فصلنامه نظریه‌های کاربردی اقتصاد/ سال دهم/ شماره ۳/ پاییز ۱۴۰۲/ صفحات ۱۳۶-۱۰۳

بهینه سازی مدل چند دوره‌ای برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت در صنعت برق با ملاحظه محدودیت انتشار دی‌اکسیدکربن[1]

مصطفی دین محمدی*
استادیار اقتصاد دانشگاه زنجان، dinm@znu.ac.ir
زین‌العابدین صادقی
دانشیار اقتصاد دانشگاه باهنر کرمان، z_sadeghi@uk.ac.ir
نسرین داودخانی
کارشناسی ارشد اقتصاد دانشگاه زنجان، nasrin.davoodkhani@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸

چکیده
هدف از این مطالعه بررسی مدل بهینه‌سازی چند دوره‌ای برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت در صنعت برق با ملاحظه سناریوهای مختلف انتشار دی‌اکسیدکربن می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی پویای بین دوره‌ای، توسعه ظرفیت نیروگاه‌ها در نرم‌افزار GAMS طراحی و مدل‌سازی شده است. تابع هدف مدل شامل کمینه‌سازی مجموع ارزش حال تنزیل شده هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و نگهداری، سوخت و هزینه‌های زیست‌محیطی در افق ۳۰ ساله و با محدودیت‌های تعادل عرضه و تقاضا، ضریب پوشش سیستم قدرت، حداکثر ظرفیت جدید نصب شده، پتانسیل منابع و پایداری شبکه بوده است. مدل پیشنهادی در قالب سناریوها و تحلیل حساسیت‌های مختلفی ارزیابی شده است.
نتایج مطالعه نشان داد که در سناریو پایه بدون ملاحظات زیست‌محیطی، تنها ظرفیت نیروگاه‌های فسیلی باید گسترش یابد. این در حالی است که در سناریو پایه با ملاحظات زیست‌محیطی با کاهش همزمان هزینه‌های تولید و هزینه زیست‌محیطی، ظرفیت نیروگاه-های سیکل‌ترکیبی، خورشیدی، اتمی و بادی به ترتیب گسترش یافته است. با در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی، سهم تولید نیروگاه‌های بخاری و گازی در افق برنامه‌ریزی نسبت به سال پایه از ۲۷/۷ و ۲۲/۷ درصد به ۹/۵ و ۴ درصد کاهش یافته است، اما سهم تولید نیروگاه-های سیکل‌ترکیبی، اتمی، خورشیدی و بادی از ۴۱/۸، ۲/۳، ۰/۱ و ۰/۱ درصد به ۷۲/۷، ۶/۵، ۲ و ۲/۳ درصد افزایش پیدا کرده است. هزینه سرمایه‌گذاری (توسعه ظرفیت) سناریوی پایه با ملاحظات زیست‌محیطی نسبت به سناریو پایه با افزایش ۶۰ درصدی به ۱۸۳ میلیارد دلار در افق برنامه ریزی می‌رسد و سناریو پایه با ملاحظات زیست‌محیطی به صورت معنی‌داری هزینه‌های توسعه ظرفیت را افزایش می‌دهد. همچنین در سناریو تداوم تحریم‌ها که حداکثر ظرفیت سالانه نیروگاه‌های تجدیدپذیر کاهش پیدا می‌کند، اهداف زیست‌محیطی محقق نمی‌شود. در تحلیل حساسیت مدل، نتایج حاکی از آن است که در سه حالت کاهش هزینه سرمایه‌گذاری، افزایش قیمت کربن و قیمت سوخت نیاز به سرمایه‌گذاری در گسترش ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، مدل برنامه‌ریزی خطی، صنعت برق، انتشار دی‌اکسیدکربن.
طبقه‌بندی JEL: C61، P18، O51.

---

[1] این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده سوم است.

* نویسنده مسئول مکاتبات

۱-مقدمه

افزایش جمعیت، فعالیت‌های اقتصادی و عدم رشد کارایی در مصارف برق موجب پایداری کمبود ظرفیت عرضه برق در ایران شده است. به همین علت یکی از راهبردهای مهم اقتصادی کشور، برنامه‌ریزی برای گسترش ظرفیت تولید برق و سرمایه‌گذاری در زمینهٔ ساخت نیروگاه‌های جدید با رعایت محدودیت‌های فنی و اقتصادی است. اما ایجاد نیروگاه‌های جدید با سوخت فسیلی خود باعث افزایش گازهای گلخانه‌ای می‌شود. بنابراین علاوه بر مباحث اقتصادی، باید به جنبه‌های زیست‌محیطی نیروگاه‌ها توجه شود.

آلاینده‌های ناشی از افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در اتمسفر و پیامدهای آن، علاوه بر آثار محلی، آثار جهانی نیز داشته و جهان را را بـا تغییـرات برگشـت‌ناپذیر و تهدیدآمیزی مواجه ساخته است. افزایش دمای کرهٔ زمین، تغییرات اقلیمی و جنگل‌زدایی، ذوب شدن یخچال‌های طبیعی و در نتیجه بالا آمدن سطح دریاها، از جمله این پیامدها محسوب می‌شوند (ماتیسن و همکاران[1]، ۲۰۱۱).

تولید انرژی الکتریکی نیروگاه‌های کشور در سال ۲۰۲۱ به ۳۵۷/۸ تراوات ساعت رسیده است. متوسط نرخ رشد تولید برق در ایران طی سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ حدود ۴/۲ درصد می‌باشد. از کل برق تولیدی کشور سهم تولید در نیروگاه‌های سیکل‌ترکیبی، بخاری و گازی ۹۴/۵ درصد، برق‌آبی ۴ درصد، اتمی و تجدیدپذیر کمتر از ۲ درصد بوده است (بی پی[2]، ۲۰۲۲).

