

علمی - تخصصی

## نیروگاه‌های هسته‌ای و راکتورهای ماژولار کوچک (SMRs)

حسین شیرانی\*

استادیار مدیریت دانش و فناوری ساخت - هلدینگ تخصصی مهندسی مشاور - قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا(ص)

(دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۴، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳)

### چکیده

در این مقاله انواع راکتورهای هسته‌ای تجاری بزرگ و فن‌آوری استفاده شده در ساخت راکتورهای هسته‌ای کوچک مقیاس مورد مطالعه قرار گرفت. راکتورهای ماژولار کوچک (SMRs; Small Modular Reactors) به عنوان یک نوع از راکتورهای هسته‌ای کوچک مقیاس معرفی گردید و انواع مختلف آن در قالب پنج گروه راکتورهای آب سبک (LWRs)، راکتورهای آب سنگین (HWRs)، راکتورهای سریع نوترونی (FNRs)، راکتورهای نمک گداخته (MSRs) و راکتورهای دما بالای تعدیل‌شده با گرافیت (GmHTRs) ارائه گشت و مشخصات فنی برخی از رایج‌ترین آنها مانند ماژول‌های NuScale، mPower، PRISM و VBER-300 در تشکیل واحد نیروگاهی مورد بررسی قرار گرفت. سوابق ساخت، سوخت هسته‌ای، ویژگی‌های منحصر به فرد و مزایای راکتورهای ماژولار کوچک از نظر کارایی، انعطاف پذیری و اقتصادی نسبت به راکتورهای بزرگ تجاری مورد تحلیل قرار گرفت و مشخص گردید که حجم کوچک و طراحی خاص ساختار قلب راکتور، سیستم ایمنی فوق هوشمند ذاتی غیرعامل هر ماژول، سیستم خنک‌کننده طبیعی، قابلیت حمل و نقل آسان، عدم امکان بروز برخی حوادث شدید در راکتور و دیگر قابلیت کاربردهای جانبی SMR ها همچون توانایی تولید هیدروژن و آب شیرین، آنها را به عنوان بهترین کاندیدا برای ایفای نقش اساسی در تولید انرژی پاک معرفی کرده است. در پایان، با توجه به استقبال جهانی صورت پذیرفته از راکتورهای ماژولار کوچک و همچنین با نگاهی بر اسناد بالادستی و مأموریت‌ها و در جهت جلوگیری از شکل‌گیری شکاف عمیق فن‌آوری میان جمهوری اسلامی ایران و کشورهای پیشرفته در خصوص ساخت و راه‌اندازی نیروگاه‌های هسته‌ای برای تأمین برق پایدار، ضرورت استفاده از ظرفیت بالقوه و بالفعل متخصصین و مهندسی ارشمنند قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا(ص) جهت انحصار شکنی و بومی سازی دانش فنی و خلق فن‌آوری ساخت SMR ها مطرح گردید.

### کلید واژه‌ها: فن‌آوری هسته‌ای، راکتور ماژولار کوچک، SMR، NuScale، mPower

#### ۱. مقدمه

بوده است. کشورهای دارنده صنعت هسته‌ای پیشرفته، لاجرم در دیگر صنایع هم پیشرفته هستند. این صنعت به دلیل استاندارد بالا، دیگر صنایع را با خود به جلو می‌کشد. ضمن اینکه صنعت هسته‌ای میعادگاه خیلی از صنایع است. انرژی هسته‌ای به تمامی انرژی‌های دیگر قابل تبدیل است البته که علوم و فنون هسته‌ای طیف گسترده‌ای دارد و فقط شامل نیروگاه‌های هسته‌ای نمی‌شود. تجاری‌سازی فن‌آوری هسته‌ای از سیاست‌های کلان دنیا بوده و این فن‌آوری علاوه بر تولید برق، در پزشکی، امور بهداشتی، دام‌پزشکی، دام‌پروری، دارو، صنایع غذایی و کشاورزی نیز کاربرد دارد [۲].

امروزه فن‌آوری، بخشی مهم در فعالیت سازمان‌ها و شرکت‌ها محسوب می‌شود به گونه‌ای که بیشتر سازمان‌ها استراتژی‌های

امروزه دنیا با چالش جدی تغییرات آب و هوا رو برو است ناشی از افزایش تقاضای جوامع برای مصرف انواع حامل‌های انرژی و به تبع آن انتشار روز افزون آلاینده‌های زیست محیطی است. هم‌اکنون بخش اعظم تولید انرژی به سوخت‌های فسیلی وابسته است و ادامه این روند تغییرات آب و هوایی شدیدی را در آینده سبب خواهد شد. استفاده از انرژی هسته‌ای به عنوان یک منبع انرژی پاک گزینه‌ای مناسب جهت کاهش تولید آلاینده‌های زیست محیطی همیشه مورد توجه سیاستگذاران انرژی بوده است [۱]. صنعت هسته‌ای پیش‌ران و پیش‌برنده دیگر صنایع کشور

براساس این قرارداد، شرکت کرافت ورک اونیون موظف شده بود طراحی، ساخت و نصب یک نیروگاه برق اتمی مشتمل بر دو واحد از نوع آب سبک تحت فشار با ظرفیت ۳۷۶۵ مگاوات حرارتی (۱۲۹۳ مگاوات الکتریکی) در ۱۸ کیلومتری جنوب غربی شهر بوشهر به صورت کلید در دست به انجام رساند. افزون بر این، پیمانکار در قرارداد جداگانه‌ای تعهد کرده بود که سوخت مورد نیاز نیروگاه را برای ۱۰ سال نخست تأمین کند که این قرارداد برای ۳۰ سال عمر نیروگاه نیز قابل تمدید بوده است. همچنین، استفاده از بخار حاصل از نیروگاه اتمی بوشهر برای راه‌اندازی دو واحد آب شیرین‌کن، هر یک به ظرفیت ۱۰۰ هزار متر مکعب در روز برای مصارف آشامیدنی، کشاورزی و صنعتی در منطقه بوشهر نیز در قالب پروژه جانبی مطرح شده بود. تا سال ۱۳۵۷ بخشی از عملیات ساختمانی واحد اول نیروگاه پایان یافت و قسمتی از تجهیزات برقی و مکانیکی ساخته و نصب گردید. پس از پیروزی انقلاب اسلامی، شرکت آلمانی از ادامه کار برای ساخت نیروگاه اتمی بوشهر سر باز زد. در سال ۱۳۷۳ قرارداد تکمیل واحد اول نیروگاه اتمی بوشهر بین سازمان انرژی اتمی ایران و پیمانکار روسی وابسته به وزارت انرژی اتمی روسیه امضاء گردید. در سال ۱۳۸۲ اولین مقدره سوخت هسته‌ای توسط متخصصین داخلی تولید شد و در سال ۱۳۸۵ جمهوری اسلامی ایران موفق به بومی سازی فن‌آوری هسته‌ای و دسترسی به دانش فنی غنی سازی اورانیوم به میزان ۵/۳ درصد شد. در راستای برنامه بلند مدت توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در آبان ماه ۱۳۹۳ قرارداد احداث دو واحد نیروگاه اتمی ۱۰۵۷ مگاواتی در ساخت‌گاه بوشهر بین دو شرکت مادر تخصصی تولید و توسعه انرژی اتمی ایران (به عنوان کارفرما) و اتم استروی اکسپرت روسی (به عنوان پیمانکار) امضاء شده است. این قرارداد در دی ماه ۱۳۹۵ نافذ و عملیات اجرایی آن طبق برنامه زمان بندی در حال انجام می‌باشد [۲].

فن‌آوری مورد استفاده در ساخت راکتورهای حال حاضر نیروگاه‌های هسته‌ای جهان عمدتاً مربوط به نیم قرن قبل می‌باشند و لذا بخش عمده راکتورهای هسته‌ای ظرف دو دهه آینده از مدار خارج می‌شوند. جایگزینی راکتورهای قدیمی هسته‌ای فرآیندی بسیار دشوار، پرهزینه است. فن‌آوری نوین تولید راکتورهای ماژولار کوچک (SMRs; Small Modular Reactors) کوچک که از علوم مرز دانشی و در حال حرکت بر لبه فن‌آوری دنیاست می‌تواند انقلابی در صنعت هسته‌ای و نیروگاه‌های هسته‌ای جهان ایجاد کند. طبق تعریف انجمن جهانی هسته‌ای و بر اساس تعریف‌های آژانس انرژی اتمی، راکتورهای هسته‌ای ماژولار (مدولار) کوچک در برابر راکتورهای تجاری بزرگ با توان تولیدی بین ۱۰۰۰ تا ۱۶۰۰ مگاوات، به عنوان راکتورهای هسته‌ای معادل ۳۰۰ مگاوات معادل یا کمتر تعریف می‌شوند که با استفاده از فن‌آوری ماژولار و امکان ساخت در

توسعه‌ی خود را بر اساس فن‌آوری و نوآوری موجود در آن تعریف می‌کنند. اغلب صنایع فعال در کشورهای در حال توسعه، انتقال فن‌آوری از کشورهای توسعه یافته را به عنوان سیاستی برای توسعه خود در نظر قرار می‌دهند. در فرآیند بومی سازی، دانشی که به صورت نظری یا عملی در سازمان وجود ندارد از طریق منابع خارجی دارنده آن کسب می‌شود، در سازمان نهادینه می‌شود و سپس براساس الزامات خاص سازمان تغییر پیدا می‌کند. در انتهای فرآیند بومی سازی، شرکت و یا سازمان دریافت کننده، بایستی توانایی نوآوری در دانش کسب شده را داشته باشد. این نوآوری در دو سطح مفهومی و عملی می‌تواند صورت بپذیرد. در سطح مفهومی در برگیرنده توسعه مفهومی دانش کسب شده و در سطح عملی شامل تغییرات جزئی در نحوه استفاده از دانش کسب شده می‌باشد. بومی‌سازی فرآیندی مستمر است که انتهای برای آن قابل تصور نیست. فن‌آوری نیروگاه‌های هسته‌ای در تولید برق مدت‌هاست که مورد توجه کشور در زمینه تأمین انرژی قرار گرفته است و با توجه به قراردادهای مختلف و نهایت تلاش از سمت گیرنده فن‌آوری، سیاست‌هایی اتخاذ شده است تا سهم صنعت داخلی در طراحی، ساخت، بهره‌برداری و نگهداری از نیروگاه‌های هسته‌ای افزایش یابد. در راستای این سیاست‌ها، پروژه بومی‌سازی فن‌آوری نیروگاه‌های هسته‌ای توسط ظرفیت‌ها و پتانسیل‌های داخلی به عنوان یک ضرورت کاملاً احساس می‌شود.

طی گزارش آژانس بین‌المللی انرژی اتمی تعداد کل نیروگاه‌های اتمی غیر نظامی که تا آوریل ۲۰۲۰ جهت تولید برق در جهان فعالیت دارند برابر با عدد ۴۴۰ می‌باشد که ظرفیت تولید برق ترکیبی آنها ۳۹۰ گیگاوات است. ۵۵ راکتور در دست ساخت و ۱۰۹ راکتور برنامه‌ریزی شده جهت ساخت وجود دارد که ظرفیت ترکیبی آنها به ترتیب ۶۳ گیگاوات و ۱۱۸ گیگاوات است. همچنین در حال حاضر پیشنهاد ساخت ۳۲۹ راکتور روی میز قرار دارد و بیش از ۴۰۰ کشتی که در آب‌های آزاد جهان در حال حرکت‌اند از انرژی راکتورهای هسته‌ای استفاده می‌کنند [۳].

## ۱-۱. ظهور فن‌آوری هسته‌ای در جمهوری اسلامی ایران

جمهوری اسلامی ایران در سال ۱۳۳۵ به منظور دستیابی به فن‌آوری هسته‌ای موافقت‌نامه ۱۱ ماده‌ای را با ایالات متحده منعقد کرد که بر اساس این قرارداد جمهوری اسلامی ایران حق داشتن انرژی هسته‌ای برای استفاده غیر نظامی از این انرژی را داشت و متعاقب این قرارداد در سال ۱۳۳۶ به عضویت آژانس بین‌المللی انرژی اتمی درآمد و در سال ۱۳۵۳ سازمان انرژی اتمی ایران را تأسیس نمود. قرارداد ساخت نیروگاه اتمی بوشهر در تیرماه سال ۱۳۵۴ بین سازمان انرژی اتمی ایران و شرکت کرافت ورک اونیون (KWU) آلمان غربی منعقد گردید که

کشورهای برخوردار از این فناوری، نسبت به برخوردار کردن کشور از فناوری صلح آمیز هسته‌ای اقدام کند. جهت جلوگیری از شکل‌گیری شکاف عمیق علمی و فن‌آوری میان ایران و کشورهای پیشرفته از یک طرف و با توجه به ترسیم موقعیت برتر در حوزه علم و فن‌آوری در منطقه مطابق سند چشم‌انداز توسعه کشور در افق ۱۴۰۴ از سوی دیگر، پرداختن به مطالعات فن‌آوری راکتورهای هسته‌ای و ساخت راکتورهای ماژولار کوچک (موضوع و پیشنهاد این مقاله) ضروری به نظر می‌رسد.

قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء (ص) یکی از سازمان‌هایی است که با افتخار توانسته گام‌های بلندی در عرصه سازندگی، خلق فن‌آوری و انحصار شکنی در حوزه‌های مختلف فنی و مهندسی بردارد. فعالیت متخصصین و مهندسین ارزشمند این سازمان، قدرت و ظرفیتی بالقوه و بالفعل از نظر دانش و فن‌آوری در کشور ایجاد نموده‌اند که به نظر می‌رسد می‌بایست از این ظرفیت به نحو احسن در جهت ورود به تأسیسات و تجهیزات فنی و مهندسی حوزه تخصصی صنعت هسته‌ای و به صورت مشخص بومی سازی دانش فنی و ساخت SMR ها در واحدهای نیروگاهی مقیاس متوسط اتمی در جهت اقتدار بخشی به نظام جمهوری اسلامی ایران استفاده نماید.

## ۲. انواع راکتورهای هسته‌ای تجاری بزرگ

معمول‌ترین راکتورهای هسته‌ای در جهان، راکتورهای آب سبک (LWR: Light Water Reactor) و راکتورهای آب سنگین (HWR: High Water Reactor) می‌باشند که در آنها از آب جهت کند کردن حرکت نوترون و خنک سازی راکتور و همچنین عامل انتقال انرژی به توربین‌ها استفاده می‌شود [۵-۱۱].

### - راکتورهای هسته‌ای آب سبک

راکتورهای آب سبک، پرمصرف‌ترین نوع راکتور هسته‌ای صنعتی در نیروگاه‌های هسته‌ای در جهان هستند. این راکتورها توسط آب معمولی خنک می‌شوند و معمولاً در فشارهای بالا کار می‌کنند. سه نوع LWR امروزه در جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱).

### - راکتورهای آب فشرده

#### (PWRs: Pressurized-Water Reactors)

راکتورهای آب فشرده معمولاً در فشارهای آبی بالا و در حدود ۱۵ مگاپاسکال کار می‌کنند و از آنجایی که آب درون این سیستم‌ها به صورت بخار نیست، راکتور احتیاج به مبدل گرمایی جهت تولید انرژی دارد. بازده کل این نوع راکتورها حدوداً بین ۳۲٪ تا ۳۳٪ تخمین زده می‌شود. این راکتور از  $UO_2$  غنی شده با درصد خلوص بالا به عنوان سوخت استفاده می‌کند. دما در قلب راکتور تا ۴۵۰ درجه سلسیوس هم می‌رسد. آب عبوری از

کارخانه و در زمان کوتاه طراحی شده‌اند. برخی از راکتورهای کوچک تا ظرفیت ۵۰۰ مگاوات موجود با توجه به این که در حال حاضر با این تعریف سازگار نیستند، اما این توضیح برای اکثر آنها صادق است.

توسعه SMR ها در جهان با سرمایه‌گذاری بخش خصوصی از جمله با مشارکت شرکت‌های کوچک استارت‌آپی در حال انجام است. مشارکت این سرمایه‌گذاران جدید نشانگر یک تغییر عمیقی در تحقیق و توسعه هسته‌ای تحت هدایت دولت و بخش خصوصی با اهداف کارآفرینانه قوی هدایت شونده می‌باشد که اغلب با یک هدف اجتماعی در ارتباط هستند. این هدف اغلب استفاده از انرژی ارزان، پاک و بدون انتشار دی‌اکسید کربن است. راکتورهای کوچک به طور بالقوه اجازه رقابت موثر با سایر منابع انرژی را دارا می‌باشند و می‌توانند به طور قابل توجهی ریسک مالی مربوط به نیروگاه‌های بزرگ را کاهش دهند. توسعه فن‌آوری‌های جدید در صنعت هسته‌ای همواره مورد توجه پیشروان این فن‌آوری بوده که در این میان استفاده از راکتورهای هسته‌ای کوچک با این فرض که از لحاظ فنی و اقتصادی توجیه پذیر باشند، می‌توانند به عنوان رویکردی جدید در تأمین انرژی جهان مطرح شود.

طی آخرین گزارشی که توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی چندی پیش در نسخه ۲۰۲۰ کتابچه دوسالانه در خصوص پیشرفت‌های فن‌آوری راکتورهای ماژولار کوچک منتشر شد، تعداد کل SMR ها تا پایان سال ۲۰۲۰ که در حال ساخت و یا توسعه هستند ۷۲ مورد در ۱۸ کشور جهان اعلام شد. ویژگی‌های منحصربه‌فرد SMR ها از نظر کارایی، انعطاف پذیری و اقتصادی ممکن است آنها را برای ایفای نقش اساسی در انتقال انرژی پاک با استقبال جهانی روبرو کنند. انتظار می‌رود استقرار گسترده‌تر SMR ها طی دهه آینده آغاز شود. SMR ها همچنین ممکن است برای کار انعطاف پذیر همزمان با منابع انرژی تجدیدپذیر متغیر مانند باد و خورشید و برای کاربردهای غیر الکتریکی مانند نمک زدایی آب دریا، ایجاد گرمایش و تولید هیدروژن نیز مناسب باشند [۴].

## ۱-۲. ضرورت بومی سازی فن‌آوری SMRs

بر اساس بندهای ۷ و ۸ اصل ۴۳ قانون اساسی «استفاده از علوم و فنون و تربیت افراد ماهر به نسبت احتیاج برای توسعه و پیشرفت اقتصاد کشور» و «جلوگیری از سلطه اقتصادی بیگانه بر اقتصاد کشور»، صنعت انرژی هسته‌ای و ایجاد نیروگاه‌های اتمی برای تأمین پایدار برق، یکی از مصادیق اجرایی کردن این اصل مهم قانون اساسی کشور به شمار می‌رود. همچنین بر اساس جزء ۱ بند ب ماده ۱۳۵ قانون برنامه پنجم توسعه کشور، در خصوص برنامه بیست ساله تولید برق از انرژی هسته‌ای در چارچوب قوانین بین المللی و با بهره‌گیری از متخصصین، امکانات داخلی و بین‌المللی و

### - راکتورهای هسته‌ای آب سنگین

در HWR علاوه بر اورانیوم غنی شده، می‌توان از اورانیوم طبیعی و غنی نشده نیز بهره برد. نکته شیمی حائز توجه در مبحث آب سنگین مورد استفاده در طراحی این راکتورها این است که آب سنگین ( $D_2O$ ) در فشار نزدیک به ۱۰ مگاپاسکال هنوز مایع است و نمی‌جوشد. راکتور کانادایی کندو (Canada Deuterium Uranium Reactor (CANDU Reactor)) یکی از معمول‌ترین راکتورهای آب سنگین فشرده (PHWR: Pressurized Heavy Water Reactor) در دنیا می‌باشد.

### ۳. راکتورهای ماژولار کوچک

#### (SMRs: Small Modular Reactors)

به‌طور خلاصه، پیشرفت و توسعه‌ی SMR ها یک پاسخ مهندسی هسته‌ای به تقاضای در حال افزایش انرژی در سراسر جهان است. این راکتورها به دلیل کوچک بودن و ماژولار بودن می‌توانند تقریباً به طور کامل در یک کارخانه ساخته شوند و ماژول به ماژول در سایت نیروگاه نصب شوند، طراحی برخی از این ماژول‌ها با ظرفیت‌های متفاوت نیروگاهی در شکل (۲) نشان داده شده است. در ساخت یک سایت نیروگاهی SMR، همه ماژول‌ها داخل یک حوضچه جدا و داخل استخر آب قرار می‌گیرند. دیوارهای استخر از فولاد ضد زنگ پوشش داده شده‌اند و گاه‌اوقات این استخرها بر روی و یا زیر زمین تعبیه می‌شوند. قرار گرفتن این استخر در زیر زمین محافظت لازم و کافی در برابر حوادثی شدید چون سیل، طوفان، زلزله و حملات تروریستی را ممکن می‌کند. هر راکتور دارای ظرفیت مشخصی برای تولید نیرو می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۳) نشان داده شده است با مونتاژ کردن و کنار هم قرار دادن تعدادی از این ماژول‌ها می‌توان به توان خروجی مشخصی از جریان الکتریسته در واحد نیروگاهی دست یافت. پوشش ایمنی غوطه‌ور در استخر آب که این امکان را میسر می‌سازد که پس از حوادث شدید بدون نیاز به دخالت عوامل خارجی و استفاده از آب از محیط بیرون جهت خنک سازی قلب راکتور، تا پس از بیش از ۶۰ ساعت همچنان قلب راکتور دچار ذوب شدگی نگردد [۱۵-۱۲].

میان میله‌های سوخت تا دمای ۳۲۵ درجه سلسیوس گرم شده و در مبدل گرمایی این آب داغ سبب گرم شدن آب در چرخه دوم می‌شود و بخاری با دمای ۲۷۰ درجه سلسیوس تولید می‌کند که این بخار به سمت توربین‌ها هدایت می‌شود.

### - راکتورهای آب جوشان

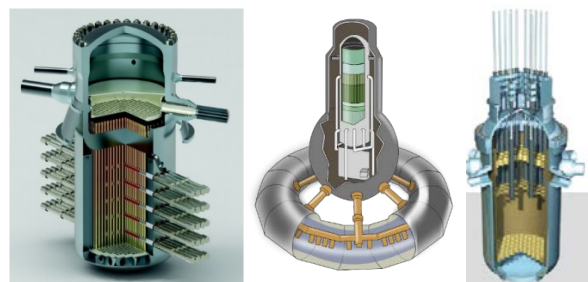
#### (BWRs: Boiling-Water Reactors)

راکتور آب جوشان معمولاً در فشارهای آبی ۷ مگاپاسکال کار می‌کنند. از آنجایی که آب درون این سیستم‌ها به صورت بخار است راکتور احتیاج به مبدل گرمایی ندارد و بخار آب مستقیماً به توربین‌ها هدایت می‌شود. به همین خاطر، این نوع راکتورها با چرخه مستقیم کار می‌کنند. بازده کل این نوع راکتورها معمولاً بین ۳۳٪ تا ۳۴٪ می‌باشد. این راکتور همانند راکتورهای آبی فشرده، از  $UO_2$  به عنوان سوخت استفاده می‌کند. از نوع خاصی از این نوع راکتورها برای تولید پلوتونیوم استفاده می‌شود. راکتور حادثه چرنوبیل یک BWR بود.

### - راکتورهای آب فوق بحرانی

#### (SCWRs: Supercritical Water Reactors)

در راکتور آب فوق بحرانی از آب فوق بحرانی به عنوان سیال عامل استفاده می‌شود. یکی از این سیالات فوق بحرانی مورد استفاده کربن دی‌اکسید و آب است. سیالات فوق بحرانی می‌توانند مانند گازها در بین جامدات حضور داشته باشند و یا به مانند مایعات مواد را در خود حل کنند. در نزدیکی نقطه بحرانی برای این سیالات، هرگونه تغییر اندک در فشار یا دما باعث یک تغییر بزرگ در چگالی آنها می‌شود.



