

علل و آثار افزایش تمایل برای سرمایه‌گذاری روی نیروگاه‌های هسته‌ای در کشورهای صنعتی

سعیده احمدی^۱

چکیده

تصمیم ایالات متحده و ۲۱ کشور دیگر در نشست کاپ ۲۸ سازمان ملل در امارات متحده عربی مبنی بر اینکه ظرفیت انرژی هسته‌ای را تا سال ۲۰۵۰ سه برابر خواهند کرد، در کنار اتخاذ رویکرد مشابه در دیگر کشورها نشان از توجه دوباره کشورها به انرژی هسته‌ای پس از فجاجی هسته‌ای گذشته دارد. بررسی‌های این مطالعه نشان می‌دهد افزون‌براین، جنگ روسیه و اوکراین و به مخاطره افتادن امنیت انرژی کشورهای اروپایی به دلیل وابستگی به گاز روسیه، در واقع به دلیل عدم قطعیت زیادی که تولید برق از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی‌های خورشیدی و بادی دارد، استفاده از منابع تولید برقی که عدم قطعیت انرژی‌های تجدیدپذیر و درعین‌حال، انتشار گازهای گلخانه‌ای سوخت‌های فسیلی را نیز نداشته باشد، علت اصلی روی آوردن کشورهای صنعتی به توسعه انرژی هسته‌ای است. در مقابل، هزینه بالای احداث نیروگاه‌های هسته‌ای و احتمال نشت رادیواکتیو همچنان موانع اصلی توسعه این انرژی به شمار می‌روند. در کشور ما نیز عدم تکافوی ظرفیت تولید برق نیروگاه‌ها در مقایسه با میزان مصرف برق و وابستگی زیاد نیروگاه‌های کشور به گاز طبیعی و ناترازی در تولید و مصرف این حامل انرژی، امنیت انرژی کشور را با مخاطره جدی روبه‌رو کرده است. در همین راستا، برنامه‌ریزی برای گسترش انرژی هسته‌ای در کشور با برطرف کردن مسئله تأمین مالی طرح‌ها، تمرکز بر توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای کوچک‌مقیاس و استفاده از ظرفیت شرکت‌های دانش‌بنیان برای توسعه صنعت هسته‌ای توصیه می‌شود.

واژگان کلیدی: انرژی هسته‌ای، امنیت انرژی، ناترازی انرژی.

مقدمه

دارند، اما این منابع همواره در اثر تغییرات فصلی دارای نوسان زیادی در میزان تولید برق در دوره‌های مختلف هستند. جنگ روسیه و اوکراین نیز تأمین انرژی از منابع داخلی را برای بیشتر کشورهای اروپایی بیش‌ازپیش مهم‌تر کرده است.

یکی از منابع مورد توجه بیشتر کشورهای صنعتی (به‌ویژه در اتحادیه اروپا) انرژی هسته‌ای است. تاریخ تولید برق هسته‌ای همواره با رخداد‌های فاجعه‌باری

با توجه به افزایش نگرانی‌ها درباره وابستگی بیش‌ازپیش کشورهای اروپایی به نفت و گاز وارداتی، نوسان شدید قیمت سوخت‌های فسیلی و تلاش برای افزایش سهم منابع انرژی دوستدار محیط‌زیست، این کشورها در نظر دارند سهم انرژی هسته‌ای را در سبد تأمین انرژی اروپا افزایش دهند. منابع تجدیدپذیر تأمین انرژی نقش مهمی در حفاظت از محیط‌زیست و مبارزه با تغییرات اقلیمی

کشورهای صنعتی می‌پردازد. سازمان‌دهی گزارش بدین صورت است که پس از مقدمه، در بخش نخست به بررسی جایگاه انرژی هسته‌ای در برنامه‌های انرژی کشورهای مختلف پرداخته می‌شود. بخش دوم به بررسی عوامل تقویت‌کننده و تضعیف‌کننده استفاده از نیروگاه‌های هسته‌ای اختصاص دارد. بخش سوم به تبیین روند آتی استفاده از انرژی هسته‌ای اختصاص دارد. بخش آخر نیز به نتیجه‌گیری و ارائه راهکارها می‌پردازد.

۱- جایگاه انرژی هسته‌ای در برنامه‌های انرژی کشورهای مختلف

بر اساس داده‌های آژانس بین‌المللی انرژی^۱ (۲۰۲۳)، ۴۳۹ رآکتور هسته‌ای در حدود ۳۲ کشور جهان وجود دارد که حدود ۱۰ درصد از برق جهان را تأمین می‌کنند. بر اساس برآوردها تا سال ۲۰۵۰، این رقم به ۲۵ درصد نیز افزایش خواهد یافت. در حال حاضر تعداد رآکتورهای فعال (در مرحله بهره‌برداری)، ۴۲۲ مورد با ظرفیت حدود ۳۷۸ هزار گیگاوات است و ۱۷ رآکتور معلق با ظرفیت ۱۵۴۴۸ گیگاوات نیز وجود دارد. همچنین، ۵۷ رآکتور انرژی هسته‌ای در دست ساخت است که ظرفیت انرژی ۵۹/۵ هزار گیگاوات را فراهم می‌کند. در سال ۲۰۲۳، ایالات متحده آمریکا در توانایی تولید برق از انرژی هسته‌ای در رتبه نخست بود و پس از آن فرانسه و چین و ژاپن و روسیه قرار داشتند. در این بخش، جایگاه انرژی هسته‌ای را در سبد انرژی کشورها و مناطق مختلف مورد بررسی قرار می‌دهیم.