کل آلودگی دی‌اکسیدکربن در سال ۲۰۲۱ برابر با ۸۹۲/۷ میلیون تن بوده است. رشد انتشار کربن ایران طی دوره ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۱، ۴/۵ درصد است که از متوسط رشد خاورمیانه با ۴/۱ درصد بیشتر می‌باشد. بررسی بخش‌های عمده مصرف‌کننده انرژی نشان می‌دهد که بخش‌های نیروگاهی، حمل‌ونقل و خانگی تجاری عمومی به ترتیب ۲۹/۶، ۲۳/۷ و ۲۴/۵ درصد از سهم انتشار دی‌اکسیدکربن را در بین بخش‌های

[1] Mathiesen et al.
[2] British Petroleum (bp)

تولیدکننده و مصرف‌کننده انرژی داشته‌اند (وزارت نیرو[1]، ۱۴۰۰)، به عبارتی دیگر بخش نیروگاهی بالاترین سهم را در انتشار دی‌اکسیدکربن دارد.

میزان انتشار CO_2 از بخش نیروگاهی طی سال‌های گذشته از روند افزایشی برخوردار بوده و با رشد سالانه ۲/۳ درصدی از ۱۵/۴ میلیون تن در سال ۱۳۸۹ به ۱۹/۵ میلیون در سال ۱۳۹۸ رسیده است (وزارت نیرو، ۱۴۰۰).

برنامه‌ریزی توسعه نیروگاه‌ها یکی از مهم‌ترین بخش‌های برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های قدرت می‌باشد که هدف از آن، یافتن الگوی مناسب توسعه نیروگاه‌هاست. در این برنامه-ریزی توسعه با احداث نیروگاه‌ها ضمن تأمین انرژی مورد نیاز مصرف‌کنندگان به صورت مطمئن، کمترین هزینه جهت تأمین بارها به شبکه تحمیل می‌شود، همچنین شبکه نیز به بالاترین میزان پایداری خود دست یافته وتلفات خطوط انتقال و آلودگی تولید شده توسط نیروگاه‌ها در بهینه‌ترین شرایط خود قرار می‌گیرند. بر این اساس، در برنامه‌ریزی یاد شده باید مشخص شود که نیروگاه‌های جدید با چه ظرفیتی، در چه زمانی و در چه مکانی باید احداث شوند تا اهداف فوق برآورده شود. این برنامه‌ریزی معمولاً برای یک دوره زمانی ۲۰ تا ۳۰ ساله انجام می‌شود. تحقیقات انجام یافته در خصوص برنامه‌ریزی توسعه تولید و جایابی نیروگاه‌ها در سه مورد قابل بررسی می باشند: اول تابع هدف مسئله بهینه‌سازی مورد اشاره، دوم نوع محدودیت‌های تساوی و نامساوی درنظر گرفته شده و گام آخر روش حل مسئله بهینه‌سازی.

این مطالعه دارای جنبه تحلیلی است و لزوما به مفهوم توصیه نقطه‌ای توسعه نیروگاهی نیست. در عمل قیود فنی متعددی بر توسعه نیروگاه‌ها حاکم است که در مدل ثابت فرض شده است. البته مفهوم کاربردی آرایش بهینه و ترکیب مطلوب نقطه‌ای هدف این مطالعه نبوده است. برای این منظور حتی نرم‌افزارهای پیچیده و توسعه‌یافتهٔ جهانی موجود است. ولی در این مقاله یک مدل ساده‌تر مبنای تحلیل هدف تحقیق می‌باشد. هدف محوری این مطالعه ملاحظه تاثیر قید زیست‌محیطی در توسعه شبکه است. تاثیر قید در دو شاخص ترکیب و آرایش فناوری نیروگاه‌ها و ساختار هزینه خود را نشان می‌دهد.

نوآوری این مقاله توسعه مدل بهینه‌سازی چند دوره‌ای برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت در صنعت برق با ملاحظه سناریوهای مختلف انتشار دی‌اکسیدکربن است. حسن این مطالعه

[1] Ministry of Power (2020)

در این است که هزینهٔ تعهدات ایران را در توافق‌نامه پاریس نشان می‌دهد؛ علاوه بر آن اطلاعات مناسبی از تغییرات فناوری هزینه‌های سرمایه‌گذاری تأمین برق و کاهش آلودگی را برای سیاست‌گذران و سرمایه‌گذاران صنعت برق ایران را نشان می‌دهد.

این مطالعه دارای جنبه تحلیلی است و لزوما به مفهوم توصیه نقطه‌ای توسعه نیروگاهی نیست. در عمل قیود فنی متعددی بر توسعه نیروگاه‌ها حاکم است که در مدل ثابت فرض شده است. البته مفهوم کاربردی آرایش بهینه و ترکیب مطلوب نقطه‌ای هدف این مطالعه نبوده است. برای این منظور حتی نرم افزارهای پیچیده و توسعه یافته‌ای جهانی موجود است. ولی در این مقاله یک مدل ساده‌تر مبنای تحلیل هدف تحقیق می‌باشد. هدف محوری این مطالعه ملاحظه تاثیر قید زیست‌محیطی در توسعه شبکه است. تاثیر قید در دو شاخص ترکیب و آرایش فناوری نیروگاه‌ها و ساختار هزینه خود را نشان می دهد.

نوآوری این مقاله توسعه مدل بهینه‌سازی چند دوره‌ای برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت در صنعت برق با ملاحظه سناریوهای مختلف انتشار دی‌اکسیدکربن است. حسن این مطالعه در این است که هزینهٔ تعهدات ایران را در توافق نامه پاریس نشان می‌دهد؛ علاوه بر آن اطلاعات مناسبی از تغییرات فناوری هزینه‌های سرمایه‌گذاری تأمین برق و کاهش آلودگی را برای سیاست‌گذران و سرمایه‌گذاران صنعت برق ایران را نشان می‌دهد.

