



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

**«ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ: Η ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΥ ΜΕΛΛΟΝΤΟΣ Ή
ΕΝΑΣ ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΟΤΗΤΑ»**
**«NUCLEAR ENERGY: THE ENERGY SOURCE OF THE FUTURE OR A
DANGER TO HUMANITY»**

Υπό

Λίτσιος Γεώργιος AM:2919097

ΛεγκίσιΚριστιάνο AM:2919143

Πτυχιακή Εργασία

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

Λάρισα, 2023

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Παπανδριανός Νικόλαος
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή
Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Κωτσόπουλος Σπυρίδων
Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή Τεχνολογίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Θεοδοσίου Θεοδόσιος
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	Λίτσιος
ΟΝΟΜΑ	Γεώργιος
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	2919097
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	05/10/2023
ΥΠΟΓΡΑΦΗ	

© 2023. Λίτσιος Γεώργιος

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

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	Λεγκίσι
ΟΝΟΜΑ	Κριστιάνο
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	2919143
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	05/10/2023
ΥΠΟΓΡΑΦΗ	

© 2023. Λεγκίσι Κριστιάνο

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Συνοπτικά, η διερεύνηση του οφέλους, το οποίο προκύπτει από την χρήση της πυρηνικής ενέργειας και των διαφόρων διαστάσεων της, αποδεικνύεται ένα σύνθετο και πολύπλευρο θέμα. Η έννοια της πυρηνικής ενέργειας, με τις δυνατότητές της για καθαρή και αποδοτική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, φέρνει πλεονεκτήματα όπως μειωμένες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και ενεργειακή ασφάλεια. Ωστόσο, παρουσιάζει επίσης προκλήσεις και ηθικά διλήμματα που σχετίζονται με την ασφάλεια, τη διαχείριση των απορριμμάτων και τα πιθανά ατυχήματα. Τα θεσμικά και ρυθμιστικά πλαίσια που αφορούν στην πυρηνική ενέργεια διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της ασφάλειας και της λογοδοσίας. Διεθνείς συμφωνίες και οργανισμοί, όπως ο ΔΟΑΕ και οι συνθήκες μη διάδοσης, θεσπίζουν πρότυπα και προωθούν την παγκόσμια συνεργασία για την ασφαλή και υπεύθυνη χρήση της πυρηνικής ενέργειας.

Τα ηθικά ζητήματα είναι πρωταρχικής σημασίας στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων σχετικά με την πυρηνική ενέργεια. Η εξισορρόπηση των οφελών και των κινδύνων απαιτεί την αξιολόγηση των αρχών της ασφάλειας, της δικαιοσύνης, της ισότητας μεταξύ των γενεών και της ενημερωμένης συναίνεσης. Τα πυρηνικά ατυχήματα, συμπεριλαμβανομένων των ThreeMileIsland, του Τσερνομπίλ και της Φουκουσίμα, υπενθυμίζουν τις καταστροφικές συνέπειες των ανεπαρκών μέτρων ασφαλείας και των ανθρώπινων λαθών. Ο αντίκτυπος στην ανθρώπινη υγεία και στους εργαζομένους είναι μια άλλη σημαντική πτυχή της πυρηνικής ενέργειας, τονίζοντας τη σημασία των ολοκληρωμένων μέτρων για την ασφάλεια και την υγεία στην εργασία και την προάσπιση των εργαζομένων. Συμπερασματικά, η πυρηνική ενέργεια προσφέρει οφέλη, αλλά η εφαρμογή της απαιτεί ισχυρά μέτρα ασφαλείας, ηθική λήψη αποφάσεων και μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που προστατεύει τους εργαζόμενους, το περιβάλλον και τις μελλοντικές γενιές.

Λέξεις κλειδιά: πυρηνική ενέργεια, ασφάλεια, κανονισμοί, ηθικά διλήμματα, πυρηνικός αντιδραστήρας, μορφές ενέργειας, υγεία των εργαζομένων

ABSTRACT

In summary, the exploration of nuclear energy and its various dimensions reveals a complex and multifaceted topic. The concept of nuclear energy, with its potential for clean and efficient power generation, brings advantages such as reduced greenhouse gas emissions and energy security. However, it also presents challenges and ethical dilemmas related to safety, waste management, and potential accidents. The institutional and regulatory frameworks surrounding nuclear energy play a crucial role in ensuring safety, security, and accountability. International agreements and organizations, such as the IAEA and non-proliferation treaties, establish standards and promote global cooperation in the safe and responsible use of nuclear energy. Ethical considerations are paramount in the decision-making processes concerning nuclear energy. Balancing the benefits and risks requires evaluating principles of safety, justice, intergenerational equity, and informed consent.

Nuclear accidents, including Three Mile Island, Chernobyl, and Fukushima, serve as stark reminders of the devastating consequences of inadequate safety measures and human errors. The impact on human health and workers is another significant aspect of nuclear energy, emphasizing the importance of comprehensive occupational safety and health measures and worker empowerment. In conclusion, nuclear energy offers potential benefits, but its implementation requires robust safety measures, ethical decision-making, and a comprehensive approach that safeguards workers, the environment, and future generations.

Keywords: nuclear energy, safety, regulations, ethical dilemmas, nuclear reactor, forms of energy, worker health.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το σημείωμα αυτό επιθυμούμε να ευχαριστήσουμε όλους όσοι συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Ευχαριστούμε θερμά τον καθηγητή μας κ.Παπανδριανό Νικόλαο που με την πολύτιμη βοήθεια του και τις παρατηρήσεις του συνέβαλε στην αρτιότερη εκπόνηση της πτυχιακής μας εργασίας.

Τέλος, θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας αλλά και τη βαθύτατη ευγνωμοσύνη μας στους γονείς μας που μας παρείχαν κάθε ηθική και υλική υποστήριξη καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μας.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	6
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ	12
1.1 Ορισμοί	12
1.2 Το άτομο	14
1.3 Πυρηνική σχάση	16
1.4 Μοντέλο σχάσης υγρής σταγόνας.....	21
1.5 Ο πυρηνικός αντιδραστήρας	23
1.6 Ζητήματα περιβαλλοντικού δικαίου	31
1.7 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από την χρήση της πυρηνικής ενέργειας.....	36
1.8 Πυρηνική σύντηξη	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	51
2.1 Ιστορική αναδρομή	51
2.1.1 Διεθνείς Οργανισμοί.....	51
2.1.2 Εθνικά ιδρύματα.....	52
2.1.3 Προκλήσεις και αντιπαραθέσεις	53
2.1.3 Ο ρόλος της κοινής αντίληψης.....	53
2.2 Διεθνείς συνθήκες.....	54
2.2.1 Ρόλος των Διεθνών Οργανισμών	60
2.2.2 Μέτρα Φυσικής Προστασίας	61
2.2.3 Ασφάλεια Προσωπικού.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ	64
3.1 Ο πυρηνικός τομέας στην Ευρώπη	64
3.2 Νομικό πλαίσιο	65
3.3 Σύμβαση ΙΑΕΑ για την πυρηνική ασφάλεια (1994).....	67
3.4 Οδηγία για την πυρηνική ασφάλεια 2009/71/ΕΥΡΑΤΟΜ	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ	71
4.1 Threemileisland	71
4.2 Chernobyl.....	73
4.3 Fukushima	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	80

5.1 Κόστος πυρηνικής ενέργειας	80
5.1.1 Κόστος κατασκευής πυρηνικού αντιδραστήρα.....	80
5.1.2 Κόστος λειτουργίας και συντήρησης.....	81
5.1.3 Κόστος καυσίμου	82
5.1.4 Κόστος παροπλισμού και διάθεσης απορριμμάτων	82
5.2 Ενεργειακή ασφάλεια και πυρηνική ενέργεια.....	83
5.2.1 Μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα	83
5.2.2 Διαφοροποίηση Πηγών Ενέργειας	84
5.2.3 Μακροπρόθεσμη Παροχή Ενέργειας	84
5.3 Οικονομικά οφέλη.....	85
5.3.1 Δημιουργία θέσεων εργασίας.....	85
5.3.2 Οικονομική Ανάπτυξη στις Κοινότητες υποδοχής.....	86
5.3.3 Τεχνολογία και Καινοτομία	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	88
6.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	88
6.1.1 Ηλιακή ενέργεια	88
6.1.2 Αιολική Ενέργεια	89
6.1.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια	89
6.1.4 Γεωθερμική Ενέργεια.....	90
6.1.5 Ενέργεια από βιομάζα	90
6.2 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας	90
6.2.1 Αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες.....	91
6.2.2 Αποθήκευση με αντλία	91
6.2.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας.....	92
6.2.4 Αποθήκευση ενέργειας πεπιεσμένου αέρα.....	94
6.3 Προκλήσεις και περιορισμοί εναλλακτικών πηγών ενέργειας.....	95
6.3.1 Διαλείπουσα και μεταβλητή φύση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	95
6.4.2 Ενοποίηση πλέγματος.....	97
6.4.3 Απαιτήσεις γης και πόρων	97
6.3.4 Ανταγωνιστικότητα κόστους	98
ΣΥΖΗΤΗΣΗ	100
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	105
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	107

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πυρηνική ενέργεια είναι ένα θέμα σημαντικής συζήτησης και εξέτασης, με τους υποστηρικτές να προβάλλουν τις δυνατότητές της ως καθαρής και αποδοτικής πηγής ενέργειας, ενώ οι επικριτές εκφράζουν ανησυχίες για την ασφάλεια, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις ηθικές της επιπτώσεις. Αυτή η πτυχιακή εργασία παρέχει μια θεώρηση των βασικών θεμάτων που αφορούν στη πυρηνική ενέργεια.

Η πυρηνική ενέργεια αξιοποιεί τη δύναμη των πυρηνικών αντιδράσεων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Βασίζεται στην αρχή της πυρηνικής σχάσης, όπου ο πυρήνας ενός ατόμου χωρίζεται σε μικρότερα θραύσματα, απελευθερώνοντας τεράστια ποσότητα ενέργειας [24]. Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας έχει υιοθετηθεί από πολλές χώρες ως μέσο για τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και τον μετριασμό των δυσμενών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Έχει τη δυνατότητα να παρέχει αξιόπιστη και συνεχή παροχή ενέργειας, με ελάχιστες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου [86].

Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας έχει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Από τη θετική πλευρά, οι πυρηνικοί σταθμοί μπορούν να παράγουν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς να συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση ή τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με την καύση ορυκτών καυσίμων [18]. Η πυρηνική ενέργεια μπορεί να βοηθήσει στην αντιμετώπιση των αυξανόμενων ενεργειακών απαιτήσεων των σύγχρονων κοινωνιών και στη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα, συμβάλλοντας έτσι στην παγκόσμια προσπάθεια για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής [107].

Ωστόσο, η χρήση της πυρηνικής ενέργειας εγείρει ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια, τη διαχείριση των αποβλήτων και την πιθανότητα καταστροφικών ατυχημάτων. Πυρηνικά ατυχήματα όπως το ThreeMileIsland, το Chernobyl και η Fukushima έχουν δείξει τις καταστροφικές συνέπειες που μπορεί να προκύψουν από

ανεπαρκή μέτρα ασφαλείας, τεχνολογικές αστοχίες και ανθρώπινα λάθη[24][104]. Αυτά τα περιστατικά είχαν μακροχρόνιες περιβαλλοντικές, υγειονομικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις, οδηγώντας σε αυξημένη δημόσια ανησυχία σχετικά με την ασφάλεια της χρήσης πυρηνικής ενέργειας.

Τα θεσμικά και ρυθμιστικά πλαίσια που αφορούν στην πυρηνική ενέργεια διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της ασφάλειας και της λογοδοσίας. Οι διεθνείς συμφωνίες, όπως η Σύμβαση της Διεθνούς Υπηρεσίας Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) για την Πυρηνική Ασφάλεια και η Συνθήκη για τη Μη Διάδοση των Πυρηνικών Όπλων, παρέχουν ένα πλαίσιο για παγκόσμια συνεργασία, πρότυπα ασφαλείας και προσπάθειες μη διάδοσης των αρνητικών επιπτώσεων, που μπορεί να φέρει η πυρηνική ενέργεια[87]. Αυτές οι συμφωνίες στοχεύουν στη θέσπιση κατευθυντήριων γραμμών για την ασφαλή και υπεύθυνη χρήση της πυρηνικής ενέργειας, δίνοντας έμφαση στη σημασία της διαφάνειας, της ανταλλαγής πληροφοριών και της τήρησης αυστηρών πρωτοκόλλων ασφαλείας.

Οι ηθικοί προβληματισμοί είναι επίσης κεντρικοί στη συζήτηση γύρω από την πυρηνική ενέργεια. Προκύπτουν ηθικά διλήμματα όταν σταθμίζονται τα πιθανά οφέλη της πυρηνικής ενέργειας έναντι των κινδύνων της. Αυτά τα διλήμματα περιλαμβάνουν την αξιολόγηση των αρχών της ασφάλειας, της δικαιοσύνης και της ισότητας μεταξύ των γενεών[108]. Η επίτευξη ισορροπίας μεταξύ της ανάγκης για ενέργεια και των πιθανών κινδύνων για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον και τις μελλοντικές γενιές απαιτεί προσεκτική δεοντολογική σκέψη και λήψη αποφάσεων.

Υπό το πρίσμα της περίπλοκης φύσης της πυρηνικής ενέργειας, αυτή η μελέτη στοχεύει να εμβαθύνει στις διάφορες διαστάσεις της, συμπεριλαμβανομένης της θετικής χρήσης της πυρηνικής ενέργειας, των θεσμικών πλαισίων, των κανονιστικών πρακτικών, των πυρηνικών ατυχημάτων, των ηθικών διλημάτων και των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία και τους εργαζόμενους. Εξετάζοντας αυτές τις πτυχές, ελπίζουμε να συμβάλουμε σε μια πιο ενημερωμένη και ολοκληρωμένη κατανόηση των θεμάτων που άπτονται της πυρηνικής ενέργειας και των συνεπειών τους στη κοινωνία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ

1.1 Ορισμοί

Η πυρηνική ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας που παράγεται από τη διάσπαση ή τη σύντηξη ατομικών πυρήνων. Αυτή η ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τροφοδοσίας πλοίων και υποβρυχίων και για άλλους σκοπούς. Οι ορισμοί που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια είναι σημαντικοί για την κατανόηση της επιστήμης, της τεχνολογίας και της πολιτικής που περιβάλλουν αυτή τη μορφή ενέργειας. Σε αυτό το δοκίμιο, θα διερευνήσουμε τους βασικούς ορισμούς που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια.

Πυρηνική ενέργεια:

Πυρηνική ενέργεια είναι η ενέργεια που απελευθερώνεται με διάσπαση ή σύντηξη των πυρήνων των ατόμων των στοιχείων. Η ενέργεια αξιοποιείται μέσω της διαδικασίας των πυρηνικών αντιδράσεων, οι οποίες μπορούν να παράγουν σημαντική ποσότητα ενέργειας σε σύγκριση με άλλες πηγές ενέργειας. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ), η πυρηνική ενέργεια ορίζεται ως «η ενέργεια που απελευθερώνεται από τις πυρηνικές αντιδράσεις και τη μετατροπή της μάζας σε ενέργεια, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί για πρακτική χρήση»[\[1\]](#).

Πυρηνικός αντιδραστήρας:

Ο πυρηνικός αντιδραστήρας είναι μια συσκευή που έχει σχεδιαστεί για να εκκινεί και να ελέγχει μια παρατεταμένη πυρηνική αλυσιδωτή αντίδραση. Η αντίδραση λαμβάνει χώρα στον πυρήνα του αντιδραστήρα, μέσα στον οποίο υπάρχει το καύσιμο, όπως ουράνιο ή πλουτώνιο, και ένασ επιβραδυντής, ο οποίος επιβραδύνει τα νετρόνια που παράγονται κατά τη διάρκεια της αντίδρασης. Η ενέργεια που παράγεται κατά τη διάρκεια της αντίδρασης χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του νερού, το οποίο με τη σειρά του δημιουργεί ατμό που οδηγεί τους στροβίλους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με τη Ρυθμιστική Επιτροπή Πυρηνικών των ΗΠΑ (NRC), "πυρηνικός αντιδραστήρας είναι μια συσκευή στην οποία πυρηνικές αλυσιδωτές

αντιδράσεις ξεκινούν, ελέγχονται και διατηρούνται με ρυθμό επαρκή για την παραγωγή θερμότητας ή άλλης ενέργειας" [2].

Πυρηνική σχάση:

Η πυρηνική σχάση είναι η διαδικασία διάσπασης του πυρήνα ενός ατόμου σε δύο ή περισσότερους μικρότερους πυρήνες, μαζί με την απελευθέρωση μεγάλης ποσότητας ενέργειας. Η διαδικασία μπορεί να συμβεί αυθόρμητα ή να προκληθεί από ένα νετρόνιο, το οποίο απορροφάται από τον πυρήνα, προκαλώντας τη διάσπασή του. Σύμφωνα με την American Nuclear Society (ANS), «πυρηνική σχάση είναι η διαδικασία κατά την οποία ο πυρήνας ενός ατόμου χωρίζεται σε δύο ή περισσότερους μικρότερους πυρήνες και απελευθερώνεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας»[3].

Πυρηνική σύντηξη:

Η πυρηνική σύντηξη είναι η διαδικασία συνένωσης δύο ή περισσότερων ατομικών πυρήνων για να σχηματιστεί ένας βαρύτερος πυρήνας, μαζί με την απελευθέρωση μεγάλης ποσότητας ενέργειας. Αυτή η διαδικασία συμβαίνει φυσικά στα αστέρια, όπου η υψηλή θερμοκρασία και πίεση επιτρέπουν στους ατομικούς πυρήνες να ξεπεράσουν τη φυσική τους απόθεση και να συντηχθούν μεταξύ τους. Σύμφωνα με το ANS, «πυρηνική σύντηξη είναι η διαδικασία κατά την οποία δύο ατομικοί πυρήνες ενώνονται για να σχηματίσουν έναν βαρύτερο πυρήνα, απελευθερώνοντας μεγάλη ποσότητα ενέργειας» [3].

Ραδιενεργή διάσπαση:

Η ραδιενεργή διάσπαση είναι η διαδικασία με την οποία ένας ασταθής ατομικός πυρήνας εκπέμπει ακτινοβολία με τη μορφή σωματιδίων ή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αυτή η διαδικασία μπορεί να συμβεί είτε αυθόρμητα είτε να προκληθεί από εξωτερικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η πίεση ή απορρόφηση ενός θερμικού νετρονίου. Η διάσπαση μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός πιο σταθερού πυρήνα ή την εκπομπή πρόσθετων σωματιδίων ή ενέργειας. Σύμφωνα με την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (EPA), "ραδιενεργή διάσπαση είναι η διαδικασία κατά την οποία ένας ασταθής ατομικός πυρήνας χάνει ενέργεια εκπέμποντας ακτινοβολία, όπως σωματίδια άλφα, σωματίδια βήτα ή ακτίνες γάμμα"[4].

Πυρηνικά απόβλητα:

Τα πυρηνικά απόβλητα είναι το υποπροϊόν των πυρηνικών αντιδράσεων, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής πυρηνικής ενέργειας από πυρηνικό αντιδραστήρα και της παραγωγής πυρηνικών όπλων. Τα απόβλητα μπορεί να περιλαμβάνουν μια ποικιλία υλικών, συμπεριλαμβανομένων αναλωθέντων καυσίμων, μολυσμένων υλικών και άλλων ραδιενεργών ουσιών. Η διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων είναι ένα μεγάλο εμπόδιο, καθώς τα απόβλητα μπορούν να παραμείνουν επικίνδυνα για χιλιάδες χρόνια. Σύμφωνα με την Παγκόσμια Πυρηνική Ένωση (WNA), «πυρηνικά απόβλητα είναι το υλικό που προκύπτει από πυρηνικές αντιδράσεις, συμπεριλαμβανομένων των αναλωθέντων καυσίμων και άλλων ραδιενεργών υλικών, που πρέπει να διαχειρίζονται και να απορρίπτονται με ασφάλεια» [5].

1.2 Το άτομο

Το άτομο είναι στοιχειώδης μονάδα ύλης. Ο όρος άτομο εισήχθη για πρώτη φορά από τον αρχαίο Έλληνα φιλόσοφο Δημόκριτο, ο οποίος πρότεινε ότι η ύλη αποτελείται από μικροσκοπικά, αδιαίρετα σωματίδια που ονόμασε άτομα. Ωστόσο, μόνο στις αρχές του 20ου αιώνα οι επιστήμονες άρχισαν να κατανοούν την πραγματική φύση των ατόμων.

Η σύγχρονη ατομική θεωρία προτάθηκε από τον John Dalton στις αρχές του 1800. Η θεωρία του Dalton βασίστηκε στην ιδέα ότι όλη η ύλη αποτελείται από άτομα, τα οποία είναι αδιαίρετα και άφθαρτα. Σύμφωνα με τον Dalton, τα άτομα διαφορετικών στοιχείων έχουν διαφορετικά βάρη και συνδυάζονται για να σχηματίσουν ενώσεις σε σταθερές αναλογίες. Αν και η θεωρία του Dalton ήταν ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός στη μελέτη των ατόμων, είχε ορισμένους περιορισμούς, όπως η αδυναμία να εξηγήσει την ύπαρξη ισοτόπων και των υποατομικών σωματιδίων μέσα στα άτομα [7].

Μόλις στις αρχές του 20ου αιώνα οι επιστήμονες άρχισαν να αποκαλύπτουν τα μυστήρια του ατόμου. Το 1909, ο Ernest Rutherford πραγματοποίησε ένα πείραμα στο οποίο βομβάρδισε ένα λεπτό φύλλο χρυσού φύλλου με σωματίδια άλφα. Τα απροσδόκητα αποτελέσματα αυτού του πειράματος οδήγησαν τον Ράδερφορντ να προτείνει το πυρηνικό μοντέλο του ατόμου. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, το άτομο

αποτελείται από έναν κεντρικό πυρήνα, ο οποίος περιέχει θετικά φορτισμένα πρωτόνια και αφόρτιστα νετρόνια, και περιβάλλεται από αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια σε στοιβάδες ή ενεργειακά επίπεδα[8].

Η ανακάλυψη του νετρονίου από τον James Chadwick το 1932 ολοκλήρωσε την εικόνα του ατόμου όπως το ξέρουμε σήμερα. Τα νετρόνια δεν έχουν φορτίο αλλά συμβάλλουν στη μάζα του πυρήνα, αποτελώντας περίπου το ήμισυ της μάζας του. Τα πρωτόνια, από την άλλη πλευρά, έχουν θετικό φορτίο και τα ηλεκτρόνια έχουν αρνητικό φορτίο. Ο αριθμός των πρωτονίων στον πυρήνα ενός ατόμου καθορίζει τον ατομικό του αριθμό και συνεπώς την ταυτότητά του ως συγκεκριμένου στοιχείου.

Η δομή του ατόμου είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων της ύλης. Η διάταξη των ηλεκτρονίων στα ενεργειακά επίπεδα ενός ατόμου καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο το άτομο θα αντιδράσει χημικά με άλλα άτομα. Τα επίπεδα ενέργειας αριθμούνται από το ένα έως το επτά, με το επίπεδο ένα να είναι πιο κοντά στον πυρήνα και το επίπεδο επτά να είναι το πιο απομακρυσμένο. Τα ηλεκτρόνια στο εξώτατο ενεργειακό επίπεδο, γνωστό ως επίπεδο σθένους, είναι τα πιο αντιδραστικά.

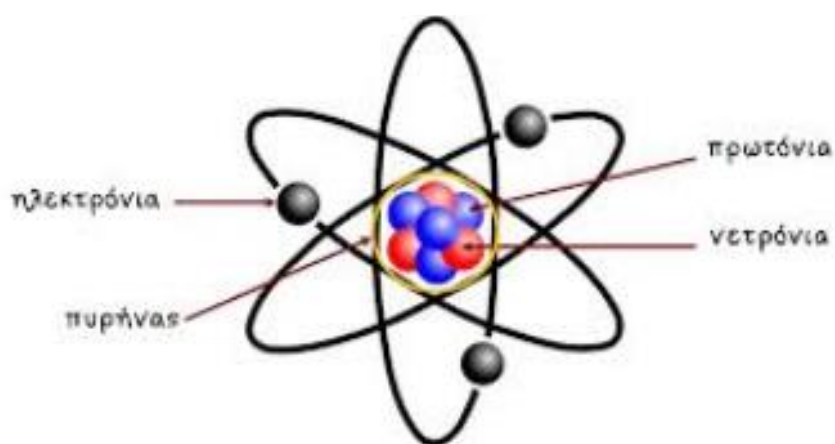
Η συμπεριφορά των ηλεκτρονίων στα άτομα περιγράφεται από την κβαντομηχανική, έναν κλάδο της φυσικής που ασχολείται με τη συμπεριφορά των σωματιδίων σε ατομικό και υποατομικό επίπεδο. Η κβαντομηχανική παρέχει ένα μαθηματικό πλαίσιο για την κατανόηση των πιθανοτήτων διάφορων γεγονότων, όπως η πιθανότητα εύρεσης ενός ηλεκτρονίου σε μια συγκεκριμένη θέση ή ενεργειακή κατάσταση. Η ανάπτυξη της κβαντικής μηχανικής στις αρχές του 20ου αιώνα έφερε επανάσταση στην κατανόησή μας για το άτομο και οδήγησε στην ανάπτυξη πολλών τεχνολογιών στις οποίες βασιζόμαστε σήμερα, όπως τρανζίστορ, λέιζερ και μηχανές μαγνητικής τομογραφίας.

Εκτός από τα πρωτόνια, τα νετρόνια και τα ηλεκτρόνια, τα άτομα περιέχουν επίσης άλλα υποατομικά σωματίδια, όπως ποζιτρόνια, μόνια και νετρίνα. Αυτά τα σωματίδια είναι συνήθως ασταθή και αποσυντίθενται με την πάροδο του χρόνου, καθιστώντας δύσκολη τη μελέτη τους. Ωστόσο, η ύπαρξή τους παρέχει περαιτέρω στοιχεία για την πολυπλοκότητα και την ποικιλομορφία του ατομικού κόσμου.

Το άτομο είναι ένα θεμελιώδες δομικό στοιχείο της ύλης, που έχει μελετηθεί εδώ και αιώνες. Η κατανόησή μας για το άτομο έχει εξελιχθεί σημαντικά με την πάροδο του χρόνου, από την αρχαία ελληνική αντίληψη των αδιαίρετων σωματιδίων στη σύγχρονη κατανόηση των υποατομικών σωματιδίων και της κβαντικής μηχανικής. Η μελέτη των ατόμων είναι απαραίτητη για την κατανόηση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων της ύλης και έχει οδηγήσει σε πολλές σημαντικές τεχνολογικές προόδους.

Ο ρόλος της ισχυρής πυρηνικής δύναμης:

Μία από τις βασικές πτυχές που λείπει στην προηγούμενη συζήτηση είναι η ισχυρή πυρηνική δύναμη, η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο στη συνοχή των ατομικών πυρήνων. Η ισχυρή πυρηνική δύναμη είναι μια θεμελιώδης αλληλεπίδραση μεταξύ πρωτονίων και νετρονίων μέσα στον πυρήνα, συγκρατώντας τα μαζί παρά την απωστική ηλεκτρομαγνητική δύναμη μεταξύ των θετικά φορτισμένων πρωτονίων[9]. Αυτή η δύναμη είναι υπεύθυνη για τη δέσμευση νουκλεονίων (πρωτόνια και νετρόνια) μέσω της ανταλλαγής σωματιδίων που ονομάζονται μεσόνια[9].



Εικόνα 1: Το άτομο[16]

1.3 Πυρηνική σχάση

Η πυρηνική σχάση είναι μια διαδικασία κατά την οποία ο πυρήνας ενός ατόμου χωρίζεται σε δύο μικρότερους πυρήνες, απελευθερώνοντας μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Αυτή η διαδικασία είναι η βασικός άξονας της πυρηνικής ενέργειας και των πυρηνικών όπλων. Η πυρηνική σχάση ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά από τους Otto Hahn και Fritz Strassmann το 1938 όταν βομβάρδισαν άτομα ουρανίου με νετρόνια

και παρατήρησαν την παραγωγή ελαφρύτερων στοιχείων, τα οποία έδειξαν ότι ο πυρήνας του ουρανίου είχε διασπαστεί.

Η διαδικασία σχάσης ξεκινά με την απορρόφηση ενός νετρονίου από τον πυρήνα ενός σχάσιμου ατόμου, όπως το ουράνιο-235 ή το πλουτόνιο-239. Η απορρόφηση του νετρονίου αυξάνει την ενέργεια του πυρήνα, με αποτέλεσμα να γίνει ασταθής και να χωριστεί σε δύο μικρότερους πυρήνες. Η διάσπαση του πυρήνα απελευθερώνει επίσης δύο ή τρία νετρόνια και μια μεγάλη ποσότητα ενέργειας με τη μορφή ακτινώνγάμμα και κινητικής ενέργειας. Αυτά τα νετρόνια μπορούν στη συνέχεια να ξεκινήσουν τη σχάση σε άλλα σχάσιμα άτομα, με αποτέλεσμα μια αλυσιδωτή αντίδραση.

Η ενέργεια που απελευθερώνεται από την πυρηνική σχάση αξιοποιείται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα, η διαδικασία σχάσης ελέγχεται χρησιμοποιώντας υλικά που ονομάζονται ράβδοι ελέγχου για την απορρόφηση των νετρονίων και την επιβράδυνση ή τη διακοπή της αλυσιδωτής αντίδρασης. Η ενέργεια που απελευθερώνεται από τη διαδικασία σχάσης χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του νερού και την παραγωγή ατμού, ο οποίος στη συνέχεια οδηγεί τους στροβίλους στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας[17].

Οι αντιδράσεις πυρηνικής σχάσης περιλαμβάνουν μια σειρά από πολύπλοκες φυσικές και χημικές διεργασίες. Η αρχική απορρόφηση ενός νετρονίου από έναν σχάσιμο πυρήνα οδηγεί στο σχηματισμό ενός σύνθετου πυρήνα που είναι διεγερμένος και ασταθής. Αυτός ο σύνθετος πυρήνας υφίσταται στη συνέχεια μια σειρά από πολύπλοκες μεταβάσεις, συμπεριλαμβανομένης της εκπομπής μιας ή περισσότερων ακτινώνγάμμα, προτού διασπαστεί σε δύο μικρότερους πυρήνες. Τα δύο θραύσματα που σχηματίζονται στην αντίδραση σχάσης έχουν επίσης κάποια κινητική ενέργεια, η οποία απελευθερώνεται ως θερμότητα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η διαδικασία της σχάσης είναι εξαιρετικά εξώθερμη, απελευθερώνοντας μεγάλη ποσότητα ενέργειας με τη μορφή θερμότητας και ακτινοβολίας. Η ενέργεια απελευθερώνεται με τη μορφή κινητικής ενέργειας των θραυσμάτων σχάσης, των ακτινώνγάμμα και των νετρονίων. Η ποσότητα ενέργειας που απελευθερώνεται σε μια αντίδραση πυρηνικής σχάσης είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που απελευθερώνεται

σε χημικές αντιδράσεις, όπως η καύση ή η οξείδωση. Για παράδειγμα, ένας μοναδικός πυρήνας ουρανίου-235 μπορεί να απελευθερώσει έως και 200 MeV ενέργειας σε μια αντίδραση σχάσης, ενώ ένα μόνο μόριο βενζίνης απελευθερώνει μόνο περίπου 3 eV ενέργειας κατά την καύση[19].

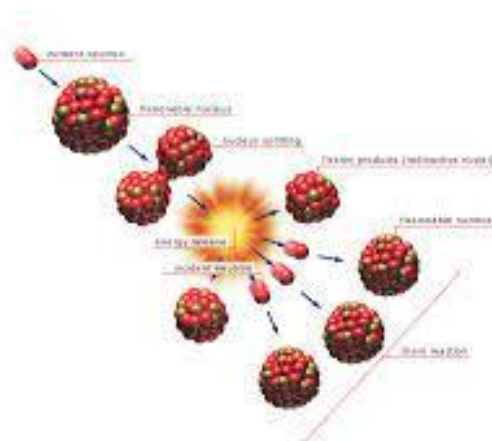
Ο ρυθμός των αντιδράσεων πυρηνικής σχάσης καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της συγκέντρωσης σχάσιμου υλικού, του ρυθμού παραγωγής και απορρόφησης νετρονίων και της διαθεσιμότητας ενεργειακών δεκτών. Σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα, αυτοί οι παράγοντες ελέγχονται προσεκτικά για να διασφαλιστεί ότι οι αντιδράσεις σχάσης εξελίσσονται με ελεγχόμενο και βιώσιμο ρυθμό. Η χρήση ράβδων ελέγχου, που μπορούν να απορροφήσουν νετρόνια και να επιβραδύνουν ή να σταματήσουν την αλυσιδωτή αντίδραση, είναι βασικό στοιχείο σε αυτόν τον έλεγχο[20]. Ωστόσο, υπάρχουν και πολλά ζητήματα που έρχεται αντιμέτωπη η χρήση της πυρηνικής ενέργειας.

Μία από τις κύριες προκλήσεις που συνδέονται με την πυρηνική σχάση είναι το ζήτημα των πυρηνικών αποβλήτων. Τα πυρηνικά έργα των κρατών για την παραγωγή ενέργειας και τη δημιουργία πυρηνικών όπλων δημιουργούν πυρηνικά απόβλητα. Για την απόρριψή τους χρησιμοποιούνται συχνά εγκαταστάσεις προσωρινής αποθήκευσης, ενώ η ταφή σε ερήμους και υπόγεια σπήλαια σε απομακρυσμένες τοποθεσίες θεωρείται μόνιμη επιλογή. Η διαδικασία σχάσης παράγει μια ποικιλία ραδιενεργών ισοτόπων, μερικά από τα οποία έχουν μεγάλο χρόνο ημιζωής και μπορούν να παραμείνουν επικίνδυνα για χιλιάδες χρόνια. Η ασφαλής αποθήκευση και διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων αποτελεί, επομένως, μείζον μέλημα για τη βιομηχανία πυρηνικής ενέργειας και για τις κυβερνήσεις σε όλο τον κόσμο. Οι τρέχουσες μέθοδοι αποθήκευσης και διάθεσης πυρηνικών αποβλήτων περιλαμβάνουν τις βαθιές γεωλογικές αποθήκες και την αποθήκευση σε ξηρό βαρέλι[21].

Ένα άλλο θέμα που σχετίζεται με την πυρηνική σχάση είναι ο κίνδυνος ατυχημάτων ή συμβάντων. Οι πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής είναι πολύπλοκες και άκρως τεχνικές εγκαταστάσεις που απαιτούν προσεκτική διαχείριση και επίβλεψη για να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία τους. Ατυχήματα όπως η καταστροφή του Τσερνομπίλ το 1986 και η καταστροφή της Φουκουσίμα το 2011 έχουν τονίσει τους πιθανούς κινδύνους που συνδέονται με την πυρηνική ενέργεια και τη σημασία των

ισχυρών μέτρων ασφαλείας και των σχεδίων αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης[22].

Παρά αυτάτα θέματα, η πυρηνική σχάση εξακολουθεί να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην κάλυψη των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών. Σύμφωνα με την Παγκόσμια Πυρηνική Ένωση, οι πυρηνικοί σταθμοί παρέχουν σήμερα περίπου το 10% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας και υπάρχουν σχέδια για την κατασκευή νέων αντιδραστήρων σε χώρες όπως η Κίνα, η Ινδία και η Ρωσία. Η πυρηνική ενέργεια θεωρείται από ορισμένους ως βασικό συστατικό ενός ενεργειακού συστήματος χαμηλών εκπομπών άνθρακα, καθώς δεν παράγει εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και μπορεί να λειτουργεί αξιόπιστα και συνεχώς.



