تحلیل ظرفیت بهینه نیروگاهی در ایران و بررسی اثرات صرفه‌جویی مصرف انرژی برآن

تیمور محمدی[1]- عاطفه تکلیف[2]- محسن بختیار[3] (نویسنده مسئول)

۱. دانشیار دانشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبائی (ره)

۲. استادیار دانشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبائی (ره)

۳. دانشجوی دکتری اقتصاد نفت و گاز، پردیس دانشگاه علامه طباطبائی (ره)

bakhtiar@iranenergy.org.ir

توضیح سردبیر: این مقاله شامل برخی نکات ویرایشی و اصلاحاتی در ارجاعات است و لذا جایگزین مقاله قبلی شده است.

چکیده:

نیاز مبرم و فزاینده به انرژی الکتریکی به ویژه در بخش‌های صنعتی، خانگی، تجاری و کشاورزی از یک سو و محدودیت منابع انرژی فسیلی در کنار افزایش نگرانی‌های زیست محیطی ناشی از مصرف این منابع برای تولید برق از سوی دیگر، لزوم برنامه‌ریزی بلندمدت برای فرآیند عرضه و مصرف انرژی الکتریکی را اجتناب‌ناپذیر ساخته است. هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی اثرات صرفه‌جویی انرژی بر توسعه بخش نیروگاهی کشور می‌باشد. بر این اساس، با به کارگیری ابزار تحلیلی مناسب توسعه سیستم عرضه برق در قالب سناریوهای ادامه روند کنونی و صرفه‌جویی انرژی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. برای انجام این مهم، با بهره‌گیری از نرم‌افزار MESSAGE، کل هزینه‌های سیستم عرضه انرژی الکتریکی به منظور تأمین تقاضای نهایی برق حداقل می‌گردد. یافته‌های این مطالعه حاکی از آن است که ظرفیت نصب شده از حدود ۷۳ هزار مگاوات در سال ۱۳۹۳ با رشد سالانه معادل ۳/٦ درصد در پایان دوره بر اساس سناریوی مرجع به ۲۵۰ گیگاوات خواهد رسید که این رقم بر اساس سناریوی صرفه‌جویی انرژی به میزان ۹۰ گیگاوات کاهش یافته و در پایان دوره با رشد سالانه‌ای معادل ۲/٤ درصد به ۱٦۰ گیگاوات خواهد رسید. این مسأله هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه را به میزان ۷۵ میلیارد دلار در طول دوره مطالعه کاهش می‌دهد.

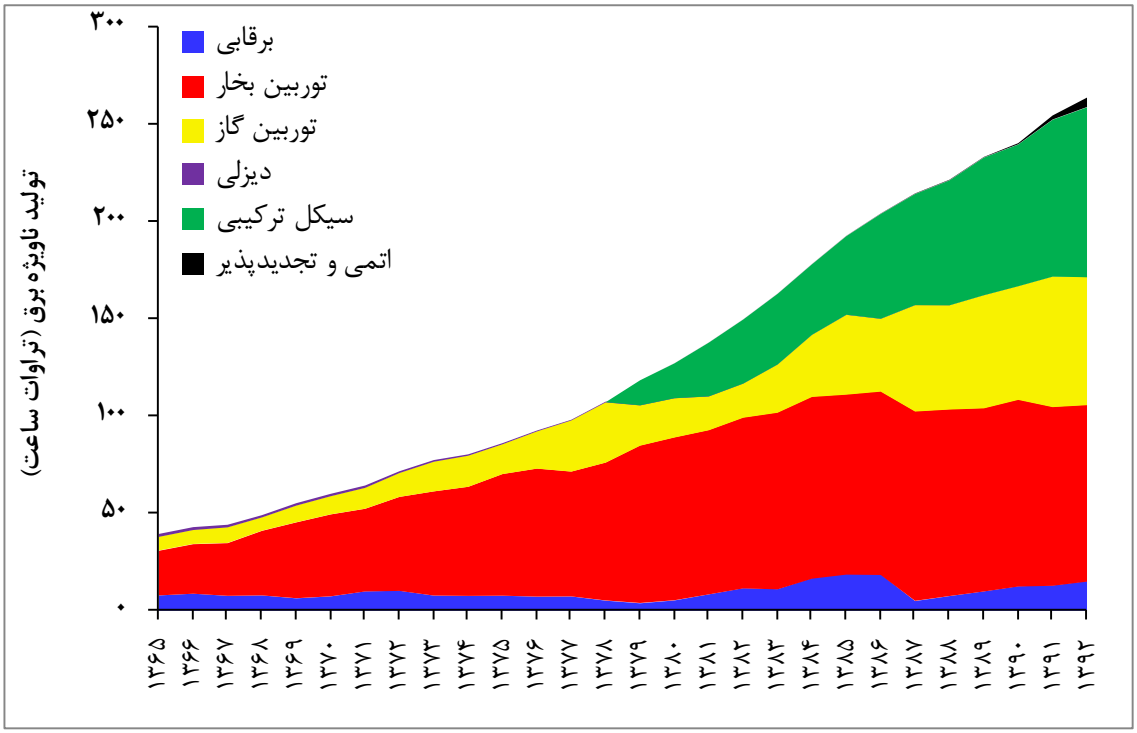
واژه‌های کلیدی: سیستم عرضه برق، نرم افزار MESSAGE، صرفه‌جویی انرژی، انرژی‌های تجدیدپذیر.

۱. مقدمه

مروری بر توسعه بخش نیروگاهی کشور طی سه دهه اخیر نشان می‌دهد که در این مدت متوسط رشد سالانه ظرفیت اسمی نصب شده ۷ درصد بوده است. کل تولید ناویژه برق یک رشد حدوداً ۷ برابری را تجربه نموده و میزان تولید از حدود ٤۰

[Downloaded from epprjournal.ir on 2024-04-19]

تراوات ساعت در سال ۱۳۶۵ به حدود ۲۶۳ تراوات ساعت در انتهای سال ۱۳۹۲ رسیده است (آمار تفصیلی ۹۲، تـوانیر ۹۳). تولید ناویژه برق به تفکیک نوع نیروگاه‌های کشور برای سـال‌هـای ۱۳۶۵ تـا ۱۳۹۲ در نمـودار (۱) مـنعکس شـده اسـت. در سال‌های اخیر نیروگاه‌های حرارتی شامل نیروگاه‌های گازی، بخاری و سیکل ترکیبی حدود ۹۵ درصـد بـرق کشـور را تولیـد نموده است. به موازات توسعه نیروگاه‌های فسیلی، نیاز این بخش به مصرف انواع حامل‌های انرژی فسیلی شامل گـاز طبیعـی، نفت کوره (مازوت) و نفت گاز (دیزل) رشد شایان توجهی نموده است. در سال‌های گذشته، سوخت‌های فسیلی مایع بیش از نیمی از نیاز بخش نیروگاهی را تأمین نموده‌اند. اما به مرور، فرآورده‌های نفتی با گاز طبیعی جایگزین شده‌اند به نحوی کـه در برخی سال‌ها سهم گاز طبیعی تا حدود ۷۵ درصد افزایش یافته است. اگر چه جایگزینی فـرآورده‌هـای نفتـی بـا گـاز طبیعـی می‌تواند در کنترل انتشار آلاینده‌های زیست محیطی از جمله دی اکسید کربن مؤثر واقع گردد، امـا رشـد روزافـزون تقاضـا و افزایش تولید نیروگاه‌های فسیلی منجر به انتشار حدود ۱۵۰ میلیون تن دی اکسید کربن در سال ۱۳۹۲ شده اسـت کـه تقریبـاً یک سوم از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشور را شامل می‌گردد (ترازنامه انـرژی ۹۲). بنـابراین بـا در نظـر گـرفتن نیـاز روزافزون تقاضای برق در سال‌های آتی، ادامه روند کنونی از منظر تأمین سوخت نیروگاهی و انتشار دی اکسید کربن در کنـار بالا بودن هزینه‌های سرمایه‌گذاری قابل توجه در این بخش، به چالشی جدی تبدیل خواهد شـد. عـلاوه بـر ایـن محـدودیت دسترسی به حامل‌های انرژی فسیلی (به ویژه در فصول سرد سال) و افـزایش احتمـالی قیمـت آنهـا، مشـکلات پـیش‌روی را جدی‌تر می‌نماید.