در این مطالعه، با هدف حداقل کردن هزینه های انتشار دی‌اکسیدکربن و هزینه توسعه ظرفیت با ملاحظه محدودیت‌های فنی تولید در صنعت برق ایران در قالب مدل بهینه-یابی خطی بین زمانی چند دوره‌ای، سناریوهای مختلف توسعه شبکه شبیه‌سازی شده و نتایج الگوهای توسعه ظرفیت شبکه و ترکیب بهینه آرایش نیروگاه‌ها در چشم‌انداز ۳۰ ساله شناسایی و تحلیل می‌شود. این مطالعه ابتدا اهم مطالعات داخل و خارج را بررسی می کند، سپس مدل و مفروضات آن ارائه و در بخش آخر به تحلیل و جمع‌بندی نتایج پرداخته می شود.

۲- ادبیات موضوع

در مطالعات صورت گرفته در ارتباط با نیروگاه‌ها، محققین سعی کرده‌اند تا نقش عوامل مختلف بر میزان آلایندگی نیروگاه‌ها و چگونگی کاهش میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده را مورد بررسی قرار دهند.

صادقی و همکاران[1] (۱۳۸۶) به بررسی پیامدهای اقتصادی – زیست‌محیطی افزایش بازده نیروگاه‌های برق فسیلی پرداخته‌اند. در این مطالعه رابطه بین میزان انتشار حاصل از فعالیت‌های تولید برق در نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل‌ترکیبی در سال‌های ۱۳۷۷-۸۲ با هزینه اجتماعی مدل‌سازی و پس از آن تغییرات در بازده نیروگاه‌ها و تأثیر آن بر میزان هزینه‌های اجتماعی شبیه‌سازی شده است. در انتها با توجه به محاسبات صورت گرفته، مشاهده شد که در نتیجه افزایش بازده، میزان آلاینده‌های تولیدی و هزینه‌های اجتماعی کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد و از آن‌جا که با توجه به اعداد و ارقام به دست آمده، این کاهش بیشتر در نیروگاه‌های بخاری رخ می‌دهد، لذا ارجحیت افزایش بازده در نیروگاه‌های بخاری می‌باشد. بر این اساس پیشنهاد می‌شود با توجه به نتایج حاصل، سیاست‌های افزایش بازده با اولویت اجرا در نیروگاه‌های بخاری اعمال گردد.

دامن‌کشیده و همکاران[2] (۱۳۸۹) در مقالهٔ خود به بررسی عوامل مؤثر بر انتشار CO_2 در نیروگاه‌ها پرداخته‌اند. در این مطالعه با استفاده از روش میانگین لگاریتمی شاخص دیویژیا (LMDI)[3]، عوامل مؤثر بر انتشار CO_2 به اثر تولیدی، ساختاری، شدت انرژی و ترکیب سوخت تقسیم شده است. این تحقیق در دوره زمانی (۱۳۸۵-۱۳۸۰) و بر روی نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل‌ترکیبی انجام شده است. نتایج به دست آمده از تحقیق نشان داد که مهم‌ترین عامل انتشار CO_2 عامل تولیدی می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از مدل می‌توان با استفاده از بهبود بهره‌وری انرژی (کاهش شدت انرژی) و استفاده از سوخت گاز طبیعی به جای دیگر سوخت‌ها و با به کارگیری نیروگاه سیکل‌ترکیبی نسبت به سایر نیروگاه‌ها برای تولید برق، انتشار CO_2 را بدون کاهش تولید برق کاهش داد.

نکوئی[4] (۱۳۹۶) در پایان‌نامه خود با عنوان «تحلیل تجزیه مکانی آلودگی ناشی از مصرف انرژی نیروگاه‌های برق ایران» تلاش کرده است ابتدا میزان تغییرات انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از مصرف انرژی در تولید برق(ACI)[5] در نیروگاه‌های حرارتی و در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۴ را محاسبه کند و سپس برای شناسایی عوامل تأثیرگذار بر آن، با استفاده از مدل-های تحلیل تجزیه و کمی کردن اثرات جغرافیایی، سهم سوخت و ترکیب سوخت، سهم و

[1] Sadeghi et al. (2007)
[2] Damankeshideh et al. (2010)
[3] Logarithmic MeahDivisia Index
[4] Nekouei (2017)
[5] Aggregate co_2 Emission Intensity

میزان تأثیرگذاری هر یک را در انواع نیروگاه‌های حرارتی مشخص کرده و سپس به تحلیل هر کدام پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان داد که به طور کلی میزان آلودگی ناشی از مصرف انرژی برای تولید الکتریسیته (ACI) سال ۹۴ در نیروگاه‌های بخاری کاهش و در نیروگاه‌های گازی و سیکل‌ترکیبی افزایش یافته است. بیشترین عامل اثرگذار کاهش ACI در نیروگاه‌های بخاری اثر جغرافیایی و بیشترین عوامل موثر افزایش ACI در نیروگاه‌های گازی و سیکل‌ترکیبی اثر جغرافیایی و اثر سهم سوخت می‌باشند. اثر ترکیب سوخت در نیروگاه‌های گازی و سیکل‌ترکیبی به علت استفاده بیشتر از گاز، مقداری ازافزایش ACI را خنثی کرده و باعث کاهش انتشار آلودگی شده است.

