مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای، دوره ۴۵، شماره ۳، جلد ۱۰۹، پاییز ۱۴۰۳

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology
Vol. 45 (4), Serial Number 109, 2024

مقایسه‌ی انواع چرخه‌های سوخت مبتنی بر استعداد مواد هسته‌ای کشور و هزینه جهت تولید برق

زهرا شهبازی راد*[1]، محمدجواد صفری[2]

۱. دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱، تهران - ایران
۲. دانشکده‌ی فیزیک و مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵۴۴۱۳، تهران - ایران

*Email: z_shahbazi@sbu.ac.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۳/۲۵ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۷/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۷/۲۵

چکیده

امروزه با توجه به نیاز همه‌ی کشورها به تأمین انرژی پایدار، انرژی هسته‌ای تقش شایانی را در سبد انرژی کشورهای پیشرفته و کشورهای درحال توسعه بازی می‌کند. انتخاب چرخه‌ی سوخت هسته‌ای مناسب در ترسیم نقشه‌ی راه صنعت هسته‌ای کشور برای استفاده‌ی بهینه از انرژی هسته‌ای، از اهمیت زیادی برخوردار است؛ که خود تابعی از چندین مؤلفه است (سطح دانش هسته‌ای، منابع و ذخایر مواد هسته‌ای و عوامل اقتصادی، و ....، که این مؤلفه‌ها عواملی هستند که در تعیین چرخه‌ی مناسب نقش به‌سزایی دارند). در این تحقیق با مقایسه‌ی انواع چرخه‌های سوخت اورانیومی، پلوتونیومی و توریومی و با بررسی استعداد کشور در حوزه‌ی مواد هسته‌ای، چهار سناریوی اصلی پیشنهاد شد و برای هر سناریو براساس میزان مواد هسته‌ای مورد نیاز و هزینه، چرخه‌های سوخت مناسب و محتمل معرفی شد که از آن میان، سناریوی "عدم دسترسی به منابع کافی اورانیوم و توانایی در انجام غنی‌سازی و بازفرآوری" به عنوان محتمل‌ترین سناریو معرفی شد و براین اساس چرخه‌های پیشنهادی انتخاب شد که مناسب‌ترین آن چرخه‌ی سوخت «اورانیومی بسته، با رآکتور سدیمی سریع و سوخت اورانیوم، TRU و FP» با حداقل ۲۳۲۰ و حداکثر ۵۲۹۶ گیگاوات‌الکتریکی- سال تولید انرژی و هزینه‌ی کل تقریبی ۱۱۷ میلیون دلار به ازای هر گیگاوات الکتریکی- سال است.

کلیدواژه‌ها: چرخه‌ی سوخت هسته‌ای، استعداد مواد هسته‌ای، اورانیوم، پلوتونیوم، توریوم، برق هسته‌ای

Comparison of different types of fuel cycles based on country's nuclear material capacity and cost for electricity generation

Z. Shahbazi Rad*[1], M.J. Safari[2]

1. Nuclear Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, P.O.Box: 1983969411, Tehran - Iran
2. Physics and Energy Engineering Faculty, Amir Kabir University, P.O.Box: 158754413, Tehran - Iran

Research Article

Received: 15.6.2023, Revised: 8.10.2023, Accepted: 17.10.2023

Abstract

Nowadays, due to the need of all countries to provide sustainable energy, nuclear energy plays a significant role in the energy portfolio of developed countries and developng countries. For this reason, it is very critical to choose the appropriate nuclear fuel cycles for the optimal use of nuclear energy. In addition, it is important to draw the road map of the country's nuclear industry. ; which itself is a function of several parameters (the level of nuclear knowledge, sources and reserves of nuclear materials economic factors, etc.). These factors play a significant role in determining the appropriate cycle). In this research, four main scenarios have been proposed by comparing uranium, plutonium, and thorium fuel cycles. In addition, four scenarios have been examined by examining nuclear material capacity. Suitable and cautious fuel cycles have been introduced for each required nuclear fuel scenario and consumption amount. Among the proposed scenarios, the scenario of "accessing sufficient uranium resources and opening up the enrichment and reprocessing" was introduced as the most likely scenario and based on the suggested axes, the most suitable closed uranium fuel cycles, with a fast sodium reactor and uranium TRU and FP fuel cycle" were selected" with a minimum of 2320 and a maximum of 5296 GW of energy production and total costs of approximately $117 million per GW of energy.

Keywords: Nuclear fuel cycle, Nuclear material capacitance, Uranium, Plutonium, Thorium, Nuclear electricity

۱. مقدمه

قدمت استفاده از اورانیوم به سده‌ی اول میلادی برمی‌گردد که در آن زمان از این ماده برای رنگ‌آمیزی لعاب‌های سفال استفاده می‌شد؛ این در حالی است که ماده‌ی مذکور تا قرن هجدهم به شکل منفرد و با نام مجزا شناخته نشده بود. در سال ۱۷۸۹ اورانیوم توسط مارتین کلپرت[۱] از پیچبلند[۲] (که در آن زمان کانی سیاه نامیده می‌شد) استخراج شد و به نام سیاره‌ی تازه کشف شده، اورانوس نامیده شد.

اورانیوم یک فلز نسبتاً پرتوزا[۳] است که در پوسته‌ی کره‌ی زمین یافت می‌شود. فراوانی این فلز تقریباً ۵۰۰ برابر بیش‌تر از طلا و برابر با قلع بوده و عنصری است که در سراسر دنیا یافت می‌شود. این فلز در بیش‌تر سنگ‌ها، خاک‌ها، رودها و دریاها وجود دارد؛ به عنوان مثال، اورانیوم در گرانیت که در حدود ۶۰٪ از پوسته‌ی زمین را تشکیل می‌دهد، با غلظت ۴ ppm[۴] موجود بوده و در سنگ‌های معدنی، غلظت اورانیوم به ۴۰۰ ppm هم می‌رسد و بعضی از ذخایر ذغال‌سنگ نیز، حاوی اورانیوم به غلظت ۱۰۰ ppm هستند. بیش‌تر خاصیت پرتوزایی که به اورانیوم منتسب شده است، در واقع ناشی از مواد معدنی دیگری است که در اثر فرایند واپاشی[۵] هسته‌ها تشکیل شده‌اند. در بعضی از نقاط زمین، غلظت اورانیوم بسیار بالا می‌باشد؛ به طوری که استخراج آن برای استفاده به عنوان یک سوخت هسته‌ای از نظر اقتصادی امکان‌پذیر است. مواد معدنی شامل اورانیوم با چنین غلظت‌هایی که استخراج آن‌ها مقرون به صرفه است را سنگ معدن اورانیوم می‌نامند [۱].

عدد اتمی[۶] اورانیوم برابر با ۹۲ بوده و به طور طبیعی دارای شش ایزوتوپ از اورانیوم-۲۳۳ تا اورانیوم-۲۳۸ می‌باشد و بنابراین بین ۱۴۱ تا ۱۴۶ نوترون دارد. رایج‌ترین ایزوتوپ اورانیوم، اورانیوم-۲۳۸ با فراوانی نسبی ۹۹٫۳ درصد و بعد از آن، اورانیوم-۲۳۵ با فراوانی نسبی ۰٫۷٪ است و بقیه ایزوتوپ‌ها نیز در مقادیر بسیار کمی وجود دارند. تمام ایزوتوپ‌های اورانیوم پرتوزا هستند و با گذشت زمان به سایر عناصر سبک‌تر واپاشی می‌شوند؛ با این حال، سرعت واپاشی آن‌ها کند است. نیمه‌عمر ایزوتوپ اورانیوم-۲۳۸، ۴٫۴۷ میلیارد سال و نیمه‌عمر اورانیوم-۲۳۵ نیز ۷۰۴ میلیون سال می‌باشد؛ به این معنی که بیش‌تر اورانیوم-۲۳۵ اصلی زمین قبلاً از بین رفته است.

ویژگی مهم اورانیوم-۲۳۵ شکافا بودن آن است و از طرفی، نوترون‌های ساطع‌شده در هنگام شکافت، می‌توانند باعث شکاف هسته‌های اورانیوم-۲۳۵ دیگر نیز شده و انرژی زیادی آزاد کنند. این واکنش زنجیره‌ای، اساس کار نیروگاه‌های هسته‌ای فعلی جهان است و به همین دلیل، اورانیوم یک منبع معدنی ارزشمند محسوب می‌شود [۲، ۳].

چرخه‌ی سوخت هسته‌ای رشته‌ای از فرایندهای صنعتی می‌باشد که منجر به تولید برق از اورانیوم در رآکتورهای هسته‌ای می‌شود. این چرخه با استخراج اورانیوم از معدن آغاز شده و با دفع پسماند هسته‌ای به اتمام می‌رسد. هم‌چنین با بازفرآوری سوخت مصرف‌شده، این مراحل یک چرخه‌ی کامل را تشکیل می‌دهند. برای استفاده از اورانیوم در رآکتور هسته‌ای، این عنصر مراحل استخراج، آسیاب[۷]، تبدیل[۸]، غنی‌سازی[۹] و ساخت سوخت[۱۰] را طی می‌کند. این فرایندها، مراحل اولیه[۱۱] چرخه‌ی سوخت را تشکیل می‌دهند. پس از آن‌که اورانیوم برای تولید برق مدتی را در رآکتور گذراند، یک سری فرایندهای دیگر شامل نگه‌داری موقت[۱۲]، بازفرآوری و بازیافت[۱۳] پسماند مصرف‌شده (قبل از دفع) بر روی سوخت مصرف‌شده[۱۴] انجام می‌شود و در نهایت نیز ضایعات پرتوزای باقی‌مانده دفع می‌شوند. تمامی این مراحل را مراحل ثانویه‌ی[۱۵] چرخه‌ی سوخت می‌نامند [۴، ۵].

استفاده از توریوم در صنعت هسته‌ای در سال ۱۹۴۴ توسط یوجین ویگنر مطرح شد. در این طرح از توریوم برای تولید اورانیوم-۲۳۳ مورد نیاز در بمب هسته‌ای استفاده می‌شد. در حدود سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ با توسعه‌ی پرشتاب صنعت هسته‌ای و با افزایش قیمت اورانیوم، مطالعات زیادی در زمینه‌ی استفاده از چرخه‌ی سوخت توریومی صورت گرفت. با این وجود، با وقوع حادثه‌ی TMI[16] آمریکا در سال ۱۹۷۹، محبوبیت انرژی هسته‌ای نزد عموم به شدت کم شد و به تبع آن قیمت اورانیوم تا حد زیادی کاهش پیدا کرد؛ بنابراین بازفرآوری اورانیوم نسبت به خرید آن، دیگر به صرفه نبود. دلیل دیگر کاهش بازفرآوری در صنعت هسته‌ای، مسایل منع اشاعه‌ی هسته‌ای بود. در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰ در آمریکا، دولت فورد و کارتر به دلایل منع

1. Martin Klaproth
2. Pitchblende
3. Radioactive
4. Part Per Million
5. Decay Process
6. Atomic Number
7. Milling
8. Conversion
9. Enrichment
10. Fabrication
11. Front-End
12. Temporary Storage
13. Recycling
14. Used Fuel
15. Back-End
16. Three Mile Island

اشاعه‌ی هسته‌ای، بازفرآوری سوخت و هم‌چنین استفاده از اورانیوم با غنای بیش از ۲۰٪ برای رآکتورهای تجاری را ممنوع اعلام کردند. این کار توسعه‌ی چرخه‌ی سوخت توریومی را با مشکل مواجه کرد. با این وجود، به دلیل افزایش مجدد قیمت اورانیوم و منابع محدود آن، تمایل کشورها به استفاده از چرخه‌ی توریوم در حال افزایش است [۶].