© 2004 GK International, all rights reserved.

Εικόνα 2: Πυρηνική σχάση[23]

Ένας τομέας συνεχιζόμενης έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα της πυρηνικής σχάσης είναι η ανάπτυξη προηγμένων σχεδίων αντιδραστήρων. Αυτά περιλαμβάνουν μικρούς αρθρωτούς αντιδραστήρες, οι οποίοι είναι μικρότεροι και πιο ευέλικτοι από τους παραδοσιακούς πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, και προηγμένους γρήγορους αντιδραστήρες, οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούν πιο αποτελεσματικά το πυρηνικό καύσιμο και να μειώνουν την ποσότητα των πυρηνικών αποβλήτων που παράγονται. Άλλοι τομείς έρευνας περιλαμβάνουν τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων, όπως το θόριο, και την ανάπτυξη προηγμένων υλικών που μπορούν να αντέξουν τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την πυρηνική σχάση.

Η διαδικασία της πυρηνικής σχάσης συνοδεύεται από ένα φαινόμενο γνωστό ως έλλειμμα μάζας. Σύμφωνα με τη διάσημη εξίσωση του Αϊνστάιν, $E=mc^2$, η ενέργεια (E) είναι ισοδύναμη με τη μάζα (m) επί την ταχύτητα του φωτός στο τετράγωνο (c^2). Κατά τη διάρκεια της πυρηνικής σχάσης, η συνολική μάζα των θραυσμάτων που προκύπτουν είναι ελαφρώς μικρότερη από τη μάζα του αρχικού πυρήνα. Αυτή η διαφορά μάζας μετατρέπεται σε ενέργεια, όπως υπαγορεύεται από την εξίσωση του Αϊνστάιν. Η απελευθερωμένη ενέργεια, με τη μορφή της κινητικής ενέργειας των θραυσμάτων και των εκπεμπόμενων σωματιδίων, είναι μια εκδήλωση της ενέργειας δέσμησης, η οποία είναι η ενέργεια που απαιτείται για να συγκρατηθούν τα νουκλεόνια (πρωτόνια και νετρόνια) μαζί στον πυρήνα.

Το έλλειμμα μάζας είναι η διαφορά μεταξύ της μάζας ενός ατομικού πυρήνα και του αθροίσματος των μαζών των νουκλεονίων που τον αποτελούν. Αυτή η διαφορά οφείλεται στην ενέργεια δέσμησης, η οποία είναι η ενέργεια που απαιτείται για να συγκρατηθούν τα νουκλεόνια μαζί στον πυρήνα. Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια δέσμησης, τόσο μικρότερη είναι η μάζα του πυρήνα. Η ενέργεια δέσμησης αντιστοιχεί στη μάζα που λείπει από τον πυρήνα, και σύμφωνα με τη διάσημη εξίσωση του Αϊνστάιν, $E=mc^2$, αυτή η μάζα μπορεί να μετατρέπεται σε ενέργεια.

Κατά τη διάρκεια της πυρηνικής σχάσης, ένας βαρύς πυρήνας όπως του ουράνιου-235 χωρίζεται σε δύο ελαφρότερους πυρήνες, γνωστούς ως θρύμματα. Το άθροισμα των μαζών των θρυμμάτων είναι λιγότερο από τη μάζα του αρχικού πυρήνα. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει έλλειμμα μάζας στη διάδοχη. Αυτό το έλλειμμα μάζας αποδίδεται στη διαφορά των ενεργειών δέσμησης μεταξύ του αρχικού και των τελικών πυρήνων. Αυτή η ενέργεια εκλύεται με τη μορφή της κινητικής ενέργειας των θραυσμάτων και των εκπεμπόμενων σωματιδίων, όπως τα νετρόνια και τα γ -κύματα. Αυτή είναι η πηγή της παραγόμενης ενέργειας κατά τη διαδικασία της πυρηνικής σχάσης [23].

Η κατανόηση του μοντέλου σταγονιδίων, του ελλείμματος μάζας και της δεσμευτικής ενέργειας παρέχει πολύτιμες γνώσεις για τις περιπλοκές της πυρηνικής σχάσης. Αυτές οι έννοιες βοηθούν στην εξήγηση των θεμελιωδών μηχανισμών πίσω από την απελευθέρωση ενέργειας κατά τη διαδικασία της σχάσης και υπογραμμίζουν τη σημασία των δυνάμεων πυρηνικής δέσμησης για τη διατήρηση της σταθερότητας εντός των ατομικών πυρήνων. Με την περαιτέρω διερεύνηση αυτών των πτυχών, οι

επιστήμονες μπορούν να βελτιώσουν την κατανόησή τους για την πυρηνική σχάση και να χρησιμοποιήσουν αυτή τη γνώση για να βελτιστοποιήσουν τα σχέδια των αντιδραστήρων, να βελτιώσουν τα μέτρα ασφαλείας και να εξερευνήσουν εναλλακτικές μορφές πυρηνικής ενέργειας[23].

Συνοπτικά, έχει τη δυνατότητα να παρέχει μια σημαντική πηγή καθαρής και αξιόπιστης ενέργειας, καθώς και σημαντικές εφαρμογές στην επιστημονική έρευνα. Ωστόσο, τα προβλήματα που σχετίζονται με τα πυρηνικά απόβλητα και την ασφάλεια απαιτούν προσεκτική διαχείριση και επίβλεψη. Απαιτείται συνεχής έρευνα και ανάπτυξη για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων και για τη διερεύνηση εναλλακτικών μορφών πυρηνικής ενέργειας, όπως η πυρηνική σύντηξη.

1.4 Μοντέλο σχάσης υγρής σταγόνας

Το μοντέλο σχάσης υγρής σταγόνας είναι ένας τρόπος να καταλάβουμε πώς οι ατομικοί πυρήνες διασπώνται σε μικρότερους και απελευθερώνουν μεγάλη ενέργεια. Αυτό το μοντέλο θεωρεί ότι ο πυρήνας είναι σαν μια σταγόνα υγρού που έχει μια επιφάνεια που την κρατάει σφαιρική. Η επιφάνεια αυτή έχει μια ενέργεια που λέγεται επιφανειακή τάση. Όμως, ο πυρήνας έχει και μια ακόμη δύναμη, την ηλεκτροστατική απόθεση, που προέρχεται από τη φόρτιση των πρωτονίων. Αυτή η δύναμη τον ωθεί να χωρίσει σε δύο. Το μοντέλο σχάσης υγρής σταγόνας μπορεί να υπολογίσει τη σχέση μεταξύ των δύο δυνάμεων και να προβλέψει πότε και πώς ο πυρήνας θα σχίσει. Επίσης, μπορεί να εξηγήσει γιατί όταν ο πυρήνας σχίζεται, χάνεται λίγη μάζα και γίνεται ενέργεια, όπως λέει και η εξίσωση του Αϊνστάιν, $E=mc^2$.

Όταν ένας πυρήνας σχίζεται σε δύο μέρη, η συνολική επιφάνειά του αυξάνεται. Αυτό σημαίνει ότι αυξάνεται και η συνολική επιφανειακή ενέργειά του, και κατ' επέκταση και η συνολική μάζα του. Δηλαδή, υπάρχει έλλειμμα μάζας μετά τη σχάση. Αυτό το έλλειμμα μάζας αποδίδεται στη δέσμη, που είναι η δύναμη που κρατάνε τα ναπολεόνια μαζί στον πυρήνα. Όσο πιο δυνατή είναι η δέσμη, τόσο λιγότερο είναι το έλλειμμα μάζας. Για αυτό, όταν ένας πυρήνας σχίζεται σε δύο ελαφρότερους πυρήνες, η δέσμη μειώνεται και το έλλειμμα μάζας, αυξάνεται. Αυτό το έλλειμμα μάζας μετατρέπεται σε ενέργεια, που εκδηλώνεται με τη μορφή της κινητικής ενέργειας των θρυμμάτων και των εκπεμπόμενων σωματιδίων. Αυτός είναι ο τρόπος που παράγεται ενέργεια, κατά τη διαδικασία της σχάσης [23].

Αυτές οι έννοιες βοηθούν στην εξήγηση των θεμελιωδών μηχανισμών πίσω από την απελευθέρωση ενέργειας κατά τη διαδικασία της σχάσης και υπογραμμίζουν τη σημασία των δυνάμεων πυρηνικής δέσμευσης για τη διατήρηση της σταθερότητας εντός των ατομικών πυρήνων. Με την περαιτέρω διερεύνηση αυτών των πτυχών, οι επιστήμονες μπορούν να βελτιώσουν την κατανόησή τους για την πυρηνική σχάση και να χρησιμοποιήσουν αυτή τη γνώση για να βελτιστοποιήσουν τα σχέδια των αντιδραστήρων, να βελτιώσουν τα μέτρα ασφαλείας και να εξερευνήσουν εναλλακτικές μορφές πυρηνικής ενέργειας.

Σύμφωνα με το μοντέλο σχάσης υγρής σταγόνας, ο ατομικός πυρήνας συμπεριφέρεται σαν μια σταγόνα υγρού, που συγκρατείται από την ισχυρή πυρηνική δύναμη που δεσμεύει πρωτόνια και νετρόνια. Η επιφανειακή τάση του σταγονιδίου αντιπροσωπεύει την ισορροπία των δυνάμεων που δρουν στην πυρηνική επιφάνεια. Όταν ο πυρήνας βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας, η επιφανειακή τάση είναι αρκετά ισχυρή ώστε να εξουδετερώσει την ηλεκτροστατική απόθεση μεταξύ των πρωτονίων και να διατηρήσει το σφαιρικό σχήμα.

Ωστόσο, υπό ορισμένες συνθήκες, εξωτερικοί παράγοντες όπως η απορρόφηση νετρονίων μπορούν να προκαλέσουν παραμορφώσεις στο σχήμα του πυρήνα. Καθώς απορροφώνται περισσότερα νετρόνια, ο πυρήνας επιμηκύνεται, τεντώνοντας το υγρό σταγονίδιο. Σε ένα ορισμένο σημείο, οι απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις μεταξύ των πρωτονίων αρχίζουν να ξεπερνούν την επιφανειακή τάση, οδηγώντας στη διαίρεση του πυρήνα σε δύο μικρότερα θραύσματα.

Αυτή η διαίρεση του πυρήνα συνοδεύεται από την απελευθέρωση σημαντικής ποσότητας ενέργειας. Καθώς το σταγονίδιο διασπάται, η περίσσεια ενέργειας δέσμευσης που αποθηκεύεται στον αρχικό πυρήνα μετατρέπεται στην κινητική ενέργεια των θραυσμάτων που προκύπτουν και των εκπεμπόμενων σωματιδίων. Αυτή η απελευθέρωση ενέργειας είναι η κινητήρια δύναμη πίσω από την τεράστια δύναμη των αντιδράσεων πυρηνικής σχάσης.

Το μοντέλο σχάσης υγρής σταγόνας παρέχει μια ποιοτική κατανόηση της διαδικασίας, αλλά δεν καταγράφει όλες τις περιπλοκές που εμπλέκονται στη σχάση. Απλοποιεί την πυρηνική δομή υποθέτοντας ομοιόμορφη πυκνότητα σε όλο τον πυρήνα και παραβλέποντας την κβαντομηχανική φύση των νουκλεονίων. Ωστόσο, το μοντέλο είναι πολύτιμο για την εννοιολόγηση των μηχανισμών που κρύβονται πίσω

από την πυρηνική σχάση και την εξήγηση διαφόρων φαινομένων που παρατηρήθηκαν πειραματικά.

Σε πρακτικές εφαρμογές, το μοντέλο σχάσης υγρής σταγόνας έχει χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη διαφορετικών πτυχών της σχάσης, όπως η κατανομή των μαζών και των ενεργειών των θραυσμάτων, καθώς και οι ιδιότητες των προϊόντων σχάσης και των εκπεμπόμενων νετρονίων και ακτινώνγάμμα. Βοηθά τους επιστήμονες να αναλύσουν και να ερμηνεύσουν πειραματικά δεδομένα, οδηγώντας σε προόδους στον σχεδιασμό των αντιδραστήρων, στη βελτιστοποίηση των καυσίμων και στη διαχείριση πυρηνικών αποβλήτων.

Επιπλέον, το μοντέλο σχάσης υγρής σταγόνας έχει συμβάλει στην ανάπτυξη προηγμένων σχεδίων αντιδραστήρων. Για παράδειγμα, έχει χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR) και προηγμένων ταχέων αντιδραστήρων. Οι προηγμένοι γρήγοροι αντιδραστήρες, οι οποίοι στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της απόδοσης καυσίμου και στην ελαχιστοποίηση της παραγωγής αποβλήτων, βασίζονται επίσης στην ενδελεχή κατανόηση των διαδικασιών σχάσης και της σχετικής απελευθέρωσης ενέργειας.

1.5 Ο πυρηνικός αντιδραστήρας

Ένας πυρηνικός αντιδραστήρας είναι ένα σύνθετο και εξαιρετικά σχεδιασμένο σύστημα που έχει ως σκοπό να αξιοποιεί την ενέργεια της πυρηνικής σχάσης για διάφορες εφαρμογές, όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η επιστημονική έρευνα και η παραγωγή ιατρικών ισοτόπων. Λειτουργεί ως η καρδιά ενός πυρηνικού σταθμού, όπου λαμβάνουν χώρα ελεγχόμενες αλυσιδωτές αντιδράσεις πυρηνικής σχάσης, απελευθερώνοντας τεράστια ποσότητα ενέργειας.



Εικόνα 3: Πυρηνικός αντιδραστήρας(Πηγή: <https://ti-einai.gr/pyrinikos-antidrastiras/>)



Εικόνα 4: Ο πυρηνικός αντιδραστήρας του «Δημόκριτου»(Πηγή:
<https://www.maxmag.gr/afieromata/dimokritos-o-ellinikos/>)

Η πυρηνική σχάση περιλαμβάνει βομβαρδισμό βαρέων ατομικών πυρήνων, τυπικά ουράνιο-235 ή πλουτώνιο-239, με νετρόνια χαμηλής ενέργειας. Καθώς αυτοί οι πυρήνες συλλαμβάνουν τα νετρόνια, γίνονται ασταθή και χωρίζονται σε δύο μικρότερα θραύσματα, απελευθερώνοντας επιπλέον νετρόνια και μια τεράστια ποσότητα ενέργειας με τη μορφή θερμότητας. Αυτή η θερμότητα στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού, ο οποίος τις τουρμπίνες που συνδέονται με ηλεκτρικές γεννήτριες, παράγοντας τελικά ηλεκτρική ενέργεια[21].

Οι τουρμπίνες είναι μηχανές ή συσκευές που συνδέονται με ηλεκτρικές γεννήτριες. Κινούνται από τον ατμό που παράγεται από τη θερμότητα μέσω της διαδικασίας που περιγράφεται παρακάτω. Ο ατμός που παράγεται από τη θέρμανση του νερού συσσωρεύει υψηλή πίεση και κινείται με μεγάλη ταχύτητα. Όταν ο ατμός περνά μέσα από τις τουρμπίνες, σπρώχνει τις λεπίδες τους και τις κάνει να περιστρέφονται. Έτσι, ο ατμός “οδηγεί” τις τουρμπίνες, δίνοντάς τους ενέργεια για να λειτουργήσουν. Η ροή υψηλής πίεσης του ατμού μέσω των τουρμπίνων προκαλεί την περιστροφή τους,

μετατρέποντας την κινητική ενέργεια του κινούμενου ατμού σε μηχανική ενέργεια. Αυτή η μηχανική ενέργεια, με τη σειρά της, οδηγεί τις συνδεδεμένες ηλεκτρικές γεννήτριες, μετατρέποντάς την τελικά σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μπορεί να μεταδοθεί και να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία κατοικιών, επιχειρήσεων και βιομηχανιών.

Για να διατηρηθεί μια ελεγχόμενη αλυσιδωτή αντίδραση, χρησιμοποιείται ένας επιβραδυντής για να επιβραδύνει τα νετρόνια που απελευθερώνονται κατά τη σχάση. Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος επιβραδυντής είναι το νερό, το οποίο όχι μόνο μειώνει την κινητική ενέργεια των νετρονίων αλλά χρησιμεύει και ως ψυκτικό υγρό, απορροφώντας και μεταφέροντας αποτελεσματικά την παραγόμενη θερμότητα. Άλλοι επιβραδυντές, όπως ο γραφίτης ή το βαρύ νερό, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε ορισμένα σχέδια αντιδραστήρων.

Ο πυρήνας του αντιδραστήρα, όπου συμβαίνουν οι πυρηνικές αντιδράσεις, αποτελείται από συγκροτήματα καυσίμου που περιέχουν το πυρηνικό καύσιμο, όπως κεραμικά σφαιρίδια εμπλουτισμένα με σχάσιμα ισότοπα. Αυτά τα συγκροτήματα καυσίμου είναι προσεκτικά διατεταγμένα μέσα σε ένα δοχείο αντιδραστήρα, συχνά κατασκευασμένο από χάλυβα ή άλλα ανθεκτικά υλικά ικανά να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Το δοχείο παρέχει περιορισμό για την πρόληψη της απελευθέρωσης ραδιενεργών υλικών.

Οι ράβδοι καυσίμου είναι ειδικές διατάξεις πυρηνικών στοιχείων καυσίμου, συνήθως με τη μορφή κεραμικών σφαιριδίων εμπλουτισμένων με σχάσιμα ισότοπα (όπως το ουράνιο-235 ή το πλουτόνιο-239). Αυτά τα συγκροτήματα καυσίμου είναι τα κύρια συστατικά που είναι υπεύθυνα για τη διατήρηση και τον έλεγχο των πυρηνικών αντιδράσεων που συμβαίνουν μέσα στον πυρήνα του αντιδραστήρα.

Τα συγκροτήματα καυσίμου διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων. Είναι προσεκτικά διατεταγμένα και τοποθετημένα μέσα στον πυρήνα του αντιδραστήρα για να εξασφαλίσουν αποτελεσματική παραγωγή θερμότητας και ελεγχόμενη αλυσιδωτή αντίδραση. Οι πυρηνικές αντιδράσεις εντός των συγκροτημάτων καυσίμου απελευθερώνουν ενέργεια με τη μορφή θερμότητας, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού και τελικά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στους πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Ο σχεδιασμός και η διάταξη αυτών των συγκροτημάτων καυσίμου είναι ζωτικής

σημασίας για τη διατήρηση της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας του συστήματος του αντιδραστήρα.

Για να διατηρηθεί το επιθυμητό επίπεδο αντιδραστικότητας και να ελεγχθεί ο ρυθμός της πυρηνικής αντίδρασης, ράβδοι ελέγχου εισάγονται στον πυρήνα του αντιδραστήρα. Αυτές οι ράβδοι, συνήθως κατασκευασμένες από υλικά που απορροφούν έντονα νετρόνια, όπως το βόριο ή το κάδμιο, μπορούν να ανυψωθούν ή να χαμηλώσουν για να ρυθμίσουν τον αριθμό των νετρονίων που είναι διαθέσιμα για σχάση. Με το χειρισμό της θέσης των ράβδων ελέγχου, οι χειριστές μπορούν να ρυθμίσουν την ισχύ εξόδου του αντιδραστήρα και να εξασφαλίσουν την ασφαλή λειτουργία του[21].

Η ασφάλεια είναι υψίστης σημασίας στους πυρηνικούς αντιδραστήρες και ενσωματώνονται πολλαπλά συστήματα ασφαλείας για την πρόληψη ατυχημάτων και τον μετριασμό των συνεπειών τους. Αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν συστήματα ψύξης πυρήνα έκτακτης ανάγκης (ECCS) που διασφαλίζουν επαρκή ψύξη σε μη κανονικές συνθήκες ή ατυχήματα, δομές περιορισμού για τον περιορισμό ραδιενεργών υλικών σε περίπτωση σοβαρού ατυχήματος και πολλά πρωτόκολλα ασφαλείας και απολύσεις για την ελαχιστοποίηση των κινδύνων.

Επιπλέον, η διαχείριση και η διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων που παράγονται από πυρηνικούς αντιδραστήρες αποτελούν κρίσιμα ζητήματα. Παράγονται διάφοροι τύποι αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων αναλωμένων καυσίμων, ψυκτικού αντιδραστήρα και ραδιενεργών υποπροϊόντων. Το αναλωμένο καύσιμο, αν και δεν είναι πλέον χρήσιμο για την παραγωγή ενέργειας, εξακολουθεί να περιέχει πολύτιμα ισότοπα και πρέπει να αποθηκεύεται με ασφάλεια και τελικά να διαχειρίζεται για μακροχρόνια αποθήκευση ή επανεπεξεργασία. Αυστηροί κανονισμοί και οδηγίες διέπουν το χειρισμό, τη μεταφορά και τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων για την ελαχιστοποίηση των κινδύνων για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία.

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες είναι εξελιγμένα και πολύπλοκα συστήματα που έχουν σχεδιαστεί για να αξιοποιούν την ενέργεια που απελευθερώνεται από τις πυρηνικές αντιδράσεις για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτοί οι αντιδραστήρες διατίθενται σε διάφορους τύπους, ο καθένας με τα ξεχωριστά χαρακτηριστικά και τις εφαρμογές του. Ένας από τους πιο συνηθισμένους τύπους είναι οι αντιδραστήρες

νερού υπό πίεση (PWR), οι οποίοι χρησιμοποιούν εμπλουτισμένο διοξείδιο ουρανίου ως καύσιμο και συνηθισμένο νερό ως ψυκτικό και μετριάστη.

Ο μετριάστης είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα για να μειώσει την ταχύτητα των γρήγορων νετρονίων που παράγονται από τη σχάση των ατομικών πυρήνων. Αυτό γίνεται μέσω της σκέδασης των νετρονίων με τους πυρήνες του μετριάστη, χωρίς να τους απορροφήσει. Με αυτό τον τρόπο, τα νετρόνια γίνονται θερμά, δηλαδή έχουν μόνο ελάχιστη κινητική ενέργεια. Τα θερμά νετρόνια είναι πολύ πιο πιθανό να προκαλέσουν μια πυρηνική αλυσιδωτή αντίδραση, επειδή έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να σχάσουν άλλους ατομικούς πυρήνες, όπως του διοξειδίου του ουρανίου-235.

Το νερό είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υλικό ως μετριάστης (περίπου το 75% των αντιδραστήρων στον κόσμο). Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται ως μετριάστες είναι η γραφίτη (20% των αντιδραστήρων) και το βαρύ νερό (5% των αντιδραστήρων). Το βηρύλλιο έχει χρησιμοποιηθεί επίσης σε κάποιους πειραματικούς τύπους, και οι υδρογονάνθρακες έχουν προταθεί ως μία ακόμη δυνατότητα [\[167\]](#).

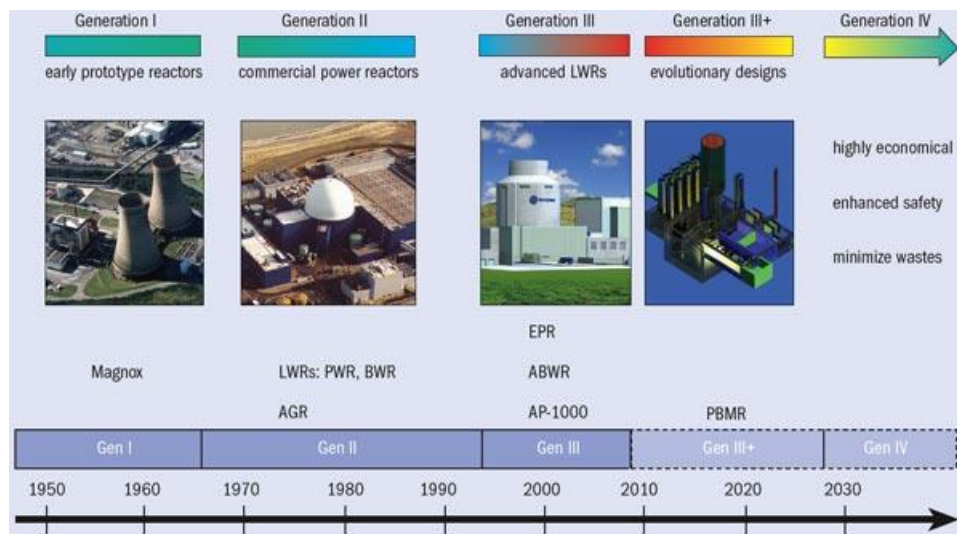
Σε ένα PWR, το πυρηνικό καύσιμο περικλείεται σε ράβδους καυσίμου, οι οποίες ομαδοποιούνται για να σχηματίσουν συγκροτήματα καυσίμου. Αυτά τα συγκροτήματα τοποθετούνται στη συνέχεια στρατηγικά στον πυρήνα του αντιδραστήρα, όπου λαμβάνει χώρα η ελεγχόμενη αλυσιδωτή αντίδραση, παράγοντας θερμότητα.

Ένας άλλος διαδεδομένος τύπος είναι οι αντιδραστήρες βρασμού νερού (BWR), οι οποίοι χρησιμοποιούν επίσης εμπλουτισμένο ουράνιο ως καύσιμο, αλλά μετατρέπουν απευθείας το νερό σε ατμό εντός του πυρήνα του αντιδραστήρα. Στα BWR, ο ατμός που παράγεται από την πυρηνική αντίδραση χρησιμοποιείται για την κίνηση στροβίλων που συνδέονται με γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αντίθεση με τα PWR, τα BWR δεν χρησιμοποιούν ξεχωριστές γεννήτριες ατμού, απλοποιώντας τη σχεδίαση του συστήματος.



Εικόνα 5: Αντιδραστήρας BWR(Πηγή: <https://educalingo.com/en/dic-en/boiling-water-reactor>)

Επιπλέον, υπάρχουν Advanced Gas– Cooled Reactors (AGRs) που χρησιμοποιούν διοξείδιο του άνθρακα ως ψυκτικό και γραφίτη ως μετριαστή. Αυτοί οι αντιδραστήρες χρησιμοποιούνται συνήθως στο Ηνωμένο Βασίλειο και είναι γνωστοί για την υψηλή θερμική τους απόδοση.



Εικόνα 6: Οι γενιές των αντιδραστήρων (Πηγή: http://www.physics4u.gr/articles/2008/nuclear_power2.html)

Επιπλέον, ορισμένοι αντιδραστήρες, όπως οι αντιδραστήρες FastBreeder (FBRs), έχουν σχεδιαστεί για να παράγουν περισσότερο σχάσιμο υλικό (όπως πλουτώνιο) από αυτό που καταναλώνουν. Τα FBR διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ανακύκλωση πυρηνικών καυσίμων και στην πιθανή επέκταση της πυρηνικής ενέργειας.

Δηλαδή, οι FBRs μπορούν να αυξήσουν τη διαθεσιμότητα και τη βιωσιμότητα της πυρηνικής ενέργειας ως πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό γίνεται μέσω των δύο βασικών πλεονεκτημάτων τους:

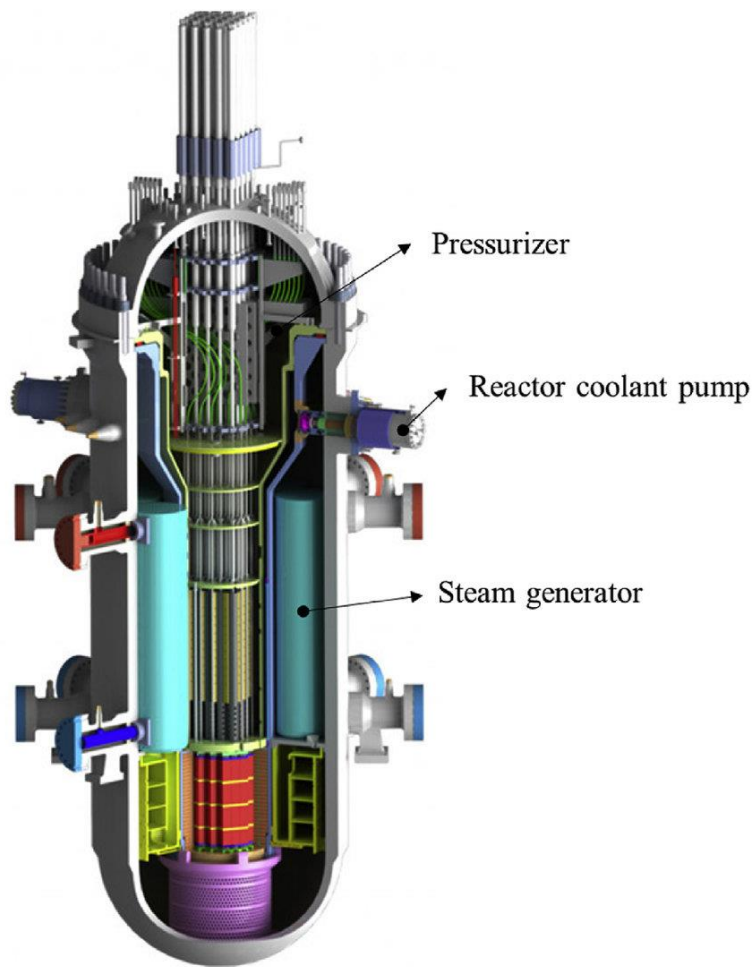
- Οι FBRs μπορούν να παράγουν περισσότερο σχάσιμο υλικό από αυτό που καταναλώνουν, δημιουργώντας έτσι νέο καύσιμο για τους ίδιους ή για άλλους αντιδραστήρες. Αυτό σημαίνει ότι οι FBRs μπορούν να εκμεταλλευτούν πλήρως το δυναμικό των πυρηνικών καυσίμων, όπως το ουράνιο-238 και το θόριο-232, που αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των φυσικών αποθεμάτων. Έτσι, οι FBRs μπορούν να επεκτείνουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής των πυρηνικών καυσίμων και να μειώσουν την εξάρτηση από τη διάχυση και τη μόλυβδο.
- Οι FBRs μπορούν να κάψουν μέρος ή όλο το πυρηνικό απόβλητο που παράγουν οι συμβατικοί αντιδραστήρες, μειώνοντας έτσι τη ραδιενέργειά του και τη δυσκολία απόθεσής του. Αυτό γίνεται μέσω της δυνατότητάς τους να σχίζουν όχι μόνο το ουράνιο-235, αλλά και το πλουτόνιο και τα άλλα τρανσουρανικάστοιχεία (ακτινίδες), που προέρχονται από τη σχάση του ουρανίου – 238. Αυτά τα στοιχεία είναι υπεύθυνα για το μεγαλύτερο μέρος της ραδιενέργειας και της διάρκειας ζωής του πυρηνικού αποβλήτου. Επομένως, οι FBRs μπορούν να μειώσουν το ποσοστό των ακτινίδων στο πυρηνικό απόβλητο και να το μετατρέψουν σε ενέργεια [\[162\]](#).

Αυτά τα δύο πλεονεκτήματα καθιστούν τους FBRs έναν προοδευτικό και αποδοτικό τύπο πυρηνικών αντιδραστήρων, που μπορεί να συμβάλει στην επέκταση της πυρηνικής ενέργειας ως μια καθαρή, ασφαλής και βιώσιμη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η επιλογή του πυρηνικού καυσίμου είναι ζωτικής σημασίας για την απόδοση του αντιδραστήρα. Οι περισσότεροι αντιδραστήρες χρησιμοποιούν εμπλουτισμένο ουράνιο ή ένα μείγμα ουρανίου και πλουτωνίου γνωστό ως καύσιμο μικτού οξειδίου (MOX). Επιπλέον, ορισμένοι ερευνητικοί αντιδραστήρες χρησιμοποιούν ουράνιο υψηλής εμπλουτισμού, ενώ οι πειραματικοί αντιδραστήρες μπορεί να χρησιμοποιούν πιο εξωτικούς τύπους καυσίμων.

Η ασφάλεια και η αποτελεσματικότητα των πυρηνικών αντιδραστήρων εξαρτώνται από τον κατάλληλο έλεγχο και τον περιορισμό των πυρηνικών αντιδράσεων εντός του πυρήνα. Τα μέτρα ασφαλείας περιλαμβάνουν ράβδους ελέγχου κατασκευασμένες από υλικά όπως το βόριο ή το άφνιο, τα οποία μπορούν να απορροφήσουν νετρόνια και να ρυθμίσουν τον ρυθμό αντίδρασης. Το δοχείο του αντιδραστήρα, συχνά κατασκευασμένο από ανθεκτικά υλικά όπως ο χάλυβας, παρέχει μια κρίσιμη δομή συγκράτησης για την πρόληψη της απελευθέρωσης ραδιενεργών υλικών.[\[162\]](#)

Τα τελευταία χρόνια, έχουν σημειωθεί πρόοδοι στον σχεδιασμό των αντιδραστήρων για τη βελτίωση της ασφάλειας, της αποτελεσματικότητας και της βιωσιμότητας. Αναπτύσσονται καινοτόμες ιδέες για αντιδραστήρες, όπως μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες (SMR) και προηγμένοι γρήγοροι αντιδραστήρες. Οι SMR είναι μικρότεροι και πιο ευέλικτοι από τους παραδοσιακούς αντιδραστήρες, προσφέροντας πλεονεκτήματα όσον αφορά το κόστος, την επεκτασιμότητα και την πιθανή ανάπτυξη σε απομακρυσμένες περιοχές. Οι προηγμένοι γρήγοροι αντιδραστήρες, από την άλλη πλευρά, στοχεύουν στη χρήση πυρηνικών καυσίμων πιο αποτελεσματικά, στη μείωση της παραγωγής αποβλήτων και ακόμη και στη μετατροπή των μακρόβιων ραδιενεργών ισοτόπων σε βραχύτερης διάρκειας ζωής.



Εικόνα 7: Αντιδραστήρας SMR (Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-small-modular-reactor-SMR_fig1_339189651)

Συμπερασματικά, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες είναι εξελιγμένα συστήματα που αξιοποιούν τη δύναμη της πυρηνικής σχάσης για διάφορους σκοπούς. Λειτουργούν μέσω ελεγχόμενων πυρηνικών αντιδράσεων, όπου η προσεκτική διαχείριση των καυσίμων, η μετριοπάθεια και οι μηχανισμοί ελέγχου διασφαλίζουν την ασφαλή και αποδοτική παραγωγή ενέργειας. Η συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη στην τεχνολογία των αντιδραστήρων προσπαθεί να βελτιώσει την ασφάλεια, να μειώσει τα απόβλητα και να παρέχει βιώσιμες και αξιόπιστες ενεργειακές επιλογές για το μέλλον.

1.6 Ζητήματα περιβαλλοντικού δικαίου

Η πυρηνική ενέργεια είναι μια αμφιλεγόμενη πηγή παραγωγής ενέργειας. Ενώ έχει πολλά οφέλη, συμπεριλαμβανομένων χαμηλότερων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα, οι πιθανοί περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που

συνδέονται με την πυρηνική ενέργεια δεν μπορούν να αγνοηθούν. Ως εκ τούτου, υπάρχουν πολλά ζητήματα περιβαλλοντικής νομοθεσίας που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια.

Περιλαμβάνουν τη διαχείριση και τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων, τη διασφάλιση της ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων και των γύρω κοινοτήτων τους, τη ρύθμιση της εξόρυξης και χρήσης ουρανίου ως πηγής καυσίμου και τη θέσπιση πρωτοκόλλων για τον παροπλισμό πυρηνικών σταθμών. Επιπλέον, η περιβαλλοντική νομοθεσία προβλέπει πιθανές επιπτώσεις πυρηνικών ατυχημάτων ή συμβάντων, την προστασία της βιοποικιλότητας και των οικοσυστημάτων κοντά σε πυρηνικές τοποθεσίες και την εφαρμογή μέτρων για την πρόληψη της διάδοσης της τεχνολογίας πυρηνικών όπλων. Αυτά τα ζητήματα απαιτούν ισχυρά νομικά πλαίσια και διεθνή συνεργασία για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών κινδύνων και τη διασφάλιση της υπεύθυνης και βιώσιμης χρήσης της πυρηνικής ενέργειας.

