



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ**



**Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»**

Πυρηνικός Αντιδραστήρας Ισχύος, τύπου SMR (Small Modular nuclear Reactor)

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του Αντωνίου Μώρου

Επιβλέπων: Ευάγγελος Π. Χίνης
Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.,
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

Αθήνα, Ιούνιος 2018

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	6
Εισαγωγή.....	7
1 Αρχή λειτουργίας και χαρακτηριστικά Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος τύπου SMR..	9
1.1 Εισαγωγή – Περί ενέργειας.....	9
1.2 Μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες ισχύος (Small Modular Reactors - SMRs).....	13
1.3 Χαρακτηριστικά των SMRs.....	14
1.4 Αρχή λειτουργίας.....	15
1.4.1 Σχάση και έλεγχος αντίδρασης.....	15
1.4.2 Πυρηνικά καύσιμα.....	17
1.4.3 Θερμική / ηλεκτρική παραγωγή.....	18
1.4.4 Ψυκτικό μέσο.....	19
1.5 Πιθανές χρήσεις.....	19
1.6 Εν δυνάμει φορτία.....	19
1.7 Καινοτομίες.....	20
1.7.1 Μείωση αποβλήτων.....	20
1.7.2 Περιορισμός εξάπλωσης πυρηνικών όπλων.....	21
1.8 Πλεονεκτήματα.....	22
1.9 Μειονεκτήματα.....	23
1.10 Σύγκριση μεταξύ SMRs και συμβατικών αντιδραστήρων.....	24
2 Αντιδραστήρες 4 ^{ης} γενιάς.....	29
2.1 Τύποι αντιδραστήρων 4ης γενιάς.....	31
Αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων (Thermal reactors).....	31
Αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων (Fast neutron reactors).....	31
2.2 Αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων (Thermal reactors).....	31
2.2.1 Αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος (Pressurized Water Reactors – PWRs) .	32
2.2.2 Αντιδραστήρες αερίου υπερυψηλής θερμοκρασίας (Very High Temperature Reactors - VHTRs).....	36
2.2.3 Αντιδραστήρες τετηγμένων αλάτων (Molten Salt Reactors - MSR).....	37
2.3 Αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων (Fast neutron reactors).....	38
2.3.1 Αντιδραστήρες αέριας ψύξης (Gas cooled Fast Reactors - GFRs ή High Temperature Gas Reactors - HTGRs).....	38
2.3.2 Αντιδραστήρας υγρών μετάλλων (Liquid Metal Reactors – LMRs).....	40
2.4 Πλεονεκτήματα αντιδραστήρων 4ης γενιάς.....	45
3 Χαρακτηριστικά ασφαλείας και ψύξης στους αντιδραστήρες SMRs, τύπου LWR.....	49

3.1	Σύστημα εντοπισμού σφαλμάτων και ασφαλούς απενεργοποίησης.	49
3.2	Συστήματα απαγωγής υπολειπόμενης θερμότητας (Residual heat removal system).	50
3.2.1	Απαγωγή υπολειπόμενης θερμότητας μέσω εναλλάκτη θερμότητας και δεξαμενής νερού.	50
3.2.2	Απαγωγή υπολειπόμενης θερμότητας μέσω παθητικά ψυχόμενου συμπυκνωτή.	51
3.2.3	Απαγωγή υπολειπόμενης θερμότητας με αντλία και εναλλάκτη θερμότητας.	51
3.3	Συστήματα έγχυσης ασφαλείας υψηλής πίεσης (High pressure safety injection systems).....	51
3.3.1	Έγχυση ασφαλείας με τη χρήση δεξαμενής υπό υψηλή πίεση.	52
3.3.2	Έγχυση ασφάλειας οδηγούμενη από τη βαρύτητα.	52
3.3.3	Έγχυση ασφαλείας με τη χρήση αντλίας υψηλής πίεσης.	53
3.4	Συστήματα έγχυσης ασφαλείας χαμηλής πίεσης (Low pressure safety injection systems).....	54
3.4.1	Έγχυση ασφαλείας με τη χρήση αντλίας χαμηλής πίεσης.....	54
3.4.2	Έγχυση ασφαλείας με τη χρήση δεξαμενής υπό χαμηλή πίεση.	54
3.4.3	Έγχυση ασφαλείας με χρήση βαλβίδων ανακυκλοφορίας.	55
3.5	Περίβλημα αντιδραστήρα (containment).	56
3.5.1	Περίβλημα καταστολής πίεσης.	56
3.5.2	Περίβλημα σκυροδέματος με σύστημα καταιονισμού.	57
3.5.3	Παθητική ψύξη μεταλλικού περιβλήματος.	58
3.6	Αντιμετώπιση σοβαρών ατυχημάτων – Περιορισμός ραδιενεργού υλικού.....	59
3.6.1	Σύστημα συγκράτησης στο εσωτερικό του περιβλήματος.	60
3.6.2	Συλλέκτης τετηγμένου πυρήνα.	61
3.6.3	Μηχανισμός ελέγχου υδρογόνου.	62
3.6.4	Σύστημα φιλτραρίσματος εξαερισμού περιβλήματος.....	63
3.7	Επίπεδα προστασίας σε σύγχρονους μικρούς αρθρωτούς αντιδραστήρες.	63
3.8	Εφαρμόσιμες απαιτήσεις ασφαλείας για την υλοποίηση των επιπέδων προστασίας στους αντιδραστήρες SMRs [IAEA - 2012].	69
4	Οικονομική ανάλυση της αγοράς των αντιδραστήρων ισχύος SMRs.....	71
4.1	Κόστος επένδυσης, κατασκευής και λειτουργίας.	71
4.1.1	Κόστος επενδύσεων.	71
4.1.2	Λειτουργία, συντήρηση και κόστος καυσίμων.	72
4.2	Παράγοντες που επηρεάζουν την οικονομία των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων.	73
4.2.1	Νέες αγορές για τους αντιδραστήρες SMRs.	75

4.2.2	Προμηθευτές SMRs.	78
4.2.3	Προκλήσεις.	81
4.2.4	Ανταγωνιστικό περιβάλλον.	83
5	Η περίπτωση των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής – Επίλογος και Προτάσεις.	89
5.1	Ο ρόλος των SMRs στις Ηνωμένες Πολιτείες.	90
5.2	Αδειοδότηση των SMRs στις Ηνωμένες Πολιτείες.	92
5.3	Επίλογος.	93
5.4	Προτάσεις.	94
6	Βιβλιογραφία.	95

Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) με τίτλο: “Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές”, της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η ανάθεση έγινε από τον Αν. Καθηγητή Ευάγγελο Π. Χίνη, της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών. Μετά τον αιφνίδιο θάνατό του στις 7 Φεβρουαρίου 2017, την επίβλεψη της εργασίας ανέλαβε ο Αν. Καθηγητής Μάριος Ι. Αναγνωστάκης, τον οποίο και ευχαριστώ. Τέλος οι ευχαριστίες μου επεκτείνονται και στα λοιπά μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον Επίκ. Καθηγητή Νικόλαο Π. Πετρόπουλο και το μέλος Ε.ΔΙ.Π. του Τομέα Δρ. Ανδρέα Α. Νικόγλου.

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, οι μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες (*Small Modular Reactors - SMRs*) προσελκύουν μεγάλο ενδιαφέρον σε ολόκληρο τον κόσμο. Ο σχεδιασμός τους ενσωματώνει καινοτόμες προσεγγίσεις προκειμένου να επιτύχει την αρθρωτή και ταχεία κατασκευή, την απλότητα και την παθητική ασφάλεια, την μείωση της εξάπλωσης των πυρηνικών όπλων και την μεγαλύτερη ασφάλεια της οικονομικής επένδυσης. Η ανάπτυξη των *SMRs* δύναται να προσφέρει καλύτερη εφαρμογή στα δίκτυα χαμηλής απαίτησης ισχύος πολλών αναπτυσσόμενων χωρών, καλύπτοντας αποτελεσματικά τις ενεργειακές ανάγκες με περιορισμένους οικονομικούς πόρους. Σε σύγκριση με τους αντιδραστήρες μεγάλης ισχύος, οι *SMRs* παρουσιάζουν σημαντικά οικονομικά οφέλη λόγω της μικρότερης διάρκειας κατασκευής, της ευέλικτης ανάπτυξης και του πιο απλού σχεδιασμού.

Πιο αναλυτικά, στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται μία πρώτη περιγραφή των χαρακτηριστικών και του τρόπου λειτουργίας των αντιδραστήρων *SMRs*, αναφέρονται οι καινοτομίες και τα χαρακτηριστικά ασφαλείας τους, ενώ γίνεται και μία σύγκριση με τους συμβατικούς σύγχρονους αντιδραστήρες.

Στο 2^ο Κεφάλαιο αναφέρονται αναλυτικά όλοι οι τύποι αντιδραστήρων 4^{ης} γενιάς, ο τρόπος που αυτοί διαχωρίζονται μεταξύ τους και τα πλεονεκτήματά τους, καθώς και ποιες είναι οι τεχνολογίες που είναι ιδανικές για εφαρμογή στην κατασκευή μικρών αντιδραστήρων.

Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφονται τα χαρακτηριστικά παθητικής ασφαλείας ενός σύγχρονου *SMR*, η χρήση περιβλήματος αντιδραστήρα και τα επίπεδα προστασίας για την αντιμετώπιση σφαλμάτων.

Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται μία οικονομική ανάλυση των στοιχείων που αφορούν στους μικρούς αντιδραστήρες. Περιγράφεται το κόστος επένδυσης, κατασκευής και λειτουργίας καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την οικονομία των *SMRs*.

Στο 5^ο Κεφάλαιο εξετάζεται συγκεκριμένα η αγορά των *SMRs* στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και εν κατακλείδι συνιστώνται κάποιες προτάσεις περαιτέρω ανάπτυξης.

Κεφάλαιο 1^ο

1 Αρχή λειτουργίας και χαρακτηριστικά Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος τύπου SMR.

1.1 Εισαγωγή – Περί ενέργειας.

Η αυξανόμενη ανησυχία σχετικά με την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού αλλά και οι επιπτώσεις της ενεργειακής κατανάλωσης στην κλιματική αλλαγή δημιουργούν σημαντικές εντάσεις στο πλαίσιο της παγκόσμιας ενεργειακής πολιτικής. Παρουσιάζεται ωστόσο συναίνεση σχετικά με την ανάγκη για:

- Αναδιάρθρωση και απελευθέρωση της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Αύξηση εξάρτησης από τις τεχνολογίες παραγωγής χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.
- Τεχνολογική διαφοροποίηση.

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (*International Energy Agency – IEA*¹), η παγκόσμια ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας παγκοσμίως αναμένεται να αυξηθεί κατά 50% μέχρι το 2035. Πιο συγκεκριμένα, προβλέπεται σχεδόν να διπλασιαστεί από 20.000 TWh το 2009 σε 39.400 TWh το 2035. Περισσότερο από το 80% αυτής της αύξησης θα προέλθει από αναπτυσσόμενες χώρες, κυρίως από την Κίνα και την Ινδία. Προκειμένου να καλυφθεί αυτή η ανάγκη, η παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος θα πρέπει να διπλασιαστεί από περίπου 4950 GWe σε 9150 GWe μέχρι το 2035. Το 2013, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από κατανάλωση λιγνίτη αντιπροσώπευε το 41% παγκόσμιας παραγωγής, ποσοστό που αναμένεται να αυξηθεί στο 43% ως το 2035. Ο λιγνίτης είναι το πλέον ρυπογόνο ορυκτό καύσιμο - μια ηλεκτροπαραγωγός μονάδα άνθρακα 1 GWe εκπέμπει περίπου 10 εκατομμύρια τόνους CO₂ ετησίως. Η εκπομπή του συγκεκριμένου αερίου θα αυξηθεί επίσης στο προαναφερθέν χρονικό πλαίσιο, από 30,2 δισεκατομμύρια σε 43,2 δισεκατομμύρια τόνους, δηλαδή αύξηση των συνολικών εκπομπών κατά δύο ποσοστιαίες μονάδες (από 43% σε 45%). Ένα σενάριο το οποίο, ενόψει της ανησυχίας για την κλιματική αλλαγή, μπορεί να θεωρηθεί περιβαλλοντικά μη βιώσιμο.

Καθώς οι μετεωρολογικές μετρήσεις παγκοσμίως καταδεικνύουν αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, οι πιέσεις για περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα θα κλιμακωθούν δραματικά. Αυτό δημιουργεί μία από τις κεντρικές προκλήσεις στην παγκόσμια ενεργειακή πολιτική: πώς να επιτευχθεί ο περιορισμός της χρήσης άνθρακα -και σε μικρότερο βαθμό του φυσικού αερίου- προκειμένου να περιοριστούν οι μελλοντικές εκπομπές του CO₂, καθώς και ποιες θα είναι οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας που θα προσφέρουν την περαιτέρω απαιτούμενη ισχύ.

¹ www.iea.org/

Επιπλέον, δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος της αυξημένης ζήτησης θα προέλθει από τις αναπτυσσόμενες χώρες, οποιαδήποτε διεθνή συμφωνία για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα ορυκτά καύσιμα θα επηρεάσει τις προοπτικές ανάπτυξής τους - με σοβαρές επιπτώσεις στη βιωσιμότητα της οικονομικής τους ανάπτυξης.

Η βασική διεθνής συμφωνία για το κλίμα είναι η σύμβαση-πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για τις κλιματικές μεταβολές (*United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC*²). Το 1997 εγκρίθηκε το Πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο εισήγαγε νομικά δεσμευτικούς στόχους μείωσης των εκπομπών για τις ανεπτυγμένες χώρες. Η δεύτερη περίοδος δεσμεύσεων του Πρωτοκόλλου του Κιότο άρχισε το 2013 και λήγει το 2020. Σε αυτήν συμμετέχουν 38 ανεπτυγμένες χώρες, μεταξύ των οποίων η ΕΕ και τα 28 κράτη μέλη της. Η ουσιαστικότερη δέσμευση είναι η μείωση των εκπομπών CO₂ σε επίπεδο τουλάχιστον 18% χαμηλότερο από εκείνο του 1990. Η βασική αδυναμία του Πρωτοκόλλου του Κιότο είναι ότι υποχρεώνει μόνον τις ανεπτυγμένες χώρες να αναλάβουν δράση. Δεδομένου ότι οι Ηνωμένες Πολιτείες δεν το υπέγραψαν ποτέ, ο Καναδάς αποχώρησε πριν από το τέλος της πρώτης περιόδου δεσμεύσεων και η Ρωσία, η Ιαπωνία και η Νέα Ζηλανδία δεν συμμετέχουν στη δεύτερη περίοδο δεσμεύσεων, το Πρωτόκολλο του Κιότο αφορά πλέον μόνον το 14% περίπου των παγκόσμιων εκπομπών. Η διάσκεψη του Παρισιού το 2015 κατέληξε σε μια νέα παγκόσμια συμφωνία για την κλιματική αλλαγή που περιλαμβάνει ένα σχέδιο δράσης για να συγκρατηθεί η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη «αρκετά κάτω» από τους 2°C. Η συμφωνία των Παρισίων άρχισε να ισχύει το 2016, αφού εκπληρώθηκε η σχετική προϋπόθεση, δηλαδή επικύρωση από 55 τουλάχιστον χώρες που να αντιπροσωπεύουν τουλάχιστον το 55% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Όλες οι χώρες της ΕΕ επικύρωσαν τη συμφωνία.

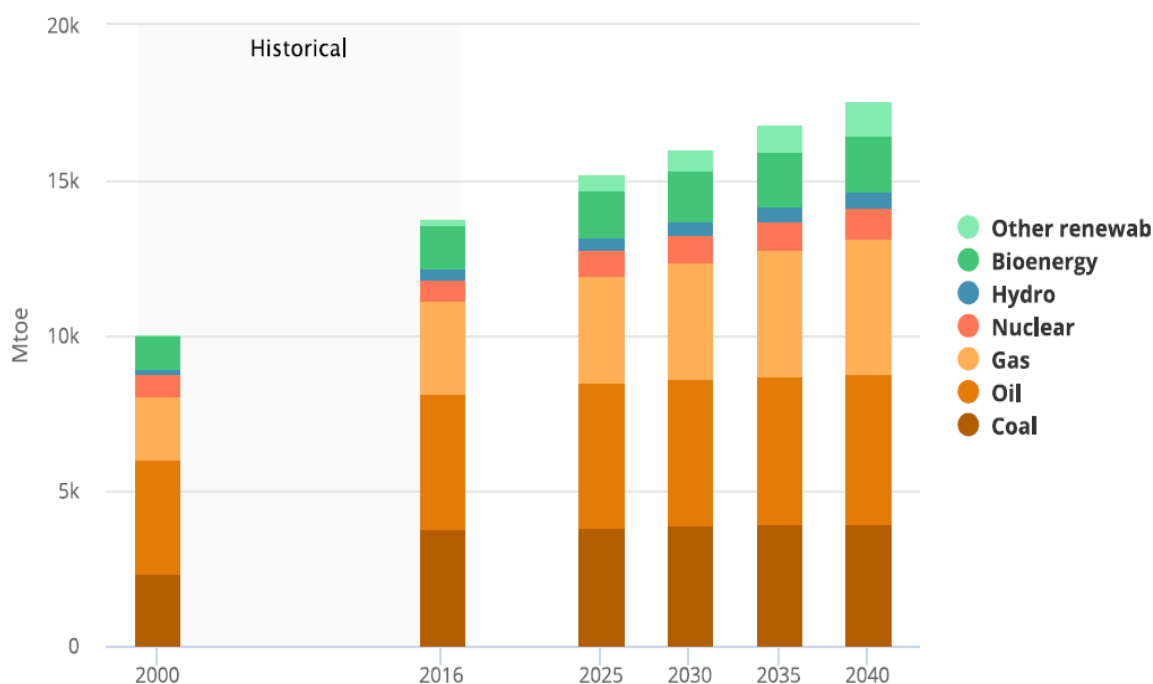
Όλες οι πηγές ενέργειας και οι τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν οφέλη και μειονεκτήματα. Τα ορυκτά καύσιμα, ιδίως ο άνθρακας και το φυσικό αέριο, θα διατηρήσουν σημαντικό μερίδιο της αγοράς. Στο πλαίσιο της νέας πολιτικής τα ορυκτά καύσιμα αναμένεται να συμμετέχουν σε ποσοστό μεγαλύτερο από το 55% της ηλεκτρικής ενέργειας που θα παράγεται μέχρι το 2035 (λαμβάνοντας υπόψη τις πολιτικές δεσμεύσεις και τα σχέδια που έχουν ανακοινωθεί από τις διάφορες χώρες για την αντιμετώπιση της ενεργειακής ασφάλειας, της κλιματικής αλλαγής και της τοπικής ρύπανσης που σχετίζονται με την ενέργεια).

Από την άλλη πλευρά, εμφανίζονται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες προς το παρόν έχουν χαμηλό ποσοστό συμμετοχής στην παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή (το 2011 αντιπροσώπευαν μόλις το 2% της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής), αλλά εμφανίζουν πολύ υψηλούς ρυθμούς αύξησης. Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, σε σχέση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας, είναι η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, η εξάρτηση της διαθεσιμότητας από τις τοπικές

² www.unfccc.int/

περιβαλλοντικές συνθήκες (όπως η ηλιοφάνεια και η ανεμόπτωση) και τέλος ο χαμηλός βαθμός απόδοσης λόγω νέων καινοτόμων εφαρμογών οι οποίες έχουν σημαντικά περιθώρια βελτίωσης. Επιπλέον, το κόστος κατασκευής κάποιων μονάδων, όπως στην περίπτωση των υδροηλεκτρικών σταθμών, σε συνδυασμό με τον χαμηλό βαθμό απόδοσης καθιστούν τις μονάδες αυτές μη ανταγωνιστικές. Υπάρχουν ωστόσο τεχνολογικές εξελίξεις που προσφέρουν σημαντικές υποσχέσεις για οικονομικά αποδοτική αύξησή τους παγκοσμίως - εκτιμήσεις για 15% της συνολικής ηλεκτρικής παραγόμενης ενέργειας, το 2035. Από την άλλη πλευρά, οι διαδεδομένες διακοπές ρεύματος, η τήξη των παγετώνων, η αυξημένη συχνότητα εμφανίσεων ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως τυφώνες, κυκλώνες, πλημμύρες κ.α. και η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας καθιστούν επιτακτική ανάγκη την ισχυρή πολιτική βούληση για άμεσες καινοτόμες δράσεις.

Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται μία πρόβλεψη για τη συνολική παγκόσμια ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας ανά καύσιμο. Ο λιγνίτης αυξάνεται από το 2016 έως το 2040 κατά περίπου 150 Mtoe (Mtoe = $11,67 \times 10^6$ MWh), τα υγρά καύσιμα αυξάνονται περίπου 450 Mtoe, το φυσικό αέριο κατά 1350 Mtoe, η πυρηνική ενέργεια κατά 320 Mtoe και οι ανανεώσιμες πηγές παρουσιάζουν την μεγαλύτερη αύξηση, της τάξης των 1500 Mtoe.



Σχήμα 1-1 Συνολική παγκόσμια ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας ανά καύσιμο [World energy outlook, International Energy Agent - IEA].

Αν και η πυρηνική σχάση αποτελεί μια καθιερωμένη τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με πολύ χαμηλές εκπομπές CO₂, θεωρείται ως μη ελκυστική επιλογή από διάφορες περιβαλλοντικές ομάδες και απλούς πολίτες. Αυτή η δυσμενής δημόσια αντίληψη προέρχεται από βαθιά ριζωμένες ανησυχίες για τον πιθανό κίνδυνο καταστροφής ενός αντιδραστήρα με καταστροφικές οικολογικές και ανθρωπιστικές συνέπειες, καθώς και τα πολύ σημαντικά ζητήματα της διάθεσης των πυρηνικών αποβλήτων και της εξάπλωσης των σχάσιμων υλικών. Αυτοί οι φόβοι έχουν επιδεινωθεί μετά τα καταστροφικά γεγονότα στην Ιαπωνία τον Μάρτιο του 2011.

Προκειμένου να μπορέσει η πυρηνική ενέργεια να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην κάλυψη των μελλοντικών παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών και στην άμβλυση της απειλής της κλιματικής αλλαγής, χρειάζεται να αντιμετωπιστούν -και να μειωθούν ουσιαστικά- οι κίνδυνοι ενός καινούριου πυρηνικού ατυχήματος, οι καθυστερήσεις και το μεγάλο κόστος κατασκευής. Η τεχνική πολυπλοκότητα, οι προκλήσεις διαχείρισης και οι εγγενείς κίνδυνοι αποτυχίας που προκαλεί η κατασκευή νέων πυρηνικών σταθμών έχουν ενισχυθεί σημαντικά καθώς το μέγεθός τους αυξάνεται στην τάξη των GW και πλέον. Γεγονός φυσικά που εν τέλει δυσχεραίνει την επένδυση κατασκευής.

Ένα πιθανό σενάριο θα μπορούσε να είναι η μείωση των πυρηνικών εγκαταστάσεων από την τάξη ισχύος των GW σε μικρότερες και λιγότερο σύνθετες μονάδες. Οι νέες γενιές πυρηνικών αντιδραστήρων βρίσκονται τώρα σε διάφορα στάδια προγραμματισμού και η ανάπτυξη τους υπόσχεται αυξημένη ασφάλεια, χαμηλότερη οικονομική επένδυση και απλοποίηση στον σχεδιασμό. Οι Πυρηνικοί Αντιδραστήρες Ισχύος τύπου *SMR (Small Modular nuclear Reactors)* αποτελούν τυποποιημένη σχεδίαση μικρότερης έκτασης, που υπόσχονται να μειώσουν τους επενδυτικούς κινδύνους και το κόστος κατασκευής, ενώ ταυτόχρονα μειώνονται οι ανησυχίες για καταστροφικά ενδεχόμενα, καθώς περιέχουν σημαντικά μικρότερο ραδιενεργό απόθεμα.

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες που θα μπορούσαν να στηριχτούν στην πυρηνική ενέργεια δεν είναι αρκετά μεγάλη για να δικαιολογήσει την ανάπτυξη πολύ μεγάλων μονάδων. Επιπλέον, τα συμβατικά πυρηνικά εργοστάσια απαιτούν ιδιαίτερα υψηλό κατασκευαστικό κόστος. Σε ολοένα και πιο απελευθερωμένες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, οι επενδυτές που επωμίζονται την κατασκευή πυρηνικών εγκαταστάσεων προτιμούν μικρότερες επενδύσεις και συντομότερο χρόνο κατασκευής. Υπάρχουν επίσης κάποιες πρώτες ενδείξεις για μία ενδεχόμενη μεταστροφή των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, μακριά από τους μεγάλους κεντρικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και προς τα πιο αποκεντρωμένα συστήματα διανομής που μειώνουν την ανάγκη για ακριβά περιφερειακά ή εθνικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Ο εξελιγμένος πυρηνικός σχεδιασμός είναι απαραίτητος προκειμένου να προσαρμοστεί σε αυτές τις εμπορικές αλλαγές και κοινωνικές απαιτήσεις:

- Οι *SMRs* αποτελούν μια ελκυστική και οικονομική επιλογή πυρηνικής ενέργειας για πολλές αναπτυσσόμενες χώρες με μικρές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, μικρό δίκτυο και περιορισμένους οικονομικούς πόρους.
- Είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για μη ηλεκτρικές εφαρμογές όπως η αφαλάτωση, οι εναλλακτικές χρήσεις θερμότητας όπως η τηλεθέρμανση και η παραγωγή υδρογόνου.
- Επιπλέον, οι εγκαταστάσεις με πολλαπλές μονάδες *SMRs* μπορούν να επιτρέψουν ένα πιο ευέλικτο παραγωγικό προφίλ (συμπαραγωγή).

Τελικά, οι *SMRs* θα μπορούσαν να προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά τη συνολική απλότητα, όπως την αρθρωτή κατασκευή και την ταχύτητα κατασκευής, τα χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας και την μείωση εξάπλωσης πυρηνικών όπλων, καθώς και τον μειωμένο οικονομικό κίνδυνο μίας επένδυσης [1,2,3].

1.2 Μικροί αρθρωτοί αντιδραστήρες ισχύος (Small Modular Reactors - SMRs).

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω πυρηνικού αντιδραστήρα πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά στις 20 Δεκεμβρίου 1951 στην έρημο του Αϊντάχο και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς εκτιμήθηκε στα 45 KWe. Έκτοτε, οι αντιδραστήρες έχουν φτάσει σε ηλεκτρική ισχύ μεγαλύτερη των 1.600 MWe, με αντίστοιχη αύξηση του κόστους επένδυσης. Σχεδόν 50 χρόνια μετά την πρώτη φορά, εμφανίζονται και πάλι εφαρμογές -και ανάγκη- για αντιδραστήρες με χαμηλή ηλεκτρική παραγωγή. Πλέον έχουν κατασκευαστεί πολλοί μικρότεροι αντιδραστήρες, δημιουργώντας μεγάλη εμπειρία στην κατασκευή μικρών μονάδων ισχύος. Ο διεθνής οργανισμός ατομικής ενέργειας (*International Atomic Energy Agency - IAEA*³) ορίζει ως μικρούς (*small*) αντιδραστήρες αυτούς με όριο απόδοσης ηλεκτρικής ισχύος έως 300 MWe και μέσους (*medium*) έως 700 MWe. Ωστόσο, ο όρος *SMR* χρησιμοποιείται συνήθως ως ακρωνύμιο για τον μικρό αρθρωτό αντιδραστήρα, ο οποίος έχει σχεδιαστεί για εξ' ολοκλήρου εργοστασιακή κατασκευή. Επιπλέον, παρουσιάζεται μία υποκατηγορία πολύ μικρών αντιδραστήρων (*vSMRs*) για μονάδες ισχύος μικρότερες των 15 MWe και χρήση ειδικά σε απομονωμένες περιοχές.

Σήμερα, λόγω του υψηλού επενδυτικού κόστους των αντιδραστήρων μεγάλης ισχύος που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και εν μέρει λόγω της ανάγκης εξυπηρέτησης μικρών ηλεκτρικών δικτύων (μικρότερων των 4 GWe), υπάρχει κατεύθυνση προς την ανάπτυξη μικρότερων μονάδων. Αυτές μπορούν να κατασκευαστούν είτε ανεξάρτητα, είτε ως τμήματα ενός μεγαλύτερου συγκροτήματος, με δυνατότητα ανάληψης ποικίλων φορτίων, ανάλογα και με την τρέχουσα ζήτηση. Παρουσιάζεται επίσης ανάπτυξη ανεξάρτητων μικρών μονάδων για απομακρυσμένες περιοχές. Οι μικρές μονάδες θεωρούνται μια πολύ πιο εύχρηστη επένδυση από τους παλιότερους συμβατικούς αντιδραστήρες, των οποίων το κόστος συχνά δυσχεραίνει την πρακτική εφαρμογή της επένδυσης.

³ www.iaea.org

Γενικά, οι *SMRs* ορίζονται ως πυρηνικοί αντιδραστήρες της τάξης ισχύος των 300MWe ή και μικρότεροι, σχεδιασμένοι με αρθρωτή τεχνολογία που χρησιμοποιεί εργοστασιακή κατασκευή μονάδων, επιδιώκοντας έτσι την οικονομική παραγωγή καθώς και μικρούς χρόνους κατασκευής. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν διάφορα προηγμένα σχέδια της μικρής κατηγορίας τα οποία βρίσκονται σε διαδικασία λειτουργίας, κατασκευής ή απλά σχεδιασμού. Υπάρχουν αρκετά μοντέλα νέων τεχνολογιών, που ομαδοποιούνται σε δύο γενικές κατηγορίες:

- Αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων (Thermal reactors)
- Αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων (Fast neutron reactors - FNRs)

Η πρώτη κατηγορία έχει τον χαμηλότερο τεχνολογικό κίνδυνο, αλλά η δεύτερη αποτελείται από αντιδραστήρες οι οποίοι δύνανται να είναι μικρότεροι, απλούστεροι στην κατασκευή τους και με μεγαλύτερη διάρκεια λειτουργίας πριν χρειαστεί ανεφοδιασμός καυσίμου.

Πίνακας 1-1 Κατάσταση κατασκευής *SMRs* τύπου *PWR* παγκοσμίως [1]

Μοντέλο <i>SMR</i>	Χώρα προέλευσης	Ηλεκτρική ισχύς (MWe)	Αδειοδότηση - Λειτουργία
<i>CAREM-25</i>	Αργεντινή	1x27	Υπό κατασκευή
<i>KLT-40S</i>	Ρωσία	2x35	Υπό κατασκευή, 2019
<i>SMART</i>	Νότιος Κορέα	1x90	-
<i>mPower</i>	ΗΠΑ	2x180	Υπό μελέτη
<i>NuScale</i>	ΗΠΑ	12x45	Υπό μελέτη
<i>HI-SMUR</i>	ΗΠΑ	1x160	Υπό μελέτη
<i>Westinghouse</i>	ΗΠΑ	1x225	Υπό μελέτη

Η ανάπτυξη των *SMRs* προχωρά στις δυτικές χώρες με πολλές ιδιωτικές πρωτοβουλίες, συμπεριλαμβανομένων των μικρών επιχειρήσεων. Η συμμετοχή αυτών των νέων επενδυτών υποδηλώνει μια μεταστροφή που πραγματοποιείται στην ανάπτυξη του τομέα της πυρηνικής ενέργειας. Στον Πίνακα 1.1. παρουσιάζονται κάποια υπό κατασκευή μοντέλα *SMRs* τύπου *PWR*, οι αποδόσεις ισχύος τους και η έναρξη του σχεδιασμού ή της κατασκευής τους. Ο μακροπρόθεσμος στόχος της πυρηνικής ενέργειας είναι να αναπτύξει μια οικονομική, ασφαλή και περιβαλλοντικά αποδεκτή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την κοινωνία [1,5,6].

1.3 Χαρακτηριστικά των *SMRs*.

Ο παγκόσμιος οργανισμός για τα πυρηνικά με τίτλο: *World Nuclear Association* – *WNA*⁴ απαριθμεί τα χαρακτηριστικά ενός μικρού αντιδραστήρα ισχύος *SMR* ως εξής:

- Ως 300MW απόδοση ηλεκτρική ισχύος.
- Αρθρωτή εργοστασιακή κατασκευή.

⁴ www.world-nuclear.org/

- Χρήση παθητικών συστημάτων ασφαλείας και άρα μικρότερη εξάρτηση από τα συστήματα ενεργητικής ασφάλειας και τις πρόσθετες αντλίες.
- Χαμηλότερη ισχύς που οδηγεί σε μείωση της καύσιμης ύλης καθώς και μικρότερο ραδιενεργό απόθεμα στον αντιδραστήρα.
- Ανάληψη μεταβαλλόμενων φορτίων - δυνατότητα συμπαραγωγής.
- Συμπαγής, ολοκληρωμένη κατασκευή αντιδραστήρα.
- Ανάληψη μεταβαλλόμενων φορτίων - δυνατότητα συμπαραγωγής.
- Ο αρθρωτός σχεδιασμός και το μικρό μέγεθος προσφέρονται για την τοποθέτηση πολλαπλών μονάδων στον ίδιο χώρο (π.χ. μοντέλα *NuScale*, *mPower*, βλ. Πίνακα 1.1 και Σχήμα 1.3).
- Δυνατότητα υπόγειας ή υποβρύχιας τοποθέτησης της μονάδας αντιδραστήρα που παρέχει μεγαλύτερη προστασία από φυσικούς (π.χ. σεισμό ή τσουνάμι) ή ανθρωπογενείς (π.χ. πρόσκρουση αεροσκάφους) κινδύνους.
- Δυνατότητα απομάκρυνσης της μονάδας αντιδραστήρα ή επί τόπου παροπλισμού στο τέλος της διάρκειας ζωής του.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίσουμε ότι ο όρος *modular*, ο οποίος στο παρόν κείμενο αποδίδεται σε ελεύθερη μετάφραση με τον όρο *αρθρωτός*, αναφέρεται αφενός στον τρόπο κατασκευής των μικρών αντιδραστήρων και αφετέρου στην δυνατότητα που έχουν να λειτουργούν είτε ανεξάρτητα, είτε συνδυαστικά, πολλές μονάδες μαζί, σχηματίζοντας μία ενιαία ηλεκτροπαραγωγική μονάδα μεγάλης ισχύος (> 300 MWe) αντίστοιχη ενός τυπικού πυρηνικού σταθμού [1,5,6].

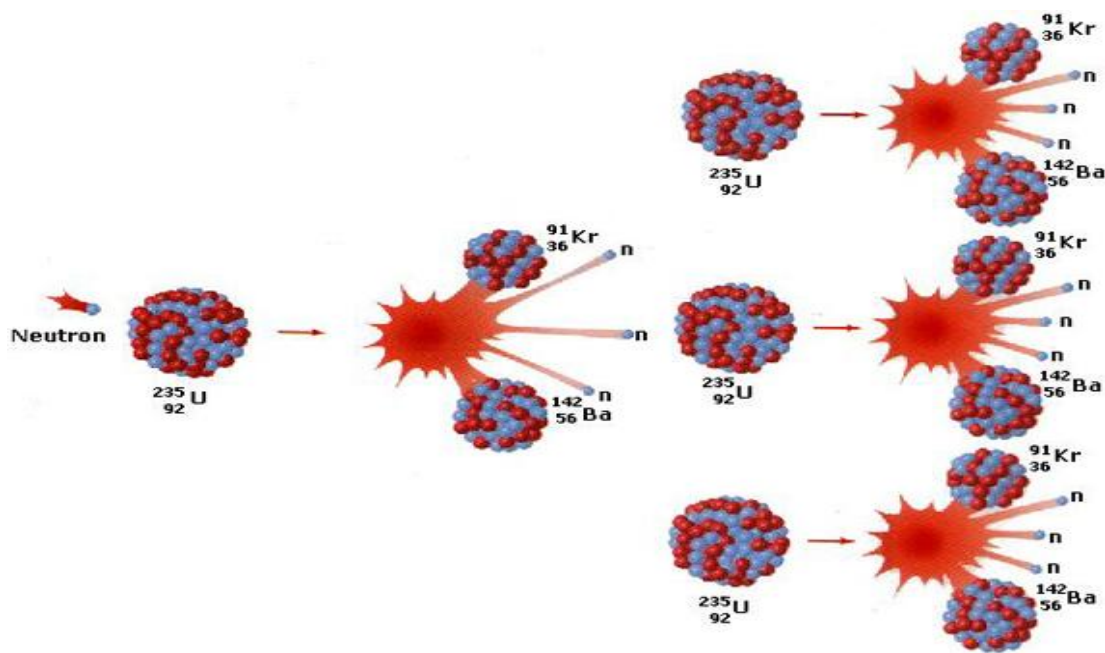
1.4 Αρχή λειτουργίας.

1.4.1 Σχάση και έλεγχος αντίδρασης.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι *SMRs*. Ορισμένοι αποτελούν απλουστευμένες εκδοχές μεγάλων αντιδραστήρων, ενώ άλλοι περιλαμβάνουν καινοτόμες τεχνολογίες. Οι μονάδες πυρηνικής ενέργειας παράγουν θερμότητα μέσω της πυρηνικής σχάσης. Όταν ένας ασταθής πυρήνας (όπως ο πυρήνας του ^{235}U) απορροφά ένα επιπλέον νετρόνιο, το άτομο θα διασπαστεί, παράγοντας θραύσματα σχάσης μεταξύ των οποίων και νετρόνια. Τα θραύσματα της σχάσης μεταφέρουν το μεγαλύτερο ποσοστό της κινητικής ενέργειας που απελευθερώνεται από τον πυρήνα του ουρανίου. Τα παραγόμενα νετρόνια προκαλούν νέες πυρηνικές σχάσεις με αποτέλεσμα τη θέρμανση των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου (Σχήμα 1.2).

Για το ^{235}U , τα πιο αργά νετρόνια είναι πιο πιθανό να προκαλέσουν αντίδραση σχάσης. Προκειμένου να επιβραδυνθούν τα νετρόνια στον πυρήνα του αντιδραστήρα, χρησιμοποιείται ένας επιβραδυντής. Ο πιο διαδεδομένος εν χρήσει επιβραδυντής είναι το ελαφρύ ύδωρ και τα νετρόνια επιβραδύνονται καθώς περνούν μέσα από το αυτό. Καθώς η θερμοκρασία του καυσίμου αυξάνεται, αυξάνεται και η αντιδραστικότητα, δηλαδή η παραγωγή νετρονίων στον πυρήνα του αντιδραστήρα.