منظور و آریان‌پور[1] (۱۳۹۷) در مطالعه خود به نقد توسعه ظرفیت نیروگاهی ایران پرداخته‌اند. در این مطالعه سیستم عرضه انرژی الکتریکی کشور با بهره‌گیری از مدل MESSAGE[2]، از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۳ مدل‌سازی شده است تا روند توسعه بهینه در افق مزبور مشخص شود. برای یافتن وضعیت بهینه در این مدل، مجموع هزینه‌های سیستم عرضه برق به عنوان معیار در نظر گرفته شده و با حداقل کردن آن، شرایط بهینه به دست آمد. سپس نتایج مدل با آنچه در عمل اتفاق افتاده مقایسه شده تا میزان انحراف توسعه واقعی از حالت ایده‌آل مشخص گردد. مهم‌ترین نتایج این پژوهش بدین شرح می‌باشند: ۱- متوسط راندمان نیروگاه‌های حرارتی کشور در سال ۱۳۹۳، کاهش ۴/۵ درصدی از حالت ایده‌آل را نشان می‌دهد، ۲- حرکت در مسیر غیربهینه منجر به اتلاف حداقل ۹۰ میلیارد متر مکعب معادل گاز طبیعی و انتشار ۴۰۰ میلیون تن دی‌اکسیدکربن اضافی طی سی سال شده است، ۳- به دلیل عدم تأمین مالی پروژه‌های نیروگاهی یا عدم تأمین به موقع آن، سالانه ۶۳۰ میلیون دلار هزینه اضافی تحمیل شده است.

حاتمی[3] (۱۳۹۸) در پایان‌نامه خود با عنوان «برنامه‌ریزی توسعه تولید توان با در نظر گرفتن شرایط زیست‌محیطی تحت شرایط عدم قطعیت و توزیع بار بین نیروگاه‌ها» هدف از این مطالعه را بررسی مدل برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق چند هدفه برای مطالعه تغییرات در تصمیم‌های تولید و آلودگی دی‌اکسیدکربن تحت عدم حتمیت در

---

[1] Manzoor & Arianpour (2018)

[2] نرم افزار مدل‌سازی و بهینه‌سازی ریاضی سمت عرضه سیستم انرژی

[3] Hatami (2019)

تقاضا و عرضه برق بیان می‌کند و یک مدل فازی چند هدفه برای سیستم برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق استان کرمان برای یک دورهٔ ۱۲ ساله به کار می‌گیرد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که برای پاسخ به تقاضا و تأمین همزمان اقتصادی (حداقل‌سازی هزینه‌های تولید) و زیست‌محیطی (حداقل‌سازی هزینه‌های آلودگی دی‌اکسیدکربن) تحت شرایط عدم حتمیت تقاضا و ضریب ظرفیت تولید، بایستی ظرفیت فناوری‌های بادی، برق‌آبی و سوخت زغال‌سنگ به ترتیب باید بیشترین گسترش را داشته باشند. همچنین برای تأمین هدف زیست‌محیطی، به ترتیب بیشترین گسترش در ظرفیت فناوری‌های تجدیدپذیر بادی، برق‌آبی و فتوولتائیک در برنامه‌ریزی قرار دارد.

هاشیم و همکاران[1] (۲۰۰۵) در مطالعه خود از یک مدل برنامه خطی ترکیبی عدد-صحیح (MILP)[2] به منظور کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن در شبکه برق آنتاریو در سال ۲۰۰۵ استفاده کرده‌اند. این شبکه متشکل از انواع نیروگاه‌های زغال‌سنگ، گازطبیعی، هسته‌ای، برق‌آبی و انرژی جایگزین است. همچنین یک تحلیل حساسیت برای بررسی تأثیر عدم قطعیت پارامترها مانند عدم قطعیت در قیمت گازطبیعی، قیمت زغال‌سنگ و هزینه‌های مقاوم‌سازی بر روی مدل انجام شده است. نتایج بهینه‌سازی مدل نشان داد که متعادل-سازی سوخت می‌تواند تا سه درصد در کاهش میزان انتشار دی‌اکسیدکربن نقش داشته باشد. فراتر از کاهش سه درصد، اقدامات سختگیرانه‌تری شامل تغییر سوخت و مقاوم سازی نیروگاه باید انجام شود. نتایج تحلیل حساسیت نیز نشان داد که نوسانات قیمت گاز و هزینه‌های مقاوم‌سازی می‌تواند منجر به تغییر سوخت شود. با این حال، تصمیمات بهینه کاهش دی‌اکسیدکربن بسیار حساس به قیمت زغال‌سنگ است.

میرزا اسماعیلی[3] (۲۰۰۷) در پایان‌نامه خود با موضوع «مدل بهینه‌سازی چند دوره‌ای برنامه‌ریزی انرژی با در نظر گرفتن میزان انتشار دی‌اکسیدکربن در آنتاریو» یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی ترکیبی عدد-صحیح (MINLP)[4] را ایجاد کرده است که قادر به تحقق ترکیبی بهینه از منابع تأمین برق آنتاریو (نیروگاه‌های هسته‌ای، زغال‌سنگ، برق-آبی و گازی) می‌باشد. این مدل با استفاده از یک تابع هدف، فرموله شده است که ارزش

[1] Hashim et al.
[2] Mixed Integer Linear Program (MILP)
[3] Mirzaesmaeli
[4] A Novel Multi-Period Mixed-Integer Non-Linear Programming Model (MINLP)

حال خالص هزینه برق [۱](COE) را در یک افق زمانی ۱۴ ساله (۲۰۰۷-۲۰۲۰) به حداقل می‌رساند. این مدل به منظور بررسی تأثیرات اقتصادی، ساختاری و زیست‌محیطی در دو مطالعه موردی حل شد. اولین مطالعه موردی یک سناریوی مورد پایه را بررسی کرد که در آن هیچ محدودیت دی‌اکسیدکربن اعمال نشده بود. مطالعه موردی دوم یک سناریوی دیگر را بررسی کرد که در آن بخش برق آنتاریو باید با محدودیت‌های انتشار دی-اکسیدکربن مطابق با اهداف کیوتو ۱۹۹۰ مطابقت داشته باشد. نتایج نشان داد که برای دستیابی به اهداف انتشار دی‌اکسیدکربن، سه نیروگاه زغال‌سنگ باید سوخت خود را تغییر دهند و یک نیروگاه زغالی دیگر با یک سیستم جذب کربن [۲](CCS) مجهز شود. علاوه بر آن، هزینه کل اجرای مطالعه موردی دوم ۱۰/۱ درصد بیشتر از مورد پایه است.

