شهریور ۱۴۰۱
مسلسل: ۱۸۴۲۴

وضعیت توسعه کاربردهای فناوری هسته‌ای
در ایران و جهان ــ برق هسته‌ای

دفتر مطالعات انرژی، صنعت و معدن

شناسنامه گزارش	مرکز پژوهش‌ها مجلس شورای اسلامی	شماره مسلسل: ۱۸۴۲۴ کد موضوعی: ۳۱۰

عنوان گزارش: وضعیت توسعه کاربردهای فناوری هسته‌ای در ایران و جهان ـ برق هسته‌ای

نام دفتر: مطالعات انرژی، صنعت و معدن (گروه انرژی)

تهیه و تدوین‌کنندگان: ایمان رمضانی، زهرا جعفری

همکاران: علی صابری، احسان ترابی میرزایی

اظهارنظرکنندگان: حسین بیات، عسگر سرمست

ناظران علمی: محمدحسن معادی رودسری، حبیب‌الله ظفریان

ویراستار تخصصی: ـــــ

ویراستار ادبی: ـــــ

واژه‌های کلیدی:

۱. نیروگاه هسته‌ای

۲. نقشه راه صنعت هسته‌ای

۳. کاهش انتشار کربن

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۶/۱۶

به نام خدا

فهرست مطالب

چکیده ۱
مقدمه ۱
۱. فرایند تولید برق هسته‌ای ۲
۲. توسعه انرژی هسته‌ای در ایران ۴
۲-۱. تاریخچه صنعت هسته‌ای در ایران ۴
۲-۲. اسناد بالادستی مرتبط با توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای ۵
۲-۳. چشم‌انداز توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در کشور ۸
۳. جایگاه انرژی هسته‌ای در کشورهای جهان ۱۰
۳-۱. روند گذشته و وضعیت فعلی انرژی هسته‌ای در دنیا ۱۰
۳-۲. چشم‌انداز کوتاه‌مدت انرژی هسته‌ای در دنیا ۱۴
۳-۳. توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در کشورهای همسایه ایران ۱۶
۳-۴. فناوری راکتورهای هسته‌ای تولید برق ۱۹
۳-۵. چشم‌انداز بلندمدت انرژی هسته‌ای در دنیا ۲۲
جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۲۵
منابع و مآخذ ۲۶

وضعیت توسعه کاربردهای فناوری هسته‌ای در ایران و جهان ـ برق هسته‌ای

چکیده

با پایان جنگ جهانی دوم، استفاده صلح‌آمیز از انرژی هسته‌ای مورد توجه بسیاری از کشورهای جهان قرار گرفت. یکی از مهم‌ترین کاربردهای فناوری هسته‌ای، تولید برق از حرارت ناشی از واکنش هسته‌ای است. بهره‌برداری از کاربردهای صلح‌آمیز فناوری هسته‌ای ازجمله تولید برق هسته‌ای همواره مورد مطالبه مقام معظم رهبری (مدظله العالی) بوده است و بسیاری از اسناد بالادستی کشور و برخی قوانین مصوب مجلس شورای اسلامی ازجمله قوانین پنج‌ساله توسعه هم بر ایجاد نیروگاه‌های هسته‌ای تأکید کرده‌اند. در حال حاضر نیروگاه اتمی بوشهر با یک واحد نیروگاهی با ظرفیت هزار مگاوات در حال فعالیت بوده و واحدهای جدیدی نیز در حال ساخت هستند. بر این اساس، یکی از سیاست‌های حوزه انرژی کشور، افزایش سهم نیروگاه‌های هسته‌ای در سبد تولید برق است. مجموع ظرفیت نیروگاه‌های هسته‌ای در حال فعالیت جهان ۳۹۴ گیگاوات است که درمجموع ۱۰ درصد از انرژی برق تولیدی در جهان را تأمین می‌کنند و برخی کشورها برنامه‌هایی برای افزایش ظرفیت برق هسته‌ای دارند. امروزه اغلب راکتورهای هسته‌ای تولید برق جهان از نوع آب تحت فشار بوده و طرح‌های پیشرفته‌ای نیز در حال توسعه هستند که با ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود، در نیروگاه‌های هسته‌ای آینده مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، به‌نظر می‌رسد تولید برق از انرژی هسته‌ای به‌عنوان راهکاری جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، در کنار توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، مورد توجه بسیاری از کشورهای جهان است.

مقدمه

ازجمله چالش‌های صنعت برق کشور در سال‌های اخیر، عدم تکافوی ظرفیت تولید برق نیروگاه‌ها در مقایسه با میزان مصرف برق بوده که این امر باعث وقوع خاموشی‌هایی در فصول گرم سال شده است. ازطرف‌دیگر، به‌دلیل وابستگی زیاد نیروگاه‌های کشور به گاز طبیعی و ناترازی در تولید و مصرف این حامل انرژی، تأمین گاز نیروگاه‌ها در فصول سرد سال با اختلال روبه‌رو شده و نیروگاه‌های کشور ناچار به استفاده از سوخت‌های با آلایندگی بیشتر می‌شوند. یکی از راهکارهای حل این چالش، تنوع‌بخشی به سبد تولید برق کشور و بهره‌برداری بیشتر از سایر منابع تولید برق است. ازآنجایی‌که یکی منابع بالقوه تولید برق که کشورهای مختلفی به آن توجه کرده‌اند، استفاده از انرژی هسته‌ای است، بررسی روند توسعه این نیروگاه‌ها در ایران و جهان برای سیاستگذاری در راستای توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای حائز اهمیت است.

علاوه بر این، کاربردهای متعدد فناوری هسته‌ای در حوزه‌هایی چون پزشکی، صنعت و کشاورزی، در کنار مزایای اقتصادی، فناوری هسته‌ای را به‌عنوان یک فناوری استراتژیک برای کشور مطرح کرده است. خصومت ذاتی آمریکا و

متحدانش با جمهوری اسلامی ایران باعث شده تا ضمن ممانعت از دستیابی ایران به فناوری صلح‌آمیز هسته‌ای، به بهانه واهی، هزینه‌هایی را به کشور تحمیل کنند. در این راستا، دشمنان ایران همواره تلاش کرده‌اند تا برنامه هسته‌ای جمهوری اسلامی ایران را فاقد توجیه فنی و اقتصادی جلوه دهند. این در حالی است که بسیاری از کشورهای جهان تلاش‌های زیادی را برای بهره‌برداری از فناوری هسته‌ای به‌کار بسته‌اند و برنامه‌ریزی گسترده‌ای برای تولید برق هسته‌ای (به‌عنوان یکی از کاربردهای مهم فناوری هسته‌ای) داشته‌اند.

در گزارش حاضر پس از ذکر مقدمه‌ای درخصوص انرژی هسته‌ای و چرخه سوخت، روند حال و آینده تولید برق هسته‌ای در ایران مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، رویکرد کشورهای جهان در ارتباط با انرژی هسته‌ای مورد مطالعه قرار گرفته و فناوری‌های مختلف راکتورهای هسته‌ای تولید برق مختصراً معرفی شده‌اند تا در راستای سیاستگذاری جهت توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در کشور، مورد استفاده تصمیم‌گیران قرار گیرند.

۱. فرایند تولید برق هسته‌ای

در طول تاریخ، بشر همواره برای ادامه حیات به انرژی نیازمند بوده و در این راستا از منابع مختلفی برای تولید انرژی بهره برده است که ازجمله آنها می‌توان به سوزاندن چوب، زغال سنگ، نفت، گاز و برخی منابع دیگر اشاره کرد. اما در سال ۱۹۳۸ دو شیمیدان آلمانی موفق به کشف یک منبع انرژی جدید به نام شکافت هسته‌ای شدند که قابلیت تولید مقادیر قابل‌توجهی انرژی توسط جرم کوچکی از ماده را داشت. با شروع جنگ جهانی دوم در سال ۱۹۳۹، کشورهای درگیر جنگ درصدد استفاده از این منبع عظیم انرژی برای تولید سلاح برآمدند و بدین‌ترتیب تحقیقات گسترده‌ای در زمینه استفاده از انرژی هسته‌ای آغاز شد. اگرچه اولین بهره‌برداری از این انرژی در قالب دو بمب اتمی بود که ایالات متحده آمریکا در شهرهای هیروشیما و ناکازاکی ژاپن منفجر کرد و قدرت رعب‌آور انرژی هسته‌ای را به نمایش گذاشت، اما در سال‌های بعد از جنگ، استفاده از این منبع انرژی برای تولید برق و بسیاری کاربردهای صلح‌آمیز دیگر مورد توجه قرار گرفت.

در فرایند شکافت هسته‌ای، یک هسته شکافا[1] با جذب نوترون به دو هسته سبک‌تر شکافته شده و مقادیر زیادی انرژی آزاد می‌کند. انرژی آزاد شده از هر واکنش شکافت هسته‌ای حدود بیست میلیون برابر بیشتر از انرژی آزاد شده از واکنش سوختن گاز متان است و این چگالی انرژی بسیار بالا ویژگی منحصربه‌فرد انرژی هسته‌ای است. در هر واکنش شکافت، تعدادی نوترون نیز تولید خواهد شد که با برخورد به سایر هسته‌های شکافا، فرایندهای شکافت دیگری را در پی داشته و اصطلاحاً یک واکنش زنجیره‌ای را موجب می‌شوند. درصورتی‌که واکنش زنجیره‌ای شکافت به‌نحوی کنترل نشود، مقادیر قابل‌ملاحظه‌ای انرژی در کسری از ثانیه آزاد خواهد شد اما درصورتی‌که فقط یکی از نوترون‌های تولیدشده از شکافت هسته‌ای منجر به شکافت دیگری شود، تولید انرژی در یک فرایند پایدار اتفاق می‌افتد و کارکرد اصلی راکتورهای هسته‌ای نیز کنترل نوترون‌های تولیدی برای دستیابی به فرایند شکافت پایدار است.

از منظر کارکرد، راکتورهای هسته‌ای به دو دسته راکتورهای قدرت و راکتورهای تحقیقاتی تقسیم می‌شوند. در راکتورهای قدرت، هدف اصلی استفاده از انرژی ناشی از فرایند شکافت بوده و راکتورهای تحقیقاتی نیز برای تولید مواد

---

۱. Fissile Nuclide: برخي هسته‌هاي سنگين مانند اورانيوم-۲۳۳، اورانيوم-۲۳۵، پلوتونيم-۲۳۹ و پلوتونيم-۲۴۱ كه قابليت شكافت دارند.

پرتوزا، آزمایش مواد، پژوهش‌های کاربردی، آموزش و کاربردهایی از این دست مورد استفاده قرار می‌گیرند.

شایان ذکر است که سیاست‌های توسعه برق هسته‌ای محدود به راکتور و نیروگاه هسته‌ای نیست و برای سیاستگذاری پایدار باید همه بخش‌های زنجیره تولید که موسوم به چرخه سوخت هسته‌ای است، به‌صورت متوازن توسعه یابند. چرخه سوخت هسته‌ای عبارت است از مجموعه‌ای از فرایندهای صنعتی که در تولید برق از اورانیوم نقش دارند. فرایندهای اصلی درگیر در چرخه سوخت هسته‌ای به شرح زیر هستند:

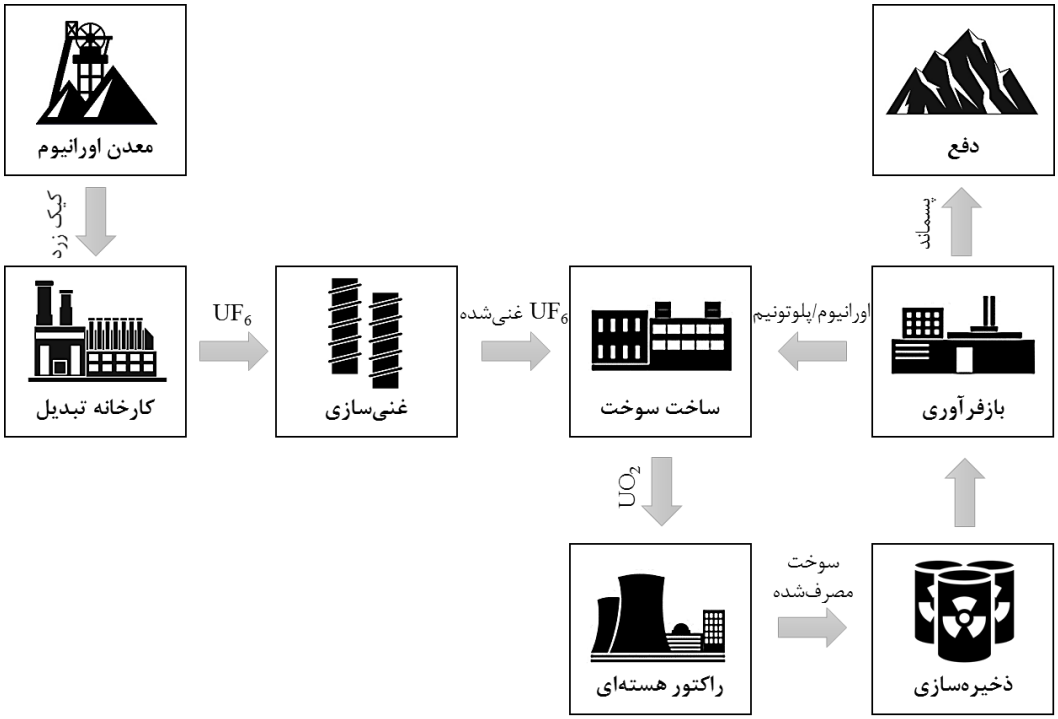
- **معدن‌کاری:** استخراج اورانیوم طبیعی از معدن، خرد کردن و انجام فرایندهای شیمیایی که به تولید کیک زرد (U_3O_8) منجر می‌شود.
- **تبدیل:** به‌منظور انجام فرایند غنی‌سازی، کیک زرد تولیدشده در مرحله قبل به UF_6 تبدیل می‌شود.
- **غنی‌سازی:** اورانیوم طبیعی معمولاً برای استفاده در راکتور مناسب نیست. به همین جهت، اورانیوم به شکل گاز UF_6 وارد کارخانه غنی‌سازی می‌شود تا مقدار هسته‌های اورانیوم-۲۳۵ نسبت به هسته‌های اورانیوم-۲۳۸ افزایش یابد. اگرچه روش‌های مختلفی برای غنی‌سازی اورانیوم وجود دارند، اما امروزه اغلب از روش سانتریفیوژ گازی برای این منظور استفاده می‌شود.
- **ساخت سوخت:** در این مرحله از چرخه سوخت، UF_6 غنی‌شده با طی فرایندهای مکانیکی به اکسید اورانیوم (UO_2) با چگالی بالا تبدیل شده و با قرارگیری در پوشش زیرکونیومی، در قالب مجتمع‌های سوخت درمی‌آید.
- **نیروگاه هسته‌ای:** با قرارگیری مجتمع‌های سوخت در قلب راکتور هسته‌ای، امکان تولید توان هسته‌ای فراهم خواهد شد. راکتورهای آب سبک متداول با ظرفیت ۱۰۰۰ مگاوات، سالانه حدود ۲۷ تن سوخت غنی‌شده نیاز دارند[۱].
- **ذخیره‌سازی:** پس از اتمام سیکل کاری راکتور هسته‌ای، سوخت مصرف‌شده برای جایگزینی با سوخت تازه از قلب راکتور خارج می‌شود. سوخت مصرف‌شده مقادیر زیادی تابش‌های هسته‌ای و حرارت تولید می‌کند و به همین دلیل پس از خروج از راکتور باید چند ماه در استخرهای ذخیره‌سازی نگهداری شود تا میزان تابش و حرارت تولیدی آن کاهش یابد.
- **دفع:** آخرین مرحله چرخه‌های سوخت باز، دفع سوخت مصرف‌شده راکتور در اعماق زمین است. بعد از خنک شدن سوخت مصرف‌شده در مرحله ذخیره‌سازی، به‌منظور حفظ افراد و محیط زیست از خطرات تشعشع‌های هسته‌ای، این سوخت برای سالیان دراز به‌صورت ایمن در تأسیسات دفع زیرزمینی نگهداری خواهد شد.
- **بازفرآوری:** سوخت مصرف‌شده نیروگاه‌های آب سبک معمولاً حاوی حدود ۱ درصد اورانیوم-۲۳۵، ۱ درصد پلوتونیم و ۳ درصد محصولات شکافت است. با بازفرآوری سوخت مصرف شده در چرخه‌های سوخت بسته، اورانیوم و پلوتونیم موجود در آن استخراج شده و مجدداً وارد کارخانه ساخت سوخت می‌شود تا به‌عنوان سوخت در قلب راکتور قرار گیرد. این عمل علاوه بر کاهش مصرف سوخت هسته‌ای و درنتیجه کاهش برداشت اورانیوم از معادن و ذخایر موجود، پسماندهای تولیدی را نیز کاهش می‌دهد.