همراه بوده که گاه باعث شده است کشورهای مختلف برنامه‌های تولید برق هسته‌ای را بر اساس نتایجی که این رخدادها به همراه داشتند، تغییر دهند، اما تمایل به راه‌اندازی نیروگاه‌های هسته‌ای هم‌اکنون در برنامه انرژی کشورهای مختلف قرار گرفته است و پیش‌بینی می‌شود سرعت راه‌اندازی نیروگاه‌های هسته‌ای در سال‌های آینده بیشتر نیز شود.

در کشور نیز عدم تکافوی ظرفیت تولید برق نیروگاه‌ها در مقایسه با میزان مصرف برق از جمله چالش‌های صنعت برق در سال‌های اخیر بوده که باعث وقوع خاموشی‌هایی در فصول گرم سال شده است. از سوی دیگر، به دلیل 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 می‌شود و نیروگاه‌های کشور ناچار به استفاده از سوخت‌های با آلاینده‌گی بیشتر می‌شوند. یکی از راهکارهای حل این چالش، تنوع‌بخشی به سبد تولید برق کشور و بهره‌برداری بیشتر از دیگر منابع تولید برق است. از آنجاکه یکی از 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.

نظر به اهمیت چرایی این رویکرد و نتایج و پیامدهای آن، این تحقیق به علل و ابعاد افزایش سرمایه‌گذاری روی نیروگاه‌های هسته‌ای در

1. International Energy Agency

– اتحادیه اروپا

حدود یک‌چهارم انرژی اتحادیه اروپا حاصل فعالیت رآکتورهای هسته‌ای است و بیش از نیمی از این میزان در فرانسه تولید می‌شود. در واقع، فرانسه که حدود ۷۰ درصد انرژی خود را از انرژی هسته‌ای تأمین می‌کند، در استفاده از این انرژی در اروپا صدرنشین است. متحدان فرانسه شامل برخی کشورهای فقیرتر اروپای شرقی هستند که رآکتورهای هسته‌ای دارند یا قصد احداث آن را برای کاهش وابستگی اقتصاد خود به زغال‌سنگ دارند. در مجموع، ۱۰۳ رآکتور در ۱۳ کشور از ۲۷ کشور عضو اتحادیه اروپا مشغول فعالیت هستند. این رآکتورها در سال ۲۰۱۹، حدود ۵۰ درصد انرژی الکتریسته تولید شده بدون استفاده از سوخت‌های فسیلی (کم‌کربن) را در کشورهای عضو تأمین کردند. با این حال، در میان کشورهای عضو اتحادیه اروپا دیدگاه‌های متفاوتی نسبت به استفاده از انرژی هسته‌ای وجود دارد. این موضوع در کنار نگرانی‌های ایمنی، انرژی هسته‌ای را به موضوعی بحث‌برانگیز تبدیل کرده است.

برخی از کشورها به رهبری فرانسه این فناوری را ترویج می‌کنند و در مقابل، گروهی به رهبری آلمان و اتریش بر اولویت دادن به منابع انرژی تجدیدپذیر تأکید دارند. در همین راستا، گروهی متشکل از کشورهای حامی انرژی هسته‌ای اتحادیه اروپا به رهبری فرانسه در ابتدای سال ۲۰۲۴ خواستار سیاست‌های مؤثرتری در

مورد انرژی هسته‌ای شدند و در بیانیه مشترک خود عنوان کردند که «این حرکت باید اکنون به چهارچوب جامع و توانمند اروپایی برای توسعه هسته‌ای تبدیل شود و ابعاد سیاست‌های اساسی از جمله تأمین مالی آن مورد بررسی قرار گیرد»^۱. این کشورها با امضای بیانیه‌ای، از انرژی هسته‌ای به‌عنوان «یکی از ابزارهای متعدد برای دستیابی به اهداف آب‌وهوایی، تولید برق پایه و تضمین ایمنی عرضه» یاد کردند. ترویج تحقیقات، نوآوری و «قوانین ایمنی یکنواخت» از جمله اهداف تعیین شده برای این ائتلاف است که در عین حال، چگونگی همکاری به‌منظور ساخت رآکتورهای بیشتر را نیز مدنظر دارد.

