



# Βασικά Χαρακτηριστικά και Εφαρμογές Προτεινόμενων Μικρών Αρθρωτών Αντιδραστήρων

Τομέας: Πυρηνικής Ενέργειας

Επιβλέπων: Μητράκος Δημήτριος Επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2024



Basic Characteristics and Applications of Recommended Small  
Modular Reactors

# Thesis

**Papadimitriou Taxiarchis**

Nuclear Energy

Supervisor: Mitrakos Dimitris

Athens, February 2024

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Παπαδημητρίου Ταξιάρχης

## **Περιεχόμενα**

1	Σύνοψη	7
1.1	Περίληψη .....	7
1.2	Abstract .....	9
2	Εισαγωγή	11
1.1	Ιστορικό και κίνητρο για τη μελέτη .....	11
1.2	Στόχοι και ερωτήματα της έρευνας .....	12
1.3	Δομής της εργασίας .....	13
3	Βασικά χαρακτηριστικά και τεχνολογία SMR	14
3.1	Επισκόπηση μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR) .....	15
	Μέγεθος .....	15
	Αρθρωτός σχεδιασμός .....	16
	Ευελιξία .....	17
	Παθητική ασφάλεια .....	18
	Πυρηνικά απόβλητα .....	19
	Ασφάλεια (security) και διασφάλιση πυρηνικών υλικών (safeguards) .....	20
	Δυνατότητα συμπαραγωγής .....	20
	Μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις .....	21
3.2	Τύποι SMR .....	22
3.2.1	Αντιδραστήρες υπό πίεση νερού (PWR) .....	22
3.2.2	Αντιδραστήρες βραστού νερού (BWR) .....	25
3.2.3	Αερόψυκτοι αντιδραστήρες υψηλής θερμοκρασίας (HTGR) .....	26
3.2.4	Αντιδραστήρες υγρών μετάλλων (LMFR) .....	28
3.2.5	Άλλοι τύποι αντιδραστήρων .....	30
3.3	Τεχνολογίες ασφαλείας των SMR .....	33
3.3.1	Φυσική προστασία στο πλαίσιο των SMR .....	33
3.3.2	Αρχείο ασφαλείας των SMR, συμπεριλαμβανομένων τυχόν ατυχημάτων ή περιστατικών που έχουν συμβεί .....	34
3.3.3	Ρυθμιστικό πλαίσιο των SMR, συμπεριλαμβανομένων των διεθνών, εθνικών και τοπικών κανονισμών .....	35
3.3.4	Διαφορές μεταξύ ρυθμιστικών απαιτήσεων για SMR και παραδοσιακούς πυρηνικούς αντιδραστήρες .....	36

4 . Εφαρμογές	39
4.1 Πιθανές εφαρμογές των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR) .....	39
4.1.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας .....	39
4.1.2 Τηλεθέρμανση .....	41
4.1.3 Αφαλάτωση και άλλες .....	44
4.2 Μελέτες περίπτωσης έργων SMR σε όλο τον κόσμο .....	47
4.3 Προοπτικές για SMR στην αγορά ενέργειας .....	52
5 . Οικονομικά Στοιχεία	56
5.1 Ανάλυση κόστους των SMR σε σύγκριση με πυρηνικούς σταθμούς και άλλες πηγές ενέργειας .....	56
5.1.1 Στοιχεία κόστους των SMR .....	56
5.1.2 Σύγκριση κόστους με πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής .....	59
5.1.3 Σύγκριση κόστους με άλλες πηγές ενέργειας .....	61
5.2 Επιλογές χρηματοδότησης για έργα SMR .....	63
5.3 Οικονομικοί και χρηματοοικονομικοί κίνδυνοι των SMR .....	66
5.4 Κυβερνητικές πολιτικές και κίνητρα για την ανάπτυξη SMR .....	68
6 . Περιβάλλον	71
6.1 Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων των SMR .....	71
6.1.1 Ο αντίκτυπος στην ποιότητα του αέρα .....	72
6.1.2 Επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού .....	73
6.1.3 Χρήση γης και επιπτώσεις στους οικοτόπους .....	75
6.1.4 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία .....	76
6.1.5 Αντίκτυπος στη διαχείριση απορριμμάτων .....	78
6.1.6 Συμπεράσματα .....	79
6.2 Σύγκριση των SMR με άλλες πηγές ενέργειας .....	80
6.2.1 Εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου .....	80
6.2.2 Διαχείριση απορριμμάτων .....	82
6.2.3 Λοιποί περιβαλλοντικοί παράγοντες .....	84
6.3 Κοινή αντίληψη και αποδοχή των SMR .....	86
7 . Συμπεράσματα	93
8 . Αναφορές - Βιβλιογραφία	96

## 1 Σύνοψη

### 1.1 Περίληψη

Η αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια και η επιτακτική ανάγκη αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής έχουν οδηγήσει στην εξερεύνηση καθαρότερων και πιο βιώσιμων πηγών ενέργειας. Οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική, η ηλιακή και η υδροηλεκτρική ενέργεια, έχουν σημειώσει σημαντική πρόοδο στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, για την κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών, είναι απαραίτητο ένα διαφοροποιημένο ενεργειακό μείγμα που περιλαμβάνει αξιόπιστες πηγές ενέργειας βασικού φορτίου με χαμηλές εκπομπές άνθρακα. Η πυρηνική ενέργεια είναι ένα αμφιλεγόμενο θέμα, με ανησυχίες γύρω από την ασφάλεια, τα πυρηνικά απόβλητα και τα πιθανά ατυχήματα που σχετίζονται με παραδοσιακούς πυρηνικούς σταθμούς μεγάλης κλίμακας.

Ως απάντηση σε αυτές τις ανησυχίες, οι Μικροί Αρθρωτοί Αντιδραστήρες (SMR) έχουν αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη και καινοτόμος λύση. Οι SMR είναι συμπαγείς, επεκτάσιμοι και ευέλικτοι πυρηνικοί αντιδραστήρες που προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους μεγαλύτερους ομολόγους τους. Αυτή η μελέτη διερευνά διεξοδικά τα πιθανά οφέλη και προκλήσεις που σχετίζονται με την ανάπτυξη και την εξάπλωση των SMR στον ενεργειακό τομέα.

Η μελέτη ξεκινά με την ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών και της τεχνολογίας των SMR. Οι SMR χαρακτηρίζονται από το μικρότερο μέγεθος, τον αρθρωτό σχεδιασμό, τους μηχανισμούς παθητικής ασφάλειας και τη δυνατότητα για συμπαραγωγή. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τους SMR κατάλληλους για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, της τηλεθέρμανσης και της αφαλάτωσης. Περιπτωσιολογικές μελέτες έργων SMR παγκοσμίως υπογραμμίζουν την ευελιξία και το αυξανόμενο ενδιαφέρον τους για την παγκόσμια αγορά ενέργειας. Επιπλέον, τα εγγενή χαρακτηριστικά ασφαλείας των SMR, όπως τα συστήματα παθητικής ψύξης, συμβάλλουν στο βελτιωμένο προφίλ ασφαλείας τους σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Η οικονομική ανάλυση των SMR αποκαλύπτει τις δυνατότητές τους για σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας, παρά το υψηλότερο αρχικό κόστος. Η μελέτη εξετάζει διάφορες επιλογές χρηματοδότησης και κυβερνητικά κίνητρα που μπορούν να ενισχύσουν περαιτέρω την οικονομική τους βιωσιμότητα. Η υποστήριξη των υπευθύνων χάραξης πολιτικής και τα ρυθμιστικά πλαίσια είναι καθοριστικής σημασίας για τη διευκόλυνση της ανάπτυξης και εξάπλωσης των SMR.

Μια κρίσιμη πτυχή αυτής της μελέτης είναι η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των SMR. Οι SMR έχουν σχεδόν μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα σε σύγκριση με τις πηγές ενέργειας που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, συμβάλλοντας στις παγκόσμιες προσπάθειες για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Επιπλέον, ορισμένα σχέδια SMR χρησιμοποιούν καύσιμο ουρανίου χαμηλού εμπλουτισμού (LEU), με αποτέλεσμα τη μειωμένη παραγωγή πυρηνικών αποβλήτων. Η δυνατότητα ανακύκλωσης καυσίμων ελαχιστοποιεί περαιτέρω την ανάγκη για διάθεση πυρηνικών αποβλήτων.

Η αντίληψη και η αποδοχή του κοινού διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επιτυχή ανάπτυξη των SMR. Η διαφανής επικοινωνία, η συμμετοχή της κοινότητας και η συμμετοχή των ενδιαφερομένων είναι απαραίτητα για την οικοδόμηση της εμπιστοσύνης του κοινού και την αποτελεσματική αντιμετώπιση των ανησυχιών. Η διεθνής συνεργασία και η ανταλλαγή γνώσεων μπορούν να ενισχύσουν την κοινή κατανόηση των SMR, προωθώντας την αποδοχή και την ευρεία υιοθέτησή τους.

Η μελέτη καταλήγει επισημαίνοντας τις δυνατότητες των SMR να συμβάλλουν σε ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον. Προσφέροντας μια ευέλικτη επιλογή ενέργειας με χαμηλές εκπομπές άνθρακα, οι SMR μπορούν να συμπληρώσουν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να υποστηρίξουν τη μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μείγμα. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις, όπως η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σχετικά με τους κοινωνικούς και πολιτικούς παράγοντες που επηρεάζουν την εφαρμογή τους και η πρόσβαση σε ολοκληρωμένα δεδομένα σχετικά με τις οικονομικές και περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις.

Συμπερασματικά, οι μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες παρουσιάζουν μια πολλά υποσχόμενη λύση στις παγκόσμιες ενεργειακές προκλήσεις. Ο σχεδιασμός τους, τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας και οι μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους τοποθετούν ως πολύτιμους διεκδικητές στην παγκόσμια αναζήτηση για καθαρότερες και πιο βιώσιμες πηγές ενέργειας. Μέσω της συνεργασίας και των συντονισμένων προσπαθειών, ο κόσμος μπορεί να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητες των SMR για να επιταχύνει τη μετάβαση σε ένα ασφαλές ενεργειακό μέλλον με χαμηλές εκπομπές άνθρακα και βιώσιμο.



## 1.2 Abstract

---

The increasing global demand for electricity and the imperative to address climate change have driven the exploration of cleaner and more sustainable sources of energy. Renewable energy technologies, such as wind, solar, and hydropower, have made significant progress in reducing greenhouse gas emissions. However, to meet the growing energy needs, a diversified energy mix that includes reliable and low-carbon baseload power sources is essential. Nuclear power has been a contentious subject, with concerns surrounding safety, nuclear waste, and potential accidents associated with traditional large-scale nuclear power plants.

In response to these concerns, Small Modular Reactors (SMRs) have appeared as a promising and innovative solution. SMRs are compact, scalable, and flexible nuclear reactors that offer several advantages over their larger counterparts. This study comprehensively explores the potential benefits and challenges associated with the development and deployment of SMRs in the energy sector.

The study begins by analyzing the key features and technology of SMRs. SMRs are characterized by their smaller size, modular design, passive safety mechanisms, and potential for co-production. These features make SMRs suitable for a wide range of applications, including electricity production, district heating, and desalination. Case studies of SMR projects worldwide highlight their versatility and growing interest in the global energy market. Moreover, the inherent safety features of SMRs, such as passive cooling systems, contribute to their improved safety profile compared to traditional nuclear reactors.

The economic analysis of SMRs reveals their potential for cost-effectiveness, despite higher upfront costs. The study examines various financing options and government incentives that can further enhance their economic viability. Policymaker support and regulatory frameworks are instrumental in helping the development and deployment of SMRs.

A crucial aspect of this study is the environmental impact assessment of SMRs. SMRs have a lower carbon footprint compared to fossil fuel-based energy sources, contributing to global efforts to mitigate climate change. Additionally, some SMR designs use low-enriched uranium (LEU) fuel, resulting in reduced nuclear waste production. The potential for recycling fuel further minimizes the need for nuclear waste disposal.

Public perception and acceptance play a significant role in the successful deployment of SMRs. Transparent communication, community engagement, and stakeholder involvement are essential to build public trust and address concerns effectively.

International collaboration and knowledge sharing can foster a mutual understanding of SMRs, promoting their acceptance and widespread adoption.

The study concludes by highlighting the potential of SMRs to contribute to a sustainable energy future. By offering a versatile and low-carbon energy choice, SMRs can complement renewable energy sources and support the transition to a more sustainable energy mix. However, challenges are still, such as the need for further research on social and political factors influencing their implementation, and access to comprehensive data on their economic and environmental impacts.

In conclusion, Small Modular Reactors present a promising and transformative solution to global energy challenges. Their unique design, enhanced safety features, and reduced environmental impact position them as valuable contenders in the global quest for cleaner and more sustainable energy sources. Through collaboration and concerted efforts, the world can harness the full potential of SMRs to accelerate the transition to a secure, low-carbon, and sustainable energy future.

## 2 Εισαγωγή

### 2.1 Ιστορικό και κίνητρο για τη μελέτη

Η αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια και η ανάγκη για καθαρότερες και βιώσιμες πηγές ενέργειας καθιστά αναγκαία την αναζήτηση νέων πηγών ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πως η αιολική, η ηλιακή και η υδροηλεκτρική ενέργεια έχουν αποκτήσει δημοτικότητα, αλλά αυτές οι πηγές από μόνες τους μπορεί να μην επαρκούν για να καλύψουν την αυξανόμενη ζήτηση. Η χρήση της πυρηνικής τεχνολογίας ως πηγή ενέργειας αποτελεί εδώ και καιρό θέμα συζήτησης και διαμάχης, με ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια, τα πυρηνικά απόβλητα και την πιθανότητα ατυχημάτων (Bhuiyan 2022).

Ωστόσο, οι παραδοσιακοί πυρηνικοί σταθμοί συχνά θεωρούνται δαπανηροί και πολύπλοκοι στην κατασκευή και τη συντήρηση. Οι μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες (SMR) προσφέρουν μια πιθανή λύση σε αυτές τις προκλήσεις, καθώς έχουν σχεδιαστεί για να είναι μικρότεροι και πιο ευέλικτοι, γεγονός που θα μπορούσε να καταστήσει ευκολότερη και φθηνότερη την κατασκευή και τη λειτουργία τους. Επιπλέον, οι αντιδραστήρες SMR μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ευρύτερο φάσμα εφαρμογών από τους παραδοσιακούς πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, συμπεριλαμβανομένων απομακρυσμένων τοποθεσιών και μικρών δικτύων που μπορεί να μην έχουν την ικανότητα να υποστηρίξουν πυρηνικό εργοστάσιο μεγάλης κλίμακας (IAEA 2023).

Η έννοια των SMR δεν είναι νέα και η έρευνα σε αυτούς τους αντιδραστήρες συνεχίζεται εδώ και αρκετές δεκαετίες. Ωστόσο, το ενδιαφέρον για τους SMR έχει αυξηθεί πρόσφατα, με πολλές χώρες να επενδύουν σε έρευνα και ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα. Οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής ξεκίνησαν πρόσφατα μια πρωτοβουλία για να υποστηρίξουν την ανάπτυξη των αντιδραστήρων SMR, ενώ η Κίνα και η Ρωσία έχουν ήδη αρχίσει να αναπτύσσουν αυτούς τους αντιδραστήρες (WNA 2023).

Ένα επιπλέον κίνητρο για τη μελέτη των SMR αποτελεί η ασφάλεια. Πυρηνικά ατυχήματα όπως αυτά στο Τσέρνομπιλ και τη Φουκουσίμα έχουν εγείρει ερωτήματα σχετικά με την ασφάλεια των πυρηνικών σταθμών μεγάλης κλίμακας. Οι SMR προσφέρουν μια πιθανή λύση σε αυτή την πρόκληση, καθώς έχουν σχεδιαστεί για να είναι εγγενώς ασφαλέστεροι από τους παραδοσιακούς πυρηνικούς αντιδραστήρες. Για παράδειγμα, ορισμένα σχέδια SMR χρησιμοποιούν χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας που βασίζονται σε φυσικά φαινόμενα όπως η βαρύτητα ή η φυσική κυκλοφορία για την ψύξη του αντιδραστήρα σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας. Αυτά τα χαρακτηριστικά ασφαλείας καθιστούν τους SMR λιγότερο ευάλωτους σε ατυχήματα.

Εκτός από τις ανησυχίες για την ασφάλεια, υπάρχουν επίσης ανησυχίες για τα πυρηνικά απόβλητα. Οι παραδοσιακοί πυρηνικοί σταθμοί παράγουν μεγάλες ποσότητες ραδιενεργών αποβλήτων, τα οποία μπορούν να παραμείνουν επικίνδυνα για χιλιάδες χρόνια. Οι SMR προσφέρουν μια πιθανή λύση και σε αυτήν την πρόκληση, καθώς ορισμένα σχέδια SMR χρησιμοποιούν διαφορετικούς τύπους

καυσίμου από τους παραδοσιακούς πυρηνικούς αντιδραστήρες, τα οποία είναι δυνατό να παράγουν μικρότερες ποσότητες αποβλήτων. Για παράδειγμα, ορισμένοι SMR χρησιμοποιούν καύσιμο ουρανίου χαμηλού εμπλουτισμού (LEU), το οποίο παράγει λιγότερα απόβλητα από το ουράνιο υψηλού εμπλουτισμού (HEU) που χρησιμοποιείται στους παραδοσιακούς αντιδραστήρες. Ορισμένα σχέδια SMR χρησιμοποιούν επίσης καύσιμα που μπορούν να ανακυκλωθούν, γεγονός που θα μπορούσε να μειώσει την ποσότητα των πυρηνικών αποβλήτων που πρέπει να αποθηκευτούν ή να απορριφθούν.

Η χρήση SMR μπορεί να αυξήσει την ενεργειακή ασφάλεια μίας χώρας. Ορισμένες χώρες, ιδιαίτερα εκείνες που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις εισαγωγές ενέργειας, μπορεί να χρησιμοποιήσουν τους SMR ως έναν τρόπο για να αυξήσουν την ενεργειακή τους ασφάλεια. Οι SMR μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να είναι μεταφερόμενοι και αρθρωτοί, γεγονός που θα μπορούσε να τους κάνει χρήσιμους για την τροφοδοσία απομακρυσμένων κοινοτήτων ή και κρίσιμων υποδομών. Επιπλέον, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία μονάδων αφαλάτωσης, γεγονός που θα μπορούσε να βοηθήσει στην αντιμετώπιση της λειψυδρίας σε περιοχές που απειλούνται από την έλλειψη νερού, ένα ζήτημα ευθέως σχετιζόμενο με πολλές περιοχές της Ελλάδας, για παράδειγμα.

Υπάρχουν ακόμη πολλές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν στην ανάπτυξη και την εγκατάσταση των SMR. Επιπλέον όμως, τα κίνητρα για τη μελέτη των SMR περιλαμβάνουν σειρά παραγόντων, συμπεριλαμβανομένης της αυξανόμενης ζήτησης για καθαρές, αξιόπιστες και προσιτές πηγές ενέργειας, την αντιμετώπιση ανησυχιών για την ασφάλεια και τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο των παραδοσιακών πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, την εκπλήρωση ενεργειακών αναγκών σε απομακρυσμένες περιοχές ή χρήσεις σε ενεργοβόρους τομείς, όπως η αφαλάτωση, καθώς και η γενική δυνατότητα τους να παρέχουν αυξημένη ενεργειακή ασφάλεια.

## **2.2 Στόχοι και ερωτήματα της έρευνας**

Οι στόχοι αυτής της μελέτης περιλαμβάνουν τον εντοπισμό των βασικών παραγόντων για την ανάπτυξη και την εφαρμογή, την αξιολόγηση της τεχνικών και οικονομικών δυνατοτήτων, την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τον προσδιορισμό του ρυθμιστικού και πολιτικού πλαισίου που απαιτείται για την υποστήριξη της ανάπτυξης των SMR.

Για την επίτευξη αυτών των στόχων, η μελέτη επιδιώκει να απαντήσει στα παρακάτω ερωτήματα:

- Ποια είναι η τεχνική και οικονομική σκοπιμότητα των SMR;
- Ποιοι είναι οι βασικοί οδηγοί για την ανάπτυξη και την εξάπλωση των SMR;
- Ποιες είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των SMR;

- Ποιο είναι το ρυθμιστικό και πολιτικό πλαίσιο που απαιτείται για την υποστήριξη της ανάπτυξης SMR;

Εκτός από αυτά τα βασικά ερωτήματα, η μελέτη εξετάζει επίσης ζητήματα που σχετίζονται με την ανάπτυξη των SMR, όπως οι πιθανές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις στις τοπικές κοινότητες και ο ρόλος της διεθνούς συνεργασίας στην υποστήριξη της ανάπτυξης και εξάπλωσης των SMR.

Ο κύριος στόχος της εργασίας είναι να παράσχει μια πρώτη, γενική αξιολόγηση των πιθανών πλεονεκτημάτων και προκλήσεων που συνδέονται με την ανάπτυξη των SMR στον ενεργειακό τομέα.

## **2.3 Δομής της εργασίας**

---

Η εργασία συγκροτείται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 3, με τίτλο " Βασικά χαρακτηριστικά και τεχνολογία SMR", περιγράφονται οι τεχνολογίες SMR, συμπεριλαμβανομένης μιας επισκόπησης των διαφορετικών τύπων SMR και μια σύγκριση με συμβατικούς πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Το κεφάλαιο εξετάζει επίσης τις αρχές του σχεδιασμού και της λειτουργίας SMR, καθώς και τις πτυχές ασφάλειας των SMR.

Το Κεφάλαιο 4, με τίτλο "Εφαρμογές", εστιάζει στις πιθανές εφαρμογές των SMR, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, της τηλεθέρμανσης και της αφαλάτωσης. Το κεφάλαιο παρέχει επίσης περιπτωσιολογικές μελέτες έργων SMR από όλο τον κόσμο και διερευνά τις προοπτικές για SMR στην αγορά ενέργειας.

Το Κεφάλαιο 5, με τίτλο "Οικονομικά δεδομένα", εξετάζει το κόστος των SMR σε σύγκριση με πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και άλλες πηγές ενέργειας. Το κεφάλαιο εξετάζει επίσης επιλογές χρηματοδότησης για έργα SMR, οικονομικούς και χρηματοοικονομικούς κινδύνους, καθώς και κυβερνητικές πολιτικές και κίνητρα για την ανάπτυξη SMR.

Το Κεφάλαιο 6, με τίτλο "Περιβάλλον", διερευνά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των SMR, συμπεριλαμβανομένης μιας σύγκρισης με άλλες πηγές ενέργειας όσον αφορά τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, τη διάθεση αποβλήτων και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Το κεφάλαιο εξετάζει επίσης την κοινή κατανόηση και αποδοχή των SMR.

### 3 . Βασικά χαρακτηριστικά και τεχνολογία SMR

Οι μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες (SMR) έχουν κερδίσει αυξανόμενη προσοχή τα τελευταία χρόνια ως μια αναδυόμενη τεχνολογία για την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας (IAEA, 2019). Σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς πυρηνικούς αντιδραστήρες μεγάλης κλίμακας, οι SMR είναι σχεδιασμένοι να είναι μικρότεροι και πιο ευέλικτοι όσον αφορά τη θέση και την απόδοση ισχύος. Οι SMR έχουν συνήθως χωρητικότητα έως και 300 MW, η οποία είναι πολύ μικρότερη από την ικανότητα 1.000-1.600 MW των πυρηνικών αντιδραστήρων μεγάλης κλίμακας (Moros, 2013). Αυτό το μικρότερο μέγεθος προσφέρει πολλά πιθανά πλεονεκτήματα, όπως χαμηλότερο κόστος κατασκευής, μικρότερους χρόνους παράδοσης και αυξημένα χαρακτηριστικά ασφαλείας.

Οι SMR μπορούν επίσης να αναπτυχθούν σε ευρύτερο φάσμα ρυθμίσεων από τους πυρηνικούς αντιδραστήρες μεγάλης κλίμακας, καθιστώντας τους μια δυνητικά ελκυστική επιλογή για απομακρυσμένες ή απομονωμένες κοινότητες, καθώς και για χρήση σε βιομηχανικές διαδικασίες όπως η αφαλάτωση ή η παραγωγή υδρογόνου. Επιπλέον, οι SMR μπορεί να είναι πιο κατάλληλα για χώρες με περιορισμένη υποδομή δικτύου ή μικρότερες απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας (IAEA, 2019). Ως εκ τούτου, οι SMR έχουν τη δυνατότητα να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο μελλοντικό ενεργειακό μείγμα, ιδιαίτερα καθώς η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας συνεχίζει να αυξάνεται.

Ωστόσο, παρά τα πιθανά οφέλη των SMR, υπάρχουν επίσης σημαντικές προκλήσεις που σχετίζονται με την ανάπτυξη και την εφαρμογή τους. Αυτές οι προκλήσεις περιλαμβάνουν τεχνικά, οικονομικά, ρυθμιστικά ζητήματα και θέματα δημόσιας αποδοχής (IAEA, 2019). Για παράδειγμα, ενώ το μικρότερο μέγεθος των SMR μπορεί να προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, δεν αποδίδουν τα οικονομικά οφέλη των πυρηνικών αντιδραστήρων μεγάλης κλίμακας, οδηγώντας σε δυνητικά υψηλότερο κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, εξακολουθούν να υπάρχουν αβεβαιότητες σχετικά με την ασφάλεια των SMR, οι οποίες θα μπορούσαν να εμποδίσουν την ευρεία υιοθέτησή τους (IAEA, 2021).

Αυτό το κεφάλαιο παρέχει μια επισκόπηση των βασικών χαρακτηριστικών και της τεχνολογίας των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων, με έμφαση στους διαφορετικούς τύπους SMR και τα χαρακτηριστικά τους. Το κεφάλαιο εξετάζει επίσης τις πτυχές ασφαλείας των SMR, καθώς και το κανονιστικό τους πλαίσιο.

### 3.1 Επισκόπηση μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR)

Σε αυτή την υποενότητα, θα παρουσιάσουμε τα κύρια πλεονεκτήματα των SMR και θα τα συγκρίνουμε με τα συμβατικά πυρηνικά εργοστάσια.

#### **Μέγεθος**

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των Small Modular Reactors (SMR) είναι το μικρότερο μέγεθός τους. Σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς πυρηνικούς αντιδραστήρες μεγάλης κλίμακας, οι SMR έχουν σχεδιαστεί για να είναι μικρότεροι, συνήθως με χωρητικότητα έως και 300 MW. Το μικρότερο μέγεθος μπορεί να έχει οφέλη σε σχέση με τους μεγαλύτερους αντιδραστήρες.

Το κύριο πλεονέκτημα των SMR είναι ότι μπορούν να μεταφερθούν και να εγκατασταθούν πιο εύκολα σε διάφορες τοποθεσίες. Οι παραδοσιακοί πυρηνικοί αντιδραστήρες μεγάλης κλίμακας απαιτούν συχνά την κατασκευή μεγάλων υποδομών γύρω τους για να υποστηρίζεται το μέγεθος και η πολυπλοκότητά τους. Αυτό περιλαμβάνει εκτεταμένες ζώνες σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης και διαχείρισης γύρω από το εργοστάσιο για τον μετριασμό των επιπτώσεων τυχόν εκλύσεων ακτινοβολίας (Mittrakos, 2022). Ωστόσο, οι SMR έχουν μικρότερη ζώνη έκτακτης ανάγκης και μειωμένο ραδιολογικό αντίκτυπο σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς αντιδραστήρες, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να εγκατασταθούν σε απομακρυσμένες περιοχές, όπως απομακρυσμένες κοινότητες ή στρατιωτικές βάσεις, όπου οι παραδοσιακοί πυρηνικοί αντιδραστήρες θα ήταν αδύνατο ή αντικοινωνικό να κατασκευαστούν. Επιπλέον, η αρθρωτή φύση των SMR σημαίνει ότι μπορούν εύκολα να κλιμακωθούν προς τα πάνω ή προς τα κάτω για να καλύψουν τις μεταβαλλόμενες ενεργειακές απαιτήσεις, όπως σημειώνεται στο (IAEA, 1972).

Το μικρότερο μέγεθος των SMR προσφέρει επίσης πιθανή εξοικονόμηση κόστους σε σχέση με τους παραδοσιακούς πυρηνικούς αντιδραστήρες μεγάλης κλίμακας. Ένας από τα κύρια προβλήματα που σχετίζεται με την παραδοσιακή πυρηνική ενέργεια είναι το υψηλό αρχικό κεφάλαιο για την κατασκευή πυρηνικών αντιδραστήρων μεγάλης κλίμακας, οι οποίοι μπορεί να πάρουν αρκετά χρόνια ή και δεκαετίες για να ολοκληρωθούν. Αντίθετα, οι SMR μπορούν να κατασκευαστούν πιο γρήγορα και με χαμηλότερο κόστος λόγω του αρθρωτού σχεδιασμού και του μικρότερου μεγέθους τους (IAEA, 1972). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του οικονομικού κινδύνου που σχετίζεται με την κατασκευή πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, καθιστώντας τους SMR ελκυστική επιλογή για τους επενδυτές.

Παρά αυτά τα πλεονεκτήματα, υπάρχουν επίσης πιθανά μειονεκτήματα που προκύπτουν από το μικρότερο μέγεθος των SMR. Για παράδειγμα, επειδή οι SMR είναι μικρότεροι, ενδέχεται να μην ωφελούν οικονομικά στο επίπεδο που το κάνουν

οι μεγαλύτεροι αντιδραστήρες. Αυτό θα μπορούσε να σημαίνει ότι το κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να είναι υψηλότερο για τους SMR σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Συμπερασματικά, το μικρότερο μέγεθος των SMR είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που προσφέρει πολλά πιθανά οφέλη σε σχέση με τους παραδοσιακούς πυρηνικούς αντιδραστήρες μεγάλης κλίμακας. Οι SMR μπορούν να μεταφερθούν και να εγκατασταθούν ευκολότερα σε διάφορες τοποθεσίες, προσφέρουν πιθανή εξοικονόμηση κόστους και έχουν πιο καλύτερα χαρακτηριστικά ασφαλείας σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς αντιδραστήρες. Ωστόσο, υπάρχουν επίσης πιθανά μειονεκτήματα στο ότι οι SMR είναι μικρότεροι, όπως η πιθανότητα υψηλότερου κόστους ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και οι προκλήσεις που συνδέονται με την ανάπτυξη μιας νέας τεχνολογίας.

### **Αρθρωτός σχεδιασμός**

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των SMR είναι ο αρθρωτός σχεδιασμός τους, ο οποίος τους επιτρέπει να κατασκευάζονται σε μικρότερα τμήματα και να συναρμολογούνται επί τόπου. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του κόστους κατασκευής και του χρόνου παράδοσης, καθιστώντας τους SMR πιο ελκυστική επιλογή για επενδυτές και κυβερνήσεις που επιθυμούν να επεκτείνουν την ικανότητα παραγωγής πυρηνικής ενέργειας.

Ο αρθρωτός σχεδιασμός των SMR έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους παραδοσιακούς πυρηνικούς αντιδραστήρες μεγάλης κλίμακας. Ένα από τα κύρια οφέλη είναι ότι επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στη διαδικασία κατασκευής. Οι SMR μπορούν να κατασκευαστούν σε μικρότερα τμήματα και στη συνέχεια να συναρμολογηθούν επί τόπου, γεγονός που μπορεί να μειώσει το χρόνο που απαιτείται για την κατασκευή ενός πυρηνικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε απομακρυσμένες ή απομονωμένες περιοχές όπου η υποδομή που απαιτείται για πυρηνικούς σταθμούς μεγάλης κλίμακας δεν είναι άμεσα διαθέσιμη.

Επιπλέον, ο αρθρωτός σχεδιασμός των SMR μπορεί επίσης να βοηθήσει στη μείωση του κόστους κατασκευής. Κατασκευάζοντας τους αντιδραστήρες σε μικρότερα τμήματα, οι κατασκευαστές μπορούν να επωφεληθούν οικονομικά κατά την παραγωγή και να μειώσουν το κόστος που σχετίζεται με τη μεταφορά και την εγκατάσταση. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του συνολικού κόστους κατασκευής ενός πυρηνικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, καθιστώντας τους SMR μια πιο οικονομική επιλογή από τους παραδοσιακούς πυρηνικούς αντιδραστήρες μεγάλης κλίμακας.



Επιπλέον, ο αρθρωτός σχεδιασμός των SMR δίνει την δυνατότητα μεγαλύτερης επεκτασιμότητας. Αυτό σημαίνει ότι οι πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να κατασκευαστούν σε μικρότερα βήματα, με πρόσθετες μονάδες που προστίθενται ανάλογα με τις ανάγκες για την κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών απαιτήσεων. Αυτό μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία για τις επιχειρήσεις κοινής ωφελείας και τις κυβερνήσεις που επιθυμούν να επεκτείνουν την ικανότητα παραγωγής πυρηνικής ενέργειας με την πάροδο του χρόνου, χωρίς να δεσμεύονται για πυρηνικούς σταθμούς μεγάλης κλίμακας που μπορεί να είναι δύσκολο να χρηματοδοτηθούν ή να δικαιολογηθούν.

Παρά τα πλεονεκτήματα του αρθρωτού σχεδιασμού των SMR, υπάρχουν επίσης ορισμένα πιθανά μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Για παράδειγμα, μπορεί να υπάρχει αυξημένο κόστος που σχετίζεται με τη συντήρηση και τη λειτουργία πολλών μικρών αντιδραστήρων σε αντίθεση με έναν μόνο μεγάλο αντιδραστήρα. Επιπλέον, ο αρθρωτός σχεδιασμός των SMR μπορεί να απαιτεί πρόσθετα μέτρα ασφαλείας και σχέδια έκτακτης ανάγκης για να ληφθεί υπόψη η πιθανή αστοχία μεμονωμένων μονάδων.

Συμπερασματικά, ο αρθρωτός σχεδιασμός των SMR είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που προσφέρει πολλά πιθανά οφέλη σε σχέση με τους παραδοσιακούς πυρηνικούς αντιδραστήρες μεγάλης κλίμακας. Οι SMR μπορούν να κατασκευαστούν σε μικρότερα τμήματα και να συναρμολογηθούν επιτόπου, γεγονός που μπορεί να μειώσει το κόστος κατασκευής και τους χρόνους παράδοσης. Προσφέρουν επίσης μεγαλύτερη ευελιξία και επεκτασιμότητα, γεγονός που μπορεί να προσφέρει στις επιχειρήσεις κοινής ωφελείας και στις κυβερνήσεις περισσότερες επιλογές για την επέκταση της ικανότητας παραγωγής πυρηνικής ενέργειας. Παρόλο που υπάρχουν ορισμένα πιθανά μειονεκτήματα στον αρθρωτό σχεδιασμό των SMR, τα πιθανά οφέλη τα καθιστούν ελκυστική επιλογή για την κάλυψη μελλοντικών ενεργειακών απαιτήσεων.

### **Ευελιξία**

Το μικρό μέγεθος των SMR, τους καθιστά πιο ευέλικτους όσον αφορά την τοποθεσία και την απόδοση ισχύος. Αυτή η ευελιξία μπορεί να προσφέρει μια σειρά από οφέλη για τους επενδυτές και τις κυβερνήσεις που επιθυμούν να επεκτείνουν την ικανότητα παραγωγής πυρηνικής ενέργειας.

Σε αντίθεση με τους πυρηνικούς αντιδραστήρες μεγάλης κλίμακας που απαιτούν σημαντική υποδομή και συστήματα υποστήριξης, οι SMR μπορούν να αναπτυχθούν σε ένα ευρύτερο φάσμα ρυθμίσεων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία απομακρυσμένων ή εκτός δικτύου τοποθεσιών, όπως στρατιωτικές

βάσεις ή μικρές πόλεις, όπου πυρηνικοί σταθμοί μεγάλης κλίμακας μπορεί να μην είναι πρακτικοί ή εφικτοί. Οι SMR μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να συμπληρώσουν τα υπάρχοντα δίκτυα ισχύος, παρέχοντας πρόσθετη χωρητικότητα ισχύος σε περιόδους υψηλής ζήτησης ή για να χρησιμεύσουν ως εφεδρικές πηγές ενέργειας σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

Ωστόσο, υπάρχουν επίσης πιθανά μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Για παράδειγμα, το μικρότερο μέγεθος των SMR μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο κόστος που σχετίζεται με την κατασκευή και τη συντήρηση πολλαπλών αντιδραστήρων. Επιπλέον, η ευελιξία που παρέχεται από τους SMR ενδέχεται να απαιτεί πρόσθετα μέτρα ασφαλείας και σχέδια έκτακτης ανάγκης για να ληφθεί υπόψη η πιθανή αστοχία μεμονωμένων αντιδραστήρων.