Ένα από τα κύρια ζητήματα περιβαλλοντικής νομοθεσίας που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια είναι η διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων. Οι πυρηνικοί σταθμοί παράγουν μεγάλες ποσότητες ραδιενεργών αποβλήτων που πρέπει να αποθηκεύονται με ασφάλεια για χιλιάδες χρόνια. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, αυτά τα απόβλητα συνήθως αποθηκεύονται σε εγκαταστάσεις προσωρινής αποθήκευσης, όπως δεξαμενές αναλωμένων καυσίμων και αποθήκευση ξηρού βαρελιού, μέχρι να αναπτυχθεί μια μόνιμη λύση διάθεσης. Ωστόσο, δεν έχει δημιουργηθεί μόνιμος χώρος διάθεσης πυρηνικών αποβλήτων στις Ηνωμένες Πολιτείες, οδηγώντας σε συνεχείς συζητήσεις και νομικές μάχες για το πού και πώς να αποθηκεύονται αυτά τα απόβλητα. Επιπλέον, η μεταφορά πυρηνικών αποβλήτων σε εγκαταστάσεις προσωρινής αποθήκευσης ή μόνιμους χώρους διάθεσης εγείρει ανησυχίες για πιθανά ατυχήματα και περιβαλλοντικές ζημιές [30].

Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα περιβαλλοντικής νομοθεσίας που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια είναι η πιθανότητα πυρηνικών ατυχημάτων. Ενώ οι πυρηνικοί σταθμοί έχουν σχεδιαστεί με πολλαπλά επίπεδα χαρακτηριστικών ασφαλείας για την πρόληψη ατυχημάτων, έχουν σημειωθεί αρκετά μεγάλα ατυχήματα στο παρελθόν, όπως η καταστροφή του Τσερνομπίλ το 1986 και η καταστροφή της Φουκουσίμα το 2011. Αυτά τα ατυχήματα όχι μόνο θέτουν άμεσο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία

και το περιβάλλον, αλλά επίσης δημιουργούν μακροπρόθεσμες περιβαλλοντικές συνέπειες, συμπεριλαμβανομένης της μόλυνσης του εδάφους, του νερού και του αέρα. Σε απάντηση, πολλές χώρες έχουν θεσπίσει αυστηρούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς και πρότυπα ασφαλείας για πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής για να μετριάσουν τους κινδύνους ατυχημάτων και να προστατεύσουν το περιβάλλον.

Εκτός από αυτά τα ζητήματα περιβαλλοντικής νομοθεσίας, η πυρηνική ενέργεια ενέχει επίσης κινδύνους για την άγρια ζωή και τη βιοποικιλότητα. Οι πυρηνικοί σταθμοί απαιτούν μεγάλες ποσότητες νερού για ψύξη, κάτι που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τα υδάτινα οικοσυστήματα αλλάζοντας τη θερμοκρασία του νερού και μειώνοντας τα επίπεδα οξυγόνου. Επιπλέον, τα πυρηνικά ατυχήματα μπορούν να οδηγήσουν στην απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον, τα οποία μπορούν να βλάψουν την άγρια ζωή και τα οικοσυστήματα. Για παράδειγμα, μετά την καταστροφή του Τσερνομπίλ, η γύρω περιοχή έγινε καταφύγιο άγριας ζωής, αλλά τα άγρια ζώα εκεί έχουν υποφέρει από γενετικές μεταλλάξεις και μειωμένους πληθυσμούς λόγω της έκθεσης στην ακτινοβολία [\[31\]](#).

Ένα από τα κρίσιμα ζητήματα περιβαλλοντικής νομοθεσίας που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια είναι οι πιθανές επιπτώσεις στα υπόγεια ύδατα. Οι πυρηνικοί σταθμοί παράγουν πολλά λύματα, τα οποία συχνά περιέχουν ραδιενεργά και άλλα επικίνδυνα υλικά. Αυτά τα λύματα συνήθως απορρίπτονται σε κοντινά ποτάμια, λίμνες ή ωκεανούς αφού υποβληθούν σε επεξεργασία για την απομάκρυνση ορισμένων από τους ρύπους. Ωστόσο, είναι δύσκολο να αφαιρεθούν όλα τα ραδιενεργά ισότοπα από τα λύματα και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μόλυνση των υπόγειων υδάτων. Τα υπόγεια ύδατα είναι ζωτικής σημασίας, πηγή πόσιμου νερού σε πολλά μέρη του κόσμου και η μόλυνση τους μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες για την υγεία και το περιβάλλον.

Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα περιβαλλοντικής νομοθεσίας που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εξόρυξης ουρανίου. Το ουράνιο είναι το κύριο καύσιμο που χρησιμοποιείται στους πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και η εξόρυξή του μπορεί να έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η εξόρυξη ουρανίου συχνά περιλαμβάνει χρήση ανοιχτού ή υπόγειου ορυχείου, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ρύπανση του εδάφους και των υδάτων. Η διαδικασία απαιτεί επίσης τη χρήση μεγάλων ποσοτήτων νερού και μπορεί να

οδηγήσει στην εξάντληση των υδάτινων πόρων σε άνυδρες περιοχές. Επιπλέον, η εξόρυξη ουρανίου μπορεί να προκαλέσει την απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον, τα οποία μπορούν να βλάψουν την άγρια ζωή και τα οικοσυστήματα [\[34\]](#).

Ο παροπλισμός πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής είναι ένα άλλο κρίσιμο ζήτημα περιβαλλοντικής νομοθεσίας που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια. Οι πυρηνικοί σταθμοί έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής και πρέπει να παροπλιστούν στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους. Ο παροπλισμός περιλαμβάνει την αποσυναρμολόγηση της μονάδας και την απόρριψη ραδιενεργών υλικών και άλλων επικίνδυνων αποβλήτων. Αυτή η διαδικασία μπορεί να είναι δαπανηρή και χρονοβόρα και υπάρχουν περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που συνδέονται με αυτήν. Ο παροπλισμός πρέπει να γίνεται προσεκτικά για να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος ατυχημάτων και να διασφαλιστεί ότι τα ραδιενεργά υλικά απορρίπτονται με ασφάλεια.

Το ζήτημα της διάδοσης των πυρηνικών όπλων σχετίζεται επίσης με ζητήματα περιβαλλοντικού δικαίου που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια. Η πυρηνική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για ειρηνικούς όσο και για στρατιωτικούς σκοπούς και η δυνατότητα εκτροπής πυρηνικών υλικών για στρατιωτικούς σκοπούς αποτελεί σημαντική ανησυχία. Η διάδοση των πυρηνικών όπλων μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην υγεία, συμπεριλαμβανομένης της πιθανότητας πυρηνικού πολέμου και της απελευθέρωσης ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον [\[35\]](#).

Η μεταφορά πυρηνικών υλικών είναι ένα άλλο σημαντικό ζήτημα περιβαλλοντικής νομοθεσίας που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια. Τα πυρηνικά υλικά πρέπει να μεταφέρονται από τα ορυχεία ουρανίου σε πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και τα πυρηνικά απόβλητα πρέπει να μεταφέρονται από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής σε χώρους διάθεσης. Αυτή η μεταφορά εγκυμονεί περιβαλλοντικούς κινδύνους, όπως η πιθανότητα ατυχημάτων και η απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον. Επιπλέον, η μεταφορά πυρηνικών υλικών εγείρει ανησυχίες για την ασφάλεια, καθώς τα υλικά μπορεί να είναι στόχοι κλοπής ή τρομοκρατίας.

Επιπλέον, το ζήτημα της πυρηνικής ενέργειας και της περιβαλλοντικής δικαιοσύνης σχετίζεται επίσης με ζητήματα περιβαλλοντικού δικαίου που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια. Τα ζητήματα περιβαλλοντικής δικαιοσύνης που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια περιλαμβάνουν τις δυσανάλογες επιπτώσεις των πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και της εξόρυξης ουρανίου στις κοινότητες χαμηλού εισοδήματος και στις έγχρωμες κοινότητες. Αυτές οι κοινότητες φέρουν συχνά μεγαλύτερο βάρος περιβαλλοντικής ρύπανσης και μπορεί να είναι πιο ευάλωτες στις επιπτώσεις της πυρηνικής ενέργειας στην υγεία και το περιβάλλον.

Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων περιβαλλοντικού δικαίου που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια, έχουν αναπτυχθεί αρκετές διεθνείς συμφωνίες και εθνικοί κανονισμοί. Μία από τις κρίσιμες διεθνείς συμφωνίες είναι η Κοινή Σύμβαση για την Ασφάλεια της Διαχείρισης Αναλωμένων Καυσίμων και για την Ασφάλεια της Διαχείρισης Ραδιενεργών Αποβλήτων, που εγκρίθηκε από τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) το 1997. Η σύμβαση θέτει διεθνή πρότυπα ασφάλειας για τη διαχείριση των αναλωμένων πυρηνικά καύσιμα και ραδιενεργά απόβλητα, συμπεριλαμβανομένης της αποθήκευσης, μεταφοράς και διάθεσης αυτών των υλικών [\[31\]](#).

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η Πυρηνική Ρυθμιστική Επιτροπή (NRC) είναι η κύρια υπηρεσία που είναι υπεύθυνη για τη ρύθμιση της βιομηχανίας πυρηνικής ενέργειας. Το NRC ορίζει πρότυπα ασφαλείας για την κατασκευή και τη λειτουργία πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και επιβλέπει την αποθήκευση, τη μεταφορά και τη διάθεση πυρηνικών υλικών. Η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA) έχει επίσης ρόλο στη ρύθμιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της πυρηνικής ενέργειας. Η EPA θέτει πρότυπα ακτινοπροστασίας και επιβλέπει τον καθαρισμό περιοχών που έχουν μολυνθεί με ραδιενεργά υλικά [\[36\]](#).

Αρκετές χώρες έχουν επίσης εφαρμόσει πολιτικές για τη σταδιακή κατάργηση της πυρηνικής ενέργειας και τη μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Για παράδειγμα, η Γερμανία έχει δεσμευτεί να καταργήσει σταδιακά την πυρηνική ενέργεια έως το 2022 και να αυξήσει τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η Ιαπωνία έχει επίσης δεσμευτεί να μειώσει την εξάρτησή της από την πυρηνική ενέργεια μετά την καταστροφή της Φουκουσίμα το 2011 [\[22\]](#).

Συμπερασματικά, τα ζητήματα του περιβαλλοντικού δικαίου που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια είναι πολύπλοκα και πολύπλευρα και απαιτούν προσεκτική εξέταση και προσοχή. Οι πιθανές επιπτώσεις της πυρηνικής ενέργειας στο περιβάλλον και στην υγεία πρέπει να αξιολογηθούν και να αντιμετωπιστούν προσεκτικά, ενώ οι διεθνείς συμφωνίες και οι εθνικοί κανονισμοί παρέχουν ένα πλαίσιο για να γίνει αυτό. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και προσεγγίσεων της πυρηνικής ενέργειας μπορεί επίσης να προσφέρει νέες ευκαιρίες για την αντιμετώπιση θεμάτων περιβαλλοντικού δικαίου που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια. Τελικά, η ασφαλής και βιώσιμη χρήση της πυρηνικής ενέργειας θα απαιτήσει συνεχή συνεργασία και δέσμευση μεταξύ των φορέων χάραξης πολιτικής, των ενδιαφερομένων της βιομηχανίας και του κοινού.

1.7 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από την χρήση της πυρηνικής ενέργειας

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της πυρηνικής ενέργειας και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν αποφασίζεται εάν θα χρησιμοποιηθεί.

Πλεονεκτήματα της Πυρηνικής Ενέργειας

Χαμηλές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου: Η πυρηνική ενέργεια παράγει χαμηλά επίπεδα αερίων θερμοκηπίου σε σύγκριση με άλλες μορφές ενέργειας. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ), οι πυρηνικοί σταθμοί δεν παράγουν σχεδόν καθόλου αέρια θερμοκηπίου και το αποτύπωμά τους άνθρακα είναι χαμηλότερο από αυτό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια [24]. Αυτό καθιστά την πυρηνική ενέργεια μια καθαρή πηγή ενέργειας που μπορεί να συμβάλει στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής.

Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα: Η πυρηνική ενέργεια έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, που σημαίνει ότι μια μικρή ποσότητα πυρηνικού καυσίμου μπορεί να παράγει μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Αυτό το καθιστά μια οικονομικά αποδοτική πηγή ενέργειας που μπορεί να παρέχει σταθερή και αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

Για να επεξηγήσουμε την έννοια της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, ας εξετάσουμε ένα παράδειγμα που αφορά το ουράνιο-235 (U-235), το οποίο χρησιμοποιείται

συνήθως ως καύσιμο σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Το U-235 είναι ένα σχάσιμο ισότοπο που υφίσταται πυρηνική σχάση, απελευθερώνοντας σημαντική ποσότητα ενέργειας.

Ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιεί ράβδους καυσίμου U-235 στον πυρήνα του αντιδραστήρα του. Αυτές οι ράβδοι καυσίμου περιέχουν μικροσκοπικά σφαιρίδια εμπλουτισμένου ουρανίου, συνήθως περίπου 3-5% U-235. Παρά το μικρό μέγεθος αυτών των σφαιριδίων, περιέχουν τεράστιο ενεργειακό δυναμικό.

Για παράδειγμα, ας εξετάσουμε ένα μόνο σφαιρίδιο καυσίμου ουρανίου που ζυγίζει περίπου 7 γραμμάρια. Μέσω μιας σειράς ελεγχόμενων αντιδράσεων σχάσης, αυτό το μικρό σφαιρίδιο μπορεί να απελευθερώσει μια τεράστια ποσότητα ενέργειας, που ισοδυναμεί με την καύση αρκετών τόνων άνθρακα ή χιλιάδων βαρελιών πετρελαίου. Η εκλύομενη ενέργεια έρχεται με τη μορφή θερμότητας, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας ατμοστρόβιλους[27].

Αυτό το παράδειγμα καταδεικνύει την υψηλή ενεργειακή πυκνότητα της πυρηνικής ενέργειας. Μια σχετικά μικρή μάζα καυσίμου ουρανίου μπορεί να παράγει τεράστια ποσότητα ενέργειας, καθιστώντας την μια αποδοτική και συμπαγή πηγή ενέργειας. Αυτό το χαρακτηριστικό έχει σημαντικές επιπτώσεις στη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και στην ικανότητα παραγωγής σταθερής και αξιόπιστης παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπλέον, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα της πυρηνικής ενέργειας συμβάλλει στη μεγάλη διάρκεια ζωής της. Ένας πυρηνικός αντιδραστήρας μπορεί να λειτουργεί συνεχώς για παρατεταμένες περιόδους προτού απαιτείται ανεφοδιασμός, μειώνοντας τον χρόνο διακοπής λειτουργίας και διασφαλίζοντας σταθερή απόδοση ισχύος. Αυτή η αξιοπιστία είναι ζωτικής σημασίας για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων των κοινοτήτων και των βιομηχανιών.[27]

Συμπερασματικά, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα της πυρηνικής ενέργειας επιτρέπει σε μια μικρή ποσότητα πυρηνικού καυσίμου, όπως το εμπλουτισμένο ουράνιο, να παράγει μια σημαντική ποσότητα ενέργειας. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά την πυρηνική ενέργεια οικονομική και αποδοτική πηγή ενέργειας, παρέχοντας σταθερή και αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ικανότητα εξαγωγής σημαντικής

ενέργειας από μια μικρή μάζα καυσίμου συμβάλλει στη συμπαγή και μακροζωία των πυρηνικών σταθμών. Αυτό το παράδειγμα καταδεικνύει τις τεράστιες δυνατότητες της πυρηνικής ενέργειας στην κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών μας αναγκών.

Ενεργειακή ασφάλεια: Η πυρηνική ενέργεια μπορεί να προσφέρει ενεργειακή ασφάλεια, καθώς μειώνει την εξάρτηση από ξένες προμήθειες πετρελαίου και φυσικού αερίου. Οι πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να λειτουργήσουν για μεγάλες χρονικές περιόδους χωρίς ανεφοδιασμό και μπορούν να παρέχουν μια σταθερή πηγή ενέργειας ανεξάρτητα από εξωτερικούς παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες ή η γεωπολιτική αστάθεια.

Η ενεργειακή ασφάλεια είναι ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα της πυρηνικής ενέργειας. Μειώνοντας την εξάρτηση από τις ξένες προμήθειες πετρελαίου και φυσικού αερίου, η πυρηνική ενέργεια μπορεί να προσφέρει μια αξιόπιστη και σταθερή πηγή ενέργειας. Αυτό έχει επιτευχθεί ιδιαίτερα από χώρες όπως ο Καναδάς, οι οποίες χρησιμοποιούν ουράνιο-238 και βαρύ νερό στους αντιδραστήρες τους.

Στην περίπτωση του ουρανίου-238 (U-238), είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν το U-238 ως κύριο καύσιμο δεν απαιτούν εμπλουτισμό καυσίμου με ουράνιο-235 (U-235). Αυτό εξαλείφει την ανάγκη εισαγωγής καυσίμων και εξασφαλίζει ενεργειακή αυτονομία για αυτές τις χώρες. Με το να μην βασίζονται σε άλλα έθνη για εμπλουτισμένο ουράνιο, δεν είναι δέσμια της τεχνολογίας ή των πολιτικών χωρών όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες ή η Ρωσία, που διαθέτουν δυνατότητες εμπλουτισμού. Αυτό τους παρέχει μεγαλύτερο έλεγχο στον ενεργειακό τους εφοδιασμό.

Ο Καναδάς είναι ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα χώρας που έχει χρησιμοποιήσει αποτελεσματικά το ουράνιο-238 και το βαρύ νερό στη βιομηχανία πυρηνικής ενέργειας. Το βαρύ νερό, γνωστό και ως οξείδιο του δευτερίου (D₂O), χρησιμοποιείται ως μετριαστής και ψυκτικό σε ορισμένους τύπους αντιδραστήρων, όπως οι αντιδραστήρες CANDU (ΚΑΝαδικό Δευτέριο Ουράνιο) του Καναδά. Αυτοί οι αντιδραστήρες έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούν φυσικό ουράνιο (το οποίο περιλαμβάνει U-238) ως καύσιμο χωρίς την ανάγκη εμπλουτισμού.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι η χρήση βαρέος νερού παρουσιάζει οικονομικές προκλήσεις. Το βαρύ νερό βρίσκεται στη φύση σε πολύ μικρά ποσοστά

και είναι δύσκολο να απομονωθεί, γεγονός που καθιστά ακριβό την παραγωγή του. Αυτό μπορεί να αποτελέσει περιορισμό στην ευρεία υιοθέτηση αντιδραστήρων με βαρύ νερό.

Παρά το ζήτημα αυτό, η χρήση ουρανίου-238 και βαρέος νερού στην πυρηνική ενέργεια καταδεικνύει τη δυνατότητα επίτευξης ενεργειακής αυτονομίας και μείωσης της εξάρτησης από τις ξένες προμήθειες καυσίμων. Επιτρέπει σε χώρες όπως ο Καναδάς να διατηρήσουν μια σταθερή πηγή ενέργειας, ανεξάρτητα από εξωτερικούς παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες ή η γεωπολιτική αστάθεια.

Διαφοροποιώντας το ενεργειακό τους μείγμα και βασιζόμενες στην πυρηνική ενέργεια, αυτές οι χώρες ενισχύουν την ενεργειακή τους ασφάλεια και συμβάλλουν σε μια πιο βιώσιμη και ανθεκτική ενεργειακή υποδομή.

Συμπερασματικά, η πυρηνική ενέργεια προσφέρει ενεργειακή ασφάλεια μειώνοντας την εξάρτηση από ξένες προμήθειες πετρελαίου και φυσικού αερίου. Χώρες όπως ο Καναδάς έχουν επιτύχει ενεργειακή αυτονομία χρησιμοποιώντας ουράνιο-238 και βαρύ νερό στους αντιδραστήρες τους, εξαλείφοντας την ανάγκη για εμπλουτισμό καυσίμων και μειώνοντας την εξάρτηση από ξένες πηγές. Ενώ η χρήση βαρέος νερού παρουσιάζει οικονομικές εμπόδια λόγω της σπανιότητας και του υψηλού κόστους παραγωγής, υπογραμμίζει τη δυνατότητα των χωρών να δημιουργήσουν έναν σταθερό και αξιόπιστο ενεργειακό εφοδιασμό. Αγκαλιάζοντας την πυρηνική ενέργεια, τα έθνη μπορούν να ενισχύσουν την ενεργειακή τους ασφάλεια και να μειώσουν την ευπάθεια σε εξωτερικούς παράγοντες, διασφαλίζοντας ένα πιο ανθεκτικό ενεργειακό μέλλον.

Δημιουργία θέσεων εργασίας: Η στελέχωση των εργοστασίων παραγωγής ενέργειας μπορεί να δημιουργήσει θέσεις εργασίας σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των κατασκευών, της μηχανικής και της συντήρησης. Σύμφωνα με την Παγκόσμια Ένωση Πυρηνικών, η πυρηνική βιομηχανία απασχολεί άμεσα πάνω από 600.000 άτομα παγκοσμίως και πολλές περισσότερες θέσεις εργασίας δημιουργούνται έμμεσα[25].

Ισχύς βασικού φορτίου: Η πυρηνική ενέργεια μπορεί να παρέχει ισχύ βασικού φορτίου, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να παράγει μια σταθερή και προβλέψιμη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με άλλες ανανεώσιμες πηγές

ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, οι οποίες εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες και μπορεί να είναι διακοπτόμενες. Η ισχύς βασικού φορτίου είναι σημαντική για τη διατήρηση μιας σταθερής και αξιόπιστης παροχής ενέργειας.

Ενεργειακή ανεξαρτησία: Η πυρηνική ενέργεια μπορεί να προσφέρει ενεργειακή ανεξαρτησία, καθώς μειώνει την εξάρτηση από ξένες προμήθειες πετρελαίου και φυσικού αερίου. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικό για χώρες που δεν διαθέτουν σημαντικούς εγχώριους ενεργειακούς πόρους.

Η ενεργειακή ασφάλεια και η ενεργειακή ανεξαρτησία είναι έννοιες στενά συνδεδεμένες, αλλά έχουν διακριτές διαφορές. Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε πώς η ενεργειακή ασφάλεια συμπληρώνει και επεκτείνεται σε αυτήν την έννοια.

Η ενεργειακή ανεξαρτησία αναφέρεται στην ικανότητα μιας χώρας να καλύψει τις ενεργειακές της ανάγκες κυρίως μέσω εγχώριων πηγών, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από ξένο πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Επενδύοντας στην πυρηνική ενέργεια, ένα έθνος μπορεί να διαφοροποιήσει το ενεργειακό του μείγμα και να μειώσει την εξάρτηση από τις εισαγωγές. Η πυρηνική ενέργεια παράγεται από το ουράνιο, ένα καύσιμο που μπορεί να προμηθευτεί εγχώρια ή να αποκτηθεί μέσω διεθνών εμπορικών συμφωνιών. Αυτό μειώνει την ευπάθεια στις διακυμάνσεις στις παγκόσμιες αγορές ενέργειας και τις γεωπολιτικές εντάσεις που σχετίζονται με τις ξένες ενεργειακές προμήθειες.

Από την άλλη πλευρά, η ενεργειακή ασφάλεια περιλαμβάνει μια ευρύτερη προοπτική που υπερβαίνει την απλή αυτάρκεια. Αναφέρεται στη διασφάλιση σταθερής και αξιόπιστης παροχής ενέργειας, ανεξάρτητα από την πηγή. Η ενεργειακή ασφάλεια περιλαμβάνει παράγοντες όπως η διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας, η ισχυρή υποδομή, οι ανθεκτικές αλυσίδες εφοδιασμού και οι αποτελεσματικές στρατηγικές διαχείρισης κινδύνου. Ενώ η ενεργειακή ανεξαρτησία εστιάζει στη μείωση της εξάρτησης από συγκεκριμένους ενεργειακούς πόρους, η ενεργειακή ασφάλεια στοχεύει στην ελαχιστοποίηση τυχόν διαταραχών στον συνολικό ενεργειακό εφοδιασμό, ανεξάρτητα από την προέλευσή τους.

Η επίτευξη ενεργειακής ασφάλειας συνεπάγεται διάφορα μέτρα, όπως η διαφοροποίηση του ενεργειακού μείγματος, η προώθηση των ανανεώσιμων πηγών, η επένδυση σε τεχνολογίες αποθήκευσης και η ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης.

Υιοθετώντας ένα διαφοροποιημένο χαρτοφυλάκιο πηγών ενέργειας, όπως πυρηνικά, ανανεώσιμες πηγές, φυσικό αέριο, ακόμη και παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα, οι χώρες μπορούν να μετριάσουν τους κινδύνους που συνδέονται με την υπερβολική εξάρτηση από έναν μόνο πόρο. Αυτή η διαφοροποίηση ενισχύει την ανθεκτικότητα έναντι των διακυμάνσεων των τιμών, των διαταραχών του εφοδιασμού ή των γεωπολιτικών συγκρούσεων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν μια συγκεκριμένη πηγή ενέργειας.

Επιπλέον, η ενεργειακή ασφάλεια περιλαμβάνει την ανθεκτικότητα και την αξιοπιστία της ενεργειακής υποδομής. Αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός ισχυρού δικτύου μεταφοράς και διανομής, καθώς και την ενοποίηση τεχνολογιών έξυπνων δικτύων για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της προσαρμοστικότητας. Διασφαλίζοντας μια καλά συνδεδεμένη και αποδοτική ενεργειακή υποδομή, οι χώρες μπορούν να ανταποκριθούν πιο αποτελεσματικά σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, φυσικές καταστροφές ή απειλές στον κυβερνοχώρο που θα μπορούσαν να διαταράξουν τις αλυσίδες εφοδιασμού ενέργειας.

Συνοπτικά, ενώ η ενεργειακή ανεξαρτησία εστιάζει στη μείωση της εξάρτησης από ξένο πετρέλαιο και φυσικό αέριο μέσω της εγχώριας παραγωγής πυρηνικής ενέργειας, η ενεργειακή ασφάλεια υιοθετεί μια ευρύτερη προσέγγιση. Περιλαμβάνει τη διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας, την ενίσχυση των υποδομών και την εφαρμογή στρατηγικών διαχείρισης κινδύνου για τη διασφάλιση σταθερού και αξιόπιστου ενεργειακού εφοδιασμού ανεξάρτητα από την πηγή. Και οι δύο έννοιες είναι ζωτικής σημασίας για τις χώρες που επιδιώκουν να ενισχύσουν την ενεργειακή τους ανθεκτικότητα και να προστατεύσουν από πιθανές διαταραχές στο παγκόσμιο ενεργειακό τοπίο.

Απόδοση νερού: Οι πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής είναι σχετικά αποδοτικοί ως προς το νερό σε σύγκριση με άλλες μορφές παραγωγής ενέργειας, δηλαδή κάνουν οικονομία στην κατανάλωση νερού. Σύμφωνα με το Ινστιτούτο Πυρηνικής Ενέργειας, οι πυρηνικοί σταθμοί χρησιμοποιούν κατά μέσο όρο μόνο 720 γαλόνια νερού ανά μεγαβατώρα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, σε σύγκριση με 1.100 γαλόνια για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου και 2.100 γαλόνια για σταθμούς παραγωγής ενέργειας με άνθρακα [26]. Αυτό μπορεί να είναι ένα σημαντικό ζήτημα σε περιοχές όπου οι υδάτινοι πόροι είναι σπάνιοι.

Πυρηνική σύντηξη: Ενώ οι σημερινοί πυρηνικοί σταθμοί βασίζονται κυρίως στην πυρηνική σχάση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στον τομέα της πυρηνικής σύντηξης. Οι πρόσφατες εξελίξεις επέτρεψαν στους επιστήμονες να επιτύχουν αντιδράσεις σύντηξης σε εργαστηριακά περιβάλλοντα, αν και για σχετικά σύντομη διάρκεια. Ωστόσο, ο απώτερος στόχος είναι να αξιοποιηθεί η πυρηνική σύντηξη σε ειδικούς αντιδραστήρες σύντηξης, όπου οι ελεγχόμενες αντιδράσεις σύντηξης μπορούν να διατηρηθούν για μεγαλύτερες περιόδους, αποδίδοντας συνεχή και άφθονη παραγωγή ενέργειας. Περισσότερα στοιχεία για την πυρηνική σύντηξη αναφέρονται και αναλύονται εκτενώς, στο υποκεφάλαιο 1.8.

Μειονεκτήματα της Πυρηνικής Ενέργειας

Κίνδυνος ατυχημάτων: Οι πυρηνικοί σταθμοί μπορεί να αποτελέσουν κίνδυνο ατυχημάτων, τα οποία μπορεί να έχουν καταστροφικές συνέπειες. Το πιο γνωστό παράδειγμα πυρηνικού ατυχήματος είναι η καταστροφή του Τσερνομπίλ το 1986 στην Ουκρανία, η οποία είχε ως αποτέλεσμα χιλιάδες θανάτους και μόλυνε μεγάλες εκτάσεις γης.

Πυρηνικά απόβλητα: Οι πυρηνικοί σταθμοί παράγουν πυρηνικά απόβλητα, τα οποία είναι ραδιενεργά και μπορούν να παραμείνουν επικίνδυνα για εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια. Η διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων αποτελεί μείζονα πρόκληση, καθώς επί του παρόντος δεν υπάρχει παγκοσμίως αποδεκτή λύση για τη μακροπρόθεσμη αποθήκευσή τους.

Διάδοση πυρηνικών όπλων: Οι πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή πυρηνικού υλικού οπλικής ποιότητας, το οποίο μπορεί να συμβάλει στη διάδοση των πυρηνικών όπλων. Αυτό αποτελεί μέριμνα για την εθνική και διεθνή ασφάλεια.

Η διάδοση των πυρηνικών όπλων παραμένει ένα πιεστικό παγκόσμιο πρόβλημα που απαιτεί τη μέγιστη προσοχή και τη συνεργασία μεταξύ των εθνών. Ενώ οι πυρηνικοί σταθμοί έχουν σχεδιαστεί κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η τεχνολογία και οι διαδικασίες που εμπλέκονται μπορούν ενδεχομένως να αξιοποιηθούν για την παραγωγή πυρηνικού υλικού οπλικής ποιότητας. Η φύση διπλής χρήσης της πυρηνικής τεχνολογίας αποτελεί σημαντική ανησυχία τόσο για την

εθνική όσο και για τη διεθνή ασφάλεια. Η επαγρύπνηση είναι απαραίτητη για την αποτροπή της εκτροπής πυρηνικών υλικών από ειρηνικούς ενεργειακούς σκοπούς στην ανάπτυξη όπλων.

Οι προσπάθειες για τον περιορισμό της διάδοσης των πυρηνικών όπλων περιλαμβάνουν συνδυασμό διπλωματικών διαπραγματεύσεων, συμφωνιών μη διάδοσης και αυστηρών διασφαλίσεων για τις πυρηνικές εγκαταστάσεις. Οι διεθνείς οργανισμοί, όπως ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ), διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στην παρακολούθηση και την επαλήθευση της ειρηνικής χρήσης της πυρηνικής τεχνολογίας επιθεωρώντας πυρηνικές εγκαταστάσεις και διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με τις συμφωνίες μη διάδοσης. Επιπλέον, οι χώρες έχουν υιοθετήσει διάφορα μέτρα ελέγχου των εξαγωγών για να αποτρέψουν την παράνομη μεταφορά ευαίσθητης πυρηνικής τεχνολογίας και υλικών σε μη εξουσιοδοτημένους φορείς.

Η προώθηση της διεθνούς συνεργασίας και του διαλόγου είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των προκλήσεων που θέτει η διάδοση των πυρηνικών όπλων. Η ενθάρρυνση των χωρών να δώσουν προτεραιότητα στις διπλωματικές λύσεις, να επικυρώσουν τις συνθήκες μη διάδοσης και να συμμετάσχουν σε προσπάθειες αφοπλισμού θα ενισχύσει το παγκόσμιο τοπίο ασφάλειας. Ενισχύοντας τις συλλογικές προσπάθειες για τη διασφάλιση της υπεύθυνης χρήσης της πυρηνικής τεχνολογίας, η διεθνής κοινότητα μπορεί να κάνει ουσιαστικά βήματα προς έναν ασφαλέστερο και ασφαλέστερο κόσμο, μετριάζοντας τους κινδύνους που συνδέονται με τη διάδοση των πυρηνικών όπλων[26].

Υψηλό αρχικό κόστος: Η κατασκευή ενός πυρηνικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής απαιτεί σημαντική αρχική επένδυση και το κόστος παροπλισμού ενός πυρηνικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής μπορεί επίσης να είναι υψηλό. Αυτό μπορεί να καταστήσει την πυρηνική ενέργεια λιγότερο οικονομικά αποδοτική από άλλες μορφές ενέργειας, ιδιαίτερα βραχυπρόθεσμα.

Υπέρβαση κόστους: Η κατασκευή ενός πυρηνικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να είναι μια περίπλοκη και δαπανηρή διαδικασία και οι υπερβάσεις κόστους δεν είναι ασυνήθιστες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το κόστος κατασκευής ενός πυρηνικού σταθμού μπορεί να υπερβαίνει τις αρχικές εκτιμήσεις κατά σημαντικό περιθώριο. Για παράδειγμα, η κατασκευή του πυρηνικού σταθμού Hinkley Point C

στο Ηνωμένο Βασίλειο αναμένεται να κοστίσει πάνω από 20 δισεκατομμύρια λίρες, που είναι υπερδιπλάσιο από την αρχική εκτίμηση [162].

Κίνδυνος από τρομοκρατικές επιθέσεις: Οι πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής και οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης πυρηνικών αποβλήτων μπορεί να είναι ευάλωτοι σε τρομοκρατικές επιθέσεις, οι οποίες μπορεί να έχουν σοβαρές συνέπειες. Οι επιθέσεις της 11ης Σεπτεμβρίου στις ΗΠΑ προκάλεσαν ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων ενώ έχουν αναφερθεί περιστατικά δολιοφθοράς ή απόπειρας δολιοφθοράς σε πυρηνικές εγκαταστάσεις σε όλο τον κόσμο [28].

Τυχαίες εκλύσεις ραδιενεργού υλικού: Ενώ ο η πιθανότητα ύπαρξης ενός μεγάλου πυρηνικού ατυχήματος είναι σχετικά χαμηλός, ακόμη και μικρές εκλύσεις ραδιενεργού υλικού μπορεί να έχουν σοβαρές συνέπειες για την υγεία των κοντινών πληθυσμών. Για παράδειγμα, το 2011, η πυρηνική καταστροφή της Fukushima Daiichi στην Ιαπωνία είχε ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση ραδιενεργού υλικού, η οποία οδήγησε στην εκκένωση χιλιάδων ανθρώπων και προκάλεσε ανησυχίες σχετικά με τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε ακτινοβολία [29].

Περιορισμένοι πόροι ουρανίου: Οι πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής απαιτούν ουράνιο ως καύσιμο και υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με τη διαθεσιμότητα πόρων ουρανίου μακροπρόθεσμα. Ενώ επί του παρόντος υπάρχει επαρκής προσφορά ουρανίου για την κάλυψη της ζήτησης, ορισμένοι ειδικοί υποστηρίζουν ότι η προσφορά θα μπορούσε να περιοριστεί στο μέλλον, γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε υψηλότερες τιμές και πιθανές διακοπές του εφοδιασμού [22].

