



اهمیت چرخه سوخت بسته در دستیابی به انرژی هسته‌ای پایدار و تجدیدپذیر در ایران

مهدی قربانی اشرف^{۱*}، پوریا حاتمی باروق^۲

۱. مهندسی هسته‌ای، دانشکده انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۱۴۵۸۸-۸۹۶۹۴، تهران - ایران
۲. معاونت برنامه‌ریزی هسته‌ای و نظارت راهبردی، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

*Email: ashraf.ghorbani@energy.sharif.edu

مقاله فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۳/۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۳/۹

چکیده

از مهم‌ترین عوامل مؤثر در توسعه پایدار هر جامعه‌ای، امنیت انرژی است. توسعه اقتصادی، رفاه اجتماعی، بهبود کیفیت زندگی و امنیت جامعه در گرو تأمین انرژی و تضمین منابع پایدار و مطمئن، پاک و مقرون به صرفه است. در سال‌های اخیر، استفاده از منابع تجدیدپذیر به منظور ایجاد تنوع در سبد انرژی، ارتقاء ملاحظات زیست‌محیطی و دستیابی به انرژی پایدار مورد توجه بسیار زیادی قرار گرفته است. از این منظر، انرژی هسته‌ای نیز در صورت استقرار مناسب، می‌تواند در سبد انرژی یک کشور به عنوان یک منبع تجدیدپذیر و پایدار در نظر گرفته شده و خلأ انرژی‌های فسیلی در آینده را جبران نماید. هدف از این پژوهش تبیین اهمیت چرخه سوخت بسته در ایجاد انرژی هسته‌ای پایدار و تجدیدپذیر در کشور است. همچنین، با توجه به وضعیت نه‌چندان مناسب منابع اورانیمی و توریمی در ایران، عدم وجود همکاری‌های گسترده بین‌المللی، وجود تحریم‌ها در تأمین مواد اولیه تولید سوخت هسته‌ای و عدم امکان تضمین تأمین سوخت مورد نیاز تولید انرژی هسته‌ای، ضرورت توجه بیش از پیش به استقرار چرخه سوخت بسته و به کارگیری رآکتورهای زاینده سریع در صنعت هسته‌ای کشور اثبات می‌گردد. توجه به این موضوع، نیل به اهداف مهمی همچون کاهش نیاز به اورانیم طبیعی، کاهش هزینه پسمانداری هسته‌ای، بهبود بازده نیروگاه‌های اتمی، ایجاد ارزش افزوده در خصوص تولید مواد مورد نیاز بخش‌های کاربرد پرتوها در صنعت، پزشکی و سلامت خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: انرژی هسته‌ای پایدار و تجدیدپذیر، چرخه سوخت بسته، رآکتورهای زاینده سریع

The importance of a closed fuel cycle in achieving sustainable and renewable nuclear energy in Iran

M. Ghorbani Ashraf^{1*}, P. Hatami Barough²

1. Nuclear Engineering, Faculty of Energy, Sharif University of Technology, P.O.Box: 14588-89694, Tehran – Iran
2. Vice President of Nuclear Planning and Strategic Supervision, AEOL, P.O.Box: 14155-1339, Tehran – Iran

Technical Paper

Received: 21.2.2024, Revised: 28.5.2024, Accepted: 29.5.2024

Abstract

Energy security is one of the most important factors in the sustainable development of societies. Fulfillment of goals such as economic development, increasing social well-being, and improving the quality of life depend on providing energy and guaranteeing stable and reliable, clean, and affordable resources. In recent years, the use of renewable resources has received a lot of attention to diversify their energy portfolio, reduce the harmful effects on the environment, and achieve sustainable energy. From this point of view, with the proper establishment of the nuclear fuel cycle, nuclear energy can be considered as renewable and sustainable energy in the energy portfolio and compensate for the lack of non-renewable energy in the future. The purpose of this paper is to explain the importance of a closed fuel cycle in achieving sustainable and renewable nuclear energy. Also, due to the not-very favorable situation of uranium and thorium resources in Iran, the lack of extensive international cooperation, the existence of sanctions in the provision of raw materials for nuclear fuel production, and the impossibility of guaranteeing the supply of fuel needed for nuclear energy production, the need to pay more attention to establishing a closed fuel cycle and using fast breeder reactors is proven. Paying attention to this important issue will achieve goals such as reducing the need for natural uranium, reducing the cost of nuclear waste, improving the efficiency of nuclear power plants, and producing materials required for the use of radiation in industry, medicine, and health.

Keywords: Sustainable and renewable nuclear energy, Closed fuel cycle, Fast breeder reactors



۱. مقدمه

امنیت ملی و اقتدار با توسعه و پیشرفت هر کشوری ارتباط متقابل دارد. از طرف دیگر توسعه مطلوب می‌بایست تأمین نیاز حداکثری نسل‌های کنونی و آتی را به همراه داشته باشد. از این رو شاید توسعه پایدار عبارت مناسبی برای موارد مذکور باشد [۱].

از مهم‌ترین عوامل مؤثر در توسعه پایدار یک کشور، تأمین انرژی آن است. برای تأمین انرژی این توسعه، باید ابعاد سیاسی، امنیتی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی- فرهنگی در نظر گرفته شود. در بُعد سیاسی، انرژی به عنوان یکی از ارکان و ابزارهای مهم کنشگری در مناسبات بین‌المللی شناخته می‌شود، به همین علت کشورها با بهره‌گیری از این مزیت به عنوان یک ابزار استراتژیک، بر وزن و قدرت چانه‌زنی خود در مناسبات قدرت جهانی و اثرگذاری بر تصمیم‌سازی‌های کلان بین‌المللی می‌افزایند. از نظر اقتصادی توسعه انرژی پایدار، توسعه اقتصادی، استفاده کارآمد از انرژی و امنیت انرژی را در بر می‌گیرد تا اطمینان حاصل شود که هر کشور به صورت دائم به انرژی کافی دسترسی دارد. بعد زیست‌محیطی شامل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، جلوگیری از تأثیرات مضر بر تنوع زیستی و اکوسیستم‌ها، کاهش تولید زباله‌های خطرناک و سمی، صرفه‌جویی در مصرف آب و کاهش استفاده از منابع تجدیدناپذیر است. مسائل اجتماعی- فرهنگی شامل دسترسی به انرژی مقرون به صرفه و قابل اطمینان برای همه مردم، حقوق کارگران و حقوق زیست‌محیطی است. پس برای دستیابی به توسعه پایدار نیازمند به «دسترسی به انرژی پاک، دائمی، مطمئن و مقرون به صرفه» است [۱].

در سال‌های اخیر، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به منظور ایجاد تنوع در سبد انرژی و ارتقاء معیارهای زیست- محیطی برای دستیابی به انرژی پایدار مورد توجه قرار گرفته است. سایر موضوعات نظیر افزایش بهای سوخت‌های فسیلی، پیشرفت تکنولوژی، روابط و رویدادهای بین‌المللی در گرایش جهانی به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر تعیین‌کننده بوده است. با این حال انرژی‌های تجدیدپذیر (انرژی خورشیدی، بادی، جزر و مد، امواج، زمین گرمایی و ...) در مقایسه با سایر گزینه‌های انرژی ناپایدارتر و وابسته به شرایط مکانی و زمانی هستند و با توجه به فناوری‌های کنونی قابلیت به‌کارگیری به‌عنوان بار پایه^۱ را ندارند. موضوع مهم دیگر پایین بودن چگالی انرژی در منابع تجدیدپذیر است، برای تولید این انرژی‌ها نیاز به مساحت بسیار بزرگی در خشکی و دریا می‌باشد و برای توسعه آنها در شهرهایی با توسعه عمودی (ساختمان‌های بلند و

چندطبقه) باید ملاحظات زیادی مورد توجه قرار گیرد [۲]. در جهان براساس فناوری‌های موجود درمیان گزینه‌های تولید انرژی، انرژی هسته‌ای دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است که می‌تواند بر مشکلات فوق‌الذکر فائق آید و به عنوان انرژی تجدیدپذیر شناخته شود که در ادامه به صورت اجمالی اشاره خواهد شد.