در این پژوهش برآنیم که با توجه به اهمیت چرخه‌ی سوخت هسته‌ای در تولید انرژی هسته‌ای، و با توجه به محدود بودن منابع مواد هسته‌ای از جمله اورانیوم در کشور، و با توجه به زیرساخت‌ها و ظرفیت‌های کشور، مناسب‌ترین و اقتصادی‌ترین چرخه/ چرخه‌های سوخت هسته‌ای را تعیین کنیم.

۲. تاریخچه‌ی پیدایش چرخه‌ی سوخت اورانیومی

در ژانویه‌ی ۱۹۳۴، ایرن کوری[1] و فردریک جولیوت[2] اعلام کردند که توانسته‌اند رادیواکتیویته‌ی مصنوعی را در برخی ایزوتوپ‌های پایدار القا کنند. این آزمایش باعث شد تا در سراسر جهان، دانشمندان به این مسأله‌ی جدید و جذاب توجه کنند. همین مسأله باعث شد تا انریکو فرمی که در شهر رم مشغول کارهای نظری بود، به کارهای آزمایشگاهی رو بیاورد. فرمی تصمیم گرفت هسته را با ذره‌ی تازه کشف‌شده‌ی نوترون بمباران کند. فرمی عناصر زیادی را توسط چشمه نوترونی تولیدشده تحت بمباران نوترونی قرار داد و درنهایت نوبت اورانیوم به‌عنوان سنگین‌ترین عنصر جدول تناوبی رسید. نتیجه‌ی این کار، عنصری سنگین‌تر از اورانیوم بود که قبلاً کشف نشده بود. با دانسته‌های امروزی ما، فرضیه فرمی هم درست بود و هم غلط؛ چراکه واکنش نوترون با اورانیوم هم می‌تواند منجر به تولید عنصر سنگین‌تر شود و هم می‌تواند عناصر جدید بسیار سبک‌تری را تولید کند. این در حالی است که فرمی در زمان خود هنوز به این دانسته نرسیده بود و شکافت هسته‌ای نیز کشف نشده بود.

در سال ۱۹۳۸ لیز مایتنر[3] و اوتو فریش[4] دریافتند مسأله‌ای که قبلاً غیرممکن پنداشته می‌شد، واقعاً در حال رخ دادن است و هسته اورانیوم تقسیم به دو قسمت شده است. مایتنر پیشنهاد کرد هسته را همانند یک قطره‌ی مایع در نظر بگیرند. بر این اساس، هسته‌ی اورانیوم ممکن است مانند قطره‌ی آب کشیده شود، سپس شروع به نازک‌شدن از وسط کرده و درنهایت به دو قطره تقسیم شود. پس از تقسیم، دو قطره با دافعه متقابل الکتریکی خود، با انرژی بالا از هم دور می‌شوند و حدود ۲۰۰ مگاالکترون ولت نیز انرژی آزاد می‌کنند. مایتنر و فریش با الگوبرداری از فرایند تقسیم سلولی، نام فرایند کشف‌شده را شکافت[5] گذاشتند [۷].

سپس فرمی و بور پس از شتاب‌دادن به پروتون‌ها در میدان مغناطیسی درون سیکلوترون، اورانیوم را به‌عنوان هسته‌ی هدف تحت بمباران پروتونی قرار دادند و یک اسیلوسکوپ[6] را به‌منظور تشخیص شکافت به سیستم آزمایشگاهی خود متصل کردند. بلافاصله پس از شروع آزمایش، منحنی اسیلوسکوپ در فواصل منظم و تقریباً هر دقیقه شروع به اوج‌گیری می‌کرد؛ که این مسأله نشان‌دهنده‌ی شکافت هسته‌ی اورانیوم بود. آن‌ها دریافتند که در طی این فرایند علاوه بر تولید هسته‌های کوچک، نوترون نیز آزاد می‌شود. این نوترون‌ها می‌توانستند اساس یک واکنش پایدار شکافت را فراهم کنند؛ چراکه اگر نوترون‌های آزاد شده به اورانیوم‌های دیگر برخورد کنند می‌توانند یک واکنش زنجیره‌ای را به وجود آورند. هم‌چنین تولید انرژی در این واکنش فقط با فرمول تبدیل جرم به انرژی انیشتین قابل توجیه بود. آن‌ها سعی کردند تا این موضوع را به آلبرت انیشتین منتقل کنند و پس از بحث با انیشتین، امکان وجود واکنش زنجیره‌ای توسط انیشتین نیز مورد تأیید قرار گرفت. آن‌ها از انیشتین خواستند تا نامه‌ای به رییس‌جمهور آمریکا فرانکلین دلانو روزولت[7] بنویسد و هشداری را مبنی بر امکان دسترسی آلمان نازی به این واکنش و استفاده از آن برای تولید بمب اتمی بدهد؛ زیرا انیشتین در آن زمان مشهورترین فیزیکدان جهان بود و رییس‌جمهور نمی‌توانست حرف او را نادیده بگیرد. انیشتین در دوم آگوست ۱۹۳۹ نامه‌ای به رییس‌جمهور نوشت و درخواست کرد تا بودجه‌ی لازم برای دسترسی به اولین سلاح اتمی در اختیار دانشمندان آمریکایی قرار گیرد تا بتوانند قبل از آلمان نازی به بمب اتم دسترسی پیدا کنند. این نامه، تأثیرات خود را برجای گذاشت و آمریکا وارد مرحله‌ی تولید بمب اتمی شد. این پروژه که با رهبری ارتش آمریکا و به سرپرستی رابرت اوپنهایمر[8] در منطقه‌ی مهندسی منهتن نیویورک انجام می‌شد، به پروژه‌ی منهتن معروف است و درنتیجه‌ی آن، آمریکا برای اولین بار به بمب اتم دست پیدا کرد

1. Irene Curie
2. Frederic Joliot
3. Lise Meitner
4. Otto Frisch
5. Fission
6. Oscilloscope
7. Franklin Delano Roosevelt
8. Robert Oppenheimer

و اولین آزمایش بمب اتم خود را در ۱۶ ژوئیه ۱۹۴۵ در منطقه‌ی ترینیتی در نیومکزیکو انجام داد [۷].

وجود ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵ به‌عنوان ماده‌ی شکافا در ترکیبات اورانیومی، اصلی‌ترین عامل استفاده از اورانیوم به‌عنوان سوخت اصلی اکثر رآکتورهای هسته‌ای است؛ اما با توجه به وجود منابع محدود اورانیوم در پوسته‌ی زمین، تأمین اورانیوم مورد نیاز رآکتورهای هسته‌ای چالشی بزرگ برای انرژی هسته‌ای در سال‌های آتی است. با توجه به پیشینه‌ی استفاده از اورانیوم و رقابت تسلیحاتی موجود بین کشورهای پیش‌روی هسته‌ای در زمان جنگ جهانی و جنگ سرد، کشورهای مذکور عملاً وقت و توانایی‌های مالی لازم برای جایگزینی سوخت‌های دیگر (مانند توریوم) به‌عنوان سوخت رآکتورهای هسته‌ای را نداشتند؛ اما در سال‌های اخیر با توجه به گسترش نگرانی‌های مربوط به ذخایر اورانیومی، کشورهای زیادی درصدد جایگزینی ایزوتوپ‌های با فراوانی زیاد در پوسته‌ی زمین (مانند توریوم-۲۳۲) برآمده‌اند [۷].

برخلاف تصورات موجود بین عموم، نمی‌توان توریوم را به‌عنوان جایگزین اورانیوم استفاده کرد؛ چراکه توریوم-۲۳۲ به‌خودی‌خود شکافا نیست، اما قابلیت تولید ایزوتوپ شکافای اورانیوم-۲۳۳ را دارد. در مرحله‌ی اول، سوخت رآکتورها باید به صورت ترکیبی از توریوم به‌عنوان ماده‌ی بارور و اورانیوم-۲۳۵ یا پلوتونیم-۲۳۹ به‌عنوان ماده‌ی شکافا باشد. در این مرحله بر اثر برخورد نوترون‌های داخل رآکتور با توریوم-۲۳۲، اورانیوم-۲۳۳ که یک ماده‌ی شکافا است، تولید می‌شود. پس از تولید اورانیوم-۲۳۳، مقداری از آن در رآکتور مصرف می‌شود و مقدار قابل‌توجهی در سوخت‌های مصرف‌شده باقی می‌ماند. بعد از خارج‌کردن سوخت‌های مصرف‌شده و بازفرآوری آن‌ها، می‌توان اورانیوم-۲۳۳ را از آن‌ها بازیابی کرد. لازم به ذکر است که استفاده از این ایزوتوپ می‌تواند باعث کاهش چشمگیر استفاده از اورانیوم در بلندمدت شود.

۳. تولید برق در رآکتور

در رآکتور هسته‌ای، ایزوتوپ اورانیوم-۲۳۵ شکافته می‌شود و مقدار قابل‌توجهی گرما را در یک فرایند پیوسته تولید می‌کند. معمولاً این فرایند به حضور کندکننده که آب یا گرافیت است، نیاز دارد. علاوه‌براین، مقداری از ایزوتوپ اورانیوم-۲۳۸ نیز به پلوتونیم تبدیل می‌شود. همانند نیروگاه سوخت فسیلی، در نیروگاه هسته‌ای نیز بخار تولیدی از حرارت‌دهی به آب، باعث چرخاندن توربین و مولد برق شده و برق تولید می‌شود.

در قلب یک رآکتور هسته‌ای، بیش از صد مجتمع سوخت قرار دارد؛ به طوری که برای یک رآکتور با توان MW_e ۱۰۰۰، قلب رآکتور تقریباً شامل ۷۵ تن اورانیوم غنی‌شده است. برای حفظ بازدهی رآکتور، هر سال یا هر ۱۸ ماه یک‌بار، یک سوم از سوخت مصرف‌شده برداشته می‌شود تا با سوخت تازه تعویض گردد. به طور کلی، یک تن از اورانیوم طبیعی تقریباً ۴۴ میلیون کیلووات ساعت برق تولید می‌کند؛ در حالی که برای تولید این مقدار برق باید ۲۰۰۰۰ تن ذغال سنگ یا ۸٫۵ میلیون مترمکعب گاز طبیعی سوزانده شود.