### **Παθητική ασφάλεια**

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των SMR είναι τα χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας, τα οποία μπορούν να ενισχύσουν την ασφάλεια και να μειώσουν τον κίνδυνο ατυχημάτων. Οι SMR έχουν σχεδιαστεί με πολλά χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας που μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς την ανάγκη εξωτερικής ενέργειας ή ανθρώπινης παρέμβασης. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν συστήματα παθητικής ψύξης, τα οποία βασίζονται σε φυσικά φαινόμενα όπως η βαρύτητα και η φυσική κυκλοφορία για την απομάκρυνση της θερμότητας από τον πυρήνα του αντιδραστήρα σε περίπτωση ατυχήματος. Αυτά τα χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας μπορούν να παρέχουν υψηλότερο βαθμό ασφάλειας από τα παραδοσιακά συστήματα ενεργητικής ασφάλειας, τα οποία απαιτούν εξωτερική δράση ή ανθρώπινη παρέμβαση για να λειτουργήσουν. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της πιθανότητας ατυχημάτων και στον μετριασμό των συνεπειών τυχόν ατυχημάτων που συμβαίνουν.

Εκτός από την ενίσχυση της ασφάλειας, τα χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας στα SMR μπορούν επίσης να συμβάλουν στη μείωση του κόστους. Επειδή αυτά τα χαρακτηριστικά λειτουργούν χωρίς την ανάγκη εξωτερικής ενέργειας ή ανθρώπινης παρέμβασης, μπορούν να μειώσουν την ανάγκη για πολύπλοκα συστήματα ασφαλείας και σχετικό εξοπλισμό. Αυτό μπορεί να συμβάλει στη μείωση του συνολικού κόστους κατασκευής και λειτουργίας ενός πυρηνικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής.

Παρά τα πιθανά οφέλη των χαρακτηριστικών παθητικής ασφάλειας στα SMR, υπάρχουν επίσης ορισμένα πιθανά μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Για παράδειγμα, ορισμένα χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας μπορεί να απαιτούν μεγαλύτερα δοχεία αντιδραστήρα ή πρόσθετο εξοπλισμό, γεγονός που

μπορεί να αυξήσει το συνολικό κόστος του αντιδραστήρα. Επιπλέον, η χρήση χαρακτηριστικών παθητικής ασφάλειας μπορεί να απαιτεί πρόσθετη έρευνα και ανάπτυξη για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία και η αποτελεσματικότητά τους. Συνολικά, τα χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας ενδέχεται να συμβάλλουν στη χρήση των SMR..

### **Πυρηνικά απόβλητα**

Οι SMR έχουν τη δυνατότητα να μειώνουν την ποσότητα των πυρηνικών αποβλήτων που παράγονται. Αυτό το επιτυγχάνουν χρησιμοποιώντας λιγότερο καύσιμο και έχοντας μικρότερους κύκλους ανεφοδιασμού, σε σύγκριση με πυρηνικούς αντιδραστήρες μεγάλης κλίμακας.

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ), οι SMR μπορούν να χρησιμοποιούν μια ποικιλία καυσίμων, συμπεριλαμβανομένων ουρανίου, πλουτωνίου και θορίου, και μπορούν ενδεχομένως να επιτύχουν μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και χαμηλότερη παραγωγή πυρηνικών αποβλήτων.

Εκτός από τη χρήση λιγότερου καυσίμου, οι SMR έχουν επίσης μικρότερους κύκλους ανεφοδιασμού. Οι παραδοσιακοί πυρηνικοί αντιδραστήρες μεγάλης κλίμακας απαιτούν διακοπή λειτουργίας κάθε 12 έως 18 μήνες για ανεφοδιασμό, κάτι που μπορεί να είναι μια χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία. Οι SMR, από την άλλη πλευρά, μπορούν να έχουν κύκλους ανεφοδιασμού έως και έξι μήνες. Αυτό σημαίνει ότι απαιτούνται λιγότερα καύσιμα για κάθε κύκλο ανεφοδιασμού, με αποτέλεσμα να παράγονται συνολικά λιγότερα πυρηνικά απόβλητα.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η μείωση των πυρηνικών αποβλήτων που παράγονται από τους SMR δεν είναι εγγυημένη και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος του καυσίμου που χρησιμοποιείται, ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα και οι συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον, οι SMR, όπως όλοι οι πυρηνικοί αντιδραστήρες, εξακολουθούν να παράγουν πυρηνικά απόβλητα, τα οποία απαιτούν κατάλληλη διαχείριση και διάθεση. Ο ΔΟΑΕ σημειώνει ότι η χρήση προηγμένων κύκλων καυσίμου και καινοτόμων στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων μπορεί να μειώσει περαιτέρω τον όγκο και τη ραδιενέργεια των πυρηνικών αποβλήτων που παράγονται από τους SMR.

### **Ασφάλεια (security) και διασφάλιση πυρηνικών υλικών (safeguards)**

Το μικρότερο μέγεθος και ο αρθρωτός σχεδιασμός των SMR προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους παραδοσιακούς αντιδραστήρες, συμπεριλαμβανομένης της βελτιωμένης ασφάλειας (IAEA, 2020). Ο αρθρωτός

σχεδιασμός των SMR τους επιτρέπει να κατασκευάζονται σε μικρότερα τμήματα και να συναρμολογούνται επιτόπου, μειώνοντας την ποσότητα πυρηνικού υλικού σε μία μόνο τοποθεσία και καθιστώντας το λιγότερο ευάλωτο σε απειλές ασφαλείας, όπως τρομοκρατικές επιθέσεις ή δολιοφθορές.

Τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας των SMR είναι ιδιαίτερα σημαντικά υπό το φως των πιθανών συνεπειών ενός πυρηνικού ατυχήματος ή επίθεσης. Οι SMR έχουν χαμηλότερη ισχύ εξόδου από τους παραδοσιακούς αντιδραστήρες, γεγονός που τους καθιστά λιγότερο ελκυστικούς στόχους για τρομοκράτες ή άλλες ομάδες που επιδιώκουν να προκαλέσουν βλάβη. Επιπλέον, ο αρθρωτός σχεδιασμός των SMR επιτρέπει την ευκολότερη εφαρμογή μέτρων φυσικής προστασίας, όπως φράγματα, περιφράξεις και κάμερες, τα οποία μπορούν να μειώσουν περαιτέρω τον κίνδυνο απειλών για την ασφάλεια (IAEA, 2020).

### **Δυνατότητα συμπαγωγής**

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των SMR είναι η ικανότητά τους να παρέχουν τόσο ηλεκτρική ενέργεια όσο και θερμότητα, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές συμπαγωγής. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Η συμπαγωγή, γνωστή και ως συνδυασμένη θερμότητα και ισχύς (CHP), περιλαμβάνει την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και χρήσιμης θερμότητας από μία μόνο πηγή καυσίμου. Αυτή η διαδικασία είναι πιο αποτελεσματική από τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, καθώς συλλαμβάνει και χρησιμοποιεί την απορριπτόμενη θερμότητα που παράγεται κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η τηλεθέρμανση είναι ένα παράδειγμα εφαρμογής συμπαγωγής που μπορεί να επωφεληθεί από τους SMR. Τα συστήματα τηλεθέρμανσης διανέμουν θερμότητα στα κτίρια μέσω ενός δικτύου σωλήνων, παρέχοντας μια πιο αποτελεσματική και φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση στα μεμονωμένα συστήματα θέρμανσης. Οι SMR μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή θερμότητας για συστήματα τηλεθέρμανσης, μειώνοντας την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα και μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Οι βιομηχανικές διεργασίες μπορούν επίσης να επωφεληθούν από τους SMR. Πολλές βιομηχανικές διεργασίες απαιτούν τόσο θερμότητα όσο και ηλεκτρική ενέργεια, και οι SMR μπορούν να παρέχουν και τα δύο με πιο ενεργειακά και οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Για παράδειγμα, οι SMR μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ατμού για βιομηχανικές διεργασίες, μειώνοντας την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα και μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Ενώ η δυνατότητα για συμπαραγωγή είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα των SMR, υπάρχουν επίσης ορισμένες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Μια πρόκληση είναι η ανάγκη για υποδομή διανομής θερμότητας, η οποία μπορεί να μην είναι άμεσα διαθέσιμη σε όλες τις περιοχές. Επιπλέον, η οικονομική βιωσιμότητα των εφαρμογών συμπαραγωγής εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως οι τιμές της ενέργειας, τα ρυθμιστικά πλαίσια και το επενδυτικό κόστος.

### **Μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις**

Οι SMR έχουν τη δυνατότητα να μειώνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της πυρηνικής ενέργειας.

Ο μειωμένος περιβαλλοντικός αντίκτυπος των SMR οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο μικρότερο μέγεθος και τον αρθρωτό σχεδιασμό τους. Οι SMR μπορούν να βρίσκονται σε περιοχές όπου δεν θα ήταν εφικτές μεγαλύτερες πυρηνικές εγκαταστάσεις, όπως πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές ή απομακρυσμένες τοποθεσίες με περιορισμένη υποδομή. Οι SMR μπορούν επίσης να σχεδιαστούν ώστε να έχουν μικρότερο φυσικό αποτύπωμα, το οποίο μπορεί να μειώσει την ποσότητα γης που απαιτείται για την κατασκευή και να μετριάσει τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τους πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής.

Ενώ οι SMR έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της πυρηνικής ενέργειας, υπάρχουν επίσης πιθανές προκλήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Μια ανησυχία είναι η πιθανότητα αυξημένης μεταφοράς πυρηνικών υλικών, ιδιαίτερα εάν οι SMR βρίσκονται σε απομακρυσμένες ή απομονωμένες περιοχές. Αυτό θα μπορούσε να αυξήσει τον κίνδυνο ατυχημάτων κατά τη μεταφορά και ενδεχομένως να οδηγήσει σε αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με τη μεταφορά.

Μια άλλη πρόκληση είναι η δυνατότητα χρήσης νερού που σχετίζεται με τους SMR. Ενώ οι SMR μπορούν να σχεδιαστούν για να χρησιμοποιούν λιγότερο νερό από τους παραδοσιακούς πυρηνικούς αντιδραστήρες μεγάλης κλίμακας, εξακολουθούν να απαιτούν σημαντικές ποσότητες νερού για σκοπούς ψύξης. Αυτό θα μπορούσε να είναι ιδιαίτερα δύσκολο σε περιοχές με λειψυδρία ή απαιτήσεις για υδάτινους πόρους.

## 3.2 Τύποι SMR

### 3.2.1 Αντιδραστήρες υπό πίεση νερού (PWR)

Ένα από τα πιο πολλά υποσχόμενα σχέδια για SMR είναι ο αντιδραστήρας υπό πίεση νερού (PWR), ο οποίος είναι μια καθιερωμένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε μεγάλης κλίμακας πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Σε αυτή την ενότητα, θα διερευνήσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά και τις αρχές λειτουργίας των SMR που βασίζονται στους αντιδραστήρες PWR.

Οι PWR-SMR λειτουργούν με τις ίδιες θεμελιώδεις αρχές με τους μεγάλης κλίμακας PWR. Οι PWR χρησιμοποιούν καύσιμο εμπλουτισμένου οξειδίου του ουρανίου για την παραγωγή θερμότητας, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού που οδηγεί τους στροβίλους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο πυρήνας του αντιδραστήρα περιέχει στοιχεία καυσίμου, τα οποία αποτελούνται από κεραμικά σφαιρίδια εμπλουτισμένου οξειδίου ουρανίου στοιβαγμένα σε μεταλλικούς σωλήνες. Όταν τα άτομα ουρανίου στα σφαιρίδια απορροφούν νετρόνια, διασπώνται, απελευθερώνοντας ενέργεια με τη μορφή θερμότητας. Αυτή η θερμότητα μεταφέρεται στο νερό, το οποίο ρέει μέσω του πυρήνα του αντιδραστήρα. Το θερμαινόμενο ψυκτικό στη συνέχεια ρέει μέσω μιας γεννήτριας ατμού, όπου θερμαίνει έναν δευτερεύοντα βρόχο νερού, παράγοντας ατμό. Στη συνέχεια, ο ατμός χρησιμοποιείται για την κίνηση ενός στροβίλου που παράγει ηλεκτρική ενέργεια.

Η βασική διαφορά μεταξύ των SMR που βασίζονται σε PWR και των PWR μεγάλης κλίμακας είναι το μέγεθος και ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα. Οι αντιδραστήρες υπό πίεση νερού (PWR) είναι ο πιο κοινός τύπος πυρηνικών αντιδραστήρων που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως, αντιπροσωπεύοντας πάνω από το 70% της παγκόσμιας παραγωγής πυρηνικής ενέργειας (World Nuclear Association, 2021).

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των PWR είναι η αξιοπιστία και η ασφάλειά τους. Έχουν αποδεδειγμένο ιστορικό ασφαλούς και αξιόπιστης λειτουργίας, με πολλούς PWR να λειτουργούν για δεκαετίες χωρίς προβλήματα. Χρησιμοποιούν επίσης πολλαπλά επιπλέον συστήματα ασφαλείας για την πρόληψη ατυχημάτων και την ελαχιστοποίηση των συνεπειών τυχόν ατυχημάτων (World Nuclear Association, 2021).

Υπάρχουν πολλά παραδείγματα υφιστάμενων και προγραμματισμένων PWR σε όλο τον κόσμο. Για παράδειγμα, ο πυρηνικός σταθμός Olkiluoto 3 στη Φινλανδία είναι ένας PWR τρίτης γενιάς που βασίζεται σε σχέδια Ευρωπαϊκών Αντιδραστήρων υπό πίεση (EPR), με ισχύ εξόδου 1.600 MW. Κατασκευάστηκε από μια κοινοπραξία εταιρειών με επικεφαλής την Areva-Siemens (Nuclear Energy Insider, 2019).



**Εικόνα 1: Ο πυρηνικός σταθμός PWR τρίτης γενιάς Olkiluoto 3 στη Φινλανδία**

Ένα άλλο παράδειγμα είναι ο πυρηνικός σταθμός Hinkley Point C στο Ηνωμένο Βασίλειο, ο οποίος είναι PWR τρίτης γενιάς με ηλεκτρική ισχύ 3.200 MW. Είναι υπό κατασκευή και προγραμματίζεται να ξεκινήσει τη λειτουργία του το 2026. Το Hinkley Point C χρησιμοποιεί σχέδιο EPR του Ηνωμένου Βασιλείου και κατασκευάζεται από την EDF Energy. Θα είναι ο πρώτος νέος πυρηνικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής που θα κατασκευαστεί στο Ηνωμένο Βασίλειο εδώ και περισσότερα από 20 χρόνια (Nuclear Energy Insider, 2019).



**Εικόνα 2: Ο υπο κατασκευή πυρηνικός σταθμός Hinkley Point C στο Ηνωμένο Βασίλειο, ο οποίος είναι PWR τρίτης γενιάς με ισχύ 3.200 MW**

Η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Vogtle στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι ένας πυρηνικός σταθμός PWR δύο μονάδων που βρίσκεται στη Georgia, με ισχύ 2.430 MW. Λειτουργεί από τα τέλη της δεκαετίας του 1980. Το 2012, ξεκίνησε η κατασκευή δύο επιπλέον AP1000 PWR στην τοποθεσία, τα οποία έχουν προγραμματιστεί να ξεκινήσουν τη λειτουργία τους το 2023 (World Nuclear Association, 2021).

Ο πυρηνικός σταθμός Taishan στην Κίνα είναι ένα PWR τρίτης γενιάς με ισχύ 1.750 MW. Το Taishan, που βρίσκεται στην επαρχία Γκουανγκντόνγκ, χρησιμοποιεί ένα γαλλικού σχεδιασμού EPR και ξεκίνησε τη λειτουργία του το 2018. Είναι ο πρώτος αντιδραστήρας EPR που τέθηκε σε λειτουργία (World Nuclear Association, 2021).

Ο πυρηνικός σταθμός Barakah στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα είναι ένας αντιδραστήρας PWR τεσσάρων μονάδων που βρίσκεται στο Άμπου Ντάμπι, με ισχύ 5.600 MW. Η πρώτη μονάδα άρχισε να λειτουργεί το 2020 και οι υπόλοιπες τρεις μονάδες έχουν προγραμματιστεί να ξεκινήσουν τη λειτουργία τους τα επόμενα χρόνια (World Nuclear Association, 2021).

Αυτά τα παραδείγματα καταδεικνύουν την παγκόσμια χρήση των PWR, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε πολλές χώρες παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένων των Ηνωμένων Πολιτειών, της Γαλλίας, της Κίνας, της Ιαπωνίας και της Νότιας Κορέας. Οι



PWR παρέχουν μια αξιόπιστη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία είναι σημαντική για τη διασφάλιση σταθερού και συνεπούς ενεργειακού εφοδιασμού.

### **3.2.2 Αντιδραστήρες βραστού νερού (BWR)**

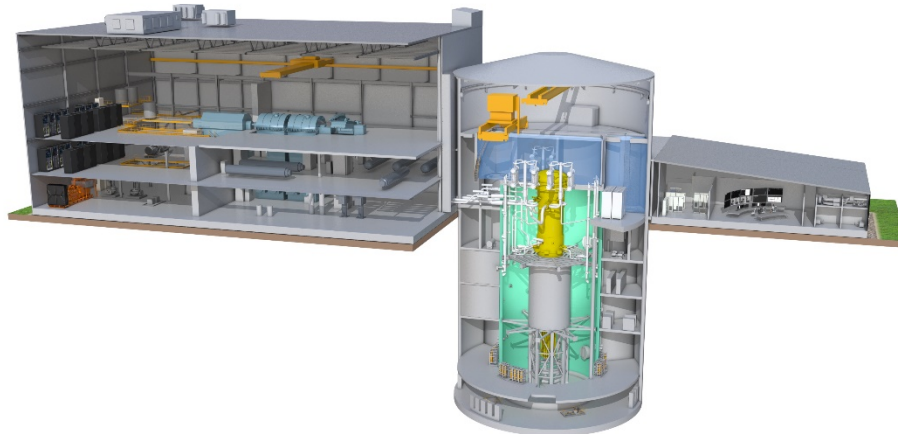
Οι BWR-SMR βασίζονται στις αρχές των αντιδραστήρων βραστού νερού, οι οποίοι αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1950 και έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλούς εμπορικούς πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής (Eaton et al., 2019).

Οι BWR SMR λειτουργούν χρησιμοποιώντας καύσιμο εμπλουτισμένου ουρανίου για την παραγωγή θερμότητας, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού. Ο ατμός παράγεται από το βραστό νερό στον πυρήνα του αντιδραστήρα και οδηγεί στροβίλους που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια (IEA, 2021). Οι BWR-SMR έχουν σχεδιαστεί για να είναι πιο συμπαγής και απλούστεροι από τα παραδοσιακά πυρηνικά εργοστάσια, με λιγότερα εξαρτήματα και μικρότερο περιβαλλοντολογικό αποτύπωμα (NEI, 2021).

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των BWR-SMR είναι οι δυνατότητές τους για χαμηλότερο κόστος και μεγαλύτερη ευελιξία σε σύγκριση με μεγαλύτερους πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Λόγω του μικρότερου μεγέθους και του απλοποιημένου σχεδιασμού τους, οι BWR-SMR μπορούν να μεταφερθούν και να εγκατασταθούν πιο εύκολα σε απομακρυσμένες τοποθεσίες ή να ενσωματωθούν σε υπάρχοντα δίκτυα ισχύος (WNA, 2021). Έχουν επίσης τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή, για να παρέχουν αξιόπιστη, καθαρή ενέργεια (DOE, 2021).

Παρά τα πιθανά πλεονεκτήματά τους, τα BWR SMR αντιμετωπίζουν επίσης αρκετές προκλήσεις. Μία από τις κύριες προκλήσεις είναι η ρυθμιστική έγκριση, καθώς μικρότεροι αντιδραστήρες ενδέχεται να μην ταιριάζουν στα υπάρχοντα ρυθμιστικά πλαίσια (ΟΟΣΑ/NEA, 2019). Επιπλέον, υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με την πιθανότητα ατυχημάτων και τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων, τα οποία πρέπει να αντιμετωπίζονται προσεκτικά για να διασφαλιστεί η δημόσια ασφάλεια (ΔΟΑΕ, 2019).

Η ανάπτυξη των BWR-SMR βρίσκεται ακόμα σε μικρή κλίμακα. Ένα παράδειγμα είναι ο BWRX-300, που αναπτύχθηκε από την GE Hitachi Nuclear Energy. Ο BWRX-300 είναι ένας απλοποιημένος αντιδραστήρας βραστού νερού που χρησιμοποιεί προηγμένα υλικά για την επίτευξη μεγαλύτερης απόδοσης και ασφάλειας. Η εταιρεία έχει υπογράψει μνημόνιο κατανόησης με την ισπανική εταιρεία Berkeley Energia, για τη διερεύνηση της χρήσης του BWRX-300 σε έναν προτεινόμενο πυρηνικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής στην Ισπανία (GE Hitachi Nuclear Energy, 2021).



**Εικόνα 3: Διάγραμμα του αντιδραστήρα βραστού νερού BWRX-300 από την GE Hitachi Nuclear Energy στην Ισπανία**

Συμπερασματικά, οι μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες με βραστό νερό έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν αξιόπιστες, ευέλικτες και οικονομικά αποδοτικές πηγές ενέργειας. Η ανάπτυξη BWR SMR, όπως η μονάδα NuScale Power Module και η BWRX-300, αντιπροσωπεύει μια πολλά υποσχόμενη πρόοδο στην τεχνολογία πυρηνικής ενέργειας. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αντιμετωπίζονται προσεκτικά και να διαχειρίζονται οι προκλήσεις που σχετίζονται με την εφαρμογή τους για να διασφαλιστεί η ασφαλής και αποτελεσματική χρήση αυτής της τεχνολογίας.

### **3.2.3 Αερόψυκτοι αντιδραστήρες υψηλής θερμοκρασίας (HTGR)**

Οι αερόψυκτοι μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες υψηλής θερμοκρασίας (HTGR SMRs) είναι ένας τύπος πυρηνικού αντιδραστήρα που χρησιμοποιεί ήλιο ως ψυκτικό αντί για νερό, το οποίο επιτρέπει υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας και αυξημένη απόδοση σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς υδρόψυκτους αντιδραστήρες (Wen et al., 2020). Οι HTGR-SMR έχουν σχεδιαστεί για να είναι μικρότεροι και πιο συμπαγείς από τα συμβατικά πυρηνικά εργοστάσια, καθιστώντας τους πιο ευέλικτους και ευκολότερους στην ενσωμάτωσή τους με τα υπάρχοντα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των HTGR-SMR είναι η ικανότητά τους να παράγουν υψηλά ποσά θερμότητας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ποικίλες εφαρμογές πέρα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η παραγωγή υδρογόνου και οι βιομηχανικές διεργασίες (El-Genk, 2019). Αυτή η αυξημένη ευελιξία

και η δυνατότητα για πολλαπλές εφαρμογές καθιστούν τους HTGR-SMR ελκυστική επιλογή.

Ένα παράδειγμα HTGR-SMR είναι ο αντιδραστήρας υψηλής θερμοκρασίας αερίου ψύξης που αναπτύσσεται από την China National Nuclear Corporation (CNNC) (Liu et al., 2017). Το HTGR έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε θερμοκρασίες έως 750°C, σημαντικά υψηλότερες από τους παραδοσιακούς υδρόψυκτους αντιδραστήρες. Το ψυκτικό υγρό ηλίου χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θερμότητας από τον πυρήνα του αντιδραστήρα σε έναν εναλλάκτη θερμότητας, ο οποίος στη συνέχεια παράγει ατμό για την κίνηση των στροβίλων και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το HTGR έχει επίσης σχεδιαστεί με χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας, όπως σύστημα ψύξης χαμηλής πίεσης και εγγενής απομάκρυνση θερμότητας από διάσπαση, που βελτιώνουν την ασφάλεια και μειώνουν την πιθανότητα ατυχημάτων.

Ένα άλλο παράδειγμα HTGR-SMR είναι ο αντιδραστήρας πολύ υψηλής θερμοκρασίας (VHTR), που αναπτύσσεται από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (DOE) (Scarlat et al., 2020). Το VHTR είναι επίσης σχεδιασμένο να λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες έως 1000°C και χρησιμοποιεί συνδυασμό ηλίου και καυσίμου με κεραμική επίστρωση για μεγαλύτερη απόδοση και ασφάλεια. Το VHTR αναπτύσσεται με τη δυνατότητα για συμπαραγωγή υδρογόνου και ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και τη χρήση της υψηλής θερμοκρασίας για βιομηχανικές διεργασίες.

Παρά τα πιθανά πλεονεκτήματά τους, τα HTGR-SMR αντιμετωπίζουν επίσης αρκετές προκλήσεις. Μία από τις κύριες προκλήσεις είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου για την κατασκευή και την ανάπτυξη της τεχνολογίας (Kumar et al., 2021). Λόγω των προηγμένων υλικών και της πολύπλοκης μηχανικής που απαιτούνται, τα HTGR-SMR ενδέχεται να έχουν υψηλότερο αρχικό κόστος από τα παραδοσιακά πυρηνικά εργοστάσια, γεγονός που μπορεί να δυσχεράνει την προσέλκυση επενδύσεων και χρηματοδότησης.

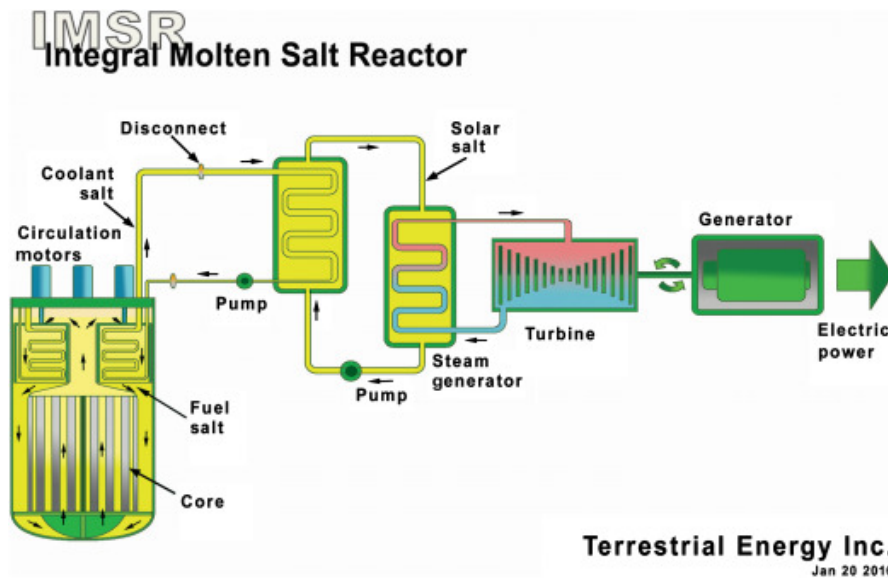
Η ρυθμιστική έγκριση είναι μια άλλη πρόκληση που αντιμετωπίζουν οι HTGR-SMR, καθώς ενδέχεται να μην ταιριάζουν στα υπάρχοντα ρυθμιστικά πλαίσια (NRC, 2017). Ο μοναδικός σχεδιασμός των HTGR SMR ενδέχεται να απαιτούν την ανάπτυξη νέων κανονισμών και προτύπων ασφαλείας, κάτι που μπορεί να είναι μια χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία.

Συμπερασματικά, οι μικροί αερόψυκτοι αρθρωτοί αντιδραστήρες υψηλής θερμοκρασίας έχουν τη δυνατότητα να αποτελέσουν καθαρή, αξιόπιστη και ευέλικτη πηγή ενέργειας. Η ανάπτυξη αντιδραστήρων, όπως το HTGR και το VHTR, αντιπροσωπεύει μια πολλά υποσχόμενη πρόοδο στην τεχνολογία πυρηνικής ενέργειας, με τη δυνατότητα παραγωγής υψηλών θερμοκρασιών για μια ποικιλία εφαρμογών πέρα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

### **3.2.4 Αντιδραστήρες υγρών μετάλλων (LMFR)**

Ένας τύπος τεχνολογίας SMR που έχει κερδίσει την προσοχή τα τελευταία χρόνια είναι οι SMR που ψύχονται με υγρό μέταλλο, οι οποίοι χρησιμοποιούν ένα υγρό μέταλλο όπως το νάτριο ή τον μόλυβδο ως ψυκτικό αντί για νερό. Οι SMR υγρών μετάλλων έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους παραδοσιακούς υδροψυκτούς αντιδραστήρες, όπως υψηλότερη θερμική απόδοση, χαμηλότερες πιέσεις λειτουργίας και βελτιωμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας. (Kazimi, Todreas, & Pilat, 2013). Η λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες επιτρέπει επίσης τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και άλλων προϊόντων, όπως το υδρογόνο, που μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω την οικονομία αυτής της τεχνολογίας (Terrestrial Energy, n.d.). Σε αυτή την υποενότητα, συνοψίζονται η τεχνολογία και οι δυνατότητες των SMR υγρών μετάλλων, καθώς και οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν στην εφαρμογή τους.

Ένα παράδειγμα SMR υγρών μετάλλων είναι ο (IMSR), που αναπτύσσεται από την Terrestrial Energy. Ο IMSR χρησιμοποιεί ένα υγρό φθοριούχο άλας τόσο ως καύσιμο όσο και ως ψυκτικό, το οποίο επιτρέπει τη λειτουργία σε υψηλή θερμοκρασία και βελτιωμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς αντιδραστήρες. Ο IMSR έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε θερμοκρασίες έως 700°C, γεγονός που επιτρέπει υψηλή θερμική απόδοση και τη δυνατότητα για συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και υδρογόνου (Terrestrial Energy, n.d.). Ο IMSR διαθέτει επίσης εγγενή χαρακτηριστικά ασφαλείας, όπως συστήματα παθητικής ψύξης, τα οποία βελτιώνουν την ασφάλεια και μειώνουν τον κίνδυνο ατυχημάτων.



**Εικόνα 4: Διάγραμμα του αντιδραστήρα υγρών μετάλλων IMSR, που αναπτύσσεται από την Terrestrial Energy**

Ένα άλλο παράδειγμα SMR υγρών μετάλλων είναι ο Fast Reactor (LFR) που ψύχεται με μόλυβδο, που αναπτύσσεται από τη Rosatom στη Ρωσία. Ο LFR χρησιμοποιεί μόλυβδο ως κύριο ψυκτικό υγρό, το οποίο επιτρέπει τη λειτουργία σε υψηλή θερμοκρασία και βελτιωμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς αντιδραστήρες. Ο LFR έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε θερμοκρασίες έως 550°C, γεγονός που επιτρέπει υψηλή θερμική απόδοση και τη δυνατότητα για συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και υδρογόνου. Ο LFR διαθέτει επίσης εγγενή χαρακτηριστικά ασφαλείας, όπως αρνητικό συντελεστή κενού και συστήματα παθητικής ψύξης, που βελτιώνουν την ασφάλεια και μειώνουν τον κίνδυνο ατυχημάτων (Rosatom, n.d.).

Παρά τα πιθανά πλεονεκτήματά τους, οι SMR υγρών μετάλλων αντιμετωπίζουν επίσης αρκετές προκλήσεις. Μία από τις κύριες προκλήσεις είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου για την κατασκευή και την ανάπτυξη της τεχνολογίας. Λόγω των προηγμένων υλικών και της πολύπλοκης μηχανικής που απαιτείται, οι SMR υγρών μετάλλων μπορεί να έχουν υψηλότερο αρχικό κόστος από τα παραδοσιακά πυρηνικά εργοστάσια, γεγονός που μπορεί να δυσχεράνει την προσέλκυση επενδύσεων και χρηματοδότησης. (Kazimi et al., 2013).

Η ρυθμιστική έγκριση είναι μια άλλη πρόκληση που αντιμετωπίζουν οι SMR υγρών μετάλλων, καθώς επίσης ενδέχεται να μην ταιριάζουν στα υπάρχοντα ρυθμιστικά πλαίσια. Το μικρότερο μέγεθος και ο μοναδικός σχεδιασμός των SMR υγρών μετάλλων ενδέχεται να απαιτούν την ανάπτυξη νέων κανονισμών και προτύπων ασφαλείας, κάτι που μπορεί να είναι μια χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία. Επιπλέον, η χρήση υγρών μετάλλων ως ψυκτικών εισάγει νέες ανησυχίες για την

ασφάλεια, όπως ο κίνδυνος πυρκαγιάς ή έκρηξης σε περίπτωση διαρροής ή δυσλειτουργίας (Kazimi et al., 2013).

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, θα είναι σημαντικό για τις κυβερνήσεις και τα ενδιαφερόμενα μέρη του κλάδου να συνεργαστούν για την ανάπτυξη ρυθμιστικών πλαισίων και προτύπων ασφαλείας που μπορούν να υποστηρίξουν την ανάπτυξη SMR υγρών μετάλλων. Αυτό πιθανότατα θα απαιτήσει σημαντικές επενδύσεις στην έρευνα και ανάπτυξη, καθώς και συνεργασία μεταξύ χωρών και διεθνών οργανισμών για την ανταλλαγή γνώσεων και εμπειρογνωμοσύνης (Kazimi et al., 2013).

### **3.2.5 Άλλοι τύποι αντιδραστήρων**

Υπάρχουν αρκετοί άλλοι τύποι SMR υπό ανάπτυξη, όπως:

Αντιδραστήρες σφαιρών - (PBRs) - Αυτοί οι αντιδραστήρες χρησιμοποιούν μικρές σφαίρες καυσίμου μεγέθους μπάλας του τένις που περιέχουν χιλιάδες σφαιρίδια καυσίμου. Οι PBR έχουν εγγενή χαρακτηριστικά ασφαλείας λόγω των φυσικών ιδιοτήτων των σφαιρών καυσίμου και μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές θερμοκρασίες για βελτιωμένη θερμική απόδοση.

Ένα παράδειγμα αντιδραστήρα Pebble Bed Reactor (PBR) είναι το HTR-PM (High-Temperature Reactor Pebble-bed Module), το οποίο βρίσκεται υπό κατασκευή στην Κίνα. Το HTR-PM είναι ένα έργο επίδειξης για την τεχνολογία PBR, σχεδιασμένο να παράγει 200 MW θερμικής ισχύος και 100 MW ηλεκτρικής ενέργειας (Li et al., 2016). Ο αντιδραστήρας αποτελείται από δύο μονάδες ισχύος 250 MWt, η καθεμία από τις οποίες περιέχει 12.000 σφαίρες καυσίμου. Οι σφαίρες καυσίμου περιέχουν χιλιάδες μικρά σωματίδια καυσίμου που είναι επικαλυμμένα με στρώματα άνθρακα και καρβιδίου του πυριτίου για να αποτρέψουν την απελευθέρωση του προϊόντος σχάσης (Chen et al., 2015). Ο αντιδραστήρας χρησιμοποιεί αέριο ήλιο ως ψυκτικό υγρό, το οποίο κυκλοφορεί μέσω της κλίνης με βότσαλα για να μεταφέρει θερμότητα σε έναν δευτερεύοντα βρόχο ηλίου, ο οποίος στη συνέχεια κινεί έναν στρόβιλο για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Ο HTR-PM έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε θερμοκρασίες έως 750°C, γεγονός που επιτρέπει υψηλή θερμική απόδοση και τη δυνατότητα για συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και άλλων προϊόντων, όπως το υδρογόνο. Ο σχεδιασμός PBR διαθέτει εγγενή χαρακτηριστικά ασφαλείας, όπως αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας και συστήματα παθητικής ψύξης, τα οποία βελτιώνουν την ασφάλεια και μειώνουν τον κίνδυνο ατυχημάτων (Wang et al., 2015).

Υπερκρίσιμοι υδρόψυκτοι αντιδραστήρες (SCWR) - Αυτοί οι αντιδραστήρες χρησιμοποιούν υπερκρίσιμο νερό ως ψυκτικό υγρό, το οποίο είναι νερό που θερμαίνεται σε θερμοκρασία και πίεση πάνω από το κρίσιμο σημείο του. Οι SCWR έχουν υψηλή θερμική απόδοση και μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, αλλά αντιμετωπίζουν επίσης προκλήσεις που σχετίζονται με τα υλικά και τη διάβρωση.

