργών αποβλήτων (IAEA, 2008). Τα δύο αυτά περιστατικά σηματοδότησαν τη διάχυση ιονίζουσας ακτινοβολίας και ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον σε ευρεία κλίμακα.

Μεγάλες εκτάσεις γεωργικής γης και αγροτικές κοινότητες επλήγησαν σοβαρά, καθιστώντας αναγκαία την άμεση ανάπτυξη και εφαρμογή μέτρων περιορισμού των επιπτώσεων. Τα αντίμετρα επικεντρώθηκαν κυρίως στην προστασία της δημόσιας υγείας και στην περιορισμένη αποκατάσταση των πληγείσων περιοχών (Napier et al., 1996).

Η Πυρηνική Εγκατάσταση Mayak και το Χρονικό της Ραδιενεργού Μόλυνσης στην Περιοχή του Kyshtym

Η πόλη Kyshtym, που βρίσκεται στην περιφέρεια Chelyabinsk της Ρωσίας, κοντά στα νότια Ουράλια Όρη και περίπου 90 χιλιόμετρα από την πόλη Chelyabinsk, γειτνιάζει με την πυρηνική εγκατάσταση Mayak Production Association. Η εγκατάσταση αυτή αποτέλεσε κομβικό σημείο για το αναπτυσσόμενο σοβιετικό πυρηνικό πρόγραμμα κατά τα χρόνια που ακολούθησαν τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο (Medvedev, 1990). Κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου, ήταν γνωστή με την κωδική ονομασία «Chelyabinsk-40» και, από το 1948 και εξής, παρήγαγε πλουτώνιο για τις σοβιετικές πυρηνικές κεφαλές (IAEA, 2008).

Οι επιχειρησιακές δραστηριότητες της Mayak προκάλεσαν εκτεταμένη και μακροχρόνια ραδιενεργό ρύπανση, όχι μόνο στην άμεση περιοχή, αλλά και σε πιο απομακρυσμένες τοποθεσίες. Η διασπορά της μόλυνσης ενισχύθηκε από τη συστηματική απόρριψη ραδιενεργών αποβλήτων στα ποτάμια συστήματα της περιοχής, γεγονός που επέτρεψε τη σταδιακή μεταφορά ραδιονουκλεϊδίων σε μεγαλύτερη γεωγραφική κλίμακα (Napier et al., 1996).

Στα μέσα της δεκαετίας του 1950, εντός του συγκροτήματος της Mayak κατασκευάστηκαν αποθηκευτικοί χώροι για υψηλής ραδιενέργειας υγρά απόβλητα, τα οποία αποτελούσαν υποπροϊόντα της επεξεργασίας πλουτωνίου. Τα απόβλητα αυτά φυλάσσονταν σε μεγάλες μεταλλικές δεξαμενές, επενδυμένες με τσιμεντένιο περίβλημα και διατηρούνταν υπό συνεχή ψύξη για χρονικό διάστημα έως και ενός έτους (Hindmarsh, 2013).

Το Ατύχημα του Kyshtym και η Διασπορά Ραδιενέργειας

Στις 29 Σεπτεμβρίου 1957, τα συστήματα ψύξης μίας εκ των δεξαμενών αποθήκευσης ραδιενεργών αποβλήτων στη μονάδα Mayak υπέστησαν αστοχία, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία στο εσωτερικό της δεξαμενής να αρχίσει να αυξάνεται (Burton, 2007). Η εξάτμιση του ψυκτικού μέσου και η άνοδος της θερμοκρασίας των περίπου 70–80 τόνων υγρών ραδιενεργών αποβλήτων οδήγησαν, γύρω στις 16:20, σε χημική έκρηξη εντός της δεξαμενής. Το περιστατικό αυτό έμεινε γνωστό ως το «ατύχημα του Kyshtym», λαμβάνοντας την ονομασία του από τον πλησιέστερο οικισμό.

Η έκρηξη προκάλεσε ρήξη της δεξαμενής και μαζική απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον. Ο σχηματισμός και η εκτίναξη ραδιενεργών αερολυμάτων

έφτασαν σε ύψος έως και 1.000 μέτρα, προκαλώντας εκτεταμένη ατμοσφαιρική διασπορά ραδιενεργών σωματιδίων. Από τα συνολικά 740 PBq (πικομπεκερέλ) ραδιενέργειας που απελευθερώθηκαν —κυρίως υπό τη μορφή Στροντίου-90 (^{90}Sr)— περίπου το 90% εναποτέθηκε ως στερεά σωματίδια σε ακτίνα έως 5 χιλιομέτρων από τη δεξαμενή. Το υπόλοιπο 10% (περίπου 74 PBq) διασκορπίστηκε ως ξηρή ραδιενεργή σκόνη, καλύπτοντας μια ζώνη πλάτους 30–50 χιλιομέτρων και μήκους περίπου 300 χιλιομέτρων, με κατεύθυνση προς τα βόρεια και βορειοανατολικά της εγκατάστασης Mayak (Yablokov, 2009).

Επιπτώσεις Ραδιενέργειας και Μακροχρόνια Ρύπανση από το Ατύχημα του Kyshtym

Περιοχή έκτασης περίπου 15.000–20.000 km² εκτέθηκε σε επίπεδα ακτινοβολίας άνω των 3,7 kBq/m², κυρίως από το ραδιενεργό ισότοπο Στρόντιο-90 (^{90}Sr). Το όριο παρέμβασης για την εκκένωση πληθυσμών ορίστηκε στα 74 kBq/m², τιμή που αντιστοιχούσε σε μια ζώνη περίπου 1.000 km², γνωστή πλέον ως Ανατολική Ουράλια Ραδιενεργή Ιχνηλάτηση (EURT – East Urals Radioactive Trace). Η μέγιστη τιμή πυκνότητας ρύπανσης καταγράφηκε κοντά στο σημείο της έκρηξης και έφτασε τα 150 MBq/m².

Ακολούθησε ταχεία μείωση των επιπέδων ραδιενέργειας στην περιοχή της EURT, λόγω της αποσύνθεσης των βραχύβιων ραδιοϊσοτόπων. Μέσα σε δύο χρόνια, ισότοπα όπως το Ζιρκόνιο-95 (^{95}Zr), το Νιόβιο-95 (^{95}Nb) και το Δημήτριο-144 (^{144}Ce) είχαν πλέον αποσυντεθεί, παύοντας να συνεισφέρουν σημαντικά στη ρύπανση. Το Στρόντιο-90, ωστόσο, λόγω της μεγάλης του ημιζωής (28,8 έτη) και της παραγωγής του ως υποπροϊόν της πυρηνικής σχάσης, παρέμεινε το κυρίαρχο ραδιενεργό στοιχείο στην περιοχή.

Η παραμονή του ^{90}Sr στο περιβάλλον αποτέλεσε σοβαρό λόγο ανησυχίας για τους επιστήμονες, καθώς ακόμα και δεκαετίες αργότερα, το 1996, παρατηρήθηκε παρουσία του στην ατμόσφαιρα. Το γεγονός αυτό υπογράμμισε τον μακροχρόνιο χαρακτήρα της ρύπανσης και τις διαρκείς επιπτώσεις του ατυχήματος στο φυσικό περιβάλλον.

Deposition	Area	^{90}Sr inventory		
		min (PBq)	mean (PBq)	Max (PBq)
kBq m ⁻²	km ²			
3.7-74	15 000-20 000*	0.074	0.777	1.48
74-740	600	0.044	0.2442	0.444
740-3700	280	0.2072	0.6216	1.036
3 700-37 000	100	0.37	2.035	3.7
37 000-150 000	17	0.629	1.5895	2.55
Total (1957)		1.32	5.27	9.21
Total (1996)		0.51	2.04	3.57

* 20 000 km² used.

Πίνακας 1: Κατανομή του ραδιενεργού ισότοπου ^{90}Sr 39 χρόνια μετά το πυρηνικό ατύχημα στο Kyshtym της Ρωσίας. (πηγή: Hisashi Ouchi: *The Man Who Survived History's Highest Radiation Levels for 83 Days*).

Επιπτώσεις του Ατυχήματος στην Καλλιεργήσιμη Γη και τη Γεωργική Παραγωγή

Κατά την περίοδο του ατυχήματος, το 63% της περιοχής χρησιμοποιούνταν για γεωργικούς σκοπούς, το 20% καλυπτόταν από δασικές εκτάσεις, ενώ υπήρχαν 23

αγροτικές κοινότητες. Οι πληθυσμοί αυτών των κοινοτήτων, που ανέρχονταν συνολικά σε περίπου 10.700 άτομα, εκκενώθηκαν σταδιακά μέσα σε χρονικό διάστημα 22 μηνών μετά το συμβάν (Medvedev, 1990). Η περαιτέρω χρήση της περιοχής για οποιαδήποτε ανθρώπινη δραστηριότητα απαγορεύθηκε προσωρινά. Ωστόσο, το 1961 ξεκίνησαν οι εργασίες αποκατάστασης, αν και μέχρι και σήμερα, περίπου 180 km² πλησίον του σημείου της έκρηξης παραμένουν επίσημα ζώνες απαγορευμένης πρόσβασης (Yablokov, 2009).

Αμέσως μετά το ατύχημα, καταγράφηκε αύξηση των επιπέδων ακτινοβολίας σε διάφορες περιοχές της ευρύτερης ζώνης και αντίστοιχη αύξηση στην παρουσία ραδιενεργών καταλοίπων στα γεωργικά προϊόντα (Napier et al., 1996). Οι τιμές της ρύπανσης στα αγροτικά προϊόντα στις περιφερειακές ζώνες της EURT (East Ural Radioactive Trace) ήταν αυξημένες κατά 10 έως 1.000 φορές σε σχέση με τα συνήθη επίπεδα, ενώ κοντά στον τόπο της έκρηξης εντοπίστηκαν τιμές έως και 100.000 φορές υψηλότερες (ΙΑΕΑ, 2008). Περίπου 9–12 ημέρες μετά το συμβάν, παρατηρήθηκαν περιπτώσεις οξείας ακτινοβολικής νόσου σε ζώα φάρμας, οι οποίες οδήγησαν στον θάνατό τους (Burton, 2007).

Έναν χρόνο μετά το ατύχημα, τα επίπεδα ρύπανσης στην επιφάνεια της περιοχής είχαν μειωθεί, κυρίως λόγω της ραδιενεργού αποσύνθεσης των ισοτόπων. Ωστόσο, εντοπίστηκαν ακόμη μολυσμένα σωματίδια στο έδαφος, τα οποία μεταφέρονταν μέσω αερολικής και υδάτινης διαβροχής, διατηρώντας τη ρύπανση στη βλάστηση και τα γεωργικά προϊόντα. Το γεγονός αυτό υποδείκνυε τη μακροχρόνια επίπτωση του ατυχήματος στο οικοσύστημα της περιοχής (Hindmarsh, 2013).

Εσωτερική και Εξωτερική Έκθεση στον Άνθρωπο – Ο ρόλος του Στροντίου-90 στην Τροφική Αλυσίδα

Στην πρώιμη φάση των συνεπειών του ατυχήματος, η εξωτερική δόση ακτινοβολίας στους ανθρώπους, κυρίως από την ακτινοβολία γ, ήταν υψηλότερη από τη δόση που προερχόταν από την εσωτερική έκθεση, δηλαδή από την κατάποση ραδιοϊσοτόπων. Περίπου 270 ημέρες μετά το ατύχημα, οι εξωτερικές και εσωτερικές δόσεις ακτινοβολίας που ανιχνεύονταν στους ανθρώπινους οργανισμούς είχαν εξισορροπηθεί. Από εκείνο το σημείο και έπειτα, η εξωτερική έκθεση σε ακτινοβολία γ άρχισε να μειώνεται συγκριτικά με τις δόσεις που προκαλούνταν από την εσωτερική ρύπανση μέσω κατανάλωσης ραδιοϊσοτόπων.

Η εσωτερική μόλυνση επικεντρωνόταν κυρίως στο γαστρεντερικό σύστημα, ως αποτέλεσμα της κατανάλωσης μολυσμένων τροφίμων και γεωργικών προϊόντων. Η εξωτερική ραδιενεργός έκθεση, αντίθετα, συσσωρευόταν σε μεγαλύτερο βαθμό στα οστά λόγω της βιοχημικής συμπεριφοράς του Στροντίου-90. Το συγκεκριμένο ισότοπο, έχοντας παρόμοια συμπεριφορά με το ασβέστιο, αποθηκεύεται στον ανθρώπινο οργανισμό κυρίως στους οστικούς ιστούς.

Αμέσως μετά το ατύχημα, η κύρια οδός έκθεσης για τον πληθυσμό ήταν η κατανάλωση ψωμιού, παρασκευασμένου από μολυσμένο με ραδιενεργή σκόνη σιτάρι που είχε συλλεχθεί από την πληγείσα περιοχή [59]. Στην πορεία του χρόνου, η ρύπανση από ⁹⁰Sr διείσδυσε περαιτέρω στην τροφική αλυσίδα, με τον πληθυσμό να εκτίθεται στο ραδιοϊσότοπο μέσω του γάλακτος, του ψωμιού και του πόσιμου νερού που προερχόταν από μικρές δεξαμενές.

Για πρώτη φορά στην ιστορία, καθορίστηκαν όρια παρέμβασης και απαγόρευσης διακίνησης τροφίμων με βάση την παρουσία ραδιενεργών σωματιδίων του ^{90}Sr , προκειμένου να προστατευτεί η δημόσια υγεία από επικίνδυνα επίπεδα ακτινοβολίας. Οκτώ χρόνια μετά το ατύχημα, το γάλα παρέμενε ένας σημαντικός φορέας εσωτερικής μόλυνσης, συνεισφέροντας έως και στο 50% της συνολικής ακτινοβολίας που καταποθούσε ο ανθρώπινος οργανισμός. Μέχρι το 1987, η πρόσληψη του ^{90}Sr από τον ανθρώπινο πληθυσμό είχε μειωθεί κατά 1.300 φορές σε σύγκριση με τις τιμές της περιόδου αμέσως μετά το ατύχημα και κατά 200 φορές σε σχέση με την πρόσληψη ένα χρόνο μετά το συμβάν.

Pathway	Dose, mSv y^{-1}			
	Average		Most exposed group	
	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs
Terrestrial foods	0.019	0.019	0.069	0.06
Freshwater fish	0.02	0.029	0.065	0.093
Drinking water	0.0022	0.0017	0.0034	0.0026
External	$7.5 \cdot 10^{-11}$	0.0056	$1.7 \cdot 10^{-10}$	0.012
Total	0.042	0.055	0.14	0.17
Grand Total	0.097		0.3	

Πίνακας 2: Τα ποσά ραδιενέργειας, που εκλύθηκαν από τα ραδιενεργά ισότοπα ^{90}Sr και ^{137}Cs εκφρασμένα σε mSv/y σε φαγητά, ψάρια, νερό κλπ (πηγή: Hisashi Ouchi: *The Man Who Survived History's Highest Radiation Levels for 83 Days*).

Χρόνια έκθεση στον Στρόντιο-90 και σωρευτικές δόσεις ακτινοβολίας

Μέχρι το 1989–1990, η ετήσια πρόσληψη του ραδιενεργού ισότοπου Στρόντιο-90 (^{90}Sr) είχε περιοριστεί στο 3% της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής για άτομα που διέμεναν σε περιοχές με πυκνότητα μόλυνσης 37 kBq/m^2 . Για άτομο που παρέμεινε επί 30 έτη σε μια τέτοια περιοχή, η σωρευτική δόση ακτινοβολίας ανήλθε σε 12 mSv συνολικά. Ειδικότερα, η απορροφούμενη δόση στο μυελό των οστών εκτιμήθηκε στα 25 mSv, ενώ στα ίδια τα οστά έφτασε τα 80 mSv.

Περιβαλλοντικές και Βιολογικές Επιπτώσεις του Ατυχήματος του Kyshtym και Μέτρα Αποκατάστασης

Άμεσες επιπτώσεις στην πανίδα και χλωρίδα

Η έντονη ραδιενεργός μόλυνση της περιοχής που επλήγη από το ατύχημα είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ποικίλων βιολογικών επιδράσεων, ιδιαίτερα κατά τους πρώτους 12–18 μήνες. Η αρχική έκθεση του ανθρώπινου πληθυσμού προήλθε κυρίως από βραχύβια ραδιοϊσότοπα που εξέπεμπαν ακτινοβολία β και γ. Καθώς το διάστημα προχωρούσε, η έκθεση στους ζωντανούς οργανισμούς προερχόταν από πιο μακρόβια ισότοπα, όπως το Στρόντιο και το Ύτριο, αλλά σε σαφώς χαμηλότερα επίπεδα.

Επιπτώσεις στη βλάστηση και αποψίλωση

Οι πρώτες ενδείξεις βιολογικών συνεπειών παρατηρήθηκαν στα πευκοδάση το 1958, περιλαμβάνοντας κιτρίνισμα των βελόνων, καθυστέρηση στην ανάπτυξη των ιστών και μορφολογικές αλλοιώσεις. Σε περιοχές πολύ κοντά στο σημείο της έκρηξης, με επίπεδα

μόλυνσης άνω των 18 MBq/m², καταγράφηκε εκτεταμένη καταστροφή της βλάστησης, με τις επιπτώσεις να διατηρούνται έως και 3–4 έτη.

Εφαρμογή μέτρων ραδιοπροστασίας και αποκατάστασης

Παρότι το ατύχημα υπήρξε τραγικό τόσο για τον πληθυσμό όσο και για το περιβάλλον, αποτέλεσε ταυτόχρονα έναυσμα για την ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών πολιτικών και τεχνικών ραδιοπροστασίας. Στο πλαίσιο αυτό, εφαρμόστηκαν συντονισμένες ενέργειες απολύμανσης και αποκατάστασης της πληγείσας περιοχής. Μεταξύ 1957 και 1959, περισσότεροι από 10.000 τόνοι γεωργικών προϊόντων καταστράφηκαν, καθώς κρίθηκαν ακατάλληλοι για κατανάλωση. Παράλληλα, πάνω από 6.000 εκτάρια γεωργικής γης υπέστησαν απολύμανση με βαθιά καλλιέργεια, κατά την οποία η επιφανειακή στρώση του εδάφους απομακρύνθηκε και θάφτηκε σε βάθος άνω των 50 cm, περιορίζοντας έτσι την απορρόφηση ρύπων μέσω των ριζικών συστημάτων.

Καλλιέργειες για περιορισμό της ακτινοβολίας και γεωργικά μέτρα

Κατά την περίοδο 1958–1959, περισσότερα από 20.000 εκτάρια καλλιεργήθηκαν με σκοπό τη μείωση της μεταφοράς ακτινοβολίας γ μέσω των φυτών. Στην περιφέρεια Τσελιάμπινσκ αποχαρκτηρίστηκαν 59.000 εκτάρια από τη γεωργική χρήση, και 47.000 εκτάρια στην περιφέρεια Σβερντλόφσκ. Από το 1990, η πλειονότητα αυτής της γης αποδόθηκε ξανά στη γεωργική παραγωγή (Napier et al., 1996).

Διαχείριση τροφικής αλυσίδας και περιορισμός βιοδιαθεσιμότητας

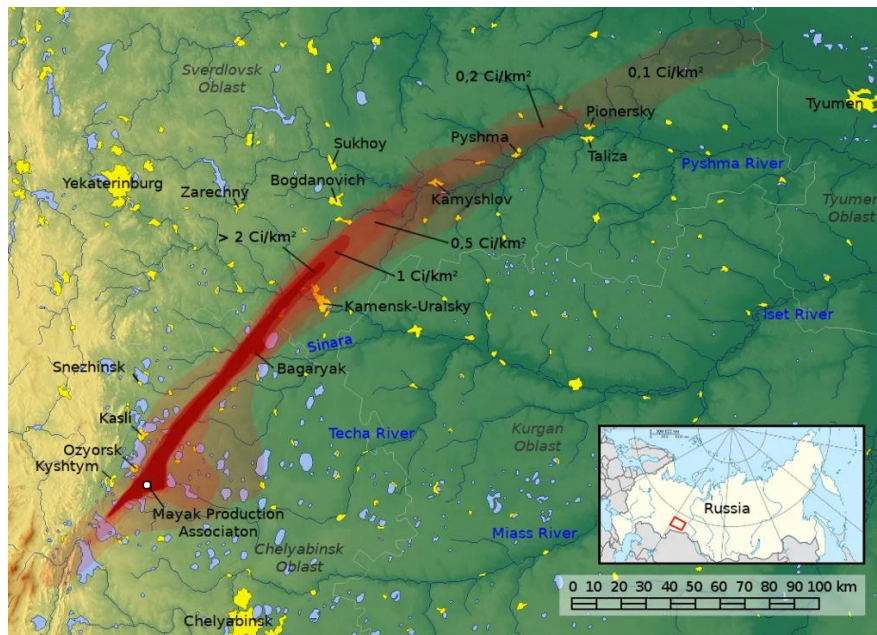
Ταυτόχρονα, αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν μέθοδοι περιορισμού της μετάδοσης ρύπων σε ζώα και στη λοιπή τροφική αλυσίδα, μέσω της διαχείρισης των ζωοτροφών (Hindmarsh, 2013). Τα μέτρα περιλάμβαναν:

- αφαίρεση μολυσμένου επιφανειακού εδάφους,
- βαθιά καλλιέργεια,
- προσθήκη λιπασμάτων και βελτιωτικών για περιορισμό της απορρόφησης ρύπων,
- χρήση καλλιεργειών με χαμηλή ικανότητα απορρόφησης Στροντίου,
- ενίσχυση των ζωοτροφών με θρεπτικά συμπληρώματα, κυρίως ασβέστιο, για μείωση της βιοδιαθεσιμότητας των ρύπων στους ζωικούς ιστούς.

Η εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων περιόρισε την πρόσληψη ρύπων από τα φυτά κατά 5 έως 15 φορές.

Αποσιώπηση και μακροχρόνια επίπτωση του ατυχήματος

Παρά τον αποσιωπημένο χαρακτήρα του την εποχή που έλαβε χώρα, το ατύχημα του Kyshtym προκάλεσε σοβαρές και μακροχρόνιες περιβαλλοντικές και υγειονομικές επιπτώσεις. Για τον λόγο αυτό, καταγράφεται στην κλίμακα πυρηνικών ατυχημάτων INES με βαθμό σοβαρότητας 6 (IAEA, 2006).



Εικόνα 19: Η έκταση που ακτινοβολήθηκε περισσότερο από το πυρηνικό ατύχημα στην Ρωσία . (πηγή: Aarkog et al. Radiological Assessment of Past, Present and Potential Sources to Environmental Contamination in the Southern Urals and Strategies for Remedial Measures (SUCON), December, 2000)

3.6 Ατύχημα Windscale, Μεγάλη Βρετανία.

Το δυστύχημα σημειώθηκε στις 10 Οκτωβρίου 1957, στο πυρηνικό εργοστάσιο της περιοχής Windscale, στην κομητεία Cumberland στη Βορειοδυτική Αγγλία. Πρόκειται για το σοβαρότερο πυρηνικό ατύχημα που έχει καταγραφεί στο Ηνωμένο Βασίλειο. Η φωτιά που εκδηλώθηκε στον πυρήνα του αντιδραστήρα διήρκεσε για 16 ώρες, προκαλώντας σοβαρή διαρροή ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον (Arnold, 2001).



Εικόνα 20: Πυρηνικό εργοστάσιο Windscale (πηγή: Consequences of the Fukushima nuclear accident – IAEA 2015)

Αιτίες και συνέπειες του πυρηνικού ατυχήματος στο Windscale (1957)-Έναρξη του ατυχήματος και εξέλιξη της πυρκαγιάς

Η πυρκαγιά και τα αίτια του ατυχήματος στον πυρηνικό αντιδραστήρα του Windscale, τον Οκτώβριο του 1957, προκάλεσαν έντονες ανησυχίες στη βρετανική κοινωνία, καθώς επρόκειτο για το πρώτο μείζον πυρηνικό ατύχημα στη Μεγάλη Βρετανία. Το συμβάν ξεκίνησε κατά τη διάρκεια μιας συνήθους διαδικασίας απελευθέρωσης ενέργειας που είχε αποθηκευτεί στον ρυθμιστή γραφίτη του αντιδραστήρα — όπως συνέβαινε στο πλαίσιο της κανονικής λειτουργίας του σταθμού (Baylis, 2007).

Αιτία του ατυχήματος: υπερθέρμανση και οξείδωση ράβδων ουρανίου

Η ερευνητική επιτροπή κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αιτία του ατυχήματος ήταν η υπερθέρμανση ορισμένων ράβδων ουρανίου. Η αποθήκευση και η θωράκισή τους απέτυχαν, με αποτέλεσμα να εκτεθεί το ουράνιο και να οξειδωθεί. Η θερμοκρασία στον πυρήνα συνέχισε να αυξάνεται, οδηγώντας στην καύση και στη μερική τήξη του γραφίτη. Μέχρι το βράδυ της Πέμπτης 10 Οκτωβρίου, η φωτιά είχε επεκταθεί σε περίπου 150 στοιχεία ουρανίου, προκαλώντας την απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων ραδιενεργών προϊόντων σχάσης στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Προσπάθειες περιορισμού της πυρκαγιάς και κατάσβεση

Αρχικά, καταβλήθηκε προσπάθεια να μειωθεί η θερμοκρασία στις επιφάνειες των στηλών γραφίτη. Ωστόσο, όταν διαπιστώθηκε ότι πολλά από τα κανάλια ουρανίου είχαν φτάσει σε κρίσιμα θερμικά όρια και είχαν ήδη πάρει φωτιά, έγινε προσπάθεια εκφόρτισης — χωρίς επιτυχία. Η υπερθέρμανση συνεχίστηκε, οδηγώντας σε γενικευμένη ανάφλεξη του πυρήνα. Τελικά, περίπου στις 9 το πρωί της Παρασκευής 11 Οκτωβρίου, και έπειτα από παρατεταμένες προσπάθειες κατάσβεσης με τη διοχέτευση μεγάλων ποσοτήτων νερού στον αντιδραστήρα, η πυρκαγιά τέθηκε υπό έλεγχο.