برای ساخت رآکتور هسته‌ای ۱۰۰۰ مگاواتی (در ایالات متحده) حدود ۲.۶ میلیون متر مربع زمین نیاز است. این در حالی است که مزارع بادی به ۳۶۰ برابر مساحت زمین بیشتر برای تولید همان مقدار انرژی نیاز دارند و نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی به ۷۵ برابر فضای بیشتری نیاز دارند. شایان ذکر است که برای تولید این مقدار انرژی به بیش از ۳ میلیون پنل خورشیدی و یا بیش از ۴۳۰ توربین بادی نیاز است (فاکتور ظرفیت در نظر گرفته نشده است) [۳].

نیروگاه‌های هسته‌ای پس از نیروگاه‌های آبی کمترین میزان کربن را (که موجب آلودگی محیط‌زیست می‌شود) تولید می‌کنند. طبق گزارشات مؤسسه انرژی هسته‌ای^۲ (NEI)، ایالات متحده آمریکا با استفاده از نیروگاه‌های هسته‌ای از انتشار بیش از ۴۷۱ میلیون تن دی‌اکسید کربن در سال ۲۰۲۰ جلوگیری کرده است [۳].

یکی از ویژگی‌های انرژی هسته‌ای سوخت آن است. انرژی نهفته در مقدار بسیار کوچکی از اورانیم با مقادیر بسیار بزرگی از سوخت‌های فسیلی برابری می‌کند. این موضوع مسائل لجستیکی را برای تأمین سوخت فسیلی در مقایسه با سوخت هسته‌ای بیشتر مبین می‌دارد [۳]. با این حال سوخت‌های هسته‌ای متعارف اورانیومی موجود در جهان و با قیمت‌های کنونی، محدود می‌باشند، به همین علت می‌بایست به شیوه مناسب‌تری از استقرار تأسیسات تولید انرژی هسته‌ای و تأمین سوخت آن توجه شود و این توجه شامل چرخه سوخت بسته و انتخاب صحیح نوع رآکتورهای مناسب در تولید انرژی خواهد بود. لازم به ذکر است که در صورت انتخاب درست، انرژی هسته‌ای به یک انرژی تجدیدپذیر، با کمترین پسماند، کمترین تولید کربن (تجهیزات تولید سوخت هسته‌ای در معادن عمدتاً با سوخت‌های فسیلی کار می‌کنند و در صورت بازفرآوری این مقادیر هم بسیار کوچک می‌شوند و میزان تولید کربن به نزدیکی صفر خواهد رسید)، بیشترین بازده حرارتی و الکتریکی و کاملاً مقرون به صرفه تبدیل خواهد شد [۴-۷].

این در حالی است که اگر بخواهیم از چرخه‌های سوخت باز متداول استفاده نماییم و بخواهیم ۱۰۰ درصد انرژی مورد نیاز جهان را توسط انرژی هسته‌ای تأمین نماییم، منابع اورانیم

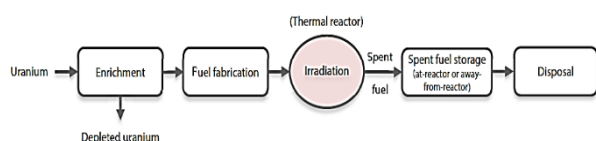


باز است. با استفاده از اورانیم، پلوتونیم، عناصر فرااورانیمی و اکتنیدهای جزئی بازیابی شده، می‌توان سوخت‌های جدیدی برای رآکتورها تولید کرد. پس از استفاده دوباره از این سوخت‌ها، سوخت‌های مصرف شده مستقیماً دفع می‌شوند. چرخه سوخت تک‌بازیافتی (نیمه‌باز) در شکل ۳ نشان داده شده است [۷].

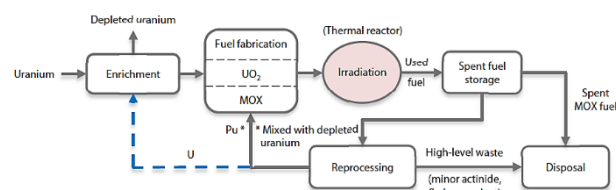
این چرخه سوخت به دلیل استفاده مجدد از ایزوتوپ‌های شکافت‌پذیر (در صورت بازیابی هم اورانیم و هم پلوتونیم) تنها به حدود ۷۵ درصد اورانیم طبیعی مورد نیاز برای چرخه باز، نیاز دارد. بنابراین حدود ۲۵ درصد سوخت کمتری نسبت به چرخه سوخت باز مصرف خواهد شد [۷].

۳.۲ چرخه سوخت بسته

مقدار و نوع محصولات شکافت تولید شده در سوخت مصرف شده در یک رآکتور PWR به درصد غنای اولیه سوخت و برنآپ^۴ آن بستگی دارد. همان‌طوری که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، اگر یک سوخت اورانیم تازه با غنای ۴/۵ درصد و برنآپ ۵۵ GWD/tU در رآکتور از نوع PWR بارگذاری شود پس از چهار بار تابش دیدن مقدار اورانیم در سوخت به حدود ۹۴ درصد مقدار اولیه کاهش می‌یابد. بنابراین در این مدت زمان تابش، میزان اورانیم-۲۳۵، پلوتونیم و اکتنیدهای جزئی (نپتونیم، آمرسیوم و کوریم) باقی‌مانده در سوخت مصرفی به ترتیب به میزان ۱/۱، ۰/۲ و ۰/۷ درصد است و همچنین حدود ۴/۷ درصد محصولات شکافت دیگر تولید می‌شود. پلوتونیم و اکتنیدهای جزئی به عنوان عناصر فرااورانیمی (TRU) شناخته می‌شوند. همان‌طوری که قبلاً اشاره شد از این عناصر می‌توان برای تولید سوخت جدید استفاده کرد [۵].



شکل ۲. چرخه سوخت هسته‌ای باز [۷].



شکل ۳. چرخه سوخت هسته‌ای تک‌بازیافتی (نیمه‌باز) [۷].

لازم به ذکر است، یکی دیگر از گزینه‌ها برای مدیریت سوخت مصرف شده این است که سوخت PWR مستقیماً برای ساخت سوخت رآکتورهای آب سنگین مانند CANDU^۱ مجدداً استفاده شود. در سوخت مصرف شده رآکتور PWR به اندازه کافی سوخت وجود دارد که بتوان از آن در رآکتوری مانند CANDU که سوخت آن بر پایه اورانیم طبیعی است، استفاده شود. این فرایند به عنوان فرایند DUPIC^۲ شناخته می‌شود [۶].

در کل با توجه به این‌که آیا سوخت مصرف شده در رآکتور مستقیماً دفع شود، یا با استفاده از بازفرآوری سوخت باقی‌مانده استخراج و دوباره در رآکتور به کار گرفته شود و یا با استفاده از بازفرآوری و رآکتورهای زاینده مقدار زیادی از مواد فرتایل باقی‌مانده در سوخت به مواد شکافت‌پذیر تبدیل و به عنوان سوخت در انواع رآکتورها استفاده شود، می‌توان سه نوع چرخه سوخت به عنوان گزینه در نظر گرفت که در ادامه این چرخه‌های سوخت به صورت مفصل توضیح داده می‌شود.

۱.۲ چرخه سوخت باز

امروزه بیشتر کشورهای دنیا از این چرخه برای تأمین انرژی هسته‌ای خود استفاده می‌کنند. همان‌طوری که پیش‌تر توضیح داده شد در این چرخه، سوخت از معادن استخراج و پس از آسیاب، غنی‌سازی و ساخت میله و مجتمع سوخت برای تغذیه رآکتور به نیروگاه منتقل می‌شود. بعد از تابش این سوخت و استخراج بیشترین انرژی ممکن، سوخت‌های مصرف شده پس از خنک‌سازی به عنوان پسماند مستقیماً دفع می‌شوند. همان‌طوری که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در اغلب چرخه سوخت‌های باز از رآکتورهایی با طیف نوترون حرارتی (رآکتورهای آب سبک و یا آب سنگین) برای تولید انرژی استفاده می‌شود [۷].