در همین حال، اتریش و آلمان نماینده ۱۳ کشور و خواستار حمایت بیشتر اتحادیه اروپا از انرژی‌های تجدیدپذیر بودند. در بیانیه این گروه به‌طور مستقیم به انرژی هسته‌ای اشاره نشده است، اما دیپلمات‌های اتحادیه اروپا چنین عنوان کردند که هدف از تأکید بر سرمایه‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر، تمرکز بر توسعه شبکه‌های برق مبتنی بر تجدیدپذیرها به جای انرژی اتمی بوده است. در بیانیه این کشورها همچنین آمده است «تأمین مالی باید بر فناوری‌های مقرون‌به‌صرفه متمرکز شود که در آن اهداف مشترک وجود دارد»^۲.

به‌طور خلاصه می‌توان چنین عنوان کرد که اتحادیه اروپا اهداف مشترکی برای گسترش

۱. این بیانیه (موافقان گسترش انرژی هسته‌ای در اتحادیه اروپا) توسط بلغارستان، کرواسی، جمهوری چک، فنلاند، فرانسه، مجارستان، هلند، لهستان، رومانی، اسلواکی، اسلونی و سوئد امضا شد.

۲. این بیانیه (مخالفان گسترش انرژی هسته‌ای در اتحادیه اروپا) توسط دانمارک، استونی، یونان، ایرلند، ایتالیا، لتونی، لوکزامبورگ، مالت، هلند، پرتغال و اسپانیا امضا شد.

تولیدی خود را به قیمت تضمینی ارائه شده از سوی دولت، به فروش می‌رسانند. بر اساس پیش‌بینی‌های آژانس بین‌المللی انرژی، این اقدامات قیمت انرژی هسته‌ای را در چین به حدود ۷۰ دلار در هر مگاوات ساعت رسانده درحالی‌که این رقم در ایالات متحده ۱۰۵ دلار و در اتحادیه اروپا ۱۶۰ دلار است.

چین همچنان برای دسترسی به اورانیمی که سوخت رآکتورها را تأمین می‌کند، به کشورهای دیگر وابسته است، اما بیشتر رآکتورهای جدید و برنامه‌ریزی شده آن به‌ویژه رآکتور هوآلونگ ۱، بر اساس طرح‌های چینی ساخته می‌شود. این کشور اکنون به دنبال صادرات چنین فناوری‌هایی است و پیش‌تر با پاکستان و آرژانتین قراردادهایی را امضا کرده است. با توجه به اینکه بسیاری از تجهیزات این رآکتورها در داخل این کشور تأمین می‌شود، برنامه کنترل صادرات فناوری به چین که دولت بایدن برقرار کرده و هدف آن ممانعت از رسیدن فناوری‌های پیشرفته با منشأ آمریکایی به چین است، چندان مانع کار چینی‌ها نشده است.

دلیل تسلط چین در ساخت رآکتورهای هسته‌ای این است که این صنعت به شدت مورد حمایت دولت است و در نتیجه، سازندگان رآکتورها می‌توانند چندین واحد هسته‌ای را با هزینه کمتر بسازند. تأمین مالی از سوی دولت، زنجیره تأمین تحت حمایت دولت و تعهد دولتی برای ایجاد این فناوری از دلایل موفقیت صنایع هسته‌ای در چین است. از سویی این صنعت با صادراتی شدن به چین امکان می‌دهد تا نفوذ ژئوپلیتیکی خود را گسترده‌تر کند.

انرژی‌های تجدیدپذیر دارد، اما هیچ هدف مشترکی در این اتحادیه برای انرژی هسته‌ای دیده نمی‌شود.

- آسیا

منطقه آسیا دارای بیشترین تعداد رآکتورهای هسته‌ای است و پس از آن اروپای غربی و مرکزی، آمریکای شمالی، اروپای شرقی و روسیه، آمریکای جنوبی و آفریقا قرار دارد. در واقع، آسیا همچنان منطقه مسلط در ساخت رآکتورهای جدید و در مجموع، از سال ۲۰۰۵، ۷۰ رآکتور با ظرفیت عملیاتی ۶۳/۶ گیگاوات در مدار قرار گرفته است.

چین در منطقه آسیا از جمله کشورهایی است که برنامه‌ریزی گسترده‌ای برای استفاده از انرژی هسته‌ای در سبد تولید انرژی خود داشته است. چین ۵ درصد از برق مورد نیاز خود را از ۵۴ نیروگاه هسته‌ای فعال در این کشور تأمین می‌کند. هم‌اکنون ساخت و ساز ۲۲ رآکتور در حال انجام و ۳۸ طرح دیگر تصویب شده است. چین به دنبال این است که با احداث ۶ تا ۸ رآکتور هسته‌ای تا سال ۲۰۳۰، به کشوری که دارای بیشترین ظرفیت در این زمینه در جهان است، تبدیل شود.