Πίνακας 1: Συγκεντρωτικός πίνακας πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της πυρηνικής ενέργειας

Πλεονεκτήματα της Πυρηνικής Ενέργειας	Μειονεκτήματα της Πυρηνικής Ενέργειας
Χαμηλές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου	Κίνδυνος ατυχημάτων και έκθεση στην ραδιενέργεια

Πλεονεκτήματα της Πυρηνικής Ενέργειας	Μειονεκτήματα της Πυρηνικής Ενέργειας
Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και αξιοπιστία	Υψηλό κόστος και χρονοβόρα διαδικασία για την κατασκευή νέων εργοστασίων
Μπορεί να λειτουργεί συνεχώς για μεγάλα χρονικά διαστήματα	Διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων και αποσυναρμολόγηση παλαιών εργοστασίων
Χρήση νερού	Θερμική ρύπανση
Μπορεί να συμβάλλει στην ενεργειακή ανεξαρτησία και ασφάλεια	Κίνδυνος πυρηνικής διάδοσης και τρομοκρατίας

Εκτός από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που συζητήθηκαν παραπάνω, διάφοροι άλλοι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Μια κρίσιμη πτυχή είναι η αντίληψη της πυρηνικής ενέργειας από το ευρύ κοινό και τους ενδιαφερόμενους φορείς, η οποία μπορεί να επηρεάσει βαθιά την αποδοχή και τη χρησιμοποίησή της. Η αντίληψη του κοινού παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση πολιτικών, κανονισμών και επενδυτικών αποφάσεων που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια.

Η αντίληψη της πυρηνικής ενέργειας επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων ιστορικών γεγονότων, κάλυψης από τα μέσα ενημέρωσης, εκστρατειών ευαισθητοποίησης του κοινού και στάσεων της κοινωνίας απέναντι στον κίνδυνο και την ασφάλεια. Τα πυρηνικά ατυχήματα, όπως αυτά στο Τσερνόμπιλ και τη Φουκουσίμα, έχουν αφήσει μια μόνιμη εντύπωση στη συλλογική ψυχή και συνέβαλαν σε αυξημένες ανησυχίες για την ασφάλεια των πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Αντίθετα, η αποτελεσματική επικοινωνία και εκπαίδευση σχετικά με την πυρηνική τεχνολογία μπορεί να βοηθήσει στην απομυθοποίηση της πολυπλοκότητάς της και να μετριάσει ορισμένους από τους φόβους που συνδέονται με την εφαρμογή της.

Οι κυβερνήσεις, οι ενεργειακοί οργανισμοί και η πυρηνική βιομηχανία πρέπει να αντιμετωπίζουν προληπτικά τις ανησυχίες του κοινού, να διασφαλίζουν τη διαφάνεια και να συνεργάζονται ενεργά με τις κοινότητες για να ενθαρρύνουν ενημερωμένες συζητήσεις σχετικά με τα οφέλη και τους κινδύνους της πυρηνικής ενέργειας. Η οικοδόμηση εμπιστοσύνης και η κατά μέτωπο αντιμετώπιση θεμάτων ασφάλειας και περιβάλλοντος είναι κρίσιμα βήματα για τη συγκέντρωση δημόσιας υποστήριξης για την ανάπτυξη και την επέκταση της πυρηνικής ενέργειας ως βιώσιμης και χαμηλών εκπομπών άνθρακα επιλογή στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα.

Σύμφωνα με μελέτη του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA), η αντίληψη του κοινού είναι σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας, καθώς οι αρνητικές αντιλήψεις μπορεί να εμποδίσουν την εφαρμογή της [20].

Επιπλέον, η διαθεσιμότητα εναλλακτικών πηγών ενέργειας μπορεί επίσης να επηρεάσει τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Καθώς οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια γίνονται πιο ανταγωνιστικές ως προς το κόστος, ενδέχεται να υπάρξει λιγότερη ζήτηση για πυρηνική ενέργεια στο μέλλον. Ωστόσο, ορισμένοι ειδικοί υποστηρίζουν ότι η πυρηνική ενέργεια μπορεί να συμπληρώσει τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να παρέχει ένα πιο ποικίλο ενεργειακό μείγμα [21].

Συνολικά, η απόφαση χρήσης της πυρηνικής ενέργειας πρέπει να βασίζεται στην προσεκτική εξέταση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της, καθώς και των ειδικών συνθηκών κάθε χώρας ή περιοχής. Καθώς τα μέτρα τεχνολογίας και ασφάλειας συνεχίζουν να βελτιώνονται, η πυρηνική ενέργεια μπορεί να διαδραματίζει ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο στην κάλυψη των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών, ενώ ταυτόχρονα μετριάζεται η κλιματική αλλαγή.

1.8 Πυρηνική σύντηξη

Η πυρηνική σύντηξη είναι μια επαναστατική διαδικασία που έχει τη δυνατότητα να παρέχει ουσιαστικά απεριόριστη και βιώσιμη πηγή καθαρής ενέργειας. Είναι η διαδικασία μέσω της οποίας οι ατομικοί πυρήνες συνδυάζονται ή συντήκονται μεταξύ τους, απελευθερώνοντας μια τεράστια ποσότητα ενέργειας στη διαδικασία.

Σε αντίθεση με την πυρηνική σχάση, η οποία είναι η διάσπαση των ατομικών πυρήνων που τροφοδοτεί τους σημερινούς πυρηνικούς αντιδραστήρες μας, η πυρηνική σύντηξη περιλαμβάνει τη συγχώνευση ατομικών πυρήνων για να σχηματιστεί ένας βαρύτερος πυρήνας. Αυτή η διαδικασία σύντηξης συμβαίνει κάτω από ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, παρόμοιες με αυτές που βρίσκονται στον πυρήνα των άστρων[27].

Το κύριο καύσιμο για την πυρηνική σύντηξη είναι τα ισότοπα του υδρογόνου, ιδιαίτερα το δευτέριο και το τρίτιο. Αυτά τα ισότοπα είναι άφθονα διαθέσιμα στο θαλασσινό νερό και μπορούν να εξαχθούν χωρίς σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Όταν οι πυρήνες δευτερίου και τριτίου έρχονται αρκετά κοντά μεταξύ τους, ξεπερνούν τη φυσική τους απώθηση και συντήκονται, σχηματίζοντας έναν πυρήνα ήλιου και απελευθερώνοντας μια τεράστια ποσότητα ενέργειας με τη μορφή σωματιδίων υψηλής ενέργειας.

Η ενέργεια που απελευθερώνεται στην πυρηνική σύντηξη είναι αρκετές φορές μεγαλύτερη από αυτή που απελευθερώνεται στην πυρηνική σχάση. Έχει τη δυνατότητα να παράγει τεράστιες ποσότητες καθαρής ενέργειας χωρίς να δημιουργεί μακρόβια ραδιενεργά απόβλητα ή εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Επιπλέον, το καύσιμο για τη σύντηξη είναι ουσιαστικά ανεξάντλητο, προσφέροντας τη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας σε κλίμακα που θα μπορούσε να καλύψει την παγκόσμια ζήτηση για τους επόμενους αιώνες.

Επιστήμονες και μηχανικοί εργάζονται ενεργά για την ανάπτυξη πρακτικών μεθόδων για την αξιοποίηση της πυρηνικής σύντηξης για την παραγωγή ενέργειας. Διερευνώνται διάφορες προσεγγίσεις, συμπεριλαμβανομένης της μαγνητικής σύντηξης περιορισμού (όπως τα tokamaks) και της αδρανειακής σύντηξης περιορισμού (όπως η σύντηξη με λέιζερ). Αυτές οι μέθοδοι στοχεύουν στη δημιουργία και διατήρηση των ακραίων συνθηκών που απαιτούνται για να συμβούν αντιδράσεις σύντηξης και στην εξαγωγή της ενέργειας που προκύπτει με ελεγχόμενο και αποδοτικό τρόπο[27].

Το θέμα αυτό έγκειται στην αναπαραγωγή των ακραίων συνθηκών που βρίσκονται στον πυρήνα του ήλιου, όπου η σύντηξη συμβαίνει φυσικά. Προκειμένου να επιτευχθούν βιώσιμες αντιδράσεις σύντηξης στη Γη, οι επιστήμονες διερευνούν διαφορετικές προσεγγίσεις, όπως ο μαγνητικός περιορισμός και ο αδρανειακός

περιορισμός. Ο μαγνητικός περιορισμός περιλαμβάνει τη χρήση ισχυρών μαγνητικών πεδίων για τον περιορισμό και τον έλεγχο του ζεστού, ιονισμένου πλάσματος, ενώ ο αδρανειακός περιορισμός βασίζεται σε ισχυρά λέιζερ ή δέσμες σωματιδίων για τη συμπίεση και τη θέρμανση του καυσίμου στις απαιτούμενες θερμοκρασίες και πυκνότητες.

Ο "μαγνητικός περιορισμός" και ο "αδρανειακός περιορισμός" είναι δύο ξεχωριστές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στον τομέα της πυρηνικής σύντηξης για την επίτευξη των απαραίτητων συνθηκών για την πραγματοποίηση αντιδράσεων σύντηξης.

Ο "μαγνητικός περιορισμός" αναφέρεται σε μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και τον περιορισμό του πλάσματος υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας ισχυρά μαγνητικά πεδία. Σε αυτή την προσέγγιση, όπως στα tokamaks, μια συσκευή σε σχήμα ντόνατς, δημιουργείται ένα σπειροειδές μαγνητικό πεδίο για να περιορίσει το πλάσμα μέσα σε ένα δοχείο κενού. Το πλάσμα είναι μια από τις τέσσερις βασικές καταστάσεις της ύλης, μαζί με το στερεό, το υγρό και το αέριο. Το πλάσμα διαφέρει από τις άλλες καταστάσεις, επειδή έχει ένα σημαντικό μέρος φορτισμένων σωματιδίων, όπως ιόντα και ηλεκτρόνια. Αυτό σημαίνει ότι το πλάσμα είναι ηλεκτρικά αγωγικό και επηρεάζεται από τα μαγνητικά πεδία.

Το πλάσμα είναι η πιο συνηθισμένη κατάσταση της ύλης στο σύμπαν, και βρίσκεται κυρίως στους αστέρες, όπως ο Ήλιος. Για να δημιουργήσουμε πλάσμα στο εργαστήριο, πρέπει να θερμάνουμε ή να εφαρμόσουμε έντονο ηλεκτρικό πεδίο σε ένα αέριο, ώστε να αποκοπούν τα ηλεκτρόνια από τους πυρήνες και να δημιουργηθούν φορτισμένα σωματίδια[162].

Το πλάσμα θερμαίνεται σε ακραίες θερμοκρασίες, συνήθως στην περιοχή των εκατοντάδων εκατομμυρίων βαθμών Κελσίου, για την έναρξη και τη διατήρηση των αντιδράσεων σύντηξης. Τα μαγνητικά πεδία εμποδίζουν το θερμό πλάσμα να έρθει σε επαφή με τα τοιχώματα του αγγείου, διατηρώντας έτσι τη σταθερότητά του και επιτρέποντας την εξέλιξη των αντιδράσεων σύντηξης. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στον περιορισμό του πλάσματος για παρατεταμένο χρονικό διάστημα για την επίτευξη μιας αυτοσυντηρούμενης αντίδρασης σύντηξης.

Από την άλλη πλευρά, ο «αδρανειακός περιορισμός» περιλαμβάνει μια διαφορετική προσέγγιση όπου η σύντηξη επιτυγχάνεται με ταχεία συμπίεση και θέρμανση μιας μικρής κάψουλας στόχου που περιέχει δευτέριο και τρίτιο. Ισχυρά λέιζερ ή ακτίνες ιόντων χρησιμοποιούνται για την παροχή παλμού υψηλής ενέργειας στον στόχο, δημιουργώντας ένα έντονο κρουστικό κύμα που συμπιέζει το καύσιμο σε εξαιρετικά υψηλές πυκνότητες και θερμοκρασίες για μια σύντομη στιγμή. Αυτή η συμπίεση αναγκάζει το καύσιμο να φτάσει τις απαραίτητες συνθήκες για να συμβούν αντιδράσεις σύντηξης. Ο περιορισμός της αδράνειας βασίζεται στην ταχεία και ακριβή συμπίεση του καυσίμου, χρησιμοποιώντας την αδράνεια του ίδιου του καυσίμου για να διατηρήσει την αντίδραση σύντηξης για σύντομη διάρκεια.

Τόσο ο μαγνητικός περιορισμός όσο και ο αδρανειακός περιορισμός έχουν τα πλεονεκτήματα και τις δυσκολίες τους. Ο μαγνητικός περιορισμός επωφελείται από την ικανότητά του να επιτυγχάνει μεγάλους χρόνους περιορισμού πλάσματος, επιτρέποντας τη λειτουργία σε σταθερή κατάσταση και μια πιο συνεχή παραγωγή ενέργειας. Ωστόσο, απαιτεί εξελιγμένες και πολύπλοκες διαμορφώσεις μαγνητικού πεδίου και αντιμετωπίζει προκλήσεις όσον αφορά τη διατήρηση της σταθερότητας του πλάσματος και τον έλεγχο των αστάθειών.

Ο αδρανειακός περιορισμός, από την άλλη πλευρά, προσφέρει το πλεονέκτημα των υψηλών ενεργειακών πυκνοτήτων και της δυνητικά γρήγορης ανάφλεξης, καθιστώντας το κατάλληλο για παλμική λειτουργία. Απαιτεί ακριβή χρονοισμό και στόχευση της ενέργειας συμπίεσης για την επίτευξη σύντηξης και αντιμετωπίζει ζητήματα στην επίτευξη υψηλών αναλογιών συμπίεσης και στον έλεγχο των αστάθειών κατά τη διαδικασία έκρηξης.

Συνολικά, τόσο οι προσεγγίσεις μαγνητικού περιορισμού όσο και οι προσεγγίσεις αδρανειακού περιορισμού στοχεύουν ενεργά στην αναζήτηση πρακτικής ενέργειας σύντηξης. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη σε αυτούς τους τομείς στοχεύει να ξεπεράσει τα τεχνικά εμπόδια και να μας φέρει πιο κοντά στην υλοποίηση μιας βιώσιμης πηγής ενέργειας σύντηξης[164].

Αν και έχουν σημειωθεί σημαντικές πρόοδοι, η επίτευξη πρακτικής πυρηνικής σύντηξης ως αξιόπιστης πηγής ενέργειας εξακολουθεί να απαιτεί την υπέρβαση πολλών τεχνικών και μηχανικών προκλήσεων. Αυτές οι προκλήσεις περιλαμβάνουν τη διατήρηση της σταθερότητας του πλάσματος, την εύρεση αποτελεσματικών

τρόπων θέρμανσης του καυσίμου και την ανάπτυξη υλικών που μπορούν να αντέξουν τις ακραίες συνθήκες εντός των αντιδραστήρων σύντηξης. Επιπλέον, η βελτιστοποίηση της αντίδρασης σύντηξης για την επίτευξη καθαρού κέρδους ενέργειας, όπου παράγεται περισσότερη ενέργεια από ό,τι καταναλώνεται, είναι ένας βασικός στόχος.

Παρά τα εναπομείναντα εμπόδια, η πρόοδος που σημειώθηκε στα εργαστηριακά πειράματα σύντηξης και οι συνεχείς ερευνητικές προσπάθειες παρέχουν πολλά υποσχόμενα σημάδια για το μέλλον της ενέργειας σύντηξης. Εάν αξιοποιηθεί επιτυχώς, θα έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στην παραγωγή ενέργειας, προσφέροντας μια καθαρή, ασφαλή και ουσιαστικά απεριόριστη πηγή ενέργειας χωρίς τα μακροπρόθεσμα ραδιενεργά απόβλητα και τον κίνδυνο κατάρρευσης που σχετίζεται με την πυρηνική σχάση [\[27\]](#).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Ιστορική αναδρομή

Η πυρηνική ενέργεια αποτελεί σημαντικό μέρος του παγκόσμιου ενεργειακού μείγματος για πάνω από έξι δεκαετίες. Είναι μια πηγή ενέργειας που παρέχει ηλεκτρική ενέργεια με χαμηλές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και μπορεί να λειτουργεί συνεχώς χωρίς να υπόκειται σε καιρικές συνθήκες. Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας έχει ρυθμιστεί από εθνικούς και διεθνείς θεσμούς για να διασφαλιστεί η ασφαλής και ειρηνική χρήση της. Σε αυτό το κεφάλαιο θα κάνουμε μια ιστορική ανασκόπηση του θεσμικού πλαισίου που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια, συμπεριλαμβανομένων των διεθνών και εθνικών θεσμών που έχουν διαδραματίσει ρόλο στη ρύθμισή της.

2.1.1 Διεθνείς Οργανισμοί

Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) είναι ο κύριος διεθνής οργανισμός που είναι υπεύθυνος για την προώθηση της ειρηνικής χρήσης της πυρηνικής ενέργειας. Ο ΔΟΑΕ ιδρύθηκε το 1957 υπό την αιγίδα των Ηνωμένων Εθνών για την προώθηση της ειρηνικής χρήσης της πυρηνικής ενέργειας και είναι ο κύριος διακυβερνητικός οργανισμός που είναι υπεύθυνος για την πυρηνική ασφάλεια. Οι κύριες λειτουργίες του περιλαμβάνουν την ανάπτυξη προτύπων ασφαλείας, την παροχή τεχνικής βοήθειας στα κράτη μέλη και την προώθηση της ειρηνικής χρήσης της πυρηνικής ενέργειας. Ο ΔΟΑΕ επιβλέπει επίσης την εφαρμογή διεθνών συνθηκών που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια, όπως η Συνθήκη για τη μη διάδοση των πυρηνικών όπλων, η οποία αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο του διεθνούς καθεστώτος μη διάδοσης των πυρηνικών όπλων. Στοχεύει στην πρόληψη της εξάπλωσης πυρηνικών όπλων και στην προώθηση του αφοπλισμού.

Ένας άλλος σημαντικός διεθνής θεσμός που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια είναι ο Όμιλος Πυρηνικών Προμηθευτών (NSG - Nuclear Suppliers Group). Η NSG είναι μια ομάδα χωρών που επιδιώκει να αποτρέψει τη διάδοση των πυρηνικών όπλων ελέγχοντας τις εξαγωγές πυρηνικών υλικών και τεχνολογιών. Η NSG ιδρύθηκε

το 1974 ως απάντηση στη δοκιμή της Ινδίας με την πυρηνική ενέργεια, η οποία απέδειξε ότι η πυρηνική τεχνολογία μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για στρατιωτικούς σκοπούς. Η NSG έχει θεσπίσει κατευθυντήριες γραμμές για την εξαγωγή πυρηνικών υλικών και τεχνολογιών σε κράτη που δεν διαθέτουν πυρηνικά όπλα, προκειμένου να αποτρέψει τη χρήση τους για στρατιωτικούς σκοπούς [19].

2.1.2 Εθνικά ιδρύματα

Εκτός από τους διεθνείς θεσμούς, τα εθνικά ιδρύματα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη ρύθμιση της πυρηνικής ενέργειας. Το ρυθμιστικό πλαίσιο για την πυρηνική ενέργεια διαφέρει από χώρα σε χώρα, αλλά υπάρχουν ορισμένα κοινά στοιχεία. Οι εθνικοί ρυθμιστικοί φορείς είναι υπεύθυνοι για τη διασφάλιση της ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων και υλικών, καθώς και για την παρακολούθηση της συμμόρφωσης με τους εθνικούς και διεθνείς κανονισμούς.

Η Ρυθμιστική Επιτροπή Πυρηνικών των Ηνωμένων Πολιτειών (NRC) είναι ο κύριος ρυθμιστικός φορέας που είναι υπεύθυνος για την ασφαλή χρήση της πυρηνικής ενέργειας στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το NRC ιδρύθηκε το 1975 μετά την ψήφιση του νόμου για την ενεργειακή αναδιοργάνωση, ο οποίος κατήργησε την Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας και μεταβίβασε τις αρμοδιότητές της στο NRC και στη Διοίκηση Έρευνας και Ανάπτυξης Ενέργειας. Το NRC είναι υπεύθυνο για την αδειοδότηση και τη ρύθμιση πυρηνικών εγκαταστάσεων και υλικών, καθώς και για την επιβολή των κανονισμών ασφαλείας και ασφάλειας στις Η.Π.Α.[28].

Η Γαλλία διαθέτει έναν κεντρικό ρυθμιστικό φορέα, το Autorité desûreté nucléaire (ASN), υπεύθυνο για τη ρύθμιση της πυρηνικής ενέργειας. Το ASN ιδρύθηκε το 2006 και είναι υπεύθυνο για την ασφάλεια και την ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων και υλικών, καθώς και για την παρακολούθηση της συμμόρφωσης με τους εθνικούς και διεθνείς κανονισμούς. Το ASN έχει την εξουσία να κλείσει τις πυρηνικές εγκαταστάσεις εάν δεν πληρούν τα πρότυπα ασφαλείας [37].

Ο ρυθμιστικός φορέας της Ιαπωνίας είναι η Αρχή Πυρηνικών Κανονισμών (NRA–National Rifle Association). Η NRA ιδρύθηκε το 2012 μετά την πυρηνική καταστροφή της Φουκουσίμα, η οποία τόνισε την ανάγκη για έναν πιο ανεξάρτητο και διαφανή ρυθμιστικό φορέα(Autorité de sûreténucléaire, 2021). Η NRA είναι υπεύθυνη για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της ασφάλειας των πυρηνικών

εγκαταστάσεων και υλικών, καθώς και για την παρακολούθηση της συμμόρφωσης με τους εθνικούς και διεθνείς κανονισμούς [38].

2.1.3 Προκλήσεις και αντιπαραθέσεις

Παρά τις προσπάθειες του θεσμικού πλαισίου για τη διασφάλιση της ασφαλούς και ειρηνικής χρήσης της πυρηνικής ενέργειας, έχουν προκύψει αρκετές προκλήσεις και αντιπαραθέσεις. Μία από τις σημαντικότερες, είναι το θέμα της διάθεσης πυρηνικών αποβλήτων. Τα υποπροϊόντα της παραγωγής πυρηνικής ενέργειας, όπως οι ράβδοι αναλωμένου καυσίμου, είναι εξαιρετικά ραδιενεργά και απαιτούν ασφαλή και ασφαλή διάθεση. Το ζήτημα της διάθεσης πυρηνικών αποβλήτων είναι ένα επίμαχο ζήτημα εδώ και δεκαετίες, χωρίς σαφή και καθολικά αποδεκτή λύση [39].

Μια άλλη σημαντική πρόκληση είναι η πιθανότητα πυρηνικών ατυχημάτων. Οι πυρηνικές καταστροφές του Τσερνομπίλ και της Φουκουσίμα είναι τα πιο αξιοσημείωτα παραδείγματα των καταστροφικών συνεπειών ενός πυρηνικού ατυχήματος. Αυτά τα ατυχήματα έχουν καταδείξει τη σημασία των ισχυρών μέτρων ασφαλείας, της ετοιμότητας έκτακτης ανάγκης και της διαφάνειας στη ρυθμιστική διαδικασία. Το θεσμικό πλαίσιο έχει ανταποκριθεί σε αυτές τις δυσκολίες εισάγοντας αυστηρότερα πρότυπα ασφαλείας και διαδικασίες αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης [28].

Υπάρχουν επίσης διαφωνίες σχετικά με τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας, ιδίως όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της και τις δυνατότητες διάδοσης πυρηνικών όπλων. Ενώ η πυρηνική ενέργεια παράγει χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, εξακολουθεί να έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η θερμική ρύπανση των υδάτινων σωμάτων και οι αρνητικές επιπτώσεις της εξόρυξης ουρανίου. Επιπλέον, υπάρχει ανησυχία ότι η διάδοση των τεχνολογιών πυρηνικής ενέργειας θα μπορούσε να οδηγήσει σε αυξημένο κίνδυνο διάδοσης πυρηνικών όπλων [37].

2.1.3 Ο ρόλος της κοινής αντίληψης

Η αντίληψη του κοινού παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του θεσμικού πλαισίου που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια. Η αντίληψη για την πυρηνική ενέργεια έχει επηρεαστεί από γεγονότα όπως οι πυρηνικές καταστροφές στο Τσερνομπίλ και στη Φουκουσίμα, τα οποία είχαν μόνιμο αντίκτυπο στη στάση του

κοινού απέναντι στην πυρηνική ενέργεια. Η αντίληψη του κοινού για την πυρηνική ενέργεια επηρεάζεται από παράγοντες όπως η κάλυψη από τα μέσα ενημέρωσης, ο πολιτικός λόγος και οι πολιτιστικές συμπεριφορές [40].

Το θεσμικό πλαίσιο ανταποκρίθηκε στην αντίληψη του κοινού αυξάνοντας τη διαφάνεια και τη συμμετοχή του κοινού στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Για παράδειγμα, ο ΔΟΑΕ (Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας) έχει καθιερώσει τη διεθνή κλίμακα πυρηνικών και ραδιολογικών γεγονότων (INES–International Nuclear Event Scale), η οποία παρέχει μια τυποποιημένη και διαφανή μέθοδο για την κοινοποίηση της σημασίας για την ασφάλεια των πυρηνικών και ραδιολογικών συμβάντων στο κοινό. Ομοίως, πολλοί εθνικοί ρυθμιστικοί φορείς, όπως το NRC, απαιτούν δημόσιες ακροάσεις και περιόδους σχολίων για την αδειοδότηση πυρηνικών εγκαταστάσεων και τις αιτήσεις αδειών [39].

Συμπερασματικά, το θεσμικό πλαίσιο που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια έχει εξελιχθεί με την πάροδο του χρόνου ώστε να διασφαλίζεται η ασφαλής και ειρηνική χρήση της. Οι διεθνείς και εθνικοί θεσμοί διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη ρύθμιση της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας, με κοινό στόχο τη διασφάλιση της ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων και υλικών. Ωστόσο, το θεσμικό πλαίσιο αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις και αντιπαραθέσεις, όπως η διάθεση πυρηνικών αποβλήτων, τα πιθανά ατυχήματα και η αντίληψη του κοινού. Το θεσμικό πλαίσιο πρέπει να συνεχίσει να προσαρμόζεται σε αυτές τις προκλήσεις και αντιπαραθέσεις, διατηρώντας παράλληλα τη δέσμευσή του για ασφάλεια και διαφάνεια.

2.2 Διεθνείς συνθήκες

Οι διεθνείς συνθήκες έχουν παίξει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του θεσμικού πλαισίου που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια. Αυτές οι συνθήκες έχουν θεσπιστεί για να προωθήσουν την ειρηνική χρήση της πυρηνικής ενέργειας, να διασφαλίσουν την ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων και να αποτρέψουν τη διάδοση των πυρηνικών όπλων. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα εξετάσουμε μερικές από τις σημαντικότερες διεθνείς συνθήκες που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια και τον αντίκτυπό τους στο θεσμικό πλαίσιο.

Η Συνθήκη για τη Μη Διάδοση των Πυρηνικών Όπλων (NPT - Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons) είναι ίσως η πιο σημαντική συνθήκη που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια. Η NPT υπογράφηκε το 1968 και έκτοτε έχει επικυρωθεί από 191 χώρες. Η συνθήκη έχει δύο βασικούς στόχους. Το πρώτο είναι να αποτραπεί η εξάπλωση των πυρηνικών όπλων και να προωθηθεί ο αφοπλισμός. Το δεύτερο είναι η προώθηση της ειρηνικής χρήσης της πυρηνικής ενέργειας. Σύμφωνα με τη συνθήκη, τα κράτη που δεν διαθέτουν πυρηνικά όπλα δεσμεύονται να μην αποκτήσουν πυρηνικά όπλα και να επιτρέψουν στον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) να επιθεωρήσει τις πυρηνικές τους εγκαταστάσεις για να εξασφαλίσει τη συμμόρφωση με τη συνθήκη. Τα κράτη που διαθέτουν πυρηνικά όπλα δεσμεύονται να εργαστούν για τον αφοπλισμό και να παρέχουν βοήθεια σε κράτη που δεν διαθέτουν πυρηνικά όπλα στην ειρηνική χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Η NPT συνέβαλε καθοριστικά στην πρόληψη της διάδοσης πυρηνικών όπλων και στην προώθηση της διεθνούς συνεργασίας για την ειρηνική χρήση της πυρηνικής ενέργειας. [\[20\]](#)

Η Σύμβαση για την Πυρηνική Ασφάλεια (CNS—Convention of Nuclear Safety) θεσπίστηκε το 1994 και έκτοτε έχει επικυρωθεί από 81 χώρες. Η CNS, στοχεύει στη διασφάλιση της ασφάλειας των πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και στην πρόληψη ατυχημάτων που θα μπορούσαν να βλάψουν τους ανθρώπους ή το περιβάλλον. Η σύμβαση απαιτεί από τα κράτη μέλη να θεσπίσουν εθνικούς κανονισμούς για την πυρηνική ασφάλεια, να δημιουργήσουν και να διατηρήσουν ένα ρυθμιστικό φορέα για την πυρηνική ασφάλεια και να διασφαλίσουν ότι οι πυρηνικές εγκαταστάσεις τους είναι ασφαλείς. Η σύμβαση απαιτεί επίσης από τα κράτη μέλη να υποβάλλονται σε περιοδικές αναθεωρήσεις ασφάλειας και να ανταλλάσσουν πληροφορίες με άλλα κράτη μέλη. Η CNS, έχει συμβάλει καθοριστικά στην προώθηση της διεθνούς συνεργασίας στον τομέα της πυρηνικής ασφάλειας και στη βελτίωση της ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων παγκοσμίως [\[24\]](#).

Η Κοινή Σύμβαση για την Ασφάλεια της Διαχείρισης Αναλωμένων Καυσίμων και για την Ασφάλεια της Διαχείρισης Ραδιενεργών Αποβλήτων θεσπίστηκε το 1997 και έκτοτε έχει επικυρωθεί από 85 χώρες. Η σύμβαση αποσκοπεί στη διασφάλιση της ασφαλούς διαχείρισης των αναλωμένων πυρηνικών καυσίμων και των ραδιενεργών αποβλήτων. Η Σύμβαση ορίζει ότι τα κράτη μέλη πρέπει να:

- έχουν εθνικές πολιτικές και κανονισμούς για την ασφάλεια των αναλωμένων πυρηνικών καυσίμων και των ραδιενεργών αποβλήτων.
- δημιουργήσουν και διατηρήσουν ένα ρυθμιστικό φορέα γι' αυτό το σκοπό.
- εξασφαλίσουν την ασφάλεια των εγκαταστάσεών τους γι' αυτά τα υλικά

Η σύμβαση απαιτεί επίσης από τα κράτη μέλη να συνεργάζονται με άλλα κράτη μέλη για την ασφαλή διαχείριση των αναλωμένων πυρηνικών καυσίμων και των ραδιενεργών αποβλήτων. Η Κοινή Σύμβαση υπήρξε καθοριστική για την προώθηση της διεθνούς συνεργασίας για την ασφαλή διαχείριση αναλωμένων πυρηνικών καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων και για τη βελτίωση της ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων παγκοσμίως.

Η Συνθήκη για την Ολοκληρωμένη Απαγόρευση των Πυρηνικών Δοκιμών (CTBT - Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty) θεσπίστηκε το 1996 και έκτοτε έχει υπογραφεί από 184 χώρες, αν και δεν έχει ακόμη τεθεί σε ισχύ. Η συνθήκη στοχεύει στην απαγόρευση όλων των πυρηνικών εκρήξεων, είτε για στρατιωτικούς είτε για ειρηνικούς σκοπούς. Η συνθήκη απαιτεί από τα κράτη μέλη να δημιουργήσουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα για την ανίχνευση και την παρακολούθηση πυρηνικών εκρήξεων, να ανταλλάσσουν δεδομένα με άλλα κράτη μέλη και να επιτρέπουν επιτόπιες επιθεωρήσεις για την επαλήθευση της συμμόρφωσης με τη συνθήκη. Το CTBT συνέβαλε καθοριστικά στην προώθηση της διεθνούς συνεργασίας για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση πυρηνικών εκρήξεων και για την πρόληψη της ανάπτυξης νέων πυρηνικών όπλων.

Εκτός από αυτές τις συνθήκες, υπάρχουν και άλλες σημαντικές συμφωνίες και πρωτόκολλα που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια. Για παράδειγμα, η Σύμβαση για την έγκαιρη ειδοποίηση πυρηνικού ατυχήματος και η σύμβαση για την παροχή βοήθειας σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος ή έκτακτης ανάγκης από ακτινοβολία στοχεύουν και οι δύο στη βελτίωση της διεθνούς συνεργασίας για την αντιμετώπιση πυρηνικών ατυχημάτων. Ο Κώδικας Δεοντολογίας για την Ασφάλεια των Ραδιενεργών Πηγών παρέχει οδηγίες για την ασφαλή χρήση ραδιενεργών πηγών, ενώ η Διεθνής Σύμβαση για την Καταστολή Πράξεων Πυρηνικής Τρομοκρατίας στοχεύει στην πρόληψη πράξεων πυρηνικής τρομοκρατίας.

Συνολικά, αυτές οι συνθήκες και συμφωνίες αντικατοπτρίζουν τη δέσμευση της διεθνούς κοινότητας να διασφαλίσει την ειρηνική και ασφαλή χρήση της πυρηνικής ενέργειας, αποτρέποντας ταυτόχρονα τη διάδοση πυρηνικών όπλων και μετριάζοντας τους κινδύνους πυρηνικών ατυχημάτων και καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Μέσω της διεθνούς συνεργασίας και της θέσπισης κοινών κανόνων και προτύπων, το θεσμικό πλαίσιο που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια έχει γίνει πιο ισχυρό, διασφαλίζοντας ότι η πυρηνική ενέργεια μπορεί να συνεχίσει να διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κόσμου, προστατεύοντας ταυτόχρονα την ασφάλεια και την ασφάλεια των ανθρώπων και το περιβάλλον [\[41\]](#).

Μια άλλη σημαντική συνθήκη που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια είναι η Σύμβαση για την Πυρηνική Ευθύνη, η οποία εγκρίθηκε το 1960 και τροποποιήθηκε το 1997. Η Σύμβαση θεσπίζει καθεστώς ευθύνης για πυρηνική ζημία, που σημαίνει ότι οι φορείς εκμετάλλευσης πυρηνικών εγκαταστάσεων θεωρούνται οικονομικά υπεύθυνοι για οποιαδήποτε ζημία προκληθεί από πυρηνικό συμβάν. Η Σύμβαση θεσπίζει επίσης ένα σύστημα διασυννοριακής αποζημίωσης σε περίπτωση διασυννοριακού πυρηνικού συμβάντος. Αυτό σημαίνει ότι εάν ένα πυρηνικό συμβάν συμβεί σε μια χώρα και προκαλέσει ζημιά σε μια άλλη, ο χειριστής της πυρηνικής εγκατάστασης στη χώρα όπου συνέβη το συμβάν είναι υπεύθυνος για την αποζημίωση των πληγέντων, ανεξάρτητα από το πού βρίσκονται.

Η Σύμβαση για την Πυρηνική Ασφάλεια, που εγκρίθηκε το 1994, είναι μια άλλη βασική συνθήκη που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια. Η Σύμβαση αποσκοπεί στη διασφάλιση της ασφάλειας των πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και άλλων πυρηνικών εγκαταστάσεων και απαιτεί από τα μέρη της να ιδρύσουν ρυθμιστικούς φορείς και να ανταλλάσσουν πληροφορίες και βέλτιστες πρακτικές σχετικά με την πυρηνική ασφάλεια. Η Σύμβαση έχει επικυρωθεί από 84 χώρες και την Ευρωπαϊκή Ένωση και είναι νομικά δεσμευτική για τα μέρη της.