یکی از مسائلی که برای تعیین سوخت رآکتورها حائز اهمیت است، مصرف[1] سوخت می‌باشد. مصرف سوخت برحسب گیگاوات- روز در هر تن اندازه‌گیری می‌شود و پتانسیل آن متناسب با سطح غنی‌سازی است. تا به امروز، عامل محدودکننده‌ی پتانسیل مصرف سوخت، مقاومت فیزیکی مجتمع‌های سوخت بوده است و از این‌رو میزان مصرف سوخت به حدود GWd/t ۴۰ محدود شده و فقط به غنی‌سازی در حدود ۴٪ نیاز دارد. البته با پیشرفت تجهیزات و مجتمع‌های سوخت، اکنون میزان GWd/t ۵۵ نیز امکان‌پذیر است (با غنی‌سازی ۵٪) و حتی مصرف تا GWd/t ۷۰ هم در حال تحقق می‌باشد (این مقدار نیازمند غنی‌سازی ۷٪ است). مزیت افزایش مصرف سوخت در این است که امکان طولانی‌تر شدن چرخه‌های کاری رآکتور فراهم می‌شود (تقریباً ۲۴ ماه) و تعویض مجتمع‌های سوخت مصرف‌شده به یک سوم کاهش پیدا خواهد کرد. هم‌چنین پیش‌بینی می‌شود که هزینه‌ی چرخه‌ی سوخت تا ۲۰٪ کاهش یابد.

از طرفی با گذر زمان، غلظت عناصر سنگین و مواد حاصل از شکافت به اندازه‌ای افزایش می‌یابد که استفاده از سوخت دیگر عملی نبوده و تقریباً بعد از گذشت ۱۸ تا ۳۶ ماه، سوخت مصرف‌شده از رآکتور خارج می‌شود. سوخت مصرف‌شده معمولاً نزدیک ۱٪ ایزوتوپ اورانیوم-۲۳۵، ۰٫۶٪ پلوتونیم شکافا و ۹۵٪ ایزوتوپ اورانیوم-۲۳۸ دارد. سوخت خارج شده گرما و مقادیر زیادی پرتو ساطع می‌کند. بنابراین بعد از خروج از رآکتور، به مدت ماه‌ها و گاهاً چندین سال به یک استخر نزدیک رآکتور منتقل می‌شود تا سطح پرتوزایی آن کاهش یابد.

مطابق سیاست‌های هر کشور، سوخت مصرف‌شده در نهایت باید جهت بازیافت بیش‌تر مواد آن بازفرآوری شود یا این‌که برای دفع دائمی آماده گردد. پس برای سوخت مصرف‌شده دو گزینه مد نظر است:

1. Burn-Up

۱. فرآوری مجدد سوخت جهت بازیابی و بازیافت قسمت قابل مصرف آن؛
۲. دفع طولانی‌مدت و نهایی بدون بازفرآوری.

یک ویژگی کلیدی در مورد انرژی هسته‌ای، امکان بازفرآوری سوخت مصرف‌شده برای بازیابی مواد شکافا و بارور جهت تأمین سوخت تازه‌ی نیروگاه‌های هسته‌ای موجود است. در مرحله‌ی بازفرآوری، از طریق بریدن میله‌های سوخت و انحلال آن‌ها در اسید، اورانیوم و پلوتونیم از محصولات شکافت جدا می‌شوند. با بازفرآوری سوخت مصرف‌شده، از هدررفت یک منبع با ارزش (اورانیوم بازفرآوری‌شده و پلوتونیم) جلوگیری شده و تا ۳۰٪ در مصرف اورانیوم طبیعی صرفه‌جویی می‌شود. از سوی دیگر، بازفرآوری سوخت مصرف‌شده باعث کاهش حجم پسماند سطح بالا در حدود یک پنجم شده و علاوه بر این، سطح پرتوزایی موجود در زباله‌های حاصل از بازفرآوری بسیار کم‌تر است و پس از حدود ۱۰۰ سال میزان پرتوزایی آن بسیار سریع‌تر از خود سوخت مصرف‌شده کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که پلوتونیم حاصل از بازفرآوری سوخت مصرف‌شده، با اورانیوم ترکیب شده و به صورت سوخت اکسید ترکیبی در رآکتور استفاده می‌شود.

۴. انواع چرخه‌های سوخت

در این پژوهش با انجام مطالعات و تحقیقات گسترده، انواع چرخه‌های سوخت اورانیومی، پلوتونیومی و توریومی ممکن را بررسی کردیم. چنان‌چه تمامی چرخه‌های سوخت مذکور را در یک جدول فهرست کنیم، جدول ۱ به‌دست خواهد آمد؛ که ۱۹ چرخه‌ی ابتدایی آن اورانیومی و سایر چرخه‌ها، توریومی هستند.

مزایا و معایب چرخه‌های سوخت اورانیومی بر مبنای نوع رآکتور در جدول ۲ نمایش داده شده است.

تفاوت چرخه‌های سوخت اورانیومی با توریومی در جدول ۳ نمایش داده شده است.

در این تحقیق ضمن بررسی هر یک از ۳۶ چرخه‌ی سوخت جریان مواد هسته‌ای در هر یک از چرخه‌ها را نیز محاسبه کردیم. به‌عنوان مثال در ادامه‌ی چرخه‌ی باز PWR و جریان مواد هسته‌ای در این چرخه را مشاهده می‌کنیم.

۱.۴ چرخه‌ی باز PWR

در این چرخه‌ی یک مرحله‌ای، از یک رآکتور آب تحت فشار (PWR) با سوخت اورانیوم غنای پایین استفاده شده است که به صورت اکسیدی (UOX) در قلب رآکتور قرار می‌گیرد و پس از ۴/۱ سال حضور در قلب رآکتور، سوخت مصرف‌شده به مرحله‌ی دفع پایانی می‌رود.

مشخصات نیروگاه و سوخت هسته‌ای این چرخه در جدول ۴ و مقدار مواد هسته‌ای در جریان در بخش‌های مختلف چرخه نیز در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۱. فهرست چرخه‌های سوخت باز و بسته‌ی مورد بررسی

شماره	توصیف چرخه
۱	چرخه‌ی باز PWR[1]
۲	چرخه‌ی باز HTGR[2]
۳	چرخه‌ی باز HWR[3]
۴	چرخه‌ی باز SFR[4]
۵	چرخه‌ی سوخت بسته‌ی HWR/PWR
۶	چرخه‌ی بسته‌ی PWR/PWR
۷	چرخه‌ی بسته‌ی SFR/PWR با سوخت Pu/U و بازفرآوری یک‌مرحله‌ای
۸	چرخه‌ی بسته‌ی SFR/PWR با سوخت Pu/U و بازفرآوری دومرحله‌ای
۹	چرخه‌ی بسته‌ی SFR/PWR با سوخت TRU[5]/U و بازفرآوری دومرحله‌ای
۱۰	چرخه‌ی بسته‌ی PWR/SFR با بازفرآوری یک‌مرحله‌ای سوخت Pu/U
۱۱	چرخه‌ی بسته‌ی PWR/SFR با بازفرآوری دومرحله‌ای سوخت Pu/U
۱۲	چرخه‌ی بسته‌ی PWR/SFR با بازفرآوری دومرحله‌ای سوخت TRU/U
۱۳	چرخه‌ی بسته‌ی HWR با سوخت اورانیوم و پلوتونیم
۱۴	چرخه‌ی بسته‌ی HWR با سوخت اورانیوم و TRU
۱۵	چرخه‌ی بسته‌ی PWR با سوخت اورانیوم و پلوتونیم
۱۶	چرخه‌ی بسته‌ی PWR با سوخت اورانیوم و TRU
۱۷	چرخه‌ی بسته‌ی SFR با سوخت اورانیوم، TRU و FP[6]
۱۸	چرخه‌ی بسته‌ی SFR با سوخت اورانیوم و پلوتونیم
۱۹	چرخه‌ی بسته‌ی SFR با سوخت اورانیوم و TRU
۲۰	چرخه‌ی توریومی باز HTGR
۲۱	چرخه‌ی توریومی MSR بسته با سوخت Th/U۳
۲۲	چرخه‌ی توریومی MSR بسته با سوخت Th/U۳ و TRU
۲۳	چرخه‌ی توریومی SFR بسته با سوخت RTh/U۳/FP
۲۴	چرخه‌ی توریومی SFR بسته با سوخت U۳/RU/LEU
۲۵	چرخه‌ی توریومی SFR بسته با سوخت Th/U۳ و دیواره پوششی توریمی
۲۶	چرخه‌ی توریومی PWR بسته با دیواره پوششی توریمی
۲۷	چرخه‌ی توریومی PWR/PWR با سوخت LEU و TH/Pu
۲۸	چرخه‌ی توریومی PWR/PWR با سوخت LEU/Th و U۳/RU/Th
۲۹	چرخه‌ی توریومی SFR/PWR
۳۰	چرخه‌ی توریومی PWR/SFR/PWR
۳۱	چرخه توریومی PWR/HTGR
۳۲	چرخه‌ی توریومی PWR/HWR نیمه‌بسته
۳۳	چرخه‌ی توریومی PWR/HWR بستهٔ اورانیوم غنای کم
۳۴	چرخه‌ی توریومی PWR/HWR بستهٔ اورانیوم غنای بالا
۳۵	چرخه‌ی توریومی HWR/HTGR خودپایدار
۳۶	چرخه‌ی توریومی HWR/MSR

1. Pressurizes Water Cooled Reactor
2. High Temperature Gas Cooled Reactor
3. Heavy Water React
4. Sodium-Cooled Fast Reactor
5. Transuranic
6. Fission Products

جدول ۲. مزایا و معایب هر دسته از رآکتورهای قدرت مورد استفاده در چرخه‌ی سوخت اورانیومی

نوع رآکتور	مزایا	معایب
آب سبک (LWR)	تجربه‌ی بهره‌برداری بالا توسعه‌ی فن‌آوری ایمنی بالا	نیاز به غنی‌سازی
آب سنگین (HWR)	عدم نیاز به غنی‌سازی سوخت‌گذاری برخط	هزینه‌ی آب سنگین قلب بزرگ پسماند سوخت بیش‌تر توان پایین فرسایش سوخت کم تولید پلوتونیم
آب سبک با کندکننده‌ی گرافیت (RBMK)	توان بالا فشار پایین مخزن سوخت‌گذاری برخط	مشکلات ایمنی حجم بزرگ
گازی دمای بالا (HTGR)	راندمان بالا امکان استفاده از اورانیوم طبیعی ایمنی بالا فرسایش سوخت بالا	توان پایین
زاینده‌ی سریع (FBR)	کاهش مصرف اورانیوم طبیعی حجم کم فشار کم فرسایش سوخت بالا	آتش‌سوزی سدیم پیچیدگی فنی طراحی دشواری بهره‌برداری، تعمیر و نگه‌داری توان پایین

جدول ۳. مزایا و معایب چرخه‌ی سوخت توریومی در مقایسه با چرخه‌ی سوخت اورانیومی

مرحله‌ی چرخه‌ی سوخت	توضیحات
استخراج و تبدیل	با چرخه‌ی اورانیومی متفاوت و ساده‌تر است.
غنی‌سازی	تفاوتی با چرخه‌ی اورانیومی ندارد.
ساخت سوخت	با چرخه‌ی اورانیومی متفاوت بوده و فرایند آن دشوارتر و پرهزینه‌تر است.
بازفرآوری	با چرخه‌ی اورانیومی متفاوت بوده و فرایند آن دشوارتر و پرهزینه‌تر است.
پسماندای	تفاوت چندانی با چرخه‌ی اورانیومی ندارد و ساده‌تر نیز می‌باشد.