چین با اعطای وام‌های ارزان و نیز زمین و مجوز به شرکت‌های انرژی دولتی، مسیر انرژی هسته‌ای را هموار کرده است. چین به تأمین کنندگان انرژی هسته‌ای یارانه‌هایی می‌دهد که به‌عنوان «خرید تضمینی برق» شناخته می‌شوند. «خرید تضمینی برق» برنامه‌ای است که در آن بیشتر کشورها منابعی را برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و نیروگاه‌های برق به سرمایه‌گذاران اعطا می‌کنند و مالکان نیروگاه‌ها، برق



- آفریقا

محل نیروگاه قرار گیرد، این فرایند سریع‌تر و ارزان‌تر از ساخت رآکتورهای بزرگ‌تر است.

قانون کاهش تورم که در اوت سال ۲۰۲۲ به تصویب رسید، از سرمایه‌گذاری و مشوق‌های مالیاتی برای ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای بزرگ موجود و رآکتورهای پیشرفته جدیدتر و نیز اورانیم با غنای پایین و تولید هیدروژن حمایت می‌کند. تقریباً تمام ظرفیت تولید هسته‌ای آمریکا از رآکتورهای می‌آید که در سال‌های ۱۹۶۷ تا ۱۹۹۰ ساخته شدند. تا سال ۲۰۱۳، تقریباً هیچ نیروگاه جدیدی ساخته نشد. دلیلش هم جذاب‌تر بودن تولید برق از گاز بود.

- عربستان سعودی

عربستان سعودی برنامه‌هایی برای ایجاد صنعت برق هسته‌ای دارد. این کشور در سال ۲۰۱۳، ایجاد ۱۷ گیگاوات ظرفیت هسته‌ای را تا سال ۲۰۳۲ پیش‌بینی کرده بود، اما این هدف دو سال بعد کنار گذاشته شد. در حال حاضر تقریباً تمام برق کشور از سوخت‌های فسیلی تولید می‌شود. در سال ۲۰۱۰، بر اساس فرمان سلطنتی، توسعه انرژی اتمی برای برآوردن نیازهای روبه‌رشد این کشور در دستور کار قرار گرفت. برنامه‌های اتمی این کشور با حضور شرکت‌های سوئیدی و فنلاندی آغاز شد. در سال ۲۰۱۱، عربستان از برنامه‌های خود برای راه‌اندازی ۱۶ رآکتور هسته‌ای با هزینه بیش از ۳۰۰ میلیارد ریال (۸۰ میلیارد دلار) در ۲۰ سال آینده خبر داد. از سوی، عربستان برای نمک‌زدایی آب دریا برنامه‌هایی برای احداث رآکتورهای کوچک دارد. در فوریه سال ۲۰۲۲، عربستان سعودی تأسیس شرکت هلدینگ

آفریقای جنوبی در سطح آفریقا تنها کشوری است که نیروگاه هسته‌ای فعال دارد. این نیروگاه در جنوب غربی کشور و در ۳۰ کیلومتری شمال کیپ‌تاون قرار دارد و از دو رآکتور تشکیل شده است. این نیروگاه، حدود ۶ درصد از برق مصرفی آفریقای جنوبی را تولید می‌کند.

- ایالات متحده آمریکا

بر اساس گزارش اداره اطلاعات انرژی ایالات متحده، این کشور در حال حاضر ۵۴ نیروگاه هسته‌ای فعال دارد. بر همین اساس، از اول اوت سال ۲۰۲۳، این کشور ۹۳ رآکتور هسته‌ای تجاری در این ۵۴ نیروگاه هسته‌ای دارد که در ۲۸ ایالت پراکنده هستند. ظرفیت تولید هسته‌ای ایالات متحده در طول تابستان سال ۲۰۲۳، به‌طور متوسط روزانه ۳/۱ گیگاوات بود. در آمریکا اقداماتی که در کنگره برای تشویق رآکتورهای جدید انجام می‌شود، از حمایت گسترده دوحزبی برخوردار است؛ زیرا قانون‌گذاران این فناوری را که زمانی بحث‌برانگیز بود، دوباره پذیرفته‌اند.

ایالات متحده یارانه‌هایی را برای راه‌اندازی دوباره برخی نیروگاه‌های هسته‌ای موجود و فروش برخی رآکتورهای هسته‌ای بزرگ به اروپای شرقی پرداخت می‌کند. این کشور بیشتر بر افزایش بازار فناوری رآکتورهای کوچک مدولار و پیشرفته و ظرفیت غنی‌سازی سوخت تأکید دارد. رآکتورهای هسته‌ای کوچک‌تر به دلیل کوچک بودن، هزینه ساخت کمتری دارند و نیز به این دلیل که طراحی مدولار اجازه می‌دهد تا قطعات سازنده نیروگاه در کارخانه ساخته شود و در

جدیدترین آمار اعلامی وزارت نیرو، نیروگاه اتمی بوشهر با ظرفیت ۱۰۲۰ مگاواتی، سهمی ۱/۱ درصدی در تولید برق کشور دارد.