Εκπομπές ραδιενέργειας και έκθεση του πληθυσμού

Οι κυριότερες πηγές ακτινοβολίας που επηρέασαν τόσο το προσωπικό του εργοστασίου όσο και τον τοπικό πληθυσμό, ήταν οι εκπομπές ισοτόπων όπως το ιώδιο-131 (^{131}I), το τελλούριο-132 (^{132}Te) και το καίσιο-137 (^{137}Cs). Ο Dunster και συνεργάτες (1958) εκτίμησαν ότι η συνολική έκθεση σε ακτινοβολία γ των ανθρώπων που ζούσαν στις περιοχές με τη μεγαλύτερη απόθεση ραδιενέργειας κυμαινόταν μεταξύ 30 και 50 milliroentgens. Αντίστοιχα, σύμφωνα με τον Chamberlain (1958), η συνολική δόση ακτινοβολίας γ ανήλθε σε 75 milliroentgens (75/1000 Roentgen), χωρίς να υπολογίζεται η απορρόφηση της ακτινοβολίας από τις κατασκευές κατοικιών.

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και διεθνής διάχυση

Οι έρευνες έδειξαν επίσης μικρές επιπτώσεις από τα μακρόβια ραδιενεργά υλικά που απελευθερώθηκαν από την κατάρρευση του αντιδραστήρα. Παρότι οι δόσεις από αυτά ήταν χαμηλές, παρατηρήθηκε σημαντικότερη επιβάρυνση από τα ισότοπα ιωδίου, τα οποία προσλήφθηκαν από τον ανθρώπινο οργανισμό. Έρευνες της εποχής κατέγραψαν αυξημένα επίπεδα ραδιενέργειας σε διάφορες περιοχές της Ευρώπης, κυρίως στο Βέλγιο και στη βόρεια Γερμανία, ως συνέπεια του ατυχήματος στο Windscale.



Εικόνα 21: Ποσά ραδιενέργειας που εντοπίστηκαν στην ατμόσφαιρα, ύστερα από το πυρηνικό ατύχημα στο Windscale της Μεγάλης Βρετανίας. Η μέτρηση είναι στην παλαιότερη μονάδα μέτρησης mCi/m³.
(πηγή: F. Loutit, G. Marley, S. Russel, *The Nuclear Reactor Accident at Windscale-October, 1957: Environmental Aspects*).

Αλυσιδωτές επιπτώσεις της ραδιενεργούς μόλυνσης στον άνθρωπο και στο οικοσύστημα

Η ραδιενεργός μόλυνση έπληξε ανθρώπους, ζώα και φυτά μέσω της βιολογικής αλυσίδας, καθώς αρχικά μεταδόθηκε από τις τροφές που καταναλώθηκαν από τα ζώα, τα οποία στη συνέχεια λειτούργησαν ως φορείς, εντείνοντας τη διασπορά της ραδιενέργειας και τις επιπτώσεις στον άνθρωπο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η απότομη αύξηση περιστατικών δηλητηριάσεων και συναφών προβλημάτων στην ευρύτερη περιοχή αλλά και σε άλλες περιοχές της χώρας. Τα περιστατικά αυτά καταγράφηκαν κυρίως σε παιδιά, γεγονός που οδήγησε τις αρχές να ερευνήσουν τα αίτια και να εντοπίσουν ως βασικό υπαίτιο το γάλα. Ως εκ τούτου, επιβλήθηκε καθολική απαγόρευση στην κατανάλωση, παραγωγή και εμπορική διακίνηση του γάλακτος για αρκετούς μήνες, έως ότου επανέλθει η ασφάλεια των προϊόντων.

Επιβάρυνση άλλων τροφίμων και αγροτικών προϊόντων

Παρόλα αυτά, οι επιπτώσεις της μόλυνσης δεν περιορίστηκαν μόνο στο γάλα. Επιβεβαιώθηκε ραδιενεργός επιβάρυνση σε αυγά και γεωργικά προϊόντα, γεγονός που οδήγησε στη λήψη πρόσθετων και αυστηρότερων μέτρων προστασίας. Τα αποτελέσματα των ερευνών που αφορούσαν στην ακτινοβολιακή έκθεση ήταν καθοριστικά για τον σχεδιασμό ελέγχων στα γαλακτοκομικά προϊόντα και χρησιμοποιήθηκαν μεταγενέστερα από τον Chamberlain (1958) για τη λεπτομερή καταγραφή της απόθεσης του ιωδίου-131.

Μελέτες σε ζώα βοσκής και επιπτώσεις

Στο πεδίο της ζωικής παραγωγής, πραγματοποιήθηκαν πλήθος μελετών με επίκεντρο τα ζώα βοσκής, όπως τα πρόβατα και οι αγελάδες, που έχουν άμεση σχέση με την ανθρώπινη τροφική αλυσίδα (Baylis, 2007). Μελέτες έδειξαν ότι, μετά από σφαγές προβάτων, εντοπίστηκαν σημαντικά επίπεδα ραδιενεργού ιωδίου-131 στους θυρεοειδείς αδένες τους, με συγκεντρώσεις κατά μέσο όρο 5–10 $\mu\text{g } ^{131}\text{I}$ ανά γραμμάριο υγρού ιστού, ιδιαίτερα εντός των πρώτων 12 ημερών μετά το ατύχημα. Ωστόσο, ακόμη και μετά από μήνες, πρόβατα από εκτεθειμένες φάρμες συνέχιζαν να παρουσιάζουν υπολείμματα ραδιενέργειας, γεγονός που αποδεικνύει τη μακροχρόνια επιβάρυνση του οικοσυστήματος. Ως αποτέλεσμα, πολλά προϊόντα ζωικής προέλευσης κρίθηκαν ακατάλληλα προς κατανάλωση και έφεραν σχετική σήμανση απαγόρευσης διάθεσης στην αγορά.

Κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις

Το σύνολο των παραπάνω εξελίξεων αντανακλά μια «αλυσιδωτή αντίδραση» ραδιενεργού μόλυνσης, με σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία, την αγροτική παραγωγή, την οικονομία και την κοινωνία στο σύνολό της (Baylis, 2007).

Place	Range (miles)	Average dose (rads)		Maximum dose (rads)	
		Adults†	Children†	Adults	Children
Seascale	2	0.5 (18)	0.8 (9)	1.4	3.9
Drigg	4	1.4 (8)	3.9 (3)	2.8	7.3
Holmrock	4.5	1.4 (7)	—	2.7	—
Ravenglass	6	1.8 (8)	12.2 (3)	4.0	16.1
Bootle	11	1.4 (12)	6.0 (11)	3.4	9.8
Millom	19.5	0.4 (29)	—	1.8	—
Ulverston	23	0.5 (5)	4.4 (3)	1.4	11.4
Barrow	24	0.3 (9)	—	1.1	—

Πίνακας 3: Άτομα που εκτέθηκαν σε ραδιενέργεια στον θυρεοειδή και τα οποία δεν ήταν κοντά στον τόπο του συμβάντος ή δεν ήταν εργαζόμενοι στον χώρο (πηγή: F. Loutit, G. Marley, S. Russel, *The Nuclear Reactor Accident at Windscale-October, 1957: Environmental Aspects*).

Επιπτώσεις της ραδιενέργειας στην ανθρώπινη υγεία και μέτρα προστασίας

Οι ασθένειες και τα προβλήματα υγείας που προκλήθηκαν από τη ραδιενέργεια, η οποία απελευθερώθηκε στην ατμόσφαιρα, επηρέασαν σημαντικά τον ανθρώπινο πληθυσμό της ευρύτερης περιοχής, όπως αποτυπώνεται και στον προηγούμενο πίνακα. Ο κυριότερος κίνδυνος προήλθε από την κατανάλωση μολυσμένων προϊόντων, προτού διαπιστωθεί ποια από αυτά ήταν τα πλέον επικίνδυνα — με το γάλα να αποτελεί την κύρια πηγή ανησυχίας.

Ιατρικές μετρήσεις και ευρήματα

Για τον λόγο αυτό, κάτοικοι που διέμεναν εκτός της άμεσης ζώνης του ατυχήματος, αλλά κατανάλωναν παρόμοια τρόφιμα με τους κατοίκους των πληγιστών περιοχών, προσκλήθηκαν επίσης να συμμετάσχουν σε ιατρικές μετρήσεις. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων του θυρεοειδούς αδένος παρατίθενται στον προαναφερθέντα πίνακα, περιλαμβάνοντας ποσοτικά στοιχεία για άτομα διαφορετικής ηλικίας και

γεωγραφικής προέλευσης. Οι μέθοδοι υπολογισμού των δόσεων ακτινοβολίας στους θυρεοειδείς αδένες έχουν δημοσιευθεί και τεκμηριωθεί.

Καταγεγραμμένες δόσεις και προστασία του πληθυσμού

Η υψηλότερη καταγεγραμμένη δόση στον θυρεοειδή αδένά ενός παιδιού έφτασε τα 16 rads, ενώ σε ενήλικα τα 40 rads. Πέρα από τις μετρήσεις σε άτομα της κύριας ζώνης έκθεσης —σύμφωνα με την κατεύθυνση των ανέμων— πραγματοποιήθηκαν επιπλέον 113 μετρήσεις σε κατοίκους άλλων περιοχών. Από αυτές, οι 107 έδειξαν μηδενική έκθεση σε ιώδιο-131, ενώ η υψηλότερη καταγεγραμμένη δόση στις υπόλοιπες ήταν μεταξύ 1 και 2 rads.

Αξιολόγηση των μέτρων προστασίας

Ο έλεγχος του γάλακτος, βασισμένος σε πολλαπλές μελέτες και μετρήσεις, υποδεικνύει ότι το κοινό προστατεύτηκε επαρκώς από την πρόσληψη υπερβολικών δόσεων εσωτερικής ακτινοβολίας μέσω της κατανάλωσής του. Τα ευρήματα από τις μετρήσεις στους θυρεοειδείς αδένες επιβεβαιώνουν αυτή την εκτίμηση. Εναλλακτικές πηγές παροχής γάλακτος από μη πληγείσες περιοχές εισήχθησαν στην αγορά, χωρίς να παρατηρηθούν ελλείψεις στην επάρκεια του προϊόντος.

Μετρήσεις σε άλλα τρόφιμα και ειδικές οδηγίες για βρέφη

Επιπλέον, μετρήσεις σε άλλες πιθανές τροφικές πηγές ραδιενεργής μόλυνσης, όπως τα λαχανικά, τα αυγά, το κρέας και το νερό, δεν έδειξαν τιμές που να δικαιολογούν την επιβολή περιοριστικών μέτρων. Η χρήση μολυσμένου γάλακτος για ανθρώπινη κατανάλωση κρίθηκε επικίνδυνη μόνο σε περιπτώσεις όπου η συγκέντρωση του ιωδίου-131 υπερέβαινε τα όρια ασφαλείας, με τις μελέτες να δείχνουν ότι ιδιαίτερα ευάλωτη ομάδα ήταν τα βρέφη, λόγω της αυξημένης ευαισθησίας τους στην πρόσληψη ραδιοϊσοτόπων.

Κατάταξη και συνέπειες του ατυχήματος στο Windscale

Ο μολυσμένος πυρηνικός αντιδραστήρας παρέμεινε σφραγισμένος έως τα τέλη της δεκαετίας του 1980, προκειμένου να καταστεί δυνατός ο καθαρισμός του και να συλλεχθούν περισσότερα στοιχεία σχετικά με τα αίτια του ατυχήματος. Το πυρηνικό ατύχημα στο Windscale της Μεγάλης Βρετανίας κατατάσσεται στην κλίμακα ραδιενεργών συμβάντων (INES) στο Επίπεδο 5. Παρά τη συγκεκριμένη κατάταξη, οι περιβαλλοντικές συνέπειες υπήρξαν σημαντικές, επηρεάζοντας αρνητικά τη φυσιολογική λειτουργία της κοινωνίας και της οικονομίας σε ευρύ φάσμα της χώρας. Το γεγονός αυτό ενέτεινε τις ανησυχίες της κοινής γνώμης σχετικά με τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις του ατυχήματος, ιδίως όσον αφορά την ασφάλεια της πυρηνικής ενέργειας και την προστασία της δημόσιας υγείας (Baylis, 2007).

3.7 Δυστυχήματα σε στρατιωτικές πυρηνικές μονάδες και οι συνέπειές τους στο θαλάσσιο περιβάλλον

Ένα λιγότερο γνωστό στο ευρύ κοινό αλλά εξίσου κρίσιμο τμήμα των πυρηνικών συμβάντων που έχουν οδηγήσει σε διαρροές ραδιενέργειας, αφορά στα δυστυχήματα που σημειώθηκαν σε στρατιωτικές πυρηνικές μονάδες —κυρίως σε πολεμικά πλοία και υποβρύχια με πυρηνική πρόωση. Τα περιστατικά αυτά εντοπίζονται σε χώρους δραστηριοποίησης των λεγόμενων στρατηγικών πυρηνικών δυνάμεων, δηλαδή κρατών που διαθέτουν πυρηνικά όπλα και αξιοποιούν προηγμένα οπικά συστήματα βασισμένα στην πυρηνική τεχνολογία (Kristensen & Norris, 2018).

Οι διαρροές ραδιενέργειας από τέτοια συμβάντα τείνουν να επηρεάζουν πρωτίστως το θαλάσσιο περιβάλλον, καθώς η πλειονότητα των περιστατικών αυτών λαμβάνει χώρα εν πλω ή σε ναυτικές βάσεις. Οι συνέπειες είναι συχνά μακροχρόνιες, με πιθανή βιοσυσσώρευση ραδιενεργών υλικών σε θαλάσσια οικοσυστήματα, επηρεάζοντας τόσο την αλιεία όσο και την ανθρώπινη υγεία μέσω της τροφικής αλυσίδας (ΙΑΕΑ, 2001).

Παρότι ορισμένα από αυτά τα συμβάντα έχουν καταγραφεί επισήμως, η στρατιωτική τους φύση οδηγεί συνήθως σε μερική ή πλήρη αποσιώπηση των πραγματικών διαστάσεων των διαρροών. Το γεγονός αυτό περιπλέκει την πλήρη επιστημονική αξιολόγηση των επιπτώσεών τους, ενώ εγείρει σοβαρά ζητήματα διαφάνειας και διεθνούς ελέγχου (Owen, 2010).

Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη των ατυχημάτων σε στρατιωτικές πυρηνικές εφαρμογές

Κάνοντας μια σύντομη ιστορική αναδρομή, αξίζει να σημειωθεί ότι ήδη κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου είχαν ξεκινήσει οι πρώτες ερευνητικές προσπάθειες για την ανάπτυξη και χρήση πυρηνικών τορπιλών από υποβρύχια. Επρόκειτο για ένα πολυσύνθετο και τεχνολογικά απαιτητικό εγχείρημα για τα δεδομένα της εποχής, το οποίο χαρακτηριζόταν από αυξημένο τεχνικό ρίσκο και ευαλωτότητα σε αστοχίες, με σοβαρούς κινδύνους για το προσωπικό που καλούνταν να το χειριστεί (Schlosser, 2013).

Κατά τη μεταπολεμική περίοδο, και ιδίως κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου, ο εντατικός εξοπλιστικός ανταγωνισμός μεταξύ των Ηνωμένων Πολιτειών και της Σοβιετικής Ένωσης επιτάχυνε την ανάπτυξη οπλικών συστημάτων βασισμένων στην πυρηνική ενέργεια (βλ. κεφ. 3). Οι τεχνολογικές εξελίξεις προωθήθηκαν συχνά χωρίς την αναγκαία μέριμνα για τις καταστροφικές συνέπειες, παρόλο που οι κίνδυνοι είχαν καταστεί εμφανείς ήδη από τις ρίψεις των ατομικών βομβών σε Χιροσίμα και Ναγκασάκι (Holloway, 1994).

Στη διεθνή βιβλιογραφία καταγράφονται δεκάδες περιστατικά (Kristensen & Norris, 2018; ΙΑΕΑ, 2001), στα οποία είτε επιβεβαιώθηκε διαρροή ραδιενεργών υλικών και ακτινοβολίας, είτε υπήρξε αυξημένος κίνδυνος πρόκλησης τέτοιου συμβάντος. Αυτά τα ατυχήματα σχετίζονται είτε με τις ίδιες τις πηγές ραδιενέργειας —όπως πυρηνικά όπλα, αντιδραστήρες πλοίων και υποβρυχίων, θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων (RTGs) και πυρηνικές πηγές ενέργειας για δορυφόρους— είτε με τα μεταφορικά και επιχειρησιακά μέσα που τα φιλοξενούσαν και εκτέθηκαν σε συνθήκες φθοράς, θραύσης ή και έκρηξης (Owen, 2010).

Καταγράφονται, επίσης, περιστατικά ατυχημάτων με αερομεταφερόμενες ατομικές ή θερμοπυρηνικές βόμβες, διηπειρωτικούς πυραύλους με πυρηνικές κεφαλές, πυραύλους cruise, καθώς και ναυτικές μονάδες με πυρηνική πρόωση ή οπλισμό. Τα περισσότερα από τα δημοσιευμένα περιστατικά αφορούν κυρίως τις στρατιωτικές δυνάμεις του δυτικού μπλοκ κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου (1946–1989). Ωστόσο, η σταδιακή αποδέσμευση αποχαρακτηρισμένων εγγράφων από χώρες όπως η πρώην Σοβιετική Ένωση και η Κίνα συμβάλλει στην αποσαφήνιση της πραγματικής κλίμακας και σοβαρότητας των στρατιωτικών πυρηνικών ατυχημάτων (Podvig, 2001)..

3.7.1 Καταγραφή και κατηγοριοποίηση στρατιωτικών πυρηνικών ατυχημάτων με περιβαλλοντικές επιπτώσεις στη θάλασσα

Σύμφωνα με έκθεση της Διεθνούς Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (IAEA) του 2001, η οποία αφορούσε στρατιωτικής φύσεως ατυχήματα με απελευθέρωση ή δυνητική διαρροή πυρηνικού υλικού στο θαλάσσιο περιβάλλον, καταγράφηκαν συνολικά 33 περιστατικά. Από αυτά, 10 δεν έχουν επιβεβαιωθεί πλήρως λόγω δυσκολιών στη διασταύρωση των διαθέσιμων πηγών. Σε αυτά τα συμβάντα, σημειώθηκε είτε επιβεβαιωμένη είτε πιθανή απελευθέρωση ραδιενεργών ουσιών στη θάλασσα, ενώ 13 από τα καταγεγραμμένα περιστατικά αφορούσαν πυρηνοκίνητα υποβρύχια.

Παράλληλα, η ίδια έκθεση αναφέρει και 37 επιπλέον περιστατικά (εκ των οποίων 10 μη πλήρως επιβεβαιωμένα), στα οποία ο κίνδυνος διαρροής ραδιενέργειας τελικά απετράπη, είτε μέσω άμεσης τεχνικής παρέμβασης είτε λόγω του ότι δεν υπήρξε ουσιαστική βλάβη στις σχετικές πηγές ραδιενέργειας. Και σε αυτή την κατηγορία, τα πυρηνοκίνητα υποβρύχια καταλαμβάνουν σημαντικό ποσοστό, καθώς τα 15 περιστατικά αφορούσαν τέτοιου είδους μονάδες, οι οποίες έφεραν και πυρηνικά όπλα (IAEA, 2001).

Τα παραπάνω συμβάντα κατατάσσονται κυρίως στις εξής πέντε κατηγορίες:

- α) Πυρηνοκίνητα υποβρύχια και πλοία επιφανείας,
- β) Πυρηνικά όπλα που μεταφέρονταν από τις παραπάνω πλατφόρμες,
- γ) Πυρηνοκίνητα πλοία εμπορικής χρήσης, όπως παγοθραυστικά,
- δ) Πυρηνικές πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνταν σε διαστημικές εφαρμογές (π.χ. δορυφόροι, διαστημικά σκάφη, υποθαλάσσιοι πομποί ακουστικών σημάτων),
- ε) Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ραδιοϊσοτόπων (Radioisotope Thermoelectric Generators – RTGs), κυρίως από τη Σοβιετική Ένωση/Ρωσία, που χρησιμοποιήθηκαν για την τροφοδοσία φάρων σε απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες περιοχές.

Τη μεγαλύτερη συχνότητα καταγραφής παρουσιάζουν τα περιστατικά που ανήκουν στις τρεις πρώτες κατηγορίες, γεγονός που υπογραμμίζει τη στρατιωτική προέλευση και τον ιδιαίτερο κίνδυνο που συνδέεται με τέτοιου είδους τεχνολογίες σε ναυτικές πλατφόρμες.

Εισαγωγή στην Πυρηνική Ναυτική Τεχνολογία

Το 1954 τέθηκε σε υπηρεσία το πρώτο πυρηνοκίνητο υποβρύχιο στον κόσμο, το αμερικανικό USS *Nautilus* (SSN-571), ανοίγοντας τον δρόμο για την ανάπτυξη πολλών παρόμοιων σκαφών. Μέχρι σήμερα, έχουν κατασκευαστεί πάνω από 530 πυρηνοκίνητα υποβρύχια, εκ των οποίων περισσότερα από 150 βρίσκονται ακόμη σε ενεργό υπηρεσία. Αναπόφευκτα, η τεχνολογική αυτή εξέλιξη συνοδεύτηκε από σειρά ατυχημάτων, μικρής ή μεγάλης κλίμακας, με σοβαρές επιπτώσεις τόσο για το πλήρωμα όσο και για το περιβάλλον, ιδίως όταν τα υποβρύχια ήταν εξοπλισμένα με πυρηνικά όπλα (Polmar & Moore, 2004; IAEA, 2001).

Το Ατύχημα του K-19

Ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά και πρώιμα παραδείγματα ήταν το ατύχημα του σοβιετικού πυρηνοκίνητου υποβρυχίου *K-19*, το οποίο σημειώθηκε τον Ιούλιο του

1961 στον Βόρειο Ατλαντικό κατά τη διάρκεια ναυτικής άσκησης. Το K-19, υποβρύχιο πρώτης γενιάς από πλευράς σχεδίασης, ήταν εξοπλισμένο με δύο πυρηνικούς αντιδραστήρες τύπου VM-A, βασισμένους σε σχεδίαση αντιδραστήρων πίεσης ελαφρού ύδατος (PWR), με καύσιμο εμπλουτισμένο ουράνιο 20% και ισχύ περίπου 70 MW έκαστος.

Αιτίες και Εξέλιξη του Ατυχήματος

Το ατύχημα προκλήθηκε από διαρροή στο πρωτεύον κύκλωμα ψύξης του αντιδραστήρα, σε σημείο μη προσβάσιμο, γεγονός που οδήγησε σε πλήρη απώλεια πίεσης στο κύκλωμα απαγωγής θερμότητας. Ελλείψει εφεδρικού συστήματος, η θερμοκρασία στον αντιδραστήρα έφτασε τους 800°C, θέτοντας τον σε κίνδυνο ανεξέλεγκτης αλυσιδωτής αντίδρασης. Μέλη του πληρώματος κατάφεραν, με αυτοσχέδιες παρεμβάσεις, να αποκαταστήσουν μερικώς την πίεση, αλλά εκτέθηκαν σε έντονη ραδιενέργεια, καθώς τοξικά ραδιενεργά αέρια είχαν πλημμυρίσει το υποβρύχιο.

Οκτώ άτομα του πληρώματος υπέστησαν θανατηφόρες δόσεις ακτινοβολίας (50–60 Sv) και απεβίωσαν εντός 6–19 ημερών. Τα υπόλοιπα μέλη εκτέθηκαν σε δόσεις έως και 1 Sv, με 31 να νοσηλεύονται και 19 να αποβιώνουν εντός της επόμενης διετίας. Το υποβρύχιο ρυμουλκήθηκε και οι δύο αντιδραστήρες του, αφού αφαιρέθηκαν τα πυρηνικά καύσιμα, αντικαταστάθηκαν με νέους σε επισκευαστικές εργασίες που ολοκληρώθηκαν το 1964.

Οι κατεστραμμένοι αντιδραστήρες απορρίφθηκαν το 1965 στον Κόλπο Abrosimova του νησιού Novaya Zemlya, στην Θάλασσα Kara. Η περιοχή αυτή είχε ήδη χρησιμοποιηθεί εκτενώς από την ΕΣΣΔ ως πεδίο ατμοσφαιρικών πυρηνικών δοκιμών (130 συνολικά μεταξύ 1950–1970), ενώ η Θάλασσα Kara και η Θάλασσα Barents μετατράπηκαν σταδιακά σε θαλάσσια πεδία απόρριψης πυρηνικών αποβλήτων.

Εκτός από τους αντιδραστήρες του K-19, τουλάχιστον άλλοι 14 κατεστραμμένοι αντιδραστήρες (από παρόμοια ατυχήματα σε υποβρύχια ή παγοθραυστικά) έχουν εναποτεθεί στην περιοχή. Η συνολική ποσότητα των πυρηνικών αποβλήτων, που απορρίφθηκαν με τη μορφή βαρελιών ή εμπορευματοκιβωτίων έως και τις αρχές της δεκαετίας του 1990, παραμένει σε μεγάλο βαθμό αδιευκρίνιστη.

Το ατύχημα του K-27 (1968)

Λίγα χρόνια αργότερα, στις 24/5/1968, σημειώθηκε ένα ακόμη σοβαρό ατύχημα, αυτή τη φορά στο σοβιετικό πυρηνοκίνητο υποβρύχιο K-27 (τύπος Project 645), στη Θάλασσα του Barents στον Αρκτικό Κύκλο. Το συγκεκριμένο περιστατικό θεωρείται σοβαρότερο ως προς τις περιβαλλοντικές του συνέπειες και αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα τεχνολογικού ρίσκου στις εφαρμογές πυρηνικής πρόωσης (Delucchi, 2006; Polmar & Moore, 2004; Zakharov, 1996).