جدول ۴. مشخصات نیروگاه و سوخت هسته‌ای چرخه‌ی باز PWR

	مشخصه		مقدار
نیروگاه هسته‌ای	نوع رآکتور		PWR
	قدرت حرارتی قلب رآکتور، MW_{th}		۳۰۰۰
	بازدهی حرارتی، ٪		۳۳
سوخت هسته‌ای	نوع سوخت		UOX
	متوسط برن‌آپ تخلیه[1]، GWd/t		۵۰
	مواد هسته‌ای اولیه		LEU
	ترکیب سوخت	نسبت اورانیوم-۲۳۵ به کل اورانیوم، ٪	۴٫۲۱
		نسبت TRU به کل فلز سنگین، ٪	۰
	زمان ماند سوخت در رآکتور، EFPY[2]		۴٫۱

1. Discharged Burn-Up
2. Effective Full Power Year

جدول ۵. جریان مواد هسته‌ای در چرخه‌ی باز PWR (تن)

مرحله		۱			مجموع
بخش		سوخت	رآکتور	بازفرآوری	
منابع طبیعی	NU[3]	-۱۸۸۶۲٫۸	-	-	-۱۸۸۶۲٫۸
ناشی از سوخت یا رآکتور	DU[4]	+۱۶۶۶۶٫۹	-	-	+۱۶۶۶۶٫۹
	U	+۲۱۹۱٫۵	-۲۱۹۱٫۵	-	۰
	Pu	-	-	-	-
	[5]MA	-	-	-	-
	DF[6]	-	-	+۲۱۹۱٫۵	+۲۱۹۱٫۵
ناشی از بازفرآوری	RU[7]	-	-	-	-
	Pu	-	-	-	-
	MA	-	-	-	-
	FP[8]	-	-	-	-
اتلاف		+۴٫۴	-	-	+۴٫۴

- جریان جرم در واحد تن متریک برای تولید ۱۰۰ گیگاوات سال انرژی هسته‌ای در نظر گرفته شده و علائم (-) و (+) به ترتیب نشان‌دهنده‌ی خوراک و تولید هر بخش می‌باشد.

۵. محاسبات اقتصادی چرخه‌ی سوخت

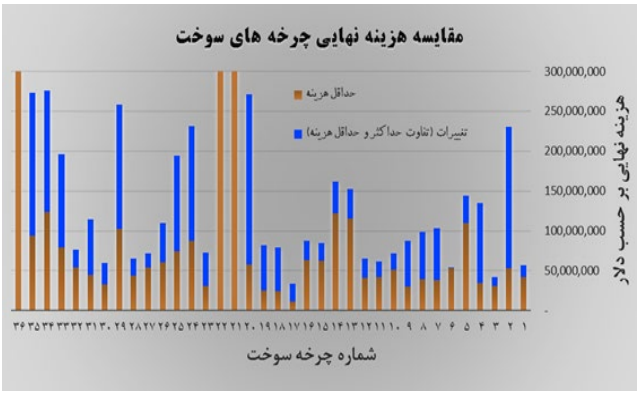
به طور کلی انتخاب اقتصادی‌ترین چرخه‌ی سوخت هسته‌ای، تابعی از هزینه‌ی بخش‌های مختلف چرخه‌ی سوخت و جریان مواد مربوط به آن می‌باشد. قیمت‌ها و هزینه‌های چرخه‌ی سوخت براساس قیمت‌های پیش‌فرض براساس مراجع [۷-۱۰] بوده و ممکن است تغییر در قیمت هر یک از بخش‌های چرخه‌ی سوخت، جایگاه چرخه‌ها نسبت به یک‌دیگر را تغییر دهد. علاوه بر این، این امکان وجود دارد که تغییر در قیمت اورانیوم و یا بازفرآوری سوخت توریومی، منجر به حالتی گردد که در صورت دسترسی به منابع اورانیومی نیز استفاده از سوخت توریومی اقتصادی‌تر باشد.

اگر هزینه‌ی نهایی سیکل تعادلی هر یک از ۳۶ چرخه‌ی فوق محاسبه شده و با یک‌دیگر مقایسه شوند، نتیجه به صورت شکل ۱ خواهد بود. در این شکل، ستون آبی‌رنگ نمایش‌گر

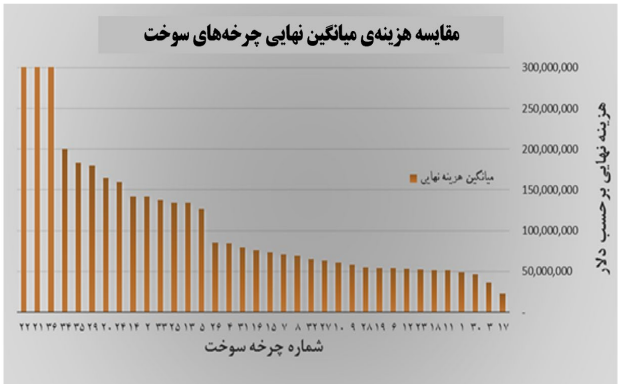
3. Natural Uranium
4. Depleted Uranium
5. Minor Actinides
6. Discharged Fuel
7. Recovered Uranium
8. Fission Products

حداقل هزینه بوده و مجموع ستون‌های آبی و زرد نیز حداکثر هزینه را نشان می‌دهد. هزینه‌ی نهایی هر چرخه برای تولید انرژی ۱ گیگاوات‌الکتریکی- سال محاسبه شده است. علاوه براین برای مقایسه‌ی بهتر، میانگین هزینه‌ی نهایی هر چرخه را محاسبه کرده و چرخه‌ها را بر این اساس مرتب می‌کنیم؛ در نتیجه شکل ۲ به‌دست می‌آید.

از آن‌جایی که می‌توان گفت، در حال حاضر صنعت هسته‌ای ایران بر پایه‌ی چرخه‌ی سوخت اورانیومی آب سبک استوار است، مرجع مقایسه‌ی اقتصادی را چرخه‌ی باز PWR (چرخه‌ی شماره‌ی ۱) در نظر گرفته و صرفاً چرخه‌هایی انتخاب می‌شوند که از این چرخه مقرون‌به‌صرفه‌تر هستند. بنابراین چرخه‌های منتخب در این سناریو، چرخه‌های موجود در جدول ۱ می‌باشند.



شکل ۱. مقایسه‌ی هزینه‌ی نهایی ۳۶ چرخه‌ی سوخت اورانیومی و توریومی مورد بررسی.



شکل ۲. میانگین هزینه‌ی نهایی ۳۶ چرخه‌ی سوخت اورانیومی و توریومی مورد بررسی.

۶. پیشنهاد سناریوهای مختلف

به طور کلی برای انتخاب چرخه‌ی سوخت مناسب برای ایران، می‌توان تعداد زیادی از سناریوهای متفاوت را در نظر گرفت؛ اما براساس نظر تیم تحقیقاتی پروژه، مهم‌ترین سناریوهای امکان‌پذیر، براساس در دسترس بودن یا نبودن اورانیوم و هم‌چنین توانایی انجام یا عدم انجام غنی‌سازی (تولید سوخت با غنای بالا) و بازفرآوری تعریف می‌شوند. در ادامه، هر یک از این سناریوها به صورت جداگانه بررسی شده و از بین سیکل تعادلی ۳۶ چرخه‌ی سوخت اورانیومی و توریومی، مناسب‌ترین چرخه یا چرخه‌ها در هر سناریو، معرفی می‌شوند.

چهار سناریوی انتخابی عبارتند از:

۱. دسترسی به منابع کافی اورانیوم و توانایی انجام غنی‌سازی بالا و بازفراوری
۲. دسترسی به منابع کافی اورانیوم و عدم‌توانایی انجام غنی‌سازی بالا و بازفراوری
۳. عدم دسترسی به منابع کافی اورانیوم و توانایی انجام غنی‌سازی بالا و بازفراوری
٤. عدم دسترسی به منابع کافی اورانیوم و عدم‌توانایی انجام غنی‌سازی بالا و بازفراوری

۱.۶ دسترسی به منابع کافی اورانیوم

فرض می‌کنیم برای تولید انرژی از فن‌آوری هسته‌ای، به منابع کافی اورانیومی (به واسطه‌ی معادن داخلی یا واردات) دسترسی داشته باشیم. در بررسی چرخه‌های مختلف اورانیومی، نکته‌ای که در تعیین چرخه‌ی مناسب حائز اهمیت است، باز یا بسته‌بودن چرخه (توانایی در بازفرآوری) و هم‌چنین توانایی در تولید سوخت با غناهای مختلف است. در زیر، سناریوهای امکان‌پذیر در این حالت‌ها به صورت مجزا ارزیابی شده‌اند.

شایان ذکر است که در صورت افزایش قیمت جهانی اورانیوم، این امکان وجود دارد که حتی در صورت دسترسی به منابع کافی اورانیومی نیز، برخی از چرخه‌های سوخت توریومی نسبت به چرخه‌های سوخت اورانیومی مقرون به صرفه‌تر باشند.

۱.۱.۶ توانایی در انجام غنی‌سازی بالا و بازفرآوری

در این سناریو فرض می‌کنیم علاوه بر دسترسی به منابع کافی اورانیوم، امکان غنی‌سازی بالا و بازفرآوری سوخت نیز فراهم است؛ به عبارت دیگر، هیچ‌گونه محدودیتی در انتخاب چرخه‌ی سوخت وجود نداشته و می‌توان بهترین چرخه‌ی سوخت از منظر اقتصادی را انتخاب نمود (جدول ۶).