ژانگ و همکاران[۳] (۲۰۱۲) در مطالعه خود یک چارچوب مدل‌سازی و بهینه‌سازی چند دوره‌ای برای برنامه‌ریزی بهینه بخش برق چین شامل نیروگاه‌های گازی، سیکل‌ترکیبی، بادی، خورشیدی و هسته‌ای بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۵۰ را ارائه داده‌اند. در این تحقیق افق برنامه‌ریزی به چندین بازه زمانی تقسیم شده است که در آن هر نوع نیروگاه برق قابل نصب، مقاوم‌سازی یا بسته است. نتایج نشان داد که با افزایش قیمت انتشار دی-اکسیدکربن، سهم انرژی هسته‌ای و انرژی‌های تجدیدپذیر (به طور عمده بادی و خورشیدی) در کل تولید برق چین به سرعت افزایش می‌یابد و نیروگاه‌های هسته‌ای جایگزین نیروگاه‌های[۴]PC می‌شوند. در مجموع هر سه نوع انرژی تجدیدپذیر فقط می-توانند سهمی در حدود ۳/۱ از کل تولید برق چین تا سال ۲۰۵۰ را به‌دست آورند.

گنگ کانگ[۵] (۲۰۱۳) به منظور بررسی عوامل مؤثر بر توسعه ظرفیت و تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، از یک مدل جدید بهینه‌سازی انژی تجدیدپذیر [۶](REOM) برای تجزیه و تحلیل انرژی‌های تجدیدپذیر بادی، خورشیدی و زیست‌توده از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۰ استفاده کرده است. نتایج نشان داد که (۱) حداکثر ظرفیت نصب شده انرژی‌های تجدیدپذیر بادی، خورشیدی و زیست توده در سال ۲۰۲۰ به ۲۳۳۳۲۱، ۲۶۶۸۰ و

[1] The Net Present Value of the Cost of Electricity (COE)
[2] Carbon Capture and Storage (CCS)
[3] Zhang et al.
[4] Pulverized Coal Combustion
[5] Gang Cong
[6] The Renewable Energy Optimization Model

۳۵۵۰۶ مگاوات می‌رسد. (۲) از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۰، انرژی زیست توده در مراحل اولیه به سرعت توسعه خواهد یافت، در حالی که انرژی باد به طور گسترده در مرحله نهایی توسعه می‌یابد و انرژی خورشیدی رشد نسبتاً پایداری دارد. (۳) با توجه به ظرفیت اضافه شده در دوره‌های اولیه، هزینه سرمایه‌گذاری واحد انرژی خورشیدی کاهش زیادی را نشان می‌دهد. (۴) محدودیت در سرمایه‌گذاری تأثیر زیادی بر توسعه نیروی بادی دارد، این در حالی است که محدودیت در تولید انرژی تجدیدپذیر در شبکه تأثیر قابل توجهی بر توسعه نیروی بادی و انرژی خورشیدی دارد.

بیگم و همکاران[1] (۲۰۱۵) در مطالعات خود اثرات رشد تولید ناخالص داخلی، مصرف انرژی و رشد جمعیت بر انتشار CO_2 را با استفاده از رویکرد خود رگرسیونی با وقفه‌های توزیعی (ARDL)، آزمون حداقل مربع معمولی پویا (DOLS)[2] و آزمون SLM U[3] در مالزی بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد که طی سال‌های ۱۹۷۰-۱۹۸۰، انتشار سرانه CO_2 با افزایش سرانه تولید ناخالص داخلی (رشد اقتصادی) کاهش یافته است. همچنین سرانه مصرف انرژی و سرانه تولید ناخالص داخلی اثرات مثبت بلند مدتی بر انتشار CO_2 دارند، اما نرخ رشد جمعیت تأثیری قابل توجهی بر انتشار CO_2 ندارد.

چن و همکاران[4] (۲۰۱۶) در مطالعه خود به بررسی توسعه پایدار صنعت برق چین (شامل نیرگاه‌های گازی، زغال‌سنگ، بادی، برق‌آبی، خورشیدی و هسته‌ای) طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۰ از طریق مدل برنامه‌ریزی خطی (LP)[5] و با در نظر گرفتن هرینه‌های خارجی غیرکربنی پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که اولاً، ۸۴ درصد ظرفیت‌های جدید را نیروگاه‌های فسیلی تشکیل می‌دهند. دوماً، اولویت تولید برق بهتر است به نیروگاه‌های فسیلی به دلیل مقرون به صرفه بودن هزینه اختصاص یابد. سوماً، حداقل هزینه کل برنامه‌ریزی برق چین ۳۴/۴۸ تریلیون یوان است که معادل دو درصد از تولید ناخالص داخلی چین می‌باشد.