شمای کلی از مراحل مختلف چرخه کامل سوخت هسته‌ای در شکل ۱ به نمایش درآمده است. تنها تفاوت یک چرخه سوخت بسته با یک چرخه سوخت باز، بازفرآوری سوخت مصرف شده است و در چرخه‌های سوخت باز، این مرحله وجود ندارد.

---

۱. ناگفته نماند که ظرفیت سوخت در راکتورهای آب سبک متداول حدود ۸۰ تن است که در هر سال فقط یك سوم از این سوخت با سوخت جدید جایگزین می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، سوخت وارد شده به راکتور تا سه سال در قلب راکتور باقي مي‌ماند.

شکل ۱. چرخه کامل (بسته) سوخت هسته‌ای



مأخذ: تلخیص نگارنده.

۲. توسعه انرژی هسته‌ای در ایران

۲-۱. تاریخچه صنعت هسته‌ای در ایران

با توسعه صنعت هسته‌ای در جهان و پیشرفت‌های روزافزون کشورهای پیشرفته در این زمینه، مقامات ایران نیز درصدد استفاده از این انرژی برآمدند. بنابراین برنامه هسته‌ای ایران قبل از انقلاب اسلامی و در سال ۱۳۳۵ با امضای تفاهم‌نامه‌ای با آمریکا در زمینه استفاده صلح‌آمیز از انرژی هسته‌ای[۱] آغاز شد. در همین سال‌ها ایران در مذاکرات مربوط به اساسنامه آژانس بین‌المللی انرژی اتمی نیز مشارکت داشته و نهایتاً در سال ۱۳۳۷ به عضویت این نهاد درآمد[۲]. در سال ۱۳۴۶ نیز در راستای تحقق طرح «اتم برای صلح» آمریکا، راکتور تحقیقاتی تهران احداث می‌شود. در این مدت تفاهم‌نامه‌های متعددی با کشورهای هسته‌ای مانند آمریکا، کانادا، فرانسه و آلمان منعقد شده و با رشد نسبی دانش هسته‌ای در کشور، سازمان انرژی اتمی در سال ۱۳۵۳ تأسیس شد[۳]. با انجام مطالعات جامع در زمینه طرح بلندمدت انرژی ایران که بنیاد پژوهشی استنفورد آمریکا انجام داد، نیاز ایران به برق هسته‌ای تا سال ۱۳۷۶ حدود ۲۴۶۰۰ مگاوات اعلام شد[۴] و بر این اساس قرارداد ساخت ۲ واحد نیروگاه هسته‌ای در بوشهر با شرکت آلمانی کرافتورک یونیون[۵] در سال ۱۳۵۴ به امضا رسید. در همین راستا، ۱۰ درصد از

۱. قانون مربوط به موافقت‌نامه همکاری بین دولت ایران و دولت ایالات متحده آمریکا راجع به استفاده‌های غیرنظامی از انرژی اتمی، مصوب مجلس شورای ملی، ۱۳۳۷/۱۱/۱۲، شماره ۴۱۰۳-۱۳۳۷/۱۲/۱۹ روزنامه رسمی.
۲. قانون مربوط به اساسنامه مؤسسه بین‌المللی انرژی اتمی، مصوب مجلس شورای ملی، ۱۳۳۷/۳/۶، شماره ۳۹۱۴-۱۳۳۷/۴/۳۱ روزنامه رسمی.
۳. قانون سازمان انرژی اتمی ایران، مصوب مجلس شورای ملی، ۱۳۵۳/۴/۱۶، شماره ۸۶۱۱-۱۳۵۳/۵/۹ روزنامه رسمی.
4. Schumacher, W., Rohan, D. & Falcone, C.; "A long-range energy plan for Iran", Stanford Research Institute, 1977.
5. Kraftwerk Union.

سهام کارخانه غنی‌سازی یورودیف فرانسه به‌منظور تأمین اورانیوم غنی شده مورد نیاز و همچنین ۱۵ درصد از سهام معدن اورانیوم راسینگ[1] در جمهوری نامیبیا خریداری شد.[2]

با پیروزی انقلاب اسلامی ایران و سپس آغاز جنگ تحمیلی، برنامه هسته‌ای ایران برای چند سال متوقف شد و بسیاری از قراردادهای گذشته با کشورهای خارجی نیز فسخ شدند. در سال ۱۳۶۰ با تصویب انتزاع سازمان انرژی اتمی از وزارت نیرو، این سازمان به یک سازمان مستقل تبدیل شد که مستقیماً زیر نظر نخست‌وزیر قرار می‌گرفت.[3] پس از پایان جنگ تحمیلی، ایران اقدام به مذاکره با طرف‌های غربی ازجمله آلمان برای تکمیل نیروگاه بوشهر و همچنین دریافت سهم اورانیوم غنی شده از کارخانه غنی‌سازی یورودیف کرد که به‌دلیل مخالفت آمریکا با شکست مواجه شد. به همین دلیل مذاکرات جدیدی با کشورهای چین و روسیه آغاز شد و در سال ۱۳۷۴ تکمیل واحد اول نیروگاه هسته‌ای بوشهر به روسیه سپرده شد. با توجه به مانع‌تراشی‌های کشورهای غربی، در این سال‌ها ایران تصمیم به توسعه صنعت غنی‌سازی اورانیوم گرفت که این مسئله واکنش شورای حکام آژانس را در پی داشت و مذاکرات انجام شده در این زمینه، به قبول داوطلبانه توقف برنامه غنی‌سازی توسط ایران منجر شد.[4] با روی کار آمدن دولت نهم، برنامه هسته‌ای ایران سرعت بیشتری گرفت و از سال ۱۳۸۴ تولید کیک زرد و غنی‌سازی اورانیوم آغاز شد. واکنش قدرت‌های غربی به این اقدام، ارجاع پرونده ایران به شورای امنیت سازمان ملل متحد و تصویب چند قطعنامه، شامل تحریم‌های افراد و شرکت‌های ایرانی بوده است.[5] در این بین واحد اول نیروگاه بوشهر توسط طرف روس تکمیل شده و این نیروگاه برای اولین بار در سال ۱۳۹۰ به شبکه سراسری برق متصل شد[6] و تاکنون نیز به‌عنوان تنها نیروگاه هسته‌ای کشور در حال فعالیت است. عملیات ساخت واحد دوم نیروگاه اتمی بوشهر هم در سال ۱۳۹۸ آغاز شده و براساس برنامه ساخت، پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۱۴۰۴ به بهره‌برداری برسد.[7] علاوه بر این، واحد سوم نیروگاه اتمی بوشهر نیز در مراحل اولیه ساخت است.

۲-۲. اسناد بالادستی مرتبط با توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای

توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای کشور در بیانات متعدد مقام معظم رهبری (مدظله العالی) و همچنین بسیاری از اسناد بالادستی کشور صراحتاً مورد تأکید قرار گرفته است. مقام معظم رهبری همواره بر حفظ و توسعه صنعت هسته‌ای کشور به‌صورت ویژه‌ای اشاره کرده‌اند که نشان‌دهنده مطالبات جدی ایشان در زمینه بهره‌برداری از کاربردهای صلح‌آمیز فناوری هسته‌ای است. طبق فرمایشات ایشان، به‌دلیل نیاز قریب‌الوقوع کشور به برق هسته‌ای و با توجه به حرکت کشورهای جهان به‌سمت بهره‌برداری بیشتر از این نوع انرژی، باید برنامه‌ریزی جهت ایجاد بیست یا سی هزار مگاوات ظرفیت برق هسته‌ای در کشور صورت گیرد.[8]

---

1. Rossing Uranium Limited.

۲. تارنمای شرکت اورانیوم راسینگ (https://www.rossing.com/shareholding.html).

۳. انتزاع سازمان انرژی اتمی از وزارت نیرو، مصوب هیئت وزیران، ۱۳۶۰/۱۲/۱۹.

۴. مرکز اسناد انقلاب اسلامی، ماجرای تعلیق هسته‌ای ایران، ۱۳۹۷/۱۱/۱۷، کد خبر: ۴۵۹۴.

۵. در این سال‌ها چهار قطعنامه در شورای امنیت سازمان ملل علیه ایران به تصویب رسید که شامل قطعنامه‌های ۱۷۳۷، ۱۷۴۷، ۱۸۰۳ و ۱۹۲۹ بود.

۶. شایان ذکر است که با توجه به تفاوت قابل توجه طراحي آلماني نيروگاه بوشهر با طراحي نيروگاه‌هاي هسته‌اي روسي و چالش‌هاي تركيب دو طراحي مختلف، تكميل واحد يكم نيروگاه بوشهر با مشكلاتي همراه بوده است.

۷. گزارش سالانه تولید و توسعه انرژی اتمی ایران، شرکت مادرتخصصي توليد و توسعه انرژی اتمی ایران، ۱۳۹۹.

۸. پایگاه اطلاع‌رسانی دفتر حفظ و نشر آثار حضرت آیت‌الله‌العظمی سیدعلی خامنه‌ای (مدظله‌العالی)، برگرفته از تارنماي: https://farsi.khamenei.ir

ضرورت توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در سیاست‌های مندرج در اسناد بالادستی مرتبط نیز مورد تأکید است. ازجمله این اسناد می‌توان به سیاست‌های کلی نظام در بخش انرژی، سند نقشه جامع علمی کشور، سند ملی راهبرد انرژی کشور و قوانین برنامه پنج‌ساله توسعه اشاره کرد. در ادامه، سیاست‌ها و الزامات مرتبط با توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای که در اسناد بالادستی مذکور ابلاغ شده‌اند، به تفکیک مورد بررسی قرار می‌گیرند.

- **سیاست‌های کلی نظام در بخش انرژی**

در بند «ب» سیاست‌های کلی نظام در بخش انرژی که مقام معظم رهبری در سال ۱۳۷۹ ابلاغ کردند، به «ایجاد تنوع در منابع انرژی کشور و استفاده از آن با رعایت مسائل زیست‌محیطی» اشاره شده است. برای دستیابی به این مهم لازم است تا منابع انرژی کشور به سوخت‌های فسیلی محدود نشود و در کنار آن، سایر منابع انرژی سازگار با محیط زیست نیز مورد بهره‌برداری قرار گیرند. در بخش دیگری از این سیاست‌ها، استفاده از انرژی‌های هسته‌ای و تجدیدپذیر برای نیل به هدف مذکور توصیه شده است. نکته‌ای که باید درباره سیاست‌های کلی نظام در زمینه انرژی هسته‌ای به آن توجه کرد این است که این سیاست‌ها صرفاً به ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای بسنده نکرده و بر کسب دانش و فناوری و تربیت نیروی متخصص مورد نیاز تأکید می‌کنند.

سیاست‌های کلی نظام در بخش انرژی هسته‌ای عبارتند از:

ـ تلاش برای کسب فناوری و دانش هسته‌ای و ایجاد نیروگاه‌های هسته‌ای به‌منظور تأمین سهمی از انرژی کشور و تربیت نیروهای متخصص،

ـ گسترش فعالیت‌های پژوهشی و تحقیقاتی در امور انرژی‌های گداخت هسته‌ای و مشارکت و همکاری علمی و تخصصی در این زمینه.

- **سند نقشه جامع علمی کشور**

سند نقشه جامع علمی کشور که در سال ۱۳۸۹ به تصویب شورای عالی انقلاب فرهنگی رسیده است، یکی از اهداف بخشی نظام علم، فناوری و نوآوری کشور را «کسب دانش طراحی و ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای و دستیابی به دانش انرژی گداخت» عنوان می‌کند. همچنین در این سند فناوری هسته‌ای (ازجمله شکافت و گداخت) در دسته اولویت‌های (الف) علم و فناوری کشور قرار گرفته است. به‌عبارت‌دیگر از دید این سند، فناوری هسته‌ای یکی از حوزه‌های فناوری است که مستلزم بیشترین تخصیص منابع و توجه مدیران و مسئولان کشور است.