Το K-27 ήταν το πρώτο υποβρύχιο που κατασκευάστηκε στο πλαίσιο μιας νέας κλάσης πυρηνοκίνητων σκαφών, σχεδιασμένων να χρησιμοποιούν έναν καινοτόμο για την εποχή τύπο αντιδραστήρα, με μέσο ψύξης υγρό μέταλλο (Liquid Metal Reactors – LMR). Κατά τα πρώτα έτη της επιχειρησιακής του ζωής (1963–1968), το K-27 λειτουργούσε ταυτόχρονα ως πλήρως επιχειρησιακή μονάδα και ως πειραματική πλατφόρμα δοκιμών για την αξιολόγηση της απόδοσης και των λειτουργικών παραμέτρων του νέου συστήματος πρόωσης (Polmar & Moore, 2004).

Οι αντιδραστήρες VT-1 και τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά

Η πρόωση του υποβρυχίου βασιζόταν στην ενέργεια που παρείχαν δύο αντιδραστήρες τύπου VT-1, καθένας απόδοσης 73 MW. Οι αντιδραστήρες αυτοί χρησιμοποιούσαν ως ψυκτικό μέσο ένα εύτηκτο κράμα μετάλλων Μολύβδου-Βισμούθιου (Lead-Bismuth Eutectic – LBE), με σημείο τήξης 123,5 °C και σημείο βρασμού 1670 °C, σε αντίθεση με τους κλασικούς αντιδραστήρες πίεσης (PWR) που χρησιμοποιούν ελαφρύ ύδωρ. Ως επιβραδυντικό μέσο χρησιμοποιούνταν στήλες Βηρυλλίου (Be), ενώ το καύσιμο αποτελούνταν από ράβδους Ουρανίου εμπλουτισμένου σε ποσοστό 20% σε 235U.

Πλεονεκτήματα του συστήματος LMR

Το υγρό μίγμα Μολύβδου-Βισμούθιου προσέφερε υψηλή θερμική αγωγιμότητα και θερμική πυκνότητα, εξασφαλίζοντας πιο αποτελεσματική απαγωγή θερμότητας από τον πυρήνα του αντιδραστήρα. Παράλληλα, θεωρούνταν ότι εξασφάλιζε θεωρητικά μεγαλύτερη ασφάλεια λειτουργίας, λόγω του υψηλού σημείου βρασμού και της χαμηλής πίεσης ατμών. Έτσι, δεν απαιτούνταν ιδιαίτερα υψηλές τιμές πίεσης ή θερμοκρασίας για την παραγωγή επαρκούς ποσότητας ατμού σε πλήρη ισχύ λειτουργίας, όπως συμβαίνει στους PWR αντιδραστήρες.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά υπόσχονταν αυξημένη απόδοση ισχύος και μεγαλύτερη αποδοτικότητα στη χρήση του πυρηνικού καυσίμου, με την ταυτόχρονη επίτευξη μειωμένου όγκου και βάρους του αντιδραστήρα σε σύγκριση με τους συμβατικούς τύπους.

Τεχνολογικοί περιορισμοί και υποεκτίμηση των κινδύνων

Παρά τα υποσχόμενα πλεονεκτήματα του νέου συστήματος πρόωσης, υπήρχαν θεμελιώδη μειονεκτήματα, τα οποία αναδείχθηκαν ήδη από τα πρώτα εκπαιδευτικά ταξίδια του υποβρυχίου. Οι τεχνικοί της εποχής, παρά την πρόοδο της τεχνολογίας και τη σωρευμένη εμπειρία, δεν κατάφεραν να προβλέψουν ή να αντιμετωπίσουν επαρκώς κρίσιμα τεχνικά προβλήματα.

Το σημαντικότερο πρόβλημα ήταν η ταχεία και εκτεταμένη διάβρωση που προκαλούσε το υγρό μίγμα Μολύβδου-Βισμούθιου στα μεταλλικά εξαρτήματα του κυκλώματος, όπως αντλίες, βρόγχους και σωληνώσεις. Η έντονη οξειδωση οδηγούσε στην παραγωγή στερεών ρύπων (π.χ. σκουριά), οι οποίοι συγκεντρώνονταν στο σύστημα ψύξης και προκαλούσαν τοπικά φαινόμενα φραγής. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα το πάγωμα και τη στερεοποίηση του ψυκτικού σε κρίσιμα σημεία του κυκλώματος απαγωγής θερμότητας, γεγονός που απαιτούσε συχνό καθαρισμό του ψυκτικού μέσου — συχνότερο από ό,τι ήταν τεχνικά ή οικονομικά εφικτό.

Παραγωγή τοξικών ραδιενεργών ενώσεων

Πέρα από τα μηχανικά προβλήματα, η λειτουργία του αντιδραστήρα παρήγαγε ιδιαίτερα τοξικά παραπροϊόντα. Η αλυσιδωτή πυρηνική αντίδραση απελευθέρωνε μεγάλο αριθμό ελεύθερων νετρονίων, τα οποία απορροφούνταν από το ψυκτικό υγρό, οδηγώντας στη μεταστοιχείωση του ισοτόπου ^{209}Bi σε ^{210}Po μέσω β^- διάσπασης.

Το ^{210}Po είναι ένα εξαιρετικά τοξικό ραδιοϊσότοπο, το οποίο εκπέμπει ακτινοβολία α και έχει χρόνο ημιζωής 4,5 μηνών. Λόγω της πτητικής του φύσης και της βιοδιαθεσιμότητάς του, αποτελεί σοβαρό περιβαλλοντικό κίνδυνο, ιδίως για τους θαλάσσιους οργανισμούς. Εισέρχεται εύκολα στην τροφική αλυσίδα μέσω της

κατάποσης μολυσμένων ειδών, όπως όστρακα, μαλάκια και καρκινοειδή, από ανώτερους θαλάσσιους θηρευτές.

Το τελικό δοκιμαστικό ταξίδι

Στις 21/5/1968, το πυρηνοκίνητο υποβρύχιο K-27 απέπλευσε από τον ναύσταθμό του στη Θάλασσα Barents για τον τελικό του δοκιμαστικό πλου. Είχε προηγηθεί μια σειρά μικρότερης κλίμακας τεχνικών δυσλειτουργιών κατά τους προηγούμενους μήνες, που αφορούσαν την αποκόλληση οξειδωμένων σωματιδίων εντός του υγρού μετάλλου, εμφάνιση μικρορωγμών στις σωληνώσεις, εισροή ρύπων στο κύκλωμα ψύξης (όπως λιπαντικό υγρό) και μικροδιαρροές ραδιενέργειας σε διάφορα διαμερίσματα του σκάφους.

Στις 24/5/1968, ενώ το υποβρύχιο έπλεε σε κατάδυση και οι δύο αντιδραστήρες λειτουργούσαν σε ονομαστική ισχύ 83%, ο αριστερός αντιδραστήρας VT-1 παρουσίασε απότομη πτώση ισχύος — μέσα σε μόλις 60–90 δευτερόλεπτα έπεσε στο 7% και σχεδόν τέθηκε εκτός λειτουργίας. Η μεταγενέστερη διερεύνηση έδειξε πως συσσωρευμένα σωματίδια οξείδωσης προκάλεσαν πιθανή απόφραξη σε κρίσιμο σημείο του κυκλώματος, οδηγώντας στη στερεοποίηση του ψυκτικού και σε τοπική αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αυτόματη πλήρη πτώση των ράβδων ελέγχου στον πυρήνα.

Ραδιενεργός ρύπανση και αντίδραση του πληρώματος

Ταυτόχρονα σημειώθηκε απότομη αύξηση της εκπομπής ακτινοβολίας γ εντός του θαλάμου του αντιδραστήρα. Ισότοπα Ξένου και Κρυπτού, σωματίδια α , και δευτερογενώς παραγόμενα σωματίδια β διέτρευσαν στον εσωτερικό χώρο, διασπείροντας ραδιενέργεια σε όλα τα διαμερίσματα του υποβρυχίου μέσω του συστήματος αερισμού. Τα 144 μέλη του πληρώματος εκτέθηκαν σε υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας. Καθώς δεν αντιλήφθηκαν αρχικά τη σοβαρότητα του περιστατικού, κατέβαλαν προσπάθειες για 30 λεπτά ώστε να επαναφέρουν τον αντιδραστήρα σε πλήρη ισχύ, επιδεινώνοντας τελικά την κατάσταση. Περίπου το 20% του πυρηνικού καυσίμου υπερθερμάνθηκε και τήχθηκε, αναμιγνυόμενο με το υγρό μέταλλο και κυκλοφορώντας στο πρωτεύον κύκλωμα ψύξης.

Το υποβρύχιο κατάφερε να αναδυθεί και, με χρήση του δεύτερου αντιδραστήρα, επέστρεψε στη βάση του στον κόλπο Gremikha, μετά από περίπου πέντε ώρες. Η μερική τήξη του αντιδραστήρα είχε σοβαρές συνέπειες στο πλήρωμα: τουλάχιστον 6 (κατά άλλες πηγές 9) μέλη απεβίωσαν άμεσα, ενώ 83 εμφάνισαν συμπτώματα τοξικής δηλητηρίασης από ραδιενέργεια — με 40 από αυτούς να έχουν υποστεί βαριά προσβολή. Πολλοί εξ αυτών απεβίωσαν μέσα στην επόμενη πενταετία.

Τα επόμενα τρία χρόνια το K-27 αποτέλεσε αντικείμενο πειραματισμών για πιθανή επισκευή ή αντικατάσταση του κατεστραμμένου αντιδραστήρα. Καμία από τις προσπάθειες δεν ευδοχώθηκε και το 1981 αποφασίστηκε η οριστική απόσυρση του σκάφους.

Βύθιση και μέτρα συγκράτησης ραδιενέργειας

Για τη βύθισή του, οι κοιλότητες και σωληνώσεις του αντιδραστήρα πληρώθηκαν με ειδικό υλικό που στερεοποιήθηκε άμεσα, ενώ οι χώροι των πυρηνικών διαμερισμάτων σφραγίστηκαν με 270 τόνους ασφάλτου. Σκοπός ήταν η προσωρινή απομόνωση των ραδιενεργών υλικών από το θαλασσινό νερό και η αποτροπή διαρροών.

Στις 6/9/1982, το υποβρύχιο K-27 βυθίστηκε σκόπιμα στα ρηχά νερά του κόλπου Steronogo, σε απόσταση μικρότερη των 33 μέτρων από τις ακτές του νησιού Novaya Zemlya. Η επιλογή αυτής της θέσης βύθισης παραβίαζε τις διατάξεις της Διεθνούς Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας σχετικά με την ασφαλή απόθεση ραδιενεργών υλικών στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Ένας από τους βασικούς λόγους ανησυχίας είναι ότι οι δύο αντιδραστήρες του υποβρυχίου περιείχαν περίπου 90 κιλά μη αναλωμένου εμπλουτισμένου ουρανίου. Η ύπαρξη αυτής της ποσότητας ενεργού πυρηνικού καυσίμου εντός του θαλάσσιου περιβάλλοντος συνιστά έναν σοβαρό δυνητικό κίνδυνο σε περίπτωση μελλοντικής ανέλκυσης ή διαρροής. Σύμφωνα με έκθεση της Νορβηγικής Επιτροπής Ακτινοπροστασίας (NRPA), που αναθεωρήθηκε το 2014 με τη συμμετοχή ειδικών της Διεθνούς Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας, η μέγιστη εκτιμώμενη ραδιενεργός δραστηριότητα του K-27 κατά τη βύθισή του ανερχόταν σε 2132,7 TBq (Yablokov, 1999; Adams et al., 2014, NRPA, 2014).

Η προσωρινή μόνωση των αντιδραστήρων με άσφαλτο (πίσσα), που εφαρμόστηκε για την αποτροπή της επαφής του θαλασσινού νερού με τα ραδιενεργά υλικά, εκτιμάται ότι έχει περιορισμένη διάρκεια ζωής. Επιστημονικές εκτιμήσεις από Ρώσους και Νορβηγούς ερευνητές προβλέπουν πως η αποτελεσματικότητα αυτής της μόνωσης θα λήξει έως τις αρχές της δεκαετίας του 2030, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι πιθανότητες διαρροής στο μέλλον.

Δυσκολίες ανέλκυσης και ανυπολόγιστοι κίνδυνοι

Η Ρωσία έχει ανακοινώσει κατά καιρούς σχέδια για την ανέλκυση τέτοιων πηγών ραδιενεργής ρύπανσης από το βυθό, σε συνεργασία με διεθνείς εταίρους, ωστόσο δεν έχει καταγραφεί ουσιαστική πρόοδος. Στην περίπτωση του K-27, το εγχείρημα της ανέλκυσης θεωρείται εξαιρετικά επικίνδυνο, τόσο λόγω της παρουσίας ενεργών καυσίμων στους αντιδραστήρες, όσο και εξαιτίας της πιθανότητας διάρρηξης του σκάφους κατά τη μετακίνηση. Μια τέτοια εξέλιξη θα ενέχει σοβαρότατους κινδύνους για εκτεταμένη ραδιενεργή μόλυνση του θαλάσσιου οικοσυστήματος, ενώ ταυτόχρονα το κόστος και οι τεχνικές απαιτήσεις καθιστούν την επιχείρηση εξαιρετικά δύσκολη.



Εικόνα 22: Το σοβιετικό πυρηνοκίνητο υποβρύχιο K-159 (1962 – 1989), στις 28/8/2003 (πηγή: *The Barents Observer*).

Το ατύχημα του 1985 στον κόλπο Chazhma

Στις 10 Αυγούστου 1985 σημειώθηκε σοβαρό πυρηνικό ατύχημα στον κόλπο Chazhma, σε ναυτική βάση της Σοβιετικής Ένωσης κοντά στο Βλαδιβοστόκ, το οποίο κατατάσσεται στο επίπεδο 5 της κλίμακας INES (IAEA, 2001). Το περιστατικό αφορούσε το πυρηνοκίνητο υποβρύχιο K-431 (τύπος Echo II), το οποίο εκείνη την ημέρα ολοκλήρωνε αντικατάσταση ράβδων καυσίμου. Κατά τη διαδικασία, το καπάκι του ενός εκ των δύο αντιδραστήρων δεν επανατοποθετήθηκε σωστά. Ανθρώπινο σφάλμα ή εξωτερικές αναταράξεις, όπως η διέλευση γειτονικής τορπιλακάτου, πιθανότατα προκάλεσαν μετακίνηση των ράβδων και απότομη αύξηση της αντιδραστικότητας, οδηγώντας σε έκρηξη (Makhijani et al., 1989). Η πίεση από τη θερμότητα εκτόξευσε το καπάκι βάρους 12 τόνων, καταστρέφοντας τον εξοπλισμό και προκαλώντας πυρκαγιά επτά ωρών. Η έκρηξη διέρρηξε τον αντιδραστήρα, σκοτώνοντας δέκα άτομα επιτόπου, ενώ η ακτινοβολία στον χώρο άγγιξε τα 5 mSv/h, 16.000 φορές πάνω από τα φυσιολογικά επίπεδα (Greenpeace, 1996).

Από το ατύχημα εκλύθηκαν 259 PBq ραδιενεργών ισοτόπων, εκ των οποίων 29 GBq ήταν ^{131}I , γνωστός καρκινογόνος παράγοντας λόγω της συσσώρευσής του στον θυρεοειδή (Yablokov et al., 2009). Η διασπορά ενός ραδιενεργού νέφους προς τη χερσόνησο Dunai οδήγησε σε έκθεση περίπου 30.000 κατοίκων, με δόσεις ακτινοβολίας που σε ορισμένες περιοχές έφτασαν τα 8 mSv/h, ισοδύναμες με δεκάδες ακτινογραφίες ανά ώρα και κίνδυνο καρκινογένεσης έως και 20% (Medvedev, 1990). Στις επιχειρήσεις επέμβασης συμμετείχαν περίπου 2.000 διασώστες, από τους οποίους 290 έλαβαν δόσεις από 50 mSv έως και 2,2 Sv, ενώ μετρήθηκαν έως 4 Sv στον θυρεοειδή. Το 44% εκτέθηκε σε επίπεδα σχεδόν βέβαιης καρκινογένεσης. Το 1998, η ρωσική κυβέρνηση αναγνώρισε 205 από αυτούς ως ισότιμους με τα θύματα του Τσερνόμπιλ, παρέχοντάς τους ειδική ασφαλιστική κάλυψη (Alexandrov, 2000).

Ο κόλπος Chazhma, ήδη από πριν, είχε μετατραπεί σε σημείο ανεπίσημης απόθεσης πυρηνικών αποβλήτων. Μετρήσεις μέχρι και τα τέλη της δεκαετίας του 1990 κατέδειξαν ακτινοβολία έως και 60 mSv/h στον βυθό, δηλαδή 3.000 φορές πάνω από

τα φυσιολογικά επίπεδα (NRPA, 2014). Αν και τα επίπεδα ^{60}Co μειώνονται με τον χρόνο, η ραδιενέργεια διαχέεται προς τον κόλπο Strelak μέσω των ρευμάτων, επιτείνοντας τον γεωγραφικό αντίκτυπο. Παρά τη σοβαρότητα του συμβάντος, δεν έχουν διεξαχθεί εκτενείς μελέτες για τις μακροχρόνιες επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και στο θαλάσσιο οικοσύστημα της περιοχής Dunai (IAEA, 2001).

Συμπεράσματα Κεφαλαίου 3

Η ανάλυση των σημαντικότερων πυρηνικών ατυχημάτων, τόσο σε στρατιωτικά υποβρύχια (K-19, K-27, K-431) όσο και σε χερσαίες πυρηνικές εγκαταστάσεις (Windscale, Kyshtym, Tokaimura, Three Mile Island, Τσερνόμπιλ, Φουκουσίμα), καταδεικνύει με σαφήνεια τις σοβαρές και πολύπλευρες συνέπειες της ανεπαρκούς διαχείρισης της πυρηνικής τεχνολογίας. Παρά τις διαφορετικές συνθήκες και τεχνολογικά περιβάλλοντα, όλα τα περιστατικά έχουν κοινά χαρακτηριστικά: ελλείψεις στην πρόληψη και την ασφάλεια, ελαττώματα σχεδίασης, ανεπαρκή εκπαίδευση προσωπικού και καθυστέρηση στη λήψη μέτρων περιορισμού της ραδιενεργού ρύπανσης.

Τα στρατιωτικής φύσης ατυχήματα, όπως αυτά των σοβιετικών υποβρυχίων, ανέδειξαν τον διαρκή περιβαλλοντικό κίνδυνο από την εναπόθεση ραδιενεργών καταλοίπων σε θαλάσσια οικοσυστήματα, καθώς και τις μακροχρόνιες επιπτώσεις στην υγεία του προσωπικού. Αντίστοιχα, μεγάλα πολιτικά ατυχήματα, όπως του Τσερνόμπιλ και της Φουκουσίμα, ανέδειξαν τη σημασία της διεθνούς συνεργασίας, της διαφάνειας και της τεχνολογικής επαγρύπνησης.

Η αξιολόγηση των μέτρων αποκατάστασης, ιδίως σε περιπτώσεις όπως του Kyshtym και της Tokaimura, υπογραμμίζει την ανάγκη για μακροπρόθεσμη επιτήρηση, διαρκή περιβαλλοντική παρακολούθηση και αυστηρή εφαρμογή διεθνών προτύπων ασφαλείας. Συνολικά, η κατανόηση αυτών των περιστατικών συνιστά πολύτιμο μάθημα για την πρόληψη μελλοντικών ατυχημάτων και τη διαμόρφωση ενός αποτελεσματικού πλαισίου πυρηνικής ασφάλειας.

4. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΣΥΝΕΠΕΙΩΝ

4.1. Πυρηνικά απόβλητα και διαχείριση.

4.1.1 Ορισμός και Προέλευση των Πυρηνικών Αποβλήτων

Ως *πυρηνικά απόβλητα* ορίζονται όλα τα υλικά ή ουσίες που παράγονται ή χρησιμοποιούνται σε δραστηριότητες της πυρηνικής βιομηχανίας —είτε στρατιωτικές είτε ειρηνικές— και θεωρούνται πλέον μη αξιοποιήσιμα για περαιτέρω χρήση. Παρά το γεγονός ότι κάποια από αυτά μπορούν υπό προϋποθέσεις να ανακυκλωθούν, σε γενικές γραμμές χαρακτηρίζονται ως μη επαναχρησιμοποιήσιμα και απαιτούν ειδικούς χειρισμούς για την ασφαλή διαχείρισή τους (IAEA, 2009).

Οι όροι *πυρηνικά* και *ραδιενεργά απόβλητα* χρησιμοποιούνται σχεδόν ταυτόσημα, καθώς τα περισσότερα πυρηνικά κατάλοιπα είτε προέρχονται από υλικά που ήταν ενεργά ραδιενεργά (όπως το καύσιμο), είτε έχουν μολυνθεί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των εγκαταστάσεων από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία (World Nuclear Association, 2022).

Υπάρχει, ωστόσο, και ένας επιμέρους τύπος ραδιενεργών αποβλήτων που δεν συνδέεται άμεσα με τον πυρηνικό κύκλο καυσίμου. Πρόκειται για τα υλικά που περιέχουν φυσικώς απαντώμενη ραδιενέργεια (*Naturally Occurring Radioactive Materials – NORM*), όπως ενώσεις παραγόμενες στη βιομηχανία λιπασμάτων ή κατάλοιπα από την εξόρυξη ορυκτών καυσίμων. Παρόλο που αυτά δεν προέρχονται από πυρηνικές εγκαταστάσεις, εμπίπτουν στο ίδιο κανονιστικό πλαίσιο διαχείρισης με τα υπόλοιπα ραδιενεργά απόβλητα (UNEP, 2020).

Η διαχείριση των αποβλήτων αυτών —που παράγονται σε όλα τα στάδια του κύκλου της πυρηνικής ενέργειας, από την εξόρυξη του ουρανίου έως την απόσυρση των εγκαταστάσεων— αποτελεί μια από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές προκλήσεις της πυρηνικής τεχνολογίας, ιδίως όσον αφορά την αποθήκευση και απομόνωσή τους για χιλιάδες χρόνια (OECD/NEA, 2018).

Παραγωγή Πυρηνικών Αποβλήτων στον Κύκλο του Πυρηνικού Καυσίμου

Πυρηνικά απόβλητα παράγονται σε όλα τα στάδια του λεγόμενου *κύκλου του πυρηνικού καυσίμου*, ο οποίος περιλαμβάνει τις φάσεις της εξόρυξης μεταλλεύματος, της αρχικής επεξεργασίας, του εμπλουτισμού ουρανίου, της χρήσης του καυσίμου στους αντιδραστήρες, της επανεπεξεργασίας και, τέλος, της τελικής διάθεσης των ραδιενεργών καταλοίπων (IAEA, 2018).

Αυτός ο κύκλος διακρίνεται τεχνικά σε δύο μέρη: το «*εμπρόσθιο άκρο*» (*front end*), που περιλαμβάνει την παραγωγή ραδιενεργών υποπροϊόντων από την εξόρυξη έως και τη χρήση του καυσίμου σε πυρηνικούς αντιδραστήρες· και το «*οπίσθιο άκρο*» (*back end*), το οποίο περιλαμβάνει την απομάκρυνση του αναλωμένου καυσίμου, την επανεπεξεργασία και την ενδεχόμενη ανακύκλωσή του, καθώς και τη διαχείριση των υπολειμματικών ραδιενεργών αποβλήτων (OECD/NEA, 2021).

Τα απόβλητα αυτά είναι κατά κανόνα ραδιενεργά, με διαφοροποιήσεις στον βαθμό επικινδυνότητας, ανάλογα με τον τύπο και την ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπουν. Η διαφοροποίηση αυτή καθορίζει και τον αντίστοιχο κίνδυνο για τον άνθρωπο και το περιβάλλον (World Nuclear Association, 2023).

Για τον λόγο αυτό, η ασφαλής διαχείριση και αποθήκευση των αποβλήτων αυτών απαιτεί προηγμένες τεχνικές, υψηλό κόστος και αυστηρή τήρηση κανονιστικών πλαισίων, ώστε να διασφαλιστεί η προστασία της δημόσιας υγείας και της βιόσφαιρας (UNEP, 2020).

Προέλευση, Σύνθεση και Παράγοντες Επικινδυνότητας των Πυρηνικών Αποβλήτων

Τα πυρηνικά απόβλητα προκύπτουν από ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων και χαρακτηρίζονται από ανομοιογένεια ως προς την προέλευση, τη χημική τους σύσταση και τις ραδιολογικές τους ιδιότητες, γεγονός που καθορίζει και τον βαθμό επικινδυνότητάς τους. Παράγοντες όπως η ποσότητα και μορφή του υλικού (στερεά, υγρά ή αέρια), ο χρόνος ημιζωής των περιεχόμενων ραδιοϊσοτόπων, το είδος και η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπουν, καθώς και οι χημικές και φυσικές τους ιδιότητες, επηρεάζουν άμεσα την τοξικότητά τους και τον κίνδυνο για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον (ΙΑΕΑ, 2018; World Nuclear Association, 2023).

Η ρύθμιση και διαχείριση των αποβλήτων αυτών υπόκειται στο εθνικό και διεθνές κανονιστικό πλαίσιο, το οποίο επιβλέπουν οι αντίστοιχες ρυθμιστικές αρχές των κρατών που χρησιμοποιούν ή αναπτύσσουν πυρηνική τεχνολογία (OECD/NEA, 2021).