سند تراز تولید و مصرف گاز طبیعی در کشور تا اواخر سال ۱۴۲۰ که در سال ۱۳۹۹ به تصویب شورای عالی انرژی رسید، افزایش استفاده از نیروگاه های هسته ای را به عنوان یکی از سیاست های صرفه جویی در مصرف گاز طبیعی

عنوان می کند. طبق این سند، به منظور تأمین امنیت عرضه گاز طبیعی در کنار دیگر اقدامات، افزایش ظرفیت نیروگاه های هسته ای در حدود ۳۰۰۰ مگاوات تا سال ۱۴۱۰ و حدود ۸۰۰۰ مگاوات تا اواخر سال ۱۴۲۰ هدف گذاری شده است. بر این اساس، روند توسعه نیروگاه های هسته ای در کشور تا اواخر سال ۱۴۲۰ به صورت جدول شماره ۱ است.

جدول ۱- پیش بینی افزایش ظرفیت برق هسته ای کشور تا اواخر سال ۱۴۲۰

سال	۱۴۲۰	۱۴۱۵	۱۴۰۶	۱۴۰۰
ظرفیت برق هسته ای (مگاوات)	۸۴۰۰	۵۲۵۰	۳۱۵۰	۱۰۵۰

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

در مجموع، حرکت سریع به سمت تولید برق از انرژی هسته ای به ویژه پس از ناآرامی های ناشی از جنگ روسیه و اوکراین ضروری شده است. تولید برق از انرژی هسته ای به طور شایان توجهی پیش می رود و تا اندازه زیادی با اهداف بین المللی و برنامه های ملی در دستیابی به کاهش انتشار کربن تا سال ۲۰۵۰ مطابقت دارد. انرژی هسته ای از نظر اطمینان، پایداری و هزینه کم بر همتایان

هسته ای را اعلام کرد که به عنوان توسعه دهنده انرژی هسته ای این کشور عمل خواهد کرد. تشکیل این نهاد ابتدا در سال ۲۰۱۳ مطرح شده بود. در سپتامبر سال ۲۰۲۳، وزیر انرژی این کشور از برنامه های دولت برای ساخت نیروگاه هسته ای خبر داد.

- ایران

بهره برداری از کاربردهای صلح آمیز فناوری هسته ای از جمله تولید برق هسته ای همواره مورد مطالبه رهبر معظم انقلاب اسلامی بوده است و بسیاری از اسناد بالادستی و برخی قوانین مصوب مجلس شورای اسلامی از جمله قوانین پنج ساله توسعه هم بر ایجاد نیروگاه های هسته ای تأکید کرده اند. در حال حاضر نیروگاه اتمی بوشهر با یک واحد نیروگاهی با ظرفیت ۱۰۰۰ مگاوات در حال فعالیت است و واحدهای جدیدی نیز در حال ساخت هستند.

خاطر نشان می شود قرارداد ساخت نیروگاه بوشهر در نیمه دهه ۱۳۵۰ منعقد شد. این نیروگاه پس از تأخیری ۳۵ ساله به شبکه سراسری برق ایران متصل شد. واحد یکم نیروگاه اتمی بوشهر از سال ۱۳۹۰ و آن هم پس از بارها تعویق، به تولید برق رسید. شرکت روسی «اتم استروی اکسپورت» در سال ۱۳۹۲، این نیروگاه را به شکل کامل به ایران تحویل داد.

در سال ۱۳۹۹، رئیس وقت سازمان انرژی اتمی به مسکو سفر کرد تا برای ادامه توسعه نیروگاه بوشهر «تفاهم های اولیه» ای با روسیه داشته باشد. این نیروگاه سال گذشته با تولید ۶ میلیون مگاوات ساعت برق و تزریق به شبکه سراسری، یکی از سال های موفق خود را در زمینه تولید برق پشت سر گذاشت. بر اساس



گلخانه‌ای مرتبط است. اقلیم‌شناسان بر این باورند که دنیا برای رسیدن به هدف کاهش ۱/۵ درجه سانتی‌گراد گرمایش جهانی، باید مصرف سوخت‌های فسیلی را به‌صورت فوری کاهش دهد. در سال ۲۰۲۲، اتحادیه اروپا پس از ماه‌ها بحث و بررسی، تولید برق هسته‌ای را در رده انرژی‌های سبز تقسیم‌بندی و توسعه استفاده از آن را به کشورها توصیه کرد.