- **سند ملی راهبرد انرژی کشور**

در سند ملی راهبرد انرژی کشور مصوب ۱۳۹۶ شورای عالی انرژی، در کنار سایر منابع تولید انرژی به راهبردهای حوزه انرژی هسته‌ای نیز توجه شده است. طبق این سند، راهبردهای بخش انرژی هسته‌ای عبارتند از:

۱. استقرار استانداردهای ملی و بین‌المللی ایمنی هسته‌ای و پرتویی و انجام نظارت و ارزیابی‌های لازم،

۲. تهیه و تأمین اقتصادی مواد اولیه و سوخت مورد نیاز راکتورهای هسته‌ای،

۳. گسترش و تعمیق پژوهش‌های بنیادی و کاربردی به‌منظور دستیابی به فناوری‌های نوین نیروگاه‌های هسته‌ای از طریق تعاملات لازم بین‌المللی،

۴. ارتقای سطح بومی‌سازی دانش فنی و بهبود فناوری‌های موجود و دستیابی به فناوری‌های نوین هسته‌ای و

توسعه کاربرد آن در بخش‌های مختلف،

۵. تعامل سازنده و مؤثر با آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، سازمان‌ها و نهادهای منطقه‌ای و بین‌المللی به‌منظور تبادل اطلاعات و استفاده از فرصت‌های علمی، فنی و مالی در صنعت هسته‌ای.

بنابراین در سند راهبرد انرژی کشور نیز توجه ویژه‌ای به دستیابی به فناوری و بومی‌سازی صنعت هسته‌ای شده و برخلاف سایر اسناد بالادستی که بر حوزه برق هسته‌ای متمرکز هستند، این سند توسعه کاربردهای انرژی هسته‌ای در بخش‌های مختلف را هم مورد تأکید قرار داده است.

- **قوانین برنامه پنج‌ساله توسعه جمهوری اسلامی ایران**

در قانون برنامه پنج‌ساله ششم توسعه مصوب سال ۱۳۹۶ برخی مسائل مرتبط با نیروگاه‌های هسته‌ای، ازجمله تدوین طرح ملی مقابله با شرایط اضطراری نیروگاه‌ها و تأسیسات هسته‌ای[۱] و همچنین ارتقای پذیرش اجتماعی در دستیابی به برق هسته‌ای[۲]، مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که در قانون پنجم توسعه مصوب سال ۱۳۸۹ تکالیف مختلفی جهت استفاده صلح‌آمیز از انرژی هسته‌ای برای تولید برق عنوان شده بود. تکالیف مربوط به استفاده صلح‌آمیز از انرژی هسته‌ای در قانون پنجم توسعه (بند «ب» ماده (۱۳۵)) به شرح زیر بوده است:

۱. تدوین برنامه بیست‌ساله تولید برق از انرژی هسته‌ای،

۲. مکان‌یابی برای احداث نیروگاه‌های هسته‌ای و توسعه چرخه سوخت هسته‌ای،

۳. استفاده از روش‌های مختلف سرمایه‌گذاری داخلی و خارجی برای احداث نیروگاه‌های هسته‌ای،

۴. همکاری و بهره‌گیری از صاحبان دانش فنی سازنده نیروگاه هسته‌ای جهت ساخت نیروگاه در کشور،

۵. برنامه‌ریزی برای تأمین سوخت مورد نیاز نیروگاه‌های هسته‌ای در داخل کشور،

۶. برنامه‌ریزی جهت احداث راکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی در کشور در راستای اهداف صلح‌آمیز هسته‌ای و به‌منظور تأمین و تهیه رادیوداروها، فعالیت‌های تحقیقاتی و کشاورزی هسته‌ای،

۷. تهیه برنامه جامع اکتشاف اورانیوم و تأمین مواد اولیه سوخت هسته‌ای در داخل کشور.

علاوه‌بر اسناد بالادستی ذکر شده، برخی قوانین مصوب مجلس نیز راهبردهایی را جهت توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای تعیین کرده‌اند. ازجمله این قوانین می‌توان به قانون دستیابی به فناوری هسته‌ای صلح‌آمیز اشاره کرد. این قانون که در سال ۱۳۸۴ و در قالب یک ماده‌واحده به تصویب نمایندگان مجلس شورای اسلامی رسید، دولت را موظف به «برخوردار نمودن کشور از فناوری هسته‌ای صلح‌آمیز ازجمله تأمین چرخه سوخت جهت بیست هزار مگاوات برق هسته‌ای» می‌کند. طبق این قانون، تکلیف مذکور باید «در چارچوب معاهده منع تولید و تکثیر سلاح‌های هسته‌ای (N.P.T[۳]) و قوانین بین‌المللی با بهره‌گیری از اندیشمندان، محققین و امکانات داخلی و بین‌المللی و همچنین پیگیری اجرای تعهدات آژانس بین‌المللی انرژی اتمی و کشورهای برخوردار از این فناوری در برابر کشورهای عضو معاهده منع تولید و تکثیر سلاح‌های هسته‌ای (N.P.T)» انجام شود.

---

۱. بند «الف» ماده (۴۱) قانون برنامه ششم توسعه: در راستای اجراء و پیشبرد سیاست‌های کلی برنامه ششم و اقتصاد مقاومتی، سازمان انرژی اتمی مکلف است با رعایت اصول پدافند غیرعامل نسبت به تدوین طرح ملی مقابله با شرایط اضطراری نیروگاه‌ها و تأسیسات هسته‌ای با همکاری سازمان، وزارتخانه‌های دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح، کشور و امور خارجه و سازمان پدافند غیرعامل و سایر دستگاه‌های ذی‌ربط اقدام کند و آن را به تصویب شورای عالی امنیت ملی کشور برساند.

۲. بند «پ» ماده (۴۸) قانون برنامه ششم توسعه: از طریق سازمان انرژی اتمی ایران در راستای ارتقای آگاهی‌ها و پذیرش اجتماعی و مشارکت‌افزایی در دستیابی به توسعه پایدار برق هسته‌ای و هماهنگی اجتماعی خود اقدامات لازم را طبق قوانین و مقررات مربوطه در این خصوص، با اولویت مناطق دارای ساختگاه هسته‌ای به‌عمل آورد.

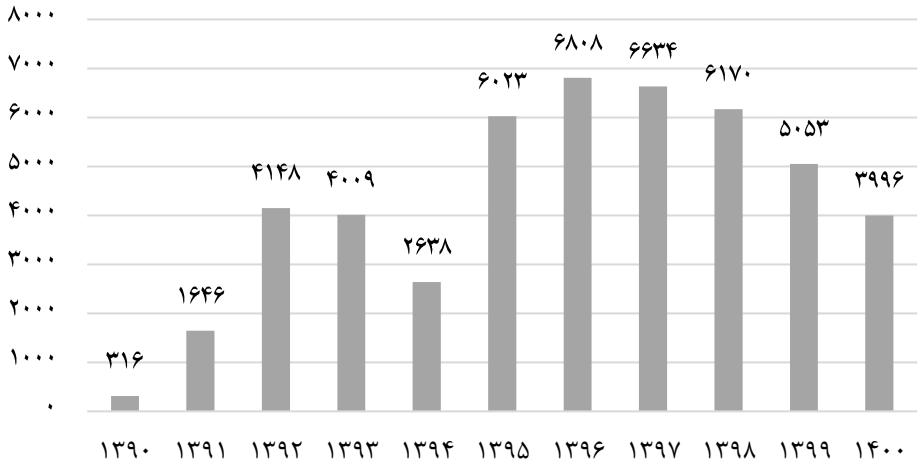
3. Non-Proliferation of Nuclear Weapons Treaty (NPT)

۳-۲. چشم‌انداز توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در کشور

در حال حاضر، ظرفیت برق هسته‌ای کشور حدود ۱۰۰۰ مگاوات است که توسط واحد اول نیروگاه هسته‌ای بوشهر، به‌عنوان تنها نیروگاه هسته‌ای کشور، تأمین می‌شود. واحد اول نیروگاه هسته‌ای بوشهر از سال ۱۳۹۰ در حال فعالیت بوده و تاکنون مانع از انتشار حدود ۴۶ میلیون تن انواع گازهای آلاینده زیست‌محیطی شده و همچنین به‌واسطه فعالیت این نیروگاه، معادل ۱۳/۹ میلیارد متر مکعب گاز طبیعی نیز در مصرف سوخت‌های فسیلی صرفه‌جویی شده است.[۱] میزان برق تحویلی به شبکه توسط این نیروگاه از زمان بهره‌برداری (سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰) به‌صورت نمودار ۱ است. پس از اتمام مرحله راه‌اندازی، بهره‌برداری تجاری از نیروگاه هسته‌ای بوشهر از مهرماه ۱۳۹۲ آغاز شده است. خاموشی‌های برنامه‌ریزی شده این نیروگاه شامل سوخت‌گذاری سالانه و تعمیرات است که به کاهش تولید برق نیروگاه در برخی سال‌ها منجر می‌شود. علاوه بر این، در شرایط خاصی امکان خاموشی برنامه‌ریزی‌نشده نیروگاه هم وجود دارد. این عوامل باعث می‌شود که میزان برق تحویل داده شده به شبکه در سال‌های مختلف با فراز و فرودهایی همراه باشد.

نمودار ۱. میزان برق تحویلی به شبکه توسط نیروگاه اتمی بوشهر در سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰[۲]

(میلیون کیلووات ساعت)



مأخذ: شرکت مادرتخصصی تولید و توسعه انرژی اتمی ایران.

یک عامل مهم در راستای برنامه‌ریزی جهت توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای، میزان نیاز کشور به برق هسته‌ای در مقایسه با سایر منابع تأمین برق است. ازاین‌رو باید ضمن بررسی دقیق مزایا (به‌عنوان مثال مزایای اقتصادی، امنیت انرژی، زیست‌محیطی و غیره) و چالش‌های بالقوه (ازجمله تأمین مواد مورد نیاز، زیرساخت‌های موجود و مسائل سیاسی) در مسیر توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در کشور، سهم بهینه برق هسته‌ای در سبد تولید برق کشور در بازه‌های زمانی مختلف تخمین زده شود. شایان ذکر است که تاکنون مطالعات پراکنده‌ای در رابطه با سهم برق هسته‌ای در سبد تولید

---

۱. شرکت مادرتخصصی تولید و توسعه انرژی اتمی ایران، گزارش سالانه تولید و توسعه انرژی اتمی ایران، ۱۳۹۹.

۲. آمارهای اعلام شده درخصوص میزان برق تحویلی به شبکه (تولید ویژه) ازسوی سازمان انرژی اتمی با آمارهای اعلامی وزارت نیرو اختلاف دارد. برای مثال در سال ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۰ به‌ترتیب رقم‌های ۲۹۴۹/۷، ۶۷۱۰، ۷۵۱۳، ۷۳۲۹/۵، ۶۷۵۸، ۵۴۶۲/۲، ۴۳۶۰ میلیون کیلووات‌ساعت اعلام شده است که متفاوت از آمارهای اعلام شده ازسوی سازمان انرژی اتمی و اطلاعات نمایش داده شده در نمودار ۱ است.

برق کشور انجام شده است. اولین مطالعه قبل از انقلاب اسلامی و توسط بنیاد پژوهشی استنفورد صورت گرفته و پس از انقلاب اسلامی نیز مطالعات مختلفی در این زمینه انجام شده که نتایج هریک از آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مطالعات انجام شده در زمینه سهم برق هسته‌ای در سبد تولید برق کشور

مجری	سال انتشار	بازه زمانی مطالعه	پیش‌بینی ظرفیت تولید برق در انتهای بازه (مگاوات)	پیش‌بینی ظرفیت تولید برق هسته‌ای در انتهای بازه (مگاوات)
بنیاد پژوهشی استنفورد	۱۳۵۳	۱۳۵۴ تا ۱۳۷۶	۲۴۰۰۰ (رشد اقتصادی کم) ۵۹۰۰۰ (رشد اقتصادی زیاد)	۹۰۰۰ (رشد اقتصادی کم) ۲۴۶۰۰ (رشد اقتصادی زیاد)
دانشگاه صنعتی شریف	۱۳۷۵	۱۳۶۸ تا ۱۴۰۰	۵۲۰۰۰	۱۱۱۶۰
سازمان انرژی اتمی	-	۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰	۶۴۵۹۶ (رشد اقتصادی کم) ۷۴۸۱۲ (رشد اقتصادی متوسط) ۸۰۰۰۰ (رشد اقتصادی زیاد)	۴۰۰۰ (رشد اقتصادی کم) ۷۰۰۰ (رشد اقتصادی متوسط) ۱۰۰۰۰ (رشد اقتصادی زیاد)
پژوهشگاه نیرو	۱۳۸۶	۱۳۸۴ تا ۱۴۰۵	۱۲۳۱۰۴	۲۰۰۰۰ تا ۶۷۰۰۰
شرکت تولید و توسعه انرژی اتمی	۱۳۹۱	۱۳۸۹ تا ۱۴۱۰	۱۲۲۶۵۹	۵۰۷۰

مأخذ: شرکت مادرتخصصی تولید و توسعه انرژی اتمی ایران.

علاوه‌براین، سند تراز تولید و مصرف گاز طبیعی در کشور تا افق ۱۴۲۰ که در سال ۱۳۹۹ به تصویب شورای عالی انرژی رسید، افزایش استفاده از نیروگاه‌های هسته‌ای را به‌عنوان یکی از سیاست‌های صرفه‌جویی در مصرف گاز طبیعی عنوان می‌کند. طبق این سند، به‌منظور تأمین امنیت عرضه گاز طبیعی و در کنار سایر اقدامات، افزایش ظرفیت نیروگاه‌های هسته‌ای به حدود ۳۰۰۰ مگاوات تا سال ۱۴۱۰ و حدود ۸۰۰۰ مگاوات تا افق ۱۴۲۰ هدف‌گذاری شده است. بر این اساس، روند توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در کشور تا افق ۱۴۲۰ به‌صورت جدول ۲ است.