Κύριες κατηγορίες προέλευσης των πυρηνικών αποβλήτων περιλαμβάνουν:

- **Αναλωμένο πυρηνικό καύσιμο (Spent Nuclear Fuel – SNF)** από πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος, στρατιωτικής χρήσης ή ερευνητικής κατεύθυνσης, καθώς και από αντιδραστήρες παραγωγής πλουτωνίου για οπλική χρήση.
- **Κατάλοιπα από εγκαταστάσεις επεξεργασίας καυσίμου**, όπως το UO_2 και το U_3O_8 («yellow cake»), εγκαταστάσεις επανεπεξεργασίας για την παραγωγή MOX, ή μονάδες εμπλουτισμού ουρανίου (UF_6), με ταυτόχρονη παραγωγή ραδιενεργών αποβλήτων μη ανακυκλώσιμων, που απαιτούν μακροχρόνια απομόνωση (ΙΑΕΑ, 2022).
- **Υλικά από αποσυρμολόγηση και συντήρηση παλαιών πυρηνικών εγκαταστάσεων**, όπως μολυσμένα μεταλλικά μέρη, σκυρόδεμα, φίλτρα, εξαρτήματα, καθώς και ατομικός προστατευτικός εξοπλισμός. Η ραδιενεργή επιμόλυνση αυτών των ετερόκλητων υλικών ενδέχεται να κυμαίνεται σε ευρύ φάσμα επιπέδων, γεγονός που απαιτεί ειδική διαχείριση ανά περίπτωση (UNEP, 2020).
- **Ιατρικά απόβλητα**, τα οποία προκύπτουν από ραδιοφάρμακα, εξωτερικές πηγές ακτινοβολίας για θεραπεία καρκίνου, αποστείρωση εργαλείων και από παραϊατρικά υλικά επιμολυσμένα κατά τη χρήση τους σε διαγνωστικές ή θεραπευτικές διαδικασίες (WHO, 2021).
- **Ραδιενεργά υλικά από βιομηχανικές ή ερευνητικές δραστηριότητες**, όπως αυτά που προκύπτουν από τη χρήση ^{14}C στην αρχαιομετρία, από τη βιομηχανία λιπασμάτων ή την παραγωγή οργάνων μέτρησης, καθώς και από εξορυκτικές και μεταλλευτικές εργασίες (ΙΑΕΑ, 2016).

Τυπολογική Κατάταξη Πυρηνικών Αποβλήτων από τον ΙΑΕΑ

Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ) έχει θεσπίσει εδώ και δεκαετίες μια βασική τυπολογία των πυρηνικών αποβλήτων, με βάση την ένταση και το είδος της ραδιενέργειας καθώς και τον χρόνο ημιζωής των ισοτόπων. Αν και η κατάταξη αυτή

δεν είναι δεσμευτική, υιοθετείται διεθνώς με παραλλαγές ανά χώρα ως προς τα όρια και τα κριτήρια ταξινόμησης (IAEA, 2009· NEA/OECD, 2015).

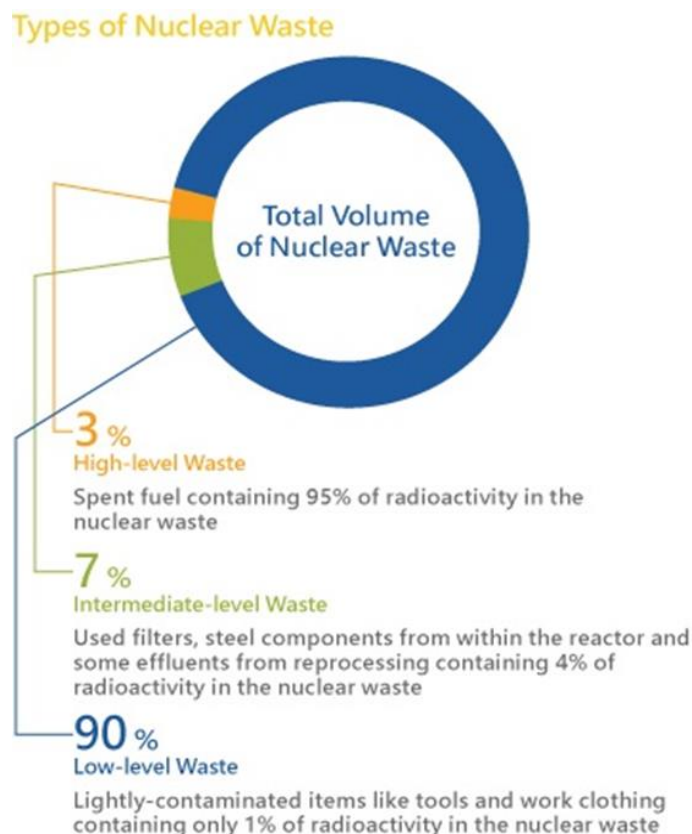
1. **Απαλλασσόμενα Απόβλητα (Exempt Waste – EW):** Περιέχουν αμελητέες ποσότητες ραδιενέργειας, συγκρίσιμες με τα φυσικά επίπεδα ακτινοβολίας υποβάθρου. Μετά από περιορισμένη φύλαξη, μπορούν να διατεθούν σε ΧΥΤΑ ή να επανεπεξεργαστούν με συμβατικές μεθόδους (IAEA, 2009).
2. **Απόβλητα Πολύ Μικρού Χρόνου Ημιζωής (Very Short Lived Waste – VSLW):** Περιέχουν ισοτόπους με ημιζωή λίγων ημερών (π.χ. ^{131}I), και αποθηκεύονται προσωρινά για σύντομο διάστημα (π.χ. 100 ημέρες), μέχρι η ραδιενέργεια να πέσει κάτω από τα καθορισμένα όρια (CNSC, 2020).
3. **Πολύ Χαμηλού Επιπέδου Απόβλητα (Very Low Level Waste – VLLW):** Έχουν περιορισμένη ραδιενέργεια και αποθηκεύονται σε θωρακισμένους επιφανειακούς χώρους. Συνήθως περιλαμβάνουν υλικά από παλιές εγκαταστάσεις, όπως μολυσμένο έδαφος και μεταλλικά εξαρτήματα (IAEA, 2006).
4. **Χαμηλού Επιπέδου Απόβλητα (Low Level Waste – LLW):** Περιλαμβάνουν ραδιονουκλεΐδια με μέση ή μεγάλη ημιζωή (π.χ. ^{60}Co , ^{137}Cs), και απαιτούν ασφαλή αποθήκευση για εκατοντάδες χρόνια, συνήθως σε υπόγειες εγκαταστάσεις μικρού βάθους (UK Environment Agency, 2011).
5. **Μεσαίου Επιπέδου Απόβλητα (Intermediate Level Waste – ILW):** Εμφανίζουν υψηλότερη ραδιενέργεια και περιέχουν σημαντικές ποσότητες ραδιοϊσοτόπων. Παράγονται από την πυρηνική βιομηχανία, ιατρικές εφαρμογές ή την επεξεργασία καυσίμου. Δεν απαιτούν ψύξη, αλλά χρειάζονται γεωλογική διάθεση σε μεγάλα βάθη και αυστηρές προδιαγραφές ασφάλειας (IAEA, 2018).



Εικόνα 23: Τεμαχισμένα υπολείμματα επένδυσης Zircaloy (εξωτερικό περίβλημα ράβδων καυσίμου), που περιβάλλει τα πέλλετ καυσίμου σε αντιδραστήρες, τα οποία δέχονται για πάνω από 2 χρόνια, την ραδιενέργεια που εκπέμπεται κατά την σχάση. Θεωρούνται συνήθως πυρηνικά (ραδιενεργά) απόβλητα μεσαίου επιπέδου (ILW) (Πηγή: Radioactivity.eu.com).

6. **Υψηλού Επιπέδου (High Level Waste – HLW):** Τα πιο επικίνδυνα απόβλητα, προέρχονται κυρίως από αναλωμένο καύσιμο αντιδραστήρων και περιέχουν

ισοτόπους τόσο έντονης όσο και μεγάλης διάρκειας ραδιενέργειας. Απαιτούν πολλαπλά στάδια διαχείρισης, προηγμένα συστήματα απομόνωσης και γεωλογική διάθεση σε πολύ μεγάλα βάθη (World Nuclear Association, 2022). Παράγουν το 95% της συνολικής ραδιενέργειας, ενώ αντιστοιχούν σε μόλις 3% του όγκου των συνολικών αποβλήτων (IAEA, 2018).



Εικόνα 24: Ποσοστιαία κατανομή συμμετοχής ανά κατηγορία πυρηνικών αποβλήτων (χαμηλού, μέσου και υψηλού επιπέδου επικινδυνότητας) και αντίστοιχη ποσοστιαία συμμετοχή στην ραδιενέργεια που συνολικά περικλείουν (πηγή: World Nuclear Association).

Η διαχείριση των μέσου και υψηλού επιπέδου πυρηνικών αποβλήτων περιλαμβάνει την ασφαλή αρχική, ενδιάμεση και τελική διάθεση υλικών που περιέχουν ραδιοϊσότοπα, κυρίως από αναλωμένο καύσιμο και επεξεργασία ουρανίου. Εφόσον δεν εφαρμόζεται ανακύκλωση, το εξαντλημένο καύσιμο κατατάσσεται ως HLW και απαιτεί μακροχρόνια απομόνωση (IAEA, 2022).

Ραδιενέργεια και δηλητηρίαση καυσίμου

Το φρέσκο καύσιμο αποτελείται κυρίως από εμπλουτισμένο οξείδιο ουρανίου (UO_2), με ~3–5% σχάσιμο ^{235}U . Είναι χαμηλής ραδιενέργειας, σε αντίθεση με το αναλωμένο, το οποίο είναι ιδιαίτερα ραδιενεργό και θερμικά ενεργό, απαιτώντας απομακρυσμένη και θωρακισμένη διαχείριση (WNA, 2023). Η διάρκεια ζωής του καυσίμου σε αντιδραστήρες είναι 3–4 έτη, οπότε συσσωρεύονται ραδιονουκλίδια που μειώνουν την αντιδραστικότητα, προκαλώντας «δηλητηρίαση» του αντιδραστήρα (Choppin et al., 2013).

Σύνθεση αναλωμένου καυσίμου

Μετά τη χρήση, το καύσιμο περιέχει ~96% ουράνιο, κυρίως ^{238}U , ~1% πλουτόνιο και ραδιονουκλίδια που εκπέμπουν ακτινοβολίες β, γ και α. Πολλά προκύπτουν από σχάση ή δέσμευση νετρονίων (OECD-NEA, 2018). Ραδιοϊσότοπα όπως το ^{131}I , ^{90}Sr και ^{137}Cs κυριαρχούν στα πρώιμα στάδια, ενώ σε βάθος χρόνου επικρατούν ισότοπα όπως ^{239}Pu , ^{243}Am και ^{129}I , με ημιζωές από αιώνες έως και εκατομμύρια έτη (IAEA, 2022).

Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας προτείνει την εφαρμογή σταδίων επεξεργασίας και συστημάτων απομόνωσης για όλα τα ραδιενεργά απόβλητα, ώστε να προστατευθεί η ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος και το διαχειριστικό ρίσκο (IAEA, 2018).

➤ Τα βασικά στάδια διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ), η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια: την προεπεξεργασία, την κύρια επεξεργασία (treatment) και την προετοιμασία για τελική συσκευασία και αποθήκευση (IAEA, 2018).

Η εφαρμογή των παραπάνω σταδίων διαφοροποιείται ανάλογα με τα πρωτόκολλα ασφαλείας των επιμέρους κρατών, όπως αυτά που εκδίδουν η U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) στις ΗΠΑ, η Nuclear Decommissioning Authority (NDA) στο Ηνωμένο Βασίλειο και η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ). Βασική προϋπόθεση για τη χάραξη οποιασδήποτε εθνικής στρατηγικής είναι η λεπτομερής και διαρκής καταγραφή των πηγών παραγωγής, της ποσότητας και των χαρακτηριστικών των αποβλήτων ανά κατηγορία επικινδυνότητας (NRC, 2022; NDA, 2021).

Προεπεξεργασία

Η προεπεξεργασία αφορά κυρίως την προετοιμασία των αποβλήτων για τις επόμενες φάσεις. Σε αυτή περιλαμβάνεται η διαλογή και ο διαχωρισμός των μολυσμένων υλικών από τα μη ραδιενεργά, ο τεμαχισμός και η αποσυναρμολόγηση υλικών με στόχο τη μείωση του όγκου, καθώς και η απολύμανση και συμπίεση, που μειώνουν τα κόστη τελικής απόρριψης (IAEA, 2018).

Ιδιαίτερα κρίσιμη θεωρείται η αρχική αποθήκευση των αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας (HLW) σε θωρακισμένες δεξαμενές νερού για διάστημα 1 έως 10 ετών. Το νερό λειτουργεί ως θερμικός αγωγός και παρέχει ακτινοπροστασία, επιτρέποντας την απομάκρυνση της θερμότητας διάσπασης των ραδιονουκλιδίων από το εξαντλημένο πυρηνικό καύσιμο (World Nuclear Association, 2023). Αυτή η περίοδος προηγείται της οποιασδήποτε διαδικασίας επεξεργασίας, ανακύκλωσης ή τελικής απόθεσης.

Κύρια επεξεργασία (Treatment)

Η κύρια επεξεργασία αποσκοπεί στη μείωση της ραδιενεργού επικινδυνότητας και του συνολικού όγκου των αποβλήτων. Οι τεχνικές που εφαρμόζονται περιλαμβάνουν την αποτέφρωση για εξουδετέρωση οργανικών υλικών και ογκομείωση, την εξάτμιση για απομάκρυνση του υδατικού διαλύτη από υγρά απόβλητα και τη φρύξη ή ξηρή οξείδωση, που σταθεροποιεί τα ιζήματα (NDA, 2021). Η επιλογή της κατάλληλης

τεχνικής βασίζεται στη χημική σύνθεση, τη φυσική κατάσταση και την ραδιενέργεια των αποβλήτων, αλλά και στις προδιαγραφές του χώρου τελικής αποθήκευσης.

Προετοιμασία για τελική αποθήκευση

Η φάση αυτή περιλαμβάνει τη σταθεροποίηση και συσκευασία των αποβλήτων σε μορφή κατάλληλη για ασφαλή μεταφορά και μακροχρόνια αποθήκευση. Κύριοι στόχοι είναι η αποτροπή της διαρροής ραδιονουκλιδίων στο περιβάλλον και η ανθεκτικότητα του τελικού προϊόντος στη θερμότητα, στην ακτινοβολία και στη χημική διάβρωση (IAEA, 2018).

Οι μέθοδοι περιλαμβάνουν τη στερεοποίηση των αποβλήτων σε υλικά όπως τσιμέντο, άσφαλτος ή τεχνητά πετρώματα τύπου SYNROC, την υαλοποίηση των HLW με ενσωμάτωσή τους σε υαλώδη μήτρα υψηλής χημικής σταθερότητας, καθώς και τη συσκευασία τους σε ειδικά θωρακισμένα χαλύβδινα δοχεία, ενισχυμένα εξωτερικά με προστατευτικά κονιάματα (World Nuclear News, 2022).

Οι τεχνικές αυτές είναι προϋπόθεση για την τελική εναπόθεση των αποβλήτων σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς ή σε άλλες εγκαταστάσεις μακροχρόνιας ασφαλούς φύλαξης.

4.2. Τεχνολογίες Ασφαλούς Αποθήκευσης Ραδιενεργών Αποβλήτων.

Ιστορική Αφετηρία της Παραγωγής και Απόρριψης Πυρηνικών Αποβλήτων

Η αρχική ανάπτυξη των στρατιωτικών πυρηνικών προγραμμάτων από τις δύο υπερδυνάμεις που αναδύθηκαν μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο (Η.Π.Α. και Ε.Σ.Σ.Δ.), κυρίως μεταξύ 1946 και των αρχών της δεκαετίας του 1950, δημιούργησε για πρώτη φορά την ανάγκη οργανωμένης διαχείρισης και διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων. Οι πρώτες ποσότητες αποβλήτων που παρήχθησαν, κυρίως από στρατιωτικά εργαστήρια, ήταν σε στερεή και υγρή μορφή και αντιμετωπίστηκαν με πρωτόγονες μεθόδους διάθεσης, δίχως σαφή διαχωρισμό ως προς τα επίπεδα επικινδυνότητας (Linsley, 1996).

Στις Η.Π.Α., συνηθισμένη πρακτική ήταν η επιφανειακή ή ρηχή ταφή των αποβλήτων εντός των ίδιων των εγκαταστάσεων. Επιπλέον, υγρά ραδιενεργά λύματα απορρίπτονταν απευθείας σε υδάτινα συστήματα, όπως ο ποταμός Columbia. Αντίστοιχα, στερεά ή υγρά απόβλητα σε βαρέλια απορρίπτονταν στο βυθό της θάλασσας, με χαρακτηριστική περίπτωση τη νήσο Farallon, ανοιχτά του Σαν Φρανσίσκο (Pacific Institute, 2006).

Στη Σοβιετική Ένωση, η απόρριψη ραδιενεργών υλικών σε θαλάσσια πεδία, όπως η Θάλασσα Μπάρεντς και η Θάλασσα Κάρα, αποτελούσε καθιερωμένη πρακτική επί δεκαετίες. Παρόμοια, στο Ηνωμένο Βασίλειο, υγρά απόβλητα από την επανεπεξεργασία καυσίμου στο Sellafield κατέληγαν στη Θάλασσα της Ιρλανδίας (IAEA, 1999).

Γενικά, κατά την περίοδο αυτή, η ασφαλής διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων αντιμετωπιζόταν επιφανειακά, καθώς η έμφαση των πυρηνικών δυνάμεων δινόταν κυρίως στην τεχνολογική πρόοδο και στην παραγωγή όπλων. Εκτιμάται ότι τόνοι ραδιενεργών αποβλήτων απορρίφθηκαν ανεξέλεγκτα, ιδίως σε θαλάσσια περιβάλλοντα, από κράτη όπως οι Η.Π.Α., το Ηνωμένο Βασίλειο και η πρώην Σοβιετική Ένωση (Linsley, 1996; IAEA, 1999).

Με την πάροδο του χρόνου, ο φόβος και η ανησυχία των κοινωνιών για τις επιπτώσεις της ραδιενέργειας αυξάνονταν, ενισχύοντας παράλληλα το αίτημα για την ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών πρακτικών διαχείρισης και απόθεσης ραδιενεργών αποβλήτων. Η ανάγκη αυτή έγινε εντονότερη καθώς η παραγωγή πυρηνικών αποβλήτων αυξανόταν, ιδίως με την είσοδο των πρώτων πυρηνικών αντιδραστήρων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για ειρηνικούς σκοπούς.

Η Διεθνής Αντίδραση: Ίδρυση του ΙΑΕΑ και Οργανωμένη Έρευνα

Καθώς οι κυβερνήσεις συνειδητοποιούσαν τους κινδύνους διαρροής ραδιενεργών αποβλήτων στο θαλάσσιο περιβάλλον και στο υπέδαφος, κατέστη σαφές ότι έπρεπε να τεθούν σε εφαρμογή αυστηρότερες και ασφαλέστερες πολιτικές διάθεσης. Το 1957, ιδρύθηκε ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ) από 12 χώρες, με σκοπό την εποπτεία και τη θέσπιση διεθνών κανόνων ασφαλείας στην πυρηνική τεχνολογία.

Την ίδια χρονιά, η Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας των Η.Π.Α. ανέθεσε στην Ακαδημία Επιστημών των Η.Π.Α. (National Academy of Sciences - NAS) μια κρίσιμη μελέτη: τη διερεύνηση και πρόταση μεθόδων ασφαλούς τελικής διάθεσης πυρηνικών αποβλήτων. Με βάση τα επιστημονικά και τεχνικά δεδομένα της εποχής, η NAS κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η βαθιά γεωλογική διάθεση (deep geological disposal) ήταν η πλέον ενδεδειγμένη και ασφαλής μέθοδος για την απόρριψη μακρόβιων ραδιενεργών αποβλήτων υψηλής επικινδυνότητας (HLW).

Εξέλιξη Τεχνολογικών Προσεγγίσεων

Το συμπέρασμα της Εθνικής Ακαδημίας Επιστημών των Η.Π.Α. (National Academy of Sciences – NAS), ότι η βαθιά γεωλογική απόθεση αποτελεί την πιο ενδεδειγμένη μέθοδο για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων υψηλής επικινδυνότητας (HLW), επανεπιβεβαιώθηκε και σε επόμενες μελέτες της (NAS, 1957· Blue Ribbon Commission, 2012). Η θέση αυτή υιοθετήθηκε σταδιακά και από τις ρυθμιστικές αρχές πολλών κρατών με ανεπτυγμένα πυρηνικά προγράμματα.

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1960, οι ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη τεχνολογιών που διασφαλίζουν την απομόνωση των ραδιενεργών καταλοίπων από τη βιόσφαιρα. Οι προσεγγίσεις αυτές έλαβαν υπόψη τόσο τις τεχνολογικές δυνατότητες όσο και τους φυσικούς πόρους κάθε περιοχής (ΙΑΕΑ, 2003). Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκαν τεχνικές όπως η ενσωμάτωση ραδιενεργών αποβλήτων σε σταθερές μήτρες, με τη μορφή υαλοποίησης ή τη χρήση ειδικών κεραμικών και τσιμεντοειδών υλικών, που προσφέρουν μακροχρόνια χημική σταθερότητα και μηχανική αντοχή (OECD/NEA, 2018).

Η τελική διάθεση των στερεοποιημένων αυτών υλικών προτείνεται να γίνεται σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς, όπως έρημες περιοχές, παλιά μεταλλεία ουρανίου ή βαθιά γεωτρημένα φρέατα, ώστε να διασφαλίζεται η μακροχρόνια απομόνωσή τους από τον ανθρώπινο πληθυσμό και τα οικοσυστήματα (ΙΑΕΑ, 2006).

Μη Εφαρμόσιμες και Απαγορευμένες Τεχνικές Διάθεσης Πυρηνικών Αποβλήτων

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές διάθεσης πυρηνικών αποβλήτων, οι οποίες ωστόσο δεν προχώρησαν σε στάδιο υλοποίησης και παραμένουν ανενεργές. Ορισμένες από αυτές κρίθηκαν μη εφαρμόσιμες είτε λόγω του ιδιαίτερα υψηλού οικονομικού κόστους είτε εξαιτίας της τεχνολογικής αδυναμίας εφαρμογής τους σε ασφαλές επίπεδο (ΙΑΕΑ, 2003).

Σε αυτές συγκαταλέγονται η απόθεση σε γεωτρήσεις πολύ μεγάλου βάθους (Deep Borehole Disposal – DBD), η απόρριψη εντός τηγμένων πετρωμάτων και η μεταφορά αποβλήτων στο διαστημικό κενό με σκοπό την οριστική απομάκρυνσή τους από τον πλανήτη (OECD/NEA, 2018). Παρότι τέτοιες προσεγγίσεις φαίνεται θεωρητικά να παρέχουν οριστική λύση, κρίθηκαν υπερβολικά επικίνδυνες ή αδύναμες τεχνολογικά.

Άλλες τεχνικές, που εφαρμόστηκαν κατά τις πρώτες δεκαετίες της πυρηνικής τεχνολογίας (1950–1970), κυρίως για την απόθεση υγρών αποβλήτων, έχουν πλέον απαγορευτεί από το διεθνές δίκαιο, καθώς κρίθηκαν επιβλαβείς για τη βιόσφαιρα και τα οικοσυστήματα. Η πρακτική της απόθεσης στον θαλάσσιο πυθμένα (oceanic disposal) εγκαταλείφθηκε επίσημα το 1993 και σήμερα απαγορεύεται από τη Σύμβαση του Λονδίνου του 1972 για την πρόληψη της ρύπανσης των θαλασσών από απόβλητα (London Convention, 1972).

Αντίστοιχα, η πρόταση ταφής αποβλήτων στους πάγους της Ανταρκτικής απαγορεύθηκε προκαταβολικά μέσω της Συνθήκης της Ανταρκτικής (Antarctic Treaty), η οποία τέθηκε σε ισχύ στις 23 Ιουνίου 1961 και θεσπίζει αυστηρούς περιορισμούς σε κάθε ανθρώπινη παρέμβαση στο οικοσύστημα της περιοχής (UNEP, 2001).

Συστηματική εφαρμογή της υποθαλάσσιας απόρριψης (1946–1993)

Η υποθαλάσσια απόρριψη ραδιενεργών αποβλήτων εφαρμόστηκε συστηματικά από το 1946 έως το 1993, κυρίως από 13 χώρες με πυρηνική τεχνολογία, μεταξύ των οποίων οι Η.Π.Α., η Σοβιετική Ένωση, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ιαπωνία και άλλες ευρωπαϊκές και ασιατικές χώρες (IAEA, 1999· Nilsen et al., 1995). Οι περιοχές που επιλέγονταν για την απόθεση περιλάμβαναν ωκεάνιες ζώνες με αργιλώδη ιζήματα, απουσία σεισμικής δραστηριότητας, αδύναμα θαλάσσια ρεύματα και μικρή έως ανύπαρκτη ανθρώπινη παρουσία. Ενδεικτικά, εναποθέσεις πραγματοποιήθηκαν στον Αρκτικό Ωκεανό, στον Βόρειο Ατλαντικό και τον Βόρειο Ειρηνικό, κοντά στις ακτές της Ρωσίας, των Η.Π.Α., της Ιαπωνίας και της Νότιας Κορέας (UNEP, 2001).

Τα απόβλητα, κυρίως υγρά ή στερεά χαμηλής ραδιενέργειας (LLW), τοποθετούνταν σε μεταλλικά δοχεία, τα οποία συχνά ενσωματώνονταν σε μεγαλύτερα εμπορευματοκιβώτια πριν απορριφθούν. Η επικρατούσα τεχνική αντίληψη ήταν ότι η λάσπη του πυθμένα και η μάζα του θαλασσινού νερού θα περιόριζαν τη διασπορά της ακτινοβολίας, ενώ ακόμη και σε περίπτωση διάρρηξης των περιβλημάτων, η ραδιενέργεια θα παρέμενε εντός του ιζήματος και θα υφίστατο πυρηνική αποσύνθεση προτού φτάσει στο ευρύτερο θαλάσσιο περιβάλλον (IAEA, 2003). Επιπλέον, στον πυθμένα απορρίφθηκαν στελέχη αντιδραστήρων, φίλτρα, ρητίνες και άλλα τεχνικά εξαρτήματα, είτε επεξεργασμένα είτε σφραγισμένα με τσιμέντο ή πολυμερή.