ج) SCWR

ب) BWR

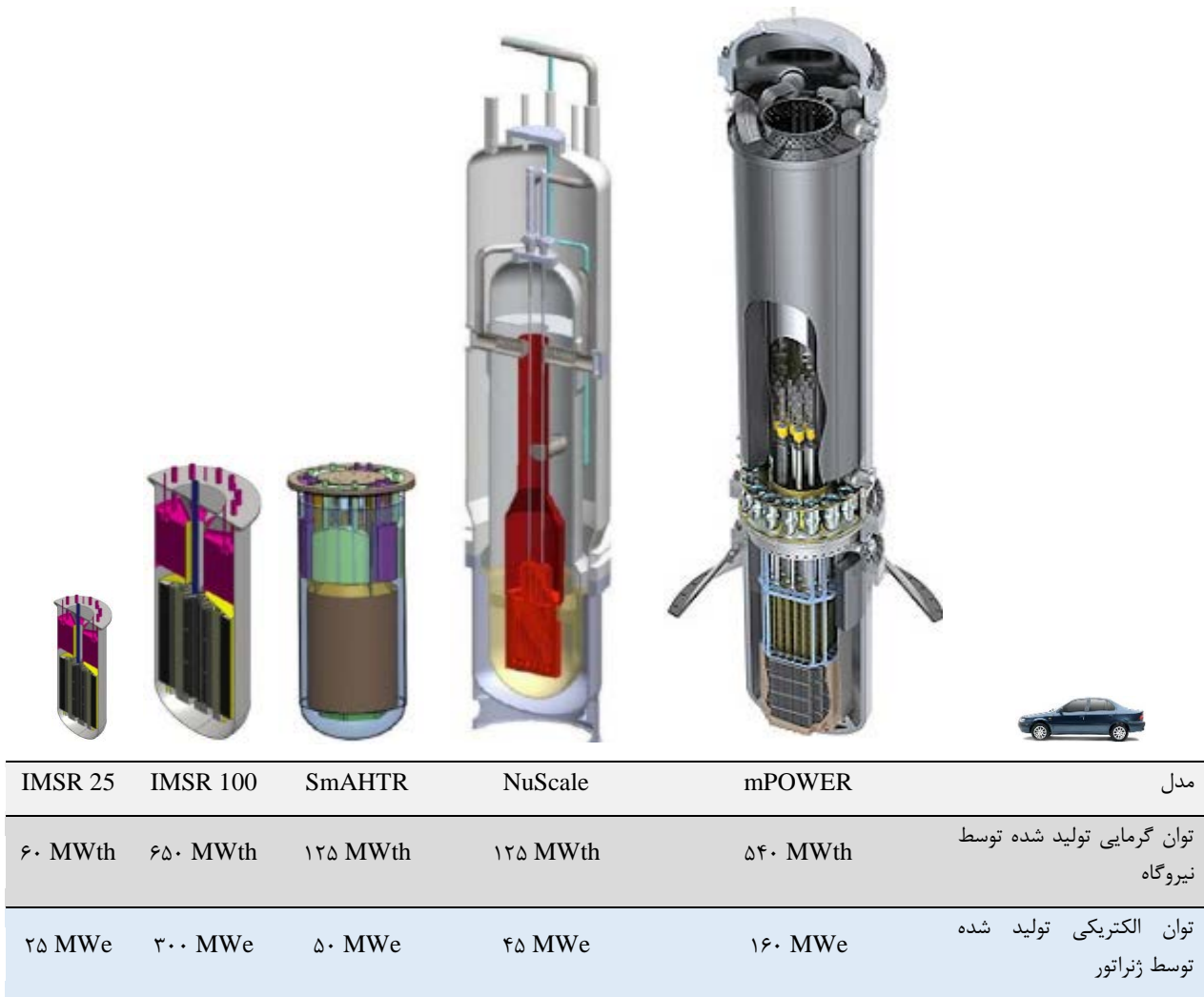
الف)  
PWR

راکتور آب فوق بحرانی

راکتور آب جوشان

راکتور آب  
فشرده

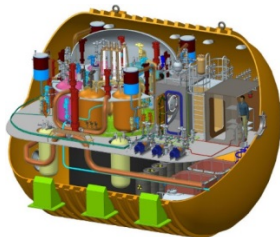
شکل (۱). تصاویر شماتیک انواع راکتورهای آب سبک



شکل (۲). انواع مختلف ماژول‌های هسته‌ای مورد استفاده در SMR ها با توان‌های الکتریکی متفاوت

خرابی هر یک از ماژول‌ها، دگر ماژول‌ها می‌توانند به فعالیت خود ادامه دهند و ماژول معیوب به کارخانه جهت رفع عیب انتقال داده شود که این امر باعث کاهش زمان تعمیرات خواهد شد. این تسهیل جهت سوخت‌گیری مجدد ماژول‌ها نیز صادق خواهد بود. همچنین حضور دو مولد بخار به موازات همدیگر، موید بر این نکته خواهد بود که در صورت از کار افتادن یک مولد، می‌توان تا اتمام تعمیرات آن، از حضور مولد دیگر جهت استفاده از راکتور بهره جست.

ماژولار بودن این راکتورها، تولید انبوه آن را میسر می‌سازد و ارتقای کیفیت آن را از تولیدی به تولید دیگر فراهم می‌نماید. برای SMR ها این ظرفیت موجود است که به دور از فضای سایت و به دور از باران و باد و محوطه کارخانه ساخته و سپس در سایت مورد نظر نصب و مونتاژ شوند و لذا از این روی تولید انبوه در داخل کارخانه هزینه ساخت را برای این راکتورها پائین خواهد آورد. استقلال عمل هر یک از ماژول‌ها در SMR ها، بزرگ‌ترین مزیت آنها می‌باشد که در صورت از کار افتادگی و



شکل (۳). نمونه‌های طراحی شده از راکتورهای هسته‌ای کوچک ماژولار (SMR)

دارد که سازه‌های زیرزمینی گاه‌ها در هنگام وقوع زمین لرزه و یا لرزه‌های ناشی از انفجارات در مجاورت سازه، می‌تواند لرزه‌هایی بس مخرب‌تر را در عمق زمین برای سازه پدید آورد.

- نیاز کمتری برای دسترسی به آب خنک کننده، بنابراین برای مناطق دور افتاده و برای کاربردهای خاص مانند استخراج یا نمک زدایی مناسب است. مقدار سوخت کم و وجود موانع بیشتر بر سر راه انتشار مواد حاصل از شکافت هسته‌ای در این راکتورها، باعث بهبود قابل توجهی در ایمنی این نیروگاه در مقایسه با نیروگاه‌های بزرگ مقیاس فعلی شده است.

- بهره‌مندی از سیستم طبیعی گردش آب جهت خنک‌کاری و استفاده هوشمندانه از جریان همرفت جهت گردش آب بدون نیاز به هیچ پمپی در مدار اول و حذف برخی از پمپ‌ها و کاهش چشم‌گیر آنها در مدار ثانویه نسبت به راکتورهای بزرگ از فن‌آوری‌های نوین به کار رفته در این راکتورها می‌باشد.

- قرارگرفتن فشارنده در بالای سر این راکتورها، نیاز به محفظه جداگانه برای فشارنده را حذف نموده و سرعت پاسخ‌دهی بر اساس گرم‌کن‌های الکتریکی و پاشش آب سرد به پالس‌های دریافتی، نسبت به راکتورهای تجاری بزرگ افزایش پیدا کرده است.

- طراحی ماژولار و اندازه کوچک SMR ها، به امکان نصب و افزایش ماژول برای توان‌های مختلف گرمایی و افزایش ظرفیت واحد در یک سایت نیروگاهی کمک کرده است.

### ۳-۲. سوخت هسته‌ای SMR ها

تعدادی کمی راکتور ماژولار کوچک وجود دارد که نیاز به سوخت اورانیوم-۲۳۵ غنی شده به میزان ۲۰٪-۵٪ دارند و معمولاً آنها به درصد خلوص بالاتری از اورانیوم نیاز دارند. البته یک خواسته جهانی وجود دارد که حداکثر میزان غنای اورانیوم مصرفی در MSR ها نهایتاً تا میزان ۱۹/۷۵٪ اورانیوم-۲۳۵ باشد. فرآیند تهیه سوخت هسته‌ای، فرآیند بسیار پیچیده و ظریفی است و دانش انجام این کار از دانش‌های پیشرفته بشری است. در واقع طی چرخه غنی‌سازی اورانیوم، پس از استخراج سنگ معدن، اورانیوم توسط اسید سولفوریک از دیگر اتم‌ها جدا می‌شود، محلول حاصل که دارای اورانیوم است، تصفیه و خشک می‌شود. محلول به دست آمده، کنستانتره جامد اورانیوم است که به آن کیک زرد گفته می‌شود. کیک زرد جامد است و برای استفاده در مرحله بعد یعنی مرحله غنی‌سازی، از فن‌آوری ویژه‌ای استفاده می‌شود و آن را به گاز  $UF_6$  (اورانیوم هگزا فلوراید) تبدیل می‌کنند. پس از تولید سوخت هسته‌ای با درصد غنای مد نظر این سوخت آماده بهره‌برداری در راکتورهای هسته‌ای در نیروگاه‌های اتمی و تولید انرژی می‌باشد. تولید انرژی هسته‌ای از دو مکانیسم قابل وصول است. (۱) شکافت هسته‌ای که فرآیندی

### ۳-۱. ویژگی‌های منحصر به فرد و مزایای SMR نسبت به راکتورهای بزرگ

بهره‌گیری از دو مولد بخار ماریپیچی به شکل متداخل و دو توریین بخار مجزا از هم از ویژگی‌های این نسل جدید راکتورهای هسته‌ای می‌باشد. تجهیزات اصلی یک راکتور مانند مولد بخار، قلب و فشارنده به صورت یک مدار یکپارچه داخل محفظه فشار قرار دارند. انواع SMR ها مولد بخار یکپارچه دارند، در این صورت لازم است مخزن فشار راکتور بزرگی داشته باشند، که این موضوع قابلیت حمل و نقل از کارخانه به سایت مورد نظر را محدود می‌کند. از این رو بسیاری از SMR های با ظرفیت‌های بالاتر دارای مولد بخار خارجی و مجزا هستند. منطقه مورد نیاز برای برنامه‌ریزی استقرار واحدهای SMR معمولاً تا ۳۰۰ متر شعاع طراحی شده است که اصلاً قابل قیاس با مساحتی که راکتورهای تجاری بزرگ اشغال می‌کنند نیست. اما همچنان صدور مجوز به طور بالقوه برای SMR ها یک چالش است، زیرا هزینه‌های صدور گواهینامه طراحی، ساخت و بهره‌برداری برای آنها لزوماً کمتر از راکتورهای بزرگ نیست. از دیگر ویژگی‌های راکتورهای ماژولار کوچک می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۶-۱۹]:

- دستیابی به امکان ساخت سری برای SMR ها در شرایط کارخانه، سطح کیفیت و کارایی این ماژول‌ها را افزایش داده است.  
- اندازه کوچک و طراحی سیستم خود ایمنی غیرعامل SMR ها، آنها را برای کشورهایی با شبکه‌های کوچک‌تر و تجربه کمتر انرژی هسته‌ای، مناسب‌تر ساخته است.

- موجودی رادیواکتیو کمتر در راکتورهای ماژولار کوچک‌تر، آنها را قابل اعتمادتر کرده و با استقبال بیشتر رو به رو ساخته است، چرا که بسیاری از موارد ایمنی لازم در راکتورهای بزرگ در راکتورهای ماژولار کوچک لازم نیست.

- اعتماد بیشتری به SMR ها به خاطر معماری حداقل و جمع و جور آنها جهت سیستم تأمین بخار هسته‌ای و سیستم‌های ایمنی برای کاهش خطرات در مقایسه با راکتورهای اتمی بزرگ حاصل شده است. برق متناوب، پمپ‌های اضافی و سیستم‌های ایمنی عامل و اپراتوری باعث بالا رفتن احتمال بروز خطرات احتمالی در راکتورهای اتمی بزرگ بوده که در این ماژول‌ها اصلاح گردیده است.