Η κοινή σύμβαση για την ασφάλεια της διαχείρισης αναλωμένων καυσίμων και για την ασφάλεια της διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων, που εγκρίθηκε το 1997, αποτελεί συμπληρωματική συνθήκη της σύμβασης για την πυρηνική ασφάλεια. Η Κοινή Σύμβαση αποσκοπεί στη διασφάλιση της ασφαλούς διαχείρισης αναλωμένων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένης της σύστασης ρυθμιστικών φορέων και της ανταλλαγής βέλτιστων πρακτικών σχετικά με την

ασφαλή αποθήκευση και διάθεση πυρηνικών αποβλήτων. Η Κοινή Σύμβαση έχει επικυρωθεί από 78 χώρες και την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Η Συνθήκη για την Απαγόρευση των Πυρηνικών Όπλων (TPNW– Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons Prohibition of Nuclear Weapons) είναι μια σχετικά νέα συνθήκη που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια, η οποία εγκρίθηκε το 2017 και τέθηκε σε ισχύ τον Ιανουάριο του 2021. Η TPNW απαγορεύει την ανάπτυξη, τη δοκιμή, την παραγωγή, την αποθήκευση, τη χρήση και την απειλή χρήσης πυρηνικών όπλων και απαιτεί από τα μέρη της να λάβουν μέτρα για να εξασφαλίσουν την εξάλειψη των πυρηνικών όπλων. Από τον Μάρτιο του 2023, το TPNW έχει επικυρωθεί από 38 χώρες και έχει υπογραφεί από 91.

Το θεσμικό πλαίσιο που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια περιλαμβάνει επίσης αρκετούς σημαντικούς διεθνείς οργανισμούς, όπως ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (IAEA) και ο Οργανισμός Πυρηνικής Ενέργειας (NEA- Nuclear Energy Agency). Ο ΔΟΑΕ, που ιδρύθηκε το 1957, είναι ένας διακυβερνητικός οργανισμός που προωθεί την ειρηνική χρήση της πυρηνικής ενέργειας και της πυρηνικής τεχνολογίας, διασφαλίζοντας παράλληλα την πυρηνική ασφάλεια και την πρόληψη της διάδοσης των πυρηνικών όπλων. Ο ΔΟΑΕ λειτουργεί διάφορα προγράμματα που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια, όπως το Πρόγραμμα Τεχνικής Συνεργασίας, το οποίο παρέχει βοήθεια στα κράτη μέλη του για την ειρηνική χρήση της πυρηνικής τεχνολογίας.

Η NEA (Nuclear Energy Agency), που ιδρύθηκε το 1958, είναι ένας άλλος διακυβερνητικός οργανισμός που προωθεί την ασφαλή, αποτελεσματική και βιώσιμη χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Η NEA λειτουργεί διάφορα προγράμματα που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια, όπως η Διεθνής Ακαδημία Πυρηνικής Ενέργειας, η οποία παρέχει κατάρτιση και εκπαίδευση σε επαγγελματίες στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας. Η NEA διεξάγει επίσης έρευνα και αναλύσεις σχετικά με την πολιτική και τεχνολογία πυρηνικής ενέργειας και παρέχει καθοδήγηση στα κράτη μέλη της σχετικά με τις βέλτιστες πρακτικές που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια.

Ένας άλλος σημαντικός οργανισμός που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια είναι η Παγκόσμια Ένωση Πυρηνικών Χειριστών (WANO–World Association of Nuclear Operators), η οποία ιδρύθηκε το 1989 ως απάντηση στην καταστροφή του

Τσερνομπίλ. Ο WANO είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός που προωθεί την πυρηνική ασφάλεια παρέχοντας αξιολόγηση και υποστήριξη από ομότιμους στα μέλη του, τα οποία είναι χειριστές πυρηνικών σταθμών σε όλο τον κόσμο. Η WANO διενεργεί αξιολογήσεις των επιδόσεων ασφάλειας των μελών της και παρέχει καθοδήγηση σχετικά με τις βέλτιστες πρακτικές που σχετίζονται με την πυρηνική ασφάλεια. Ο οργανισμός διευκολύνει επίσης την ανταλλαγή πληροφοριών και τη συνεργασία μεταξύ των μελών του για την προώθηση της συνεχούς βελτίωσης της πυρηνικής ασφάλειας.

Εκτός από αυτούς τους οργανισμούς, υπάρχουν και αρκετοί περιφερειακοί οργανισμοί που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια. Για παράδειγμα, η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας (Euratom) ιδρύθηκε το 1957 για να προωθήσει την ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας στην Ευρώπη. Η Euratom λειτουργεί διάφορα προγράμματα που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια, όπως το Κοινό Κέντρο Ερευνών, το οποίο διεξάγει έρευνα για την πυρηνική ασφάλεια, την ασφάλεια και την τεχνολογία. Ο οργανισμός έχει επίσης ρυθμιστικές λειτουργίες που σχετίζονται με την πυρηνική ασφάλεια και ασφάλεια στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Το θεσμικό πλαίσιο που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια εξελίσσεται συνεχώς καθώς αναδύονται νέες τεχνολογίες, ανησυχίες για την ασφάλεια και γεωπολιτικοί παράγοντες. Για παράδειγμα, η πυρηνική καταστροφή της Φουκουσίμα το 2011 οδήγησε σε μια εκ νέου εστίαση στην πυρηνική ασφάλεια και οδήγησε σε αλλαγές στους κανονισμούς και τα πρότυπα ασφαλείας σε πολλές χώρες[41].

Συνολικά, οι διεθνείς συνθήκες και οι οργανισμοί που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην προώθηση της ασφαλούς, ειρηνικής και βιώσιμης χρήσης της πυρηνικής ενέργειας. Αυτοί οι θεσμοί συμβάλλουν στο να διασφαλιστεί ότι η πυρηνική ενέργεια χρησιμοποιείται υπεύθυνα, ότι αντιμετωπίζονται οι ανησυχίες για την ασφάλεια και ότι ελαχιστοποιούνται οι κίνδυνοι που συνδέονται με την πυρηνική ενέργεια. Ωστόσο, υπάρχουν επίσης συνεχείς συζητήσεις και προβλήματα που σχετίζονται με τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων ανησυχιών για τη διάδοση των πυρηνικών όπλων, τη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων και την πιθανότητα ατυχημάτων ή συμβάντων. Αυτά τα ζητήματα θα συνεχίσουν να διαμορφώνουν το θεσμικό πλαίσιο που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια τα επόμενα χρόνια.

2.2.1 Ρόλος των Διεθνών Οργανισμών

Οι διεθνείς οργανισμοί διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της πυρηνικής ασφάλειας. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο ΔΟΑΕ είναι υπεύθυνος για την ανάπτυξη και την εφαρμογή διεθνών συμφωνιών που σχετίζονται με την πυρηνική ασφάλεια. Επιπλέον, ο ΔΟΑΕ παρέχει επίσης τεχνική βοήθεια και εκπαίδευση στα κράτη μέλη για να τα βοηθήσει να βελτιώσουν τις πρακτικές πυρηνικής ασφάλειας τους.

Τα Ηνωμένα Έθνη (ΟΗΕ) διαδραματίζουν επίσης ρόλο στην προώθηση της πυρηνικής ασφάλειας. Το 2004, το Συμβούλιο Ασφαλείας των Ηνωμένων Εθνών υιοθέτησε την Απόφαση 1540, η οποία απαιτεί από όλα τα κράτη να αποτρέψουν τη διάδοση πυρηνικών, χημικών και βιολογικών όπλων, καθώς και των συστημάτων παράδοσης τους, σε μη κρατικούς φορείς. Το ψήφισμα απαιτεί από τα κράτη να θεσπίσουν και να επιβάλουν κατάλληλα νομικά και ρυθμιστικά μέτρα για να αποτρέψουν τη διάδοση αυτών των όπλων. Το ψήφισμα ζητά επίσης διεθνή συνεργασία για την υποστήριξη των κρατών στην εφαρμογή αυτών των μέτρων.

Η Παγκόσμια Πρωτοβουλία για την Καταπολέμηση της Πυρηνικής Τρομοκρατίας (GICNT –GlobalInitiativetoCombat Nuclear Terrorism) είναι ένας άλλος διεθνής οργανισμός που στοχεύει στην ενίσχυση της παγκόσμιας πυρηνικής ασφάλειας. Το GICNT είναι μια εταιρική σχέση μεταξύ 30 χωρών και τεσσάρων διεθνών οργανισμών, συμπεριλαμβανομένου του ΔΟΑΕ, με στόχο την πρόληψη της πυρηνικής τρομοκρατίας. Το GICNT στοχεύει στην προώθηση της διεθνούς συνεργασίας και της ανάπτυξης ικανοτήτων για την πρόληψη, τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση της πυρηνικής τρομοκρατίας.

Διεθνείς οργανισμοί όπως ο ΔΟΑΕ, ο ΟΗΕ και το GICNT είναι απαραίτητοι για την προώθηση της πυρηνικής ασφάλειας παγκοσμίως. Αυτοί οι οργανισμοί παρέχουν καθοδήγηση, τεχνική βοήθεια και εκπαίδευση για να βοηθήσουν τα κράτη μέλη να βελτιώσουν τις πρακτικές πυρηνικής ασφάλειας τους. Προωθούν επίσης τη διεθνή συνεργασία για την πρόληψη των πυρηνικών ατυχημάτων, της τρομοκρατίας και της διάδοσης των πυρηνικών όπλων [\[22\]](#).

2.2.2 Μέτρα Φυσικής Προστασίας

Μια κρίσιμη πτυχή του θεσμικού πλαισίου ασφάλειας που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια είναι τα μέτρα φυσικής προστασίας. Τα μέτρα φυσικής προστασίας έχουν σχεδιαστεί για να αποτρέπουν τη μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση σε πυρηνικές εγκαταστάσεις και υλικά. Αυτά τα μέτρα μπορεί να περιλαμβάνουν ελέγχους πρόσβασης, όπως προφυλακτήρες, πύλες και φράκτες, καθώς και συστήματα ανίχνευσης εισβολής και κάμερες παρακολούθησης.

Εκτός από τα φυσικά εμπόδια, οι πυρηνικές εγκαταστάσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιούν παθητικά μέτρα για την προστασία του πυρηνικού υλικού, όπως σφραγίδες ένδειξης παραβίασης, συναγερμούς και ανιχνευτές ακτινοβολίας. Αυτά τα μέτρα έχουν σχεδιαστεί για να ανιχνεύουν τυχόν προσπάθειες κλοπής ή εκτροπής πυρηνικού υλικού.

Τα μέτρα φυσικής προστασίας επεκτείνονται και στη μεταφορά πυρηνικού υλικού. Η μεταφορά πυρηνικού υλικού αποτελεί σημαντική ανησυχία για την ασφάλεια, καθώς μπορεί να είναι ευάλωτη σε κλοπή ή δολιοφθορά. Η μεταφορά πυρηνικού υλικού απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό, συντονισμό και μέτρα ασφαλείας. Αυτά τα μέτρα μπορεί να περιλαμβάνουν ασφαλή εμπορευματοκιβώτια μεταφοράς, ένοπλες συνοδές και συστήματα παρακολούθησης.

Τα μέτρα φυσικής προστασίας αποτελούν ουσιαστικό στοιχείο του θεσμικού πλαισίου ασφαλείας που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια. Αυτά τα μέτρα έχουν σχεδιαστεί για να αποτρέπουν τη μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση σε πυρηνικές εγκαταστάσεις και υλικά, που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε πυρηνικά ατυχήματα, τρομοκρατία ή διάδοση πυρηνικών όπλων [22].

2.2.3 Ασφάλεια Προσωπικού

Μια άλλη κρίσιμη πτυχή του θεσμικού πλαισίου ασφαλείας που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια είναι η ασφάλεια του προσωπικού. Η ασφάλεια προσωπικού αναφέρεται στα μέτρα που λαμβάνονται για να διασφαλιστεί ότι το προσωπικό που εργάζεται σε πυρηνικές εγκαταστάσεις είναι αξιόπιστο, αξιόπιστο και κατάλληλα εκπαιδευμένο.

Οι πυρηνικές εγκαταστάσεις πρέπει να διενεργούν διεξοδικούς ελέγχους ιστορικού στο προσωπικό προτού τους επιτραπεί η πρόσβαση σε ευαίσθητες περιοχές ή υλικά. Το προσωπικό που εργάζεται σε πυρηνικές εγκαταστάσεις πρέπει επίσης να υποβληθεί σε εκπαίδευση ασφάλειας για να διασφαλίσει ότι κατανοεί τα πρωτόκολλα ασφαλείας και τις διαδικασίες που ισχύουν για την προστασία των πυρηνικών υλικών.

Οι πυρηνικές εγκαταστάσεις πρέπει επίσης να καθιερώνουν εκκενώσεις και ελέγχους πρόσβασης για να περιορίζουν την πρόσβαση του προσωπικού σε ευαίσθητες περιοχές ή υλικά. Η πρόσβαση σε αυτές τις περιοχές ή υλικά θα πρέπει να περιορίζεται μόνο στο προσωπικό που έχει νόμιμη ανάγκη πρόσβασης σε αυτές.

Η ασφάλεια του προσωπικού αποτελεί ουσιαστικό στοιχείο του θεσμικού πλαισίου ασφαλείας που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια. Είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι το προσωπικό που εργάζεται σε πυρηνικές εγκαταστάσεις είναι αξιόπιστο, αξιόπιστο και κατάλληλα εκπαιδευμένο, για την πρόληψη πυρηνικών ατυχημάτων, τρομοκρατίας ή διάδοσης πυρηνικών όπλων.

Τα θεσμικά πλαίσια ασφαλείας που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια είναι απαραίτητα για τη διασφάλιση της ασφαλούς και ασφαλούς χρήσης της πυρηνικής ενέργειας. Αυτά τα πλαίσια περιλαμβάνουν διεθνείς συμφωνίες και εσωτερικούς κανονισμούς που καθοδηγούν τις πρακτικές πυρηνικής ασφαλείας. Οι διεθνείς οργανισμοί, όπως ο ΔΟΑΕ, ο ΟΗΕ και το GICNT, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην προώθηση της πυρηνικής ασφαλείας παγκοσμίως.

Τα μέτρα φυσικής προστασίας και τα μέτρα ασφαλείας του προσωπικού αποτελούν κρίσιμα στοιχεία του θεσμικού πλαισίου ασφαλείας που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια. Τα μέτρα φυσικής προστασίας έχουν σχεδιαστεί για να αποτρέπουν τη μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση σε πυρηνικές εγκαταστάσεις και υλικά, ενώ τα μέτρα ασφαλείας προσωπικού διασφαλίζουν ότι το προσωπικό που εργάζεται σε πυρηνικές εγκαταστάσεις είναι αξιόπιστο, αξιόπιστο και κατάλληλα εκπαιδευμένο.

Η αποτελεσματική πυρηνική ασφάλεια απαιτεί μια ολοκληρωμένη και ολοκληρωμένη προσέγγιση που συνδυάζει νομικά και ρυθμιστικά πλαίσια, μέτρα φυσικής προστασίας και μέτρα ασφαλείας προσωπικού. Απαιτεί επίσης διεθνή

συνεργασία και συντονισμό για την πρόληψη πυρηνικών ατυχημάτων, τρομοκρατίας ή διάδοσης πυρηνικών όπλων [41].

Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ το θεσμικό πλαίσιο ασφάλειας που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια είναι κρίσιμο, δεν είναι αλάνθαστο. Οι κίνδυνοι πυρηνικής ασφάλειας εξελίσσονται συνεχώς και τα μέτρα ασφαλείας πρέπει να προσαρμοστούν για την αντιμετώπιση νέων απειλών. Για να εξασφαλιστεί η ασφαλής και ασφαλής χρήση της πυρηνικής ενέργειας, είναι απαραίτητο να διατηρηθεί συνεχής διάλογος για την πυρηνική ασφάλεια, να ανταλλάσσονται οι βέλτιστες πρακτικές και να αναπτύσσονται νέες προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση των αναδυόμενων κινδύνων ασφάλειας.

Συμπερασματικά, το θεσμικό πλαίσιο ασφάλειας που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια είναι απαραίτητο για τη διασφάλιση της ασφαλούς και ασφαλούς χρήσης της πυρηνικής ενέργειας. Αυτό το πλαίσιο περιλαμβάνει διεθνείς συμφωνίες και εσωτερικούς κανονισμούς που καθοδηγούν τις πρακτικές πυρηνικής ασφάλειας, καθώς και μέτρα φυσικής προστασίας και μέτρα ασφαλείας προσωπικού. Οι διεθνείς οργανισμοί, όπως ο ΔΟΑΕ, ο ΟΗΕ και το GICNT, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην προώθηση της πυρηνικής ασφάλειας παγκοσμίως. Η αποτελεσματική πυρηνική ασφάλεια απαιτεί μια ολοκληρωμένη και ολοκληρωμένη προσέγγιση που προσαρμόζεται στην αντιμετώπιση των αναδυόμενων κινδύνων ασφάλειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

3.1 Ο πυρηνικός τομέας στην Ευρώπη

Ο πυρηνικός τομέας στην Ευρώπη έχει σημαντικό αντίκτυπο στο ενεργειακό μείγμα της ηπείρου και διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στην κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τα τελευταία χρόνια, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) προωθεί ενεργά τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας ως βασικό στοιχείο της ενεργειακής της πολιτικής.

Σύμφωνα με μια έκθεση που δημοσιεύθηκε από την Ευρωπαϊκή Πυρηνική Εταιρεία (ENS – European Nuclear Society) το 2021, υπάρχουν επί του παρόντος 106 πυρηνικοί αντιδραστήρες σε λειτουργία σε όλη την Ευρώπη, που παρέχουν περίπου το 26% των αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας της ηπείρου[43]. Η Γαλλία είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός πυρηνικής ενέργειας στην Ευρώπη, με 56 αντιδραστήρες σε λειτουργία, ακολουθούμενη από τη Ρωσία με 38 αντιδραστήρες. Άλλες χώρες με σημαντική ικανότητα πυρηνικής ενέργειας περιλαμβάνουν το Ηνωμένο Βασίλειο, την Ουκρανία και τη Σουηδία.

Ωστόσο, ο πυρηνικός τομέας στην Ευρώπη αντιμετωπίζει ενστάσεις. Ένα από τα πιο πιεστικά ζητήματα είναι η ασφαλής και υπεύθυνη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων, τα οποία παράγονται κατά τη λειτουργία των πυρηνικών σταθμών. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει ένα σύνολο κανονισμών, συμπεριλαμβανομένης της Οδηγίας για τη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων και των αναλωμένων καυσίμων, για τη διασφάλιση του ασφαλούς χειρισμού, αποθήκευσης και διάθεσης πυρηνικών αποβλήτων[44].

Ένα άλλο πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο πυρηνικός τομέας στην Ευρώπη είναι ο αυξανόμενος ανταγωνισμός από άλλες πηγές ενέργειας, ιδίως από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το μειούμενο κόστος της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας τα έχει κάνει όλο και πιο ανταγωνιστικά με την πυρηνική ενέργεια και πολλές ευρωπαϊκές χώρες επενδύουν πλέον σε μεγάλο βαθμό σε αυτές τις τεχνολογίες. Σύμφωνα με έκθεση του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA) το 2020, η ανανεώσιμη ενέργεια πρόκειται να γίνει η μεγαλύτερη πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη έως το 2025, ξεπερνώντας τόσο τα πυρηνικά όσο και τα ορυκτά καύσιμα[45].

Παρά αυτές τις προκλήσεις, ο πυρηνικός τομέας στην Ευρώπη αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στο ενεργειακό μείγμα της ηπείρου τις επόμενες δεκαετίες. Η μακροπρόθεσμη ενεργειακή στρατηγική της ΕΕ, γνωστή ως Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, αναγνωρίζει το ρόλο της πυρηνικής ενέργειας στην επίτευξη των κλιματικών και ενεργειακών στόχων της ηπείρου, παράλληλα με άλλες τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα[46]. Η οδηγία της ΕΕ για την πυρηνική ασφάλεια απαιτεί επίσης από τα κράτη μέλη να διασφαλίζουν την ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων τους και παρέχει ένα πλαίσιο συνεργασίας σε θέματα πυρηνικής ασφάλειας σε ολόκληρη την ΕΕ[44].

Συμπερασματικά, ο πυρηνικός τομέας στην Ευρώπη αποτελεί ζωτικό συστατικό του ενεργειακού μείγματος της ηπείρου, παρέχοντας σημαντικό μέρος των αναγκών της σε ηλεκτρική ενέργεια και συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ενώ ο τομέας αντιμετωπίζει πολλές δυσκολίες, συμπεριλαμβανομένης της ασφαλούς διαχείρισης των πυρηνικών αποβλήτων και του ανταγωνισμού από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο τις επόμενες δεκαετίες. Η ΕΕ έχει θεσπίσει ένα σύνολο κανονισμών και πολιτικών για τη διασφάλιση της ασφαλούς και υπεύθυνης χρήσης της πυρηνικής ενέργειας, ενώ παράλληλα προωθεί την ανάπτυξη άλλων τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα.

3.2 Νομικό πλαίσιο

Το νομικό πλαίσιο που διέπει τον πυρηνικό τομέα στην Ευρώπη είναι πολύπλοκο και εκτεταμένο, με μια σειρά διεθνών, περιφερειακών και εθνικών κανονισμών και συμφωνιών για τη διασφάλιση της ασφαλούς και υπεύθυνης χρήσης της πυρηνικής ενέργειας. Μία από τις βασικές διεθνείς συμφωνίες στον τομέα αυτό είναι η Συνθήκη για τη Μη Διάδοση των Πυρηνικών Όπλων, η οποία στοχεύει στην πρόληψη της διάδοσης πυρηνικών όπλων και στην προώθηση της συνεργασίας για την ειρηνική χρήση της πυρηνικής ενέργειας, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο[47]. Όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ έχουν υπογράψει τη ΝΡΤ.

Σε περιφερειακό επίπεδο, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει θεσπίσει ένα σύνολο κανονισμών και οδηγιών που διέπουν τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας, καθώς και τη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων και την ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων. Ένα από τα βασικά νομοθετήματα σε αυτόν τον τομέα είναι η

Συνθήκη Eurotom, η οποία ίδρυσε την Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας (Eurotom) και παρέχει ένα πλαίσιο για την ανάπτυξη και τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας στην ΕΕ[48]. Η Συνθήκη Eurotom θεσπίζει επίσης κοινά πρότυπα ασφάλειας για τις πυρηνικές εγκαταστάσεις και απαιτεί από τα κράτη μέλη να συνεργάζονται σε θέματα πυρηνικής ασφάλειας.

Εκτός από τη Συνθήκη Eurotom, η ΕΕ έχει εκδώσει μια σειρά από οδηγίες και κανονισμούς που διέπουν διάφορες πτυχές του πυρηνικού τομέα. Για παράδειγμα, η οδηγία για τη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων και των αναλωμένων καυσίμων απαιτεί από τα κράτη μέλη να αναπτύξουν και να εφαρμόσουν εθνικά σχέδια για την ασφαλή διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων και των αναλωμένων καυσίμων[48]. Η οδηγία για την πυρηνική ασφάλεια απαιτεί από τα κράτη μέλη να ιδρύσουν εθνικές ρυθμιστικές αρχές υπεύθυνες για τη διασφάλιση της ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων, καθώς και να συνεργάζονται με άλλα κράτη μέλη σε θέματα πυρηνικής ασφάλειας[49].

Σε εθνικό επίπεδο, κάθε κράτος μέλος της ΕΕ έχει το δικό του νομικό πλαίσιο που διέπει τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει νόμους που διέπουν την αδειοδότηση και τη λειτουργία πυρηνικών εγκαταστάσεων, καθώς και κανονισμούς που διέπουν τη μεταφορά και αποθήκευση πυρηνικών υλικών. Για παράδειγμα, στη Γαλλία, ο πυρηνικός τομέας διέπεται από ένα σύνολο νόμων και κανονισμών, συμπεριλαμβανομένου του νόμου περί πυρηνικών δραστηριοτήτων και του νόμου περί αρχής πυρηνικής ασφάλειας[50]. Αυτοί οι νόμοι θεσπίζουν το πλαίσιο για την αδειοδότηση και τη λειτουργία των πυρηνικών εγκαταστάσεων, καθώς και την ασφαλή και ασφαλεία του πυρηνικού τομέα στη Γαλλία.

Εκτός από τους διεθνείς, περιφερειακούς και εθνικούς κανονισμούς, ο πυρηνικός τομέας στην Ευρώπη υπόκειται επίσης σε μια σειρά διεθνών προτύπων και κατευθυντήριων γραμμών που έχουν αναπτυχθεί από οργανισμούς όπως ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ) και ο Οργανισμός Πυρηνικής Ενέργειας (ΝΕΑ). Αυτά τα πρότυπα καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα θεμάτων, συμπεριλαμβανομένης της πυρηνικής ασφάλειας, ασφάλειας και διασφαλίσεων, καθώς και της μεταφοράς και διαχείρισης πυρηνικών υλικών[51][52].

Συμπερασματικά, το νομικό πλαίσιο που διέπει τον πυρηνικό τομέα στην Ευρώπη είναι περίπλοκο και εκτεταμένο, με μια σειρά διεθνών, περιφερειακών και εθνικών

κανονισμών και συμφωνιών για τη διασφάλιση της ασφαλούς και υπεύθυνης χρήσης της πυρηνικής ενέργειας. Η βασική διεθνής συμφωνία στον τομέα αυτό είναι η Συνθήκη για τη Μη Διάδοση των Πυρηνικών Όπλων, ενώ σε περιφερειακό επίπεδο, η Συνθήκη Eurotom και μια σειρά οδηγιών και κανονισμών της ΕΕ θεσπίζουν το πλαίσιο για την ανάπτυξη και χρήση της πυρηνικής ενέργειας στην Ε.Ε. . Κάθε κράτος μέλος της ΕΕ έχει επίσης το δικό του νομικό πλαίσιο που διέπει τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας και ο τομέας υπόκειται σε μια σειρά διεθνών προτύπων και κατευθυντήριων γραμμών που έχουν αναπτυχθεί από οργανισμούς όπως ο ΔΟΑΕ και η ΝΕΑ.

3.3 Σύμβαση ΙΑΕΑ για την πυρηνική ασφάλεια (1994)

Η Σύμβαση του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) για την πυρηνική ασφάλεια εγκρίθηκε το 1994 και είναι μια νομικά δεσμευτική διεθνής συμφωνία που θεσπίζει ένα πλαίσιο για την ασφαλή λειτουργία των πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Η Σύμβαση έχει σχεδιαστεί για να προωθήσει τη συνεργασία μεταξύ των κρατών μελών για τη βελτίωση της ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων και τη διευκόλυνση της ανταλλαγής πληροφοριών και βέλτιστων πρακτικών στην πυρηνική βιομηχανία. Από τον Μάιο του 2021, υπάρχουν 82 κράτη που έχουν επικυρώσει τη Σύμβαση, συμπεριλαμβανομένων των περισσότερων ευρωπαϊκών χωρών[53].

Η Σύμβαση για την Πυρηνική Ασφάλεια απαιτεί από τα κράτη μέλη να θεσπίσουν και να διατηρήσουν ένα κατάλληλο ρυθμιστικό πλαίσιο για την πυρηνική ασφάλεια, καθώς και να διασφαλίσουν ότι οι πυρηνικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας σχεδιάζονται, κατασκευάζονται και λειτουργούν με τρόπο που να παρέχει το υψηλότερο επίπεδο ασφάλειας. Τα κράτη μέλη οφείλουν επίσης να καταρτίζουν και να διατηρούν σχέδια ετοιμότητας έκτακτης ανάγκης και να επανεξετάζουν και να ενημερώνουν τακτικά αυτά τα σχέδια για να διασφαλίζουν την αποτελεσματικότητά τους[53].

Σύμφωνα με τη Σύμβαση, τα κράτη μέλη υποχρεούνται να υποβάλλουν εθνικές εκθέσεις για την εφαρμογή της Σύμβασης κάθε τρία χρόνια. Αυτές οι εκθέσεις εξετάζονται από μια ομάδα διεθνών εμπειρογνομόνων, οι οποίοι παρέχουν συστάσεις

και προτάσεις για τη βελτίωση της ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων. Η Σύμβαση προβλέπει επίσης τη θέσπιση διαδικασίας αξιολόγησης από ομοτίμους, κατά την οποία τα κράτη μέλη μπορούν να ζητήσουν από διεθνείς εμπειρογνώμονες να επανεξετάσουν την ασφάλεια συγκεκριμένων πυρηνικών εγκαταστάσεων[53].

Η Σύμβαση για την Πυρηνική Ασφάλεια έχει διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων στην Ευρώπη και σε όλο τον κόσμο. Για παράδειγμα, μετά την πυρηνική καταστροφή της Fukushima Daiichi το 2011, ο ΔΟΑΕ πραγματοποίησε επανεξέταση της ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων στην Ευρώπη και έκανε ορισμένες συστάσεις για τη βελτίωση των μέτρων ασφαλείας και των σχεδίων ετοιμότητας έκτακτης ανάγκης[54].

Εκτός από τη Σύμβαση για την Πυρηνική Ασφάλεια, ο ΔΟΑΕ έχει αναπτύξει μια σειρά προτύπων και κατευθυντήριων γραμμών ασφαλείας για την υποστήριξη της ασφαλούς λειτουργίας των πυρηνικών εγκαταστάσεων. Αυτά τα πρότυπα καλύπτουν μια σειρά θεμάτων, συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού, της κατασκευής και της λειτουργίας πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, καθώς και της διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων και της μεταφοράς ραδιενεργών υλικών. Ο ΔΟΑΕ παρέχει επίσης τεχνική βοήθεια και εκπαίδευση στα κράτη μέλη για να υποστηρίξει την εφαρμογή αυτών των προτύπων και να ενισχύσει την ασφάλεια και την ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων[53].

Συμπερασματικά, η Σύμβαση του ΔΟΑΕ για την Πυρηνική Ασφάλεια είναι μια νομικά δεσμευτική διεθνής συμφωνία που θεσπίζει ένα πλαίσιο για την ασφαλή λειτουργία των πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Η Σύμβαση απαιτεί από τα κράτη μέλη να θεσπίσουν και να διατηρήσουν ένα κατάλληλο ρυθμιστικό πλαίσιο για την πυρηνική ασφάλεια, καθώς και να διασφαλίσουν ότι οι πυρηνικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας σχεδιάζονται, κατασκευάζονται και λειτουργούν με τρόπο που να παρέχει το υψηλότερο επίπεδο ασφάλειας. Η Σύμβαση έχει διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων στην Ευρώπη και σε όλο τον κόσμο, και συμπληρώνεται από μια σειρά προτύπων και κατευθυντήριων γραμμών ασφαλείας του ΔΟΑΕ.

3.40δηγία για την πυρηνική ασφάλεια 2009/71/ΕΥΡΑΤΟΜ

Η οδηγία για την πυρηνική ασφάλεια 2009/71/EURATOM είναι μια οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) που θεσπίζει ένα πλαίσιο για την πυρηνική ασφάλεια στην ΕΕ. Η οδηγία βασίζεται στις αρχές του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) και στοχεύει να διασφαλίσει ότι οι πυρηνικές εγκαταστάσεις στην ΕΕ σχεδιάζονται, κατασκευάζονται και λειτουργούν με τρόπο που να παρέχει το υψηλότερο επίπεδο ασφάλειας. Η οδηγία καλύπτει όλα τα στάδια του πυρηνικού κύκλου, από τον σχεδιασμό και την κατασκευή πυρηνικών εγκαταστάσεων έως τη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων[55].

Σύμφωνα με την οδηγία για την πυρηνική ασφάλεια, τα κράτη μέλη υποχρεούνται να θεσπίσουν και να διατηρήσουν ένα ρυθμιστικό πλαίσιο για την πυρηνική ασφάλεια που είναι ανεξάρτητο, διαφανές και αποτελεσματικό. Η οδηγία απαιτεί από τα κράτη μέλη να διασφαλίζουν ότι οι πυρηνικές εγκαταστάσεις έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί έτσι ώστε να αντέχουν εξωτερικούς και εσωτερικούς κινδύνους, συμπεριλαμβανομένων των φυσικών καταστροφών, του ανθρώπινου λάθους και της αστοχίας εξοπλισμού. Τα κράτη μέλη καλούνται επίσης να καταρτίσουν και να διατηρούν σχέδια ετοιμότητας έκτακτης ανάγκης για να διασφαλίσουν ότι μπορούν να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα σε περίπτωση πυρηνικού συμβάντος[55].

Η οδηγία για την πυρηνική ασφάλεια απαιτεί επίσης από τα κράτη μέλη να θεσπίσουν και να διατηρούν ένα σύστημα για την αδειοδότηση και την επιθεώρηση των πυρηνικών εγκαταστάσεων. Η οδηγία απαιτεί από τα κράτη μέλη να διενεργούν περιοδικές αξιολογήσεις ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων για να διασφαλίζουν ότι συνεχίζουν να πληρούν τα πρότυπα ασφαλείας με την πάροδο του χρόνου. Τα κράτη μέλη καλούνται επίσης να δημιουργήσουν ένα σύστημα αναφοράς και διερεύνησης πυρηνικών συμβάντων και να παρέχουν πρόσβαση του κοινού σε πληροφορίες για την πυρηνική ασφάλεια [55].

Η οδηγία για την πυρηνική ασφάλεια αποτελεί σημαντικό στοιχείο της συνολικής προσέγγισης της ΕΕ για την πυρηνική ασφάλεια και συμπληρώνεται από άλλες οδηγίες και κανονισμούς της ΕΕ, όπως η οδηγία για τα βασικά πρότυπα ασφαλείας (2013/59/EURATOM) και η οδηγία για τα ραδιενεργά απόβλητα (2011/70/ΕΥΡΑΤΟΜ). Μαζί, αυτές οι οδηγίες και οι κανονισμοί παρέχουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την πυρηνική ασφάλεια στην ΕΕ[56].

Συμπερασματικά, η Οδηγία για την Πυρηνική Ασφάλεια 2009/71/EΥΡΑΤΟΜ είναι μια βασική οδηγία της ΕΕ που θεσπίζει ένα πλαίσιο για την πυρηνική ασφάλεια στην ΕΕ. Η οδηγία βασίζεται στις αρχές του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας και στοχεύει να διασφαλίσει ότι οι πυρηνικές εγκαταστάσεις στην ΕΕ σχεδιάζονται, κατασκευάζονται και λειτουργούν με τρόπο που να παρέχει το υψηλότερο επίπεδο ασφάλειας. Η οδηγία καλύπτει όλα τα στάδια του πυρηνικού κύκλου και απαιτεί από τα κράτη μέλη να θεσπίσουν και να διατηρήσουν ένα ρυθμιστικό πλαίσιο για την πυρηνική ασφάλεια που είναι ανεξάρτητο, διαφανές και αποτελεσματικό. Η οδηγία για την πυρηνική ασφάλεια συμπληρώνεται από άλλες οδηγίες και κανονισμούς της ΕΕ που παρέχουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την πυρηνική ασφάλεια στην ΕΕ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ

4.1 Three Mile Island

Το ατύχημα του Three Mile Island (TMI), που συνέβη τον Μάρτιο του 1979, παραμένει ένα από τα σημαντικότερα πυρηνικά περιστατικά στην ιστορία. Αυτό το περιστατικό είχε βαθύ αντίκτυπο στην αντίληψη του κοινού για την πυρηνική ενέργεια και προκάλεσε ανησυχίες για την ασφάλεια των πυρηνικών σταθμών. Αυτή η ενότητα στοχεύει να παρέχει μια ολοκληρωμένη ανάλυση του ατυχήματος του Three Mile Island, των αιτιών, των συνεπειών του, των επακόλουθων βελτιώσεων στα μέτρα πυρηνικής ασφάλειας και των μόνιμων επιπτώσεων στη βιομηχανία.