Τα νετρόνια της σχάσης εξέρχονται των ράβδων καυσίμου με κινητική ενέργεια της τάξης των MeV. Εισέρχονται στον χώρο του επιβραδυντή και συγκρούονται με τα άτομα του, μεταφέροντας έτσι την κινητική τους ενέργεια σε αυτά. Έτσι τα άτομα του επιβραδυντή αποκτούν ενέργεια και τα νετρόνια επιβραδύνονται έως ότου η μέση κινητική ενέργειά τους είναι περίπου ίση με αυτήν των ατόμων του επιβραδυντή. Αυτά τα νετρόνια λέγονται θερμικά νετρόνια επειδή δεν χάνουν (κατά μέσο όρο) άλλη ενέργεια, μοιράζοντάς την στα άτομα του επιβραδυντή. Τα νετρόνια που έχουν επιβραδυνθεί πλέον εισέρχονται ξανά στις ράβδους του καυσίμου και προκαλούν νέες σχάσεις ασταθών πυρήνων ^{235}U , προκαλώντας αλυσιδωτή αντίδραση. Μια ελεγχόμενη αλυσιδωτή σχάση είναι απαραίτητη για την εκμετάλλευση της πυρηνικής ενέργειας. Απαιτούνται συγκεκριμένες ποσότητες πυρηνικού καυσίμου, διαφορετικά τα νετρόνια δεν θα επηρεάσουν επαρκή αριθμό άλλων ασταθών ατόμων. Είναι επίσης ευκολότερο για τους ασταθείς πυρήνες να απορροφούν νετρόνια όταν αυτά ταξιδεύουν με συγκεκριμένη ταχύτητα.



Σχήμα 1-2 Πυρηνική σχάση [www.physicsgg.me]

Η αντιδραστικότητα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και η πυκνότητα του ψυκτικού μέσου και του επιβραδυντή, η θερμοκρασία και η πυκνότητα του καυσίμου και εν τέλει της συνολικής δομής. Οι αντιδραστήρες που έχουν επιβραδυντή ή ψυκτικό μέσο σε υγρή μορφή, χαρακτηρίζονται από δύο συντελεστές που σχετίζονται με την εξέλιξη της αντίδρασης. Καθώς η θερμοκρασία του καυσίμου και του επιβραδυντή αυξάνονται, ο θετικός συντελεστής κενού (*positive void coefficient*) προκαλεί τη μείωση της πυκνότητας του ψυκτικού μέσου και κατ' επέκταση την αύξηση του πληθυσμού των νετρονίων (μιας και το ελαφρύ ύδωρ είναι ένας δυνατός απορροφητής νετρονίων) και συνεπώς την αύξηση της

απόδοσης ισχύος του αντιδραστήρα. Από την άλλη πλευρά, καθώς η ισχύς αυξάνεται, αυξάνεται και η θερμοκρασία του καυσίμου, με αποτέλεσμα τη μείωση του πληθυσμού νετρονίων που συνεισφέρουν στη σχάση. Αυτή η διαδικασία αφορά στον αρνητικό συντελεστή καυσίμου (*negative fuel coefficient*). Η επίδραση των δύο συντελεστών εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας και την απόδοση ισχύος του αντιδραστήρα και καθιστά τον αντιδραστήρα -εκ φύσεως- ανθεκτικό στην ανεξέλεγκτη αλυσιδωτή αντίδραση ή στην ξαφνική και απότομη αύξηση της θερμοκρασίας.

Σε συνθήκες λειτουργίας πλήρους ισχύος, ο συντελεστής θερμοκρασίας καυσίμου κυριαρχεί και ορίζεται ως αρνητικός συντελεστής ισχύος (*negative power coefficient*). Ωστόσο, σε λειτουργία κάτω από το 20% της πλήρους ισχύος, ο συντελεστής ισχύος γίνεται θετικός, λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών του καυσίμου, γεγονός που πρέπει να περιορίζεται με συστήματα αυτόματης απενεργοποίησης λειτουργίας. Ο θετικός συντελεστής κενού περιορίζεται με την τοποθέτηση απορροφητών νετρονίων ώστε να μεταβάλλεται η ισορροπία απορρόφησης των νετρονίων μεταξύ των απορροφητών και του ψυκτικού μέσου, ενώ απαιτείται εμπλουτισμός του ^{235}U 2-2,4%. Οι συντελεστές κενού αφορούν αντιδραστήρες με υγρό ψυκτικό μέσο ή επιβραδυντή, όπως οι αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος (*PWRs*), οι αντιδραστήρες υγρών μετάλλων (*SFRs* και *LBFRs*) και οι αντιδραστήρες τετηγμένων αλάτων (*MSRs*). Υπό συνθήκες ατυχήματος, μπορούν επίσης να επιδράσουν σε αερίοψυκτους αντιδραστήρες (*GFRs*) [7,8,9].

1.4.2 Πυρηνικά καύσιμα.

Ορισμένοι *SMRs* είναι ταχείς αντιδραστήρες - δεν χρησιμοποιούν τους επιβραδυντές για να επιβραδύνουν τα νετρόνια. Οι ανάγκες σε καύσιμα σε αυτόν τον τύπο αντιδραστήρα είναι λίγο διαφορετικές: τα άτομα πρέπει να απορροφούν νετρόνια που ταξιδεύουν σε υψηλότερες ταχύτητες. Αυτό συνήθως σημαίνει αλλαγή της διάταξης καυσίμου μέσα στον πυρήνα ή χρήση διαφορετικών τύπων καυσίμου, προκειμένου να επιτυγχάνεται ομοιόμορφη κατανάλωση. Το ^{239}Pu είναι πιο πιθανό να απορροφήσει ένα νετρόνιο υψηλής ταχύτητας απ' ό,τι το ^{235}U . Ο συντελεστής κενού παίζει κι εδώ τον ρόλο του: όταν ο πυρήνας θερμαίνεται πάρα πολύ και τα νετρόνια αρχίζουν να κινούνται ταχύτερα, ακόμα και τα στοιχεία που συνήθως απορροφούν νετρόνια έχουν πρόβλημα να τα συλλάβουν. Η σχάση επιβραδύνεται και δεν συνεχίζεται ανεξέλεγκτα.

Όλοι οι αντιδραστήρες που είναι σε λειτουργία χρησιμοποιούν καύσιμα που βασίζονται στο U, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχει και Pu. Το πυρηνικό καύσιμο μπορεί να έχει τις εξής μορφές:

- Διοξείδιο του φυσικού ουρανίου (UO_2) (αντιδραστήρες 2^{ης} γενιάς *Candu*)
- Διοξείδιο του ουρανίου (UO_2) με εμπλουτισμένο ^{235}U σε αναλογία 1.5 - 4% (αντιδραστήρες *BWR*, *PWR*)

- Οξείδιο μίγματος ουρανίου και πλουτωνίου (Mixed Oxide MOx, (UPu)O₂) με βάση το φυσικό ή απεμπλουτισμένο ουράνιο (0.72% ή 0.2% ²³⁵U αντίστοιχα).

Μία συνήθης σύσταση καυσίμου σε έναν αντιδραστήρα θερμικών νετρονίων είναι περίπου 2-4% εμπλουτισμένο ²³⁵U και ²³⁸U, ενώ σε έναν αντιδραστήρα ταχέων νετρονίων είναι μείγμα 80% απεμπλουτισμένο ²³⁵U και 20% ²³⁹Pu .

Όταν το καύσιμο δεν είναι σε θέση να συμβάλει πλέον στην αλυσιδωτή αντίδραση, απομακρύνεται από τον αντιδραστήρα. Δύο σενάρια διέπουν τη διαχείριση αυτού του εξαντλημένου καυσίμου: επανεπεξεργασία του καυσίμου για την ανάκτηση του U (απεμπλουτισμένο U) και του Pu και χρήση τους στην κατασκευή μίγματος καυσίμου (MOx) ή αποθήκευση του καυσίμου σε ειδικούς χώρους εναπόθεσης χωρίς να υπάρχει η πρόθεση ανάκτησής τους. Η σειρά από βιομηχανικές και πυρηνικές διαδικασίες που εμπλέκονται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στους πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος με τη χρήση U και Pu ονομάζεται κύκλος πυρηνικού καυσίμου. Ο κύκλος πυρηνικού καυσίμου ξεκινά με την εξόρυξη του ορυκτού U από το έδαφος και τελειώνει με τη διάθεση των ραδιενεργών καταλοίπων, που παράγονται κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας όλου του κύκλου.

Ένα άλλο όφελος των ταχέων αντιδραστήρων είναι ότι ορισμένοι από αυτούς μπορούν να επιτρέπουν τη μεταστοιχείωση. Κατά τη διάρκεια παραγωγής της ενέργειας, υπάρχουν αρκετά νετρόνια τα οποία δεν συμμετέχουν στην αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης, χρησιμοποιούνται όμως για να μετατρέψουν τα μη σχάσιμα στοιχεία σε σχάσιμα. Πρόκειται για αντιδραστήρα αναπαραγωγής (*breeder reactor*), ο οποίος κατά τη λειτουργία του παράγει περισσότερο καύσιμο από όσο καταναλώνει. Πιο συγκεκριμένα, ο πυρήνας καυσίμου του αναπαραγωγού αντιδραστήρα περιβάλλεται με ²³⁸U, το οποίο είναι το πιο εύκολα εντοπισμένο ισότοπο ουρανίου και είναι μη σχάσιμο. Τότε το ²³⁸U υφίσταται αντίδραση απορρόφησης νετρονίων και μεταστοιχείωνεται σε ²³⁹Pu, το οποίο είναι σχάσιμο και κατά τον ανεφοδιασμό του αντιδραστήρα υπάρχει η δυνατότητα να απομακρυνθεί, να καθαριστεί και επαναχρησιμοποιηθεί ως καύσιμο. Παρουσιάζεται συνεπώς επαναχρησιμοποίηση καυσίμου και ενδεχόμενη εξάλειψη ανάγκης απομάκρυνσης αποβλήτων, δηλαδή ένα κλειστός κύκλος καυσίμου. Σε τέτοιους αντιδραστήρες μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί το Th²³² για παραγωγή U²³³ [7,8,10].

1.4.3 Θερμική / ηλεκτρική παραγωγή.

Παραδοσιακά, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες χρησιμοποιούν ένα ψυκτικό μέσο για να απάγουν θερμότητα από τον πυρήνα και εν συνεχεία να τη χρησιμοποιήσουν για ατμοπαραγωγή μέσω ατμογεννητριών. Ο παραγόμενος ατμός οδηγείται σε στροβίλους που θα παράξουν ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν κάποια σχέδια αερόψυκτων αντιδραστήρων που χρησιμοποιούν αεροστρόβιλο αντί για ένα δευτερεύον κύκλωμα νερού. Επίσης, υπάρχουν μερικές μονάδες που παράγουν θερμική, αντί για ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγει ένας πυρηνικός αντιδραστήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή

υδρογόνου. Αυτή τη στιγμή ορισμένες από τις πιθανές εμπορικές -μη ηλεκτρικές- εφαρμογές της πυρηνικής θερμότητας περιλαμβάνουν την αφαλάτωση του νερού και την παραγωγή υποπροϊόντων πετρελαίου (εξόρυξη πετρελαίου από πίσσα, δημιουργία συνθετικού πετρελαίου από άνθρακα κ.λπ.) [11].

1.4.4 Ψυκτικό μέσο.

Επί του παρόντος, οι περισσότεροι αντιδραστήρες χρησιμοποιούν ως ψυκτικό μέσο το νερό. Το ελαφρύ ύδωρ (H_2O) είναι πιο συνηθισμένο από το βαρύ ύδωρ (D_2O). Σκοπός της κυκλοφορίας του ψυκτικού είναι η απαγωγή της θερμικής ενέργειας από τον πυρήνα του αντιδραστήρα και η χρήση της για ατμοπαραγωγή. Τα σύγχρονα σχέδια αντιδραστήρων πειραματίζονται με διαφορετικούς τύπους ψυκτικού μέσου. Οι αντιδραστήρες υγρών μετάλλων έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο στις ΗΠΑ όσο και σε άλλες χώρες. Οι αερόψυκτοι αντιδραστήρες και οι αντιδραστήρες τετηγμένου άλατος εξετάζονται επίσης ως επιλογή για λειτουργία σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες [7,8].

1.5 Πιθανές χρήσεις.

Οι *SMRs* θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη σημαντικού ποσοστού της ζήτησης ενέργειας, όπως για παράδειγμα ως εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι απομακρυσμένες τοποθεσίες συχνά δυσκολεύονται να βρουν οικονομικά αποδοτικές και αξιόπιστες πηγές ενέργειας. Οι μικροί πυρηνικοί αντιδραστήρες θεωρούνται λύση για πολλά ενεργειακά προβλήματα σε αυτές τις δυσπρόσιτες περιοχές. Επιπλέον, παρουσιάζονται διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές, όπως ο καθαρισμός ύδατος, η αφαλάτωση και η εξόρυξη, μιας και σε αυτές τις περιοχές η θερμότητα και η ηλεκτρική ενέργεια κοστίζουν ακριβά. Τέλος, υπάρχουν θερμικές εφαρμογές όπως η παραγωγή ατμού που θερμαίνει βιομηχανικές ή οικιακές εγκαταστάσεις [12,13].

1.6 Εν δυνάμει φορτία.

Οι πυρηνικοί σταθμοί έχουν αναπτυχθεί για να καλύψουν την αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Ορισμένοι από αυτούς τους ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς μπορούν να προσφέρουν καθημερινά ηλεκτρική ισχύ μεταξύ 50% και 100% της ονομαστικής ισχύος τους. Κάποιες φορές ωστόσο η ζήτηση μειώνεται και χρειάζεται απαραίτητα η διοχέτευση της παραγόμενης ενέργειας. Μία εναλλακτική αποτελεσματική λύση είναι η συμπαραγωγή, δηλαδή η εκτροπή της υπέρμετρης -σε σχέση με τη ζήτηση- ισχύος σε βοηθητικό σύστημα.

Ένα κατάλληλο σύστημα συμπαραγωγής χρειάζεται ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ή/και θερμότητας στην περιοχή των 500 MWe (1,5 GWth), πρέπει όμως να έχει και

τη δυνατότητα ανταπόκρισης σε έκτακτες περιπτώσεις αύξησης της ζήτησης. Επιπλέον, χρειάζεται να είναι ευέλικτο, δηλαδή να μπορεί να λειτουργεί με πλήρες φορτίο κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή και να απενεργοποιείται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Από οικονομική άποψη, είναι απαραίτητο η επένδυση στο βοηθητικό σύστημα να είναι κερδοφόρα. Η μεταφορά θερμότητας, η αφαλάτωση και η παραγωγή υδρογόνου θα μπορούσαν να είναι τεχνικά και οικονομικά εφικτές [12].

1.7 Καινοτομίες

Η ανάγκη για ηλεκτρικό ρεύμα σε απομακρυσμένες περιοχές είναι συνήθως μικρή και ευμετάβλητη. Οι μεγάλοι ηλεκτροπαραγωγοί πυρηνικοί σταθμοί είναι γενικά ανελαστικοί στην ανάληψη μεταβαλλόμενου φορτίου και τη συμπαραγωγή. Υπάρχει η δυνατότητα για διακύμανση της ισχύος εξόδου, αλλά δεν είναι οικονομικά ανταποδοτική. Οι SMRs είναι σχεδιασμένοι για ανάληψη μεταβλητού φορτίου, έτσι ώστε όταν οι απαιτήσεις για ηλεκτρική ισχύ μειώνονται, να παράγουν μικρότερη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα καινούρια μοντέλα *SMRs* σχεδιάζονται ώστε να αξιοποιούν τη μέγιστη δυνατότητα κατανάλωσης ενός καυσίμου και γενικότερα παρουσιάζουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τους συμβατικούς αντιδραστήρες. Τα πιο αραιά διαστήματα ανεφοδιασμού μπορούν να μειώσουν τους κινδύνους διάδοσης πυρηνικών υποπροϊόντων, καθώς και τις πιθανότητες διαφυγής ακτινοβολίας από το περίβλημα. Η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του καυσίμου μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη στους αντιδραστήρες απομακρυσμένων περιοχών, όπου παρουσιάζεται περιορισμένη προσβασιμότητα.

Λόγω της έλλειψης εκπαιδευμένου προσωπικού σε απομακρυσμένες περιοχές, οι *SMRs* πρέπει να είναι εγγενώς ασφαλείς. Πολλές μονάδες μεγαλύτερης ισχύος διαθέτουν χαρακτηριστικά ενεργητικής ασφαλείας. Αντίθετα, σε πολλούς *SMRs* χρησιμοποιούνται και παθητικά χαρακτηριστικά ασφαλείας. Τα χαρακτηριστικά παθητικής ασφαλείας ενεργοποιούνται αυτόματα και δεν απαιτούν για τη λειτουργία τους κινητά εξαρτήματα και μηχανικό σχεδιασμό, παρά βασίζονται μόνο σε φυσικούς νόμους [1,5,12].

1.7.1 Μείωση αποβλήτων.

Οι *SMRs* είναι αντιδραστήρες που προορίζονται να έχουν υψηλότερα ποσοστά κατανάλωσης καυσίμων, μειώνοντας έτσι την ποσότητα των παραγόμενων αποβλήτων. Επιπλέον, σε υψηλότερη ενέργεια νετρονίων μπορούν να επεξεργαστούν περισσότερα προϊόντα σχάσης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μερικοί *SMRs* μπορούν να είναι ταχείς αντιδραστήρες αναπαραγωγής (*breeder reactors*), οι οποίοι πέρα από την κατανάλωση του καυσίμου ^{235}U , μετατρέπουν μη σχάσιμα υλικά όπως το ^{238}U

(το οποίο εμφανίζεται σε πολύ υψηλότερη συγκέντρωση από το ^{235}U) σε χρήσιμα καύσιμα. Άλλα μοντέλα έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν με εναλλακτικό κύκλο καυσίμου θορίου (Th), ο οποίος προσφέρει σημαντικά μειωμένα ραδιοτοξικά απόβλητα εν συγκρίσει με τον κύκλο του ουρανίου [5,12].

1.7.2 Περιορισμός εξάπλωσης πυρηνικών όπλων.

Η χρήση πυρηνικών καυσίμων για τη δημιουργία όπλων αποτελεί πάντα μια ανησυχία. Η μικρότερη παραγωγή ισχύος και το μικρότερο μέγεθος, είναι πλεονεκτήματα που καθιστούν τους *SMRs* μία αναπτυσσόμενη προοπτική σε πολύ περισσότερες θέσεις από τις υπάρχουσες μεγάλες εγκαταστάσεις, καθώς και ως αντικαταστάτες ηλεκτροπαραγωγών σταθμών (όπως παλιά εργοστάσια κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων), αλλά και σε πολλές χώρες που προηγουμένως δεν είχαν πυρηνικές εγκαταστάσεις.

Από την άλλη πλευρά, πολλοί μικροί αντιδραστήρες είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να μειώνουν τον κίνδυνο κλοπής ή καταστροφής υλικού. Το καύσιμο του πυρηνικού αντιδραστήρα είναι ουράνιο χαμηλού εμπλουτισμού ή έχει συγκέντρωση χαμηλότερη από 20% ^{235}U . Ο χαμηλός βαθμός εμπλουτισμού καθιστά το καύσιμο λιγότερο επιθυμητό στην παραγωγή όπλων. Επιπλέον, όταν το καύσιμο ακτινοβολείται, τα προϊόντα σχάσης που αναμιγνύονται με τα σχάσιμα υλικά είναι εξαιρετικά ραδιενεργά και απαιτούν ειδικό χειρισμό προκειμένου να απομακρυνθούν ασφαλώς.

Ορισμένα μοντέλα *SMRs* σχεδιάζονται να έχουν πυρήνες και καύσιμα με τέτοια διάρκεια ζωής, ώστε να μην χρειάζονται ανεφοδιασμό. Το γεγονός αυτό περιορίζει την εξάπλωση, καθώς δεν απαιτεί χειρισμό πυρηνικού καυσίμου επί τόπου. Επιπλέον, υπάρχουν αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος που έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν με κύκλο καυσίμου θορίου προσφέρουν αυξημένη αντίσταση εξάπλωσης σε σύγκριση με τον συμβατικό κύκλο ουρανίου.

Ένας πιθανός τρόπος μετριασμού των κινδύνων λόγω της εξάπλωσης της πυρηνικής τεχνολογίας στις αναπτυσσόμενες χώρες μπορεί να είναι η υιοθέτηση τακτικών που οριοθετούν τις επίμαχες δράσεις (όπως ο διαχωρισμός ισοτόπων ουρανίου ή η επανεπεξεργασία αναλωμένου καυσίμου) μέσα σε μεγάλα διεθνή ενεργειακά πάρκα που θα εξάγουν καύσιμα και υδρογόνο, καθώς και η προώθηση μικρών σφραγισμένων αντιδραστήρων (40-50 MWe). Αυτοί οι αντιδραστήρες θα αποτελούν ολοκληρωμένες κατασκευές, έτσι ώστε να μην μπορούν να αφαιρεθούν μεμονωμένα εξαρτήματα ή καύσιμα και να παραδίδονται ως λειτουργική μονάδα στις εγκαταστάσεις των εκάστοτε αγοραστών. Στο τέλος της ζωής του πυρήνα (περίπου 15-20 χρόνια), οι αντιδραστήρες θα επιστρέφονται στο ενεργειακό πάρκο χωρίς να έχουν ανοιχτεί. Έτσι, κατά τη διάρκεια των ετών λειτουργίας δεν θα υπάρχει ανεφοδιασμός και κατά συνέπεια οι εμπλεκόμενες χώρες δεν θα χρειάζονται εγκαταστάσεις κατασκευής καυσίμων και προηγμένες ικανότητες διαχείρισης.

Τέλος, η συμπαγής κατασκευή των *SMRs* αποτελεί ένα άλλο χρήσιμο χαρακτηριστικό. Επειδή ο πυρήνας του αντιδραστήρα είναι τοποθετημένος εξολοκλήρου μέσα στο περίβλημα καθώς και στο εσωτερικό μιας κεντρικής μονάδας παραγωγής, λιγότεροι άνθρωποι έχουν πρόσβαση στο καύσιμο πριν και μετά την ακτινοβόλησή του [1,5,12].

1.8 Πλεονεκτήματα.

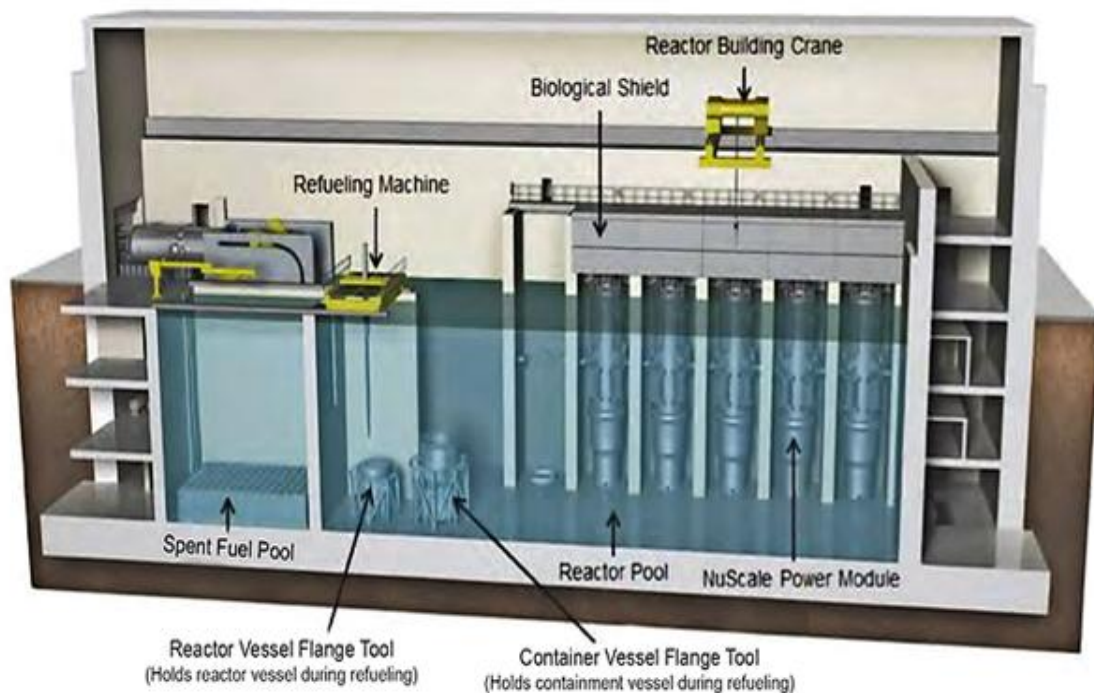
Γενικά, οι σύγχρονοι μικροί αντιδραστήρες που αποσκοπούν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να έχουν:

- Απλότητα σχεδιασμού.
- Μαζική εργοστασιακή παραγωγή.
- Σύντομους χρόνους κατασκευής.
- Μειωμένο κόστος εγκατάστασης.

Επιπλέον, οι περισσότεροι σχεδιάζονται με παθητικά χαρακτηριστικά ασφαλείας, καθώς και για υπόγεια τοποθέτηση, δημιουργώντας έτσι υψηλότερη προστασία από κακόβουλες ενέργειες. Η έκθεση της *WNA* (2013) έδειξε ότι πολλές από τις διατάξεις ασφαλείας που είναι απαραίτητες ή τουλάχιστον επιθυμητές σε μεγάλους αντιδραστήρες δεν είναι απαραίτητες στα μικρά σχέδια που πρόκειται να εφαρμοστούν.

Η έκθεση της *WNA* (2015) σχετικά με την τυποποίηση της αδειοδότησης και την εναρμόνιση της με τα νέα δεδομένα, δείχνει ότι το τεράστιο δυναμικό των *SMRs* βασίζεται στους παρακάτω παράγοντες:

- Απλοποίηση της κατασκευής: Λόγω του μικρού τους μεγέθους και της αρθρωτής κατασκευής, οι μικροί αντιδραστήρες μπορούν να κατασκευαστούν σχεδόν εξ' ολοκλήρου σε ελεγχόμενη εργοστασιακή μονάδα και να εγκατασταθούν τμηματικά, βελτιώνοντας το επίπεδο της ποιότητας, της κατασκευής και της αποδοτικότητας.
- Η μικρότερη ισχύς των *SMRs* (ως 300 MWe) δίνει εν γένει τη δυνατότητα για καλύτερη απαγωγή της θερμότητας.
- Το μικρό τους μέγεθος και τα χαρακτηριστικά παθητικής ασφάλειας τους καθιστούν ιδανικούς για απομακρυσμένες περιοχές, με μικρότερα δίκτυα και χώρες με μικρότερη εμπειρία στην πυρηνική ενέργεια.
- Ευελιξία στην επιλογή φορτίου καθώς δεν χρειάζεται απαραίτητα να συνδεθούν σε ισχυρό δίκτυο, καθώς και ευελιξία στην παραγωγή ισχύος (*Πίνακας 1.1*).
- Δυνατότητα για τοποθέτηση πολλαπλών μονάδων στην ίδια τοποθεσία (π.χ. το μοντέλο της εταιρείας *NuScale*, *Σχήμα 1.3*).



Σχήμα 1-3 Η πολλαπλή εγκατάσταση μικρών αντιδραστήρων της εταιρείας NuScale [14].

Γενικότερα, όλα τα χαρακτηριστικά κατασκευής και καινοτόμου λειτουργίας που αναφέρθηκαν παραπάνω αποτελούν κατασκευαστικές προκλήσεις που εφόσον αντιμετωπίζονται συνιστούν τεχνολογικά και λειτουργικά πλεονεκτήματα [1,5,12]:

- Θερμοϋδραυλικό σύστημα φυσικής κυκλοφορίας και συστήματα παθητικής ασφάλειας.
- Ευκολότερος παροπλισμός.
- Μειωμένη επάνδρωση.
- Προχωρημένα ψηφιακά συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου.
- Καινοτόμες τεχνολογίες αντλιών.
- Εσωτερικές ράβδοι ελέγχου (*Control Rods Drive Mechanism - CRDMs*).
- Συστήματα ανεφοδιασμού καυσίμων.
- Διαχείριση αναλωμένου καυσίμου.
- Αδειοδότηση βάσει των εμπειριών και των ρυθμιστικών πλαισίων κάθε χώρας.

1.9 Μειονεκτήματα.

- Οικονομία κλίμακας

Οικονομία κλίμακας είναι η τάση του μακροχρόνιου μέσου συνολικού κόστους να μειώνεται όταν αυξάνεται η ποσότητα παραγωγής. Οι *SMRs* μπορούν να έχουν υψηλότερο κόστος σε σύγκριση με συμβατικούς αντιδραστήρες μεγάλης κλίμακας, παρά το μικρότερό τους μέγεθος. Η ικανότητα για προκατασκευή σε εργοστάσιο και μετεγκατάσταση στο σημείο παραγωγής μειώνει σημαντικά το κόστος, ωστόσο το βασικό μειονέκτημα είναι ότι αυτά τα βελτιωμένα οικονομικά στοιχεία μπορούν να

υλοποιηθούν για αρχική ζήτηση παραγωγής αντιδραστήρων της τάξης 40-70 μονάδες, γεγονός που μοιάζει αρκετά απίθανο.

- Αδειοδότηση

Η αδειοδότηση είναι μια πρόκληση για τους *SMRs*. Το κόστος των αδειών σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας δεν είναι απαραίτητως μικρότερο απ' ό,τι για τους συμβατικούς αντιδραστήρες, γεγονός που επιβαρύνει σημαντικά τους επενδυτές. Η διαδικασία χορήγησης αδειών αναπτύχθηκε ιστορικά για μεγάλους αντιδραστήρες, εμποδίζοντας έτσι την απλή ανάπτυξη πολλών πανομοιότυπων μονάδων σε διάφορες χώρες. Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία αδειοδότησης της σχετικής επιτροπής των ΗΠΑ επικεντρώθηκε κυρίως σε μεγάλους εμπορικούς αντιδραστήρες. Οι προδιαγραφές σχεδιασμού και ασφάλειας, οι απαιτήσεις επάνδρωσης και τα τέλη αδειοδότησης έχουν προσανατολιστεί σε αντιδραστήρες με ηλεκτρική ισχύ άνω των 700MWe.

- Εξάπλωση πυρηνικών όπλων.

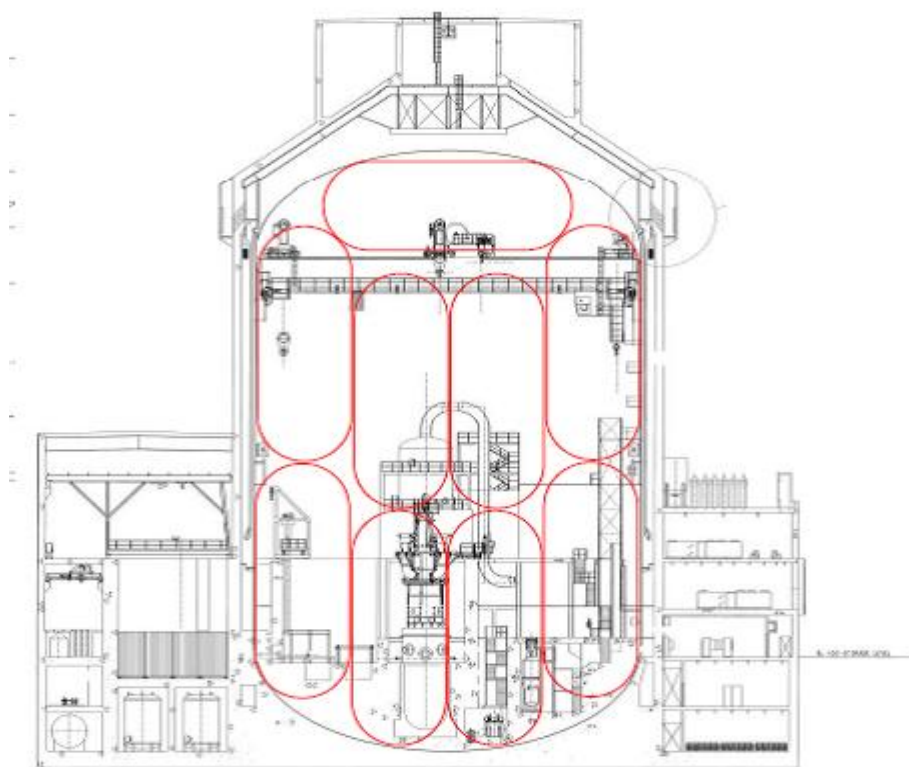
Ο βαθμός στον οποίο η πυρηνική ενέργεια θα καταστεί αποδεκτή και σταθερή επιλογή για τις μελλοντικές ενεργειακές απαιτήσεις παγκοσμίως θα εξαρτηθεί εν μέρει από την ικανότητα της διεθνούς κοινότητας να ελαχιστοποιήσει τους σχετικούς κινδύνους εξάπλωσης και χρήσης των πυρηνικών καυσίμων στην κατασκευή πυρηνικών όπλων. Ένα πρόγραμμα πυρηνικής ανάπτυξης, εκτός αν συνοδεύεται από επαρκείς τεχνικές και θεσμικές εγγυήσεις, ενδέχεται να αυξήσει τον κίνδυνο εκτροπής ή κλοπής σχάσιμων υλικών και εγκαταστάσεων, τεχνολογίας και εμπειρογνωμοσύνης. Κάτι τέτοιο θα επιτρέψει σε μη εμπλεκόμενες χώρες να αποκτήσουν την κατάλληλη τεχνολογία για την ανάπτυξη πυρηνικών όπλων ή την απόκτηση πυρηνικού υλικού από τρομοκρατικές ομάδες. Επιπλέον, οι αναπαραγωγοί αντιδραστήρες παράγουν μεγαλύτερη ποσότητα πλουτωνίου από αυτήν που καταναλώνουν, στοιχείο που χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή πυρηνικών όπλων [1].

1.10 Σύγκριση μεταξύ *SMRs* και συμβατικών αντιδραστήρων.

Η κύρια διαφορά των *SMRs*, σε σύγκριση με τους προηγμένους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (*LWRs*), είναι η αρθρωτή παραγωγή σε εργοστασιακές συνθήκες και η δυνατότητα παράκαμψης της σειριακής κατασκευής. Παρόλο που οι σύγχρονοι *LWRs* βασίζονται επίσης στην αρθρωτή κατασκευή, στους *SMRs* -σε ορισμένες περιπτώσεις- ολόκληρος ο αντιδραστήρας μαζί με το πρωτεύον κύκλωμα δύναται να εγκατασταθεί στο σημείο παραγωγής της ενέργειας. Στα Σχήματα 1.4(α,β) γίνεται μία σύγκριση μεγεθών του περιβλήματος ενός συμβατικού αντιδραστήρα και ενός συμπαγούς *SMR* και φαίνεται η οικονομία εμβαδού, όγκου και κατ' επέκταση κόστους που μπορεί να επιτευχθεί με την κατασκευή μικρών αντιδραστήρων ισχύος.

Ο εξοπλισμός των διάφορων τύπων *SMRs* ποικίλει ανάλογα με τον σχεδιασμό της εκάστοτε εταιρείας. Οι περισσότερες εταιρείες επενδύουν σε αντιδραστήρες με μεμονωμένα περιβλήματα (*containment*) και επιμένουν στην παροχή ενισχυμένης πυρηνικής ασφάλειας με χρήση παθητικού συστήματος ασφαλείας. Το ψυκτικό ρέει μέσω του πυρήνα εξαιτίας της φυσικής κυκλοφορίας.

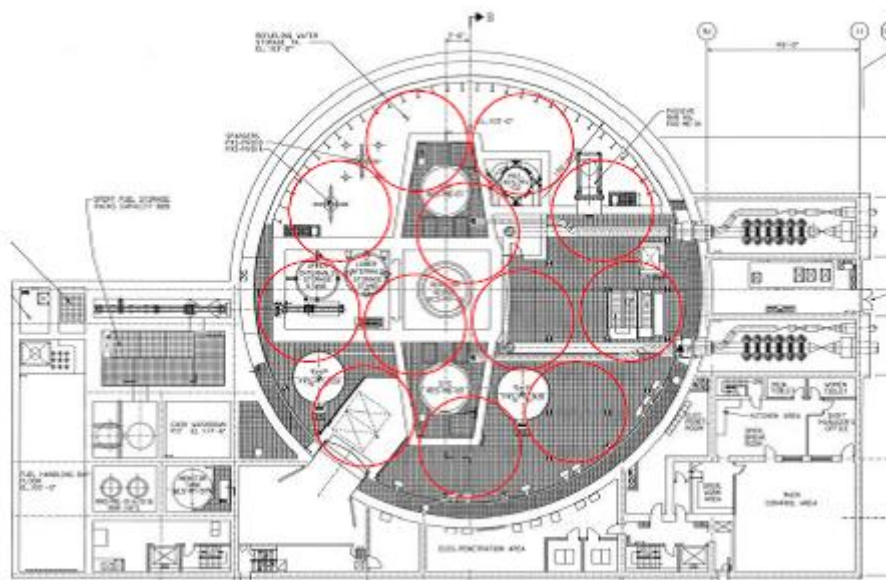
Σύμφωνα με εκτιμήσεις των σχεδιαστών *SMRs*, η πλήρης εργοστασιακή συναρμολόγηση των μονάδων θα επιτρέψει μεγάλη μείωση του κόστους κατασκευής. Θεωρητικά, για μια μεγάλη σειρά παραγωγής, το κόστος επένδυσης μιας ημέρας ανά *kWe* για τους *SMRs* θα μπορούσε να είναι μικρότερο απ' ό,τι για τους *LWRs*. Ένας μικρός αρθρωτός αντιδραστήρας είναι πολύ οικονομικότερος από έναν αντιδραστήρα ελαφρού ύδατος, οπότε αναμένεται να είναι ευκολότερη η χρηματοδότησή τους, καθιστώντας τους *SMRs* πιο προσιτούς για την κάλυψη της ζήτησης. Επιπλέον, τα εργοστάσια με πολλές μονάδες *SMRs* προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία στις επιχειρήσεις που μοιράζονται το δίκτυο με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή λειτουργούν πάνω σε μικρά δίκτυα. Αυτό τους καθιστά κατάλληλους για ανάπτυξη σε μεγαλύτερο αριθμό τοποθεσιών.



Σχήμα 1-4 Σύγκριση όγκου συμβατικού περιβλήματος αντιδραστήρα και συμπαγούς *SMR* [16].

Την ίδια στιγμή, τα περισσότερα μοντέλα *SMRs* προσφέρουν πολλές επιλογές στην ανάληψη φορτίων. Κανονικά, για έναν συμβατικό πυρηνικό αντιδραστήρα, ο έλεγχος του φορτίου είναι ανεπαρκής λόγω του ακριβού κόστους παραγωγής πυρηνικής ενέργειας. Επομένως, μειώνοντας την ισχύ εξόδου δεν σημαίνει ότι μειώνεται

σημαντικά και το κόστος παραγωγής. Αντίθετα, οι *SMRs* προσφέρουν τη δυνατότητα για χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας σε συμπαραγωγή κατάλληλων υποπροϊόντων. Συνεπώς δίνεται η δυνατότητα εκτροπής -ακόμη και- του 100% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή και το 100% της παραγόμενης θερμικής ενέργειας ορισμένων μονάδων των *SMRs* για διαφορετικούς σκοπούς συμπαραγωγής ενώ οι υπόλοιπες μονάδες τροφοδοτούν κανονικά την αγορά με ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 1-5 Σύγκριση εμβαδών συμβατικού περιβλήματος αντιδραστήρα και συμπαγούς SMR [16].