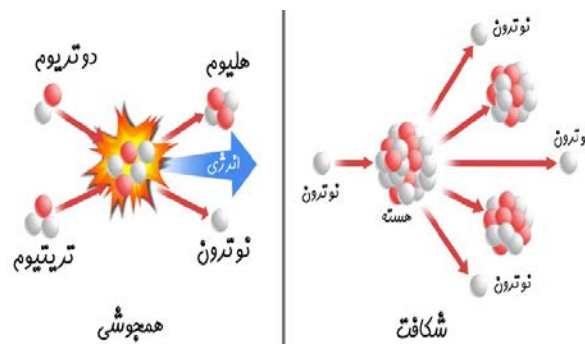
- پتانسیل ایجاد تأسیسات زیرزمینی یا زیر آب برای واحد راکتور، محافظت بیشتر در برابر خطرات طبیعی به عنوان مثال زمین لرزه، سونامی یا عملیات‌های طراحی شده توسط بشر (به عنوان مثال برخورد هواپیما و عملیات تروریستی) را باعث شده است. البته مطالعات ژئوفیزیکی سایت نیروگاه از درجه اهمیت خیلی بالایی برخوردار است چرا که نظریه‌ای دال بر این موضوع وجود

فوق بحرانی و کنترل نشده قرار خواهد داشت و اگر کنترل نشود، تولید شدن زنجیروار نوترون و عناصر شکافت پذیر (چون  $^{239}\text{Pu}$  و  $^{241}\text{Pu}$  برای راکتورهای آب سنگین) تا مرز ذوب شدن لوله‌های سوخت و انفجار هسته‌ای ادامه خواهد داشت. در یک راکتور SMR، سیستم خاموش کنندگی آکوملاتور (SAS: Shutdown Accumulator System) جهت تزریق آب بردار (بوریک اسید) از مخازن تحت فشار آب بردار به سیستم خنک کننده راکتور از طریق شیرهای یک طرفه به منظور کنترل حالت فوق بحرانی به کار گرفته خواهد شد. در راکتور در اثر گیراندازی نوترون توسط عناصر شکافت مانند اورانیوم-۲۳۳، اورانیوم-۲۳۵ و پلوتونیوم-۲۳۹، هسته‌ی مرکب تشکیل شده و در نهایت این هسته مرکب شکافته می‌شود. به ازای هر شکافت انرژی، دو پاره شکافت، تعدادی نوترون آبی و تأخیری و پرتوهای گاما گسیل می‌شوند. برخی از پاره‌های شکافت با مسمومیت پرتوی و نیمه عمر بالا تکنسیوم-۹۹، ید-۱۲۹ و زیرکونیوم-۹۳ می‌باشد. عناصری با اعداد جرمی بالاتر از اورانیوم را به عنوان عناصر فرا اورانیومی در اثر گیراندازی‌های متوالی نوترون توسط اورانیوم در قلب یک راکتور هسته‌ای نیز به وجود می‌آیند. بعضی از این عناصر دارای میزان مسمومیت پرتوی و نیمه عمر بسیار بالا بوده که آنها را به عنوان زباله‌های هسته‌ای می‌شناسیم.

### ۳-۴. جنبه اقتصادی SMR ها

ساخت SMR ها در سایت هزینه‌ای بالغ بر ۳۵ تا ۴۵ میلیون دلار و با اضافه کردن هزینه‌های اضافی نزدیک به ۷۰ میلیون دلار به ازای هر واحد خواهد رسید و ۳-۱ سال برای ساخت آن زمان لازم است. در حالی که ساخت و تجهیز پروژه راکتورهای هسته‌ای تجاری بزرگ بسیار زمان‌بر بوده و در نهایت هزینه‌ای بین ۶ تا ۱۰ میلیارد دلار خواهند داشت و مدت زمان ساخت آنها گاه‌ا از ۸ تا ۱۰ سال طول خواهد کشید. ساخت و ساز سیستم‌های ایمنی غیرعامل SMR ها در مقایسه با راکتورهای بزرگتر، آنها را با تأمین مالی آسان‌تری مواجه ساخته است. دستیابی به امکان ساخت سری برای SMR ها در شرایط کارخانه، هزینه‌ها را بیشتر کاهش داده است. طراحی و استفاده از سیستم گردش طبیعی خنک کننده راکتور در SMR ها، ضرورت وجود پمپ در مدار اول این راکتورها را حذف کرده و لذا هزینه‌های جانبی را کم نموده است. یکپارچه شدن تجهیزات، مولدهای بخار، قلب و سیستم‌های مدار اول در داخل محفظه فشار راکتور در SMR ها، منجر به حذف قسمت اعظم لوله کشی مدار و حوادث ناشی از آسیب و شکستگی لوله‌های تأسیسات شده و لذا از لحاظ اقتصادی نسبت به راکتورهای تجاری بزرگ مقرون به صرفه‌تر خواهند بود.

است که بسیار سخت قابل کنترل است و طی این فرآیند، هسته‌ی یک اتم با یک نوترون به دو جزء کوچک‌تر تقسیم می‌شود و طی این فرآیند انرژی آزاد می‌شود (شکل ۴). این همان شیوه‌ای است که در مورد ایزوتوپ‌های اورانیوم-۲۳۵ به کار می‌رود. (۲) همجوشی (گداخت) هسته‌ای که همان‌گونه که در شکل (۴) نمایش داده شده است، فرآیندی است که در آن دوتریوم و تریتیوم ترکیب شده و طی آزاد سازی انرژی به هلیوم تبدیل می‌شوند. این همان اتفاقی است که در خورشید و ستارگان رخ می‌دهد. همه راکتورهای هسته‌ای تجاری از شکافت هسته‌ای استفاده می‌کنند، در این نیروگاه‌های هسته‌ای معمولاً از انرژی شکافت هسته اتم‌های اورانیوم، پلوتونیوم و توریوم استفاده می‌شود. گرمای حاصل از واکنش هسته‌ای در راکتور، آبی را که در مرحله خنک‌سازی به عنوان خنک‌کننده به کار می‌رود را به بخار آب تبدیل می‌کند. بخار آب تولید شده همانند آنچه در تولید برق از زغال‌سنگ، نفت یا گاز متداول است به سوی توربین فرستاده می‌شود تا با راه اندازی مولد، توان الکتریکی مورد نیاز را تولید کند. فن‌آوری بکار رفته در راکتورهای ماژولار کوچک (SMR) همانند راکتورهای تجاری بزرگ بر مبنای شکافت هسته‌ای می‌باشد.



شکل (۴). تصویر شماتیک از شکافت و همجوشی هسته‌ای

### ۳-۳. شبیه‌سازی قلب راکتور SMR

قلب یک راکتور SMR از مجتمع‌های سوختی، رفلکتور دور قلب و نگه دارنده‌های میله‌های سوختی تشکیل شده است. یکی از اولین قدم‌های شبیه سازی قلب یک راکتور، شبیه سازی اولین میله سوخت می‌باشد که با در نظر گرفتن تعدادی از این میله‌ها یک مجتمع سوخت تشکیل و با در نظر گرفتن چندین مجتمع، قلب ما شبیه سازی خواهد شد. در قلب یک راکتور SMR مشابه راکتورهای PWR و BWR، وقتی شکافت هسته‌ای اتفاق می‌افتد، نوترون‌ها در یک فرایند آماری آزاد می‌شوند. عمده نوترون‌ها طی فرآیند شکافت در کمتر از ۱۰ نانوثانیه آزاد می‌شوند. نوترون‌های آزاد شده به نوبه خود میزان قدرت راکتور را تعیین می‌کنند که این میزان قدرت راکتور را اصطلاحاً با واژه راکتیویته می‌سنجند که واحد آن دلار و هر دلار برابر با ۱۰۰ سنت می‌باشد. نقطه کاری راکتور، راکتیویته بین صفر تا یک دلار می‌باشد و اگر راکتیویته بیشتر از یک دلار باشد، راکتور در حالت



### ۴. انواع مختلف SMR

به استناد گزارش آژانس بین‌المللی انرژی اتمی تعداد کل SMR هایی که در دنیا تا پایان سپتامبر ۲۰۲۰ در حال فعالیت، توسعه، ساخت و طراحی هستند مجموعاً ۷۲ مورد است که البته ۱۵ مورد از آنها به استانداردهای تعریف شده برای واحدهای SMR نزدیک می‌باشند و جزء راکتورهای هسته‌ای کوچک مقیاس مطرح می‌شوند و مابقی ۵۷ مورد که تماماً در جدول (۱) الی (۵) لیست شده‌اند به عنوان SMR های حال حاضر شناخته می‌شوند. در جدول‌های فوق نام برند، توان ظرفیت الکتریکی خروجی، نوع فن‌آوری هسته‌ای به کار رفته، شرکت و کشور ارائه دهنده آورده شده است [۱۹-۵].

جدول (۱). راکتورهای هسته‌ای کوچک در حال ساخت تا سپتامبر ۲۰۲۰.

| No. | Name    | Capacity | Type         | Developer                   |
|-----|---------|----------|--------------|-----------------------------|
| 1   | CAREM25 | 27 MWe   | Integral PWR | CNEA & INVAP, Argentina     |
| 2   | HTR-PM  | 210 MWe  | Twin HTR     | INET, CNEC & Huaneng, China |

جدول (۲). راکتورهای هسته‌ای خیلی کوچک ارائه شده تا سپتامبر ۲۰۲۰.

| No. | Name          | Capacity  | Type             | Developer                 |
|-----|---------------|-----------|------------------|---------------------------|
| 1   | U-battery     | 4 MWe     | HTR              | Urenco-led consortium, UK |
| 2   | Starcore      | 10-20 MWe | HTR              | Starcore, Quebec          |
| 3   | MMR-5         | 5 MWe     | HTR              | UltraSafe Nuclear, USA    |
| 4   | Holos Quad    | 3-13 MWe  | HTR              | HolosGen, USA             |
| 5   | Gen4 module   | 25 MWe    | Lead-bismuth FNR | Gen4 (Hyperion), USA      |
| 6   | Sealer        | 3-10 MWe  | Lead FNR         | LeadCold, Sweden          |
| 7   | eVinci        | 0.2-5 MWe | Heatpipe FNR     | Westinghouse, USA         |
| 8   | Aurora        | 1.5 MWe   | Heatpipe FNR     | Oklo, USA                 |
| 9   | NuScale micro | 1-10 MWe  | Heatpipe         | NuScale, USA              |

### ۳-۵. سوابق آزمایشات و ساخت SMR ها

اولین نیروگاه SMR جهان که در دسامبر ۲۰۱۹ در منطقه‌ای دور افتاده در روسیه به شبکه برق متصل شد. که در حال حاضر شمالی‌ترین نیروگاه برق جهان هم است که هم گرما و هم برق را به مناطق کم جمعیت تأمین کرد و هم منجر به خاموش شدن نیروگاه سوخت زغال سنگ شد. روسیه همچنین جهت تأمین برق پایدار و کاهش میزان انتشار کربن در حال توسعه یک پروژه SMR فوق پیشرفته زمینی است که برای راه‌اندازی در سال ۲۰۲۷ برنامه‌ریزی کرده است. چین نمونه اولیه SMR با سیستم خنک‌کنندگی گازی را تولید کرده است که این راکتور توسط گاز هلیوم خنک می‌شود و می‌تواند به دمای حداکثر ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد برسد و آن را برای کاربردهای غیر الکتریکی مانند تولید هیدروژن نیز مناسب می‌کند.

بیش از ۵۰ طرح راکتور SMRs در طول این چند سال اخیر از طریق بسیاری از برنامه‌های ملی و بین‌المللی توسعه داده شده است. بسیاری از کشورها حتی بیشتر از ایالات متحده، وقت و سرمایه زیادی در توسعه راکتورهای ماژولار کوچک گذاشته‌اند. روسیه: چند SMR در حال حاضر در سیبری در حال انجام کار است/ هند: یک مدل کانادایی با توان ۲۲۰ مگاوات در حال حاضر در هند کار می‌کند/ پاکستان: یک نوع چینی ۳۰۰ مگاوات در پاکستان کار می‌کند/ چین: چند راکتور با خروجی‌های مختلف در حال کار است، سرمایه‌گذاری زیادی در این زمینه کرده‌اند/ ژاپن: طرح‌های مختلفی در حال کار است و سرمایه‌گذاری سنگینی در تولید طرح‌های جدید کرده است/ اروپا: اروپا هم مانند ژاپن و چین (به خصوص فرانسه) در این راستا سرمایه‌گذاری زیادی انجام داده‌اند.