نمودار (۱): تولید ناویژه برق به تفکیک نیروگاه‌های مختلف در ایران (آمار تفصیلی ۹۲، توانیر ۹۳)

صرفه‌جویی در مصرف انرژی در کنار توسعه و به کارگیری فناوری‌های جایگزین، به ویژه انـرژی‌هـای پـاک (تجدیدپـذیر و هسته‌ای)، می‌تواند نقش بسزایی را در کنترل و کاهش چالش‌های مزبور ایفـا نمایـد. بنـابراین پرسـش اساسـی آن اسـت کـه صرفه‌جویی انرژی چه اثری بر روند توسعه بخش نیروگاهی دارد و جایگاه فنـاوری‌هـای نـوین در سـبد تولیـد بـرق کشـور

[Downloaded from epprjournal.ir on 2024-04-19]

چیست؟ از این رو، توجه به برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و یکپارچه به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع و فناوری‌های مختلف انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به تاثیرگذاری تکنولوژیهای مختلف انرژی بر یکدیگر و پیچیدگی استفاده از منابع انرژی توسط تکنولوژیهای مختلف برای تامین تقاضای انرژی ، به کارگیری ابزارها و مدلهای از پیش طراحی شده برای بررسی و مطالعه حالات مختلف سیستم عرضه و تقاضای انرژی و ارتباطات میان آنها ضروری است. بدین منظور مدل‌های سیستم عرضه انرژی و تحلیل تقاضای انرژی به طور گسترده‌ای توسط مراکز علمی و تحقیقاتی توسعه یافته‌اند که با استفاده از آنها، تحلیل جامع سیستم عرضه و تقاضای انرژی ممکن می‌گردد. "مدل سیستم عرضه برق، ظرفیت‌سازی بهینه برای فناوری‌های نیروگاهی و وضعیت بهینه عملیاتی آنها را به منظور تأمین تقاضای نهایی برق مشخص می‌کند." (شفیعی و همکاران، ۱۳۸۸).

در مقاله حاضر، با تعریف سناریوهای مناسب، ضمن بررسی اثرات صرفه‌جویی انرژی و اثرات افزایش احتمالی قیمت سوخت‌های فسیلی و نقش توسعه فناوری، بر روند توسعه انواع نیروگاه‌ها، مصرف انواع حامل‌های انرژی و میزان انتشار دی اکسید کربن ارزیابی می گردد. بدین منظور در بخش دوم مقاله، مدل MESSAGE به اختصار معرفی شده و سپس، ساختار سیستم عرضه برق کشور در بخش سوم ارائه می‌شود. در بخش چهارم پس از تبیین مفروضات اصلی و پایگاه اطلاعات مورد استفاده به عنوان ورودی مدل، سناریوها تعریف می‌شوند. در انتها نیز نتایج حاصل از اجرای مدل در قالب این سناریوها ارزیابی و تحلیل می‌گردد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

ابزار مورد استفاده در این مطالعه، مبتنی بر مدل بهینه‌سازی سیستم عرضه برق، توسعه یافته در محیط نرم‌افزار MESSAGE می‌باشد که توسط شفیعی و همکاران (۱۳۹۰ و ۱۳۹۳) برای دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو توسعه یافته است. متدلوژی حاکم بر این مدل، بهینه‌سازی پویا از طریق تعریف یک تابع هدف و با در نظر گرفتن محدودیتهایی نظیر منابع انرژی در دسترس، نیاز به سرمایه گذاریهای جدید، تکنولوژیهای مورد نیاز و ملاحظات زیست محیطی میباشد. با تعریف این تابع هدف و محدودیتهای آن امکان ارزیابی و تحلیل استراتژیهای مختلف عرضه انرژی و به دنبال آن تحلیل تقاضای مورد نیاز فراهم می شود. از جمله ورودی‌های مدل عبارتند از: ساختار سیستم انرژی، قیمت و جریان انرژی در سال پایه، منابع و تکنولوژیهای مختلف انرژی و مشخصات فنی و اقتصادی آنها ، تقاضای انرژی و محدودیتهای فنی و سیاستی. معیار این مدل برای بهینه یابی، حداقل کردن هزینه های سیستم انرژی با بکارگیری روش برنامه ریزی خطی است. تابع هدف مدل با ارائه اطلاعاتی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری ، هزینه‌های تعمیر و نگهداری ثابت و متغیر ، هزینه منابع انرژی، هزینه واردات انرژی (یا درآمدهای صادراتی) و هزینه‌های زیست محیطی برای تمام سطوح، تکنولوژی‌ها، مناطق و زمان‌های مختلف به نرم افزار MESSAGE شکل میگیرد. با حداقل کردن هزینه های تعریف شده در تابع هدف با لحاظ محدودیتهای فوق الذکر، وضعیت بهینه سیستم عرضه انرژی بدست می آید. معادلات و فرمولاسیون مدل در پیوست مقاله و به طور مفصل در مرجع (IAEA, 2007) ارائه شده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2024-04-19]

تاکنون مدل MESSAGE و مدلهای مشابه برای تعیین ساختار بهینهٔ سیستم عرضهٔ برق و انرژی در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه، به نتایج برخی تجربیات داخلی و بین‌المللی در استفاده از این مدل اشاره می‌گردد:

دفتر برنامه ریزی انرژی وزارت نیرو در دهه ۱۳۷۰ برای اولین بار مدل EFOM-ENV که یک مدل برنامه ریزی خطی است را به منظور تحلیل سیستم عرضه انرژی ایران بکار گرفت و با استفاده از آن، گزارشهای تحلیلی متعددی را تهیه نمود. سپس از طریق آژانس بین المللی انرژی اتمی نسخه ۵ نرم افزار MESSAGE در اختیار دفتر برنامه ریزی انرژی وزارت نیرو قرار گرفت و پس از برگزاری یک دوره آموزشی توسط آژانس بین المللی انرژی اتمی، امکان بهره گیری از این نرم افزار فراهم گردید. نسخه‌های مختلفی از مدل‌های سیستم عرضه برق و انرژی توسعه یافته و در اختیار دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو قرار گرفته است. (رجوع شود به شفیعی و همکاران (۱۳۸۸ و ۱۳۹۳))

روگنر و ریاحی (Rogner and Riahi, 2013) چشم‌انداز نیروگاه‌های هسته‌ای را در دنیا با استفاده از مدل MESSAGE و در قالب سناریوهای مختلف بررسی کرده‌اند. هدف سناریوهای این مطالعه این است که انتشار دی اکسید کربن به نحوی کنترل شود تا حداکثر میزان افزایش دما در سال ۲۰۵۰ دو درجه سانتی‌گراد باشد. از این رو گزینه‌هایی همچون نیروگاه‌های هسته‌ای، ترکیب نیروگاه‌های فسیلی با سیستم جذب و ذخیره‌سازی کربن و نیروگاه‌های تجدیدپذیر برای رسیدن به هدف این مطالعه در شرایط مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در مجموع نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که سهم بهینه نیروگاه‌های هسته‌ای در تأمین برق دنیا در سال ۲۰۵۰ بین ۵ تا ۲۰ درصد خواهد بود. همچنین نتایج این مطالعه به تفکیک مناطق جغرافیایی بیانگر این موضوع است که آسیا از بیشترین پتانسیل در زمینه توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای تا سال ۲۰۵۰ برخوردار است، کما این که دو سوم ظرفیت‌های برنامه‌ریزی شده برای ساخت طی سال‌های آتی در این قاره خواهد بود. بالا بودن رشد تقاضا دلیل اصلی برای رشد سریع نیروگاه‌های هسته‌ای در آسیا ذکر شده است (تأمین نیاز ۸۰۰ میلیون نفر به برق در سال ۲۰۳۰).

مرجع (Integriertes Ressourcen Management, 2008) به بررسی سیستم عرضه انرژی در بخشی از منطقه جنوب شرق آسیا، شامل کشورهای کامبوج، لائوس، میانمار، تایلند، ویتنام و بخشی از چین می‌پردازد. تمرکز این مطالعه بر مزایای ناشی از همکاری‌های بخش انرژی (مبادلات انرژی) بین کشورهای مزبور می‌باشد. مقایسه سناریوی "مبادلات انرژی" (امکان واردات و صادرات انواع حامل‌های انرژی بین کشورها) با سناریوی "عدم امکان مبادلات منطقه‌ای"، بیانگر کاهش هزینه‌ها تا میزان ۲۰۰ میلیارد دلار برای کل دوره مطالعه و برای مجموعه کشورهای این منطقه خواهد بود. علاوه بر این، ایجاد امنیت انرژی مزایای سناریوی همراه با مبادلات انرژی را دو چندان می‌کند.