Ένα παράδειγμα υπερκρίσιμου υδρόψυκτου αντιδραστήρα (SCWR) είναι ο канаδικός υπερκρίσιμος υδρόψυκτος αντιδραστήρας (CSWR), η ιδέα για τον οποίο αναπτύσσεται από τα Canadian Nuclear Laboratories (CNL) (Canadian Nuclear Laboratories, n.d.). Το CSWR έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε θερμοκρασία περίπου 510°C και πίεση 25 MPa, που είναι πάνω από το κρίσιμο σημείο του νερού, όπου το νερό υπάρχει ως μονοφασικό ρευστό με μοναδικές θερμοφυσικές ιδιότητες.

Η σχεδίαση CSWR διαθέτει ένα σύστημα ψυκτικού μέσου, όπου το νερό θερμαίνεται στον πυρήνα του αντιδραστήρα και στη συνέχεια περνά μέσα από μια γεννήτρια ατμού με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο πυρήνας του αντιδραστήρα έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιεί φυσικό καύσιμο ουρανίου, βαρύ νερό ως επιβραδυντή και ψύχεται από υπερκρίσιμο νερό. Ο αντιδραστήρας χρησιμοποιεί ένα απλό, παθητικό σύστημα ασφαλείας, το οποίο βασίζεται στη φυσική κυκλοφορία για την απομάκρυνση της θερμότητας σε περίπτωση ατυχήματος απώλειας ψυκτικού.

Ο σχεδιασμός CSWR έχει πολλά πιθανά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή θερμική απόδοση, μειωμένο κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας και μειωμένες απαιτήσεις καυσίμου. Ο αντιδραστήρας μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει ένα ευρύ φάσμα καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου του εμπλουτισμένου ουρανίου, του θορίου και του επανεπεξεργασμένου καυσίμου. Η ιδέα για τους CSWR βρίσκεται ακόμη στην σε πολύ πρώιμο στάδιο και θα απαιτηθεί περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη για να καθοριστεί η σκοπιμότητα του σχεδιασμού για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε εμπορική κλίμακα.

Αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων - Αυτοί οι αντιδραστήρες χρησιμοποιούν ταχεία νετρόνια για να διατηρήσουν την πυρηνική αλυσιδωτή αντίδραση, η οποία τους επιτρέπει να χρησιμοποιούν ευρύτερο φάσμα καυσίμων και να επιτυγχάνουν υψηλότερη θερμική απόδοση από τους παραδοσιακούς αντιδραστήρες. Οι αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων μπορούν να χρησιμοποιούν μια ποικιλία ψυκτικών, όπως υγρό μέταλλο ή αέριο.

Ένα παράδειγμα αντιδραστήρα ταχέων νετρονίων είναι ο BN-800, ο οποίος είναι ένας αντιδραστήρας που ψύχεται με νάτριο και βρίσκεται στη Ρωσία. Ο BN-800 έχει σχεδιαστεί για να παράγει 880 MW ηλεκτρικής ενέργειας ενώ παράλληλα παράγει

νέο υλικό καυσίμου από απεμπλουτισμένο ουράνιο. Χρησιμοποιεί υγρό νάτριο ως ψυκτικό, το οποίο έχει εξαιρετικές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας και επιτρέπει στον αντιδραστήρα να λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες.

Ο BN-800 χρησιμοποιεί ταχέα νετρόνια, τα οποία επιτρέπουν την αποτελεσματική χρήση καυσίμου και την ικανότητα να τη δυνατότητας ποικιλίας καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου του απεμπλουτισμένου ουρανίου και του πλουτωνίου. Ο πυρήνας του αντιδραστήρα έχει σχεδιαστεί με μια “κουβέρτα” γόνιμου υλικού που περιβάλλει τα συγκροτήματα καυσίμου, γεγονός που επιτρέπει την αναπαραγωγή νέου καυσίμου.

Ο BN-800 διαθέτει επίσης πολλά συστήματα παθητικής ασφάλειας, συμπεριλαμβανομένου ενός συστήματος παθητικής απομάκρυνσης παραμένουσας θερμότητας και ενός συστήματος παθητικής διακοπής λειτουργίας, τα οποία βελτιώνουν την ασφάλεια και την αξιοπιστία του αντιδραστήρα. Ο αντιδραστήρας βρίσκεται σε λειτουργία από το 2014 και θεωρείται σημαντικό ορόσημο στην ανάπτυξη της τεχνολογίας αντιδραστήρων ταχέων νετρονίων (Kulikov, et al., 2016).

Αντιδραστήρες με βάση το θόριο - Αυτοί οι αντιδραστήρες χρησιμοποιούν θόριο ως καύσιμο αντί για ουράνιο, το οποίο έχει πολλά πιθανά πλεονεκτήματα, όπως βελτιωμένη ασφάλεια, μειωμένη παραγωγή αποβλήτων και χαμηλότερο κίνδυνο εξάπλωσης (proliferation, safeguards). Οι αντιδραστήρες με βάση το θόριο μπορεί να χρησιμοποιούν μια ποικιλία ψυκτικών και ρυθμίσεων, όπως λιωμένο αλάτι ή ψύξη με αερίο.

Ένα παράδειγμα αντιδραστήρα με βάση το θόριο είναι ο Indian Advanced Heavy Water Reactor (AHWR), ο οποίος αναπτύσσεται από το Bhabha Atomic Research Center (BARC) στην Ινδία (Bhabha Atomic Research Centre, n.d.). Το AHWR έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιεί το θόριο ως κύριο καύσιμο, με μια μικρή ποσότητα εμπλουτισμένου ουρανίου για την έναρξη της αντίδρασης. Η σχεδίαση AHWR χρησιμοποιεί βαρύ νερό για επιβραδυντή και ψυκτικό, που επιτρέπει βελτιωμένη οικονομία νετρονίων. Ο αντιδραστήρας ενσωματώνει επίσης έναν κύκλο καυσίμου με βάση το θόριο, όπου το θόριο ακτινοβολείται για την παραγωγή ουρανίου-233, το οποίο είναι ένα σχάσιμο υλικό που μπορεί να διατηρήσει μια πυρηνική αντίδραση.

Ο σχεδιασμός AHWR περιλαμβάνει επίσης πολλά χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας, όπως ένα σύστημα παθητικής απομάκρυνσης υπολειπόμενης θερμότητας και ένα σύστημα παθητικής απενεργοποίησης, που βελτιώνουν την ασφάλεια και την αξιοπιστία του αντιδραστήρα. Ο αντιδραστήρας είναι επίσης σχεδιασμένος να λειτουργεί σε χαμηλή πίεση, γεγονός που μειώνει τον κίνδυνο ατυχήματος απώλειας ψυκτικού.



Ο AHWR έχει πολλά πιθανά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους παραδοσιακούς αντιδραστήρες με βάση το ουράνιο, όπως η μειωμένη ποσότητα ραδιενεργών αποβλήτων μεγάλης διάρκειας ζωής και ένας δυνητικά χαμηλός κίνδυνος διάδοσης πυρηνικών όπλων. Ωστόσο, θα απαιτηθεί περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη για να καθοριστεί η σκοπιμότητα του AHWR για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε εμπορική κλίμακα.

Αυτά είναι μόνο μερικά παραδείγματα των πολλών διαφορετικών τύπων SMR υπό ανάπτυξη. Κάθε τύπος αντιδραστήρα έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και προκλήσεις και η επιλογή της τεχνολογίας θα εξαρτηθεί από παράγοντες όπως οι τοπικές ενεργειακές ανάγκες, η διαθεσιμότητα πόρων και οι κανονιστικές απαιτήσεις.

### **3.3 Τεχνολογίες ασφαλείας των SMR**

#### **3.3.1 Φυσική προστασία στο πλαίσιο των SMR**

Η φυσική προστασία είναι μια σημαντική παράμετρος στην ανάπτυξη και λειτουργία των Μικρών Αρθρωτών Αντιδραστήριων (SMR), οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν ενέργεια σε απομακρυσμένες ή απομονωμένες περιοχές. Όπως οι Densmore, T. & Duffy, V.G. (2021) έχουν σημειώσει, οι SMR έχουν μοναδικές προκλήσεις ασφαλείας λόγω του μικρού τους μεγέθους και της δυνατότητας χρήσης τους σε μη παραδοσιακές εφαρμογές. Η διασφάλιση της ασφάλειας των SMR περιλαμβάνει την προστασία τους από σκόπιμη βλάβη, όπως τρομοκρατικές ενέργειες ή δολιοφθορές, καθώς και τη διασφάλιση της ασφαλούς και ασφαλούς μεταφοράς πυρηνικών υλικών που σχετίζονται με SMR.

Για την προστασία των SMR από σκόπιμη βλάβη, μπορούν να ληφθούν ορισμένα μέτρα ασφαλείας, όπως σημειώνεται από τους Densmore, T. & Duffy, V.G. (2021) και τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) (2011). Για παράδειγμα, οι SMR μπορούν να σχεδιαστούν με χαρακτηριστικά ασφάλειας, όπως συστήματα περιορισμού που έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν σε εξωτερικές απειλές. Επιπλέον, μπορούν να ληφθούν μέτρα ασφαλείας σε εγκαταστάσεις SMR, όπως έλεγχοι πρόσβασης, κάμερες παρακολούθησης και ένοπλοι φρουροί. Αυτά τα μέτρα ασφαλείας μπορούν να βοηθήσουν στην αποτροπή πιθανών απειλών και να παρέχουν ένα επιπλέον επίπεδο προστασίας.

Μια άλλη κρίσιμη πτυχή της ασφάλειας στο πλαίσιο των SMR είναι η μεταφορά πυρηνικών υλικών. Η μεταφορά πυρηνικών υλικών υπόκειται σε αυστηρές ρυθμίσεις και υπόκειται σε αυστηρά πρωτόκολλα ασφαλείας, όπως σημειώνεται από τον ΔΟΑΕ (2011). Αυτά τα πρωτόκολλα περιλαμβάνουν ελέγχους ιστορικού για το προσωπικό που εμπλέκεται στις μεταφορές, συστήματα παρακολούθησης οχημάτων και μέτρα φυσικής ασφάλειας. Αυτά τα μέτρα βοηθούν να διασφαλιστεί ότι τα πυρηνικά υλικά μεταφέρονται με ασφάλεια, χωρίς να εκτρέπονται ή να κλαπούν.

Συμπερασματικά, η ασφάλεια είναι μια ουσιαστική πτυχή που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία των SMR, όπως σημειώνεται από τους Densmore, T. & Duffy, V.G. (2021). Με την ενσωμάτωση μέτρων ασφαλείας σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του SMR, συμπεριλαμβανομένων των μεταφορών, είναι δυνατός ο μετριασμός των κινδύνων και η διασφάλιση της ασφαλούς και ασφαλούς χρήσης της πυρηνικής ενέργειας. Αυτό είναι κρίσιμο όχι μόνο για την προστασία των εγκαταστάσεων και του προσωπικού SMR αλλά και για το ευρύτερο κοινό και το περιβάλλον.

### **3.3.2 Αρχείο ασφαλείας των SMR, συμπεριλαμβανομένων τυχόν ατυχημάτων ή περιστατικών που έχουν συμβεί**

Οι μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες (SMR) είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία και από το 2021 δεν υπήρχαν εμπορικές εγκαταστάσεις SMR σε λειτουργία. Ως εκ τούτου, δεν έχουν αναφερθεί ατυχήματα ή περιστατικά που να αφορούν SMR (NEA, 2021). Ωστόσο, υπήρξαν μερικά περιστατικά και ατυχήματα που αφορούσαν πειραματικούς αντιδραστήρες μικρής κλίμακας που δεν προορίζονταν για εμπορική λειτουργία.

Ένα τέτοιο περιστατικό συνέβη το 2011, στο ιαπωνικό πειραματικό Fast Breeder Reactor Monju. Ένα μηχάνημα χειρισμού καυσίμων δυσλειτουργούσε, προκαλώντας διαρροή μικρής ποσότητας ραδιενεργού νατρίου στο δοχείο συγκράτησης του αντιδραστήρα. Αυτό το περιστατικό οδήγησε σε προσωρινή διακοπή λειτουργίας του αντιδραστήρα και διερεύνηση ζητημάτων ασφαλείας (WNA, 2021).

Ένα άλλο περιστατικό συνέβη το 2016, στον ερευνητικό αντιδραστήρα Halden της Norwegian Thor Energy, ο οποίος είναι πειραματικός αντιδραστήρας μικρής κλίμακας. Ένα συγκρότημα καυσίμου υπέστη ζημιά κατά τη διάρκεια της τακτικής συντήρησης, γεγονός που οδήγησε σε διαρροή ψυκτικού. Ο αντιδραστήρας έκλεισε και διεξήχθη έρευνα για τα αίτια του συμβάντος (IAEA, 2016).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτά τα περιστατικά δεν σχετίζονταν με τα εγγενή χαρακτηριστικά ασφαλείας των SMR, καθώς ήταν πειραματικοί αντιδραστήρες που δεν είχαν σχεδιαστεί για εμπορική λειτουργία. Επιπλέον, και τα δύο περιστατικά περιορίστηκαν και δεν είχαν σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία ή στο περιβάλλον.

Συνολικά, ενώ υπήρξαν μερικά περιστατικά και ατυχήματα που αφορούσαν πειραματικούς αντιδραστήρες μικρής κλίμακας, δεν υπήρξαν ατυχήματα ή περιστατικά με εμπορικές εγκαταστάσεις SMR. Το ιστορικό ασφαλείας των SMR αναμένεται να είναι καλό, λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών ασφαλείας τους και του ισχυρού ρυθμιστικού πλαισίου που διέπει τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία τους (NEA, 2021).

### **3.3.3 Ρυθμιστικό πλαίσιο των SMR, συμπεριλαμβανομένων των διεθνών, εθνικών και τοπικών κανονισμών**

Οι μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες (SMR), όπως όλοι οι πυρηνικοί αντιδραστήρες, υπόκεινται σε ένα ισχυρό ρυθμιστικό πλαίσιο που διέπει τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία τους. Αυτό το ρυθμιστικό πλαίσιο περιλαμβάνει διεθνείς, εθνικούς και τοπικούς κανονισμούς, οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί όλοι για να διασφαλίζουν την ασφάλεια των SMR.

Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη ρύθμιση της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των SMR, σε διεθνές επίπεδο. Ο ΔΟΑΕ παρέχει καθοδήγηση σχετικά με την πυρηνική ασφάλεια και τις διασφαλίσεις, και συνεργάζεται με τα κράτη μέλη για την ανάπτυξη και την εφαρμογή προτύπων ασφάλειας για πυρηνικές εγκαταστάσεις, συμπεριλαμβανομένων των SMR (IAEA, 2021).

Σε εθνικό επίπεδο, κάθε χώρα έχει τη δική της ρυθμιστική υπηρεσία που επιβλέπει τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των SMR. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, για παράδειγμα, η Πυρηνική Ρυθμιστική Επιτροπή (NRC) είναι υπεύθυνη για τη ρύθμιση της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας, ενώ στον Καναδά, η Καναδική Επιτροπή Πυρηνικής Ασφάλειας (CNSC) διαδραματίζει παρόμοιο ρόλο (NRC, 2021, CNSC, 2021). Αυτοί οι ρυθμιστικοί φορείς θεσπίζουν απαιτήσεις αδειοδότησης, πρότυπα ασφαλείας και προγράμματα επιθεώρησης για να διασφαλίσουν ότι οι SMR λειτουργούν με ασφάλεια.

Σε τοπικό επίπεδο, οι εγκαταστάσεις SMR υπόκεινται σε διάφορους κανονισμούς και άδειες που εκδίδονται από τις τοπικές αρχές, όπως οικοδομικές άδειες, περιβαλλοντικές άδειες και άδειες χρήσης γης. Αυτές οι άδειες και οι κανονισμοί έχουν σχεδιαστεί για να διασφαλίζουν ότι οι SMR τοποθετούνται και λειτουργούν με τρόπο που συνάδει με τους τοπικούς νόμους και κανονισμούς και ότι δεν αποτελούν απειλή για τη δημόσια υγεία ή το περιβάλλον.

Εκτός από αυτούς τους διεθνείς, εθνικούς και τοπικούς κανονισμούς, οι προγραμματιστές και οι χειριστές SMR πρέπει επίσης να συμμορφώνονται με διάφορα βιομηχανικά πρότυπα και βέλτιστες πρακτικές, όπως αυτά που αναπτύχθηκαν από την Αμερικανική Εταιρεία Μηχανολόγων Μηχανικών (ASME) και τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC). (ASME, 2021, IEC, 2021).

Συνολικά, το ρυθμιστικό πλαίσιο που διέπει την πυρηνική ενέργεια είναι ισχυρό και ολοκληρωμένο και έχει σχεδιαστεί για να διασφαλίζει την ασφαλή χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Το πλαίσιο περιλαμβάνει διεθνείς, εθνικούς και τοπικούς κανονισμούς, καθώς και βιομηχανικά πρότυπα και βέλτιστες πρακτικές. Η

τροποποίηση και η προσαρμογή του πλαισίου, ώστε να καλύπτουν τους SMR, είναι ήδη σε έρευνα και εξέλιξη σε πολλές χώρες, όπως και σε διεθνές επίπεδο, καθώς ο ΔΟΑΕ συνεχώς ανανεώνει και συμπληρώνει τα σχετικά πρότυπα και τις κατευθυντήριες οδηγίες.

### **3.3.4 Διαφορές μεταξύ ρυθμιστικών απαιτήσεων για SMR και παραδοσιακούς πυρηνικούς αντιδραστήρες**

Μελέτες έχουν επισημάνει ορισμένες από τις διαφορές μεταξύ των κανονιστικών απαιτήσεων για μικρούς αρθρωτούς αντιδραστήρες (SMR) και συμβατικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες. Σύμφωνα με έκθεση του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ), οι ρυθμιστικές απαιτήσεις για τους SMR είναι πιθανό να επικεντρωθούν περισσότερο στον σχεδιασμό και την αξιοπιστία των χαρακτηριστικών παθητικής ασφάλειας, καθώς και στην στιβαρότητα των συστημάτων περιορισμού, σε σύγκριση με τους συμβατικούς αντιδραστήρες (ΟΟΣΑ, 2021).

Τα χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας είναι συστήματα που βασίζονται σε φυσικά φαινόμενα, όπως η βαρύτητα ή η φυσική κυκλοφορία, για την εκτέλεση των λειτουργιών ασφαλείας τους, αντί να απαιτούν ενεργή επέμβαση από χειριστές ή εξοπλισμό. Παραδείγματα χαρακτηριστικών παθητικής ασφάλειας σε SMR περιλαμβάνουν συστήματα ψύξης που βασίζονται στη βαρύτητα και βρόχους ψυκτικού υγρού φυσικής κυκλοφορίας. Το παραπάνω σημαίνει επίσης ότι οι κανονιστικές απαιτήσεις για τους SMR είναι πιθανό να επικεντρωθούν στην αξιοπιστία αυτών των χαρακτηριστικών ασφαλείας, διασφαλίζοντας ότι μπορούν να εκτελούν τις λειτουργίες τους αποτελεσματικά και με συνέπεια με την πάροδο του χρόνου.

Αναφορικά με τα συστήματα συγκράτησης αρχικά είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι πρόκειται για δομές ή εξαρτήματα που έχουν σχεδιαστεί για να εμποδίζουν την απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών σε περίπτωση ατυχήματος. Αυτά τα συστήματα μπορεί να περιλαμβάνουν φυσικά εμπόδια, όπως τοίχους από οπλισμένο σκυρόδεμα ή δοχεία συγκράτησης από χάλυβα, ή μηχανικά χαρακτηριστικά, όπως παθητικούς αυτοκαταλυτικούς ανασυνδυαστές (PARs) που μπορούν να αποτρέψουν τη συσσώρευση αερίου υδρογόνου σε περίπτωση διαρροής ψυκτικού. Η έκθεση του ΟΟΣΑ λοιπόν υποδηλώνει ότι οι ρυθμιστικές απαιτήσεις για SMR ενδέχεται να δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στα συστήματα συγκράτησης από εκείνα για τους συμβατικούς αντιδραστήρες, γεγονός που είναι πιθανό να οφείλεται στο γεγονός ότι οι SMR έχουν σχεδιαστεί για να είναι μικρότεροι και πιο συμπαγείς από τους συμβατικούς αντιδραστήρες και επομένως μπορεί να έχουν λιγότερο διαθέσιμο χώρο για δομές συγκράτησης. Αυτό σημαίνει ότι τα συστήματα συγκράτησης μπορεί να χρειαστεί να

είναι πιο στιβαρά και αποτελεσματικά προκειμένου να αποτραπεί η απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών σε περίπτωση ατυχήματος.

Μια άλλη μελέτη από την Υπηρεσία Πυρηνικής Ενέργειας (NEA) εντόπισε την ανάγκη για πιο ευέλικτες ρυθμιστικές απαιτήσεις για SMR, οι οποίοι είναι συχνά σχεδιασμένοι να είναι πιο προσαρμόσιμοι και αρθρωτοί από τους συμβατικούς αντιδραστήρες (NEA, 2020). Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την αντιμετώπιση ζητημάτων όπως η ασφάλεια των μεταφερόμενων SMR και η προσαρμογή των παραλλαγών στο σχεδιασμό και την εφαρμογή.

Η αρθρωτή φύση των SMR σημαίνει επίσης ότι μπορεί να υπάρχει μεγαλύτερη διαφοροποίηση στο σχεδιασμό και την εφαρμογή τους σε σύγκριση με τους συμβατικούς αντιδραστήρες. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει προκλήσεις για τις ρυθμιστικές αρχές που πρέπει να διασφαλίσουν ότι τηρούνται τα πρότυπα ασφαλείας, ενώ παράλληλα αντιμετωπίζουν αυτές τις παραλλαγές. Η έκθεση NEA συνέστησε ότι οι κανονιστικές απαιτήσεις για τους SMR θα πρέπει να είναι αρκετά ευέλικτες ώστε να επιτρέπουν διαφοροποιήσεις στο σχεδιασμό και την εφαρμογή, ενώ παράλληλα θα διασφαλίζεται η ασφάλεια.

Η έκθεση NEA σημείωσε επίσης ότι τα ρυθμιστικά πλαίσια για τους SMR μπορεί να διαφέρουν από αυτά για τους συμβατικούς αντιδραστήρες, λόγω της σχετικής καινοτομίας και της μικρότερης κλίμακας (NEA, 2020). Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι SMR ενδέχεται να υπόκεινται σε ταχύτερες και πιο βελτιωμένες ρυθμιστικές διαδικασίες, προκειμένου να ενθαρρυνθεί η ανάπτυξή τους.

Επιπροσθέτως, μια μελέτη από το Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT) διαπίστωσε ότι οι απαιτήσεις αδειοδότησης για SMR μπορεί να διαφέρουν από αυτές για τους συμβατικούς αντιδραστήρες, με μεγαλύτερη έμφαση στην επίδειξη της ασφαλείας και της αξιοπιστίας νέων και καινοτόμων τεχνολογιών (MIT, 2018).

Η έκθεση του MIT συνέστησε ότι η διαδικασία αδειοδότησης για SMR θα πρέπει να περιλαμβάνει μια συλλογική προσπάθεια μεταξύ των ρυθμιστικών αρχών, των ενδιαφερομένων του κλάδου και του κοινού για να διασφαλιστεί ότι η ασφάλεια αυτών των καινοτόμων τεχνολογιών αξιολογείται διεξοδικά. Η έκθεση πρότεινε επίσης ότι οι ρυθμιστικές αρχές μπορεί να χρειαστεί να είναι πιο προορατικές στη συνεργασία με τους προγραμματιστές SMR για να εντοπίσουν πιθανά προβλήματα ασφαλείας και να τα αντιμετωπίσουν κατά τη διαδικασία αδειοδότησης.

Συνολικά, ενώ οι κανονιστικές απαιτήσεις για SMR μοιράζονται τον ίδιο στόχο της διασφάλισης της ασφαλούς και ασφαλούς χρήσης της πυρηνικής ενέργειας με τους συμβατικούς αντιδραστήρες, τα μοναδικά χαρακτηριστικά των SMR ενδέχεται να απαιτούν ένα πιο ευέλικτο και προσαρμόσιμο ρυθμιστικό πλαίσιο προσαρμοσμένο

στο σχεδιασμό, την εφαρμογή και την εφαρμογή τους και χαρακτηριστικά ασφαλείας.

## 4 . Εφαρμογές

### 4.1 Πιθανές εφαρμογές των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR)

Αυτή η ενότητα διερευνά το φάσμα πιθανών εφαρμογών των SMR και εξετάζει τα πλεονεκτήματα, τις προκλήσεις και τις επιπτώσεις τους. Αναλύοντας τις πιθανές εφαρμογές των SMR, μπορούμε να αποκτήσουμε γνώσεις για το ρόλο τους στην αντιμετώπιση των ενεργειακών αναγκών, στην προώθηση καθαρών πηγών ενέργειας και στην υποστήριξη διαφόρων βιομηχανικών τομέων.

#### 4.1.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Μία από τις κύριες εφαρμογές των SMR είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι SMR προσφέρουν ευελιξία ως προς το μέγεθος και την επεκτασιμότητα, καθιστώντας τα κατάλληλα τόσο για κεντρική όσο και για αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας. Αυτοί οι αντιδραστήρες μπορούν να παρέχουν καθαρή και αξιόπιστη ηλεκτρική ενέργεια για την υποστήριξη οικιακών, εμπορικών και βιομηχανικών τομέων, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες περιοχές ή περιοχές εκτός δικτύου. Ο αρθρωτός σχεδιασμός των SMR επιτρέπει ανάπτυξη και κατασκευή, πιο γρήγορα σε σχέση με τους συμβατικούς πυρηνικούς σταθμούς, μειώνοντας τον χρόνο παράδοσης και το κόστος που σχετίζονται.

Οι SMR διαθέτουν σημαντικές δυνατότητες για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές και περιοχές εκτός δικτύου που δεν έχουν πρόσβαση σε κεντρική υποδομή δικτύου. Αυτές οι περιοχές βασίζονται συχνά σε δαπανηρή και επιβλαβή για το περιβάλλον παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα. Οι SMR προσφέρουν μια βιώσιμη εναλλακτική, παρέχοντας καθαρή και οικονομικά προσιτή ενέργεια σε απομακρυσμένες κοινότητες, επιχειρήσεις εξόρυξης, στρατιωτικές εγκαταστάσεις και υπεράκτιες πλατφόρμες. Το συμπαγές μέγεθος και τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας των SMR τους καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλους για εφαρμογές εκτός δικτύου.

Οι SMR μπορούν επίσης να παρέχουν αξιόπιστη ισχύ βασικού φορτίου, εξασφαλίζοντας σταθερή και συνεχή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Η σταθερή παραγωγή των SMR συμβάλλει στην κάλυψη της σταθερής ενεργειακής ζήτησης σε οικιακούς, εμπορικούς και βιομηχανικούς τομείς. Προσφέροντας μια συνεχή και προβλέψιμη πηγή ενέργειας, οι SMR συμβάλλουν στη σταθερότητα του δικτύου και συμπληρώνουν τις διαλείπουσες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, που παρουσιάζουν φυσικές διακυμάνσεις.

Οι SMR ενισχύουν την ανθεκτικότητα του δικτύου διαφοροποιώντας το ενεργειακό μείγμα και μειώνοντας την εξάρτηση από μία μόνο πηγή ενέργειας. Η ενσωμάτωση των SMR στην υποδομή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνει την ενεργειακή ασφάλεια παρέχοντας σταθερή και ανθεκτική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμη και κατά τη διάρκεια διακοπών σε άλλα μέρη του δικτύου. Οι SMR μπορούν να λειτουργήσουν ως στρατηγικό πλεονέκτημα, συμβάλλοντας σε ένα ισχυρό και αξιόπιστο ενεργειακό σύστημα.

Παρόλα αυτά, η εφαρμογή SMR για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί την ανάπτυξη ή/και προσαρμογή των ρυθμιστικών πλαισίων για την αντιμετώπιση των μοναδικών χαρακτηριστικών αυτών των αντιδραστήρων. Πρέπει να θεσπιστούν πρότυπα ασφαλείας, διαδικασίες αδειοδότησης και ρυθμιστική εποπτεία για να διασφαλιστεί η ασφαλής και υπεύθυνη λειτουργία των SMR. Τα κράτη και οι ρυθμιστικοί φορείς πρέπει να αναπτύξουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο που να λαμβάνει υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τις ποικίλες εφαρμογές των SMR.

Οι SMR συνεπάγονται σημαντικό κόστος κεφαλαίου, το οποίο μπορεί να δημιουργήσει προκλήσεις για την ευρεία εξάπλωσή τους. Οι επιλογές χρηματοδότησης και τα επενδυτικά μοντέλα πρέπει να διερευνηθούν για να καταστούν τους SMR οικονομικά βιώσιμους. Οι συμπράξεις δημόσιου και ιδιωτικού τομέα, η κρατική υποστήριξη και οι καινοτόμοι μηχανισμοί χρηματοδότησης μπορούν να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στην υπέρβαση των οικονομικών φραγμών και στην παροχή κινήτρων για την ανάπτυξη και εφαρμογή των SMR.

Η δημόσια αποδοχή και η εμπιστοσύνη στην πυρηνική ενέργεια, συμπεριλαμβανομένων των SMR, είναι ουσιαστικής σημασίας για την επιτυχή εφαρμογή τους. Θα πρέπει να διεξάγονται εκστρατείες ενημέρωσης και ευαισθητοποίησης του κοινού για την αντιμετώπιση ανησυχιών και παρανοήσεων και την προώθηση ενός εποικοδομητικού διαλόγου γύρω από τα οφέλη και την ασφάλεια των SMR. Η οικοδόμηση εμπιστοσύνης του κοινού στους SMR απαιτεί διαφανή επικοινωνία, εκπαίδευση και συμμετοχή των ενδιαφερομένων στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων.

Η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων που παράγονται από τους SMR αποτελεί επίσης ένα κρίσιμο ζήτημα. Πρέπει να θεσπιστούν αποτελεσματικές στρατηγικές διαχείρισης αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένης της αποθήκευσης, της διάθεσης και της πιθανής ανακύκλωσης ή επανεπεξεργασίας, για να διασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη ασφάλεια και περιβαλλοντική βιωσιμότητα των SMR. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη στις τεχνολογίες διαχείρισης αποβλήτων είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης.

Οι SMR, όπως κάθε πυρηνική τεχνολογία, εγείρουν ανησυχίες σχετικά με τους κινδύνους διάδοσης των πυρηνικών όπλων. Τα αυστηρά μέτρα μη διάδοσης, η



διεθνής συνεργασία και η τήρηση των διασφαλίσεων και των διεθνών συμφωνιών είναι ζωτικής σημασίας για την ελαχιστοποίηση των κινδύνων διάδοσης που συνδέονται με τους SMR.

#### **4.1.2 Τηλεθέρμανση**

Η τηλεθέρμανση είναι μια βασική εφαρμογή των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR) που προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση, τη μείωση των εκπομπών άνθρακα και τη βιώσιμη αστική ανάπτυξη. Αυτή η ανάλυση διερευνά τις πιθανές εφαρμογές των SMR για τηλεθέρμανση, εξετάζοντας τα οφέλη, τις προκλήσεις και τις επιπτώσεις τους. Διερευνώντας τις εφαρμογές τηλεθέρμανσης των SMR, μπορούμε να αποκτήσουμε γνώσεις για το ρόλο τους στην παροχή αξιόπιστης και βιώσιμης θερμότητας, την προώθηση της ενεργειακής απόδοσης και την απαλλαγή των αστικών περιβαλλόντων από άνθρακα.

Οι SMR μπορούν να χρησιμεύσουν ως αξιόπιστη και συνεχής πηγή θερμότητας για συστήματα τηλεθέρμανσης. Η σταθερή και προβλέψιμη απόδοση των SMR εξασφαλίζει σταθερή παροχή ζεστού νερού ή ατμού για τη θέρμανση χώρου και τις ανάγκες χρήσης ζεστού νερού. Παρέχοντας μια σταθερή πηγή θερμότητας, οι SMR συμβάλλουν στην αξιοπιστία και την ανθεκτικότητα των δικτύων τηλεθέρμανσης, ιδιαίτερα σε περιόδους αυξημένης ζήτησης και ακραίες καιρικές συνθήκες.

Η ενσωμάτωση των SMR στα συστήματα τηλεθέρμανσης ενισχύει τη συνολική ενεργειακή απόδοση. Οι SMR μπορούν να παράγουν τόσο ηλεκτρική ενέργεια όσο και θερμότητα ταυτόχρονα μέσω διαδικασιών συνδυασμένης θερμότητας και ισχύος (CHP) ή συμπαραγωγής. Αυτή η προσέγγιση συμπαραγωγής βελτιώνει τη συνολική χρήση καυσίμου και μειώνει τις απώλειες ενέργειας σε σύγκριση με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Ως πηγή ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα, οι SMR μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με την τηλεθέρμανση, συμβάλλοντας στις τοπικές και παγκόσμιες προσπάθειες μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. [Chionis, 2018].

Οι SMR προσφέρουν το πλεονέκτημα της αποκεντρωμένης παραγωγής θερμότητας, επιτρέποντας την παραγωγή θερμότητας πιο κοντά στους τελικούς χρήστες. Με την τοποθέτηση SMR κοντά σε αστικές περιοχές ή εντός δικτύων τηλεθέρμανσης, οι απώλειες θερμότητας κατά τη μετάδοση μπορούν να ελαχιστοποιηθούν, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος. Η αποκεντρωμένη παραγωγή θερμότητας μειώνει επίσης την εξάρτηση από τη μεταφορά θερμότητας σε μεγάλες αποστάσεις και τη σχετική υποδομή, η οποία μπορεί να είναι δαπανηρή και λιγότερο ενεργειακά αποδοτική.

Η χρήση SMR στα συστήματα τηλεθέρμανσης ενισχύει την ποικιλομορφία των καυσίμων και την ενεργειακή ασφάλεια. Οι SMR μπορούν να χρησιμοποιούν διάφορους τύπους καυσίμων, συμπεριλαμβανομένων καυσίμων ουρανίου, θορίου ή μικτών οξειδίων, παρέχοντας ευελιξία και μειώνοντας την εξάρτηση από μία μόνο πηγή ενέργειας. Η ποικιλία των επιλογών καυσίμων βοηθά στον μετριασμό των κινδύνων που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα καυσίμων, την αστάθεια των τιμών και τους γεωπολιτικούς παράγοντες. Με τη διαφοροποίηση του ενεργειακού μείγματος, οι SMR συμβάλλουν σε μια πιο ανθεκτική και ασφαλή υποδομή τηλεθέρμανσης.

Οι SMR στα συστήματα τηλεθέρμανσης μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα από το ηλεκτρικό δίκτυο, παρέχοντας αξιόπιστη παροχή θερμότητας ακόμη και σε διακοπές ρεύματος. Αυτή η ανεξαρτησία του δικτύου ενισχύει την ανθεκτικότητα των δικτύων τηλεθέρμανσης, διασφαλίζοντας την αδιάλειπτη παροχή θερμότητας σε οικιακούς, εμπορικούς και βιομηχανικούς χρήστες. Οι SMR μπορούν να χρησιμεύσουν ως κρίσιμη υποδομή σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, όπως φυσικές καταστροφές ή βλάβες δικτύου, διατηρώντας βασικές υπηρεσίες και προστατεύοντας ευάλωτους πληθυσμούς.

Η ενσωμάτωση των SMR στα συστήματα τηλεθέρμανσης απαιτεί τήρηση αυστηρών προτύπων ασφαλείας και συμμόρφωσης με τους κανονισμούς. Πρέπει να θεσπιστούν πρωτόκολλα ασφαλείας, διαδικασίες αδειοδότησης και ρυθμιστική εποπτεία για να διασφαλιστεί η ασφαλής και υπεύθυνη λειτουργία των SMR σε κοντινή απόσταση από κατοικημένες περιοχές. Τα ρυθμιστικά πλαίσια πρέπει να αντιμετωπίζουν τα μοναδικά χαρακτηριστικά και τις ειδικές προκλήσεις που σχετίζονται με τους SMR σε εφαρμογές τηλεθέρμανσης.

