دریافت: ۱۲ اسفند ۱۴۰۳ تاریخ پذیرش: ۲۵ تیر ۱۴۰۴ صفحات ۲۶ الی ۵۷

چشم‌انداز مطلوب توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران: بررسی تطبیقی چالش‌ها و فرصت‌ها با نگاهی به تجارب جهانی

محمدحسین احمدی پیشکوهی[۱]، عباس ملکی[۲]، سعید نوری کرم[۳]، افشین غلامعلی پور[۴]

۱. کارشناسی ارشد مهندسی برق، مجتمع برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
۲. استاد سیاستگذاری انرژی، گروه سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
۳. کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۴. کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران. ایران

چکیده: تدوین استراتژی جامع انرژی با تأکید بر کارایی و بهینه‌سازی مصرف، اولویت بسیاری از کشورهاست. انرژی هسته‌ای به دلیل مزایایی چون تولید برق در مقیاس بالا، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تنوع‌بخشی به سبد انرژی، جایگاه ویژه‌ای دارد. این تحقیق به بررسی چالش‌ها و الزامات توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران می‌پردازد. ایران به عنوان کشوری وابسته به سوخت‌های فسیلی، با چالش‌های محیط زیستی، اقتصادی و سیاسی در تأمین پایدار انرژی روبروست.این مقاله با رویکرد تحلیلی-تطبیقی و چارچوب سیاست‌گذاری جان کینگدان، به بررسی سه جریان مسائل، سیاست‌ها و سیاست‌گذاری در زمینه نیروگاه‌های هسته‌ای می‌پردازد. فناوری نیروگاه‌ها و چرخه سوخت هسته‌ای، از شکافت هسته‌ای تا راکتورهای نسل چهارم، معرفی می‌شود. تجربیات کشورهایی چون چین، امارات، ترکیه و هند نشان می‌دهد که بومی‌سازی فناوری، تأمین مالی پایدار، برنامه‌ریزی مناسب و همکاری‌های بین‌المللی، عوامل کلیدی موفقیت هستند. چالش‌های ایران شامل محدودیت منابع اورانیوم، فشارهای بین‌المللی، هزینه‌های بالا و وابستگی به فناوری خارجی است. کمبود نیروی انسانی متخصص و عدم ثبات سیاست‌گذاری داخلی نیز از موانع توسعه هستند. در نهایت، پیشنهادهایی چون بومی‌سازی فناوری، بازفرآوری سوخت مصرف‌شده، تنوع‌بخشی به تأمین مالی، تقویت نیروی انسانی و شفافیت در سیاست‌گذاری ارائه می‌شود تا به توسعه پایدار انرژی هسته‌ای و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی در ایران کمک کند.

کلید واژه‌ها: نیروگاه‌های هسته‌ای، توسعه پایدار، چالش‌های سیاست‌گذاری، بومی‌سازی فناوری، تنوع‌بخشی به سبد انرژی

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

مقدمه

تأمین پایدار انرژی یکی از مهم‌ترین عوامل توسعه اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی در جهان امروز است. با افزایش تقاضای جهانی برای انرژی و کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، بسیاری از کشورها به دنبال یافتن منابع جایگزین پایدار و کم‌کربن هستند. در این میان، انرژی هسته‌ای به‌عنوان یکی از منابع کلیدی تأمین انرژی، به دلیل مزایایی همچون کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تولید پایدار و قابلیت تأمین انرژی در مقیاس بزرگ، جایگاه ویژه‌ای در سیاست‌گذاری‌های انرژی کشورهای مختلف یافته است (Mathew, 2022) .

در دهه‌های اخیر، تغییرات چشمگیری در چشم‌انداز انرژی به دلیل تلاش برای مقابله با گرمایش جهانی رخ داده است. افزایش چشم‌گیر تقاضای جهانی برای انرژی، مصرف بیش از حد سوخت‌های فسیلی را تشدید کرده و منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است. برای کاهش آسیب‌های احتمالی ناشی از این انتشار گسترده، انرژی هسته‌ای به‌عنوان راهکاری بالقوه برای بسیاری از مشکلات انرژی در جامعه مطرح شده است. تحقیقات نشان می‌دهند که نیروگاه‌های هسته‌ای علاوه بر تولید انرژی با انتشار پایین گازهای گلخانه‌ای، از منظر استفاده از منابع طبیعی نیز مزیت‌های چشم‌گیری دارند. بررسی چرخه عمر تولید انرژی هسته‌ای نشان می‌دهد که میزان بهره‌گیری از منابع طبیعی در این فناوری به‌مراتب کمتر از تولید انرژی حرارتی بوده و از این نظر، در سطحی هم‌تراز با منابع تجدیدپذیر قرار می‌گیرد. از این رو، توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای می‌تواند نقشی کلیدی در تحقق اهداف توسعه پایدار و کاهش اثرات محیط زیستی ناشی از تولید انرژی ایفا کند (Nakagawa et al., 2022). بر اساس آخرین گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، انرژی هسته‌ای حدود ۱۰ درصد برق جهان را تأمین می‌کند و در برخی کشورها از جمله فرانسه، این سهم به ۶۴ درصد می‌رسد (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۲۳).

ایران نیز به‌عنوان یکی از کشورهای دارای پتانسیل در حوزه انرژی هسته‌ای، تلاش‌هایی برای توسعه این فناوری انجام داده است. برنامه هسته‌ای ایران از دهه ۱۳۳۰ شمسی آغاز شد و با راه‌اندازی نیروگاه اتمی بوشهر در سال ۱۳۹۰، ایران به جمع کشورهای دارای نیروگاه هسته‌ای پیوست (رمضانی و جعفری، ۱۴۰۱). با این حال، توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران با چالش‌های متعددی مواجه است که از جمله آن‌ها می‌توان به محدودیت منابع اورانیوم داخلی، هزینه‌های بالای ساخت و بهره‌برداری و فشارهای سیاسی و اقتصادی بین‌المللی اشاره کرد (شیخ شعاعی، ۱۴۰۰).

ایران به‌عنوان یکی از کشورهای در حال توسعه، با چالش‌های متعددی در تأمین پایدار انرژی مواجه است. در حال حاضر، بخش عمده‌ای از برق کشور از طریق نیروگاه‌های فسیلی تأمین می‌شود که نه‌تنها موجب افزایش انتشار

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

آلاینده‌های محیط زیستی می‌شود، بلکه با توجه به محدودیت منابع فسیلی و رشد فزاینده تقاضای برق، ضرورت تنوع‌بخشی به منابع انرژی را بیش از پیش نمایان می‌سازد. صنعت برق به‌تنهایی مسئول ۲۷ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای است و سهم آن در افزایش انتشار آلاینده‌های محیط زیستی به‌طور مداوم در حال رشد است. از این‌رو، استفاده از فناوری‌های نوین تولید انرژی مانند انرژی هسته‌ای، به‌عنوان یکی از راهکارهای اصلی برای کاهش انتشار آلاینده‌های محیط زیستی و تغییرات اقلیمی مطرح شده است. مطالعات انجام‌شده در کشورهای مختلف از جمله کره جنوبی، ترکیه، انگلستان و آمریکا نشان داده است که انرژی هسته‌ای می‌تواند نقش مؤثری در کاهش انتشار آلاینده‌های محیط زیستی و بهبود شرایط اقلیمی ایفا کند (ایوبیان و موسی‌رضایی، ۱۳۹۷). با توجه به مزایای اقتصادی و محیط زیستی این فناوری، بسیاری از کشورهای جهان برنامه‌های گسترده‌ای برای توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای تدوین کرده‌اند. به‌عنوان مثال، چین با بیش از ۲۹ نیروگاه هسته‌ای جدید در حال ساخت، به یکی از پیشروترین کشورها در این صنعت تبدیل شده است (انجمن جهانی هسته‌ای، ۲۰۲۵).

این مقاله با هدف بررسی چالش‌ها و الزامات توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران تدوین شده است. در این راستا، ابتدا فناوری نیروگاه‌های هسته‌ای معرفی شده و سپس با مرور تجربیات جهانی، وضعیت صنعت هسته‌ای در کشورهایی مانند امارات متحده عربی، ترکیه، چین و هند تحلیل می‌شود. در ادامه، چالش‌های سیاستی، اقتصادی و عملیاتی توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت، پیشنهادهای سیاستی ارائه می‌شود.

پیشینه پژوهش

در زمینه توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. شیخ شعاعی به بررسی روند توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در کشورهای در حال توسعه پرداخته و بر اهمیت سیاست‌گذاری در حوزه منابع انسانی برای مدیریت پایدار نیروگاه‌های هسته‌ای تأکید کرده است. شیخ شعاعی بیان می‌کند که کشورهایی که به‌تازگی وارد عرصه صنعت هسته‌ای شده‌اند، نیازمند برنامه‌های جامع توانمندسازی ملی هستند که آموزش تخصصی، مدیریت دانش و شبکه‌سازی در سطوح ملی و بین‌المللی را در بر می‌گیرد.ن. همچنین، به اهمیت منابع انسانی ماهر در ساخت، بهره‌برداری و نگهداری نیروگاه‌های هسته‌ای اشاره شده است. این پژوهش نتیجه می‌گیرد که توسعه پایدار انرژی هسته‌ای بدون برنامه‌ریزی دقیق برای منابع انسانی و سیاست‌گذاری مناسب امکان‌پذیر نیست (شیخ شعاعی، ۱۴۰۰).

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

رمضانی و جعفری در پژوهشی وضعیت فعلی و چشم‌انداز توسعه انرژی هسته‌ای در ایران و جهان را تحلیل کرده‌اند. در این پژوهش، تاریخچه صنعت هسته‌ای ایران، از آغاز همکاری‌های بین‌المللی در دهه ۱۳۳۰ تا راه‌اندازی نیروگاه بوشهر در سال ۱۳۹۰، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، سیاست‌های کلان کشور در حوزه انرژی هسته‌ای، از جمله تأکید بر تولید ۲۰ هزار مگاوات برق هسته‌ای در اسناد بالادستی، تحلیل شده است. همچنین این پژوهش چالش‌های پیش روی ایران، از جمله تحریم‌ها، محدودیت‌های مالی و ضرورت بومی‌سازی فناوری را مطرح کرده و برنامه‌های توسعه‌ای مرتبط با احداث واحدهای دوم و سوم نیروگاه بوشهر را مورد ارزیابی قرار داده است (رمضانی و جعفری، ۱۴۰۱).

ایوبیان و موسی‌رضایی در یک پژوهش به بررسی نقش انرژی هسته‌ای در کاهش انتشار آلاینده‌های محیط زیستی و تغییرات اقلیمی پرداخته‌اند. ایوبیان و موسی‌رضایی با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی پویا و تحلیل سناریوهای مختلف، تأثیر انرژی هسته‌ای بر کاهش هزینه‌های محیط زیستی را در مقایسه با نیروگاه‌های فسیلی، تجدیدپذیر، گازی و بخار تحلیل کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که انرژی هسته‌ای می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش انتشار آلاینده‌های محیط زیستی و مقابله با تغییرات اقلیمی در ایران مورد استفاده قرار گیرد. این پژوهش همچنین به چالش‌هایی نظیر تولید پسماندهای پرتوزا و مقاومت‌های عمومی در برابر توسعه انرژی هسته‌ای اشاره کرده است (ایوبیان و موسی‌رضایی، ۲۰۱۸).

در یک پژوهش کاتب و همکاران با استفاده از مدل MESSAGE[1] به بررسی ترکیب بهینه نیروگاهی در ایران تا افق ۲۰۵۰ پرداخته‌اند. سه سناریوی مرجع، پایداری انرژی و افزایش قیمت سوخت در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که در سناریوی پایداری انرژی، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، هسته‌ای و تجدیدپذیر به ترتیب اولویت دارند. همچنین، نیروگاه‌های هسته‌ای در سناریوی مرجع و پایداری انرژی در جایگاه دوم و در سناریوی افزایش قیمت سوخت در جایگاه سوم قرار دارند. این تحقیق تأکید دارد که توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای برای تأمین پایدار انرژی در ایران ضروری است (کاتب و همکاران، ۱۴۰۳).

در پژوهش جلالی و غیاثوند، به بررسی راهبردهای پدافند غیرعامل در توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران پرداخته شده است. نویسندگان به چالش‌های امنیتی، محیط زیستی و اقتصادی توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای اشاره کرده و راهکارهایی برای کاهش آسیب‌پذیری این نیروگاه‌ها ارائه داده‌اند. از جمله این راهکارها می‌توان به بهبود زیرساخت‌های امنیتی، افزایش توان داخلی در طراحی و ساخت تجهیزات و کاهش وابستگی به فناوری‌های

[1] Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

خارجی اشاره کرد. این پژوهش تأکید دارد که پدافند غیرعامل می‌تواند نقش مهمی در افزایش امنیت و پایداری نیروگاه‌های هسته‌ای ایفا کند (جلالی و غیاثوند، ۱۳۹۶).