### ۳-۶. سیستم ایمنی SMR ها

هدف اصلی ایمنی هسته‌ای محافظت از کارکنان، مردم و در یک کلام محیط زیست از اثرات مخرب مواد رادیواکتیو با ایجاد و حفظ اقدامات دفاعی مؤثر در تأسیسات هسته‌ای است. حصول اطمینان از عملکرد ایمن تأسیسات صنعت هسته‌ای، از دغدغه‌های اصلی افکار عمومی، سازمان‌های مسئول حفظ سلامتی مردم در هر کشور و همچنین آژانس بین‌المللی انرژی اتمی است. آنچه که SMR ها را مورد توجه قرار داده و آنها را از راکتورهای هسته‌ای پیشین متمایز نموده و باعث استقبال جهانی از آنها شده، سیستم خود ایمنی فوق‌العاده مطمئن و غیرعامل آنها می‌باشد. SMR ها دارای سیستم ایمنی غیرعامل (Passive) هستند و هیچ وسیله مکانیکی یا الکتریکی برای بکار انداختن آن لازم نیست.



| Russia* |                     |         |             |                            |
|---------|---------------------|---------|-------------|----------------------------|
| 16      | Westinghouse LFR    | 300 MWe | Lead FNR    | Westinghouse, USA          |
| 17      | TMSR-SF             | 100 MWt | MSR         | SINAP, China               |
| 18      | PB-FHR              | 100 MWe | MSR         | UC Berkeley, USA           |
| 19      | Integral MSR        | 192 MWe | MSR         | Terrestrial Energy, Canada |
| 20      | Moltex SSR-U        | 150 MWe | MSR/FNR     | Moltex, UK                 |
| 21      | Moltex SSR-W global | 150 MWe | MSR         | Moltex, UK                 |
| 22      | Thorcon TMSR        | 250 MWe | MSR         | Martingale, USA            |
| 23      | Leadir-PS100        | 36 MWe  | Lead-cooled | Northern Nuclear, Canada   |

جدول (۵). راکتورهای هسته‌ای کوچک برای استقرار موقت- راکتورهای توسعه یافته و خیلی پیشرفته تا سپتامبر ۲۰۲۰

| No | Name                 | Capacity | Type         | Developer                         |
|----|----------------------|----------|--------------|-----------------------------------|
| 1  | VBER-300             | 300 MWe  | PWR          | OKBM, Russia                      |
| 2  | NuScale              | 60 MWe   | Integral PWR | NuScale Power + Fluor, USA        |
| 3  | SMR-160              | 160 MWe  | PWR          | Holtec, USA + SNC-Lavalin, Canada |
| 4  | ACP100/Linglo ng One | 125 MWe  | Integral PWR | NPIC/CNPE/CN NC, China            |
| 5  | SMART                | 100 MWe  | Integral PWR | KAERI, South Korea                |
| 6  | BWRX-300             | 300 MWe  | BWR          | GE Hitachi, USA                   |
| 7  | PRISM                | 311 MWe  | Sodium FNR   | GE Hitachi, USA                   |
| 8  | Natrium              | 345 MWe  | Sodium FNR   | TerraPower + GE Hitachi, USA      |
| 9  | ARC-100              | 100 MWe  | Sodium FNR   | ARC with GE Hitachi, USA          |
| 10 | Integral MSR         | 192 MWe  | MSR          | Terrestrial Energy, Canada        |
| 11 | BREST                | 300 MWe  | Lead FNR     | RDIPE, Russia                     |
| 12 | RITM-200M            | 50 MWe   | Integral PWR | OKBM, Russia                      |
| 13 | BANDI-60S            | 60       | PWR          | Kepco, South                      |

جدول ۳. راکتورهای هسته‌ای کوچک تا سپتامبر ۲۰۲۰

| No. | Name     | Capacity | Type         | Developer                     |
|-----|----------|----------|--------------|-------------------------------|
| 1   | CNP-300  | 300 MWe  | PWR          | SNERDI/CNNC, Pakistan & China |
| 2   | PHWR-220 | 220 MWe  | PHWR         | NPCIL, India                  |
| 3   | EGP-6    | 11 MWe   | LWGR         | at Bilibino, Siberia (cogen)  |
| 4   | KLT-40S  | 35 MWe   | PWR          | OKBM, Russia                  |
| 5   | RITM-200 | 50 MWe   | Integral PWR | OKBM, Russia                  |

جدول (۴). راکتورهای هسته‌ای کوچک در مراحل اولیه طراحی تا سپتامبر ۲۰۲۰

| No | Name              | Capacity | Type         | Developer                    |
|----|-------------------|----------|--------------|------------------------------|
| 1  | EM2               | 240 MWe  | HTR, FNR     | General Atomics (USA)        |
| 2  | FMR               | 50 MWe   | HTR, FNR     | General Atomics + Framatome  |
| 3  | VK-300            | 300 MWe  | BWR          | NIKIET, Russia               |
| 4  | AHWR-300 LEU      | 300 MWe  | PHWR         | BARC, India                  |
| 5  | CAP200 LandStar-V | 220 MWe  | PWR          | SNERDI/SPIC, China           |
| 6  | SNP350            | 350 MWe  | PWR          | SNERDI, China                |
| 7  | ACPR100           | 140 MWe  | Integral PWR | CGN, China                   |
| 8  | IMR               | 350 MWe  | Integral PWR | Mitsubishi Heavy Ind, Japan* |
| 9  | Westinghouse SMR  | 225 MWe  | Integral PWR | Westinghouse, USA*           |
| 10 | mPower            | 195 MWe  | Integral PWR | BWXT, USA*                   |
| 11 | UK SMR            | 400+ MWe | PWR          | Rolls-Royce, UK              |
| 12 | PBMR              | 165 MWe  | HTR          | PBMR, South Africa*          |
| 13 | HTMR-100          | 35 MWe   | HTR          | HTMR Ltd, South Africa       |
| 14 | MCFR              | 350 MWe  | MSR/FNR      | Southern Co, TerraPower, USA |
| 15 | SVBR-100          | 100 MWe  | Lead-Bi FNR  | AKME-Engineering,            |

✓ راکتورهای سریع نوترونی

(FNR: Fast Neutron Reactors)

✓ راکتورهای نمک گداخته

(MSR: Molten Salt Reactors)

✓ راکتورهای دمای بالا تعدیل شده با گرافیت

(GmHTR: Graphite-moderated High Temperature Reactors)

برخی از رایج ترین SMR های حال حاضر دنیا در قالب ۵ گروه مجزا، شامل موارد زیر می باشد. در بخش بعدی آنها را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

|            | MWe    |     | Korea         |
|------------|--------|-----|---------------|
| 14 Xe-10   | 75 MWe | HTR | X-energy, USA |
| 15 ACPR50S | 60 MWe | PWR | CGN, China    |

در خصوص فن آوری راکتورهای کوچک ماژولار (SMR) پنج گزینه اصلی در دنیا در حال پیگیری است [۱۹-۵]:

✓ راکتورهای آب سبک

(LWR: Light Water Reactors)

✓ راکتورهای آب سنگین

(HWR: Heavy Water Reactors)

۱- راکتورهای هسته ای کوچک ماژولار آب سبک:

NuScale, mPower, Westinghouse SMR, VBER, Rolls-Royce SMR, SHELF, CAREM, Flexblue

۲- راکتورهای هسته ای کوچک ماژولار آب سنگین:

PHWR-220, Hybrid SMR Concept, USNC Micro Modular Reactor

۳- راکتورهای هسته ای کوچک ماژولار سریع نوترونی:

PRISM, 4S-Toshiba, SVBR-100

۴- راکتورهای هسته ای کوچک ماژولار نمک گداخته:

LFTR, TMSR, Integral MSR, Westinghouse eVinci

۵- راکتورهای هسته ای کوچک ماژولار دما تعدیل شده با گرافیت:

Fuji MSR, Flibe LFTR, Transatomic Power, ThorCon

#### ۴-۱. SMR های آب سبک

##### ۴-۱-۱. NuScale

و یا عمق زمین نصب شده است و ۶۴۰ تن وزن دارد و حاوی مولد بخار بالای راکتور است. یک نیروگاه استاندارد NuScale از ۱۲ ماژول تشکیل می شود که با هم حدود ۹۲۴ مگاوات نیرو ارائه می دهند، اگرچه اکنون نیروگاه های چهار ماژول و شش ماژول نیز در حال راه اندازی است. جرثقیل سقفی هر ماژول را از استخر

خود به قسمت جداگانه ای از نیروگاه برای سوخت گیری بالا می برد. طول عمر عملیاتی این ماژول ۶۰ سال است. دارای عملکرد خنک کننده غیرعامل کامل پس از خاموش شدن و قطع برق برای مدت نامحدود حتی بدون نیاز به باتری DC می باشد. این راکتور می تواند با سوخت MOX کار کند. یک کارخانه ۱۲ ماژول NuScale با هسته های کامل MOX می تواند در مدت ۴۰ سال ۱۰۰ تن پلوتونیوم مصرف کند و ۲۰۰ تراوات ساعت (TWh) برق تولید کند. شرکت استارتاپی NuScale Power در سال ۲۰۱۰ تخمین زده بود که سرمایه لازم برای یک واحد

راکتور NuScale یکی از شاخص ترین SMR ها می باشد که به دنیا ارائه شده است و نسبت به راکتورهای کنونی، کوچک تر و ایمن تر می باشند. طرح کلی راکتور NuScale برگرفته از بیش از ۵۰ سال تجربه و کار عملی با راکتورهای تحت فشار می باشد. راکتور NuScale یک پکیج ماژولار با فن آوری PWR بدون نیاز به پمپ های مدار اول است و برای انتقال خنک کننده های مدار اولیه از مفاهیم گردش طبیعی استفاده می کند. این راکتور دارای مخزن تحت فشار و خنک کننده با فن آوری همرفت به قطر ۳ متر می باشد. این راکتور کوچک با چرخه سوخت گیری ۲۴ ماهه از سوخت استاندارد عادی تا ۴/۹۵٪ غنی شده استفاده می کند. همان گونه که در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است طول این راکتور برابر با ۲۰ متر می باشد. ماژول مخزن استوانه ای با قطر ۴/۶ متر و ارتفاع ۲۳ متر که در استخر پر از آب در سطح

۲۰ متر طول و حدود سه متر قطر دارد و به راحتی توسط کامیون و قطار قابلیت حمل و جابجایی دارد. می‌توان ۱۰۰ نمونه از آنها را در یک محفظه مهار مخصوص راکتورهای بزرگ قرار داد. هر ماژول کوچک می‌تواند ۴۵ مگاوات انرژی تولید کند. ساختار کلی این راکتور همان گونه که برشی از آن در شکل ۵ نشان داده شده است از غلاف میله‌های سوخت، محفظه فشار، پوشش ایمنی، آب استخر، دیواره بتونی استخر با لایه فولادی و محفظه بالای هر یک از ماژول‌ها تشکیل شده است. قلب راکتور داخل یک پوشش متصل به یک کانال بالا برنده قرار دارد. آب موجود در فضای قلب راکتور پس از برداشت گرمای میله‌های سوخت از طریق کانال بالا برنده به سمت بالا هدایت می‌شود و در ادامه وارد فضای مابین لوله‌های مولد بخار می‌شود و پس از انتقال گرما و سرد شدن طی جریان همرفت یک گردش طبیعی به سمت پایین را خواهد داشت.



شکل (۵). نمای کلی و برش داده شده سه بعدی از یک ماژول راکتور هسته‌ای NuScale طراحی شده

آن ۳/۶ متر قطر و ۲۲ متر ارتفاع دارد و کل واحد قطر ۴/۵ متر و ارتفاع ۲۳ متر دارد. این راکتور دارای یک کندانسور خنک‌کننده هوا با ۳۱٪ بهره‌وری حرارتی و سیستم‌های ایمنی غیرعامل است. این نیروگاه در ابتدا ۱۲۵ مگاوات بود اما در سال ۲۰۱۴، ظرفیت نیروگاه ۱۹۵ مگاوات گزارش شد. شرکت سازنده این راکتور یک نسخه ۱۵۵ مگاواتی بر پایه خنک‌کنندگی هوا نیز برنامه‌ریزی کرده است. انتقال گرما را در این راکتور هشت پمپ سرد کننده کوچک بر عهده دارند. این راکتور سوخت غنی شده تقریباً ۵٪ را برای یک چرخه سوخت چهار ساله بکار می‌گیرد و یک عمر ۶۰ ساله دارد. مدت زمان لازم برای ساخت هر ماژول mPower داخل کارخانه و اسمبل کردن ماژول‌ها کنار هم در سایت نیروگاه را تقریباً ۴ سال پیش بینی می‌کنند.

۱۲ واحدی، ۵۴۰ مگاوات نیروگاهی از این ماژول حدود ۴۰۰۰ دلار برای هر کیلووات می‌باشد، این در سال ۲۰۱۴ به ۵۰۷۸ دلار بر کیلووات رسید و با افزایش بیشتر توان راکتور، این شرکت در اواخر سال ۲۰۲۰ هزینه ۲۸۵۰ دلار بر کیلووات را برای یک کارخانه ۱۲ ماژول ۹۲۴ مگاواتی عنوان کرد. راکتور NuScale، به برج‌های بزرگ خنک‌کننده نیازی ندارد و می‌توان در هر مکانی نسبت به ساخت آن اقدام کرد. این راکتور جدید می‌تواند هر موقعیت اضطراری را مدیریت کند. از آنجا که ماژول NuScale کوچک است، امکان تولید انبوه آن و ساخت آن در هر مکان وجود خواهد داشت. نکته مهم‌تر این که این راکتورهای کوچک می‌توانند از چندین مکانیسم خنک‌کننده و ایمن استفاده کنند که در دسترس راکتورهای بزرگ قرار ندارد. NuScale از آب سبک استفاده می‌کند که تاکنون متداول‌ترین نوع راکتور در نیروگاه‌های تجاری هسته‌ای بوده است. ماژول NuScale، حدود

سیستم کنترل شیمی و حجم آب برای این دسته از راکتورها ساده و مشابه راکتورهای هسته‌ای بزرگ و البته در مقیاس خیلی کوچک‌تر می‌باشد. سیستم کنترل شیمی، بخشی از آب موجود را از دستگاه‌های نمک زدا عبور می‌دهد تا خواص شیمیایی و خلوص آن حفظ شود و هنگامی که میزان آب موجود از حد نرمال کمتر شود با تزریق آب اضافی آن را جبران می‌کند. همچنین غلظت بور (اسید بوریک) در آب موجود در محفظه توسط سیستم کنترل مدیریت و تنظیم می‌شود.