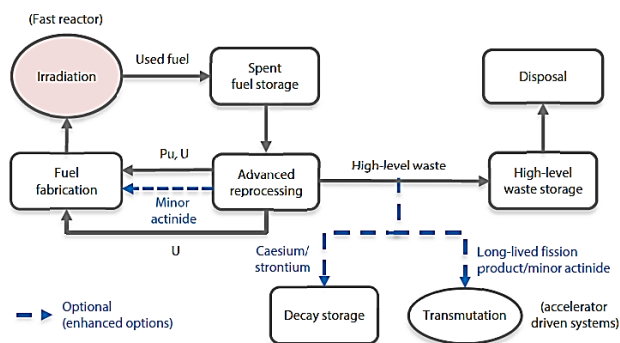
۲.۲ چرخه سوخت تک‌بازیافتی (نیمه‌باز)

این نوع چرخه سوخت از دو مرحله تشکیل می‌شود که مرحله اول همانند چرخه سوخت باز است. این در حالی است که در مرحله دوم سوخت خنک‌شده از مرحله اول، بازفرآوری شده و اورانیم و پلوتونیم (به عنوان سوخت) آن از پسماندهای سطح بالا^۴ (HLW) جدا می‌شود. باید اشاره شود که حجم پسماند تولید شده در این چرخه کمتر از حجم پسماند چرخه سوخت

1. Canada Deuterium Uranium
2. Direct Use of Spent Fuel in CANDU Reactors
3. High Level Waste

4. Burn-Up



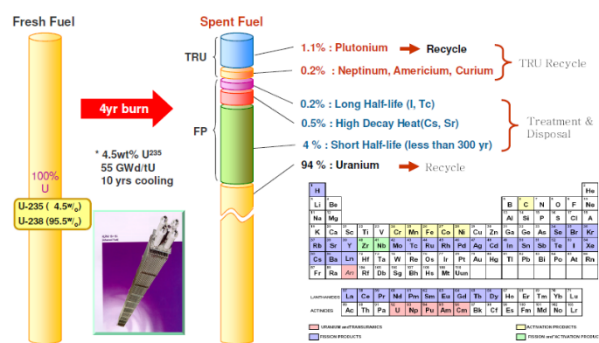


شکل ۵. چرخه سوخت هسته‌ای بسته [۷].

از آنجاکه تمام اورانیم شکافت‌پذیر و پلوتونیم تولید شده از اورانیم فرتایل را می‌توان در این چرخه مصرف کرد، مقدار اورانیم طبیعی مورد نیاز برای تولید همان مقدار انرژی در چرخه سوخت باز به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. رآکتورهای سریع می‌توانند از پلوتونیم تولید شده خود یا پلوتونیم تولید شده توسط رآکتورهای آبی از جمله سوخت رآکتور آب سبک به طور نامحدود استفاده کنند. بنابراین در این چرخه می‌توان حداکثر بهره را از پتانسیل انرژی موجود در سوخت برد و در عین حال از دفع طولانی‌مدت سوخت‌های مصرف شده حاوی اورانیم و پلوتونیم جلوگیری کرد. می‌توان اشاره نمود که با بازفرآوری پیشرفته، اکتینیدهای جزئی (به ویژه نپتونیم، آمرسیوم و کوریوم) موجود در سوخت مصرف شده به عناصر دیگر تبدیل می‌شوند که به دنبال آن میزان پسماند سطح بالا کاهش می‌یابد [۷].

۳. برنامه کشورها برای دستیابی به انرژی هسته‌ای دائمی

در حال حاضر در جهان کشورهایی که چرخه سوخت بسته دارند و قادرند از سوخت مصرف شده مجدداً سوخت جدید تولید کنند، از آرایش رآکتورهای مختلفی برای استفاده طولانی‌مدت از انرژی هسته‌ای استفاده کرده یا در صدد حرکت به سمت این نوع بهره‌برداری از انرژی هسته‌ای هستند. آمریکا، روسیه، فرانسه، چین، هند، ژاپن نمونه‌هایی از این کشورها می‌باشند. در ادامه استراتژی‌های مختلف این کشورها برای دستیابی به شبکه انرژی هسته‌ای دائمی را خواهیم دید. این چرخه‌های تولید انرژی هسته‌ای دائمی (سوخت) براساس نقاط قوت و ضعف هر کشور در تهیه مواد اولیه و توانمندی در ساخت انواع مختلف رآکتورها شکل گرفته است و شاید اصلی‌ترین دلیل در تنوع نوع رآکتورهای تولیدکننده، توجه به هر دو جنبه انرژی هسته‌ای در تولید حرارت و پرتو می‌باشد. چین، هند و روسیه کشورهایی هستند که دیدگاه کلان خود را نسبت به این موضوع در مقالات

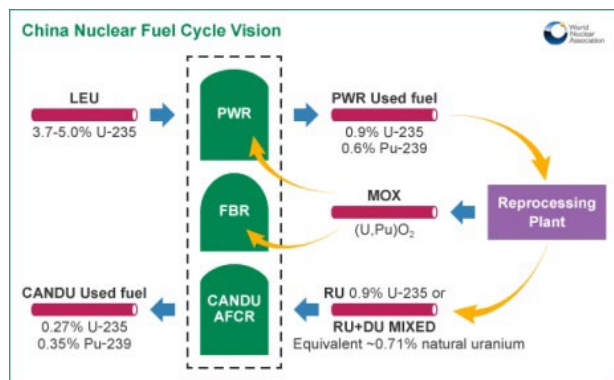


شکل ۴. ساختار و ترکیب سوخت مصرف شده در یک رآکتور آب سبک تحت فشار (PWR) [۶].

علاوه بر پلوتونیم و اکتینیدهای جزئی محصولات شکافت دیگری هم در حین فرایند شکافت اورانیم تولید می‌شود. حدود ۰/۲ درصد این محصولات، ید و تکنسیم هستند که نیمه‌عمر طولانی دارند. به همین علت دفع دائمی این پسماندها نیازمند تخصیص زمان زیاد و توجه ویژه‌ای است. برخی از محصولات شکافت مانند سزیم و استرانسیم حرارت بالایی را واپاشی می‌کنند که این خود یکی از چالش‌های اصلی پسمانداری می‌باشد که مقدار این عناصر در سوخت حدود ۰/۵ درصد است. محصول شکافت باقی‌مانده نیمه‌عمر کوتاهی (کمتر از ۳۰۰ سال) دارد و مقدار آن حدود ۴ درصد است [۵]. بنابراین بهترین روش برای مدیریت سوخت‌های مصرف شده این است که اولاً بتوان از سوخت باقی‌مانده مجدداً در رآکتورها استفاده کرد و ثانیاً بتوان میزان پسماند با درجه سمیت بالا به صورت قابل‌توجهی کاهش داد. این اهداف با انتخاب چرخه سوخت بسته میسر است که در ادامه به تشریح این چرخه پرداخته می‌شود.

چرخه سوخت بسته، شبیه چرخه سوخت تک‌بازیافتی است که در بالا توضیح داده شد، با این تفاوت که سوخت چندین بار بازیافت می‌شود. به طور کلی، برای داشتن مواد شکافت‌پذیر کافی برای یک بازیافت چندگانه، نوع دیگری از رآکتور (رآکتور زاینده سریع) برای مرحله دوم استفاده می‌شود. این نوع رآکتور از نوترون‌هایی پر انرژی برای شکافت استفاده می‌کند، به همین علت پلوتونیم بیشتری از اورانیم فرتایل ساخته می‌شود. اورانیم و پلوتونیم را می‌توان به طور مداوم بازیافت کرده و به عنوان سوخت در رآکتور با طیف نوترون‌های حرارتی و سریع استفاده نمود. این کار تا زمانی که اورانیم فرتایل کافی برای جبران مواد شکافت‌پذیر در سوخت باشد، ادامه می‌یابد. در هر بار بازفرآوری پسماندهای تولید شده دفع می‌شود. یک نمونه از فرایند چرخه سوخت بسته در شکل ۵ آورده شده است [۷].