احمدی در پژوهش خود به بررسی علل افزایش تمایل کشورهای صنعتی به سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های هسته‌ای را مورد بررسی قرار داده است. پژوهش احمدی بیان می‌کند که جنگ روسیه و اوکراین و وابستگی کشورهای اروپایی به گاز روسیه، در کنار عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی، از دلایل اصلی این رویکرد هستند. همچنین، مزایای انرژی هسته‌ای در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأمین پایدار انرژی، این فناوری را به گزینه‌ای جذاب برای کشورهای صنعتی تبدیل کرده است. از سوی دیگر، هزینه بالای ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای و خطرات ناشی از نشت رادیواکتیو، همچنان به‌عنوان چالش‌های اصلی توسعه این فناوری مطرح هستند. در ایران نیز، ناترازی در تولید و مصرف برق و وابستگی شدید به گاز طبیعی، ضرورت تنوع‌بخشی به سبد انرژی را بیش از پیش آشکار کرده است (احمدی، ۱۴۰۳).

در یک پژوهش، امامی و اکبری با استفاده از داده‌های تلفیقی به بررسی تأثیر رشد مصرف انرژی هسته‌ای بر رشد اقتصادی در دو گروه کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که در کشورهای توسعه‌یافته، رشد مصرف انرژی هسته‌ای تأثیر مثبت و معناداری بر رشد اقتصادی دارد، اما در کشورهای در حال توسعه، این تأثیر معنادار نیست. امامی و اکبری به این نتیجه رسیدند که کشورهای در حال توسعه به دلیل محدودیت منابع مالی و هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه، توانایی بهره‌برداری مؤثر از انرژی هسته‌ای را ندارند. همچنین، این پژوهش نشان داد که در کشورهای توسعه‌یافته، انرژی هسته‌ای به‌عنوان یک منبع پایدار و کم‌هزینه، نقش مهمی در تأمین انرژی و رشد اقتصادی ایفا می‌کند (امامی و اکبری، ۱۳۹۲).

شجاعی و همکاران در یک پژوهش اثرات محیط زیستی و اقتصادی نیروگاه‌های فسیلی و هسته‌ای را مقایسه کردند. شجاعی و همکاران نشان دادند که نیروگاه‌های هسته‌ای به دلیل انتشار صفر گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های پایین تولید برق، در مقایسه با نیروگاه‌های فسیلی، گزینه‌ای پایدارتر و دوستدار محیط‌زیست هستند. با این حال، چالش‌هایی مانند مدیریت پسماندهای هسته‌ای و تأمین ایمنی کامل نیروگاه‌ها، از معایب این فناوری محسوب می‌شوند. همچنین، این پژوهش نشان داد که در صورت در نظر گرفتن هزینه‌ها و عوامل خارجی (مانند انتشار آلاینده‌های محیط زیستی)، برق تولیدی از نیروگاه‌های هسته‌ای به‌عنوان یک گزینه رقابتی و مقرون به‌صرفه مطرح می‌شود (شجاعی و همکاران، ۱۳۹۸).

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

پژوهش مشکات مدل‌های قراردادی مناسب برای احداث و به‌روزرسانی نیروگاه‌های هسته‌ای را مورد بررسی قرار داده است. مشکات دو مدل اصلی یعنی مدل طراحی، تأمین و ساخت[۲] و مدل دارایی پایه تحت کنترل[۳] را بررسی کرده است. این پژوهش نشان داد که مدل طراحی، تأمین و ساخت به دلیل انتقال دانش و فناوری و کاهش زمان پروژه، در کشورهایی مانند ازبکستان مورد استفاده قرار گرفته است. در مقابل، مدل دارایی پایه تحت کنترل که بیش‌تر در انگلیس مطرح است، به‌عنوان یک مدل نوآورانه برای تأمین مالی و کاهش ریسک‌های پروژه معرفی شده است. این مدل می‌تواند با جلب سرمایه‌گذاری بخش خصوصی و تقسیم هزینه‌ها میان دولت و مصرف‌کنندگان، به توسعه پایدار نیروگاه‌های هسته‌ای کمک کند (مشکات، ۱۴۰۲).

در یک پژوهش ترابی و غفرانی به تحلیل فنی و اقتصادی نیروگاه‌های هسته‌ای پرداختند. ترابی و غفرانی از مدل‌های اقتصادی برای ارزیابی هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری نیروگاه‌های هسته‌ای استفاده کردند. نتایج نشان داد که هزینه‌های اولیه ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای بسیار بالا است، اما در بلندمدت به دلیل هزینه‌های پایین بهره‌برداری و تولید، این نیروگاه‌ها از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه هستند. همچنین، این پژوهش به مزایای محیط زیستی نیروگاه‌های هسته‌ای، از جمله کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، اشاره کرده است (ترابی و غفرانی، ۱۳۸۹).

روش پژوهش

روش پژوهش در این مقاله ترکیبی از روش توصیفی-تحلیلی و استفاده از چارچوب پنجره سیاست‌گذاری[۴] جان کینگدان[۵] است. چارچوب کینگدان برای تحلیل فرایند سیاست‌گذاری و شناسایی فرصت‌های مناسب برای اجرای سیاست‌ها به کار می‌رود (Kingdon, 2011). در این پژوهش از این چارچوب برای بررسی چالش‌ها و الزامات توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران استفاده شده است. چارچوب کینگدان شامل سه جریان اصلی است که باید در یک نقطه زمانی خاص همگرا شوند تا پنجره سیاست‌گذاری باز شود:

- جریان مسائل[۶]: در این پژوهش جریان مسائل شامل چالش‌های موجود در توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران است. این چالش‌ها از طریق تحلیل داده‌های کمی و کیفی، بررسی اسناد و مدارک و مصاحبه با کارشناسان شناسایی شده‌اند. به‌عنوان مثال چالش‌هایی مانند محدودیت منابع اورانیوم، هزینه‌های بالای

[2] Engineering, Procurement, and Construction (EPC)
[3] Regulatory Asset Base (RAB)
[4] Policy Window
[5] John W. Kingdon
[6] Problem Stream

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

ساخت نیروگاه‌ها، وابستگی به فناوری خارجی و فشارهای سیاسی و اقتصادی بین‌المللی در این بخش مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

- جریان سیاست‌ها[7]: این جریان شامل مجموعه‌ای از راهکارها، پیشنهادها و سیاست‌های جایگزین است که می‌توانند برای غلبه بر چالش‌های شناسایی‌شده در جریان مسائل ارائه شوند. در این پژوهش، با مطالعه تطبیقی تجربیات کشورهای مختلف (چین، امارات متحده عربی، هند و ترکیه) با توجه به رویکرد توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای و تحلیل سیاست‌های کلان انرژی در ایران، راهکارهایی نظیر بومی‌سازی فناوری، بازفرآوری سوخت مصرف‌شده و تنوع‌بخشی به روش‌های تأمین مالی پروژه‌ها پیشنهاد شده است.
- جریان سیاست‌گذاری[8]: این جریان شامل عوامل سیاسی و نهادی است که بر تصمیم‌گیری‌ها و اجرای سیاست‌ها تأثیر می‌گذارند. در این پژوهش، عواملی مانند ثبات سیاست‌گذاری در ایران، حمایت‌های مالی و سیاسی از توسعه انرژی هسته‌ای و نقش دستگاه‌های مختلف دولتی و غیردولتی در این حوزه تحلیل شده‌اند.

بر اساس چارچوب کینگدان، زمانی‌که این سه جریان هم‌زمان به یکدیگر برسند، پنجره سیاست‌گذاری باز می‌شود و فرصت مناسبی برای پیشبرد سیاست‌ها فراهم می‌گردد. در این پژوهش، شرایط لازم برای همگرایی این سه جریان در ایران بررسی شده و پیشنهادهایی برای باز کردن پنجره سیاست‌گذاری در راستای توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای ارائه شده است.

معرفی تاریخچه و فناوری نیروگاه‌های هسته‌ای

توسعه جهانی برق هسته‌ای در پنج مرحله شکل گرفته است: مرحله کشف (۱۹۰۰ تا ۱۹۵۰) که طی آن مبانی اولیه فیزیک هسته‌ای شناخته شد، مرحله آزمایش و مدل‌سازی (۱۹۵۱ تا ۱۹۶۸) که نخستین راکتورهای آزمایشی ساخته شدند، مرحله رشد و گسترش سریع (۱۹۶۹ تا ۱۹۷۹) که نیروگاه‌های هسته‌ای به‌طور گسترده توسعه یافتند، مرحله رکود و ایستایی (۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰) که روند توسعه به دلیل چالش‌های فنی و نگرانی‌های ایمنی کند شد، و در نهایت مرحله احیا و توسعه مجدد (از آغاز قرن ۲۱ تاکنون) که سرمایه‌گذاری در این حوزه افزایش یافته و فناوری‌های پیشرفته‌تری معرفی شده‌اند. در طول این مراحل، فناوری انرژی هسته‌ای از نسل اول تا نسل چهارم توسعه یافته است.

[7] Policy Stream
[8] Politics Stream

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

در سال ۱۹۳۸، کشف شکافت هسته‌ای موجب ظهور انرژی هسته‌ای شد. در سال ۱۹۵۴، اولین نیروگاه هسته‌ای جهان با نام گدانسک اوبراین[9] در شوروی ساخته شد که سرآغازی برای تولید برق هسته‌ای به شمار می‌رود. متعاقباً، میزبانی از نسل اول نیروگاه‌های هسته‌ای به تدریج به عنوان مدل‌های آزمایشی ساخته شد. از اواخر دهه ۱۹۶۰ تا اوایل دهه ۱۹۷۰، نسل دوم نیروگاه هسته‌ای تجاری به‌طور گسترده در کشورهای صنعتی ساخته‌شد و توسعه انرژی هسته‌ای جهان را به اوج رساند (Rachkov, 2014). نسل سوم فناوری هسته‌ای با امنیت بالاتر پس از حادثه واحد دوم نیروگاه تری مایل آیلند[10] (در سال ۱۹۷۹) و حادثه نیروگاه چرنوبیل[11] (در سال ۱۹۸۶) به وجود آمد. در آغاز قرن بیست‌ویکم و در سال ۲۰۰۳، افزایش قیمت نفت، گاز و زغال‌سنگ، سرعت توسعه صنعت هسته‌ای را دوباره افزایش داد. حادثه فوکوشیما در ژاپن (۲۰۱۱) مانعی برای تداوم رشد صنعت هسته‌ای جهان ایجاد نکرد. پس از حادثه فوکوشیما، فناوری نسل چهارم در دستور کار تحقیقاتی قرار گرفته است و تمرکز توسعه صنعت انرژی هسته‌ای به منطقه آسیا و اقیانوسیه تغییر کرده است. راکتورهای نسل اول در دهه ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ توسعه یافتند و آخرین راکتور نسل اول (ویلفا۱[12] در بریتانیا) در پایان سال ۲۰۱۵ تعطیل شد. در این نسل از راکتورها بیش‌تر از اورانیوم طبیعی به‌عنوان سوخت و از گرافیت به‌عنوان تعدیل‌کننده استفاده می‌شد. راکتورهای نسل دوم بیش‌تر ناوگان هسته‌ای کنونی ایالات متحده و سایر کشورها را تشکیل می‌دهند. در این نسل از راکتورها از سوخت اورانیوم غنی‌شده استفاده می‌شود و بیش‌تر توسط آب خنک و تعدیل می‌شوند. وضعیت فعلی راکتورهای فعال در جهان در جدول (۱) مشخص شده است. چنان‌که آشکار است، بخش عمده ظرفیت فعلی هسته‌ای جهان به نیروگاه‌های دارای راکتورهای PWR[13] و BWR[14] اختصاص دارد که در دسته راکتورهای آب سبک قرار گرفته و متعلق به نسل دوم و سوم هستند.

نخستین راکتورهای پیشرفته نسل سوم در ژاپن، چین، روسیه و امارات متحده عربی وارد مرحله بهره‌برداری شده‌اند، در حالی‌که سایر راکتورهای این نسل در حال ساخت یا آماده سفارش هستند. راکتورهای نسل سوم به‌عنوان نسخه‌ای پیشرفته از نسل دوم طراحی شده‌اند، هرچند مرز مشخصی میان این دو نسل وجود ندارد. در مقابل، راکتورهای نسل چهارم هنوز در مرحله طراحی مفهومی قرار دارند. از ویژگی‌های برجسته این نسل می‌توان به

[9] Gdansk O'Brien
[10] Three Mile Island Nuclear Generating Station
[11] Chernobyl Nuclear Power Plant (ChNPP)
[12] wylfa1
[13] Pressurized Water Reactor
[14] Boiling Water Reactor

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

استفاده از چرخه سوخت بسته و توانایی سوزاندن اکتینیدهای با عمر طولانی که در حال حاضر بخشی از سوخت مصرف‌شده به شمار می‌روند؛ اشاره کرد. در این رویکرد، محصولات شکافت، تنها پسماندهای سطح بالا محسوب می‌شوند (گزارش انجمن جهانی هسته‌ای، ۲۰۲۵).