جدول ۲. روند افزایش ظرفیت برق هسته‌ای کشور تا افق ۱۴۲۰

سال	۱۳۹۷	۱۴۰۰	۱۴۰۶	۱۴۱۵	۱۴۲۰
ظرفیت برق هسته‌ای (مگاوات)	۱۰۵۰	۱۰۵۰	۳۱۵۰	۵۲۵۰	۸۴۰۰

مأخذ: سند تراز تولید و مصرف گاز طبیعی در کشور تا افق ۱۴۲۰.

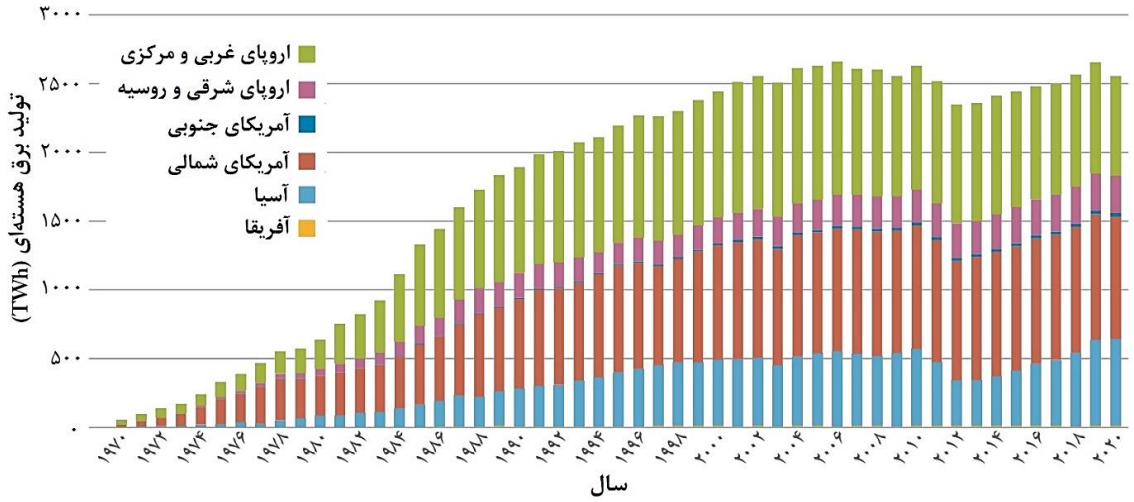
با توجه به آنچه گفته شد، ظرفیت بهینه انرژی هسته‌ای در سبد تولید برق کشور در مطالعات مختلف متمایز بوده است. اما به‌نظر می‌رسد برآورد حداقلی از ظرفیت برق هسته‌ای مورد نیاز کشور، به میزان ۸۴۰۰ مگاوات تا سال ۱۴۲۰ باشد. علاوه‌براین، در بند «ح» تبصره «۱۵» قانون بودجه سال ۱۴۰۱ کل کشور به دولت اجازه داده شده است تا نسبت به احداث ۱۰۰۰۰ مگاوات نیروگاه هسته‌ای اقدام کند. اما با توجه به عدم ابلاغ شیوه‌نامه اجرایی این بند، بازه زمانی مدنظر برای ایجاد ظرفیت مذکور مشخص نیست.

۳. جایگاه انرژی هسته‌ای در کشورهای جهان

۳-۱. روند گذشته و وضعیت فعلی انرژی هسته‌ای در دنیا

با پایان جنگ جهانی دوم، استفاده از انرژی هسته‌ای برای مقاصد صلح‌آمیز، خصوصاً تولید برق، مورد توجه قرار گرفت. در این راستا، اولین راکتور تولید برق با نام EBR-1 در سال ۱۹۵۱ در کشور آمریکا و در مقیاس آزمایشگاهی به بهره‌برداری رسید. اولین برق هسته‌ای در مقیاس تجاری هم در سال ۱۹۵۴ در اتحاد جماهیر شوروی وارد شبکه شد. در ادامه، کشورهای انگلستان، فرانسه، آلمان و کانادا به ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای پرداختند و در سال‌های بعد، این نیروگاه‌ها با سرعت زیادی توسعه یافتند. سیر زمانی تولید برق هسته‌ای در مناطق مختلف جهان در نمودار ۲ قابل مشاهده است.

نمودار ۲. روند تولید برق هسته‌ای در مناطق مختلف جهان (تراوات ساعت)



Source: World Nuclear Association, World Nuclear Performance Report, 2021.

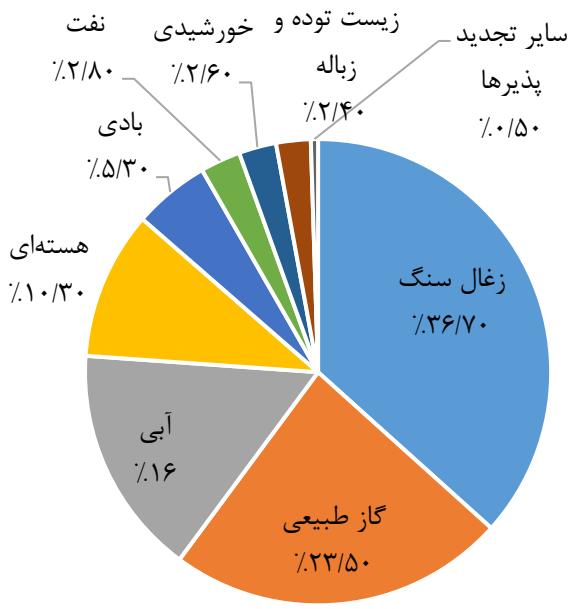
ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ با شتاب بالایی صورت گرفته است. اما وقوع حوادث هسته‌ای تری مایل آیلند[1] (سال ۱۹۷۹) و چرنوبیل[2] (سال ۱۹۸۶) و همچنین کاهش قیمت نفت، از تمایل کشورها به ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای بیشتر می‌کاهد. با این وجود، اغلب کشورهای دارای نیروگاه هسته‌ای، در سال‌های بعد میزان تولید برق هسته‌ای خود را در سطح تقریباً ثابتی نگاه داشته‌اند.

در حال حاضر، حدود ۱۰ درصد از برق جهان را انرژی هسته‌ای تأمین می‌کند. این میزان برق هسته‌ای توسط ۴۴۰ راکتور قدرت هسته‌ای با مجموع ظرفیت ۳۹۴ گیگاوات در ۳۲ کشور تولید می‌شود.[3] به‌منظور مقایسه، در نمودار ۳، سهم انرژی برق تولیدی از منابع مختلف ارائه شده است. در سال‌های اخیر، بیشترین برق تولیدی جهان از منابع

1. Three Mile Island
2. Chernobyl
3. International Atomic Energy Agency (IAEA), Power Reactor Information System (PRIS), 2022.

زغال سنگ تأمین شده است. بعد از زغال سنگ، مهم‌ترین منابع تولید برق، گاز طبیعی و برق‌آبی هستند و در میان منابع تولید برق، انرژی هسته‌ای جایگاه چهارم را دارد. ظرفیت منصوبه نیروگاه‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، بادی، جزر و مد و زمین گرمایی توسعه پرشتابی داشته‌اند، اما مجموع سهم آنها از انرژی برق تولیدی جهان در سال ۲۰۱۹ به ۱۰ درصد نمی‌رسد. شایان توجه است که بیشترین سهم انرژی هسته‌ای در تولید برق جهان مربوط به سال ۱۹۹۶ به میزان ۱۷/۵ درصد بوده است.

نمودار ۳. تولید برق جهان در سال ۲۰۱۹ به تفکیک منابع



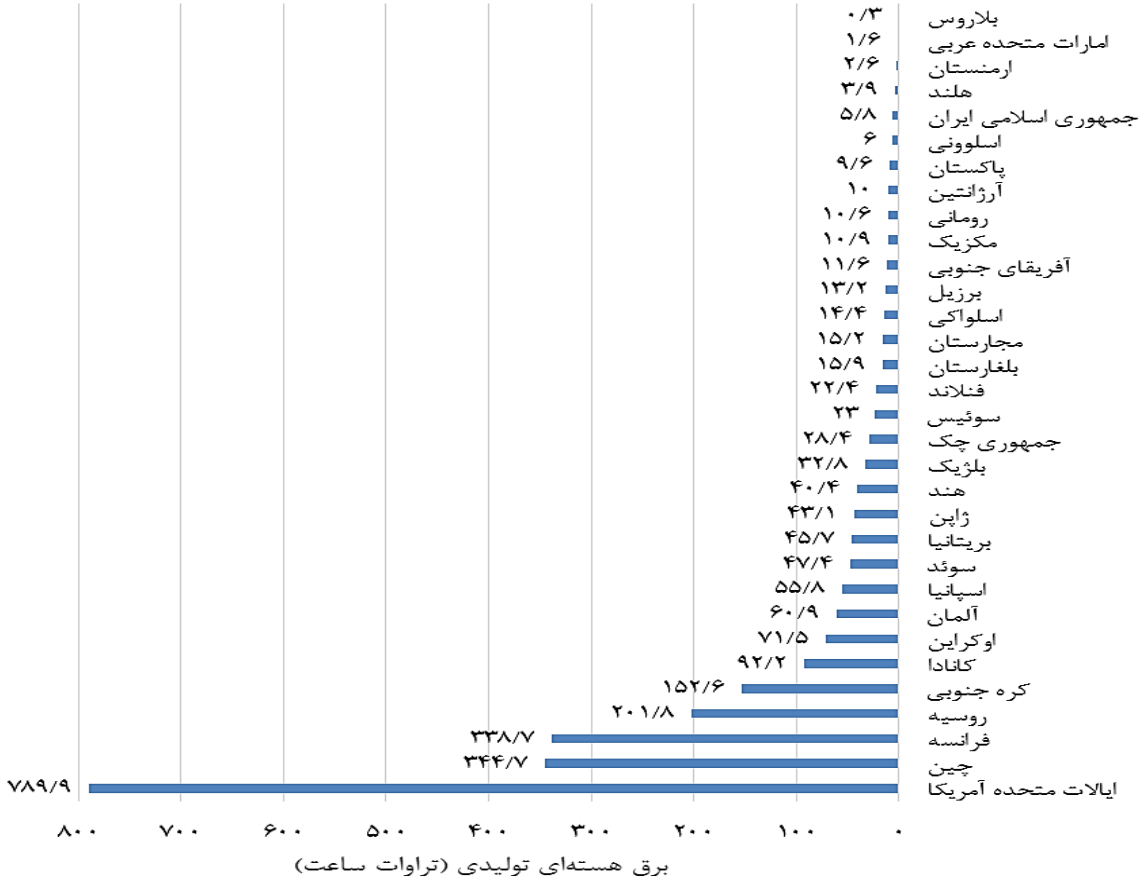
Source: International Energy Agency (IEA), Electricity Information: Overview, 2021.

از میان ۳۲ کشور دارای نیروگاه‌های هسته‌ای، میزان تولید برق هسته‌ای ایالات متحده آمریکا با اختلاف زیادی از سایر کشورهای جهان بیشتر است. توسعه پرشتاب نیروگاه‌های هسته‌ای در کشور چین باعث شده تا در سال ۲۰۲۰ میزان تولید برق هسته‌ای در این کشور از کشور فرانسه بیشتر شده و به دومین تولیدکننده برق هسته‌ای جهان تبدیل شود. کل برق هسته‌ای تولیدی جهان در سال ۲۰۲۰ حدود ۲۵۰۰ تراوات ساعت بوده و در نمودار ۴، به تفکیک ۳۲ کشور دارای نیروگاه هسته‌ای نشان داده شده است. با شروع بهره‌برداری از نیروگاه اتمی بوشهر در سال ۱۳۹۰، جمهوری اسلامی ایران نیز به جمع کشورهای صاحب نیروگاه هسته‌ای پیوسته و در سال ۲۰۲۰ به میزان ۵/۸ تراوات ساعت برق هسته‌ای تولید کرده است.

برای بررسی سیاست‌های کلی کشورها در مورد استفاده از برق هسته‌ای، توجه به میزان برق هسته‌ای تولیدی کافی نیست؛ چراکه میزان کل برق تولیدی توسط کشورها متفاوت بوده و لازم است تا سهم برق هسته‌ای نسبت به کل برق تولیدی در هر کشور تعیین شود. به‌عنوان مثال، اگرچه ایالات متحده آمریکا بیشترین میزان برق هسته‌ای را در جهان تولید می‌کند، اما این میزان برق هسته‌ای، تنها ۱۹/۷ درصد از کل برق تولیدی این کشور را شامل می‌شود. سهم برق هسته‌ای در سبد تولید برق کشورهای دارای نیروگاه هسته‌ای در سال ۲۰۲۰، در