شکل ۶. رآکتورهای مورد توجه در شبکه انرژی دائمی هسته‌ای دو جزئی کشور چین در افق بلندمدت [۸].

۲.۳ برنامه هند در دستیابی به انرژی هسته‌ای دائمی

هند یکی از بزرگ‌ترین برنامه‌های دستیابی به شبکه انرژی دائمی هسته‌ای را دارد. این کشور به دلیل ضعف خود در تأمین اورانیم مورد نیاز برای تولید انرژی بلندمدت، به استفاده از توریم به عنوان محور توسعه انرژی هسته‌ای خود روی آورده است. برنامه این کشور در سه گام پی‌ریزی شده است و در آن قرار است شبکه انرژی دائمی هسته‌ای به صورت سه جزئی و به صورت ترکیب توریمی-اورانیمی در سه گام پیگیری شود (شکل ۷ نشانگر برنامه هند برای دستیابی شبکه انرژی دائمی است). این برنامه طراحی، ساخت و اثبات فناوری‌هایی که برای اولین بار در جهان رخ خواهند داد را در بر می‌گیرد. این برنامه که دارای انواع رآکتورهای آب سنگین اورانیمی، رآکتور آب سنگین توریمی و سریع زاینده توریمی است، اجزاء تشکیل‌دهنده و محوری توسعه هسته‌ای هند خواهد بود. این برنامه سه مرحله‌ای، توسط دکتر هومی بابا در دهه ۱۹۵۰ برای تضمین استقلال انرژی بلندمدت کشور از طریق استفاده از ذخایر اورانیم و توریم موجود در ماسه‌های موناظیتی در منطقه ساحلی جنوب هند تدوین شد. تمرکز نهایی این برنامه بر امکان استفاده از ذخایر توریم هند برای تأمین انرژی مورد نیاز کشور است. توریم به ویژه برای هند جذاب است، زیرا تنها حدود ۱ تا ۲ درصد ذخایر اورانیم جهانی را در اختیار دارد، اما یکی از بزرگ‌ترین ذخایر توریم جهانی با حدود ۲۵ درصد از ذخایر توریم شناخته شده جهان است. لازم به ذکر است که ذخایر توریم جهان ۳ تا ۴ برابر میزان ذخایر اورانیم در جهان است و این موضوع دلیل اهمیت بیشتر توجه به توریم در کشورهای فقیر از نظر منابع اورانیمی است [۹، ۱۰].

و گزارش‌های مختلف اعلام نموده‌اند و می‌توان نوع نگرش آنها نسبت به بهره‌برداری تقریباً بی‌پایان از انرژی هسته‌ای با استفاده از فرایند شکافت را دید. البته تولید انرژی هسته‌ای با استفاده از فناوری‌های حوزه فرایند گداخت و ترکیب‌های مختلف فرایندهای گداخت-گداخت، گداخت-شکافت، شکافت-شکافت‌دهی، شکافت-گداخت-شکافت، واپاشی-شکافت-شکافت‌دهی و سایر تراکیب فرایندهای تولید انرژی نیز وجود دارد ولی در حال حاضر و در افق کوتاه‌مدت و میان مدت، و شاید در ۱۰۰ سال آتی محتمل‌ترین مسیر استفاده از فناوری‌های تولید انرژی هسته‌ای در حوزه فرایند شکافت باشد. ترکیبی مانند شکافت‌دهی و شکافت رآکتورهای ADS را در بر می‌گیرد، ترکیبی از گداخت - شکافت، رآکتورهای هیبرید را در بر دارد و ترکیب‌های دوتایی و سه‌تایی و شاید انتخاب‌های بیشتر برای دستیابی به شبکه انرژی هسته‌ای دائمی هم‌اکنون در چشمانداز کشورهای صاحب فناوری به صورت آشکار و پنهان بوده است.

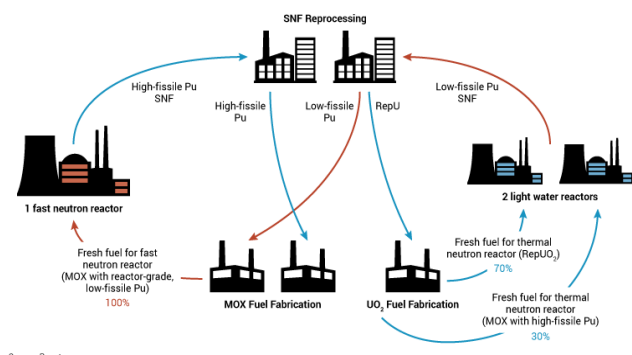
۱.۳ برنامه چین در دستیابی به انرژی هسته‌ای دائمی

چین یکی از بزرگ‌ترین برنامه‌های دستیابی به سیستم شبکه انرژی دائمی هسته‌ای را در جهان دارد. توجه به میزان رآکتورهای ساخته شده در دو دهه گذشته و تعداد رآکتورهای در حال ساخت این کشور نشان از عظم جدی توسعه هسته‌ای چین دارد. نکته محوری در این توسعه چشمانداز چرخه سوخت چین می‌باشد که این کشور را به یک سیستم سه جزئی سوق داده است. در حال حاضر چین رآکتورهای آب سبک و آب سنگین را در بهره‌برداری خود قرار داده است و از فرایند DUPIC در استفاده مجدد سوخت رآکتورهای آب سبک در رآکتورهای آب سنگین بهره‌مند است. با توجه به چشمانداز این کشور در شبکه سه جزئی شبکه انرژی دائمی هسته‌ای، تحرکات این کشور در حوزه رآکتورهای سریع کاملاً توجیه‌پذیر خواهد بود و همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، این موضوع به صورت صریح در برنامه‌های این کشور در حال پیگیری است. برتری رآکتورهای آب سنگین (CANDU) در سوخت‌گذاری برخط و امکان تولید سوخت (چشمه) مورد نیاز در توسعه کاربرد پرتوها خصوصاً تولید کبالت ۶۰، نقش رآکتورهای آب سنگین را در برنامه چین برجسته نموده است [۸].



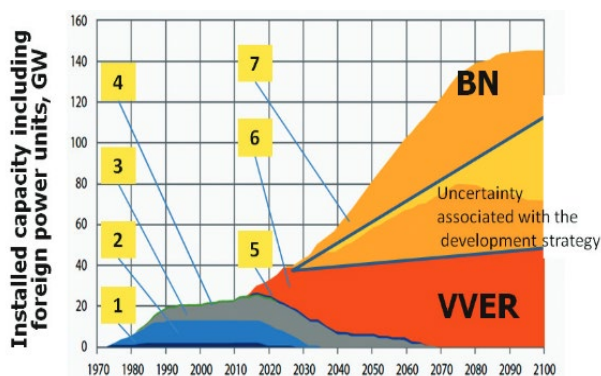
قدیمی‌ترین رآکتور زاینده سریع است که هنوز از آن بهره‌برداری می‌شود و زمان بهره‌برداری آن تا سال ۲۰۲۵ تمدید شده است. از سال ۲۰۱۶ رآکتور BN-۸۰۰ نیز، با قابلیت تولید ۸۸۰ مگاوات الکتریکی، در بلویارسک شروع به کار کرد و از مخلوط اکسید اورانیوم-پلوتونیم نیز به عنوان سوخت در آن استفاده شده است. رآکتورهای BN-۱۲۰۰ گام بعدی توسعه رآکتورهای زاینده سریع روسی است که هدف آن دستیابی به اهداف نسل چهارم رآکتورهای هسته‌ای همچون ایمنی و کارایی بالا است. ساخت و توسعه این نوع رآکتورها نشان‌دهنده تعهد روسیه به پیشرفت فناوری هسته‌ای و دستیابی به چرخه سوخت بسته برای تولید انرژی پایدار (تجدیدپذیر) است [۱۴].