جدول (۱): وضعیت راکتورهای هسته‌ای در حال کار در جهان[15]

نوع راکتور	کشورهای استفاده کننده عمده	تعداد	مجموع ظرفیت الکتریکی (گیگاوات)	سوخت	خنک کننده	تعدیل کننده
PWR	آمریکا، فرانسه، ژاپن، روسیه، چین، کره‌جنوبی	۳۱۳	۳۰۰/۹	اکسید اورانیوم غنی‌شده	آب	آب
BWR	آمریکا، ژاپن، سوئد	۶۰	۶۱	اکسید اورانیوم غنی‌شده	آب	آب
PHWR[16]	کانادا، هند	۴۶	۲۴	اکسید اورانیوم طبیعی	آب سنگین	آب سنگین
LWGR[17]	روسیه	۱۰	۶/۵	اکسید اورانیوم غنی‌شده	آب	گرافیت
AGCR[18]	بریتانیا	۸	۴/۷	اورانیوم طبیعی (فلز) و اکسید اورانیوم غنی‌شده	کربن‌دی‌اکسید	گرافیت
FNR[19]	روسیه	۲	۱/۴	اکسید پلوتونیوم و اکسید اورانیوم	سدیم مایع	–
HTGCR[20]	چین	۱	۰/۲	اکسید اورانیوم غنی‌شده	هلیم	گرافیت
مجموع	–	۴۴۰	۳۹۸/۷	–	–	–

[15] https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors

[16] Pressurized Heavy Water Reactor

[17] Light Water Graphite-moderated Reactor

[18] Advanced Gas-Cooled Reactor

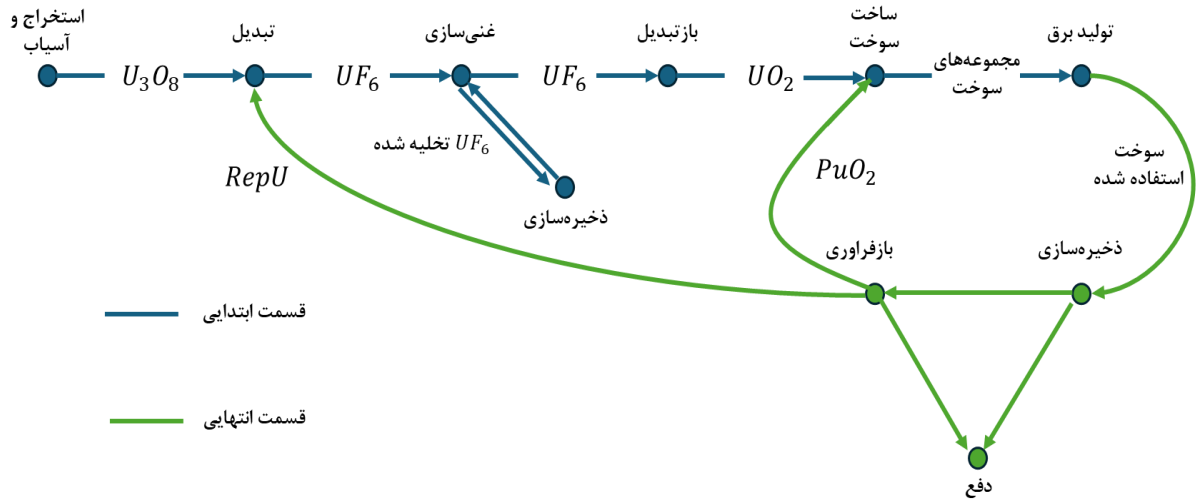
[19] Fast Neutron Reactor

[20] High Temperature Gas-Cooled Reactor

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

معرفی چرخه سوخت هسته‌ای

کلیه فرایندهای مرتبط با تولید برق از واکنش‌های هسته‌ای در مجموع تحت عنوان چرخه سوخت هسته‌ای شناخته می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، چرخه سوخت هسته‌ای با استخراج اورانیوم شروع شده و با دفع زباله‌های هسته‌ای پایان می‌یابد. اورانیوم برای استفاده در یک راکتور هسته‌ای، مراحل استخراج و آسیاب، تبدیل، غنی‌سازی[۲۱] و ساخت سوخت را طی می‌کند. این مراحل بخش ابتدایی چرخه سوخت هسته‌ای را تشکیل می‌دهند. پس از آن‌که اورانیوم حدود سه سال درراکتور برای تولید برق مورد استفاده قرار گرفت، سوخت مصرف‌شده وارد مراحل بعدی، از جمله ذخیره‌سازی موقت، پردازش مجدد و بازیافت، می‌شود و در نهایت، پسماندهای تولیدی دفع می‌گردند. این فرایندها به‌طور کلی به‌عنوان بخش انتهایی چرخه سوخت هسته‌ای شناخته می‌شوند.



شکل (۱): چرخه سوخت هسته‌ای[۲۲]

برای راکتور آب سبک با توان خروجی ۱۰۰۰ مگاوات، هسته شامل حدود ۷۵ تن اورانیوم با غنای پایین است. در هسته راکتور، ایزوتوپ U-235 شکافته می‌شود و در یک فرایند پیوسته به نام واکنش زنجیره‌ای، گرمای زیادی تولید می‌کند. این فرایند به وجود یک تعدیل‌کننده مانند آب یا گرافیت بستگی دارد و کاملاً کنترل می‌شود.

[۲۱] افزایش نسبت اورانیوم قابل شکافت در واکنش هسته‌ای که اورانیوم با عدد جرمی فرد است

[22] https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview.aspx

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

بخشی از U-238 در هسته راکتور به پلوتونیوم تبدیل شده و حدود نیمی از آن دچار شکافت می‌شود. این فرایند تقریباً ۳۰ درصد از انرژی خروجی راکتور را تأمین می‌کند، که در راکتورهای CANDU[۲۳] این مقدار به بیش از ۵۰ درصد می‌رسد. مشابه نیروگاه‌های سوخت فسیلی، گرمای تولیدشده برای تولید بخار به کار می‌رود که سپس توربین و ژنراتور برق را به حرکت درمی‌آورد. از طریق این فرایند، یک واحد ۱۰۰۰ مگاواتی بیش از ۷ میلیارد کیلووات ساعت (۷ تراوات ساعت) برق در یک سال فراهم می‌کند. به‌منظور حفظ عملکرد بهینه راکتور، سالانه یا در دوره‌های ۱۸ ماهه حدود یک سوم از سوخت مصرف شده از راکتور خارج و با سوخت جدید جایگزین می‌شود. شایان ذکر است در راکتورهای آب سبک، هر تن اورانیوم طبیعی به‌طور معمول قادر به تولید حدود ۴۴ میلیون کیلووات ساعت برق است.

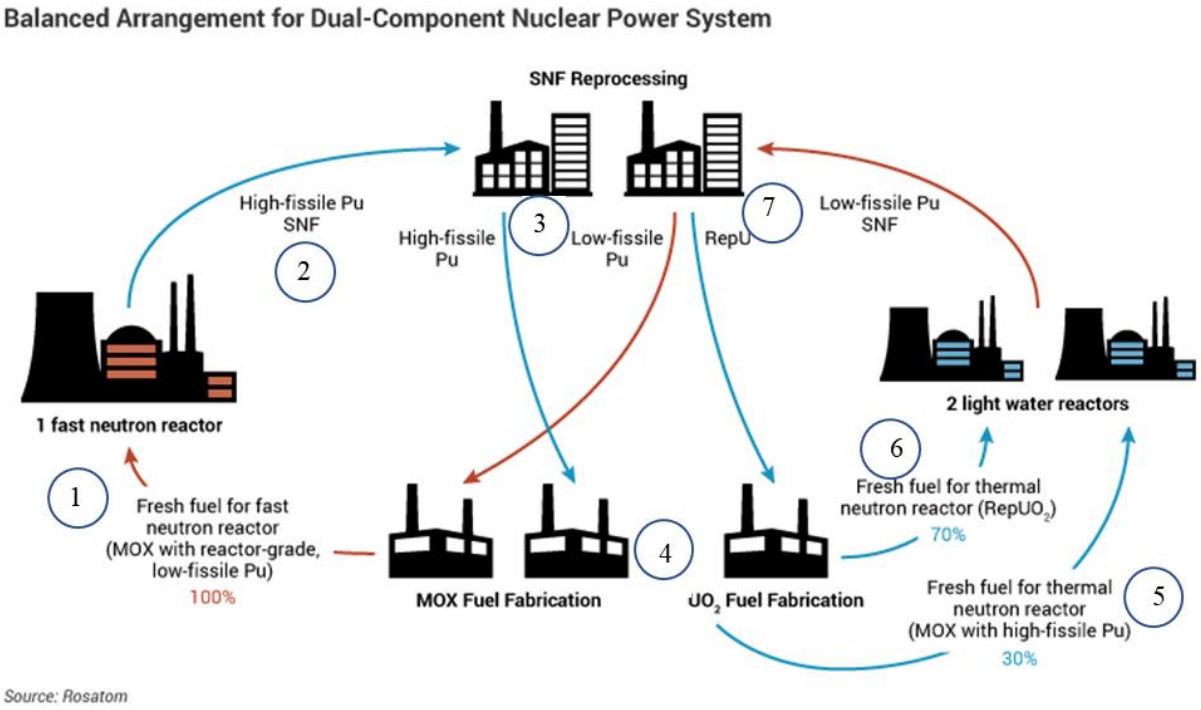
برآوردها نشان می‌دهد که مجموع ذخایر کشف‌شده اورانیوم در جهان حدود ۵.۵ میلیون تن است. در فناوری پیشرفته PWR، پس از سه سال بهره‌برداری، تنها ۵ درصد از سوخت مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از جنبه‌های اساسی انرژی هسته‌ای، قابلیت بازیافت سوخت مصرف‌شده به‌جای دفع آن به‌عنوان ضایعات است که منجر به شکل‌گیری مفهوم چرخه سوخت بسته می‌شود. در روش متداول فعلی، پلوتونیوم از سوخت مصرف‌شده جدا شده و همراه با اورانیوم ضعیف‌شده برای تولید سوخت اکسید مخلوط[۲۴] (MOX) به کار می‌رود. با این‌حال، بازیافت اورانیوم در سطح محدودی انجام می‌شود. راهکار جایگزین برای بستن چرخه سوخت، بازیافت هم‌زمان اورانیوم و پلوتونیوم بدون جداسازی آن‌ها و افزودن مقدار مشخصی اورانیوم تازه با غنای بالاتر از حد معمول است که به تولید سوخت مخلوط احیاشده[۲۵] منجر می‌شود. این فناوری در حال توسعه است. در تمامی این روش‌ها، محصولات شکافت و اکتینیدهای جزئی طی پردازش سوخت مصرف‌شده به‌عنوان ضایعات سطح بالا جدا می‌شوند. افزون بر این، استفاده از توریم به‌عنوان گزینه‌ای جایگزین برای سوخت هسته‌ای مورد توجه قرار دارد.

شرکت روس‌اتم[۲۶] یک چرخه سوخت شامل هر دو راکتور حرارتی و سریع با استفاده از دو نوع سوخت MOX را پیشنهاد کرده است که باعث کاهش اورانیوم مورد نیاز تا حدود ۳۰ درصد می‌شود و این قابلیت را دارد تا سهم MOX را افزایش دهد. در این طرح مطابق شکل (۲)، در راکتورهای حرارتی-نوترونی منابع اولیه پلوتونیوم هستند، اما این پلوتونیوم گرید راکتور است که حدود یک سوم آن ایزوتوپ‌های غیرقابل شکافت با عدد جرمی زوج

[23] CANada Deuterium Uranium
[24] Mixed OXide fuel (MOX)
[25] REgenerated MIXture of U, Pu oxides (REMIX)
[26] Rosatom

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

است (۱). پلوتونیم چه از اورانیوم و چه از سوخت MOX به دست آمده باشد، جدا شده و به سوخت MOX برای راکتورهای زاینده سریع با نسبت تولید کمتر از ۱/۲ تبدیل می‌شود که سوخت مصرف شده آن‌ها دارای نسبت بسیار کم‌تری از ایزوتوپ‌های پلوتونیوم غیرقابل شکافت با عدد جرمی زوج است (۲) که آن را پس از فرایند بازفرآوری (۳) و تولید سوخت (۴) برای استفاده در راکتورهای آب سبک ایده‌آل می‌کند. پلوتونیوم با شکافت بالا که از سوخت مصرف شده راکتور سریع بازیافت می‌شود، به سوخت MOX برای راکتورهای آب سبک اصلی تبدیل می‌شود و حدود ۳۰ درصد سوخت آن‌ها را تشکیل می‌دهد (۵). ۷۰ درصد دیگر سوخت، اورانیوم غنی‌سازی‌شده (RepU) است (۶) که پس از مصرف برای ساخت سوخت MOX استفاده می‌شود (۷).