در مرجع (Mohapatra and Mohanakrishnan, 2010) توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای برای کشور هندوستان در درازمدت مد نظر قرار گرفته است. مقایسه نتایج این مطالعه در سناریوهای مختلف نشان از رشد حدود شش برابری کل ظرفیت نصب شده نیروگاهی در یک بازه ٤٠ ساله در این کشور دارد، به گونه‌ای که میزان ظرفیت نصب شده از ۲۱۵ گیگاوات در سال ۲۰۱۲ به بیش از ۱۳۰۰ گیگاوات در سال ۲۰۵۲ خواهد رسید. در مجموع سهم بهینه نیروگاه‌های مختلف در تولید برق در سال ۲۰۵۲ به شرح زیر می‌باشند: زغال‌سنگ‌سوز ٤٣ تا ٥٦، هسته‌ای ١٦ تا ٣٣، سایر نیروگاه‌های فسیلی ۱۳ تا ۱۷ درصد و نیروگاه‌های تجدیدپذیر (آبی و غیر آبی) ۱۲ درصد.

آژانس بین‌المللی انرژی اتمی به عنوان توسعه دهنده مدل MESSAGE در دو گزارش مجزا در مراجع (IAEA, 2006) و (IAEA, 2008) چشم‌انداز توسعه پایدار بخش انرژی را به ترتیب در کشورهای برزیل و کوبا بررسی نموده است. مطالعات مربوط به کشور کوبا نشان می‌دهد که کل تولید برق از کمتر از ۲۳ تراوات ساعت در سال ۲۰۱۰ به بیش از ٤١

[Downloaded from epprjournal.ir on 2024-04-19]

تراوات ساعت در سال ۲۰۲۵ افزایش می‌یابد. گزارش مربوط به کشور برزیل نتایج را در دو سناریو ارائه کرده است. نتایج گویای این واقعیت است که نیروگاه‌های برقابی، گازی و تجدیدپذیرها (غیر آبی) به ترتیب با ٦۰ درصد، ۲۳ درصد و ۱۰ درصد بیشترین سهم را در تولید برق در سال ۲۰۲۵ به خود اختصاص خواهند داد.

هاینون و همکاران در مرجع (Hainoun et al., 2010) سیستم عرضه انرژی برای کشور سوریه را با در نظر گرفتن کل تکنولوژی‌های تبدیل انرژی در سطوح مختلف مدل‌سازی کرده‌اند. یافته‌های این مطالعه در بخش برق نشان می‌دهد که میزان ظرفیت نصب شده بهینه از حدود ۷۰۰۰ مگاوات در سال ۲۰۰۷ به حدود ۲۰۰۰۰ مگاوات در سال ۲۰۳۰ خواهد رسید. به دلیل محدودیت‌های موجود در مدل، سهم گاز طبیعی در تولید برق به شدت کاسته شده، به نحوی که سهم آن از حدود ۸۰ درصد در سال ۲۰۰۷ تا حدود ۱۵ درصد در سال ۲۰۳۰ کاهش می‌یابد. از سوی دیگر نیروگاه‌های هسته‌ای در بلندمدت ۱۵ درصد نیاز بخش نیروگاهی را تأمین نموده و مابقی (حدود ۷۰ درصد) به نیروگاه‌های بخاری با سوخت‌های مایع اختصاص داده خواهد شد. جمع‌بندی این تحقیق بیانگر این مسأله است که افزایش مصارف داخلی فرآورده‌های نفتی و کاهش میزان تولید نفت خام در سال‌های آتی، پیامدهای چالش برانگیزی را برای اقتصاد این کشور به همراه خواهد داشت.

پیش‌بینی‌های مرجع (Chaivongvilan and Sharma, 2009) در خصوص توسعه بخش نیروگاهی در کشور تایلند بیانگر متوسط رشد ۳ درصدی در تولید برق برای دوره زمانی۲۰۱۰ تا ۲۰۵۰ می‌باشد. نتایج سناریوی ادامه روند کنونی گویای این واقعیت است که گاز طبیعی و زغال سنگ سهم عمده در تأمین سوخت نیروگاهی را بر عهده داشته (۸۵ درصد)، در حالی که در سایر سناریوها، انرژی‌های تجدیدپذیر و زیست توده جایگزین سوخت‌های فسیلی خواهند شد.

به طور خلاصه، بررسی مطالعات بین‌المللی در زمینه استفاده از مدل MESSAGE نشان می‌دهد که افق زمانی اکثر مطالعات به طور تقریبی بین ۲۵ تا ٤۰ سال می‌باشد. از منظر پوشش جغرافیایی نیز این قابلیت را داراست که مدل‌سازی برای ناحیه‌ای از یک کشور (مثلاً یک استان یا ایالت)، توسعه انرژی برای یک کشور خاص، چندین کشور و حتی سطح بین‌المللی (جهانی) را انجام دهد. هر یک از این مطالعات به دنبال پاسخ به سوالات مشخص بوده، اما وجه اشتراک آنها ارائه ترکیب بهینه ظرفیت نصب شده نیروگاهی و مصرف سوخت در شرایط مختلف می‌باشد.

۳. سیستم عرضه برق کشور

سیستم عرضه انرژی، شبکه‌ای از تکنولوژی‌های مختلف با ورودی‌ها و خروجی‌های مشخص است که در آن حامل‌های انرژی نظیر نفت خام، گاز، زغال‌سنگ، فرآورده‌های نفتی و برق در سطوح مختلف جریان می‌یابند. سیستم عرضه برق کشور، که بخشی از سیستم عرضه انرژی است، دربرگیرنده فناوری‌های مختلف تولید برق از جمله نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، نیروگاه‌های گازی، نیروگاه‌های بخاری، نیروگاه‌های زغال‌سنگ‌سوز، نیروگاه هسته‌ای، نیروگاه‌های آبی (کوچک، بزرگ و تلمبه ذخیره‌ای)، نیروگاه‌های تجدیدپذیر و مولدهای تولید پراکنده میباشد.

٤. مفروضات کلیدی، اطلاعات ورودی و سناریوها

۱,٤. سال پایه و افق زمانی مورد مطالعه

در این مطالعه سال ۱۳۹۳ به عنوان سال مبنای محاسبات اقتصادی و سال آغازین برآورد میزان تقاضا در نظر گرفته شده است. افق برنامه‌ریزی عرضه انرژی سال ۱٤۳۰ و طول دوره مطالعه از سال ۱۳۹۵ تا ۱٤۳۰ به تفکیک مقاطع ۵ ساله می‌باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2024-04-19]

۲,٤. محدودیت‌های دسترسی به منابع و قیمت سوخت

مهمترین محدودیت‌های اعمال شده در مدل عبارتند از:

- گاز طبیعی: کنترل سهم گاز طبیعی در نیروگاه‌های با سوخت گاز، مازوت و نفت‌گاز به‌صورتی که حداکثر ۷۵ درصد مصرف سوخت سالانه در اوایل دوره بوسیله گاز طبیعی تأمین و امکان افزایش این سهم بر اساس برنامه‌های بلندمدت شرکت توانیر به صورت خطی تا ۱۰۰ درصد در اواخر دوره (توانیر، ۱۳۹۳) وجود خواهد داشت. قیمت گاز طبیعی در سال پایه، بر مبنای متوسط قیمت بین‌المللی گاز طبیعی و معادل ۲۰ سنت بر متر مکعب در نظر گرفته می‌شود.
- نفت گاز: بدون محدودیت و قیمت هر لیتر آن در سال پایه ٤۳ سنت در نظر گرفته می‌شود (OPEC, 2015).
- نفت کوره: بدون محدودیت و قیمت هر لیتر آن در سال پایه ۳۰ سنت در نظر گرفته می‌شود (OPEC, 2015).
- زغال‌سنگ: با توجه به برآوردهای موجود حدود ۳۰۰ میلیون تن از منابع کشف شده داخلی (ترازنامه انرژی، ۱۳۹۰) و در صورت نیاز، مازاد آن از واردات تأمین گردد. قیمت زغال‌سنگ در سال پایه ۷۰ دلار بر تن می‌باشد (EIA, 2015).
- سوخت هسته‌ای: فرض شده که نیاز سوخت هسته‌ای تا حداکثر ۱۵ سال برای یک واحد نیروگاه اتمی بوشهر از منابع داخلی و مابقی از واردات سوخت بدون هیچ محدودیتی قابل تأمین باشد. هزینه سوخت هسته‌ای یک سنت به ازای هر کیلوات ساعت برق تولیدی در نظر گرفته می‌شود (سازمان انرژی اتمی، ۱۳۹۳).
- آبی کوچک: حداکثر ۲۵۰۰ مگاوات ظرفیت نصب (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۰)
- آبی بزرگ: حداکثر ۲۵۰۰۰ مگاوات ظرفیت نصب (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران ، ۱۳۹۰)
- تلمبه ذخیره‌ای: حداکثر ۱۰۰۰۰ مگاوات ظرفیت نصب (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران ، ۱۳۹۰)
- زمین‌گرمایی: حداکثر ۵۰۰۰ مگاوات ظرفیت نصب (دفتر انرژی زمین گرمایی سانا، ۱۳۹۱)
- بادی: حداکثر ٤۰۰۰۰ مگاوات ظرفیت نصب (دفتر انرژی باد و امواج سانا، ۱۳۹۱)
- حرارتی- خورشیدی: ٦۰۰۰۰ مگاوات (دفتر انرژی خورشیدی سانا، ۱۳۹۱)
- فوتوولتائیک: حداکثر ۱۰ درصد کل تولید برق در افق مطالعه (بر مبنای نقشه راه آژانس بین‌المللی انرژی)
- لندفیل: ۵۰۰ مگاوات (دفتر انرژی زیست توده سانا، ۱۳۹۱)
- زباله‌سوز: ۵۰۰ مگاوات (دفتر انرژی زیست توده سانا، ۱۳۹۱)
- موتورهای گازسوز در حالت تولید پراکنده: ۳۰۰۰ مگاوات در کوتاه مدت (مجری تولید پراکنده توانیر، ۱۳۹۱) و امکان افزایش آن تا سقف ۱۲۰۰۰ مگاوات در درازمدت (متناسب با رشد تقاضای برق در کشور)
- واردات برق: با توجه به اینکه درسال پایه نسبت واردات به کل تولید ناویژه داخلی حدود ۱/۳ درصد بوده است (آمار تفصیلی صنعت برق، ۱۳۹۰)، برای واردات برق، قیدی به‌صورت حداکثر ۱/۳ درصد تولید داخلی (بر حسب انرژی) در اوایل دوره درنظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود به‌صورت خطی تا سقف ۵ درصد در اواخر دوره اضافه گردد (برنامه‌ریزی و توسعه شبکه توانیر، ۱۳۹۰). قیمت برق وارداتی در حال حاضر ۵/۵ سنت بر کیلووات ساعت بوده و فرض می‌شود در پایان دوره تا سقف ۷ سنت بر کیلووات ساعت اضافه گردد (برنامه‌ریزی و توسعه شبکه توانیر، ۱۳۹۰).
- صادرات برق: با توجه به اینکه درسال پایه نسبت صادرات به کل تولید ناویژه داخلی حدود ۳/۸ درصد بوده است (آمار تفصیلی صنعت برق، ۱۳۹۰)، برای صادرات، قیدی به‌صورت حداکثر ۳/۸ درصد تولید داخلی (بر حسب انرژی) در اوایل دوره درنظر گرفته می‌شود و فرض شده که این مقدار به‌صورت خطی تا سقف ۱۰ درصد در اواخر اضافه گردد (برنامه‌ریزی و توسعه شبکه توانیر، ۱۳۹۰). قیمت آن در حال حاضر ۷ سنت بر کیلووات ساعت بوده و فرض می‌شود در پایان دوره تا سقف ۱۰ سنت بر کیلووات ساعت اضافه گردد (برنامه‌ریزی و توسعه شبکه توانیر، ۱۳۹۰).

[Downloaded from epprjournal.ir on 2024-04-19]

۳,٤. مشخصات فنی- اقتصادی نیروگاه‌ها

مشخصات عمومی فنی- اقتصادی تکنولوژی‌های مورد نظر شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های ثابت و متغیر تعمیر و نگهداری، بازده، ضریب ظرفیت، طول عمر و مدت زمان ساخت در جدول (۱) آورده شده است. برای ارزیابی ارزش حال کل هزینه‌های سیستم عرضه انرژی از نرخ تنزیل ۱۰ درصد در مدل استفاده شده است. اثرات تجاری‌سازی فناوری‌های جدید، نظیر نیروگاه‌های تجدیدپذیر در قالب کاهش میزان هزینه سرمایه‌گذاری اولیه آنها در این مطالعه لحاظ می‌شود.

جدول (۱): اطلاعات فنی و اقتصادی تکنولوژی‌های سیستم عرضه برق

تکنولوژی	هزینه سرمایه‌گذاری	هزینه تعمیر و نگهداری ثابت سالیانه	هزینه تعمیر و نگهداری متغیر	بازده	ضریب ظرفیت	طول عمر	مدت زمان ساخت	کاهش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه [۲]
	($/kW)	($/kW)	($/MWh)	(درصد)	(درصد)	(سال)	(سال)	(درصد در سال)
نیروگاه بخاری	۹۰۰	۹/۵	۰/٤۹	٤۱	۸۰	۳۰	۵	ثابت
نیروگاه گازی	۵۵۰	٤/۵	۰/٦۵	۳۹	۸۵	۱۲	۲	ثابت
موتورهای پیستونی (تولید پراکنده)	۸۰۰	۸	۵/۰	٤۰	۹۰	۱۰	۱/۵	ثابت
نیروگاه سیکل ترکیبی	۷۰۰	٤/٤	۰/٤۲	۵۰	۸۰	۳۰	۵	ثابت
نیروگاه زغال سنگ سوز رایج	۱٦۰۰	٦٤	–	۳۵/۳	۸۵	۳۰	۳	ثابت
نیروگاه زغال سنگ سوز فوق بحرانی	۲۲۰۰	۸۸	–	٤۵	۸۵	٤۰	٤	۰/۷ درصد
نیروگاه هسته‌ای آب سبک	٤۸۰۰	٦۹	۰/۵	۳۳	۸۵	٦۰	۷	۱ درصد
توربین بادی	۱٤۰۰	٤۸	–	–	۳۰	۲۰	۲	۱ درصد
سلول‌های فوتوولتائیک (متصل به شبکه)	۱۸۰۰	۵۰	–	–	۱۸	۲۵	۱	۲ درصد
سلول‌های فوتوولتائیک (جدا از شبکه)	۲٤۰۰	۵۰	–	–	۱۵	۲۵	۱	۲ درصد
نیروگاه برقابی کوچک	۲۰۰۰	۱٤	–	–	۵۰– ۳۵	٤۰	٤	ثابت
نیروگاه برقابی بزرگ	۱۵۰۰	۱۰/۸	–	–	۲۵– ۱۵	۵۰	۷	ثابت

مراجع: (سازمان توسعه منابع آب، ۱۳۹۰)؛ (دفتر انرژی باد و امواج سانا، ۱۳۹۱)؛ (دفتر انرژی خورشیدی سانا، ۱۳۹۱)؛ (مجری تولید پراکنده توانیر، ۱۳۹۱)؛ (دفتر برنامه‌ریزی تولید توانیر، ۱۳۸۵)؛ (برنامه‌ریزی و توسعه شبکه توانیر، ۱۳۹۰)؛ (برنامه‌ریزی و توسعه شبکه توانیر، ۱۳۸۹)؛ (دفتر تنظیم مقررات بازار برق، ۱۳۹۱)؛ (IAEA, 2010)؛ (IEA, 2010a).

۲- کاهش هزینه سرمایه‌گذاری بر مبنای پیش‌بینی گزارشات اتحادیه اروپا (JRC, 2014) و آژانس بین‌المللی انرژی برآورد شده است (IEA, 2010b).