Παρότι η πλειονότητα των αποβλήτων αφορούσε LLW, καταγράφηκαν και περιστατικά απόρριψης υλικών υψηλής ραδιενέργειας (HLW), ιδίως μετά από ατυχήματα πυρηνικών υποβρυχίων ή συνειδητή καταβύθιση αντιδραστήρων με υπολειπόμενο καύσιμο, κυρίως από τη Σοβιετική Ένωση τις δεκαετίες του 1950 έως 1980 (Bellona Foundation, 1996). Η IAEA υπολογίζει ότι κατά την περίοδο 1946–1993 απορρίφθηκαν συνολικά πάνω από 900.000 m³ αποβλήτων, με συνολική εκτιμώμενη ραδιενέργεια άνω των 85.000 TBq, αν και τα στοιχεία είναι ατελή, αφού ορισμένα κράτη δεν παρείχαν πλήρη δεδομένα (IAEA, 1999).

Παρά τα αρχικά τεχνικά επιχειρήματα, η ωκεάνια απόρριψη αποδείχθηκε προβληματική. Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου ήταν η αδυναμία ανάκτησης των

απορριπτόμενων υλικών, λόγω του βάθους, της τεχνολογικής δυσκολίας και του κόστους, σε συνδυασμό με την αβεβαιότητα για τις μακροπρόθεσμες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ως αποτέλεσμα, η πρακτική αυτή εγκαταλείφθηκε οριστικά με τη Σύμβαση του Λονδίνου (1972) και απαγορεύτηκε πλήρως το 1993 μέσω διεθνών συνθηκών προστασίας των θαλάσσιων οικοσυστημάτων (London Convention, 1993· UNEP, 2001).

➤ **Εφαρμοζόμενες Τεχνικές Προεπεξεργασίας και Επεξεργασίας Πυρηνικών Αποβλήτων**

Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ), καθώς και το ρυθμιστικό πλαίσιο κάθε κράτους, οι τεχνικές για την ασφαλή διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων κατατάσσονται σε δύο κύριες κατηγορίες: την προεπεξεργασία και την επεξεργασία. Οι διαδικασίες αυτές αποσκοπούν στη σταθεροποίηση, την απομόνωση και την ασφαλή συσκευασία των αποβλήτων, ενώ παράλληλα επιδιώκουν — όπου αυτό είναι δυνατό — τη μείωση του όγκου, της θερμικής ισχύος και της ραδιοτοξικότητας των καταλοίπων, με παράλληλη διατήρηση του κόστους σε αποδεκτά επίπεδα (ΙΑΕΑ, 2006· Ewing, 2015).

Μία χαρακτηριστική μέθοδος επεξεργασίας αποτελεί η υποβρύχια ψύξη του αναλωμένου καυσίμου σε δεξαμενές νερού για χρονικό διάστημα τουλάχιστον ενός έτους. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται παγκοσμίως στους πυρηνικούς αντιδραστήρες δεύτερης και τρίτης γενιάς, με την ύπαρξη υποδομών προσωρινής αποθήκευσης πλησίον του αντιδραστήρα. Η υποβρύχια αποθήκευση θεωρείται ασφαλής και έχει αξιολογηθεί θετικά μετά από εμπειρία άνω των 60 ετών. Η ελεγχόμενη ψύξη των ράβδων καυσίμου επιτρέπει τη σταδιακή απαγωγή θερμότητας και τη ραδιολογική αποφόρτιση μέσω της μεταστοιχείωσης βραχύβιων προϊόντων σχάσης και ακτινιδών (World Nuclear Association, 2023).

Η διαδικασία μεταφοράς του καυσίμου από τον αντιδραστήρα προς τη δεξαμενή ψύξης πραγματοποιείται μέσω απομακρυσμένου χειρισμού, με χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού που προστατεύει το προσωπικό από ακτινοβολία. Οι δεξαμενές κατασκευάζονται από σκυρόδεμα μεγάλου πάχους και φέρουν επένδυση από ανοξείδωτο χάλυβα, προσφέροντας διπλή θωράκιση. Συνήθως, κάθε 12–24 μήνες, αντικαθίσταται το 20–30% των ράβδων καυσίμου, στο πλαίσιο ενός κύκλου ανανέωσης. Το αποσυρόμενο καύσιμο τοποθετείται σε ειδικές μεταλλικές σχάρες στο πυθμένα δεξαμενών βάθους άνω των 12 μέτρων, οι οποίες περιέχουν κράματα με βόριο, ένα ισχυρό απορροφητικό νετρονίων που ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο επανακρισιμότητας (DOE, 2020).

Η διάταξη των ράβδων εντός των δεξαμενών μεταβάλλεται ανάλογα με την παραγόμενη θερμότητα, ώστε να επιτυγχάνεται ομοιογενής ψύξη. Με την πάροδο του χρόνου, η θερμική και ραδιενεργός ένταση των ράβδων μειώνεται σημαντικά, λόγω της φυσικής αποσύνθεσης των εντατικά ραδιενεργών ισοτόπων. Το νερό των δεξαμενών ανακυκλώνεται συνεχώς, διατηρώντας τη θερμοκρασία κάτω από τους 50°C, ενώ σύγχρονα αυτόματα συστήματα παρακολούθησης επιτηρούν τυχόν διαρροές ραδιενέργειας.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, λειτουργούν τέτοιες εγκαταστάσεις και εκτός πυρηνικών σταθμών, παρέχοντας δυνατότητα μακροπρόθεσμης προσωρινής αποθήκευσης — διάρκειας δεκαετιών — για αναλωμένα πυρηνικά καύσιμα, συνήθως σε γεωγραφικά απομονωμένες περιοχές, μακριά από πυκνοκατοικημένες ζώνες (GAO, 2021).



Εικόνα 25: Κεντρική Εγκατάσταση Ενδιάμεσης Αποθήκευσης σε δεξαμενή νερού, αναλωμένου καυσίμου (CLAB), Σουηδία. (πηγή: World Nuclear Association).

➤ Στερεοποίηση Ραδιενεργών Υλικών: Τεχνικές SYNROC, DUCRETE και Υαλοποίηση

Η στερεοποίηση αποτελεί κρίσιμο στάδιο επεξεργασίας ραδιενεργών αποβλήτων, καθώς εξασφαλίζει σταθεροποίηση, απομόνωση και περιορισμό διαρροών. Ανάμεσα στις πιο σημαντικές τεχνικές περιλαμβάνονται το SYNROC, το DUCRETE και η υαλοποίηση.

SYNROC (SYNthetic ROCK)

Το SYNROC αναπτύχθηκε στην Αυστραλία το 1978 για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας (HLW) (Ringwood et al., 1979). Βασίζεται σε ορυκτά όπως το ρουτίλιο (TiO_2), ο περοβσκίτης και ο ζirkονόλιθος, που αναμειγνύονται με απόβλητα, θερμαίνονται ($\sim 750^\circ\text{C}$) και συμπιέζονται ισοστατικά (HIP) στους $1150\text{--}1280^\circ\text{C}$ και 150 MPa , παράγοντας κεραμικό υλικό μεγάλης χημικής και δομικής σταθερότητας (IAEA, 2018). Τα ραδιονουκλεΐδια ενσωματώνονται στο κρυσταλλικό πλέγμα, περιορίζοντας σημαντικά τη διαρροή ακόμη και πτητικών ισοτόπων όπως ^{129}I και ^{99}Tc . Η τεχνική ανταγωνίζεται εμπορικά τη μέθοδο υαλοποίησης, ιδίως μετά το 2010 (ANSTO, 2015).

DUCRETE

Το DUCRETE αποτελεί ειδικό σκυρόδεμα με θρυμματισμένο απεμπλουτισμένο ουράνιο (DUO_2), αντί για κοινό αδρανές υλικό, παρέχοντας θωράκιση έναντι γ-ακτινοβολίας και νετρονίων (US NRC, 2012). Παρόλο που χρησιμοποιείται πειραματικά ως περίβλημα κάνιστρων HLW, η εφαρμογή του είναι περιορισμένη λόγω ανησυχιών για τη μακροχρόνια σταθερότητά του, ρυθμιστικών περιορισμών και υψηλού κόστους παραγωγής (DOE, 2005).

Υαλοποίηση (Vitrification)

Η υαλοποίηση είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική για HLW, με εφαρμογές από τη δεκαετία του 1970 σε χώρες όπως Η.Π.Α., Ιαπωνία και Ρωσία (ΙΑΕΑ, 2006). Περιλαμβάνει αφύγρανση αποβλήτων (calcination), ανάμιξή τους με βοριοπυριτικό γυαλί και τήξη στους ~1200°C σε κλιβάνους Joule, δημιουργώντας ομοιογενές υαλώδες υλικό που σφραγίζεται σε ανοξείδωτα κάνιστρα (EPA, 2011). Το τελικό προϊόν παρουσιάζει υψηλή αντοχή στη διάβρωση, χημική σταθερότητα και αποτελεσματική απομόνωση ραδιονουκλιδίων. Αν και κοστοβόρα, η υαλοποίηση θεωρείται η πιο αξιόπιστη τεχνολογία για μακροχρόνια διαχείριση HLW (US EPA, 2011).

Οι τεχνικές αυτές αποτελούν τον πυρήνα της σύγχρονης στρατηγικής διαχείρισης ραδιενεργών καταλοίπων, διασφαλίζοντας υψηλά επίπεδα ασφάλειας και περιβαλλοντικής προστασίας.

➤ Αποθήκευση Ραδιενεργών Αποβλήτων σε Συσκευασίες Ξηρού Τύπου (Dry Cask Storage)

Η αποθήκευση αναλωμένου πυρηνικού καυσίμου (SNF) σε συσκευασίες ξηρού τύπου αποτελεί ευρέως διαδεδομένη τεχνική ενδιάμεσης διαχείρισης αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας (HLW), κυρίως μετά από ετήσια ψύξη σε υδάτινες δεξαμενές (ΙΑΕΑ, 2018). Εφαρμόζεται από τη δεκαετία του 1980 σε χώρες όπως οι Η.Π.Α., Ιαπωνία, Ρωσία και κράτη της Ε.Ε., με διαφοροποιήσεις ανάλογα με το κανονιστικό πλαίσιο και τις γεωγραφικές συνθήκες (US NRC, 2020).

Η μέθοδος βασίζεται στη χρήση μεταλλικών δοχείων (συνήθως ανοξείδωτου χάλυβα) γεμισμένων με ράβδους SNF, υπό αδρανή ατμόσφαιρα (ήλιο ή αργό), ώστε να αποτρέπονται χημικές αντιδράσεις και διαρροές πτητικών ραδιονουκλιδίων. Τα δοχεία αυτά σφραγίζονται ερμητικά ή μηχανικά, φέρουν συνήθως διπλό περίβλημα και εξωτερική θωράκιση από σκυρόδεμα ειδικής σύνθεσης για την απορρόφηση γ-ακτινοβολίας και νετρονίων (NEA, 2016).

Η αποθήκευση πραγματοποιείται είτε σε υπαίθριες εγκαταστάσεις είτε σε θωρακισμένα υπόγεια κελιά με παθητική ψύξη μέσω φυσικής κυκλοφορίας αέρα. Σύμφωνα με τον κανονισμό του US NRC (2008), η ξηρή αποθήκευση μπορεί να γίνει μόνο μετά από τουλάχιστον πέντε έτη υδάτινης ψύξης, ενώ τα δοχεία πρέπει να πληρούν αυστηρές απαιτήσεις ανθεκτικότητας σε φυσικές καταστροφές και κακόβουλες ενέργειες (US NRC, 2020).

Το 2023, οι Η.Π.Α. διέθεταν 81 εγκαταστάσεις ξηρής αποθήκευσης σε 37 πολιτείες, κυρίως εντός ή πλησίον πυρηνικών σταθμών. Τα βαρέλια παρέχονται από πιστοποιημένες ιδιωτικές εταιρείες και ορισμένοι τύποι είναι κατάλληλοι τόσο για αποθήκευση όσο και για μεταφορά (ΙΑΕΑ, 2016).

Η μέθοδος θεωρείται ασφαλής και προσωρινή, ενόψει της απουσίας μόνιμων γεωλογικών αποθετηρίων. Οι εθνικές αρχές διεξάγουν τακτικούς ελέγχους για τη διασφάλιση ακτινοπροστασίας, καθώς και της δομικής ακεραιότητας των υλικών. Μακροχρόνιες αξιολογήσεις δείχνουν ότι τα συστήματα ξηρής αποθήκευσης διατηρούν τη σταθερότητά τους για τουλάχιστον 40 έτη, ενώ η συνολική διάρκεια

χρήσης εκτιμάται πως μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις (IAEA, 2018; NEA, 2016)



Εικόνα 26: Βαρέλια ξηράς αποθήκευσης ράβδων αναλωμένου καυσίμου

➤ Τεχνικές Επανεπεξεργασίας Αναλωμένου Πυρηνικού Καυσίμου

Η επανεπεξεργασία του αναλωμένου καυσίμου επιδιώκει την ανάκτηση χρήσιμων ραδιενεργών υλικών, κυρίως Πλουτωνίου και Ουρανίου, για επαναχρησιμοποίηση είτε ως καύσιμο (MOX fuel) είτε σε στρατιωτικές εφαρμογές (World Nuclear Association, 2022). Η πλέον διαδεδομένη βιομηχανική μέθοδος είναι η PUREX (Plutonium Uranium Redox EXtraction), που διαχωρίζει εκλεκτικά τα χρήσιμα υλικά από τα τοξικά προϊόντα σχάσης και τις ακτινίδες (IAEA, 2018).

Αυτή η προσέγγιση εντάσσεται σε μια κυκλική στρατηγική διαχείρισης, μειώνοντας τον όγκο και τη ραδιοτοξικότητα των τελικών αποβλήτων (OECD/NEA, 2019). Η τεχνολογία επανεπεξεργασίας συμβάλλει στην περιβαλλοντική προστασία, περιορίζοντας την ανάγκη για τελική διάθεση μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων υψηλής επικινδυνότητας

➤ Τεχνικές Μακροχρόνιας Διάθεσης ή Τελικής Αποθήκευσης

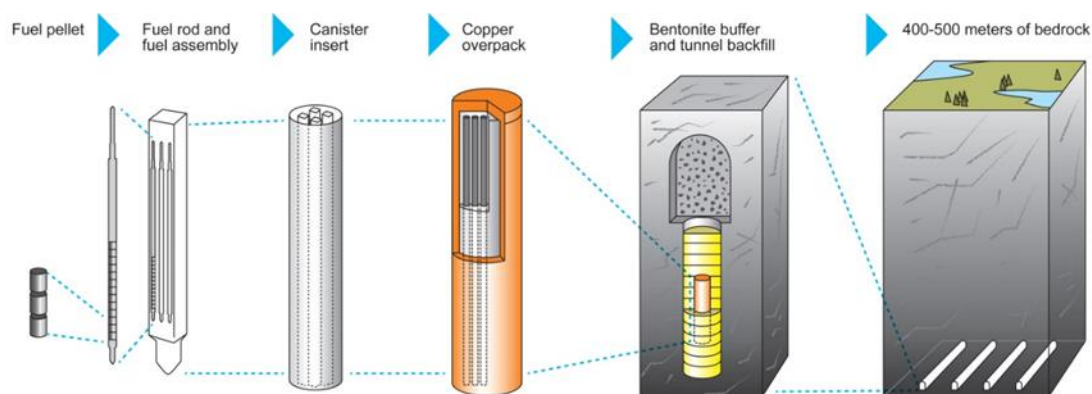
Ανάλογα με το αν προβλέπεται η ανάκτηση των αποβλήτων, διακρίνουμε δύο βασικές προσεγγίσεις: μακροχρόνια διάθεση (long-term storage) και τελική αποθήκευση (final disposal) (European Commission, 2021).

Επιφανειακή ή ρηχή αποθήκευση

Εφαρμόζεται κυρίως για χαμηλής επικινδυνότητας απόβλητα (LLW/ILW), αλλά και για προσωρινή αποθήκευση HLW. Περιλαμβάνει εγκαταστάσεις από οπλισμένο σκυρόδεμα, εντός ή κοντά σε πυρηνικές μονάδες (US NRC, 2020). Οι ράβδοι καυσίμου συχνά παραμένουν επί σειρά ετών σε δεξαμενές ύδατος ή τοποθετούνται σε ξηρές συσκευασίες τύπου dry cask, με δυνατότητα μελλοντικής επανεπεξεργασίας.

Υπόγεια γεωλογική διάθεση

Αποτελεί την πιο αποδεκτή διεθνώς λύση για μακρόβια ραδιενεργά απόβλητα (HLW, SNF). Περιλαμβάνει πολυστρωματικά φράγματα: στερεοποιημένα απόβλητα, κάνιστρα χαλκού/χάλυβα, σκυρόδεμα, και τελικά, γεωλογικά φράγματα όπως γρανίτης ή αργιλικά πετρώματα (NEA, 2017). Οι εγκαταστάσεις σχεδιάζονται για χιλιάδες έτη ασφάλειας, με παραδείγματα όπως το Onkalo (Φινλανδία) και το WIPP (ΗΠΑ).



Εικόνα 27: Τυπική αναπαράσταση διαδικασίας τελικής διάθεσης πολλαπλών φραγμών, για αναλωμένο καύσιμο.

4.3. Ανακύκλωση καυσίμων.

Η επανεπεξεργασία του αναλωμένου πυρηνικού καυσίμου συνιστά θεμελιώδη τεχνολογική επιλογή για το κλείσιμο του κύκλου του καυσίμου, καθώς επιτρέπει την ανάκτηση σχάσιμων υλικών –κυρίως ουρανίου και πλουτωνίου– που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν είτε ως νέο καύσιμο (π.χ. σε μορφή MOX) είτε για άλλες τεχνικές ή και στρατιωτικές εφαρμογές (Choppin et al., 2013· World Nuclear Association, 2023). Η πρακτική αυτή καθιστά εφικτή την κυκλική αξιοποίηση του ενεργειακού δυναμικού των ραδιενεργών υλικών, μειώνοντας ταυτόχρονα τον συνολικό όγκο και τη ραδιοτοξικότητα των αποβλήτων μακροχρόνιας επικινδυνότητας. Ιστορικά, η επανεπεξεργασία ξεκίνησε κατά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο στις Ηνωμένες Πολιτείες, με στόχο την απομόνωση του ^{239}Pu για στρατιωτική χρήση σε ατομικά όπλα. Από τη δεκαετία του 1950 και έπειτα, με την εμφάνιση εμπορικών αντιδραστήρων, η τεχνολογία αυτή απέκτησε και ειρηνικό προσανατολισμό, καθώς το αναλωμένο καύσιμο αντιμετωπίστηκε ως πηγή πολύτιμων σχάσιμων υλικών που θα μπορούσαν να τροφοδοτήσουν εκ νέου την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (IAEA, 2018).

Τεχνικές διαχωρισμού υλικών.

Η επανεπεξεργασία του αναλωμένου πυρηνικού καυσίμου στηρίζεται στην εφαρμογή προηγμένων χημικών τεχνικών διαχωρισμού, με σκοπό την απομόνωση του ουρανίου και του σχάσιμου πλουτωνίου (^{239}Pu) από τα υπόλοιπα ραδιονουκλίδια που προκύπτουν από τη διαδικασία της καύσης, όπως τα προϊόντα σχάσης και τα ισότοπα των ακτινιδών (NEA, 2023). Στην πράξη, η τελική σύνθεση του καυσίμου επηρεάζεται από παράγοντες όπως ο χρόνος παραμονής στον αντιδραστήρα, ο τρόπος λειτουργίας του και ο αρχικός εμπλουτισμός σε ^{235}U (IAEA, 2018). Κατά την καύση, σημαντικό ποσοστό του ^{235}U υφίσταται σχάση, ενώ το ^{238}U μεταστοιχειώνεται διαδοχικά σε ^{239}Pu , το οποίο είτε υποβάλλεται σε σχάση είτε μετατρέπεται σε μη σχάσιμο ^{240}Pu (OECD, 2021). Το αναλωμένο καύσιμο παρουσιάζει, κατά την απόσυρση, κατά μέσο όρο 95–96% ουράνιο (εκ των οποίων το μεγαλύτερο μέρος είναι ^{238}U), 0,9–1% πλουτώνιο και 3–3,5% προϊόντα σχάσης, με πολύ μικρότερα ποσοστά υπερουρανικών στοιχείων (World Nuclear Association, 2022). Η ποιότητα του παραγόμενου πλουτωνίου καθορίζει τη μελλοντική του χρήση: αν το ποσοστό του ^{239}Pu είναι $\geq 93\%$, θεωρείται «οπλικής ποιότητας», ενώ χαμηλότερες αναλογίες το καθιστούν κατάλληλο μόνο για καύσιμα αντιδραστήρων. Οι χώρες με προηγμένα προγράμματα διαχείρισης αποβλήτων είτε διαθέτουν εγκαταστάσεις επανεπεξεργασίας (όπως η Γαλλία, το

Ηνωμένο Βασίλειο και η Ρωσία), είτε αποστέλλουν το καύσιμο για εξωτερική επεξεργασία (NEA, 2023). Παράλληλα, η χρήση τεχνικών όπως η PUREX καθιστά εφικτή την ανάκτηση γόνιμου υλικού και τη μείωση της ραδιοτοξικότητας των αποβλήτων, στοιχείο-κλειδί για τη βιώσιμη διαχείριση του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου (ΙΑΕΑ, 2018).

Οι υδρομεταλλουργικές τεχνικές έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές και οικονομικά βιώσιμες για τον διαχωρισμό και την ανάκτηση χρήσιμων ραδιονουκλιδίων από το αναλωμένο πυρηνικό καύσιμο. Μέσω υγρής εξαγωγής, επιτυγχάνεται υψηλός βαθμός καθαρισμού του ουρανίου και του πλουτωνίου από τα υπόλοιπα ραδιενεργά κατάλοιπα (ΙΑΕΑ, 2018). Το εξαγόμενο πλουτώνιο αποθηκεύεται σε μορφή οξειδίου (PuO_2), το οποίο μπορεί να αναμιχθεί με απεμπλουτισμένο ουράνιο για την παραγωγή μεικτού καυσίμου MOX (Mixed Oxide Fuel). Παράλληλα, το επεξεργασμένο ουράνιο (RepU) δύναται να αξιοποιηθεί στο μέλλον ως «στρατηγικό καύσιμο αποθεματικού χαρακτήρα», υπό την προϋπόθεση οικονομικής βιωσιμότητας —ιδίως σε περιόδους αύξησης των τιμών του φυσικού ουρανίου (NEA, 2023).

Ωστόσο, λόγω της ισοτοπικής του σύνθεσης μετά την καύση (περιεκτικότητα σε ανεπιθύμητα ισότοπα όπως το ^{236}U), απαιτείται σημαντικός επανεμπλουτισμός ώστε να επαναχρησιμοποιηθεί. Στην πράξη, η εμπορική επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου ουρανίου παραμένει περιορισμένη. Χαρακτηριστική είναι η ιστορική εφαρμογή της στο Ηνωμένο Βασίλειο με αντιδραστήρες τύπου Magnox, όπου μόνο μικρές ποσότητες MOX χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία (World Nuclear Association, 2022).

Σήμερα, η ανακύκλωση καυσίμου παραμένει επικεντρωμένη στον διαχωρισμό του σχάσιμου πλουτωνίου και του ουρανίου από τα μη επαναχρησιμοποιήσιμα προϊόντα σχάσης και τις θυγατρικές ακτινίδες. Παρά την τεχνική ωριμότητα των μεθόδων, η πλήρης ανακύκλωση του καυσίμου περιορίζεται από παράγοντες κόστους, τεχνολογικής πολυπλοκότητας και πολιτικής αποδοχής (OECD, 2021).

Η Μέθοδος PUREX και Σύγχρονες Τεχνολογίες Ανακύκλωσης Πυρηνικού Καυσίμου

Η μέθοδος PUREX (Plutonium and Uranium Recovery by EXtraction) αποτελεί τη βασική τεχνική υδρομεταλλουργικής επανεπεξεργασίας αναλωμένου πυρηνικού καυσίμου. Πρόκειται για μια διαδικασία δύο σταδίων: αρχικά, οι ράβδοι καυσίμου τεμαχίζονται και διαλύονται σε νιτρικό οξύ, με στόχο τη διαχωριστική εκχύλιση ουρανίου και πλουτωνίου από τα υπόλοιπα ραδιενεργά ισότοπα (ΙΑΕΑ, 2018). Στη συνέχεια, το πλουτώνιο διαχωρίζεται από το ουράνιο μέσω περαιτέρω χημικών επεξεργασιών.

Πολλές χώρες αναπτύσσουν εναλλακτικές ή βελτιωμένες παραλλαγές της μεθόδου PUREX, όπως οι UREX, COEX, DIEX και SUNEX, οι οποίες στοχεύουν στον ταυτόχρονο διαχωρισμό πολλαπλών ακτινιδών και στη μείωση της ραδιενεργού επικινδυνότητας των αποβλήτων. Οι τεχνολογίες αυτές αποσκοπούν στη μείωση της δυνατότητας στρατιωτικής χρήσης των διαχωρισμένων υλικών και στην ενίσχυση της περιβαλλοντικής ασφάλειας (OECD, 2021).

Η ανακύκλωση του καυσίμου μέσω της επανεπεξεργασίας έχει πολλαπλά οφέλη. Μειώνει σημαντικά την ποσότητα και την επικινδυνότητα των αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας (HLW) που απαιτούν τελική αποθήκευση. Παράλληλα, αυξάνει την ενεργειακή απόδοση των πυρηνικών σταθμών, καθώς επιτρέπει την ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση του σχάσιμου πλουτωνίου (^{239}Pu), αποδίδοντας επιπλέον 25–

30% ενέργεια από την ίδια αρχική ποσότητα ουρανίου (NEA, 2022). Η διαδικασία αυτή συμβάλλει επίσης στη μείωση των απαιτήσεων για εξόρυξη φυσικού ουρανίου, έως και κατά 30%.