کشور روسیه سابقه بهره‌برداری و توسعه رآکتورهای گرافیتی یا همان RBMKها را دارد. اما در افق بلندمدت توسعه این کشور، دو طیف رآکتورهای آب سبک و سریع زاینده قرار دارند. در شکل ۹ تنوع این رآکتورها، زمان بهره‌برداری و نسبت به کارگیری نمایش داده شده است [۱۵].

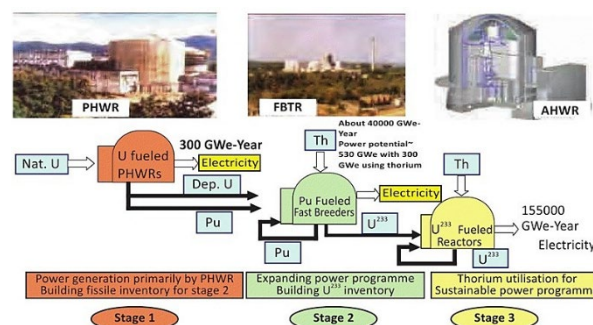


Source: Rosatom

شکل ۸. چینه متوازن شبکه انرژی دائمی هسته‌ای دو جزئی با رآکتورهای آب سبک و زاینده سریع [۱۳].



شکل ۹. نسبت مابین رآکتورهای سریع و آب سبک در شبکه انرژی دائمی هسته‌ای دو جزئی کشور روسیه در افق بلندمدت (۱. VVER۴۴۰، ۲. RBMK، ۳. VVER۱۰۰۰، ۴. BN۶۰۰، ۵. BN۸۰۰، ۶. VVER TOI، ۷. BN۱۲۰۰) [۱۵].



شکل ۷. برنامه سه مرحله‌ای هند برای دستیابی به شبکه انرژی دائمی هسته‌ای [۱۱].

در این برنامه در گام اول از اورانیوم طبیعی برای سوختن در یک رآکتور آب سنگین تحت فشار (PHWR) استفاده می‌شود و محصول جانبی، پلوتونیم ۲۳۹ در مرحله دوم استفاده می‌شود. در مرحله دوم رآکتور زاینده سریع (FBR) برای تولید پلوتونیم ۲۳۹ بیشتر، که سپس منجر به تبدیل توریم ۲۳۲ به اورانیوم شکافت‌پذیر، اورانیوم ۲۳۳ تبدیل می‌شود، توسعه داده می‌شود. در مرحله سوم رآکتورهای زاینده به کار گرفته و در رآکتورهای توریم پایه، اورانیوم ۲۳۳ بیشتری تولید و مصرف می‌شوند [۹، ۱۰، ۱۲].

۳.۳ برنامه روسیه در در دستیابی به انرژی هسته‌ای دائمی روسیه از بزرگ‌ترین بازیگران فناوری هسته‌ای در دو فرایند تولید اصلی انرژی یعنی، شکافت و گداخت است. در حال حاضر این کشور از بزرگ‌ترین سازندگان نیروگاه‌های شکافتی در جهان بوده و نقش مهمی در تولید رادیوایزوتوپ‌های حوزه صنعت و سلامت را ایفا می‌کند. این کشور براساس مستندات موجود افق تولید انرژی شکافتی خود را در شبکه انرژی دائمی هسته‌ای به صورت ترکیبی از رآکتورهای آب سبک و زاینده سریع سدیمی دنبال می‌کند. رآکتورهای معروف و جدید BN و VVER از مهم‌ترین بازیگران دستیابی به انرژی هسته‌ای دائمی در روسیه خواهند بود. چینه این نوع رآکتورها برای دستیابی به شبکه انرژی دائمی هسته‌ای در شکل ۸ نشان داده شده است [۱۳].

رآکتورهای نوع BN با هدف استفاده از طیف نوترون‌های سریع برای تولید حرارت و انرژی در جهت توسعه انرژی هسته‌ای در کشور روسیه طراحی و ساخته شده‌اند. رآکتور BN-۳۵۰، اولین نمونه از این نوع رآکتور برای استفاده به عنوان آب‌شیرین‌کن و تولید انرژی در قزاقستان ساخته و در سال ۱۹۹۹ از رده خارج شد. رآکتور BN-۶۰۰ که از سال ۱۹۸۰ در نیروگاه هسته‌ای بلویارسک مورد بهره‌برداری قرار گرفت از



۴. گزینه‌های استقرار انرژی هسته‌ای دائمی در ایران

کشور ایران با توجه به کاهش منابع تجدیدپذیر (سوخت فسیلی و منابع گازی) و دسترسی محدود به منابع اورانیمی نیازمند انتخاب استراتژی مناسب برای چرخه سوخت هسته‌ای خود است. در این بخش ابتدا وضعیت موجود این کشور از نظر منابع اورانیمی و سطح بلوغ فناوری توضیح داده می‌شود. سپس با توجه به دانش و فناوری‌های موجود در این کشور، نیاز به ادامه همین وضعیت و یا تغییر استراتژی چرخه سوخت، بررسی خواهد شد.

۱.۴ وضعیت کنونی

کشور ایران جهت دستیابی به شبکه انرژی پایدار، مطمئن و مقرون به صرفه، توسعه برق هسته‌ای را در سبد انرژی خود دیده است. در همین راستا، این کشور علاوه بر ساخت نیروگاه هسته‌ای، به دنبال ساخت و توسعه دیگر تأسیسات هسته‌ای مربوط به چرخه سوخت هسته‌ای است. با توجه به تأسیسات و تجهیزات موجود در این کشور، چرخه سوخت آن از نوع چرخه سوخت باز می‌باشد که در ادامه وضعیت هر کدام از آنها و میزان منابع اورانیمی موجود در ایران به صورت اجمالی توضیح خواهد شد.

۱.۱.۴ چرخه سوخت هسته‌ای ایران

کشور ایران دارای یک رآکتور هسته‌ای ۱۰۰۰ مگاواتی است که در نیروگاه بوشهر با همکاری روسیه ساخته شده و از نوع رآکتور آب سبک تحت فشار (VVER) است. این رآکتور از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ بیش از ۴۷ هزار میلیون کیلووات ساعت برق تولید کرده و از مصرف بیش از ۸۲ میلیون بشکه نفت و انتشار حدود ۴۶ میلیون تن گازهای گلخانه‌ای جلوگیری کرده است. ایران همچنین در حال ساخت فازهای دوم و سوم نیروگاه بوشهر با ظرفیت ۱۰۰۰ مگاواتی است [۱۶].

کشور ایران برای تأمین سوخت هسته‌ای رآکتور و مدیریت سوخت مصرف شده از چرخه سوخت باز استفاده می‌کند که این چرخه شامل مراحل اکتشاف، استخراج، تولید، تبدیل، غنی‌سازی و ساخت سوخت و مجتمع سوخت است. ایران دارای معادن اورانیم در گچین، ساغند، نارینگان و زرین است که از آنها سنگ معدن اورانیم استخراج می‌شود. ایران همچنین دارای دو کارخانه تولید اورانیم در بندرعباس و اردکان است که سنگ معدن را به کیک زرد (U_3O_8) تبدیل می‌کنند. کارخانه تبدیل اورانیم در اصفهان کیک زرد را به هگزافلوورید اورانیم (UF_6) و اکسید اورانیم (UO_2) تبدیل می‌کند. کارخانه غنی‌سازی سوخت در نطنز و فردو UF_6 را با استفاده از سانتریفیوژ غنی‌سازی

می‌کنند. کارخانه تولید سوخت در اصفهان UO_2 را به قرص، میله و مجتمع سوخت هسته‌ای تبدیل می‌کند [۱۶].