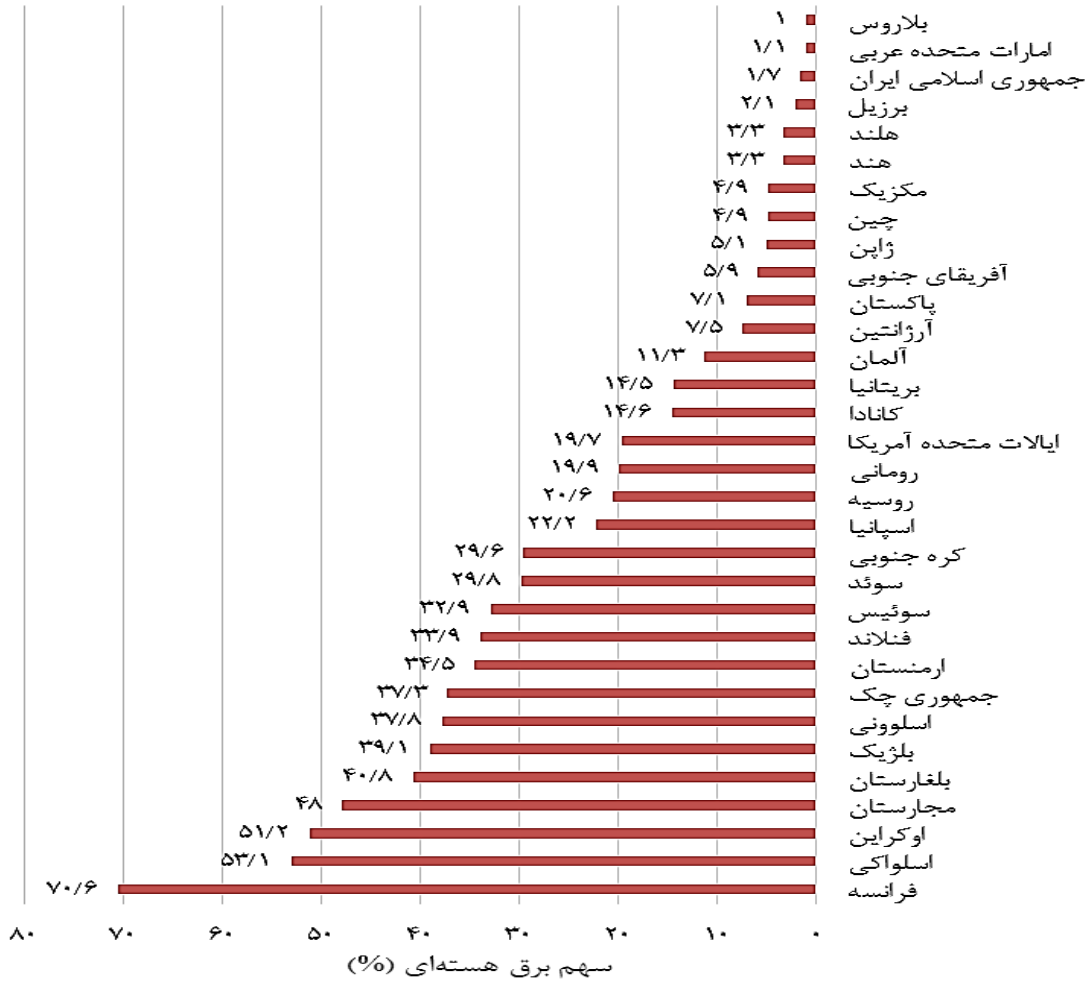
نمودار **۵** نشان داده شده است. از میان کشورها، بیشترین سهم انرژی هسته‌ای در سبد تولید برق به کشور فرانسه با بیش از ۷۰ درصد برق هسته‌ای تعلق دارد. در قاره آسیا نیز بزرگ‌ترین تولیدکننده برق هسته‌ای کشور چین است و با توجه به میزان زیاد کل برق تولیدی این کشور، سهم برق هسته‌ای فقط ۴/۹ درصد است. شایان ذکر است که تا قبل از حادثه فوکوشیما، کشور ژاپن بیشتر از ۲۵ درصد برق خود را از طریق انرژی هسته‌ای تأمین می‌کرد. به‌دلیل بازبینی ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای پس از حادثه فوکوشیما، بسیاری از راکتورهای هسته‌ای ژاپن خاموش شدند و لذا در سال ۲۰۲۰ سهم برق هسته‌ای در سبد تولید برق این کشور به ۵/۱ درصد کاهش یافته است.

نمودار ۴. میزان برق هسته‌ای تولیدی در سال ۲۰۲۰ به تفکیک کشورهای دارای نیروگاه هسته‌ای



Source: International Atomic Energy Agency (IAEA), Power Reactor Information System (PRIS), 2020.

نمودار ۵. سهم برق هسته‌ای در سبد تولید برق کشورهای دارای نیروگاه هسته‌ای در سال ۲۰۲۰

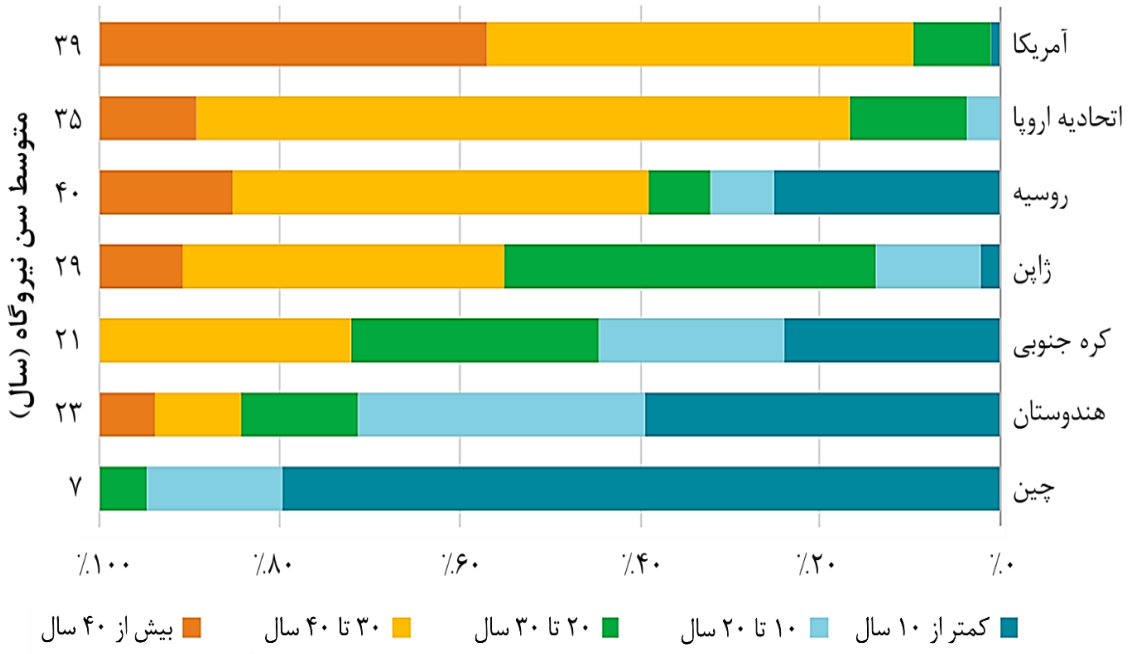


مأخذ: همان.

سن نیروگاه‌های هسته‌ای در کشورهای مختلف، بیانگر روند رشد نیروگاه‌های هسته‌ای در این کشورهاست. در نمودار ۶ سن نیروگاه‌های هسته‌ای در برخی کشورهای پیشرو در این زمینه ارائه شده است. طبق این نمودار، سن اغلب نیروگاه‌های آمریکا و روسیه بیش از ۴۰ سال است. متوسط سن نیروگاه‌های هسته‌ای در کشورهای اروپایی نیز ۳۵ سال است. با وجود بالا بودن عمر نیروگاه‌های هسته‌ای در روسیه، بیش از ۲۰ درصد نیروگاه‌های هسته‌ای این کشور عمری کمتر از ۱۰ سال دارند که نشان‌دهنده رویکرد این کشور برای ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای جدید بوده است. ازسویی دیگر، آمریکا و اتحادیه اروپا به بهره‌برداری از نیروگاه‌های موجود و پیاده‌سازی طرح‌های افزایش طول عمر نیروگاه تمرکز کرده‌اند. در کشورهای آسیایی نظیر ژاپن، کره جنوبی، هندوستان و چین، اغلب نیروگاه‌های هسته‌ای سن کمتر از ۲۰ سال دارند که نشان می‌دهد این کشورها در سال‌های اخیر در حال گسترش نیروگاه‌های هسته‌ای خود بوده‌اند. شایان ذکر است که به‌طورکلی، طور عمر استاندارد نیروگاه‌های هسته‌ای قدیمی ۴۰ سال و طول عمر نیروگاه‌های جدید ۶۰ سال است و امکان افزایش آن با انجام برخی اصلاحات وجود دارد.[1]

1. International Energy Agency (IEA), Projected Costs of Generating Electricity, 2020.

نمودار ۶. سن نیروگاه‌های هسته‌ای در کشورهای منتخب



Source: International Energy Agency (IEA), Nuclear Power in a Clean Energy System, 2019.

۲-۳. چشم‌انداز کوتاه‌مدت انرژی هسته‌ای در دنیا

به‌منظور بررسی سیاست‌های کوتاه‌مدت کشورهای جهان در توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای، فهرست نیروگاه‌های هسته‌ای در حال ساخت در کشورهای مختلف جهان در جدول ۳ آمده است. درحال حاضر ۱۷ کشور در حال ساخت ۵۴ نیروگاه هسته‌ای جدید با مجموع ظرفیت ۵۵/۵ گیگاوات هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین ساخت‌وساز راکتورهای هسته‌ای قدرت در جهان (۱۷ راکتور) در کشور چین در حال انجام است. کشورهای هندوستان، کره جنوبی، روسیه و ترکیه در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. سایر کشورهای مذکور هم تنها در حال ساخت یک یا دو واحد جدید هستند. پس از بهره‌برداری از واحد اول نیروگاه اتمی بوشهر به‌عنوان اولین نیروگاه هسته‌ای منطقه جنوب غرب آسیا (خاورمیانه)، سایر کشورهای این منطقه نیز برنامه‌های ساخت نیروگاه هسته‌ای را در دستور کار قرار دادند و در حال حاضر ۶ نیروگاه هسته‌ای در کشورهای ترکیه، امارات متحده عربی و جمهوری اسلامی ایران در حال ساخت هستند. برنامه‌ریزی کشورها برای افزایش ظرفیت برق هسته‌ای، به نیروگاه‌های هسته‌ای در حال ساخت محدود نبوده و ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای بیشتری به‌عنوان برنامه بلندمدت کشورهای جهان مطرح است که در بخش‌های بعدی گزارش مورد اشاره قرار می‌گیرند.

جدول ۳. نیروگاه‌های هسته‌ای در حال ساخت در جهان

کشور	تعداد راکتورها	ظرفیت الکتریکی (مگاوات)
چین	۱۷	۱۷۳۶۵
هندوستان	۸	۶۰۲۸
روسیه	۴	۳۷۵۹
کره جنوبی	۳	۴۰۲۰
ترکیه	۳	۳۳۴۲
انگلستان	۲	۳۲۶۰
امارات متحده عربی	۲	۲۶۹۰
ژاپن	۲	۲۶۵۳
ایالات متحده آمریکا	۲	۲۲۳۴
بنگلادش	۲	۲۱۶۰
اوکراین	۲	۲۰۷۰
اسلواکی	۲	۸۸۰
فرانسه	۱	۱۶۳۰
برزیل	۱	۱۳۴۰
بلاروس	۱	۱۱۱۰
جمهوری اسلامی ایران	۱[۱]	۹۷۴
آرژانتین	۱	۲۵
مجموع	**۵۴**	**۵۵۵۴۰**

Source: International Atomic Energy Agency (IAEA), Power Reactor Information System (PRIS), 2021.

با وقوع حوادث هسته‌ای بزرگ همچون حادثه چرنوبیل و فوکوشیما، برخی کشورهای اروپایی دارای نیروگاه هسته‌ای به‌دلیل نگرانی از پیامدهای محیط زیستی حوادث هسته‌ای احتمالی، تصمیم به کنار گذاشتن برق هسته‌ای و تعطیلی نیروگاه‌های هسته‌ای خود گرفته‌اند. ازجمله این کشورها می‌توان به آلمان، ایتالیا، سوئیس و بلژیک اشاره کرد.[۲] کشور آلمان از پیشگامان توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای بوده و اولین نیروگاه هسته‌ای این کشور در سال ۱۹۶۶ به بهره‌برداری رسید. رشد ظرفیت برق هسته‌ای این کشور تا سال ۱۹۸۶ با سرعت ادامه پیدا کرد. اما با وقوع حادثه چرنوبیل، ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای جدید متوقف شد و با قدرت گرفتن حزب سبز و وقوع حادثه فوکوشیما در سال‌های بعد، روند تعطیلی نیروگاه‌های هسته‌ای آلمان سرعت گرفت. با این وجود به‌دلیل نیاز روزافزون آلمان به برق، تعطیلی همه نیروگاه‌های هسته‌ای این کشور تاکنون محقق نشده است و در حال حاضر سه نیروگاه هسته‌ای با مجموع ظرفیت ۴۰۰۰ مگاوات در حال فعالیت هستند. ازجمله پیامدهای تعطیلی نیروگاه‌های هسته‌ای آلمان می‌توان به افزایش تولید برق از نیروگاه‌های فسیلی و آلودگی هوا، افزایش واردات برق، افزایش قیمت برق برای مصرف‌کنندگان و کاهش امنیت انرژی در کشور آلمان اشاره کرد.[۳] کشور ایتالیا

۱. این نیروگاه، واحد دوم نیروگاه اتمي بوشهر است. شایان ذکر است که واحد سوم نیروگاه اتمي بوشهر نیز در مراحل اولیه ساخت بوده و در این آمار ذکر نشده است.

۲. البته در پی شروع جنگ روسیه و اوکراین و افزایش نگرانی‌ها نسبت به وابستگی بیش از حد کشورهای اروپایی به نفت و گاز وارداتی و همچنین تعهد این کشورها ذیل معاهده اقلیمی پاریس مبنی بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌نظر می‌رسد که کشورهای اروپایی مذکور در حال تجدیدنظر در مورد سیاست‌های کاهش ظرفیت هسته‌ای هستند و انتظار می‌رود توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در برنامه‌های میان‌مدت مورد توجه این کشورها قرار گیرد.

3. Jarvis, S., Deschenes,O., Jha, A., "The Private and External Costs of Germany’s Nuclear Phase-Out", Journal

هم یک سال پس از حادثه چرنوبیل، با برگزاری همه‌پرسی در سال ۱۹۸۷ چهار نیروگاه هسته‌ای خود را تعطیل کرد. علاوه‌براین، کشورهای سوئیس و بلژیک هم برنامه‌های بلندمدتی را برای تعطیلی نیروگاه‌های هسته‌ای تصویب کرده‌اند و با این وجود، در حال حاضر بخش قابل توجهی از برق این کشورها از انرژی هسته‌ای تأمین می‌شود.

۳-۳. توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در کشورهای همسایه ایران

برخی از کشورهای همسایه ایران ازجمله ارمنستان، امارات متحده عربی، پاکستان، ترکیه و عربستان سعودی نیز توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای را مدنظر قرار داده‌اند که از میان این کشورها، ارمنستان، امارات و پاکستان دارای نیروگاه‌های هسته‌ای فعال بوده، ترکیه در حال ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای است و عربستان نیز برنامه‌هایی برای ایجاد ظرفیت برق هسته‌ای در آینده دارد. وضعیت کشورهای همسایه ایران در زمینه توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در جدول ۴ ارائه شده است. همسایگانی که در جدول زیر به آنها اشاره‌ای نشده است، سیاست‌های جدی در زمینه تولید برق هسته‌ای نداشته‌اند.