Στους Πίνακες 1.2 και 1.3 παρουσιάζεται μία σύγκριση ανάμεσα σε συμβατικούς και σύγχρονους μικρούς αντιδραστήρες που αφορά στα συστήματα ασφάλειας και υποστήριξής τους.

Πίνακας 1-2 Σύγκριση συστημάτων ασφάλειας συμβατικών και μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων [5].

Συστήματα ασφάλειας συμβατικών αντιδραστήρων.	Συστήματα ασφάλειας μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων.
Ενεργητικό σύστημα έγχυσης υψηλής ή χαμηλής πίεσης.	Δεν απαιτείται σύστημα ενεργητικής ασφάλειας. Η ψύξη του πυρήνα διατηρείται με παθητικά συστήματα.
Γεννήτριες ντίζελ έκτακτης ανάγκης.	Ο παθητικός σχεδιασμός δεν απαιτεί εναλλαγή ισχύος για τη διατήρηση της ψύξης του πυρήνα. Η θερμότητα του πυρήνα απάγεται με αγωγή και συναγωγή μέσω του δοχείου αντιδραστήρα.
Συστήματα ψύξης, επιπλέον αντλίες και όργανα ελέγχου. Τα σύνθετα συστήματα απαιτούν σημαντικό αριθμό online δοκιμών που συμβάλλουν στην αναξιοπιστία των εγκαταστάσεων και στις ακούσιες προκλήσεις των συστημάτων ασφάλειας.	Τα απλούστερα ή/και παθητικά συστήματα ασφάλειας απαιτούν λιγότερες δοκιμές και δεν είναι τόσο επιρρεπή στην απροσδόκητη λειτουργία.

Πίνακας 1-3 Σύγκριση συστημάτων υποστήριξης συμβατικών και μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων [5].

<i>Συστήματα υποστήριξης συμβατικών αντιδραστήρων.</i>	<i>Συστήματα υποστήριξης μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων.</i>
Χρήση αντλιών ψύξης αντιδραστήρα και αντίστοιχων στρόφιγγων: Η διαρροή των αντλιών ήταν πάντοτε επισφαλής. Η συντήρηση και αντικατάσταση τους είναι δαπανηρή και χρονοβόρα.	Η ολοκληρωμένη διάταξη εξαλείφει την ανάγκη για στρόφιγγες.
Τα συστήματα ψύξης που χρησιμοποιούν θαλασσινό και ποταμίσιο νερό, υπόκεινται σε δυσκολίες λειτουργίας εξαιτίας των ακραίων καιρικών συνθηκών και της βιομάζας.	Τα σχέδια <i>SMRs</i> είναι παθητικά και απάγουν τη θερμότητα μέσω αγωγιμότητας και μεταφοράς. Δεν απαιτείται απαγωγή θερμότητας σε εξωτερική δεξαμενή νερού.
Απαιτούνται θέρμανση, εξαερισμός και κλιματισμός για την υποστήριξη της ορθής λειτουργίας των συστημάτων που σχετίζονται με την ασφάλεια.	Ο σχεδιασμός της εγκατάστασης ελαχιστοποιεί ή εξαλείφει την ανάγκη για σχετική με την ασφάλεια ψύξη του χώρου.

Επί του παρόντος, υπάρχουν τουλάχιστον 50 υπό ανάπτυξη σχέδια *SMRs* για διάφορες εφαρμογές. Τρία πειραματικά μοντέλα βρίσκονται σε προχωρημένο στάδιο κατασκευής:

- CAREM-25, τύπου PWR, Αργεντινή (Σχήμα 2.4)
- HTR-PM, τύπου HTGR, Κίνα (Σχήμα 2.12)
- KLT-40s, τύπου PWR, Ρωσία.

Προγραμματίζεται να εκκινήσουν τη λειτουργία τους ως το 2020, ενώ δεκάδες μοντέλα *SMRs* βρίσκονται σε στάδιο σχεδιασμού. Επιπλέον, η εταιρεία *NuScale* είναι η πρώτη που έχει καταθέσει στην εθνική ρυθμιστική αρχή των Ηνωμένων Πολιτειών (*Nuclear Regulatory Commission – NRC*⁵), τον Δεκέμβριο 2016, αίτηση αδειοδότησης για λειτουργία *SMR* και μάλιστα, έχει ολοκληρωθεί με επιτυχία η πρώτη φάση αξιολόγησης. Δεδομένων των προαναφερθέντων ζητημάτων και προκλήσεων που πρέπει να επιλυθούν, οι πρώτες εμπορικές εφαρμογές των *SMRs* αναμένεται να ξεκινήσουν στο χρονικό πλαίσιο μεταξύ 2025-2030 και να καθιερωθούν μετά το 2030 [5,6,12].

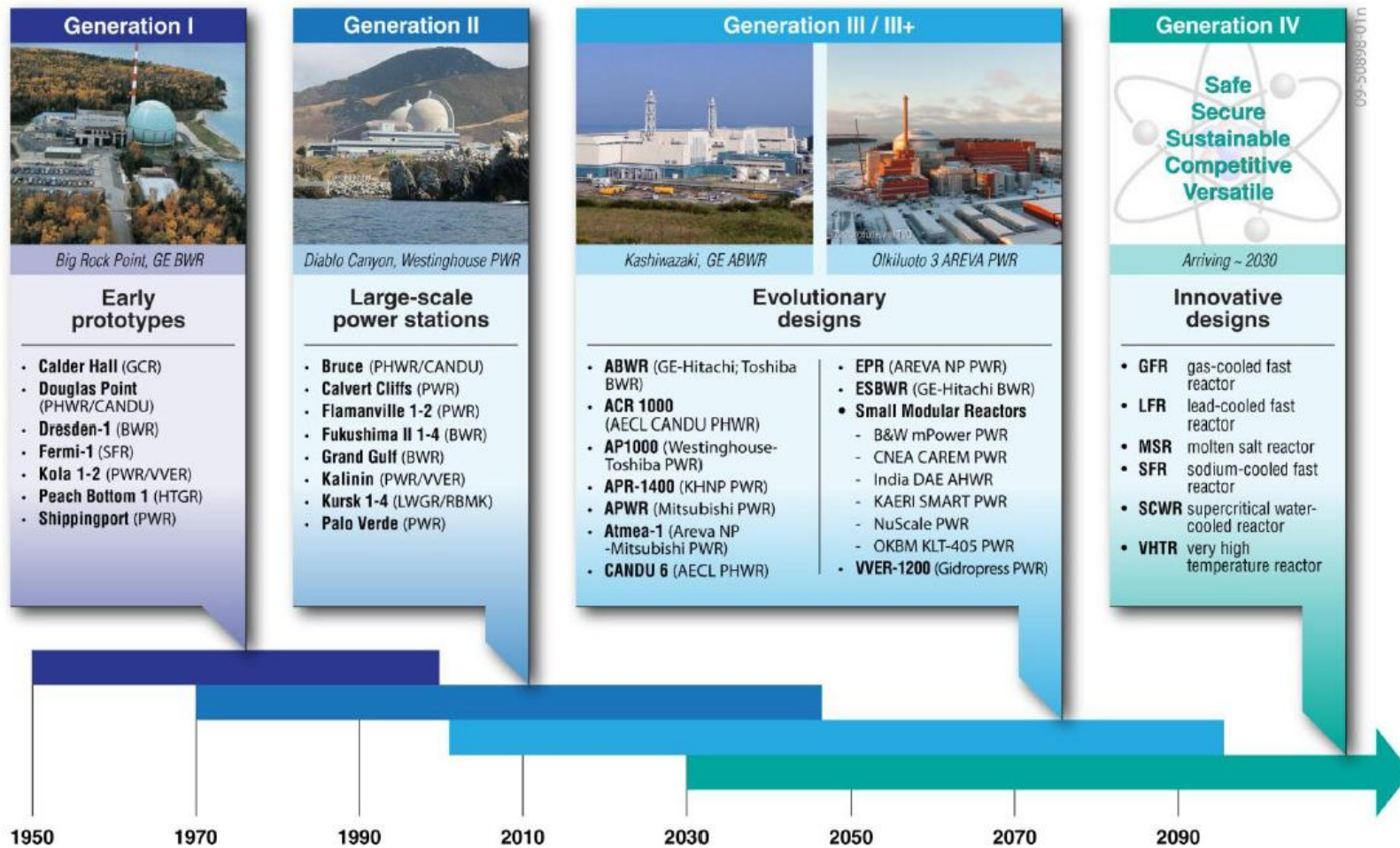
⁵ www.nrc.gov

Κεφάλαιο 2^ο

2 Αντιδραστήρες 4^{ης} γενιάς.

Οι αντιδραστήρες 4^{ης} γενιάς είναι ένα σύνολο σχεδίων πυρηνικών αντιδραστήρων που μελετώνται για εμπορικές εφαρμογές και αποσκοπούν στην επίτευξη σημαντικών στόχων όπως η βελτίωση της ασφάλειας και της ενεργειακής απόδοσης και η μείωση του κόστους. Τα περισσότερα από αυτά τα σχέδια γενικά δεν αναμένεται να είναι διαθέσιμα για εμπορική εφαρμογή πριν το 2030. Επί του παρόντος, η πλειοψηφία των αντιδραστήρων που λειτουργούν σε όλο τον κόσμο θεωρείται ότι ανήκουν στην 2^η γενιά (αντιδραστήρες *PWRs/LWRs*), καθώς η συντριπτική πλειονότητα των συστημάτων πρώτης γενιάς απομακρύνθηκαν πριν από μερικά χρόνια, ενώ υπάρχουν μόνο δώδεκα αντιδραστήρες 3^{ης} γενιάς (2014).

Στο *Σχήμα 2.1* γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση μοντέλων αντιδραστήρων των τριών πρώτων γενεών, καθώς και των έξι τύπων αντιδραστήρων 4^{ης} γενιάς που βρίσκονται υπό σχεδιασμό. Οι αντιδραστήρες 5^{ης} γενιάς αναφέρονται σε μοντέλα καθαρά θεωρητικά και ως εκ τούτου δεν θεωρούνται ακόμη κατασκευαστικά εφικτοί στο άμεσο μέλλον [1,17].



Σχήμα 2-1 Οι τέσσερις γενιές σύγχρονων αντιδραστήρων [17].

2.1 Τύποι αντιδραστήρων 4ης γενιάς.

Πολλοί τύποι αντιδραστήρων εξετάστηκαν θεωρητικά προκειμένου να συμπεριληφθούν στη 4^η γενιά. Ωστόσο, ο κατάλογος μειώθηκε για να επικεντρωθεί στις πιο ελπιδοφόρες και πρακτικά υλοποιήσιμες τεχνολογίες. Ο διαχωρισμός ανά τύπο γίνεται με βάση την τεχνολογία κατασκευής του αντιδραστήρα και το ψυκτικό μέσο. Διακρίνουμε δύο βασικές κατηγορίες, καθεμία από τις οποίες περιλαμβάνει τους εξής τύπους αντιδραστήρα:

Αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων (Thermal reactors)

- Αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος (Pressurized water reactors - PWRs).
 - i. Αντιδραστήρες ύδατος υπερκρίσιμης θερμοκρασίας (SuperCritical Water cooled Reactors - SCWRs).
 - ii. Αντιδραστήρες αερίου υπερυψηλής θερμοκρασίας (Very High Temperature Reactors - VHTRs).
- Αντιδραστήρες τετηγμένων αλάτων (Molten Salt Reactors - MSR).

Αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων (Fast neutron reactors)

- Αντιδραστήρες αέριας ψύξης (Gas cooled Fast Reactors - GFRs).
- Αντιδραστήρας υγρών μετάλλων (Liquid Metal Reactors - LMRs).
 - i. Αντιδραστήρες ταχείας ψύξης με νάτριο (Sodium cooled Fast Reactors - SFRs).
 - ii. Αντιδραστήρες ταχείας ψύξης με μόλυβδο ή μόλυβδο και βισμούθιο (Lead or Lead-Bismuth cooled Fast Reactors - LFRs/LBFRs).

Έκθεση της Πυρηνικής επιτροπής ασφαλείας του Καναδά (*Canadian Nuclear Safety Commission - CNSC*⁶), το 2016, επικεντρώθηκε σε εννέα σχέδια αντιδραστήρων κάτω των 25 MWe για απομακρυσμένες περιοχές εκτός δικτύου. Δύο εξ' αυτών ήταν αντιδραστήρες ύδατος (*LWRs*) των 6,4 και 9 MWe αντίστοιχα, τρεις ήταν αντιδραστήρες ατμού (*HTGRs*) 5, 8 και 16 MWe, ένας ήταν αντιδραστήρας τετηγμένων αλάτων (*MSR*) ισχύος 32,5 MWe, δύο ήταν αντιδραστήρες υγρών μετάλλων (*LMRs*) της τάξης των 2,8 και 10 MWe αντίστοιχα και τέλος υπήρχε ένας αντιδραστήρας ταχέων νετρονίων ψύξεως με μόλυβδο (*LFR*) των 3-10 MWe. Οι παραπάνω σχεδιασμοί προσφέρουν σημαντική πρόοδο στη οικονομική βιωσιμότητα και την ασφάλεια, την αξιοπιστία καθώς και τη μείωση της εξάπλωσης πυρηνικών όπλων μέσω της φυσικής προστασίας [1,17,18].

2.2 Αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων (Thermal reactors).

Ένας αντιδραστήρας θερμικών νετρονίων εκμεταλλεύεται τα αργά ή θερμικά νετρόνια. Χρησιμοποιεί έναν επιβραδυντή ο οποίος μειώνει την ταχύτητα των νετρονίων που εκπέμπονται από την σχάση, ώστε να είναι πιο πιθανό να συλληφθούν από το καύσιμο και να οδηγήσουν στην αλυσιδωτή αντίδραση.

⁶ www.nuclearsafety.gc.ca/eng/

2.2.1 Αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος (Pressurized Water Reactors – PWRs) .

Τα σχέδια που βασίζονται σε τεχνολογίες αντιδραστήρων ύδατος είναι παρόμοια με τους περισσότερους από τους συμβατικούς αντιδραστήρες, οι οποίοι λειτουργούν είτε ως αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος (*PWRs*) είτε ως αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος (*BWRs*) και ως εκ τούτου έχουν το χαμηλότερο τεχνολογικό ρίσκο. Επιπλέον, τα μοντέλα αυτά ενσωματώνουν καινοτόμες τεχνολογίες για την επίτευξη απλότητας, βελτιωμένης λειτουργικής απόδοσης και ενισχυμένης ασφάλειας. Για παράδειγμα, το ολοκληρωμένο περίβλημα μπορεί να τοποθετηθεί στο υπέδαφος καθιστώντας δυνατή την ψύξη με φυσικές διαδικασίες (συναγωγή, αγωγιμότητα). Έχουν συνήθως ισχύ μικρότερη από 300 MWe και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντικατάσταση παλαιότερων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα παρόμοιου μεγέθους ισχύος.

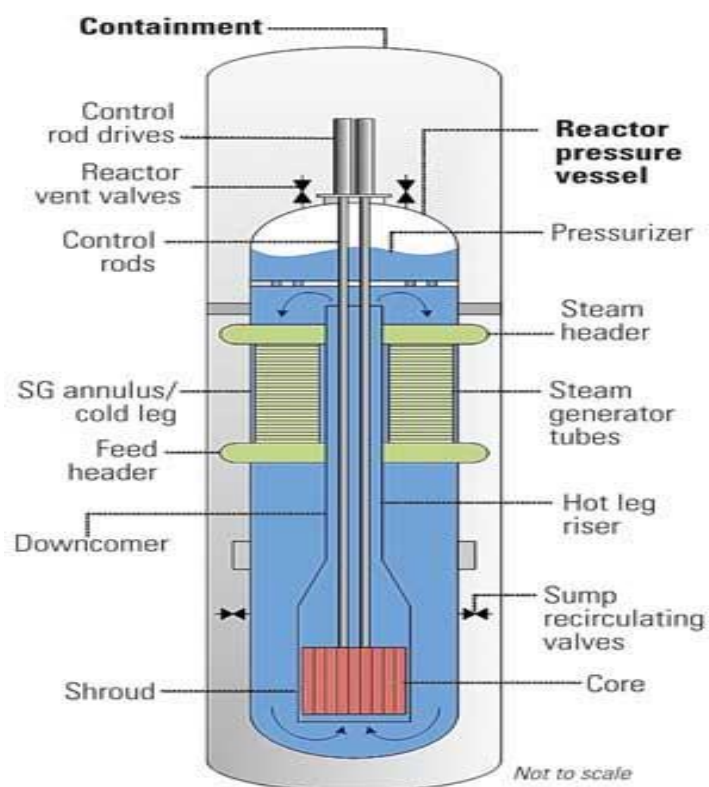
Πίνακας 2-1 Γενικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά SMRs τύπου PWR [1].

Μοντέλο <i>SMR</i>	Χώρα κατασκευής	Θερμική/ηλεκτρική ισχύς (MW)	Μη ηλεκτρικές εφαρμογές	Ανάπτυξη
<i>KTL-40S</i>	Ρωσία	2x150/2x3,5	Θερμότητα για απομακρυσμένη θέρμανση 2x25 GCal/hour ή πόσιμο νερό 20.000–100.000 m ³ /μέρα	2014
<i>RITM-200</i>	Ρωσία	175/50	30MW περίσσεια ισχύς ή 248 t/hour ατμού 295°C, 38atm	2015
<i>CAREM-25</i>	Αργεντινή	116/27	πόσιμο νερό 10.000 m ³ /μέρα	Έναρξη κατασκευής 2012
<i>SMART</i>	Νότιος Κορέα	330/100	Θερμότητα για απομακρυσμένη θέρμανση 150 GCal/hour ή πόσιμο νερό 40.000 m ³ /μέρα	2015
<i>Westinghouse SMR</i>	ΗΠΑ	800/225	-	2018-2022
<i>mPower</i>	ΗΠΑ	576/180 (ανά μονάδα)	-	2018-2022
<i>NuScale</i>	ΗΠΑ	160/45	Πόσιμο νερό ή παραγωγή ατμού	2018-2022

Οι αντιδραστήρες *PWRs* είναι αντιδραστήρες δύο κυκλωμάτων, έμμεσου κύκλου ενέργειας. Το ψυκτικό μέσο -και ταυτόχρονα επιβραδυντής- του πρωτεύοντος κυκλώματος είναι το ελαφρύ ύδωρ και επειδή έχει χαμηλή θερμοκρασία ζέσεως, επιβάλλεται η λειτουργία του αντιδραστήρα υπό υψηλή πίεση (~155atm), προκειμένου να αποφευχθεί η ζέση του νερού. Η μέγιστη θερμοκρασία του αντιδραστήρα είναι περίπου 345°C. Η θερμότητα που παράγεται στον πυρήνα του αντιδραστήρα μεταφέρεται στο δευτερεύον κύκλωμα μέσω ατμογεννητριών. Οι

PWRs αντιπροσωπεύουν το 61% της παγκόσμιας παραγωγής αντιδραστήρων, ενώ αποτελούν την πρώτη επιλογή στους υπό σχεδιασμό μικρούς αντιδραστήρες (56 από τις 61 μονάδες το 2012).

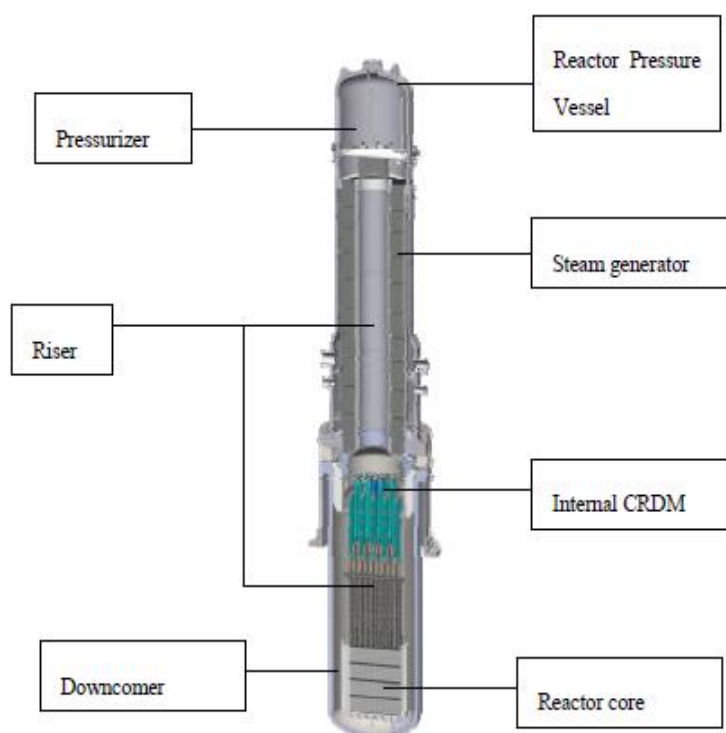
Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται γενικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά διαφόρων *SMRs* τύπου *PWR*, ενώ στο Σχήμα 2.2 βλέπουμε έναν ολοκληρωμένο συμπαγή αντιδραστήρα *PWR* τύπου *LWR*. Πρόκειται για το μοντέλο *SMR* της εταιρείας *NuScale*, το οποίο βρίσκεται υπό σχεδιασμό και η κατασκευή του αναμένεται να εκκινήσει στο διάστημα 2018-2020. Η *NuScale* είναι η πρώτη εταιρεία που κατέθεσε αίτηση αδειοδότησης για λειτουργία *SMR* (Δεκέμβριος 2016). Τα υπάρχοντα αρθρωτά σχέδια διαθέτουν αμογεννήτριες, αντλίες κύριας κυκλοφορίας και συμπιεστές, τα οποία τοποθετούνται σε ξεχωριστές μονάδες, ωστόσο η αρχή λειτουργίας τους είναι ίδια με τους συμβατικούς *PWRs*.



Σχήμα 2-2 Containment αντιδραστήρα *PWR* τύπου *LWR* (μοντέλο της εταιρείας *NuScale*) [19].

Ένας άλλος σχεδιασμός με ολοκληρωμένη διάταξη πρωτεύοντος που συμπεριλαμβάνει και τις αμογεννήτριες, είναι το μοντέλο της εταιρείας *mPower* (Σχήμα 2.3). Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο χώρος συλλογής ατμού κάτω από τον κορυφαίο θόλο του δοχείου λειτουργεί ως συμπιεστής. Σε μερικά σχέδια, οι ράβδοι ελέγχου και οι αντλίες ψυκτικού μέσου στεγάζονται επίσης στο εσωτερικό του δοχείου του αντιδραστήρα. Αυτός ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός του πρωτεύοντος κυκλώματος επιτρέπει την απομάκρυνση των σωληνώσεων μεγάλης διαμέτρου και

ελαχιστοποιεί τις διεισδύσεις στο δοχείο του αντιδραστήρα. Έτσι μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά την πιθανότητα ατυχημάτων ψύξης (*Loss of coolant accidents - LOCAs*).



Σχήμα 2-3 PWR με ολοκληρωμένη διάταξη πρωτεύοντος κυκλώματος (μοντέλο mPower) [1].

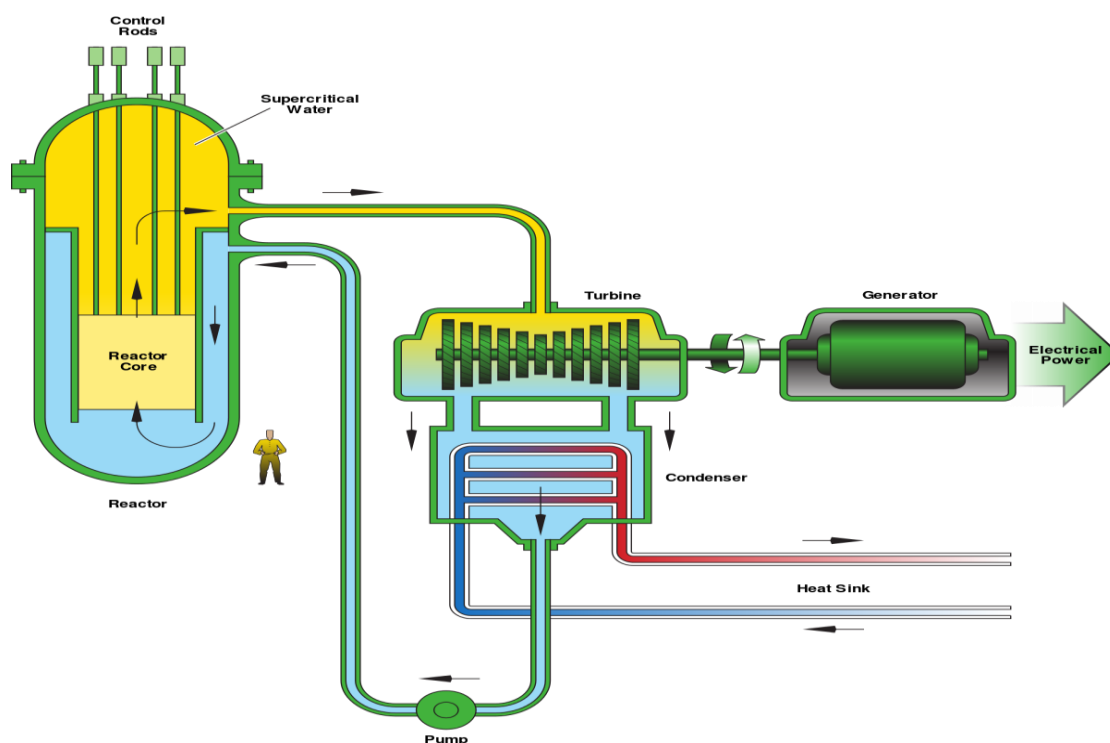
Τα σχέδια των *SMRs* που βασίζονται σε τεχνολογίες αντιδραστήρων πεπιεσμένου ύδατος (όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1) έχουν ηλεκτρική ισχύ εξόδου που κυμαίνεται από 8.5 έως 300 MWe. Σε πολλές περιπτώσεις, το σχέδιο απαιτεί δύο ή και περισσότερες μονάδες. Υπάρχει πάντοτε η επιλογή να δημιουργηθούν πολλές μονάδες σε μια τοποθεσία, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των συμβατικών αντιδραστήρων. Με μια ομάδα μονάδων, η συνολική απόδοση του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής που αποτελείται από *SMRs* μπορεί να είναι τόσο υψηλή όσο εκείνη ενός πυρηνικού σταθμού με μεγάλους αντιδραστήρες. Εκτός από τα ρωσικά σχέδια, που αφορούν σε θαλάσσιες εγκαταστάσεις, όλοι οι υπόλοιποι *SMRs* του Πίνακα 2.1 αναπτύσσονται για χερσαίες εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής. Τα μοντέλα των εταιρειών *Westinghouse*, *mPower* και *NuScale* διαθέτουν υπόγειες εγκαταστάσεις.

Οι μη ηλεκτρικές εφαρμογές, όπως η παραγωγή θερμότητας για τηλεθέρμανση ή η αφαλάτωση θαλασσινού νερού, περιλαμβάνονται μόνο στα ρωσικά μοντέλα καθώς και στο μοντέλο της Κορέας (*SMART*). Στους υπόλοιπους αντιδραστήρες αυτές οι εφαρμογές εμφανίζονται ως μελλοντική επιλογή. Όσον αφορά το πυρηνικό καύσιμο, ο αντιδραστήρας *KLT-40S* καταναλώνει καύσιμο με βάση το διοξείδιο του ουρανίου. Ο αρχικός εμπλουτισμός ^{235}U είναι ελαφρώς κάτω από 20%. Όλα τα υπόλοιπα σχέδια

SMR στον Πίνακα 2.1 χρησιμοποιούν ως καύσιμο διοξείδιο του ουρανίου με εμπλουτισμό ^{235}U μικρότερο από 5% [1,5,8,9,17,18].

2.2.1.1 Αντιδραστήρες ύδατος υπερκρίσιμης θερμοκρασίας - SuperCritical Water cooled Reactors – SCWRs).

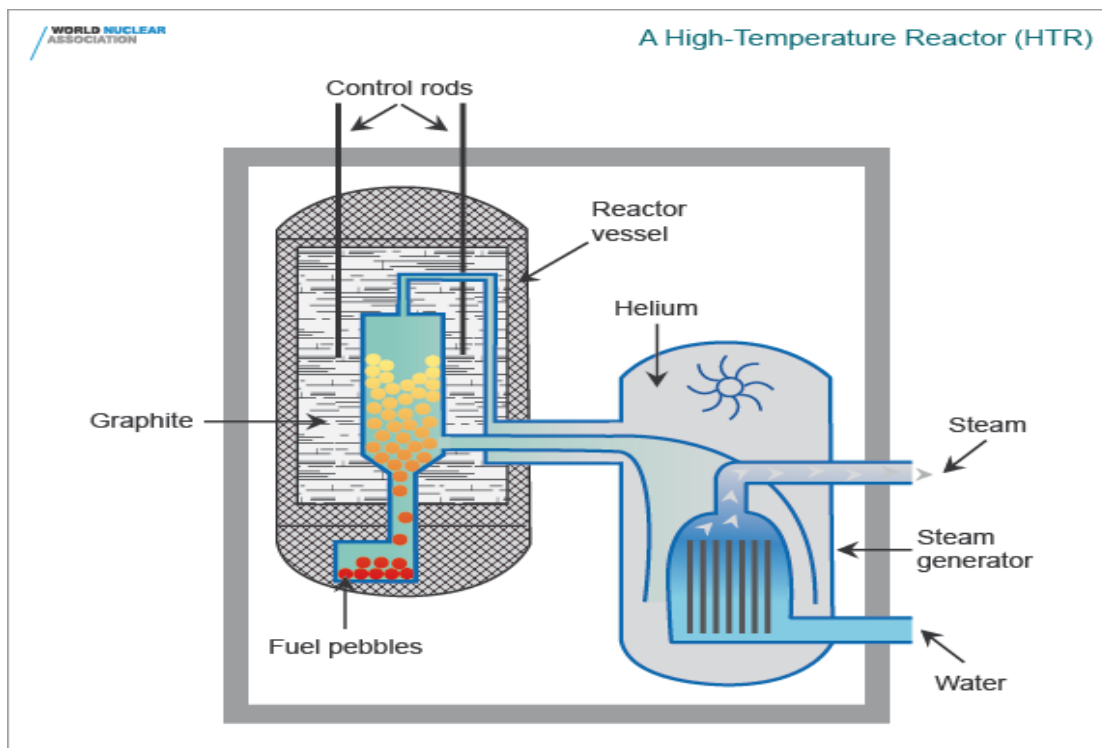
Οι SCWRs είναι αντιδραστήρες ύδατος που λειτουργούν σε υψηλότερες των οριακών (374°C , 220atm) τιμές πίεσης και θερμοκρασίας, στους $510\text{-}625^{\circ}\text{C}$. Συνήθως χρησιμοποιούν ως καύσιμο UO_2 χαμηλού εμπλουτισμού (<5%). Η ταχύτητα και η ενέργεια των νετρονίων είναι μεγαλύτερες από εκείνες που συνηθίζονται στους θερμικούς αντιδραστήρες, γεγονός που προσδίδει στον συγκεκριμένο σχεδιασμό δυνατότητα μεγαλύτερης ισχύος εξόδου. Συχνά, συγκρίνεται με τον αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος (Boiling water reactor - BWR), αλλά επειδή χρησιμοποιεί το νερό υπερκρίσιμης θερμοκρασίας ως ψυκτικό μέσο και επιβραδυντή και εκμεταλλεύεται μία και όχι δύο φάσεις νερού, ομοιάζει περισσότερο με έναν PWR (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2-4 Αντιδραστήρας ύδατος υπερκρίσιμης θερμοκρασίας – SCWR [17].

Οι SCWRs υπόσχονται προηγμένα πυρηνικά συστήματα λόγω της υψηλής θερμικής τους αποτελεσματικότητας (περίπου 45% έναντι 33% αποδοτικότητας των σημερινών LWRs) και σημαντική απλοποίηση των εγκαταστάσεων. Κύρια αποστολή τους είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλού κόστους. Επειδή είναι αντιδραστήρες ύδατος, ενέχουν κινδύνους έκρηξης ατμού και ραδιενεργού ατμού, όπως άλλωστε και οι BWRs και LWRs, καθώς και την ανάγκη για πολύ ακριβά δοχεία πίεσης, σωληνώσεις, βαλβίδες και αντλίες [1,17,18].

2.2.2 Αντιδραστήρες αερίου υπερυψηλής θερμοκρασίας (Very High Temperature Reactors - VHTRs).

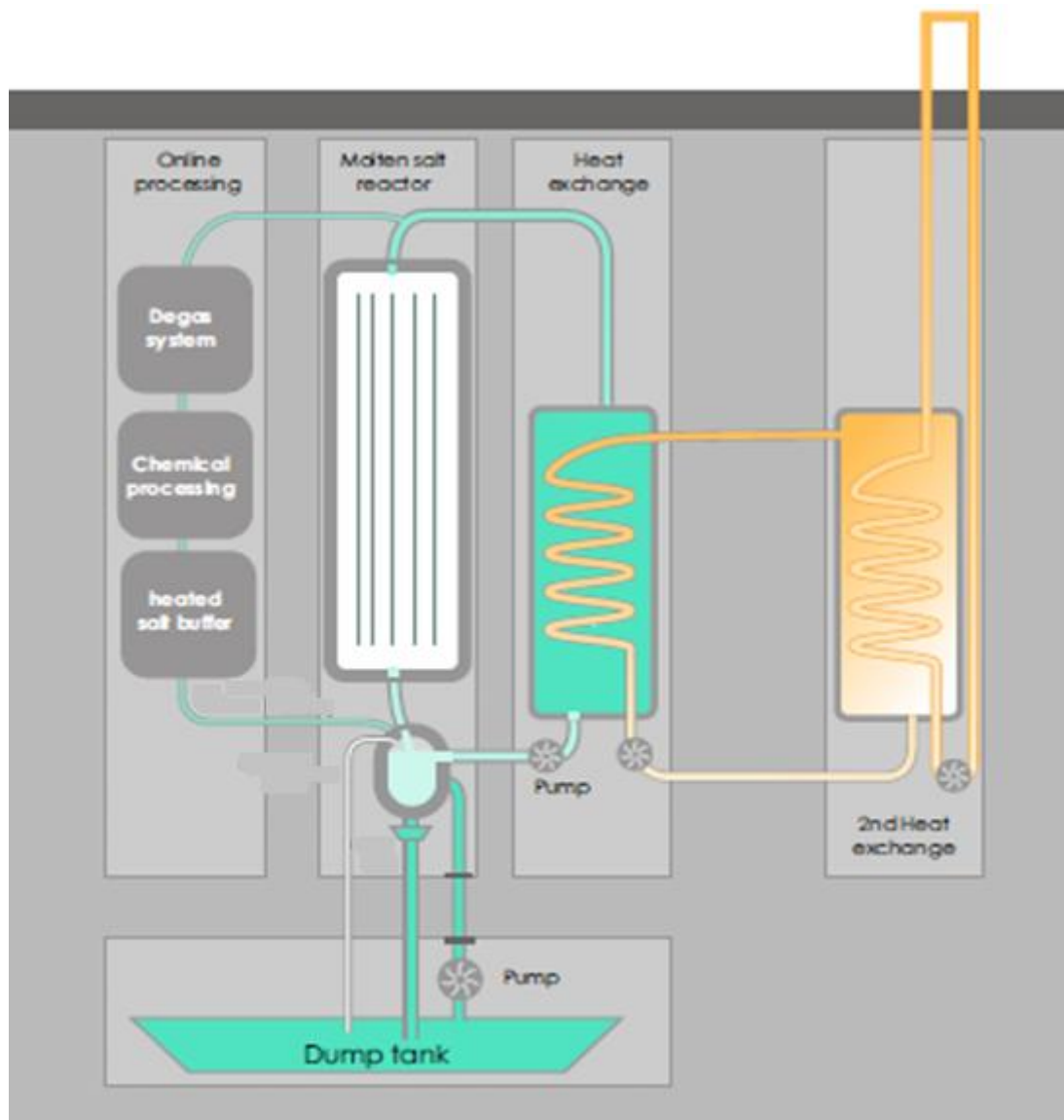


Σχήμα 2-5 Αντιδραστήρας υπερυψηλής θερμοκρασίας – VHTRs [5].

Οι αντιδραστήρες *VHTRs* παρέχουν ευελιξία στην εφαρμογή και στη χρήση του καυσίμου. Χρησιμοποιούν γραφίτη ως επιβραδυντή και He ή τετηγμένο άλας ως ψυκτικό μέσο (Σχήμα 2.5). Επίσης, χρησιμοποιούν ως καύσιμο UO_2 χαμηλού εμπλουτισμού (<5%). Ένα από τα πλεονεκτήματα τους είναι οι υψηλές θερμοκρασίες του ψυκτικού μέσου σε σύγκριση με τους συμβατικούς αντιδραστήρες. Οι θερμοκρασίες εξόδου από τον πυρήνα κυμαίνονται από περίπου 800°C έως 1000°C για εξελιγμένους αντιδραστήρες. Οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας επιτρέπουν μεγαλύτερη θερμική απόδοση, δηλαδή αύξηση της πυκνότητας των νετρονίων και επομένως αύξηση της ισχύος. Επιτρέπουν επίσης μη ηλεκτρικές εφαρμογές όπως η παραγωγή θερμότητας ή υδρογόνου [1,5,17,18].

2.2.3 Αντιδραστήρες τετηγμένων αλάτων (Molten Salt Reactors - MSR).

Στον αντιδραστήρα τετηγμένου άλατος το πρωτεύον ψυκτικό μέσο, ακόμα και το ίδιο το καύσιμο, είναι ένα μίγμα τετηγμένου άλατος (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2-6 Αντιδραστήρας τετηγμένων αλάτων – MSR [20].

Τα περισσότερα σχέδια χρησιμοποιούν ως πυρηνικό καύσιμο τέτρα-φθοριούχο ουράνιο (UF_4) ή τέτρα-φθοριούχο θόριο (ThF_4), διαλυμένο σε τετηγμένο άλας φθορίου. Τα φθοριούχα άλατα λιθίου ή λιθίου-βηρυλλίου παραμένουν υγρά χωρίς συμπίεση έως και τους $1400^{\circ}C$. Συνήθως ο αντιδραστήρας αυτός λειτουργεί στους $700-800^{\circ}C$, σε αντίθεση με έναν *PWR* ο οποίος λειτουργεί σε περίπου $345^{\circ}C$ υπό πίεση 155 bar. Ο πυρήνας διαθέτει γραφίτη ως επιβραδυντή. Όπως και στους *SCWRs*, στον *MSR* η ταχύτητα και η ενέργεια των νετρονίων είναι μεγαλύτερες από εκείνες που συνηθίζονται στους θερμικούς αντιδραστήρες.