شایان به ذکر است که کشور ایران دارای شرکت مدیریت پسماندهای رادیواکتیو ایران^۱ (IRWA) است که مسئول دفع پسماندهای پرتوزا، شامل پسماندهای حاصل از بهره‌برداری و از کاراندازی تأسیسات هسته‌ای است. این شرکت برای حفاظت از مردم، محیط‌زیست و نسل‌های بعدی در برابر اثرات مضر تشعشعات ناشی از پسماندهای رادیواکتیو فعالیت می‌کند. ایران سایت انارک را به عنوان مخزن نزدیک به سطح زمین برای دفع پسماندهای سطح پایین و میانی ناشی از صنعت هسته‌ای در ایران انتخاب کرده است. ایران همچنین در حال مطالعه و بررسی سایت‌های دیگری برای دفع پسماندهای سطح بالا (HLW) است [۱۶].

۲.۱.۴ ذخایر اورانیمی ایران

از سال ۱۹۶۵، سالانه سندی به عنوان «Red Book» توسط آژانس انرژی هسته‌ای^۲ (NEA) و آژانس بین‌المللی انرژی اتمی^۳ (IAEA) منتشر می‌شود، که در آن منابع، تولید و تقاضای اورانیم هر کشور آورده می‌شود. براساس گزارش ۲۰۲۲ این سند (همان‌طوری که در جدول ۱ مشاهده می‌شود)، جمع ذخایر قطعی^۴ و تخمینی^۵ قابل استحصال اورانیم (RAR+IR) کشور ایران حدود ۷۴۰۰ تن است [۱۷].

اگر داده‌های جدول ۲ به عنوان پارامترهای مربوط به فرایند ساخت سوخت و تولید انرژی رآکتور ۱۰۰۰ مگاواتی VVER در نظر گرفته شود، کشور ایران فقط توانایی تأمین حدود ۸ سال نیاز برنامه ۳۰۰۰ مگاواتی برق هسته‌ای در سایت فعلی نیروگاه بوشهر را دارد [۱۷، ۱۸]. بنابراین این کشور برای تأمین سوخت برنامه برق هسته‌ای به شدت نیاز به واردات اورانیم طبیعی خواهد داشت.

۲.۴ آینده استقرار وضعیت کنونی

با توجه به نوع چرخه سوخت استقرار یافته در کشور ایران و منابع محدود اورانیمی این کشور، تولید انرژی هسته‌ای در این کشور به مدت محدودی اتفاق خواهد افتاد. به منظور تولید انرژی هسته‌ای به عنوان انرژی تجدیدپذیر در کشور ایران، نیازمند به تغییر سیاست این کشور در استقرار نوع چرخه سوخت و رآکتورهای هسته‌ای است.

1. Iran Radioactive Waste Management Co

2. Nuclear Energy Agency

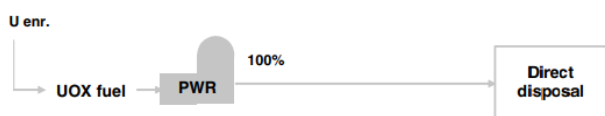
3. International Atomic Energy Agency

4. Reasonably Assured Resources (RAR)

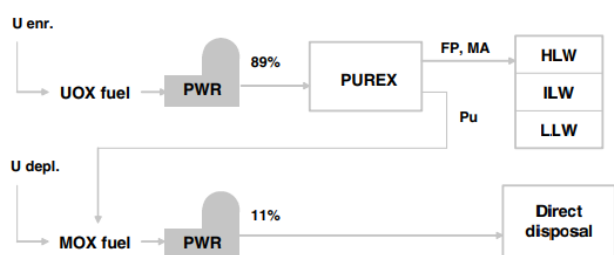
5. Inferred Resources (IR)



استفاده از چرخه سوخت تک‌باز یافتی برای بازیابی سوخت مصرف شده، حدود ۲۵ درصد از منابع اورانیم طبیعی ذخیره‌سازی خواهد شد. از طرفی با استفاده از چرخه سوخت بسته و رآکتورهای سریع زاینده، نیاز به منابع اورانیم به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۳ با استفاده از چرخه سوخت بسته حدود ۱۰۰ درصد اورانیم طبیعی ذخیره‌سازی می‌شود [۷-۱۹].



شکل ۱۰. شماتیک چرخه سوخت باز (چرخه سوخت مرجع) [۱۹].



شکل ۱۱. شماتیک چرخه سوخت با فرایند بازآوری مرسوم [۱۹].



شکل ۱۲. شماتیک چرخه سوخت بسته [۱۹].

جدول ۳. مشخصات طراحی رآکتور و پارامترهای چرخه سوخت

نوع رآکتور	توان حرارتی (MW)	توان الکتریکی (MW)	بازده نیروگاه (%)	نوع سوخت	برنآپ (GWd/tHM)
PWR-UOX	۴۲۵۰	۱۴۵۰	۳۴٫۱	UOX	۶۰
PWR-MOX	۴۲۵۰	۱۴۵۰	۳۴٫۱	MOX	۶۰
FR-carbide	۲۴۰۰	۱۱۵۸	۴۸٫۳	(U,Pu) C-SiC	۱۰۰

جدول ۱. منابع اورانیمی موجود در ایران برحسب قیمت قابل استخراج^۱

		هزینه استخراج (به ازای هر کیلوگرم)			
		کمتر از ۴۰ دلار آمریکایی	کمتر از ۸۰ دلار آمریکایی	کمتر از ۱۳۰ دلار آمریکایی	کمتر از ۲۶۰ دلار آمریکایی
ذخایر موجود	ذخایر قطعی (RAR)	-	-	۴۳۰۰	۴۳۰۰
	ذخایر تخمینی (IR)	-	-	۵۵۰۰	۵۵۰۰
ذخایر قابل بازیابی	ذخایر قطعی (RAR)	-	-	۳۲۰۰	۳۲۰۰
	ذخایر تخمینی (IR)	-	-	۴۲۰۰	۴۲۰۰

جدول ۲. پارامترهای فرایند غنی‌سازی و نیروگاه ۱۰۰۰ مگاواتی

فرایند	پارامتر	مقدار
استخراج	تلفات استخراج	۰٫۴/۲۴٪
تبدیل	تلفات	۰٫۵٪
غنی‌سازی	درصد غنا	۴٫۱٪
	تلفات غنی‌سازی	۰٫۲۵٪
ساخت سوخت	تلفات	۱٪
نیروگاه	برنآپ سوخت (GWd/t U)	۳۲
	بازده نیروگاه	۳۳٪

شماتیک و مشخصات نوع چرخه سوخت‌های (چرخه سوخت باز، تک‌باز یافتی و بسته) در نظر گرفته شده در این بخش به منظور مقایسه مقدار اورانیم طبیعی مورد نیاز، میزان بار حرارتی و حجم پسماند تولید شده، حجم پسماند سطح بالای تولید شده و زمان لازم برای رسیدن پرتوزایی سوخت مصرف شده به مقدار پرتوزایی اورانیم طبیعی، به ترتیب در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ آورده و همچنین به مشخصات رآکتورهای به‌کارگیری شده در چرخه سوخت‌ها در جدول ۳ اشاره شده است [۱۹].

۳.۴ وضعیت پیشرو در صورت تغییر استراتژی استقرار همان‌طوری که قبلاً اشاره شد در سوخت مصرف شده حدود ۹۴٪ اورانیم (به انضمام ۱ درصد پلوتونیم) وجود دارد، در صورت

۱. مقادیر براساس تن (ton) آورده شده است.