Αιτίες και γεγονότα του ατυχήματος στο Three Mile Island

Το ατύχημα στο Three Mile Island προέκυψε από έναν συνδυασμό δυσλειτουργιών εξοπλισμού, σφαλμάτων χειριστή και ελαττωμάτων σχεδιασμού. Το περιστατικό ξεκίνησε με μια βλάβη στο σύστημα ψύξης, η οποία προκάλεσε μερική τήξη του πυρήνα του αντιδραστήρα. Το νερό ψύξης του αντιδραστήρα μολύνθηκε με ραδιενεργά υλικά, οδηγώντας στην απελευθέρωση μικρής ποσότητας ραδιενεργών αερίων και ραδιενεργού ιωδίου. Η κύρια αιτία του ατυχήματος ήταν η παρανόηση των συνθηκών λειτουργίας του εργοστασίου από τους χειριστές, οι οποίοι απέτυχαν να αναγνωρίσουν και να ανταποκριθούν επαρκώς στην εκτυλισσόμενη κατάσταση[57].

Συνέπειες και διδάγματα

Το ατύχημα στο Three Mile Island είχε σημαντικές συνέπειες τόσο για το περιβάλλον όσο και για τη δημόσια υγεία. Ενώ η απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών ήταν περιορισμένη και δεν προκάλεσε άμεση βλάβη στο κοινό, οδήγησε στην εκκένωση των γύρω περιοχών ως προληπτικό μέτρο. Το περιστατικό είχε μόνιμο αντίκτυπο στην αντίληψη του κοινού, προκαλώντας ευρεία ανησυχία για την ασφάλεια της πυρηνικής ενέργειας[58]. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση της κατασκευής νέων πυρηνικών σταθμών στις Ηνωμένες Πολιτείες και μια στροφή προς αυστηρότερους κανονισμούς ασφαλείας.

Το ατύχημα λειτούργησε επίσης ως καταλύτης για βελτιώσεις στα πρωτόκολλα απόκρισης έκτακτης ανάγκης και επικοινωνίας. Τόνισε την ανάγκη για καλύτερη

κατάρτιση και εκπαίδευση για τους χειριστές των εγκαταστάσεων και τους ανταποκριτές έκτακτης ανάγκης. Το περιστατικό προκάλεσε μια επαναξιολόγηση των πρακτικών διαχείρισης κινδύνου, τονίζοντας τη σημασία της διατήρησης μιας ισχυρής κουλτούρας ασφάλειας στην πυρηνική βιομηχανία[59].

Βελτιώσεις στην Πυρηνική Ασφάλεια

Μετά το ατύχημα του Three Mile Island, έγιναν εκτεταμένες προσπάθειες για τη βελτίωση των κανονισμών και των πρακτικών πυρηνικής ασφάλειας. Το περιστατικό χρησίμευσε ως κλήση αφύπνισης για τη βιομηχανία, οδηγώντας σε μια ολοκληρωμένη αναθεώρηση των διαδικασιών ασφάλειας και στην εφαρμογή πολυάριθμων βελτιώσεων ασφάλειας. Αυτές οι βελτιώσεις περιελάμβαναν καλύτερη εκπαίδευση χειριστή, βελτιωμένα σχέδια απόκρισης έκτακτης ανάγκης, ενισχυμένο εξοπλισμό και συστήματα και αυστηρότερους κανονισμούς για το σχεδιασμό και τη λειτουργία της μονάδας[60].

Η Ρυθμιστική Επιτροπή Πυρηνικών (NRC–Nuclear Regulatory Commission) εφάρμοσε μια σειρά μέτρων για την πρόληψη παρόμοιων ατυχημάτων, συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας ενός νέου πλαισίου για την αξιολόγηση και τη διαχείριση κινδύνων σε πυρηνικούς σταθμούς (U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2009). Το περιστατικό οδήγησε στη δημιουργία του Institute of Nuclear Power Operations (INPO), ενός οργανισμού που ηγείται της βιομηχανίας που προωθεί την αριστεία στις λειτουργίες και την ασφάλεια των πυρηνικών σταθμών. Το INPO διενεργεί ολοκληρωμένες αξιολογήσεις πυρηνικών σταθμών και μοιράζεται τις βέλτιστες πρακτικές σε ολόκληρο τον κλάδο για να διασφαλίσει τη συνεχή βελτίωση των επιδόσεων ασφάλειας[59].

Επιπλέον, το ατύχημα ΤΜΙ ώθησε τις εξελίξεις στην ανάπτυξη προηγμένων σχεδίων αντιδραστήρων και χαρακτηριστικών ασφαλείας. Το περιστατικό ανέδειξε την ανάγκη για συστήματα παθητικής ασφάλειας που να μπορούν να λειτουργούν χωρίς παρέμβαση χειριστή και να μετριάζουν τις συνέπειες των ατυχημάτων. Τα νέα σχέδια αντιδραστήρων, όπως οι αντιδραστήρες Generation III+ και Generation IV, ενσωματώνουν χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας που ενισχύουν τη συνολική ασφάλεια των πυρηνικών σταθμών παραγωγής ενέργειας[60].

Το ατύχημα του Three Mile Island ήταν ένα σημείο καμπής για τη βιομηχανία πυρηνικής ενέργειας, προκαλώντας μια επανεκτίμηση των πρακτικών και των κανονισμών ασφαλείας. Το περιστατικό τόνισε την ανάγκη για συνεχή βελτίωση και επαγρύπνηση στον πυρηνικό τομέα για την πρόληψη ατυχημάτων και τον μετριασμό των συνεπειών τους. Ενώ το ατύχημα είχε σημαντικές επιπτώσεις, ώθησε επίσης την πρόοδο στην πυρηνική ασφάλεια, με αποτέλεσμα μια ασφαλέστερη και πιο ισχυρή πυρηνική βιομηχανία παγκοσμίως.



Εικόνα8: Three mile island accident [\[59\]](#)

4.2 Chernobyl

Η καταστροφή του Τσερνομπίλ, που συνέβη στις 26 Απριλίου 1986, θεωρείται ευρέως ως το πιο καταστροφικό πυρηνικό ατύχημα στην ιστορία. Το περιστατικό είχε εκτεταμένες συνέπειες για το περιβάλλον, τη δημόσια υγεία και την αντίληψη της πυρηνικής ενέργειας. Αυτή η ενότητα στοχεύει να παρέχει μια εις βάθος ανάλυση της καταστροφής του Τσερνομπίλ, συμπεριλαμβανομένων των αιτιών, των άμεσων και μακροπρόθεσμων επιπτώσεων, των επακόλουθων βελτιώσεων στην πυρηνική ασφάλεια και των διδαγμάτων που αντλήθηκαν από αυτό το τραγικό γεγονός.

Αιτίες και γεγονότα της καταστροφής του Τσερνομπίλ

Η καταστροφή του Τσερνομπίλ ήταν το αποτέλεσμα ενός συνδυασμού ελαττωμάτων σχεδιασμού, σφαλμάτων χειριστή και λανθασμένης κουλτούρας ασφάλειας. Κατά τη διάρκεια μιας συνήθους δοκιμής ασφαλείας στον αντιδραστήρα 4 του πυρηνικού σταθμού του Τσερνομπίλ, σημειώθηκε μια απροσδόκητη αύξηση της ισχύος λόγω ελαττωματικού σχεδιασμού του αντιδραστήρα. Το κύμα προκάλεσε ταχεία αύξηση της ισχύος του αντιδραστήρα, οδηγώντας σε έκρηξη ατμού και επακόλουθη πυρκαγιά γραφίτη, που έκαιγε για αρκετές ημέρες[61].

Πιο αναλυτικά:

Ανεπαρκής σχεδιασμός αντιδραστήρα: Ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα RBMK που χρησιμοποιήθηκε στο Τσερνομπίλ είχε εγγενείς ατέλειες, ιδιαίτερα στον θετικό συντελεστή κενού. Αυτό σημαίνει ότι καθώς σχηματίζονται φυσαλίδες ατμού στο ψυκτικό υγρό, αυξάνεται η αντιδραστικότητα του αντιδραστήρα, οδηγώντας δυνητικά σε ανεξέλεγκτες υπερτάσεις ισχύος. Αυτό το σχεδιαστικό ελάττωμα ήταν ένας κρίσιμος παράγοντας, καταλυτικός στη δημιουργία του ατυχήματος.

Εκπαίδευση χειριστή και διαδικασίες: Το σφάλμα χειριστή έπαιξε σημαντικό ρόλο στην καταστροφή. Το προσωπικό που διεξήγαγε τη δοκιμή ασφαλείας δεν ήταν επαρκώς εκπαιδευμένο, ενώ υπήρχε έλλειψη σαφών διαδικασιών για την ασφαλή διεξαγωγή της δοκιμής. Οι χειριστές έκαναν κρίσιμα λάθη κατά τη διάρκεια της δοκιμής, όπως το κλείσιμο των συστημάτων ψύξης έκτακτης ανάγκης, γεγονός που επιδείνωσε την κατάσταση.

Ελαττωματική κουλτούρα ασφάλειας: Το εργοστάσιο του Τσερνομπίλ διέπταν από μια ελαττωματική κουλτούρα ασφάλειας, όπου γίνονταν συντομεύσεις και τα πρωτόκολλα ασφαλείας δεν ακολουθούνταν πάντα αυστηρά. Υπήρχε μια τάση να δοθεί προτεραιότητα στην τήρηση των ποσοτώσεων παραγωγής έναντι των ανησυχιών για την ασφάλεια. Αυτή η κουλτούρα εφησυχασμού και αδιαφορίας για την ασφάλεια συνέβαλε στην καταστροφή.

Έλλειψη ενημέρωσης: Η αρχική απάντηση της σοβιετικής κυβέρνησης στο ατύχημα χαρακτηρίστηκε από έλλειψη διαφάνειας. Καθυστέρησαν να ενημερώσουν το κοινό και τη διεθνή κοινότητα για τη σοβαρότητα της κατάστασης, η οποία εμπόδισε τις

προσπάθειες αντιμετώπισης έκτακτων περιστατικών και δυνητικά εξέθετε περισσότερους ανθρώπους σε ακτινοβολία.

Η κυβέρνηση της Σοβιετικής Ένωσης προσπάθησε να κρύψει την κλίμακα του ατυχήματος και δεν ενημέρωσε τους πολίτες. Ο απόλυτος αριθμός των νεκρών δεν είναι γνωστός, ωστόσο, υπάρχουν εκθέσεις που υποδεικνύουν ότι μέχρι 200.000 άνθρωποι είχαν πάθει κάποιου είδους νόσο λόγω των ραδιενεργών υλών που εκλύθηκαν[61].

Άμεσες και Μακροπρόθεσμες Συνέπειες

Η καταστροφή του Τσερνομπίλ είχε σοβαρές άμεσες και μακροπρόθεσμες συνέπειες. Η έκρηξη και η επακόλουθη πυρκαγιά απελευθέρωσαν σημαντική ποσότητα ραδιενεργών υλικών στην ατμόσφαιρα, μολύνοντας μεγάλες περιοχές της Ουκρανίας, της Λευκορωσίας και της Ρωσίας, καθώς και τμήματα της Ευρώπης[61]. Οι άμεσες επιπτώσεις περιελάμβαναν την απώλεια ζωών, τον εκτοπισμό χιλιάδων ανθρώπων από τα σπίτια τους και τον σχηματισμό ενός εξαιρετικά ραδιενεργού συντριμμιού γνωστού ως «πόδι του ελέφαντα» στον πυρήνα του αντιδραστήρα.

Οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της καταστροφής του Τσερνομπίλ ήταν εκτεταμένες και συνεχίζουν να επηρεάζουν τις πληγείσες περιοχές σήμερα. Η απελευθέρωση ραδιενεργών ισοτόπων, όπως το ιώδιο-131 και το καίσιο-137, μολύνθηκε το έδαφος, το νερό και η βλάστηση, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση των ποσοστών καρκίνου, ιδιαίτερα του καρκίνου του θυρεοειδούς, στον εκτεθειμένο πληθυσμό[61]. Η καταστροφή είχε επίσης επιζήμιες επιπτώσεις στο περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένης της διατάραξης των οικοσυστημάτων και της εμμονής της ραδιενεργής μόλυνσης στις πληγείσες περιοχές.

Βελτιώσεις στην Πυρηνική Ασφάλεια

Η καταστροφή του Τσερνομπίλ χρησίμευσε ως κλήση αφύπνισης για την πυρηνική βιομηχανία, προκαλώντας εκτεταμένες βελτιώσεις στις πρακτικές πυρηνικής ασφάλειας. Το περιστατικό υπογράμμισε τη σημασία μιας ισχυρής κουλτούρας ασφάλειας, τονίζοντας την ανάγκη για σαφή πρωτόκολλα, σωστή εκπαίδευση και αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ των χειριστών και της διοίκησης. Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) διαδραμάτισε κρίσιμο ρόλο στην προώθηση των βελτιώσεων ασφάλειας και στη θέσπιση διεθνών προτύπων μέσω της

δημοσίευσης κατευθυντήριων γραμμών για την ασφάλεια και της εφαρμογής αξιολογήσεων από ομότιμους, για να εξασφαλιστεί η συνεχής ανάπτυξη και ενίσχυση της πυρηνικής ασφάλειας σε ολόκληρο τον κόσμο"[61].

Η καταστροφή οδήγησε σε σημαντικές αλλαγές στο σχεδιασμό του αντιδραστήρα και στα χαρακτηριστικά ασφαλείας. Τα νέα σχέδια αντιδραστήρων, όπως οι αντιδραστήρες GenerationIII και GenerationIV, ενσωματώνουν συστήματα παθητικής ασφάλειας και βελτιωμένες δομές περιορισμού για την πρόληψη και τον μετριασμό των ατυχημάτων[62]. Επιπλέον, το ατύχημα του Τσερνομπίλ ώθησε τις εξελίξεις στον σχεδιασμό και την ετοιμότητα αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, με μεγαλύτερη έμφαση στη διαχείριση έκτακτης ανάγκης εκτός έδρας και στη δημόσια επικοινωνία[61].

Διδάγματα που αντλήθηκαν και παγκόσμιος αντίκτυπος

Η καταστροφή του Τσερνομπίλ παρείχε πολύτιμα μαθήματα για την πυρηνική βιομηχανία και τη διεθνή κοινότητα. Τόνισε τη σημασία της διαφάνειας, της λογοδοσίας και της αποτελεσματικής επικοινωνίας στις πυρηνικές επιχειρήσεις. Το περιστατικό οδήγησε σε επανεκτίμηση των πρωτοκόλλων ασφαλείας και δέσμευση για συνεχή βελτίωση των μέτρων πυρηνικής ασφάλειας παγκοσμίως. Η θέσπιση διεθνών πλαισίων, όπως η Σύμβαση για την Πυρηνική Ασφάλεια και η Κοινή Σύμβαση για την Ασφάλεια της Διαχείρισης Αναλωμένων Καυσίμων και για την Ασφάλεια της Διαχείρισης Ραδιενεργών Αποβλήτων, είχε ως στόχο την ενίσχυση των προτύπων ασφαλείας και την ενίσχυση της διεθνούς συνεργασίας[61].

Ο αντίκτυπος της καταστροφής του Τσερνομπίλ επεκτάθηκε πέρα από την πυρηνική βιομηχανία. Επηρέασε σημαντικά την κοινή γνώμη για την πυρηνική ενέργεια, οδηγώντας σε αυξημένο έλεγχο και μια πιο προσεκτική προσέγγιση για την επέκταση της πυρηνικής ενέργειας. Το περιστατικό ανέδειξε τους πιθανούς κινδύνους που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια και ενίσχυσε την ανάγκη για αυστηρούς κανονισμούς, αυστηρές αξιολογήσεις ασφαλείας και αποτελεσματική ετοιμότητα έκτακτης ανάγκης[62].

Η καταστροφή του Τσερνομπίλ αποτελεί μια τραγική υπενθύμιση των καταστροφικών συνεπειών που μπορεί να προκύψουν από ένα πυρηνικό ατύχημα. Τόνισε τη σημασία της προτεραιότητας για την ασφάλεια, την προώθηση μιας

ισχυρής κουλτούρας ασφάλειας και τη συνεχή βελτίωση των πυρηνικών πρακτικών. Τα διδάγματα που αντλήθηκαν από την καταστροφή του Τσερνομπίλ έχουν διαμορφώσει την προσέγγιση της πυρηνικής βιομηχανίας για την ασφάλεια, οδηγώντας σε σημαντικές προόδους στον σχεδιασμό του αντιδραστήρα, την ετοιμότητα έκτακτης ανάγκης και τη διεθνή συνεργασία.



Εικόνα10: Chernobyl disaster [\[58\]](#)

4.3 Fukushima

Η πυρηνική καταστροφή της Fukushima Daiichi, η οποία συνέβη στις 11 Μαρτίου 2011, μετά από ισχυρό σεισμό και τσουνάμι, θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα πυρηνικά ατυχήματα στην πρόσφατη ιστορία. Το περιστατικό είχε ευρείες συνέπειες, εγείροντας ανησυχίες για την ασφάλεια της πυρηνικής ενέργειας και προκαλώντας επανεκτίμηση των πολιτικών για την πυρηνική ενέργεια. Αυτή η ενότητα στοχεύει να παρέχει μια ολοκληρωμένη ανάλυση της καταστροφής της Φουκουσίμα, συμπεριλαμβανομένων των αιτιών, των άμεσων και μακροπρόθεσμων επιπτώσεων, των μέτρων αντίδρασης και των διδαγμάτων που αντλήθηκαν από αυτό το τραγικό συμβάν.

Αιτίες και γεγονότα της καταστροφής της Φουκουσίμα

Η καταστροφή της Φουκουσίμα προκλήθηκε από έναν τεράστιο σεισμό και το επακόλουθο τσουνάμι που έπληξε τη βορειοανατολική ακτή της Ιαπωνίας. Ο σεισμός

προκάλεσε απώλεια ισχύος εκτός έδρας και ζημιές στις εφεδρικές γεννήτριες, οδηγώντας σε πλήρη απώλεια της ικανότητας ψύξης για τους αντιδραστήρες του πυρηνικού σταθμού Fukushima Daiichi. Χωρίς επαρκή ψύξη, οι αντιδραστήρες υπερθερμάνθηκαν, προκαλώντας τήξη καυσίμου και απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον[63].

Άμεσες και Μακροπρόθεσμες Συνέπειες

Οι άμεσες συνέπειες της καταστροφής της Φουκουσίμα περιελάμβαναν την απομάκρυνση χιλιάδων κατοίκων από τις γύρω περιοχές και την εφαρμογή μέτρων για τον έλεγχο και τον μετριασμό της έκλυσης ραδιενεργών υλικών. Το περιστατικό είχε ως αποτέλεσμα τη μόλυνση του εδάφους, του νερού και των γεωργικών προϊόντων στις πληγείσες περιοχές[63]. Αν και δεν αποδίδονται άμεσοι θάνατοι σε έκθεση σε ακτινοβολία, οι ψυχολογικές και κοινωνικές επιπτώσεις στον πληγέν πληθυσμό ήταν σημαντικές.

Οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της καταστροφής της Φουκουσίμα συνεχίζουν να γίνονται αισθητές σήμερα. Η απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών, όπως το ιώδιο-131 και το καίσιο-137, δημιούργησε ανησυχίες σχετικά με πιθανούς κινδύνους για την υγεία για τον εκτεθειμένο πληθυσμό και τη μόλυνση του θαλάσσιου οικοσυστήματος[63]. Το περιστατικό οδήγησε στο κλείσιμο όλων των πυρηνικών αντιδραστήρων στην Ιαπωνία και σε σημαντική αλλαγή της κοινής γνώμης σχετικά με την πυρηνική ενέργεια.

Ανταπόκριση και διδάγματα

Η απάντηση στην καταστροφή της Φουκουσίμα περιελάμβανε εκτεταμένα μέτρα έκτακτης ανάγκης για τη σταθεροποίηση των αντιδραστήρων, τον έλεγχο της απελευθέρωσης ραδιενεργών υλικών και την προστασία του κοινού. Καταβλήθηκαν προσπάθειες για τη βελτίωση της επικοινωνίας και του συντονισμού μεταξύ των κυβερνητικών υπηρεσιών, των χειριστών σταθμών παραγωγής ενέργειας και των τοπικών αρχών. Το περιστατικό τόνισε την ανάγκη για αποτελεσματικά σχέδια αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, ισχυρά πρωτόκολλα επικοινωνίας και ενισχυμένη ευαισθητοποίηση και ετοιμότητα του κοινού [63].

Η καταστροφή της Φουκουσίμα οδήγησε σε ενδελεχή αναθεώρηση των κανονισμών και των πρακτικών πυρηνικής ασφάλειας. Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής

Ενέργειας (ΔΟΑΕ) διεξήγαγε μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση και έκανε συστάσεις για τη βελτίωση της πυρηνικής ασφάλειας παγκοσμίως [64]. Τα διδάγματα που αντλήθηκαν από τη Φουκουσίμα οδήγησαν σε ενισχυμένα πρότυπα ασφαλείας, συμπεριλαμβανομένης της βελτίωσης των εκτιμήσεων κινδύνου για σεισμικές και τσουνάμι, ανάπτυξη συστημάτων παθητικής ασφάλειας και βελτιώσεις στην προστασία των εφεδρικών πηγών ενέργειας [63].

Το περιστατικό είχε επίσης παγκόσμιο αντίκτυπο στις πολιτικές για την πυρηνική ενέργεια. Πολλές χώρες επανεκτίμησαν τα προγράμματα πυρηνικής ενέργειας τους, ενώ ορισμένες επέλεξαν τη σταδιακή κατάργηση ή τη μείωση της παραγωγής πυρηνικής ενέργειας. Η καταστροφή της Φουκουσίμα λειτούργησε ως καταλύτης για την αυξημένη έμφαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στα μέτρα ενεργειακής απόδοσης.

Η πυρηνική καταστροφή της Fukushima Daiichi τόνισε την ευπάθεια των πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής σε φυσικές καταστροφές και τόνισε τη σημασία των ισχυρών μέτρων ασφαλείας και της ετοιμότητας έκτακτης ανάγκης. Το περιστατικό οδήγησε σε επανεκτίμηση των πρακτικών πυρηνικής ασφάλειας, που οδήγησε σε βελτιώσεις στον σχεδιασμό του αντιδραστήρα, στον σχεδιασμό αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και στη διεθνή συνεργασία. Οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της καταστροφής της Φουκουσίμα συνεχίζουν να διαμορφώνουν την κοινή γνώμη για την πυρηνική ενέργεια και να ενισχύουν την ανάγκη για αυστηρούς κανονισμούς ασφαλείας και συνεχή επαγρύπνηση στην πυρηνική βιομηχανία.



Εικόνα11: Fukushima disaster[58]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1 Κόστος πυρηνικής ενέργειας

Το κόστος της πυρηνικής ενέργειας είναι μια κρίσιμη πτυχή που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την αξιολόγηση της βιωσιμότητάς της ως πηγής ενέργειας. Αυτή η ενότητα θα εξετάσει διάφορα στοιχεία κόστους που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια, συμπεριλαμβανομένων των κεφαλαιουχικών δαπανών, του κόστους λειτουργίας και συντήρησης, του κόστους καυσίμων και του κόστους παροπλισμού και διάθεσης αποβλήτων. Η κατανόηση αυτών των δαπανών είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της οικονομικής σκοπιμότητας και της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας των πυρηνικών σταθμών.

5.1.1 Κόστος κατασκευής πυρηνικού αντιδραστήρα

Το κόστος κεφαλαίου αναφέρεται στις δαπάνες που πραγματοποιήθηκαν κατά την κατασκευή και θέση σε λειτουργία πυρηνικών σταθμών. Αυτές οι δαπάνες περιλαμβάνουν το σχεδιασμό, τη μηχανική, την προμήθεια και την κατασκευή της εγκατάστασης. Οι πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, είναι έργα τα οποία έχουν υψηλό αρχικό κόστος, λόγω της πολυπλοκότητάς τους και των αυστηρών απαιτήσεων ασφαλείας.

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ), το κόστος κεφαλαίου μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με παράγοντες όπως η τεχνολογία του αντιδραστήρα, το μέγεθος της μονάδας, τα χαρακτηριστικά τοποθεσίας και οι κανονιστικές απαιτήσεις[117]. Οι πυρηνικοί σταθμοί μεγάλης κλίμακας συνήθως περιλαμβάνουν σημαντικές αρχικές επενδύσεις, που κυμαίνονται από πολλά δισεκατομμύρια έως δεκάδες δισεκατομμύρια δολάρια. Ωστόσο, έχουν προταθεί μικρότεροι σχεδιασμοί αρθρωτών αντιδραστήρων ως πιθανός τρόπος μείωσης του κόστους κεφαλαίου[118].

Δύο πυρηνικοί αντιδραστήρες, ο Vogtle 3 και ο 4, των οποίων η κατασκευή στις ΗΠΑ ξεκίνησε τον Ιούνιο του 2009, χρειάστηκαν πολύ περισσότερο από το αναμενόμενο για να ολοκληρωθούν. Επιπλέον, κόστισαν περισσότερο από ό,τι αναμενόταν. Οι δαπάνες για δύο αντιδραστήρες, οι οποίοι αρχικά προβλεπόταν να ανέλθουν συνολικά σε 14 δισεκατομμύρια δολάρια, έχουν ήδη φτάσει τα 30 δισεκατομμύρια δολάρια και ενδέχεται να προκύψουν περισσότερες δαπάνες πριν τεθεί σε λειτουργία η Μονάδα 4 στις αρχές του 2024. Η GeorgiaPower είχε προβλέψει να θέσει τους αντιδραστήρες σε λειτουργία το 2016 και το 2017, αλλά η διαδικασία αναβλήθηκε. Αυτό οφειλόταν κυρίως στο γεγονός ότι η κατασκευή ξεκίνησε πριν ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός. Ωστόσο, οι δυσκολίες που συναντώνται στην ανάπτυξη αυτού του έργου των πυρηνικών αντιδραστήρων AP1000 θα βοηθήσουν να ανοίξει ο δρόμος για ένα μέλλον, στο οποίο η διαδικασία ανάπτυξης είναι λιγότερο περίπλοκη[165].

5.1.2 Κόστος λειτουργίας και συντήρησης

Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης περιλαμβάνει τις δαπάνες που σχετίζονται με τις καθημερινές λειτουργίες, την τακτική συντήρηση και τις επισκευές πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Αυτές οι δαπάνες περιλαμβάνουν μισθούς προσωπικού, εκπαίδευση, μέτρα ασφαλείας, τακτικές επιθεωρήσεις και συντήρηση εξοπλισμού.

Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης των πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής είναι σχετικά υψηλό σε σύγκριση με άλλες πηγές ενέργειας. Ωστόσο, είναι πιο σταθερά και προβλέψιμα κατά τη διάρκεια ζωής του εργοστασίου. Σύμφωνα με την Υπηρεσία Ενεργειακών Πληροφοριών των ΗΠΑ (EIA–Energy Information Administration), το 2019, το μέσο κόστος λειτουργίας των πυρηνικών σταθμών στις

Ηνωμένες Πολιτείες ήταν περίπου 30,42 \$ ανά μεγαβατώρα. [119] Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτά τα κόστη μπορεί να διαφέρουν μεταξύ χωρών και περιοχών λόγω διαφορών στο κόστος εργασίας, στις κανονιστικές απαιτήσεις και στην αποδοτικότητα των εγκαταστάσεων.

5.1.3 Κόστος καυσίμου

Το κόστος των καυσίμων αποτελεί σημαντικό μέρος των συνολικών δαπανών για τη λειτουργία ενός πυρηνικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες χρησιμοποιούν κυρίως ουράνιο ή πλουτόνιο ως καύσιμο για τη διαδικασία σχάσης. Το κόστος του πυρηνικού καυσίμου εξαρτάται από παράγοντες όπως οι τιμές της αγοράς ουρανίου, το κόστος εμπλουτισμού και ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα.

Οι τιμές του ουρανίου μπορεί να είναι ασταθείς λόγω της παγκόσμιας δυναμικής προσφοράς και ζήτησης. Ωστόσο, το κόστος των καυσίμων αποτελεί συνήθως ένα σχετικά μικρό ποσοστό του συνολικού κόστους της παραγωγής πυρηνικής ενέργειας. Σύμφωνα με την Υπηρεσία Πυρηνικής Ενέργειας (NEA), οι δαπάνες καυσίμων κυμαίνονται συνήθως από 15% έως 25% του συνολικού κόστους παραγωγής για πυρηνικούς σταθμούς[120].

5.1.4 Κόστος παροπλισμού και διάθεσης απορριμμάτων

Το κόστος παροπλισμού αναφέρεται στις δαπάνες που σχετίζονται με την απόσυρση ενός πυρηνικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής στο τέλος της λειτουργικής του ζωής. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την αποξήλωση και την απολύμανση της εγκατάστασης, τη διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων και την αποκατάσταση του χώρου.

Το κόστος παροπλισμού των πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής είναι σημαντικό και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος της μονάδας, ο τύπος του αντιδραστήρα, οι στρατηγικές διαχείρισης αποβλήτων και οι κανονιστικές απαιτήσεις. Η NEA εκτιμά ότι το κόστος παροπλισμού μπορεί να κυμαίνεται από 5% έως 15% του συνολικού κόστους επένδυσης ενός πυρηνικού σταθμού[120].

Το κόστος διάθεσης των απορριμμάτων είναι επίσης σημαντικό στοιχείο. Η παραγωγή πυρηνικής ενέργειας παράγει ραδιενεργά απόβλητα που απαιτούν ασφαλή

διάθεση. Η μακροπρόθεσμη διαχείριση και διάθεση πυρηνικών αποβλήτων συνεπάγεται πρόσθετο κόστος. Το κόστος αυτό ποικίλλει ανάλογα με τη στρατηγική διαχείρισης απορριμμάτων που εφαρμόζει κάθε χώρα.

Η εκτίμηση του κόστους της πυρηνικής ενέργειας περιλαμβάνει την εξέταση πολλών παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων των κεφαλαιουχικών δαπανών, του κόστους λειτουργίας και συντήρησης, του κόστους καυσίμων και του κόστους παροπλισμού και διάθεσης αποβλήτων. Ενώ οι πυρηνικοί σταθμοί έχουν υψηλό αρχικό κόστος κεφαλαίου, προσφέρουν σταθερό και προβλέψιμο κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Το κόστος των καυσίμων, αν και είναι σχετικά μικρό σε σύγκριση με το συνολικό κόστος παραγωγής, μπορεί να επηρεαστεί από τις τιμές της αγοράς ουρανίου. Το κόστος παροπλισμού και διάθεσης αποβλήτων είναι σημαντικά στοιχεία για τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα της πυρηνικής ενέργειας.

5.2 Ενεργειακή ασφάλεια και πυρηνική ενέργεια

Η ενεργειακή ασφάλεια αποτελεί κρίσιμο μέλημα για τις χώρες που στοχεύουν να εξασφαλίσουν έναν αξιόπιστο και βιώσιμο ενεργειακό εφοδιασμό. Αυτή η ενότητα διερευνά πώς η πυρηνική ενέργεια συμβάλλει στην ενεργειακή ασφάλεια μέσω της μείωσης της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα, της διαφοροποίησης των πηγών ενέργειας και του μακροπρόθεσμου ενεργειακού εφοδιασμού. Η κατανόηση αυτών των πτυχών είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση του ρόλου της πυρηνικής ενέργειας στην κάλυψη των μελλοντικών ενεργειακών απαιτήσεων.

5.2.1 Μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα

Η πυρηνική ενέργεια προσφέρει μια εναλλακτική λύση στην παραδοσιακή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα, μειώνοντας την εξάρτηση από εξαντλήσιμους πόρους όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Τα ορυκτά καύσιμα συνδέονται με διάφορες προκλήσεις, όπως η αστάθεια των τιμών, οι γεωπολιτικοί κίνδυνοι και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Οι πυρηνικοί σταθμοί παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω ελεγχόμενων διεργασιών πυρηνικής σχάσης χωρίς να εκπέμπουν αέρια θερμοκηπίου. Με την ενσωμάτωση της

πυρηνικής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα, οι χώρες μπορούν να μειώσουν την εξάρτησή τους από ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οδηγώντας σε ένα πιο βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον ενεργειακό σύστημα [\[121\]](#).

5.2.2 Διαφοροποίηση Πηγών Ενέργειας

Η διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί βασικό στοιχείο των στρατηγικών ενεργειακής ασφάλειας. Η πυρηνική ενέργεια παρέχει μια πολύτιμη επιλογή εναλλακτικών πηγών παράλληλα με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Με την ενσωμάτωση ενός μείγματος πυρηνικών, ανανεώσιμων και συμβατικών πηγών ενέργειας, οι χώρες μπορούν να ενισχύσουν την ανθεκτικότητά τους στις διακοπές εφοδιασμού και τις διακυμάνσεις της αγοράς.

Οι πυρηνικοί σταθμοί μπορούν να παρέχουν ισχύ βασικού φορτίου, που σημαίνει ότι λειτουργούν συνεχώς, παρέχοντας σταθερή και αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το χαρακτηριστικό συμπληρώνει τη διαλείπουσα φύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, που εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες. Ο συνδυασμός πυρηνικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να δημιουργήσει ένα πιο ισορροπημένο και ισχυρό ενεργειακό χαρτοφυλάκιο, μειώνοντας την ευπάθεια σε διακυμάνσεις σε οποιαδήποτε μεμονωμένη πηγή ενέργειας [\[122\]](#).

5.2.3 Μακροπρόθεσμη Παροχή Ενέργειας

Η πυρηνική ενέργεια προσφέρει τη δυνατότητα για μακροπρόθεσμο ενεργειακό εφοδιασμό λόγω της αφθονίας των πόρων ουρανίου και θορίου. Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία είναι πεπερασμένα και υπόκεινται σε εξάντληση, οι πόροι πυρηνικών καυσίμων εκτιμάται ότι είναι πιο άφθονοι και ευρύτερα κατανομημένοι γεωγραφικά.

Τα αποθέματα ουρανίου είναι διαθέσιμα σε διάφορες χώρες, διασφαλίζοντας μια διαφοροποιημένη αλυσίδα εφοδιασμού για πυρηνικά καύσιμα. Επιπλέον, οι συνεχείς προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης διερευνούν τη χρήση του θορίου ως πιθανής πηγής καυσίμου, επεκτείνοντας περαιτέρω τη μακροπρόθεσμη διαθεσιμότητα της πυρηνικής ενέργειας [123].

Επιπλέον, οι πυρηνικοί σταθμοί έχουν συνήθως μεγάλη διάρκεια ζωής, που συχνά εκτείνεται σε αρκετές δεκαετίες. Αυτή η εκτεταμένη διάρκεια ζωής συμβάλλει στη μακροπρόθεσμη παροχή ενέργειας παρέχοντας σταθερή και προβλέψιμη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Η πυρηνική ενέργεια διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας μέσω της μείωσης της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα, της διαφοροποίησης των πηγών ενέργειας και του μακροπρόθεσμου ενεργειακού εφοδιασμού. Με την ενσωμάτωση της πυρηνικής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα, οι χώρες μπορούν να μετριάσουν τους κινδύνους που συνδέονται με την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, να διαφοροποιήσουν τις πηγές ενέργειας τους και να εξασφαλίσουν έναν αξιόπιστο και βιώσιμο ηλεκτρισμό μακροπρόθεσμα.

5.3 Οικονομικά οφέλη

Εκτός από τις δυνατότητες παραγωγής ενέργειας που διαθέτει, η πυρηνική ενέργεια αποφέρει διάφορα οικονομικά οφέλη στις χώρες και τις κοινότητες υποδοχής. Αυτή η ενότητα διερευνά τα οικονομικά πλεονεκτήματα της πυρηνικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας θέσεων εργασίας, της οικονομικής ανάπτυξης στις κοινότητες υποδοχής και της προόδου στην τεχνολογία και την καινοτομία. Η κατανόηση αυτών των πλεονεκτημάτων είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της συνολικής αξίας και της δυνητικής οικονομικής ανάπτυξης που σχετίζεται με την πυρηνική ενέργεια.