در نگاه اول این‌گونه به نظر می‌رسد که چرخه‌ی شماره‌ی ۱۷ با چرخه‌ی شماره‌ی ۱ تفاوت بسیار چشم‌گیری دارد؛ اما برای مقایسه‌ی بهتر این چرخه‌ها، بهتر است هزینه‌ی سرمایه‌گذاری[1] اولیه‌ی آن‌ها هم در نظر گرفته شود. حدود هزینه‌ی سرمایه‌گذاری برای ساخت هریک از رآکتورهای رایج در جدول ۷ آمده است.

1. Capital Cost

جدول ۶. هزینه‌ی نهایی چرخه‌های منتخب در سناریوی اول

شماره‌ی۴ چرخه	نام چرخه	حداقل هزینه (دلار)	حداکثر هزینه (دلار)	میانگین هزینه نهایی (دلار)
۱۷	چرخه‌ی بسته‌ی SFR با سوخت اورانیوم، TRU و FP	۱۱,۲۲۷,۲۰۰	۳۳,۹۱۱,۹۴۰	۲۲,۵۶۹,۵۷۰
۳	چرخه‌ی باز HWR	۳۰,۷۲۱,۸۰۰	۴۲,۳۸۴,۹۰۰	۳۶,۵۵۳,۳۵۰
۳۰	چرخه‌ی توریومی PWR/SFR/PWR	۳۲,۸۰۴,۴۵۰	۵۹,۸۰۴,۵۷۰	۴۶,۳۰۴,۵۱۰
۱	چرخه‌ی باز PWR	۴۱,۶۶۶,۰۰۰	۵۷,۰۴۴,۶۰۰	۴۹,۳۵۵,۳۰۰

جدول ۷. هزینه‌ی سرمایه‌گذاری رآکتورهای قدرت مورد استفاده در چرخه‌ی سوخت اورانیومی [۱۱]

نام رآکتور	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری ($/kW$_e$)
آب سبک (LWR)	۴۳۰۰
آب سنگین (HWR)	۴۲۳۰
گازی دمای بالا (HTGR)	۵۱۷۰
زاینده‌ی سریع (FBR)	۴۷۰۰

با استفاده از نتیجه‌ی بالا، هزینه‌ی کلی چرخه‌های منتخب در این سناریو (مجموع هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و هزینه‌ی نهایی) مطابق جدول ۸ می‌باشد و مشاهده می‌شود که در این حالت، تفاوت چرخه‌های شماره ۱ و ۱۷ کم‌تر شده است.

۲.۱.۶ عدم توانایی در انجام غنی‌سازی بالا و بازفرآوری

در این سناریو فرض می‌شود منابع اورانیومی به مقدار کافی در دسترس باشند؛ اما به هر دلیلی (سیاسی یا فنی) امکان بازفرآوری یا غنی‌سازی بالای سوخت فراهم نیست؛ به عبارت دیگر، از بین چرخه‌های اورانیومی موجود، تنها می‌توان آن دسته از چرخه‌های باز را انتخاب کرد که به سوخت با غنای بالا نیازی ندارند.

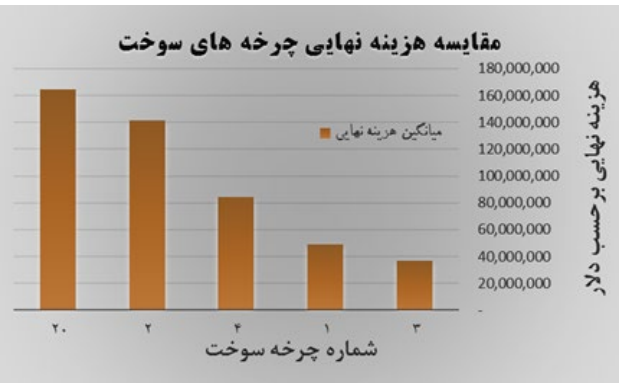
در این حالت تنها باید چرخه‌های باز موجود در جدول ۱ را با یک‌دیگر مقایسه کرد. مطابق شکل ۳، تنها چرخه‌ای که با چرخه‌ی سوخت شماره‌ی ۱ قابل رقابت می‌باشد، چرخه‌ی سوخت شماره‌ی ۳، یا همان چرخه‌ی باز آب سنگین است. بنابراین چرخه‌های منتخب در سناریوی دوم و هزینه‌ی کل آن‌ها (مجموع هزینه‌ی نهایی و هزینه‌ی سرمایه‌گذاری ساخت)، در جدول ۹ آورده شده است.

۲.۶ عدم دسترسی به منابع کافی اورانیوم

اگر برای تولید انرژی از فن‌آوری هسته‌ای به منابع کافی اورانیوم دسترسی نداشته باشیم، با مشکل بزرگی مواجه هستیم؛ زیرا در تمامی چرخه‌های سوخت موجود، به مقداری اورانیوم برای بهره‌برداری از رآکتور نیاز داریم. بر این اساس، باید به دنبال چرخه‌هایی بود که کم‌ترین مصرف اورانیوم را دارند.

یکی از راه‌های مؤثر در کاهش مصرف اورانیوم، استفاده از سوخت‌های توریومی است. افزون بر این، در بررسی چرخه‌های مختلف اورانیومی و اورانیوم- توریومی، نکته‌ای که در تعیین چرخه‌ی مناسب حائز اهمیت است، باز یا بسته بودن چرخه (توانایی در بازفرآوری) و هم‌چنین توانایی در تولید سوخت با غناهای مختلف است. در ادامه، سناریوهای امکان‌پذیر در این حالت‌ها به صورت مجزا ارزیابی شده‌اند.

ذکر این نکته حائز اهمیت است که مصرف اورانیوم طبیعی در برخی از چرخه‌های اورانیومی، حتی از چرخه‌های توریومی نیز کم‌تر می‌باشد. از این‌رو در این حالت، علاوه بر کم‌تر بودن مصرف اورانیوم طبیعی، اقتصادی بودن چرخه‌ی سوخت مورد نظر نیز، تأثیر زیادی در انتخاب چرخه‌ی مناسب خواهد داشت. البته باید توجه نمود که عدم دسترسی به منابع اورانیومی کافی، عامل بسیار مهمی بوده و برای برآورده‌سازی هدف تولید برق از طریق فن‌آوری هسته‌ای، این امکان وجود دارد که ناچار به انتخاب گزینه‌هایی باشیم که از نظر اقتصادی، جزو بهترین چرخه‌های جدول ۱ نیستند.



شکل ۳. مقایسه‌ی میانگین هزینه‌ی نهایی چرخه‌های باز مورد بررسی.

جدول ۸. هزینه‌ی کل چرخه‌های منتخب در سناریوی اول

شماره چرخه	نام چرخه	میانگین هزینه نهایی (دلار)	هزینه سرمایه‌گذاری (دلار)	هزینه کل (دلار)
۱۷	چرخه‌ی بسته‌ی SFR با سوخت اورانیوم، TRU و FP	۲۲,۵۶۹,۵۷۰	۹۴,۰۰۰,۰۰۰	۱۱۶,۵۶۹,۵۷۰
۳	چرخه‌ی باز HWR	۳۶,۵۵۳,۳۵۰	۸۴,۶۰۰,۰۰۰	۱۲۱,۱۵۳,۳۵۰
۳۰	چرخه‌ی توریومی PWR/SFR/PWR	۴۶,۳۰۴,۵۱۰	۹۰,۰۰۸,۰۰۰	۱۳۶,۳۱۲,۵۱۰
۱	چرخه‌ی باز PWR	۴۹,۳۵۵,۳۰۰	۸۶,۰۰۰,۰۰۰	۱۳۵,۳۵۵,۳۰۰

جدول ۹. هزینه‌ی کل چرخه‌های منتخب در سناریوی دوم

شماره چرخه	نام چرخه	میانگین هزینه نهایی (دلار)	هزینه سرمایه‌گذاری (دلار)	هزینه کل (دلار)
۳	چرخه باز HWR	۳۶,۵۵۳,۳۵۰	۸۴,۶۰۰,۰۰۰	۱۲۱,۱۵۳,۳۵۰
۱	چرخه باز PWR	۴۹,۳۵۵,۳۰۰	۸۶,۰۰۰,۰۰۰	۱۳۵,۳۵۵,۳۰۰

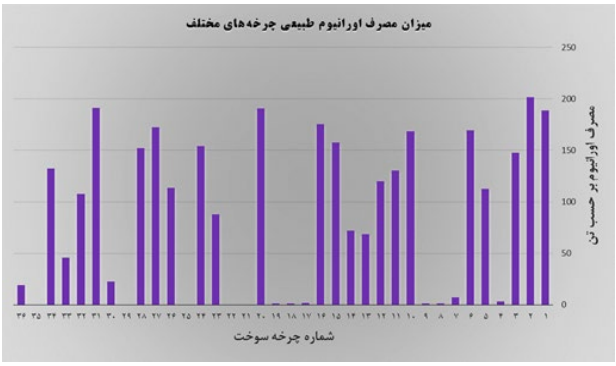
۱.۲.۶ توانایی در انجام غنی‌سازی بالا و بازفرآوری

در این سناریو فرض می‌شود منابع اورانیومی به قدر کافی در دسترس نباشند و دسترسی به منابع توریومی در حد مطلوبی قرار داشته باشد؛ زیرا علاوه بر آن‌که مقدار توریوم مصرفی در چرخه‌های توریومی بسیار اندک است، منابع توریومی نسبت به منابع اورانیومی از وضعیت بهتری برخوردار هستند. افزون براین، در زمینه‌ی بازفرآوری و غنی‌سازی بالای سوخت نیز هیچ‌گونه محدودیتی در نظر گرفته نمی‌شود.

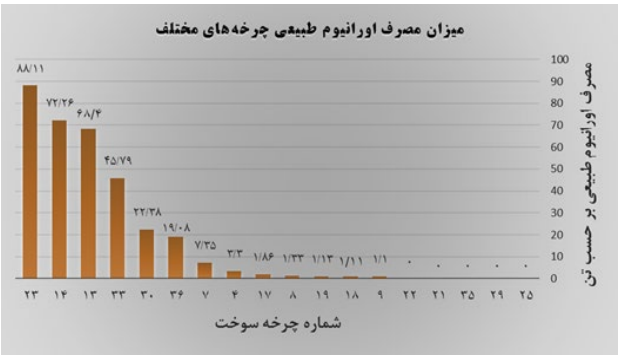
شکل ۴ میزان مصرف اورانیوم طبیعی در ۳۶ چرخه‌ی سوخت جدول ۱ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، یک چرخه‌ی باز PWR بیش از ۱۵۰ تن اورانیوم طبیعی مصرف می‌کند. با توجه به پیش‌فرض اصلی این سناریو (کمبود منابع اورانیومی) و به منظور کاهش تعداد چرخه‌های مورد بررسی، در مرحله‌ی اول تنها چرخه‌هایی در نظر گرفته می‌شود که میزان اورانیوم مصرفی آن‌ها کم‌تر از ۱۰۰ تن باشد (شکل ۵).