در سمت دیگر، عوامل و زمینه‌های تضعیف‌کننده مهمی همچنان مانع از توسعه سریع انرژی هسته‌ای در سبد تولید انرژی کشورها می‌شود. نخستین مسئله در این خصوص، فجایع محیط‌زیستی است که این نیروگاه‌ها در طول تاریخ مسبب آن بوده‌اند. پس از حادثه سال ۱۹۷۹ نیروگاه تری‌مایل‌آیلند در ایالت پنسیلوانیا و سپس فاجعه چرنوبیل در سال ۱۹۸۶ و حادثه فوکوشیما در سال ۲۰۱۱، نگاه و افکار عمومی نسبت به انرژی هسته‌ای به شکل گسترده‌ای تغییر کرد. در آلمان، ترس از ایمنی ناشی از احتمال بروز حادثه برای نیروگاه‌های هسته‌ای، مواضع جنبش زیست‌محیطی و حزب سبز این کشور را تقویت کرده است. دولت چپ میانه آلمان در سال ۲۰۰۲، قانونی را برای جلوگیری از ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای جدید تصویب کرد. براین اساس، قرار بود تمام رآکتورهای موجود نیز در آینده از فعالیت بازمانند. بیشتر نیروگاه‌های هسته‌ای در سراسر اروپا و آمریکای شمالی با رسیدن به پایان عمر خود با تعطیلی احتمالی مواجه می‌شوند. برخی کشورها نیز مخالف استقرار سریع منابع انرژی تجدیدپذیر هستند. این روندها ناشی از دیدگاه‌های متفاوت و تا حدودی

خود در انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه با در نظر گرفتن سن نسبتاً بالای نیروگاه هسته‌ای مزیت دارد.

۲- عوامل تقویت‌کننده و تضعیف‌کننده استفاده از نیروگاه‌های هسته‌ای

هم‌اکنون مجموعه عوامل متعددی در راستای تقویت استفاده از انرژی هسته‌ای در کشورها و مناطق مختلف وجود دارد. همان‌طور که در جدول شماره ۲ خلاصه شده است، نخستین عامل اقبال کشورها به ساخت نیروگاه هسته‌ای را می‌توان به شرایط برآمده از جنگ روسیه و اوکراین نسبت داد. تداوم وابستگی به سوخت‌های فسیلی صادراتی که از کشورهای نامطمئن مانند روسیه تأمین می‌شود، می‌تواند امنیت انرژی هر کشوری را به خطر اندازد. یکی از راهکارهای کاهش ریسک امنیت انرژی، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و نیز تولید برق هسته‌ای است. دلیل مهم دیگر، عدم قطعیت شایان توجهی است که تولید برق از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی‌های خورشیدی و بادی دارد و عدم امکان دیسپچینگ (مدیریت عرضه و تقاضای برق) این نوع منابع است. در واقع، عرضه انرژی از منابع تجدیدپذیر تا اندازه زیادی در کنترل طبیعت است. از این‌رو تطبیق دادن این منابع با تقاضای برق بدون داشتن منابع مطمئن‌تر تولید برق، امنیت شبکه را به مخاطره می‌اندازد. انرژی هسته‌ای به‌عنوان منبع پشتیبان مناسب، امنیت شبکه برق را تا اندازه زیادی افزایش می‌دهد.

سومین عامل مهم روی آوردن کشورها به انرژی هسته‌ای، به تعهد کشورها برای کاهش انتشار گازهای



دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ ساخته شده‌اند و بنابراین، در بسیاری موارد دارای عمر بالا و نیازمند تعمیر و نگهداری مداوم و پرهزینه هستند یا بسیاری از نیروگاه‌های ایالات متحده در دهه چهارم فعالیت خود هستند. برآوردها نشان می‌دهد هر رآکتور کوچک مدولار حدود ۲ میلیارد پوند هزینه دارد درحالی‌که نیروگاه‌های سستی هسته‌ای بالغ بر ۲۳ میلیارد پوند هزینه خواهند داشت.

متناقض در مورد نقش انرژی هسته‌ای در ترکیب انرژی جهانی است.

یکی از دلایل اصلی اختلاف‌نظرها در مورد انرژی هسته‌ای، قدمت بالای تأسیسات هسته‌ای و هزینه‌بر بودن تعمیر و احداث واحدهای تولیدی جدید است. برای مثال، بیشتر نیروگاه‌های فرانسه که بیش از هر کشور دیگری برق را از انرژی هسته‌ای تولید می‌کند، در

جدول ۲- عوامل تقویت‌کننده و تضعیف‌کننده توسعه انرژی هسته‌ای در دنیا

عوامل تقویت‌کننده توسعه انرژی هسته‌ای	عوامل تضعیف‌کننده توسعه انرژی هسته‌ای
اولویت یافتن مسئله امنیت عرضه انرژی به‌ویژه پس از جنگ روسیه و اوکراین و افزایش قیمت انرژی‌های فسیلی به همراه اختلال زنجیره تأمین آنها	مسائل نشت (چرنوبیل و فوکویاما)
عدم قطعیت گسترده در تأمین انرژی از تجدیدپذیرها	هزینه بالای راه‌اندازی نیروگاه‌های هسته‌ای
عدم انتشار گازهای گلخانه‌ای	زمان‌بر بودن بهره‌برداری از نیروگاه‌های هسته‌ای

مأخذ: یافته‌های پژوهش.