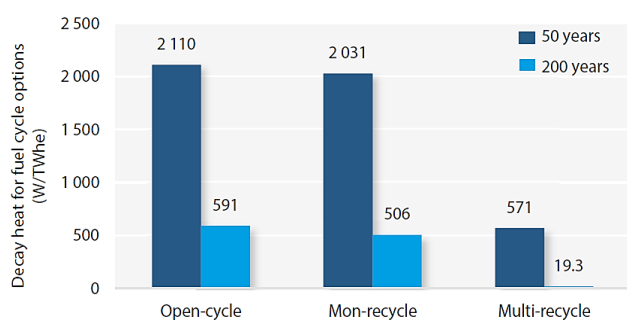


هزینه ساخت و نگهداری پسماندها در چرخه سوخت بسته به شکل قابل توجهی کاهش خواهد یافت (برای دوره ۵۰ ساله حدود ۷۰ درصد و برای دوره ۲۰۰ ساله حدود ۹۷ درصد بار حرارتی در چرخه سوخت بسته نسبت به دیگر چرخه‌ها کاهش می‌یابد) [۷-۱۹].

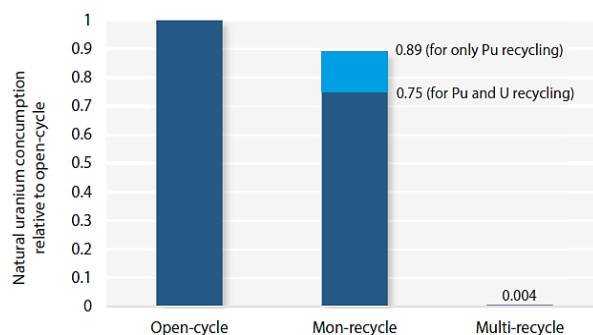
حجم پسماندهای سطح بالا نیز یکی از عوامل مؤثر بر اندازه مخازن ذخیره‌سازی پسماندها است. شکل ۱۵ حجم پسماندهای سطح بالا را در چرخه‌های مختلف سوخت نشان می‌دهد. حجم پسماند ناشی از چرخه سوخت تک‌بازيافتی حدود ۸۳ درصد کمتر از حجم پسماند چرخه سوخت باز است. این در حالی است که این حجم از پسماند در چرخه سوخت بسته نسبت به چرخه سوخت باز به حدود ۹۵ درصد کاهش می‌یابد [۶-۲۰].

همان‌طوری که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، در حالت عادی زمان لازم برای رسیدن پرتوزایی سوخت مصرف شده به مقدار پرتوزایی اورانیم طبیعی در حدود چند صد هزار سال است. در صورتی که چرخه سوخت بسته پیشرفته که شامل بازیابی مواد شکافت‌پذیر مانند پلوتونیم و سایر اکتینیدهای جزئی است، این زمان را به حدود ۴۰۰ سال کاهش می‌دهد. بنابراین به‌کارگیری چرخه‌های سوخت بسته کامل نسبت به چرخه‌های سوخت باز و نیمه‌باز (چرخه سوخت تک‌بازيافتی) می‌تواند منجر به کاهش زمان پسمانداری و حجم مخزن پسماند و در نتیجه کاهش هزینه‌های پسمانداری و ریسک انتشار مواد پرتوزا به محیط‌زیست شود [۷-۲۱].

پس با استفاده از چرخه سوخت بسته می‌توان هم بیشترین انرژی ممکن از سوخت‌های مصرف شده را استخراج کرد و هم پسماندهای تولید شده را مقرون به صرفه و با درصد سمومیت پایین دفع نمود.



شکل ۱۴. میزان گرمای واپاشی شده توسط پسماندهای سوخت ذخیره‌سازی شده برای دو دوره متفاوت (۵۰ و ۲۰۰ سال) قبل از قرارگیری در مخزن‌های پسمانداری در انواع چرخه سوخت [۷].



شکل ۱۳. میزان اورانیم طبیعی مورد نیاز برای انواع چرخه سوخت نسبت به چرخه سوخت باز [۷].

مدیریت سوخت مصرف شده یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در صنعت هسته‌ای است. پس از تحت تابش قرار گرفتن سوخت اکسید اورانیم تازه، سه دسته عناصر تولید می‌شود: خانواده اورانیم/پلوتونیم، محصولات شکافت و اکتینیدهای جزئی (نپتونیم، آمرسیوم، کوریم). انتخاب یک گزینه از چرخه سوخت تأثیر زیادی بر ویژگی‌های پسماند نهایی و نحوه مدیریت پسماندها خواهد داشت. با این حال در همه گزینه‌ها، هدف دفع پسماندهای تولید شده است. در ادامه تأثیر چرخه‌های مختلف سوخت هسته‌ای بر روی سطح سمومیت، بار حرارتی ساطع شده و حجم پسماندهایی که باید دفع شود، بررسی خواهد شد. میزان بار حرارتی و حجم پسماندهای هسته‌ای تولید شده از رآکتور تأثیر بسزایی در اندازه مخزن‌های ذخیره‌سازی دارند. هر چه بار حرارتی این پسماندها (HLW) کمتر باشد، موجب کاهش اندازه مخزن‌ها و به دنبال آن کاهش هزینه ساخت و نگهداری پسماندها می‌شود. عوامل مؤثر در کاهش بار حرارتی پسماندها عبارتند از [۷-۱۹]:

۱. خنک‌سازی طولانی‌مدت سوخت مصرف شده قبل از قرارگیری آن در مخزن‌ها
۲. جداسازی محصولات شکافت (سزیم ۱۳۷ و استرانسیم ۹۰) از پسماندها که دارای بار حرارتی زیاد با نیمه‌عمر کوتاه هستند.

۳. سوزاندن ایزوتوپ‌ها (پلوتونیم ۲۳۸ و آمرسیوم ۲۴۱) که دارای بار حرارتی زیاد با نیمه‌عمر کوتاه و متوسط هستند.

در شکل ۱۴ بار حرارتی تولیدی پسماندها پس از دو دوره مختلف خنک‌سازی (۵۰ و ۲۰۰ سال) برای چرخه سوخت‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود با استفاده از چرخه سوخت بسته حرارت تولیدی پسماندها قبل از ذخیره‌سازی در مخازن پسمانداری نسبت به چرخه سوخت باز و نیمه‌باز (تک‌بازيافتی) به مراتب کمتر است. بنابراین اندازه و



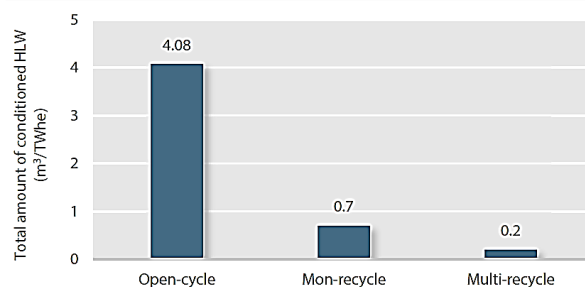
داخلی و بین‌المللی، رویه‌ها و استانداردهای مورد نیاز و ...، مغزافزاری (دانش فنی در تمام فرایندهای ذیل بازفرآوری - نظیر فرایندهای همچون DUPIC، Pyro-Processing، PUREX، مشاوره، اتاق‌های فکر، ظرفیت‌های بین‌المللی و ...) و انسان‌افزاری (کارگران، تکنسین‌ها، مهندسین و مدیران) متناسب و بهره‌جستن از ابزار پژوهش در حوزه بازفرآوری و آموزش نیروی انسانی آن از نکات مهم در ایجاد و توسعه آینده چرخه سوخت بسته خواهد بود.

کشور ایران فقط از دانش و ساخت سوخت در چرخه سوخت باز بهره‌مند بوده و تجربه بهره‌برداری آن به رآکتورهای آب سبک محدود می‌گردد. با توجه به وضعیت موجود کشور، برای دستیابی به چرخه سوخت بسته نیاز به حصول دانش و فناوری فرایندهای بازفرآوری و ساخت و بهره‌برداری رآکتورهای زاینده سریع و رآکتورهای آب سنگین می‌باشد. از طرفی کشور به مسائل سیاسی با موضوع تحریم درگیر می‌باشد و لذا رسیدن به چنین دانش و فناوری‌هایی بسیار سخت و زمان‌بر است. به همین علت کشور بایستی با مشارکت کشورهایی همسو همچون چین و روسیه اقدام به دستیابی به دانش و فناوری‌های مذکور نماید.