#### ۴-۱-۲. mPower

اواسط سال ۲۰۰۹، Babcock & Wilcox (B&W) راکتور mPower خود را ارائه کردند که یک PWR ۵۰۰ مگاوات گرمایی (با خروجی ۱۸۰ مگاوات الکتریکی) بود. مخزن تحت فشار راکتور حاوی هسته دو متر در دو متر و مولد بخار یکپارچه

سوخت‌گیری در این راکتور هشت ساله می‌باشد. این راکتور برای عمر ۶۰ ساله و ضریب ظرفیت ۹۰٪ طراحی شده است. اولین و بزرگ‌ترین راکتور ارائه شده از این نوع با توان گرمایی نیروگاهی ۹۱۷ مگاوات و توان الکتریکی ۳۲۵ مگاوات در کشور قزاقستان توسط روسیه ساخته شده است که نمای کلی این SMR را در شکل ۶- الف می‌توانید مشاهده نمایید. این راکتور دارای چهار ژنراتور بخار بیرونی و یک قلب با ۸۵ مجموعه سوخت استاندارد VVER با غنای ۴/۹۵٪ می‌باشد. برای این راکتور این قابلیت به راحتی است که با سوخت پیشرفته‌تر و غنی شده بالاتر (۱/۱۸) فواصل سوخت‌گیری را تا ۱۵ سال افزایش داد.

#### ۴-۱-۵. Rolls-Royce SMR

رولزرویس از سال ۲۰۱۵ با طرح SMR با توان ۲۲۰ مگاوات کارش را شروع کرد اما تمرکز آن به سمت یک راکتور با اندازه ۴۰۰-۴۴۰ مگاوات تغییر کرده است. این راکتور در واقع یک PWR سه حلقه‌ای است که دارای مولدهای بخار خارجی نزدیک به راکتور است که از طریق کارخانه ساخته شده و قابل حمل به محل باشد. راکتور با ۱۱/۳ متر ارتفاع، ۴/۵ متر قطر و با طول عمر ۶۰ ساله طراحی شده است. از سوخت ۴/۹۵٪ غنی شده با استاندارد سوخت PWR با طول سوخت فعال ۲/۸ متر استفاده می‌کند و دارای دوره سوخت‌گیری ۲۴-۲۸ ماه خواهد بود. در ابتدای سال ۲۰۲۰ این شرکت تخمین زد که یک واحد ۴۴۰ مگاواتی از این ماژول هزینه‌ای بالغ بر ۲/۳ میلیارد دلار نیاز دارد.

#### ۴-۱-۳. Westinghouse SMR

راکتور ماژولار کوچک وستینگ‌هاوس یک PWR یکپارچه کلاس ۸۰۰ مگاوات گرمایی (با ۲۲۵ مگاوات الکتریکی) با سیستم‌های ایمنی غیرعامل است که در دسته سوختی AP1000 با مونتاژ ۸۹ عددی و طول فعال ۲/۴۴ متر و غنی‌سازی کمتر از ۵٪ قرار دارد. مولد بخار بالای قلب راکتور توسط هشت پمپ خنک کننده افقی جریان محوری پشتیبانی می‌شود. قسمت شناور راکتور (ساخته شده در کارخانه) در زیر سطح زمین در یک ظرف استخر با قطر ۹/۸ متر و ارتفاع ۲۷ متر نصب می‌شود. ماژول ۲۵ متر ارتفاع و ۳/۵ متر قطر دارد. راکتور چرخه سوخت‌گیری ۲۴ ماهه و عمر مفید ۶۰ ساله دارد. در صورت بروز حادثه دارای ایمنی غیرعامل با عدم مداخله اپراتور به مدت هفت روز می‌باشد. بارگیری روزانه را می‌توان از ۲۰٪ تا ۱۰۰٪ توان با آهنگ ۵٪ تغییر در دقیقه انجام داد. در زیر بار مداوم، نیروگاه می‌تواند تغییرات بار ۱۰٪± با آهنگ ۲٪ در دقیقه را انجام دهد.

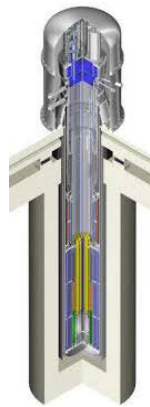
#### ۴-۱-۴. VBER-150, VBER-300

راکتور ماژولار VBER در دو ظرفیت ۱۵۰ و ۳۰۰ مگاوات تولید برق و با مصرف سوخت اکسید اورانیوم غنی شده تا ۴/۷٪ ارائه شده است و دارای دو مولد بخار می‌باشد که در حال حاضر بر روی کشتی ۱۲۰۰۰ تنی نصب شده است. فاصله زمانی



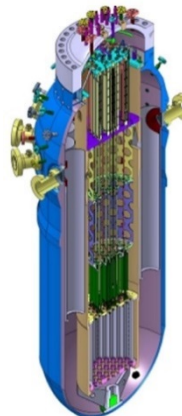
SMART

(ت)



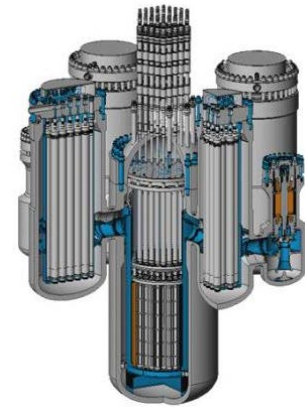
4S

(پ)



CAREM

(ب)



VBER-300

(الف)

شکل (۶). تعدادی از ماژول‌های نیروگاه هسته‌ای SMR

**۴-۱-۶. Flexblue**

سیستم خنک کننده اولیه خود را در مخزن تحت فشار راکتور با ۱۱ متر ارتفاع و  $\frac{3}{5}$  متر قطر قرار داده و کاملاً به جریان همرفت (البته برای ماژول‌های کمتر از ۱۵۰ مگاوات) متکی است. نمای کلی این SMR در شکل ۶- ب نشان داده شده است. آخرین نسخه این ماژول با ظرفیت ۱۰۰ مگاوات خواهد بود که در آن پمپ‌های خنک کننده محوری به صورت الکتریکی هدایت می‌شوند. سوخت آن به صورت PWR غنی شده با استاندارد  $\frac{3}{1}$  تا  $\frac{3}{4}$ ٪ در مجموعه‌های سوخت شش ضلعی است و به صورت سالانه سوخت گیری می‌شود.

**۴-۲. راکتورهای هسته‌ای کوچک ماژولار آب سنگین****۴-۲-۱. PHWR-220**

راکتور PHWR-220 با ظرفیت تولید ۲۲۰ مگاوات برق می‌باشد که توسط آب سنگین تعدیل و خنک می‌شود. سوخت طبیعی اکسید اورانیوم در لوله‌های فشار افقی است. دوره سوخت گیری برای آن ۲۴ ماه است و میزان سوختن تقریباً ۱۵ گیگاوات گرم در هر تن می‌باشد.

**۴-۲-۲. Hybrid SMR Concept**

راکتور کوچک ماژولار هیبریدی- هسته‌ای Hybrid SMR Concept از شرکت Hybrid Power Technologies LLC مقادیر زیادی هوای فشرده را تولید می‌کند و توربین انرژی الکتریکی را تولید می‌کند. هلیوم از راکتور تعدیل شده گرافیتی ۶۰۰ مگاواتی، توربین اصلی را به همراه کمپرسور هوا هدایت می‌کند. هوای بسیار پر فشار، توربین را که دارای یک مولد ۸۵۰ مگاوات با کارایی ۸۵٪ است را شارژ می‌کند. راکتور و کمپرسور در یک ساختار مهار کامل قرار دارند. توان واقعی خروجی برای این SMR ۳۰۰ مگاوات است.

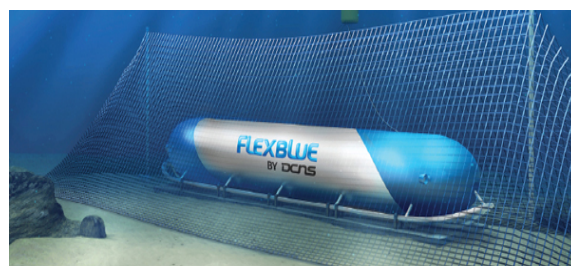
**۴-۲-۳. USNC Micro Modular Reactor**

ماژول راکتور MMR; Micro Modular Reactor با توان ۱۵ مگاوات گرمایی و خروجی ۵ مگاوات برق به صورت انعطاف پذیر کار می‌کند و دارای خروجی قابل تغییر است. این راکتور از طریق فرآیند ذوب نمک انرژی تولید می‌کند و در طول عمر ۲۰ ساله خود به سوخت گیری احتیاج ندارد و پس از ۲۰ سال این SMR از کار می‌افتد و از مدار خارج می‌شود.

**۴-۳. راکتورهای سریع نوترونی****۴-۳-۱. PRISM (Power Reactor Innovative Small Module)**

PRISM یک ماژول کوچک خلاقانه راکتور قدرتی ذاتاً ایمن است که با فلز مایع خنک می‌شود و محصول مشترک جنرال

راکتور Flexblue به گونه‌ای طراحی شده است که در عمق ۶۰-۱۰۰ متری بستر دریا تا ۱۵ کیلومتری ساحل غوطه‌ور شود و به راحتی برای انجام سرویس به ساحل بازگردد. راکتور، ژنراتورهای بخار و توربین ژنراتور در یک بدنه استوانه‌ای ۱۲۰۰۰ تنی غوطه‌ور به طول ۱۰۰ متر و قطر ۱۲-۱۵ متر قرار می‌گیرند (شکل ۷ را ملاحظه نمائید). هر ماژول ساخته شده با استفاده از یک کشتی قابل حمل است. ظرفیت راکتور در محدوده ۲۵۰-۵۰ مگاوات است که از جدیدترین طراحی‌های DCNS عنوان می‌شود، اما جزئیات آن اعلام نشده است.



شکل (۷). ماژول نیروگاه هسته‌ای Flexblue مستقر در قعر دریا

**۴-۱-۷. SHELF**

ماژول SHELF، یک راکتور روسی ۶ مگاواتی PWR با یک ژنراتور توربو در یک غلاف استوانه‌ای به طول ۱۵ متر و قطر ۸ متر است که مانند Flexblue در بستر دریا مستقر می‌شود. ماژول SHELF از یک راکتور یکپارچه با گردش اجباری و طبیعی در مدار اولیه بهره می‌برد که در آن هسته، مولد بخار، پمپ گردش موتور و درایو سیستم کنترل در یک مخزن تحت فشار استوانه قرار گرفته‌اند. از سوخت غنی شده درصد پائین  $UO_2$  در ماتریس آلیاژ آلومینیوم استفاده می‌کند. چرخه سوخت برای این راکتور ۵۶ ماه است. این راکتور بر اساس نمونه‌های اولیه عملیاتی به ندرت سرویس می‌شود. این راکتور به عنوان تأمین انرژی برای توسعه نفت و گاز در دریاهای قطب شمال در نظر گرفته شده و نسخه‌های زمینی نیز برای آن پیش بینی شده است.