Η δημόσια αποδοχή και η εμπιστοσύνη στην πυρηνική ενέργεια, συμπεριλαμβανομένων των SMR, είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή εφαρμογή τους στα συστήματα τηλεθέρμανσης. Η συμμετοχή του κοινού, η εκπαίδευση και οι εκστρατείες ευαισθητοποίησης είναι απαραίτητες για την αντιμετώπιση ανησυχιών, την εξάλειψη των παρανοήσεων και την προώθηση ενός εποικοδομητικού διαλόγου σχετικά με τα οφέλη και την ασφάλεια των SMR. Η οικοδόμηση εμπιστοσύνης του κοινού στους SMR απαιτεί διαφανή επικοινωνία, συμμετοχή των ενδιαφερομένων και επίδειξη επιτυχημένων επιχειρησιακών εμπειριών.

Η ενσωμάτωση SMR στα υπάρχοντα συστήματα τηλεθέρμανσης ενδέχεται να απαιτήσει αναβαθμίσεις και τροποποιήσεις υποδομής για να διασφαλιστεί η συμβατότητα. Τα συστήματα ανταλλαγής θερμότητας, τα δίκτυα διανομής και οι τεχνολογίες μεταφοράς θερμότητας μπορεί να χρειαστεί να προσαρμοστούν ή να επεκταθούν για να προσαρμόσουν τα μοναδικά χαρακτηριστικά και την απόδοση θερμότητας των SMR. Ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός, οι μελέτες σκοπιμότητας και η

συνεργασία με φορείς εκμετάλλευσης τηλεθέρμανσης είναι απαραίτητες για την αξιολόγηση των απαιτήσεων υποδομής και τη βελτιστοποίηση της ενσωμάτωσης των SMR στα συστήματα τηλεθέρμανσης.

Η καταλληλότητα των SMR για εφαρμογές τηλεθέρμανσης εξαρτάται από την τοπική ζήτηση θερμότητας και την επεκτασιμότητα του συστήματος. Η προσεκτική ανάλυση των απαιτήσεων θερμότητας, της πυκνότητας πληθυσμού και του πολεοδομικού σχεδιασμού είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό του βέλτιστου μεγέθους και του αριθμού των SMR που απαιτούνται για την κάλυψη της ζήτησης θερμότητας της περιοχής. Λαμβάνοντας υπόψη την επεκτασιμότητα των SMR εξασφαλίζεται η ευελιξία για επέκταση ή μείωση της ικανότητας παραγωγής θερμότητας με βάση την εξελισσόμενη ζήτηση θερμότητας και την αστική ανάπτυξη.

Η επιτυχής εφαρμογή των SMR στα συστήματα τηλεθέρμανσης απαιτεί τη συμμετοχή της κοινότητας και τη συνεργασία των ενδιαφερομένων. Ο ανοιχτός διάλογος, η συμμετοχή των τοπικών κοινοτήτων και η διαβούλευση με τους κατοίκους, τις επιχειρήσεις και τους σχετικούς ενδιαφερόμενους συμβάλλουν στην οικοδόμηση εμπιστοσύνης, στην αντιμετώπιση των ανησυχιών και στη διασφάλιση ότι η ενσωμάτωση των SMR ευθυγραμμίζεται με τις ανάγκες και τις προτεραιότητες της κοινότητας. Η έγκαιρη δέσμευση και η διαφάνεια στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων ενισχύουν την αποδοχή και την υποστήριξη των SMR στις εφαρμογές τηλεθέρμανσης.

Συμπερασματικά, οι πιθανές εφαρμογές των Small Modular Reactors (SMRs) για τηλεθέρμανση προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως αξιόπιστη παροχή θερμότητας, ενεργειακή απόδοση, μείωση του άνθρακα, ποικιλομορφία καυσίμου και ανεξαρτησία του δικτύου. Ωστόσο, η αντιμετώπιση προκλήσεων που σχετίζονται με την ασφάλεια, τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς, την αντίληψη του κοινού, τις απαιτήσεις υποδομής, τις εκτιμήσεις κόστους, τη διαχείριση απορριμμάτων και τη συνεργασία των ενδιαφερομένων είναι απαραίτητη για την επιτυχή εφαρμογή των SMR στα συστήματα τηλεθέρμανσης. Αναγνωρίζοντας και αντιμετωπίζοντας αυτές τις προκλήσεις, μπορούμε να ξεκλειδώσουμε το πλήρες δυναμικό των SMR στην τηλεθέρμανση, συμβάλλοντας σε βιώσιμα και απελευθερωμένα αστικά περιβάλλοντα. Οι SMR, ως καθαρή και αποτελεσματική πηγή θερμότητας, έχουν τη δυνατότητα να φέρουν επανάσταση στην τηλεθέρμανση, παρέχοντας αξιόπιστη και βιώσιμη θέρμανση, ενώ παράλληλα μειώνουν τις εκπομπές άνθρακα και ενισχύουν την ενεργειακή ασφάλεια στις πόλεις και τις κοινότητες.

#### **4.1.3 Αφαλάτωση και άλλες**

Η διαδικασία μετατροπής του θαλασσινού νερού σε γλυκό, είναι μια ουσιαστική λύση για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας σε πολλές περιοχές σε όλο τον κόσμο. Οι μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες (SMR) διαθέτουν σημαντικές δυνατότητες για εφαρμογές αφαλάτωσης λόγω της ικανότητάς τους να παρέχουν ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Αυτή η ανάλυση διερευνά τις εφαρμογές αφαλάτωσης των SMR, εξετάζοντας τα οφέλη, τις προκλήσεις και τις επιπτώσεις τους. Αξιοποιώντας τις δυνατότητες των SMR, μπορούμε να αποκτήσουμε γνώσεις για το ρόλο τους στη βιώσιμη παραγωγή νερού, την ενίσχυση της ασφάλειας του νερού και την προώθηση της οικονομικής ανάπτυξης.

Οι SMR μπορούν να επιτύχουν υψηλή ενεργειακή απόδοση στις διαδικασίες αφαλάτωσης. Χρησιμοποιώντας την περίσσεια θερμότητας που παράγεται κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι SMR μπορούν να ενσωματωθούν με τεχνολογίες αφαλάτωσης όπως η γρήγορη απόσταξη πολλαπλών σταδίων, η αντίστροφη ώσμωση ή η απόσταξη πολλαπλών επιπτώσεων. Αυτή η προσέγγιση συμπαραγωγής μειώνει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας και το λειτουργικό κόστος της αφαλάτωσης, καθιστώντας την μια πιο οικονομικά βιώσιμη λύση [Elgowainy, 2018].

Ο αρθρωτός σχεδιασμός των SMR επιτρέπει την επεκτασιμότητα και την ευελιξία στις εφαρμογές αφαλάτωσης. Σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς πυρηνικούς σταθμούς μεγάλης κλίμακας, οι SMR μπορούν να αναπτυχθούν σε μικρότερη δυναμικότητα, επιτρέποντας τη σπονδυλωτή επέκταση με βάση τη ζήτηση νερού. Αυτό το χαρακτηριστικό επεκτασιμότητας είναι ιδιαίτερα πλεονεκτικό για περιοχές με ποικίλες απαιτήσεις σε νερό ή για περιοχές με περιορισμένο χώρο για ανάπτυξη υποδομής.

Οι SMR προσφέρουν μια αξιόπιστη και συνεχή πηγή ενέργειας για αφαλάτωση, εξασφαλίζοντας σταθερή παροχή γλυκού νερού. Η εγγενής σταθερότητα και προβλεψιμότητα της λειτουργίας των SMR συμβάλλουν στην αξιοπιστία και την ανθεκτικότητα των μονάδων αφαλάτωσης, μειώνοντας την εξάρτηση από εξωτερικές πηγές ενέργειας. Αυτό ενισχύει την ασφάλεια των υδάτων, ειδικά σε περιοχές με υδατική πίεση όπου η πρόσβαση σε πόρους γλυκού νερού είναι περιορισμένη.

Η ενσωμάτωση των SMR με τις διαδικασίες αφαλάτωσης συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών άνθρακα. Αντικαθιστώντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα με πυρηνική ενέργεια χαμηλών εκπομπών άνθρακα, οι SMR συμβάλλουν στον μετριασμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με την αφαλάτωση. Αυτό ευθυγραμμίζεται με τους παγκόσμιους στόχους μετριασμού της κλιματικής αλλαγής και προωθεί τη βιώσιμη παραγωγή νερού με μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η ενσωμάτωση των SMR σε εφαρμογές αφαλάτωσης απαιτεί αυστηρή τήρηση των πρωτοκόλλων ασφαλείας και τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς. Η διασφάλιση

της ασφαλούς λειτουργίας των SMR και η πρόληψη πιθανών ατυχημάτων ή συμβάντων είναι υψίστης σημασίας. Θα πρέπει να υπάρχουν ολοκληρωμένες αξιολογήσεις ασφάλειας, διαδικασίες αδειοδότησης και ρυθμιστική εποπτεία για την αντιμετώπιση των μοναδικών παραμέτρων που σχετίζονται με τους SMR σε μονάδες αφαλάτωσης [Saleh, 2018].

Η οικονομική βιωσιμότητα των SMR σε εφαρμογές αφαλάτωσης εξαρτάται από το κόστος και τις διαθέσιμες επιλογές χρηματοδότησης. Ενώ οι SMR προσφέρουν πλεονεκτήματα όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση και την παραγωγή νερού, το αρχικό κόστος κεφαλαίου που σχετίζεται με την ανάπτυξή τους μπορεί να είναι σημαντικό. Η διερεύνηση καινοτόμων μηχανισμών χρηματοδότησης, συμπράξεων δημόσιου-ιδιωτικού τομέα και κρατικής υποστήριξης μπορεί να βοηθήσει στην υπέρβαση των οικονομικών φραγμών και να καταστήσει την πυρηνική αφαλάτωση οικονομικά εφικτή.

Οι εφαρμογές αφαλάτωσης των SMR προσφέρουν μια πολλά υποσχόμενη λύση για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου οι πόροι γλυκού νερού είναι περιορισμένοι. Αξιοποιώντας τα οφέλη των SMR, όπως η ενεργειακή απόδοση, η επεκτασιμότητα και η αξιοπιστία, η πυρηνική αφαλάτωση μπορεί να συμβάλει στη βιώσιμη παραγωγή νερού, να ενισχύσει την ασφάλεια του νερού και να προωθήσει την οικονομική ανάπτυξη. Καθώς ο κόσμος αντιμετωπίζει αυξανόμενες προκλήσεις για το νερό, οι SMR παρέχουν μια βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον επιλογή για την κάλυψη της αυξανόμενης παγκόσμιας ζήτησης για γλυκό νερό.

Εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την τηλεθέρμανση και την αφαλάτωση, οι μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες (SMR) έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες άλλες εφαρμογές. Μερικές από αυτές τις εφαρμογές περιλαμβάνουν:

1. **Θερμότητα διεργασίας:** Οι SMR μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή θερμότητας διεργασίας για βιομηχανικές εφαρμογές όπως η χημική κατασκευή, η διύλιση πετρελαίου και η παραγωγή υδρογόνου. Η παραγωγή υψηλής θερμοκρασίας των SMR μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε βιομηχανικές διεργασίες, αντικαθιστώντας τις πηγές θερμότητας που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα και μειώνοντας τις εκπομπές άνθρακα [IAEA].
2. **Απομακρυσμένη παραγωγή ενέργειας:** Οι SMR μπορούν να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στην παροχή αξιόπιστης ενέργειας σε απομακρυσμένες και εκτός δικτύου κοινότητες, σε επιχειρήσεις εξόρυξης και στρατιωτικές εγκαταστάσεις. Το συμπαγές τους μέγεθος, ο αρθρωτός σχεδιασμός και η ικανότητά τους να λειτουργούν για παρατεταμένες περιόδους χωρίς

ανεφοδιασμό τους καθιστούν κατάλληλους για απομακρυσμένη παραγωγή ενέργειας, μειώνοντας την εξάρτηση από γεννήτριες ντίζελ ή μετάδοση ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις [World Nuclear Association].

3. **Παραγωγή Υδρογόνου:** Οι SMR μπορούν να ενσωματωθούν με τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου, όπως η αναμόρφωση μεθανίου ατμού ή η ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας για την παραγωγή υδρογόνου ως πηγή καθαρού καυσίμου. Το υδρογόνο που παράγεται από SMRs μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των μεταφορών, της αποθήκευσης ενέργειας και των βιομηχανικών διεργασιών, συμβάλλοντας στις προσπάθειες απανθρακοποίησης [IAEA].
4. **Παραγωγή ιατρικών ισοτόπων:** Οι SMR μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ιατρικών ισοτόπων που χρησιμοποιούνται στη διαγνωστική απεικόνιση και τη θεραπεία του καρκίνου. Η υψηλή ροή νετρονίων των SMRs επιτρέπει την αποτελεσματική παραγωγή ισοτόπων, συμπεριλαμβανομένων του μολυβδαινίου-99 και του τεχνητίου-99m, τα οποία είναι ζωτικής σημασίας για ιατρικές διαδικασίες και έχουν σύντομο χρόνο ημιζωής, απαιτώντας εγκαταστάσεις παραγωγής επί τόπου [NEA].
5. **Παράκτια παραγωγή ενέργειας:** Οι SMR μπορούν να αναπτυχθούν σε υπεράκτιες περιοχές για να παρέχουν ενέργεια σε υπεράκτιες πλατφόρμες πετρελαίου και φυσικού αερίου, υπεράκτια αιολικά πάρκα ή απομακρυσμένες παράκτιες κοινότητες. Το συμπαγές μέγεθος και τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας των SMR τα καθιστούν κατάλληλα για υπεράκτιες εγκαταστάσεις, διασφαλίζοντας αξιόπιστη παροχή ρεύματος σε δύσκολα θαλάσσια περιβάλλοντα.
6. **Μικροδίκτυα και ενεργειακή ανθεκτικότητα:** Οι SMR μπορούν να ενσωματωθούν σε συστήματα μικροδικτύων για να ενισχύσουν την ενεργειακή ανθεκτικότητα και τη σταθερότητα του δικτύου. Παρέχοντας μια τοπική και αποκεντρωμένη πηγή ενέργειας, οι SMR μπορούν να υποστηρίξουν κρίσιμης σημασίας υποδομές, συμπεριλαμβανομένων νοσοκομείων, στρατιωτικών βάσεων και κέντρων αντιμετώπισης καταστροφών, κατά τη διάρκεια έκτακτης ανάγκης ή διακοπών δικτύου.

Αυτά είναι μόνο μερικά παραδείγματα των πιθανών εφαρμογών των SMR. Η ευελιξία και η ευελιξία των τεχνολογιών SMR τις καθιστούν προσαρμόσιμες σε ένα ευρύ φάσμα ενεργοβόρων βιομηχανιών και απομακρυσμένων τοποθεσιών, προσφέροντας βιώσιμες και ανθεκτικές ενεργειακές λύσεις. Καθώς η έρευνα και η ανάπτυξη συνεχίζονται, η περαιτέρω εξερεύνηση αυτών των εφαρμογών θα ανοίξει το δρόμο για την εκτεταμένη ανάπτυξη των SMR σε διάφορους τομείς.

## 4.2 Μελέτες περίπτωσης έργων SMR σε όλο τον κόσμο

Παρακάτω μελετώνται οι σημαντικότερες περιπτώσεις SMR σε όλο τον κόσμο:

### 1) NuScale Power (ΗΠΑ)

Η NuScale Power είναι μια εταιρεία στην πρώτη γραμμή της ανάπτυξης μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR) για εμπορική χρήση. Ο καινοτόμος σχεδιασμός SMR τους έχει κερδίσει σημαντική προσοχή στην πυρηνική βιομηχανία.



**Εικόνα 5: Διάγραμμα του αντιδραστήρα NuScale Power**

Ο σχεδιασμός SMR της NuScale βασίζεται σε τεχνολογία αντιδραστήρα υπό πίεση (PWR), η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία πυρηνικής ενέργειας. Το NuScale Power Module (NPM) είναι μια αυτόνομη μονάδα με ικανότητα παραγωγής 77 μεγαβάτ θερμικής (MWe). Πολλαπλές μονάδες μπορούν να συνδυαστούν για να σχηματίσουν μια μονάδα παραγωγής ενέργειας διαφορετικών μεγεθών, παρέχοντας ευελιξία στην κάλυψη διαφορετικών ενεργειακών απαιτήσεων.

Ο σχεδιασμός NPM ενσωματώνει χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας, βασιζόμενη σε φυσικές δυνάμεις όπως η βαρύτητα, η φυσική κυκλοφορία και η μεταφορά για να διασφαλιστεί η ασφαλής και σταθερή λειτουργία. Αυτό ενισχύει τη συνολική ασφάλεια του αντιδραστήρα και μειώνει την ανάγκη για συστήματα ενεργητικής ασφάλειας και εξωτερικές πηγές ενέργειας. Τα NPM στεγάζονται σε μια κοινή πύλα που παρέχει πρόσθετη ασφάλεια και διευκολύνει τις δραστηριότητες συντήρησης.

Ο σχεδιασμός SMR της NuScale προσφέρει βελτιωμένα χαρακτηριστικά ασφάλειας, συμπεριλαμβανομένης της εγγενούς σταθερότητας, του προφίλ χαμηλού κινδύνου και των μειωμένων περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Το συμπαγές μέγεθος του NPM επιτρέπει ευκολότερη μεταφορά, εργοστασιακή κατασκευή και απλοποιημένη κατασκευή, μειώνοντας το κόστος και τα χρονοδιαγράμματα κατασκευής.

Ο αρθρωτός χαρακτήρας του σχεδιασμού του NuScale επιτρέπει αυξητικές προσθήκες χωρητικότητας, επιτρέποντας σταδιακή ανάπτυξη και οικονομικά αποδοτική κλιμάκωση με βάση τη ζήτηση ενέργειας. Η ευελιξία της τεχνολογίας SMR της NuScale την καθιστά κατάλληλη για διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ενέργειας, της αφαλάτωσης και της παραγωγής υδρογόνου. Η NuScale Power έχει λάβει σημαντική αναγνώριση και υποστήριξη, συμπεριλαμβανομένης της χρηματοδότησης από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ και συνεργασιών με μεγάλες εταιρείες ενέργειας.

Η NuScale Power συνεργάζεται στενά με τη Ρυθμιστική Επιτροπή Πυρηνικών των ΗΠΑ (NRC) για να λάβει πιστοποίηση σχεδιασμού και ρυθμιστική έγκριση για το σχεδιασμό SMR. Το 2020, η NuScale έγινε η πρώτη εταιρεία που έλαβε έγκριση τυπικού σχεδιασμού από το NRC για ένα SMR.

Το πρώτο εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας NuScale σχεδιάζεται να κατασκευαστεί στο Εθνικό Εργαστήριο του Αϊντάχο στις Ηνωμένες Πολιτείες, με τις εργασίες να αναμένεται να ξεκινήσουν στα μέσα της δεκαετίας του 2020. Η NuScale Power έχει επίσης υπογράψει συμφωνίες με διεθνείς εταίρους για τη διερεύνηση της ανάπτυξης της τεχνολογίας SMR τους σε άλλες χώρες, γεγονός που δείχνει παγκόσμιο ενδιαφέρον για τον αντιδραστήρα NuScale Power SMR.

Συνοπτικά, ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα SMR της NuScale Power προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα, όπως βελτιωμένη ασφάλεια, επεκτασιμότητα και ευελιξία. Η πρόοδος της εταιρείας στις ρυθμιστικές εγκρίσεις και συνεργασίες καταδεικνύει το αυξανόμενο ενδιαφέρον και τις δυνατότητες για την τεχνολογία SMR της NuScale για την παροχή καθαρών και αξιόπιστων ενεργειακών λύσεων για το μέλλον.

## **2. Rolls-Royce (Ηνωμένο Βασίλειο)**



Η Rolls-Royce είναι μια διάσημη βρετανική εταιρεία μηχανικών με μακρά ιστορία σε διάφορους κλάδους, συμπεριλαμβανομένης της αεροδιαστημικής, της άμυνας και των συστημάτων ισχύος. Τα τελευταία χρόνια, η Rolls-Royce συμμετείχε ενεργά στην ανάπτυξη μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο σχεδιασμός SMR της Rolls-Royce βασίζεται σε τεχνολογία αντιδραστήρα υπό πίεση (PWR), η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία πυρηνικής ενέργειας. Η ιδέα του Rolls-Royce SMR ονομάζεται «UK SMR» και έχει σχεδιαστεί για να έχει χωρητικότητα περίπου 440 μεγαβάτ θερμικής (MWe). Προορίζεται να είναι μια επεκτάσιμη λύση, με πολλαπλές μονάδες που συνδυάζονται για να σχηματίσουν μεγαλύτερες μονάδες παραγωγής ενέργειας.

Ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα ενσωματώνει προηγμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας, συμπεριλαμβανομένων μηχανισμών παθητικής ψύξης που βασίζονται σε φυσικές δυνάμεις όπως η μεταφορά και η βαρύτητα. Αυτά τα χαρακτηριστικά εξασφαλίζουν εγγενή ασφάλεια και εξαλείφουν την ανάγκη για ενεργά συστήματα ή παρέμβαση χειριστή κατά τη διάρκεια ορισμένων σεναρίων. Ο Rolls-Royce SMR στοχεύει να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής περίπου 60 ετών, μεγιστοποιώντας τη χρήση του αντιδραστήρα και ενισχύοντας την οικονομική βιωσιμότητά του.

Ο Rolls-Royce SMR προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή απόδοση και μειωμένο αποτύπωμα άνθρακα. Ο προηγμένος σχεδιασμός του επιτρέπει αυξημένη θερμική απόδοση, με αποτέλεσμα υψηλότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου και μειωμένες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Το συμπαγές μέγεθος του Rolls-Royce SMR το καθιστά κατάλληλο για διάφορα σενάρια ανάπτυξης. Μπορεί να εγκατασταθεί σε διάφορες τοποθεσίες, συμπεριλαμβανομένων απομακρυσμένων περιοχών, νησιών ή περιοχών με περιορισμένη υποδομή δικτύου. Αυτή η ευελιξία ενισχύει την ενεργειακή προσβασιμότητα και μειώνει τις απώλειες μετάδοσης.

Η Rolls-Royce στοχεύει στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας κατασκευής και συναρμολόγησης χρησιμοποιώντας αρθρωτές τεχνικές κατασκευής. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την αποτελεσματική παραγωγή σε ένα ελεγχόμενο εργοστασιακό περιβάλλον, μειώνοντας το κόστος και τα χρονοδιαγράμματα κατασκευής. Ο σχεδιασμός SMR της Rolls-Royce ενσωματώνει επίσης καινοτόμα χαρακτηριστικά για βελτιωμένη χρήση καυσίμου και διαχείριση απορριμμάτων, ενισχύοντας τη συνολική βιωσιμότητα του αντιδραστήρα.

Η Rolls-Royce συνεργάζεται ενεργά με τις ρυθμιστικές αρχές, συμπεριλαμβανομένου του Γραφείου Πυρηνικών Κανονισμών (ONR) του Ηνωμένου Βασιλείου, για να αναζητήσει ρυθμιστική έγκριση για τον σχεδιασμό SMR. Η εταιρεία στοχεύει να αποκτήσει άδεια για το UK SMR μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 2020. Η κυβέρνηση

του Ηνωμένου Βασιλείου έχει δείξει υποστήριξη για την ανάπτυξη SMR, συμπεριλαμβανομένου του Rolls-Royce SMR, ως μέρος της δέσμευσής της για καθαρές και αξιόπιστες πηγές ενέργειας. Έχει παρασχεθεί χρηματοδότηση και υποστήριξη πολιτικής για να επιταχυνθεί η ανάπτυξη και η εξάπλωση της τεχνολογίας SMR στο ΗΒ.

Η Rolls-Royce έχει δημιουργήσει συνεργασίες με διάφορους οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένων πυρηνικών επιχειρήσεων κοινής ωφελείας, εταιρειών μηχανικών και ερευνητικών ιδρυμάτων, για να προωθήσει την εμπορευματοποίηση και την ανάπτυξη της τεχνολογίας SMR της.

Συνοπτικά, ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα SMR της Rolls-Royce προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή απόδοση, συμπαγές μέγεθος και προηγμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας. Η εστίαση της εταιρείας στην αρθρωτή κατασκευή και τη βιωσιμότητα ευθυγραμμίζεται με την παγκόσμια τάση προς καθαρότερες πηγές ενέργειας. Με συνεχή δέσμευση ρυθμιστικών αρχών και κρατική υποστήριξη, η Rolls-Royce SMR έχει τη δυνατότητα να συμβάλει στο μελλοντικό ενεργειακό τοπίο παρέχοντας αξιόπιστες λύσεις παραγωγής ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα.

### **3. China National Nuclear Corporation (Κίνα)**

Η China National Nuclear Corporation (CNNC) είναι μια κρατική εταιρεία πυρηνικής ενέργειας στην Κίνα που συμμετέχει ενεργά στην ανάπτυξη μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR).

Ο σχεδιασμός CNNC SMR βασίζεται σε μια τεχνολογία αντιδραστήρα υπό πίεση (PWR), η οποία είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη και καθιερωμένη τεχνολογία πυρηνικής ενέργειας. Η ιδέα του CNNC SMR είναι γνωστή ως "ACP100" (Advanced Compact Pressurized Reactor 100 MW) και έχει σχεδιαστεί για να έχει χωρητικότητα 100 μεγαβάτ ηλεκτρικής ενέργειας (MWe).

Το ACP100 είναι μια μικρή, αυτόνομη μονάδα αντιδραστήρα που ενσωματώνει προηγμένα χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων παθητικής ψύξης και ψύξης πυρήνα έκτακτης ανάγκης. Αυτά τα συστήματα ασφαλείας έχουν σχεδιαστεί για να βασίζονται σε φυσικά φαινόμενα όπως η βαρύτητα και η μεταφορά, διασφαλίζοντας ασφάλεια χωρίς την ανάγκη εξωτερικής ισχύος ή παρέμβασης χειριστή.

Ο αρθρωτός σχεδιασμός του ACP100 επιτρέπει την εργοστασιακή κατασκευή και την τυποποιημένη παραγωγή, μειώνοντας το κόστος και τα χρονοδιαγράμματα κατασκευής. Οι μονάδες μπορούν να κατασκευαστούν σε ελεγχόμενο περιβάλλον και να μεταφερθούν στο χώρο ανάπτυξης για συναρμολόγηση.

Το CNNC SMR προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως βελτιωμένη ασφάλεια, μειωμένο κόστος κεφαλαίου και βελτιωμένη ευελιξία. Τα χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας και το μικρό μέγεθος του ACP100 συμβάλλουν στην εγγενή ασφάλεια και το προφίλ μειωμένου κινδύνου. Ο συμπαγής σχεδιασμός του ACP100 επιτρέπει ευέλικτες επιλογές ανάπτυξης, συμπεριλαμβανομένων απομακρυσμένων τοποθεσιών και τοποθεσιών εκτός δικτύου. Η αρθρωτή προσέγγιση επιτρέπει τη σταδιακή εφαρμογή, όπου μπορούν να προστεθούν πρόσθετες μονάδες καθώς αυξάνεται η ζήτηση ενέργειας, παρέχοντας μια επεκτάσιμη λύση.

Το ACP100 έχει σχεδιαστεί για να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και η αρθρωτή κατασκευή επιτρέπει την ευκολία συντήρησης και τη δυνατότητα ανακαίνισης ή αντικατάστασης μονάδων ανάλογα με τις ανάγκες. Το ACP100 στοχεύει να έχει υψηλή θερμική απόδοση, συμβάλλοντας στη βελτιωμένη χρήση καυσίμων και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Μπορεί να παρέχει καθαρή και αξιόπιστη ηλεκτρική ενέργεια, συμβάλλοντας στην κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών απαιτήσεων της Κίνας, μειώνοντας παράλληλα την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα.

Η CNNC έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο στην ανάπτυξη και την εμπορευματοποίηση του ACP100 SMR. Έχει κατασκευάσει ένα έργο επίδειξης, τον πυρηνικό σταθμό Shidaowan, στην επαρχία Shandong της Κίνας. Το εργοστάσιο διαθέτει δύο μονάδες ACP100. Ο πυρηνικός σταθμός Shidaowan χρησιμεύει ως πλατφόρμα για τη δοκιμή και την επαλήθευση της απόδοσης, της ασφάλειας και της λειτουργίας του σχεδιασμού ACP100. Παρέχει πολύτιμα επιχειρησιακά δεδομένα και εμπειρία για περαιτέρω βελτιώσεις και εμπορική ανάπτυξη.

Το CNNC συμμετέχει επίσης ενεργά σε διεθνή συνεργασία για την προώθηση της τεχνολογίας SMR, συμπεριλαμβανομένου του ACP100. Έχει υπογράψει συμφωνίες με χώρες όπως η Σαουδική Αραβία, η Αργεντινή και το Ηνωμένο Βασίλειο για να διερευνήσει την πιθανή ανάπτυξη του ACP100 στις αντίστοιχες ενεργειακές τους αγορές.

Συνοπτικά, ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα ACP100 SMR του CNNC προσφέρει βελτιωμένη ασφάλεια, ευελιξία και επεκτασιμότητα. Τα χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας, το συμπαγές μέγεθος και η αρθρωτή κατασκευή του το καθιστούν ελκυστική επιλογή για καθαρή και αξιόπιστη παραγωγή ενέργειας. Με την επιτυχή ανάπτυξη του πυρηνικού σταθμού Shidaowan και τις προσπάθειες διεθνούς συνεργασίας, το CNNC κάνει σημαντικά βήματα προς την εμπορευματοποίηση και την παγκόσμια υιοθέτηση της τεχνολογίας SMR. Το ACP100 έχει τη δυνατότητα να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στο ενεργειακό τοπίο της Κίνας και να συμβάλει στην παγκόσμια μετάβαση προς πιο βιώσιμες πηγές ενέργειας με χαμηλές εκπομπές άνθρακα.

### **4.3 Προοπτικές για SMR στην αγορά ενέργειας**

Οι μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες (SMR) έχουν σημαντικές προοπτικές στην αγορά ενέργειας λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών και των δυνατοτήτων τους να αντιμετωπίζουν διάφορες προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο κλάδος. Καθώς ο κόσμος προσπαθεί να μεταβεί σε καθαρότερες και πιο βιώσιμες πηγές ενέργειας, οι SMR προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα που τα καθιστούν ελκυστική επιλογή. Αυτή η ανάλυση διερευνά τις προοπτικές των SMR στην αγορά ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τα οφέλη, τις προκλήσεις και τις επιπτώσεις τους.

Μία από τις βασικές προοπτικές των SMR έγκειται στην επεκτασιμότητα και την ευελιξία τους. Σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς πυρηνικούς σταθμούς μεγάλης κλίμακας, οι SMR είναι μικρότεροι σε μέγεθος και μπορούν να κατασκευαστούν σε εργοστασιακό περιβάλλον, επιτρέποντας τυποποιημένα και αρθρωτά σχέδια. Αυτή η σπονδυλωτή προσέγγιση επιτρέπει ταχύτερη ανάπτυξη και χαμηλότερο αρχικό κόστος, καθιστώντας τους SMR πιο προσιτούς σε ένα ευρύτερο φάσμα πελατών, συμπεριλαμβανομένων των αναπτυσσόμενων χωρών και των απομακρυσμένων κοινοτήτων. Η επεκτασιμότητα των SMR επιτρέπει επίσης τη σταδιακή εφαρμογή, όπου μπορούν να προστεθούν πρόσθετες μονάδες καθώς αυξάνεται η ζήτηση ενέργειας, παρέχοντας μια ευέλικτη και προσαρμόσιμη λύση για την κάλυψη των εξελισσόμενων ενεργειακών αναγκών. [Haffar, 2018]

Επιπλέον, οι SMR προσφέρουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας σε σύγκριση με τους συμβατικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες. Πολλά σχέδια SMR ενσωματώνουν συστήματα παθητικής ασφάλειας που βασίζονται σε φυσικά φαινόμενα, όπως η βαρύτητα και η μεταφορά, για να σβήσουν με ασφάλεια τον αντιδραστήρα σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Αυτά τα εγγενή χαρακτηριστικά ασφαλείας, σε συνδυασμό με το μικρότερο μέγεθός τους, συμβάλλουν σε μειωμένο προφίλ κινδύνου και αυξημένη δημόσια αποδοχή των SMR. Αυτή η βελτιωμένη αντίληψη ασφαλείας ανοίγει ευκαιρίες για SMR να αναπτυχθούν σε τοποθεσίες πιο κοντά σε κέντρα πληθυσμού, μειώνοντας τις απώλειες μετάδοσης και διασφαλίζοντας πιο αποτελεσματικό και αξιόπιστο ενεργειακό εφοδιασμό.

Μια άλλη προοπτική των SMR είναι η συμβατότητά τους με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι SMR μπορούν να παρέχουν ισχύ βασικού φορτίου και σταθερότητα στο δίκτυο, συμπληρώνοντας τις διαλείπουσες ανανεώσιμες πηγές όπως η ηλιακή και η αιολική. Η ικανότητά τους να λειτουργούν συνεχώς και να παράγουν σταθερή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας τους καθιστά κατάλληλους για ενσωμάτωση με συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δημιουργώντας υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας που είναι πιο αξιόπιστα και αποδοτικά. Συνδυάζοντας τους

SMR με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, είναι δυνατό να επιτευχθεί υψηλότερο μερίδιο καθαρής ενέργειας στο συνολικό ενεργειακό μείγμα, διατηρώντας παράλληλα τη σταθερότητα του δικτύου και την ενεργειακή ασφάλεια.

Οι SMR προσφέρουν επίσης τη δυνατότητα για αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας. Το μικρότερο μέγεθος τους επιτρέπει να βρίσκονται πιο κοντά στους καταναλωτές ενέργειας, μειώνοντας τις απώλειες μετάδοσης και βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος. Αυτή η αποκεντρωμένη προσέγγιση ενισχύει την ενεργειακή ανθεκτικότητα ελαχιστοποιώντας την εξάρτηση από υποδομές μεταφοράς μεγάλων αποστάσεων, καθιστώντας τους SMR ιδιαίτερα κατάλληλους για απομακρυσμένες ή απομονωμένες περιοχές. Επιπλέον, οι SMR μπορούν να υποστηρίξουν την ανάπτυξη μικροδικτύων, όπου τα τοπικά συστήματα παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής ενέργειας λειτουργούν ανεξάρτητα ή σε συνδυασμό με το κύριο δίκτυο. Αυτή η αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας μπορεί να συμβάλει στην ενεργειακή πρόσβαση, ειδικά σε περιοχές με περιορισμένες υποδομές δικτύου.

Επιπλέον, οι SMR μπορούν να συμβάλουν στις προσπάθειες απαλλαγής από τις ανθρακούχες εκπομπές αντικαθιστώντας την παραγωγή ενέργειας που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και οι χαμηλές εκπομπές άνθρακα της πυρηνικής ενέργειας καθιστούν τους SMR μια βιώσιμη επιλογή για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η ικανότητά τους να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα ταυτόχρονα μέσω διαδικασιών συνδυασμένης θερμότητας και ισχύος (CHP) ή συμπαραγωγής προσθέτει στον πιθανό αντίκτυπό τους σε διάφορους τομείς, όπως οι βιομηχανικές διεργασίες, η τηλεθέρμανση και η παραγωγή υδρογόνου. Οι SMR μπορούν να βοηθήσουν στην απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές αυτών των τομέων αντικαθιστώντας τις πηγές ορυκτών καυσίμων με πυρηνική θερμότητα χαμηλών εκπομπών άνθρακα, συμβάλλοντας στους συνολικούς στόχους μείωσης των εκπομπών.

Ωστόσο, υπάρχουν προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την πλήρη υλοποίηση των προοπτικών των SMR στην αγορά ενέργειας. Μια σημαντική πρόκληση είναι το υψηλό αρχικό κόστος κεφαλαίου που σχετίζεται με την ανάπτυξη τεχνολογιών SMR. Ενώ ο αρθρωτός σχεδιασμός και η εργοστασιακή κατασκευή μπορούν να συμβάλουν στη μείωση του κόστους, απαιτούνται ακόμη σημαντικές επενδύσεις για έρευνα, ανάπτυξη, αδειοδότησης και ανάπτυξη υποδομών. Η κρατική υποστήριξη και τα ευνοϊκά ρυθμιστικά πλαίσια είναι ζωτικής σημασίας για την παροχή κινήτρων για ιδιωτικές επενδύσεις και για την εμπορευματοποίηση των SMR.