Υπάρχουν παραλλαγές της τεχνολογίας τετηγμένου άλατος οι οποίες περιλαμβάνουν τον αντιδραστήρα διπλού ρευστού που σχεδιάζεται με μόλυβδο ως ψυκτικό μέσο, αλλά με καύσιμο τετηγμένου άλατος, για παράδειγμα χλωριούχο πλουτόνιο. Μία άλλη αξιοσημείωτη προσέγγιση είναι ο αντιδραστήρας σταθερού άλατος (*Stable salt reactor - SSR*), ο οποίος περικλείει το τετηγμένο άλας σε εκατοντάδες κοινές ράβδους στερεού καυσίμου που είναι ήδη καθιερωμένες στην πυρηνική βιομηχανία. Ο τελευταίος σχεδιασμός βρέθηκε ότι είναι ο πιο ανταγωνιστικός για την ανάπτυξη μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων *SMRs*.

Το υγρό καύσιμο έχει αρνητικό συντελεστή που προσφέρει παθητική ασφάλεια, οπότε όταν αυξηθεί η θερμοκρασία καυσίμου, μειώνεται η αντιδραστικότητα. Ένα άλλο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του *MSR* είναι η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του αναλωμένου καυσίμου, χαρακτηριστικό που συνήθως συναντάται στους αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων. Η δυνατότητα αυτή επιτεύχθηκε με την αντικατάσταση ενός τμήματος ουρανίου στο αναλωμένο πυρηνικό καύσιμο με θόριο. Τέλος, ο *MSR* λειτουργεί σε σχεδόν ατμοσφαιρική πίεση, εξαλείφοντας τον κίνδυνο εκρηκτικής έκλυσης ραδιενεργών υλικών [1,17,18,20].

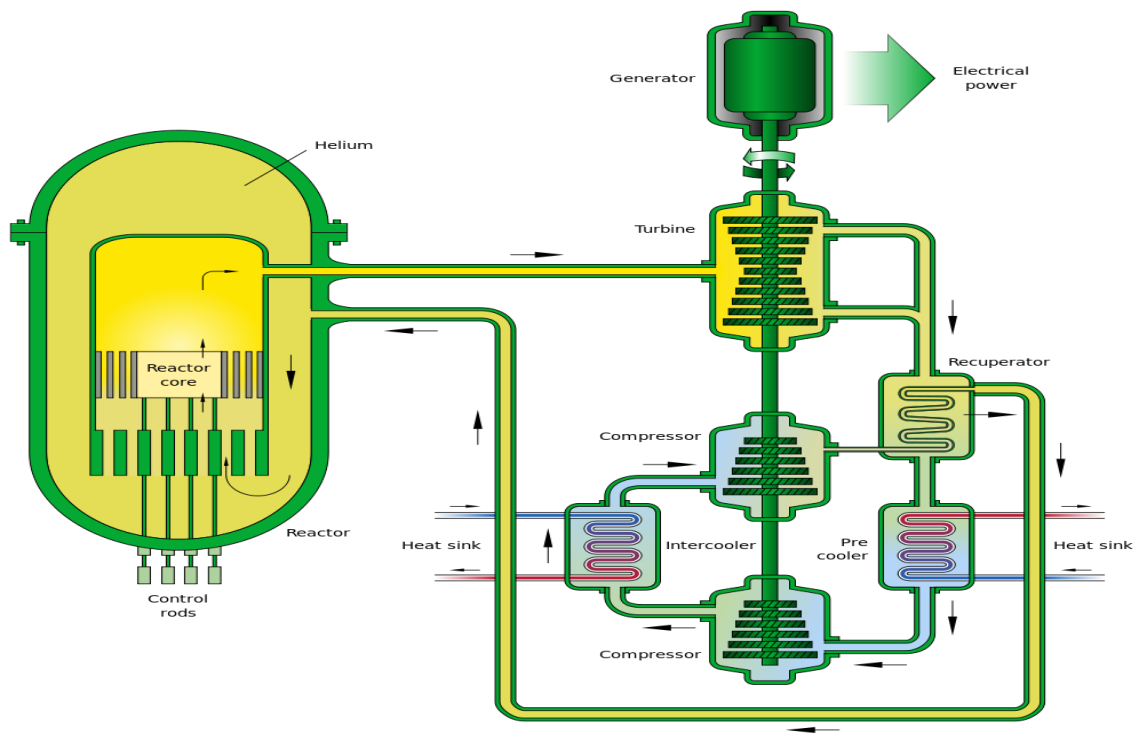
2.3 Αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων (Fast neutron reactors).

Ένας γρήγορος αντιδραστήρας χρησιμοποιεί άμεσα τα ταχέα νετρόνια που εκπέμπονται από την σχάση, χωρίς τη διαμεσολάβηση επιβραδυντή. Μπορεί επίσης να αναπαράγει περισσότερη ποσότητα καυσίμου απ' ό,τι καταναλώνει με τη διαδικασία της μεταστοιχείωσης (*breeder reactors*), οδηγώντας σε έναν κλειστό κύκλο καυσίμου.

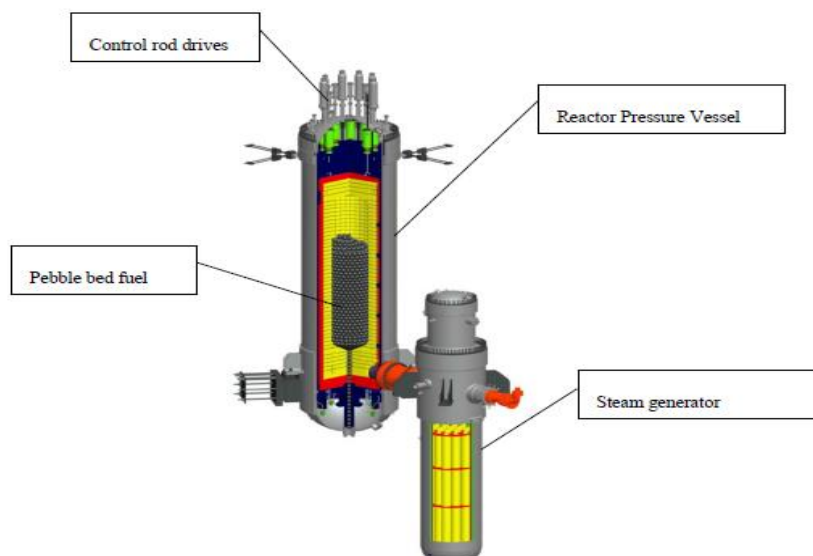
2.3.1 Αντιδραστήρες αέριας ψύξης (Gas cooled Fast Reactors - GFRs ή High Temperature Gas Reactors - HTGRs).

Τα μοντέλα αέριας ψύξης παρέχουν ευελιξία στην εφαρμογή και στη χρήση του καυσίμου. Διαθέτουν φάσμα ταχέων νετρονίων για την αποτελεσματική κατανάλωση του γόνιμου ουρανίου. Ο αντιδραστήρας ψύχεται με He και με θερμοκρασία εξόδου 850°C (οι θερμοκρασίες εξόδου από τον πυρήνα μπορούν να φτάσουν έως και 1000°C για εξελιγμένους αντιδραστήρες) αποτελεί μια εξέλιξη του αντιδραστήρα υπερυψηλής θερμοκρασίας *VHTR*, με έναν πιο βιώσιμο κύκλο καυσίμου (Σχήμα 2.7). Ένα από τα πλεονεκτήματα των *HTGRs* είναι οι υψηλότερες θερμοκρασίες του ψυκτικού μέσου, οι οποίες επιτρέπουν μεγαλύτερη θερμική απόδοση και επομένως αύξηση της ισχύος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε με εξοπλισμό παραγωγής ατμού είτε με αεριοστρόβιλο καθώς και ως πηγή θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας. Οι υψηλές θερμοκρασίες εξόδου του αντιδραστήρα μπορούν επίσης να λειτουργήσουν καταλυτικά σε ενδόθερμες αντιδράσεις για την παραγωγή υδρογόνου. Δίνεται η δυνατότητα για διάφορους κύκλους καυσίμου, όπως ^{235}U (χαμηλού εμπλουτισμού), ^{233}Th , μίγμα ^{239}Pu με ^{233}Th και ^{235}U . Ιστορικά, αυτοί οι

αντιδραστήρες χρησιμοποιούνται για μη ηλεκτρικές εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών, όπως η παραγωγή υδρογόνου και η αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Για το σκοπό αυτό, πολλά σχέδια *HTGRs* χρησιμοποιούν μικροσκοπικούς πυρήνες κεραμικού καυσίμου (διαμέτρου 0,5 mm) με πολλαπλές κεραμικές επικαλύψεις. Εν προκειμένω, παρουσιάζεται αρνητικός συντελεστής καυσίμου, με αποτέλεσμα να περιορίζονται τα προϊόντα σχάσης σε υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 1600°C) και αξιόπιστη απόδοση (μέχρι 120 MW/μέρα/ kg).



Σχήμα 2-7 Αντιδραστήρας αέριας ψύξης – HTGR [17].



Σχήμα 2-8 Κινζικό μοντέλο αντιδραστήρα αέριας ψύξης - HTGR-PM [1].

Πίνακας 2-2 Χαρακτηριστικά του μοντέλου HTR-PM [1].

Μοντέλο <i>SMR</i>	<i>HTR-PM</i>
Χώρα	Κίνα
Θερμική/ηλεκτρική ισχύς (MW)	250/105,5 (ανά μονάδα)
Μη ηλεκτρικές εφαρμογές	-
Διαμόρφωση εγκατάστασης	Επίγεια εγκατάσταση 3 μονάδων
Διάστημα ανεφοδιασμού	48 μήνες
Έναρξη κατασκευής	2012
Έναρξη λειτουργίας	(2015)

Τα παραδοσιακά σχέδια *HTGRs* παρέχουν υψηλή αποδοτικότητα μετατροπής ενέργειας - έως 55% σε σύγκριση με το 33% ενός *PWR*. Ωστόσο, η ανάπτυξη αυτών των σχεδίων, αναμένεται από το 2025 και μετά. Το μοντέλο που φαίνεται να είναι έτοιμο για ανάπτυξη είναι το κινεζικό *HTR-PM* (Σχήμα 2.8). Ο συγκεκριμένος αντιδραστήρας χρησιμοποιεί ένα υπόστρωμα σφαιρών, όπου το καύσιμο τοποθετείται στο κέντρο σφαιρών από γραφίτη που κινούνται κατά μήκος του πυρήνα κατά τη διάρκεια λειτουργίας του αντιδραστήρα και εξασφαλίζει απόδοση περίπου 42% [1,17,18,21].

2.3.2 Αντιδραστήρας υγρών μετάλλων (Liquid Metal Reactors – LMRs).

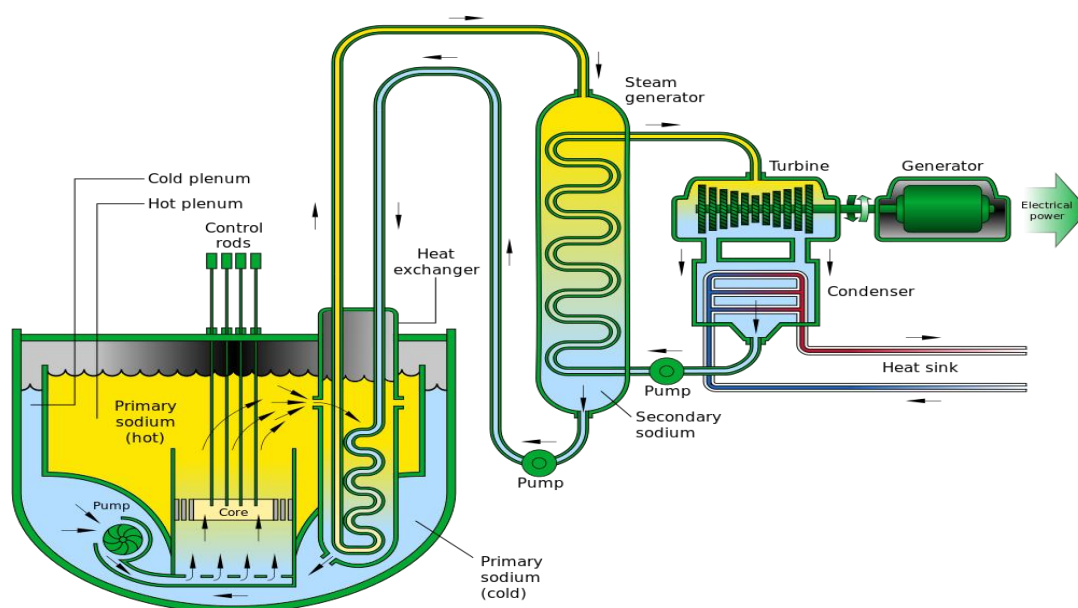
2.3.2.1 Αντιδραστήρες ταχείας ψύξης με νάτριο (Sodium cooled Fast Reactors - SFRs).

Ο αντιδραστήρας *SFR* ψύχεται με υγρό νάτριο και χρησιμοποιεί ως καύσιμο μεταλλικό κράμα ουρανίου και πλουτωνίου (*MOx*) ή αναλωμένο πυρηνικό καύσιμο αντιδραστήρων ελαφρού ύδατος. Το καύσιμο του αντιδραστήρα τοποθετείται σε χαλύβδινη επένδυση ενώ στον κενό χώρο μεταξύ των ράβδων καυσίμου τοποθετείται υγρό νάτριο. Ο πυρήνας λειτουργεί με ταχέα νετρόνια χωρίς την χρήση επιβραδυντή με θερμοκρασία εξόδου στους 500-550°C.

Μία από τις προκλήσεις σχεδιασμού είναι ο κίνδυνος χειρισμού του νατρίου, το οποίο παρόλο που έχει υψηλή θερμική ικανότητα, αντιδρά εξώθερμα αν έρθει σε επαφή με το νερό και τον αέρα. Για το λόγο αυτό όλοι οι *SFRs* χρησιμοποιούν ένα ενδιάμεσο σύστημα μεταφοράς θερμότητας, το οποίο χρησιμοποιεί και αυτό διάλυμα νατρίου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.9. Αρχικά, το νάτριο μεταφέρει τη θερμότητα που παράγεται στον πυρήνα σε έναν ενδιάμεσο εναλλάκτη θερμότητας που βρίσκεται μέσα στο δοχείο του αντιδραστήρα. Συνήθως, τα πιο καινούρια μοντέλα είναι τύπου πισίνας. Το δευτερεύον νάτριο παράγει θερμότητα που μεταφέρεται στις ατμογεννήτριες που βρίσκονται μακριά από τον αντιδραστήρα, ώστε να αποφευχθεί κάποια ενδεχόμενη αντίδραση νατρίου-ατμού. Σε γενικές γραμμές, η χρήση υγρού

μετάλλου αντί νερού, ως ψυκτικού μέσου, επιτρέπει στο σύστημα να λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση, μειώνοντας τον κίνδυνο διαρροής.

Στόχος του αντιδραστήρα *SFR* είναι να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα της χρήσης του ουρανίου με μεταστοιχείωση σε πλουτόνιο και η μείωση της ανάγκης απομάκρυνσης του αναλωμένου καυσίμου (μείωση αποθήκευσης αναλωμένου καυσίμου ως και 98%, *Korea Atomic Energy Research Institute - KAERI*⁷). Άλλο ένα πλεονέκτημα είναι ότι, όταν ο αντιδραστήρας *SFR* υπερθερμαίνεται, το καύσιμο διαστέλλεται και λόγω του αρνητικού συντελεστή καυσίμου, η αλυσιδωτή αντίδραση επιβραδύνεται αυτόματα.



Σχήμα 2-9 Αντιδραστήρας ταχείας ψύξης με νάτριο – SFR [17].

Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά δύο μοντέλων αρθρωτών *SFRs* που χρησιμοποιούν νάτριο ως ψυκτικό μέσο και σύστημα ενδιάμεσης μεταφοράς θερμότητας.

Το μοντέλο *PRISM* έχει αναπτυχθεί ειδικά για την ανακύκλωση του πλουτωνίου που συσσωρεύεται ως αναλωμένο καύσιμο συμβατικών αντιδραστήρων. Χρησιμοποιεί μεταλλικό καύσιμο ουρανίου-πλουτωνίου-ζιρκονίου με αρχική περιεκτικότητα σε πλουτόνιο 26%. Το σύστημα αποτελείται από τρεις μονάδες αντιδραστήρων, καθεμία από τις οποίες διαθέτει την δική της αμογεννήτρια, συνδεδεμένες σε μία μόνο στροβιλογεννήτρια. Οι μονάδες του αντιδραστήρα βρίσκονται υπόγεια ενώ ο στρόβιλος βρίσκεται πάνω από το έδαφος ώστε να λειτουργεί η παθητική ψύξη αέρα.

⁷ www.kaeri.re.kr/english/

Πίνακας 2-3 Χαρακτηριστικά των μοντέλων PRISM και 4S τύπου SFR [1].

Μοντέλο SMR		PRISM	4S
Χώρα		ΗΠΑ - Ιαπωνία	Ιαπωνία
Θερμική/ηλεκτρική ισχύς (MW)		471/155 (ανά μονάδα)	471/10-50
Μη ηλεκτρικές εφαρμογές		-	Πόσιμο νερό: 34.000 m ³ /μέρα Υδρογόνο: 6.5 t/μέρα Παραγωγή θερμότητας ή ατμού
Διαμόρφωση εγκατάστασης		3 μονάδες	Επίγεια μονάδα
Διάστημα ανεφοδιασμού		1 χρόνος	30 χρόνια
Έναρξη λειτουργίας		2020	2015

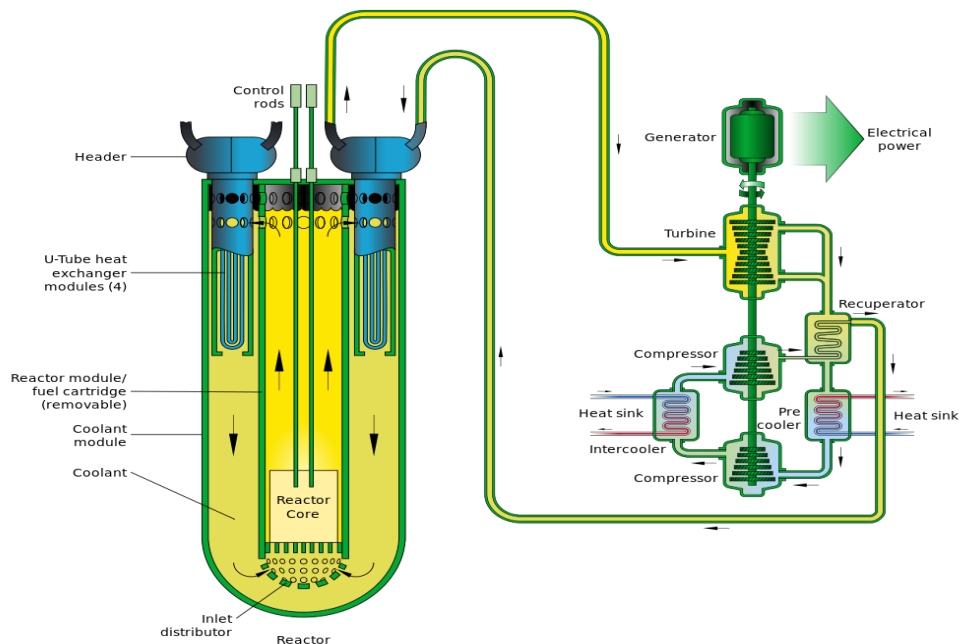
Το μοντέλο 4S της Toshiba έχει αναπτυχθεί τις τελευταίες δύο δεκαετίες και στη σημερινή του έκδοση έχει σχεδιαστεί ως μονάδα ισχύος 10 MWe, με δυνατότητα 30 χρόνων συνεχούς λειτουργίας χωρίς ανεφοδιασμό. Το 4S χρησιμοποιεί κράμα ουρανίου-ζιρκονίου ως καύσιμο με αρχικό εμπλουτισμό ουρανίου μικρότερο από 20%, καθώς επίσης και παθητική ψύξη αέρα. Οι πιθανές χρήσεις είναι η παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου με τη μέθοδο ηλεκτρολύσεως υψηλής θερμοκρασίας, καθώς και η λειτουργία του ως πηγή ενέργειας και θερμότητας σε απομακρυσμένες μικρές πόλεις (π.χ. στην Αλάσκα) [1,17,18,21].

2.3.2.2 Αντιδραστήρες ταχείας ψύξης με μόλυβδο ή μόλυβδο και βισμούθιο (Lead or Lead-Bismuth cooled Fast Reactors - LFRs/LBFRs).

Οι αντιδραστήρες ταχείας ψύξης με μόλυβδο ή μόλυβδο και βισμούθιο (Σχήμα 2.10), μπορούν να εξεταστούν από κοινού καθώς χρησιμοποιούν παρόμοιες τεχνολογίες. Για παράδειγμα ο καθαρισμός του ψυκτικού μέσου και ο έλεγχος της διάβρωσης του είναι παρόμοιοι στα δύο μέταλλα, διαφέρουν μόνο σε μικρές λεπτομέρειες. Επί του παρόντος, δεν υπάρχουν μικρές αρθρωτές μονάδες που χρησιμοποιούν ως ψυκτικό μέσο αποκλειστικά τον μόλυβδο, οπότε η έρευνα περιορίζεται στην κατασκευή SMRs όπου υπάρχει σύμπραξη μόλυβδου-βισμούθιου.

Το εύτηκτο κράμα μόλυβδου-βισμούθιου είναι χημικώς αδρανές όταν βρίσκεται στον αέρα ή στο νερό, επομένως, σε αντίθεση με τους SFRs, δεν χρησιμοποιείται ενδιάμεσο σύστημα μεταφοράς θερμότητας. Έχει πολύ υψηλό σημείο βρασμού (1670°C) και πολύ υψηλή πυκνότητα που επιτρέπει την αποτελεσματική απαγωγή θερμότητας σε ατμοσφαιρικές πιέσεις. Η θερμοκρασία εξόδου του κυμαίνεται μεταξύ 480 και 800°C. Λόγω του σημείου πήξης του στους 125°C, στερεοποιείται υπό συνθήκες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Έτσι συμβάλλει αποτελεσματικά στην επιδιόρθωση ρωγμών που μπορεί να εμφανιστούν στα όρια του ψυκτικού μέσου.

Ένα από τα τεχνικά ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν είναι η διάβρωση των στοιχείων καυσίμου, καθώς και των δομικών στοιχείων, κατά τη ροή του ψυκτικού μέσου. Η διάβρωση εξαρτάται από τη θερμοκρασία και είναι ευκολότερο να αντιμετωπιστεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Υπάρχει μοντέλο που χρησιμοποιεί δομικά υλικά με βάση τον ανοξείδωτο χάλυβα για λειτουργία αντιδραστήρα σε περιοχή θερμοκρασιών κάτω των 500°C.



Σχήμα 2-10 Αντιδραστήρας ταχείας ψύξης με μόλυβδο ή μόλυβδο και βισμούθιο - LFRs/LBFRs [17].

Πίνακας 2-4 Χαρακτηριστικά των μοντέλων SVBR-100 και GEN4 τύπου LBFR [1].

Μοντέλο SMR	SVBR-100	GEN4 Energy Module
Χώρα	Ρωσία	ΗΠΑ
Θερμική/ηλεκτρική ισχύς (MW)	280/101,5 (ανά μονάδα)	70/25 (ανά μονάδα)
Μη ηλεκτρικές εφαρμογές	Απομακρυσμένη θέρμανση Πόσιμο νερό	Θερμότητα Πόσιμο νερό Υδρογόνο
Διαμόρφωση εγκατάστασης	Απλή ή πολλαπλές μονάδες Επίγεια ή σε εξέδρα	Επίγεια απλή ή πολλαπλές μονάδες
Διάστημα ανεφοδιασμού (έτη)	7-8	5-15
Έναρξη λειτουργίας	2017	2018

Στον Πίνακα 2.4 συνοψίζονται τα γενικά χαρακτηριστικά και η κατάσταση σχεδιασμού δύο μοντέλων αντιδραστήρων SMRs που βασίζονται στην τεχνολογία των LBFR.

Όπως όλοι οι αντιδραστήρες ψύξης με μέταλλο, το μοντέλο *SVBR-100* λειτουργεί κοντά στην ατμοσφαιρική πίεση. Όπως προαναφέρθηκε, το ψυκτικό υγρό είναι χημικά αδρανές στο νερό και στον αέρα, οπότε δεν χρησιμοποιείται ενδιάμεσο σύστημα μεταφοράς θερμότητας, χρησιμοποιούνται ωστόσο αντλίες. Επομένως, η μικρή μονάδα *SVBR-100* βυθίζεται σε μια πισίνα με νερό σε ατμοσφαιρική πίεση. Η ζέση του νερού στην πισίνα βοηθά στην απαγωγή της θερμότητας από την εξωτερική επιφάνεια του δοχείου του αντιδραστήρα σε περίπτωση ατυχημάτων.

Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να λειτουργήσει με διαφορετικούς τύπους πυρηνικών καυσίμων. Μία επιλογή είναι το διοξείδιο του ουρανίου με μέσο όρο εμπλουτισμού 16,3%. Ο αντιδραστήρας είναι σχεδιασμένος για συνεχή λειτουργία 7-8 ετών, μετά τα οποία ο καθαρισμός και η επανατροφοδότηση του αντιδραστήρα με καύσιμο πραγματοποιείται επιτόπου.

Το δεύτερο μοντέλο, ο αντιδραστήρας *GEN4* μοιράζεται πολλά κοινά με τον *SVBR-100*. Ωστόσο, ο *GEN4* χρησιμοποιεί φυσική κυκλοφορία του πρωτεύοντος ψυκτικού μέσου σε κανονική λειτουργία – σε αντίθεση με τις αντλίες του πρώτου μοντέλου. Επιπλέον, έχει σχεδιαστεί για να ανεφοδιάζεται και να παροπλίζεται στο εργοστάσιο. Τέλος, μπορεί να εγκατασταθεί είτε μοναδικά, είτε σε συνδυασμό πολλαπλών μονάδων.

Περισσότερα από 30 μοντέλα *SMRs* έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν κατά την πρώτη δεκαετία του εικοστού πρώτου αιώνα. Πολλά από αυτά έχουν συνεχίσει σε προχωρημένα στάδια εγκατάστασης και αδειοδότησης. Εκτός από τη σταθερή πρόοδο συγκεκριμένων μοντέλων, υπάρχουν μικροί αντιδραστήρες που βρίσκονται σε πολύ πρώιμα στάδια σχεδιασμού, δηλαδή δεν υπάρχει λεπτομερής περιγραφή και διαθέσιμα τεχνικά χαρακτηριστικά. Άλλωστε, μετά το ατύχημα της Φουκουσίμα, ο σχεδιασμός και η κατασκευή κάποιων μοντέλων επιβραδύνθηκε ή και σταμάτησε τελείως. Εκτός από τους κλασικούς *SMRs*, υπάρχουν και σχέδια αντιδραστήρων απόδοσης ισχύος μερικών δεκάδων MW (*vSMRs*). Αυτοί αποτελούν συμβατικές τεχνολογίες *PWR* ή αντιδραστήρες βαρέος ύδατος *HWRs* [1,17,18,21].

Στον Πίνακα 2.5 φαίνεται μία συγκεντρωτική παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών των έξι διαφορετικών τύπων αντιδραστήρων 4^{ης} γενιάς. Βλέπουμε τον διαχωρισμό σε θερμικούς και ταχείς αντιδραστήρες, το ψυκτικό μέσο που αυτοί χρησιμοποιούν, τη θερμοκρασία εξόδου του πυρήνα καθώς και την αντίστοιχη ισχύ τους [22].

Πίνακας 2-5 Συγκεντρωτική παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών των αντιδραστήρων 4ης γενιάς [22].

Τύπος Αντιδραστήρα	SCWR	VHTR	MSR	GFR	SFR	LBFR
Φάσμα νετρονίων	Θερμικά/ταχεία	θερμικά	Θερμικά/ταχεία	Ταχεία	Ταχεία	Ταχεία
Ψυκτικό μέσο	Ύδωρ	Ήλιο	Φθοριούχα/χλωριούχα άλατα	Ήλιο	Νάτριο	Μόλυβδος-Βισμούθιο
Θερμοκρασία εξόδου πυρήνα (°C)	510-625	800-1000	700-800	850	500-550	480-800
Καύσιμο	UO ₂ (<5%)	UO ₂ (<5%)	UF ₄ , ThF ₄	UO ₂ (<5%), ²³³ Th, MOx	MOx	UO ₂
Κύκλος καυσίμου	Ανοιχτός/κλειστός	Ανοιχτός	Κλειστός	Κλειστός	Κλειστός	Κλειστός
Ισχύς (MWe)	300-700	250-300	250	1200	30-150	20-180

2.4 Πλεονεκτήματα αντιδραστήρων 4ης γενιάς.

Σύμφωνα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των σύγχρονων πυρηνικών σταθμών, οι αντιδραστήρες 4^{ης} γενιάς παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα:

- 100-300 φορές μεγαλύτερη εκμετάλλευση του πυρηνικού καυσίμου και καλύτερη ενεργειακή απόδοση.
- Ευρύτερο φάσμα καυσίμων.
- Μικρότερη διάρκεια ραδιοτοξικότητας των πυρηνικών αποβλήτων τους (μερικούς αιώνες αντί για χιλιετίες).
- Ορισμένοι αντιδραστήρες δύνανται να καταναλώσουν υφιστάμενα πυρηνικά απόβλητα προκειμένου να παράξουν ηλεκτρική ενέργεια, ενώ οι αναπαραγωγοί (*breeder*) αντιδραστήρες παράγουν περισσότερο καύσιμο απ' ό,τι καταναλώνουν μέσω της μεταστοιχείωσης (π.χ. ²³⁹Pu από ²³⁸U ή ²³³U από ²³²Th).
- Βελτιωμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά ασφαλείας, όπως η αποσυμπίεση του δοχείου του αντιδραστήρα και η αυτόματη παθητική διακοπή λειτουργίας του αντιδραστήρα σε περίπτωση αστοχίας λειτουργίας ή ατυχήματος απώλειας ψυκτικού μέσου καθώς και ο αποκλεισμός έκρηξης υδρογόνου.
- Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες δεν εκπέμπουν CO₂ κατά τη λειτουργία τους - παρόλο που εκπέμπεται κατά την κατασκευή, εφόσον χρησιμοποιούνται ορυκτά καύσιμα. Γενικά, οι εκπομπές CO₂ και αερίων του θερμοκηπίου στη διάρκεια ζωής ενός αντιδραστήρα αποτελούν μικρό ποσοστό συγκριτικά με τις παραδοσιακές πηγές ορυκτών καυσίμων.

Πίνακας 2-6 Ψυκτικό αντιδραστήρων θερμικών νετρονίων[12].

Τύποι επιβραδυντή/ψυκτικό αντιδραστήρων θερμικών νετρονίων	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ελαφρύ ύδωρ	Δοκιμασμένη τεχνολογία, συμπαγές δοχείο	Χαμηλή επάρκεια καυσίμου
Βαρύ ύδωρ/ελαφρύ ύδωρ	Καλή επάρκεια καυσίμου	Χαμηλή απόδοση ισχύος, σύνθετη κατασκευή
Ήλιο/γραφίτης	Υψηλή θερμική μάζα, καλή θερμική επάρκεια	Χαμηλή απόδοση ισχύος
Τετηγμένο άλας/γραφίτης	Χαμηλή πίεση, υψηλή θερμική μάζα, καλή θερμική επάρκεια	Όχι επαρκώς δοκιμασμένη τεχνολογία, διάβρωση

Πίνακας 2-7 Ψυκτικό αντιδραστήρων ταχέων νετρονίων[12].

Ψυκτικό αντιδραστήρων ταχέων νετρονίων	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Νάτριο	Δοκιμασμένη τεχνολογία, καλή μεταφορά της θερμότητας	Αντιδραστικό με το νερό
Μόλυβδος ή μόλυβδος-βισμούθιο	Υψηλό σημείο βρασμού, λιγότερο αντιδραστικά στοιχεία με τον αέρα και το νερό	Βαρύς, χαμηλή μεταφορά θερμότητας, υψηλό κόστος βισμούθιου
Ήλιο	Αδρανές, δεν υφίσταται αλλαγή φάσης	Χαμηλή θερμική μάζα και μεταφορά θερμότητας

Πίνακας 2-8 Καύσιμα αντιδραστήρων θερμικών νετρονίων [12].

Καύσιμα αντιδραστήρων θερμικών νετρονίων	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Οξειδίο ουρανίου με κράμα ζirkονίου	Δοκιμασμένη τεχνολογία	Αντιδραστικότητα του ζirkονίου με τον ατμό προς παραγωγή υδρογόνου
Κράματα ζirkονίου-ουρανίου	Υψηλή πυκνότητα καυσίμου, χαμηλό κόστος	Αντιδραστικότητα του ζirkονίου με τον ατμό, χαμηλό σημείο τήξης
Προηγμένα κεραμικά καύσιμα	Δεν δύναται η παραγωγή υδρογόνου	Όχι επαρκώς δοκιμασμένη τεχνολογία, δύσκολη κατασκευή

Πίνακας 2-9 Καύσιμα αντιδραστήρων ταχέων νετρονίων[12].

Καύσιμα αντιδραστήρων ταχέων νετρονίων	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Οξείδιο ουρανίου-πλουτωνίου	Δοκιμασμένη τεχνολογία, υψηλό σημείο τήξης, υψηλή απόδοση	Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα – υψηλές θερμοκρασίες καυσίμων, αντιδρά με το νάτριο
Ουράνιο-πλουτώνιο-άζωτο	Υψηλή πυκνότητα καυσίμου, υψηλό σημείο τήξης, συμβατός με νάτριο	Όχι επαρκώς δοκιμασμένη τεχνολογία
Ουράνιο-πλουτώνιο-άνθρακας	Υψηλή πυκνότητα καυσίμου, υψηλό σημείο τήξης, συμβατός με νάτριο	Περιορισμένη απόδοση ισχύος
Ουράνιο-πλουτώνιο-κράμα ζιρκονίου	Υψηλή πυκνότητα καυσίμου, συμβατός με νάτριο	Χαμηλό σημείο τήξης, ασύμβατο με τα ψυκτικά του μόλυβδου

Στους Πίνακες 2.6-2.9 παρουσιάζεται μία σύγκριση ανάμεσα σε αντιδραστήρες θερμικών και ταχέων νετρονίων, όσον αφορά το ψυκτικό μέσο και τα καύσιμα που χρησιμοποιούν, όπως επίσης τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των στοιχείων αυτών [12,17,18,21].

Κεφάλαιο 3^ο

3 Χαρακτηριστικά ασφαλείας και ψύξης στους αντιδραστήρες SMRs, τύπου LWR.

Τα χαρακτηριστικά ασφαλείας ενός πυρηνικού σταθμού είναι ένα σύνολο μέσων για την προστασία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος από τα ραδιενεργά προϊόντα σχάσης σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος. Η κύρια λειτουργία τους είναι να εντοπίσουν και να ελέγξουν, να μετριάσουν και εν τέλει να τερματίσουν τις συνέπειες των υποτιθέμενων ατυχημάτων προκειμένου να διατηρήσουν τα επίπεδα έκθεσης σε ακτινοβολία κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια. Υπάρχουν πολλά χαρακτηριστικά ασφαλείας που χρησιμοποιούνται σε μικρούς αντιδραστήρες SMRs, όπως για παράδειγμα το σύστημα εντοπισμού σφαλμάτων, ο μηχανισμός απαγωγής υπολειπόμενης θερμότητας (*residual heat removal system*), το σύστημα έγχυσης ασφαλείας (*safety injection system*) και το περίβλημα του αντιδραστήρα (*containment system*). Οι διάφορες παραλλαγές τους οφείλονται κυρίως στο είδος του αντιδραστήρα και την απόδοση ισχύος του, καθώς και στους τρόπους με τους οποίους κάθε μοντέλο αντιμετωπίζει τα πιθανά ατυχήματα.

3.1 Σύστημα εντοπισμού σφαλμάτων και ασφαλούς απενεργοποίησης.

Γενικά, οι αντιδραστήρες που ψύχονται με νερό χρησιμοποιούν ράβδους ελέγχου ως κύριο σύστημα ελέγχου της αντιδραστικότητας και απενεργοποίησης του αντιδραστήρα υπό κανονικές αλλά και συνθήκες έκτακτης ανάγκης. Οι ράβδοι ελέγχου είναι κατασκευασμένες από υλικά που δύνανται να απορροφούν νετρόνια και εισάγονται στον πυρήνα του αντιδραστήρα με τον μηχανισμό κίνησης ράβδων ελέγχου (*Control rod drive mechanism - CRDM*) ή απλά λόγω της βαρύτητας, προκειμένου να τερματίσουν την αλυσιδωτή αντίδραση. Η θέση τους μεταβάλλεται έτσι ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός ρυθμός σχάσης. Όταν οι ράβδοι είναι βαθύτερα μέσα στον πυρήνα, απορροφούν περισσότερα νετρόνια κι έτσι μειώνεται ο ρυθμός σχάσεων. Το αντίθετο συμβαίνει όταν οι ράβδοι αποσύρονται. Οι περισσότεροι CRDMs στα υπάρχοντα σχέδια βρίσκονται έξω από το δοχείο πίεσης, είτε στο πάνω μέρος (όπως στον PWR) είτε κάτω από το δοχείο καυσίμου (όπως στον BWR). Η διαδικασία εισαγωγής των ράβδων στον πυρήνα, ενέχει την μικρή πιθανότητα αστοχίας που οδηγεί στην απώλεια ψυκτικού (*Loss of coolant accident - LOCA*) και στη στιγμιαία αύξηση της αντιδραστικότητας. Στους σύγχρονους SMRs τύπου PWR, οι ράβδοι ελέγχου ενσωματώνονται στο ενιαίο περίβλημα, μέσα στον πυρήνα. Η τεχνική αυτή αφαιρεί εγγενώς την πιθανότητα ατυχήματος εκτίναξης ράβδου και των επακόλουθων LOCA, καθώς εξαλείφονται οι διεισδύσεις στο δοχείο του αντιδραστήρα. Κάποια μοντέλα SMRs που εφαρμόζουν την τεχνολογία CRDM εντός

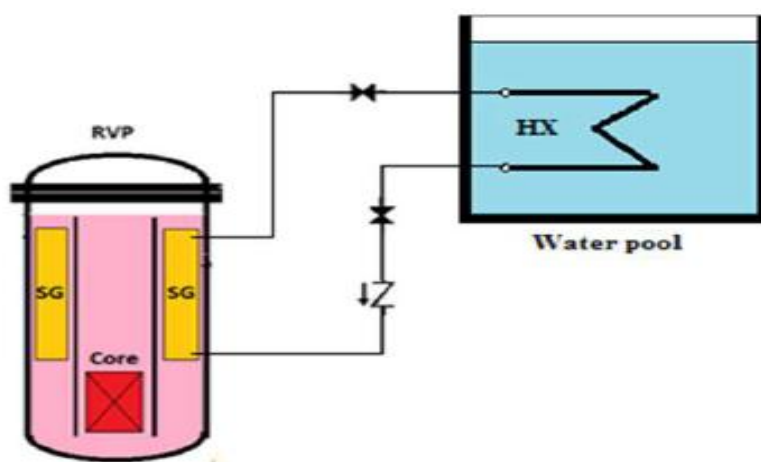
του δοχείου είναι μεταξύ άλλων το *CAREM25*, το *IRIS*, το *mPower* και ο *Westinghouse SMR* [7,19,23].