اکنون اگر ۱۸ چرخه‌ی سوختی که مصرف اورانیوم طبیعی آن‌ها کم‌تر از ۱۰۰ تن می‌باشد، برحسب هزینه‌ی نهایی مرتب گردد، شکل ۶ حاصل می‌شود. با مقایسه‌ی شکل ۵ و شکل ۶، چرخه‌های منتخب در سناریوی سوم مشخص می‌شوند (جدول ۱۰). ناگفته نماند برخی از چرخه‌های سوخت (مثل شماره‌های ۲۱، ۲۲، ۲۵، ۲۹ و ۳۵) از نظر میزان مصرف اورانیوم طبیعی بسیار کارآمد هستند، اما به دلیل هزینه‌هایی که امروزه دارند، از نظر اقتصادی نامناسب هستند؛ مثل رآکتورهای MSR (چرخه‌های شماره‌ی ۲۱ و ۲۲).

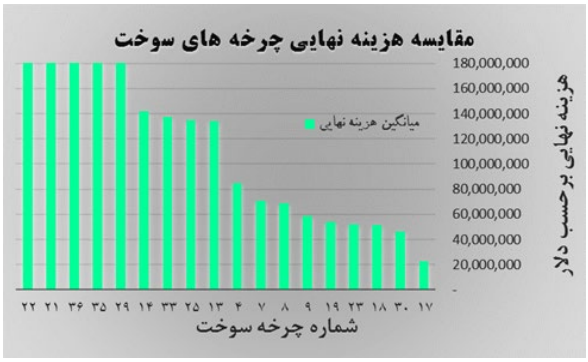
هزینه‌ی کل چرخه‌های منتخب فوق، با اضافه کردن هزینه‌ی سرمایه‌گذاری ساخت به‌دست می‌آید. جدول ۱۱ چرخه‌های منتخب در سناریوی سوم و هزینه‌ی کل آن‌ها را نمایش می‌دهد.



شکل ۴. میزان مصرف اورانیوم طبیعی در چرخه‌های سوخت مورد بررسی.



شکل ۵. میزان مصرف اورانیوم طبیعی، در چرخه‌های سوختی که کم‌تر از ۱۰۰ تن اورانیوم طبیعی مصرف می‌کنند.



شکل ۶. هزینه‌ی نهایی چرخه‌های سوختی که کم‌تر از ۱۰۰ تن اورانیوم طبیعی مصرف می‌کنند.

جدول ۱۰. هزینه‌ی نهایی چرخه‌های منتخب در سناریوی سوم

شماره چرخه	نام چرخه	حداقل هزینه (دلار)	حداکثر هزینه (دلار)	میانگین هزینه نهایی (دلار)
۱۷	چرخه‌ی بسته‌ی SFR با سوخت اورانیوم، TRU و FP	۱۱,۲۲۷,۲۰۰	۳۳,۹۱۱,۹۴۰	۲۲,۵۶۹,۵۷۰
۳۰	چرخه‌ی توریومی PWR/SFR/PWR	۳۲,۸۰۴,۴۵۰	۵۹,۸۰۴,۵۷۰	۴۶,۳۰۴,۵۱۰
۱۸	چرخه‌ی بسته‌ی SFR با سوخت اورانیوم و پلوتونیم	۲۴,۷۶۵,۲۰۰	۷۸,۷۹۴,۶۹۰	۵۱,۷۷۹,۹۴۵
۱۹	چرخه‌ی بسته‌ی SFR با سوخت اورانیوم و TRU	۲۵,۴۹۱,۱۰۰	۸۲,۰۹۰,۲۷۰	۵۳,۷۹۰,۶۸۵

جدول ۱۱. هزینه‌ی کل چرخه‌های منتخب در سناریوی سوم

شماره چرخه	نام چرخه	میانگین هزینه نهایی (دلار)	هزینه سرمایه‌گذاری (دلار)	هزینه کل (دلار)	مصرف اورانیوم (تن)
۱۷	چرخه‌ی بسته‌ی SFR با سوخت اورانیوم، TRU و FP	۲۲,۵۶۹,۵۷۰	۹۴,۰۰۰,۰۰۰	۱۱۶,۵۶۹,۵۷۰	۱/۸۶
۳۰	چرخه‌ی توریومی PWR/SFR/PWR	۴۶,۳۰۴,۵۱۰	۹۰,۰۰۸,۰۰۰	۱۳۶,۳۱۲,۵۱۰	*۲۲/۳۸
۱۸	چرخه‌ی بسته‌ی SFR با سوخت اورانیوم و پلوتونیم	۵۱,۷۷۹,۹۴۵	۹۴,۰۰۰,۰۰۰	۱۴۵,۷۷۹,۹۴۵	۱/۱۱
۱۹	چرخه‌ی بسته‌ی SFR با سوخت اورانیوم و TRU	۵۳,۷۹۰,۶۸۵	۹۴,۰۰۰,۰۰۰	۱۴۷,۷۹۰,۶۸۵	۱/۱۳

*: شایان ذکر است علی‌رغم کم‌تر بودن هزینه‌ی کل چرخه‌ی مذکور نسبت به چرخه‌های شماره‌ی ۱۸ و ۱۹، مصرف اورانیوم در این چرخه بیش‌تر بوده و ممکن است در مقایسه با چرخه‌های ۱۷ و ۱۸ (بر اساس وضعیت منابع اورانیومی موجود)، کارآمدی کم‌تری داشته باشد.

۲.۲.۶ عدم توانایی در انجام غنی‌سازی بالا و بازفرآوری

این سناریو، محدودترین حالتی است که در این بخش بررسی خواهد شد. در این حالت، تنها منابع توریومی در دسترس بوده و امکان دست‌یابی به منابع اورانیومی و فن‌آوری‌های غنی‌سازی و بازفرآوری سوخت فراهم نیست.

در این سناریو تنها باید چرخه‌های باز موجود در جدول ۱ را با یک‌دیگر مقایسه کرد. میزان مصرف اورانیوم طبیعی در این چرخه‌ها، در شکل ۷ نشان داده شده است.

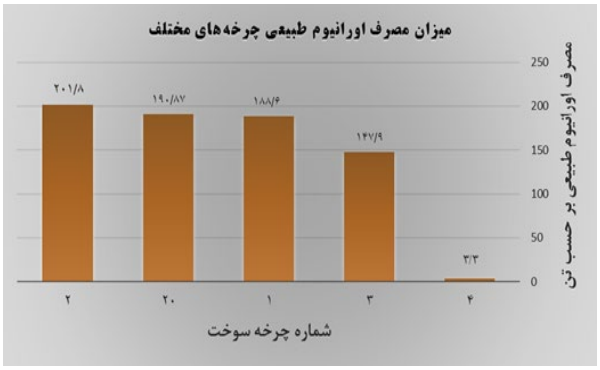
بر این اساس، تنها چرخه‌هایی که می‌توان در این سناریو انتخاب کرد، چرخه‌های شماره‌ی ۴ و ۳ می‌باشند. شکل ۴ هزینه‌ی نهایی این دو چرخه و جدول ۱۲ نیز هزینه‌ی کل آن‌ها را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۱۲، می‌توان گفت در سناریوی چهارم یا باید هزینه‌ی نسبتاً زیادی برای چرخه‌ی سوخت هسته‌ای صرف کرد و مصرف اورانیوم را نسبت به چرخه‌ی باز PWR به میزان مطلوبی کاهش داد (چرخه‌ی شماره‌ی ۴)؛ یا میزان مصرف اورانیوم طبیعی را تنها اندکی کاهش داد و هزینه‌ی زیادی صرف نکرد (چرخه‌ی شماره‌ی ۳).

۷. نتایج و بحث

۱.۷ پیش‌فرض‌های ایران و تعیین سناریوی منتخب

اصلی‌ترین محدودیت ایران در مسیر توسعه‌ی انرژی هسته‌ای، کمبود منابع اورانیوم طبیعی است؛ به طوری که براساس گزارش کتاب قرمز در سال ۲۰۲۰ [۱۲]. میزان منابع شناسایی‌شده‌ی اورانیوم طبیعی ایران بین ۴۳۱۶ تا ۹۸۵۱ تن برآورد شده است[۱]. این بدان معناست که با استفاده از ذخایر اورانیوم موجود در ایران، در خوش‌بینانه‌ترین حالت تنها می‌توان اورانیوم مورد نیاز برای واحد ۱ نیروگاه بوشهر را به مدت ۶۰ سال تأمین نمود[۲]. از طرف دیگر، با توجه به مشکلات سیاسی فراوانی که قدرت‌های جهانی در زمینه‌ی صنعت هسته‌ای ایران به‌وجود آورده‌اند، واردات اورانیوم از سایر کشورها به‌قدری با محدودیت مواجه است که به هیچ عنوان نمی‌توان واردات اورانیوم را به عنوان منبعی قابل اتکا برای تأمین اورانیوم طبیعی قلمداد کرد. بنابراین می‌توان گفت کمبود منابع اورانیوم، یک پیش‌فرض اساسی در راهبرد توسعه‌ی صنعت هسته‌ای ایران است. شایان ذکر است که سوخت مورد نیاز برای رآکتور بوشهر، تاکنون از طریق واردات تأمین شده و بنابراین نمی‌توان واردات سوخت را به کلی ناممکن دانست.



شکل ۷. میزان مصرف اورانیوم طبیعی در چرخه‌های سوخت باز مورد بررسی.

۱. به گزارش «ارزیابی وضعیت ایران در زمینه‌ی تأمین انرژی هسته‌ای» رجوع شود.
۲. بر اساس گزارش «ارزیابی وضعیت ایران در زمینه‌ی تأمین انرژی هسته‌ای»، واحد ۱ نیروگاه بوشهر سالانه به ۱۶۰تن اورانیوم طبیعی نیاز دارد.

جدول ۱۲. هزینه‌ی کل چرخه‌های منتخب در سناریوی چهارم

شماره چرخه	نام چرخه	میانگین هزینه نهایی (دلار)	هزینه سرمایه‌گذاری (دلار)	هزینه کل (دلار)	مصرف اورانیوم (تن)
۳	چرخه‌ی باز HWR	۳۶,۵۵۳,۳۵۰	۸۴,۶۰۰,۰۰۰	۱۲۱,۱۵۳,۳۵۰	۱۴۷٫۹
۴	چرخه‌ی باز SFR	۸۴,۵۶۰,۸۵۰	۹۴,۰۰۰,۰۰۰	۱۷۸,۵۶۰,۸۵۰	۳٫۳

برای تعیین چرخه‌های سوخت مناسب برای ایران، در ابتدا لازم است تا از میان چهار سناریوی ذکر شده، محتمل‌ترین سناریو انتخاب شود. با توجه به آن‌چه در ابتدای این بخش گفته شد، فرض عدم دسترسی به منابع کافی اورانیوم، پیش‌فرضی عقلانی است که باید آن را مورد توجه قرار داد.