٤,٤. تعریف سناریوها

در این مقاله برای تحلیل ترکیب بهینه نیروگاهی دو سناریوی ادامه روند کنونی تحت عنوان «سناریوی مرجع» و «سناریوی صرفه‌جویی انرژی» در نظر گرفته شده است. قیمت سوخت‌های فسیلی در ابتدای دوره در هر دو سناریو، قیمت‌های بین‌المللی سال ۲۰۱۵ در نظر گرفته شده و در طول دوره مطالعه از یک روند افزایشی مطابق سناریوی مرجع دپارتمان انرژی ایالات متحده و به میزان ۲/۵ درصد در سال برخوردار است. روند توسعه فناوری نیز در هر دو سناریو یکسان در نظر گرفته شده و فرض شده است با توسعه فناوری، هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه فناوری‌های نوین (به ویژه فناوری انرژی‌های

[Downloaded from epprjournal.ir on 2024-04-19]

تجدیدپذیر) کاهش یابد. نرخ رشد اقتصادی، نرخ رشد جمعیت و سهم بخش‌های اقتصادی از تولید ناخالص داخلی نیز در هر دو سناریو یکسان فرض شده است.

در سناریوی مرجع، تقاضای برق و رفتار مصرف کنندگان در طول دوره مطالعه همانند وضعیت کنونی ادامه خواهد یافت. شاخص شدت انرژی نیز در این سناریو ادامه روند موجود خواهد بود و اقدامات و راهکارهای جدیدی توسط بخش‌های مصرف کننده انرژی برق در جهت بهبود و اصلاح الگوی مصرف انرژی برق و صرفه جویی و بهینه‌سازی مصرف برق انجام نخواهد شد. بنابراین میزان تقاضای برق در طول دوره مطالعه با در نظر گرفتن مفروضات فوق و با استفاده از مطالعه دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو تحت عنوان "برنامه بلندمدت توسعه بخش انرژی کشور" سالانه ۳/٤ درصد رشد خواهد یافت.

در سناریوی صرفه‌جویی انرژی، مصرف کنندگان بخش‌های مختلف برای صرفه‌جویی در مصرفِ برق اهتمام جدی خواهند داشت. بهبود راندمان تجهیزات مصرف کننده انرژی، بهره‌برداری مناسب از تجهیزات، رعایت دمای آسایش و رعایت استانداردهای مصرف انرژی در ساختمان‌سازی از جمله اقداماتی است که در این سناریو مورد توجه قرار گرفته است. همچنین اصلاح الگوی مصرف برق از طریق روشنایی و تجهیزات مصرف کننده برق در بخش خانگی و استفاده از تجهیزات و موتورهای الکتریکی با راندمان بالا در بخش صنعت نیز مد نظر بوده است. با در نظر گرفتن این اقدامات صرفه‌جویی، میزان رشد مصرف برق بر اساس مطالعه دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو به حداکثر دو درصد در سال محدود شده است. و لذا تقاضای برق در سناریوی صرفه‌جویی انرژی سالانه دو درصد افزایش خواهد یافت.

جدول (۲) روند افزایش تقاضای برق در دو سناریوی مرجع و صرفه جویی انرژی را نشان می‌دهد. دامنه تغییرات تقاضای برق در این دو سناریو حداقل ٤٥٠ و حداکثر ۷۷۰ تراوات ساعت در سال در انتهای دوره مطالعه خواهد بود. (دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، ۱۳۹۳)

جدول (۲): پیش‌بینی تقاضای بلندمدت برق در کشور

سناریو	۱۳۹۲	۱۳۹۵	۱٤۰۰	۱٤۰۵	۱٤۱۰	۱٤۱۵	۱٤۲۰	۱٤۲۵	۱٤۳۰
مرجع	۲۱٦	۲٤۳	۲۹۵	۳۵۷	٤۳۰	۵۱۱	۵۹٦	٦۸۰	۷٦۲
صرفه‌جویی	۲۱٦	۲٤۲	۲۹۰	۳۳۹	۳۸٤	٤۲۱	٤٤٦	٤٦۲	٤۵۰

(دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، ۱۳۹۳)

۵. نتایج حاصل از اجرای مدل

بر اساس سناریوهای فوق الذکر و اطلاعات مورد نیاز در بخشهای پیش گفته، نتایج حاصل از اجرای مدل در ۵ بخش روند توسعه بهینه ظرفیت نیروگاهی، سهم بهینه فناوری‌ها در تولید، میزان مصرف سوخت، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و نهایتاً حجم سرمایه‌گذاری لازم برای توسعه مزبور بشرح زیر تحلیل خواهد شد.[۱]

۱,۵. روند توسعه ظرفیت نیروگاهی

۱. خوانندگان محترم می‌توانند برای آشنایی با ساختار و معادلات اصلی مدل، مستقیماً با نویسنده مسئول تماس حاصل فرمایند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2024-04-19]

ظرفیت بهینه نیروگاهی مورد نیاز تا انتهای دوره بر اساس دو سناریوی مرجع و صرفه‌جویی انرژی به ترتیب در نمودارهای (۲) و (۳) نشان داده شده است. ظرفیت نصب شده در ابتدای دوره (سال ۱۳۹۰) معادل ٦١ گیگاوات می‌باشد که با رشدی معادل ۳/٦ درصد در سال در پایان دوره بر اساس سناریوی مرجع به ۲۵۰ گیگاوات خواهد رسید که این رقم بر اساس سناریوی صرفه جویی انرژی به میزان ۹۰ گیگاوات کاهش یافته و در پایان دوره با رشد سالانه‌ای معادل ۲/٤ درصد به ١٦٠ گیگاوات خواهد رسید.

نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در سناریوی مرجع همواره از یک روند صعودی برخوردار می‌باشند و ظرفیت اسمی این نوع نیروگاه‌ها از حدود ۱۸۰۰۰ مگاوات در سال ۱۳۹۳ با رشد متوسط سالانه ای معادل ٤/۳ درصد به ۹٦۰۰۰ مگاوات در سال ١٤٣٠ خواهد رسید. اما در سناریوی صرفه‌جویی انرژی، ظرفیت اسمی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در سه دوره آخر با افت محسوسی مواجه خواهد شد و در نهایت با رشد متوسط سالانه‌ای معادل ۱/۹ درصد به ۳۹۰۰۰ مگاوات در سال ١٤٣٠ افزایش می یابد. افت مزبور عمدتاً به خاطر کاهش تقاضا در سناریوی صرفه‌جویی انرژی می‌باشد.

مجموع نیروگاه‌های حرارتیِ رایج کشور نظیر نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، بخاری و گازی در ابتدای دوره حدود ۸۵ درصد ظرفیت نصب شده را به خود اختصاص داده‌اند. در حالیکه این سهم در دو سناریوی مزبور در افق مطالعه از یک روند نزولی برخوردار بوده و در سال ١٤٣٠ بر اساس سناریوی مرجع تنها نیمی از ظرفیت نصب شده نیروگاهی در کشور به این گونه نیروگاه‌ها اختصاص داده خواهد شد و بر اساس سناریوی صرفه جویی انرژی، نزدیک به ۳۵ درصد از نیروگاه‌ها به نیروگاه‌های حرارتی فوق اختصاص یافته است. مهمترین دلیل این افت حذف تدریجی نیروگاه‌های بخاری به دلیل هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری در مقایسه با سایر نیروگاههای حرارتی و راندمان نسبتاً پایین آنها در کنار افزایش قیمت سوخت می‌باشد. اما نیروگاه‌های سیکل ترکیبی به دلیل راندمان بالا و هزینه نسبتاً پائین در مقایسه با سایر گزینه‌های نیروگاهی، در افق مطالعه تقریباً بدون رقیب باقی خواهند ماند.