**۴-۱-۸. CAREM**

راکتور CAREM توسط کمیسیون ملی انرژی اتمی آرژانتین ساخته شده است. یک راکتور با مخزن تحت فشار یکپارچه و با توان ۱۰۰ مگاوات که دارای ۱۲ مولد بخار است که علاوه بر کاربری تولید برق نیروگاهی به عنوان یک راکتور تحقیقاتی و یا برای نمک زدایی آب دریا نیز طراحی شده است. CAREM کل

منفی است. واحد ساخته شده در کارخانه به محل منتقل می-شود، زیر سطح زمین نصب می‌شود و یک چرخه بخار را از طریق یک حلقه سدیم ثانویه هدایت می‌کند، این قابلیت سه دهه کارکرد مداوم و بدون سوخت گیری مجدد را دارد. سوخت فلزی (۱۶۹ پین با قطر ۱۰ میلی متر) سوخت اورانیوم-زیرکونیوم غنی شده کمتر از ۲۰٪ یا آلیاژ U-Pu-Zr با غنای ۲۴٪ پلوتونیوم برای نسخه ۱۰ مگاوات می‌باشد. راکتور ماژولار 4S (شکل ۶-پ) برای حفظ خودکار دمای خنک کننده خروجی ۵۵۰-۵۱۰ درجه سلسیوس طراحی شده است و مناسب برای تولید برق با تولید هیدروژن الکترولیتی دمای بالا می‌باشد. هزینه نیروگاه ۲۵۰۰ دلار برای واحد کوچک پیش بینی شده است. این راکتور ماژولار مقیاس کوچک بسیار مناسب و قابل رقابت با گازوئیل و سوخت‌های فسیلی در بسیاری از مکان‌ها می‌باشد. توشیبا یک برنامه بازاریابی در سراسر جهان برای فروش واحدهای ماژولار تولید برق، نیروگاه‌های آب شیرین کن و ساخت هیدروژن در نظر دارد. انتظار می‌رود فروش تولید هیدروژن برای شرکت سازنده بیش از فروش برق باشد.

#### ۳-۳-۴ SVBR-100

SVBR-100 یک راکتور سرب بیسموت سریع از نوع ماژولار، یکپارچه، کوچک و جدید روسی است که به عنوان یک مولد برق ۱۰۰ مگاواتی در حال توسعه است. با ۱۲ ژنراتور بخار و دو پمپ گردش اصلی که در همان استخر Pb-Bi در دمای ۴۹۰-۳۴۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان هسته راکتور قرار گرفته‌اند. این راکتور به گونه‌ای طراحی شده است که می‌تواند از طیف گسترده‌ای از سوخت استفاده کند. واحد آزمایشی آن در ابتدا از اکسید اورانیوم غنی شده ۱۶/۳٪ استفاده کرد. با سوخت U-Pu MOX نیز کار می‌کند. فاصله سوخت گیری ۷-۸ سال خواهد بود و طول عمر ۶۰ ساله برای آن پیش بینی شده است. نقطه ذوب خنک کننده یعنی Pb-Bi، ۱۲۳/۵ درجه سانتی‌گراد است، بنابراین راکتور را از هر گونه ذوب شدگی طی خاموش شدن و قطع برق راکتور در اثر هر عامل مخرب و تصادفی بیرونی به راحتی محافظت می‌کند. این ماژول با ظرفیت ۲۸۰ مگاوات گرمایی ۴/۵ متر طول و ۸/۵ متر ارتفاع دارد. از یک نیروگاه با چنین ماژول‌هایی انتظار می‌رود که برق را با هزینه کمتری نسبت به سایر فن‌آوری‌های جدید با ظرفیت برابر و همچنین ایمنی ذاتی و غیرعامل در اختیار قرار دهد. روسیه هفت زیردریایی کلاس آلفا ساخت که هرکدام از آنها با یک راکتور ۱۵۵ مگاوات گرمایی با خنک‌کنندگی Pb-Bi کار می‌کنند. روسیه نزدیک بر ۸۰ سال است که تجربه عملیاتی کار با این نوع از راکتورها را بدست آورده است. SVBR-100 اولین راکتور خنک‌شده توسط فلزات سنگین می‌باشد. البته این راکتور به عنوان یک راکتور چند منظوره می‌تواند علاوه بر تأمین نیرو،

الکتریک و هیتاچی (GEH) می‌باشد. این SMR دارای راکتورهای جمع و جور با سیستم خنک‌کنندگی غیرعامل است که از دو ماژول ۳۱۱ مگاواتی الکتریکی (۸۴۰ مگاوات گرمایی) تشکیل شده است که هر کدام با یک مولد بخار که مجموعاً یک مولد توربین را هدایت می‌کنند در ارتباط هستند. ماژول‌های از نوع استخر زیر سطح زمین شامل مدار اولیه کامل با خنک‌کنندگی سدیم و در دمای حدود ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. یک حلقه سدیم میانی گرما را به ژنراتورهای بخار می‌رساند. جهت تأمین سوخت از سوخت فلزی Pu & DU راکتور آب سبک استفاده می‌شود. طی انجام فرآیند تمام عناصر با عدد اتمی بیشتر از اورانیوم در فرآوری مجدد الکترومالتورژی با هم حذف می‌شوند تا سوخت تازه دارای اکتینیدهای جزئی با پلوتونیوم و اورانیوم باشد. راکتور برای استفاده از هسته آلیاژی فلز ناهمگن با ۱۹۲ مجموعه سوخت در دو منطقه سوخت طراحی شده است. در نسخه طراحی شده برای بازیافت سوخت LWR حداکثر burnup برای آن ۱۲۲ Gwd/t است. در نسخه‌های دیگر که برای مصارف تحقیقاتی یا پلوتونیوم نظامی طراحی شده است، ۴۲ عدد از آنها blanket داخلی، ۴۲ عدد شعاعی و ۱۰۸ عدد آن به عنوان سوخت driver است و حداکثر burnup آن ۱۴۴ Gwd/t است. برای نسخه بازیافت سوخت LWR، سوخت در راکتور چهار سال باقی می‌ماند و یک چهارم آن سالانه حذف می‌شود و در سال ۷۲ کیلوگرم تولید خالص پلوتونیوم خواهد داشت. در نسخه تولید کننده، سوخت در راکتور با یک سوم حذف در هر دو سال و تولید خالص ۵۷ کیلوگرم پلوتونیوم شکاف‌پذیر در حدود شش سال باقی می‌ماند. نسبت Breeding به پیکربندی بستگی دارد، بنابراین از ۰/۷۲ تا ۱/۲۳ متغیر است. سوخت PRISM استفاده شده پس از حذف محصولات شکافت بازیافت می‌شود، البته الزامی هم وجود ندارد. نیروگاه در مقیاس تجاری از شش ماژول راکتور برای تأمین ۱۸۶۶ مگاوات استفاده می‌کند. در واحدهای نیروگاهی PRISM به مدت ۴۵ تا ۹۰ روز محصول تولید شده پلوتونیوم را که شامل پلوتونیوم ۲۰٪، زیرکونیوم و اورانیوم تخلیه شده (حاوی غلظت‌های کاهش یافته‌ای از اورانیوم-۲۳۴ و اورانیوم-۲۳۵) است را تابش‌دهی می‌کنند و آن را به استاندارد سوخت مصرفی رادیواکتیو می‌رسانند و سپس آن را در سیلوهای خنک کننده هوا ذخیره می‌کنند. کل ذخیره می‌تواند در طی ۵ سال مورد تابش‌دهی مکرر قرار بگیرد و مجدد می‌توان از آن برای حدود ۵۵ سال برای تولید ۶۰۰ مگاوات برق استفاده نمود.

#### ۳-۳-۴ 4S

راکتور 4S یک SMR ژاپنی ساخت شرکت توشیبا، فوق العاده ایمن، کوچک و ساده با سیستم باتری هسته‌ای است که از سدیم به عنوان خنک‌کننده با پمپ‌های الکترومغناطیسی استفاده می‌کند و دارای ویژگی‌های ایمنی غیرعامل و با ضریب دمای واکنش



فنی و نظارتی اضافی آنها از استفاده از سوخت‌های پایه توریم جلوگیری می‌شود.

#### Westinghouse eVinci .۴-۴-۴

ریز راکتور eVinci با ظرفیت ۲۰۰ کیلووات تا ۵ مگاوات و به طور معمول ۱/۶ مگاوات، کاملاً کارخانه‌ای ساخته می‌شود. گرمای فرآیند تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز در دسترس خواهد بود. عمر ماژول‌ها ده سال است و پس از آن ماژول برای سوخت‌گیری مجدد به کارخانه بازگردانده می‌شود. چندین گزینه سوخت از جمله اورانیوم به شکل اکسید، فلز و سیلیکون برای eVinci وجود دارد.

#### ۵-۴-۴ راکتورهای دمای بالا تعدیل‌شده با گرافیت

##### Fuji MSR .۱-۵-۴

Fuji MSR یک ماژول تعدیل‌شده با گرافیت است که با سوخت  $\text{ThF}_4\text{-UF}_4$  و خنک‌کننده FLiBe در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد کار می‌کند. این راکتور می‌تواند پلوتونیوم و آکتینیدها را مصرف کند و از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ مگاوات تولید برق داشته باشد. این پلنفرم با ایجاد یک کنسرسیوم بین‌المللی ژاپن، روس و ایالات متحده با محوریت ژاپن، تحت عنوان انجمن بین‌المللی نمک گداخته توریم در حال توسعه بیشتر است. ماژول Thorium Tech Solutions (TTS) و چندین نمونه موفق دیگر از جمله مینی فوجی ۱۰ مگاواتی در ژاپن بر این پایه طراحی شده است.

##### Flibe LFTR .۲-۵-۴

ماژول Flibe LFTR از نمک لیتیوم فلوراید (LiF) و برلییم فلوراید ( $\text{BeF}_2$ ) به عنوان خنک‌کننده اصلی خود در هر دو مدار استفاده می‌کند. سوخت آن اورانیوم-۲۳۳ است که از نمک توریم در FLiBe حاصل می‌شود که از بستر گرافیت عبور و گردش خواهد کرد. یک نیروگاه پایلوت ۲ مگاواتی و در نهایت ۲۵۰ مگاوات نیروگاهی از آن پیش‌بینی شده است.

##### Transatomic Power .۳-۵-۴

در ابتدا این ماژول با هدف استفاده از لاکتیدها و اورانیوم با غنای پائین ۱/۸٪ به عنوان سوخت طراحی گردید ولی در پایان مجبور به حذف لاکتیدها از چرخه سوخت آن و استفاده از اورانیوم غنی شده حداکثر به میزان ۵٪ شدند. در طرح راکتور تجدید نظر شده TAP یک هسته بسیار جمع و جور متشکل از یک تعدیل‌کننده هیدرید زیرکونیوم کارآمد و سوخت تترا فلوراید اورانیوم ( $\text{UF}_4$ ) حاوی نمک لیتیوم فلوراید (LiF) و همچنین آکتینیدهای تولید شده در حین کار وجود دارد. خنک‌کننده ثانویه نمک لیتیوم فلوراید-پتاسیم فلوراید-سدیم فلوراید

جهت کاربری گرمایی و یا نمک زدایی نیز به کار گرفته شود. فاصله سوخت‌گیری ۲۰ ساله و ظرفیت تولید ۱۲ مگاوات پیش‌بینی شده است.

#### ۴-۴-۴ راکتورهای نمک گداخته

##### Liquid Fluoride Thorium Reactor .۱-۴-۴ (LFTR)

راکتور SMR توریم فلوراید مایع (LFTR) یک طرح ناهمگن راکتور ذوب نمک (MSR) است که سوخت اورانیوم-۲۳۳ خود را از نمک‌های فلوراید لیتیوم-برلییم (FLiBe) تولید می‌کند. برخی از نوترون‌های آزاد شده در هنگام شکافت نمک اورانیوم-۲۳۳ در هسته راکتور توسط توریم موجود در نمک جذب می‌شوند. اورانیوم-۲۳۳ جذب شده، از نمک جدا شده و در FLiBe تبدیل به سوخت هسته مایع می‌شود. مایع گداخته، حرارت را از قلب راکتور و به وسیله یک مبدل حرارتی به سیکل مذاب دوم که غیر رادیواکتیو است منتقل می‌کند، سپس سیکل دوم، گرمای به دست آورده را برای تولید انرژی به توربین بخار منتقل می‌کند. LFTR ها می‌توانند خیلی سریع توان خروجی خود را به ازای بارهای مختلف تغییر دهند.

##### Thorium Molten Salt Reactor .۲-۴-۴ (TMSR)

چین در حال ساخت راکتور نمک گداخته توریم (TMSR) ۵ مگاوات است که اساساً یک LFTR است. از سوخت با غنای کم مصرف می‌کند و سیستم خنک‌کننده آن FLiBe است.