در نتیجه‌ی آن‌چه گفته شد، برای پیشنهاد چرخه‌ی سوخت مناسب ایران، فرض می‌شود که حق غنی‌سازی و بازفرآوری سوخت مصرف‌شده برای ایران محفوظ باشد؛ لذا سناریوی محتمل برای ایران، «عدم دسترسی به منابع کافی اورانیوم و توانایی در انجام غنی‌سازی و بازفرآوری» خواهد بود. البته از آن‌جایی که تحلیل‌های انجام‌شده در بالا بر پایه‌ی احتمالات بوده و همواره امکان تغییر در شرایط نیز وجود دارد، علاوه بر سناریوی محتمل، چرخه‌های سوخت منتخب در سه سناریوی دیگر نیز با در نظر گرفتن زیرساخت‌ها و فن‌آوری‌های مورد نیاز، تحت بررسی بیش‌تری قرار می‌گیرند.

مطابق آن‌چه بیان شد، می‌توان چرخه‌های سوخت مناسب در هریک از سناریوهای چهارگانه را به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد:

❖ **سناریوی اول:**

- چرخه‌ی اورانیومی بسته، با رآکتور سریع سدیمی؛
- چرخه‌ی اورانیومی باز، با رآکتور آب سنگین؛
- چرخه‌ی توریومی بسته، با رآکتورهای سریع سدیمی و آب سبک؛
- چرخه‌ی اورانیومی باز، با رآکتور آب سبک؛

❖ **سناریوی دوم:**

- چرخه‌ی اورانیومی باز، با رآکتور آب سنگین؛
- چرخه‌ی اورانیومی باز، با رآکتور آب سبک؛

❖ **سناریوی سوم:**

- چرخه‌ی اورانیومی بسته، با رآکتور سریع سدیمی؛
- چرخه‌ی توریومی بسته، با رآکتورهای سریع سدیمی و آب سبک؛

❖ **سناریوی چهارم:**

- چرخه‌ی اورانیومی باز، با رآکتور سریع سدیمی؛
- چرخه‌ی اورانیومی باز، با رآکتور آب سنگین.

انتخاب هریک از چرخه‌های فوق، مشروط به توانایی در حصول مواد، زیرساخت‌ها و فن‌آوری‌های منحصر به فردی است که در بهره‌برداری از هر چرخه، نقشی اساسی ایفا می‌کنند. در ادامه‌ی این بخش، به بررسی هریک از این ملزومات برای چرخه‌های مدنظر پرداخته می‌شود.

۲.۷ مواد مورد نیاز

به طور کلی در بهره‌برداری از یک چرخه‌ی سوخت هسته‌ای، به طیف وسیعی از مواد مختلف (شامل سوخت هسته‌ای، غلاف، فولاد، بتن، رزین‌ها، اسیدها و ...) نیاز می‌باشد. با این وجود، تنها ماده‌ای که برای توسعه‌ی چرخه‌ی سوخت هسته‌ای جنبه‌ی گلوگاهی داشته و ایجاد یک چرخه‌ی سوخت با امکان دست‌یابی به آن رابطه‌ی مستقیم دارد، سوخت هسته‌ای است. تنها مواد هسته‌ای که در طبیعت وجود دارند و منشأ سایر سوخت‌های هسته‌ای غیرطبیعی می‌باشند، اورانیوم و توریوم هستند.

اگرچه ایران دارای منابع اورانیوم طبیعی است؛ اما متأسفانه مقادیر این منابع محدود بوده و بنابراین باید برای استفاده از آن‌ها تا حد امکان صرفه‌جویی نمود. ناگفته نماند در صورت استفاده‌ی صحیح، همین منابع محدود نیز قابلیت تأمین سوخت هسته‌ای مورد نیاز برای چرخه‌ی سوخت پیشنهادی را خواهد داشت.

برای چرخه‌های توریومی، علاوه بر اورانیوم، تأمین توریوم نیز حائز اهمیت است که در این راستا می‌توان گفت با توجه به مصرف کم توریوم در چرخه‌های توریومی پیشنهادی (حداکثر ۲ تن به ازای هر گیگاوات‌الکتریکی-ساعت[1] انرژی) و هم‌چنین تخمین منابع توریومی موجود در ایران (۳۰۰۰۰ تن[2])، می‌توان گفت تأمین توریوم مورد نیاز برای چرخه‌ی سوخت هسته‌ای ایران با محدودیتی مواجه نخواهد بود.

1. GWe-Year
۲. به گزارش «ارزیابی وضعیت ایران در زمینه‌ی تأمین انرژی هسته‌ای» رجوع شود.

۳.۷ ملزومات بهره‌برداری از رآکتورهای آب سبک

ایجاد و بهره‌برداری از چرخه‌های سوخت هسته‌ای، علاوه بر مواد هسته‌ای، مستلزم زیرساخت‌ها و فن‌آوری‌های مختلفی جهت ساخت اجزای مختلف نیروگاه هسته‌ای، غنی‌سازی، بازفرآوری، ساخت سوخت، بهره‌برداری از نیروگاه و غیره می‌باشد؛ که در این بخش به مهم‌ترین ملزومات و سطح توانایی ایران در هریک از آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۱.۳.۷ ساخت نیروگاه و بهره‌برداری از آن

در حال حاضر تنها نیروگاه هسته‌ای ایران، واحد یک نیروگاه بوشهر است که از سال ۱۳۹۰ به شبکه‌ی سراسری برق متصل شده و دو واحد دیگر آن نیز در بوشهر در دست ساخت می‌باشد. با این وجود، توجه به این مسأله حائز اهمیت است که سازنده‌ی تمامی نیروگاه‌های مذکور کشور روسیه بوده و می‌توان گفت در حال حاضر ایران توانایی ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای را ندارد. با وجود همکاری فنی ایران در پروژه‌ی ساخت واحدهای جدید نیروگاه بوشهر، به نظر می‌رسد تا خودکفایی ایران در زمینه‌ی ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای مسیری طولانی در پیش باشد. البته در زمینه‌ی بهره‌برداری از نیروگاه‌های هسته‌ای آب سبک، از آن‌جایی که در حال حاضر بهره‌برداری از نیروگاه آب سبک بوشهر توسط متخصصان داخلی انجام می‌شود و تجربه‌ی قابل قبولی نیز در این زمینه وجود دارد، به نظر می‌رسد بهره‌برداری از نیروگاه‌های آب سبک توسط متخصصان داخلی امکان‌پذیر باشد.

۲.۳.۷ سایر مراحل چرخه‌ی سوخت

رآکتورهای آب سبک همواره نیازمند غنی‌سازی سوخت اورانیومی تا حد مشخصی می‌باشند (معمولاً حدود ۴ درصد غنی‌سازی)؛ بنابراین برای تأمین سوخت نیروگاه‌های آب سبک، تأسیسات غنی‌سازی نیز مورد نیاز است. در سال‌های اخیر، ایران در زمینه‌ی غنی‌سازی به روش سانتریفیوژ پیشرفت‌های چشم‌گیری داشته و کارخانه‌های غنی‌سازی نطنز و فردو قابلیت غنی‌سازی سوخت مورد نیاز رآکتورهای آب سبک را خواهند داشت. بر این اساس، برای استفاده‌ی تجاری از کارخانه‌های غنی‌سازی نطنز و فردو تنها باید ظرفیت آن‌ها را افزایش داد و در نتیجه، می‌توان گفت زیرساخت‌های فنی ایران برای غنی‌سازی سوخت اورانیومی مناسب است.

به‌علاوه، در زمینه‌ی تولید کیک زرد و فرآوری اورانیوم نیز به ترتیب زیرساخت‌هایی در اردکان و اصفهان ایجاد شده و با توجه به تحقیق و توسعه‌ی انجام گرفته در این زمینه‌ها، تجاری‌سازی فرایندهای مذکور دشوار نخواهد بود.

از دیگر مراحل مهم در چرخه‌ی سوخت آب سبک، می‌توان به مرحله‌ی ساخت سوخت اشاره کرد. تأسیسات ساخت سوخت ایران در شهر اصفهان واقع شده و تاکنون آزمایش‌های مربوط به ساخت سوخت‌های اورانیوم اکسید که در رآکتورهای آب سبک مورد استفاده قرار می‌گیرند، در این مجموعه انجام شده است. هم‌چنین امکان ساخت سوخت‌های اورانیوم اکسید و هم‌چنین غلاف زیرکونیومی در ایران وجود دارد. شایان ذکر است اگرچه برای ایجاد چرخه‌ی سوخت اورانیومی، فرایند ساخت سوخت نیازمند تحقیق و توسعه‌ی بیش‌تر و افزایش ظرفیت می‌باشد، اما زیرساخت‌های مربوطه در داخل کشور موجود و فراهم است.

در زمینه‌ی پسمانداری نیز زیرساخت‌های مربوطه در تأسیسات انارک وجود دارد و اگرچه تاکنون سوخت نیروگاه بوشهر به مرحله‌ی دفع نرسیده، اما امکان پسمانداری و دفع سوخت مصرف‌شده در داخل کشور وجود خواهد داشت.

۴.۷ ملزومات بهره‌برداری از رآکتورهای آب سنگین

تنها رآکتور بزرگ‌مقیاس آب سنگین ایران، رآکتور اراک است که در حال ساخت می‌باشد. اگرچه در فرایند ساخت این رآکتور تحقیقاتی تجربیات ارزشمندی به‌دست آمده، با این وجود می‌توان گفت در حال حاضر توانایی ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای آب سنگین در داخل کشور وجود ندارد.

رآکتورهای آب سنگین نیازی به غنی‌سازی سوخت ندارند؛ اما برای تأمین آب سنگین مورد نیاز آن‌ها، کشورها مستلزم به ایجاد تأسیساتی جهت تولید آب سنگین یا واردات آن هستند. کارخانه‌ی تولید آب سنگین ایران، در سال ۱۳۸۵ در اراک به بهره‌برداری رسید و بر اساس اطلاعات موجود، آب سنگین تولیدی در آن به روسیه و آمریکا نیز صادر شده است؛ بنابراین زیرساخت‌های تولید آب سنگین در داخل کشور کاملاً فراهم است.

زیرساخت‌های مربوط به سایر بخش‌های چرخه‌ی سوخت این نوع رآکتورها نیز، مانند ساخت سوخت و پسمانداری، تا حد زیادی مشابه رآکتورهای آب سبک است.