شکل (۲): طرح پیشنهادی شرکت روس اتم برای استفاده از سوخت MOX[27]

برای دستیابی به تعادل در این سیستم با توجه به نسبت تولید و مصرف سوخت، ظرفیت راکتورهای حرارتی باید دو برابر راکتورهای سریع باشد. پلوتونیوم و بیش‌تر اورانیوم از سیستم خارج نمی‌شوند و تا حد امکان بازیافت می‌شوند و سوخت مصرف شده انباشته کمی وجود دارد. همچنین نباید تجمع پلوتونیوم یا RepU وجود داشته باشد. اکتینیدهای جزئی نیز در راکتورهای سریع سوزانده می‌شوند. این سیستم جدا از محدودیت نسبت سوخت MOX در راکتورهای حرارتی موجود در طرح (اکنون ۳۰ درصد) و نسبت U-232 در RepU، خودکفا است. در

[27]https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

این موارد، بخشی از سوخت نیاز به اورانیوم غنی شده با منشاء طبیعی دارد. میزان محصولات شکافتی که در این سیستم به‌عنوان پسماند دفع می‌شوند، به‌مراتب کمتر از مقدار تولیدشده در فرایندهای بازفرآوری متداول است. علاوه بر این، مشابه پسماند حاصل از فرایند REMIX، امکان بازیابی ایزوتوپ‌های ارزشمندی همچون سزیم، استرانسیم و تکنسیم از این پسماند وجود دارد. شرکت روس‌اتم قصد دارد این سیستم را در راکتورهای تولیدکننده سریع موجود به کار گیرد و به‌ویژه با اتصال نخستین راکتور BN-1200 به شبکه در سال ۲۰۲۷، زمینه اجرای این فناوری را فراهم سازد. همچنین، این شرکت از فعالان صنعت راکتورهای حرارتی و دارندگان ذخایر پلوتونیوم برای مشارکت در این طرح بین‌المللی دعوت به همکاری کرده است.

مطالعه تطبیقی توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در کشورهای منتخب

بررسی تطبیقی کشورهای مختلف نشان می‌دهد که توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای به سیاست‌های ملی، منابع مالی و راهبردهای تأمین سوخت وابسته است. کشورهایی مانند چین و هند با تمرکز بر بومی‌سازی فناوری توانسته‌اند در این حوزه پیشرفت‌های قابل‌توجهی داشته باشند. در مقابل، کشورهایی مانند امارات متحده عربی و ترکیه با تکیه بر همکاری‌های بین‌المللی و تأمین مالی خارجی، مسیر توسعه را طی می‌کنند.

توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در امارات متحده عربی

برنامه هسته‌ای امارات متحده عربی در سال ۲۰۰۸ با انتشار سیاست جامع انرژی هسته‌ای آغاز شد. این سیاست بر استفاده صلح‌آمیز از انرژی هسته‌ای، رعایت استانداردهای بین‌المللی ایمنی و امنیت و همکاری نزدیک با آژانس بین‌المللی انرژی اتمی[۲۸] تأکید داشت (Hickey, 2021). امارات متحده عربی برای توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای خود از همکاری با شرکت‌های خارجی بهره برد و در سال ۲۰۰۹، کنسرسیوم کره جنوبی به رهبری شرکت برق کره‌جنوبی[۲۹] برنده مناقصه ساخت نیروگاه براکه[۳۰] شد. این همکاری شامل طراحی، ساخت، تأمین مالی و آموزش نیروی انسانی بومی است.

نیروگاه هسته‌ای براکه شامل چهار راکتور از نوع APR-1400[۳۱] است که توسط KEPCO طراحی و ساخته شده‌اند. هزینه کل این پروژه حدود ۲۴.۴ میلیارد دلار برآورد شده است. تأمین مالی این پروژه به‌صورت مدل مشارکت

[28] International Atomic Energy Agency (IAEA)
[29] Korea Electric Power Corporation (KEPCO)
[30] Barakah Nuclear Energy Plant
[31] Advanced Power Reactor 1400 MW electricity

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

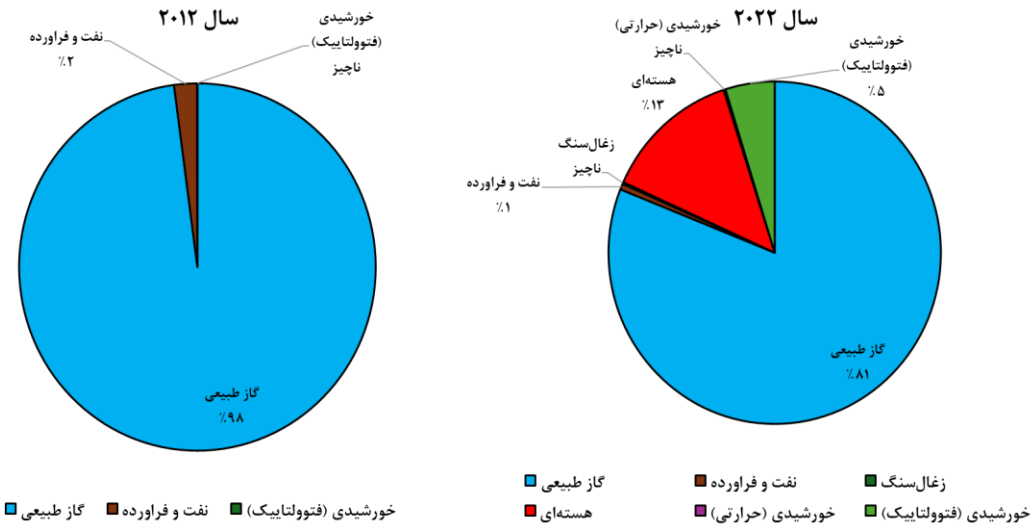
دولتی و خصوصی[۳۲] انجام شده است، به‌طوری که ۲۰ درصد از سرمایه‌گذاری توسط شرکت انرژی هسته‌ای امارات[۳۳] و ۸۰ درصد باقی‌مانده توسط KEPCO و بانک‌های بین‌المللی تأمین شده است. بانک صادرات و واردات کره جنوبی[۳۴] یکی از مهم‌ترین نهادهای تأمین مالی این پروژه است (Hickey, 2021).

در این مدل، KEPCO به‌عنوان شریک اصلی، مسئولیت طراحی، ساخت، بهره‌برداری و نگهداری از نیروگاه را بر عهده دارد. همچنین، قراردادهای بلندمدت خرید برق[۳۵] تضمین کرده‌اند که امارات متحده عربی بتواند برق تولیدی این نیروگاه را به‌صورت پایدار و با قیمت ثابت خریداری کند. این قراردادها به کاهش ریسک سرمایه‌گذاری و اطمینان از بازگشت سرمایه کمک کرده‌اند.

امارات متحده عربی با هدف کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و افزایش صادرات نفت و گاز، به دنبال تنوع‌بخشی به سبد انرژی خود است. انرژی هسته‌ای به‌عنوان یکی از منابع پایدار و کم‌کربن در این سیاست جایگاه ویژه‌ای دارد و همان‌گونه که در نمودار (۱) مشخص است سهم گاز طبیعی از تولید برق در امارات متحده عربی از ۹۸ درصد در سال ۲۰۱۲ به ۸۱ درصد در سال ۲۰۲۲ کاهش یافته است. همچنین هسته‌ای ۱۳ درصد از سبد تولید برق در سال ۲۰۲۲ را به خود اختصاص داده است و پیش‌بینی می‌شود این سهم تا پایان سال ۲۰۲۴ به ۲۵ درصد افزایش یابد (Hickey, 2021).

[32] Joint Venture
[33] Emirates Nuclear Energy Company (ENEC)
[34] Export-Import Bank of Korea
[35] Power Purchase Agreement (PPA)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]



نمودار (۱): سهم حامل‌های مختلف از تولید برق در امارات متحده عربی در سال ۲۰۱۲ و ۲۰۲۲[36]

توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای، به‌ویژه در کشورهایی که برای اولین بار به این فناوری روی می‌آورند، با چالش‌های متعددی همراه است. در پروژه براکه نیز امارات متحده عربی با چالش‌های زیر مواجه بود:

۱) هزینه بالای سرمایه‌گذاری: نیروگاه‌های هسته‌ای به دلیل هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری بسیار بالا، نیازمند سرمایه‌گذاری کلان هستند. تأمین مالی ۲۴/۴ میلیارد دلاری پروژه براکه، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های این پروژه بود. کشورهای کم‌درآمد یا متوسط، معمولاً نمی‌توانند چنین پروژه‌هایی را بدون کمک خارجی تأمین مالی کنند. استفاده از مدل مشارکت دولتی و خصوصی و جذب سرمایه‌گذاری خارجی، به امارات متحده عربی کمک کرد تا هزینه‌های سنگین پروژه را تأمین کند. بانک صادرات و واردات کره جنوبی و سایر نهادهای مالی بین‌المللی نقش مهمی در این زمینه داشتند. همچنین قراردادهای بلندمدت خرید برق به سرمایه‌گذاران اطمینان داد که برق تولیدی نیروگاه با قیمت ثابت خریداری خواهد شد. این امر به کاهش ریسک‌های مالی و اطمینان از بازگشت سرمایه کمک کرد.

۲) ریسک‌های تأخیر در ساخت: تأخیر در ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای می‌تواند هزینه‌های پروژه را به‌شدت افزایش دهد. در طول ساخت نیروگاه براکه، امارات متحده عربی تلاش کرد تا با همکاری نزدیک با KEPCO و بهره‌گیری از تجارب این شرکت، میزان تأخیرها را به حداقل برساند.

[36] https://www.iea.org/countries/united-arab-emirates/electricity

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

۳) توسعه نیروی انسانی: کمبود نیروی متخصص در زمینه هسته‌ای یکی از چالش‌های اصلی است. امارات متحده عربی برای حل این مشکل، برنامه‌های آموزشی گسترده‌ای را با همکاری KEPCO اجرا کرد و نیروی کار بومی را برای بهره‌برداری و نگهداری از نیروگاه آموزش داد.

۴) ایمنی و شفافیت: رعایت استانداردهای ایمنی و ایجاد شفافیت در برنامه‌های هسته‌ای از دیگر چالش‌ها است. امارات متحده عربی با همکاری نزدیک با آژانس بین‌المللی انرژی اتمی و استفاده از استانداردهای بین‌المللی، توانست این چالش را مدیریت کند.

۵) وابستگی به فناوری خارجی: امارات متحده عربی به دلیل نداشتن تجربه قبلی در زمینه هسته‌ای، کاملاً به فناوری و دانش خارجی وابسته است. این وابستگی می‌تواند امنیت انرژی کشور را در بلندمدت تحت تأثیر قرار دهد.

توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در ترکیه

ترکیه با هدف تأمین امنیت انرژی، کاهش وابستگی به واردات انرژی و کاهش هزینه‌های انرژی، به دنبال توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای است. در سال ۲۰۱۲، ترکیه حدود ۴۴ درصد از برق خود را از گاز طبیعی تأمین می‌کرد که ۹۵ درصد آن وارداتی بود. این وابستگی به گاز طبیعی، به‌ویژه از روسیه، ترکیه را در برابر نوسانات قیمت و تنش‌های ژئوپلیتیکی آسیب‌پذیر کرده است. علاوه بر این، ترکیه به دنبال کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و دستیابی به اهداف توسعه پایدار است. نیروگاه‌های هسته‌ای به دلیل تولید کم کربن، می‌توانند به ترکیه در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کنند. همچنین، انرژی هسته‌ای به‌عنوان بخشی از برنامه «چشم‌انداز ۲۰۲۳» ترکیه برای تبدیل شدن به یکی از ۱۰ اقتصاد برتر جهان مورد توجه قرار گرفته است (Jewell, 2015).