جدول ۴. وضعیت توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در کشورهای همسایه ایران

کشور	تعداد راکتور فعال	ظرفیت هسته‌ای فعال (مگاوات)	تعداد راکتور در حال ساخت	ظرفیت هسته‌ای در حال ساخت (مگاوات)	ظرفیت جدید برنامه‌ریزی شده (مگاوات)
ارمنستان	۱	۴۵۱	۰	۰	۱۰۶۰
امارات متحده عربی	۲	۲۸۳۴	۲	۲۸۰۰	-
پاکستان	۶	۳۵۳۰	۰	۰	۱۱۶۱
ترکیه	۰	۰	۳	۳۶۰۰	۹۹۰۰
عربستان سعودی	۰	۰	۰	۰	۱۷۰۰۰

Source: International Atomic Energy Agency (IAEA), Power Reactor Information System (PRIS), 2022.

کشور ارمنستان دارای دو واحد راکتور هسته‌ای تولید برق است که در نیروگاه هسته‌ای متسامور[1] واقع شده‌اند. این نیروگاه از نوع آب سبک تحت فشار است که در زمان شوروی سابق ساخته شده و اولین واحد آن در سال ۱۹۷۶ و واحد دوم در سال ۱۹۸۰ به بهره‌برداری رسید. با این وجود پس از وقوع یک زلزله شدید در ارمنستان (اگرچه این نیروگاه هیچ‌گونه آسیبی ندید)، مقامات شوروی به‌دلیل ملاحظات ایمنی تصمیم به تعطیلی نیروگاه گرفتند. بعد از فروپاشی اتحاد جماهیر شوروی و استقلال ارمنستان، در پی نیاز شدید این کشور به انرژی، واحد دوم این نیروگاه در سال ۱۹۹۵ مجدداً در مدار تولید قرار گرفت. از حدود ۷/۸ تراوات ساعت برق تولیدی ارمنستان در سال ۲۰۲۰، حدود ۳۶ درصد از نیروگاه هسته‌ای تأمین شده است. در حال حاضر مجوز بهره‌برداری از واحد دوم نیروگاه هسته‌ای متسامور ارمنستان تا سال ۲۰۲۶ تمدید شده است و ساخت یک نیروگاه هسته‌ای جدید با ظرفیت ۱۰۶۰ مگاوات حداکثر تا

of the European Economic Association, 2022.
1. Metsamor Nuclear Power Plant

سال ۲۰۳۵، در دستور کار قرار دارد.[1] شایان ذکر است که سوخت نیروگاه هسته‌ای ارمنستان را روسیه تأمین می‌کند.

امارات متحده عربی در سال ۲۰۰۸ اعلام کرد که قصد دارد از انرژی هسته‌ای به‌عنوان منبع اصلی تولید برق غیرفسیلی استفاده کند. در این راستا، در سال ۲۰۱۲ ساخت نیروگاه هسته‌ای براکه[2] با چهار واحد نیروگاهی توسط کره جنوبی و با قراردادی به ارزش ۲۰/۴ میلیارد دلار آغاز شد. اولین نیروگاه هسته‌ای امارات با ظرفیت ۱۴۱۷ مگاوات در سال ۲۰۲۰ به بهره‌برداری رسید و ساخت واحد دوم با ظرفیت ۱۴۱۷ مگاوات نیز در سال ۲۰۲۱ به اتمام رسید. هم‌اکنون دو واحد نیروگاه هسته‌ای دیگر هریک با ظرفیت ۱۴۰۰ مگاوات نیز در مراحل پایانی ساخت بوده و با بهره‌برداری از چهار واحد نیروگاه هسته‌ای براکه، ظرفیت تولید برق هسته‌ای در این کشور به حدود ۵۶۰۰ مگاوات می‌رسد. امارات پیش‌بینی کرده است که این ظرفیت امکان تأمین ۲۵ درصد از تقاضای برق را پاسخگو خواهد بود.[3] امارات همچنین قراردادهای بلندمدتی را برای بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری و تأمین سوخت نیروگاه‌های هسته‌ای خود با کره جنوبی منعقد کرده است. به‌منظور جلب حمایت آمریکا از برنامه هسته‌ای امارات، این کشور در ابتدای تصمیم خود برای بهره‌برداری از انرژی هسته‌ای، توافقی را با ایالات متحده آمریکا منعقد کرده است تا در ازای همکاری آمریکا در استفاده از انرژی هسته‌ای، امارات از حق غنی‌سازی و بازفرآوری سوخت مصرف شده خود چشم‌پوشی کند.[4]

پاکستان به‌عنوان تنها همسایه ایران که به عضویت معاهده منع گسترش سلاح‌های هسته‌ای در نیامده است، در کنار ساخت سلاح‌های هسته‌ای، به توسعه کاربردهای صلح‌آمیز فناوری هسته‌ای ازجمله تولید برق هسته‌ای پرداخته است. اولین راکتور هسته‌ای تولید برق پاکستان، یک راکتور آب سنگین ۱۰۰ مگاواتی بوده که با مشارکت کانادا ساخته شد و در سال ۱۹۷۱ به بهره‌برداری رسید. این راکتور پس از ۵۰ سال فعالیت و با پایان عمر کاری، در سال ۲۰۲۱ برای همیشه خاموش شد. با افزایش مناسبات راهبردی میان پاکستان و چین در اواخر قرن بیستم، همکاری‌های دو کشور در زمینه توسعه فناوری هسته‌ای و خصوصاً ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای آغاز شد. به‌این‌ترتیب ۶ نیروگاه هسته‌ای با مشارکت فنی و سرمایه‌گذاری کشور چین در پاکستان ساخته شد و ساخت واحدهای جدید نیز در حال برنامه‌ریزی است. فهرست نیروگاه‌های هسته‌ای پاکستان در جدول ۵ ارائه شده است. ظرفیت فعلی برق هسته‌ای پاکستان ۳۵۳۰ مگاوات بوده و قرارداد ساخت یک واحد ۱۱۶۱ مگاواتی دیگر هم با چین منعقد شده است. پاکستان در نظر دارد تا سال ۲۰۳۰ ظرفیت برق هسته‌ای در این کشور به ۸۹۰۰ مگاوات برسد. سوخت نیروگاه‌های هسته‌ای پاکستان به‌واسطه قراردادهای تضمین سوخت مادام‌العمر توسط چین تأمین می‌شود.[5]

1. Republic of Armenia Energy Sector Development Strategic Program to 2040.
2. Barakah Nuclear Power Plant
3. Policy of the United Arab Emirates on the Evaluation and Potential Development of Peaceful Nuclear Energy.
4. The U.S.–Uae 123 Agreement for Peaceful Civilian Nuclear Energy Cooperation.
5. World Nuclear Association, Nuclear power in pakistan, 2022.

جدول ۵. نیروگاه‌های هسته‌ای کشور پاکستان

نام نیروگاه	ظرفیت	نوع	سال آغاز بهره‌برداری	وضعیت فعلی
کراچی-۱	۱۰۰	آب سنگین تحت فشار	۱۹۷۱	خاموشی دائمی
کراچی-۲	۱۱۰۰	آب سبک تحت فشار	۲۰۲۱	در حال بهره‌برداری
کراچی-۳	۱۱۰۰	آب سبک تحت فشار	۲۰۲۲	در حال بهره‌برداری
چشمه-۱	۳۲۵	آب سبک تحت فشار	۲۰۰۰	در حال بهره‌برداری
چشمه-۲	۳۲۵	آب سبک تحت فشار	۲۰۱۱	در حال بهره‌برداری
چشمه-۳	۳۴۰	آب سبک تحت فشار	۲۰۱۶	در حال بهره‌برداری
چشمه-۴	۳۴۰	آب سبک تحت فشار	۲۰۱۷	در حال بهره‌برداری

Source: International Atomic Energy Agency (IAEA), Power Reactor Information System (PRIS), 2022.

ترکیه نیز از سال ۱۹۷۰ به بهره‌برداری از نیروگاه‌های هسته‌ای ابراز تمایل کرده و رایزنی‌هایی با کشورهای مختلف در این زمینه داشته است. با این وجود به‌دلیل مشکلات اقتصادی، توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در این کشور با تأخیرهایی روبه‌رو بوده است. ترکیه تلاش کرده است تا علاوه بر جذب سرمایه‌گذاری خارجی برای ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای، از فناوری کشورهای مختلف استفاده کند. هم‌اکنون سه واحد نیروگاه هسته‌ای آب سبک در سایت آق‌قویو[1] ترکیه توسط روسیه در حال ساخت هستند که ظرفیت هر واحد ۱۲۰۰ مگاوات است و یک واحد مشابه دیگر نیز در مراحل آغاز ساخت است. علاوه‌براین، قرارداد ساخت نیروگاه هسته‌ای سینوپ[2] با چهار واحد نیروگاهی و مجموع ظرفیت ۴۶۰۰ مگاوات از طریق سرمایه‌گذاری مشترک شرکت میتسوبیشی ژاپن[3] و شرکت الکتریسیته دو فرانس فرانسه[4] منعقد شده است. ترکیه همچنین قصد دارد تا سومین نیروگاه هسته‌ای (نیروگاه هسته‌ای اینیدا[5]) خود را که دارای چهار واحد نیروگاهی با مجموع ظرفیت ۵۳۰۰ مگاوات است، با مشارکت چین بسازد. در قراردادهای ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای ترکیه، به تأمین سوخت مصرفی نیروگاه‌ها نیز توجه شده است. به‌عنوان مثال، براساس توافق ترکیه با روسیه، سوخت نیروگاه هسته‌ای آق‌قویو توسط روسیه و از طریق کارخانه ساخت سوختی که در ترکیه احداث خواهد شد تأمین می‌شود.[6]

عربستان سعودی در سال ۲۰۰۹ تصمیم خود مبنی‌بر توسعه کاربردهای انرژی هسته‌ای را اعلام کرد و برای پیشبرد این تصمیم، اقدام به تأسیس «شهر انرژی اتمی و تجدیدپذیر ملک عبدالله»[7] کرد. هدف‌گذاری اولیه عربستان در راستای ایجاد ظرفیت ۱۷۰۰۰ مگاوات برق هسته‌ای تا سال ۲۰۳۲ بوده که این هدف برای سال ۲۰۴۰ تمدید شده است. عربستان سعودی تاکنون تفاهم‌نامه‌های متعددی را با کشورهای صاحب فناوری نیروگاه‌های هسته‌ای منعقد کرده است

1. Akkuyu Nuclear Power Plant
2. Sinop Nuclear Power Plant
3. Mitsubishi Heavy Industries (MHI)
4. Électricité de France (EDF)
5. Igneada Nuclear Power Plant
6. World Nuclear Association, Nuclear power in Turkey, 2022.
7. The King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy

که ازجمله آنها می‌توان به امضای قرارداد ساخت راکتورهای کوچک ماژولار با کره جنوبی و آرژانتین به‌منظور تولید هم‌زمان برق و آب شیرین اشاره کرد. با این وجود به‌نظر می‌رسد برنامه ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای عربستان هنوز به مرحله عملیاتی نرسیده است. به نظر می‌رسد نقش عوامل سیاسی نیز در تمایل عربستان جهت توسعه انرژی هسته‌ای حائز اهمیت باشد. [۱]

۴-۳. فناوری راکتورهای هسته‌ای تولید برق

در یک راکتور هسته‌ای، انرژی حاصل از شکافت هسته‌ای به‌صورت کنترل‌شده به گرما تبدیل می‌شود و گرمای حاصله، به‌واسطه یک سیال خنک‌کننده برای تولید بخار مورد استفاده قرار می‌گیرد. بخار تولیدشده نیز به گردش توربین و تولید برق توسط مولد الکتریکی منجر خواهد شد. با توجه به نوع راکتور هسته‌ای مورد استفاده، فناوری‌های مرتبط با چرخه سوخت هسته‌ای شامل مراحل تولید سوخت، پسمانداری و بازفرآوری نیز متفاوت خواهند بود. تاکنون طرح‌های مختلفی برای راکتورهای هسته‌ای قدرت توسعه یافته‌اند که هریک ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود را دارند. برخی طراحی‌های جدیدتر نیز در حال مطالعه و آزمایش هستند.

طرح‌های مختلف راکتورهای هسته‌ای قدرت براساس نوع خنک‌کننده یا کندکننده[۲] مورد استفاده و همچنین برخی ویژگی‌های ساختاری از یکدیگر متمایز می‌شوند. در سال‌های پیشین برخی طرح‌ها مانند راکتورهای آب تحت فشار (PWR[۳])، راکتورهای آب جوشان (BWR[۴])، راکتورهای آب سنگین تحت فشار (PHWR[۵])، راکتورهای آب سبک با کندکننده گرافیتی (LWGR[۶]) و راکتورهای با خنک‌کننده گازی (GCR[۷]) در مقیاس صنعتی توسعه یافته و امروزه در کشورهای مختلف برای تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی طرح‌های جدیدتر نیز در مراحل توسعه می‌باشند و هنوز در مقیاس وسیع برای تولید برق مورد بهره‌برداری قرار نگرفته‌اند. ازجمله این طرح‌های جدید می‌توان به راکتورهای زاینده سریع (FBR[۸])، راکتورهای نمک مذاب (MSR[۹])، راکتورهای کوچک ماژولار (SMR[۱۰]) و راکتورهای گداخت هسته‌ای اشاره کرد.