۵.۷ ملزومات بهره‌برداری از رآکتورهای سریع سدیمی

رآکتورهای سریع با سوخت سدیم مذاب، نوع پیشرفته‌ای از رآکتورها هستند که توسط برخی کشورهای صاحب فن‌آوری در حال توسعه می‌باشند. از آن‌جایی که توسعه‌ی این رآکتورها در سطح جهانی نیز به مرحله‌ی تکامل نرسیده و با چالش‌های بسیاری همراه است و هم‌چنین با توجه به عدم وجود دانش ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران، دست‌یابی به فن‌آوری ساخت و بهره‌برداری از نیروگاه‌های دارای رآکتور سریع سدیمی در کوتاه‌مدت و میان‌مدت برای ایران ممکن نمی‌باشد. از طرف دیگر، اغلب رآکتورهای سریع سدیمی در یک چرخه‌ی بسته، که سوخت مصرف‌شده در آن مورد بازفرآوری قرار می‌گیرد، فعالیت می‌کنند و بنابراین برای استفاده از چرخه‌ی بسته‌ی رآکتورهای سریع سدیمی، تأسیسات بازفرآوری سوخت مصرف‌شده نیز باید ایجاد شوند. لازم به ذکر است، اگرچه در داخل کشور آزمایش‌هایی در زمینه‌ی جداسازی مواد از سوخت مصرف‌شده انجام گرفته، اما هیچ‌گونه زیرساخت صنعتی برای بازفرآوری سوخت مصرف‌شده در ایران وجود ندارد و استفاده از چرخه‌ی بسته‌ی حاوی رآکتورهای سریع سدیمی، برای ایران با چالش جدی روبه‌رو می‌باشد.

۶.۷ میزان توان تولیدی از چرخه‌های سوخت پیشنهادی، با توجه به منابع اورانیوم موجود در ایران

با توجه به آن‌چه گفته شد، میزان منابع شناسایی‌شده‌ی اورانیوم ایران بین ۴۳۱۶ تا ۹۸۵۱ تن تخمین زده می‌شود. از طرفی، با دانستن میزان مصرف اورانیوم به ازای تولید ۱ گیگاوات- سال انرژی در هریک از چرخه‌های پیشنهادی برای سناریوهای مختلف، می‌توان مقدار انرژی تولیدی از هر چرخه را با در نظر گرفتن منابع اورانیوم موجود در ایران، به‌دست آورد[1]. این مقادیر در جدول ۱۳ ارائه شده‌اند. کاملاً مشهود است که چرخه‌های منتخب سناریوی دوم، به دلیل نقض فرض این سناریو (یعنی عدم دسترسی ایران به منابع اورانیومی)، نتایج نامطلوبی را به همراه داشته‌اند.

جدول ۱۳. میزان انرژی تولیدی از هر چرخه، با در نظر گرفتن منابع اورانیوم موجود در ایران

سناریو	شماره‌ی چرخه	نام چرخه	میزان مصرف اورانیوم (تن)	میزان انرژی تولیدی (گیگاوات- سال)	
				حداقل	حداکثر
اول	۱۷	چرخه‌ی اورانیومی بسته، با رآکتور سریع سدیمی و سوخت اورانیوم، TRU و FP*	۱٫۸۶	۲۳۲۰	۵۲۹۶
	۳	چرخه‌ی اورانیومی باز، با رآکتور آب سنگین	۱۴۷٫۹	۲۹	۶۷
	۳۰	چرخه‌ی توریومی بسته، با رآکتورهای سریع سدیمی و آب سبک	۲۲٫۳۸	۱۹۳	۴۴۰
	۱	چرخه‌ی اورانیومی باز، با رآکتور آب سبک	۱۸۸٫۶	۲۳	۵۲
دوم	۳	چرخه‌ی اورانیومی باز، با رآکتور آب سنگین	۱۴۷٫۹	۲۹	۶۷
	۱	چرخه‌ی اورانیومی باز، با رآکتور آب سبک	۱۸۸٫۶	۲۳	۵۲
سوم	۱۷	چرخه‌ی اورانیومی بسته، با رآکتور سریع سدیمی و سوخت اورانیوم، TRU و FP**	۱٫۸۶	۲۳۲۰	۵۲۹۶
	۳۰	چرخه‌ی توریومی بسته، با رآکتورهای سریع سدیمی و آب سبک	۲۲٫۳۸	۱۹۳	۴۴۰
	۱۸	چرخه‌ی اورانیومی بسته، با رآکتور سریع سدیمی و سوخت اورانیوم و پلوتونیم	۱٫۱۱	۳۸۸۸	۸۸۷۴
	۱۹	چرخه‌ی اورانیومی بسته، با رآکتور سریع سدیمی و سوخت اورانیوم و TRU	۱٫۱۳	۳۸۱۹	۸۷۱۷
چهارم	۴	چرخه‌ی اورانیومی باز، با رآکتور سریع سدیمی***	۳٫۳	۱۳۰۷	۲۹۸۵
	۳	چرخه‌ی اورانیومی باز، با رآکتور آب سنگین	۱۴۷٫۹	۲۹	۶۷

*: لازم به ذکر است که به دلیل فرسایش بالای سوخت در این نوع رآکتورها، ساخت سوخت آن‌ها به فن‌آوری‌های پیچیده‌ای نیاز دارد که در حال حاضر بسیار دشوار است.

**: لازم به ذکر است که به دلیل فرسایش بالای سوخت در این نوع رآکتور، ساخت سوخت آن‌ها به فن‌آوری‌های پیچیده‌ای نیاز دارد که در حال حاضر بسیار دشوار است.

***: لازم به ذکر است که به دلیل فرسایش بالای سوخت در این نوع رآکتور، ساخت سوخت آن‌ها به فن‌آوری‌های پیچیده‌ای نیاز دارد که در حال حاضر بسیار دشوار است.

۱. شایان ذکر است واحد ۱ نیروگاه بوشهر، طی یک سال کارکرد خود در توان نامی، تقریباً ۱ گیگاوات‌الکتریکی-سال انرژی تولید می‌کند.

۸. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پس از بررسی سناریوهای مختلف انتخاب چرخه‌ی سوخت هسته‌ای ایران، سناریوی سوم (عدم دسترسی به منابع کافی اورانیوم و توانایی در انجام غنی‌سازی و بازفرآوری) به عنوان محتمل‌ترین سناریو معرفی شد. در ادامه، مواد و زیرساخت‌های مورد نیاز در چرخه‌های مختلف با نگاه به پتانسیل‌های موجود در کشور، به صورت کلی بررسی گردید و در نهایت با توجه به منابع اورانیوم موجود در ایران و میزان مصرف اورانیوم در چرخه‌های مختلف، مقدار انرژی تولیدی در چرخه‌های مورد بررسی (جدول ۹) محاسبه شده است. نتیجه‌ی نهایی و چرخه‌های پیشنهادی مناسب برای ایران به صورت زیر است؛ که نقطه‌ی اشتراک تمامی آن‌ها، استفاده از رآکتورهای سدیمی سریع می‌باشد:

- چرخه‌ی سوخت «اورانیومی بسته، با رآکتور سدیمی سریع و سوخت اورانیوم، TRU و FP» (چرخه‌ی شماره‌ی ۱۷): با حداقل ۲۳۲۰ و حداکثر ۵۲۹۶ گیگاوات‌الکتریکی- سال تولید انرژی و هزینه‌ی کل تقریبی ۱۱۷ میلیون دلار به ازای هر گیگاوات الکتریکی- سال؛
- چرخه‌ی سوخت «اورانیومی بسته، با رآکتور سدیمی سریع و سوخت اورانیوم و پلوتونیم» (چرخه‌ی شماره‌ی ۱۸): با حداقل ۳۸۸۸ و حداکثر ۸۸۷۴ گیگاوات‌الکتریکی- سال تولید انرژی و هزینه‌ی کل تقریبی ۱۴۶ میلیون دلار به ازای هر گیگاوات الکتریکی- سال؛
- چرخه‌ی سوخت «اورانیومی بسته، با رآکتور سدیمی سریع و سوخت اورانیوم و TRU» (چرخه‌ی شماره‌ی ۱۹): با حداقل ۳۸۱۹ و حداکثر ۸۷۱۷ گیگاوات‌الکتریکی- سال تولید انرژی و هزینه‌ی کل تقریبی ۱۴۸ میلیون دلار به ازای هر گیگاوات الکتریکی- سال؛
- چرخه‌ی سوخت «توریومی بسته، با رآکتورهای سریع سدیمی و آب سبک» (چرخه‌ی شماره‌ی ۳۰): با حداقل ۱۹۳ و حداکثر ۴۴۰ گیگاوات‌الکتریکی- سال تولید انرژی و هزینه‌ی کل تقریبی ۱۳۶ میلیون دلار به ازای هر گیگاوات الکتریکی- سال؛

لازم به ذکر است که برای انتخاب دقیق چرخه‌ی سوخت لازم است که اثر عوامل دیگر از جمله مباحث استراتژیک شامل (مباحث حقوقی و معاهداتی، مسائل سیاسی، مباحث امنیتی، اسناد بالادستی)، مباحث اقتصادی، ریسک و عواملی دیگر مورد بررسی قرار بگیرد که در ادامه‌ی این تحقیق توسط نویسندگان مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مراجع

1. McKay D, Miezitis Y. Australia’s uranium resources, geology and development of deposits. Mineral Resource Report. AGSO. Geoscience Australia, Canberra. 2001.
2. Lambert I, Mckay A, Miezitis Y. Australia's uranium resources: trends, global comparisons and new developments. 1996.
3. Lambert I, McKay A, Miezitis Y. Australia’s uranium resources and production in a world context. Bureau of Resources Sciences, Canberra, ANA Conference October. 2001.
4. Nuclear Energy Agency: Organisation for Economic Co-Operation And Development. Uranium 2018, Resources, Production and Demand.
5. Association W.N. International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues. International Atomic Energy Agency (2014).
6. OECD. Introduction of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle. 2015.
7. Crossland I. Nuclear fuel cycle science and engineering. Elsevier. 2012.
8. Kim S, Ko W, Lee Y.H. Economic viability of metallic sodium-cooled fast reactor fuel in Korea. Science and Technology of Nuclear Installations. 2013(1).
9. Ko W.I, Gao F. Economic analysis of different nuclear fuel cycle options. Science and Technology of Nuclear Installations. 2012.
10. Kasten P.R, Homan F, Allen E. Assessment of the thorium fuel cycle in power reactors. Oak Ridge National Lab, TN (USA). 1977.
11. Advanced Fuel Cycle Cost Basis. Prepared for U.S. Department of Energy. Fuel Cycle Options Campaign. 2017.
12. Uranium 2020: Resources, Production and Demand. Nuclear Energy Agency. 2020.

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
شهبازی راد، زهرا، صفری، محمدجواد. (۱۴۰۳)، مقایسه‌ی انواع چرخه‌های سوخت مبتنی بر استعداد مواد هسته‌ای کشور و هزینه جهت تولید برق. مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای، ۱۰۹(۳)، ۱۲۲-۱۳۵. Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1607.html .DOI: https://doi.org/10.24200/nst.2024.1607