ترکیه از دهه ۱۹۷۰ به دنبال توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای بوده است، اما این تلاش‌ها به دلیل مشکلات مالی، سیاسی و فنی بارها متوقف شده است. در حال حاضر، این کشور با هدف کاهش وابستگی به واردات انرژی، تنوع‌بخشی به منابع انرژی و تأمین امنیت انرژی، برنامه‌های خود را برای ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای دنبال می‌کند. ترکیه از دهه ۱۹۵۰ میلادی به انرژی هسته‌ای علاقه‌مند بوده و در سال ۱۹۵۶ کمیسیون انرژی اتمی ترکیه[37] تأسیس شد. اولین تلاش جدی برای ساخت نیروگاه هسته‌ای در سال ۱۹۷۰ انجام شد، اما به دلیل کودتای نظامی ۱۹۸۰ و مشکلات مالی، این پروژه متوقف شد. در دهه ۱۹۸۰، ترکیه با استفاده از مدل ساخت، بهره‌برداری و انتقال[38] تلاش

[37] Turkey Atomic Energy Commission (TAEC)

[38] Build–Operate–Transfer (BOT)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

کرد تا پروژه‌های هسته‌ای را پیش ببرد، اما نگرانی‌های بین‌المللی درباره احتمال استفاده از فناوری هسته‌ای برای تولید سلاح، این تلاش‌ها را ناکام گذاشت.

در دهه ۱۹۹۰، ترکیه دوباره تلاش کرد تا با همکاری شرکت‌های بین‌المللی پروژه‌های هسته‌ای را اجرا کند، اما به دلیل نگرانی‌های محیط زیستی و مشکلات مالی، این پروژه‌ها نیز متوقف شد. در نهایت، در سال ۲۰۱۰ ترکیه با امضای توافقنامه‌ای با روسیه برای ساخت نیروگاه هسته‌ای آک‌کویو[۳۹]، وارد مرحله جدیدی از برنامه‌ریزی هسته‌ای شد (Jewell, 2015). ترکیه در حال حاضر اجرای دو پروژه بزرگ هسته‌ای، شامل نیروگاه آک‌کویو و نیروگاه سینوپ[۴۰] را دنبال می‌کند.

نیروگاه آک‌کویو با همکاری شرکت روسی روس‌اتم و بر اساس مدل ساخت، مالکیت و بهره‌برداری[۴۱] اجرا می‌شود. روسیه مسئولیت تأمین مالی، ساخت، مالکیت و بهره‌برداری از این نیروگاه را بر عهده دارد. این نیروگاه شامل چهار راکتور با ظرفیت کلی ۴۸۰۰ مگاوات است و انتظار می‌رود حدود ۱۰ درصد از نیاز برق ترکیه را تأمین کند (Hickey, 2021). هزینه این پروژه حدود ۲۱ میلیارد دلار برآورد شده است و ترکیه تضمین کرده است که ۷۰ درصد برق تولیدی دو راکتور اول و ۳۰ درصد برق دو راکتور دیگر را برای مدت ۱۵ سال با قیمت ثابت خریداری کند (Jewell, 2015).

پروژه نیروگاه سینوپ با مشارکت ژاپن و فرانسه برنامه‌ریزی شده بود، اما در سال ۲۰۱۸، ژاپن به دلیل افزایش هزینه‌ها و چالش‌های مالی از این طرح کناره‌گیری کرد. این نیروگاه با ظرفیت ۵۶۰۰ مگاوات طراحی شده بود و هزینه اجرای آن حدود ۲۰ میلیارد دلار برآورد می‌شد (Hickey, 2021).

ترکیه در مسیر توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای با چالش‌های متعددی، از جمله موارد زیر، مواجه است.

۱) وابستگی به سرمایه‌گذاری خارجی: مدل BOO که برای نیروگاه آک‌کویو استفاده شده است، ترکیه را به شدت به روسیه وابسته کرده است. این وابستگی می‌تواند استقلال انرژی ترکیه را تحت تأثیر قرار دهد و به نگرانی‌های ژئوپلیتیکی دامن بزند (Hickey, 2021).
۲) مشکلات مالی: هزینه‌های بالای ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای، یکی از موانع اصلی برای ترکیه است. پروژه سینوپ به دلیل افزایش هزینه‌ها و مشکلات مالی متوقف شد.

[39] Akkuyu Nuclear Power Plant
[40] Sinop Nuclear Power Plant
[41] Build-Own-Operate (BOO)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

۳) نگرانی‌های محیط زیستی و اجتماعی: پروژه‌های هسته‌ای ترکیه با مخالفت‌های عمومی و نگرانی‌های محیط زیستی مواجه هستند. بسیاری از مردم ترکیه به دلیل تجربه فاجعه چرنوبیل در سال ۱۹۸۶، نسبت به ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای بی‌اعتماد هستند (Topal-Namli, 2014).

۴) کمبود نیروی انسانی متخصص: ترکیه برای بهره‌برداری از نیروگاه‌های هسته‌ای به نیروی انسانی متخصص نیاز دارد، اما کمبود نیروی متخصص داخلی، این کشور را به استفاده از نیروی کار خارجی وابسته کرده است (Jewell, 2015).

توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در چین

کشور چین دارای عظیم‌ترین ناوگان برق هسته‌ای در آسیا است. عمر عمده راکتورهای هسته‌ای فعال در این کشور زیر ۱۰ سال است و این کشور با بومی‌سازی این فناوری، توانسته صنعت برق هسته‌ای خود را توسعه دهد. توسعه هسته‌ای چین با برنامه‌ریزی‌های مناسب و سرمایه‌گذاری‌های عظیم در این حوزه به‌دست آمده است. چین در سال ۱۹۵۱ با اتحاد جماهیر شوروی قراردادی محرمانه امضا کرد که طی آن، سنگ معدن اورانیوم را در ازای کمک شوروی در فناوری هسته‌ای تأمین می‌کرد. این همکاری تا سال ۱۹۵۹ ادامه داشت و منجر به تأسیس مراکز تحقیقاتی، کارخانه‌های جداسازی شیمیایی و تأسیسات تولید اورانیوم و پلوتونیوم شد. اما پس از قطع روابط با شوروی در سال ۱۹۵۹، چین تصمیم گرفت منابع بیش‌تری را به توسعه هسته‌ای اختصاص دهد و مؤسسات تحقیقاتی متعددی را در سراسر کشور تأسیس کرد. تا سال ۱۹۶۳، چین بیش از ۴۰ کارخانه جداسازی شیمیایی ایجاد کرد و در سال ۱۹۶۴ اولین آزمایش اتمی خود را انجام داد. در سال ۱۹۶۷، چین اولین بمب هیدروژنی خود را آزمایش کرد. به‌طور کلی، توسعه صنعت هسته‌ای چین در چهار مرحله شروع توسعه، توسعه آرام، توسعه سریع و توسعه ایمن و کارآمد طبقه‌بندی می‌شود (Zeng, 2016).

۱) شروع توسعه هسته‌ای چین (۱۹۷۰– ۱۹۹۳)

چین در دهه ۱۹۷۰ مطالعات خود را در زمینه نیروگاه‌های هسته‌ای آغاز کرد و نخستین نیروگاه هسته‌ای کاملاً بومی خود، گینشان[۴۲]، را با استفاده از راکتور تحت فشار ساخت ژاپن احداث کرد. این نیروگاه با ظرفیت ۳۰۰ مگاوات در سال ۱۹۹۱ به شبکه متصل شد. همچنین، چین در سال ۱۹۸۲ دو واحد ۹۸۰ مگاواتی از فرانسه خریداری کرد که در سال ۱۹۹۴ تکمیل شدند. با این حال، توسعه هسته‌ای چین در این مرحله با چالش‌هایی نظیر نبود

[42] Qinshan Nuclear Power Plant

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

دستورالعمل روشن، فقدان برنامه‌ریزی بلندمدت و محدودیت‌های فناوری مواجه بود. به‌عنوان نمونه، نیروگاه گینشان از نظر فناوری و اقتصادی در مقایسه با نیروگاه‌های وارداتی مانند دایا بی[۴۳] کارایی کمتری داشت.

۲) توسعه آرام هسته‌ای چین(۱۹۹۴–۲۰۰۵)

در این مرحله، با توجه به فراوانی منابع انرژی در چین، نیروگاه‌های هسته‌ای به‌عنوان منبعی تکمیلی در نظر گرفته شدند و سیاست «توسعه آرام» برای انرژی هسته‌ای اتخاذ شد. چین در این دوره فناوری‌های پیشرفته را از فرانسه، کانادا و روسیه وارد کرد و چندین واحد جدید ساخت. تا پایان سال ۲۰۰۴، ظرفیت نصب‌شده نیروگاه‌های هسته‌ای به ۴۷۰۰ مگاوات رسید. همچنین، در سال ۲۰۰۰، چین با ساخت نیروگاه چشمه[۴۴] در پاکستان به هشتمین صادرکننده فناوری هسته‌ای تبدیل شد. این دوره با پیشرفت‌های فنی و همکاری‌های بین‌المللی همراه بود و پایه‌ای برای توسعه سریع‌تر صنعت هسته‌ای چین ایجاد کرد.

۳) توسعه سریع هسته‌ای چین (۲۰۰۶– ۲۰۱۱)

با رشد اقتصادی چین و کمبود انرژی، اهمیت انرژی هسته‌ای افزایش یافت. در سال ۲۰۰۷، شورای دولتی چین برنامه بلندمدت توسعه انرژی هسته‌ای (۲۰۰۵–۲۰۲۰) را تصویب کرد. در این دوره، ظرفیت نصب‌شده نیروگاه‌های هسته‌ای به ۱۱۳۰۸ مگاوات با ۱۳ واحد فعال و ۲۹۲۴۵ مگاوات با ۲۶ واحد در حال ساخت رسید. فناوری هسته‌ای چین نیز پیشرفت قابل‌توجهی داشت و برنامه‌های CPR1000 و ACP1000 برای توسعه فناوری بومی آغاز شد. در سال ۲۰۱۱، تولید برق هسته‌ای چین به ۸۷/۴ میلیارد کیلووات ساعت رسید که ۱/۸۵ درصد از تولید برق این کشور را تشکیل می‌داد.

۴) توسعه ایمن و کارآمد هسته‌ای چین (۲۰۱۲–اکنون)

حادثه هسته‌ای فوکوشیما در سال ۲۰۱۱ چین را وادار به بازبینی راهبرد هسته‌ای خود کرد. در پی این رویداد، دولت چین ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای را در اولویت قرار داد و استانداردهای سخت‌گیرانه‌تری برای پروژه‌های جدید اعمال کرد. برنامه پنج‌ساله دوازدهم چین (۲۰۲۰–۲۰۱۱) بر توسعه ایمن، کارآمد و پایدار انرژی هسته‌ای متمرکز بود. در این دوره، پروژه‌های جدید با رعایت استانداردهای ایمنی نسل سوم طراحی و اجرا شدند. علاوه

[43] Daya Bay Nuclear Power Plant
[44] Çeşme Power Plant

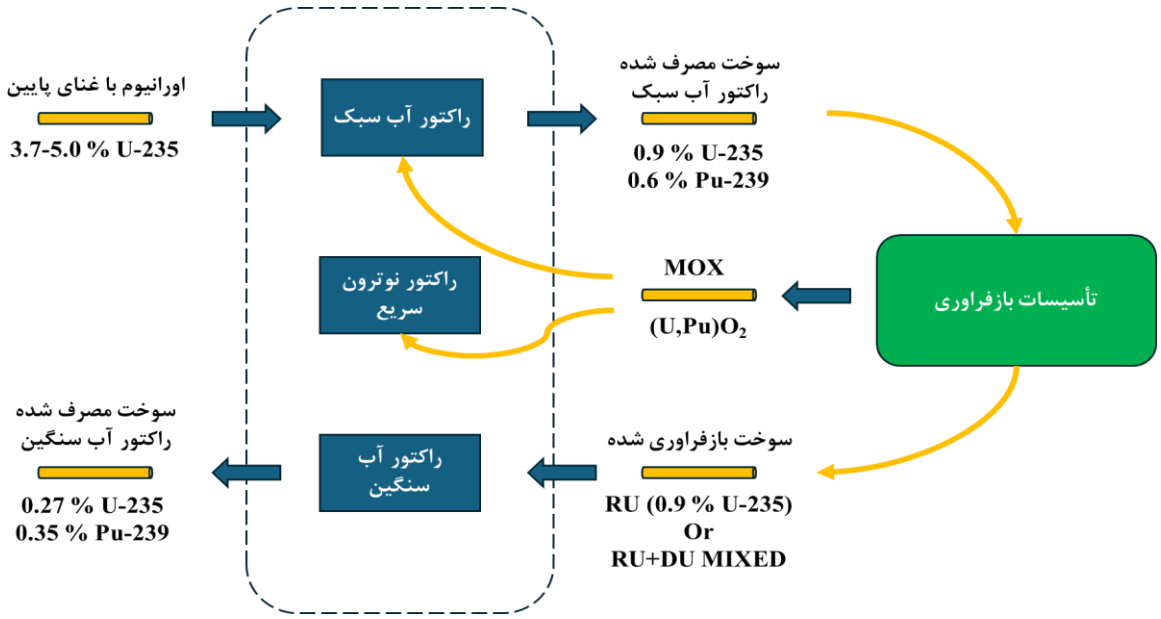
[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

بر این، دولت چین روند ازسرگیری ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای را با سرعتی کنترل‌شده و مبتنی بر برنامه‌ریزی علمی دنبال کرد.