3.2 Συστήματα απαγωγής υπολειπόμενης θερμότητας (Residual heat removal system).

Εάν παρουσιαστεί κάποια αστοχία στον μηχανισμό ψύξης, η παραμένουσα θερμότητα του πυρήνα του αντιδραστήρα αυξάνεται συνεχώς, με αποτέλεσμα την παραγωγή ατμού μετά από κάποιο χρόνο. Ως εκ τούτου, η πίεση του συστήματος αυξάνεται. Ο πυρήνας πρέπει να ψυχθεί και να αφαιρεθεί η υπολειπόμενη θερμότητα.

3.2.1 Απαγωγή υπολειπόμενης θερμότητας μέσω εναλλάκτη θερμότητας και δεξαμενής νερού.

Ορισμένοι *SMRs* αφαιρούν παθητικά την εναπομένουσα θερμότητα μέσω μιας σύζευξης των γεννητριών ατμού (*Steam Generators - SGs*) με τους εναλλάκτες θερμότητας (*Heat exchangers - HXs*) οι οποίοι βρίσκονται βυθισμένοι μέσα σε μια δεξαμενή νερού (Σχήμα 3.1). Ο ατμός που παράγεται από την εναπομένουσα θερμότητα στην αμογεννήτρια κατευθύνεται προς τους εναλλάκτες θερμότητας όπου συμπυκνώνεται. Το συμπύκνωμα ρέει πίσω στην αμογεννήτρια μέσω της εισόδου τροφοδοσίας νερού. Με αυτόν τον τρόπο η εναπομένουσα θερμότητα απομακρύνεται με φυσική κυκλοφορία. Μοντέλα *SMRs* τα οποία εφαρμόζουν αυτή την μέθοδο είναι μεταξύ άλλων το *IRIS*, το *SMART* και το σχέδιο της *NuScale* [19].



Σχήμα 3-1 Απαγωγή θερμότητας μέσω του εναλλάκτη θερμότητας [19].

3.2.2 Απαγωγή υπολειπόμενης θερμότητας μέσω παθητικά ψυχόμενου συμπυκνωτή.

Ορισμένοι *SMRs* χρησιμοποιούν παθητικούς συμπυκνωτές οι οποίοι είναι βυθισμένοι σε δεξαμενή νερού και συνδέονται με το άνω μέρος του δοχείου καυσίμου, σχηματίζοντας έτσι ένα φυσικό βρόχο κυκλοφορίας προκειμένου να ψυχθεί το πρωτεύον κύκλωμα. Όταν οι βαλβίδες του κυκλώματος ανοίξουν, ο ατμός πηγαίνει στους σωλήνες του συμπυκνωτή μεταφέροντας έτσι τη θερμότητα στο νερό της δεξαμενής. Ο ατμός συμπυκνώνεται και επιστρέφει ως νερό στο δοχείο μέσω της βαρύτητας. Όπως και στην προηγούμενη παράγραφο, η εναπομένουσα θερμότητα απομακρύνεται με φυσική κυκλοφορία. Τα μοντέλα *SMRs* που εφαρμόζουν το σύστημα του παθητικά ψυχόμενου συμπυκνωτή (*Residual heat removal system - RHRS*) είναι το *CAREM25* και το *NuScale*. Ο ίδιος μηχανισμός χρησιμοποιείται επίσης στους μεγάλους αντιδραστήρες τύπου *PWR* [19].

3.2.3 Απαγωγή υπολειπόμενης θερμότητας με αντλία και εναλλάκτη θερμότητας.

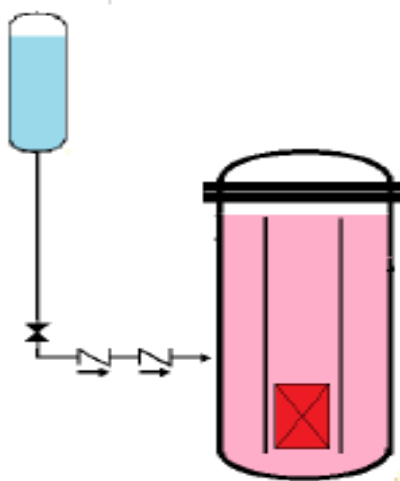
Η συμβατική προσέγγιση για τον μηχανισμό απαγωγής της υπολειπόμενης θερμότητας είναι η χρήση ενεργητικών μέσων που αποτελούνται συνήθως από αντλίες και βαλβίδες, εναλλάκτες θερμότητας και τις μεταξύ τους σωληνώσεις. Η διαφορά από τους προηγούμενους τρόπους είναι ότι πλέον η κυκλοφορία δεν είναι φυσική, αλλά βεβιασμένη. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται από πολλούς υπάρχοντες εξελιγμένους αντιδραστήρες τύπου *LWR* [19].

3.3 Συστήματα έγχυσης ασφαλείας υψηλής πίεσης (High pressure safety injection systems).

Επιπλέον, οι υδρόψυκτοι αντιδραστήρες διαθέτουν έναν εναλλακτικό μηχανισμό για την εξασφάλιση τερματισμού της σχάσης, σε περίπτωση που ο *CRDM* αποτύχει. Ο μηχανισμός αυτός οδηγεί σε έγχυση διαλύματος βορίου (σημείο ζέσεως βορίου: 3927°C) στο πρωταρχικό κύκλωμα με ενεργητική ή παθητική κινητήρια δύναμη. Το διάλυμα βορίου χρησιμοποιείται σε περίπτωση *LOCA* διότι έχει την ιδιότητα να απορροφά νετρόνια και συνεπώς να επιβραδύνει την αντιδραστικότητα και κατ' επέκταση να μειώνεται η θερμοκρασία του πυρήνα. Μοντέλα που εφαρμόζουν παθητικές εναλλακτικές μεθόδους τερματισμού σχάσης είναι μεταξύ άλλων το *CAREM25*, το *IRIS* και ο *Westinghouse SMR*. Το μοντέλο *SMART* χρησιμοποιεί ενεργητικό σύστημα έγχυσης βορίου [7,19].

3.3.1 Έγχυση ασφαλείας με τη χρήση δεξαμενής υπό υψηλή πίεση.

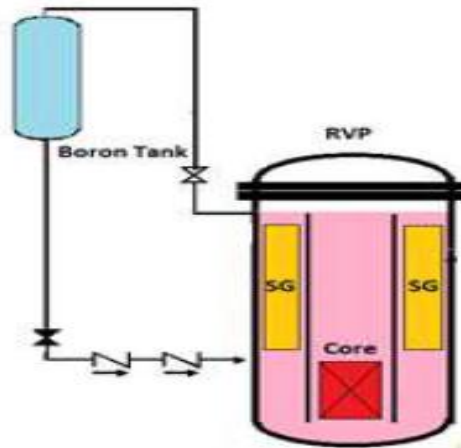
Το συγκεκριμένο σύστημα υπάρχει σε πολλούς αντιδραστήρες ως μέρος ενός γενικότερου συστήματος ασφαλείας έκτακτης ανάγκης. Ένας τυπικός σχεδιασμός αποτελείται από μία δεξαμενή υδατικού διαλύματος βορίου, η οποία συνδέεται με το δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα. Ο πυθμένας της δεξαμενής συνδέεται με το δοχείο του αντιδραστήρα μέσω μίας βαλβίδας ελέγχου που ανοίγει όταν η πίεση του δοχείου του αντιδραστήρα πέσει χαμηλότερα από την πίεση της δεξαμενής, όπως μπορεί να συμβεί, για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια ενός *LOCA* (Σχήμα 3.2). Αυτό το σύστημα ασφαλείας παρέχει μία στιγμιαία έγχυση ψυχρού διαλύματος προκειμένου να αντισταθμιστεί η ξαφνική απώλεια του ψυκτικού υγρού, διάστημα κατά το οποίο το ενεργητικό σύστημα ασφαλείας θα ξεκινήσει αυτόματα [19].



Σχήμα 3-2 Δεξαμενή υπό υψηλή πίεση [19].

3.3.2 Έγχυση ασφάλειας οδηγούμενη από τη βαρύτητα.

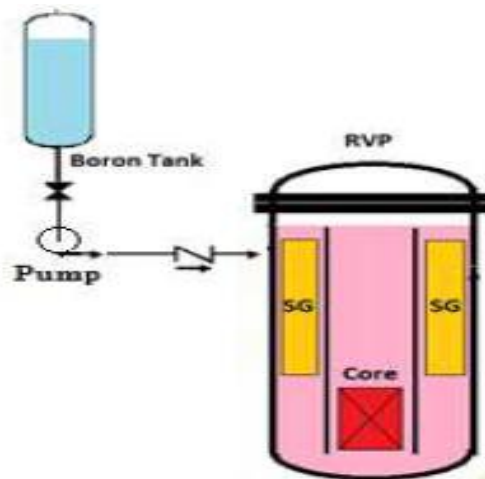
Ορισμένοι *SMRs* τύπου *PWR* διαθέτουν μια υπερυψωμένη δεξαμενή υδατικού διαλύματος βορίου που χρησιμοποιεί τη βαρυτική δύναμη, ώστε σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης να παρέχει νερό στο πρωτεύον σύστημα (Σχήμα 3.3). Η κορυφή της δεξαμενής συνδέεται στο δοχείο του αντιδραστήρα με κανονικά ανοικτή βαλβίδα, ενώ ο σωλήνας εκ πλήρωσης στον πυθμένα της δεξαμενής απομονώνεται από το δοχείο του αντιδραστήρα με μία κανονικά κλειστή βαλβίδα. Κατά τη διάρκεια μιας κατάστασης έκτακτης ανάγκης, ανοίγει η κάτω βαλβίδα με αποτέλεσμα το νερό να ρέει προς το δοχείο, ψύχοντας έτσι τον πυρήνα και διακόπτοντας την αλυσιδωτή αντίδραση. Τα μοντέλα *SMRs* που εφαρμόζουν αυτόν τον μηχανισμό είναι μεταξύ άλλων το *IRIS* και ο *Westinghouse SMR* [19].



Σχήμα 3-3 Έγχυση ασφαλείας οδηγούμενη από τη βαρύτητα [19].

3.3.3 Έγχυση ασφαλείας με τη χρήση αντλίας υψηλής πίεσης.

Μια άλλη -ενεργητική- προσέγγιση για το σύστημα έγχυσης ασφαλείας, που χρησιμοποιείται σε πολλούς υπάρχοντες αντιδραστήρες, απαιτεί ηλεκτρική αντλία που αναπτύσσει υψηλή πίεση, για την έγχυση διαλύματος βορίου από τη δεξαμενή έκτακτης ανάγκης στο δοχείο του αντιδραστήρα (Σχήμα 3.4). Ο μηχανισμός αυτός χρησιμοποιείται στο μοντέλο SMART [19].

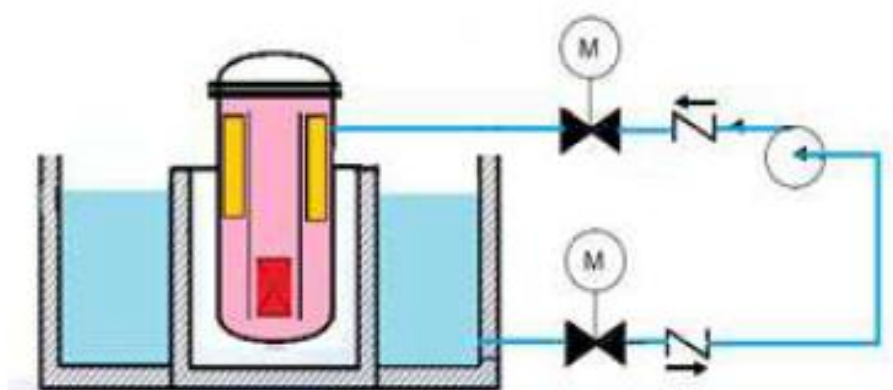


Σχήμα 3-4 Έγχυση ασφαλείας με τη χρήση αντλίας υψηλής πίεσης [19].

3.4 Συστήματα έγχυσης ασφαλείας χαμηλής πίεσης (Low pressure safety injection systems).

3.4.1 Έγχυση ασφαλείας με τη χρήση αντλίας χαμηλής πίεσης.

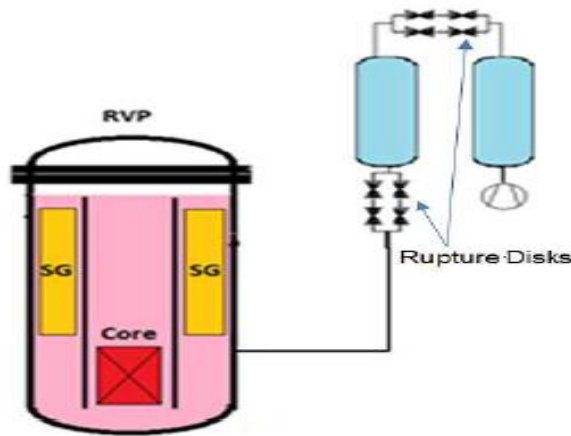
Σε αυτό το σύστημα, η αντλία χαμηλής πίεσης χρησιμοποιείται για την έγχυση νερού από το εσωτερικό της δεξαμενής του περιβλήματος (Σχήμα 3.5). Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η έγχυση, χρειάζεται πρώτα να αποσυμπιεστεί το δοχείο του αντιδραστήρα. Ο μηχανισμός με αντλία υψηλής πίεσης που περιγράφηκε στην τελευταία παράγραφο είναι χρήσιμος μόνο εάν το *LOCA* είναι μικρό, διότι αναπτύσσει υψηλή πίεση και χαμηλή ροή, τα οποία αρκούν σε μία μικρή απώλεια ψυκτικού μέσου. Αν το *LOCA* είναι μεγάλο, η πίεση στον αντιδραστήρα είναι χαμηλή και το ποσοστό απώλειας ψυκτικού είναι υψηλό. Η έγχυση ασφαλείας χαμηλής πίεσης είναι σχεδιασμένη για αυτές τις περιπτώσεις. Η ροή ψύξης παρέχεται συνήθως σε έναν εναλλάκτη θερμότητας προκειμένου να απαχθεί η παραμένουσα θερμότητα [19].



Σχήμα 3-5 Έγχυση ασφαλείας με τη χρήση αντλίας χαμηλής πίεσης [19].

3.4.2 Έγχυση ασφαλείας με τη χρήση δεξαμενής υπό χαμηλή πίεση.

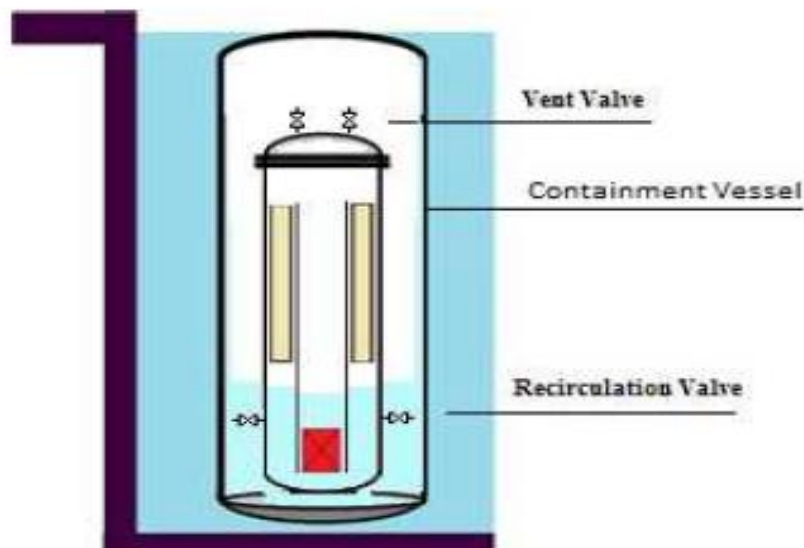
Η υπερυψωμένη δεξαμενή περιέχει υδατικό διάλυμα βορίου και χρησιμοποιείται στην περίπτωση έγχυσης ασφαλείας χαμηλής πίεσης (για παράδειγμα στο μοντέλο CAREM25). Κατά τη διάρκεια του *LOCA*, όταν η πίεση στο δοχείο του αντιδραστήρα γίνεται σχετικά χαμηλή (περίπου 15atm), τα διαφράγματα ασφαλείας (rupture discs) τα οποία απομονώνουν τις δεξαμενές συσσώρευσης από το δοχείο πίεσεως, διαρρηγνύονται και το υδατικό διάλυμα βορίου ρέει προς το δοχείο του αντιδραστήρα (Σχήμα 3.7) [19].



Σχήμα 3-6 Δεξαμενή υπό χαμηλή πίεση [19].

3.4.3 Έγχυση ασφαλείας με χρήση βαλβίδων ανακυκλοφορίας.

Ο συγκεκριμένος μηχανισμός έγχυσης αποτελείται από εφεδρικές βαλβίδες εξαερισμού και βαλβίδες ανακυκλοφορίας (Σχήμα 3.8). Το σύστημα αφαιρεί την υπολειπόμενη θερμότητα του πυρήνα ανοίγοντας τις βαλβίδες εξαερισμού. Ο ατμός από το δοχείο πίεσεως πηγαίνει στο περίβλημα, όπου ψύχεται και συμπυκνώνεται στην εσωτερική του επιφάνεια, λόγω της δεξαμενής νερού που το περιβάλλει. Το συμπυκνωμένο νερό συσσωρεύεται στο κάτω μέρος του περιβλήματος. Όταν το επίπεδο του νερού ανέβει πάνω από τις βαλβίδες ανακυκλοφορίας, αυτές ανοίγουν, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια διαδρομή φυσικής κυκλοφορίας από το περίβλημα προς τον πυρήνα του αντιδραστήρα (μοντέλο NuScale) [19].



Σχήμα 3-7 Έγχυση ασφαλείας με χρήση βαλβίδων ανακύκλωσης [19].

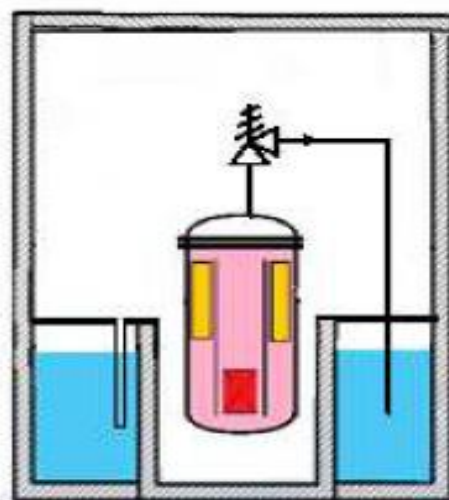
3.5 Περίβλημα αντιδραστήρα (containment).

Το περίβλημα του αντιδραστήρα έχει τις εξής βασικές λειτουργίες:

- Διατήρηση στο εσωτερικό του περιβλήματος των ραδιενεργών ουσιών που εμφανίζονται είτε στην κατάσταση ομαλής λειτουργίας, είτε σε συνθήκες ατυχήματος.
- Προστασία από υπερπιέσεις που μπορεί να εμφανιστούν στη διάρκεια λειτουργίας του αντιδραστήρα.
- Προστασία της εγκατάστασης έναντι ακραίων φυσικών κινδύνων καθώς και ανεπιθύμητων εξωτερικών παραγόντων.
- Θωράκιση της ακτινοβολίας στην ορθή λειτουργία και σε ενδεχόμενο ατύχημα.

Η ακεραιότητα του περιβλήματος πρέπει να διατηρείται σε οποιαδήποτε περίπτωση, συνεπώς η θερμοκρασία και η πίεση μέσα σε αυτό πρέπει να ελέγχονται και να διατηρούνται κάτω από τα επιτρεπτά όρια. Οι κατασκευές περιβλημάτων αντέχουν πιέσεις εύρους 2,5-5,5 atm [19].

3.5.1 Περίβλημα καταστολής πίεσης.

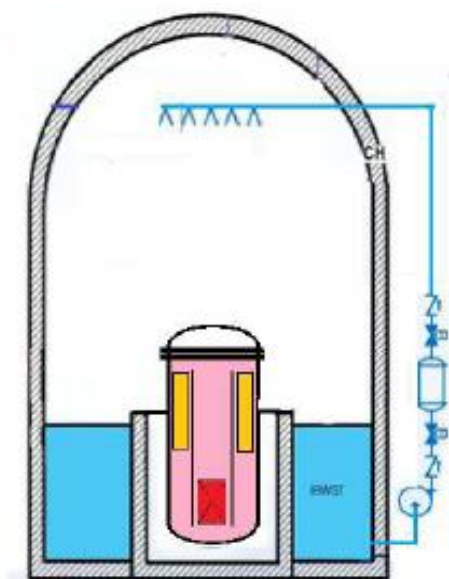


Σχήμα 3-8 Περίβλημα καταστολής πίεσης [19].

Ορισμένοι σχεδιασμοί περιβλημάτων αντιδραστήρων χρησιμοποιούν δεξαμενή νερού προκειμένου να καταστείλουν την υψηλή πίεση. Ο ατμός υψηλής θερμοκρασίας που απελευθερώνεται από το δοχείο του αντιδραστήρα (μέσω οπών, βαλβίδων εκτόνωσης καθώς και συστημάτων αυτόματης αποσυμπίεσης - *Automatic Depressurization System ADSs*) κατευθύνεται προς μια δεξαμενή (Σχήμα 3.9), όπου συμπυκνώνεται, μειώνοντας έτσι την αυξημένη πίεση του περιβλήματος. Αυτός ο τύπος μετριασμού πίεσης χρησιμοποιείται σε μοντέλα *BWRs* εδώ και πολλά χρόνια. Μοντέλα *SMRs* που εφαρμόζουν αυτή την κατασκευή είναι το *CAREM25* και το *IRIS* [19].

3.5.2 Περίβλημα σκυροδέματος με σύστημα καταιονισμού.

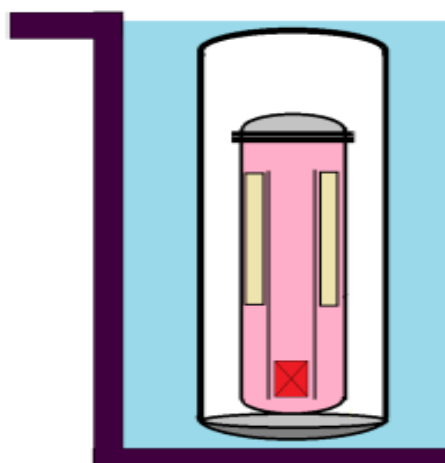
Μία μέθοδος για τον έλεγχο της πίεσης είναι ο ψεκάσμος νερού μέσα στο περίβλημα. Αυτή η προσέγγιση έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε υπάρχοντα σχέδια *PWRs* όπου η δομή που περιβάλλει τον αντιδραστήρα κατασκευάζεται από σκυρόδεμα. Το σύστημα χρησιμοποιεί αντλίες, που βρίσκονται εκτός του περιβλήματος, για την έγχυση νερού από τις δεξαμενές προς τους καταιονιστήρες που βρίσκονται στον θόλο πάνω από τον αντιδραστήρα (Σχήμα 3.10). Το ψεκαζόμενο νερό συμπυκνώνει τον υπάρχοντα ατμό και μειώνει την πίεση στο εσωτερικό του περιβλήματος. Μοντέλο *SMR* που κατασκευάζεται κατ' αυτόν τον τρόπο είναι το *SMART* [19].



Σχήμα 3-9 Περίβλημα με σύστημα καταιονισμού [19].

Βυθισμένο μεταλλικό περίβλημα. Καθώς η ισχύς ενός *SMR* δεν ξεπερνά τα 300 MWe, η συνολική διάσταση του πυρήνα και του δοχείου του αντιδραστήρα είναι επίσης μικρές. Συνεπώς, το περιορισμένο μέγεθος επιτρέπει τη βύθιση ενός χαλύβδινου περιβλήματος σε μια δεξαμενή νερού προκειμένου να επιτευχθεί παθητική ψύξη της κατασκευής (Σχήμα 3.11). Έτσι επιτρέπεται η συμπύκνωση του ατμού υψηλής θερμοκρασίας μέσα στο περίβλημα και την ίδια στιγμή η απαγωγή της θερμότητας με μηχανισμούς μεταφοράς και συναγωγής από τον τοίχο του περιβλήματος στην εξωτερική δεξαμενή. Το περίβλημα ψύχεται πάντα από το νερό της δεξαμενής που το περιβάλλει, με αποτέλεσμα οποιαδήποτε ποσότητα ατμού ενδέχεται να απελευθερωθεί από το δοχείο του αντιδραστήρα, είτε λόγω αστοχίας κάποιας βαλβίδας ασφαλείας, είτε εξαιτίας κάποιου αναπάντεχου *LOCA*, μπορεί αμέσως να συμπυκνωθεί. Αυτό συνεπάγεται τη διατήρηση του αποθέματος νερού, αλλά και των ραδιενεργών υλικών μέσα στο περίβλημα. Η αποτελεσματικότητα της συμπύκνωσης ενισχύεται με την εκκένωση του αέρα του περιβάλλοντος χώρου μεταξύ του δοχείου πίεσης και του περιβλήματος, κατά την κανονική λειτουργία. Η

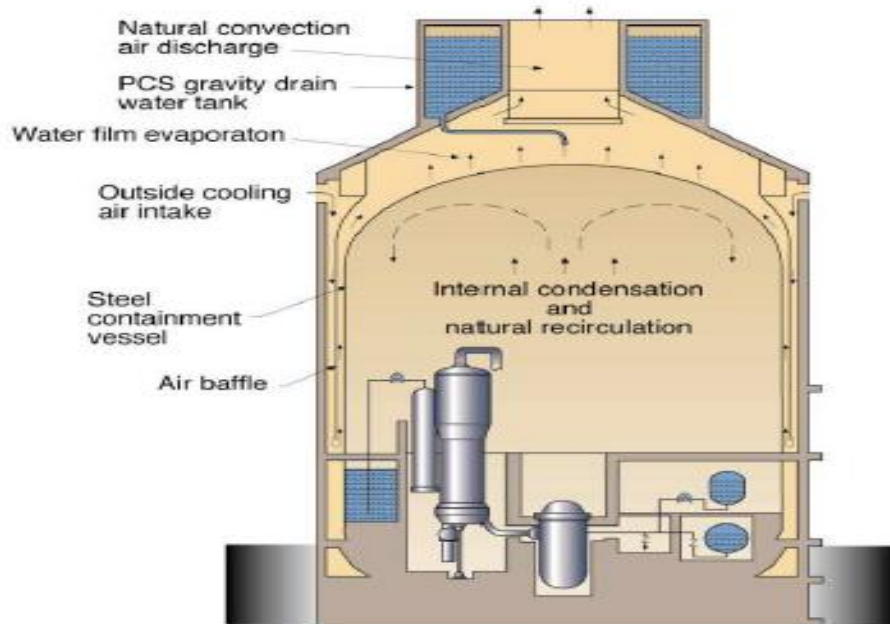
κατάσταση κενού που δημιουργείται μειώνει την απώλεια θερμότητας και εξαλείφει την ανάγκη μόνωσης του δοχείου αντιδραστήρα. Μειώνει επίσης την πιθανότητα έκρηξης υδρογόνου κατά τη διάρκεια σοβαρού ατυχήματος μιας και η ποσότητα του οξυγόνου είναι περιορισμένη. Μοντέλο *SMR* που κατασκευάζεται με τον παραπάνω τρόπο είναι το *NuScale*, ενώ παρόμοια προσέγγιση χρησιμοποιείται επίσης από την *Westinghouse* [19].



Σχήμα 3-10 Βυθισμένο χαλύβδινο περίβλημα [19].

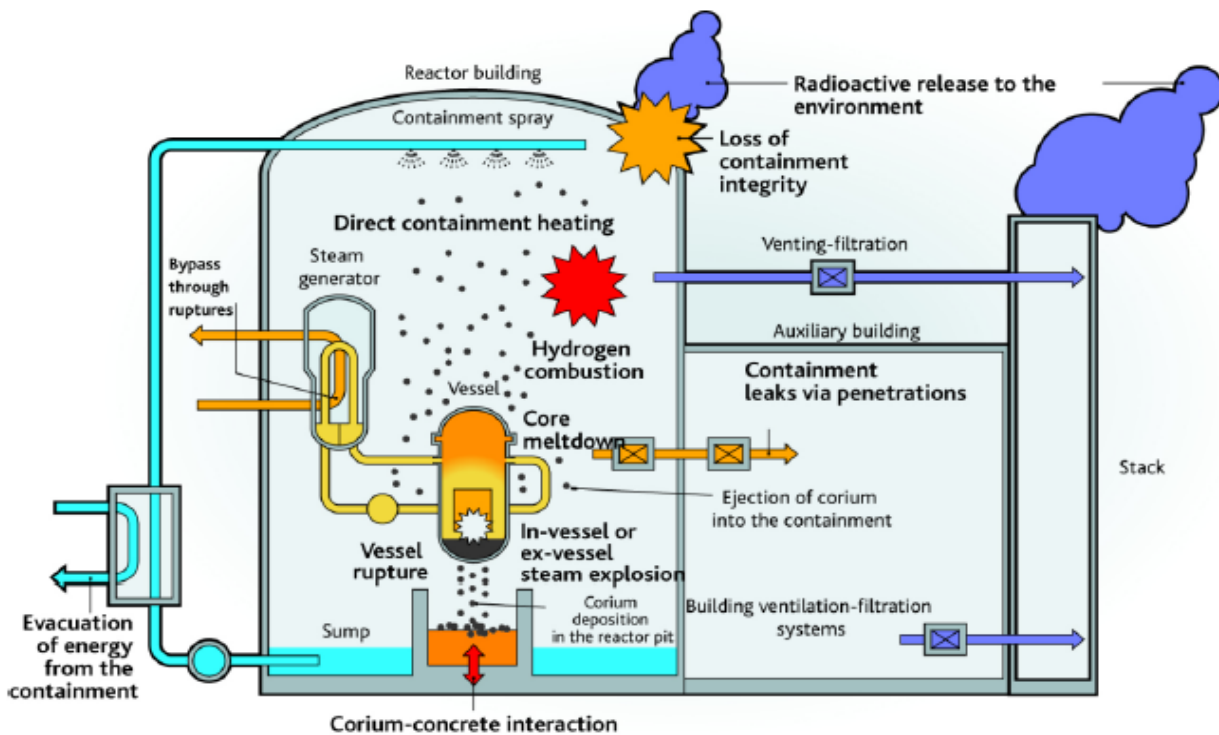
3.5.3 Παθητική ψύξη μεταλλικού περιβλήματος.

Σε μερικούς προηγμένους αντιδραστήρες χρησιμοποιείται παραλλαγή του μεταλλικού περιβλήματος της προηγούμενης κατηγορίας. Ένα μεγάλο όγκου μεταλλικό περίβλημα αντιδραστήρα περιβάλλεται από ένα κτήριο ενισχυμένου σκυροδέματος προκειμένου να αντέξει την αύξηση της πίεσης κατά τη διάρκεια ενός *LOCA*. Το περίβλημα ψύχεται παθητικά με ροή αέρα ή με καταιονισμό ύδατος (Σχήμα 3.12), με αποτέλεσμα ο ατμός να συμπυκνώνεται στην εσωτερική επιφάνεια του περιβλήματος. Η συγκεκριμένη κατασκευή παθητικής ψύξης εφαρμόζεται στο μοντέλο *AP1000*, ενώ παρόμοια ψύχεται και το *mPower* [19].



Σχήμα 3-11 Παθητική ψύξη περιβλήματος (μοντέλο AP1000) [19].

3.6 Αντιμετώπιση σοβαρών ατυχημάτων – Περιορισμός ραδιενεργού υλικού.

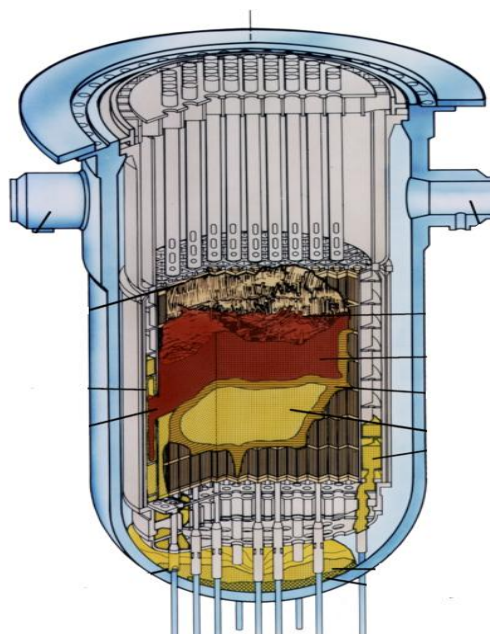


Σχήμα 3-12 Σοβαρά ατυχήματα και τρόποι διαρροής ακτινοβολίας στο περιβάλλον [24].

Υπάρχουν διάφορα σοβαρά ατυχήματα που μπορούν να συμβούν σε έναν αντιδραστήρα και στο περίβλημά του. Στο Σχήμα 3.13 φαίνονται μερικά από αυτά, όπως η τήξη του πυρήνα του αντιδραστήρα, η ρήξη του δοχείου του αντιδραστήρα, η ρήξη του περιβλήματος, η έκρηξη υδρογόνου στο εσωτερικό του περιβλήματος και η διαρροή ραδιενεργούς ακτινοβολίας στο περιβάλλον. Στη συνέχεια αναλύονται διάφοροι μηχανισμοί που αποσκοπούν στην πρόληψη ή την αντιμετώπιση αυτών των ατυχημάτων [24].

3.6.1 Σύστημα συγκράτησης στο εσωτερικό του περιβλήματος.

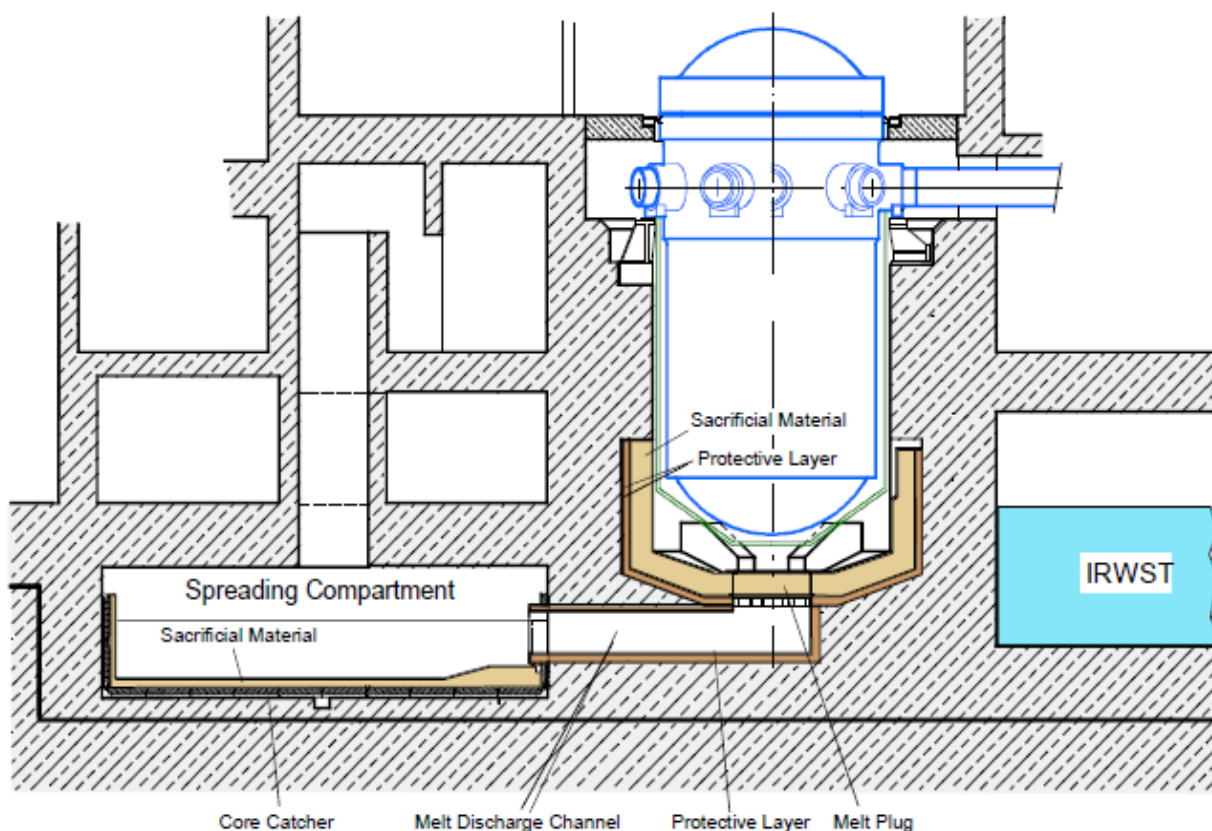
Οι περισσότεροι σχεδιαστές σύγχρονων αντιδραστήρων χρησιμοποιούν συγκεκριμένες στρατηγικές αντιμετώπισης σοβαρών ατυχημάτων. Μία από αυτές είναι η συγκράτηση του *corium* μέσα στο περίβλημα. *Corium* ονομάζεται το τετηγμένο μίγμα σχάσιμων υλικών που μοιάζει με λάβα και εμφανίζεται μετά από ατύχημα και τήξη του πυρήνα του αντιδραστήρα (Σχήμα 3.14). Σε αυτή την περίπτωση, η εξωτερική επιφάνεια του δοχείου αντιδραστήρα ψύχεται με νερό που περιέχεται στο γενικότερο περίβλημα της κατασκευής. Η κοιλότητα του δοχείου του αντιδραστήρα πλημμυρίζεται έτσι ώστε το κάτω τμήμα του δοχείου να είναι πάντα βυθισμένο στο νερό κατά τη διάρκεια ενός σοβαρού ατυχήματος. Πολλά σύγχρονα μοντέλα χρησιμοποιούν αυτόν τον μηχανισμό (*SMART, IRIS, mPower*).



Σχήμα 3-13 Δημιουργία *corium* στο εσωτερικό του περιβλήματος [nrc.com].

Η παραπάνω διαδικασία συνήθως συνδυάζεται με ένα σύστημα ψύξης του περιβλήματος, παθητικό ή ενεργητικό, για να εξασφαλιστεί ότι το απόθεμα νερού όπου είναι βυθισμένο το δοχείο του αντιδραστήρα θα διατηρηθεί επαρκώς ψυχρό για παρατεταμένο χρονικό διάστημα [19].

3.6.2 Συλλέκτης τετηγμένου πυρήνα.