Μια άλλη πρόκληση είναι η δημόσια αντίληψη και αποδοχή της πυρηνικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των SMR. Οι ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια, τη διαχείριση των αποβλήτων και τους κινδύνους διάδοσης έχουν συχνά συσχετιστεί με την πυρηνική ενέργεια. Η οικοδόμηση εμπιστοσύνης του κοινού στους SMR απαιτεί

διαφανή επικοινωνία, συμμετοχή των ενδιαφερομένων και διάδοση ακριβών πληροφοριών σχετικά με τα οφέλη και την ασφάλεια των SMR. Είναι σημαντικό να αντιμετωπιστούν οι ανησυχίες του κοινού, να εξαλειφθούν οι εσφαλμένες αντιλήψεις και να προωθηθεί ένας εποικοδομητικός διάλογος για την προώθηση της ευρύτερης αποδοχής των SMR ως βιώσιμης ενεργειακής επιλογής. [Brown, 2016].

Επιπλέον, το ρυθμιστικό πλαίσιο για τους SMR πρέπει να αναπτυχθεί και να εναρμονιστεί για να διασφαλιστεί ότι εφαρμόζονται μέτρα ασφάλειας, ασφάλειας και μη διάδοσης. Οι διαδικασίες αδειοδότησης και κανονιστικών διαδικασιών θα πρέπει να εξορθολογιστούν και να προσαρμοστούν στα μοναδικά χαρακτηριστικά των SMR, λαμβάνοντας υπόψη το μικρότερο μέγεθος και τις δυνατότητες για ποικίλες εφαρμογές. Οι προσπάθειες διεθνούς συνεργασίας και τυποποίησης μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη διευκόλυνση της ρυθμιστικής διαδικασίας και στη διασφάλιση της τήρησης των παγκόσμιων προτύπων ασφάλειας. [Groenendaal, 2015]

Οι προοπτικές των SMR στην αγορά ενέργειας εξαρτώνται επίσης από τη διαθεσιμότητα και την προσβασιμότητα των καυσίμων. Ενώ οι SMR μπορούν να χρησιμοποιούν διάφορους τύπους καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου του εμπλουτισμένου ουρανίου, θορίου ή ακόμα και προηγμένων καυσίμων, η διασφάλιση αξιόπιστης και βιώσιμης παροχής καυσίμου είναι απαραίτητη. Απαιτούνται συλλογικές προσπάθειες για την αντιμετώπιση της διαθεσιμότητας καυσίμου, της ασφάλειας και της διαχείρισης του κύκλου καυσίμου, συμπεριλαμβανομένων προηγμένων τεχνολογιών ανακύκλωσης καυσίμων και στρατηγικών διαχείρισης απορριμμάτων.

Ένας άλλος παράγοντας που θα μπορούσε να επηρεάσει τις προοπτικές των SMR είναι η εξέλιξη των ενεργειακών πολιτικών και των δομών της αγοράς. Υποστηρικτικές πολιτικές, όπως μακροπρόθεσμες συμβάσεις, οικονομικά κίνητρα και ρυθμιστικά πλαίσια που εκτιμούν τις χαμηλές εκπομπές άνθρακα και τις αξιόπιστες πηγές ενέργειας, μπορούν να ενθαρρύνουν τις επενδύσεις σε έργα SMR. Η ενσωμάτωση των SMR στις ενεργειακές αγορές απαιτεί κατάλληλους μηχανισμούς της αγοράς που αναγνωρίζουν τα μοναδικά χαρακτηριστικά τους, όπως την ικανότητά τους να παρέχουν ισχύ αποσπώμενη ενέργεια και ισχύ βασικού φορτίου.

Οι προοπτικές των SMR εξαρτώνται επίσης από τη διεθνή συνεργασία και την ανταλλαγή γνώσεων. Η συνεργασία μεταξύ χωρών, φορέων του κλάδου και ερευνητικών ιδρυμάτων μπορεί να επιταχύνει τις τεχνολογικές εξελίξεις, να προωθήσει την καινοτομία και να διευκολύνει την ανταλλαγή βέλτιστων πρακτικών. Οι διεθνείς συνεργασίες μπορούν να βοηθήσουν στην υπέρβαση τεχνικών, ρυθμιστικών και οικονομικών φραγμών, προωθώντας την παγκόσμια ανάπτυξη των SMR και μειώνοντας το κόστος μέσω οικονομιών κλίμακας.

Αρκετές χώρες σε όλο τον κόσμο έχουν ήδη σημειώσει πρόοδο στην εξερεύνηση των προοπτικών των SMR. Για παράδειγμα, ο Καναδάς αναπτύσσει ενεργά το πρόγραμμα Advanced Small Modular Reactor (SMR), με στόχο την ανάπτυξη SMR σε απομακρυσμένες κοινότητες και βιομηχανικές εφαρμογές. Οι Ηνωμένες Πολιτείες εγκαινίασαν το Advanced Reactor Demonstration Program για να υποστηρίξουν την κατασκευή και τη λειτουργία δύο πρωτογενών προηγμένων αντιδραστήρων, συμπεριλαμβανομένων των SMR. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, η κυβέρνηση έχει δεσμευτεί να επενδύσει στην έρευνα και ανάπτυξη SMR για να τοποθετήσει τη χώρα ως παγκόσμιο ηγέτη στην ανάπτυξη SMR.

Συμπερασματικά, οι Μικροί Αρθρωτοί Αντιδραστήρες (SMR) προσφέρουν σημαντικές προοπτικές στην αγορά ενέργειας. Η επεκτασιμότητα, τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας, η συμβατότητα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι δυνατότητες αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας και η δυνατότητα απαλλαγής από τον άνθρακα τα καθιστούν ελκυστική επιλογή για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων με βιώσιμο και ανθεκτικό τρόπο. Ωστόσο, οι προκλήσεις που σχετίζονται με το αρχικό κόστος, την αντίληψη του κοινού, τα ρυθμιστικά πλαίσια, τη διαθεσιμότητα καυσίμων και τις δομές της αγοράς πρέπει να αντιμετωπιστούν για να πραγματοποιηθούν πλήρως οι προοπτικές των SMR. Η διεθνής συνεργασία, οι υποστηρικτικές πολιτικές και οι τεχνολογικές εξελίξεις είναι απαραίτητες για την ευρεία υιοθέτηση των SMR και τη συμβολή σε ένα καθαρότερο και πιο βιώσιμο ενεργειακό μέλλον.

## 5 . Οικονομικά Στοιχεία

### 5.1 Ανάλυση κόστους των SMR σε σύγκριση με πυρηνικούς σταθμούς και άλλες πηγές ενέργειας

Η ανάλυση κόστους είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας και ανταγωνιστικότητας των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR) στην αγορά ενέργειας. Σε αυτή την ενότητα, εμβαθύνουμε σε μια ολοκληρωμένη ανάλυση κόστους των SMR, συγκρίνοντάς τα με παραδοσιακούς πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και άλλες πηγές ενέργειας. Η ανάλυση περιλαμβάνει διάφορα στοιχεία κόστους, όπως σχεδιασμό, κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση και παροπλισμό. Εξετάζοντας τις πτυχές κόστους, μπορούμε να αποκτήσουμε γνώσεις σχετικά με τις οικονομικές εκτιμήσεις που σχετίζονται με την ανάπτυξη των SMR και να αξιολογήσουμε την ανταγωνιστικότητά τους ως προς το κόστος έναντι των εναλλακτικών τεχνολογιών ενέργειας. Αυτή η ενότητα χωρίζεται σε τρεις υποενότητες: Συνιστώσες κόστους των SMR, Σύγκριση κόστους με πυρηνικούς σταθμούς και Σύγκριση κόστους με άλλες πηγές ενέργειας. Μαζί, αυτές οι υποενότητες παρέχουν μια ολιστική άποψη των επιπτώσεων στο κόστος των SMR, βοηθώντας στην κατανόηση της οικονομικής τους σκοπιμότητας και του πιθανού αντίκτυπου στην αγορά ενέργειας.

#### 5.1.1 Στοιχεία κόστους των SMR

Η κατανόηση των συνιστωσών κόστους των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR) είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας και της ανταγωνιστικότητάς τους στην αγορά ενέργειας. Σε αυτήν την υποενότητα, θα εμβαθύνουμε στα διάφορα στοιχεία κόστους που εμπλέκονται στον κύκλο ζωής των SMR. Εξετάζοντας αυτά τα στοιχεία, συμπεριλαμβανομένου του κόστους σχεδιασμού, κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης και του παροπλισμού, μπορούμε να αποκτήσουμε πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις οικονομικές εκτιμήσεις που σχετίζονται με την ανάπτυξη SMR.

#### Κόστος σχεδιασμού

Η φάση σχεδιασμού είναι μια κρίσιμη πτυχή της ανάπτυξης ενός SMR, που περιλαμβάνει εκτεταμένες δραστηριότητες έρευνας, μηχανικής και αδειοδότησης. Το κόστος σχεδιασμού περιλαμβάνει την ανάπτυξη σχεδίων αντιδραστήρων, συστημάτων ασφαλείας και σχετικής υποδομής. Επιπλέον, οι ρυθμιστικές εγκρίσεις



και οι διαδικασίες αδειοδότησης προσθέτουν στο κόστος σχεδιασμού. Τα σχέδια των SMR που δίνουν έμφαση στην τυποποίηση και τη σπονδυλοποίηση μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση του κόστους σχεδιασμού αξιοποιώντας οικονομίες κλίμακας και απλοποιώντας τη ρυθμιστική διαδικασία (Wang et al., 2018).

#### Κόστος κατασκευής

Το κόστος κατασκευής αντιπροσωπεύει σημαντικό μέρος της συνολικής επένδυσης ενός SMR. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος κατασκευής περιλαμβάνουν την προετοιμασία του εργοταξίου, την προμήθεια υλικών, την εργασία και τη διαχείριση έργου. Οι SMR, με το μικρότερο μέγεθος και τον αρθρωτό σχεδιασμό τους, προσφέρουν πιθανά πλεονεκτήματα κόστους έναντι των μεγαλύτερων πυρηνικών σταθμών. Η εργοστασιακή κατασκευή εξαρτημάτων SMR μπορεί να μειώσει τον χρόνο και το κόστος κατασκευής μέσω βελτιωμένου ποιοτικού ελέγχου και βελτιωμένων διαδικασιών συναρμολόγησης (OECD/NEA, 2016). Ωστόσο, προκλήσεις όπως εκτιμήσεις για την τοποθεσία και απαιτήσεις υποδομής ενδέχεται να εξακολουθούν να επηρεάζουν το κόστος κατασκευής.

#### Κόστος λειτουργίας και συντήρησης

Η λειτουργία και η συντήρηση ενός SMR περιλαμβάνει δαπάνες που σχετίζονται με καύσιμα, προσωπικό, τακτικές επιθεωρήσεις, επισκευές και αναβαθμίσεις εξοπλισμού. Το κόστος του καυσίμου για έναν SMR είναι σχετικά χαμηλότερο σε σύγκριση με τους συμβατικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες λόγω του μικρότερου μεγέθους τους και της υψηλότερης απόδοσης χρήσης καυσίμου (United States Nuclear Regulatory Commission, 2017). Ωστόσο, άλλα λειτουργικά έξοδα, όπως το προσωπικό και η συντήρηση, ενδέχεται να διαφέρουν ανάλογα με την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού, τις κανονιστικές απαιτήσεις και τις ειδικές συνθήκες λειτουργίας. Οι προηγμένοι σχεδιασμοί SMR που ενσωματώνουν χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας μπορούν ενδεχομένως να μειώσουν το λειτουργικό κόστος και το κόστος συντήρησης ελαχιστοποιώντας την ανάγκη για ενεργά συστήματα και παρεμβάσεις χειριστή (Rosner et al., 2018).

#### Κόστος παροπλισμού

Ο παροπλισμός είναι μια ουσιαστική πτυχή οποιασδήποτε πυρηνικής εγκατάστασης και οι SMR δεν αποτελούν εξαίρεση. Το κόστος παροπλισμού περιλαμβάνει την ασφαλή αποσυναρμολόγηση και διάθεση του αντιδραστήρα, την αποκατάσταση του

εργοταξίου και τη διαχείριση των αποβλήτων. Ενώ οι SMR αναμένεται να έχουν χαμηλότερο κόστος παροπλισμού σε σύγκριση με τους μεγαλύτερους αντιδραστήρες λόγω του μικρότερου μεγέθους τους, τα ειδικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά και οι ειδικές εκτιμήσεις για την τοποθεσία μπορούν να επηρεάσουν το συνολικό κόστος (Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας, 2017). Η έγκαιρη εξέταση των στρατηγικών παροπλισμού και των κανονιστικών απαιτήσεων μπορεί να βοηθήσει στη βελτιστοποίηση του κόστους παροπλισμού και να διασφαλίσει το ασφαλές κλείσιμο των εγκαταστάσεων SMR.

Η κατανόηση των συνιστωσών κόστους των SMR είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας και ανταγωνιστικότητάς τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανάλυση κόστους των SMR είναι ένα σύνθετο και εξελισσόμενο πεδίο, που επηρεάζεται από παράγοντες όπως η τεχνολογική ωριμότητα, το ρυθμιστικό περιβάλλον, οι συνθήκες της αγοράς και τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του έργου. Επιπλέον, οι εξελίξεις στις διαδικασίες παραγωγής, η βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας και οι καμπύλες εκμάθησης μπορούν να επηρεάσουν περαιτέρω την ανταγωνιστικότητα κόστους των SMR με την πάροδο του χρόνου.

Με την αξιολόγηση του κόστους σχεδιασμού, κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης και παροπλισμού των SMR, οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να λάβουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με την οικονομική σκοπιμότητα της εγκατάστασης των SMR ως μέρος του ενεργειακού τους χαρτοφυλακίου. Οι στρατηγικές μείωσης του κόστους, όπως η τυποποίηση, η σπονδυλοποίηση και οι βελτιωμένες κατασκευαστικές πρακτικές, μπορούν να συμβάλουν στη μείωση του συνολικού κόστους των SMR. Επιπλέον, η συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερομένων του κλάδου, των ρυθμιστικών φορέων και των κυβερνητικών φορέων είναι ζωτικής σημασίας για την αντιμετώπιση των προκλήσεων κόστους, τον εξορθολογισμό των ρυθμιστικών διαδικασιών και την ενίσχυση ενός ευνοϊκού επενδυτικού περιβάλλοντος για την ανάπτυξη SMR.

Συμπερασματικά, η ανάλυση των συνιστωσών κόστους παρέχει πολύτιμες γνώσεις σχετικά με τις οικονομικές εκτιμήσεις που σχετίζονται με τους SMR. Καθώς η τεχνολογία SMR συνεχίζει να προοδεύει και να αποκτά δυναμική, η κατανόηση και η βελτιστοποίηση αυτών των στοιχείων κόστους είναι ουσιαστικής σημασίας για την απελευθέρωση του πλήρους οικονομικού δυναμικού τους και τη διευκόλυνση της ένταξής τους στην αγορά ενέργειας.

### **5.1.2 Σύγκριση κόστους με πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής**

Η σύγκριση του κόστους των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR) με αυτό των συμβατικών πυρηνικών σταθμών είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας και ανταγωνιστικότητας της τεχνολογίας SMR. Σε αυτή την υποενότητα, θα αναλύσουμε τις διαφορές κόστους μεταξύ SMR και πυρηνικών σταθμών μεγάλης κλίμακας, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης, καυσίμων και παροπλισμού. Κατανοώντας αυτές τις συγκρίσεις κόστους, μπορούμε να αξιολογήσουμε τα πιθανά πλεονεκτήματα κόστους των SMR και τις επιπτώσεις τους στην αγορά ενέργειας.

#### Κόστος κατασκευής

Το κόστος κατασκευής διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη συνολική οικονομία των έργων πυρηνικής ενέργειας. Οι πυρηνικοί σταθμοί μεγάλης κλίμακας απαιτούν συνήθως σημαντικές προκαταβολικές επενδύσεις λόγω των πολύπλοκων σχεδίων τους, των εκτεταμένων μέτρων ασφαλείας και των μοναδικών απαιτήσεων για συγκεκριμένες εγκαταστάσεις. Αντίθετα, οι SMR επωφελούνται από το μικρότερο μέγεθος και τον αρθρωτό σχεδιασμό τους, που μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση κόστους στην κατασκευή. Μελέτες έχουν δείξει ότι η σπονδυλωτή προσέγγιση κατασκευής που χρησιμοποιείται στους SMR μπορεί να μειώσει το κόστος κατασκευής έως και 20% σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς πυρηνικούς σταθμούς (OECD/NEA, 2016). Επιπλέον, η εργοστασιακή κατασκευή εξαρτημάτων SMR επιτρέπει βελτιωμένο ποιοτικό έλεγχο και μικρότερα χρονοδιαγράμματα κατασκευής, με αποτέλεσμα πιθανή αποδοτικότητα κόστους.

#### Κόστος λειτουργίας και συντήρησης

Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι ένας άλλος ουσιαστικός παράγοντας στις συγκρίσεις κόστους μεταξύ SMR και πυρηνικών σταθμών μεγάλης κλίμακας. Ενώ οι SMR και οι συμβατικοί αντιδραστήρες μοιράζονται ορισμένες ομοιότητες στα λειτουργικά έξοδα, όπως το προσωπικό και η τακτική συντήρηση, υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές. Οι SMR, με το μικρότερο μέγεθος και τον απλοποιημένο σχεδιασμό τους, μπορούν ενδεχομένως να επωφεληθούν από το χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Η συμπαγής φύση των SMR επιτρέπει την ευκολότερη πρόσβαση στα εξαρτήματα, μειώνοντας τους χρόνους επιθεώρησης και επισκευής. Επιπλέον, οι προηγμένοι σχεδιασμοί SMR που ενσωματώνουν χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας μπορούν να μειώσουν την ανάγκη για ενεργά συστήματα και παρεμβάσεις χειριστή, συμβάλλοντας περαιτέρω στην εξοικονόμηση κόστους (Rosner et al., 2018). Ωστόσο, τα ειδικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά, οι κανονιστικές

απαιτήσεις και οι συνθήκες λειτουργίας μπορούν να επηρεάσουν το συνολικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης και απαιτείται προσεκτική ανάλυση.

### Κόστος καυσίμου

Το κόστος των καυσίμων αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην οικονομία της πυρηνικής ενέργειας. Οι SMR γενικά χρησιμοποιούν τους ίδιους τύπους καυσίμων με τους συμβατικούς αντιδραστήρες, όπως τα καύσιμα εμπλουτισμένου ουρανίου ή μικτών οξειδίων. Ωστόσο, λόγω του μικρότερου μεγέθους τους και της υψηλότερης απόδοσης χρήσης καυσίμου, οι SMR μπορούν δυνητικά να επωφεληθούν από το μειωμένο κόστος καυσίμου σε σύγκριση με τους μεγαλύτερους αντιδραστήρες. Οι SMR απαιτούν συνήθως λιγότερα καύσιμα ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα μειωμένα έξοδα καυσίμου κατά τη διάρκεια ζωής της μονάδας. Επιπλέον, το μικρότερο απόθεμα καυσίμων που απαιτείται για τους SMR μπορεί να συμβάλει σε χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και μειωμένη πολυπλοκότητα του κύκλου καυσίμου (United States Nuclear Regulatory Commission, 2017). Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το κόστος των καυσίμων μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τις συνθήκες της αγοράς, τα επίπεδα εμπλουτισμού καυσίμων και άλλους παράγοντες.

### Κόστος παροπλισμού

Το κόστος παροπλισμού αντιπροσωπεύει μια ουσιαστική πτυχή των έργων πυρηνικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων τόσο των SMR όσο και των αντιδραστήρων μεγάλης κλίμακας. Ενώ οι SMR αναμένεται να έχουν χαμηλότερο κόστος παροπλισμού λόγω του μικρότερου μεγέθους τους, τα ειδικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά και οι ειδικές εκτιμήσεις για την τοποθεσία μπορούν ακόμα να επηρεάσουν το συνολικό κόστος (Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας, 2017). Ο σωστός σχεδιασμός και η έγκαιρη εξέταση των στρατηγικών παροπλισμού μπορεί να βελτιστοποιήσει το κόστος παροπλισμού των SMR, διασφαλίζοντας το ασφαλές κλείσιμο των εγκαταστάσεων και την αποτελεσματική διαχείριση των απορριμμάτων. Είναι σημαντικό να ενσωματωθεί το κόστος παροπλισμού στη συνολική οικονομική ανάλυση των SMR για να εκτιμηθούν με ακρίβεια οι μακροπρόθεσμες οικονομικές τους επιπτώσεις.

Η σύγκριση του κόστους των SMR με αυτά των συμβατικών πυρηνικών σταθμών αποκαλύπτει πιθανά πλεονεκτήματα κόστους για την τεχνολογία SMR. Ο αρθρωτός σχεδιασμός και οι βελτιωμένες διαδικασίες κατασκευής των SMR συμβάλλουν σε μειωμένο κόστος κατασκευής, ενώ το μικρότερο μέγεθος και οι απλοποιημένοι σχεδιασμοί τους προσφέρουν τη δυνατότητα για χαμηλότερα έξοδα λειτουργίας και

συντήρησης. Επιπλέον, η υψηλότερη απόδοση χρήσης καυσίμου των SMR μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση κόστους στην προμήθεια και διαχείριση καυσίμων. Ωστόσο, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη παράγοντες που σχετίζονται με την τοποθεσία, ρυθμιστικές απαιτήσεις και άλλες μεταβλητές που μπορεί να επηρεάσουν τις συγκρίσεις κόστους. Η κατανόηση αυτών των δυναμικών κόστους είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της οικονομικής σκοπιμότητας και ανταγωνιστικότητας των SMR στην αγορά ενέργειας.

### **5.1.3 Σύγκριση κόστους με άλλες πηγές ενέργειας**

Η σύγκριση του κόστους των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR) με το κόστος άλλων πηγών ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της ανταγωνιστικότητας και της οικονομικής βιωσιμότητας της τεχνολογίας SMR στο ευρύτερο ενεργειακό τοπίο. Σε αυτήν την υποενότητα, θα αναλύσουμε τις συγκρίσεις κόστους των SMR με την παραδοσιακή παραγωγή ενέργειας που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα, τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και άλλες τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Εξετάζοντας αυτές τις δυναμικές κόστους, μπορούμε να αξιολογήσουμε τα πιθανά πλεονεκτήματα κόστους των SMR και τον ρόλο τους στη συνολική ενεργειακή μετάβαση.

#### Παραγωγή ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα

Μία από τις κύριες συγκρίσεις κόστους περιλαμβάνει την παραδοσιακή παραγωγή ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας, το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο. Ενώ το αρχικό κόστος κεφαλαίου για τους SMR μπορεί να είναι υψηλότερο σε σύγκριση με τις μονάδες ορυκτών καυσίμων, προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα μακροπρόθεσμα. Οι SMR παρέχουν μια εναλλακτική λύση χαμηλών εκπομπών άνθρακα στην παραγωγή ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα, συμβάλλοντας στους στόχους μείωσης των εκπομπών και στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα (IEA, 2020). Επιπλέον, το κόστος λειτουργίας των SMR είναι γενικά χαμηλότερο από αυτό των μονάδων ορυκτών καυσίμων, καθώς το κόστος πυρηνικών καυσίμων είναι σχετικά σταθερό και λιγότερο επιρρεπές στις διακυμάνσεις των τιμών των καυσίμων (NEA, 2017). Επιπλέον, οι SMR δεν αντιμετωπίζουν τους ίδιους κινδύνους που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα καυσίμων και την αστάθεια των τιμών με τα εργοστάσια ορυκτών καυσίμων, παρέχοντας μια πιο σταθερή δομή κόστους κατά τη διάρκεια λειτουργίας του εργοστασίου.

### Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η σύγκριση του κόστους των SMR με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική, είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση του δυνητικού ρόλου των SMR σε ένα διαφοροποιημένο ενεργειακό χαρτοφυλάκιο. Ενώ το κεφαλαιουχικό κόστος των εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις όσον αφορά τη απρόσκοπτη λειτουργία και την ενσωμάτωση στο δίκτυο. Οι SMR, από την άλλη, προσφέρουν δυνατότητες παραγωγής ενέργειας βασικού φορτίου, παρέχοντας σταθερή και συνεχή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά τη σύγκριση του κόστους των SMR με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη το σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (LCOE) κατά τη διάρκεια ζωής της μονάδας, συμπεριλαμβανομένων παραγόντων όπως η εγκατάσταση, η λειτουργία, η συντήρηση και η υποδομή μεταφοράς (EIA, 2021). Ανάλογα με το συγκεκριμένο πλαίσιο και τις ενεργειακές απαιτήσεις, ένας συνδυασμός SMR και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να προσφέρει ένα οικονομικά αποδοτικό και αξιόπιστο ενεργειακό μείγμα που διασφαλίζει τόσο την παραγωγή καθαρής ενέργειας όσο και τη σταθερότητα του δικτύου.

### Άλλες τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα

Εκτός από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, άλλες τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα, όπως πυρηνικοί σταθμοί μεγάλης κλίμακας, υδροηλεκτρική ενέργεια και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στις συγκρίσεις κόστους. Οι πυρηνικοί σταθμοί μεγάλης κλίμακας παίζουν παραδοσιακά σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας με χαμηλές εκπομπές άνθρακα. Οι SMR μπορούν να προσφέρουν πλεονεκτήματα όσον αφορά το χαμηλότερο αρχικό κόστος κεφαλαίου, την ευελιξία στην ανάπτυξη και πιθανές συνέργειες με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (US DOE, 2015). Η υδροηλεκτρική ενέργεια, ενώ είναι ώριμη τεχνολογία, απαιτεί κατάλληλες γεωγραφικές συνθήκες και μπορεί να έχει υψηλό αρχικό κόστος. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες και τα αντλούμενα υδροηλεκτρικά, είναι ζωτικής σημασίας για τη σταθερότητα του δικτύου και την ενσωμάτωση διακοπτόμενων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλά μπορεί να είναι ακριβά. Το κόστος των SMR πρέπει να αξιολογηθεί στο πλαίσιο αυτών των τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα, λαμβάνοντας υπόψη τις ειδικές απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά κάθε επιλογής.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι συγκρίσεις κόστους μεταξύ SMR και άλλων πηγών ενέργειας μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με παράγοντες όπως η τοποθεσία, η κλίμακα, τα ρυθμιστικά πλαίσια και οι τεχνολογικές εξελίξεις. Επιπλέον, οι προβλέψεις κόστους θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους εξωτερικούς παράγοντες

όπως οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η διαθεσιμότητα καυσίμων και οι γεωπολιτικοί κίνδυνοι, οι οποίοι μπορεί να έχουν μακροπρόθεσμες οικονομικές επιπτώσεις. Απαιτείται προσεκτική ανάλυση και μοντελοποίηση για την αξιολόγηση της ανταγωνιστικότητας κόστους των SMR σε διαφορετικά σενάρια αγοράς ενέργειας.

Συμπερασματικά, η σύγκριση του κόστους των SMR με άλλες πηγές ενέργειας παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την οικονομική βιωσιμότητα και τον ρόλο τους στην ενεργειακή μετάβαση. Ενώ οι SMR μπορεί να έχουν υψηλότερο αρχικό κόστος κεφαλαίου σε σύγκριση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα, το χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και οι εκπομπές άνθρακα τους καθιστούν ελκυστικές μακροπρόθεσμες επενδύσεις. Σε σύγκριση με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι SMR προσφέρουν δυνατότητες παραγωγής ενέργειας βασικού φορτίου, συμπληρώνοντας τις διαλείπουσες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και διασφαλίζοντας τη σταθερότητα του δικτύου. Επιπλέον, η εξέταση άλλων τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα παρέχει μια ολιστική προοπτική για τη δυναμική του κόστους στο ενεργειακό τοπίο. Οι μελλοντικές αναλύσεις κόστους θα πρέπει να λάβουν υπόψη διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των εκτιμήσεων που σχετίζονται με την τοποθεσία, των τεχνολογικών προόδων και των εξωτερικών παραγόντων, για να παρέχουν μια ολοκληρωμένη κατανόηση των πλεονεκτημάτων κόστους και των προκλήσεων που σχετίζονται με τους SMR.

## **5.2 Επιλογές χρηματοδότησης για έργα SMR**

Η επιτυχής ανάπτυξη και εγκατάσταση μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR) απαιτεί επαρκείς μηχανισμούς χρηματοδότησης για την υποστήριξη του υψηλού αρχικού κόστους κεφαλαίου που σχετίζεται με αυτά τα έργα. Σε αυτήν την ενότητα, θα διερευνήσουμε διάφορες επιλογές χρηματοδότησης που είναι διαθέσιμες για έργα SMR, όπως δημόσια χρηματοδότηση, ιδιωτικές επενδύσεις, διεθνείς συνεργασίες και καινοτόμα οικονομικά μοντέλα. Η κατανόηση του τοπίου χρηματοδότησης είναι ζωτικής σημασίας για την εμπορευματοποίηση και την ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας SMR.

### Δημόσια χρηματοδότηση

Η δημόσια χρηματοδότηση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην υποστήριξη της ανάπτυξης SMR, ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια όταν οι τεχνολογικοί κίνδυνοι είναι υψηλοί. Οι κυβερνήσεις και οι δημόσιοι φορείς μπορούν να παρέχουν άμεση οικονομική στήριξη μέσω επιχορηγήσεων, επιδοτήσεων και δανείων, καθώς και έμμεση υποστήριξη μέσω προγραμμάτων έρευνας και ανάπτυξης και ρυθμιστικών

πλαισίων. Η δημόσια χρηματοδότηση στοχεύει στην τόνωση της καινοτομίας, τον μετριασμό των οικονομικών κινδύνων και τη δημιουργία ευνοϊκού περιβάλλοντος για ιδιωτικές επενδύσεις σε έργα SMR (ΔΟΑΕ, 2020). Οι κυβερνήσεις σε όλο τον κόσμο, αναγνωρίζοντας τις δυνατότητες των SMR, έχουν διαθέσει σημαντικά κονδύλια σε προγράμματα έρευνας, επίδειξης και εμπορευματοποίησης. Για παράδειγμα, το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ έχει παράσχει οικονομική υποστήριξη σε έργα SMR μέσω πρωτοβουλιών όπως το Advanced Reactor Demonstration Program (ARDP) (US DOE, 2021). Η δημόσια χρηματοδότηση μπορεί επίσης να προωθήσει διεθνείς συνεργασίες, ανταλλαγή γνώσης και μεταφορά τεχνολογίας, διευκολύνοντας την ανάπτυξη έργων SMR σε παγκόσμια κλίμακα.

### Ιδιωτική επένδυση

Οι ιδιωτικές επενδύσεις διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη χρηματοδότηση έργων SMR, ιδιαίτερα κατά τα μεταγενέστερα στάδια ανάπτυξης και εμπορευματοποίησης. Οι ιδιώτες επενδυτές, συμπεριλαμβανομένων των επιχειρήσεων κοινής ωφελείας, των ενεργειακών εταιρειών και των εταιρειών επιχειρηματικών κεφαλαίων, αναζητούν βιώσιμες επενδυτικές ευκαιρίες στον ενεργειακό τομέα που προσφέρουν ελκυστικές αποδόσεις και ευθυγραμμίζονται με τους στόχους βιωσιμότητας τους. Ωστόσο, τα έργα SMR αντιμετωπίζουν μοναδικές προκλήσεις στην προσέλκυση ιδιωτικών επενδύσεων λόγω των τεχνολογικών κινδύνων τους, των μεγάλων χρονοδιαγραμμάτων των έργων και των κανονιστικών αβεβαιοτήτων (NEA, 2018). Για να προσελκύσουν ιδιωτικό κεφάλαιο, οι κατασκευαστές των SMR πρέπει να επιδείξουν την εμπορική βιωσιμότητα, την ασφάλεια και τις μακροπρόθεσμες οικονομικές προοπτικές των έργων τους. Η συνεργασία μεταξύ δημόσιου και ιδιωτικού τομέα μπορεί επίσης να προσφέρει ένα ευνοϊκό περιβάλλον για ιδιωτικές επενδύσεις στην τεχνολογία SMR. Επιπλέον, τα καινοτόμα μοντέλα χρηματοδότησης, όπως οι συμφωνίες αγοράς ενέργειας (PPAs), οι κοινοπραξίες και η χρηματοδότηση έργων, μπορούν να βοηθήσουν στον μετριασμό των επενδυτικών κινδύνων και στην προσέλκυση ιδιωτικών κεφαλαίων (IAEA, 2020).

### Διεθνείς Συνεργασίες

Οι διεθνείς συνεργασίες προσφέρουν ευκαιρίες για επιμερισμό του κόστους, της τεχνογνωσίας και των κινδύνων που σχετίζονται με την ανάπτυξη των SMR. Οι συλλογικές προσπάθειες μπορούν να αξιοποιήσουν τους πόρους και την τεχνογνωσία πολλών χωρών για να επιταχύνουν την ανάπτυξη της τεχνολογίας, να μειώσουν το κόστος και να ενισχύσουν τις προοπτικές εμπορευματοποίησης των SMR. Οι διεθνείς συνεργασίες μπορούν να περιλαμβάνουν κοινά προγράμματα



έρευνας και ανάπτυξης, πλατφόρμες ανταλλαγής γνώσεων και συγχρηματοδοτούμενα έργα επίδειξης. Για παράδειγμα, το Generation IV International Forum (GIF) συγκεντρώνει χώρες για να συνεργαστούν για την έρευνα και την ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών αντιδραστήρων, συμπεριλαμβανομένων των SMR (GIF, 2020). Οι συλλογικές προσπάθειες μπορούν επίσης να διευκολύνουν την εναρμόνιση των ρυθμιστικών πλαισίων και των διαδικασιών αδειοδότησης, μειώνοντας τον χρόνο και το κόστος που συνεπάγεται η διάθεση έργων SMR στην αγορά.

### Καινοτόμα χρηματοοικονομικά μοντέλα

Εκτός από τους παραδοσιακούς μηχανισμούς χρηματοδότησης, εμφανίζονται καινοτόμα χρηματοοικονομικά μοντέλα για την υποστήριξη έργων SMR. Αυτά τα μοντέλα στοχεύουν στην αντιμετώπιση συγκεκριμένων προκλήσεων που σχετίζονται με τους SMR, όπως το υψηλό αρχικό κόστος, τα μεγάλα χρονοδιαγράμματα έργων και οι τεχνολογικοί κίνδυνοι. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι η έννοια των «συστάδων SMR» ή «πάρκων SMR», όπου πολλαπλοί SMR αναπτύσσονται μαζί για να μοιράζονται υποδομές, πόρους και λειτουργικά κόστη (NEA, 2018). Αυτή η προσέγγιση ομαδοποίησης μπορεί να οδηγήσει σε οικονομίες υψηλής κλίμακας, χαμηλότερο κόστος κατασκευής και βελτιωμένα οικονομικά έργα. Ένα άλλο αναδυόμενο μοντέλο είναι η χρήση συμπράξεων δημόσιου-ιδιωτικού τομέα (ΣΔΙΤ) για τον συνδυασμό δημόσιας χρηματοδότησης, ιδιωτικών επενδύσεων και εμπειρογνωμοσύνης στη διαχείριση έργων (ΔΟΑΕ, 2020). Οι ΣΔΙΤ μπορούν να συμβάλουν στον μετριασμό των κινδύνων, να διασφαλίσουν την αποδοτική εκτέλεση του έργου και να επιτρέψουν την αποτελεσματική κατανομή των πόρων. Η διερεύνηση αυτών των καινοτόμων χρηματοοικονομικών μοντέλων μπορεί να ξεκλειδώσει νέους δρόμους για τη χρηματοδότηση έργων SMR και να συμβάλει στην οικονομική τους βιωσιμότητα.

Οι επιλογές χρηματοδότησης για έργα SMR περιλαμβάνουν έναν συνδυασμό δημόσιας χρηματοδότησης, ιδιωτικών επενδύσεων, διεθνών συνεργασιών και καινοτόμων χρηματοοικονομικών μοντέλων. Η δημόσια χρηματοδότηση παρέχει αρχική υποστήριξη για δραστηριότητες έρευνας, ανάπτυξης και επίδειξης, ενώ οι ιδιωτικές επενδύσεις διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην εμπορευματοποίηση και την ανάπτυξη των SMR. Οι διεθνείς συνεργασίες προσφέρουν ευκαιρίες για κοινή χρήση κόστους και ανταλλαγή γνώσεων, επιταχύνοντας την ανάπτυξη των SMR σε παγκόσμια κλίμακα. Καινοτόμα χρηματοοικονομικά μοντέλα, όπως η ομαδοποίηση και οι ΣΔΙΤ, μπορούν να αντιμετωπίσουν συγκεκριμένες προκλήσεις που σχετίζονται με τους SMR και να προσελκύσουν επενδύσεις. Ένας συνδυασμός αυτών των μηχανισμών χρηματοδότησης, προσαρμοσμένοι στα μοναδικά χαρακτηριστικά των

SMR, θα είναι απαραίτητος για να ξεκλειδώσει πλήρως το δυναμικό αυτής της πολλά υποσχόμενης τεχνολογίας.