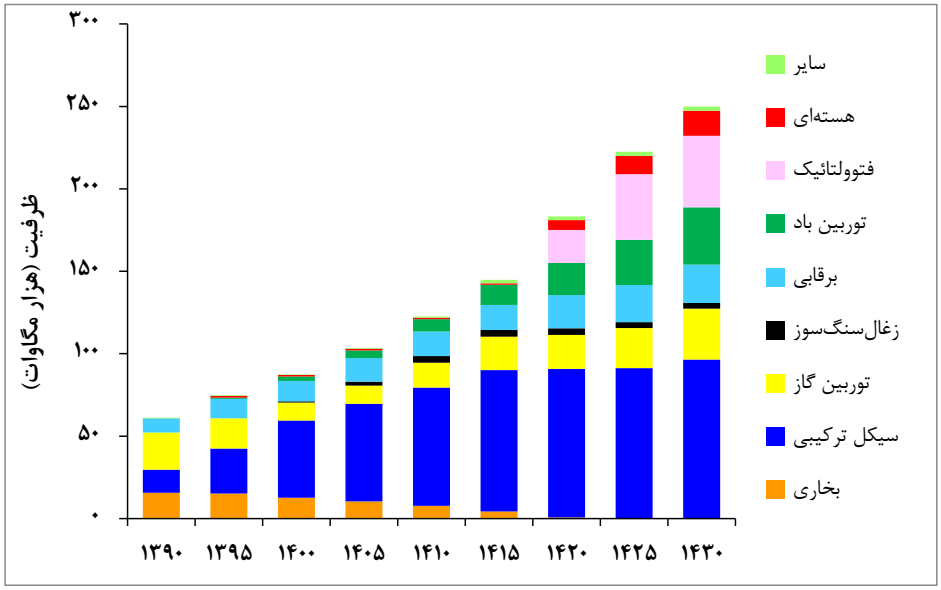
نیروگاه‌های تجدیدپذیر از سال ١٤٠٠ به بعد در هر دو سناریو رشد معناداری پیدا کرده به طوری که نصب و راه‌اندازی بیش از ۳۰۰۰۰ مگاوات توربین بادی در افق مطالعه در هر دو سناریو پیشنهاد می‌شود. سلول‌های فتوولتائیک نیز در سه دوره آخر شدیداً رقابت‌پذیر خواهد شد و سهم زیادی را در هر دو سناریو به خود اختصاص خواهد داد. سهم نیروگاه‌های بادی و سلول‌های فتوولتائیک در انتهای دوره در سناریوهای مرجع به ترتیب به ١٤ و ١٧ درصد و در ستاریوی صرفه جویی انرژی به ۲۲ و ۱۷ درصد خواهد رسید. به دلیل بازنشستگی نیروگاه‌های فسیلی موجود و جایگزینی آنها با نیروگاه‌های تجدیدپذیر غیر آبی، کل ظرفیت نصب شده نیروگاهی بعد از سال ١٤١٥ در دو سناریو از رشد قابل توجهی برخوردار می‌شود. این امر ناشی از پائین‌تر بودن ضریب ظرفیت (نسبت حداکثر انرژی قابل تولید در سال از واحد به کل ظرفیت اسمی نصب شده) نیروگاه‌های تجدیدپذیر در مقایسه با نیروگاه‌های فسیلی می‌باشد.

نیروگاه‌های هسته‌ای تا سال ١٤١٥ سهم اندکی را در هر دو سناریو به خود اختصاص داده‌اند. دلیل اصلی این مسأله، مفروضات مربوط به هزینه‌های تولید برق هسته‌ای، به ویژه بالا بودن هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه آنها می‌باشد که رقابت‌پذیری آنها را در مقایسه با سایر فناوری‌های جایگزین کاهش داده است. از این رو تا آن سال به جز تولید برق از نیروگاه‌های هسته‌ای موجود (نیروگاه اتمی بوشهر)، احداث ظرفیت جدیدی در مدل پیشنهاد نشده است. با وجود این، از سال ١٤٢٠ به بعد، این نوع نیروگاه‌ها رقابت‌پذیری قابل ملاحظه‌ای پیدا نموده، به نحوی که تا سال ١٤٣٠ ایجاد ۱۵ هزار مگاوات نیروگاه هسته‌ای در هر دو سناریو توسط مدل پیشنهاد می‌گردد. پیشنهاد مدل برای نصب نیروگاه‌های هسته‌ای عملاً به اواخر

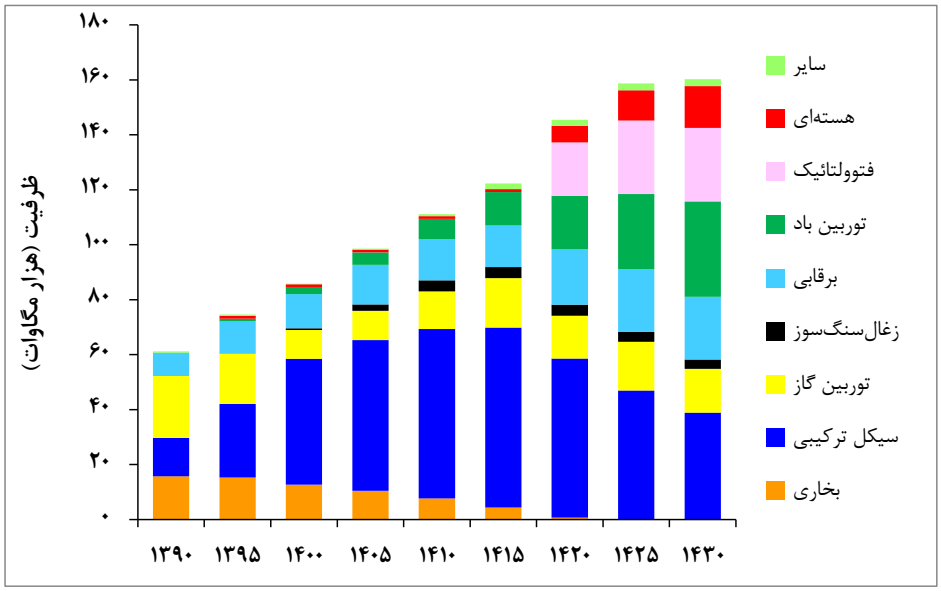
[Downloaded from epprjournal.ir on 2024-04-19]

دوره برنامه‌ریزی مرتبط می‌شود. دلیل این امر هم کاهش قابل توجه هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه آن تا سال ۱٤۲۰ (۳٦۰۰ دلار بر کیلووات) و همچنین افزایش تدریجی قیمت سوخت‌های فسیلی و به ویژه گاز طبیعی (حدود ٤۰ سنت بر متر مکعب) است.

نیروگاه‌های زغال‌سنگ‌سوز، سهم چندانی در بخش نیروگاهی نخواهند داشت. ظرفیت برنامه‌ریزی شده نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز طبس از سال ۱۳۹٦ وارد مدار می‌شود ولی پس از آن ظرفیت‌های جدیدتری از این نوع (یعنی نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز متعارف با راندمان حدود ۳۵ درصد) توجیه اقتصادی پیدا نخواهند کرد. بدیهی است با حذف محدودیت مذکور، این تکنولوژی از سبد عرضه هردو سناریو حذف خواهد شد. اما راه‌اندازی ۳۵۰۰ مگاوات نیروگاه پیشرفته زغال‌سنگ با راندمان ٤۵ درصد تا سال ۱٤۱۰ برای هر دو سناریو پیشنهاد می‌گردد.



نمودار (۲): روند بهینه کل ظرفیت نصب شده نیروگاهی در سناریوی مرجع (سایر: مجموع نیروگاه‌های دیزلی، توربین انبساطی، پیل سوختی، زمین گرمایی، حرارتی- خورشیدی و زیست توده)



[Downloaded from epprjournal.ir on 2024-04-19]

نمودار (۳): روند بهینه کل ظرفیت نصب شده نیروگاهی در سناریوی صرفه‌جویی انرژی

۲,۵. روند بهینه تولید برق

روند بهینه تولید برق به وسیله انواع فناوری‌های نیروگاهی در سناریوی مرجع و صرفه‌جویی انرژی به ترتیب در جداول (۳) و (٤) نمایش داده شده است. در سناریوی مرجع، با وجود خروج نیروگاه‌های توربین بخار از سبد تولید برق کشور، در بلند مدت سایر نیروگاه‌های فسیلی مجموعاً حدود ٦٣ درصد برق کشور را تولید می‌نمایند (سیکل ترکیبی ٥٢ درصد، توربین گاز و موتورهای گازسوز ٨ درصد و زغال‌سنگ ٣ درصد). این در حالی است که در سناریوی صرفه‌جویی انرژی، نیروگاه‌های فسیلی در بلند مدت مجموعاً حدود ٤٥ درصد برق کشور را تولید می‌نمایند (سیکل ترکیبی ٣٣ درصد، توربین گاز و موتورهای گازسوز ٨ درصد و زغال‌سنگ ٤ درصد).