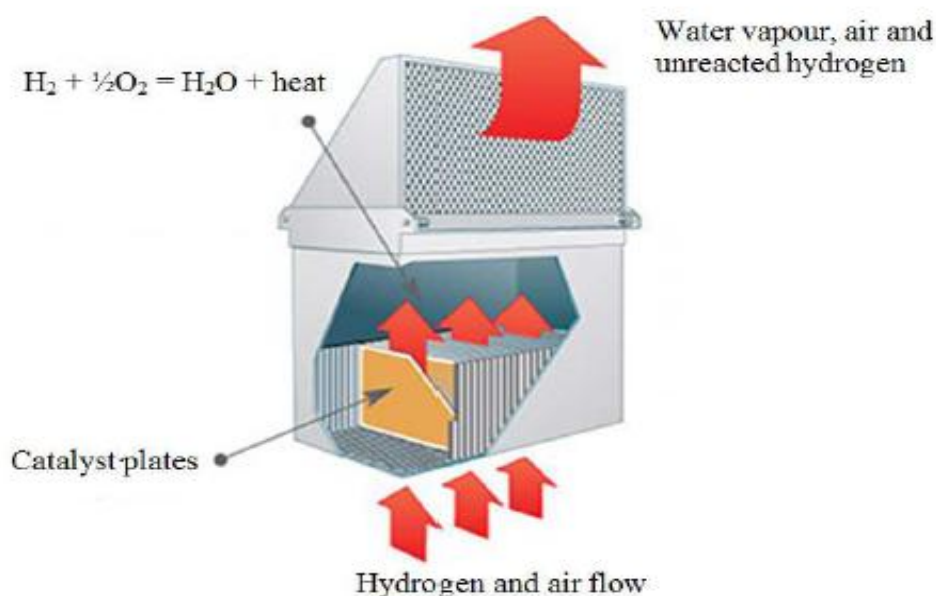


Σχήμα 3-14 Συλλέκτης corium [24].

Προκειμένου να αποτραπεί η διαφυγή του ραδιενεργού υλικού ενός τετηγμένου πυρήνα από το περίβλημα συγκράτησης, υπάρχει μία συγκεκριμένη δομή που τοποθετείται κάτω από το δοχείο του αντιδραστήρα. Πρόκειται για έναν χώρο κατασκευασμένο από κεραμικό σκυρόδεμα ανθεκτικό στη θερμότητα, προκειμένου να εμποδίσει τη διείσδυση του τετηγμένου υλικού μέσα στο έδαφος. Ο τετηγμένος πυρήνας (και το υπόλοιπο υλικό του δοχείου αντιδραστήρα) απλώνεται σε όλο τον όγκο του συλλέκτη, ώστε να μειωθεί η θερμική του πυκνότητα (Σχήμα 3.15). Παράλληλα υπάρχει μηχανισμός ψύξης ώστε το υλικό να διατηρείται σταθερό για παρατεταμένη περίοδο. Μία μέθοδος ψύξης είναι ο πλημμυρισμός με νερό. Ο συλλέκτης βρίσκεται μέσα σε δεξαμενή νερού και το θερμό corium λιώνει τις μεταλλικές της πύλες, ώστε το νερό να εισέλθει στο χώρο που βρίσκεται το θερμό τήγμα και όχι το αντίθετο προς αποφυγή έκρηξης ατμού [19].

3.6.3 Μηχανισμός ελέγχου υδρογόνου.

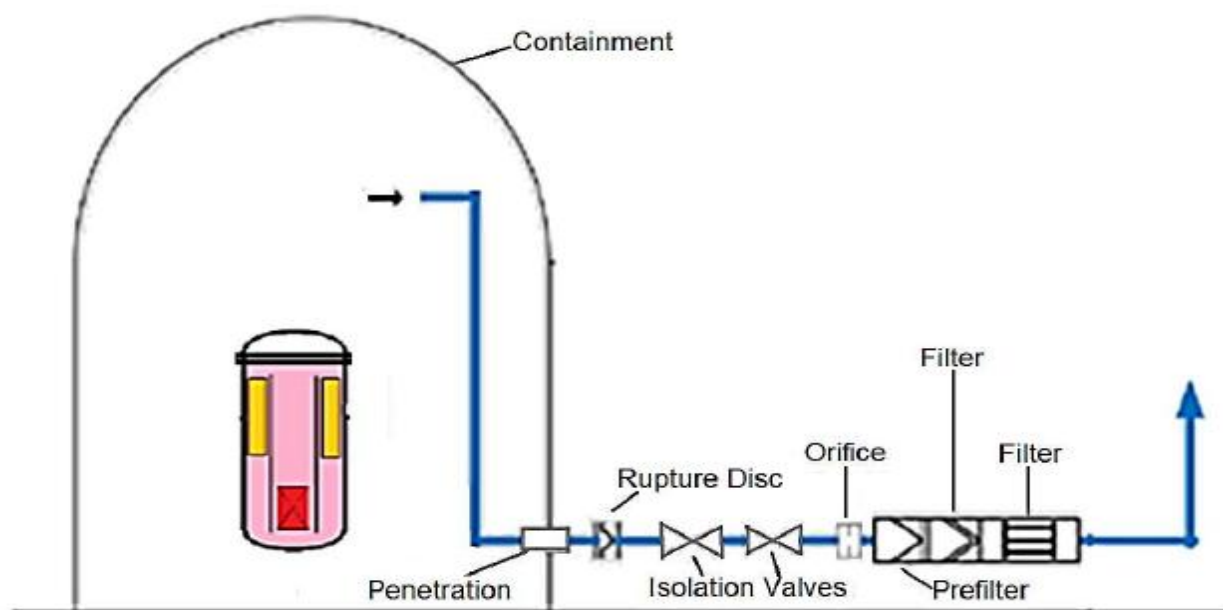
Ως σοβαρό θεωρείται το ατύχημα που προκαλείται μετά από αστοχία στα πυρηνικά καύσιμα. Για παράδειγμα, όταν το κράμα ζιρκονίου του περιβλήματος του καυσίμου υπερθερμανθεί, τότε αντιδρά με ατμό υψηλής θερμοκρασίας και παράγει υδρογόνο. Η οξείδωση του ζιρκονίου είναι μια εξώθερμη αντίδραση που οδηγεί στην παραγωγή υδρογόνου. Το υδρογόνο μπορεί να αντιδράσει εκρηκτικά αν συναντήσει οξυγόνο (σωστής στοιχειομετρικής αναλογίας). Η ακριβής θέση της έκρηξης εξαρτάται από τις τοπικές συγκεντρώσεις και θερμοκρασίες των δύο αερίων, γεγονός που συνεπάγεται αυξήσεις πίεσης μεγαλύτερες από την ονομαστική πίεση του περιβλήματος. Συνεπώς, η συγκέντρωση του υδρογόνου πρέπει να μειώνεται και να ελέγχεται προκειμένου να διατηρείται η ακεραιότητα του περιβλήματος.



Σχήμα 3-15 Παθητικός αυτοκαταλυτικός αναμίκτης υδρογόνου [19].

Αυτό δύναται να συμβεί εάν το υδρογόνο αντιδράσει εν τη γενέσει του με το οξυγόνο, με τη χρήση παθητικών αυτοκαταλυτικών αναμικτών υδρογόνου στο περίβλημα (Σχήμα 3.16). Οι αναμίκτες χρησιμοποιούνται συνήθως σε καινούρια μοντέλα SMRs (SMART, mPower, IRIS και CAREM25), μπορούν ωστόσο να τοποθετηθούν και σε παλαιότερους σχεδιασμούς. Κάποια σχέδια συνδυάζουν τον αναμίκτη υδρογόνου με την εκ των προτέρων αδρανοποίηση της ατμόσφαιρας του περιβλήματος με άζωτο προκειμένου να απομακρυνθεί το οξυγόνο (IRIS) [19].

3.6.4 Σύστημα φιλτραρίσματος εξαερισμού περιβλήματος.



Σχήμα 3-16 Φιλτράρισμα εξαερισμού περιβλήματος [19].

Σε περίπτωση ατυχήματος, ειδικά όταν η πίεση μέσα στο περίβλημα αυξάνεται έως ότου φτάσει ή και υπερβεί το όριο σχεδιασμού του, χρησιμοποιείται εξαερισμός για την αποφυγή της καταστροφικής υπερπίεσης. Το φιλτράρισμα του εξαερισμού επιβάλλεται προκειμένου να αποτραπεί η ανεξέλεγκτη απελευθέρωση ραδιενεργών αερίων από το καύσιμο του πυρήνα στο περιβάλλον (Σχήμα 3.17). Οι περισσότεροι SMRs χρησιμοποιούν τέτοιου είδους συστήματα εξαερισμού του περιβλήματος [19].

3.7 Επίπεδα προστασίας σε σύγχρονους μικρούς αρθρωτούς αντιδραστήρες.

Η πηγαία αντιμετώπιση σφαλμάτων (*Defence in depth - DiD*) είναι μια έννοια που εφαρμόζεται από τις απαρχές ανάπτυξης της πυρηνικής ενέργειας προκειμένου να επιτευχθεί η ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων. Σκοπός της είναι να αντισταθμίσει πιθανά σφάλματα που οφείλονται σε ανθρώπινο παράγοντα ή σε αστοχία του εξοπλισμού, μέσω διαφόρων αλληλοεπικαλυπτόμενων επιπέδων προστασίας, ώστε αστοχίες που ξεπερνούν ένα επίπεδο να προλαμβάνονται από κάποιο επόμενο. Πρόκειται για μια καθιερωμένη φιλοσοφία ασφάλειας που εφαρμόζεται στον σχεδιασμό και την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση των πυρηνικών εγκαταστάσεων, προκειμένου να επιτευχθεί η πρόληψη και ο μετριασμός των ατυχημάτων, καθώς και η διασφάλιση της δημόσιας υγείας. Η προστασία παρέχεται με πολλαπλά και ανεξάρτητα μέσα σε κάθε επίπεδο, έτσι ώστε η ενδεχόμενη αστοχία να εντοπιστεί έγκαιρα και να αποφευχθεί ή να διορθωθεί με

κατάλληλα μέτρα. Προλαμβάνοντας την αστοχία και το ατύχημα, προστατεύεται το κοινό και το περιβάλλον από τυχαίες εκλύσεις ακτινοβολίας. Σχεδόν όλα τα σχέδια *SMRs* επιδιώκουν να ενισχύσουν το πρώτο και τα επόμενα επίπεδα άμυνας ενσωματώνοντας παθητικά χαρακτηριστικά ασφαλείας. Το μικρότερο μέγεθος πυρήνα και η μικρότερη ισχύς διευκολύνουν την παθητική απαγωγή της θερμότητας. Ο κύριος στόχος είναι να εξαλειφθούν ή να αποφευχθούν τα ατυχήματα εν τη γενέσει τους, καθώς και οι συνέπειές τους.

Στους *Πίνακες 3.1-3.5* παρουσιάζονται τα βασικότερα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά που συνιστούν την πηγαία αντιμετώπιση σφαλμάτων και τα επίπεδα προστασίας στους σύγχρονους μικρούς αντιδραστήρες. Παρατηρείται, καθώς τα επίπεδα εξελίσσονται, πως βασικός σκοπός των σχεδιαστικών χαρακτηριστικών είναι η αλληλοεπικάλυψη των αστοχιών, ώστε ιδανικά να μην κλιμακωθούν οι συνθήκες που θα επιτρέψουν την γέννηση σοβαρού ατυχήματος και διαρροής ακτινοβολίας.

1^ο επίπεδο προστασίας

Ο στόχος των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών του πρώτου επιπέδου προστασίας (*Πίνακας 3.1*) είναι η αποφυγή αποκλίσεων από την κανονική λειτουργία και η αποφυγή βλαβών του συστήματος. Αυτό προϋποθέτει ότι η μονάδα είναι άρτια σχεδιασμένη και κατασκευασμένη, ενώ λειτουργεί και συντηρείται σύμφωνα με τα κατάλληλα επίπεδα ποιότητας. Σε αυτό το επίπεδο, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των κατάλληλων υλικών σχεδιασμού και στον έλεγχο της κατασκευής των εξαρτημάτων και των εγκαταστάσεων. Η μείωση της πιθανότητας εσωτερικών κινδύνων, η μείωση των συνεπειών μιας αστοχίας συμβάντος και ο μετριασμός της πιθανής πηγής προέλευσης ενός ατυχήματος, συνθέτουν το πρώτο επίπεδο άμυνας. Επιπλέον, δίνεται προσοχή στις διαδικασίες που σχετίζονται με τον σχεδιασμό, την κατασκευή και την συντήρηση των εγκαταστάσεων, όπως επίσης με την επιθεώρηση και τον έλεγχο τους.

Πίνακας 3-1 Πρώτο επίπεδο προστασίας: αποφυγή αποκλίσεων από την κανονική λειτουργία, αποφυγή βλαβών [19].

	Κατασκευαστικό χαρακτηριστικό	Σκοπός σχεδιασμού	Μοντέλα <i>SMRs</i>
1	Χαμηλή έξοδος ισχύος του πυρήνα.	Μεγαλύτερα θερμοϋδραυλικά όρια.	<i>IRIS, CAREM25, NuScale, mPower</i>
2	Υψηλή θερμική αγωγιμότητα των καυσίμων.	Χαμηλότερη θερμοκρασία καυσίμου και υψηλότερη ανοχή σε περίπτωση αστοχίας καυσίμου.	<i>KLT-40S</i>
3	Ατμογεννήτριες με χαμηλότερη πίεση στο πρωτεύον κύκλωμα.	Μείωση, αποκλεισμός των ατυχημάτων απώλειας ψυκτικού (<i>LOCA</i>).	<i>CAREM25, IRIS, ACP100, SMART, RITM-200, VK-300, NuScale, MPower, Westinghouse SMR</i>
4	Συμπαγής αρθρωτή κατασκευή αντιδραστήρα.	Μειωμένη πιθανότητα <i>LOCA</i> .	<i>KLT-40S</i>
5	Στεγανοποίηση συστήματος ψύξης αντιδραστήρα.	Μειωμένη πιθανότητα <i>LOCA</i> .	<i>KLT-40S</i>
6	Περίβλημα στο πρωτεύον κύκλωμα πίεσης.	Εξάλειψη <i>LOCA</i> που οφείλονται σε υπερπίεσεις.	<i>NuScale</i>
7	Βύθιση αντλιών.	Εξάλειψη εμπλοκών στις αντλίες και στα <i>LOCAs</i> .	<i>IRIS, SMART, Westinghouse SMR</i>
8	Φυσική κυκλοφορία υγρών.	Εξάλειψη ατυχημάτων απώλειας ροής.	<i>CAREM25, ABV-6M, VK-300, NuScale, SMR-160</i>
9	Μηχανισμός οδήγησης ράβδων ελέγχου (<i>CRDM</i>) στο δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα.	Εξάλειψη ατυχημάτων εκτίναξης ράβδων ελέγχου.	<i>CAREM25, IRIS, Westinghouse SMR</i>
10	Υψηλό απόθεμα νερού στον πυρήνα.	Μεγάλη θερμική αδράνεια, μειωμένες απαιτήσεις απομάκρυνσης θερμότητας.	<i>IRIS, CAREM25</i>
11	Αρνητικός συντελεστής θερμοκρασίας καυσίμου.	Έλεγχος αλυσιδωτής αντίδρασης.	Όλα τα μοντέλα.

2^ο επίπεδο προστασίας

Ο στόχος των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών του δεύτερου επιπέδου προστασίας (Πίνακας 3.2) είναι η ανίχνευση και η παρακολούθηση αποκλίσεων από την κανονική λειτουργική κατάσταση προκειμένου να αποφευχθούν οι συνθήκες που επιτρέπουν και κλιμακώνουν ένα πιθανό ατύχημα. Άλλωστε, υπάρχουν αστοχίες που θα συμβούν σίγουρα στη διάρκεια ζωής ενός πυρηνικού σταθμού, παρά την προσοχή που δίνεται για την πρόληψή τους. Το δεύτερο επίπεδο προστασίας απαιτεί την παροχή ειδικών συστημάτων ασφάλειας, όπως αυτά καθορίζονται στην ανάλυση της ορθής λειτουργίας, για την πρόληψη ή την ελαχιστοποίηση των πιθανών ζημιών από παρόμοια συμβάντα που ξεπερνούν το πρώτο επίπεδο προστασίας.

Πίνακας 3-2 Δεύτερο επίπεδο προστασίας: ανίχνευση και παρακολούθηση αποκλίσεων από την κανονική λειτουργία [19].

	Κατασκευαστικό χαρακτηριστικό	Σκοπός σχεδιασμού	Μοντέλα SMRs
1	Ενεργητικά συστήματα ρύθμισης και ελέγχου.	Έγκαιρη ανίχνευση μη φυσιολογικής λειτουργίας και ενδεχόμενων αστοχιών.	Όλα τα μοντέλα.
2	Συντελεστές ελέγχου αντιδραστικότητας.	Αυξημένος αυτοέλεγχος μη φυσιολογικής λειτουργίας.	Όλα τα μοντέλα.
3	Σχετικά υψηλό απόθεμα ψυκτικού στο πρωτεύον, μεγάλη θερμική αδράνεια.	Αργή εξέλιξη των μεταβατικών καταστάσεων στη μη φυσιολογική λειτουργία.	IRIS, CAREM25
4	Διαρροή πριν το επερχόμενο ατύχημα.	Προειδοποίηση ατυχήματος.	KLT-40S
5	Παθητικά ή ενεργητικά συστήματα απενεργοποίησης αντιδραστήρα.	Τερματισμός λειτουργίας αντιδραστήρα.	Όλα τα μοντέλα.
6	Χρήση ψηφιακής τεχνολογίας.	Βελτιωμένη διεπαφή ανθρώπου-αντιδραστήρα.	NuScale, mPower, ACP100

3^ο επίπεδο προστασίας

Όσον αφορά τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του τρίτου επιπέδου προστασίας (Πίνακας 3.3), υποτίθεται ότι η κλιμάκωση ορισμένων αναμενόμενων λειτουργικών περιστατικών και αστοχιών δεν μπόρεσε να αποφευχθεί σε κάποιο από τα δύο προηγούμενα επίπεδα και δημιουργήθηκε ένα σοβαρότερο πρόβλημα λειτουργίας. Για την αντιμετώπιση του χρησιμοποιούνται επιπλέον παθητικά χαρακτηριστικά ασφαλείας, καθώς και πρόσθετος εξοπλισμός και έλεγχος των συνεπειών, ώστε να επιτευχθεί η σταθερή και ομαλή λειτουργία της πυρηνικής εγκατάστασης. Απαιτούνται λοιπόν χαρακτηριστικά ασφαλείας ικανά να οδηγήσουν τον

αντιδραστήρα αρχικά σε μία ελεγχόμενη κατάσταση και εν συνεχεία σε κατάσταση ασφαλούς τερματισμού λειτουργίας, διατηρώντας τουλάχιστον ένα εμπόδιο για τον περιορισμό και τη συγκράτηση ραδιενεργού υλικού.

Πίνακας 3-3 Τρίτο επίπεδο προστασίας: αποφυγή σοβαρών προβλημάτων λειτουργίας [19].

	Κατασκευαστικό χαρακτηριστικό	Σκοπός σχεδιασμού	Μοντέλα SMRs
1	Συντελεστές ελέγχου αντιδραστικότητας.	Αυξημένος αυτοέλεγχος μη φυσιολογικής λειτουργίας.	Όλα τα μοντέλα.
2	Σχετικά υψηλό απόθεμα ψυκτικού στο πρωτεύον.	Αργή εξέλιξη των μεταβατικών καταστάσεων λόγω μη φυσιολογικής λειτουργίας.	<i>IRIS, CAREM25</i>
3	Υψηλή θερμική επάρκεια ολόκληρης της πυρηνικής εγκατάστασης.	Περιορισμός της αύξησης θερμοκρασίας στη διάρκεια ενός ατυχήματος.	<i>KLT-40S</i>
4	Σύστημα απαλής συμπίεσης.	Απόσβεση διαταραχών πίεσης στη διάρκεια ατυχημάτων.	<i>KLT-40S, RITM-200</i>
5	Περιορισμός της ακούσιας κίνησης των ράβδων ελέγχου.	Περιορισμός της αντιδραστικότητας κατά τη διάρκεια ατυχήματος.	<i>KLT-40S</i>
6	Διάφορα (και επιπλέον) συστήματα απενεργοποίησης αντιδραστήρα και απαγωγής θερμότητας.	Αυξημένη αξιοπιστία ασφαλούς λειτουργίας.	Όλα τα μοντέλα.
7	Εισαγωγή των ράβδων ελέγχου στον πυρήνα, οδηγούμενων από την βαρύτητα.	Τερματισμός λειτουργίας αντιδραστήρα.	<i>KLT-40S, CAREM25, ACP100, IRIS, SMART, VBER-300, ABV-6M, NuScale, Westinghouse SMR</i>
8	Έλεγχος ασφαλείας ράβδων ελέγχου.	Τερματισμός λειτουργίας αντιδραστήρα.	<i>IRIS</i>
9	Συσκευή έγχυσης διαλύματος βορίου υψηλής πίεσης, οδηγούμενη από την βαρύτητα.	Τερματισμός λειτουργίας αντιδραστήρα.	<i>CAREM25, AHWR300</i>
10	Συσκευή έγχυσης διαλύματος βορίου, που ενεργοποιείται από δίσκους ρήξης.	Τερματισμός λειτουργίας αντιδραστήρα και μη αποκάλυψη του πυρήνα σε περίπτωση <i>LOCA</i> .	<i>CAREM25</i>
11	Παθητική ψύξη του πυρήνα με μεταφορά θερμότητας.	Παθητική απαγωγή θερμότητας.	<i>CAREM25, AHWR-300, ABV-6M, VK 300, NuScale, SMR-160</i>
12	Βαλβίδες ασφαλείας,	Προστασία του δοχείου του	<i>IRIS, CAREM25</i>

	εκτόνωσης.	αντιδραστήρα από την υπερπίεση.	
13	Παθητικοί μηχανισμοί οδηγούμενοι από τη βαρύτητα.	Εξασφάλιση ότι ο πυρήνας μένει καλυμμένος σε κάθε περίπτωση, μετά από ένα <i>LOCA</i> .	<i>IRIS, ACP100</i>

4^ο επίπεδο προστασίας

Στόχος των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών του τέταρτου επιπέδου προστασίας (Πίνακας 3.4) είναι η διαχείριση σοβαρών ατυχημάτων -εφόσον ο αρχικός σχεδιασμός έχει αποτύχει- και η διασφάλιση ότι η έκλυση ραδιενέργειας περιορίζεται και ει δυνατόν συγκρατείται. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με συμπληρωματικά μέτρα και διαδικασίες για την πρόληψη της εξέλιξης των ατυχημάτων, καθώς και με την άμβλυνση των συνεπειών τους, πέραν των διαδικασιών διαχείρισης.

Πίνακας 3-4 Τέταρτο επίπεδο προστασίας: διαχείριση σοβαρών ατυχημάτων και περιορισμός ραδιενέργειας [19].

	Κατασκευαστικό χαρακτηριστικό	Σκοπός σχεδιασμού	Μοντέλα <i>SMRs</i>
1	Χαμηλή έξοδος ισχύος του πυρήνα.	Περιορισμός ή αναβολή τήξης του πυρήνα.	<i>IRIS, CAREM25, NuScale, mPower</i>
2	Χαμηλό ποσοστό θέρμανσης των στοιχείων καυσίμου σε υποθετική αποκάλυψη του πυρήνα.	Πρόληψη της τήξης του πυρήνα εξαιτίας ενδεχόμενης αποκάλυψης του.	<i>CAREM25, mPower</i>
3	Παθητικό σύστημα ψύξης έκτακτης ανάγκης του πυρήνα.	Παροχή επαρκούς χρόνου για τον έλεγχο ατυχήματος.	<i>KLT-40S, IRIS, DMS, KLT-40S, CAREM25, AHWR300, Westinghouse SMR, ACP100, SMART, VK-300, NuScale, mPower, SMR-160</i>
4	Παθητικό σύστημα ψύξης του πυθμένα του δοχείου αντιδραστήρα.	Διατήρηση του τετηγμένου πυρήνα μέσα στο δοχείο.	<i>KLT-40S, CAREM25</i>
5	Παθητική πλημμύρα της κοιλότητας του αντιδραστήρα, μετά από ένα μικρό <i>LOCA</i>	Πρόληψη τήξης του αντιδραστήρα εξαιτίας ενδεχόμενης αποκάλυψης του.	<i>IRIS, VBER-300, mPower</i>
6	Περίβλημα (<i>containment</i>)	Πρόληψη απελευθέρωσης ραδιενεργού υλικού. Προστασία από εξωτερικούς παράγοντες.	Όλα τα μοντέλα.

7	Περίβλημα με επιπλέον εξωτερική προστασία ή διπλό περίβλημα.	Πρόληψη απελευθέρωσης ραδιενεργού υλικού. Προστασία από εξωτερικούς παράγοντες.	<i>IRIS, CAREM25, KLT-40S, VVER-300, VK-300, mPower, NuScale, SMR-160, Westinghouse SMR</i>
8	Παθητική ψύξη περιβλήματος.	Μείωση της πίεσης και περιορισμός της απελευθέρωσης ραδιενέργειας.	<i>KLT-40S, SMART, AHWR300, NuScale, ACP100, mPower</i>
9	Αδρανές περίβλημα.	Πρόληψη της ανάφλεξης υδρογόνου.	<i>IRIS</i>
10	Αυτοκαταλυτικός αναμίκτης υδρογόνου.	Πρόληψη της ανάφλεξης υδρογόνου.	<i>CAREM25, AHWR300, SMR-160</i>

5^ο επίπεδο προστασίας

Τα χαρακτηριστικά του πέμπτου και τελευταίου επιπέδου προστασίας (Πίνακας 3.5) έχουν ως στόχο τον περιορισμό της ακτινοβολίας και των συνεπειών της πιθανής έκλυσης ραδιενεργών υλικών που ενδέχεται να προκύψουν σε συνθήκες ατυχήματος. Αυτό απαιτεί την ύπαρξη μιας επαρκώς εξοπλισμένης μονάδας ελέγχου έκτακτης ανάγκης.

Πίνακας 3-5 Πέμπτο επίπεδο προστασίας: περιορισμός της ακτινοβολίας και των συνεπειών της πιθανής έκλυσης ραδιενεργών υλικών [19].

	Κατασκευαστικό χαρακτηριστικό	Σκοπός σχεδιασμού	Μοντέλα SMRs
1	Διοικητικά μέτρα.	Μείωση του ραδιολογικού κινδύνου και των συνεπειών που προκύπτουν από την απελευθέρωση του ραδιενεργού υλικού.	<i>KLT-40S</i>
2	Χαμηλότερη παραμένουσα θερμότητα.	Μικρότερη ανάγκη έκτακτου σχεδιασμού.	Όλα τα μοντέλα.

3.8 Εφαρμόσιμες απαιτήσεις ασφαλείας για την υλοποίηση των επιπέδων προστασίας στους αντιδραστήρες SMRs [IAEA - 2012].

Ο σχεδιασμός της πηγαίας αντιμετώπισης σφαλμάτων απαιτείται να εξασφαλίζει, στο βαθμό που είναι πρακτικά υλοποιήσιμο, ότι το πρώτο ή το δεύτερο επίπεδο προστασίας είναι ικανό -και αρκετό- να αποτρέψει την κλιμάκωση των συνθηκών ατυχήματος σε όλες τις εν δυνάμει αστοχίες ή αποκλίσεις από το φυσιολογικό που είναι πιθανό να συμβούν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ενός πυρηνικού σταθμού.

Τα επίπεδα προστασίας χρειάζεται να είναι αλληλοεπικαλυπτόμενα. Αυτό επιτυγχάνεται με την υλοποίηση των παρακάτω απαιτήσεων ασφαλείας [19]:

- Αξιόπιστη και υψηλής ποιότητας κατασκευή, ώστε να εξασφαλίζεται η ελαχιστοποίηση των αποτυχιών και των αποκλίσεων από την κανονική λειτουργία. Αποτροπή των ατυχημάτων στο μέτρο του δυνατού και εξασφάλιση ομαλής λειτουργίας ακόμη και κατόπιν ενδεχόμενης απόκλισης.
- Εξασφάλιση ελέγχου συμπεριφοράς των εγκαταστάσεων μέσω ενεργητικών και παθητικών χαρακτηριστικών, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται -ή ακόμη και να αποκλείονται- οι βλάβες και οι αποκλίσεις από την κανονική λειτουργία που απαιτούν ενεργοποίηση των συστημάτων ασφαλείας.
- Έλεγχος της εγκατάστασης και αυτόματη ενεργοποίηση των συστημάτων ασφαλείας, έτσι ώστε οι βλάβες και οι αποκλίσεις από την κανονική λειτουργία -που δεν εμπίπτουν στην ικανότητα παθητικής αντιμετώπισης- να μπορούν να διαχειριστούν άμεσα και αποτελεσματικά. Ελαχιστοποίηση πιθανότητας ανθρώπινης παρέμβασης και ενεργητικής ασφάλειας.
- Έλεγχος των δομών, των εξαρτημάτων και των ενεργειών προκειμένου να περιοριστούν οι συνέπειες των αποτυχιών και οι αποκλίσεις από την κανονική λειτουργία που υπερβαίνουν την ικανότητα των συστημάτων ασφαλείας.
- Παροχή πολλαπλών φυσικών εμποδίων στην απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον.

Τα επίπεδα προστασίας εφαρμόζονται στην πράξη με τον σχεδιασμό μιας σειράς φυσικών φραγμών περιορισμού του ραδιενεργού υλικού σε συγκεκριμένες τοποθεσίες. Ο αριθμός των φυσικών φραγμών που είναι απαραίτητοι εξαρτάται από τους πιθανούς κινδύνους (εσωτερικούς κι εξωτερικούς) και τις πιθανές συνέπειες των αποτυχιών [19].

Κεφάλαιο 4^ο

4 Οικονομική ανάλυση της αγοράς των αντιδραστήρων ισχύος *SMRs*.

Τα οικονομικά μεγέθη των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων, δηλαδή το κόστος αρχικής επένδυσης, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης καθώς και το κόστος των καυσίμων δεν είναι ακόμη ακριβώς υπολογίσιμα, ωστόσο οι σχεδιαστές των σύγχρονων αυτών αντιδραστήρων υποστηρίζουν ότι το κόστος κατασκευής ανά *kWe* των *SMRs* θα μπορούσε να είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο κόστος ενός προηγμένου αντιδραστήρα ελαφρού ύδατος (*LWR*). Αυτό θα ήταν εφικτό εάν υπήρχε μαζική παραγωγή *SMRs*, βελτιστοποίηση της αλυσίδας εφοδιασμού και μικρότερο κόστος χρηματοδότησης. Η ζήτηση μικρών αντιδραστήρων καθορίζει τα οικονομικά στοιχεία των εγκαταστάσεων παραγωγής και επομένως είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επίτευξη της ανταγωνιστικότητας των *SMRs*.

4.1 Κόστος επένδυσης, κατασκευής και λειτουργίας.

Το κόστος επένδυσης κατασκευής και λειτουργίας αποτελούν σημαντικές παραμέτρους για τη βιωσιμότητα των σχεδίων για την εμπορική χρήση *SMRs*. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα επιμέρους κόστη και καταδεικνύονται οι παράγοντες που τα επηρεάζουν.

4.1.1 Κόστος επενδύσεων.

Όπως συμβαίνει και με τους υπάρχοντες προηγμένους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος, το κόστος επένδυσης ενός *SMR* περιλαμβάνει τη μηχανική σχεδίαση, την προμήθεια και την κατασκευή, καθώς και το κόστος των διαφόρων αδειών. Το συνολικό κόστος επένδυσης κεφαλαίου είναι ίσο με το κόστος λειτουργίας ανά *kWe* προσθέτοντας το κόστος χρηματοδότησης. Παρόλο που η οικονομία κλίμακας είναι ακόμη δυσμενής για τους *SMRs*, η εργοστασιακή παραγωγή μονάδων και οι βραχύτεροι χρόνοι κατασκευής θα μπορούσαν να μειώσουν το ανά *kWe* κόστος λειτουργίας. Οι εκτιμήσεις δείχνουν ότι ο συνδυασμός αυτών των παραγόντων μπορεί μελλοντικά να οδηγήσει σε συνολικό κόστος χαμηλότερο από τα υπάρχοντα σχέδια, ενώ προσφέρεται η δυνατότητα για καλύτερη διαχείριση του οικονομικού κινδύνου που σχετίζεται με κατασκευές μακράς διάρκειας και αυξημένου επενδυτικού κόστους.

Ένας άλλος παράγοντας με δυνατότητα μείωσης του κόστους παραγωγής σχετίζεται με τη διάρθρωση και τη διαχείριση του έργου. Η αύξηση του μέσου κόστους κεφαλαίου ανά *MWh* των *LWRs* την τελευταία δεκαετία οφείλεται κυρίως στους εξής παράγοντες:

- Στις συμφωνίες και την διαχείριση των οικονομικών κινδύνων των προμηθευτών (αύξηση του κόστους κατά 70%).
- Στην αύξηση των τιμών των βασικών εμπορευμάτων (25%).
- Στην αύξηση των δαπανών των ιδιοκτητών (περίπου 17,5%).

Τα παραπάνω στοιχεία υπερδιπλασίασαν το κόστος ανάληψης κατασκευής ενός συμβατικού αντιδραστήρα μεταξύ 2004 και 2012. Το κόστος επένδυσης ανά kWe θα μπορούσε να μειωθεί λόγω της πιθανής εξοικονόμησης που σχετίζεται με βελτιστοποιημένες αλυσίδες συναρμολόγησης. Φυσικά, αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιτυχή αδειοδότηση και εγκατάσταση του εργοστασίου κατασκευής των μονάδων, καθώς και άλλους παράγοντες που αναλύονται περαιτέρω στη συνέχεια [1,4].

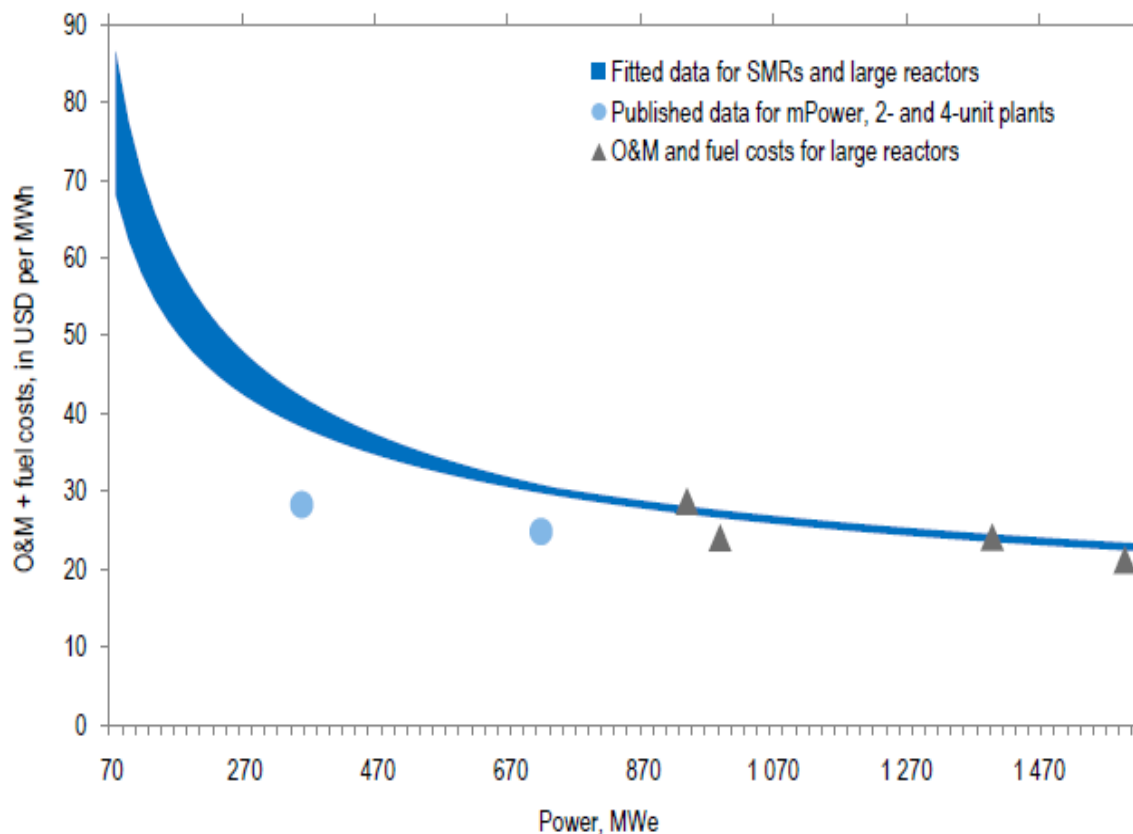
4.1.2 Λειτουργία, συντήρηση και κόστος καυσίμων.

Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης αφορά όλα τα έξοδα που σχετίζονται με τη λειτουργία και τη συντήρηση της εγκατάστασης, τη διαχείριση και τα υλικά προμηθειών, τα τέλη αδειοδότησης και τους μισθούς του προσωπικού.

Υπάρχει μία σταθερή συνιστώσα του κόστους λειτουργίας και συντήρησης που είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος της εγκατάστασης, για παράδειγμα, το κόστος ασφάλειας. Γενικότερα όμως, το κόστος λειτουργίας (ανά MWh) είναι υψηλότερο για έναν SMR απ' ό,τι για έναν προηγμένο LWR. Το κόστος καυσίμων αναμένεται να είναι υψηλότερο εξαιτίας του μικρότερου μεγέθους και άρα της πιο ανεπαρκούς εκμετάλλευσης. Επιπλέον, το κόστος θα εξαρτηθεί από την ικανότητα των κατασκευαστών να πείσουν εμπράκτως τις ρυθμιστικές αρχές ότι οι απαιτήσεις ασφαλούς λειτουργίας μπορούν να επιτευχθούν με μειωμένο προσωπικό.

Από την άλλη πλευρά, πολλά σχέδια SMRs προτείνουν καινοτόμες λύσεις για τη λειτουργία των εγκαταστάσεων, για παράδειγμα μία μόνο αίθουσα ελέγχου για περισσότερους του ενός αντιδραστήρες ή αντικατάσταση αντιδραστήρων αντί για επί τόπου ανεφοδιασμό. Επιπλέον, για εγκαταστάσεις που περιλαμβάνουν πολλαπλές μονάδες SMRs, το κόστος αναμένεται να μειωθεί, καθώς μειώνεται το κόστος μισθοδοσίας. Τα παραπάνω στοιχεία μπορούν να οδηγήσουν σε χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και συντήρησης, εφόσον φυσικά συναινέσουν και οι ρυθμιστικές αρχές με την κατάλληλη αδειοδότηση.