### **5.3 Οικονομικοί και χρηματοοικονομικοί κίνδυνοι των SMR**

Όπως συμβαίνει με κάθε ενεργειακή τεχνολογία, οι Μικροί Αρθρωτοί Αντιδραστήρες (SMR) συνοδεύονται από οικονομικούς και χρηματοοικονομικούς κινδύνους. Είναι απαραίτητο να αξιολογηθούν και να κατανοηθούν αυτοί οι κίνδυνοι για να διασφαλιστεί η επιτυχής ανάπτυξη και λειτουργία των SMR. Αυτή η ενότητα θα αναλύσει τους οικονομικούς και χρηματοοικονομικούς κινδύνους που σχετίζονται με τους αντιδραστήρες SMR, συμπεριλαμβανομένων των τεχνολογικών κινδύνων, των αβεβαιοτήτων της αγοράς, των κανονιστικών προκλήσεων, των περιορισμών χρηματοδότησης και των κινδύνων λειτουργικής απόδοσης. Με τον εντοπισμό και τον μετριασμό αυτών των κινδύνων, οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις και να αναπτύσσουν στρατηγικές για την ενίσχυση της οικονομικής βιωσιμότητας και της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας των έργων SMR.

Ένας από τους σημαντικούς οικονομικούς και χρηματοοικονομικούς κινδύνους που συνδέονται με τους SMR πηγάζει από την ίδια την τεχνολογία. Οι SMR αντιπροσωπεύουν μια σχετικά νέα γενιά πυρηνικών αντιδραστήρων και ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η λειτουργία τους συνεπάγονται εγγενείς τεχνολογικές προκλήσεις. Αυτές οι προκλήσεις μπορεί να οδηγήσουν σε υπερβάσεις κόστους, καθυστερήσεις και αβεβαιότητες στην απόδοση. Τεχνικά ζητήματα κατά τη διάρκεια των φάσεων ανάπτυξης και εγκατάστασης μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα αυξημένο κόστος κεφαλαίου, εκτεταμένα χρονοδιαγράμματα κατασκευής και μειωμένα οικονομικά έργα (OECD/NEA, 2016). Η διασφάλιση της τεχνολογικής ετοιμότητας, της ευρωστίας και της αξιοπιστίας των SMR μέσω αυστηρών δοκιμών, έργων επίδειξης και ρυθμιστικής εποπτείας είναι ζωτικής σημασίας για τον μετριασμό αυτών των κινδύνων.

Η οικονομική βιωσιμότητα των SMR συνδέεται στενά με τις αβεβαιότητες της αγοράς, συμπεριλαμβανομένων των τιμών της ενέργειας, των προβλέψεων της ζήτησης και του ανταγωνισμού από εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Οι διακυμάνσεις των τιμών της ενέργειας μπορούν να επηρεάσουν την ανταγωνιστικότητα και την οικονομική σκοπιμότητα των έργων SMR, ιδιαίτερα σε σύγκριση με συμβατικές πηγές ενέργειας ή άλλες τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Η μακροπρόθεσμη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, σε συνδυασμό με τα πολιτικά και ρυθμιστικά πλαίσια, επηρεάζει το δυναμικό της αγοράς για τους SMR (World Nuclear Association, 2021). Οι αλλαγές στις συνθήκες της αγοράς και οι ανταγωνιστικές ενεργειακές τεχνολογίες μπορούν να δημιουργήσουν αβεβαιότητες στις οικονομικές αποδόσεις και τη

μακροπρόθεσμη κερδοφορία των επενδύσεων SMR. Η διεξαγωγή ισχυρών αναλύσεων της αγοράς, η εξέταση των τάσεων της αγοράς ενέργειας και η αξιολόγηση των πιθανών κινδύνων της αγοράς είναι ουσιαστικά βήματα για τη διαχείριση αυτών των αβεβαιοτήτων.

Τα ρυθμιστικά πλαίσια διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της ασφάλειας και της περιβαλλοντικής συμμόρφωσης των SMR. Ωστόσο, οι κανονιστικές προκλήσεις μπορεί να θέτουν οικονομικούς και χρηματοοικονομικούς κινδύνους για τα έργα SMR. Η περίπλοκη και εξελισσόμενη φύση των πυρηνικών κανονισμών μπορεί να οδηγήσει σε μακροχρόνιες διαδικασίες αδειοδότησης, αυξημένο κόστος συμμόρφωσης και αβεβαιότητες στα χρονοδιαγράμματα των έργων (ΔΟΑΕ, 2019). Ασυνεπείς ή απρόβλεπτες ρυθμιστικές απαιτήσεις σε διαφορετικές δικαιοδοσίες μπορεί να εμποδίσουν την ανάπτυξη και την εμπορευματοποίηση των SMR. Η ανάπτυξη εξορθολογισμένων και εναρμονισμένων ρυθμιστικών πλαισίων ειδικά για τους SMR, μαζί με σαφείς οδούς αδειοδότησης, μπορεί να μετριάσει αυτούς τους κινδύνους και να διευκολύνει τις επενδύσεις στην τεχνολογία SMR (World Nuclear Association, 2021).

Η εξασφάλιση επαρκούς χρηματοδότησης για έργα SMR είναι κρίσιμος παράγοντας για την επιτυχία τους. Ωστόσο, το υψηλό αρχικό κόστος κεφαλαίου που σχετίζεται με τους SMR μπορεί να παρουσιάσει σημαντικές προκλήσεις χρηματοδότησης. Τα μοναδικά χαρακτηριστικά των SMR, συμπεριλαμβανομένου του μικρότερου μεγέθους και του αρθρωτού σχεδιασμού τους, μπορούν να οδηγήσουν σε περιορισμένη πρόσβαση στους παραδοσιακούς μηχανισμούς χρηματοδότησης έργων. Οι ιδιώτες επενδυτές μπορεί να αντιλαμβάνονται τα έργα SMR ως υψηλού κινδύνου λόγω τεχνολογικών αβεβαιοτήτων, ρυθμιστικών πολυπλοκοτήτων και μακρών χρονοδιαγραμμάτων (OECD/NEA, 2016). Η έλλειψη πρόσβασης σε οικονομικά προσιτές επιλογές χρηματοδότησης μπορεί να εμποδίσει την ανάπτυξη και εξάπλωση των SMR. Για να μετριάσουν οι χρηματοδοτικοί περιορισμοί, οι κυβερνήσεις, τα χρηματοπιστωτικά ιδρύματα και οι υπεύθυνοι ανάπτυξης έργων πρέπει να συνεργαστούν για να αναπτύξουν καινοτόμα χρηματοοικονομικά μοντέλα, να μειώσουν τους επενδυτικούς κινδύνους και να δημιουργήσουν υποστηρικτικά πλαίσια πολιτικής.

Η μακροπρόθεσμη λειτουργική απόδοση των SMR μπορεί να έχει σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις. Παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα του αντιδραστήρα, οι παράγοντες χωρητικότητας και το λειτουργικό κόστος μπορούν να επηρεάσουν την οικονομική βιωσιμότητα και την κερδοφορία των έργων SMR. Οι επιχειρησιακές προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένων των απαιτήσεων συντήρησης, του κόστους καυσίμων και των υποχρεώσεων παροπλισμού, πρέπει να αντιμετωπίζονται προσεκτικά για να διασφαλιστεί η οικονομική βιωσιμότητα των SMR (World Nuclear Association, 2021). Οι προληπτικές στρατηγικές συντήρησης, οι αξιόπιστες αλυσίδες

εφοδιασμού καυσίμων και οι αποτελεσματικές πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων είναι απαραίτητες για την ελαχιστοποίηση των λειτουργικών κινδύνων και τη διατήρηση της ανταγωνιστικής απόδοσης.

Συμπερασματικά, η αξιολόγηση και ο μετριασμός των οικονομικών και χρηματοοικονομικών κινδύνων είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή ανάπτυξη των SMR. Οι τεχνολογικοί κίνδυνοι, οι αβεβαιότητες της αγοράς, οι κανονιστικές προκλήσεις, οι περιορισμοί χρηματοδότησης και οι κίνδυνοι λειτουργικής απόδοσης είναι μεταξύ των βασικών παραγόντων που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Η συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερομένων, συμπεριλαμβανομένων των κυβερνήσεων, των ρυθμιστικών αρχών, των χρηματοπιστωτικών ιδρυμάτων και των προγραμματιστών έργων, είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη στρατηγικών για τον μετριασμό αυτών των κινδύνων και την ενίσχυση της οικονομικής βιωσιμότητας των έργων SMR. Με την κατανόηση και τη διαχείριση αυτών των κινδύνων αποτελεσματικά, οι SMR μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια μετάβαση σε ένα μέλλον χαμηλών εκπομπών άνθρακα και βιώσιμης ενέργειας.

#### **5.4 Κυβερνητικές πολιτικές και κίνητρα για την ανάπτυξη SMR**

Οι κυβερνητικές πολιτικές και τα κίνητρα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διαμόρφωση της ανάπτυξης και εγκατάστασης των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR). Αναγνωρίζοντας τις δυνατότητες των SMR στην αντιμετώπιση των ενεργειακών προκλήσεων, οι κυβερνήσεις παγκοσμίως εφαρμόζουν διάφορα μέτρα για να υποστηρίξουν και να επιταχύνουν την εμπορευματοποίησή τους. Αυτή η ενότητα θα αναλύσει τις βασικές κυβερνητικές πολιτικές και τα κίνητρα για την ανάπτυξη SMR, συμπεριλαμβανομένης της οικονομικής υποστήριξης, των κανονιστικών πλαισίων, των πρωτοβουλιών έρευνας και ανάπτυξης και διεθνών συνεργασιών. Κατανοώντας αυτές τις πολιτικές και τα κίνητρα, οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να περιηγηθούν στο ρυθμιστικό τοπίο, να αποκτήσουν πρόσβαση σε ευκαιρίες χρηματοδότησης και να προωθήσουν ένα ευνοϊκό περιβάλλον για την ανάπτυξη SMR.

Οικονομική υποστήριξη:

Η κρατική χρηματοδοτική στήριξη είναι καθοριστική για την προώθηση της ανάπτυξης SMR. Οι κυβερνήσεις μπορούν να παρέχουν άμεση οικονομική βοήθεια με τη μορφή επιχορηγήσεων, δανείων ή εγγυήσεων δανείων για τη μείωση των οικονομικών κινδύνων που σχετίζονται με τα έργα SMR. Αυτοί οι χρηματοοικονομικοί

μηχανισμοί μπορούν να βοηθήσουν στην υπέρβαση του υψηλού αρχικού κόστους κεφαλαίου, να επιτρέψουν τις προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης και να υποστηρίξουν την κατασκευή και ανάπτυξη SMR (ΟΟΣΑ/ΝΕΑ, 2019). Η οικονομική στήριξη μπορεί επίσης να έχει τη μορφή επιδοτήσεων ή συμφωνιών αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για την παροχή κινήτρων για ιδιωτικές επενδύσεις και την ενίσχυση της οικονομικής βιωσιμότητας των έργων SMR. Οι κυβερνήσεις που παρέχουν σταθερή, μακροπρόθεσμη οικονομική υποστήριξη δημιουργούν ένα ευνοϊκό περιβάλλον για τους προγραμματιστές SMR και προσελκύουν τη συμμετοχή του ιδιωτικού τομέα.

Τα καλά καθορισμένα και εξορθολογισμένα ρυθμιστικά πλαίσια είναι απαραίτητα για την επιτυχή ανάπτυξη των SMR. Οι κυβερνήσεις πρέπει να θεσπίσουν σαφείς διαδικασίες αδειοδότησης, πρότυπα ασφαλείας και ρυθμιστικές απαιτήσεις ειδικά για τους SMR. Οι απλοποιημένες ρυθμιστικές διαδικασίες μπορούν να μειώσουν τα χρονοδιαγράμματα αδειοδότησης, να μειώσουν το κόστος συμμόρφωσης και να παρέχουν βεβαιότητα στους προγραμματιστές και τους επενδυτές των έργων (World Nuclear Association, 2021). Οι κυβερνήσεις μπορούν επίσης να διευκολύνουν την ανταλλαγή γνώσεων και την εναρμόνιση των ρυθμιστικών πρακτικών μεταξύ των δικαιοδοσιών για να ελαχιστοποιήσουν τις κανονιστικές πολυπλοκότητες και αβεβαιότητες. Με την προώθηση ενός υποστηρικτικού και προβλέψιμου ρυθμιστικού περιβάλλοντος, οι κυβερνήσεις μπορούν να ενθαρρύνουν τις επενδύσεις στην τεχνολογία SMR.

Η κρατική υποστήριξη για πρωτοβουλίες έρευνας και ανάπτυξης (E&A) είναι ζωτικής σημασίας για την προώθηση της τεχνολογίας SMR και την αντιμετώπιση των τεχνικών προκλήσεων. Οι κυβερνήσεις μπορούν να διαθέσουν χρηματοδότηση για προγράμματα E&A που επικεντρώνονται στη βελτιστοποίηση σχεδιασμού SMR, βελτιώσεις ασφάλειας και μέτρα μείωσης του κόστους. Η συνεργασία μεταξύ κυβερνητικών φορέων, ερευνητικών ιδρυμάτων και ενδιαφερόμενων μερών του κλάδου μπορεί να προωθήσει την καινοτομία και να επιταχύνει την ανάπτυξη των SMRs (IEA, 2020). Επιπλέον, οι κυβερνήσεις μπορούν να δημιουργήσουν εγκαταστάσεις δοκιμών και έργα επίδειξης για να επικυρώσουν την απόδοση και την ασφάλεια των σχεδίων SMR. Οι πρωτοβουλίες E&A μπορούν να ενισχύσουν την ανταγωνιστικότητα των SMR, να μειώσουν τους τεχνολογικούς κινδύνους και να διευκολύνουν την εμπορευματοποίησή τους.

Οι διεθνείς συνεργασίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην προώθηση της ανάπτυξης των SMR. Οι κυβερνήσεις μπορούν να συμμετάσχουν σε διμερείς ή πολυμερείς συνεργασίες για την ανταλλαγή γνώσεων, εμπειρογνωμοσύνης και πόρων που σχετίζονται με τους SMR. Οι συλλογικές προσπάθειες μπορούν να διευκολύνουν τη μεταφορά τεχνολογίας, να εναρμονίσουν τις ρυθμιστικές πρακτικές και να αντιμετωπίσουν κοινές προκλήσεις στην ανάπτυξη των SMR. Οι διεθνείς

συνεργασίες παρέχουν επίσης ευκαιρίες για κοινά έργα E&A, τυποποίηση προσεγγίσεων σχεδιασμού και επέκταση της αγοράς (ΔΟΑΕ, 2018). Οι κυβερνήσεις μπορούν να προωθήσουν τη διεθνή συνεργασία μέσω φόρουμ, ομάδων εργασίας και συμφωνιών για την προώθηση της ανάπτυξης των SMR σε παγκόσμια κλίμακα.

Οι κυβερνήσεις μπορούν επίσης να παράσχουν κίνητρα αγοράς και συμφωνίες απορρόφησης για να τονώσουν την ανάπτυξη των SMR. Τα τιμολόγια τροφοδοσίας, τα πιστοποιητικά ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και οι μηχανισμοί τιμολόγησης του άνθρακα μπορούν να δημιουργήσουν οικονομικά κίνητρα για τους SMR, καθιστώντας τους πιο ανταγωνιστικούς στην αγορά ενέργειας. Οι συμφωνίες απορρόφησης, όπου οι κυβερνήσεις δεσμεύονται να αγοράζουν μια συγκεκριμένη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας από SMR σε προκαθορισμένες τιμές, παρέχουν βεβαιότητα εσόδων και μειώνουν τους εμπορικούς κινδύνους για τους προγραμματιστές των έργων SMR (OECD/NEA, 2019). Αυτά τα κίνητρα της αγοράς και οι συμφωνίες εξαγοράς μπορούν να προσελκύσουν ιδιωτικές επενδύσεις, να αυξήσουν την εμπιστοσύνη της αγοράς και να συμβάλουν στην οικονομική βιωσιμότητα των έργων SMR.

Οι κυβερνητικές πολιτικές και τα κίνητρα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην προώθηση της ανάπτυξης και της εξάπλωσης των SMR. Η οικονομική υποστήριξη, τα εξορθολογισμένα ρυθμιστικά πλαίσια, οι πρωτοβουλίες έρευνας και ανάπτυξης, οι διεθνείς συνεργασίες και τα κίνητρα αγοράς συμβάλλουν στη δημιουργία ενός ευνοϊκού περιβάλλοντος για την ανάπτυξη των SMR. Οι κυβερνήσεις παγκοσμίως αναγνωρίζουν τις δυνατότητες των SMR στην επίτευξη των ενεργειακών στόχων, στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας. Εφαρμόζοντας υποστηρικτικές πολιτικές και κίνητρα, οι κυβερνήσεις μπορούν να ξεκλειδώσουν πλήρως το δυναμικό των SMR και να επιταχύνουν τη μετάβαση σε ένα μέλλον χαμηλών εκπομπών άνθρακα και βιώσιμης ενέργειας.

## 6 . Περιβάλλον

Καθώς ο κόσμος μεταβαίνει προς καθαρότερες και πιο βιώσιμες πηγές ενέργειας, η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ενεργειακών τεχνολογιών καθίσταται υψίστης σημασίας. Οι μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες (SMR) έχουν αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη λύση για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων με ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και αντιμετώπιση περιβαλλοντικών ανησυχιών. Αυτό το κεφάλαιο εστιάζει στις περιβαλλοντικές πτυχές των SMR, συμπεριλαμβανομένης της εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, της σύγκρισης των SMR με άλλες πηγές ενέργειας όσον αφορά τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, τη διάθεση αποβλήτων και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες, και τη σημασία της κοινής κατανόησης και αποδοχής των SMR. Εξετάζοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των SMR, μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα τον ρόλο τους στην επίτευξη των παγκόσμιων στόχων για το κλίμα και την αειφορία.

### 6.1 Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων των SMR

Η επιτυχής εφαρμογή των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR) απαιτεί ολοκληρωμένη κατανόηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεών τους. Καθώς ο κόσμος επιδιώκει τη μετάβαση προς καθαρότερες και πιο βιώσιμες πηγές ενέργειας, είναι σημαντικό να αξιολογηθούν και να μετριάστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τα έργα των SMR. Αυτή η ενότητα εστιάζει στην Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΕΠΕ) των SMR, με στόχο να παρέχει πληροφορίες για τη διαδικασία αξιολόγησης, τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τα μέτρα που μπορούν να εφαρμοστούν για την ελαχιστοποίηση των δυσμενών επιπτώσεων.

Θα εμβαθύνουμε στους συγκεκριμένους περιβαλλοντικούς παράγοντες που πρέπει να αξιολογηθούν, όπως η ποιότητα του αέρα, η ποιότητα του νερού, η χρήση γης, τα οικοσυστήματα, η ανθρώπινη υγεία και η διαχείριση των απορριμμάτων. Κάθε παράγοντας θα εξεταστεί διεξοδικά για να προσδιοριστούν οι πιθανές επιπτώσεις που σχετίζονται με τα έργα SMR και να εντοπιστούν αποτελεσματικές στρατηγικές μετριασμού.

Μέσω αυτής της διερεύνησης στοχεύουμε να υπογραμμίσουμε τη σημασία της αξιολόγησης και του μετριασμού των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, να παρέχουμε πολύτιμες πληροφορίες για τους συγκεκριμένους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη και να συμβάλουμε σε μια ολοκληρωμένη κατανόηση των περιβαλλοντικών επιδόσεων των SMR. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να υποστηρίξουμε τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων, να προωθήσουμε τη βιώσιμη

ενεργειακή ανάπτυξη και να διασφαλίσουμε την υπεύθυνη ανάπτυξη SMR στην επιδίωξή μας για ένα καθαρότερο και πιο βιώσιμο ενεργειακό μέλλον.

### **6.1.1 Ο αντίκτυπος στην ποιότητα του αέρα**

Η ποιότητα του αέρα είναι ένας κρίσιμος περιβαλλοντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την αξιολόγηση των SMR (IAEA, 2017). Η λειτουργία των SMR μπορεί ενδεχομένως να έχει τόσο άμεσες όσο και έμμεσες επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα, γεγονός που απαιτεί συνολική αξιολόγηση για τη διασφάλιση της προστασίας της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος. Αυτή η ενότητα εστιάζει στην ανάλυση του αντίκτυπου στην ποιότητα του αέρα που σχετίζεται με έργα SMR, συμπεριλαμβανομένων των πιθανών εκπομπών, των προτύπων διασποράς και των μέτρων μετριασμού.

Οι ειδικές εκπομπές από SMR ποικίλλουν ανάλογα με την τεχνολογία του αντιδραστήρα, τον τύπο του καυσίμου και τις συνθήκες λειτουργίας. Για παράδειγμα, οι αντιδραστήρες ελαφρού νερού (LWR), που είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία SMR, εκπέμπουν αμελητέες ποσότητες ραδιενεργών αερίων λόγω αποτελεσματικών συστημάτων περιορισμού. Ωστόσο, άλλοι τύποι SMR, όπως οι αντιδραστήρες υψηλής θερμοκρασίας (HTGR), ενδέχεται να απελευθερώσουν μικρές ποσότητες ραδιενεργών αερίων, συμπεριλαμβανομένων ευγενών αερίων όπως το ξένο και το κρυπτό (IAEA, 2020). Αυτές οι εκπομπές ελέγχονται προσεκτικά για να διασφαλιστεί η συμμόρφωση με τα ρυθμιστικά πρότυπα και να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπός τους στην ποιότητα του αέρα.

Για να εκτιμηθεί με ακρίβεια ο αντίκτυπος των SMR στην ποιότητα του αέρα, διεξάγονται ολοκληρωμένες μελέτες παρακολούθησης και μοντελοποίησης για την εκτίμηση των εκπομπών και την πρόβλεψη των προτύπων διασποράς τους. Αυτές οι μελέτες λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως το ύψος, η ταχύτητα του αερίου, οι μετεωρολογικές συνθήκες και η τοπογραφία (IAEA, 2020). Μέσω αυτών των αναλύσεων, μπορούν να προσδιοριστούν οι πιθανές επιπτώσεις στην ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα κοντά σε εγκαταστάσεις SMR.

Τα μοντέλα διασποράς, όπως το μοντέλο του Gaussian plume, χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της συγκέντρωσης και της χωρικής κατανομής των ρύπων στις γύρω περιοχές (EPA, 2021). Αυτά τα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως η ταχύτητα του ανέμου, η κατεύθυνση του ανέμου, οι κατηγορίες ευστάθειας και τα χαρακτηριστικά της πηγής για να προβλέψουν τα μοτίβα της διασποράς.

Η αξιολόγηση των επιπτώσεων στην ποιότητα του αέρα περιλαμβάνει τη σύγκριση των προβλεπόμενων συγκεντρώσεων των ρύπων με τα σχετικά πρότυπα και κατευθυντήριες γραμμές για την ποιότητα του αέρα (IAEA, 2017). Αυτή η ανάλυση



βοηθά στον εντοπισμό τυχόν υπερβάσεων των ρυθμιστικών ορίων και στην αξιολόγηση των σχετικών κινδύνων για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Οι επιπτώσεις μπορούν να αξιολογηθούν ως προς τη βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη έκθεση σε ρύπους, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η εγγύτητα σε ευαίσθητους υποδοχείς, η πυκνότητα του πληθυσμού και οι ευάλωτες ομάδες.

### **6.1.2 Επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού**

Η ποιότητα του νερού είναι μια κρίσιμη πτυχή που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την αξιολόγηση των Μικρών Αρθρωτών Αντιδραστήρων (SMR), καθώς έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν τα υδάτινα οικοσυστήματα και τους υδάτινους πόρους (IAEA, 2017). Αυτή η ενότητα εστιάζει στην ανάλυση των πιθανών επιπτώσεων στην ποιότητα των υδάτων που σχετίζονται με έργα SMR, συμπεριλαμβανομένης της πιθανότητας θερμικής ρύπανσης, της απελευθέρωσης ραδιενεργών υλικών και της εφαρμογής μέτρων μετριασμού.

#### Θερμική ρύπανση

Μία από τις κύριες ανησυχίες σχετικά με τις επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού είναι η θερμική ρύπανση. Οι SMR χρησιμοποιούν το νερό ως ψυκτικό στη διαδικασία παραγωγής πυρηνικής ενέργειας. Το θερμαινόμενο νερό απορρίπτεται ξανά σε υδάτινα σώματα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας του νερού. Οι αυξημένες θερμοκρασίες του νερού μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τους υδρόβιους οργανισμούς, ιδιαίτερα αυτούς που είναι ευαίσθητοι στις αλλαγές θερμοκρασίας, όπως τα ψάρια και η λοιπή υδρόβια πανίδα.

Για την αξιολόγηση της πιθανής θερμικής ρύπανσης, εφαρμόζονται διάφορα μέτρα, συμπεριλαμβανομένης της παρακολούθησης της θερμοκρασίας του νερού στα σημεία απόρριψης και της εκτίμησης της φέρουσας ικανότητας του υδατικού συστήματος υποδοχής. Χρησιμοποιούνται προγνωστικά μοντέλα για την εκτίμηση της διασποράς του θερμικού νέφους και την αξιολόγηση της πιθανής επίδρασής του στα υδάτινα οικοσυστήματα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέτρα μετριασμού, όπως η χρήση πύργων ψύξης ή η υιοθέτηση εναλλακτικών συστημάτων ψύξης για την ελαχιστοποίηση της θερμικής ρύπανσης και τη διατήρηση της ακεραιότητας των υδάτινων σωμάτων.

#### Απελευθέρωση ραδιενεργού υλικού

Οι SMR περιλαμβάνουν τη χρήση ραδιενεργών υλικών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που εγείρει ανησυχίες σχετικά με την πιθανή απελευθέρωση

ραδιενεργών ουσιών στα υδάτινα σώματα. Είναι ζωτικής σημασίας η πρόληψη της απελευθέρωσης ραδιενεργών υλικών και η διασφάλιση της προστασίας της ποιότητας του νερού και του περιβάλλοντος. Ισχύουν αυστηροί κανονισμοί και αυστηρά προγράμματα παρακολούθησης για την πρόληψη και τον εντοπισμό τυχόν εκλύσεων ραδιενέργειας.

Ο σχεδιασμός και η λειτουργία των SMR ενσωματώνουν πολλαπλές δικλείδες ασφαλείας και συστήματα περιορισμού για την πρόληψη της διαφυγής ραδιενεργών υλικών (IAEA, 2020). Εφαρμόζονται αυστηρά μέτρα ποιοτικού ελέγχου σε όλη τη φάση κατασκευής και λειτουργίας για να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος. Διενεργούνται τακτικές επιθεωρήσεις, συντήρηση και δοκιμές για τη διασφάλιση της ακεραιότητας αυτών των συστημάτων ασφαλείας. Σε περίπτωση εντοπισμού εκλύσεων, εφαρμόζονται κατάλληλα μέτρα αντιμετώπισης και μετριασμού για τον περιορισμό και την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στην ποιότητα του νερού.

#### Μέτρα Μετριασμού και Περιβαλλοντική Παρακολούθηση

Για να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος στην ποιότητα του νερού των SMR, χρησιμοποιούνται διάφορα μέτρα μετριασμού. Αυτά τα μέτρα περιλαμβάνουν την εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας νερού για την απομάκρυνση των ακαθαρσιών και τη μείωση της απελευθέρωσης ρύπων. Επιπλέον, στρατηγικές όπως η χρήση συστημάτων ψύξης κλειστού κύκλου, τα οποία ελαχιστοποιούν την πρόσληψη και την απόρριψη νερού, μπορούν να μειώσουν σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των SMR (IAEA, 2017).

Η περιβαλλοντική παρακολούθηση διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην αξιολόγηση και τη διαχείριση των επιπτώσεων των SMR στην ποιότητα του νερού. Διεξάγονται τακτικά προγράμματα παρακολούθησης για τη μέτρηση βασικών παραμέτρων ποιότητας του νερού, όπως η θερμοκρασία, το pH, το διαλυμένο οξυγόνο και η παρουσία ρύπων. Αυτά τα δεδομένα παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων μετριασμού και τον εντοπισμό τυχόν αποκλίσεων από τα αναμενόμενα πρότυπα ποιότητας του νερού. Τα συστήματα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο μπορούν να παρέχουν έγκαιρη ανίχνευση τυχόν ανωμαλιών, επιτρέποντας την άμεση λήψη μέτρων για τον μετριασμό των πιθανών επιπτώσεων. (UNEP, 2017).

Η αξιολόγηση των επιπτώσεων στην ποιότητα των υδάτων αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της συνολικής εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων για έργα SMR. Μέσω προσεκτικής ανάλυσης της πιθανής θερμικής ρύπανσης και της απελευθέρωσης ραδιενεργών υλικών, παράλληλα με την εφαρμογή ισχυρών μέτρων μετριασμού και προγραμμάτων περιβαλλοντικής παρακολούθησης, οι επιπτώσεις στην ποιότητα του

νερού που σχετίζονται με τους SMR μπορούν να αξιολογηθούν και να διαχειριστούν αποτελεσματικά. Η τήρηση αυστηρών κανονισμών και η υιοθέτηση βέλτιστων πρακτικών διασφαλίζουν την προστασία των υδάτινων πόρων και τη διατήρηση των υδάτινων οικοσυστημάτων. Με την εφαρμογή κατάλληλων μέτρων, τα έργα SMR μπορούν να ελαχιστοποιήσουν το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα και να συμβάλουν στη βιώσιμη και υπεύθυνη ενεργειακή ανάπτυξη.

### **6.1.3 Χρήση γης και επιπτώσεις στους οικοτόπους**

Η χρήση γης και οι επιπτώσεις στους οικοτόπους είναι μια κρίσιμη πτυχή για την αξιολόγηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των Μικρών Αρθρωτών Αντιδραστήρων (SMR) (IAEA, 2017). Τα έργα SMR απαιτούν γη για την κατασκευή και τη λειτουργία των εγκαταστάσεων των αντιδραστήρων, των υποδομών υποστήριξης και άλλων συναφών εγκαταστάσεων. Η χρήση της γης για τους SMR πρέπει να αξιολογηθεί προσεκτικά για να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος στους φυσικούς οικοτόπους, τη βιοποικιλότητα και τις υπάρχουσες χρήσεις γης (IAEA, 2017). Η αξιολόγηση περιλαμβάνει την εξέταση της καταλληλότητας της επιλεγμένης τοποθεσίας, της πιθανής διατάραξης των φυσικών οικοσυστημάτων και της συμβατότητας με τα υπάρχοντα σχέδια χρήσης γης.

Για τον μετριασμό των επιπτώσεων από τη χρήση γης, τα κριτήρια επιλογής τοποθεσίας περιλαμβάνουν συνήθως παράγοντες όπως η εγγύτητα στην υπάρχουσα υποδομή, η αποφυγή περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών και η εξέταση της διαθεσιμότητας γης. Η εφαρμογή συμπαγών και αρθρωτών σχεδίων για SMR μπορεί να βοηθήσει στη βελτιστοποίηση της χρήσης γης και στη μείωση του συνολικού αποτυπώματος των εγκαταστάσεων. Επιπλέον, η υιοθέτηση καινοτόμων προσεγγίσεων χωροθέτησης, όπως η συστέγαση με υπάρχουσες πυρηνικές ή βιομηχανικές εγκαταστάσεις, μπορεί να ελαχιστοποιήσει περαιτέρω τις απαιτήσεις χρήσης γης.

Η ανάπτυξη SMR μπορεί να οδηγήσει επίσης σε κατακερματισμό των οικοτόπων, ιδιαίτερα εάν το έργο βρίσκεται σε περιοχές με υψηλή οικολογική αξία ή όπου υπάρχουν σημαντικοί φυσικοί οικοτόποι (WWF, 2019). Ο κατακερματισμός των οικοτόπων μπορεί να διαταράξει τις οικολογικές διεργασίες, να οδηγήσει στην απομόνωση των πληθυσμών των ειδών και να οδηγήσει σε απώλεια της βιοποικιλότητας. Είναι σημαντικό να αξιολογηθούν και να διαχειριστούν οι πιθανές επιπτώσεις του κατακερματισμού των οικοτόπων κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση έργων SMR.

Τα μέτρα μετριασμού για τον κατακερματισμό των οικοτόπων περιλαμβάνουν την εφαρμογή οικολογικών διαδρόμων ή περασμάτων άγριας ζωής για τη διευκόλυνση της μετακίνησης των ειδών και τη διατήρηση της οικολογικής συνδεσιμότητας. Οι εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων και οι διαβουλεύσεις με τους σχετικούς

ενδιαφερομένους και εμπειρογνώμονες μπορούν να συμβάλουν στον εντοπισμό κατάλληλων μέτρων μετριασμού προσαρμοσμένων στο συγκεκριμένο έργο και στο τοπικό πλαίσιο.

Για τον μετριασμό των επιπτώσεων της χρήσης γης και των ενδιαιτημάτων των έργων SMR, μπορούν να εφαρμοστούν διάφορα μέτρα μετριασμού. Αυτά τα μέτρα περιλαμβάνουν την αποκατάσταση των περιοχών που επηρεάζονται, τη δημιουργία περιοχών διατήρησης και την εφαρμογή προγραμμάτων αντιστάθμισης βιοποικιλότητας (IAEA, 2020). Οι προσπάθειες αποκατάστασης των οικοτόπων μπορούν να επικεντρωθούν στην αποκατάσταση της αυτοφυούς βλάστησης, στη δημιουργία κατάλληλων οικοτόπων για την άγρια ζωή και στη βελτίωση των οικολογικών λειτουργιών.

Η υιοθέτηση βέλτιστων πρακτικών, όπως η ενσωμάτωση πράσινων υποδομών στους σχεδιασμούς έργων, μπορεί να συμβάλει στην ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στη γη και τους οικοτόπους. Η πράσινη υποδομή περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως πράσινες στέγες, προστατευτικά με βλάστηση και εξωραϊσμό γηγενών φυτών, που προάγουν τη βιοποικιλότητα και παρέχουν οικολογικά οφέλη. Η ενσωμάτωση πρακτικών βιώσιμης διαχείρισης της γης, όπως οι τεχνικές ανάπτυξης χαμηλού αντίκτυπου, μπορεί να ελαχιστοποιήσει περαιτέρω τις επιπτώσεις χρήσης γης και οικοτόπων που σχετίζονται με τους SMR.

#### **6.1.4 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία**

Η αξιολόγηση του αντίκτυπου στην ανθρώπινη υγεία είναι μια κρίσιμη πτυχή της αξιολόγησης των πιθανών επιπτώσεων των Μικρών Αρθρωτών Αντιδραστήρων (SMR) στις τοπικές κοινότητες και τους γύρω πληθυσμούς (IAEA, 2017). Αυτή η ενότητα εστιάζει στην ανάλυση των πιθανών επιπτώσεων των έργων SMR στην ανθρώπινη υγεία, συμπεριλαμβανομένης της έκθεσης σε ακτινοβολία, της ποιότητας του αέρα και του νερού.

Η έκθεση στην ακτινοβολία είναι ένα από τα κύρια προβλήματα που σχετίζονται με τα έργα πυρηνικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των SMR (IAEA, 2011). Είναι σημαντικό να αξιολογούνται και να διαχειρίζονται πιθανοί κίνδυνοι ακτινοβολίας για να διασφαλιστεί η ασφάλεια και η ευημερία των ατόμων που ζουν ή εργάζονται κοντά σε εγκαταστάσεις SMR.

Η αξιολόγηση της έκθεσης σε ακτινοβολία περιλαμβάνει τη μέτρηση και την πρόβλεψη των επιπέδων ακτινοβολίας που εκπέμπεται κατά τη διάρκεια κανονικών λειτουργιών και πιθανών σεναρίων ατυχημάτων. Αυτό περιλαμβάνει την αξιολόγηση του αντίκτυπου τόσο της εξωτερικής όσο και της εσωτερικής έκθεσης σε ακτινοβολία στους εργαζόμενους και στο ευρύ κοινό. Τα μέτρα μετριασμού μπορεί να

περιλαμβάνουν την εφαρμογή προγραμμάτων ακτινοπροστασίας, συστημάτων παρακολούθησης και σχεδίων αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου έκθεσης σε ακτινοβολία και τη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τα ρυθμιστικά πρότυπα.