برنامه آینده توسعه هسته‌ای چین

کشور چین با در اختیار داشتن فناوری ساخت انواع راکتور (آب سبک و آب سنگین) و همچنین تحقیق و توسعه در زمینه راکتورهای نسل ۴ (از جمله راکتورهای زاینده سریع) به دنبال چرخه بسته سوخت هسته‌ای است که در نهایت امنیت آینده انرژی در این کشور را تضمین می‌کند. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، با بهره‌گیری از بازفراوری به‌عنوان هسته مرکزی این طرح، می‌توان چرخه بسته سوخت هسته‌ای را با استفاده از مقدار محدودی اورانیوم طبیعی با غنای کم، در ترکیب با سوخت MOX که سوخت اولیه راکتورهای آب سبک است، شکل داد. در این طرح، از راکتورهای آب سبک، آب سنگین و راکتورهای زاینده سریع به‌صورت یکپارچه استفاده شده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]



شکل (۳): برنامه‌ریزی چین در چرخه سوخت هسته‌ای[۴۵]

توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در هند

از زمان ساخت دو راکتور کوچک آب جوش در نیروگاه تاراپور[۴۶] در دهه ۱۹۶۰، راهبرد صنعت برق هسته‌ای هند بر دستیابی به استقلال کامل در چرخه سوخت هسته‌ای متمرکز شده است. در نتیجه، برنامه انرژی هسته‌ای این کشور عمدتاً بدون دریافت سوخت یا پشتیبانی فناورانه از سایر کشورها توسعه یافته است. در سال ۱۹۶۴، راکتور آب سنگین تحت فشار (PHWR) به‌عنوان طراحی اصلی توسعه صنعت هسته‌ای هند تصویب شد، چراکه در مقایسه با راکتورهای آب جوش (BWR)، نیاز به اورانیوم طبیعی کمتری داشت، فاقد الزام غنی‌سازی بود و امکان ساخت آن با ظرفیت‌های مهندسی موجود در کشور فراهم می‌شد. در این طراحی، به‌جای مخزن تحت فشار سنگین، از لوله‌های تحت فشار استفاده شده است.

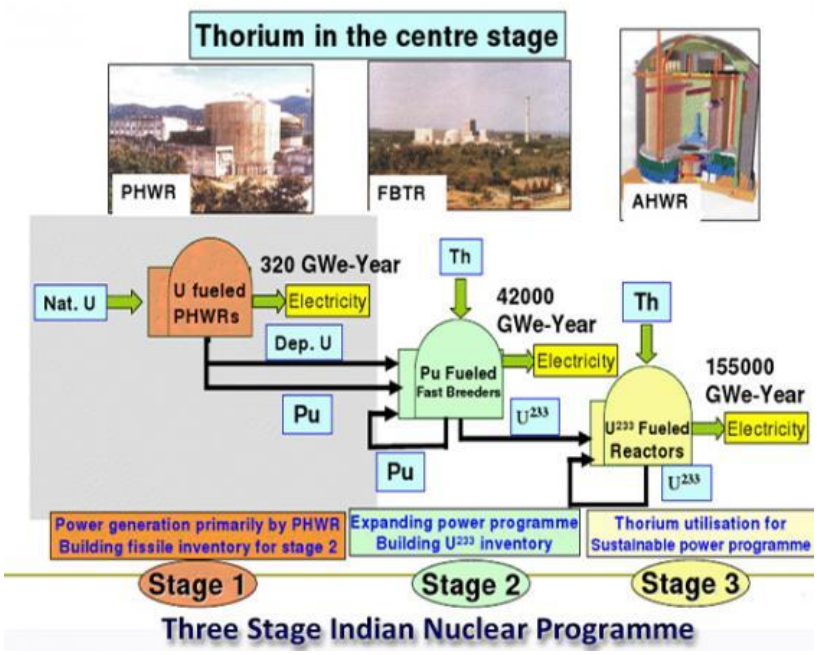
راکتورهای هسته‌ای هند تا اواسط دهه ۱۹۹۰ پایین‌ترین ضریب بهره‌برداری را در سطح جهان داشتند که این امر نشان‌دهنده چالش‌های فنی ناشی از انزوای کشور هند بود. با این حال، این ضریب از ۶۰ درصد در سال ۱۹۹۵ به ۸۵ درصد در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ افزایش یافت. اما، در فاصله سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰، کاهش تأمین سوخت اورانیوم منجر به افت ضریب بهره‌برداری شد.

[45] Zheng, X. , Deng, B. , Ou, W. and Gou, F. (2014) Conversion of U-238 and Th-232 Using a Fusion Neutron Source. World Journal of Nuclear Science and Technology, 4, 222-227. doi: 10.4236/wjnst.2014.44028.

[46] Tarapur Atomic Power Station (TAPS)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

خودکفایی انرژی هسته‌ای هند از اکتشاف و استخراج اورانیوم از طریق ساخت سوخت، تولید آب سنگین، طراحی و ساخت راکتور تا بازفراوری و مدیریت ضایعات گسترش یافت. این کشور همچنین در حال توسعه فناوری برای استفاده از منابع فراوان توریم خود به‌عنوان سوخت هسته‌ای است. شکل (۴) چشم‌انداز برنامه هسته‌ای هند را نشان می‌دهد که راکتورهای آب سنگین، راکتورهای زاینده سریع و راکتورهای آب سنگین پیشرفته در طی سه مرحله برق مورد نیاز این کشور را تأمین خواهند کرد (Srivastava, 2022).



شکل (۴): برنامه توسعه هسته‌ای هند[47]

شرکت انرژی هسته‌ای هند با مسئولیت محدود[48] مسئول طراحی، ساخت، راه‌اندازی و بهره‌برداری از نیروگاه‌های هسته‌ای حرارتی است. این شرکت در آغاز سال ۲۰۱۰ اعلام کرد که سرمایه کافی برای ۱۰ هزار مگاوات نیروگاه جدید در اختیار دارد. مدل تأمین مالی این نیروگاه‌های جدید ۷۰ درصد سهام و ۳۰ درصد تأمین مالی بدهی است. با این حال، هدف این شرکت مشارکت دادن سایر بخش‌های دولتی و شرکت‌های خصوصی در توسعه آینده انرژی هسته‌ای، به‌ویژه شرکت ملی انرژی حرارتی[49] است. شرکت NTPC بزرگ‌تر از NPCIL است و تولیدکننده اصلی برق در هند به‌شمار می‌رود. شرکت NTPC عمدتاً در مالکیت دولت قرار دارد. بر اساس قانون انرژی هسته‌ای

[47] Srivastava, D., Kapoor, K. & Amarendra, G. Development of Advanced Nuclear Structural Materials for Sustainable Energy Development. (2022). *J Indian Inst Sci* 102, 391–404. https://doi.org/10.1007/s41745-022-00287-z

[48] Nuclear Power Corporation of India Limited (NPCIL)

[49] National Thermal Power Corporation (NTPC)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

سال ۱۹۶۲، مشارکت بخش خصوصی در تولید برق هسته‌ای ممنوع است. اصلاحیه‌های این قانون در سال ۲۰۱۶، اگرچه امکان سرمایه‌گذاری مشترک را برای شرکت‌های دولتی فراهم کرد، اما همچنان بخش خصوصی را از این حوزه مستثنی نمود. علاوه بر این، سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی در صنعت انرژی هسته‌ای، به‌استثنای زنجیره تأمین، مجاز نیست.

چالش‌های توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران

با توجه به اهمیت تنوع در سبد تولید برق کشور و ویژگی‌های متمایز برق هسته‌ای نظیر قابلیت اطمینان و عمر طولانی نیروگاه‌ها، بررسی موانع و چالش‌های توسعه نیروگاه‌های برق هسته‌ای در ایران از اهیمت ویژه‌ای برخوردار است. این چالش‌ها و موانع توسعه هسته‌ای را می‌توان در دو سطح سیاستی و عملیاتی طبقه‌بندی کرد.

چالش‌ها و موانع سیاستی توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران

یکی از چالش‌های اساسی در تصمیم‌گیری برای توسعه برق هسته‌ای، بلندمدت بودن پیامدهای این تصمیم است. تصمیم‌گیری ساخت نیروگاه هسته‌ای از زمان شروع فرایند ساخت نیروگاه، بهره‌برداری و در نهایت تعطیلی نیروگاه و خاموشی ایمن آن فرایندی است که نزدیک به چند دهه به طول می‌انجامد. با توجه به طولانی بودن زمان ساخت نیروگاه هسته‌ای، تغییر دولت‌مردان و تغییر نگرش حاکمیت و تصمیم‌گیران این حوزه چالش بزرگی برای متولیان امر ایجاد می‌کند. یکی دیگر از چالش‌های سیاستی توسعه هسته‌ای پیوند امنیتی – سیاسی برنامه هسته‌ای جمهوری اسلامی در تمام ابعاد است. در اغلب کشورها ساخت و توسعه نیروگاه هسته‌ای ساختاری غیرسیاسی دارد و همکاری شرکت‌های خصوصی در زمینه فناوری نیروگاه هسته‌ای بسیار برجسته است.

عدم همکاری بین بخش‌های مختلف دولت با سازمان برای پیشبرد اهداف توسعه برق هسته‌ای یکی دیگر از موانع به شمار می‌رود. یکی از نمونه‌های این چالش، نبود امکان انعقاد قراردادهای فروش تضمینی برق برای سازمان است. این مسئله منجر به افزایش دشواری در تأمین مالی پروژه‌های نیروگاهی جدید شده و ریسک سرمایه‌گذاری در این حوزه را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. با بررسی اسناد بالادستی سازمان و طرح‌ها می‌توان دریافت که جای خالی طرحی جامع و راهبردی وجود دارد که در بازه‌ی زمانی مشخص، سازمان انرژی اتمی و دستگاه‌های اجرایی را مکلف به اجرای تعهدات کند. اکثر قوانین وضع شده و طرح‌ها به صورت کیفی به مسئله توسعه نیروگاه هسته‌ای پرداخته‌اند و راهکار روشنی در آن دیده نمی‌شود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

چالش‌ها و موانع عملیاتی توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران

یکی از مهم‌ترین چالش‌های عملیاتی توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران، محدودیت منابع اورانیوم است. منابع اورانیوم را می‌توان به دو دسته منابع اولیه و ثانویه تقسیم نمود. در منبع اولیه، اورانیوم به عنوان محصول اصلی استخراج شده و هدف اصلی از ایجاد معدن، تأمین این ماده معدنی محسوب می‌شود. در منابع غیرمتعارف مانند شیل اورانیوم به‌عنوان محصول جانبی همراه با سایر فلزات استخراج شده و از طریق روش‌های جداسازی، از آن‌ها تفکیک می‌شود؛ نمونه‌ای از این منابع، سنگ آهن است. بر اساس فعالیت‌های اکتشافی تکمیل شده در سال ۱۳۹۶ و با در نظر گرفتن تغییرات کلی از آخرین گزارش، کل منابع متعارف شناسایی شده (با اطمینان و استنباط منطقی) برابر با ۴۳۱۶ تن اورانیوم درجا برآورد می‌شود. این منابع عمدتاً شامل ذخایر متاسوماتیک، مرتبط با گرانیت و دگرگونی هستند. تغییرات در منابع استنباط‌شده ناشی از اکتشافات جدید بوده که بخش عمده آن‌ها به کانی‌سازی از نوع متاسوماتیک مربوط است.

برخی از منابع استنباط شده به دلیل مطالعات اضافی به دسته منابع متعارف شناسایی شده منتقل شدند. مجموع منابع استنباط شده در محل تا ۱ ژانویه ۲۰۱۹ بالغ بر ۵۵۳۵ تن اورانیوم است. منابع پیش‌بینی‌شده به ۹۸۰۰ تن اورانیوم در رده هزینه کمتر از ۱۳۰ دلار آمریکا به ازای هر کیلوگرم اورانیم می‌رسد، در حالی‌که منابع احتمالی ۴۸۱۰۰ تن اورانیوم در دسته هزینه‌های تخصیص داده نشده در سال ۲۰۱۹ است. مطالعات اخیر مناطق مساعدی را برای بررسی منابع غیر متعارف (ثانویه) بالقوه شناسایی کرده است. این شامل سنگ‌های فسفاته، سنگ‌های غیرآهنی، سنگ‌های آهنی، کربناتیت و شیل‌های سیاه می‌شود. ارزیابی پتانسیل این منابع از طریق یک رویکرد مرحله‌ای انجام می‌شود که شامل طرح‌های مفهومی برای استخراج و فراوری است. منابع غیر متعارف تخمینی در دسته هزینه‌های تخصیص داده نشده به ۵۳۰۰۰ تن می‌رسد.