---

[1] Begum et al.
[2] The Dynamic Ordinary Least Squared Test
[3] The Sasabuchi–Lind–Mehlum U tests (SLM U test)
[4] Chen et al.
[5] Linear Programming

حسینی و همکاران[1] (۲۰۱۹) در مطالعه خود میزان انتشار دی‌اکسیدکربن ایران را در سال ۲۰۳۰ تحت فرضیات دو سناریو، یعنی تجارت به طور معمول (BAU)[2] و برنامه ششم توسعه (SDP)[3] و با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی چندگانه (MLR)[4] و تحلیل رگرسیون چند جمله‌ای چندگانه (MPR)[5] پیش‌بینی کرده‌اند. یافته‌ها حاکی از آن است که ایران به احتمال زیاد به تعهد خود در توافق‌نامه پاریس تحت مفروضات سناریو BAU عمل نخواهد کرد. با این حال، اجرای کامل SDP اگر چه بلند پروازانه بود اما می‌توانست هدف کاهش انتشار را تا پایان ۲۰۱۸ برآورده کند.

جی و همکاران[6] (۲۰۲۰) در مطالعه خود با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی بین زمانی برای ارزیابی سیستم‌های انرژی جهانی و کاهش میزان گرمایش کره زمین برای رسیدن به توافق‌نامه پاریس، هزینه سیستم‌های انرژی جهانی را به حداقل می‌رساند. این مدل جهان را به ۵۴ منطقه تقسیم می‌کند و افق زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰ را پوشش می‌دهد. در انتها به این نتیجه رسیده‌اند که برای دستیابی به هدف دو درجه سانتی‌گراد به کربن-زدایی شدید سیستم‌های انرژی نیاز است. برای کاهش هزینه‌ها و تغییرات آب‌وهوایی انتظار می‌رود در نیمه‌ی دوم قرن بیست و یکم نصب نیروگاه‌های سیکل‌ترکیبی افزایش یابد و نصب این تأسیسات در کشورهایی با منابع انرژی محدود پیش‌بینی شد.

فلور[7] (۲۰۲۰) در مطالعه خود با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی، برنامه‌ریزی و سیاست-گذاری سیستم انرژی (LEAP)، انتشار گازهای گلخانه‌ای را در سه سناریو سناریوی بدون اقدامات و تغییر در رفتار فعلی (WOM)[8]، سناریوی اقدامات برنامه‌ریزی شده موجود (WEM)[9]، سناریوی سیاست‌گذاری‌های کاهش‌دهنده اتحادیه اروپا را در آذربایجان پیش‌بینی کرده است. وی در پایان به این نتیجه رسید که در سناریوی WOM کل انتشارات گازهای گلخانه‌ای آذربایجان ۶۷ درصد افزایش می‌یابد. در سناریوی WEM،

---

[1] Hoseini et al.
[2] Business as usual
[3] The Sixth Development Plan
[4] Multiple Linear Regression Analysis
[5] Multiple Polynomial Regression Analysis
[6] Gi et al.
[7] Felver
[8] Without Measures Scenario or Business-as-usual (WOM)
[9] With Existing Measures Scenario (WEM)

انتشار گازهای گلخانه‌ای پیش‌بینی شده تنها ۲۹/۷ درصد کمتر از سال پایه و هنوز بالاتر از تعهدات پیمان پاریس است. در سناریوی سیاست‌گذاری‌های کاهش‌دهنده اتحادیه اروپا، میزان تولید گازهای گلخانه‌ای پیش‌بینی شده ۳۷/۲ درصد کمتر از سال پایه می‌باشد. بنابراین اقدامات فعلی آذربایجان برای انجام تعهدات خود در توافق‌نامه پاریس کافی نیست و اقدامات قوی‌تری لازم است.

تای هیپ و هافمن[1] (۲۰۲۰) در مطالعه خود با در نظر گرفتن اهداف کاهش دی‌اکسیدکربن، از یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای صنعت برق ویتنام استفاده کرده‌اند. این مدل شامل نیروگاه‌های زغال‌سنگ، گازی، سیکل‌ترکیبی، دیزلی، بادی، خورشیدی و برق‌آبی و در افق زمانی ۲۰۱۸-۲۰۳۰ است. هزینه‌های سرمایه‌گذاری نیروگاه، بهره‌برداری و نگهداری، سوخت، محیط زیست و واردات برق در مدل درنظر گرفته شده است. مدل طراحی شده با فرضیاتی در مورد توسعه تقاضای برق، حداکثر بار، وجود مکانیسم قیمت دی‌اکسیدکربن و نرخ تغییر هزینه‌ها در بازار برق ویتنام اعمال شد. مهم‌ترین محدودیت میزان مجاز انتشار دی‌اکسیدکربن بود. نتایج تحقیق نشان داد که تغییر سوخت گزینه مفیدی برای کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن است. ثانیاً، انرژی باد و خورشیدی نقش اساسی در سیستم تامین برق دارند.

طبق مطالعات فوق، برای آن که بتوانیم میزان انتشار دی‌اکسیدکربن و هزینه توسعه ظرفیت را به حداقل برسانیم باید علاوه بر گسترش ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر، سوخت نیروگاه‌ها را تغییر دهیم. بدین منظور هدف از تحقیق حاضر ایجاد یک مدل بهینه‌سازی آرایش نیروگاه‌ها است تا بتوان با سناریوهای مختلف میزان انتشار دی‌اکسیدکربن و هزینه توسعه ظرفیت نیروگاه‌های ایران را حداقل کرد.