Τα έργα SMR μπορούν να έχουν έμμεσες επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα και των υδάτων μέσω διαφόρων μηχανισμών όπως η απελευθέρωση εκπομπών, οι θερμικές εκκενώσεις ή η πιθανότητα τυχαίας έκλυσης (IAEA, 2017). Είναι ζωτικής σημασίας η αξιολόγηση και η διαχείριση αυτών των επιπτώσεων για την προστασία της ανθρώπινης υγείας και τη διατήρηση της ποιότητας του περιβάλλοντος .

Η αξιολόγηση των επιπτώσεων στην ποιότητα του αέρα και του νερού περιλαμβάνει την παρακολούθηση και τη μοντελοποίηση της διασποράς των ρύπων, την αξιολόγηση των πιθανών οδών έκθεσης και την αξιολόγηση των σχετικών κινδύνων για την υγεία. Τα μέτρα μετριασμού μπορεί να περιλαμβάνουν την εγκατάσταση τεχνολογιών ελέγχου της ρύπανσης, την εφαρμογή συστημάτων επεξεργασίας νερού και τη δημιουργία προγραμμάτων παρακολούθησης για τη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τα πρότυπα ποιότητας του αέρα και του νερού (WHO, 2011; WHO, 2018).

Τα έργα SMR μπορούν να έχουν και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις στις τοπικές κοινότητες, συμπεριλαμβανομένων των αλλαγών στην απασχόληση, της ανάπτυξης υποδομών και της κοινοτικής ευημερίας (WNA, 2019). Η κατανόηση και η αντιμετώπιση αυτών των παραγόντων είναι ζωτικής σημασίας για την προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης και τη διασφάλιση θετικών αποτελεσμάτων για τον πληθυσμό.

Η αξιολόγηση των κοινωνικοοικονομικών παραγόντων περιλαμβάνει την αξιολόγηση των πιθανών πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των έργων SMR για την τοπική οικονομία, τις ευκαιρίες απασχόλησης και τη συνολική ποιότητα ζωής. Μπορεί επίσης να περιλαμβάνει ζητήματα κοινωνικής ισότητας, δέσμευσης της κοινότητας και πιθανότητας μετατόπισης ή διακοπής των μέσων διαβίωσης. Τα μέτρα μετριασμού μπορεί να περιλαμβάνουν την εφαρμογή προγραμμάτων κοινοτικής ανάπτυξης, πρωτοβουλίες ανάπτυξης ικανοτήτων και την προώθηση της τοπικής συμμετοχής στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων.

### **6.1.5 Αντίκτυπος στη διαχείριση απορριμμάτων**

Η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων είναι μια κρίσιμη πτυχή των έργων SMR, που διασφαλίζει τον ασφαλή χειρισμό, αποθήκευση και διάθεση των αποβλήτων που παράγονται κατά τις φάσεις λειτουργίας και παροπλισμού (IAEA, 2011). Αυτή η ενότητα εστιάζει στην ανάλυση των πιθανών επιπτώσεων της διαχείρισης

αποβλήτων SMR στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία, καθώς και τις στρατηγικές και τους κανονισμούς που ισχύουν για την αντιμετώπιση αυτών των ανησυχιών.

Τα ραδιενεργά απόβλητα που παράγονται από έργα SMR μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διαφορετικούς τύπους με βάση τα επίπεδα δραστηριότητάς τους, τους χρόνους ημιζωής και τους πιθανούς κινδύνους (WNA, 2020). Αυτά περιλαμβάνουν απόβλητα χαμηλής ραδιενέργειας (LLW), απόβλητα ενδιάμεσης στάθμης (ILW) και απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας (HLW). Κάθε είδος αποβλήτων απαιτεί συγκεκριμένες μεθόδους χειρισμού και διάθεσης για να διασφαλιστεί η προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος.

Το LLW αποτελείται από υλικά με σχετικά χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας, όπως μολυσμένα εργαλεία, προστατευτικά ρούχα και εξαρτήματα αντιδραστήρα. Το ILW περιέχει απόβλητα με υψηλότερα επίπεδα ραδιενέργειας, όπως ρητίνες και φίλτρα από συστήματα επεξεργασίας νερού. Το HLW είναι ο πιο επικίνδυνος τύπος αποβλήτων και αποτελείται από αναλωμένα καύσιμα και άλλα υλικά υψηλής ραδιενέργειας.

Οι στρατηγικές διαχείρισης αποβλήτων για τους SMR στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του όγκου και των κινδύνων των αποβλήτων, στην πρόληψη της απελευθέρωσης ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον και στη διασφάλιση μακροπρόθεσμης απομόνωσης και περιορισμού (IAEA, 2011). Αυτές οι στρατηγικές περιλαμβάνουν πολλά βασικά βήματα, όπως χαρακτηρισμό απορριμμάτων, επεξεργασία, συσκευασία, αποθήκευση και τελική διάθεση.

Ο χαρακτηρισμός των αποβλήτων περιλαμβάνει την αξιολόγηση των επιπέδων ραδιενέργειας και των φυσικών ιδιοτήτων των αποβλήτων για τον προσδιορισμό των κατάλληλων μεθόδων χειρισμού και διάθεσης. Οι διαδικασίες επεξεργασίας, όπως η μείωση του όγκου, η συμπίεση και η ενθυλάκωση, μπορούν να εφαρμοστούν για τη μείωση του όγκου των αποβλήτων και τη βελτίωση της σταθερότητάς τους.

Η συσκευασία είναι ζωτικής σημασίας για την ασφαλή μεταφορά και αποθήκευση των απορριμμάτων. Περιλαμβάνει την τοποθέτηση απορριμμάτων σε δοχεία που παρέχουν θωράκιση και περιορισμό για την πρόληψη της απελευθέρωσης ραδιενεργών υλικών. Οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν προσωρινή ή μακροπρόθεσμη αποθήκευση για διαφορετικούς τύπους απορριμμάτων. Αυτές οι εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν επιτόπιες λίμνες αποθήκευσης ή βαρέλια για αναλωμένα καύσιμα, καθώς και ειδικά κατασκευασμένες εγκαταστάσεις αποθήκευσης για LLW και ILW.

Η τελική διάθεση του HLW γίνεται συνήθως σε βαθιές γεωλογικές αποθήκες, όπου τα απόβλητα είναι μόνιμα απομονωμένα από τη βιόσφαιρα. Αυτές οι αποθήκες βρίσκονται σε σταθερούς γεωλογικούς σχηματισμούς, διασφαλίζοντας τη

μακροπρόθεσμη συγκράτηση και απομόνωση των ραδιενεργών αποβλήτων (WNA, 2021).

Η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων υπόκειται σε αυστηρά κανονιστικά πλαίσια και μέτρα ασφαλείας για την προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος (IAEA, 2016). Διεθνείς οργανισμοί, όπως ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ), παρέχουν καθοδήγηση και πρότυπα για πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων.

Τα ρυθμιστικά πλαίσια περιλαμβάνουν απαιτήσεις για τον χαρακτηρισμό, τη συσκευασία, τη μεταφορά και τη διάθεση απορριμμάτων. Αυτοί οι κανονισμοί στοχεύουν να διασφαλίσουν ότι οι δραστηριότητες διαχείρισης αποβλήτων συμμορφώνονται με αυστηρά πρότυπα ασφαλείας και προστατεύουν τις μελλοντικές γενιές από πιθανούς κινδύνους.

Τα μέτρα ασφαλείας περιλαμβάνουν την εφαρμογή ισχυρών συστημάτων παρακολούθησης και ελέγχου, καθώς και τακτικές επιθεωρήσεις και ελέγχους για την αξιολόγηση της συμμόρφωσης με τις κανονιστικές απαιτήσεις. Η συμμετοχή ρυθμιστικών φορέων και ανεξάρτητων εμπειρογνομόνων στην επίβλεψη των δραστηριοτήτων διαχείρισης αποβλήτων προσθέτει ένα επιπλέον επίπεδο λογοδοσίας και διασφαλίζει τη διαφάνεια στη διαδικασία.

### **6.1.6 Συμπεράσματα**

Σε αυτό το κεφάλαιο, έχουμε διερευνήσει διάφορες πτυχές της εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των SMR, συμπεριλαμβανομένης της ποιότητας του αέρα, της ποιότητας των υδάτων, της χρήσης γης και των οικοτόπων, της ανθρώπινης υγείας και της διαχείρισης αποβλήτων. Αναλύοντας αυτούς τους παράγοντες, αποκτούμε μια ολοκληρωμένη κατανόηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και προκλήσεων που σχετίζονται με τα έργα SMR.

Τα ευρήματα υπογραμμίζουν τη σημασία της διεξαγωγής μιας ισχυρής εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων νωρίς στον κύκλο ζωής του έργου. Τέτοιες αξιολογήσεις παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τις πιθανές επιπτώσεις και επιτρέπουν την ανάπτυξη αποτελεσματικών μέτρων μετριασμού. Η δέσμευση των ενδιαφερομένων έχει αναδειχθεί ως κρίσιμη πτυχή, διασφαλίζοντας τη διαφάνεια, την αντιμετώπιση των ανησυχιών και την ενσωμάτωση των τοπικών προοπτικών στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων.

Τα διδάγματα από μελέτες περιπτώσεων και οι εμπειρίες από προηγούμενα έργα SMR χρησιμεύουν ως πολύτιμη καθοδήγηση για μελλοντικές εξελίξεις. Αυτά τα μαθήματα τονίζουν τη σημασία της προσαρμοστικής διαχείρισης, της επιλογής

τεχνολογίας, της παρακολούθησης και της υποβολής εκθέσεων και της ανταλλαγής γνώσεων μεταξύ των ενδιαφερομένων. Με την εφαρμογή αυτών των μαθημάτων, η περιβαλλοντική απόδοση των έργων SMR μπορεί να βελτιωθεί, συμβάλλοντας στη βιώσιμη ενεργειακή ανάπτυξη.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των SMR πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε σύγκριση με άλλες πηγές ενέργειας. Οι SMR έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν πολλά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, όπως μειωμένες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, βελτιωμένη διαχείριση απορριμμάτων και αποτελεσματική χρήση γης. Ωστόσο, είναι ζωτικής σημασίας η διεξαγωγή ολοκληρωμένων συγκριτικών αξιολογήσεων για την αξιολόγηση των ειδικών περιβαλλοντικών ανταλλαγών και οφελών των SMR σε σχέση με άλλες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της συμβατικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα.

Συμπερασματικά, η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των SMR είναι ένα κρίσιμο συστατικό της ανάπτυξής τους. Με την ενσωμάτωση ισχυρών μεθοδολογιών αξιολόγησης, τη συμμετοχή των ενδιαφερομένων και την εφαρμογή αποτελεσματικών μέτρων μετριασμού, τα έργα SMR μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να συμβάλουν σε βιώσιμα ενεργειακά συστήματα. Είναι σημαντικό να συνεχιστεί η παρακολούθηση και η βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων μέσω της συνεχούς έρευνας, της συνεργασίας και της ανταλλαγής γνώσεων.

## **6.2 Σύγκριση των SMR με άλλες πηγές ενέργειας**

---

### **6.2.1 Εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου**

Η σύγκριση των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR) με άλλες πηγές ενέργειας είναι μια κρίσιμη πτυχή για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων. Ένας βασικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Αυτή η ανάλυση εστιάζει στην αξιολόγηση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου που σχετίζονται με τους SMR σε σύγκριση με τη συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα. Εξετάζοντας το αποτύπωμα άνθρακα των SMR και την πιθανή συμβολή τους στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, αυτή η μελέτη στοχεύει να παράσχει πληροφορίες για το ρόλο των SMR στη μετάβαση προς ένα ενεργειακό μέλλον χαμηλών εκπομπών άνθρακα.

Σε αντίθεση με τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, οι οποίοι απελευθερώνουν σημαντικές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα



(CO<sub>2</sub>) και άλλων αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, οι SMR προσφέρουν μια πιο καθαρή εναλλακτική για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η απουσία εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά τη διαδικασία παραγωγής πυρηνικής ενέργειας τοποθετεί τους SMR ως μια πολλά υποσχόμενη λύση για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και τη μείωση της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Μια μελέτη του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA) (2020) τόνισε ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από πυρηνικούς σταθμούς, συμπεριλαμβανομένων των SMR, απέφυγε την εκπομπή άνω των 2,5 δισεκατομμυρίων τόνων CO<sub>2</sub> παγκοσμίως το 2019. Αυτή η σημαντική μείωση στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου καταδεικνύουν τη δυνατότητα των SMR να συμβάλλουν στην επίτευξη εθνικών και διεθνών κλιματικών στόχων.

Σύμφωνα με τον IEA (2020), οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα ήταν υπεύθυνοι για περίπου 10 δισεκατομμύρια τόνους εκπομπών CO<sub>2</sub> το 2019. Η σύγκριση των SMR με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από άνθρακα αποκαλύπτει μια έντονη διαφορά όσον αφορά τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου.

Επιπλέον, οι SMR υπερτερούν των σταθμών παραγωγής ενέργειας φυσικού αερίου, οι οποίοι, αν και εκπέμπουν λιγότερο άνθρακα από τον άνθρακα, εξακολουθούν να εκπέμπουν CO<sub>2</sub> ως υποπροϊόν της καύσης. Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου συμβάλλουν στις εκπομπές μεθανίου, ένα ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου. Αντίθετα, οι SMR προσφέρουν μια πιο βιώσιμη και καθαρότερη εναλλακτική λύση χωρίς να συμβάλλουν στις εκπομπές CO<sub>2</sub> ή μεθανίου κατά τη λειτουργία τους (IAEA, 2020).

#### Ενσωμάτωση SMR σε Ενεργειακά Συστήματα

Η ενσωμάτωση SMR στα ενεργειακά συστήματα μπορεί να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στη μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Η ανάπτυξη SMR μπορεί να επιτρέψει τη μετατόπιση συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές CO<sub>2</sub> από τον τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι SMR μπορούν να τοποθετηθούν στρατηγικά κοντά σε υπάρχοντες σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, διευκολύνοντας τη σταδιακή κατάργηση αυτών των πηγών υψηλών εκπομπών διατηρώντας παράλληλα τη σταθερότητα του δικτύου και τον ενεργειακό εφοδιασμό. Αυτή η προσέγγιση ελαχιστοποιεί την ανάγκη για μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, μειώνοντας έτσι τις απώλειες μετάδοσης και βελτιώνοντας τη συνολική ενεργειακή απόδοση.

Επιπλέον, η επεκτασιμότητα και η σπονδυλωτή φύση των SMR παρέχουν ευελιξία στην κάλυψη της ζήτησης ενέργειας, ειδικά σε περιοχές όπου ενδέχεται να μην είναι εφικτή η κατασκευή πυρηνικών σταθμών μεγάλης κλίμακας. Η ανάπτυξη των SMR μπορεί να υποστηρίξει την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρέχοντας αξιόπιστη και βασική ηλεκτρική ενέργεια, συμπληρώνοντας τις διαλείπουσες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια.

Συμπερασματικά, η σύγκριση των SMR με άλλες πηγές ενέργειας αναδεικνύει τα σημαντικά πλεονεκτήματά τους όσον αφορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Οι SMR εκπέμπουν αμελητέο CO<sub>2</sub> κατά τη λειτουργία τους, σε αντίθεση με την παραγωγή ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα. Οι ελάχιστες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου των SMR τους καθιστούν ως μια πολλά υποσχόμενη λύση για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και την επίτευξη στόχων βιώσιμης ανάπτυξης. Με την ενσωμάτωση των SMR σε ενεργειακά συστήματα και τη στρατηγική αντικατάσταση των συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής υψηλών εκπομπών, μπορεί να επιταχυνθεί η μετάβαση προς μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα, συμβάλλοντας σε ένα καθαρότερο και πιο βιώσιμο μέλλον.

### **6.2.2 Διαχείριση απορριμμάτων**

Η σύγκριση των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR) με άλλες πηγές ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων. Η διαχείριση των απορριμμάτων είναι μια βασική πτυχή αυτής της σύγκρισης. Αυτή η ανάλυση εστιάζει στην αξιολόγηση των πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων που σχετίζονται με τους SMR σε σύγκριση με άλλες πηγές ενέργειας. Εξετάζοντας τις στρατηγικές για τη διάθεση, την αποθήκευση και τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αυτή η μελέτη στοχεύει να παράσχει πληροφορίες σχετικά με την απόδοση διαχείρισης αποβλήτων των SMR και τη συμβολή τους στη βιώσιμη παραγωγή ενέργειας.

Οι SMR έχουν εγγενή πλεονεκτήματα στη διαχείριση αποβλήτων σε σύγκριση με άλλες πηγές ενέργειας. Ένα βασικό πλεονέκτημα είναι ο σχετικά μικρός όγκος απορριμμάτων που παράγονται. Οι SMR παράγουν λιγότερα απόβλητα σε σύγκριση με τους συμβατικούς πυρηνικούς σταθμούς λόγω του μικρότερου μεγέθους τους και της χαμηλότερης ισχύος εξόδου. Τα απόβλητα που παράγονται από τους SMR ταξινομούνται σε απόβλητα χαμηλής στάθμης (LLW), απόβλητα ενδιάμεσης στάθμης (ILW) και απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας (HLW), καθένα από τα οποία απαιτεί συγκεκριμένες μεθόδους χειρισμού και διάθεσης (IAEA, 2017).

Το LLW των SMR περιλαμβάνει συνήθως αντικείμενα με ελάχιστα επίπεδα ραδιενέργειας, όπως μολυσμένα προστατευτικά ρούχα και εργαλεία. Το ILW

περιλαμβάνει υλικά με υψηλότερα επίπεδα ραδιενέργειας, όπως ρητίνες και φίλτρα. Το HLW αποτελείται από αναλωμένα καύσιμα και υλικά υψηλής ραδιενέργειας (IAEA, 2017).

Οι συμβατικοί πυρηνικοί σταθμοί παράγουν μεγαλύτερους όγκους αποβλήτων λόγω της υψηλότερης ισχύος τους. Οι μεγαλύτερες ποσότητες αποβλήτων που παράγονται από αυτές τις εγκαταστάσεις δημιουργούν προκλήσεις όσον αφορά την αποθήκευση, τη διάθεση και τη μακροπρόθεσμη διαχείριση. Οι SMR, από την άλλη πλευρά, μπορούν να χρησιμοποιήσουν καινοτόμες στρατηγικές διαχείρισης αποβλήτων που είναι πιο διαχειρίσιμες και οικονομικά αποδοτικές (WNA, 2020).

Μια πολλά υποσχόμενη στρατηγική διαχείρισης αποβλήτων για τους SMR είναι η έννοια της «ολοκληρωτικής» ή «παθητικής» διαχείρισης αποβλήτων, η οποία περιλαμβάνει την ενσωμάτωση συστημάτων επεξεργασίας και διάθεσης αποβλήτων στο σχεδιασμό SMR. Αυτή η προσέγγιση ελαχιστοποιεί τη μεταφορά απορριμμάτων και επιτρέπει την αποτελεσματική και ασφαλή διαχείριση των απορριμμάτων επιτόπου (ΔΟΑΕ, 2017).

Επιπλέον, οι SMR μπορούν επίσης να υιοθετήσουν προηγμένες τεχνολογίες επεξεργασίας αποβλήτων, όπως πυροεπεξεργασία ή προηγμένες μεθόδους επανεπεξεργασίας, οι οποίες μπορούν να μειώσουν τον όγκο και τη ραδιοτοξικότητα των αποβλήτων. Αυτές οι τεχνολογίες έχουν τη δυνατότητα να ανακυκλώσουν και να επαναχρησιμοποιήσουν ορισμένες ροές αποβλήτων, βελτιστοποιώντας περαιτέρω τις πρακτικές διαχείρισής τους (ΔΟΑΕ, 2017).

Η συμπαγής φύση των SMR επιτρέπει την επιτόπια αποθήκευση και τις εγκαταστάσεις κεντρικής διαχείρισης απορριμμάτων, μειώνοντας την ανάγκη για μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτό ελαχιστοποιεί τους πιθανούς κινδύνους που σχετίζονται με ατυχήματα μεταφοράς απορριμμάτων (ΔΟΑΕ, 2017).

Επιπλέον, αυστηρά ρυθμιστικά πλαίσια και μέτρα ασφαλείας διέπουν τη διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων των SMR. Διεθνείς οργανισμοί, όπως ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ), παρέχουν κατευθυντήριες γραμμές και πρότυπα για πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων. Αυτοί οι κανονισμοί διασφαλίζουν ότι οι δραστηριότητες διαχείρισης αποβλήτων συμμορφώνονται με αυστηρά πρότυπα ασφαλείας και προστατεύουν την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον (ΔΟΑΕ, 2017).

Συμπερασματικά, η σύγκριση των πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων μεταξύ SMR και άλλων πηγών ενέργειας υπογραμμίζει τα πλεονεκτήματα των SMR όσον αφορά τον όγκο, την αποθήκευση και τη διάθεση των αποβλήτων. Το μικρότερο μέγεθος και η πολυμορφικότητα των SMR προσφέρουν πιο διαχειρίσιμες επιλογές, συμπεριλαμβανομένης της ολοκληρωμένης διαχείρισης απορριμμάτων και προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας. Αυτές οι στρατηγικές βελτιστοποιούν την

αποθήκευση αποβλήτων, ελαχιστοποιούν τους κινδύνους μεταφοράς και μειώνουν τις μακροπρόθεσμες περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αποβλήτων. Επιπλέον, αυστηρά ρυθμιστικά πλαίσια και μέτρα ασφαλείας διασφαλίζουν τον ασφαλή χειρισμό και την απόρριψη ραδιενεργών αποβλήτων από SMR. Η ενσωμάτωση αυτών των πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων τοποθετεί τους SMR ως μια πολλά υποσχόμενη λύση για βιώσιμη παραγωγή ενέργειας, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τους περιβαλλοντικούς κινδύνους.

### **6.2.3 Λοιποί περιβαλλοντικοί παράγοντες**

Αυτή η ανάλυση στοχεύει να συγκρίνει τους Μικρούς Αρθρωτούς Αντιδραστήρες (SMR) με άλλες πηγές ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη μια σειρά περιβαλλοντικών παραγόντων πέρα από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και τη διάθεση απορριμμάτων. Εστιάζοντας σε πτυχές όπως η χρήση γης, η κατανάλωση νερού και οι επιπτώσεις στο οικοσύστημα, αυτή η μελέτη παρέχει πληροφορίες για την ευρύτερη περιβαλλοντική απόδοση των SMR σε σχέση με άλλες πηγές ενέργειας. Εξετάζοντας αυτούς τους παράγοντες, μπορούμε να αποκτήσουμε μια ολοκληρωμένη κατανόηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και πλεονεκτημάτων των SMR.

#### Χρήση γης και περιβαλλοντικό αποτύπωμα

Ένας σημαντικός περιβαλλοντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σύγκριση των πηγών ενέργειας είναι η χρήση γης και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Οι SMR έχουν το πλεονέκτημα του μικρότερου φυσικού αποτυπώματος σε σύγκριση με τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής μεγάλης κλίμακας, οι οποίοι απαιτούν εκτεταμένες χερσαίες εκτάσεις για εγκατάσταση και λειτουργία. Οι SMR μπορούν να αναπτυχθούν με κατανομημένο τρόπο, καταλαμβάνοντας λιγότερη γη και επιτρέποντας μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή τοποθεσίας (IAEA, 2020).

Αντίθετα, οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, όπως οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα ή φυσικού αερίου, απαιτούν συχνά μεγάλες εκτάσεις γης για εξόρυξη καυσίμων, αποθήκευση και τη σχετική υποδομή. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αποψίλωση των δασών, απώλεια οικοτόπων και διαταραχή του οικοσυστήματος. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια απαιτούν επίσης σημαντικές χερσαίες εκτάσεις για εγκατάσταση, αν και γενικά έχουν χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σύγκριση με την παραγωγή ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα (UNEP, 2017).

### Κατανάλωση νερού και επιπτώσεις

Η κατανάλωση νερού είναι ένας άλλος κρίσιμος περιβαλλοντικός παράγοντας. Οι SMR γενικά έχουν χαμηλότερη κατανάλωση νερού σε σύγκριση με τους συμβατικούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, συμπεριλαμβανομένων των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα και φυσικού αερίου. Τα συστήματα ψύξης κλειστού κύκλου που χρησιμοποιούνται σε πολλούς σχεδιασμούς SMR ελαχιστοποιούν την πρόσληψη νερού ανακυκλώνοντας και επαναχρησιμοποιώντας το νερό ψύξης (IAEA, 2020).

Αντίθετα, οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής βασίζονται συχνά σε συστήματα ψύξης ανοιχτού βρόχου που καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες νερού από τοπικά υδατικά συστήματα. Αυτή η υψηλή κατανάλωση νερού μπορεί να οδηγήσει σε λειψυδρία, διαταραχή του οικοσυστήματος και επιπτώσεις στην υδάτινη βιοποικιλότητα (EPA, 2021).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η υδροηλεκτρική ενέργεια και η βιοενέργεια, μπορούν επίσης να έχουν σημαντική κατανάλωση νερού και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μπορούν να εκτοπίσουν κοινότητες, να αλλάξουν τα οικοσυστήματα των ποταμών και να επηρεάσουν τη διαθεσιμότητα νερού. Η παραγωγή βιοενέργειας βασίζεται σε εκτεταμένους γεωργικούς πόρους και υδάτινους πόρους, που ενδεχομένως οδηγούν σε αλλαγή χρήσης γης, αποψίλωση δασών και ρύπανση των υδάτων (UNEP, 2017).

### Επιπτώσεις στο Οικοσύστημα και Διατήρηση της Βιοποικιλότητας

Ο αντίκτυπος στα οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα είναι ένα άλλο κρίσιμο περιβαλλοντικό ζήτημα. Οι SMR, λόγω της μικρότερης κλίμακας τους, έχουν το πλεονέκτημα ότι προκαλούν δυνητικά λιγότερες διαταραχές στους φυσικούς οικοτόπους και τη βιοποικιλότητα σε σύγκριση με τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής μεγάλης κλίμακας. Ο συμπαγής σχεδιασμός και η αρθρωτή φύση των SMR επιτρέπουν επιλογές τοποθέτησης που ελαχιστοποιούν την ενόχληση σε ευαίσθητα οικοσυστήματα (IAEA, 2020).

Οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, ιδιαίτερα εκείνοι που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, συχνά συμβάλλουν στη ρύπανση του αέρα και των υδάτων, οδηγώντας σε αρνητικές επιπτώσεις στα τοπικά οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα. Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα, για παράδειγμα, εκπέμπουν ρύπους όπως το διοξείδιο του θείου και τα οξείδια του αζώτου, τα οποία συμβάλλουν στην όξινη βροχή και στην υποβάθμιση του οικοσυστήματος. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν γενικά χαμηλότερες άμεσες επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα, αν και τα μεγάλης κλίμακας ηλιακά ή αιολικά

πάρκα μπορεί να προκαλέσουν κατακερματισμό των οικοτόπων και να επηρεάσουν την τοπική άγρια ζωή (WWF, 2019).

Λαμβάνοντας υπόψη περιβαλλοντικούς παράγοντες πέρα από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και τη διάθεση αποβλήτων, η σύγκριση των SMR με άλλες πηγές ενέργειας αποκαλύπτει πολλά πλεονεκτήματα. Οι SMR έχουν μικρότερο αποτύπωμα γης, χαμηλότερη κατανάλωση νερού και δυνητικά μειωμένες επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα. Αυτά τα χαρακτηριστικά τοποθετούν τους SMR ως μια πολλά υποσχόμενη ενεργειακή λύση που εξισορροπεί την παραγωγή ενέργειας με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Ωστόσο, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη το συγκεκριμένο πλαίσιο και η τοποθεσία κατά την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης διαφορετικών πηγών ενέργειας. Ενσωματώνοντας αυτές τις σκέψεις, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής μπορούν να λάβουν τεκμηριωμένες αποφάσεις για την προώθηση ενός ποικίλου και βιώσιμου ενεργειακού μείγματος.

### **6.3 Κοινή αντίληψη και αποδοχή των SMR**

Η κοινή κατανόηση και αποδοχή των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR) στο πλαίσιο του περιβάλλοντος είναι υψίστης σημασίας για την επιτυχή ανάπτυξή τους ως βιώσιμη ενεργειακή λύση. Οι SMR προσφέρουν πολλά πιθανά περιβαλλοντικά οφέλη, συμπεριλαμβανομένων των μειωμένων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, της αποτελεσματικής χρήσης γης και των ενισχυμένων δυνατοτήτων διαχείρισης απορριμμάτων. Ωστόσο, η αντιμετώπιση της αντίληψης του κοινού, η απόκτηση υποστήριξης από τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής και η προώθηση της συνεργασίας του κλάδου είναι κρίσιμες πτυχές που πρέπει να ληφθούν υπόψη για να διασφαλιστεί η ευρεία αποδοχή και υιοθέτηση των SMR.

Η μετάβαση σε πηγές ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα αποτελεί παγκόσμια επιτακτική ανάγκη για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και την επίτευξη στόχων βιώσιμης ανάπτυξης. Οι SMR, ως προηγμένες πυρηνικές τεχνολογίες, έχουν κερδίσει την προσοχή λόγω της δυνατότητάς τους να συμβάλλουν σε ένα ενεργειακό μέλλον χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Ωστόσο, η αντίληψη του κοινού παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της αποδοχής και της υποστήριξης αυτών των καινοτόμων ενεργειακών λύσεων. Η κατανόηση και η αντιμετώπιση των ανησυχιών του κοινού, των παρανοήσεων και των ελλείψεων γνώσης σχετικά με τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο των SMR είναι ουσιαστικής σημασίας για την οικοδόμηση εμπιστοσύνης του κοινού.

Μελέτες έρευνας της κοινής γνώμης που πραγματοποιήθηκαν από τον Οργανισμό Πυρηνικής Ενέργειας (NEA) και τον ΟΟΣΑ έχουν ρίξει φως στα διαφορετικά επίπεδα

ευαισθητοποίησης του κοινού, στάσεων και αποδοχής της πυρηνικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των SMR. Αυτές οι μελέτες υπογραμμίζουν την ανάγκη για αποτελεσματικές στρατηγικές επικοινωνίας για την προώθηση της κατανόησης του κοινού και τη συμμετοχή σε ενημερωμένες συζητήσεις σχετικά με τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα και προκλήσεις των SMRs (NEA, 2021). Με την ενσωμάτωση της δημόσιας συμβολής, την αντιμετώπιση των ανησυχιών και τη διασφάλιση της διαφάνειας, μπορεί να προωθηθεί η διαδικασία οικοδόμησης κοινής κατανόησης και αποδοχής.

Η υποστήριξη των πολιτικών είναι μια άλλη κρίσιμη πτυχή στην επιτυχή ανάπτυξη των SMR. Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στη δημιουργία ενός υποστηρικτικού περιβάλλοντος πολιτικής που ενθαρρύνει τις επενδύσεις, την έρευνα και την ασφαλή ανάπτυξη των SMR. Είναι υπεύθυνοι για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων και προκλήσεων που σχετίζονται με τους SMR και για τη διασφάλιση της ύπαρξης των κατάλληλων ρυθμιστικών πλαισίων για την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας.

Η συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερομένων του κλάδου, συμπεριλαμβανομένων των σχεδιαστών SMR, των επιχειρήσεων κοινής ωφελείας και της ευρύτερης βιομηχανίας ενέργειας, είναι απαραίτητη για την ανταλλαγή γνώσεων, την αντιμετώπιση κοινών προκλήσεων και την προώθηση της καινοτομίας. Η τεχνική συνεργασία και οι ερευνητικές συνεργασίες συμβάλλουν στη συνεχή βελτίωση των τεχνολογιών SMR, των πρακτικών ασφαλείας και των περιβαλλοντικών επιδόσεων. Η δέσμευση του κλάδου βοηθά στον εντοπισμό ευκαιριών για την ενίσχυση των περιβαλλοντικών οφελών των SMR και διασφαλίζει την απρόσκοπτη ενσωμάτωσή τους στα υπάρχοντα ενεργειακά συστήματα.

Η διεθνής συνεργασία και η ανταλλαγή γνώσεων διαδραματίζουν επίσης ζωτικό ρόλο στην προώθηση της κοινής κατανόησης και αποδοχής των SMR. Οργανισμοί όπως ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) διευκολύνουν τη συνεργασία μεταξύ των χωρών, υποστηρίζουν την ανάπτυξη εναρμονισμένων κανονιστικών πλαισίων και παρέχουν καθοδήγηση σχετικά με τα πρότυπα ασφαλείας και περιβάλλοντος. Η ανταλλαγή βέλτιστων πρακτικών και διδαγμάτων από διεθνείς περιπτώσιολογικές μελέτες μπορεί να ενημερώσει τις στρατηγικές ανάπτυξης και τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων των έργων SMR παγκοσμίως.

Συμπερασματικά, η κοινή κατανόηση και αποδοχή των SMRs στο πλαίσιο του περιβάλλοντος απαιτεί την αντιμετώπιση της αντίληψης του κοινού, την απόκτηση υποστήριξης από τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής και την προώθηση της συνεργασίας του κλάδου (OECD/NEA, 2019). Με την αλληλεπίδραση με το κοινό, την αντιμετώπιση ανησυχιών και την προώθηση ενημερωμένων συζητήσεων, οι τεχνολογίες SMR μπορούν να γίνουν καλύτερα κατανοητές και να οικοδομηθεί η

εμπιστοσύνη του κοινού. Η υποστήριξη των πολιτικών και η ανάπτυξη υποστηρικτικών ρυθμιστικών πλαισίων είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία ενός ευνοϊκού περιβάλλοντος για την ανάπτυξη SMR. Η συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών της βιομηχανίας, η ανταλλαγή γνώσεων και η διεθνής συνεργασία συμβάλλουν στην προώθηση των SMR ως βιώσιμης ενεργειακής λύσης χαμηλών εκπομπών άνθρακα.

### Δημόσια Αντίληψη και Αποδοχή

Η αντίληψη και η αποδοχή του κοινού διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διαμόρφωση του μέλλοντος των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR) ως βιώσιμης ενεργειακής λύσης. Η κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την αντίληψη του κοινού, η αντιμετώπιση των ανησυχιών και η προώθηση ενημερωμένων συζητήσεων είναι απαραίτητα για την ενίσχυση της αποδοχής και της οικοδόμησης εμπιστοσύνης στις τεχνολογίες SMR. Αυτή η ενότητα διερευνά τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την αντίληψη του κοινού, τη σημασία των αποτελεσματικών στρατηγικών επικοινωνίας και τον ρόλο της δημόσιας συμμετοχής στην ενίσχυση της αποδοχής των SMR.

Η αντίληψη του κοινού για τους SMR επηρεάζεται από μια σειρά παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων των προϋπαρχουσών στάσεων απέναντι στην πυρηνική ενέργεια, του επιπέδου γνώσης σχετικά με τους SMR, των ανησυχιών για την ασφάλεια και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την εμπιστοσύνη στους ρυθμιστικούς φορείς και τους ενδιαφερόμενους του κλάδου. Ερευνητικές μελέτες έχουν δείξει ότι η στάση του κοινού απέναντι στην πυρηνική ενέργεια είναι περίπλοκη και μπορεί να επηρεαστεί από ατομικές αξίες, κοινωνικό πλαίσιο και προηγούμενες εμπειρίες (NEA, 2021).

Η παραπληροφόρηση και οι παρανοήσεις γύρω από την πυρηνική ενέργεια, συμπεριλαμβανομένων των SMR, μπορούν επίσης να διαμορφώσουν την αντίληψη του κοινού. Αυτές οι λανθασμένες αντιλήψεις μπορεί να προέρχονται από ιστορικά περιστατικά, όπως τα ατυχήματα της Φουκουσίμα και του Τσερνομπίλ, και μπορούν να συμβάλουν στη δημόσια ανησυχία και αντίσταση απέναντι στις πυρηνικές τεχνολογίες. Η αντιμετώπιση αυτών των λανθασμένων αντιλήψεων μέσω της ακριβούς διάδοσης πληροφοριών είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση της κατανόησης και της αποδοχής του SMR από το κοινό.