۳- روند آتی انرژی هسته‌ای

سرمایه‌گذاری زیادی در زمینه انرژی هسته‌ای دارند. هند با ۸ رآکتور در دست ساخت که قادر به تولید بیش از ۶ گیگاوات برق است، دومین کشور دنیا در ساخت رآکتورهای هسته‌ای است. رتبه ۳ نیز از آن ترکیه با ۴ رآکتور هسته‌ای در حال ساخت با ظرفیت احتمالی ۴/۵ گیگاوات است. نخستین نیروگاه‌های هسته‌ای ترکیه می‌توانند تا ۳۵ میلیارد کیلووات ساعت برق در سال تولید کنند و چهار رآکتور آن تا سال ۲۰۲۸ به‌طور کامل فعال می‌شود. همچنین، طول عمر نیروگاه آک‌کویو در مرسین طبق برنامه‌ریزی‌ها ۸۰ سال است. تخمین زده می‌شود که این نیروگاه در کاهش انتشار کربن به‌طور متوسط سالانه ۳۵ میلیون تن کمک کند. این طرح ۱/۵ میلیارد دلاری در هزینه‌های واردات گاز طبیعی از خارج صرفه‌جویی می‌کند و بر درآمد ملی ترکیه نیز تأثیر مثبت دارد.

درحالی‌که برخی از کشورهای اروپایی و آمریکای شمالی برای کنار گذاشتن ناوگان رآکتورهای خود آماده می‌شوند، به باور کارشناسان، این انرژی در دیگر مناطق جهان چشم‌انداز مثبتی دارد؛ زیرا تقاضای انرژی همچنان به‌سرعت در حال افزایش است. بر اساس گزارش انجمن جهانی هسته‌ای، کشورهای چین، هند، روسیه و ترکیه در سال‌های آینده نقش پیشرو را در رشد انرژی هسته‌ای ایفا می‌کنند؛ به‌طوری‌که ۸۵ درصد از ظرفیت‌های اضافه‌شده، خارج از اروپای غربی و آمریکای شمالی است که اکثریت ظرفیت تولید انرژی هسته‌ای جهانی را در نیم‌قرن گذشته به خود اختصاص داده است.

بیش از ۴۰ درصد از ۶۱ نیروگاه هسته‌ای در حال ساخت در چین است. هند و روسیه نیز



خالص کربن صفر برسد. این گزارش می‌افزاید ظرفیت هسته‌ای در سال ۲۰۲۲ در سراسر جهان ۴۰ درصد افزایش یافت و چین، فنلاند، کره جنوبی و پاکستان پیشتاز این افزایش ظرفیت بودند.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد راهکارها

با توجه به نیاز کشور به افزایش ظرفیت تولید برق و نیز وابستگی زیاد صنعت برق کشور به گاز طبیعی و چالش تأمین سوخت نیروگاه‌ها، تنوع‌بخشی به سبد تولید برق و استفاده از دیگر منابع تولید برق مانند انرژی هسته‌ای به‌عنوان راهکار عملی مطرح است. راهکارهای پیشنهادی در این حوزه به شرح زیر است.

- تمرکز بر توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای کوچک مقیاس: نیروگاه‌های هسته‌ای کوچک با ظرفیت پایین، نسل جدیدی از نیروگاه‌ها هستند که مزایای زیادی از جمله هزینه‌بری پایین و زمان کمتر برای راه‌اندازی نسبت به نیروگاه‌های هسته‌ای متداول دارند و امکان ساخت آن‌ها در یک مکان و سپس انتقال و بهره‌برداری از آن‌ها در مکانی دیگر برای رآکتورهای مدولار کوچک مقیاس وجود دارد. این نیروگاه‌ها به‌طور معمول توان تولید برق کمتر از ۳۰۰ مگاوات را دارند که حدود یک‌سوم ظرفیت تولیدی رآکتورهای سستی است. همچنین، مقیاس‌پذیری یکی از ویژگی‌های این نیروگاه‌ها با ظرفیت پایین است؛ به‌طوری‌که نیروگاه هسته‌ای استفاده‌کننده از رآکتورهای کوچک می‌تواند کار خود را با یک رآکتور آغاز کند و سپس با افزایش تقاضا ظرفیت خود را بالا ببرد. این موضوع موجب کاهش هزینه‌های راه‌اندازی مرتبط با نیروگاه‌های معمولی می‌شود.

در آسیا که میزان بیشترین ظرفیت تولیدات خودرو، لوازم الکترونیکی، سوخت، فلزات و کالا در جهان است، تمایل کمتری برای ایجاد اختلال در زیرساخت‌های برق وجود دارد؛ زیرا برای حفظ اقتصادهای درحال‌رشد سریع منطقه و ایجاد شغل ضروری است. در این منظر، انرژی هسته‌ای به‌عنوان جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی در راستای تولید برق پایه در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند با افزایش حجم انرژی‌های تجدیدپذیر در سراسر آسیا و دیگر مناطق در دهه‌های آینده تکمیل شود. برای مثال، چین، رتبه نخست در کاربست انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان، از نظر توسعه برنامه‌ریزی‌شده انرژی هسته‌ای پیشتاز است. انتظار می‌رود این کشور ۴۴ درصد از کل افزایش بالقوه در ظرفیت انرژی هسته‌ای را به خود اختصاص دهد و از ایالات متحده پیشی بگیرد.