۳- روش‌شناسی تحقیق

۱-۳- روش‌های مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت صنعت برق

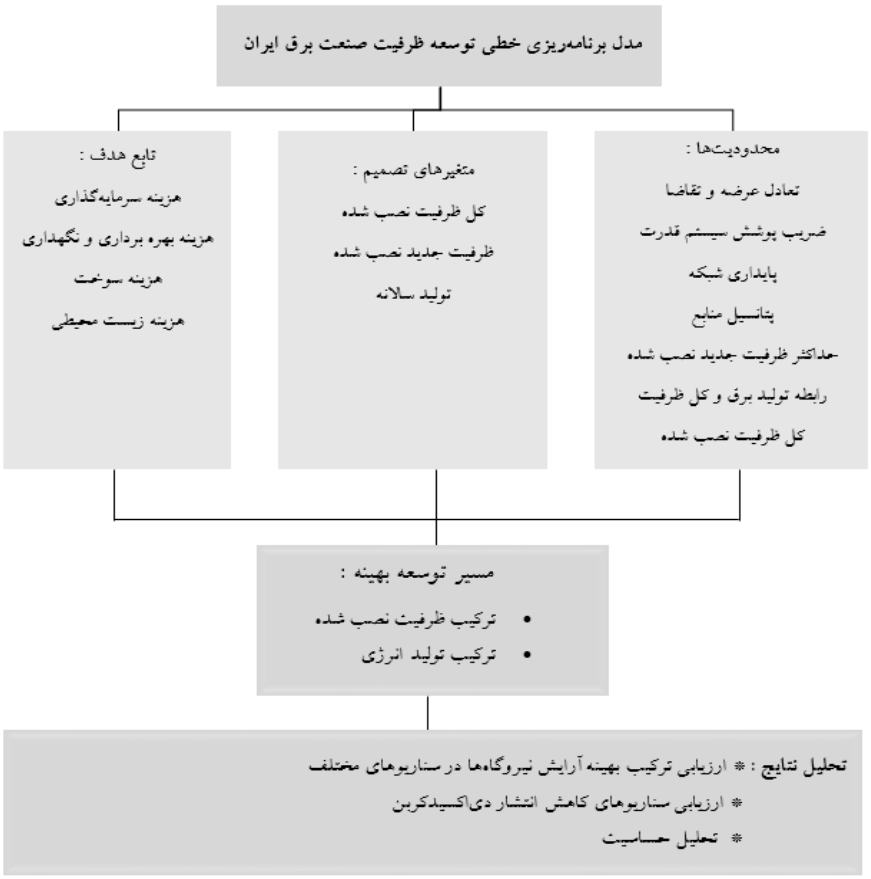
مسئلهٔ برنامه‌ریزی توسعهٔ شبکه به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی با یک تابع هدف در بسیاری از مطالعات به کار گرفته شده است. مطرح شدن اهداف جدید، مرتبط و متقابل سبب شده است که رویکرد مسئله برنامه‌ریزی توسعهٔ شبکه به‌سمت مدل‌های برنامه‌ریزی با توابع هدف مختلف مرتبط به هم سوق پیدا کند؛ به‌طوری‌که هر تابع هدف، خود را بدون

[1] Hiep & Hoffmann

توجه به هدف قسمت دیگر بهینه کند. نکته مهم آن است که مقدار تابع هدف و فضای تصمیم‌گیری در آن تابع هدف بر توابع هدف دیگر اثر می‌گذارد. مزیت اصلی این مدل‌ها در این است که به برنامه‌ریز سیستم اجازهٔ تحلیل هزینه - فایده را می‌دهد؛ درحالی‌که در مدل‌های کلاسیک این امر امکان‌پذیر نیست.

هدف مسئله برنامه‌ریزی، یافتن برنامه توسعه ظرفیت بهینه‌ای است که بتواند جوابگوی تقاضا باشد. این برنامه به سؤالاتی همچون در چه نوع نیروگاهی، با چه ظرفیتی و در چه زمانی باید سرمایه‌گذاری کرد، پاسخ می‌دهد. به دلیل پیچیدگی سیستم تولید برق و تعدد متغیرها و محدودیت‌های تحقیق در این مطالعه از روش خطی استفاده شده است.

مدل پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی خطی چنددوره ای است که توسط تای هیپ و هافمن در سال ۲۰۲۰ ارائه شده است. این مدل با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های کل سیستم توسعه صنعت برق تحت محدودیت‌های اقتصادی و فنی طراحی شده است. هزینه‌های توسعه شبکه قدرت شامل هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه بهره‌برداری و نگهداری، هزینه سوخت، هزینه محیط زیست است. افق زمانی تحقیق تا سال ۱۴۲۷ و طول دوره مطالعه از سال ۱۳۹۸ تا ۱۴۲۷ می‌باشد. سال ۱۳۹۷، به عنوان سال پایه در نظر گرفته شد. چارچوب مدل پژوهش را در شکل ۱ مشاهده می شود.



شکل (۱): ساختار مدل پژوهش

منبع: یافته‌های تحقیق

در جدول زیر تعریف اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل ارائه شده است. در فناوری‌های تولید برق، سیکل‌ترکیبی۲، آن بخش از افزایش ظرفیت تولید نیروگاهی است که با توسعه نیروگاه‌های گازی موجود به سیکل‌ترکیبی حاصل می‌شود. نیروگاه سیکل-ترکیبی۱، شامل نیروگاه‌های توسعه ای آتی است که فاز گازی با سیکل‌ترکیبی آن با هم راه‌اندازی می‌شود.