##### Integral MSR .۳-۴-۴

این IMSR یک SMR ساده است که اجزای اولیه راکتور از جمله مبدل‌های حرارتی اولیه، مدار ثانویه را در یک مخزن هسته مهر و موم شده و قابل تعویض دارد. دارای عمر پیش‌بینی شده هفت ساله است و در دمای ۷۰۰-۶۰۰ درجه سانتی‌گراد کار خواهد کرد که می‌تواند بسیاری از برنامه‌های حرارتی فرآیند صنعتی را پشتیبانی کند. سوخت آن اورانیوم غنی شده درصد پائین ( $\text{UF}_4$ ) به همراه یک نمک حامل فلوراید در فشار جو است. نمک خنک‌کننده مدار ثانویه آن  $\text{ZrF}_4\text{-KF}$  در فشار اتمسفر است. نمک سوم برای تولید برق، مدیریت گرما و یا پشتیبان-گیری از باد و خورشید در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. دارای سیستم خنک‌کننده اضطراری و غیرعامل فوق پیشرفته است. هر نیروگاه برای دو راکتور ماژولار فضا خواهد داشت. IMSR مقیاس‌پذیر است و در سه مقیاس ۸۰ مگاوات، ۳۰۰ مگاوات و ۶۰۰ مگاوات ارائه شده است. در مقایسه با سایر طرح‌های MSR، برای ماژول IMSR به دلیل پیچیدگی‌های



نهادی مأموریت‌گرا به عرصه طراحی و ساخت راکتورهای کوچک هسته‌ای ماژولار جهت تولید برق پایدار کشور در کلان شهرها، شهرک‌های بزرگ صنعتی، کارخانه‌های پرمصرف نیرو، معادن و مناطق دور از دسترسی و حتی کشتی‌های تجاری و ناوهای هواپیمابری پیشنهاد می‌گردد. همچنین با توجه به اهمیت موضوع که بر هیچ کس پوشیده نیست موارد ذیل قویاً پیشنهاد می‌گردد:

- طراحی و یا احداث و یا تجهیز نیروگاه‌های هسته‌ای تجاری بزرگ با استفاده از ظرفیت قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا(ص) برای کمک به سازمان انرژی اتمی در جهت تأمین نیروی برق مورد نیاز کشور

- مشارکت، تعامل و استفاده از ظرفیت قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا(ص) در احداث و ایجاد راکتورهای هسته‌ای ماژولار کوچک مقیاس SMR

- مشارکت، تعامل و استفاده از ظرفیت قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا(ص) در فرآیند ایجاد چرخه سوخت هسته‌ای سازمان انرژی اتمی در پشتیبانی علمی و فنی از صنعت هسته‌ای کشور با توانمندی‌هایی اعم از مطالعات زمین شناسی مربوط به اورانیوم و سایر عناصر لازم دیگر برای صنعت هسته‌ای، مطالعاتی از قبیل طراحی فرآیند، ژئوشیمی، کانی شناسی، استخراج سنگ معدن و سایر مطالعات

## ۶. نتیجه‌گیری

افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و ظهور انواع آلاینده‌های خطرناک زیست محیطی، تغییر شرایط آب و هوایی، بهره‌برداری از انرژی پاک هسته‌ای برای تولید برق را امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر ساخته است. در این خصوص توسعه راکتورهای ماژولار کوچک (SMRs) به پاسخ مهندسی هسته‌ای به تقاضای روزافزون انرژی در سراسر جهان مبدل گشته است که حساسیت این موضوع، ضرورت این مقاله را مسبب شده است. در این مقاله انواع مختلف SMR های حال حاضر جهان با فن‌آوری‌های متفاوت آب سبک، آب سنگین، نوترونی، نمک گداخته و دما بالای گرافیتی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند. در این مقاله مشخص گردید که این راکتورها به دلیل کوچک بودن و ماژولار بودن می‌توانند تقریباً به طور کامل در یک کارخانه ساخته شوند و ماژول به ماژول در سایت نیروگاه نصب شوند که طراحی ماژولار و اندازه کوچک SMR ها، امکان افزایش ماژول برای توان‌های مختلف گرمایی و افزایش ظرفیت واحد در یک سایت نیروگاهی را ممکن خواهد ساخت. همچنین مشخص گردید که اعتماد و استقبال بیشتری به SMR ها به خاطر اندازه کوچک آنها جهت سیستم تأمین بخار و سیستم‌های ایمنی برای کاهش خطرات حاصل شده است و مشکلات برق متناوب، پمپ‌های اضافی و

(FLiNaK; LiF-KF-NaF) است. شار نوترون بیشتر از یک تعدیل کننده گرافیت است و بنابراین به شدت در سوزاندن آکتینیدهای تولید شده نقش دارد. محصولات شکافت به طور مداوم حذف می‌شوند در حالی که مقدار کمی سوخت تازه افزوده می‌شود. یک راکتور تجاری از این SMR می‌تواند ۵۵۰ مگاوات باشد که با استفاده از چرخه بخار با ۴۴ درصد بازده حرارتی با ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد در مدار اولیه کار کند.

## ۴-۵-۴ ThorCon

راکتور ThorCon یک راکتور توربیم تک سیال در طیف حرارتی است که تعدیل کننده آن گرافیت می‌باشد. از ترکیبی از اورانیوم-۲۳۳ از توریوم و اورانیوم-۲۳۵ با غنای ۱۹/۷٪ استفاده می‌کند. نمک سوخت، فلوراید سدیم-فلوراید بریلیم (BeF<sub>2</sub>-NaF) همراه با تترا فلوراید‌های اورانیوم و توریوم محلول می‌باشد که بنا به دلایل هزینه از حضور لیتیم فلوراید جلوگیری شده است. نمک خنک کننده مدار ثانویه نیز سدیم فلوراید-بریلیم فلوراید است. این راکتور در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد کار می‌کند. دو ماژول ۲۵۰ مگاواتی و ۵۵۰ مگاواتی موجود است که نیروگاه را تشکیل می‌دهند. هر نیروگاه شامل دو ماژول قابل تعویض می‌باشد. هر ماژول شامل یک مخزن، یک مبدل حرارتی اولیه و یک پمپ مدار اولیه است و قطر هر ماژول ۱۱/۶ متر، قطر ۷/۳ متر و وزن آن ۳۶۰ تن می‌باشد. ماژول‌ها در سایت نیروگاه ۳۰ متر پائین تر از سطح زمین قرار خواهند گرفت. به صورت گردشی در هر زمان فقط یکی از ماژول‌ها تولید نیرو می‌کند و ماژول دیگر در حالت خنک شدن خواهد بود. هر چهار سال یک بار سیلندر خنک کننده تعویض خواهد شد و نمک سوخت به سیلندر جدید انتقال داده خواهد شد و پس از خنک کاری مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

## ۵. ضرورت حضور قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا- (ص) در بومی سازی فن‌آوری ساخت SMRs

با توجه به جایگاه خاص فن‌آوری انرژی اتمی و نیروگاه‌های هسته‌ای و همچنین نگاه نو کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه طی سال‌های اخیر به استفاده از راکتورهای کوچک ماژولار هسته‌ای یا به اصطلاح همان SMR ها، جهت ارتقاء کمی و کیفی جایگاه جمهوری اسلامی ایران در استفاده از فن‌آوری هسته‌ای و ساخت و تجهیز نیروگاه‌های اتمی و تولید انرژی پاک، ورود قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا(ص) به این عرصه بیش از پیش احساس می‌شود. لذا با نگاهی بر اسناد بالادستی و مأموریت‌ها و همچنین با توجه به سبقه درخشان قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا(ص) در ساخت، تجهیز و راه اندازی پروژه ملی پالایشگاه ستاره خلیج فارس و رویکرد نوین قرارگاه در انحصار شکنی، ورود قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا(ص) به عنوان

5. Small Modular Reactors-Key to Future Nuclear Power Generation in the U.S., Nov 2011, technical paper for DOE from University of Chicago Energy Policy Institute (EPIC)
6. Small Modular Reactors-their potential role in the UK, National Nuclear Laboratory, 2012.
7. Status of Small and Medium Sized Reactor Designs-A Supplement to the IAEA Advanced Reactors Information, System (ARIS), IAEA, 2012.
8. Zheng Mingguang (SNERDI), Small Reactors R&D in China, 2013.
9. Facilitating International Licensing of Small Modular Reactors, Cooperation in Reactor Design Evaluation and Licensing (CORDEL) Working Group of the World Nuclear Association, 2015.
10. Ontario Ministry of Energy-SMR Deployment Feasibility Study: Feasibility of the Potential Deployment of Small Modular Reactors (SMRs) in Ontario prepared by Hatch Ltd. for the Ontario Ministry of Energy, 2016.
11. Juan A. Vitali et al., Study on the use of Mobile Nuclear Power Plants for Ground Operations, 2018.
12. IAEA Advances in small modular reactor technology developments, 2018, International Atomic Energy Agency, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), 2018.
13. M .R. Islam and H. Gabbar, "Study of small modular reactors in modern microgrids," Int. Trans. Electr. Energy Sys. 25, (9), 2014.
14. E. Dahlgren, C. Gocmen, K. Lackner, and G. van Ryzi, "Small modular infrastructure," Eng. Econ., 58 (4) 2013.
15. E. McGinnis, "The BIG potential for nuclear micro-reactors accessed," January 24, 2020.
16. U.S. Department of Energy Tech. Rep Code of federal regulations, title 10 - energy, title: Part 830 - nuclear safety management, 4, Department of Energy, 2019.
17. P. A. Wrigley, P. Wood, P. Stewart, R. Hall, and D. Robertson, "Module layout optimization using a genetic algorithm in light water modular nuclear reactor power plants," Nucl. Eng. Des. 341, 2019.
18. International Atomic Energy Agency Small modular reactors, www.iaea.org
19. E. H. Uguru, S. F. Abdul Sani, M. U. Khandaker, and M. H. Rabir, "Investigation on the effect of  $^{238}\text{U}$  replacement with  $^{232}\text{Th}$  thin small modular reactor (SMR) fuel matrix," Prog. Nucl. Energy, 118, 2020.

سیستم‌های ایمنی مختص راکتورهای هسته‌ای تجاری بزرگ، در این ماژول‌ها اصلاح گردیده است. همچنین بررسی‌ها نشان داد که قرار گرفتن فشارنده در بالای SMR ها، نیاز به محفظه جداگانه برای فشارنده را حذف نموده و سرعت پاسخ‌دهی و پاشش آب سرد به پالس‌های دریافتی، نسبت به راکتورهای تجاری بزرگ افزایش پیدا کرده است. مطالعه و بررسی گردید که طراحی و استفاده از سیستم خنک کننده طبیعی در SMR ها، ضرورت وجود پمپ در مدار اول این راکتورها را حذف و لذا هزینه‌های جانبی را کم نموده است. همچنین یکپارچه شدن تجهیزات، مولدهای بخار، قلب و سیستم‌های مدار اول در داخل محفظه فشار راکتور منجر به حذف حجم زیادی از لوله کشی مدار و در نهایت حوادث ناشی از آسیب لوله‌های تأسیسات شده و لذا از لحاظ اقتصادی نسبت به راکتورهای تجاری بزرگ باعث کاهش چشم‌گیر هزینه سرمایه‌ای می‌شود. به عنوان نظر پیشنهادی مطرح گردید که قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء(ص) به عنوان بازوی عملیاتی کشور در عرصه سازندگی همگام با سازمان انرژی اتمی در زمینه توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای کشور به نماد استفاده صلح آمیز فن‌آوری هسته‌ای برای تولید برق ایمن و مطمئن به منظور رفع نیاز نسل‌های آینده به انرژی پاک در راستای توسعه پایدار کشور مبدل گردد و با حضور مقتدرانه در پروژه‌های رقابت با پیمانکار خارجی به منظور شکستن انحصار ساخت راکتورهای هسته‌ای و به صورت مشخص ساخت راکتورهای هسته‌ای ماژولار کوچک مقیاس SMR به خودکفایی کشور کمک نماید. البته این مسئله را هم باید مد نظر قرار داشت که توان اقلیمی و شرایط اقلیمی هر منطقه، محدودیت‌هایی را در آن منطقه سبب می‌شود. با توجه به شرایط و اقلیم منطقه ما، گاه‌ها جهت پیاده‌سازی و بومی‌سازی فن‌آوری‌های نو ظهوری که به دنیا عرضه می‌شوند من جمله فن‌آوری مطالعه شده در این مقاله، گپ عملیاتی معنی‌دار و محدودیت‌های اجرائی عمیقی وجود دارد که در صورت چشم‌پوشی از آنها قطعاً با مشکلاتی در داخلی‌سازی رو به رو خواهیم شد. لذا انجام پژوهشی در این زمینه، با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و برشماری برخی از این محدودیت‌ها و بررسی فاکتورها و ظرفیت‌های موجود، به پژوهشگران محترم توصیه می‌گردد.

## ۷. مراجع

1. Mahamat K Dodo, Examining the potential impacts of climate change on international security, SpringerPlus 3(1):194, 2014. Www.wmo.int
2. Atomic Energy Organization of Iran, www.aeo.org.ir
3. World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements, Www.world-nuclear.org, World Nuclear Association
4. International Atomic Energy Agency