سنگ معدن اورانیوم به دست آمده از معادن روباز گنبد نمک گچین (از نوع سطحی) از سال ۱۳۸۵ در کارخانه اورانیوم بندرعباس فراوری می‌شود. کارخانه تولید اورانیوم بندرعباس در سال ۱۳۸۵ با ظرفیت اسمی تولید سالانه ۲۱ تن اورانیوم شروع به کار کرد و در سال ۱۳۹۵ تعطیل شد. دومین کارخانه تولید اورانیوم واقع در نزدیکی اردکان در سال ۱۳۹۶ آغاز به کار کرد. ظرفیت اسمی تولید سالانه ۵۰ تن است و از سنگ معدن اورانیوم ساغند تأمین می‌شود. علاوه بر مرکز تولید اورانیوم اردکان که هم اکنون در حال فعالیت است، مطالعات امکان‌سنجی برای مرکز تولید ناریگان در حال انجام است. در حال حاضر، ذخایر اورانیوم ایران شامل اورانیوم وارداتی از آفریقا پیش از انقلاب، اورانیوم تولید داخل و اورانیوم مبادله‌شده در چارچوب برجام در ازای اورانیوم غنی‌شده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

بااین‌حال، میزان منابع شناسایی‌شده و نرخ بهره‌برداری کنونی حتی برای تأمین نیاز سالانه نیروگاه بوشهر (حدود ۱۶۰ تن اورانیوم طبیعی) کافی نیست.

تولید مجتمع‌های سوخت مورد نیاز راکتورهای هسته‌ای مستلزمفناوری پیشرفته و دانش فنی بالا است. با این وجود شرکت تولید سوخت راکتورهای هسته‌ای تحت نظارت سازمان انرژی اتمی موفق به دستیابی به این فناوری شده است. اما استفاده از این سوخت در نیروگاه بوشهر مستلزم رعایت استانداردهای سخت‌گیرانه روس‌اتم است که تاکنون محقق نشده است. در شرایط تحریم، به نظر می‌رسد که روسیه تنها تأمین‌کننده اورانیوم ایران باشد، آن‌هم به‌صورت میله‌های سوختی و صرفاً برای استفاده در راکتورهای ساخت این کشور، که تنها در چارچوب قراردادهای دوجانبه انجام می‌شود.

چالش مهم دیگر در توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران، تأمین مالی این نیروگاه‌ها است. روش‌های مختلفی برای تأمین مالی نیروگاه‌های هسته‌ای در جهان استفاده شده است. هزینه اولیه بالای ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای و دوره بازگشت سرمایه بلند مدت و در نتیجه جذابیت کم سرمایه‌گذاری، مالکیت دولت، پیوند سیاسی – امنیتی برنامه هسته‌ای ایران در تمام بخش‌ها، استفاده از سرمایه‌گذاری بخش خصوصی داخلی را به چالش بزرگی تبدیل کرده است. علاوه بر تأمین مالی مستقیم توسط دولت و سرمایه‌گذاری‌های خارجی که هر کدام روند خاص خود را دارند، قراردادهای ساخت، بهره‌برداری، انتقال و واگذاری و قراردادهای ساخت، تملک و بهره‌برداری توسط شرکت‌های خارجی در سایر کشورها رواج دارد.

در حال حاضر تحریم‌ها، ریسک سرمایه‌گذاری خارجی را افزایش داده‌اند. علاوه بر این، وزارت نیرو برای نیروگاه بوشهر قرارداد خرید تضمینی برق ارائه نمی‌دهد، در حالی که این نیروگاه برخلاف نیروگاه‌های حرارتی گازی و سیکل ترکیبی، از سوخت ارزان یا یارانه‌ای، نظیر گاز طبیعی رایگان، بهره‌مند نیست. همچنین، ضریب ظرفیت بسیار بالای نیروگاه‌های حرارتی در مقایسه با سایر نیروگاه‌ها، که منجر به کاهش هزینه‌های ناشی از زمان‌های خارج از مدار می‌شود، از مزایای کلیدی این نیروگاه‌ها محسوب می‌شود.

تأمین مالی واحدهای ۱، ۲ و ۳ نیروگاه بوشهر مستقیماً توسط دولت انجام شده است. تأخیر در پرداخت هزینه‌های پیمانکار موجب تعلیق پروژه، طولانی شدن روند ساخت و افزایش هزینه احداث نیروگاه هسته‌ای می‌شود، چراکه نرخ تنزیل، متأثر از عواملی همچون تورم، تأثیر قابل‌توجهی بر هزینه‌های ساخت این نوع نیروگاه‌ها دارد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

تحلیل جدیدی از روند تاریخی احداث نیروگاه‌های هسته‌ای نشان می‌دهد که از سال ۲۰۱۰، تأخیر در اجرای پروژه‌ها به‌طور متوسط ۱۸ درصد از کل هزینه‌های ساخت را به خود اختصاص داده است. با توجه به هزینه بالای احداث نیروگاه‌های هسته‌ای، این میزان افزایش هزینه بسیار چشمگیر ارزیابی می‌شود.

چالش عملیاتی دیگری که در توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران مشهود است، وابستگی خارجی در ساخت و بهره‌برداری از این نیروگاه‌ها است. در کشور علاوه بر شرکت تولید و توسعه، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای نیز سعی در طراحی، ساخت و توسعه راکتورهای هسته‌ای دارد و هر دو نهاد زیر نظر سازمان انرژی اتمی فعالیت می‌کنند. فرایند طراحی و ساخت راکتورهای هسته‌ای از پیچیدگی بالایی برخوردار است و تنها تعداد محدودی از کشورها به این فناوری دست یافته‌اند. اغلب این کشورها از طریق همکاری‌های بین‌المللی یا خرید فناوری از سایر کشورها موفق به توسعه راکتورهای هسته‌ای شده‌اند.

در حال حاضر، طراحی راکتورهای هسته‌ای در ایران در مرحله مفهومی قرار دارد. برآوردها نشان می‌دهد که میزان مشارکت داخلی در احداث نیروگاه‌های برق هسته‌ای طی دو دهه آینده در محدوده ۲۰ تا ۳۰ درصد خواهد بود. اگرچه این سطح از مشارکت، در صورت تحقق، به‌عنوان گامی مؤثر در جهت کسب تجربه و توسعه ظرفیت‌های داخلی قابل توجه است، اما از سوی دیگر، وابستگی فناورانه کشور به منابع خارجی را در سطح ۷۰ تا ۸۰ درصد حفظ می‌کند. یکی از چالش‌های اساسی در این مسیر، زمان‌بر بودن فرایند دستیابی به فناوری ساخت راکتورهای هسته‌ای است. با توجه به راهبرد فعلی سازمان انرژی اتمی، احتمال ساخت راکتورهای هسته‌ای در ایران طی دهه‌های آینده بالا است، اما چالش اساسی این است که در صورت دستیابی کشور به فناوری‌های نسل دوم یا در خوش‌بینانه‌ترین حالت، نسل سوم، در سطح جهانی راکتورهای نسل چهارم به مرحله تجاری‌سازی رسیده‌اند.

بحث و تفسیر

هم اکنون تدوین راهبردی که مرکب از بررسی تمامی پارامترهای تأثیرگذار در عرضه و تقاضای انرژی و تعیین راهکارهای مناسب جهت کاراتر نمودن انرژی و الگوی بهینه مصرف آن باشد، در رأس برنامه‌های زیربنایی بیش‌تر کشورهای جهان قرار دارد. در میان حامل‌های مختلف انرژی، انرژی هسته‌ای جایگاه ویژه‌ای دارد. ساخت نیروگاه هسته‌ای مستلزم سرمایه‌گذاری کلان و دوره بازگشت سرمایه‌ای طولانی‌مدت است، از این‌رو تأمین مالی این پروژه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کشورهای مختلف، بسته به سیاست‌های کلان اقتصادی و ظرفیت‌های مالی خود، راهکارهای متنوعی را برای تأمین مالی نیروگاه‌های هسته‌ای اتخاذ کرده‌اند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

امارات متحده عربی تا ۴۰ درصد از تأمین مالی مورد نیاز برای ساخت و راه‌اندازی نیروگاه‌های هسته‌ای جدید را از طریق سرمایه‌گذاران خارجی جذب می‌کند. مدل امارات متحده عربی برای مدیریت برنامه انرژی هسته‌ای خود، استفاده از پیمانکاران خارجی است و این کشور به دنبال بومی‌سازی این فناوری نیست. امارات با اتخاذ رویکردی متفاوت، از غنی‌سازی و بازفراوری داخلی صرف‌نظر کرده و با انعقاد توافقات بلندمدت، تأمین پایدار سوخت هسته‌ای، حمل‌ونقل ایمن و مدیریت سوخت مصرف‌شده را از طریق لیزینگ سوخت یا سایر روش‌های نوین تضمین کرده است. در ترکیه، عدم ارائه تضمین مالی از سوی دولت، موجب شکست اولیه برنامه‌های توسعه برق هسته‌ای شد، اما در نهایت، روسیه با پذیرش مدل ساخت، مالکیت و بهره‌برداری مسئولیت تأمین مالی و اجرای پروژه‌های نیروگاهی را بر عهده گرفت. در هند، شرکت انرژی هسته‌ای هند (NPCIL) مسئولیت طراحی، ساخت، راه‌اندازی و بهره‌برداری از نیروگاه‌های هسته‌ای حرارتی را بر عهده دارد. مدل تأمین مالی این نیروگاه‌ها مبتنی بر ۷۰ درصد سرمایه سهامداران و ۳۰ درصد تأمین مالی از طریق بدهی است. با این‌حال، NPCIL درصدد است با جذب سرمایه از سایر بخش‌های دولتی و شرکت‌های خصوصی، به‌ویژه شرکت ملی انرژی حرارتی (NTPC)، زمینه توسعه آینده انرژی هسته‌ای را فراهم سازد.

چین برای رسیدن به جایگاه کنونی در صنعت هسته‌ای، بیش از شش دهه سرمایه‌گذاری گسترده‌ای در توسعه فناوری و زیرساخت‌های مرتبط انجام داده است. پس از قطع همکاری با شوروی، این کشور با تخصیص منابع مالی قابل‌توجه، فرایند بومی‌سازی فناوری هسته‌ای را تسریع کرد که نتیجه آن ساخت نخستین راکتور کاملاً چینی، «گینشان»، بود. در ادامه، چین با خرید راکتورهای فرانسوی و بهره‌گیری از دانش فنی آن‌ها، به توسعه بومی این فناوری پرداخت. ساخت نیروگاه‌های آزمایشی در پاکستان نیز به افزایش مهارت و تجربه شرکت‌های چینی در این حوزه کمک کرد. علاوه بر این، خرید امتیاز فناوری راکتورهای آمریکایی، زمینه‌ساز توسعه راکتورهای نسل سوم در این کشور شد. در سال‌های بعد، ایمنی هسته‌ای به اولویت راهبردی چین تبدیل شد و تمامی راکتورهای ساخت این کشور ملزم به رعایت استانداردهای ملی و بین‌المللی ایمنی شدند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

پیشنهادهای سیاستی

با بررسی الزامات و چالش‌های سیاستی و عملیاتی توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در کشور پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

- یکی از چالش‌های اساسی در توسعه برق هسته‌ای، ماهیت بلندمدت تعهدات و پیامدهای این تصمیم است. با توجه به دوره زمانی طولانی برای ساخت و بهره‌برداری از نیروگاه‌های هسته‌ای، تغییر دولت‌ها و تحولات در رویکردهای حاکمیتی می‌تواند چالش‌های قابل‌توجهی برای سیاست‌گذاران و مجریان این حوزه ایجاد کند. بنابراین، تصمیم‌گیری در این زمینه باید با نگاهی فراتر از ملاحظات مقطعی و جناحی، در چارچوب منافع راهبردی و بلندمدت کشور انجام شود.

- یکیاز چالش‌های اساسی در سیاست‌گذاری توسعه برق هسته‌ای، تأثیرگذاری ملاحظات سیاسی داخلی بر حوزه‌ای کاملاً تخصصی با ابعاد فنی، اقتصادی و ژئوپلیتیکی پیچیده است. در حال حاضر، شناخت کافی از تمایزهای بنیادین میان نیروگاه‌های هسته‌ای و نیروگاه‌های فسیلی (سیکل بخار و سیکل ترکیبی) وجود ندارد. به‌ویژه آن‌که توسعه فناوری نیروگاه‌های هسته‌ای مستلزم زیرساخت‌هایی گسترده، الزامات ایمنی سخت‌گیرانه و زنجیره تأمین پیچیده‌ای است که با نیروگاه‌های متعارف قابل مقایسه نیست. این ناآگاهی منجر به برداشت‌های نادرست و تعمیم‌های غیرعلمی درباره قابلیت‌ها، چالش‌ها و الزامات بهره‌برداری از انرژی هسته‌ای شده است.