Το κόστος των καυσίμων εξαρτάται από το κόστος του ουρανίου, τις υπηρεσίες μετατροπής και εμπλουτισμού του, αλλά και το κόστος κατασκευής μιγμάτων καυσίμων. Είναι δύσκολο να υπάρξουν εκτιμήσεις για το κόστος καυσίμων των καινοτόμων SMRs, δεδομένου ότι για πολλούς από αυτούς ο σχεδιασμός δεν έχει ακόμη οριστικοποιηθεί. Λαμβάνοντας υπόψη την μικρότερη μέση κατανάλωση καυσίμου και το κόστος κατασκευής, το κόστος καυσίμου ανά MWh θα μπορούσε να είναι υψηλότερο για τους SMRs ελαφρού ύδατος από ό,τι για τους προηγμένους LWRs.



Σχήμα 4-1 Κόστος λειτουργίας, συντήρησης και καυσίμων συναρτήσει της απόδοσης ισχύος, IAEA 2015 [4].

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται το σύνολο των δαπανών λειτουργίας, συντήρησης και καυσίμων για τους σύγχρονους *LWRs* και *SMRs*, σε συνάρτηση με την εγκατεστημένη ισχύ. Παρατηρείται ότι για πολλαπλές μονάδες δύο και τεσσάρων αντιδραστήρων, το συνολικό κόστος είναι μειωμένο σε σχέση με αυτό των *SMRs* ή των μεγάλων μεμονωμένων μονάδων [1,4].

4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την οικονομία των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων.

Οι οικονομικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της πυρηνικής ενέργειας, ως κλάσμα του συνόλου της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, είναι παρόμοιοι τόσο για τους μεγάλους πυρηνικούς αντιδραστήρες όσο και για τους μικρούς αρθρωτούς αντιδραστήρες. Ωστόσο, αναμένεται ότι οι *SMRs* θα είναι πιο ευέλικτοι και θα διευκολύνουν ορισμένες από τις ρυθμιστικές απαιτήσεις. Ανεξάρτητα από το μέγεθος, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες μπορούν να κατασκευαστούν μόνο σε χώρες που έχουν ήδη πρόγραμμα πυρηνικής ενέργειας ή είναι πρόθυμες να αναπτύξουν ένα. Ως εκ

τούτου, η ανάλυση της αγοράς περιορίζεται στις χώρες που έχουν εκφράσει ενδιαφέρον για την ανάπτυξη πυρηνικού προγράμματος.

Πίνακας 4-1 Παράγοντες που επηρεάζουν την αγορά των SMRs [4].

Αγοραστές SMRs	<ul style="list-style-type: none"> • Παράγοντες σε εθνικό επίπεδο: <ul style="list-style-type: none"> ○ Ανάγκη για εγχώρια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ○ Ακαθάριστο εθνικό προϊόν και αξιολόγηση της οικονομίας ○ Ανάπτυξη προγράμματος πυρηνικής ενέργειας ○ Προστασία του περιβάλλοντος • Παράγοντες σε επίπεδο χρησιμότητας: <ul style="list-style-type: none"> ○ Χρηματοοικονομική και πιστωτική ικανότητα των επιχειρήσεων ○ Επίπεδο τιμών ηλεκτρικής ενέργειας ○ Δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας: μέγεθος, τάση, ποιότητα δικτύου, συντελεστής φορτίου, εγκατεστημένη ισχύς μονάδας
Προμηθευτές SMRs	<ul style="list-style-type: none"> • Χρηματοοικονομική ικανότητα του προμηθευτή • Άρτια τεχνολογία, ετοιμότητα και δομή της γραμμής συναρμολόγησης. • Ανταγωνιστικότητα
Προκλήσεις	<ul style="list-style-type: none"> • Ρυθμιστικοί κανόνες και αδειοδότηση • Ανάπτυξη υποδομής στη χώρα υποδοχής και αξιόπιστο δίκτυο • Εργασία, εκπαίδευση και κατάρτιση
Ανταγωνιστικό περιβάλλον	<ul style="list-style-type: none"> • Τύπος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας: ελεγχόμενη ή απελευθερωμένη • Άλλες επιλογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Στον Πίνακα 4.1, αναφέρονται οι διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του μοντέλου, της τεχνολογίας και της αγοράς για έναν SMR, καθώς και οι προκλήσεις που παρουσιάζονται για τους προμηθευτές και τους δυνητικούς πελάτες όσο αφορά την εγκατάσταση και την ανταγωνιστικότητα μικρών αντιδραστήρων [1,4,5].

4.2.1 Νέες αγορές για τους αντιδραστήρες SMRs.

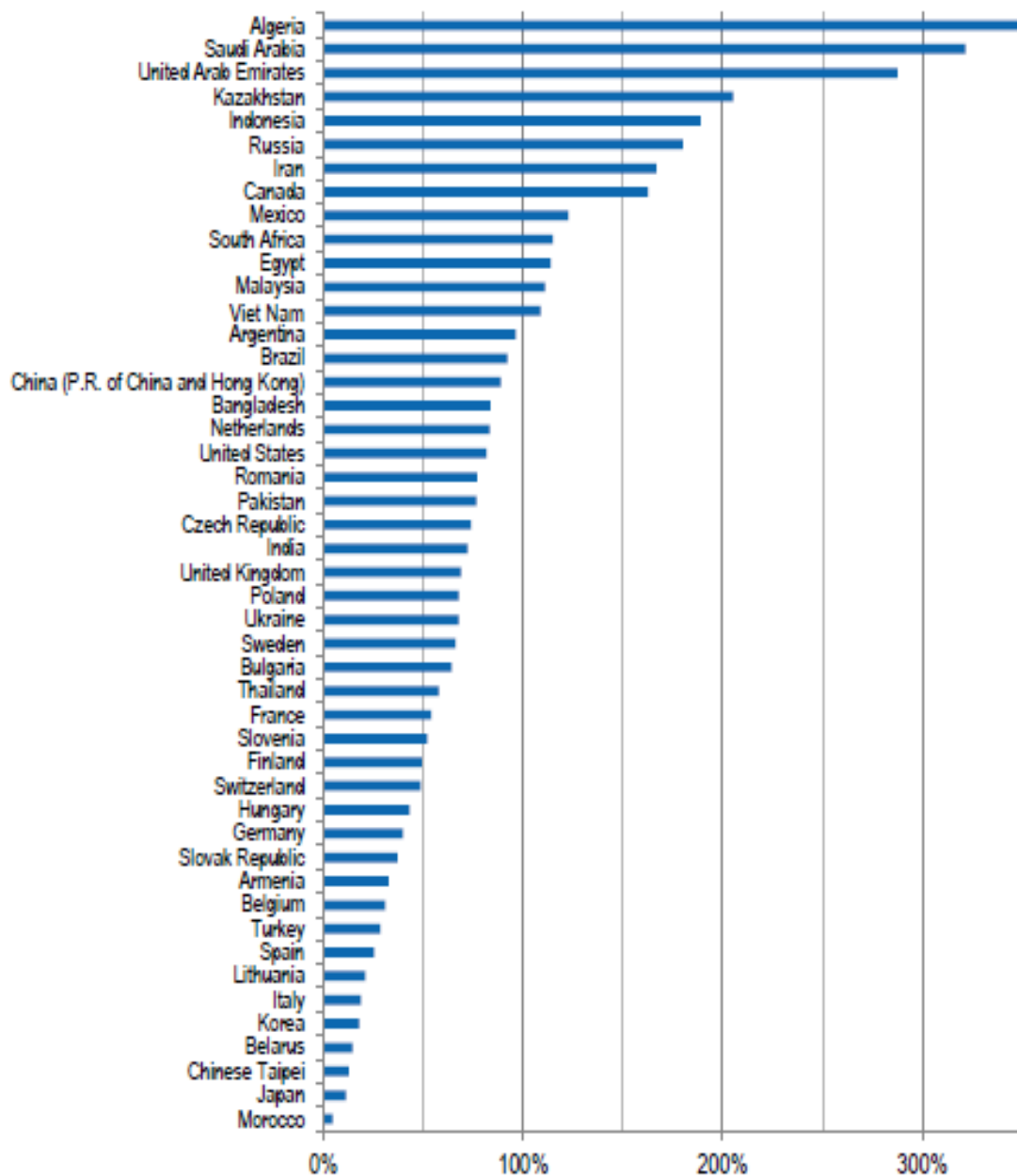
4.2.1.1 Παράγοντες σε εθνικό επίπεδο.

Σε εθνικό επίπεδο, η ανάπτυξη προγράμματος πυρηνικής ενέργειας είναι απαραίτητη προϋπόθεση είτε για μεγάλους είτε για μικρούς αντιδραστήρες. Πρέπει να γίνουν τα απαραίτητα βήματα που εκτελούνται από μια νέα χώρα, όπως αυτά περιγράφονται στον επίσημο κανονισμό της *IAEA* (2007) [4] και περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, τη δημιουργία ανεξάρτητης εθνικής ρυθμιστικής αρχής με επαρκείς πόρους (ανθρώπινους και οικονομικούς) και στέρεα επιστημονική βάση. Στο παρελθόν χρειάζονταν αρκετά χρόνια για την ακολουθία της προβλεπόμενης διαδικασίας, μα οι πιο σύγχρονοι αγοραστές (ιδίως τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα) κατέδειξαν ότι ένας ταχύτερος ρυθμός εγκατάστασης είναι δυνατός εάν η πυρηνική ανάπτυξη θεωρείται εθνική προτεραιότητα και αν υπάρχουν επαρκείς οικονομικές δυνατότητες.

Μια σημαντική προϋπόθεση για την ανάπτυξη ενός *SMR* είναι η ανάγκη για εγχώρια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η ανάγκη μπορεί να προκύψει από τους παρακάτω παράγοντες:

- Χαμηλό ποσοστό του πληθυσμού που έχει πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια.
- Υψηλή ανάπτυξη της οικονομίας ή/και αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ανά κάτοικο.
- Προτεραιότητα στη βελτίωση της μακροπρόθεσμης ασφάλειας των ενεργειακών αποθεμάτων και της εγχώριας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο απλούστερος δείκτης ενεργειακής αυτάρκειας είναι η αναλογία της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε συνάρτηση με τη συνολική παροχή πρωτογενούς ενέργειας (Σχήμα 4.2).

Ανάλογα με το μέγεθος της οικονομίας και τον ρυθμό αύξησης των ενεργειακών αναγκών, χρειάζεται να γίνει μία ανάλυση της επιλογής μεταξύ των μεγάλων πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής (*Nuclear Power Plants - NPP*) και των *SMRs*. Πιο συγκεκριμένα, ένα από τα πρώτα βήματα για τις νέες χώρες είναι η κατασκευή ενός ερευνητικού αντιδραστήρα. Αυτοί οι αντιδραστήρες λειτουργούν διαφορετικά από τους αντιδραστήρες ισχύος: παρέχουν βασική και εφαρμοσμένη έρευνα σε θέματα πυρηνικής τεχνολογίας και θερμοϋδραυλικής, αλληλεπιδράσεις ακτινοβολιών και ύλης, παραγωγή ισοτόπων κ.α., ενώ συμπεριλαμβάνουν την εκπαίδευση του προσωπικού για μελλοντικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και οργανισμούς τεχνικής υποστήριξης. Μερικές από τις παραπάνω λειτουργίες θα μπορούσαν να εκτελεστούν και από έναν *SMR*, ο οποίος αποτελεί ελκυστική επιλογή για νεοεισερχόμενους αγοραστές, τουλάχιστον για τις πρώτες μονάδες.



Σχήμα 4-2 Η ενεργειακή αυτονομία (παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας/συνολική παροχή πρωτογενούς ενέργειας) για τις χώρες που έχουν ή εξετάζουν την ανάπτυξη πυρηνικού προγράμματος, IAEA 2012 [4].

4.2.1.2 Παράγοντες σε επίπεδο χρησιμότητας.

- Χρηματοοικονομική και πιστωτική ικανότητα των επιχειρήσεων.

Για τις επιχειρήσεις, η κατασκευή μονάδας *SMR* προσφέρει τη δυνατότητα ενός νέου οικονομικού μοντέλου στην ανάπτυξη πυρηνικού σταθμού. Οι *SMRs* θα μπορούσαν να αποτελέσουν ελκυστική επιλογή για εταιρείες που επιθυμούν να επενδύσουν στην πυρηνική ενέργεια, αλλά δεν έχουν επαρκείς οικονομικές δυνατότητες για τη χρηματοδότηση της κατασκευής ενός προηγμένου αντιδραστήρα ελαφρού ύδατος.

Οι νέες επιχειρήσεις προσελκύονται επίσης από την ιδέα ότι οι αντιδραστήρες θα μπορούσαν να αναπτυχθούν σταδιακά, αποφεύγοντας έτσι το μεγάλο κόστος που ενυπάρχει στα σημερινά πυρηνικά εργοστάσια. Επιπλέον, η κατασκευή περισσότερων μονάδων *SMRs* στην ίδια τοποθεσία θα μπορούσε να προσφέρει πρόσθετα οφέλη, όπως για παράδειγμα η μείωση των ασφάλιστρων κινδύνου στα δάνεια των επόμενων μονάδων, με την προϋπόθεση ότι οι πρώτες μονάδες έχουν κατασκευαστεί και λειτουργήσει με επιτυχία. Οι παραπάνω παράγοντες αποτελούν προϋποθέσεις που συμβάλλουν στη δημιουργία κατάλληλων συνθηκών για μείωση του κόστους χρηματοδότησης.

- Επίπεδο τιμών ηλεκτρικής ενέργειας.

Το επίπεδο των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για τους *SMRs* και μακροπρόθεσμα χρειάζεται να είναι τουλάχιστον τόσο υψηλές, ώστε τα έσοδα από την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας να αντισταθμίσουν τις κατ' αποκοπή δαπάνες (συμπεριλαμβανομένου ενός εύλογου ποσοστού απόδοσης της επένδυσης). Δεδομένου ότι το κόστος λειτουργίας και συντήρησης ανά MWh θα μπορούσε να είναι υψηλότερο για τους *SMRs* απ' ό,τι για τους προηγμένους *LWR*, υπάρχει κίνδυνος για τους πρώτους να μην παράγουν αρκετή ηλεκτρική ενέργεια σε μια απελευθερωμένη αγορά προκειμένου να ανακτήσουν το πάγιο κόστος τους. Ωστόσο, η διαφορά μεταξύ του μεταβλητού κόστους των *SMRs* και των μεγάλων πυρηνικών αντιδραστήρων δεν είναι πιθανόν αρκετά μεγάλη ώστε να καταστήσει τους *SMRs* πιο ευαίσθητους στις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας. Συμπερασματικά, το επίπεδο των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα γενικότερα. Μια άλλη σημαντική πτυχή είναι η προβλεψιμότητα των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας στις απελευθερωμένες αγορές.

- Δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας: μέγεθος, τάση, ποιότητα δικτύου, συντελεστής φορτίου, εγκατεστημένη ισχύς μονάδας.

Οι πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής απαιτούν εύρωστα και αξιόπιστα δίκτυα για ασφαλή λειτουργία. Η εγκατάσταση μιας μεγάλης μονάδας σε ένα αδύναμο δίκτυο είναι προβληματική και μπορεί να απαιτήσει μεγάλες επενδύσεις σε μελλοντική ενίσχυση του δικτύου. Ο βασικός κανόνας είναι ότι η ισχύς μιας μονάδας παραγωγής δεν πρέπει να υπερβαίνει το 10-15% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να είναι οικονομικά ανταποδοτική. Το δεδομένο αυτό, καθιστά τους *SMRs* κατάλληλους για μικρά δίκτυα (ή μεμονωμένα τμήματα δικτύου) απαίτησης ισχύος 1 έως 3.5 GWe περίπου.

Από την άλλη πλευρά, οι επιχειρήσεις που εκμεταλλεύονται πλήθος προηγμένων *LWRs* σε ένα καλά ανεπτυγμένο δίκτυο ενδιαφέρονται λιγότερο για τους μικρούς αντιδραστήρες, εκτός αν υπάρχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των τελευταίων που έχουν ισχυρό βάρος σε μία αξιολόγηση. Στην περίπτωση αυτή, η ευελιξία των *SMRs* θα πρέπει να κριθεί με βάση τις απαιτήσεις των συστημάτων ηλεκτρικής

ενέργειας και σε σύγκριση με τα φορτία και τη ζήτηση των σύγχρονων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής [1,4].

4.2.2 Προμηθευτές SMRs.

4.2.2.1 Χρηματοοικονομική ικανότητα του προμηθευτή.

Οι προμηθευτές των *SMRs* στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής εκτιμούν ότι το συνολικό κόστος μιας εγκατάστασης *SMR* είναι μεταξύ 1-2 δισεκατομμυρίων δολαρίων.

Η πρώτη φάση περιλαμβάνει την ανάπτυξη και την προετοιμασία του σχεδιασμού καθώς και το σύνολο των απαραίτητων εγγράφων για την αδειοδότηση. Αυτό το στάδιο διαρκεί περίπου δέκα χρόνια και απαιτεί επένδυση ύψους περίπου 0,5-1 δις δολαρίων. Στο τέλος αυτού του σταδίου περίπου το 50% του σχεδιασμού είναι πλήρες. Το επόμενο βήμα είναι η φάση προπαρασκευής που συνίσταται στην οριστικοποίηση του σχεδιασμού και την αναζήτηση των υλικών κατασκευής. Αυτή η φάση διαρκεί αρκετά επιπλέον χρόνια και για την επιτυχή της εφαρμογή απαιτείται επένδυση ύψους περίπου 0,3-0,6 δισεκατομμυρίων δολαρίων. Τέλος, υπάρχει η φάση της εμφάνισης στην αγορά που συνίσταται στην δημιουργία της πρώτης μονάδας και την συνεργασία με τους αγοραστές. Το κόστος εκτιμάται περίπου στα 0,3-0,5 δισεκατομμύρια δολάρια.

Συμπερασματικά, η ανάπτυξη ενός *SMR* απαιτεί χρόνο και μεγάλες επενδύσεις πριν από την επίτευξη της μαζικής παραγωγής. Επομένως, η οικονομική δυνατότητα του προμηθευτή αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επιτυχή εξέλιξη. Για τους πιο προηγμένους σχεδιασμούς, οι κυβερνήσεις παρέχουν κάποια μορφή επιδότησης. Για παράδειγμα, στις Ηνωμένες Πολιτείες προσφέρεται οικονομική επιχορήγηση είτε άμεσα στον προμηθευτή, είτε με τη μορφή εργασιακής υποστήριξης τόσο στη διαδικασία κατασκευής, όσο και στη διαδικασία αδειοδότησης. Στη Ρωσία και την Κορέα, οι *SMRs* αναπτύσσονται από το κρατικά πυρηνικά ινστιτούτα και εταιρείες.

4.2.2.2 Άρτια τεχνολογία, ετοιμότητα και δομή της γραμμής συναρμολόγησης.

Η ετοιμότητα της τεχνολογίας και η ύπαρξη ολοκληρωμένων πρωτοτύπων αποτελεί βασικό παράγοντα που θα καθορίσει τις προοπτικές αγοράς για έναν αγοραστή μικρού αντιδραστήρα. Αποδεδειγμένη τεχνολογία και προηγμένα σχέδια είναι απαραίτητα για να προσελκύσουν τους πιθανούς αγοραστές, αλλά και να καθορίσουν τη δομή και την αλυσίδα συναρμολόγησης.

Το βασικό στοιχείο για την ανταγωνιστικότητα των *SMRs* είναι η παραγωγή σε εργοστασιακές συνθήκες. Είναι προφανές ότι μια μονάδα συναρμολόγησης που δεν λειτουργεί σε επαρκές επίπεδο θα αποτύχει στην επίτευξη οικονομικής

ανταγωνιστικότητας. Με παρόμοιο τρόπο, η δημιουργία πολλαπλών εγκαταστάσεων συναρμολόγησης *SMRs* θα μπορούσε ενδεχομένως να μειώσει τον συνολικό αριθμό παραγγελιών και άρα τον όγκο παραγωγής για κάθε εγκατάσταση, καθιστώντας δυσκολότερη την ανταγωνιστικότητα.

Ο αρθρωτός τρόπος κατασκευής των *SMRs* αποτελεί μία δραστική αλλαγή στον τρόπο κατασκευής του σύνθετου εξοπλισμού ενός σύγχρονου συμβατικού πυρηνικού σταθμού. Η γραμμή συναρμολόγησης ενός μικρού αντιδραστήρα τοποθετείται (εργοστασιακά) γύρω από ένα σχετικά σταθερό ποσοστό παραγωγής μονάδων. Η εμπειρία (2013) δείχνει ότι μία επί τόπου αλυσίδα συναρμολόγησης εμπνευσμένη από την αυτοκινητοβιομηχανία αποτελεί επικερδή πρόκληση για την πυρηνική επιχείρηση. Μια άλλη προσέγγιση είναι ένα κλιμακωτό εργοστάσιο συναρμολόγησης. Όσο το ποσοστό παραγωγής των *SMRs* είναι χαμηλό, η γραμμή συναρμολόγησης θα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να επεκτείνεται παράλληλα με την ωρίμανση της κατασκευαστικής τεχνολογίας και την αύξηση των παραγγελιών.

Υπάρχουν πολλές προϋποθέσεις για την επιτυχή εφαρμογή των μοντέλων συναρμολόγησης. Καταρχάς τα προϊόντα πρέπει να είναι τυποποιημένα. Ειδικότερα, αυτό σημαίνει ότι ο προμηθευτής ενός *SMR* θα έχει περιορισμένη δυνατότητα αντιμετώπισης των απαιτήσεων προσαρμογής χωρίς να καταστρέψει το επιχειρηματικό μοντέλο. Δεύτερον, δεν είναι δυνατή η ανακατασκευή. Στη συνέχεια, απαιτείται έγκαιρη διάθεση όλων των εξαρτημάτων που απαιτούνται για την συναρμολόγηση (καθώς και επιπλέον απόθεμα). Τέλος, ο εξοπλισμός του σταθμού εργασίας θα πρέπει να είναι αξιόπιστος και οι ομάδες εργασίας στις γραμμές συναρμολόγησης πρέπει να είναι άρτια εκπαιδευμένες.

Ένα από τα πιο σημαντικά θέματα για την εγκατάσταση ενός εργοστασίου συναρμολόγησης *SMRs* είναι η ρυθμιστική αρχή πυρηνικής ενέργειας. Οι τρέχουσες ρυθμιστικές πρακτικές ενδέχεται να μην είναι συμβατές με τη συναρμολόγηση ενός εργοστασίου, για παράδειγμα, εάν η διαδικασία συναρμολόγησης είναι αυτοματοποιημένη. Οι ρυθμιστικές αρχές και οι κατασκευαστές πρέπει να συνεργαστούν στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό στο στάδιο του σχεδιασμού, ώστε να μειωθεί το ενδεχόμενο ανακατασκευής.

4.2.2.3 Ανταγωνιστικότητα.

Όπως αναφέρθηκε, οι *SMRs* θα μπορούσαν να είναι συγκρίσιμοι με τους μεγάλους πυρηνικούς αντιδραστήρες όσον αφορά το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, εάν τα ανταγωνιστικά τους πλεονεκτήματα γίνουν περισσότερο ρεαλιστικά. Εφόσον επιτευχθεί η μαζική παραγωγή, τότε οι *SMRs* θα έχουν τη δυνατότητα να διαθέτουν ανταγωνιστικό κόστος λειτουργίας ανά *kWe*. Μπορεί το κόστος λειτουργίας να είναι υψηλότερο, αλλά το συνολικό κόστος επένδυσης μπορεί να καταστεί ελκυστικό λόγω χαμηλότερου οικονομικού κινδύνου της επένδυσης και μικρότερου χρόνου

κατασκευής. Όσον αφορά τα μεταβλητά κόστη, οι *SMRs* αναμένεται να έχουν υψηλότερες τιμές λειτουργίας, συντήρησης και κόστους καυσίμων σε σχέση με τις τιμές για τους προηγμένους *LWRs*.

Έχοντας μικρότερη αρχική επένδυση (λόγω της βελτιστοποιημένης γραμμής συναρμολόγησης και του μικρότερου κόστους χρηματοδότησης) και υψηλότερο κόστος λειτουργίας, συντήρησης και καυσίμων από τους συμβατικούς σταθμούς, αναμένεται να παραμείνουν στην κατάταξη ανάμεσα στους πυρηνικούς σταθμούς μεγάλης κλίμακας και στις εγκαταστάσεις ορυκτών καυσίμων, ανάλογα φυσικά και με το κόστος των τελευταίων καθώς και των εκπομπών CO₂.

Συγκρίνοντας με μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διαφορετικών καυσίμων, τα επιχειρήματα ευελιξίας και μεγέθους των *SMRs* δεν μπορούν να επικρατήσουν έναντι των μονάδων που λειτουργούν με φυσικό αέριο και βασίζονται σε μια δοκιμασμένη τεχνολογία. Εν προκειμένω, το κόστος των καυσίμων θα μπορούσε να αποτελέσει καθοριστικό παράγοντα.

Από την άλλη πλευρά, με την προϋπόθεση επιλογής της πυρηνικής ενέργειας, το κύριο πλεονέκτημα των *SMRs* είναι πιθανώς ο χαμηλότερος οικονομικός κίνδυνος της επένδυσης συγκριτικά με μία συμβατική μονάδα μεγάλων διαστάσεων. Για να γίνει η κατάλληλη επιλογή, οι επενδυτές των μικρών αντιδραστήρων χρειάζεται να στοχεύσουν σε παραδοσιακές αγορές με καλά ανεπτυγμένα δίκτυα. Στις αγορές αυτές, οι *SMRs* πρέπει από τη μία πλευρά, να ανταγωνιστούν τις εγκαταστάσεις ορυκτών καυσίμων, που μπορούν να είναι μικρές και ευέλικτες, αλλά με το μειονέκτημα των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, και από την άλλη πλευρά την μεγάλη κλίμακας πυρηνική ενέργεια.

Μία άλλη οικονομική εφαρμογή για μικρούς αντιδραστήρες *SMRs* θα μπορούσε να είναι η ενεργειακή τροφοδοσία απομακρυσμένων ή απομονωμένων περιοχών και νησιών όπου απαιτούνται μικρές μονάδες και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται με μη πυρηνικές πηγές είναι υψηλό. Επιπλέον, παρουσιάζεται ως επιλογή, η παροχή ρεύματος σε μια ολόκληρη πόλη ή σε μία βιομηχανική εγκατάσταση σε απομακρυσμένη περιοχή (για παράδειγμα, μία εγκατάσταση εξόρυξης). Λόγω των ειδικών απαιτήσεων σε αυτό το είδος εφαρμογής, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που θα παράγεται εκτιμάται ότι θα είναι αρκετά υψηλό, ωστόσο όμως ανταγωνιστικό σε σχέση με το κόστος άλλων εναλλακτικών λύσεων.

Σε εξειδικευμένες αγορές, εκτός κεντρικών δικτύων, οι κύριοι ανταγωνιστές των *SMRs* δεν είναι οι μεγάλης κλίμακας πυρηνικοί σταθμοί, αλλά οι μικρότερες εγκαταστάσεις ισχύος που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα (για παράδειγμα οι γεννήτριες *diesel*). Στις αγορές αυτές ωστόσο, οι εναλλακτικές λύσεις είναι αρκετά δαπανηρές, με αποτέλεσμα ο αρθρωτός χαρακτήρας, η ευελιξία και η χαμηλή απαίτηση δικτύου των *SMRs* να τους καθιστούν βιώσιμους. Από την άλλη πλευρά, οι εξειδικευμένες αγορές σπάνια βρίσκονται σε χώρες με καλά ανεπτυγμένο πυρηνικό

πρόγραμμα (με εξαίρεση τον Καναδά και την Ρωσία), με συνέπεια να καθίστανται κρίσιμα τα ζητήματα αδειοδότησης. Οποιοσδήποτε τοπικές συνθήκες, λόγω των κανονισμών λειτουργίας ή της γεωγραφίας, μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την αρθρωτή παραγωγή σε εργοστασιακές συνθήκες που απαιτούνται για να καταστήσουν ανταγωνιστικούς τους μικρούς αντιδραστήρες. Η τυποποίηση των *SMRs* είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας [1,4].

4.2.3 Προκλήσεις.

4.2.3.1 Ρυθμιστικοί κανόνες και αδειοδότηση.

Η πρώτη και πιο σημαντική πρόκληση είναι οι ρυθμιστικές απαιτήσεις και οι κανονισμοί λειτουργίας. Πολλοί σχεδιασμοί σύγχρονων μικρών αντιδραστήρων προσφέρουν καινοτόμα χαρακτηριστικά όπως ενισχυμένα συστήματα παθητικής ασφάλειας, αρθρωτή κατασκευή και πολλαπλή εγκατάσταση αντιδραστήρων στην ίδια δεξαμενή. Οι προμηθευτές των *SMRs* υποστηρίζουν ότι αυτά τα χαρακτηριστικά θα μπορούσαν να μειώσουν το εργατικό προσωπικό και επομένως το μέγεθος των μέτρων έκτακτης ανάγκης και εκκένωσης που προβλέπονται από την εφαρμογή των σημερινών κανονισμών. Είναι προφανές ότι οι απαιτήσεις ασφάλειας είναι οι ίδιες για τους μικρούς όπως και για τους συμβατικούς πυρηνικούς σταθμούς, αλλά το ζήτημα είναι πώς θα μπορέσουν οι *SMRs* να ανταπεξέλθουν σε αυτές τις απαιτήσεις. Οι ρυθμιστικές αρχές και οι οργανισμοί τεχνικής υποστήριξης χρειάζονται επίσης χρόνο για να προσδιορίσουν επακριβώς τους κανονισμούς λειτουργίας και τις κρίσεις τους σχετικά με τις σύγχρονες επιλογές και τις καινοτομίες, οι οποίες θα μπορούσαν να καθυστερήσουν τη διαδικασία χορήγησης αδειών.

Όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, η σύγχρονη τεχνολογία των *SMRs* βασίζεται σε αρθρωτούς τρόπους κατασκευής και ανάπτυξης, αλλά το ισχύον ρυθμιστικό μοντέλο δεν είναι κατάλληλο για αυτούς. Οι ρυθμιστικές αρχές αντιμετωπίζουν όλους τους πυρηνικούς αντιδραστήρες, μικρούς ή μεγάλους με τον ίδιο τρόπο και ενώ τα χαρακτηριστικά ασφαλείας των μικρών αντιδραστήρων θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν γενικά εντός του υφιστάμενου κανονιστικού πλαισίου, υπάρχουν ακόμη ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν. Ιδανικά, για την επιτυχή ανάπτυξη των *SMRs*, πρέπει να υιοθετηθεί μια νέα προσέγγιση για την αδειοδότηση, ώστε να επιτρέπεται η εργοστασιακή αρθρωτή κατασκευή. Απαιτείται ισχυρός συντονισμός, όχι μόνο όσον αφορά την ασφάλεια, την υγεία και τους περιβαλλοντικούς κανόνες, αλλά και στη συνεννόηση μεταξύ των κατασκευαστών.

Πιο συγκεκριμένα η αποτελεσματική πλήρης εργοστασιακή συναρμολόγηση των *SMRs* ενδέχεται να μην μπορεί να επιτρέψει σε επιθεωρητές να ελέγχουν όλα τα στάδια. Για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας προτιμάται ένας επί τόπου επιθεωρητής σε συγκεκριμένο σημείο. Επιπλέον, χρειάζεται ένα καινοτόμο σύστημα αδειοδότησης που θα διαχωρίζει τη γενική έγκριση ή τη χορήγηση άδειας λειτουργίας της μονάδας κατασκευής ενός *SMR*, του ίδιου του αντιδραστήρα και του χώρου

εγκατάστασης του. Διαχωρίζοντας τα στάδια αδειοδότησης σε ανεξάρτητες ενότητες αντανακλώνεται καλύτερα τα χαρακτηριστικά των *SMRs* και απλουστεύεται η διαδικασία.

Μια πρόσθετη πρόκληση προκύπτει κατά την εξαγωγή μονάδων *SMRs*, οπότε εμπλέκονται δύο ή και περισσότερες ρυθμιστικές αρχές, τόσο της χώρας εξαγωγής όσο και της χώρας προορισμού. Μεταξύ των προτεινόμενων επιλογών είναι η εφαρμογή δοκιμασμένων πρακτικών, όπως για παράδειγμα η πιστοποίηση των αεροπλάνων και των λοιπών μηχανικών μερών τους. Πράγματι, υπάρχει τεράστια εμπειρία στην έκδοση αδειών αεροσκαφών, με καθιερωμένες διαδικασίες αμοιβαίας επικύρωσης μεταξύ της Ευρώπης, των ΗΠΑ και άλλων χωρών. Εάν ένα αεροσκάφος έχει πιστοποιηθεί από την αρχή μίας χώρας, τότε το πιστοποιητικό επικυρώνεται και από την άλλη. Αυτό καθίσταται δυνατό μόνο λόγω της αμοιβαίας εμπιστοσύνης και των ισχυρών εργασιακών σχέσεων μεταξύ των αεροπορικών αρχών σε διάφορες χώρες.

Άλλα σημαντικά ρυθμιστικά ζητήματα αφορούν στην επικύρωση των συστημάτων ενισχυμένης παθητικής ασφάλειας και στην εγκατάσταση πολλαπλών μονάδων, στο μέγεθος της ζώνης σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης και τις εργασιακές απαιτήσεις για άρτια λειτουργία και ασφάλεια. Αυτή η επικύρωση θα μπορούσε να ληφθεί με τις υφιστάμενες διαδικασίες, χρησιμοποιώντας παρόμοια προσέγγιση με τις μεγαλύτερες πυρηνικές εγκαταστάσεις. Ωστόσο, οι *SMRs* πρέπει να αποδείξουν ότι μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις ασφαλείας. Οι ρυθμιστικές αρχές και οι οργανισμοί τεχνικής υποστήριξης θα χρειαστούν χρόνο και έρευνα για να σχηματίσουν απόψεις σχετικές με τις παραπάνω επιλογές και καινοτομίες, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις στην έκδοση άδειας κατασκευής και λειτουργίας ενός *SMR*.

4.2.3.2 Ανάπτυξη υποδομής στη χώρα υποδοχής και αξιόπιστο δίκτυο.

Η ανάπτυξη των υποδομών καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική όταν οι μικροί αντιδραστήρες εξάγονται σε αναπτυσσόμενες χώρες. Οι *SMRs* παραμένουν πυρηνικοί αντιδραστήρες και υπάρχουν αυστηρές απαιτήσεις για την ανάπτυξή τους. Η πυρηνική ενέργεια επιβάλλει επίσης απαιτήσεις ποιότητας και αξιοπιστίας του ηλεκτρικού δικτύου. Αν και οι *SMRs* έχουν μικρότερη ισχύ εξόδου (όντας καταλληλότεροι για μικρότερα δίκτυα), απαιτείται συχνά ενίσχυση του δικτύου για την επίτευξη των επιπέδων αξιοπιστίας και ποιότητας, που απαιτούνται για την ασφαλή λειτουργία του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, όπως για παράδειγμα η παροχή της πλεονασματικής ισχύος και η υψηλή σταθερότητα της συχνότητας.

Η εντοπιότητα ανάπτυξης της υποδομής θα εξαρτηθεί από το επίπεδο της οικονομικής και βιομηχανικής ανάπτυξης της εμπλεκόμενης χώρας. Παρόλο που συχνά συνηθίζεται η μεγιστοποίηση της συγκέντρωσης σε μία πυρηνική εγκατάσταση, αυτό αντιβαίνει στο επιχειρηματικό μοντέλο των *SMRs* με την εργοστασιακή συναρμολόγηση μονάδων και την αποστολή στην εκάστοτε τοποθεσία.

Ωστόσο, τα μη πυρηνικά εξαρτήματα των αντιδραστήρων, όπως για παράδειγμα η ατμογεννήτρια ή το σύστημα ψύξης, μπορούν να κατασκευαστούν τοπικά.

4.2.3.3 Εργασία, εκπαίδευση και κατάρτιση.

Από την άποψη της διαχείρισης του ανθρώπινου δυναμικού που εμπλέκεται στη λειτουργία, αλλά και τη διαδικασία παροπλισμού (*decommissioning - dismantling*) μίας εγκατάστασης, υπάρχουν οφέλη που σχετίζονται με την πολλαπλή εγκατάσταση πανομοιότυπων μονάδων *SMRs* αντί ενός μεγάλου αντιδραστήρα. Οι *SMRs* έχουν το πλεονέκτημα των ενδεχομένως μειωμένων απαιτήσεων ανθρώπινου δυναμικού, λόγω της αρθρωτής σχεδίασης και της απλοποιημένης κατασκευής τους, οπότε η εστίαση στον ανθρώπινο παράγοντα μετατοπίζεται στο εργοστάσιο όπου κατασκευάζεται ο αντιδραστήρας [1,4].

4.2.4 Ανταγωνιστικό περιβάλλον.

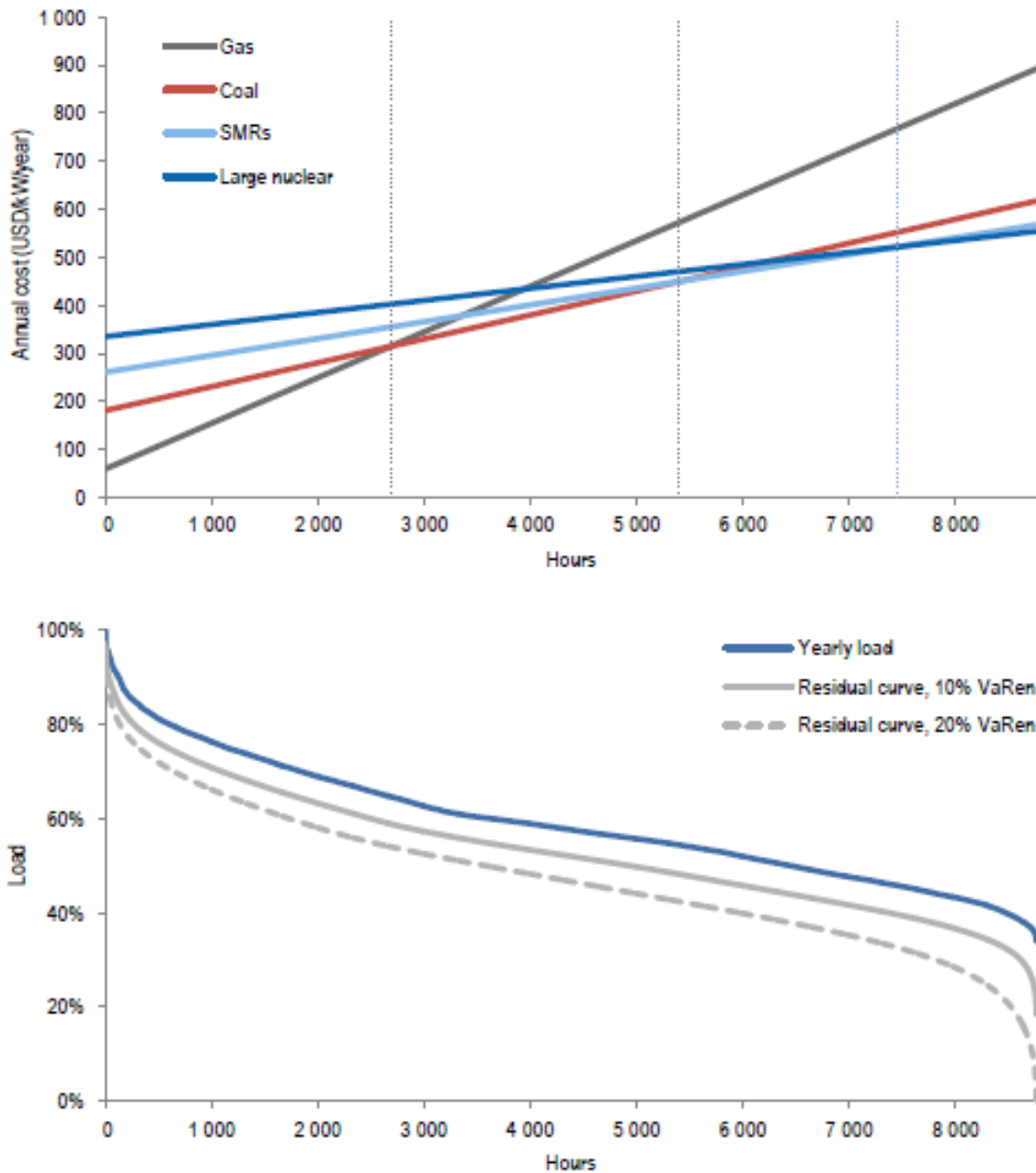
4.2.4.1 Τύπος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας: ελεγχόμενη ή απελευθερωμένη.