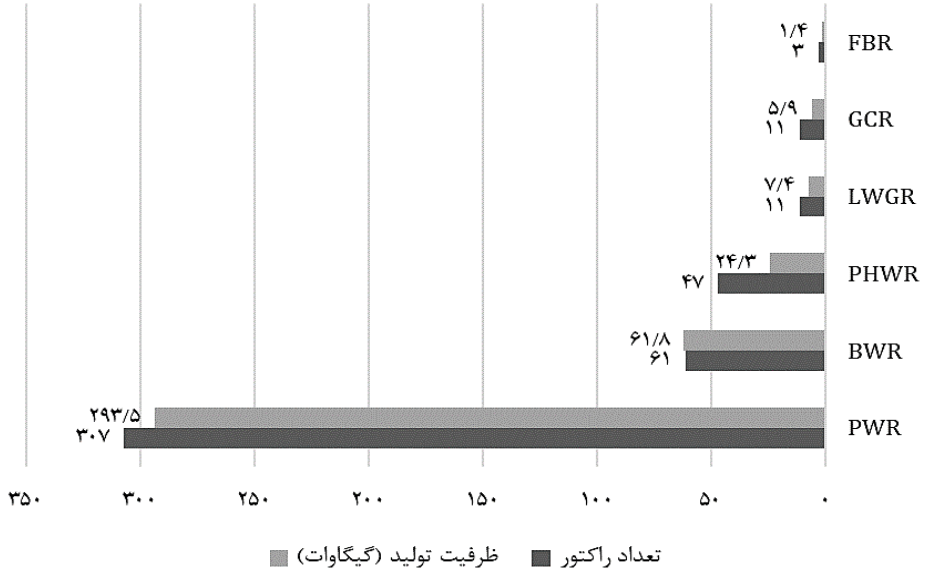
امروزه ۴۴۰ راکتور هسته‌ای قدرت با ظرفیت ۳۹۴ گیگاوات، در کل جهان در حال بهره‌برداری هستند. تعداد و ظرفیت الکتریکی هریک از انواع متداول راکتورهای هسته‌ای قدرت در حال بهره‌برداری در جهان، به‌صورت نمودار ۷ است. در حال حاضر، اغلب برق هسته‌ای جهان را راکتورهای آب تحت فشار تأمین می‌کنند و راکتورهای آب جوشان و آب سنگین تحت فشار در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. راکتورهای آب سبک با کندکننده گرافیتی و راکتورهای با خنک‌کننده گازی نیز سهم کوچکی از تولید برق هسته‌ای را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین راکتورهای زاینده

---

۱. غریبی، محسن. اهداف عربستان سعودی از توسعه فناوری هسته‌ای، فصلنامه سیاست خارجی، ۱۴۰۰.
۲. ماده‌اي كه براي كاهش انرژي نوترون‌ها در راكتور هسته‌اي مورد استفاده قرار مي‌گيرد (معمولاً آب).
3. Pressurized Water Reactor
4. Boiling Water Reactor
5. Pressurized Heavy-Water Reactor
6. Light-Water Graphite Reactor
7. Gas Cooled Reactor
8. Fast Breeder Reactor
9. Molten Salt Reactor
10. Small Modular Reactor

سریع در تعداد محدودی (سه راکتور) در حال بهره‌برداری هستند و طرح‌هایی از این نوع راکتور همچنان در دست تحقیق و توسعه هستند.

نمودار ۷. انواع راکتورهای در حال بهره‌برداری در جهان



Source: International Atomic Energy Agency (IAEA), Power Reactor Information System (PRIS), 2022.

امروزه بسیاری از کشورهای جهان ازجمله جمهوری اسلامی ایران از راکتورهای آب تحت فشار برای تولید برق هسته‌ای استفاده می‌کنند و در کل جهان تعداد ۳۰۷ عدد از این نوع راکتور، با ظرفیت ۲۹۳ گیگاوات (حدود ۷۴ درصد ظرفیت برق هسته‌ای جهان) در حال بهره‌برداری هستند. شایان ذکر است که در کنار مزایای فنی، سازگاری این نوع راکتور با اهداف منع گسترش سلاح‌های هسته‌ای نیز ازجمله دلایل توسعه این طرح بوده است؛ چراکه راکتورهای آب سبک به اورانیوم با غنای بالا نیاز ندارند و میزان پلوتونیم تولیدی در آنها نیز کم است. راکتورهای آب جوشان هم از آب سبک استفاده می‌کنند و شباهت زیادی با راکتورهای آب تحت فشار دارند. این در حالی است که در راکتورهای آب سنگین تحت فشار، آب سنگین هم نقش کندکننده نوترون و هم نقش خنک‌کننده را برعهده دارد. نوترون‌های کند می‌توانند با اورانیوم واکنش داده و برخلاف راکتورهای آب سبک که نوترون‌های حرارتی را جذب می‌کنند، به‌دلیل جذب بسیار پایین نوترون توسط آب سنگین، می‌توان از اورانیوم طبیعی به‌عنوان سوخت راکتورهای آب سنگین استفاده کرد و بنابراین میزان انرژی تولیدشده به‌ازای هر کیلوگرم اورانیوم استخراج‌شده از معدن بیشتر خواهد بود. به همین جهت این راکتورها گزینه مناسبی برای تولید برق هسته‌ای در کشورهای با منابع محدود اورانیوم هستند. اما به‌دلیل تولید مقادیر بیشتر پلوتونیم، با حساسیت‌های منع اشاعه سلاح‌های هسته‌ای همراه هستند.

علاوه‌بر طرح‌های مرسوم راکتورهای هسته‌ای، طرح‌های پیشرفته‌تری نیز در دست توسعه است. اگرچه در سال‌های اخیر راکتورهای قدرت متداول نیز بهبود یافته‌اند، اما راکتورهای هسته‌ای پیشرفته، طراحی و کارکرد کاملاً متمایزی

دارند. ازجمله ویژگی‌های این راکتورهای پیشرفته می‌توان به صرفه اقتصادی، ایمنی بیشتر، مصرف سوخت کمتر و پسماند هسته‌ای کمتر اشاره کرد. یکی از طرح‌های راکتورهای پیشرفته، راکتورهای زاینده سریع هستند که قابلیت تولید سوخت پلوتونیمی به اندازه سوخت مصرف‌شده یا بیشتر در طول سیکل کاری را دارند. در این صورت می‌توان با بازفرآوری سوخت مصرف شده راکتور، سوخت سیکل‌های بعدی را فراهم کرد. این قابلیت باعث افزایش چشمگیر منابع سوخت هسته‌ای جهان شده و در صورت توسعه این راکتورها، آینده انرژی هسته‌ای در جهان با تحول جدی مواجه خواهد شد؛ چراکه در نسل فعلی راکتورهای هسته‌ای فقط از هسته اورانیوم-۲۳۵ به‌عنوان سوخت استفاده می‌شود که حدود ۰/۷ درصد از اورانیوم طبیعی را شامل می‌شود. اما این راکتورها با استفاده از هسته اورانیوم-۲۳۸، مقدار مواد هسته‌ای قابل استفاده برای تولید انرژی را به میزان بیش از ۱۴۰ برابر افزایش خواهند داد. ازطرف‌دیگر به‌دلیل استفاده مجدد از سوخت مصرف‌شده، مقدار پسماند هسته‌ای تولیدشده نیز کمتر است.

از دیگر طرح‌های جدید راکتورهای هسته‌ای که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است، راکتورهای کوچک ماژولار است. توان الکتریکی این راکتورها کمتر از ۳۰۰ مگاوات بوده و اجزای آنها قابلیت ساخت در کارخانه و انتقال به ساختگاه مورد نظر را دارند. با توجه به هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا و مدت زمان ساخت طولانی نیروگاه‌های هسته‌ای بزرگ، توسعه راکتورهای کوچک ماژولار به کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و زمان ساخت نیروگاه منجر خواهند شد و به همین دلیل مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته‌اند. این راکتورها همچنین برای تولید برق یا حرارت در مناطقی که به شبکه سراسری متصل نیستند، گزینه مناسبی می‌باشند و قادرند تا با کمترین نیاز به فعالیت‌های اپراتوری و سوخت‌گذاری مجدد، برق ایمن و مطمئنی را تأمین کنند. طرح‌های راکتورهای کوچک که در حال حاضر در جهان ساخته‌شده یا در حال ساخت هستند، به شرح جدول ۶ است. شایان ذکر است که علاوه‌بر طرح‌های ذیل، طرح‌های بسیار دیگری نیز در حال اخذ مجوز یا مراحل اولیه توسعه می‌باشند.

جدول ۶. طرح‌های راکتورهای کوچک ساخته‌شده یا در حال ساخت در جهان

نام طرح	ظرفیت (مگاوات)	نوع	کشور	وضعیت
CNP-300	۳۰۰	PWR	چین	ساخته‌شده
PHWR-220	۲۲۰	PHWR	هند	ساخته‌شده
EGP-6	۱۱	LWGR	روسیه	ساخته‌شده
KLT-40S	۵۵	PWR	روسیه	ساخته‌شده
RITM-200	۵۰	PWR	روسیه	ساخته‌شده
BREST	۳۰۰	FNR[1]	روسیه	در حال ساخت
HTR-PM	۲۱۰	HTR[2]	چین	در حال ساخت
ACP100	۱۲۵	PWR	چین	در حال ساخت
CAREM	۲۷	PWR	آرژانتین	در حال ساخت

Source: World Nuclear Association, Small Nuclear Power Reactors, 2021.

1. Fast Neutron Reactor
2. High Temperature Reactor

یکی دیگر از فناوری‌های تولید برق هسته‌ای در آینده بلندمدت، استفاده از انرژی گداخت هسته‌ای است. برخلاف فرایند شکافت که یک هسته سنگین به هسته‌های سبک‌تر تبدیل می‌شود، در فرایند گداخت هسته‌ای دو هسته سبک با یکدیگر برخورد کرده و یک هسته سنگین‌تر و مقداری انرژی تولید می‌شود. برای شروع پدیده گداخت، هسته‌های اولیه باید با انرژی زیادی به یکدیگر برخورد کنند. بنابراین این پدیده در دماهای بسیار بالا اتفاق می‌افتد و چالش اصلی راکتورهای گداخت نیز ایجاد و کنترل این دمای بسیار زیاد است. از مزیت‌های اصلی این منبع تولید انرژی، فراوانی سوخت مورد نیاز (حدود ۰/۰۱۵۳ درصد از آب دریاها را دوتریوم تشکیل می‌دهد که به‌عنوان سوخت همجوشی قابل استفاده است)، نیمه عمر کوتاه پسماندهای هسته‌ای تولیدی و ایمنی ذاتی بالا در برابر حوادث می‌باشند. ساخت راکتورهای گداخت هسته‌ای پایدار با چالش‌های فناوری بسیار پیچیده‌ای همراه است که مستلزم سرمایه‌گذاری بین‌المللی و توسعه دانش مربوطه است. در حال حاضر پروژه‌های متعددی در دنیا مشغول تحقیق روی راکتورهای گداخت هستند و در این میان، پروژه بین‌المللی ITER[1] به‌عنوان بزرگ‌ترین راکتور همجوشی هسته‌ای جهان در فرانسه و با همکاری ۳۵ کشور در حال اجراست. هدف پروژه ITER دستیابی به توان حرارتی ناشی از گداخت هسته‌ای به میزان ۵۰۰ مگاوات و به مدت زمان حداقل ۴۰۰ ثانیه به‌طور مداوم است. با توجه به چالش‌های فنی پیش‌رو و پروژه‌های در دست اقدام، پیش‌بینی می‌شود که استفاده تجاری از این منبع انرژی حداقل تا سال ۲۰۵۰ محقق نشود.

۵-۳. چشم‌انداز بلندمدت انرژی هسته‌ای در دنیا

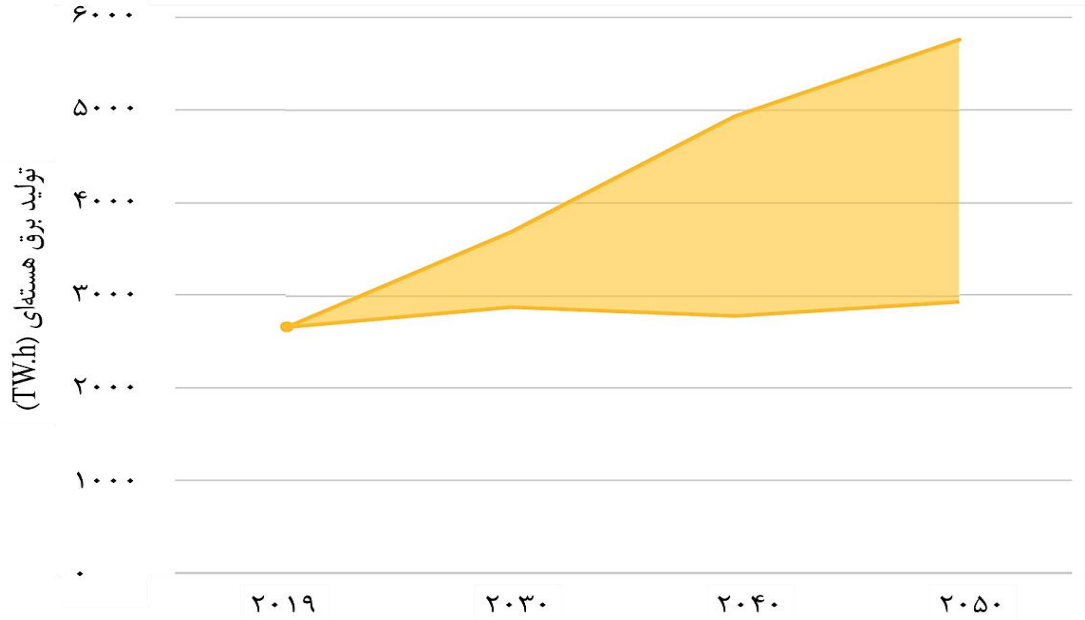
با نگاه به روند تولید برق هسته‌ای در سال‌های گذشته و همچنین سیاست‌های کشورها در این زمینه، نمی‌توان با قطعیت در مورد آینده تولید برق هسته‌ای در جهان قضاوت کرد. با این وجود، برخی مؤسسه‌های بین‌المللی معتبر در گزارش‌های خود پیش‌بینی‌ها و پیشنهادهایی را درخصوص روند آتی توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای اظهار داشته‌اند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

- **آژانس بین‌المللی انرژی اتمی[2]**

طبق پیش‌بینی‌های انجام‌شده توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، در صورت استمرار روند فعلی فناوری و منابع تولید برق هسته‌ای و همچنین در صورت اجرای برنامه‌های فعلی کشورهای جهان جهت توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای، ظرفیت برق هسته‌ای جهان از ۳۹۲ گیگاوات در سال ۲۰۱۹ به ۷۱۵ گیگاوات در سال ۲۰۵۰ خواهد رسید[3]. اما از نگاه محتاطانه و درصورتی‌که بخشی از برنامه‌های توسعه برق هسته‌ای کشورها به مرحله اجرا نرسد، ظرفیت برق هسته‌ای جهان در سال ۲۰۵۰ به ۳۶۳ گیگاوات خواهد رسید. در نمودار ۸ پیش‌بینی آژانس بین‌المللی انرژی اتمی از حد پایین و بالای روند تولید برق هسته‌ای جهان تا سال ۲۰۵۰ ارائه شده است. طبق این پیش‌بینی، روند تولید برق هسته‌ای در آمریکای شمالی و اروپای غربی ثابت یا کاهشی بوده و در سایر نواحی جهان افزایشی خواهد بود.