Μέχρι σήμερα, περίπου 30% του αναλωμένου καυσίμου από αντιδραστήρες έχει επανεπεξεργαστεί παγκοσμίως, ενώ η παγκόσμια δυναμικότητα αγγίζει τους 3.860 τόνους ετησίως. Η λειτουργία της εγκατάστασης Rokkasho-Mura στην Ιαπωνία προβλέπεται να ενισχύσει περαιτέρω αυτή τη δυνατότητα (WNA, 2023).

Παράλληλα, η τεχνολογία PUREX και οι παραλλαγές της μειώνουν τον χρονικό ορίζοντα επικινδυνότητας των αποβλήτων. Ένα ανακυκλωμένο καύσιμο φτάνει σε επίπεδα ραδιενέργειας αντίστοιχα με του φυσικού ουρανίου μέσα σε 9.000 χρόνια, έναντι των >300.000 ετών για τα μη ανακυκλωμένα κατάλοιπα.

Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματα, η επανεπεξεργασία δεν εξαλείφει την ανάγκη για ασφαλή τελική διάθεση των μη επαναχρησιμοποιήσιμων υπολειμμάτων, τα οποία συνεχίζουν να απαιτούν μακροχρόνιο σχεδιασμό διαχείρισης.

Οικονομικά και τεχνικά εμπόδια στην υιοθέτηση της ανακύκλωσης πυρηνικού καυσίμου

Παρά τα σημαντικά τεχνολογικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα της επανεπεξεργασίας και της ανακύκλωσης πυρηνικού καυσίμου, η ευρύτερη εφαρμογή τους παρεμποδίζεται από ουσιαστικά οικονομικά και τεχνικά εμπόδια. Η εγκατάσταση και λειτουργία μονάδων επεξεργασίας απαιτεί υψηλό αρχικό κεφάλαιο και εξειδικευμένη τεχνογνωσία, ενώ οι ίδιες οι διαδικασίες είναι σύνθετες και αυξάνουν το τελικό κόστος του παραγόμενου καυσίμου MOX ή επανεμπλουτισμένου ουρανίου (NEA, 2022). Συγκριτικά με τον ανοικτό κύκλο καυσίμου —όπου το φυσικό ουράνιο χρησιμοποιείται χωρίς επανεπεξεργασία και το αναλωμένο καύσιμο απορρίπτεται ως απόβλητο— η επιλογή της ανακύκλωσης εμφανίζεται οικονομικά λιγότερο συμφέρουσα, ιδίως σε χώρες όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, που έχουν επιλέξει την οδό της απευθείας τελικής απόθεσης (WNA, 2023). Ωστόσο, οι συνεχιζόμενες τεχνολογικές εξελίξεις στους τομείς του χημικού διαχωρισμού, της ραδιοϊσοτοπικής αξιοποίησης και της επανεπεξεργασίας μειώνουν σταδιακά το σχετικό κόστος, καθιστώντας τη στρατηγική της ανακύκλωσης περισσότερο ανταγωνιστική και ελκυστική σε μεσοπρόθεσμο ορίζοντα (OECD, 2021).

Ζητήματα διάδοσης πυρηνικών όπλων και ανακύκλωση καυσίμου

Η ανακύκλωση πυρηνικού καυσίμου ενέχει τον κίνδυνο διάδοσης πυρηνικών όπλων, καθώς το ανακτημένο ^{239}Pu μπορεί να αξιοποιηθεί στρατιωτικά (World Nuclear Association, 2022). Η πρόωρη απόσυρση καυσίμου αυξάνει την περιεκτικότητα σε σχάσιμο πλουτώνιο, αλλά απαιτεί επανεκκίνηση του αντιδραστήρα, κάτι που παρακολουθείται στενά από τους διεθνείς ελεγκτικούς μηχανισμούς (IAEA, 2018).

Η επανεπεξεργασία, αρχικά στρατιωτική πρακτική κατά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, χρησιμοποιείται σήμερα και για παραγωγή ενέργειας (Schneider & Froggatt, 2021). Τεχνικές όπως η PUREX επιτρέπουν την απομόνωση ουρανίου και πλουτωνίου για παραγωγή MOX ή στρατηγική αποθήκευση (OECD-NEA, 2012). Παράλληλα, νέες παραλλαγές όπως οι UREX και COEX στοχεύουν στη μείωση της ραδιενεργού επικινδυνότητας των αποβλήτων (IAEA, 2020).

Η τελική σύσταση του καυσίμου εξαρτάται από τον χρόνο καύσης. Με την πάροδο του χρόνου αυξάνονται τα μη σχάσιμα ισότοπα όπως το ^{240}Pu , περιορίζοντας τη

χρησιμότητά του για όπλα (Choppin et al., 2013). Το αναλωμένο καύσιμο περιέχει 95% ουράνιο, 1% πλουτώνιο και 3–4% προϊόντα σχάσης.

Παρά τα ενεργειακά και περιβαλλοντικά οφέλη, το υψηλό κόστος και οι γεωπολιτικοί κίνδυνοι καθιστούν την απευθείας ταφή πιο ελκυστική για χώρες όπως οι ΗΠΑ (Schneider & Froggatt, 2021). Οι αντιδραστήρες 4ης γενιάς αναμένεται να επιτρέψουν τη μεταστοιχείωση μακρόβιων ισοτόπων, βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση και περιορίζοντας τη μακροπρόθεσμη ραδιενέργεια (OECD-NEA, 2021).

4.4. Εναλλακτικές πηγές ενέργειας και πράσινες τεχνολογίες.

Πυρηνική Ενέργεια και Πράσινη Μετάβαση: Θεσμικό Πλαίσιο και Πολιτικές Εξελίξεις

Η *Συνθήκη των Παρισίων* του 2015, που υπεγράφη από 196 χώρες, θέτει ως στόχο τον περιορισμό της παγκόσμιας υπερθέρμανσης μέσω της μετάβασης σε ενεργειακές πηγές χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έως το 2050 (UNFCCC, 2015). Παρά τις διεθνείς προσπάθειες, μέχρι το 2021, τα ορυκτά καύσιμα εξακολουθούσαν να καλύπτουν τα 2/3 της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας, ενώ ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) τονίζει την ανάγκη αντιστροφής αυτής της αναλογίας μέσα στις επόμενες δεκαετίες (IEA, 2021).

Στο πλαίσιο αυτό, η πυρηνική ενέργεια επανέρχεται στο προσκήνιο ως βασικό εργαλείο της πράσινης μετάβασης. Στις 21 Νοεμβρίου 2023, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο αναγνώρισε επίσημα την πυρηνική ενέργεια ως «χαμηλών εκπομπών» πηγή, εντάσσοντάς την στον κατάλογο των πράσινων τεχνολογιών που υποστηρίζουν τη στρατηγική της Ε.Ε. για απανθρακοποίηση (European Parliament, 2023). Η απόφαση αυτή, αν και τεχνικού χαρακτήρα, αποτελεί πολιτική στροφή, δίνοντας έμφαση στον ρόλο της πυρηνικής ενέργειας στην ενεργειακή αυτονομία της Ένωσης.

Η πυρηνική ενέργεια αντιμετωπίζεται ως μεταβατική μορφή ενέργειας: δεν είναι πλήρως ανανεώσιμη, αλλά θεωρείται απαραίτητη για τη διασφάλιση της επάρκειας ισχύος σε περιόδους μεγάλης ζήτησης και χαμηλής παραγωγής από ΑΠΕ, ειδικά σε συνθήκες γεωπολιτικής και οικονομικής αστάθειας. Παρ' όλα αυτά, η τελική ενσωμάτωσή της στα οικονομικά σχέδια στήριξης των πράσινων τεχνολογιών εναπόκειται στα κράτη-μέλη της Ε.Ε., καθώς απαιτείται έγκριση σε εθνικό επίπεδο (WNA, 2023).

Ανθρακικό Αποτύπωμα της Πυρηνικής Ενέργειας

Η πυρηνική ενέργεια θεωρείται τεχνολογία χαμηλών εκπομπών άνθρακα, καθώς η ίδια η διεργασία της σχάσης δεν παράγει αέρια του θερμοκηπίου· οι μόνες εκπομπές κατά τη λειτουργία ενός πυρηνικού αντιδραστήρα αφορούν υδρατμούς από την ψύξη, χωρίς ιδιαίτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (IEA, 2022). Οι εκπομπές CO₂ προκύπτουν κυρίως σε άλλα στάδια, όπως η εξόρυξη ουρανίου, η κατασκευή και η αποσυναρμολόγηση των μονάδων. Σύμφωνα με τη World Nuclear Association, οι μέσες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά γιγαβατώρα (GWh) ηλεκτρικής ενέργειας είναι 29 tn για την πυρηνική ενέργεια, έναντι 26 tn για την αιολική, 85 tn για την ηλιακή, 888 tn για τον λιθάνθρακα και 1054 tn για τον λιγνίτη, επιβεβαιώνοντας τη θέση της πυρηνικής ενέργειας ανάμεσα στις καθαρές τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα (WNA, 2023).

Συγκριτικά Πλεονεκτήματα και Προβληματισμοί για την Πυρηνική Ενέργεια στη Μετάβαση Χαμηλών Εκπομπών

Η πυρηνική ενέργεια διαθέτει σημαντικά τεχνικά, περιβαλλοντικά και λειτουργικά πλεονεκτήματα, καθιστώντας τη ανταγωνιστική στο ενεργειακό μείγμα χαμηλών εκπομπών. Πυρηνικά εργοστάσια λειτουργούν σταθερά 24/7, ανεξάρτητα από καιρικές συνθήκες, με δυνατότητα συνεχούς παραγωγής έως και 24 μήνες χωρίς αλλαγή καυσίμου (World Nuclear Association, 2023). Η ισχύς τους είναι ρυθμιζόμενη, γεγονός που τους επιτρέπει να καλύπτουν μεταβολές της ζήτησης σε συνδυασμό με ΑΠΕ (IAEA, 2022).

Η ενεργειακή πυκνότητα του ^{235}U είναι έως και 3 εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη από τα ορυκτά καύσιμα, προσφέροντας υψηλή απόδοση με ελάχιστη πρώτη ύλη και μικρότερο περιβαλλοντικό φορτίο (Department of Energy, USA, 2021). Επιπλέον, οι πυρηνικοί σταθμοί απαιτούν πολύ μικρότερη έκταση γης σε σχέση με την ηλιακή ή αιολική ενέργεια: για την ίδια ισχύ (1.000 MW), απαιτούν λιγότερα από 2 km², όταν οι ΑΠΕ χρειάζονται πολλαπλάσια εμβαδά (IEA, 2022; U.S. DOE, 2020).

Ωστόσο, η πυρηνική ενέργεια προκαλεί αντιδράσεις, ιδίως από περιβαλλοντικούς και επιστημονικούς φορείς. Τρεις βασικές ενστάσεις εγείρονται: (1) οι κίνδυνοι από πιθανά ατυχήματα (π.χ. Τσερνόμπιλ, Φουκουσίμα), (2) η αβεβαιότητα για τη μακροπρόθεσμη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων υψηλής τοξικότητας, και (3) οι περιορισμένες προμήθειες ουρανίου, οι οποίες συνεπάγονται γεωπολιτικές και οικονομικές εξαρτήσεις (Greenpeace, 2021; NEA-OECD, 2020). Τα παραπάνω μειονεκτήματα περιορίζουν την αποδοχή της ως πλήρως "πράσινης" και ανανεώσιμης μορφής ενέργειας στο πλαίσιο της βιώσιμης μετάβασης.

Ζητήματα ασφάλειας λειτουργίας των πυρηνικών εγκαταστάσεων

Η ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων αποτελεί έναν από τους πλέον κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν τη δημόσια αποδοχή και τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα της πυρηνικής ενέργειας ως πηγής χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Σημαντικά ατυχήματα, όπως εκείνα του Τσερνόμπιλ (1986) και της Φουκουσίμα (2011), κλόνισαν σε παγκόσμιο επίπεδο την εμπιστοσύνη στην τεχνολογία, καταδεικνύοντας ότι, ακόμη και σε συστήματα με πολλαπλά επίπεδα ασφαλείας, η πιθανότητα καταστροφικής αποτυχίας δεν μπορεί να αποκλειστεί πλήρως (IAEA, 2022).

Η απαγόρευση πρόσβασης στην περιοχή γύρω από το Τσερνόμπιλ, που παραμένει σε ισχύ επί δεκαετίες, και οι μακροπρόθεσμες συνέπειες της ραδιενεργού μόλυνσης στην Ιαπωνία μετά τη Φουκουσίμα, ενίσχυσαν την κοινωνική διστακτικότητα απέναντι στην εγκατάσταση νέων πυρηνικών σταθμών. Η αντίσταση αυτή εντείνεται ιδιαίτερα σε τοπικές κοινωνίες, οι οποίες ανησυχούν για τους πιθανούς κινδύνους για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον (Greenpeace, 2021). Ωστόσο, στο τεχνικό και ρυθμιστικό επίπεδο, η πυρηνική βιομηχανία έχει προβεί σε σημαντική ενίσχυση των προτύπων ασφαλείας, σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές διεθνών οργανισμών όπως η Διεθνής Υπηρεσία Ατομικής Ενέργειας (IAEA) και το Διεθνές Συμβούλιο Πυρηνικής Ασφάλειας (WANO, 2020).

Η σύγχρονη πυρηνική τεχνολογία ενσωματώνει εξελιγμένα επάλληλα συστήματα ασφαλείας, που καλύπτουν το σύνολο του κύκλου ζωής μιας εγκατάστασης —από την επιλογή της τοποθεσίας και την αδειοδότηση έως την κατασκευή, τη λειτουργία και την αποξήλωση. Παρότι η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών αυξάνει σημαντικά το κόστος κατασκευής και συντήρησης, εξασφαλίζει αυξημένη λειτουργική αξιοπιστία και μειώνει την πιθανότητα σοβαρού ατυχήματος (NEA-OECD, 2020).

Παρά τα μέτρα ασφαλείας, η ιστορική εμπειρία —με ατυχήματα, τεχνικές αστοχίες και ενίοτε ελλιπή εποπτεία— έχει επηρεάσει την επενδυτική εμπιστοσύνη, οδηγώντας σε καθυστερήσεις ή ακυρώσεις σχεδίων σε πολλές χώρες, ειδικά κατά τις δεκαετίες 1980–2000. Αυτή η επιφυλακτικότητα συνέβαλε στη μείωση του ποσοστού της πυρηνικής ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα από 17,5% το 2010 σε περίπου 9,2% το 2022 (IEA, 2023).

Ωστόσο, η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται εκθετικά λόγω της εξάπλωσης ενεργοβόρων τεχνολογιών, όπως η τεχνητή νοημοσύνη, η υπολογιστική υποδομή blockchain και η εξηλεκτρισμένη βιομηχανία, καθώς και της ταχείας ανάπτυξης και αστικοποίησης σε αναπτυσσόμενες περιοχές (π.χ. Υποσαχάρια Αφρική, ΝΑ Ασία) (World Bank, 2023). Οι ΑΠΕ, αν και απαραίτητο τμήμα της ενεργειακής μετάβασης, δεν είναι επαρκείς για να καλύψουν με αξιοπιστία τη συνολική ζήτηση. Παρά τις πολιτικές στήριξης, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εξακολουθούν να αντιπροσωπεύουν μόλις το 13% της παγκόσμιας ενεργειακής παραγωγής, με αισιόδοξες προβλέψεις για αύξηση στο 20% έως το 2030 (IEA, 2023).

Σε αυτό το πλαίσιο, η πυρηνική ενέργεια επανέρχεται δυναμικά στη διεθνή ενεργειακή στρατηγική, κυρίως ως αξιόπιστη επιλογή βάσης. Ένδειξη αυτής της μετανόησης αποτελεί η 28η Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (COP28), το 2023, κατά την οποία 22 χώρες, συμπεριλαμβανομένων των ΗΠΑ, του Καναδά, της Γαλλίας και του Ηνωμένου Βασιλείου, δεσμεύτηκαν να τριπλασιάσουν την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας έως το 2050 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2020, παράλληλα με την αυστηρή εφαρμογή διεθνών προτύπων ασφάλειας (UNFCCC, 2023).

Το πρόβλημα της ασφαλούς οριστικής διάθεσης των ραδιενεργών αποβλήτων

Ένα από τα σοβαρότερα και επιστημονικά αδιαμφισβήτητα μειονεκτήματα της πυρηνικής ενέργειας παραμένει η οριστική διάθεση των μακρόβιων και ιδιαίτερα τοξικών ραδιενεργών αποβλήτων. Πρόκειται για πρόβλημα που εξακολουθεί να επισκιάζει τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της πυρηνικής ενέργειας ως προς το χαμηλό κόστος καυσίμου και τις σχεδόν μηδενικές εκπομπές άνθρακα.

Διεθνείς περιβαλλοντικές οργανώσεις όπως η WWF και η Greenpeace, καθώς και εκατοντάδες επιστημονικοί και κρατικοί φορείς παγκοσμίως, επισημαίνουν ότι το πρόβλημα αυτό όχι μόνο παραμένει άλυτο, αλλά επιτείνεται διαχρονικά. Η εξάπλωση της χρήσης πυρηνικής ενέργειας, με την κατασκευή νέων αντιδραστήρων, καθώς και η αποξήλωση παλαιών εγκαταστάσεων, αυξάνουν τον συνολικό όγκο αποβλήτων μέσης και υψηλής ραδιενέργειας (ILW και HLW) που απαιτούν επεξεργασία και ασφαλή τελική διάθεση.

Μολονότι οριστική λύση δεν έχει ακόμη δοθεί, φαίνεται ότι στο άμεσο μέλλον η κλίμακα του προβλήματος μπορεί να περιοριστεί ουσιαστικά μέσω της συνδυασμένης εφαρμογής δύο στρατηγικών:

i) Αύξηση επενδύσεων σε σύγχρονες πυρηνικές εγκαταστάσεις με περιβαλλοντικά αυστηρά πρότυπα. Ενδεικτικά, το προσχέδιο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (2022) για την ένταξη των επενδύσεων σε πυρηνική ενέργεια στις «πράσινες» κατηγορίες απαιτεί: η οικοδομική άδεια να έχει εκδοθεί έως το 2045, να πληρούνται τα αναβαθμισμένα πρότυπα περιορισμένων εκπομπών CO₂ κατά την κατασκευή, και έως το 2050 να έχει κατατεθεί σχέδιο για μονάδα τελικής διάθεσης HLW αποβλήτων εντός ή κοντά στο εργοστάσιο.

ii) Παράλληλη επένδυση στην τεχνολογική καινοτομία στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας. Αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη αντιδραστήρων νέας γενιάς, τη χρήση καυσίμων με χαμηλότερο ραδιενεργό αποτύπωμα (όπως το θόριο), τη γενίκευση της ανακύκλωσης καυσίμων, τη βελτίωση τεχνικών διαχωρισμού και απομόνωσης των αποβλήτων, και την εμπορική αξιοποίηση της πυρηνικής σύντηξης.

Αν αυτοί οι δύο άξονες υλοποιηθούν αποτελεσματικά, τότε καθίσταται βάσιμη η εκτίμηση ότι η πυρηνική ενέργεια μπορεί μελλοντικά να εξελιχθεί σε μια ακόμη βασική συνιστώσα του ενεργειακού μείγματος χαμηλών εκπομπών, συμβάλλοντας ουσιαστικά τόσο στη μείωση των εκπομπών άνθρακα όσο και στη συρρίκνωση του ραδιενεργού αποτυπώματος και του όγκου των παραγόμενων καταλοίπων — το οποίο μέχρι σήμερα παραμένει το σημαντικότερο τεχνικό και περιβαλλοντικό της μειονέκτημα.

Πεπερασμένος χαρακτήρας των πυρηνικών καυσίμων και προοπτικές βιωσιμότητας

Η πυρηνική ενέργεια, από την άποψη της αέναης διαθεσιμότητας των πρώτων υλών της —χαρακτηριστικό γνώρισμα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή ακτινοβολία, ο άνεμος και η υδροδυναμική ενέργεια— δεν μπορεί να θεωρηθεί ανανεώσιμη. Τα γνωστά αποθέματα του φυσικού μεταλλεύματος που αποτελεί την πρώτη ύλη των πυρηνικών καυσίμων είναι πεπερασμένα και, με τους σημερινούς ρυθμούς εξόρυξης, επαρκούν για μερικές εκατοντάδες χρόνια. Η διάρκεια αυτή αναμένεται να μειωθεί σε περίπτωση αύξησης της παγκόσμιας χρήσης της πυρηνικής ενέργειας.

Επιπλέον, οι περισσότερες εκπομπές άνθρακα στον κύκλο ζωής της πυρηνικής ενέργειας δεν προέρχονται από το στάδιο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω σχάσης, αλλά από τις πρώιμες φάσεις του κύκλου καυσίμου. Συγκεκριμένα, σημαντικές εκπομπές παράγονται κατά την κατασκευή των ορυχείων, τις διαδικασίες εξόρυξης και χημικής κατεργασίας του μεταλλεύματος, καθώς και στη φάση εμπλουτισμού του ουρανίου (μετατροπή σε αέρια μορφή και φυγοκέντρωση). Αυτές οι διεργασίες επηρεάζουν αρνητικά το συνολικό «πράσινο» αποτύπωμα της πυρηνικής ενέργειας, παρά το γεγονός ότι η ίδια η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος είναι σχεδόν μηδενικών εκπομπών.

Ωστόσο, το συγκεκριμένο μειονέκτημα μπορεί να μετριαστεί στο μέλλον, εφόσον μειωθεί η εξάρτηση από την πρωτογενή εξόρυξη φυσικού ουρανίου. Αυτό αναμένεται να καταστεί εφικτό με την ευρύτερη εφαρμογή και εμπορική αξιοποίηση των αναπαραγωγικών αντιδραστήρων τέταρτης γενιάς, και ειδικότερα των αντιδραστήρων ταχέων νετρονίων (Fast Neutron Reactors – FNR). Η τεχνολογία αυτή καθιστά δυνατή τη μετατροπή γόνιμων υλικών, όπως το ²³⁸U, σε σχάσιμα, επιτρέποντας έτσι την αξιοποίηση των μεγάλων ποσοτήτων επεξεργασμένων καυσίμων που ήδη έχουν συσσωρευτεί. Έτσι, το πυρηνικό καύσιμο μπορεί δυνητικά να ανακυκλώνεται σε σημαντικό βαθμό, μειώνοντας τη συνολική ανάγκη για νέες πρώτες ύλες και

ενισχύοντας τη βιωσιμότητα της πυρηνικής ενέργειας στο πλαίσιο της πράσινης μετάβασης.

-
- **Εισαγωγή στην τεχνολογία των ταχέων αντιδραστήρων**

Η τεχνολογία των αντιδραστήρων ταχέων νετρονίων τέταρτης γενιάς αποτελεί σημαντική εξέλιξη στο πεδίο της πυρηνικής ενέργειας, επιβεβαιώνοντας τις προσδοκίες για έναν πιο αποδοτικό και βιώσιμο ενεργειακό κύκλο, με περιορισμένη εξάρτηση από νέα κοιτάσματα ουρανίου. Οι πρώτες εφαρμογές της τεχνολογίας έχουν υλοποιηθεί μέσω πειραματικών ή πιλοτικών μονάδων σε χώρες όπως η Ρωσία, με τους αντιδραστήρες BN-600 και BN-800 (World Nuclear Association, 2023), η Ινδία (FBTR και PFBR), η Κίνα (CEFR και CFR-600), αλλά και οι Η.Π.Α., η Ιαπωνία και η Γερμανία, που διαθέτουν μακρόχρονη εμπειρία στον τομέα. Οι ταχείς αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες μπορούν να χρησιμοποιούν ανακυκλωμένο καύσιμο από συμβατικούς αντιδραστήρες καθώς και απεμπλουτισμένο ουράνιο, του οποίου τα παγκόσμια αποθέματα εκτιμώνται σε άνω του 1,2 εκατομμυρίων τόνων (IAEA, 2019). Η αξιοποίηση αυτών των υλικών μειώνει την ανάγκη για νέες εξορύξεις φυσικού μεταλλεύματος και περιορίζει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του πυρηνικού κύκλου, συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών CO₂ (NEA, 2020).

Τα γνωστά παγκόσμια αποθέματα ουρανίου εκτιμώνται σήμερα σε περίπου 6,1 εκατομμύρια τόνους, με το μεγαλύτερο ποσοστό —άνω του 50%— να βρίσκεται συγκεντρωμένο σε τρεις χώρες: την Αυστραλία, το Καζακστάν και τον Καναδά (IAEA, 2021). Η γεωγραφική αυτή συγκέντρωση δημιουργεί γεωπολιτικές ανισορροπίες και ενδεχόμενες εξαρτήσεις, καθώς η ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού επηρεάζεται από διεθνείς εντάσεις, κρίσεις ή εμπορικούς περιορισμούς (NEA, 2022).

Στη δεκαετία του 1950, οι πρώτες δοκιμές αντιδραστήρων ταχέων νετρονίων αντιμετώπισαν τεχνικά αδιέξοδα, λόγω της ανωριμότητας των υλικών και της έλλειψης αξιόπιστων συστημάτων ασφάλειας (World Nuclear Association, 2023). Ωστόσο, η τεχνολογική πρόοδος των τελευταίων δεκαετιών, σε συνδυασμό με τη συσσωρευμένη εμπειρία από πειραματικά προγράμματα, έχει πλέον καταστήσει ρεαλιστική τη σταδιακή εμπορική αξιοποίηση των ταχέων αντιδραστήρων με εφαρμογή κλειστού κύκλου καυσίμου, δηλαδή μέσω επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης αναλωμένων καυσίμων και καύσης απεμπλουτισμένου ουρανίου (OECD-NEA, 2018).

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (IAEA), τέτοιοι αντιδραστήρες έχουν τη δυνατότητα να εξάγουν 60 έως 70 φορές περισσότερη ενέργεια από την ίδια ποσότητα φυσικού ουρανίου συγκριτικά με τους σημερινούς θερμικούς αντιδραστήρες (IAEA, 2020), οδηγώντας σε σημαντική εξοικονόμηση πρώτης ύλης και ταυτόχρονη μείωση του όγκου των ραδιενεργών αποβλήτων υψηλής επικινδυνότητας. Επιπλέον, η μείωση της ανάγκης για νέες εξορύξεις συνεπάγεται και περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπως οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από την εξορυκτική δραστηριότητα (Schneider et al., 2022).