رافائل ماریانو گروسی، رئیس آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، در اجلاس کاپ ۲۸ در سال ۲۰۲۳ عنوان کرد «تحقیقات تأیید می‌کند که هدف انتشار خالص کربن صفر جهانی تنها با سرمایه‌گذاری سریع، پایدار و شایان توجه در انرژی هسته‌ای تا سال ۲۰۵۰ محقق می‌شود». فاتح بیروول، رئیس آژانس بین‌المللی انرژی نیز عنوان کرده است که انرژی هسته‌ای در حال بازگشت بسیار قوی است؛ هرچند نیازمند حمایت دولت‌ها برای توسعه طرح‌های مربوط به آن است. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی که در اکتبر منتشر شد، ظرفیت انرژی هسته‌ای دنیا باید از ۴۱۷ گیگاوات در سال ۲۰۲۲، به بیش از ۹۰۰ گیگاوات در سال ۲۰۵۰ برسد؛ یعنی بیش از دو برابر شود تا در آن سال دنیا به هدف انتشار

شرکت‌های دانش‌بنیان و فناوری در زنجیره ارزش صنعت هسته‌ای در راستای توسعه محصولات و خدمات تخصصی و تجاری‌سازی دستاوردهای پژوهشی، همکاری و مشارکت در توسعه کاربرد فناوری‌های مرتبط با صنعت هسته‌ای و ارتقای کارکردهای نظام نوآوری و فناوری در بخش علوم و فنون هسته‌ای به امضا رسیده است که در آن مجموع ارزش طرح‌های تعریف‌شده در دوره چهارساله به میزان ۲۰ هزار میلیارد ریال و مجموع ارزش مشارکت در توسعه زیرساخت‌های فناورانه، مشارکت در یکی از صندوق‌های غیردولتی پژوهش و فناوری و حمایت از تحقیق و توسعه در مجموع، ۱۲ هزار و ۵۰۰ میلیارد ریال تعیین شده است.

منابع

- شورای عالی انرژی، (۱۴۰۰)، سند تراز تولید و مصرف گاز طبیعی در کشور تا افق سال ۱۴۲۰.
- شبکه اطلاع‌رسانی نفت و انرژی (۱۴۰۰).
- مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی (۱۴۰۱). وضعیت توسعه کاربردهای فناوری هسته‌ای در ایران و جهان. ایران، تهران: مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی جمهوری اسلامی ایران.
- Alliance of CEO Climate Leaders share open letter to world leaders for COP28, (<https://www.weforum.org/>).
- International Energy Agency (IEA), Energy Technology Perspectives, 2023.

- برنامه‌ریزی برای گسترش انرژی هسته‌ای در کشور با برطرف کردن مسئله تأمین مالی طرح‌ها: برای رسیدن به رقم ۲۰ هزار مگاوات برق هسته‌ای که مورد تأکید رهبر معظم انقلاب اسلامی نیز هست، برنامه‌ریزی برای برطرف کردن موانع از جمله مسئله تأمین مالی جدی است. بر اساس پیش‌بینی‌های وزارت نیرو، تا سال ۱۴۱۰ باید ۸ درصد از برق تولیدی کشور از طریق نیروگاه‌های هسته‌ای تأمین شود، اما حتی با بهره‌برداری از واحدهای دوم و سوم نیروگاه بوشهر که هم‌اکنون در دست احداث است نیز این هدف محقق نمی‌شود. یکی از موانع توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای، مسئله تأمین مالی آن‌هاست. بررسی‌ها حاکی است که روش‌های تأمین مالی سرمایه‌گذاری مستقیم غیردولتی (سرمایه‌گذاری خارجی و خصوصی) و قراردادهای ساخت، بهره‌برداری و انتقال از جمله روش‌های تأمین مالی مؤثر در نیروگاه‌های هسته‌ای به شمار می‌روند.

- استفاده از ظرفیت شرکت‌های دانش‌بنیان برای توسعه صنعت هسته‌ای: نقش‌آفرینی شرکت‌های دانش‌بنیان به عنوان مصادیق مردمی‌سازی اقتصاد در صنعت هسته‌ای می‌تواند ضمن تکمیل زنجیره ارزش این صنعت و کاربردی‌سازی آن، توسعه محصولات و خدمات ارزش‌آفرین و اشتغال‌زا را به ارمغان آورد. براین اساس، توافق‌نامه همکاری مشترک «معاونت علمی، فناوری و اقتصاد دانش‌بنیان ریاست‌جمهوری» و «سازمان انرژی اتمی ایران»، با اهدافی مانند حمایت و بهره‌مندی از ظرفیت