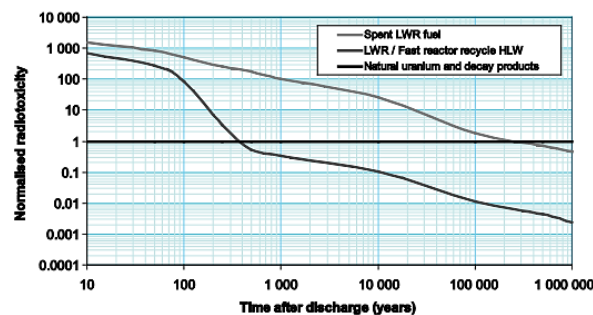
۶. نتیجه‌گیری

هر کشوری برای دستیابی به امنیت انرژی نیازمند به برخورداری از منابع انرژی متنوع و تجدیدپذیر در سبد انرژی است. یکی از منابعی که می‌تواند در دستیابی به این هدف کمک کند، انرژی هسته‌ای می‌باشد. تجدیدپذیر و مقرون به صرفه شدن انرژی هسته‌ای نیازمند استفاده از شیوه مناسب استقرار تأسیسات تولید و تسهیل برق هسته‌ای شامل چرخه سوخت بسته و انتخاب صحیح نوع رآکتورها است.

با توجه به وضعیت منابع طبیعی کشور ایران و شرایط سیاسی آن (وجود تحریم‌ها)، جمهوری اسلامی ایران در راستای رسیدن به امنیت انرژی با استفاده از انرژی هسته‌ای، نیاز به استقرار چرخه سوخت بسته و به‌کارگیری رآکتورهای زاینده سریع در صنعت هسته‌ای خود دارد. از طرفی بایستی اشاره شود که از رآکتورهای آب سنگین نیز می‌توان برای خودکفایی در تولید رادیوایزوتوپ‌ها و کاهش هزینه‌های غنی‌سازی استفاده شود. با این اقدامات نیاز به منابع اورانیم طبیعی کاهش یافته و سوخت‌های مصرف شده با بازفرآوری به چرخه تولید برق هسته‌ای بازمی‌گردند و هم‌زمان کاهش هزینه‌های پسمانداری هسته‌ای نیز صورت می‌گیرد. لذا کشور ایران مجهز به منابع انرژی پایدار، مطمئن و مقرون به صرفه خواهد شد.



شکل ۱۵. حجم پسماندهای سطح بالای تولید شده در انواع چرخه سوخت [۷].



شکل ۱۶. زمان لازم برای رسیدن پرتوایی پسماندها سطح بالا به سطح پرتوایی اورانیم طبیعی [۷].

۵. بخش‌های ضروری و مورد نیاز جهت استقرار چرخه سوخت بسته

برای دستیابی به شبکه انرژی هسته‌ای دائمی، استقرار چرخه سوخت بسته الزامی است. بدین منظور علاوه بر رآکتورهایی با طیف نوترون حرارتی متداول، باید رآکتورهایی با طیف نوترون سریع و زاینده نیز در چرخه سوخت به‌کار گرفته شود. شایان ذکر است، برای تولید حامل انرژی پاک و چندمنظوره همچون هیدروژن باید از رآکتورهای دما بالا در چرخه سوخت استفاده شود. پس ایران برای دستیابی به انرژی هسته‌ای به عنوان انرژی تجدیدپذیر و همچنین خودکفایی در تولید رادیوایزوتوپ‌ها نیازمند به ساخت رآکتورهایی مانند رآکتورهای زاینده سریع (مانند رآکتور زاینده سریع با خنک‌کننده سدیم مایع)، رآکتورهای آب سنگین و رآکتورهای دما بالا در کنار رآکتورهای آب سبک می‌باشد. از طرف دیگر، بنا به دلایلی همچون کمبود منابع اورانیمی و توریمی در کشور، استفاده بهینه از سوخت‌های مصرف شده رآکتورهای کنونی، آتی و اورانیم تهی شده و کاهش میزان اکتیویته و حجم پسماند آنها برای دفع نهایی می‌بایست به سمت چرخه سوخت بسته به عنوان یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر حرکت نماید. ایجاد زیرساخت‌های سخت‌افزاری (هات‌سل‌ها)، سایت‌های بازفرآوری، تجهیزات حمل و خردایش و فرآوری و ...، نرم‌افزاری (نرم‌افزارهای تخصصی، قوانین و مقررات

1. Hot Cell

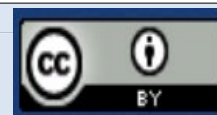


مراجع

1. Kabeyi M.J, Olanrewaju O.A. Sustainable energy transition for renewable and low carbon grid electricity generation and supply. *Frontiers in Energy research*. 2022 Mar 24;9:1032.
2. Østergaard P.A, Duic N, Noorollahi Y, Mikulcic H, Kalogirou S. Sustainable development using renewable energy technology. *Renewable energy*. 2020 Feb 1;146:2430-7.
3. Nuclear Energy Institute. <https://www.nei.org>.
4. What is nuclear. <https://whatisnuclear.com/blog/2020-10-28-nuclear-energy-is-longterm-sustainable.html/>.
5. Hore-Lacy I. In: Nuclear Energy in the 21st Century, 1st edition (Academic Press, Cambridge, Massachusetts). 2007;55-92.
6. Yang M.S. Closing the Nuclear Fuel Cycle. *Gen IV Webinar Series*. 2016.
7. Van den Eynde G, Trtilek R, Fritz L, Evans C, Mathonniere G, Van der Werf J, Lucibello P, Suzuki K, Sano T, Takeda S, Nam H.O. Strategies and Considerations for the Back End of the Fuel Cycle. *Organization for Economic Co-Operation and Development*. 2021.
8. Word Nuclear Association. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-fuel-cycle.aspx>.
9. Banerjee S, Sinha R.K, Kailas S. Thorium utilization for sustainable supply of nuclear energy. *In Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2011 Sep 23;312(6).
10. Bucher R.G. India's baseline plan for nuclear energy self-sufficiency. *Argonne National Lab (ANL), Argonne, IL (United States)*. 2009 Jan 1.
11. LotusArise-Ultimate. <https://lotusarise.com/indias-nuclear-programme-upsc>.
12. A Report of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO), Assessment of Nuclear Energy Systems Based on a Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors. (IAEA, Vienna, 2012).
13. Word Nuclear Association. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-fuel-cycle.aspx>.
14. Word Nuclear Association. <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/fast-neutron-reactor>.
15. Petrov A.Y, Shutikov A.V, Ponomarev-Stepnoy N.N, Bezzubtsev V.S, Bakanov M.V, Troyanov V.M. Prospects of creation of the two-component nuclear energy system. *Nuclear Energy and Technology*. 2019 Sep 25;5(3):265-271.
16. International Atomic Energy Agency. <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/IranIslamicRepublicof/IranIslamicRepublicof.htm>.
17. A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. Uranium 2022 Resources, Production and Demand, (NEA, Paris, 2022).
18. WISE Uranium Project. <https://www.wise-uranium.org>.
19. Organization for Economic Co-operation and Development. Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management. *Organization for Economic Co-operation and Development*. 2006.
20. Brown K.T. Basic information relating to uranium-enrichment calculations and fuel requirements for nuclear power reactors. *Atomic Energy Board*. 1977.
21. Organization for Economic Co-operation and Development. Potential Benefits and Impacts of Advanced Nuclear Fuel Cycles with Actinide Partitioning and Transmutation. *Organization for Economic Co-operation and Development*. 2011.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

قربانی اشرف، مهدی، حاتمی باروق، پوریا. (۱۴۰۴). اهمیت چرخه سوخت بسته در دستیابی به انرژی هسته‌ای پایدار و تجدیدپذیر در ایران. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*، ۱۱(۱)، ۱۷۶-۱۸۷. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1533.2000>. Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1655.html