Στις ελεγχόμενες αγορές, οι παραγωγοί ενέργειας έχουν περισσότερη ασφάλεια όσον αφορά τα έσοδα τους από ό,τι στις απελευθερωμένες. Ο έντονος ανταγωνισμός των τελευταίων, σε συνδυασμό με την μείωση των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας που παρατηρείται σε αρκετές χώρες (χαμηλή τιμή του φυσικού αερίου και άνοδος των επιδοτούμενων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας) και την αύξηση των τιμών των προηγμένων πυρηνικών αντιδραστήρων, έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση της πυρηνικής ανάπτυξης μεγάλων πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Η μεγάλη επένδυση που απαιτείται και η υψηλή διάρκεια κατασκευής καθιστούν την πυρηνική ανάπτυξη επισφαλή για τις ελεύθερες αγορές.

4.2.4.2 Άλλες επιλογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι υπάρχουσες και μελλοντικές επιλογές καυσίμων (πυρηνικά, μίγματα, ορυκτά, φυσικό αέριο, υδροκίνηση) διαθέτουν διαφορετικό ετήσιο οικονομικό κόστος ανά σύνολο ωρών ηλεκτροπαραγωγής. Στο *Σχήμα 4.3* παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός απλοποιημένου μοντέλου για την εκτίμηση του ετήσιου κόστους λειτουργίας για μείγμα τεσσάρων ηλεκτροπαραγωγών πηγών. Στο μοντέλο αυτό υποθέτουμε ότι οι *SMRs* έχουν φτάσει σε τεχνολογική ωριμότητα, με αποτέλεσμα να είναι ανταγωνιστικοί σε σχέση με τα μεγάλα πυρηνικά και τα ορυκτά καύσιμα. Από το αριστερό μέρος του σχήματος, 0 έως 3000 ώρες λειτουργίας περίπου, το οποίο αντιστοιχεί σε συντελεστή φορτίου 60-85%, παρατηρούμε ότι η τεχνολογία *SMRs* είναι ανταγωνιστική σε σχέση με τα λιγνιτικά και τα μεγάλα πυρηνικά εργοστάσια και ότι θα μπορούσε να λειτουργήσει σε αντικατάστασή τους. Αντίστοιχα, από το δεξιό τμήμα του σχήματος, 6000 έως 8700 ώρες λειτουργίας, το οποίο αντιστοιχεί σε συντελεστή φορτίου 35-60%, οι *SMRs* ανταγωνίζονται τα μεγάλα πυρηνικά με χαμηλότερο κόστος από τα ορυκτά καύσιμα. Με βαθύτερη έρευνα, μπορεί να

επιτευχθεί η σύνθεση ενός ενεργειακού μίγματος που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα του συντελεστή φορτίου.

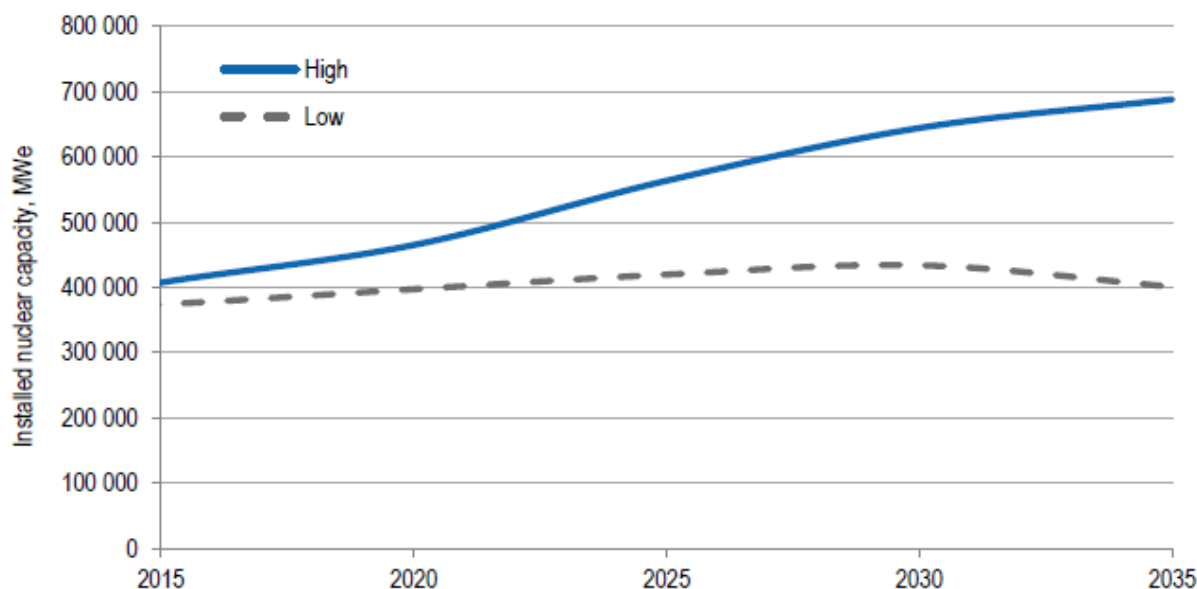


Σχήμα 4-3 Το ετήσιο κόστος διαφορετικών πηγών ενέργειας, NEA 2012 [4].

Οι μεγάλες πυρηνικές εγκαταστάσεις και οι SMRs έχουν ελαφρώς διαφορετικές κατανομές μεταξύ σταθερού και μεταβλητού κόστους. Αυτό σημαίνει ότι οι SMRs ενδέχεται να έχουν χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου, λόγω της εργοστασιακής

παραγωγής, της συντομότερης περιόδου κατασκευής και της ευκολότερης χρηματοδότησης, αλλά υψηλότερο μεταβλητό κόστος, δηλαδή μεγαλύτερο κόστος ανά MWh λειτουργίας και συντήρησης και χαμηλότερη απόδοση καυσίμου [1,4].

4.3. Συνολική πυρηνική ισχύς και το ποσοστό των SMRs.



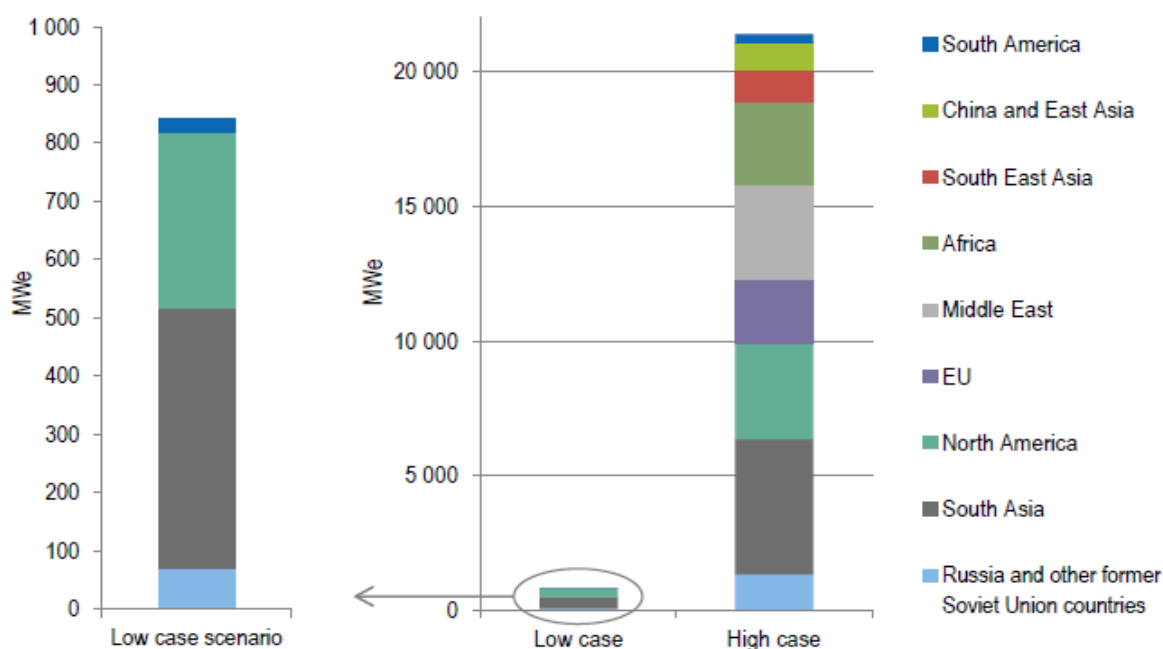
Σχήμα 4-4 Η συνολική εγκαταστημένη πυρηνική ισχύς μέχρι το 2035, NEA 2014 [4].

Σύμφωνα με τις επικαιροποιημένες προβλέψεις των NEA (*Nuclear Energy Agency*⁸) και IAEA, η συνολική πυρηνική ισχύς μέχρι το 2035 θα είναι μεταξύ 400 και 700 GWe, ανάλογα με την απόδοση των υποτιθέμενων σχεδιασμών (Σχήμα 4.4). Στην βέλτιστη περίπτωση (δηλαδή εφόσον επιτευχθεί μαζική παραγωγή μικρών αντιδραστήρων ισχύος), σχεδόν 300 GWe νέας πυρηνικής ισχύος θα προστεθεί τα επόμενα 20 χρόνια, εκ των οποίων περίπου τα 245 κατά την περίοδο 2020-2035.

Για να εκτιμηθεί το μέγεθος της παγκόσμιας αγοράς το 2035, χρειάζεται να ληφθούν υπόψη για κάθε χώρα ξεχωριστά οι διάφοροι παράγοντες που αναφέρθηκαν προηγούμενα, ιδίως η οικονομική ανταγωνιστικότητα των SMRs και η ανάπτυξη των υποδομών, με κυριότερο το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Θεωρείται ότι η σχετική αδειοδότηση θα είναι επικυρωμένη στις αρχές της δεκαετίας του 2020, εφόσον θα έχει δημιουργηθεί η γραμμή συναρμολόγησης και θα έχει εκπαιδευτεί το ανθρώπινο δυναμικό τόσο για την κατασκευή όσο και για τη λειτουργία των SMRs. Στόχος είναι να υπολογιστεί η συμμετοχή των SMRs στη συνολική πυρηνική απόδοση ισχύος, προκειμένου να διαφανεί εάν αυτό το ποσοστό επαρκεί για την κατασκευή εγκαταστάσεων μαζικής παραγωγής.

⁸ www.oecd-nea.org

Από την μία πλευρά, βρίσκεται η αισιόδοξη περίπτωση, η οποία θεωρεί ότι οι *SMRs* είναι πιο ακριβοί στην κατασκευή και λειτουργία (συγκρινόμενοι με άλλες πηγές ενέργειας) και συνεπώς μόνο ένας περιορισμένος αριθμός έργων θα ολοκληρωθεί, συμπεριλαμβανομένων των πρωτοτύπων και της δημιουργίας εγκαταστάσεων σε απομακρυσμένες περιοχές με υψηλές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, στην αισιόδοξη περίπτωση, το ποσοστό των *SMRs* καθορίζεται χρησιμοποιώντας την υπόθεση ότι οι μικροί αντιδραστήρες θα είναι οικονομικότεροι από τους προηγμένους *LWRs*, αλλά θα έχουν υψηλότερα μεταβλητά έξοδα (λειτουργία, συντήρηση και κόστος καυσίμων). Με οικονομικούς όρους, υποθέτουμε ότι το ετήσιο κόστος για έναν μικρό αντιδραστήρα θα είναι μεταξύ των μονάδων ορυκτών καυσίμων και των μεγάλων πυρηνικών εγκαταστάσεων.



Σχήμα 4-5 Προβλεπόμενη απόδοση ισχύος των *SMRs* το 2035 ανά περιοχή, NEA 2014 [4].

Όπως φαίνεται σε αυτά τα δύο γραφήματα, περίπου το 9% της νέας παραγωγής πυρηνικής ισχύος, κατά την περίοδο 2020-2035, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με μικρούς αντιδραστήρες, σύμφωνα με την αισιόδοξη πρόβλεψη και περίπου το 2,3%, στη μετριοπαθή πρόβλεψη. Συνολικά, περίπου 21 GWe νέας πυρηνικής ισχύος θα μπορούσαν να προστεθούν με τους *SMRs* στην πρώτη περίπτωση, δηλαδή περίπου το 3% της συνολικής εγκατεστημένης πυρηνικής ισχύος μέχρι το 2035. Ανάλογα με την ισχύ εξόδου των μονάδων *SMRs* (κυμαίνεται από 50 MWe έως 300 MWe), θα μπορούσαν να παραχθούν συνολικά περίπου 105-425 μονάδες κατά την προαναφερθείσα περίοδο.

Πίνακας 4-2 Ανάπτυξη πυρηνικής τεχνολογίας SMRs την περίοδο 2020-2035 σε ενδιαφερόμενες χώρες [4].

Χώρα	Ποσοστό συμμετοχής SMRs στη συνολική παραγωγική ισχύ 2020-2035 (μετριοπαθής πρόβλεψη)	Ποσοστό συμμετοχής SMRs στη συνολική παραγωγική ισχύ 2020-2035 (αισιόδοξη πρόβλεψη)	Σχόλιο
Αλγερία	0%	100%	Σχέδιο κατασκευής πυρηνικού σταθμού με SMR.
Αργεντινή	1%	13%	Μοντέλο CAREM (πρωτότυπο) υπό κατασκευή και άλλα σχέδια.
Μπαγκλαντές	0%	30%	Σχέδια για aLWRs, ίσως και SMRs.
Καναδάς	0%	15%	Αν αναπτυχθεί πυρηνική ενέργεια, μερικό ποσοστό θα είναι με SMR.
Κίνα	0%	2%	Σχέδια για aLWRs, ίσως και SMRs.
Αίγυπτος	0%	10%	Σχέδιο κατασκευής πυρηνικού σταθμού με SMR.
Ινδία	5%	15%	Ανάπτυξη μικρών και μεγάλων αντιδραστήρων.
Ινδονησία	10%	30%	Η δομή του δικτύου ενισχύει την επιλογή SMR.
Καζακστάν	0%	25%	Συζήτηση για SMR.
Λιθουανία	0%	10%	Μικρή οικονομία, ενδεχόμενο για SMR.
Μαλαισία	0%	10%	SMR ως πρώτο βήμα πυρηνικής ανάπτυξης.
Μεξικό	0%	15%	Αν αναπτυχθεί πυρηνική ενέργεια, μερικό ποσοστό θα είναι με SMR.
Μαρόκο	0%	10%	SMR ως πρώτο βήμα πυρηνικής ανάπτυξης.
Πακιστάν	5%	10%	SMR υπό κατασκευή.
Πολωνία	0%	15%	Ανάπτυξη SMR υπό ιδανικές συνθήκες.
Ρωσία	1%	8%	Πλωτός πυρηνικός σταθμός υπό

			κατασκευή.
Σαουδική Αραβία	5%	20%	<i>aLWRs</i> και <i>SMRs</i> (παράλληλα με ανανεώσιμες πηγές)
Νότιος Αφρική	0%	15%	<i>aLWRs</i> και <i>SMRs</i> (παράλληλα με ανανεώσιμες πηγές)
Ταϊλάνδη	0%	5%	Σχέδιο κατασκευής πυρηνικού σταθμού με <i>SMR</i> .
Ηνωμένο Βασίλειο	0%	20%	<i>aLWRs</i> και <i>SMRs</i> (παράλληλα με ανανεώσιμες πηγές)
ΗΠΑ	5%	20%	<i>aLWRs</i> και <i>SMRs</i> (παράλληλα με ανανεώσιμες πηγές)
Βιετνάμ	0%	5%	Σχέδιο κατασκευής πυρηνικού σταθμού με <i>SMR</i> .

Οι προβλέψεις αυτές δεν λαμβάνουν υπόψη τις δυνατότητες περαιτέρω ανάπτυξης των τεχνολογιών *SMRs*, καθώς και διάφορα κανονιστικά πλαίσια που ενδέχεται να οδηγήσουν σε σημαντικές αλλαγές στον χώρο [1,4,25].

Κεφάλαιο 5^ο

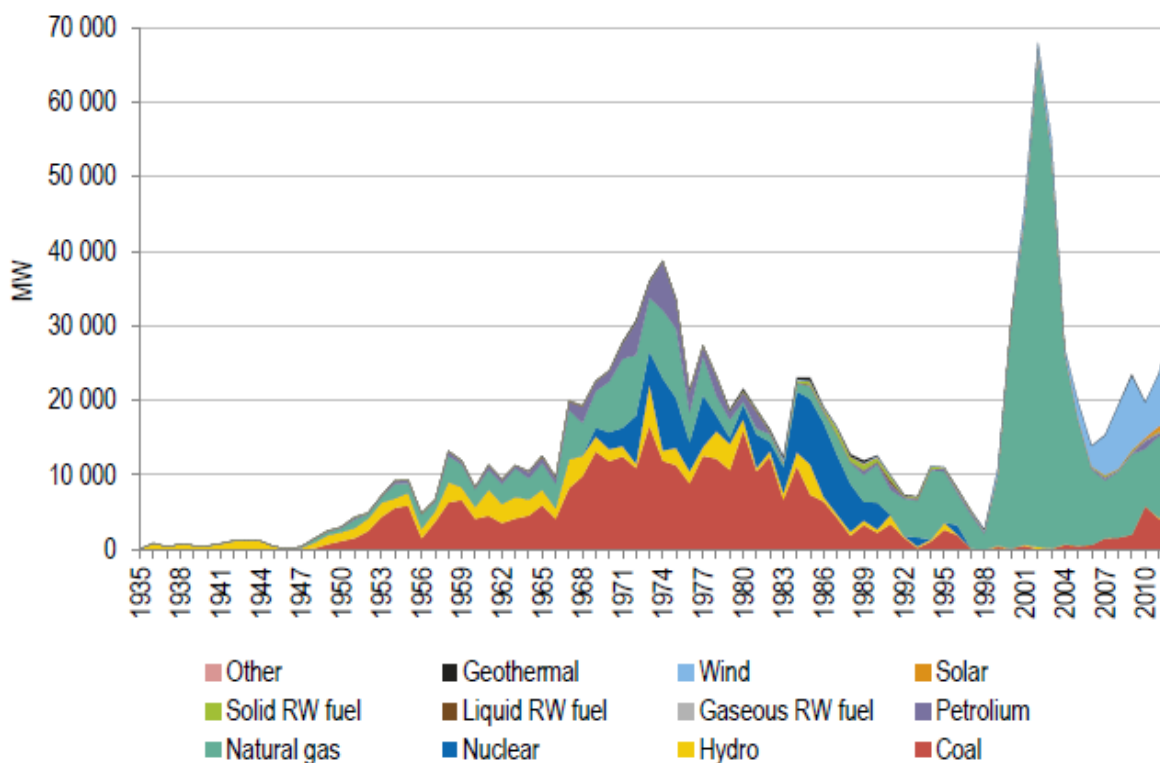
5 Η περίπτωση των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής – Επίλογος και Προτάσεις.

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής αποτελείται από τις ακόλουθες διεργασίες: παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μετάδοση και διανομή σε βιομηχανικούς και εμπορικούς, δημόσιους και οικιακούς αγοραστές. Στον Πίνακα 5.1 φαίνεται η συνολική ισχύς ηλεκτροπαραγωγής στις ΗΠΑ ανά πηγή ενέργειας, το 2014.

Πίνακας 5-1 Η συνολική ισχύς των διαφορετικών πηγών ενέργειας σύμφωνα την Αρχή ενέργειας των ΗΠΑ, US Energy Administration Information - US EAI, 2014 [4].

Τύπος ενέργειας	Αριθμός γεννητριών ενέργειας	Παραγωγική ισχύς (MWe)
Άνθρακας	1212	329815
Πετρέλαιο	3601	49794
Φυσικό αέριο	5700	488169
Άλλα αέρια	99	2452
Πυρηνική	100	104424
Υδροηλεκτρική	4002	78581
Αιολική	977	60712
Ηλιακή	874	6674
Ξύλο	369	9477
Γεωθερμική	193	3765
Βιομάζα	1850	5832
Άλλοι	110	2728
Σύνολο	19087	1142420

Οι περιβαλλοντικές πολιτικές και οι ρυθμιστικές αρχές προκαλούν αβεβαιότητα σχετικά με το ρυθμό αποχώρησης των ορυκτών καυσίμων και την ικανότητα παραγωγής πυρηνικής ενέργειας (Σχήμα 5.1). Οι αγορές ενδέχεται να αποτύχουν να προσελκύσουν επενδύσεις σταθερού κόστους και μακράς διάρκειας όπως η πυρηνική ενέργεια. Υπάρχουν και άλλοι λόγοι που εμποδίζουν την πυρηνική ανάπτυξη, ιδίως οι χαμηλές τιμές του φυσικού αερίου και η πλεονάζουσα παραγωγή του σε ορισμένες περιφέρειες, η απουσία τιμής για το CO₂ και το υψηλό κόστος των νέων πυρηνικών σταθμών [1,4].



Σχήμα 5-1 Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ανά πηγή ενέργειας τα τελευταία 70 χρόνια στις ΗΠΑ, US EAI, 2014 [4].

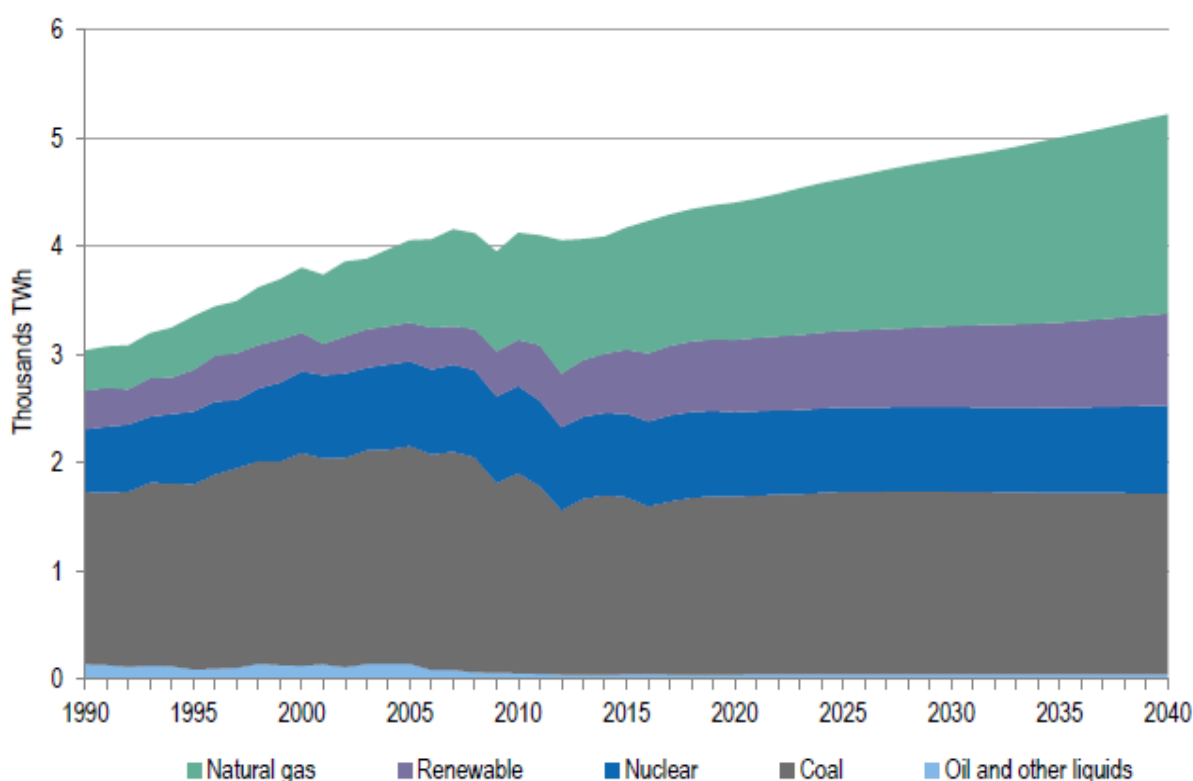
5.1 Ο ρόλος των SMRs στις Ηνωμένες Πολιτείες.

Υπάρχει έντονο ενδιαφέρον στις ΗΠΑ για αναδιαμόρφωση της πυρηνικής βιομηχανίας και ιδιαίτερη προσοχή έχει επικεντρωθεί τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη των *SMRs*, οι οποίοι θα μπορούσαν ενδεχομένως να αντικαταστήσουν παλαιούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με κατανάλωση άνθρακα που πρέπει να κλείσουν λόγω νέων, περισσότερο αυστηρών κανονισμών για την προστασία του περιβάλλοντος. Οι Ηνωμένες Πολιτείες έχουν ενεργό πρόγραμμα κατασκευής μικρών αντιδραστήρων τα τελευταία χρόνια. Υπάρχουν μερικά σχέδια *SMRs* με άμεσες δυνατότητες ανάπτυξης, όπως τα μοντέλα *mPower*, *NuScale*, *Westinghouse* και *Holtec*. Έχουν διατεθεί 452 εκατομμύρια δολάρια σε επιχορηγήσεις για τα μοντέλα *mPower* και *NuScale*, στην υποστήριξη του σχεδιασμού τους και στα προγράμματα αδειοδότησης.

Εάν η ανάπτυξη της τεχνολογίας των *SMRs* συνεχιστεί όπως αναμένεται από τους σχεδιαστές τους, οι αντιδραστήρες θα μπορούσαν να κατασκευαστούν ταχύτερα και με χαμηλότερο κόστος από τους προηγμένους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος *LWRs*. Το μεταβλητό τους κόστος είναι πιο δύσκολο να εκτιμηθεί δεδομένου ότι εξαρτάται έντονα από την εκάστοτε ρυθμιστική αρχή.

Ακολουθώντας το ιδανικό σενάριο (*NEA/IAEA, 2014*), αναμένεται να προστεθεί νέα πυρηνική ισχύς της τάξης των 16 GWe στις Ηνωμένες Πολιτείες κατά την περίοδο 2020-2035 και περίπου 6 GWe σύμφωνα με το μετριοπαθές σενάριο. Σύμφωνα με

τις προβλέψεις της *US EAI*, άλλες πηγές ενέργειας που αναμένεται να αναπτυχθούν τις επόμενες δεκαετίες, είναι τα εργοστάσια φυσικού αερίου και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Σχήμα 5.2). Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, οι *SMRs* με μικρότερο κόστος εργοστασιακής παραγωγής από τους προηγμένους *LWRs* και με μεγαλύτερο μεταβλητό κόστος (λειτουργία, συντήρηση και κόστος καυσίμων) γίνονται όλο και περισσότερο ανταγωνιστικοί στις αγορές. Το βέλτιστο ποσοστό των *SMRs* στην συνολική εγκατεστημένη πυρηνική ισχύ είναι περίπου 23% όταν εμπλακεί περίπου 20% παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, και περίπου 16% όταν δεν υπάρχουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.



Σχήμα 5-2 Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ανά πηγή ενέργειας, US EIA, 2014 [4].

Ιδανικά, η εκτίμηση της τάξης μεγέθους του βέλτιστου ποσοστού των *SMRs* στην παγκόσμια αγορά, δεδομένης της αβεβαιότητας άλλων παραγόντων, ανέρχεται στο 20% (της νέας εγκατάστασης πυρηνικής ισχύος παγκοσμίως), δηλαδή περίπου 3,5 GWe στις ΗΠΑ για την περίοδο 2020-2035. Αυτό θα αντιστοιχεί περίπου στο 3,5% της συνολικής πυρηνικής ισχύος που θα εγκατασταθεί στις Ηνωμένες Πολιτείες την περίοδο 2035-2040 [1,4].

5.2 Αδειοδότηση των SMRs στις Ηνωμένες Πολιτείες.

Η χορήγηση άδειας για τους *SMRs* θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην ανταγωνιστικότητά τους. Ειδικότερα, η αποδοχή από τους ρυθμιστές των καινοτόμων χαρακτηριστικών ασφαλείας, του μειωμένου προσωπικού για τη λειτουργία του εργοστασίου και της κατασκευής ολόκληρων μονάδων και εξαρτημάτων αντιδραστήρων στο εργοστάσιο. Υπάρχει ένα σενάριο διαχωρισμού της άδειας σε τρεις υποκατηγορίες: Παραχωρείται άδεια χρήσης εγκαταστάσεων πολλαπλών μονάδων, άδεια κύριας εγκατάστασης και άδεια για κάθε μονάδα αντιδραστήρα. Η τελευταία εναλλακτική λύση (δηλαδή άδεια *SMR* παρόμοια με αυτή των προηγμένων *LWRs*) θεωρείται η καλύτερη επιλογή στο σημερινό στάδιο. Η *NuScale* είναι η πρώτη εταιρεία που κατέθεσε στη εθνική ρυθμιστική αρχή των Ηνωμένων Πολιτειών (*Nuclear Regulatory Commission – NRC*⁹), τον Δεκέμβριο 2016, αίτηση αδειοδότησης για λειτουργία *SMR*. Πλέον, έχει ολοκληρωθεί με επιτυχία η πρώτη φάση αξιολόγησης [4].

⁹ www.nrc.gov

5.3 Επίλογος.

Οι *SMRs* είναι μικροί αντιδραστήρες αρθρωτής κατασκευής και εργοστασιακής συναρμολόγησης, με απόδοση ισχύος μικρότερη των 300 MWe, οι οποίοι θεωρείται ότι δύνανται να διευρύνουν την ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας. Στοχεύουν στις παραδοσιακές αγορές (στο υπάρχον δίκτυο), σε εξειδικευμένες εφαρμογές απομακρυσμένων και απομονωμένων περιοχών και σε νησιά που απαιτούν μικρού μεγέθους μονάδες, όπου η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από άλλες πηγές έχει υψηλό κόστος.

Οι προμηθευτές μικρών αντιδραστήρων παρουσιάζουν μία σειρά από πλεονεκτήματα:

- Αρθρωτή κατασκευή και απλοποιημένα συστήματα μετατροπής ισχύος.
- Βραχύτερος χρόνος κατασκευής.
- Ενισχυμένη πυρηνική ασφάλεια και εφαρμογή παθητικών χαρακτηριστικών.
- Ελεγχόμενη απόδοση ισχύος, μειωμένοι ρύποι, δυνατότητα συμπαραγωγής (αφαλάτωση νερού και τηλεθέρμανση).
- Διαμόρφωση πολλαπλών μονάδων.
- Ευκολότερος παροπλισμός και μη εξάπλωση πυρηνικού υλικού.

Το ακριβές κόστος δεν είναι ακόμη απόλυτα γνωστό, ωστόσο οι σχεδιαστές υποστηρίζουν ότι το καθαρό κόστος λειτουργίας ανά kWe θα είναι χαμηλότερο από το κόστος λειτουργίας ενός προηγμένου *LWR*. Αυτό θα είναι εφικτό αν πραγματοποιηθεί μαζική παραγωγή *SMRs* και βελτιστοποίηση των γραμμών συναρμολόγησης.

Το ποσοστό των *SMRs* στην παγκόσμια πυρηνική κατασκευή την περίοδο 2020-2035 εκτιμάται σύμφωνα με διάφορα κριτήρια ανταγωνιστικότητας και εξετάζονται δύο περιπτώσεις: από τη μία πλευρά η αισιόδοξη, που προϋποθέτει την επιτυχή χορήγηση αδειών και την εγκαθίδρυση εργοστασίων παραγωγής και αλυσίδας συναρμολόγησης και από την άλλη πλευρά, μια πιο μετριοπαθής περίπτωση περιορισμένης παραγωγής μονάδων μικρών αντιδραστήρων. Στο πρώτο σενάριο υπολογίζεται αύξηση ισχύος από τους *SMRs* ως και 21 GWe μέχρι το 2035, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 3% της συνολικής εγκατεστημένης πυρηνικής ισχύος στον κόσμο. Επομένως, το 9% περίπου των νέων πυρηνικών σταθμών θα μπορούσαν να είναι *SMRs*, ποσοστό που μειώνεται περίπου στο 2,3% στο δεύτερο σενάριο.

Τέλος, οι *SMRs* πρέπει να αποδείξουν ότι μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις ασφαλείας. Οι ρυθμιστικές αρχές και οι οργανισμοί τεχνικής υποστήριξης θα χρειαστούν χρόνο και πόρους για να αξιολογήσουν τις καινοτομίες και η διαδικασία αυτή θα μπορούσε να οδηγήσει σε καθυστερήσεις στην έκδοση αδειών λειτουργίας [1,4].

5.4 Προτάσεις.

Οι *SMRs* αντιπροσωπεύουν έναν εναλλακτικό τρόπο ανάπτυξης και προώθησης της πυρηνικής ενέργειας. Ιδανικά, μπορούν να προσθέσουν μέχρι και 21 GWe στη συνολική απόδοση ισχύος ως το 2035. Για την επίτευξη των φιλόδοξων στόχων της καινοτόμας αυτής τεχνολογίας, προτείνονται οι ακόλουθες συστάσεις:

- Οι κυβερνήσεις και η βιομηχανία πρέπει να συνεργαστούν για την επιτάχυνση της κατασκευής των πρωτοτύπων *SMRs* που θα μπορούσαν να αποδείξουν τα οφέλη αυτής της τεχνολογίας. Οι κυβερνήσεις χρειάζεται να υποστηρίξουν τη διεθνή συνεργασία και να εργαστούν σε εθνικό και διεθνές επίπεδο για τη θέσπιση κοινού πλαισίου αδειοδότησης για μικρούς πυρηνικούς αντιδραστήρες.
- Οι προμηθευτές και οι δυνητικοί αγοραστές των *SMRs* θα πρέπει να συνεργάζονται στενά με τις ρυθμιστικές αρχές προκειμένου να επιλύουν άμεσα τα διάφορα αναπτυξιακά και κατασκευαστικά ζητήματα (καθώς και για την επικύρωση των καινοτόμων χαρακτηριστικών ασφαλείας).
- Οι προμηθευτές και οι αγοραστές θα πρέπει να συνεργαστούν για να εκτιμήσουν τα οικονομικά στοιχεία των *SMRs*, λαμβάνοντας υπόψη τον ρόλο που θα μπορούσαν να διαδραματίσουν οι μικροί αντιδραστήρες στους νέους ενεργειακούς συνδυασμούς, ιδίως μετά την άνοδο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Πρέπει να πραγματοποιηθούν λεπτομερείς αξιολογήσεις της αγοράς των *SMRs*, με ρεαλιστικές εκτιμήσεις για τα οικονομικά στοιχεία και τις δυνατότητες της γραμμής συναρμολόγησης [1,4].

6 Βιβλιογραφία

- [1] I. N. Kessides and V. Kuznetsov, “Small Modular Reactors for Enhancing Energy Security in Developing Countries”, *Sustainability*, p. 1806-1832, 2012.
- [2] International Atomic Energy Agency, "50 Years of Nuclear Energy", 2008.
- [3] "European Council", [online]. Available: <http://www.consilium.europa.eu/>.
- [4] Nuclear Energy Agency, “Small Modular Reactors Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment”, 2016.
- [5] World Nuclear Association, "Small Nuclear Power Reactors", 2018. [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org>.
- [6] International Atomic Energy Agency, “Advances in Small Modular Reactors – Technology Development, A Supplement to IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)”, 2016.
- [7] World Nuclear Association, “Nuclear fusion power”, 2017. [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org>.
- [8] World Nuclear Association, “Nuclear power reactors”, 2018. [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org>.
- [9] G. Hewitt, J. Collier, “Introduction to Nuclear Power”, 2000.
- [10] “Κύκλος πυρηνικού καυσίμου”, [online]. Available: <http://www.eclass.duth.gr>.
- [11] World Nuclear Association, “Nuclear Process Heat for Industry”, 2017. [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org>.
- [12] G. Waddington, “Small Modular Reactors (SMR) - Feasibility Study”, 2014.
- [13] M.Cooper, “Small modular reactors and the future of nuclear power in the United States”, *Energy Research & Social Science*, p. 162-177, 2014.
- [14] A. Harkness, Westinghouse Electric Company, “Small Modular Reactors (SMRs), What are they and why are they cool”, ANS Meeting Rocky Hill, 2012.
- [15] R. Fares, “Three Ways Small Modular Reactors Overcome Existing Barriers to Nuclear”, 2016. [Online]. Available: <https://blogs.scientificamerican.com>.
- [16] N. Shulyak, Westinghouse Electric Company, “Westinghouse Small Modular Reactor Taking Proven Technology to the Next Level”, IAEA INPRO Dialogue Forum Vienna, 2011.
- [17] J. E. Kelly, U.S. Department of Energy, “Generation IV Reactors”, Generation IV International Forum, 2014.
- [18] Nuclear Energy Agency, “Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems”, Generation IV International Forum, 2014.

[19] International Atomic Energy Agency, “Design Safety Considerations for Water Cooled Small Modular Reactors Incorporating Lessons Learned from the Fukushima Daiichi Accident”, 2016.

[20] Seaborg Technologies, “Seaborg Wasteburner, Molten salt reactor”, 2015.

[21] World Nuclear Association, “Fast Neutron Reactors”, 2017. [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org>.

[22] Generation IV International Forum, “GIF R&D Outlook for Generation IV Nuclear Energy Systems”, 2009.

[23] World Nuclear Association, “Safety of Nuclear Power Reactors”, 2017. [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org>.

[24] Institut de Radioprotection et de Surete Nuclaire, “Considerations concerning the strategy of corium retention in the reactor vessel”, 2015.

[25] Canadian Nuclear Safety Commission, “Small Modular Reactors Regulatory Strategy, Approaches and Challenges”, 2016.