5.3.1 Δημιουργία θέσεων εργασίας

Ο τομέας της πυρηνικής ενέργειας έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει σημαντικές ευκαιρίες απασχόλησης σε διάφορα στάδια του κύκλου ζωής ενός πυρηνικού

σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. Αυτά τα στάδια περιλαμβάνουν το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία, τη συντήρηση και τον παροπλισμό. Το ποικίλο φάσμα δραστηριοτήτων που απαιτούνται για έργα πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής διεγείρει τη δημιουργία θέσεων εργασίας στη μηχανική, τις κατασκευές, την κατασκευή, τη λειτουργία και άλλους συναφείς τομείς.

Μελέτες έχουν δείξει ότι τα έργα πυρηνικής ενέργειας μπορούν να έχουν θετικό αντίκτυπο στη δημιουργία θέσεων εργασίας. Για παράδειγμα, μια μελέτη του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ) εκτιμά ότι κάθε 1.000 MW πυρηνικής δυναμικότητας δημιουργεί περίπου 5.000 έως 15.000 άμεσες και έμμεσες θέσεις εργασίας κατά τη φάση κατασκευής και 400 έως 700 μόνιμες θέσεις εργασίας κατά τη φάση λειτουργίας[124].

5.3.2 Οικονομική Ανάπτυξη στις Κοινότητες υποδοχής

Οι πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής συχνά χρησιμεύουν ως καταλύτες για την οικονομική ανάπτυξη στις κοινότητες υποδοχής όπου βρίσκονται. Η κατασκευή και η λειτουργία ενός πυρηνικού σταθμού τονώνει τις τοπικές οικονομίες μέσω της αυξημένης ζήτησης για αγαθά και υπηρεσίες, την ανάπτυξη υποδομών και τις επενδύσεις στην περιοχή.

Οι κοινότητες υποδοχής επωφελούνται από την εισροή ειδικευμένων εργαζομένων, τα αυξημένα φορολογικά έσοδα και τη δημιουργία βοηθητικών βιομηχανιών που υποστηρίζουν τον πυρηνικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής. Επιπλέον, η παρουσία ενός πυρηνικού σταθμού μπορεί να προσελκύσει άλλες βιομηχανίες και επιχειρήσεις, οδηγώντας σε περαιτέρω οικονομική ανάπτυξη και διαφοροποίηση.

Αρκετές περιπτώσιολογικές μελέτες έχουν καταδείξει τον θετικό οικονομικό αντίκτυπο των πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στις κοινότητες υποδοχής. Για παράδειγμα, η κατασκευή και η λειτουργία του εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Vogtle στη Γεωργία των ΗΠΑ, έχουν συσχετιστεί με αυξημένη απασχόληση, επιχειρηματική δραστηριότητα και φορολογικά έσοδα στη γύρω περιοχή[125].

5.3.3 Τεχνολογία και Καινοτομία

Η πυρηνική ενέργεια οδηγεί τις τεχνολογικές εξελίξεις και την καινοτομία σε διάφορους τομείς. Η πολύπλοκη φύση των πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής απαιτεί την ανάπτυξη τεχνολογιών μηχανικής αιχμής, επιστήμης υλικών και τεχνολογιών ασφάλειας. Αυτές οι εξελίξεις δεν ωφελούν μόνο την πυρηνική βιομηχανία αλλά έχουν και ευρύτερες εφαρμογές σε άλλους τομείς.

Η έρευνα και η ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας συμβάλλουν στην πρόοδο του σχεδιασμού των αντιδραστήρων, των τεχνολογιών καυσίμων, των τεχνικών διαχείρισης αποβλήτων και των μέτρων ασφαλείας. Αυτές οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση, να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση του ενεργειακού συστήματος.

Επιπλέον, η πυρηνική ενέργεια μπορεί να χρησιμεύσει ως μοχλός για καινοτομία σε τομείς όπως τα προηγμένα υλικά, η ρομποτική, η απομακρυσμένη παρακολούθηση και η τεχνητή νοημοσύνη. Η τεχνογνωσία που αποκτάται από την έρευνα και ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας μπορεί να μεταφερθεί σε άλλες βιομηχανίες, τονώνοντας την τεχνολογική πρόοδο και την οικονομική ανάπτυξη.

Συνοψίζοντας, η πυρηνική ενέργεια αποφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη μέσω της δημιουργίας θέσεων εργασίας, της οικονομικής ανάπτυξης στις κοινότητες υποδοχής και της προόδου στην τεχνολογία και την καινοτομία. Ο τομέας δημιουργεί ευκαιρίες απασχόλησης καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός πυρηνικού σταθμού και τονώνει τις τοπικές οικονομίες. Επιπλέον, η πυρηνική ενέργεια οδηγεί τις τεχνολογικές εξελίξεις που έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών πέρα από τον ενεργειακό τομέα, ενισχύοντας την καινοτομία και την οικονομική ανάπτυξη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

6.1 Ανανεώσιμη πηγές ενέργειες

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην αντιμετώπιση των αυξανόμενων ενεργειακών απαιτήσεων, μετριάζοντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές ανησυχίες. Αυτή η ενότητα διερευνά διάφορες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ηλιακής ενέργειας, της αιολικής ενέργειας, της υδροηλεκτρικής ενέργειας, της γεωθερμικής ενέργειας και της ενέργειας από βιομάζα. Η κατανόηση των χαρακτηριστικών και των δυνατοτήτων αυτών των πηγών είναι απαραίτητη για την επίτευξη ενός βιώσιμου και διαφοροποιημένου ενεργειακού μείγματος.

6.1.1 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια αξιοποιεί τη δύναμη του ηλιακού φωτός και τη μετατρέπει σε χρησιμοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια ή θερμότητα. Η τεχνολογία φωτοβολταϊκών (PV) χρησιμοποιεί ηλιακούς συλλέκτες για να μετατρέψει απευθείας το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ τα ηλιακά θερμικά συστήματα χρησιμοποιούν το ηλιακό φως για να παράγουν θερμότητα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές.

Η ηλιακή ενέργεια προσφέρει σημαντικές δυνατότητες λόγω της αφθονίας και της ευρείας διαθεσιμότητάς της. Είναι μια καθαρή και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που δεν παράγει άμεσες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά τη λειτουργία. Το μειωμένο κόστος των ηλιακών συλλεκτών και η πρόοδος της τεχνολογίας έχουν συμβάλει στην ταχεία ανάπτυξη των εγκαταστάσεων ηλιακής ενέργειας παγκοσμίως [\[126\]](#).

6.1.2 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιεί την κινητική ενέργεια του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες συλλαμβάνουν την ενέργεια του ανέμου και τη μετατρέπουν σε μηχανική ισχύ, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννητριών.

Η αιολική ενέργεια έχει γίνει μια από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παγκοσμίως. Είναι άφθονη και ευρέως διαδεδομένη, με δυνατότητες τόσο στην ξηρά όσο και στις υπεράκτιες εγκαταστάσεις. Η αιολική ενέργεια προσφέρει περιβαλλοντικά οφέλη, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και της διατήρησης των υδάτινων πόρων σε σύγκριση με τη συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας[127].

6.1.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια αξιοποιεί την ενέργεια του νερού που ρέει ή πέφτει για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Περιλαμβάνει τη χρήση φραγμάτων ή άλλων κατασκευών για τη σύλληψη και τον έλεγχο της ενέργειας του νερού, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια και τελικά σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι μια ώριμη και αξιόπιστη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που αντιπροσωπεύει σημαντικό μέρος της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρέχει ευέλικτη και αποσπώμενη ισχύ, υποστηρίζοντας τη σταθερότητα του δικτύου και την ενσωμάτωση διακοπτόμενων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ωστόσο, η ανάπτυξη της υδροηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις, όπως η διαταραχή των οικοτόπων και η μετατόπιση των πληθυσμών[128].

6.1.4 Γεωθερμική Ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιεί τη θερμότητα από το υπέδαφος της Γης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή την παροχή άμεσης θέρμανσης και ψύξης. Αξιοποιεί φυσικές γεωθερμικές δεξαμενές ή χρησιμοποιεί γεωθερμικές αντλίες θερμότητας για πρόσβαση στη θερμική ενέργεια της Γης.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια αξιόπιστη και συνεχώς ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, που προσφέρει σταθερή παραγωγή ενέργειας με χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για περιοχές με σημαντικούς γεωθερμικούς πόρους, όπως γεωλογικά ενεργές περιοχές. Οι γεωθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να λειτουργούν όλο το εικοσιτετράωρο, παρέχοντας ισχύ βασικού φορτίου[129].

6.1.5 Ενέργεια από βιομάζα

Η ενέργεια από βιομάζα χρησιμοποιεί οργανικά υλικά, όπως γεωργικά υπολείμματα, δασικά υποπροϊόντα και αποκλειστικές ενεργειακές καλλιέργειες, για την παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρικής ενέργειας ή βιοκαυσίμων. Η βιομάζα μπορεί να καεί απευθείας ή να μετατραπεί σε διάφορες μορφές ενέργειας μέσω θερμικών, χημικών ή βιοχημικών διεργασιών.

Η ενέργεια από βιομάζα συμβάλλει σε ένα πιο βιώσιμο σύστημα διαχείρισης απορριμμάτων και προσφέρει μια αξιόπιστη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Ωστόσο, η βιωσιμότητα της παραγωγής και χρήσης βιομάζας πρέπει να λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως η χρήση γης, η διαθεσιμότητα των πόρων και οι εκπομπές άνθρακα από την καύση βιομάζας[126].

6.2 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διευκόλυνση της ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο, βελτιώνοντας τη σταθερότητα του δικτύου και καθιστώντας ένα πιο αξιόπιστο και αποδοτικό ενεργειακό σύστημα. Αυτή η ενότητα διερευνά διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της αποθήκευσης σε μπαταρίες, της αποθήκευσης αντλίας υδροηλεκτρικής ενέργειας, της αποθήκευσης θερμικής

ενέργειας και της αποθήκευσης ενέργειας πεπιεσμένου αέρα. Η κατανόηση αυτών των τεχνολογιών είναι απαραίτητη για τη μεγιστοποίηση των οφελών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την επίτευξη ενός βιώσιμου ενεργειακού μέλλοντος.

6.2.1 Αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες

Τα συστήματα αποθήκευσης μπαταριών αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια σε χημική μορφή και την απελευθερώνουν όταν χρειάζεται. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι ο πιο κοινός τύπος που χρησιμοποιείται για αποθήκευση ενέργειας λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, της απόδοσης και του γρήγορου χρόνου απόκρισης.

Η αποθήκευση μπαταριών παίζει ζωτικό ρόλο στην εξομάλυνση της διακοπτόμενης παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, στη βελτιστοποίηση της προσφοράς και ζήτησης ενέργειας και στην παροχή σταθερότητας του δικτύου. Επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση της ανανεώσιμης ενέργειας με την αποθήκευση της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους υψηλής παραγωγής και την απόρριψή της σε περιόδους υψηλής ζήτησης. Τα συστήματα αποθήκευσης μπαταριών προσφέρουν πολλαπλά οφέλη στο ενεργειακό οικοσύστημα. Ενισχύουν την αξιοπιστία του ηλεκτρικού δικτύου παρέχοντας εφεδρική ισχύ κατά τη διάρκεια διακοπών και συμβάλλουν επίσης σε μια πιο αποτελεσματική και ισορροπημένη ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στη συνολική ενεργειακή υποδομή[130].

6.2.2 Αποθήκευση με αντλία

Η αντλούμενη υδροηλεκτρική αποθήκευση είναι η πιο ώριμη και ευρέως διαδεδομένη μορφή αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Χρησιμοποιεί τη δυναμική ενέργεια του νερού αντλώντας νερό από μια χαμηλότερη δεξαμενή σε μια υψηλότερη δεξαμενή σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και υπερβολικής παραγωγής. Όταν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή, το αποθηκευμένο νερό απελευθερώνεται για να ρέει κατηφορικά, δίνοντας κίνηση στους στρόβιλους και παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια.

Η αντλούμενη υδροηλεκτρική αποθήκευση προσφέρει υψηλή ενεργειακή απόδοση και δυνατότητες αποθήκευσης μεγάλης διάρκειας, καθιστώντας την κατάλληλη για την εξισορρόπηση των διακυμάνσεων στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Παρέχει σταθερότητα δικτύου, εξισορρόπηση φορτίου και ικανότητα αιχμής, συμβάλλοντας στην αντιστάθμιση της προσφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με τη ζήτηση[131].

6.2.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας

Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES–Thermal Energy Storage) αποθηκεύουν και απελευθερώνουν θερμική ενέργεια για μελλοντική χρήση. Το TES μπορεί να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους, όπως αποθήκευση θερμότητας σε λιωμένα άλατα, υλικά αλλαγής φάσης ή μέσω της χρήσης συστημάτων αποθήκευσης ζεστού και κρύου νερού.

Τα συστήματα TES χρησιμοποιούνται συνήθως σε συνδυασμό με μονάδες συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας (CSP), επιτρέποντας τη συνεχή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ακόμη και όταν ο ήλιος δεν λάμπει. Το TES επιτρέπει στα εργοστάσια CSP να αποθηκεύουν περίσσεια θερμότητας κατά τη διάρκεια της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας και να τη χρησιμοποιούν σε περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας ή τη νύχτα. Ενισχύει τη δυνατότητα αποστολής και την ευελιξία των εγκαταστάσεων CSP, βελτιώνοντας τη συνολική τους απόδοση και την ενσωμάτωση στο δίκτυο[127].

Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES) είναι ένα κρίσιμο συστατικό σε συνδυασμό με μονάδες συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας (CSP–Concentrated Solar Power), που επιτρέπουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ακόμη και όταν το ηλιακό φως δεν είναι διαθέσιμο. Το TES παρέχει έναν μηχανισμό αποθήκευσης θερμικής ενέργειας που παράγεται από μονάδες CSP σε περιόδους υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας και στη συνέχεια απελευθερώνεται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας ή τη νύχτα. Αυτή η τεχνολογία ενισχύει σημαντικά τη λειτουργικότητα των εγκαταστάσεων CSP, αυξάνοντας την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητά τους ως προς τη συμβολή στο ενεργειακό δίκτυο.

Ακολουθεί μια λεπτομερής εξήγηση του τρόπου λειτουργίας των συστημάτων TES[127]:

Συλλογή θερμότητας: Οι μονάδες συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας (CSP) χρησιμοποιούν καθρέφτες ή φακούς για να εστιάσουν το ηλιακό φως σε έναν κεντρικό δέκτη, δημιουργώντας έντονη θερμότητα. Αυτή η θερμότητα αυξάνει τη θερμοκρασία ενός ρευστού μεταφοράς θερμότητας, συνήθως ενός ειδικού τύπου λαδιού ή λιωμένου άλατος, που κυκλοφορεί μέσω του δέκτη.

Αποθήκευση ενέργειας: Τα συστήματα TES συλλαμβάνουν την περίσσεια θερμότητα που παράγεται από το εργοστάσιο CSP κατά τη διάρκεια περιόδων έντονης ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτή η περίσσεια θερμότητας αποθηκεύεται αποτελεσματικά σε μονωμένα δοχεία, γνωστά ως δεξαμενές ή δεξαμενές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Αυτές οι δεξαμενές έχουν σχεδιαστεί για να διατηρούν τη θερμότητα για παρατεταμένες περιόδους χωρίς σημαντικές απώλειες.

Θερμικό μέσο αποθήκευσης: Η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια διατηρείται σε ένα επιλεγμένο μέσο αποθήκευσης, συχνά λιωμένο αλάτι ή άλλα υλικά υψηλής θερμοκρασίας. Το λιωμένο αλάτι προτιμάται ιδιαίτερα λόγω της ικανότητάς του να διατηρεί τη θερμότητα σε υψηλές θερμοκρασίες, καθιστώντας το κατάλληλο για παρατεταμένη αποθήκευση ενέργειας.

Απελευθέρωση θερμότητας: Όταν η ένταση του ήλιου μειώνεται ή κατά τις νυχτερινές ώρες που το φως του ήλιου δεν είναι διαθέσιμο, η μονάδα CSP μπορεί να αντλήσει από την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια. Η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται από τις δεξαμενές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και μεταφέρεται στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας που κυκλοφορεί μέσω του δέκτη.

Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας: Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας, που τώρα θερμαίνεται από την απελευθερωμένη αποθηκευμένη ενέργεια, χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού. Αυτός ο ατμός κινεί έναν στρόβιλο συνδεδεμένο με μια γεννήτρια, παράγοντας τελικά ηλεκτρική ενέργεια. Η διαδικασία είναι παρόμοια με τους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, με τη διαφορά ότι οι μονάδες CSP που είναι εξοπλισμένες με TES μπορούν να λειτουργούν συνεχώς, ακόμη και όταν το άμεσο ηλιακό φως δεν είναι διαθέσιμο.

Δυνατότητα διανομής και ενσωμάτωση στο δίκτυο: Το TES ενισχύει τη δυνατότητα αποστολής και την ευελιξία των εγκαταστάσεων CSP. Η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια επιτρέπει σε αυτές τις μονάδες να συνεχίσουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας ή τη νύχτα, διασφαλίζοντας έτσι μια πιο συνεπή απόδοση ισχύος. Αυτή η σταθερότητα συμβάλλει στην αποτελεσματική ενσωμάτωση των σταθμών CSP στο ηλεκτρικό δίκτυο, καθιστώντας τους πιο αξιόπιστους και πολύτιμους συντελεστές στον συνολικό ενεργειακό εφοδιασμό.

Ουσιαστικά, τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας παρέχουν μια κρίσιμη λύση στη διαλείπουσα φύση των ηλιακών πηγών ενέργειας. Επιτρέποντας στις μονάδες CSP να αποθηκεύουν περίσσεια θερμικής ενέργειας και να τη χρησιμοποιούν όταν χρειάζεται, το TES ενισχύει την αξιοπιστία, την απόδοση και την ενοποίηση στο δίκτυο των συστημάτων συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας.

6.2.4 Αποθήκευση ενέργειας πεπιεσμένου αέρα

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας πεπιεσμένου αέρα (CAES – Compressed – air Energy Storage) αποθηκεύουν την περίσσεια ηλεκτρική ενέργεια συμπιέζοντας τον αέρα και αποθηκεύοντάς τον σε υπόγεια σπήλαια ή δεξαμενές. Όταν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή, ο πεπιεσμένος αέρας απελευθερώνεται, διαστέλλεται και χρησιμοποιείται για την κίνηση στροβίλων, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια.

Η CAES παρέχει μια οικονομικά αποδοτική και μεγάλης κλίμακας λύση αποθήκευσης ενέργειας. Προσφέρει αποθήκευση μεγάλης διάρκειας και δυνατότητες υψηλής απόδοσης ισχύος, καθιστώντας το κατάλληλο για την εξισορρόπηση των διακυμάνσεων της ανανεώσιμης ενέργειας και την υποστήριξη της σταθερότητας του δικτύου[132].

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της αποθήκευσης ενέργειας σε μπαταρίες, της αποθήκευσης μέσω αντλίας υδροηλεκτρικής ενέργειας, της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και της αποθήκευσης ενέργειας πεπιεσμένου αέρα, είναι κρίσιμες για την αποτελεσματική

ενοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της απόδοσης του ενεργειακού συστήματος. Αυτές οι τεχνολογίες αποθήκευσης διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στην εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης ενέργειας, ενισχύοντας τη σταθερότητα του δικτύου και βελτιστοποιώντας τη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Περαιτέρω πρόοδοι και ανάπτυξη τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας είναι απαραίτητες για την επίτευξη ενός βιώσιμου και ανθεκτικού ενεργειακού μέλλοντος.

6.3 Προκλήσεις και περιορισμοί εναλλακτικών πηγών ενέργειας

Ενώ οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προσφέρουν υποσχόμενες εναλλακτικές λύσεις στα παραδοσιακά ενεργειακά συστήματα που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, αντιμετωπίζουν επίσης προκλήσεις και περιορισμούς που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την ευρεία υιοθέτησή τους. Αυτή η ενότητα διερευνά μερικές από τα βασικά ζητήματα που σχετίζονται με τις εναλλακτικές λύσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της διαλείψεως και της μεταβλητότητας, της ολοκλήρωσης του δικτύου, των απαιτήσεων γης και πόρων και ανταγωνιστικότητας κόστους. Η κατανόηση αυτών των προκλήσεων είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη στρατηγικών για την αντιμετώπισή τους και τη διασφάλιση της επιτυχούς μετάβασης σε ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον.

6.3.1 Διαλείπουσα και μεταβλητή φύση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που χρίζουν διαχείρισης, είναι η διαλείπουσα και μεταβλητή φύση τους. Η παραγωγή ηλιακής και αιολικής ενέργειας εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες και υπόκειται σε διακυμάνσεις. Αυτό θέτει περιορισμούς για τη διατήρηση ενός συνεπούς και αξιόπιστου ενεργειακού εφοδιασμού.

Εκτός από τους περιορισμούς που θέτει η διαλείπουσα φύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του κύκλου ζωής τους απαιτεί επίσης να ληφθεί υπόψη. Ενώ η ηλιακή και η αιολική ενέργεια προσφέρουν πιο καθαρές εναλλακτικές λύσεις ενέργειας, ο πλήρης κύκλος ζωής των εξαρτημάτων τους μπορεί

να προκαλέσει σημαντικές περιβαλλοντικές ανησυχίες. Οι ανεμογεννήτριες, για παράδειγμα, αντιμετωπίζουν προβλήματα τόσο όσον αφορά την κατασκευή όσο και την τελική διάθεσή τους.

Η ανακύκλωση των ανεμογεννητριών αποτελεί μια πολύπλοκη συνθήκη προς αντιμετώπιση. Καθώς αυτοί οι στρόβιλοι φτάνουν στο τέλος της λειτουργικής τους ζωής, η απόρριψη και η ανακύκλωση των εξαρτημάτων τους αποκτά πρωταρχική σημασία. Ιδιαίτερα ανησυχητικά είναι τα πλαστικά εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται στα πτερύγια των στροβίλων, τα οποία είναι δύσκολο να ανακυκλωθούν αποτελεσματικά. Εάν δεν γίνει σωστή διαχείριση, αυτά τα πλαστικά υλικά μπορούν να αποικοδομηθούν σε μη αποικοδομήσιμα μικροπλαστικά, επιβαρύνοντας περαιτέρω το περιβάλλον και πιθανώς να εισέλθουν στα οικοσυστήματα. Αξίζει λοιπόν να τονιστεί η ανάγκη για καινοτόμες και βιώσιμες λύσεις στον κλάδο της αιολικής ενέργειας, διασφαλίζοντας ότι τα οφέλη της αιολικής ενέργειας δεν υπονομεύονται από μακροπρόθεσμες περιβαλλοντικές συνέπειες.

Επιπλέον, η κατασκευή ανεμογεννητριών απαιτεί σημαντικές ποσότητες υλικών και ενέργειας. Η κατασκευή και η συναρμολόγηση εξαρτημάτων στροβίλου, όπως δομές πύργων, πτερύγια και κιβώτια ταχυτήτων, απαιτούν πρώτες ύλες και κατανάλωση ενέργειας. Μια μελέτη που διεξήχθη από ερευνητές [\[144\]](#) υπογραμμίζει την ενεργοβόρα φύση της παραγωγής ανεμογεννητριών, εγείροντας ερωτήματα σχετικά με τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ευρείας υιοθέτησής τους. Η αντιμετώπιση αυτών των ανησυχιών περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής, την εξερεύνηση εναλλακτικών υλικών με χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και την εφαρμογή αποτελεσματικών στρατηγικών στο τέλος του κύκλου ζωής τους για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στους χώρους υγειονομικής ταφής και στα οικοσυστήματα.

Ενώ οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προσφέρουν αναμφίβολα ζωτικές λύσεις για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αυτά τα στοιχεία υπενθυμίζουν ότι η μετάβαση σε ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον απαιτεί ολοκληρωμένη εξέταση ολόκληρου του κύκλου ζωής αυτών των τεχνολογιών. Η εξισορρόπηση των οφελών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων απαιτεί συνεχή έρευνα, καινοτομία και συλλογικές προσπάθειες μεταξύ των βιομηχανιών.

Η διακοπή και η μεταβλητότητα μπορούν να αντιμετωπιστούν με διάφορα μέσα. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως η αποθήκευση μπαταριών και η αντλούμενη υδροηλεκτρική αποθήκευση, μπορούν να αποθηκεύσουν περίσσεια ενέργειας σε περιόδους υψηλής παραγωγής και να την απελευθερώσουν σε περιόδους χαμηλής παραγωγής, εξομαλύνοντας έτσι τις διακυμάνσεις. Επιπλέον, η ενσωμάτωση διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια, μπορεί να βοηθήσει στην εξισορρόπηση της διαλείπουσας λειτουργίας τους και στη βελτίωση της συνολικής αξιοπιστίας του συστήματος [125].

6.4.2 Ενοποίηση πλέγματος

Η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα υπάρχοντα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας θέτει τεχνικές και λειτουργικές δυσκολίες. Η υποδομή του δικτύου πρέπει να αναβαθμιστεί και να επεκταθεί για να φιλοξενήσει την αυξημένη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επιπλέον, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συχνά απαιτούν εξειδικευμένες τεχνικές διαχείρισης δικτύου για να διασφαλιστεί η σταθερή του λειτουργία και αξιοπιστία.

Οι προηγμένες τεχνολογίες δικτύου, όπως τα έξυπνα δίκτυα και τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην αποτελεσματική ενοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, την απόκριση της ζήτησης και τη βελτιστοποιημένη διαχείριση ενέργειας, επιτρέποντας την απρόσκοπτη ενσωμάτωση της διαλείπουσας ανανεώσιμης ενέργειας στο δίκτυο [131].

6.4.3 Απαιτήσεις γης και πόρων

Η επέκταση των εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδιαίτερα για ηλιακή και αιολική ενέργεια, απαιτεί επαρκή διαθεσιμότητα γης και κατανομή πόρων. Η μεγάλη κλίμακα ανάπτυξη τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να απαιτεί σημαντικές εκτάσεις γης και πρόσβαση σε κατάλληλους πόρους.

Ο στρατηγικός σχεδιασμός χρήσης γης και η προσεκτική επιλογή τοποθεσίας είναι βασικές στρατηγικές για τη μείωση των απαιτήσεων γης των εγκαταστάσεων ανανεώσιμης ενέργειας. Επιπλέον, οι τεχνολογικές εξελίξεις σε ηλιακούς συλλέκτες και ανεμογεννήτριες μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση παραγωγής ενέργειας, μειώνοντας τις συνολικές απαιτήσεις γης και πόρων [127].

6.3.4 Ανταγωνιστικότητα κόστους

Ενώ το κόστος των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μειώνεται σταθερά με τα χρόνια, εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν ζητήματα όσον αφορά την ανταγωνιστικότητα κόστους σε σύγκριση με τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Το αρχικό κόστος κεφαλαίου, τα έξοδα εγκατάστασης και συντήρησης μπορεί να είναι υψηλότερα για τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, επηρεάζοντας την οικονομική βιωσιμότητά τους.

Ωστόσο, οι συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις, οι οικονομίες κλίμακας και οι υποστηρικτικές πολιτικές μπορούν να μειώσουν το κόστος των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι οικονομίες κλίμακας αναφέρονται στο φαινόμενο όπου το κόστος ανά μονάδα παραγωγής μειώνεται καθώς αυξάνεται η κλίμακα παραγωγής. Με απλούστερους όρους, καθώς μια εταιρεία ή βιομηχανία παράγει περισσότερο προϊόν ή υπηρεσία, το μέσο κόστος παραγωγής κάθε μονάδας μειώνεται [127].

Η ευρεία υιοθέτηση εναλλακτικών λύσεων ανανεώσιμης ενέργειας είναι απαραίτητη για την επίτευξη ενός βιώσιμου ενεργειακού μέλλοντος με χαμηλές εκπομπές άνθρακα. Ωστόσο, πρέπει να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα και οι περιορισμοί που σχετίζονται με τη διαλείπουσα διακοπή και τη μεταβλητότητα, την χωρητικότητα του δικτύου διανομής, τις απαιτήσεις γης και πόρων και την ανταγωνιστικότητα κόστους. Μέσω της προόδου στις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, των συστημάτων διαχείρισης δικτύου, του αποτελεσματικού σχεδιασμού χρήσης γης και της συνεχούς μείωσης του κόστους, αυτές οι προκλήσεις μπορούν να ξεπεραστούν. Η υπέρβαση αυτών των περιορισμών θα ανοίξει το δρόμο για μια επιτυχημένη μετάβαση σε μια κοινωνία με γνώμονα τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι προηγούμενες ενότητες έχουν εμβαθύνει σε διάφορες πτυχές της πυρηνικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των θετικών χρήσεων, των θεσμικών και κανονιστικών πλαισίων, των πυρηνικών ατυχημάτων, των ηθικών διλημμάτων και των ανθρώπινων προβλημάτων που συνδέονται με την εφαρμογή της. Αυτή η συζήτηση στοχεύει να συνθέσει τα βασικά σημεία και να ρίξει φως στα περίπλοκα ζητήματα γύρω από την πυρηνική ενέργεια.

Δεοντολογικά ζητήματα:

Η πυρηνική ενέργεια παρουσιάζει μια σειρά από ηθικά διλήμματα που απαιτούν προσεκτική εξέταση. Η ισορροπία μεταξύ των πιθανών οφελών, όπως η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και η κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων, και των εγγενών κινδύνων, συμπεριλαμβανομένων των πυρηνικών ατυχημάτων και των προκλήσεων διάθεσης αποβλήτων, απαιτεί ολοκληρωμένες ηθικές αξιολογήσεις [\[108\]](#). Η ηθική λήψη αποφάσεων απαιτεί την ενσωμάτωση αρχών όπως η ασφάλεια, η δικαιοσύνη, η διασφάλιση της ισότητας, η ενημερωμένη συναίνεση και η παγκόσμια συνεργασία [\[104\]\[86\]](#). Η επίτευξη της σωστής ισορροπίας μεταξύ των οφελών και των κινδύνων της πυρηνικής ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για την πλοήγηση στο ηθικό τοπίο.

Ανθρώπινοι παράγοντες:

Το ανθρώπινο στοιχείο παίζει σημαντικό ρόλο στην επιτυχή εφαρμογή και ασφαλή λειτουργία της πυρηνικής ενέργειας. Η διασφάλιση της ασφάλειας και της ευημερίας των εργαζομένων στην πυρηνική βιομηχανία είναι υψίστης σημασίας. Αυτό συνεπάγεται ισχυρά μέτρα επαγγελματικής ασφάλειας και υγείας, ενδυνάμωση της προσήλωσης προς τον στόχο και τη συμμετοχή των εργαζομένων σε αυτή τη διαδικασία, διαχείριση του επαγγελματικού stress, ολοκληρωμένη εκπαίδευση και καθιέρωση μιας ηθικής κουλτούρας [\[112\]\[113\]\[115\]](#). Αυτές οι εκτιμήσεις συμβάλλουν στη διατήρηση ενός ασφαλούς εργασιακού περιβάλλοντος και στην πρόληψη συμβάντων που θα μπορούσαν να έχουν σοβαρές συνέπειες για τους εργαζόμενους και τις γύρω κοινότητες.

Δημόσια Δέσμευση και Διαφάνεια:

Η δημόσια δέσμευση και η διαφάνεια αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της ηθικής λήψης αποφάσεων στην πυρηνική ενέργεια. Περιλαμβάνουν την ανοιχτή ανταλλαγή πληροφοριών, τη συμμετοχή του κοινού σε συζητήσεις και αποφάσεις που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια και την απόκτηση δέσμευσης και υποστήριξης του για τις επιλεγμένες πορείες δράσης. Η αποτελεσματική συμμετοχή του κοινού, οι διαδικασίες λήψης αποφάσεων χωρίς αποκλεισμούς και η διαφανής δημόσια πληροφόρηση σχετικά με θέματα ασφάλειας είναι ζωτικής σημασίας για την αντιμετώπιση των ανησυχιών, την ενίσχυση της εμπιστοσύνης και την ενσωμάτωση διαφορετικών προοπτικών [89]. Η ανοιχτή και διαφανής επικοινωνία σχετικά με τους κινδύνους, τα οφέλη και τις διαθέσιμες εναλλακτικές λύσεις στην πυρηνική ενέργεια είναι απαραίτητη για την απόκτηση ενημερωμένης συναίνεσης και τη διευκόλυνση μιας πιο δημοκρατικής προσέγγισης στη λήψη αποφάσεων [109].

Ρυθμιστικά Πλαίσια και Διεθνής Συνεργασία:

Τα αποτελεσματικά ρυθμιστικά πλαίσια είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ασφαλούς και υπεύθυνης χρήσης της πυρηνικής ενέργειας. Ισχυρά θεσμικά και νομικά πλαίσια, διεθνείς συμφωνίες και συμβάσεις όπως η Σύμβαση του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) για την Πυρηνική Ασφάλεια και η Συνθήκη για τη μη διάδοση των πυρηνικών όπλων αποτελούν τη βάση για παγκόσμια συνεργασία, ασφαλή πρότυπα ασφάλειας και προσπάθειες μη διάδοσης των πυρηνικών. [87][108] Αυτά τα πλαίσια διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διατήρηση της ασφάλειας, της λογοδοσίας και στην αντιμετώπιση των ανησυχιών που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια.

Η συζήτηση υπογραμμίζει τις περίπλοκες σκέψεις και ανθρώπινες εκτιμήσεις γύρω από την πυρηνική ενέργεια. Η εξισορρόπηση των πιθανών οφελών και των κινδύνων, η διασφάλιση της ασφάλειας και της ευημερίας των εργαζομένων, η δέσμευση του κοινού και η θέσπιση ισχυρών ρυθμιστικών πλαισίων είναι αναπόσπαστα στοιχεία για την εξερεύνηση του ηθικού πλαισίου που διέπει την πυρηνική ενέργεια. Η λήψη δεοντολογικών αποφάσεων στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας απαιτεί μια διεπιστημονική προσέγγιση που ενσωματώνει την επιστημονική γνώση, τις ηθικές αρχές και τη συμμετοχή των ενδιαφερομένων. Αντιμετωπίζοντας αυτές τις σκέψεις, η κοινωνία μπορεί να αγωνιστεί για την υπεύθυνη και βιώσιμη χρήση της πυρηνικής

ενέργειας, ενώ παράλληλα προστατεύει την ασφάλεια, τη διαφάνεια και την ευημερία των ατόμων και του περιβάλλοντος.

Οφέλη από την πυρηνική ενέργεια:

Η πυρηνική ενέργεια προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα που την καθιστούν ελκυστική επιλογή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά τα οφέλη περιλαμβάνουν:

- **Μετριασμός της κλιματικής αλλαγής:** Η πυρηνική ενέργεια είναι μια πηγή ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα, πράγμα που σημαίνει ότι εκπέμπει σημαντικά λιγότερα αέρια θερμοκηπίου σε σύγκριση με την παραγωγή ενέργειας που βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα. Διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.
- **Ενεργειακή ασφάλεια:** Η πυρηνική ενέργεια παρέχει μια σταθερή και αξιόπιστη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς δεν εξαρτάται από τις διακυμάνσεις των τιμών των καυσίμων ή τις καιρικές συνθήκες όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Βοηθά στη διαφοροποίηση του ενεργειακού μείγματος και στη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα.
- **Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα:** Τα πυρηνικά καύσιμα έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, που σημαίνει ότι μια μικρή ποσότητα καυσίμου μπορεί να παράγει σημαντική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό καθιστά τους πυρηνικούς σταθμούς πιο αποδοτικούς όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου σε σύγκριση με άλλες πηγές.
- **Ισχύς βασικού φορτίου:** Οι πυρηνικοί σταθμοί μπορούν να λειτουργούν συνεχώς και να παρέχουν σταθερή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας τους κατάλληλους για την κάλυψη της ζήτησης βασικού φορτίου, που είναι το ελάχιστο επίπεδο ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται ανά πάσα στιγμή.