همانطور که در بخش قبل اشاره شد، ظرفیت پیشنهادی برای نصب نیروگاه‌های هسته‌ای تا سال ١٤٣٠ در هر دو سناریو یکسان خواهد بود (حدود ١٥٠٠٠ مگاوات). اما مقایسه سهم این نوع نیروگاه‌ها در تولید در جدول (٥)، حاکی از آن است که سهم نیروگاه‌های هسته‌ای در تولید در سال ١٤٣٠ در سناریوی مرجع ١٢ درصد و در سناریوی صرفه‌جویی انرژی ٢٠ درصد خواهد بود. تفاوت تقاضای انرژی در دو سناریو منجر به آن می‌شود تا با وجود ظرفیت یکسان، سهم آنها در تولید متفاوت باشد.

مطابق اطلاعات جدول (٥)، نیروگاه‌های تجدیدپذیر غیر آبی به ویژه توربین‌های بادی و سلول‌های فتوولتائیک سهم قابل توجهی در تولید برق کشور به خود اختصاص خواهند داد. از آنجایی که نیروگاه‌های تجدیدپذیر ضریب دسترسی پائین‌تری در مقایسه با انواع فسیلی و هسته‌ای (٣٠ درصد برای باد و ٢٠ درصد برای خورشید) دارند، با وجود ظرفیت‌سازی قابل ملاحظه، سهم کمتری در تولید خواهند داشت. مثلاً نیروگاه‌های تجدیدپذیر غیر آبی در سناریوی مرجع حدود یک سوم ظرفیت نصب شده نیروگاهی در سال ١٤٣٠ را شامل شده‌اند، اما تنها یک پنجم تولید برق در آن سال از این نوع فناوری‌ها خواهد بود. یا در سناریوی صرفه‌جویی انرژی با وجودی که حدود ٤٠ درصد ظرفیت نصب شده را به خود اختصاص داده‌اند اما تنها حدود ٢٧ درصد تولید از محل این نوع نیروگاه‌ها خواهد بود.

جدول (۳): میزان بهینه تولید برق در سناریوی مرجع (میلیارد کیلووات ساعت)

نوع نیروگاه	١٣٩٠	١٣٩٥	١٤٠٠	١٤٠٥	١٤١٠	١٤١٥	١٤٢٠	١٤٢٥	١٤٣٠
بخاری	٩٦	٨٩	٦١	٥٠	٣٨	١٩	٣	٠	٠
سیکل ترکیبی	٧٣	١٥٥	٢٣٩	٢٩٩	٣٦١	٤٣٨	٤٥٢	٤٤٣	٤٧٨
توربین گاز	٥٩	٣٠	٢١	٢٣	٣٠	٣٨	٤٦	٦٨	٧٣
زغال‌سنگ‌سوز	٠	٠	٥	١٧	٣٠	٣٠	٣٠	٢٦	٢٥
برقابی	١٢	٢٠	٢٥	٢٩	٣١	٣٠	٣٥	٣٩	٤١
توربین باد	٠	٢	٧	١٢	٢٠	٣٢	٥١	٧٢	٩١
هسته‌ای	٠	٧	٧	٧	٧	٧	٤٤	٨١	١١٣
فتوولتائیک	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٣٦	٧٤	٨٢

[Downloaded from epprjournal.ir on 2024-04-19]

سایر	۰	۱	۱	۲	۵	۱۳	۱۵	۱۶	۱۶
مجموع	**۲۴۰**	**۳۰۳**	**۳۶۶**	**۴۳۹**	**۵۲۲**	**۶۰۷**	**۷۱۳**	**۸۱۹**	**۹۲۱**

(نتایج تحقیق)

جدول (۴): روند بهینه تولید برق در سناریوی صرفه‌جویی انرژی (میلیارد کیلووات ساعت)

نوع نیروگاه	۱۳۹۰	۱۳۹۵	۱۴۰۰	۱۴۰۵	۱۴۱۰	۱۴۱۵	۱۴۲۰	۱۴۲۵	۱۴۳۰
بخاری	**۹۶**	۹۰	۶۱	۵۰	۳۸	۱۸	۳	۰	۰
سیکل ترکیبی	**۷۳**	۱۵۳	۲۳۳	۲۷۷	۳۱۰	۳۳۵	۲۸۶	۲۲۲	۱۸۶
توربین گاز	**۵۹**	۳۰	۲۰	۲۳	۲۹	۳۹	۴۳	۶۴	۴۳
زغال‌سنگ‌سوز	۰	۰	۵	۱۷	۳۰	۳۰	۳۰	۲۶	۲۵
برقابی	**۱۲**	۲۰	۲۵	۲۹	۳۱	۳۰	۳۴	۳۸	۳۵
توربین باد	۰	۳	۷	۱۲	۲۰	۳۲	۵۱	۷۲	۹۱
هسته‌ای	۰	۷	۷	۷	۷	۷	۴۴	۸۱	۱۱۳
فتوولتائیک	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۵	۴۹	۵۱
سایر	۰	۱	۱	۲	۵	۱۳	۱۵	۱۶	۱۶
مجموع	**۲۴۰**	**۳۰۳**	**۳۶۰**	**۴۱۸**	**۴۶۹**	**۵۰۵**	**۵۴۲**	**۵۶۹**	**۵۶۰**

(نتایج تحقیق)

جدول (۵): سهم فناوری‌های پاک در تولید برق (درصد)

سناریو	نوع فناوری	۱۴۰۰	۱۴۱۰	۱۴۲۰	۱۴۳۰
مرجع	تجدیدپذیر غیر آبی	۲	۴	۱۳	۲۰
	هسته‌ای	۲	۱	۶	۱۲
صرفه‌جویی انرژی	تجدیدپذیر غیر آبی	۲	۵	۱۷	۲۷
	هسته‌ای	۲	۱	۸	۲۰

(نتایج تحقیق)

۶. جمع‌بندی

در این مقاله نتایج حاصل از اجرای مدل عرضه برق کشور، در قالب دو سناریوی ادامه روند کنونی و صرفه‌جویی انرژی با یکدیگر مقایسه شد. در این سناریوها، اثرات افزایش احتمالی قیمت سوخت‌های فسیلی و نقش توسعه فناوری نیز مد نظر

[Downloaded from epprjournal.ir on 2024-04-19]

قرار گرفته‌اند. برآیند اثرات فوق بر روند توسعه ظرفیت انواع نیروگاه‌ها و آرایش بهینه تولید ارزیابی و تحلیل گردید. مهمترین یافته‌های این مطالعه به شرح ذیل می‌باشند:

- در بین فناوری‌های فسیلی، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی حتی در شرایط بدبینانه، یعنی زمانی که قیمت گاز طبیعی روند افزایشی داشته باشد، به عنوان ارجح‌ترین گزینه تکنولوژیکی در کوتاه مدت تا میان مدت مطرح می‌باشد. به دلیل انعطاف‌پذیری توربین‌های گازی، این توربین‌ها نقش بسزایی در تأمین نیاز پیک تقاضا ایفا می‌نمایند. از این رو، حفظ تقریبی ظرفیت موجود در طول دوره برنامه‌ریزی و در شرایط مختلف پیشنهاد می‌شود. برخلاف نیروگاه‌های توربین گاز، نیروگاه‌های بخاری موجود به صورت تدریجی از سبد بخش نیروگاهی خارج خواهند شد. علت آن، کم اثر شدن و حذف محدودیت تأمین سوخت گاز طبیعی در فصول سرد بوده، که به تبع حذف این محدودیت، قابلیت نیروگاه‌های توربین بخار در به کارگیری مازوت به جای گاز طبیعی در فصول سرد، عملاً مزیتی محسوب نخواهد شد.
- نیروگاه‌های تجدیدپذیر غیر آبی (عمدتاً شامل باد و فتوولتائیک) حداقل بیست درصد از کل تولید برق کشور را تا سال ۱٤۳۰ به خود اختصاص خواهند داد، که در شرایط خوشبینانه سهم آنها تا ۲۷ درصد قابل افزایش خواهد بود. علاوه بر این نتایج هر دو سناریو نشان می‌دهد که ظرفیت‌سازی برای نیروگاه‌های برقابی باید به گونه‌ای باشد تا سهم فعلی آنها در تولید برق (حداقل ۵ درصد) در افق مطالعه حفظ شود. شایان ذکر است که توسعه نیروگاه‌های برقابی کوچک اولویت بیشتری را در مقایسه با نیروگاه‌های برقابی بزرگ خواهند داشت.
- در صورت ادامه روند کنونی در رشد مصرف برق، در سال ۱٤۳۰ ظرفیت نصب شده نیروگاهی بایستی به حدود ۲۵۰ هزار مگاوات برسد تا تقاضای برق در آن سال تأمین شود. اما در سناریوی صرفه‌جویی انرژی، نصب و راه‌اندازی ۱٦۰ هزار مگاوات ظرفیت نیروگاهی، پاسخگوی نیاز برق کشور خواهد بود. این مسأله میزان هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه را سالانه حدود ۲ میلیارد دلار کاهش داده و در مجموع ۷۵ میلیارد دلار صرفه‌جویی در بر خواهد داشت. علاوه بر این، مقایسه سناریوها در سال ۱٤۳۰ بیانگر آن است که مصرف سوخت در بخش نیروگاهی تا ٤۳ درصد در سناریوی صرفه‌جویی انرژی در قیاس با ادامه روند کنونی کاهش خواهد یافت. مجموع هزینه سوخت صرفه‌جویی شده در طول ۳۵ سال در سناریوی صرفه‌جویی انرژی، معادل ۱۸۰ میلیارد دلار برآورد می‌گردد (با فرض گاز طبیعی ۲۰ سنت برمتر مکعب). در نهایت، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی منجر به آن می‌شود تا انتشار دی اکسید کربن در سناریوی صرفه‌جویی انرژی، ٥٤ درصد کمتر از میزان انتشار آن در سناریو مرجع در سال ۱٤۳۰ گردد.