Οι αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων του μέλλοντος θα χρησιμοποιούν ως αρχικό καύσιμο μίγματα ουρανίου-235 με εμπλουτισμό έως 20% και ουρανίου-238. Η σχάση θα προκαλείται μέσω βομβαρδισμού με νετρόνια υψηλής ενέργειας, χωρίς τη χρήση επιβραδυντή, γεγονός που επιτρέπει τη μετατροπή μεγαλύτερου ποσοστού του καυσίμου σε σχάσιμη μορφή (GIF, 2021). Σε αντίθεση με τους σημερινούς αντιδραστήρες που αξιοποιούν μόλις το 1,5–2% του U-235, η τεχνολογία των ταχέων

αντιδραστήρων υπόσχεται πολύ υψηλότερη ενεργειακή απόδοση και μεγαλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πυρηνικών πόρων.

Κατά τη λειτουργία αυτών των αντιδραστήρων θα παράγονται επίσης σχάσιμοι πυρήνες, κυρίως πλουτώνιο-239 (Pu-239) και πλουτώνιο-241 (Pu-241), με ρυθμούς αναπαραγωγής (λόγος νέων σχάσιμων πυρήνων προς τους προηγούμενους) που δύνανται να ξεπερνούν το 1. Αυτό σημαίνει ότι θα παράγουν περισσότερο καύσιμο από όσο καταναλώνουν —χαρακτηριστικό που καθιστά τους Fast Breeder Reactors (FBRs) έναν από τους βασικούς τύπους αντιδραστήρων τέταρτης γενιάς υπό ανάπτυξη. Αυτοί οι αντιδραστήρες θα βασίζονται σχεδόν αποκλειστικά σε πλουτώνιο ως καύσιμο, δίνοντας επίσης τη δυνατότητα «καύσης» του πλεονάζοντος πλουτωνίου από παροπλισμένα πυρηνικά όπλα, περιορίζοντας τις σχετικές ανησυχίες.

Ψυκτικά μέσα και υλικά κατασκευής

Στη μεγάλη πλειονότητα των λειτουργικών αντιδραστήρων ταχέων νετρονίων τέταρτης γενιάς, το ψυκτικό μέσο είναι είτε υγρό μέταλλο (όπως ενώσεις νατρίου, μόλυβδος ή ευθηκτικά κράματα μολύβδου-βισμούθιου), είτε ευγενές αέριο. Τα υλικά αυτά επιλέγονται λόγω της αμελητέας αλληλεπίδρασής τους με τα νετρόνια, της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας και της δυνατότητας γρήγορης απαγωγής θερμότητας υψηλής πυκνότητας από τον πυρήνα. Οι ράβδοι ελέγχου κατασκευάζονται από καρβίδιο βορίου, προσφέροντας υψηλή ικανότητα απορρόφησης νετρονίων.

Περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα της νέας τεχνολογίας

Οι αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων 4ης γενιάς παρουσιάζουν δύο σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς το περιβαλλοντικό αποτύπωμα:

α) Ο δομικός και λειτουργικός τους σχεδιασμός (υψηλή πυκνότητα ταχέων νετρονίων σε περιβάλλον με μειωμένη δέσμευση) επιτρέπει τη σχάση μακρόβιων και επικίνδυνων ακτινίδων, που παραμένουν αναξιοποίητες στο αναλωμένο καύσιμο των σημερινών αντιδραστήρων (OECD-NEA, 2012· IAEA, 2018). Έτσι, αντί να υπόκεινται σε βραδεία αποσύνθεση μέσω σύλληψης νετρονίων, υφίστανται σχάση, μεταστοιχειώνονται σε λιγότερο ραδιενεργά νουκλίδια και αποκτούν πολύ μικρότερη ημιζωή (Till and Chang, 1999· IAEA, 2020).

β) Το αποτέλεσμα είναι όχι μόνο η ποσοτική μείωση των αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας (HLW), αλλά και η ποιοτική βελτίωση του ραδιενεργού αποτυπώματος: η ταχύτερη χρονικά εξασθένηση της ραδιενέργειας τους σε επίπεδα που συγκρίνονται με αυτά του φυσικού ουρανίου (World Nuclear Association, 2023· MIT, 2011).

Πιθανότητες μεταστοιχείωσης (%)		
Ισότοπο	θερμικό φάσμα	γρήγορο φάσμα
Np-237	3	27
Pu-238	7	70
Pu-239	63	85
Pu-240	1	55
Pu-241	75	87
Pu-242	1	53
Am-241	1	21
Am-242μ	75	94
Am-243	1	23
Cm-242	1	10

Πιθανότητες μεταστοιχείωσης (%)		
Ισότοπο	θερμικό φάσμα	γρήγορο φάσμα
Cm-243	78	94
Cm-244	4	33

Πίνακας 4: Τα ποσοστά (επί τοις%) μεταστοιχείωσης μέσω σχάσης και περαιτέρω πυρηνικής αποσύνθεσης, κάποιων από τα σημαντικά ραδιοϊσότοπα (ακτινίδες) που παράγονται από την σειρά πυρηνικής αποσύνθεσης του ουρανίου, όταν αυτά σχάζονται σε «θερμικούς» και σε «ταχείς» πυρηνικούς αντιδραστήρες. Παρατηρούμε ότι οι πιθανότητες μεταστοιχείωσης αυξάνονται σημαντικά με την σχάση από ταχεία νετρόνια. (πηγή: World Nuclear Association)

Εγγενής ασφάλεια λειτουργίας των ταχέων αντιδραστήρων

Οι αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων (FNR – Fast Neutron Reactors) διαθέτουν δομικά έναν ισχυρό αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας, γεγονός που ενισχύει καθοριστικά την ασφάλεια λειτουργίας τους (IAEA, 2018· Zhang et al., 2020). Συγκεκριμένα, η αλυσιδωτή πυρηνική αντίδραση επιβραδύνεται ή ακόμα και διακόπτεται αυτόματα όταν η θερμοκρασία αυξηθεί απότομα —όπως θα συνέβαινε, για παράδειγμα, σε περίπτωση απώλειας ή διαρροής του ψυκτικού μέσου (World Nuclear Association, 2023).

Αυτό το εγγενές χαρακτηριστικό παθητικής ασφάλειας, το οποίο συναντάται και σε ταχείς αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν θόριο ως καύσιμο, καθιστά την τεχνολογία αυτή εξαιρετικά αξιόπιστη από άποψη πυρηνικής ασφάλειας (Sorensen, 2013· Hargraves and Moir, 2010). Αντίθετα, στους σημερινούς αντιδραστήρες θερμών νετρονίων με βάση το ουράνιο, η πυρηνική αντίδραση μπορεί να συνεχιστεί ακόμη και σε συνθήκες ανεξέλεγκτης αύξησης της θερμοκρασίας, οδηγώντας εν δυνάμει σε τήξη του πυρήνα και σοβαρό ατύχημα (Schaffer, 2011· NEA, 2021)..

Η αξιοποίηση του Θορίου ως εναλλακτικού πυρηνικού καυσίμου

Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως σε ερευνητικούς αντιδραστήρες της Ινδίας ή στον πρωτότυπο κινεζικό αντιδραστήρα άλατος θορίου (MTSR – Molten Thorium Salt Reactor), εξετάζεται η χρήση του Θορίου-232 (^{232}Th) ως βασικού καυσίμου ή σε συνδυασμό με ουράνιο (IAEA, 2020· WNA, 2023). Η ιδέα αξιοποίησης του θορίου υπήρχε από τα πρώτα βήματα της πυρηνικής τεχνολογίας, όμως δεν υιοθετήθηκε ευρέως, καθώς η βιομηχανία προσανατολίστηκε στη χρήση του ουρανίου, που επέτρεπε την παραγωγή πλουτωνίου, απαραίτητου για την κατασκευή πυρηνικών όπλων (Schaffer, 2011). Αντίθετα, η αλυσιδωτή αντίδραση που βασίζεται στο θόριο δεν παράγει πλουτώνιο, γεγονός που εμπόδισε την εξάπλωση της χρήσης του σε στρατηγικά προγράμματα (IAEA, 2020).

Ωστόσο, το θόριο παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα για ειρηνική ενεργειακή χρήση:

- (α) Είναι τρεις φορές πιο άφθονο από το ουράνιο και τα γνωστά του κοιτάσματα είναι σχεδόν τετραπλάσια σε ποσότητα. Επιπλέον, έχει πολύ υψηλότερη ενεργειακή απόδοση: ένας τόνος θορίου ισοδυναμεί ενεργειακά με περίπου 200 τόνους ουρανίου ή πάνω από τρία εκατομμύρια τόνους άνθρακα (IAEA, 2012· Sorensen, 2013).
- (β) Δεν μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή πυρηνικών όπλων, γεγονός που το καθιστά ασφαλέστερη επιλογή από γεωπολιτική σκοπιά (World Nuclear Association, 2023).
- (γ) Παράγει μικρότερες ποσότητες αποβλήτων, τα οποία επιπλέον έχουν πιο βραχύβιο χρόνο ημιζωής. Η επικινδυνότητα τους περιορίζεται σε περίπου 400–500 χρόνια, έναντι των χιλιάδων ετών που απαιτούνται για την αποδόμηση των μακρόβιων

ραδιονουκλιδίων από ουράνιο (Hargraves and Moir, 2010).
(δ) Είναι εμπορικά εκμεταλλεύσιμο στο σύνολό του ως καύσιμο, σε αντίθεση με το ουράνιο, όπου χρησιμοποιείται μόνο το 0,7% (το ισότοπο ^{235}U) (IAEA, 2020· Sorensen, 2013).

(ε) Το ετήσιο κόστος καυσίμου ενός αντιδραστήρα ισχύος 1 GWe με θόριο υπολογίζεται πως θα ήταν έως και 600 φορές χαμηλότερο από εκείνο ενός αντίστοιχου αντιδραστήρα ουρανίου (World Nuclear News, 2021).

Μικροί Αρθρωτοί Αντιδραστήρες (SMRs) και Μικροαντιδραστήρες: Νέα τεχνολογία με περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα

Η τεχνολογία των Μικρών Αρθρωτών Αντιδραστήρων (SMRs) και των Μικροαντιδραστήρων (MNRs) παρουσιάζει αυξανόμενο ενδιαφέρον λόγω των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων και της δυνατότητας συμβολής στην ενεργειακή μετάβαση. Οι SMRs, ισχύος έως 300 MWe, και οι μικροαντιδραστήρες, ισχύος από 1 έως 10 MW, αντλούν έμπνευση από την πυρηνική πρόωση στρατιωτικών υποβρυχίων (IAEA, 2022· European Commission, 2023). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή επισημαίνει τον ρόλο των SMRs στη μείωση των εκπομπών CO_2 έως το 2040, ενώ ο ΔΟΑΕ τους αξιολογεί ως ενδιάμεση λύση χαμηλού κινδύνου προς ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα (IAEA, 2022).

Οι αντιδραστήρες 3ης γενιάς χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό μέσο και χαρακτηρίζονται από εγγενή ασφάλεια, ενώ οι προηγμένοι SMRs 4ης γενιάς αξιοποιούν ταχέα νετρόνια και καινοτόμα μέσα όπως λιωμένα άλατα ή ευγενή αέρια (GIF, 2021). Παρά την υποστήριξη από κυβερνήσεις και ιδιωτικά κεφάλαια, η ανάπτυξη αντιμετωπίζει προκλήσεις, όπως η αδειοδότηση και η τεχνική πολυπλοκότητα. Σύμφωνα με την πρόσφατη έκθεση του Nuclear Energy Agency (NEA, 2024), υπάρχουν 98 σχέδια SMRs παγκοσμίως, εκ των οποίων τα 56 είναι ενεργά, ενώ 42 έχουν «παγώσει». Έως σήμερα, μόνο δύο μονάδες έχουν τεθεί σε πλήρη εμπορική λειτουργία: ο ρωσικός πλωτός σταθμός Akademik Lomonosov, με δύο αντιδραστήρες PWR ισχύος 35 MWe έκαστος (σε λειτουργία από το 2020), και ο κινεζικός HTR-PM, ένας καινοτόμος αερόψυκτος αντιδραστήρας 4ης γενιάς ισχύος 210 MWe που διασυνδέθηκε με το δίκτυο το 2023 (WNA, 2024).

Η Πυρηνική Σύντηξη: Ορίζοντας για Πραγματικά Ανανεώσιμη και Καθαρή Ενέργεια

Η πυρηνική σύντηξη αποτελεί την πιο υποσχόμενη προοπτική της σύγχρονης πυρηνικής τεχνολογίας για τη μετάβαση της ανθρωπότητας σε καθαρές, ανανεώσιμες και πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας (IAEA, 2020· ITER, 2023). Σε αντίθεση με τη σχάση, η σύντηξη βασίζεται στη συγχώνευση ελαφρών πυρήνων (όπως του δευτερίου και του τριτίου), με αποτέλεσμα την απελευθέρωση τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας, χωρίς τη δημιουργία μακρόβιων ραδιενεργών αποβλήτων (Schneider et al., 2021). Η τεχνολογία αυτή, η οποία μιμείται τις διαδικασίες που συμβαίνουν στον Ήλιο, απαιτεί ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας (άνω των 100 εκατομμυρίων βαθμών Κελσίου) και μαγνητικού περιορισμού, επιτυγχανόμενες σε σύνθετες διατάξεις τύπου tokamak (Zohm, 2016).

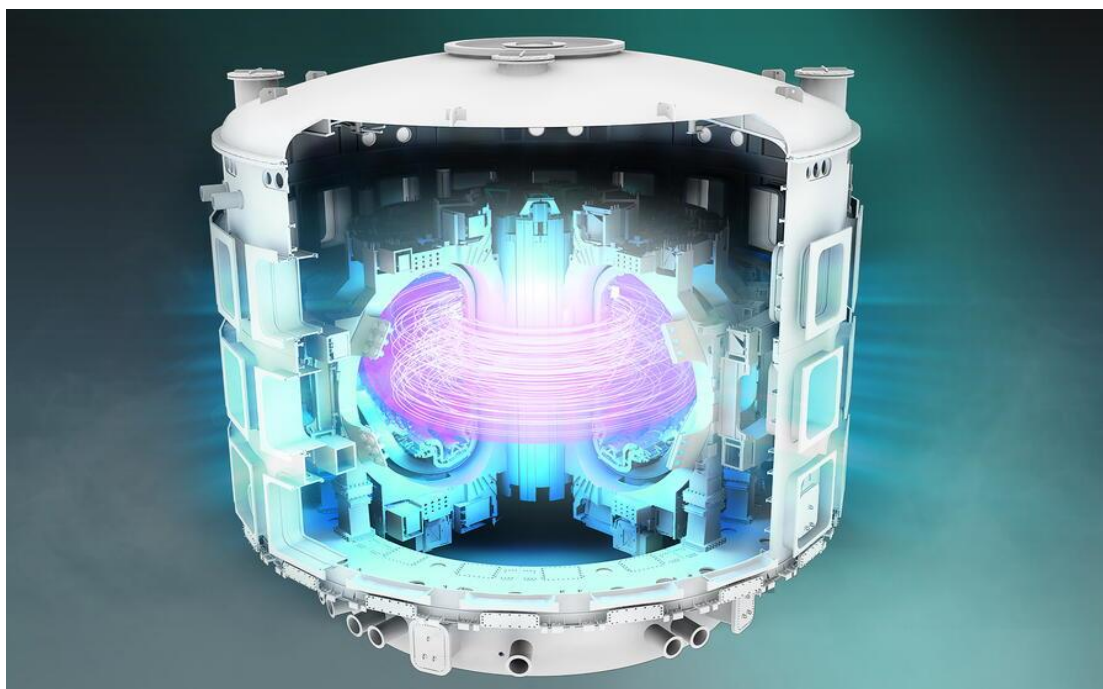
Παρότι η σύντηξη παραμένει τεχνολογικά προκλητική και ενεργειακά απαιτητική, τα πλεονεκτημά της είναι πολλαπλά: μηδενικές εκπομπές CO_2 κατά τη λειτουργία, περιορισμένη και διαχειρίσιμη ραδιενέργεια (κυρίως τριτίου με ημιζωή 12,3 ετών), εγγενής ασφάλεια λόγω φυσικής αυτορρύθμισης, αφθονία καυσίμου (δευτέριο και

λίθιο) και σταθερή παραγωγή βασικού φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας, ανεξάρτητα από εξωτερικές συνθήκες (European Commission, 2022). Επιπλέον, η φύση της αντίδρασης αποκλείει την κατασκευή πυρηνικών όπλων, συμβάλλοντας στον περιορισμό της στρατιωτικοποίησης της πυρηνικής τεχνολογίας (IAEA, 2021). Αν και η πλήρης εμπορική αξιοποίηση τοποθετείται στο δεύτερο μισό του 21ου αιώνα, η πρόοδος που έχει σημειωθεί σε πειραματικά προγράμματα (όπως ο διεθνής αντιδραστήρας ITER) καθιστά πλέον ρεαλιστικό τον στόχο μιας ενεργειακά αυτόνομης και βιώσιμης κοινωνίας, με τη σύντηξη ως κεντρικό άξονα.

Το Πρόγραμμα ITER: Ο Παγκόσμιος Δρόμος προς την Πυρηνική Σύντηξη

Η σημαντικότερη διεθνής συνεργατική προσπάθεια για την προώθηση της έρευνας στην πυρηνική σύντηξη είναι το πρόγραμμα ITER, το οποίο εδρεύει στη Γαλλία και αναμένεται να τεθεί σε πλήρη λειτουργία μετά το 2040. Η καθυστέρηση αυτή αποδίδεται σε προβλήματα χρηματοδότησης, τεχνικά εμπόδια, καθώς και στις επιπτώσεις της διεθνούς πολιτικής αστάθειας, όπως η αποχώρηση του Ηνωμένου Βασιλείου και η προσωρινή διακοπή συμμετοχής της Ελβετίας (ITER, 2023· European Commission, 2022). Στην «καρδιά» του ITER βρίσκεται η μεγαλύτερη μηχανή tokamak που έχει κατασκευαστεί ποτέ, σχεδιασμένη να επιτύχει ελεγχόμενη σύντηξη πλάσματος, προκειμένου να αποδείξει τη σκοπιμότητα της τεχνολογίας (IAEA, 2021).

Ο στόχος δεν είναι η άμεση εμπορική αξιοποίηση, αλλά η επίτευξη θετικού ενεργειακού ισοζυγίου: η παραγόμενη θερμική ισχύς (500 MW) θα πρέπει να είναι δεκαπλάσια της απαιτούμενης ισχύος εισόδου (50 MW), επιτυγχάνοντας λόγο απόδοσης $Q = 10$ (ITER, 2023). Για λόγους σύγκρισης, το παγκόσμιο ρεκόρ αποδοτικότητας σε tokamak κατέχει μέχρι σήμερα το πρόγραμμα JET στο Ηνωμένο Βασίλειο, που το 1997 πέτυχε αναλογία $Q = 0,67$ (UKAEA, 2020). Η υλοποίηση των στόχων του ITER απαιτεί συνδυασμό καινοτόμων τεχνολογιών, ακριβή έλεγχο συνθηκών περιορισμού και θέρμανσης του πλάσματος, και συμμόρφωση με τα αυστηρά πρότυπα ασφαλείας που επιβάλλονται από τις γαλλικές αρχές και τον ΔΟΑΕ (IAEA, 2021). Παρά τις τεχνολογικές προόδους, η εμπορική αξιοποίηση της σύντηξης προβλέπεται να γίνει εφικτή μετά το 2050, γεγονός που καθιστά το ITER κομβικής σημασίας βήμα για το μέλλον της καθαρής ενέργειας (World Nuclear Association, 2024).



Εικόνα 28: Καλλιτεχνική απεικόνιση της μηχανής πυρηνικής σύντηξης (tokamak) του προγράμματος ITER.

4.5. Διεθνές Ρυθμιστικό Πλαίσιο και Συνθήκες για την Ασφαλή Χρήση της Πυρηνικής Ενέργειας.

Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις όσον αφορά την ασφάλεια, τη ραδιολογική προστασία, τη διαχείριση αποβλήτων και την αποτροπή της διάδοσης πυρηνικών όπλων. Για τον λόγο αυτό, η διεθνής κοινότητα έχει αναπτύξει ένα πολύπλευρο και σύνθετο ρυθμιστικό πλαίσιο, το οποίο βασίζεται σε διεθνείς συμβάσεις, θεσμούς και τεχνικά πρότυπα που προωθούν την ασφαλή, υπεύθυνη και ειρηνική χρήση της πυρηνικής ενέργειας (IAEA, 2018; Choppin et al., 2013).

Ο ρόλος του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (IAEA)

Ο βασικός θεσμός σε διεθνές επίπεδο για την εποπτεία και τη ρύθμιση των πυρηνικών δραστηριοτήτων είναι ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (IAEA), που ιδρύθηκε το 1957 υπό την αιγίδα του ΟΗΕ. Ο IAEA προωθεί την ειρηνική χρήση της πυρηνικής ενέργειας, παρέχει τεχνική υποστήριξη στα κράτη-μέλη και επιβλέπει την εφαρμογή συμφωνιών διασφάλισης (safeguards), μέσω επιθεωρήσεων και παρακολούθησης πυρηνικών εγκαταστάσεων (IAEA, 2018). Η IAEA θέτει επίσης διεθνή πρότυπα ασφαλείας (Safety Standards), τα οποία καλύπτουν όλα τα στάδια του κύκλου καυσίμου, από την εξόρυξη έως την απόσυρση και αποξήλωση πυρηνικών εγκαταστάσεων.

Διεθνείς συμβάσεις και νομικές δεσμεύσεις

Πολλάπλες διεθνείς συμβάσεις ενισχύουν το ρυθμιστικό πλαίσιο. Η Σύμβαση για την Πυρηνική Ασφάλεια (Convention on Nuclear Safety, 1994) δεσμεύει τις χώρες με πυρηνικούς σταθμούς να διασφαλίζουν την ασφάλεια των εγκαταστάσεων τους σε όλα τα επίπεδα λειτουργίας. Αντίστοιχα, η Σύμβαση για την Ασφάλεια της Διαχείρισης Ραδιενεργών Αποβλήτων (Joint Convention, 1997) ρυθμίζει ζητήματα διαχείρισης αποβλήτων και χρησιμοποιημένου καυσίμου. Η Συνθήκη για τη Μη Διάδοση των

Πυρηνικών Όπλων (NPT, 1968) αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο του καθεστώτος μη διάδοσης, απαιτώντας από τα κράτη-μέλη που δεν διαθέτουν πυρηνικά όπλα να απέχουν από την απόκτησή τους και να θέτουν τις πυρηνικές τους δραστηριότητες υπό τον έλεγχο της IAEA (World Nuclear Association, 2023).

Περιφερειακές και εθνικές ρυθμιστικές αρχές

Παράλληλα με το διεθνές πλαίσιο, κάθε κράτος φέρει την κύρια ευθύνη για την ασφάλεια των πυρηνικών του δραστηριοτήτων. Οι εθνικές ρυθμιστικές αρχές, όπως η Nuclear Regulatory Commission (NRC) στις ΗΠΑ, η ASN στη Γαλλία και η ENSREG στην Ευρωπαϊκή Ένωση, θεσπίζουν και επιβάλλουν ρυθμιστικούς κανόνες, αδειοδοτούν πυρηνικές εγκαταστάσεις και διενεργούν επιθεωρήσεις. Στην Ε.Ε., το ρυθμιστικό πλαίσιο ενισχύθηκε με την οδηγία 2009/71/Ευρατόμ, η οποία εναρμονίζει τις απαιτήσεις ασφάλειας μεταξύ των κρατών-μελών και καθιστά υποχρεωτική την ανεξαρτησία των εθνικών ρυθμιστικών αρχών.

Τεχνικές προδιαγραφές και διαχείριση κινδύνων

Η ασφαλής λειτουργία των πυρηνικών εγκαταστάσεων απαιτεί την εφαρμογή τεχνικών προδιαγραφών, όπως πολλαπλά επίπεδα προστασίας (defence-in-depth), παθητικά και ενεργά συστήματα ασφαλείας και αυστηρά πρότυπα για την ποιότητα εξοπλισμού και την εκπαίδευση του προσωπικού. Μετά τα ατυχήματα στο Τσερνόμπιλ (1986) και τη Φουκουσίμα (2011), ενισχύθηκαν οι διεθνείς απαιτήσεις για ανθεκτικότητα σε εξωτερικά συμβάντα, όπως σεισμοί και πλημμύρες, καθώς και για τη διαχείριση σοβαρών ατυχημάτων (stress tests, severe accident management).

Προκλήσεις και σύγχρονες εξελίξεις

Παρά τις σημαντικές προόδους, το ρυθμιστικό πλαίσιο αντιμετωπίζει προκλήσεις. Η διασφάλιση της ασφάλειας σε παλαιούς αντιδραστήρες, η διαχείριση μακροχρόνιων ραδιενεργών αποβλήτων και η πιθανή χρήση της πυρηνικής τεχνολογίας για στρατιωτικούς σκοπούς παραμένουν κρίσιμα ζητήματα. Η ανάπτυξη των αντιδραστήρων 4ης γενιάς και των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMRs) απαιτεί προσαρμογή του κανονιστικού πλαισίου, ώστε να καλυφθούν οι ιδιαιτερότητες τους, χωρίς να μειώνεται το επίπεδο ασφάλειας.