1. International Thermonuclear Experimental Reactor
2. International Atomic Energy Agency (IAEA)
۳. شایان ذکر است که در گزارش دیگری که در سال ۲۰۱۷ آژانس بین‌المللی انرژی اتمی منتشر کرد، ظرفیت برق هسته‌ای در سال ۲۰۵۰ برابر با ۸۷۴ گیگاوات پیش‌بینی شده بود.

نمودار ۸. پیش‌بینی روند تولید برق هسته‌ای جهان تا سال ۲۰۵۰ (تراوات ساعت)



Source: International Atomic Energy Agency (IAEA), Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, 2020.

• آژانس بین‌المللی انرژی[1]

آژانس بین‌المللی انرژی نیز مطالعات مختلفی را در مورد جایگاه انرژی هسته‌ای در آینده جهان انجام داده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که بدون توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای، رسیدن به اهداف کاهش انتشار کربن بسیار دشوار خواهد بود. ازاین‌رو، آژانس بین‌المللی انرژی به کشورها توصیه می‌کند که ظرفیت تولید برق هسته‌ای خود را از طریق افزایش زمان بهره‌برداری نیروگاه‌های فعلی، توسعه نیروگاه‌های جدید و تشویق به توسعه فناوری‌های نوین افزایش دهند. براساس پیش‌بینی این آژانس، توسعه راکتورهای ماژولار کوچک (SMR[2]) باعث گسترده‌تر شدن بازار انرژی هسته‌ای خواهد شد. این آژانس همچنین پیشنهاد می‌دهد که راکتورهای نسل چهار[3] و چرخه‌های سوخت مرتبط با آنها نیز در بازه ۲۰۳۰ تا ۲۰۴۰ توسعه یابند.[4]

سند چشم‌انداز جهانی انرژی که در سال ۲۰۲۰ توسط آژانس بین‌المللی انرژی منتشر شد، پیش‌بینی می‌کرد که در سناریوی توسعه پایدار، میزان تولید انرژی برق هسته‌ای از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۴۰ حدود ۶۰ درصد افزایش خواهد یافت. ازطرف‌دیگر به‌منظور به صفر رساندن انتشار کربن تا سال ۲۰۵۰، لازم است تا میزان انرژی تولیدی سالیانه از فناوری هسته‌ای بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ به دو برابر افزایش یابد. به‌عبارت‌دیگر باید سالیانه حدود ۳۰ گیگاوات ظرفیت جدید تولید برق هسته‌ای ایجاد شود. براساس این گزارش‌ها، در صورت عدم تصمیم‌گیری به‌موقع در مورد انرژی هسته‌ای،

1. International Energy Agency (IEA)
2. Small Modular Reactor
۳. راکتورهايي با طراحي نوين كه با زايش سوخت جديد منجر به افزايش قابل توجه منابع سوخت هسته‌اي در دسترس خواهند شد. اين راكتورها همچنين بسياري مزيت‌هاي ديگر ازجمله ايمني بالا، پسماند كمتر و غيره دارند.
4. International Energy Agency (IEA), Energy Technology Perspectives, 2020.

هزینه‌های به صفر رساندن انتشار دی اکسیدکربن افزایش یافته یا احتمال عدم دستیابی به هدف مذکور نیز وجود دارد.[۱]

•اداره اطلاعات انرژی آمریکا[۲]

اداره اطلاعات انرژی آمریکا روند افزایش تولید برق هسته‌ای در جهان تا سال ۲۰۵۰ را حدود ۱ درصد در سال پیش‌بینی می‌کند و لذا سهم تولید برق از انرژی هسته‌ای تقریباً ثابت خواهد بود. براساس پیش‌بینی این سازمان، اغلب افزایش ظرفیت برق هسته‌ای جهان نیز مربوط به کشورهای غیرعضو در سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (OECD[۳]) است، به‌طوری‌که از سال ۲۰۳۲ چین به‌عنوان بزرگ‌ترین تولیدکننده برق هسته‌ای از آمریکا پیشی می‌گیرد.[۴]

•مؤسسه فناوری ماساچوست[۵]

براساس گزارش مؤسسه فناوری ماساچوست آمریکا درخصوص آینده انرژی هسته‌ای، پیاده‌سازی هر برنامه کاهش انتشار کربن بدون در نظر گرفتن نقش انرژی هسته‌ای، بسیار هزینه‌بر خواهد بود. به‌گونه‌ای که هزینه یک شبکه برق فاقد کربن بدون انرژی هسته‌ای در آمریکا دو برابر و در چین چهار برابر بیشتر خواهد شد.[۶]

•انجمن جهانی هسته‌ای[۷]

نظر انجمن جهانی هسته‌ای در مورد آینده انرژی هسته‌ای نیز در غالب برنامه توازن[۸] ارائه شده است. براساس این برنامه، به‌منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، باید ۲۵ درصد از تولید برق جهان را نیروگاه‌های هسته‌ای تولید کنند و برای این منظور لازم است تا سال ۲۰۵۰ ظرفیت برق هسته‌ای به میزان ۱۰۰۰ گیگاوات افزایش یابد. دستیابی به این هدف مستلزم رشد اقتصادی و فناوری، بهبود فرایندهای قانونگذاری و توسعه یک الگوی ایمنی هسته‌ای مؤثر است.[۹]

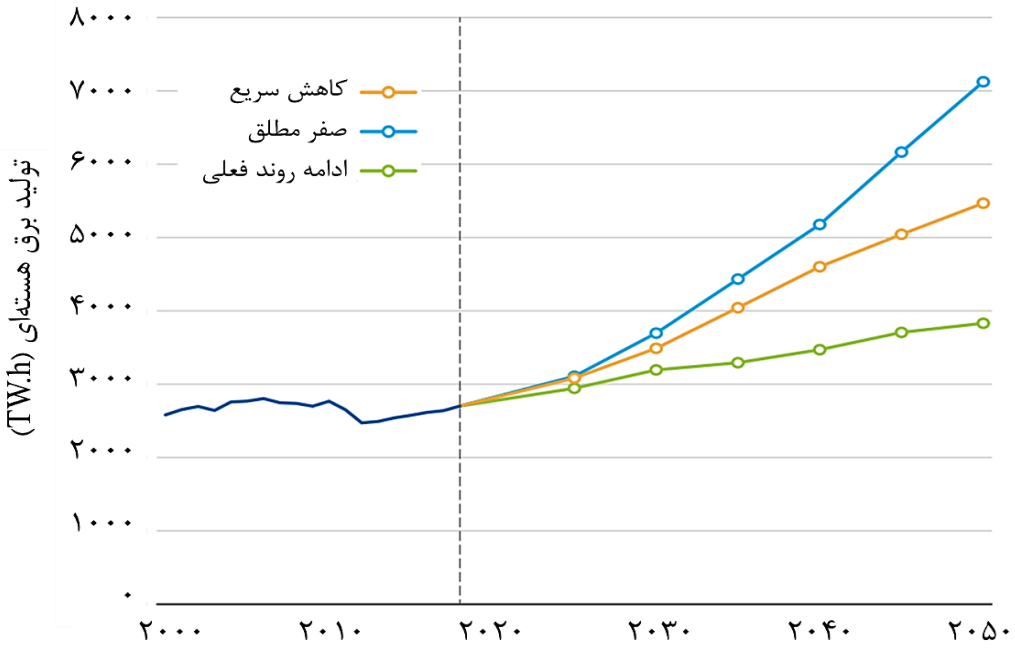
•شرکت بریتیش پترولیوم (BP)[۱۰]

براساس پیش‌بینی شرکت انگلیسی بریتیش پترولیوم (BP)، در آخرین گزارش چشم‌انداز انرژی که در سال ۲۰۲۰ منتشر شده، سبد انرژی کشورهای جهان تا سال ۲۰۵۰ در غالب سه سناریوی مختلف خواهد بود. این سناریوها شامل «ادامه روند فعلی[۱۱]»، «کاهش سریع انتشار کربن[۱۲]» و سناریوی «صفر مطلق[۱۳]» می‌شوند. در همه سناریوهای مذکور، برق هسته‌ای جایگاه خود را حفظ کرده و در سناریوهای کاهش کربن، برق تولیدی از انرژی هسته‌ای تا بیش از دو برابر افزایش یافته است. همچنین نقش کشورهای چین و هند در افزایش ظرفیت برق هسته‌ای در هر سه سناریو چشمگیر است. پیش‌بینی شرکت BP از روند تولید برق هسته‌ای جهان تا سال ۲۰۵۰ با در نظر گرفتن سناریوهای مذکور، در نمودار ۹ به نمایش درآمده است.

---

1. International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook, 2020.
2. Energy Information Administration (EIA)
3. Organisation for Economic Co-operation and Development
4. U.S. Energy Information Administration (EIA), International Energy Outlook, 2019.
5. Massachusetts Institute of Technology (MIT)
6. Massachusetts Institute of Technology (MIT), The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World, 2018.
7. World Nuclear Association
8. Harmony programme
9. World Nuclear Association, The Harmony Programme: What will power our electric future?, 2019.
10. Bp statistical Review of World Energy2021. Retrieved from www.bp.com
11. The Business-as-usual Scenario
12. The Rapid Transition Scenario
13. The Net Zero Scenario

نمودار ۹. پیش‌بینی رشد تولید برق هسته‌ای در جهان تا سال ۲۰۵۰ در سناریوهای مختلف (تراوات ساعت)



Source: British Petroleum (BP), Energy Outlook, 2020.

با توجه به آنچه ذکر شد، طبق پیش‌بینی اغلب مؤسسه‌های بین‌المللی معتبر، در آینده‌ای نه‌چندان دور میزان تولید برق از انرژی هسته‌ای به‌عنوان یک منبع انرژی پاک و پایدار در تولید برق افزایش خواهد یافت. البته این افزایش همانند دهه‌های گذشته به‌صورت جهشی نخواهد بود. ازطرف‌دیگر، به‌منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، بسیاری از مؤسسه‌ها به استفاده از انرژی هسته‌ای در کنار سایر منابع برق کم‌کربن تأکید کرده‌اند.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به نیاز کشور به افزایش ظرفیت تولید برق و همچنین وابستگی زیاد صنعت برق کشور به گاز طبیعی و چالش تأمین سوخت نیروگاه‌ها، تنوع‌بخشی به سبد تولید برق کشور و استفاده از سایر منابع تولید برق مانند منابع تجدیدپذیر و انرژی هسته‌ای به‌عنوان یک راهکار بلندمدت مطرح است. در حال حاضر ۱۰ درصد از برق جهان را ۴۴۰ راکتور قدرت هسته‌ای در ۳۲ کشور تولید می‌کنند. برنامه هسته‌ای ایران نیز از سال ۱۳۳۵ آغاز شده است. با وجود تأکید اسناد بالادستی بر توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای، هم‌اکنون یک واحد نیروگاه هسته‌ای با ظرفیت حدود هزار مگاوات در بوشهر در حال فعالیت است. استفاده از انرژی هسته‌ای برای تولید برق، مورد توجه همسایگان ایران ازجمله ارمنستان، امارات متحده عربی، پاکستان، ترکیه و عربستان سعودی نیز قرار گرفته است. ازطرف‌دیگر، تاکنون طرح‌های مختلف راکتورهای هسته‌ای قدرت توسعه یافته‌اند و در حال حاضر اغلب نیروگاه‌های هسته‌ای جهان از نوع آب سبک تحت فشار هستند. همچنین نسل جدید نیروگاه‌های هسته‌ای نیز در دست توسعه هستند که ازجمله ویژگی‌های آنها می‌توان به صرفه اقتصادی، ایمنی بیشتر، مصرف سوخت کمتر و پسماند هسته‌ای کمتر اشاره کرد. طبق پیش‌بینی اغلب مؤسسه‌های

بین‌المللی معتبر، تا سال ۲۰۵۰ میزان برق تولیدشده از انرژی هسته‌ای تا حدودی افزایش خواهد یافت و این افزایش عمدتاً در کشورهای آسیایی ازجمله چین و هندوستان خواهد بود. با بررسی روند توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در کشورهای مختلف جهان، به‌نظر می‌رسد همچنان بهره‌برداری از انرژی هسته‌ای مورد توجه کشورهای جهان است تا در کنار منابعی چون انرژی‌های تجدیدپذیر، برای تولید برق پایدار و بدون انتشار کربن مورد استفاده قرار گیرد. در همین راستا لازم است تا ضمن بررسی مزایا و چالش‌های توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در کشور، برنامه‌ریزی دقیقی برای ساخت و بهره‌برداری از نیروگاه‌های هسته‌ای کشور صورت گیرد. ازجمله الزامات برنامه‌ریزی در راستای توسعه برق هسته‌ای در ایران، تعیین ظرفیت برق هسته‌ای مورد نیاز و همچنین انتخاب نوع فناوری مورد استفاده برای تولید برق هسته‌ای در کشور است.

منابع و مآخذ

۱. تارنمای سازمان انرژی اتمی ایران.

۲. شرکت مادرتخصصی تولید و توسعه انرژی اتمی ایران.

۳. غریبی، محسن. اهداف عربستان سعودی از توسعه فناوری هسته‌ای، فصلنامه سیاست خارجی، ۱۴۰۰.

4. Schumacher, W., Rohan, D. & Falcone, C., "A long-range energy plan for Iran", Stanford Research Institute, 1977.
5. International Atomic Energy Agency (IAEA), Power Reactor Information System (PRIS), 2022.
6. International Energy Agency (IEA), Electricity Information: Overview, 2021.
7. International Energy Agency (IEA), Nuclear Power in a Clean Energy System, 2019.
8. Stephen Jarvis, Olivier Deschenes, Akshaya Jha, The Private and External Costs of Germany’s Nuclear Phase-Out, Journal of the European Economic Association, 2022.
9. International Atomic Energy Agency (IAEA), Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, 2020.
10. International Energy Agency (IEA), Energy Technology Perspectives, 2020.
11. British Petroleum (BP), Energy Outlook, 2020.
12. International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook, 2020.
13. U.S. Energy Information Administration (EIA), International Energy Outlook, 2019.
14. Massachusetts Institute of Technology (MIT), The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World, 2018.
15. World Nuclear Association, The Harmony Programme: What will power our electric future?, 2019.
16. World Nuclear Association, Nuclear Power Reactors, 2022.
17. Generation IV International Forum, A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, 2002.