Ανησυχίες σχετικά με την πυρηνική ενέργεια:

Ενώ η πυρηνική ενέργεια προσφέρει πολλά οφέλη, υπάρχουν σοβαρές ανησυχίες που σχετίζονται με τη χρήση της. Είναι σημαντικό να αντιμετωπιστούν αυτές οι ανησυχίες για να διασφαλιστεί η ασφαλής και υπεύθυνη εφαρμογή της πυρηνικής ενέργειας. Μερικές από τις ανησυχίες περιλαμβάνουν:

Πυρηνικά ατυχήματα: Πυρηνικά ατυχήματα, όπως το ThreeMileIsland, το Τσερνόμπιλ και η Φουκουσίμα, έχουν εγείρει ανησυχίες για την ασφάλεια των πυρηνικών σταθμών. Αυτά τα περιστατικά υπογραμμίζουν την ανάγκη για αυστηρά μέτρα ασφαλείας και ισχυρά ρυθμιστικά πλαίσια για την πρόληψη και τον μετριασμό των ατυχημάτων.

Διάθεση αποβλήτων: Η διαχείριση και η διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων αποτελεί σημαντική ανησυχία. Τα ραδιενεργά απόβλητα παραμένουν επικίνδυνα για χιλιάδες χρόνια και η διασφάλιση της ασφαλούς αποθήκευσης και μακροπρόθεσμου περιορισμού τους είναι ζωτικής σημασίας. Αναπτύσσονται πρόοδοι στις τεχνολογίες διαχείρισης απορριμμάτων και στους χώρους αποθήκευσης για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων.

Κόστος και προσιτές τιμές: Το αρχικό κόστος για την κατασκευή πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να είναι υψηλό, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει οικονομικές προκλήσεις, ειδικά για οικονομικά ασθενέστερες χώρες. Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη το κόστος που σχετίζεται με τον παροπλισμό πυρηνικών σταθμών και τη διάθεση αποβλήτων.

Δημόσια αντίληψη και εμπιστοσύνη: Η αντίληψη και η εμπιστοσύνη του κοινού στην πυρηνική ενέργεια διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στην αποδοχή και την εφαρμογή της. Η ακριβής πληροφόρηση, η διαφάνεια και η αποτελεσματική επικοινωνία σχετικά με τους κινδύνους, τα οφέλη και τα μέτρα ασφαλείας που συνδέονται με την πυρηνική ενέργεια είναι ζωτικής σημασίας για την οικοδόμηση της εμπιστοσύνης του κοινού.

Ελληνική Θέση και Διεθνή Πλαίσια:

Η Ελλάδα, έχει διατηρήσει ξεκάθαρη θέση, κατά της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας. Ωστόσο, η Ελλάδα συμμετέχει ενεργά σε ευρωπαϊκά και διεθνή φόρουμ που σχετίζονται με την πυρηνική ασφάλεια και εκπληρώνει τις συμβατικές εθνικές της υποχρεώσεις.

Σε διεθνές επίπεδο, ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην πυρηνική ασφάλεια. Η Διεθνής Σύμβαση για την Πυρηνική Ασφάλεια, που επικυρώθηκε από την Ελλάδα, θέτει διεθνή πρότυπα και

ενθαρρύνει τη συνεργασία μεταξύ των κρατών για τη διασφάλιση υψηλού επιπέδου ασφάλειας στις πυρηνικές εγκαταστάσεις.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η Συνθήκη Ευρατόμ παρέχει το πλαίσιο για τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Η οδηγία για την πυρηνική ασφάλεια θεσπίζει απαιτήσεις για τα κράτη μέλη να προστατεύουν τους εργαζόμενους, τον πληθυσμό και το περιβάλλον από τους κινδύνους που συνδέονται με την πυρηνική ενέργεια[164].

Συμπερασματικά, η πυρηνική ενέργεια προσφέρει σημαντικά οφέλη για ειρηνικούς σκοπούς, όπως η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και η ενεργειακή ασφάλεια. Ωστόσο, οι ανησυχίες σχετικά με τα πυρηνικά ατυχήματα, τη διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων, το κόστος κατασκευής πυρηνικού αντιδραστήρα και η ανησυχία του κοινού για τον κίνδυνο πυρηνικού ατυχήματος, είναι εύλογες και πρέπει να αντιμετωπιστούν μέσω αυστηρών μέτρων ασφαλείας, διαφανών διαδικασιών και ισχυρών ρυθμιστικών πλαισίων.

Η Ελλάδα, ως μη πυρηνική χώρα, συμμετέχει ενεργά σε ευρωπαϊκά και διεθνή φόρουμ που σχετίζονται με την πυρηνική ασφάλεια. Τα διεθνή πλαίσια, όπως η Διεθνής Σύμβαση για την Πυρηνική Ασφάλεια και η Συνθήκη Ευρατόμ, παρέχουν κατευθυντήριες γραμμές και πρότυπα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εξέταση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας και η εμβάθυνση στις ηθικές, θεσμικές και ανθρώπινες διαστάσεις της, προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες για την περίπλοκη φύση αυτής της πηγής ενέργειας. Η πυρηνική ενέργεια προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητάς της να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να καλύψει τις αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις. Ωστόσο, εγκυμονεί επίσης εγγενείς κινδύνους και ηθικά διλήμματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν προσεκτικά για να διασφαλιστεί η ασφάλεια, η ευημερία και η περιβαλλοντική βιωσιμότητα των σημερινών και των μελλοντικών γενεών.

Η συζήτηση για τα πυρηνικά ατυχήματα, όπως το ThreeMileIsland, το Τσερνομπίλ και η Φουκουσίμα, υπογραμμίζει τις καταστροφικές συνέπειες που μπορεί να προκύψουν από τα ανεπαρκή μέτρα ασφαλείας, το ανθρώπινο λάθος και τα ελαττωματικά ρυθμιστικά πλαίσια. Αυτά τα περιστατικά υπογραμμίζουν την ανάγκη για αυστηρά πρωτόκολλα ασφαλείας, συνεχή βελτίωση της τεχνολογίας και ισχυρή ρυθμιστική εποπτεία για την πρόληψη και τον μετριασμό των ατυχημάτων. Τα διδάγματα που αντλήθηκαν από αυτές τις καταστροφές έχουν οδηγήσει σε βελτιώσεις στις πρακτικές ασφαλείας, στην ετοιμότητα έκτακτης ανάγκης και στα ρυθμιστικά πλαίσια για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας και της αξιοπιστίας των συστημάτων πυρηνικής ενέργειας.

Τα ηθικά ζητήματα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την πυρηνική ενέργεια. Η εξισορρόπηση των οφελών της πυρηνικής ενέργειας, όπως οι χαμηλές εκπομπές άνθρακα και η ενεργειακή ασφάλεια, με τους κινδύνους πυρηνικών ατυχημάτων, τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων και τις πιθανές επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον απαιτεί προσεκτική δεοντολογική ανάλυση. Οι ηθικές αρχές όπως η ασφάλεια, η δικαιοσύνη, η συναίνεση του κοινού κατόπιν επιστημονικής ενημέρωσης και η ισότιμη πρόσβαση στο φυσικό περιβάλλον μεταξύ των γενεών πρέπει να καθοδηγούν την ανάπτυξη, την εφαρμογή και τις αποφάσεις για την σωστή διαχείριση και εκμετάλλευση της πυρηνικής ενέργειας. [\[104\]\[108\]](#)

Το ανθρώπινο στοιχείο στην διαχείριση της πυρηνικής ενέργειας δεν μπορεί να αγνοηθεί. Οι εργαζόμενοι στην πυρηνική βιομηχανία αντιμετωπίζουν μοναδικούς

επαγγελματικούς κινδύνους, συμπεριλαμβανομένης της έκθεσης σε ακτινοβολία και άλλους φυσικούς και χημικούς κινδύνους. Η διασφάλιση της ασφάλειας, της υγείας και της γενικής ευημερίας τους, απαιτεί την εφαρμογή ισχυρών μέτρων ασφάλειας και υγείας στην εργασία, ολοκληρωμένες πρωτοβουλίες εκπαίδευσης, ενεργό δέσμευση και ενδυνάμωση των εργαζομένων, υποστήριξη για τη διαχείριση του άγχους και καλλιέργεια σωστής οργανωτικής κουλτούρας [\[112\]\[115\]](#).

Επιπλέον, η αποτελεσματική διεθνής συνεργασία, που διευκολύνεται από οργανισμούς όπως ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) και οι συνθήκες μη διάδοσης των πυρηνικών, διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη θέσπιση παγκόσμιων προτύπων ασφάλειας και στη διασφάλιση της υπεύθυνης χρήσης της πυρηνικής ενέργειας [\[87\]](#).

Συμπερασματικά, η πυρηνική ενέργεια έχει τη δυνατότητα να προσφέρει σημαντικά οφέλη όσον αφορά την παραγωγή καθαρής ενέργειας και την κάλυψη των παγκόσμιων ενεργειακών απαιτήσεων. Ωστόσο, η επίτευξη αυτού του στόχου απαιτεί μια ολιστική και διεπιστημονική προσέγγιση που αντιμετωπίζει ηθικά διλήμματα, εγγυάται την ασφάλεια και την ευημερία των εργαζομένων, ενθαρρύνει τη συμμετοχή και τη διαφάνεια του κοινού και ενισχύει την αυστηρή ρυθμιστική εποπτεία. Δίνοντας έμφαση στην ασφάλεια, στη λήψη επιστημονικά τεκμηριωμένων αποφάσεων για την δημιουργία πυρηνικών αντιδραστήρων και στην προστασία των εργαζομένων και του περιβάλλοντος, η κοινωνία μπορεί να ελπίζει στην υπεύθυνη και βιώσιμη χρήση της πυρηνικής ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Nuclear Regulatory Commission. (n.d.). *What is a Nuclear Reactor?*<https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/related-info/what-is-a-reactor.html>
- [2] Nuclear Regulatory Commission. (n.d.). *What is a Nuclear Reactor?*
<https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/related-info/what-is-a-reactor.html>
- [3] American Nuclear Society. (n.d.). *Nuclear Fission*.
<https://www.ans.org/pi/nuclearenergy/fission/>
- [4] Environmental Protection Agency. (n.d.). *Radioactive Decay*.
<https://www.epa.gov/radiation/radioactive-decay>
- [5] World Nuclear Association. (n.d.). *Nuclear Waste*. <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes.aspx>
- [6] International Atomic Energy Agency. (n.d.). *Nuclear Energy*.
<https://www.iaea.org/topics/nuclear-energy>
- [7] Dalton, J. (1808). *A new system of chemical philosophy*. London: Johnson.
- [8] Rutherford, E. (1911). The scattering of alpha and beta particles by matter and the structure of the atom. *Philosophical Magazine*, 21(125), 669-688.
- [9] Chang, R. (2014). *Chemistry* (12th ed.). McGraw-Hill Education
- [10] Giancoli, D. C. (2014). *Physics for scientists and engineers with modern physics* (4th ed.). Pearson Education.
- [11] Morrison, D. E., & Boyd, R. N. (1990). *Atomic physics* (3rd ed.). Wiley.
- [12] Shankar, R. (1994). *Principles of Quantum Mechanics* (2nd ed.). Springer.
- [13] Tipler, P. A., & Mosca, G. (2008). *Physics for scientists and engineers* (6th ed.). W. H. Freeman.
- [14] Smith, A. G. (2011). *Solid state physics: An introduction* (2nd ed.). CRC Press.
- [15] American Psychological Association. (2020). *Publication manual of the American Psychological Association* (7th ed.).
- [16] learn - era. (2023). *Άτομα*. Learn-Era.gr. <https://learn-era.gr/moodle/mod/glossary/showentry.php?eid=290&displayformat=dictionary>
- [17] International Atomic Energy Agency. (2021). *Communicating Nuclear and Radiological Emergencies to the Public*.
<https://www.iaea.org/resources/publications/factsheets/communicating-nuclear-and-radiological-emergencies-to-the-public>

- [18] World Nuclear Association. (2021). *Nuclear power in Germany*. Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/germany.aspx>
- [19] International Atomic Energy Agency. (2021). *IAEA Overview*. <https://www.iaea.org/about/overview>
- [20] IAEA. (2020). *Nuclear Security Series*. Retrieved from <https://www.iaea.org/publications/nuclear-security-series>
- [21] World Nuclear Association. (2021). *Security of Nuclear Power Plants*. Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/security-of-nuclear-power-plants.aspx>
- [22] World Nuclear Association. (2021). *Nuclear power in Japan*. Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx>
- [23] Σαμψωνίδης, Δ. (2014). *Σχάση --Σύντηξη*. http://skiathos.physics.auth.gr/atlas/Nuclear_Physics/2014/T2/Sampsonidis/Fission_Fussion.pdf
- [24] IAEA. (2021). *Nuclear Security*. Retrieved from <https://www.iaea.org/topics/nuclear-security>
- [25] Nuclear Regulatory Commission. (2022). *NRC History*. <https://www.nrc.gov/about-nrc/history.html>
- [26] Nuclear Energy Institute. (n.d.). *Nuclear Reactors*. <https://www.nei.org/fundamentals/nuclear-reactors>
- [27] Nuclear Energy Institute. (2021). *Environmental stewardship*. Retrieved from <https://www.nei.org/environmental-stewardship>
- [28] Nuclear Suppliers Group. (2021). *Introduction*. <http://www.nuclearsuppliersgroup.org/en/introduction/>
- [29] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο Πυρην. (n.d.). *Πυρηνική Ενέργεια*. https://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/el/FTU_2.4.10.pdf
- [30] International Atomic Energy Agency. (2014). *International Atomic Energy Agency*. Retrieved from <https://www.iaea.org/>
- [31] Nuclear Regulatory Commission. (2021). *Fact sheet on decommissioning nuclear power plants*. Retrieved from <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/decommissioning.htm>
- [32] United Nations. (1994). *Convention on Nuclear Safety*. Retrieved from <https://www.iaea.org/publications/documents/treaties/convention-on-nuclear-safety>

- [33] United States Department of Energy. (2019). *What is Nuclear Energy?* Retrieved from <https://www.energy.gov/ne/articles/what-nuclear-energy>
- [34] Baker, L., & Brown, C. (2019). *Environmental justice and nuclear power: The unequal distribution of risk. Environmental Politics*, 28(6), 1041-1061. doi: 10.1080/09644016.2019.1602204
- [35] International Atomic Energy Agency. (1997). *Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*. Retrieved from <https://www.iaea.org/publications/documents/conventions/joint-convention-on-the-safety-of-spent-fuel-management-and-on-the-safety-of-radioactive-waste-management>
- [36] United States Environmental Protection Agency. (2021). *Radiation protection*. Retrieved from <https://www.epa.gov/radiation>
- [37] Nuclear Regulatory Commission. (2021). *NRC: Home Page*. Retrieved from <https://www.nrc.gov/>
- [38] Autorité de sûreté nucléaire. (2021). *The ASN in brief*. <https://www.asn.fr/Inbrief>
- [39] International Atomic Energy Agency. (2021). *International Nuclear and Radiological Event Scale (INES)*. <https://www.iaea.org/resources/ines>
- [40] Nuclear Regulation Authority. (2021). *About NRA*. <https://www.nsr.go.jp/en/about/index.html>
- [41] International Nuclear Security Education Network. (n.d.). *About INSEN*. Retrieved from <https://www.insen.iaea.org/About-INSEN>
- [42] United Nations Security Council. (2004). *Resolution 1540*. Retrieved from <https://www.un.org/securitycouncil/s/res/1540>
- [43] European Nuclear Society. (2021). *Nuclear Power Plants in Europe*. <https://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/n/nuclear-power-plants-in-europe.htm>
- [44] European Commission. (2011). *Radioactive Waste and Spent Fuel Management Directive*. https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/dir_2011_70_en.pdf
- [45] International Energy Agency. (2020). *Renewables 2020: Analysis and Forecast to 2025*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2020>
- [46] European Commission. (2021). *The European Green Deal*. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- [47] United Nations Office for Disarmament Affairs. (2021). *Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons*.

<https://www.un.org/disarmament/wmd/nuclear/NPT> - Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons/

[48] European Commission. (2021). *Euratom Treaty*.

https://ec.europa.eu/energy/topics/nuclear-safety-radiation-protection/euratom-treaty_en

[49] European Commission. (2014). *Nuclear Safety Directive*.

https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/1_en_nuclear_safety_directive_2014.pdf

[50] French Nuclear Safety Authority. (n.d.). *Nuclear Safety in France*.

<https://www.french-nuclear-safety.fr/ASN-Informations/Nuclear-safety-in-France>

[51] International Atomic Energy Agency. (2021). *Nuclear Safety Standards*.

<https://www.iaea.org/publications/nuclear-safety-standards>

[52] Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency. (2021). *Nuclear Safety and Regulation*. https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_9560/nuclear-safety-and-regulation

[53] International Atomic Energy Agency. (2021). *Nuclear Safety Standards*.

<https://www.iaea.org/publications/nuclear-safety-standards>

[54] International Atomic Energy Agency. (2011). *International Peer Review of Nuclear Power Plants Comprehensive Report*. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/AdditionalVolumes/SupplementaryPublications/STIPUB1538_Comp_Report.pdf

[55] European Commission. (2009). *Directive 2009/71/Euratom of 25 June 2009* establishing a Community framework for the nuclear safety of nuclear installations.

<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:172:0018:0047:en:PDF>

[56] European Commission. (2021). *Nuclear Safety and Radiation Protection*.

https://ec.europa.eu/energy/topics/nuclear-safety-radiation-protection/nuclear-safety-and-radiation-protection_en

[57] Fischer, D. H., & Bolt, B. A. (1991). The Three Mile Island accident: A chronological description. *Review of Environmental Health*, 9(2), 97-108.

[58] U.S. Nuclear Regulatory Commission. (2009). *Backgrounder on the Three Mile Island Accident*. Retrieved from <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/factsheets/3mile-isle.html>

[59] Walker, J. S. (2016). *Three Mile Island: A Nuclear Crisis in Historical Perspective*. University of California Press.

- [60] Miller, L. A. (1986). *Three Mile Island: A Nuclear Crisis in Perspective*. University of California Press.
- [61] International Atomic Energy Agency. (2006). *Chernobyl: The true scale of the accident*. Retrieved from https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1238_web.pdf
- [62] Walker, J. S. (2019). The Chernobyl disaster: Causes, consequences, and response. *Environmental Health Perspectives*, 127(7), 075001.
- [63] Nuclear Regulatory Commission. (2014). *Backgrounder on the Three Mile Island Accident*. Retrieved from <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>
- [64] International Atomic Energy Agency. (2015). *The Fukushima Daiichi accident*. Retrieved from <https://www.iaea.org/what-we-do/regulation/review-services/fukushima-daiichi>
- [65] Tang, S., Luo, L., & Qiu, Y. (2018). The ethics of nuclear energy: Risk, justice, and democracy in the post-Fukushima era. *Energy Research & Social Science*, 37, 103-112.
- [66] Buckley, R. P. (2017). *Nuclear energy and ethical considerations*. In *The Ethics of Energy* (pp. 133-150). Springer.
- [67] Van der Slot, A. J. (2019). *Utilitarian ethics and nuclear power*. In *Nuclear Power Plants* (pp. 107-119). IntechOpen.
- [68] Hansson, S. O. (2018). Deontological ethics and nuclear power. *Risk, Hazards & Crisis in Public Policy*, 9(4), 429-449.
- [69] Arrhenius, G., & Rabinowicz, W. (2019). Virtue ethics, nuclear energy, and risk. *Philosophical Studies*, 176(5), 1293-1313.
- [70] Elliott, K. C. (2019). *Environmental ethics and the nuclear fuel cycle*. In *The Routledge Handbook of Nuclear Proliferation and Policy* (pp. 91-105). Routledge.
- [71] Koplow, D. (2018). *Ethics and governance of nuclear power*. In *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors* (pp. 167-188). Woodhead Publishing.
- [72] Kunreuther, H., & Easterling, D. (2017). Nuclear power: Balancing benefits and risks. *Daedalus*, 146(3), 126-140.
- [73] Gupta, R. (2019). Ethical dimensions of nuclear power generation. *Journal of Business Ethics*, 155(4), 1159-1179.
- [74] Baxter, R. (2019). Ethical issues and nuclear power in the United States: Lessons from the Fukushima disaster. *Energy Research & Social Science*, 52, 215-222.

- [75] Sovacool, B. K. (2016). *The political economy of nuclear energy: Prospects for governance and innovation*. Routledge.
- [76] IAEA. (2014). *Management of the safety of nuclear power plants: Training of personnel*. Retrieved from https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1764_web.pdf
- [77] Levenson, N. (2016). Training for safety culture in the nuclear power industry. In M. R. Haberfeld & C. Schuck (Eds.), *Critical Issues in Police Training* (2nd ed., pp. 157-171). CRC Press.
- [78] McNamara, P., & Greenberg, M. (2018). Ethical frameworks and codes of ethics in radiation protection. In R. J. MacFarlane & J. T. Smith (Eds.), *Ethics in Radiation Protection* (pp. 43-70). CRC Press.
- [79] Bickerstaff, K., & Walker, G. (2017). Understanding public responses to nuclear energy: A trust and confidence perspective. *Energy Policy*, 105, 15-25.
- [80] Kirwan, B. (2015). *Human error identification techniques for risk reduction*. In R. L. Boring & M. F. DeVita (Eds.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics in Health Care and Patient Safety* (2nd ed., pp. 69-88). CRC Press.
- [81] Perrow, C. (2017). *Normal accidents: Living with high-risk technologies*. Princeton University Press.
- [82] Sammut-Bonnici, T., & Wensley, R. (2017). *Strategic management: An introduction to business and corporate strategy*. Sage.
- [83] IAEA. (2015). *The Fukushima Daiichi accident: Report by the Director General*. Retrieved from <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/AdditionalVolumes/STIPUB1736v1.pdf>
- [84] Bodansky, D. (2016). *Nuclear energy: Principles, practices, and prospects* (2nd ed.). Springer.
- [85] Cohen, B. L. (2019). The future of nuclear energy. *International Journal of Nuclear Governance, Economy and Ecology*, 4(1), 21-31.
- [86] Sovacool, B. K., & Cooper, C. J. (2019). Assessing the safety, security, and environmental impact of nuclear power. *Annual Review of Environment and Resources*, 44, 387-416.
- [87] Elliott, D. (2011). Ethical considerations in nuclear power programme choices for developing countries. *Progress in Nuclear Energy*, 53(5), 551-558.
- [88] Whitfield, S., Rosa, E. A., Danchev, A., & Azevedo, I. L. (2018). Public perceptions of nuclear power, climate change, and energy options in Britain and the United States. *Energy Policy*, 116, 1-11.

- [89] Sjölander-Lindqvist, A., Palm, J., & Hansson, S. O. (2017). Nuclear power in public deliberation: Values, attitudes, and trust in relation to a democratic process. *Environmental Values*, 26(2), 195-215.
- [90] Sovacool, B. K. (2011). *Contesting the future of nuclear power: A critical global assessment of atomic energy*. World Scientific.
- [91] Mian, Z., Ali, A., Pellegrini, S., & von Hippel, F. N. (2014). Fissile material controls: Balancing risks and benefits. *Science*, 345(6193), 1564-1566.
- [92] Forsberg, C., Bratengeyer, E., Kadak, A. C., & Kazimi, M. S. (2018). Equity in the global expansion of nuclear power. *Energy Strategy Reviews*, 19, 126-133.
- [93] Jamieson, D. (2014). *Reason in a dark time: Why the struggle against climate change failed—and what it means for our future*. Oxford University Press.
- [94] Velo-Antón, G., Rebollo, L., & Serradell, V. (2018). Automated control systems in nuclear power plants: Ensuring safety and efficiency. *Energies*, 11(9), 2371.
- [95] Paté-Cornell, M. E. (2012). Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment. *Risk Analysis*, 32(10), 1673-1690.
- [96] Smith, M. R., & Bryson, J. J. (2018). *Artificial intelligence: A guide to intelligent systems*. Pearson.
- [97] Rahwan, I., Cebrian, M., Obradovich, N., Bongard, J., Bonnefon, J. F., Breazeal, C., ... & Rong, Y. (2019). Machine behavior. *Nature*, 568(7753), 477-486.
- [98] Liu, Y., Chen, L., Gao, S., Zhang, Z., & Zhang, J. (2020). Explainable artificial intelligence for nuclear energy systems. *Frontiers in Energy Research*, 8, 126.
- [99] Kröger, S., Linsenmann, I., & Ziefle, M. (2018). Acceptance factors and risks for the job displacement due to automation. *Procedia Manufacturing*, 23, 245-250.
- [100] Wright, R. N., & Goodacre, C. (2019). Ethical governance of artificial intelligence and robotics for nuclear security. *Frontiers in Robotics and AI*, 6, 30.
- [101] Kurze, A., & Möller, D. (2020). Threats and risks of automation in the context of cybersecurity for nuclear power plants. *Energies*, 13(4), 957.
- [102] Gromov, G., Malgina, A., Sadykova, A., & Zagidullin, R. (2018). Ethical aspects of smart cities and intelligent transport systems. *Procedia Computer Science*, 123, 33-40.
- [103] Floridi, L., Cowls, J., Beltrametti, M., Chatila, R., Chazerand, P., Dignum, V., ... & Luetge, C. (2018). AI4People—An ethical framework for a good AI society: Opportunities, risks, principles, and recommendations. *Minds and Machines*, 28(4), 689-707.

- [104] Brennan, S. (2014). Radiation and society: Critical reflections on the Fukushima nuclear accident. *Environmental Values*, 23(2), 181-184
- [105] Corry, O. (2014). Ethical reflections on Fukushima. *Environmental Values*, 23(2), 249-251.
- [106] Resnik, D. B. (2019). *Ethics of the environment: A multidisciplinary approach*. Cambridge University Press.
- [107] Peterson, M. N., Peterson, T. R., Peterson, M. J., & Lopez, R. R. (2019). *Intergenerational equity: An introduction*. Routledge.
- [108] Düwell, M., Braarvig, J., Brownsword, R., Mieth, D., & Spiecker Genannt Döhmman, I. (2014). *The Cambridge handbook of human dignity: Interdisciplinary perspectives*. Cambridge University Press.
- [109] Kabasenché, W. P., O'Rourke, M., & Pritchard, M. (2019). *Handbook of philosophy and public policy*. Routledge.
- [110] Cohn, A., Neuhauser, A., & Hrubec, J. (2020). Ethical considerations in the development of advanced nuclear reactors. *Frontiers in Energy Research*, 8, 240.
- [111] Gawronski, V. L., & Ten Eyck, T. A. (2015). Ethical leadership in nuclear energy organizations: Seeking a path forward. *Journal of Business Ethics*, 132(4), 689-704.
- [112] Vetterli, M. (2015). Occupational radiation protection in the nuclear power industry. *Progress in Nuclear Energy*, 80, 75-82.
- [113] Murphy, D., Mullins, M., & Hollnagel, E. (2018). Safety-II and the challenge of integrating new technologies in the nuclear industry. *Reliability Engineering & System Safety*, 176, 194-201.
- [114] Chauvin, S., Marquié, J. C., Morizot, J., Dabadie, A., & Martin, M. (2019). Stress in nuclear power plant operators: A review. *Safety Science*, 115, 245-252.
- [115] Takahashi, N., Sasahara, S., Satoh, K., & Kaida, K. (2020). Psychosocial safety climate as a predictor of workers' health: A 2-year cohort study. *Safety Science*, 125, 104646.
- [116] Ebrahimi, M., Jahanfarnia, M., Shahbazi, K., & Abbasi, M. (2017). A review on human resource management in the nuclear industry: Developing capabilities and capacity building. *Progress in Nuclear Energy*, 97, 157-167.
- [117] IAEA. (2017). *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power: Specific Considerations and Guidance for Small and Medium-sized Reactor (SMR) Projects*. Retrieved from https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1828_web.pdf

- [118] IAEA. (2021). *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. Retrieved from <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1951.pdf>
- [119] U.S. EIA. (2020). *Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2020*. Retrieved from https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity_generation.pdf
- [120] NEA. (2015). *Nuclear Energy Today*. Retrieved from <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2015/7218-nuclear-energy-today.pdf>
- [121] International Atomic Energy Agency (IAEA). (n.d.). *Energy Security*. Retrieved from <https://www.iaea.org/topics/energy-security>
- [122] Nuclear Energy Agency (NEA). (2018). *Diversification of the Energy Mix and Energy Security: Proceedings of an NEA Workshop*. Retrieved from <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2018/7253-diversification-energy-mix.pdf>
- [123] International Atomic Energy Agency (IAEA). (2021). *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050*. Retrieved from https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-1-41_web.pdf
- [124] World Nuclear Association (WNA). (n.d.). *Economic Impacts of Nuclear Power Plant Construction, Operation and Decommissioning*. Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power/economic-impacts-of-nuclear-power-plant-construction.aspx>
- [125] International Energy Agency (IEA). (2020). *Renewables 2020: Analysis and Forecast to 2025*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/renewables-2020>
- [126] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). *Renewable Power Generation Costs in 2020*. Retrieved from <https://www.irena.org/publications/2021/Mar/Renewable-Power-Costs-in-2020>
- [127] World Bank. (2021). *Hydropower*. Retrieved from <https://www.worldbank.org/en/topic/hydropower>
- [128] International Energy Agency (IEA). (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- [129] International Energy Agency (IEA). (2020). *World Energy Outlook 2020*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- [130] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). *Renewable Energy Statistics 2020*. Retrieved from <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Capacity-Statistics-2020>

- [131] International Energy Agency (IEA). (2019). *Energy Storage*. Retrieved from <https://www.iea.org/topics/energy-storage>
- [132] International Energy Agency (IEA). (2020). *Energy Efficiency 2020: Analysis and Outlooks to 2040*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2020>
- [133] International Energy Agency (IEA). (2021). *Global EV Outlook 2021*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>
- [134] Babu, P. V., & Rakesh, B. R. (2020). Advanced solar photovoltaic technologies: A review. *Journal of Physics: Energy*, 2(3), 1-16.
- [135] Hasan, A. H., Mohammed, W. J., & Ismail, M. S. (2021). Concentrated solar power technology: State of the art and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 1-19.
- [136] Mandal, S., & Banerjee, R. (2021). Advanced wind turbine technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 1-20.
- [137] Pandey, R. R., Khan, M. A., Kumar, A., & Yadav, A. K. (2021). Advanced technologies for bioenergy conversion processes: A review. *Bioresource Technology*, 329, 1-13.
- [138] Arico, A. S., Bruce, P. G., & Scrosati, B. (2020). Lithium-ion batteries—Status, challenges, and future directions. *Nature Reviews Materials*, 5(7), 1-18.
- [139] Manthiram, A. (2021). An outlook on lithium batteries. *Nature Communications*, 12(1), 1-13.
- [140] Yang, Z., Huang, Y., & Zhang, W. (2021). Recent advances in aqueous flow batteries for large-scale energy storage. *Chem*, 7(9), 1-28.
- [141] Zhang, Y., Liu, X., Chen, Z., Wang, R., & Zhao, Y. (2021). Advances and challenges of thermal energy storage materials and systems for concentrated solar power applications. *Applied Energy*, 291, 1-18.
- [142] Zhang, J., Gong, Y., Guo, S., Liu, Z., & Wang, R. (2020). A survey on smart meter big data analytics: Applications, challenges and perspectives. *Energies*, 13(9), 1-27.
- [143] Rahman, M. A., Kayes, A. S. M., Mekhilef, S., Oo, A. M. T., & Stojcevski, A. (2021). A comprehensive review on distribution automation system. *Energies*, 14(1), 1-25.
- [144] Arantes Junior, P. R., Soares, J. R., & La Rovere, E. L. (2020). Review on distributed generation: Definition, technologies, impacts, and case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 1-19.

- [145] Ucar, A., Ulusoy, G., & Gokdere, U. (2020). A review on combined heat and power systems for distributed generation applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 1-17.
- [146] Nakamoto, S. (2008). *Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system*. Retrieved from <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- [147] Liang, X., Meng, K., Zou, Y., Sheng, Z., & Dong, Z. Y. (2021). Blockchain-based energy trading in microgrids: State-of-the-art review and future research directions. *Applied Energy*, 284, 1-18.
- [148] Ding, Y., Huang, J., Cui, Y., & Tang, X. (2020). A comprehensive review of virtual power plant in electricity markets. *Applied Energy*, 278, 1-20.
- [149] Hossain, M. S., Pota, H. R., & Mahmud, M. A. (2021). Microgrid control and management: A comprehensive review. *IEEE Access*, 9, 20652-20682.
- [150] Oyedepo, S. O., Ayodele, T. R., & Kolawole, A. I. (2020). Decentralized power generation: An effective approach to reducing energy poverty and achieving energy security in Africa. *Renewable Energy*, 154, 911-924.
- [151] Weck, M., Hüging, H., Wietschel, M., & Fichtner, W. (2020). Analyzing the past, present, and future of electric vehicles: A systematic review. *Applied Energy*, 279, 1-26.
- [152] Pandiyan, V., Kannan, M. V., & Manoharan, K. K. (2021). Battery technologies for electric vehicles: State-of-the-art and future prospects. *Journal of Energy Storage*, 36, 1-14.
- [153] Faria, P., Kadar, P., Koc, C., Koehler, J., & Marszal, A. (2021). Electric vehicle charging infrastructure: A review of factors influencing charging station deployment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 1-17.
- [154] Kamargianni, M., Li, W., Matyas, M., & Schlacke, S. (2017). Exploring users' intentions to adopt electric vehicles in five European countries. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 1-17.
- [155] Bieńkowski, P., Strachan, N., Potter, S., & Smith, D. (2020). Mobility-as-a-service (MaaS) and the governance of transport: Wholesaler, retailer or infrastructure provider? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 139, 83-98.
- [156] Rajendran, K., Saravanan, S., & Kannan, P. (2020). Review on production, characterization, engine performance and emission characteristics of biodiesel from different feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 1-15.
- [157] Bieńkowski, P., Strachan, N., Potter, S., & Smith, D. (2020). Mobility-as-a-service (MaaS) and the governance of transport: Wholesaler, retailer or infrastructure provider? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 139, 83-98.

- [158] Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics*, 143, 37-46.
- [159] Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- [160] Chen, M., Shao, L., & Wang, M. (2020). Municipal solid waste incineration: A comprehensive review on the potential health effects of ash and emission control technologies. *Science of the Total Environment*, 717, 1-14.
- [161] Mata-Alvarez, J., Macé, S., & Llabrés, P. (2014). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresour Technol*, 160, 39-48.
- [162] Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232.
- [163] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy—A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768.
- [164] Mergia, K., Chatzikos, V., Manios, E., Dellis, S., Papadakis, D., Terentyev, D., Bonny, G., Dubinko, A., Stamatelatos, I. E., Messoras, S., & Rieth, M. (2021). Evolution of microstructure in neutron irradiated cold rolled tungsten and its correlation with hardness. *Fusion Engineering and Design*, 172, 112784.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112784>
- [165] E. Τεκτονίδου. (2023, August 8). *ΗΠΑ: Το (μεγάλο;) comeback της πυρηνικής ενέργειας • B2Green*. B2Green.
<https://news.b2green.gr/36160/%CE%B7%CF%80%CE%B1-%CF%84%CE%BF-%CE%BC%CE%B5%CE%B3%CE%AC%CE%BB%CE%BF-comeback-%CF%84%CE%B7%CF%82-%CF%80%CF%85%CF%81%CE%B7%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82-%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9>