- نبود هماهنگی مؤثر میان بخش‌های مختلف دولت و سازمان انرژی اتمیکی دیگر از موانع اساسی در مسیر توسعه برق هسته‌ای به شمار می‌رود. این عدم همکاری در کنار فقدان یک طرح جامع و راهبردی با الزامات اجرایی مشخص، موجب کندی پیشرفت در تحقق اهداف این حوزه شده است. همچنین تاکنون مطالعات جامع و قابل استنادی درباره منابع توریم کشور، به‌عنوان یکی از سوخت‌های بالقوه راکتورهای هسته‌ای، انجام نشده است. با توجه به محدودیت منابع اورانیوم، ضروری است که مطالعات زمین‌شناسی دقیق برای ارزیابی و استحصال اقتصادی توریم در کشور صورت گیرد.

- محدودیت منابع اورانیوم در جهان، اهمیت بازفراوری سوخت مصرف شده در نیروگاه‌ها را دو چندان کرده است. با توجه به محدودیت منابع اورانیوم در کشور، این مهم در کشور توجیه اقتصادی نیز دارد و سوخت مصرف شده در نیروگاه بوشهر یکی از منابع برای بازفراوری به‌شمار می‌رود و تمهیدات ذخیره

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

این سوخت در کشور باید صورت گیرد. فناوری تولید سوخت MOX و REMIX امنیت انرژی هسته‌ای را افزایش می‌دهد لذا پیشنهاد می‌شود، تحقیق و توسعه در این زمینه در اولویت سازمان انرژی اتمی باشد و هدف خودکفایی در تأمین سوخت راکتورها در آینده با استفاده از این فناوری قابل دستیابی است. همچنین طرح چرخه بسته سوخت هسته‌ای شرکت روس‌اتم عملاً نیاز به سوخت جدید را بسیار محدود می‌کند، تحقیق و توسعه این طرح در کشور، امنیت انرژی هسته‌ای را بیش از پیش افزایش می‌دهد و می‌توان گفت، آینده صنعت انرژی هسته‌ای به این سمت پیش می‌رود.

- علاوه بر تأمین مالی مستقیم دولت و سرمایه‌گذاری‌های خارجی که هر یک سازِکارهای خاص خود را دارند، مدل‌های قراردادهای نظیر ساخت، بهره‌برداری، انتقال و واگذاری و ساخت، تملک و بهره‌برداری در بسیاری از کشورها برای توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای به کار گرفته می‌شوند. با این‌حال، شرایط خاص کشور مانع از جذب سرمایه‌گذاری خارجی در این حوزه شده است. در این راستا، اصلاح ساختاری اقتصاد برق کشور یکی از پیش‌نیازهای کلیدی برای جذب سرمایه‌گذاری خارجی در قالب مدل‌های BOO و BOT محسوب می‌شود. علاوه بر این، بهره‌گیری از سرمایه‌های مردمی و نقدینگی سرگردان در کشور، همراه با تخصیص مناسب منابع صندوق توسعه ملی به پروژه‌های زیربنایی، از جمله نیروگاه‌های هسته‌ای، می‌تواند به‌عنوان راهکارهای مؤثر تأمین مالی مورد توجه قرار گیرد.
- میزان مشارکت داخلی پیش‌بینی شده در احداث نیروگاه‌های برق هسته‌ای، طی دو دهه آتی، در بازه ۳۰-۲۰ درصد قرار دارد. تحقق این سطح از مشارکت، می‌تواند نقش مهمی در انتقال دانش فنی و کسب تجربه در حوزه ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای ایفا کند.با این‌حال، این امر به معنای وابستگی فناورانه ۷۰ تا ۸۰ درصدی به منابع خارجی خواهد بود، مسئله‌ای که نیازمند بررسی دقیق در چهارچوب سیاست‌های کلان کشور و برنامه‌های توسعه صنعتی و فناوری ملی است.

با توجه به افزایش تدریجی میزان مشارکت داخلی در بهره‌برداری تجاری نیروگاه بوشهر و جایگزینی موفق کارشناسان روسی با متخصصان ایرانی، پیشنهاد می‌شود برنامه‌ریزی راهبردی جهت بومی‌سازی کامل عملیات نگهداری و تعمیرات نیروگاه‌های هسته‌ای در دستور کار قرار گیرد. این هدف می‌تواند با افزایش ظرفیت‌های آموزشی، توسعه زیرساخت‌های فنی و گسترش همکاری‌های بین‌المللی برای انتقال دانش فنی محقق شود. همچنین، لازم است سیاست‌های حمایتی برای تقویت شرکت‌های داخلی فعال در حوزه خدمات فنی و مهندسی نیروگاه‌های هسته‌ای تدوین گردد تا استقلال فناورانه کشور در این حوزه تسریع شود.با توجه به چالش‌های فنی،

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

اقتصادی و اجرایی توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای، واقع‌بینانه‌ترین راهبرد در کوتاه‌مدت، تکمیل پروژه‌های در دست احداث در بوشهر است. در این راستا، تأمین پایدار سوخت هسته‌ای به‌عنوان یکی از الزامات اساسی توسعه این فناوری، اهمیت ویژه‌ای دارد. با درنظرگرفتن محدودیت منابع اورانیوم داخلی، بازفراوری سوخت مصرف‌شده نیروگاه بوشهر به‌عنوان یک منبع ارزشمند اورانیوم ثانویه، ضرورتی راهبردی محسوب می‌شود و ذخیره این سوخت در کشور باید در اولویت سیاست‌گذاری قرار گیرد.

افزایش سهم برق هسته‌ای علاوه بر تنوع‌بخشی به سبد تأمین برق، موجب ارتقای امنیت انرژی کشور نیز خواهد شد. با این‌حال، دستیابی به توسعه پایدار در این حوزه مستلزم اصلاح ساختار اقتصاد برق، کاهش نگاه صرفاً سیاسی و امنیتی به فناوری هسته‌ای، تضمین مسیرهای پایدار واردات اورانیوم مستقل از تنش‌های ژئوپلیتیکی، ایجاد مکانیزم‌های مؤثر تأمین مالی و برنامه‌ریزی تصمیم‌گیری‌های کلان به‌گونه‌ای است که تحت تأثیر تغییرات مدیریتی دچار نوسان نشود.

چشم‌انداز آینده صنعت هسته‌ای جهان، حرکت به‌سوی چرخه بسته سوخت هسته‌ای است، که در آن راکتورهای نوترون سریع و فناوری‌های پیشرفته بازفرآوری نقشی کلیدی ایفا می‌کنند. ایران نیز برای ورود به این مسیر، باید سرمایه‌گذاری پایدار در حوزه تحقیقات و توسعه فناوری راکتورهای نسل جدید را در دستور کار قرار دهد تا زمینه لازم برای پیوستن به کشورهای پیشرو در این عرصه فراهم شود.

مراجع

- احمدی، س. (۱۴۰۳). علل و آثار افزایش تمایل برای سرمایه‌گذاری روی نیروگاه‌های هسته‌ای در کشورهای صنعتی. *ماهنامه علمی «امنیت اقتصادی»، ۱۲(۳)*، ۶۹-۷۸.
- ایوبیان، ن.، و موسی رضایی، ر. (۱۳۹۷). مطالعه‌ی نقش مؤثر برق هسته‌ای در کاهش آلاینده‌های زیست محیطی و تغییر آب و هوا در مقایسه با سایر نیروگاه‌ها در ایران. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای، ۳۹(۲)*، ۴۹-۶۰.
- امامی، ک.، و اکبری، م. (۱۳۹۲). بررسی تاثیر رشد مصرف انرژی هسته‌ای بر رشد اقتصادی کشورهای منتخب. *اقتصاد مالی (اقتصاد مالی و توسعه)، ۷(۲۵)*، ۲۰۵-۲۱۹.
- جلالی, غلامرضا, غیاثوند, رضا, ذکی, حسین. (۱۳۹۸). مقاله پژوهشی: راهبردهای پدافند غیرعامل در توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در دوره پسابرجام. *راهبرد دفاعی*, ۱۷(۴), ۱۲۵-۱۴۸.
- رمضانی، ا.، و جعفری، ز. (۱۴۰۱). وضعیت توسعه کاربردهای فناوری هستهای در ایران و جهان ـ برق هسته‌ای. *مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی*.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

- شجاعی، م.، غازی، س.، و بیرانوند، م. (۱۳۹۲). انجام مطالعات اقتصادی و زیست محیطی نیروگاه‌های فسیلی و هسته‌ای و ارائه گزینه بهینه. *اقتصاد مالی (اقتصاد مالی و توسعه)، ۷(۲۲)*، ۲۷-۴۸.
- شیخ شعاعی، ح. (۱۴۰۰). نیروگاه‌های هسته‌ای در اقتصادهای نوظهور و سیاستگذاری منابع انسانی. *اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت و صنعت*.
- کاتب، ب.، عباسپور، م.، و عابدی، ز. (۱۴۰۳). ارایه ترکیب پایدار و بهینه نیروگاهی برق در ایران با تاکید بر جایگاه نیروگاه‌های هسته‌ای. *اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت و صنعت*.
- مشکات، س. م. (۱۴۰۲). احداث و به‌روزرسانی پروژه‌های تولید برق هسته‌ای: ارزیابی مدل‌های طراحی، تأمین و ساخت (EPC) و دارایی پایهٔ تحت کنترل (RAB). *مطالعات حقوق تطبیقی، ۱۴(۲)*، ۱۰۰۱-۱۰۲۲.
- ترابی اردکانی، ع.، و غفرانی، م. ب. (۱۳۸۹). رقابت‌پذیری اقتصادی نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران. *نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران (انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران)، ۷(۱)*، ۲۵-۳۳. SID.
- Aydın, C. İ. (2019). Nuclear energy debate in Turkey: Stakeholders, policy alternatives, and governance issues. *Energy Policy, 136,* 111041.
- Hickey, S. M., Malkawi, S., & Khalil, A. (2021). Nuclear power in the Middle East: Financing and geopolitics in the state nuclear power programs of Turkey, Egypt, Jordan and the United Arab Emirates. *Energy Research & Social Science, 74,* 101961.
- Ho, M., Obbard, E., Burr, P. A., & Yeoh, G. (2019). A review on the development of nuclear power reactors. *Energy Procedia, 160,* 459–466.
- https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors
- https://www.iea.org/countries/united-arab-emirates/electricity
- Jewell, J., & Ates, S. A. (2015). Introducing nuclear power in Turkey: A historic state strategy and future prospects. *Energy Research & Social Science, 10,* 273–282.
- Kingdon, J. W., & Thurber, J. A. (2011). *Agendas, Alternatives, and Public Policies*.
- Mathew, M. D. (2022). Nuclear energy: A pathway towards mitigation of global warming. *Progress in Nuclear Energy*, *143*(1), 104080.
- Nakagawa, N., Kosai, S., & Yamasue, E. (2022). Life cycle resource use of nuclear power generation considering total material requirement. *Journal of Cleaner Production*, *363*, 132530.
- Rachkov, V. I., Kalyakin, S. G., Kukharchuk, O. F., et al. (2014). From the first nuclear power plant to fourth-generation nuclear power installations [on the 60th anniversary of the World's First nuclear power plant]. *Thermal Engineering, 61,* 327–336.
- Rodríguez-Penalonga, L., & Moratilla Soria, B. Y. (2017). A review of the nuclear fuel cycle strategies and the spent nuclear fuel management technologies. *Energies, 10(8),* 1235.
- Srivastava, D., Kapoor, K. & Amarendra, G. Development of Advanced Nuclear Structural Materials for Sustainable Energy Development. (2022). *J Indian Inst Sci* 102, 391–404.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]

- Topal-Namli, H., & Namli, S. S. (2014). Nuclear power in Turkey: Pros and cons. *In The 2014 WEI International Academic Conference Proceeding.*
- Zeng, M., Wang, S., Duan, J., Sun, J., Zhong, P., & Zhang, Y. (2016). Review of nuclear power development in China: Environment analysis, historical stages, development status, problems and countermeasures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59,* 1369–1383.
- Zheng, X. , Deng, B. , Ou, W. and Gou, F. (2014) Conversion of U-238 and Th-232 Using a Fusion Neutron Source. *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 4, 222-227.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-06-01]