Οι αποτελεσματικές στρατηγικές επικοινωνίας είναι απαραίτητες για τη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ των τεχνικών εμπειρογνομόνων και του ευρύτερου κοινού και για την προώθηση μιας ισορροπημένης και βασισμένης σε στοιχεία κατανόησης των SMR. Η σαφής και διαφανής επικοινωνία βοηθά στην οικοδόμηση εμπιστοσύνης του



κοινού, αντιμετωπίζει τις ανησυχίες και παρέχει ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τα περιβαλλοντικά οφέλη και τα χαρακτηριστικά ασφάλειας των SMR.

Ένα βασικό στοιχείο αποτελεσματικής επικοινωνίας είναι η χρήση απλής γλώσσας και προσβάσιμων μορφών για τη μετάδοση σύνθετων τεχνικών πληροφοριών. Η εμπλοκή του κοινού μέσω διαφόρων καναλιών επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων δημόσιων συναντήσεων, εκπαιδευτικών εκστρατειών, μέσων κοινωνικής δικτύωσης και διαδραστικών πλατφορμών, επιτρέπει τον αμφίδρομο διάλογο και την ευκαιρία να αντιμετωπιστούν συγκεκριμένες ανησυχίες ή παρανοήσεις.

Η συμμετοχή αξιόπιστων πηγών, όπως ανεξάρτητων εμπειρογνομώνων, επιστημόνων και περιβαλλοντικών οργανώσεων, μπορεί να ενισχύσει την αξιοπιστία των παρεχόμενων πληροφοριών. Αυτές οι πηγές μπορούν να βοηθήσουν στη μετάφραση των τεχνικών πληροφοριών σε κατανοητούς όρους, να απαντήσουν σε ερωτήσεις και να παρέχουν διαβεβαιώσεις σχετικά με την ασφάλεια και την περιβαλλοντική απόδοση.

Η ουσιαστική συμμετοχή του κοινού είναι ζωτικής σημασίας για την ενίσχυση της αποδοχής των SMR και για τη διασφάλιση ότι λαμβάνονται υπόψη διαφορετικές προοπτικές στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Η συμμετοχή του κοινού παρέχει την ευκαιρία στο κοινό να εκφράσει τις ανησυχίες του, να θέσει ερωτήσεις και να συμμετάσχει στη διαμόρφωση της ανάπτυξης και της ανάπτυξης έργων SMR.

Οι διαδικασίες δέσμευσης του κοινού θα πρέπει να είναι περιεκτικές, διαφανείς και να διεξάγονται νωρίς στα στάδια σχεδιασμού των έργων SMR. Αυτό επιτρέπει τον εντοπισμό βασικών ενδιαφερομένων, συμπεριλαμβανομένων των τοπικών κοινοτήτων, των περιβαλλοντικών ομάδων και των αυτόχθονων πληθυσμών, και διασφαλίζει τη σημαντική συμμετοχή τους στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων.

Η συμμετοχή του κοινού στη διαδικασία εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ΕΠΕ) είναι ιδιαίτερα σημαντική. Οι ΕΠΕ παρέχουν την ευκαιρία αξιολόγησης των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των έργων SMR και επιτρέπουν τη δημόσια συμβολή στα μέτρα μετριασμού και στα προγράμματα παρακολούθησης. Η ενσωμάτωση της δημόσιας ανατροφοδότησης στη διαδικασία ΕΠΕ ενισχύει τη διαφάνεια και ενισχύει την αξιοπιστία της αξιολόγησης.

Η καθιέρωση σαφών γραμμών επικοινωνίας μεταξύ των ενδιαφερομένων του κλάδου, των ρυθμιστικών φορέων και του κοινού ενισχύει την εμπιστοσύνη και επιτρέπει την έγκαιρη αντιμετώπιση ανησυχιών ή ερωτημάτων.

Η διαφάνεια στις πρακτικές ασφάλειας, στις στρατηγικές διαχείρισης αποβλήτων και στις περιβαλλοντικές επιδόσεις είναι ζωτικής σημασίας για την ενστάλαξη εμπιστοσύνης στο κοινό. Οι τακτικές ενημερώσεις, η υποβολή εκθέσεων σχετικά με

τους δείκτες ασφάλειας και η ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με τα αποτελέσματα της περιβαλλοντικής παρακολούθησης συμβάλλουν στην οικοδόμηση εμπιστοσύνης του κοινού επιδεικνύοντας υπευθυνότητα και δέσμευση για την ασφάλεια και την προστασία του περιβάλλοντος.

Επιπλέον, η αναγνώριση και η μάθηση από προηγούμενα περιστατικά, όπως τα πυρηνικά ατυχήματα, και η εφαρμογή διδαγμάτων από το σχεδιασμό και τη λειτουργία των SMR ενισχύουν τη δέσμευση του κλάδου για ασφάλεια και συνεχή βελτίωση.

Συμπερασματικά, η δημόσια αντίληψη και η αποδοχή των SMR επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, όπως προϋπάρχουσες στάσεις, κενά γνώσης, ανησυχίες για την ασφάλεια και το περιβάλλον και την εμπιστοσύνη στους ρυθμιστικούς φορείς και τους ενδιαφερόμενους του κλάδου. Οι αποτελεσματικές στρατηγικές επικοινωνίας που περιλαμβάνουν σαφείς και προσβάσιμες πληροφορίες, τη δέσμευση με αξιόπιστες πηγές και τη συμμετοχή του κοινού χωρίς αποκλεισμούς είναι απαραίτητες για την ενίσχυση της αποδοχής και της οικοδόμησης εμπιστοσύνης στις τεχνολογίες SMR. Η διαφάνεια και η ανταπόκριση στις ανησυχίες του κοινού είναι ζωτικής σημασίας για την οικοδόμηση εμπιστοσύνης και τη διασφάλιση ότι οι SMR θεωρούνται μια βιώσιμη και περιβαλλοντικά υπεύθυνη ενεργειακή λύση.

#### Υποστήριξη διαμορφωτών πολιτικής και κανονιστικό πλαίσιο

Η υποστήριξη των υπευθύνων χάραξης πολιτικής και ένα ισχυρό ρυθμιστικό πλαίσιο είναι ζωτικής σημασίας στοιχεία για την επιτυχή ανάπτυξη και εγκατάσταση Μικρών Αρθρωτών Αντιδραστηρίων (SMR). Αυτή η ενότητα διερευνά τη σημασία της υποστήριξης των υπευθύνων χάραξης πολιτικής για την προώθηση της ανάπτυξης SMR, τον ρόλο των ρυθμιστικών πλαισίων για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της προστασίας του περιβάλλοντος και την ανάγκη συντονισμού και διεθνούς συνεργασίας στις ρυθμιστικές πρακτικές.

Η υποστήριξη των υπευθύνων χάραξης πολιτικής είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία ενός ευνοϊκού περιβάλλοντος για την ανάπτυξη των SMR. Οι κυβερνήσεις διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στον καθορισμό των στόχων πολιτικής, στην παροχή οικονομικών κινήτρων και στη θέσπιση ρυθμιστικών πλαισίων που διευκολύνουν την εφαρμογή των SMR.

Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής αναγνωρίζουν τα πιθανά οφέλη των SMR, συμπεριλαμβανομένου του ρόλου τους στη διαφοροποίηση του ενεργειακού μείγματος, στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας. Οι SMR προσφέρουν μια ευέλικτη και επεκτάσιμη λύση που μπορεί να αναπτυχθεί σε διάφορες ρυθμίσεις, συμπεριλαμβανομένων

απομακρυσμένων ή εκτός δικτύου τοποθεσιών, βιομηχανικών συγκροτημάτων και αστικών περιοχών.

Για να ενθαρρύνουν την ανάπτυξη των SMR, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής μπορούν να παρέχουν οικονομικά κίνητρα, όπως επιχορηγήσεις έρευνας και ανάπτυξης, εγγυήσεις δανείων ή φορολογικές πιστώσεις. Αυτά τα κίνητρα συμβάλλουν στην προσέλκυση ιδιωτικών επενδύσεων και ενισχύουν την καινοτομία στις τεχνολογίες SMR. Επιπλέον, η σύναψη μακροπρόθεσμων συμφωνιών αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ή τιμολογίων τροφοδοσίας μπορεί να προσφέρει ασφάλεια στην αγορά και να μετριάσει τους οικονομικούς κινδύνους που σχετίζονται με τα έργα SMR.

### Ρυθμιστικό Πλαίσιο για την Ασφάλεια και την Προστασία του Περιβάλλοντος

Ένα ισχυρό ρυθμιστικό πλαίσιο είναι απαραίτητο για τη διασφάλιση της ασφαλούς και υπεύθυνης λειτουργίας των SMR και την προστασία του περιβάλλοντος. Οι ρυθμιστικοί φορείς έχουν την ευθύνη να θεσπίσουν σαφή πρότυπα ασφαλείας, διαδικασίες αδειοδότησης και πρωτόκολλα επιθεώρησης για την αξιολόγηση και την παρακολούθηση της απόδοσης των SMR.

Τα ρυθμιστικά πλαίσια για τους SMR βασίζονται σε καθιερωμένες αρχές και διεθνείς κατευθυντήριες γραμμές. Αυτά περιλαμβάνουν τα πρότυπα ασφαλείας του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) και τα κριτήρια σχεδιασμού που περιγράφονται από τους εθνικούς ρυθμιστικούς φορείς. Τα ρυθμιστικά πλαίσια λαμβάνουν υπόψη όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του SMR, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής τοποθεσίας, της κατασκευής, της λειτουργίας και του παροπλισμού.

Οι διαδικασίες αδειοδότησης για SMR περιλαμβάνουν μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των χαρακτηριστικών ασφαλείας, τα σχέδια ετοιμότητας έκτακτης ανάγκης, τις στρατηγικές διαχείρισης αποβλήτων και τις εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Οι ρυθμιστικοί φορείς διασφαλίζουν ότι τα σχέδια SMR πληρούν αυστηρές απαιτήσεις ασφαλείας, συμπεριλαμβανομένων των εγγενών χαρακτηριστικών ασφαλείας, των συστημάτων παθητικής ψύξης και των στιβαρών δομών συγκράτησης.

Διενεργούνται τακτικές επιθεωρήσεις και έλεγχοι για την επαλήθευση της συμμόρφωσης με τα ρυθμιστικά πρότυπα και τον εντοπισμό τομέων προς βελτίωση. Η συνεχής παρακολούθηση των λειτουργιών SMR, συμπεριλαμβανομένης της ακτινοπροστασίας, της διαχείρισης αποβλήτων και των δυνατοτήτων απόκρισης έκτακτης ανάγκης, διασφαλίζει τη συνεχή αξιολόγηση της ασφαλείας και των περιβαλλοντικών επιδόσεων.

Δεδομένης της παγκόσμιας φύσης της ανάπτυξης SMR, ο συντονισμός και η διεθνής συνεργασία μεταξύ των ρυθμιστικών φορέων είναι ουσιαστικής σημασίας. Η εναρμόνιση των κανονιστικών πρακτικών, η ανταλλαγή βέλτιστων πρακτικών και η θέσπιση κοινών προτύπων ασφάλειας διευκολύνουν την αποτελεσματική ανάπτυξη των SMR, διατηρώντας παράλληλα τα υψηλότερα επίπεδα ασφάλειας και προστασίας του περιβάλλοντος.

Διεθνείς οργανισμοί, όπως ο ΔΟΑΕ και ο Οργανισμός Πυρηνικής Ενέργειας (NEA), παρέχουν πλατφόρμες συνεργασίας και ανταλλαγής πληροφοριών σχετικά με τους κανονισμούς SMR. Η προσέγγιση Milestones του ΔΟΑΕ παρέχει ένα δομημένο πλαίσιο για τις νεοεισερχόμενες χώρες να αναπτύξουν και να ενισχύσουν τη ρυθμιστική τους υποδομή.

Η συνεργασία μεταξύ των ρυθμιστικών φορέων επιτρέπει τη συγκέντρωση πόρων, εμπειρογνωμοσύνης και διδαγμάτων, συμβάλλοντας στη συνεχή βελτίωση των ρυθμιστικών πρακτικών. Διευκολύνει επίσης την αναγνώριση των αξιολογήσεων ασφάλειας και των αποφάσεων αδειοδότησης σε διάφορες δικαιοδοσίες, εκσυγχρονίζοντας τη ρυθμιστική διαδικασία για τους πωλητές και τους φορείς εκμετάλλευσης SMR.

## 7. Συμπεράσματα

Η αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια, σε συνδυασμό με την επείγουσα ανάγκη για μετάβαση σε καθαρότερες και πιο βιώσιμες πηγές ενέργειας, έχει οδηγήσει στην εξερεύνηση νέων ενεργειακών τεχνολογιών. Ενώ οι ανανεώσιμες πηγές όπως η αιολική, η ηλιακή και η υδροηλεκτρική ενέργεια έχουν κάνει σημαντικά βήματα, η κάλυψη της αυξανόμενης ενεργειακής ζήτησης απαιτεί ένα διαφοροποιημένο ενεργειακό μείγμα. Οι παραδοσιακοί πυρηνικοί σταθμοί έχουν αντιμετωπίσει ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια, τα πυρηνικά απόβλητα και πιθανά ατυχήματα, με αποτέλεσμα την αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων. Οι μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες (SMR) έχουν αναδειχθεί ως πιθανή απάντηση για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, προσφέροντας μια συμπαγή, ευέλικτη και εγγενώς ασφαλέστερη επιλογή πυρηνικής ενέργειας.

Σε όλη αυτή την ολιστική μελέτη, έχουμε εμβαθύνει σε διάφορες διαστάσεις των SMR, με στόχο να αξιολογήσουμε τη σκοπιμότητα, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, την οικονομική βιωσιμότητα και τον πιθανό ρόλο τους στον ενεργειακό τομέα. Απαντώντας σε βασικά ερευνητικά ερωτήματα, προσδιορίσαμε τα πιθανά οφέλη και προκλήσεις που σχετίζονται με την ανάπτυξη των SMR και προσφέραμε πολύτιμες γνώσεις σε υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, επενδυτές και ενδιαφερόμενους φορείς.

Η ανάλυση της τεχνολογίας των SMR αποκάλυψε τα βασικά της χαρακτηριστικά, όπως το μέγεθος, ο αρθρωτός σχεδιασμός, οι μηχανισμοί παθητικής ασφάλειας και οι δυνατότητες συμπαραγωγής. Οι SMR παρουσιάζουν μια πολλά υποσχόμενη λύση για την κάλυψη διαφόρων ενεργειακών αναγκών, με εφαρμογές που κυμαίνονται από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έως την τηλεθέρμανση και την αφαλάτωση. Περιπτωσιολογικές μελέτες έργων SMR παγκοσμίως υπογραμμίζουν τις δυνατότητες και το αυξανόμενο ενδιαφέρον τους για την παγκόσμια αγορά ενέργειας.

Επιπλέον, οι SMR παρουσιάζουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας σε σύγκριση με τα συμβατικά πυρηνικά εργοστάσια. Η εξάρτησή τους από συστήματα παθητικής ασφάλειας και η δυνατότητα για μηχανισμούς διακοπής λειτουργίας που οδηγούνται από τη βαρύτητα ενισχύουν την εγγενή ασφάλειά τους. Τα ρυθμιστικά πλαίσια έχουν εξελιχθεί για να υποστηρίξουν την ανάπτυξη των SMR, διασφαλίζοντας πως τηρούνται τα πρότυπα ασφαλείας, αν και εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένες διαφορές μεταξύ των κανονισμών SMR και των συμβατικών πυρηνικών αντιδραστήρων.

Η οικονομική ανάλυση των SMRs έχει επισημάνει πολλαπλές ευκαιρίες και προκλήσεις. Ενώ οι SMR μπορεί να συνεπάγονται υψηλότερο αρχικό κόστος λόγω του μοναδικού σχεδιασμού και των χαρακτηριστικών ασφαλείας τους, οι δυνατότητές τους για ταχύτερη κατασκευή και χαμηλότερους κινδύνους χρηματοδότησης συμβάλλουν στη συνολική σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας. Η διερεύνηση

επιλογών χρηματοδότησης και κυβερνητικών κινήτρων μπορεί να προωθήσει περαιτέρω την οικονομική τους βιωσιμότητα.

Η εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων των SMR έχει λάβει υπόψη διάφορες πτυχές, συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, της διαχείρισης αποβλήτων, της χρήσης γης και των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία. Οι SMR ξεχωρίζουν ως ενεργειακή επιλογή χαμηλών εκπομπών άνθρακα, εκπέμποντας λιγότερα αέρια θερμοκηπίου κατά τη λειτουργία τους σε σύγκριση με πηγές που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Η δυνατότητά τους να συμπληρώνουν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να παρέχουν συνεχή ισχύ βασικού φορτίου συμβάλλει στις παγκόσμιες προσπάθειες μετριασμού της κλιματικής αλλαγής.

Οι αποτελεσματικές στρατηγικές διαχείρισης αποβλήτων για SMR μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις. Ορισμένα σχέδια SMR χρησιμοποιούν καύσιμο ουρανίου χαμηλού εμπλουτισμού (LEU), παράγοντας λιγότερα απόβλητα από τους συμβατικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες που βασίζονται σε ουράνιο υψηλού εμπλουτισμού (HEU). Επιπλέον, η δυνατότητα ανακύκλωσης καυσίμου μπορεί να μειώσει την ποσότητα των πυρηνικών αποβλήτων που απαιτούν αποθήκευση ή διάθεση.

Ενώ οι SMR προσφέρουν μια πιθανή λύση για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων με μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι επιπτώσεις τους στην ποιότητα των υδάτων, στη χρήση της γης και στις πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων απαιτούν προσεκτική εξέταση για να διασφαλιστεί η περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

Η κοινή αντίληψη και η αποδοχή των SMR διαδραματίζουν επίσης κρίσιμο ρόλο στην επιτυχή ανάπτυξή τους. Η διαφανής επικοινωνία, η δέσμευση της κοινότητας και η συμμετοχή των ενδιαφερομένων είναι απαραίτητα για την οικοδόμηση της εμπιστοσύνης του κοινού και την αντιμετώπιση των ανησυχιών. Η υποστήριξη των υπευθύνων χάραξης πολιτικής και τα σαφή ρυθμιστικά πλαίσια είναι καθοριστικής σημασίας για τη διευκόλυνση της ανάπτυξης και εμπορευματοποίησης των SMR.

Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν αρκετές προκλήσεις στην πορεία προς την εφαρμογή του SMR. Η μελέτη αναγνωρίζει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σχετικά με κοινωνικούς και πολιτικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξή τους. Η πρόσβαση σε ολοκληρωμένα δεδομένα σχετικά με τις οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις των SMR είναι απαραίτητη, δεδομένου ότι ορισμένα σχέδια βρίσκονται ακόμη σε φάση ανάπτυξης.

Συμπερασματικά, οι μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες προσφέρουν μια καινοτόμο και βιώσιμη λύση στις παγκόσμιες ενεργειακές προκλήσεις. Ο μοναδικός σχεδιασμός και τα χαρακτηριστικά ασφαλείας τους, μαζί με τις δυνατότητές τους να συμπληρώνουν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τους καθιστούν πολύτιμους διεκδικητές στη

μετάβαση σε ένα μέλλον χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Για να αξιοποιηθεί πλήρως το δυναμικό τους, είναι απαραίτητη η ισχυρή συνεργασία μεταξύ των κυβερνήσεων, της βιομηχανίας και άλλων ενδιαφερομένων. Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής πρέπει να παρέχουν συνεπή υποστήριξη μέσω κατάλληλων κανονισμών, κινήτρων και επιλογών χρηματοδότησης. Αγκαλιάζοντας τις ευκαιρίες και αντιμετωπίζοντας τις προκλήσεις που σχετίζονται με τους SMR, ο κόσμος μπορεί να πλησιάσει πιο κοντά σε ένα πιο ασφαλές, καθαρότερο και βιώσιμο ενεργειακό μέλλον.

## 8 . Αναφορές - Βιβλιογραφία

- Akashi, T., & Hussain, M. A. (2021). Small modular reactors for electricity generation: a review. *Energy Science & Engineering*, 9(2), 408-435.
- Al-Sulaiman, F. A., & Al-Waked, R. (2020). Economics of nuclear desalination: Review of methods and future trends. *Desalination*, 475, 114172.
- American Society of Mechanical Engineers. (2021). Standards and Certification. Retrieved from <https://www.asme.org/codes-standards>
- Bhuiyan, M. A., Zhang, Q., Khare, V., Mikhaylov, A., Pinter, G., & Huang, X. (2022). Renewable Energy Consumption and Economic Growth Nexus—A Systematic Literature Review. *Frontiers in Environmental Science*, 10
- Bose, D., & Kannan, U. (2020). Small modular reactors: Safety and regulatory issues. *Progress in Nuclear Energy*, 124, 103314.
- Boubakri, N., Elmay, Y., & Hamouda, B. (2021). SMR technologies and perspectives for future energy supply. *Progress in Nuclear Energy*, 131, 103677.
- Brown, N., & Sovacool, B. K. (2016). Sociotechnical imaginaries of the info disaster: Nuclear power in the Australian print media. *Energy Research & Social Science*, 16, 204-215.
- Canadian Nuclear Laboratories. (n.d.). Canadian Supercritical Water-cooled Reactor (CSWR). Retrieved April 28, 2023, from <https://www.cnl.ca/en/home/about/what-we-do/research-and-development/smr/cswr.aspx>
- Canadian Nuclear Safety Commission. (2021). Mandate and Responsibilities. Retrieved from <https://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/about-us/mandate-and-responsibilities/index.cfm>
- Chakravarti, A., & Hussain, I. (2019). Nuclear desalination: Opportunities and challenges. *Progress in Nuclear Energy*, 114, 103090.
- Chen, K., Li, F., Li, J., Liu, B., Chen, M., & Yu, S. (2015). Pebble bed reactor fuel elements coating technology: A review. *Journal of Nuclear Materials*, 460, 175-183.
- Chionis, D., Aravossis, K., & Flamos, A. (2018). Small Modular Reactors: An overview. *Energy Strategy Reviews*, 20, 195-206.



- Chyong, C. K., & Hobbs, B. F. (2015). Strategic modelling of future electricity scenarios with high renewables: A case study of East Denmark. *Energy Policy*, 87, 642-654.
- Densmore, T. & Duffy, V.G. (2021). Systematic Literature Review of Nuclear Safety Systems in Small Modular Reactors. In: *Communications in Computer and Information Science*, vol 1498. Conference paper.
- Diamond, D. (2016). *Small Modular Reactors: Comparative Analysis of Economics, Safety, and Licensing*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.
- DOE. (2021). Small Modular Reactors. Retrieved from <https://www.energy.gov/>
- Eaton, T. R., Burgos, W. D., & Mohagheghi, A. H. (2019). Boiling Water Reactor (BWR) Systems. In *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (pp. 499-514). Elsevier.
- El-Genk, M. S. (2019). The role of high-temperature air-cooled nuclear reactors in renewable energy and sustainable development. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 34, 150-165.
- Elgowainy, A., & Reddi, S. (2018). Review of nuclear desalination: Strategies for coupling with renewable energies and sustainability considerations. *Desalination*, 427, 1-17.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2021). Water Quality Standards and Implementation. Retrieved from <https://www.epa.gov/>
- Fesenko, G. V., & Matveev, Y. V. (2019). Analysis of the possibility of combining renewable and nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 353, 110247.
- GE Hitachi Nuclear Energy. (2021). GE Hitachi Signs Memorandum of Understanding with Berkeley Energia for Potential BWRX-300 Small Modular Reactor Deployment in Spain. Retrieved from <https://www.ge.com/>
- Generation IV International Forum (GIF). (2020). The Generation IV International Forum. Retrieved from <https://www.gen-4.org/>
- Groenendaal, W., & van der Laan, J. (2015). International standardisation of SMRs: The role of government. *Energy Policy*, 83, 84-91.
- Haffar, I., & Abdalla, A. N. (2018). Small modular reactors (SMRs): An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(Part 1), 1179-1194.
- HolosGen. (2021). Our Technology. Retrieved from <https://www.holosgen.com/>

- Hu, Z., Zhai, P., Yang, M., Wang, X., & Su, G. (2021). Status and prospects of desalination powered by small modular reactors. *Progress in Nuclear Energy*, 136, 103901.
- IAEA-TECDOC-1972, Benefits and Challenges of Small Modular Fast Reactors, International Atomic Energy Agency, Vienna (2020).
- IEA. (2019). *The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities*. International Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2011). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2011). *Waste Management in Nuclear Power Plants: A Safety Guide*. Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2016). *Environmental Assessment of Nuclear Power Plants: A Guidebook*. Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2016). *Operating Experience with Nuclear Power Stations in Member States in 2015*. Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2016). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: Specific Safety Requirements*. Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2017). *Environmental Impact Assessment for Nuclear Power Plants: A Safety Guide*. Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2017). *Waste Management in Nuclear Power Plants: A Safety Guide*. Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2018). *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*. Retrieved from <https://www-pub.iaea.org/>
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2018). *Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment*. Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2019). *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*. Retrieved from <https://www-pub.iaea.org/>
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2020). *Financing Nuclear Power Projects: Overview of Financing Concepts and Mechanisms*. Retrieved from <https://www-pub.iaea.org/>

- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2020). Planning and economic studies for small modular reactors. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-5.6.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2020). Small modular reactors: An overview. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-5.5.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2020). Small Modular Reactors: Environmental Impact Assessment. Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). SMR Applications: Hydrogen Production. Retrieved from <https://www.iaea.org/>
- International Atomic Energy Agency (IAEA). SMR Applications: Industrial Heat. Retrieved from <https://www.iaea.org/>
- International Atomic Energy Agency. (2011). Security of small quantities of radioactive material: A guide for state holders and first responders. IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2014). Safety and Security of Small Modular Reactors: Volume 1. IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2017). Decommissioning of Small Nuclear Facilities and Sites. Retrieved from <https://www-pub.iaea.org/>
- International Atomic Energy Agency. (2019). Benefits and challenges of small modular fast reactors. Retrieved from <https://www.iaea.org/>
- International Atomic Energy Agency. (2019). Small Modular Reactors: Nuclear Power Fad or Future? Vienna: International Atomic Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency. (2021). Lessons Learned in Regulating Small Modular Reactors. Retrieved from <https://www.iaea.org/>
- International Atomic Energy Agency. (2021). Nuclear Safety and Security. Retrieved from <https://www.iaea.org/>
- International Electrotechnical Commission. (2021). IEC and nuclear energy. Retrieved from <https://www.iec.ch/>
- International Energy Agency (IEA). (2020). Global Energy Review 2020: The Impacts of the Covid-19 Crisis on Global Energy Demand and CO2 Emissions. Paris: IEA.
- International Energy Agency (IEA). (2020). Technology Roadmap: Nuclear Energy. Retrieved from <https://www.iea.org/>
- International Energy Agency. (2019). The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World. Paris: International Energy Agency.

- International Energy Agency. (2023). What are Small Modular Reactors (SMRs)?
- International Energy Agency. (2020). World Energy Outlook 2020. Retrieved from <https://www.iea.org/>
- Kazimi, M. S., Todreas, N. E., & Pilat, E. E. (2013). Liquid Metal Cooled Small Modular Reactors. Massachusetts Institute of Technology.
- Kulikov, G. G., Lebedev, A. V., Seliverstov, V. A., & Subbotin, S. A. (2016). BN-800: A new generation of fast reactors. Nuclear Engineering and Technology, 48(3), 577-586.
- Kumar, U., Kakodkar, A., Sinha, R. K., & Ahluwalia, P. K. (2021). Nuclear energy in the context of climate change. Current Science, 120(3), 327-341.
- Kuznetsov, V., & Bogatov, S. (2016). Small modular reactors for electricity and heat generation. Energy Procedia, 95, 407-414.
- Lévêque, L., Olhoff, N., & Suh, K. Y. (2016). A decision framework for the development and deployment of small modular reactors. Energy Conversion and Management, 129, 197-206.
- Li, F., Liu, B., & Chen, K. (2016). The status of high temperature gas-cooled reactor technology in China. Progress in Nuclear Energy, 88, 225-231.
- Lindroos, M., & Ahlstrand, R. (2018). Future fuel supply for small modular reactors. Progress in Nuclear Energy, 106, 201-210.
- Lovenskiold, P. (2020). The role of small modular reactors in district heating. Applied Energy, 260, 114299.
- Mancini, M., & Singh, B. (2021). Small Modular Reactors: Potential for Co-generation and District Heating. Progress in Nuclear Energy, 137, 103767.
- MIT (2018). Massachusetts Institute of Technology, The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World: An Interdisciplinary MIT Study. Retrieved from <https://energy.mit.edu/>
- Moghtaderi, A., & Abbaspour, A. (2020). Passive safety systems for small modular reactors. Progress in Nuclear Energy, 122, 103324.
- Moros, E. (2013). Small modular reactors (SMRs): A review of their status. Energy Policy, 61, 719-727. Retrieved from <http://www.physics.ntua.gr/>
- NEA (2020). Nuclear Energy Agency, Report on regulatory considerations for small modular reactors. Retrieved from <https://www.oecd-nea.org/>

- North, R. (2018). Environmental Impact Assessment: A Practical Guide. London: Routledge.
- Nuclear Energy Agency (NEA). (2018). Nuclear Energy and Sustainable Development: Environmental Impacts of Advanced Nuclear Power Generation. Paris: NEA.
- Nuclear Energy Agency (NEA). (2018). Technical Report on the Economic Aspects of Small Modular Reactors. Retrieved from <https://www.oecd-nea.org/>
- Nuclear Energy Agency (NEA). (2018). The Safety of Small Modular Reactors: Technical, Legal, and Institutional Innovations. Paris: NEA.
- Nuclear Energy Agency (NEA). (2021). Public Opinion on Nuclear Energy: Synthesis Report. Retrieved from <https://www.oecd-nea.org/>
- Nuclear Energy Agency (NEA). (2021). The NEA Small Modular Reactor (SMR) Strategy. Retrieved from <https://www.oecd-nea.org/>
- Nuclear Energy Agency (NEA). SMR Applications: Medical Isotopes.
- Nuclear Energy Agency. (2017). Projected Costs of Generating Electricity. Retrieved from <https://www.oecd-nea.org/>
- Nuclear Regulatory Commission. (2021). About NRC. Retrieved from <https://www.nrc.gov/>
- NuScale Power. (2021). Small Modular Reactor (SMR) Technology. Retrieved from <https://www.nuscalepower.com/>
- OECD (2021). Nuclear Energy Agency, Regulatory aspects of small modular reactors: Volume 2: Overview of regulatory requirements and guidance for the licensing of small modular reactors. Retrieved from <https://www.oecd-nea.org/>
- OECD Nuclear Energy Agency (OECD/NEA). (2019). Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment. Retrieved from <https://www.oecd-nea.org/>
- OECD/NEA. (2016). Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment. Retrieved from <https://www.oecd-nea.org/>
- OECD/NEA. (2016). Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment. Retrieved from <https://www.oecd-nea.org/>
- OECD/NEA. (2020). The NEA Small Modular Reactor (SMR) Strategy. [Online]. Available: <https://www.oecd-nea.org/>

- OECD/Nuclear Energy Agency (NEA). (2016). Technical, Economic and Regulatory Aspects of the Development of Small Modular Reactors (SMRs). Retrieved from <https://www.oecd-nea.org/>
- OECD/Nuclear Energy Agency (NEA). (2019). Technical, Economic and Regulatory Aspects of the Development of Small Modular Reactors (SMRs). Retrieved from <https://www.oecd-nea.org/>
- Oklo. (2021). Aurora. Retrieved from <https://oklo.com/>
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). (2014). Environmental Impacts of the Fuel Cycle: A Report to Stakeholders. Paris : OECD.
- Perdu, M., Villeneuve, J., Lefebvre, M., & Van Rooijen, W. F. G. (2019). Potential for Small Modular Reactors in decentralized district heating applications. Energy Procedia, 160, 360-369.
- Rosatom. (n.d.). Lead-cooled Fast Reactor (BREST-OD-300). Retrieved April 25, 2023, from <https://www.rosatom.ru/>
- Rosner, R., Deutch, J. M., Ansolabehere, S., et al. (2018). The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study. Retrieved from <https://energy.mit.edu/>
- Rosner, R., Deutch, J. M., Ansolabehere, S., et al. (2018). The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study. Retrieved from <https://energy.mit.edu/>
- Saleh, H., Al-Zuhairi, A., & El-Din, A. N. (2018). Assessment of small modular reactors for nuclear desalination. Nuclear Engineering and Design, 327, 141-153.
- Smith, C. F. (2018). Potential role of small modular reactors in enabling distributed energy infrastructure. Nuclear Engineering and Design, 327, 78-86.
- Suh, K. Y., Kim, J. H., Park, J. Y., & Yoon, Y. I. (2019). Feasibility study on the deployment of small modular reactor in isolated area. Energy Conversion and Management, 182, 9-19.
- Terrestrial Energy. (n.d.). IMSR. Retrieved April 25, 2023, from <https://www.terrestrialenergy.com/>
- U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Energy. SMR Applications: Water Desalination. Retrieved from <https://www.energy.gov/>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2011). Environmental Impact Assessment: Training Resource Manual. Nairobi: UNEP.

- United Nations Environment Programme (UNEP). (2017). Environmental Impact Assessment: Training Resource Manual. Nairobi: UNEP.
- United States Department of Energy. (2015). Quadrennial Technology Review 2015: Technology Assessment - Advanced Nuclear Energy Systems. Retrieved from <https://www.energy.gov/>
- United States Energy Information Administration. (2021). Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2021. Retrieved from <https://www.eia.gov/>
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2021). Air Emissions Modeling. Retrieved from <https://www.epa.gov/>
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2021). Water Quality Standards and Implementation. Retrieved from <https://www.epa.gov/>
- United States Nuclear Regulatory Commission (NRC). (2018). Small modular reactors. NRC Fact Sheet.
- United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC). (2021). Radioactive Waste Management. Retrieved from <https://www.nrc.gov/>
- United States Nuclear Regulatory Commission. (2017). Small Modular Reactors. Retrieved from <https://www.nrc.gov/>
- Wang, C., Zhao, Y., Xu, X., et al. (2018). The Economies of Scale of Small Modular Reactors: Analysis of Construction Costs. *Energy Policy*, 113, 430-437.
- Wang, J., Zhang, L., & Chi, G. (2018). Techno-economic feasibility study of a small modular nuclear combined heat and power system for district heating. *Applied Energy*, 229, 1071-1083.
- Wang, Y., Xie, Y., Shi, C., Lu, Y., & Yu, Y. (2015). Analysis of the inherent safety features of the HTR-PM reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 84, 36-45.
- World Association of Nuclear Operators (WANO). (2019). Environmental Stewardship: A Good Practice Guide for Nuclear Power Plants. London: WANO.
- World Health Organization (WHO). (2011). Air Quality Guidelines: Global Update 2005. Geneva: WHO.
- World Health Organization (WHO). (2018). Guidelines for Drinking-Water Quality. Geneva: WHO.

- World Nuclear Association (WNA). (2017). Environmental Performance: Principles and Practices. London: WNA.
- World Nuclear Association (WNA). (2019). Socio-economic Effects of Nuclear Power Plant Closures. London: WNA.
- World Nuclear Association (WNA). (2020). Licensing and Safety Regulation of SMRs. Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/>
- World Nuclear Association (WNA). (2020). Radiation and Health Effects. Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/>
- World Nuclear Association (WNA). (2020). Radioactive Waste Management. Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/>
- World Nuclear Association (WNA). (2021). Fast Breeder Reactors. Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/>
- World Nuclear Association (WNA). (2021). Storage and Disposal of Radioactive Waste. Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/>
- World Nuclear Association (WNA). (2021). Sustainable Development Indicators: A Report to Stakeholders. London: WNA.
- World Nuclear Association. (2021). Small Modular Reactors (SMRs). Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/>
- World Nuclear Association. (2021). Small nuclear power reactors. Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/>
- World Nuclear Association. Small Nuclear Power Reactors. Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/>
- World Wildlife Fund (WWF). (2019). Habitat Fragmentation. Retrieved from <https://www.worldwildlife.org/>
- Zhai, P., Hu, Z., Hu, L., Zhang, M., & Su, G. (2021). Feasibility analysis and comparison of different desalination technologies integrated with small modular reactors. *Progress in Nuclear Energy*, 131, 103492.
- Zhang, D., Su, G., & Hu, Z. (2019). Techno-economic feasibility study of small modular reactor-assisted desalination systems. *Annals of Nuclear Energy*, 133, 1043-1052.
- Zhang, Y., & Zhang, L. (2017). Public acceptance of nuclear desalination in China: A case study of Tianwan Nuclear Power Plant. *Desalination*, 409, 136-143.