Το διεθνές ρυθμιστικό πλαίσιο για την πυρηνική ενέργεια αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της στρατηγικής παγκόσμιας ασφάλειας και βιώσιμης ανάπτυξης. Παρά τις προκλήσεις, η διαρκής ενίσχυση των θεσμών, των τεχνικών προτύπων και της διαφάνειας μπορεί να διασφαλίσει την ειρηνική, ασφαλή και υπεύθυνη χρήση της πυρηνικής τεχνολογίας.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

6.1 Η Πυρηνική Ενέργεια ως Περιβαλλοντικά Βιώσιμη Επιλογή στο Ενεργειακό Μείγμα

Η πυρηνική ενέργεια συγκαταλέγεται στις τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα, με τις συνολικές εκπομπές CO₂ καθ' όλο τον κύκλο ζωής μιας πυρηνικής μονάδας να κυμαίνονται σε επίπεδα παρόμοια με αυτά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), όπως η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια (IPCC, 2022· WNA, 2023). Ωστόσο, το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της πυρηνικής ενέργειας είναι περισσότερο σύνθετο, καθώς περιλαμβάνει τη διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων, την πρόληψη ατυχημάτων και τη μακροχρόνια ρύθμιση της ραδιολογικής επικινδυνότητας (IAEA, 2021). Η τεχνολογική εξέλιξη των τελευταίων δεκαετιών έχει εισαγάγει νέες προσεγγίσεις που μειώνουν σημαντικά αυτές τις επιβαρύνσεις. Οι αντιδραστήρες τέταρτης γενιάς (Gen IV), όπως οι Fast Neutron Reactors (FNRs), οι Small Modular Reactors (SMRs) και οι Μικροαντιδραστήρες, ενσωματώνουν συστήματα εγγενούς ασφάλειας, μειώνουν τον όγκο και τη διάρκεια ζωής των ραδιενεργών αποβλήτων και βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση μέσω ανακύκλωσης καυσίμου (NEA, 2022· GIF, 2021).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αξιοποίηση του θορίου ως εναλλακτικού πυρηνικού καυσίμου, καθώς το ισότοπο ²³²Th, όταν μετασχηματίζεται σε ²³³U, μπορεί να υποστεί σχάση χωρίς να παράγει σημαντικές ποσότητες πλουτωνίου, γεγονός που περιορίζει την πιθανότητα χρήσης για πυρηνικά όπλα και καθιστά την τεχνολογία πολιτικά ελκυστικότερη (IAEA, 2020). Ταυτόχρονα, οι θοριούχοι αντιδραστήρες εκλύουν μικρότερες ποσότητες μακρόβιων ραδιενεργών αποβλήτων, γεγονός που ενισχύει τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας.

Η συμβολή της πυρηνικής ενέργειας στη μετάβαση σε ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον ενισχύεται ακόμη περισσότερο όταν εντάσσεται σε υβριδικά ενεργειακά σχήματα, όπου μπορεί να συνδυάζεται λειτουργικά με ΑΠΕ. Ειδικά οι SMRs, λόγω του μικρού τους μεγέθους και της ευκολίας εγκατάστασης, προσφέρονται για συμπληρωματική χρήση σε περιοχές χωρίς αξιόπιστο δίκτυο ή μεταβλητή ζήτηση (EC, 2023· IAEA, 2023). Σε τέτοια συστήματα, η πυρηνική ενέργεια καλύπτει τη σταθερή ζήτηση βασικού φορτίου, ενώ οι ΑΠΕ εξυπηρετούν την ευμετάβλητη συνιστώσα, προσφέροντας ένα ευέλικτο και σταθερό ενεργειακό μοντέλο.

Παρότι η τεχνολογία είναι πλέον ώριμη για εμπορική χρήση σε ορισμένες περιπτώσεις, η πλήρης ένταξη της πυρηνικής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα εξαρτάται από τη διαμόρφωση ρυθμιστικών πλαισίων, την ενίσχυση της κοινωνικής αποδοχής και τη διεθνή συνεργασία για την ανάπτυξη ασφαλών και διαφανών τεχνολογιών (OECD-NEA, 2024). Η απάντηση στο ερώτημα εάν η πυρηνική ενέργεια μπορεί να θεωρηθεί «πράσινη» εξαρτάται πλέον λιγότερο από την τεχνική σκοπιμότητα και περισσότερο από τη συλλογική πολιτική βούληση, τη θεσμική υποστήριξη και την ενεργή συμμετοχή της διεθνούς κοινότητας.

6.2 Εκτίμηση των προκλήσεων και των πιθανών λύσεων.

Η αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας από τον άνθρωπο αποκάλυψε, ήδη από τις πρώτες εφαρμογές της, ένα εντυπωσιακό φάσμα τεχνολογικών δυνατοτήτων αλλά και σοβαρών προκλήσεων. Η μέχρι σήμερα εμπειρία, με ατυχήματα που είχαν δυσμενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, ανέδειξε την ανάγκη για εξαιρετικά αυστηρά πρότυπα ασφάλειας και υψηλού επιπέδου τεχνολογικό σχεδιασμό (IAEA, 2020).

Κατά τις πρώτες δεκαετίες ανάπτυξης της πυρηνικής τεχνολογίας, τόσο σε στρατιωτικό όσο και σε εμπορικό επίπεδο, δεν πληρούνταν επαρκώς τα απαιτούμενα θεσμικά και τεχνικά κριτήρια για τη διαχείριση των κινδύνων. Ωστόσο, η πυρηνική ενέργεια συνεχίζει να θεωρείται μία από τις αποδοτικότερες επιλογές στο ενεργειακό μείγμα, με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, μικρό όγκο καυσίμου και χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τη λειτουργία (NEA, 2021).

Παρά τα οφέλη αυτά, η παρουσία ραδιενεργών αποβλήτων και οι ενδεχόμενες διαρροές αποτελούν μακροπρόθεσμο κίνδυνο για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία. Οι επιπτώσεις είναι ενδεχομένως παγκόσμιας κλίμακας, με συσσωρευτική επιβάρυνση των οικοσυστημάτων και της βιοποικιλότητας. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση της πυρηνικής ενέργειας απαιτεί συστηματική διερεύνηση της σωρευτικής επίδρασης των ανθρωπογενών ραδιενεργών εκπομπών στο πλανητικό περιβάλλον. Η προσπάθεια αυτή προϋποθέτει διεθνή επιστημονική συνεργασία και εναρμονισμένες μεθοδολογίες ώστε τα αποτελέσματα να είναι αξιόπιστα και συγκρίσιμα (UNSCEAR, 2022).

Ειδική αναφορά αξίζει να γίνει στη στρατιωτική διάσταση της πυρηνικής ενέργειας. Η κατοχή και η συνεχιζόμενη ανάπτυξη πυρηνικών όπλων συνιστούν μία υπαρξιακή απειλή για την ανθρωπότητα. Οι οικολογικές και ανθρωπιστικές επιπτώσεις ενός γενικευμένου πυρηνικού πολέμου είναι καταστροφικές, με ενδεχόμενη εμφάνιση φαινομένων όπως ο «πυρηνικός χειμώνας», η μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας και η επισιτιστική κρίση μεγάλης κλίμακας (Toon et al., 2007).

Η αποτυχία ουσιαστικού πυρηνικού αφοπλισμού εδράζεται σε γεωπολιτικά, στρατηγικά και οικονομικά συμφέροντα, τα οποία ενισχύουν την τάση ορισμένων κρατών να αντιμετωπίζουν τα πυρηνικά όπλα ως εγγύηση ασφάλειας και εργαλείο αποτροπής (Kristensen & Korda, 2023). Ακόμα και σε περίοδο ειρήνης, η διατήρηση τέτοιων οπλοστασίων ενέχει κινδύνους, τόσο λόγω πιθανών ατυχημάτων όσο και λόγω της συνεχώς αυξανόμενης ποσότητας ραδιενεργών καταλοίπων που προκύπτουν από την αποσυναρμολόγηση και συντήρηση των όπλων.

Η έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού σε ραδιενέργεια έχει πλέον τεκμηριωθεί επιστημονικά ως καρκινογόνος παράγοντας, με πληθώρα επιδημιολογικών και εργαστηριακών μελετών να καταδεικνύουν τη σύνδεση μεταξύ ιοντίζουσας ακτινοβολίας και βλαβών στο γενετικό υλικό, καθώς και αυξημένη συχνότητα συγκεκριμένων μορφών καρκίνου (WHO, 2016). Οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις δεν είναι μόνο άμεσες, αλλά επεκτείνονται χρονικά και χωρικά, πλήττοντας τη βιοποικιλότητα και τη σταθερότητα της τροφικής αλυσίδας.

Παρά τις προκλήσεις, η εμπορική χρήση της πυρηνικής ενέργειας δεν φαίνεται να υποχωρεί. Η αυξανόμενη ανάγκη για μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα

και η πρόοδος στην τεχνολογία αντιδραστήρων ενισχύουν το ενδιαφέρον για νέες εφαρμογές της πυρηνικής σχάσης. Η αξιοπιστία, η βελτίωση των μηχανισμών ασφάλειας και η δυνατότητα ενσωμάτωσης σε υβριδικά ενεργειακά σχήματα καθιστούν την πυρηνική ενέργεια ελκυστική επιλογή για τη μεταβατική περίοδο προς ένα καθαρότερο ενεργειακό μέλλον (WNA, 2022).

Σε κάθε περίπτωση, η αυστηρή συμμόρφωση με τα ρυθμιστικά πρότυπα ασφαλείας, η επένδυση στην ανακύκλωση πυρηνικού καυσίμου και η ενίσχυση των διεθνών μηχανισμών παρακολούθησης και διαφάνειας αποτελούν τις βασικές προϋποθέσεις για την ασφαλή και κοινωνικά αποδεκτή χρήση της πυρηνικής ενέργειας στον 21ο αιώνα.

6.3 Προοπτικές Τεχνολογικής Εξέλιξης και Έρευνας στην Πυρηνική Ενέργεια.

Η περαιτέρω εξέλιξη της πυρηνικής τεχνολογίας επιβάλλει τη διαρκή αναπροσαρμογή του ερευνητικού προσανατολισμού με βάση τις αρχές της βιωσιμότητας και της ασφάλειας. Τα ισχύοντα εθνικά και διεθνή πρότυπα λειτουργίας —όπως διαμορφώνονται από τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ) και τις αρμόδιες ρυθμιστικές αρχές— πρέπει να αποτελούν θεμέλιο για την επιστημονική και τεχνολογική πρόοδο, διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση των μελλοντικών εφαρμογών με τις αρχές της ακτινοπροστασίας, της τεχνικής αξιοπιστίας και της περιβαλλοντικής υπευθυνότητας.

Οι μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες οφείλουν να εστιάσουν στην ενίσχυση της εγγενούς ασφάλειας των αντιδραστήρων, στη βελτιστοποίηση των υλικών έναντι της ραδιενεργούς φθοράς και στην ανάπτυξη εξελιγμένων στρατηγικών διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων. Ειδικότερα, η ενσωμάτωση αυτοματοποιημένων και παθητικών συστημάτων ασφαλείας, η αύξηση της ανοχής του καυσίμου σε υψηλές θερμοκρασίες και η ανθεκτικότητα των υλικών σε ακτινοβολία και διάβρωση, αποτελούν βασικά πεδία τεχνολογικής καινοτομίας.

Ταυτόχρονα, η κοινωνική αποδοχή της πυρηνικής ενέργειας θα εξαρτηθεί από τον βαθμό διαφάνειας, αξιοπιστίας και αποτελεσματικής διαχείρισης των κινδύνων. Η επιτυχής αντιμετώπιση του προβλήματος των πυρηνικών αποβλήτων, το οποίο παραμένει ανοιχτό, αποτελεί τη βασική προϋπόθεση για την ευρύτερη εφαρμογή της τεχνολογίας. Η πλήρης υιοθέτηση τεκμηριωμένων στρατηγικών αποθήκευσης και τελικής διάθεσης, η ενεργή συμμετοχή του κοινού στη λήψη αποφάσεων και η αυστηρή εποπτεία των φορέων διαχείρισης είναι στοιχεία θεμελιώδους σημασίας.

Η επένδυση στην ανάπτυξη αντιδραστήρων νέας γενιάς, όπως οι ταχείς αντιδραστήρες σχάσης με χρήση ανακυκλωμένου καυσίμου, αποτελεί καθοριστικό μεταβατικό βήμα προς ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον. Οι τεχνολογίες αυτές προωθούνται ήδη από χώρες όπως η Κίνα, η Ινδία και οι Ηνωμένες Πολιτείες, καθώς ενσωματώνουν εγγενή χαρακτηριστικά ασφάλειας και συμβάλλουν στον περιορισμό των μακροχρόνιων ραδιενεργών αποβλήτων.

Παράλληλα, η έρευνα στην πυρηνική σύντηξη προβάλλει ως η πιο υποσχόμενη μακροπρόθεσμη ενεργειακή προοπτική. Η δυνατότητα παραγωγής καθαρής ενέργειας μέσω σύντηξης ελαφρών πυρήνων, χωρίς παραγωγή πλουτωνίου ή μακρόβιων ραδιενεργών αποβλήτων, καθιστά την τεχνολογία αυτή ιδανική για την κάλυψη των παγκόσμιων αναγκών σε ενέργεια με μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα. Το πρόγραμμα

ITER, η μεγαλύτερη διεθνής συνεργασία για την ανάπτυξη σύντηξης, αποτελεί ενδεικτικό παράδειγμα της προσπάθειας αυτής. Αν και η εμπορική αξιοποίηση παραμένει τεχνολογικά και χρονικά απομακρυσμένη, η πρόοδος που έχει σημειωθεί επιβεβαιώνει τη δυνατότητα επιτυχούς μετάβασης σε ένα νέο ενεργειακό πρότυπο, υπό την προϋπόθεση ύπαρξης πολιτικής βούλησης και επαρκούς χρηματοδότησης.

Η προώθηση της πυρηνικής τεχνολογίας, λοιπόν, απαιτεί συνδυασμένη δράση σε επίπεδο επιστημονικής έρευνας, κοινωνικής ευαισθητοποίησης και πολιτικής στρατηγικής, ώστε να διασφαλιστεί η συμβατότητά της με τις αρχές της αειφορίας, της δημόσιας υγείας και της περιβαλλοντικής ισορροπίας.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ATA (American Thyroid Association), 2014. Radiation and the thyroid: Assessing the Fukushima accident. [online] Available at: <https://www.thyroid.org> [Accessed 22 Jun. 2025].
- Acton, J.M. and Hibbs, M., 2012. Why Fukushima was preventable. Washington DC: Carnegie Endowment for International Peace.
- Bromet, E.J., Havenaar, J.M. and Guey, L.T., 2011. A 25-year retrospective review of the psychological consequences of the Chernobyl accident. *Clinical Oncology*, 23(4), pp.297–305.
- Burton, D. (2007) *Nuclear Accidents: The Accidents, Their Causes and Consequences*. London: McFarland.
- Cardis, E., Howe, G., Ron, E., et al., 2006. Cancer consequences of the Chernobyl accident: 20 years on. *Journal of Radiological Protection*, 26(2), pp.127–140.
- Fairlie, I. and Sumner, D., 2006. The other report on Chernobyl (TORCH). Berlin: European Greens.
- Funabashi, Y. and Kitazawa, K., 2012. Fukushima in review: A complex disaster, a disastrous response. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 68(2), pp.9–21.
- Hindmarsh, R. (2013) *Nuclear Disaster at Fukushima Daiichi: Social, Political and Environmental Issues*. London: Routledge.
- IAEA (2008) *The Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- IAEA (International Atomic Energy Agency) (1999). *The Criticality Accident in Tokaimura, Japan*. Vienna: IAEA.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 2006. *Chernobyl's legacy: Health, environmental and socio-economic impacts and recommendations to the governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine*. Vienna: IAEA.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 2015. *The Fukushima Daiichi Accident: Report by the Director General*. Vienna: IAEA.
- Japan Nuclear Energy Safety Organization (JNES) (2001). *Report on the Tokaimura Criticality Accident*. Tokyo: JNES.
- Medvedev, G. (1990) *The Legacy of Chernobyl*. New York: W.W. Norton & Company.
- Møller, A.P. and Mousseau, T.A., 2011. Conservation biology of radioactive contaminated areas. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102(9), pp.1045–1048.
- NISA (Nuclear and Industrial Safety Agency), 2011. *Report on the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident*. Tokyo: Ministry of Economy, Trade and Industry.

- Napier, B.A., et al. (1996) 'Radiological exposure and health effects from the Mayak Production Association', *Health Physics*, 71(4), pp. 513–521.
- Nuclear Safety Commission of Japan (NSC) (2000). Summary Report on the JCO Criticality Accident in Tokaimura. Available at: <https://www.nsr.go.jp/english/library/> (Accessed: 22 June 2025).
- Ouchi, H. and Shinohara, M. (2000). Medical Management of Radiation Accident Victims in Japan: The Tokaimura Case. *Journal of Radiation Research*, 41(Suppl), pp.89–100.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) (2000). Lessons Learned from the JCO Criticality Accident in Japan. NUREG/IA-0143.
- UNDP (United Nations Development Programme), 2002. The Human Consequences of the Chernobyl Nuclear Accident: A Strategy for Recovery. New York: UNDP.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. New York: United Nations.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 2014. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2013 Report, Volume I. New York: United Nations.
- WHO (World Health Organization), 2006. Health effects of the Chernobyl accident and special health care programmes. Geneva: WHO.
- WHO (World Health Organization), 2013. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami. Geneva: WHO.
- World Nuclear Association (WNA) (2023). Tokaimura Criticality Accident. Available at: <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/tokaimura-criticality-accident.aspx> (Accessed: 22 June 2025)
- Yablokov, A.V. (2009) 'Radioactive contamination of the Techa River and surrounding environment', *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1181(1), pp. 301–326.
- Boice JD. "Radiation epidemiology and the US radiation effects research programs." *J Radiol Prot.* 2011.
- CTBTO – Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization. (2020). Nuclear Testing History.
- Fairlie, I. and Sumner, D., 2006. The other report on Chernobyl (TORCH). Berlin: European Greens.
- Glasstone, S., & Dolan, P. J. (1977). The Effects of nuclear weapons (3rd ed.). United States Department of Defense and Department of Energy.
- Gourlay, S. (2017). "Nuclear Accidents: Trends and Lessons Learned." *Journal of Risk Research*.

- Hansen, C. (2001). U.S. Nuclear Weapons: The Secret History. Crown Publishing Group.
- Hersey, J. (1946). Hiroshima. New Yorker / Alfred A. Knopf.
- Holloway, D., 1994. Stalin and the Bomb: The Soviet Union and Atomic Energy 1939–1956. New Haven: Yale University Press.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 1992. The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1. Safety Series No. 75-INSAG-7. Vienna: IAEA.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 2006. Chernobyl's legacy: Health, environmental and socio-economic impacts and recommendations to the governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine. Vienna: IAEA.
- IAEA – International Atomic Energy Agency. (2006). Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience.
- IAEA. "The Fukushima Daiichi Accident," Technical Volume 2/5, 2008.
- INSAG, 1992. The Chernobyl Accident: A Report by the International Nuclear Safety Advisory Group. Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). "The International Nuclear and Radiological Event Scale (INES)." www.iaea.org.
- Makhijani, A., Hu, H., & Yih, K. (1991). Radioactive Heaven and Earth: The Health and Environmental Effects of Nuclear Weapons Testing in, on, and above the Earth. Apex Press / International Physicians for the Prevention of Nuclear War.
- McNeill, J. R. (2000). Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World. W. W. Norton & Company.
- Medvedev, G., 1990. The Truth About Chernobyl. New York: Basic Books.
- NRC. "Report of the President's Commission on the Accident at Three Mile Island." 1980.
- Rhodes, R. (1986). The Making of the Atomic Bomb. Simon & Schuster.
- Shrader-Frechette, K. (2011). "What Will Work: Fighting Climate Change with Renewable Energy, Not Nuclear Power." Oxford University Press.
- Simon, S. L., Bouville, A., & Land, C. E. (2006). Fallout from nuclear weapons tests and cancer risks. American Scientist, 94(1), 48–57.
- U.S. Department of Defense. (2004). Nuclear Matters Handbook.
- U.S. GAO. "Nuclear Regulation: A Perspective on Liability Protection for a Nuclear Plant Accident." 1981.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). "Sources and Effects of Ionizing Radiation." UNSCEAR Reports.

United Nations. (1961). General Assembly Resolution 1653 (XVI): Declaration on the Prohibition of the Use of Nuclear and Thermonuclear Weapons.

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations.

Walker J.S. "Three Mile Island: A Nuclear Crisis in Historical Perspective." University of California Press, 2004.

WHO – World Health Organization. (2016). Ionizing Radiation, Health Effects and Protective Measures.

Wing S., Richardson D., Armstrong D., Crawford-Brown D. "A reevaluation of cancer incidence near the Three Mile Island nuclear plant: the collision of evidence and assumptions." Environ Health Perspect. 1997.

World Nuclear Association. "Nuclear Power and the Environment." www.world-nuclear.org.

World Nuclear Association. (2023). World Nuclear Power Reactors and Uranium Requirements.

Yamazaki, J. N. (1995). Medical Effects of the Atomic Bomb in Hiroshima and Nagasaki. Parthenon Publishing.

- World Nuclear Association. (2023). World Nuclear Power Reactors and Uranium Requirements.
- Glasstone, S., & Dolan, P. J. (1977). The Effects of nuclear weapons (3rd ed.). U.S. Department of Defense and U.S. Department of Energy.
- Hersey, J. (1946). Hiroshima. New Yorker / Alfred A. Knopf.
- Rhodes, R. (1986). The Making of the Atomic Bomb. Simon & Schuster.
- United Nations. (1961). General Assembly Resolution 1653 (XVI): Declaration on the Prohibition of the Use of Nuclear and Thermonuclear Weapons.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations.
- Yamazaki, J. N. (1995). Medical Effects of the Atomic Bomb in Hiroshima and Nagasaki. Parthenon Publishing.
- Glasstone, S., & Dolan, P. J. (1977). The Effects of nuclear weapons (3rd ed.). United States Department of Defense and Department of Energy.
- Rhodes, R. (1986). The Making of the Atomic Bomb. Simon & Schuster.

- Hansen, C. (2001). U.S. Nuclear Weapons: The Secret History. Crown Publishing Group.
- UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations.
- WHO – World Health Organization. (2016). Ionizing Radiation, Health Effects and Protective Measures.
- Simon, S. L., Bouville, A., & Land, C. E. (2006). Fallout from nuclear weapons tests and cancer risks. *American Scientist*, 94(1), 48–57.
- Makhijani, A., Hu, H., & Yih, K. (1991). *Radioactive Heaven and Earth: The Health and Environmental Effects of Nuclear Weapons Testing in, on, and above the Earth*. Apex Press / International Physicians for the Prevention of Nuclear War.
- IAEA – International Atomic Energy Agency. (2006). *Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience*.
- Kearny, C. H. (1986). *Nuclear War Survival Skills* (Updated ed.). Oak Ridge National Laboratory.
- McNeill, J. R. (2000). *Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World*. W. W. Norton & Company.
- U.S. Department of Defense. (2004). *Nuclear Matters Handbook*.
- CTBTO – Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization. (2020). *Nuclear Testing History*.
- Yamazaki, J. N. (1995). *Medical Effects of the Atomic Bomb in Hiroshima and Nagasaki*. Parthenon Publishing.
- Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ). (2024). Ετήσια Έκθεση Ραδιολογικής Προστασίας στην Ελλάδα. www.eeae.gr
- International Atomic Energy Agency (IAEA). "The International Nuclear and Radiological Event Scale (INES)." www.iaea.org.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). "Sources and Effects of Ionizing Radiation." UNSCEAR Reports.
- World Nuclear Association. "Nuclear Power and the Environment." www.world-nuclear.org.
- Gourlay, S. (2017). "Nuclear Accidents: Trends and Lessons Learned." *Journal of Risk Research*.
- Shrader-Frechette, K. (2011). "What Will Work: Fighting Climate Change with Renewable Energy, Not Nuclear Power." Oxford University Press.
- Boice JD. "Radiation epidemiology and the US radiation effects research programs." *J Radiol Prot*. 2011.
- IAEA. "The Fukushima Daiichi Accident," Technical Volume 2/5, 2008.

- NRC. "Report of the President's Commission on the Accident at Three Mile Island." 1980.
 - U.S. GAO. "Nuclear Regulation: A Perspective on Liability Protection for a Nuclear Plant Accident." 1981.
 - Walker J.S. "Three Mile Island: A Nuclear Crisis in Historical Perspective." University of California Press, 2004.
 - Wing S., Richardson D., Armstrong D., Crawford-Brown D. "A reevaluation of cancer incidence near the Three Mile Island nuclear plant: the collision of evidence and assumptions." *Environ Health Perspect.* 1997.
 - Fairlie, I. and Sumner, D., 2006. *The other report on Chernobyl (TORCH)*. Berlin: European Greens.
 - Holloway, D., 1994. *Stalin and the Bomb: The Soviet Union and Atomic Energy 1939–1956*. New Haven: Yale University Press.
 - IAEA (International Atomic Energy Agency), 1992. *The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1*. Safety Series No. 75-INSAG-7. Vienna: IAEA.
 - IAEA (International Atomic Energy Agency), 2006. *Chernobyl's legacy: Health, environmental and socio-economic impacts and recommendations to the governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine*. Vienna: IAEA.
 - INSAG, 1992. *The Chernobyl Accident: A Report by the International Nuclear Safety Advisory Group*. Vienna: IAEA.
- U.S. Department of Energy. (1982). *United States Nuclear Tests: July 1945 through September 1992*. Nevada Operations Office.
- Barker, H. M. (2012). *Bravo for the Marshallese: Regaining Control in a Post-Nuclear, Post-Colonial World*. Cengage Learning
- Simon, S. L., et al. (2010). "Radiation doses and cancer risks in the Marshall Islands: National Cancer Institute Report." *Health Physics*, 99(2), 157–176.
- Rhodes, R. (1986). *The Making of the Atomic Bomb*. Simon & Schuster.
- National Research Council (U.S.). (2005). *Radiation Source Use and Replacement: Abbreviated Version*. National Academies Press.
- Johnston, B. R., et al. (2007). *Half-lives and Half-truths: Confronting the Radioactive Legacies of the Cold War*. School for Advanced Research Press.
- .