به موازات افزایش نگرانی‌های زیست محیطی، سازمان ملل متحد به دنبال تصویب قوانین سختگیرانه‌تر و وادار کردن همه کشورها برای کاهش جدی انتشار گازهای گلخانه‌ای خواهد بود. از این قوانین به عنوان سنگ بنای توافقی بی‌سابقه که قرار است از سال ۲۰۲۰ اجرایی شود، یاد می‌کنند (European Commission). از آنجایی که ایران نیز جزء ۱۰ کشور اول از منظر انتشار دی اکسید کربن در دنیا محسوب می‌گردد (IEA, 2012) و با توجه به سهم قابل ملاحظه بخش نیروگاهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای (حدود یک سوم کل انتشار در کشور)، و به موازات اجرای توافقنامه‌های بین‌المللی مورد اشاره در آینده نزدیک، سناریوی صرفه‌جویی انرژی این مطالعه می‌تواند به عنوان نقشه راه توسعه بخش نیروگاهی کشور مدنظر قرار گیرد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2024-04-19]

تشکر و قدردانی

فرآیند توسعه مدل‌های برنامه‌ریزی بلندمدت انرژی در ایران از بیش از یک دهه پیش در دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انـرژی وزارت نیرو آغاز شده است و مبتنی بر مدل سیستم عرضه برق کشور می‌باشد که در این دفتر توسعه یافته است. بدین وسـیله از تلاشهای افرادی که در فرآیند توسعه مدلهای مزبور در این دفتر نقش داشته‌اند تشکر و قدردانی می گردد.

منابع

آمار تفصیلی صنعت برق، ویژه مدیریت راهبردی سال ۹۲، شرکت مادر تخصصی توانیر، ۱۳۹۳.

سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، معاونت فنی و اجرایی، دفتر انرژی زمین‌گرمایی. ۱۳۹۱. اطلاعات فنی و اقتصادی نیروگاه‌های زمین گرمایی.

سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، معاونت فنی و اجرایی، دفتر انرژی باد و امواج. ۱۳۹۱. اطلاعات فنی و اقتصادی توربین‌های بادی.

سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، معاونت فنی و اجرایی، دفتر انرژی خورشیدی. ۱۳۹۱. اطلاعات فنی و اقتصادی نیروگاه‌های خورشیدی.

سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، معاونت فنی و اجرایی، دفتر انرژی زیست توده. ۱۳۹۱. منابع انرژی زیست توده و اطلاعات فنی و اقتصادی آن.

شرکت مادر تخصصی توانیر. ۱۳۹۳. چهل و هفت سال صنعت برق ایران در آیینه آمار.

شرکت مادر تخصصی توانیر، دفتر برنامه‌ریزی توسعه. ۱۳۹۰. پیش‌بینی تقاضای بلند مدت برق در کشور.

شرکت مادر تخصصی توانیر، معاونت برنامه‌ریزی و توسعه شبکه. ۱۳۸۹. طرح‌های نیروگاهی وزارت نیرو در برنامه پنجم توسعه.

شرکت مادر تخصصی توانیر، معاونت برنامه‌ریزی و توسعه شبکه. ۱۳۹۰. طرح تولید پراکنده کشور.

شرکت مادر تخصصی توانیر، معاونت برنامه‌ریزی و توسعه شبکه. ۱۳۹۰. مبادلات برق با کشورهای همسایه.

شرکت مادر تخصصی توانیر، معاونت برنامه‌ریزی، دفتر برنامه‌ریزی تولید. ۱۳۸۵. اطلاعات فنی و اقتصادی نیروگاه‌های حرارتی کشور.

شفیعی، احسان. مقدم تبریزی، محمدعلی. فرمد، مجید. ۱۳۸۸. توسعه سیستم عرضه برق کشور در شرایط محدود سوخت نیروگاه‌هـا در ماه‌های سرد سال، بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران.

شفیعی، احسان و همکاران. ۱۳۹۰. وزارت نیرو، معاونت امور برق و انرژی، دفتـر برنامـه‌ریـزی کـلان بـرق و انـرژی. طـرح پژوهشـی برنامه‌ریزی سیستم عرضه برق کشور.

شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران. ۱۳۹۰. مشخصات فنی و اقتصادی نیروگاه‌های برقابی.

وزارت نیرو، معاونت امور برنامه‌ریزی و امور اقتصادی، دفتر تنظیم مقررات بازار برق و خصوصی سازی. ۱۳۹۱. هزینه‌های انتقال و توزیع برق در کشور.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2024-04-19]

شفیعی، احسان و همکاران. ۱۳۹۳. وزارت نیرو، معاونت امور برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی. طرح پژوهشی برنامه بلندمدت توسعه بخش انرژی کشور.

وزارت نیرو، معاونت برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی. ۱۳۹٤. ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۲.

Chaivongvilan S., Sharma D. (2009). Long-term impacts of alternative Energy-environmental scenarios for Thailand.

Department of Energy (DOE). 2015. Annual Energy Outlook 2015.

Energy Information Administration (EIA). 2015. Short-term energy outlook. Accessed from: http://www.eia.gov/forecasts/steo/report/coal.cfm.

European Commission, Climate Action. The 2015 international agreement. Available from: http://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/future/index_en.htm [accessed 8 March 2015].

European commission: Joint research center (JRC). 2014. Energy technology reference indicator projections for 2010-2050.

Hainoun A., SeifAldin M., Almoustafa S. (2010). Formulating an optimal long-term energy supply strategy for Syria using MESSAGE model. Energy Policy 38, 1701–1714.

IAEA (2006). Brazil: a country profile on sustainable energy development.

IAEA (2008). Cuba: a country profile on sustainable energy development.

Integriertes Ressourcen Management (2008). Economics of Energy Integration: Application of MESSAGE Model in the GMS.

Internationa Energy Agency (IEA). 2010b. Energy technology perspective 2010: scenarios and strategies to 2050.

International Atomic Energy Agency (IAEA). 2007. User's Manual of MESSAGE.

International Energy Agency and Nuclear Energy Agency (IAEA). 2010. Projected Cost of Generating Electricity.

International Energy Agency- Energy Technology Systems Analysis Programme (IEA). 2010a. Coal-Fired Power.

International Enrgy Agency (IEA). (2012). CO_2 Emissions from Fuel Combustion.

Mohapatra D.K., Mohanakrishnan P. (2010). A methodology for the assessment of nuclear power development scenario. Energy Policy 38, 4330–4338.

OPEC. 2015. OPEC Bulletin: Petroleum: An Engine for Global Development.

Rogner M., Riahi K. (2013). Future nuclear perspectives based on MESSAGE integrated assessment modeling. Energy Strategy Reviews 1, 223–232.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2024-04-19]