جدول (۱): تعریف اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم

	مشخصات و تعاریف
t	افق برنامه‌ریزی (۱۳۹۸ تا ۱۴۲۷)
i	نیروگاه‌ها: بخاری، گازی، سیکل‌ترکیبی۱ و ۲، برق‌آبی، بادی، خورشیدی و اتمی
پارامترها	
$CAP_{I.1397}$	کل ظرفیت نصب شده نیروگاه i در سال ۱۳۹۷ (MW)
$IC_{I.1397}$	هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه i در سال ۱۳۹۷ ($/MW)
$OMC_{I.1397}$	هزینه بهره‌برداری و نگهداری نیروگاه i در سال ۱۳۹۷ ($/MWh)
$FUC_{I.1397}$	هزینه سوخت نیروگاه i در سال ۱۳۹۷ ($/MWh)
LC_I	چرخه عمر نیروگاه i (years)
FLH_I	ساعات حضور نیروگاه i در مدار (hours)
$CAPMAX_I$	حداکثر ظرفیت سالانه نصب شده نیروگاه i (MW)
ED_T	تقاضای برق در سال t (MW)
PL_T	حداکثر تقاضا در پیک در سال t (MW)
$SAMAX_I$	حداکثر ظرفیت بالقوه نیروگاه i (MW)
CP_T	قیمت CO_2 در سال t ($/ton CO_2)
A_I	نرخ تغییر هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه i (%/years)
B_I	نرخ تغییر هزینه بهره‌برداری و نگهداری نیروگاه i (%/years)
Γ_I	نرخ تغییر هزینه سوخت نیروگاه i (%/years)
EF_I	ضریب انتشار CO_2 نیروگاه i (ton CO_2/MWh)
M	ضریب پایداری شبکه
R	نرخ تنزیل
P	ضریب حاشیه لود بار
متغیرهای تصمیم	
$CAP_{I.T}$	کل ظرفیت نصب شده نیروگاه i در سال t (MW)
$CAPNEW_{I.T}$	ظرفیت جدید نصب شده نیروگاه i در سال t (MW)
$GEN_{I.T}$	تولید سالانه برق در نیروگاه i در سال t (MWh)

منبع: یافته‌های تحقیق

۲-۳- تابع هدف مدل

تابع هدف، مدل برنامه‌ریزی خطی به حداقل رساندن هزینه‌های سیستم در کل دوره‌های برنامه‌ریزی است که به شرح زیر می‌باشد:

$$\min \mathrm{TSC} = \mathrm{TC}_{inv} + \mathrm{TC}_{om} + \mathrm{TC}_{fu} + \mathrm{TC}_{env} \quad (۱)$$

هر کدام از هزینه‌های سیستم، در معادله‌ای جداگانه محاسبه می‌شود. هزینه سرمایه-گذاری به شرح زیر است:

$$TC_{inv} = \sum_{t.i} IC_{i.1397} \times (1+\alpha_i)^{t-1397} \times CAPnew_{i.t} \times (1+r)^{-(t-1397)} \times [r/(1+r)/1-(1+r)^{-Lc_i}] \quad (۲)$$

هزینه بهره‌برداری و نگهداری به شرح زیر است:

$$TC_{om} = \sum_{t.i} OMC_{i.1397} \times (1+\beta_i)^{t-1397} \times CAP_{i.t} \times (1+r)^{-(t-1397)} \quad (۳)$$

هزینه سوخت نیروگاه‌ها به شرح زیر است:

$$TC_{fu} = \sum_{t.i} FUC_{i.1397} \times (1+\gamma_i)^{t-1397} \times GEN_{i.t} \times (1+r)^{-(t-1397)} \quad (۴)$$

هزینه زیست‌محیطی[۱] (مقدار پولی که برای مقابله با آثار انتشار CO_2 پرداخت می‌شود) به شرح زیر است:

$$TC_{env} = \sum_{t.i} CP_t \times GEN_{i.t} \times ef_i \times (1+r)^{-(t-1397)} \quad (۵)$$

۳-۳ محدویت‌های مدل

تعادل عرضه و تقاضا:

$$\sum_i GEN_{i.t} \geq ED_t \quad (۶)$$

ضریب پوشش سیستم قدرت:

$$(1+p) \times PL_t \leq \sum_i CAP_{i.t} \quad (۷)$$

پایداری شبکه:

$$\sum_{i \in (wind.solar)} GEN_{i.t} \leq \mu \times \sum_i GEN_{i.t} \quad (۸)$$

پتانسیل منابع:

---

[۱] در حالت وجود بازار کربن هر نیروگاه جدید که از سوخت فسیلی استفاده می‌کند بابت انتشار آلودگی باید سهمیه آلودگی خریداری کند یا مالیات بر آلودگی را پرداخت نماید.

$$CAP_{i.t} \leq SAmax_i \; i \in (solar.wind.hydropower.atomic.combinedcycle2) \quad (۹)$$

حداکثر ظرفیت جدید نصب شده:

$$CAPnew_{i.t} \leq CAPmax_i \quad (۱۰)$$

رابطه تولید سالانه برق و کل ظرفیت نصب شده:

$$GEN_{i.t} \leq CAP_{i.t} \times FLH_i \quad (۱۱)$$

کل ظرفیت نصب شده:

$$CAP_{i.t} = CAP_{i.1397} + \sum_t CAPnew_{i.t} \quad (۱۲)$$

مدل‌سازی نیازمند مفروضات و داده‌های پایه می‌باشد. در دو جدول زیر مفروضات داده-های مشترک و اختصاصی نیروگاه‌ها و شرایط عمومی مدل ارائه شده ا ست.

جدول (۲): مفروضات و داده‌های مشترک فناوری تولید در مدل

شاخص	مقدار	شرح
انواع نیروگاه‌ها	بخاری، گازی، سیکل‌ترکیبی[۱]، برق‌آبی، خورشیدی، بادی و اتمی	
نرخ تنزیل (درصد)	۵	چن و همکاران (۲۰۱۶)
ضریب حاشیه لود بار(درصد)	۵	
تقاضای برق سال پایه (مگاوات‌ساعت)	۳۰۹۱۲۴۸۰۰	وزارت نیرو
حداکثر تقاضا در پیک در سال پایه (مگاوات)	۵۳۵۶۳	وزارت نیرو
نرخ رشد تقاضا (درصد)	۵	در سناریوهای مختلف
نرخ رشد حداکثر تقاضا در پیک (درصد)	۴	در سناریوهای مختلف
ضریب پایداری شبکه (درصد)	۹	چن و همکاران (۲۰۱۶)
قیمت CO_2(دلار بر تن)	۲۰	بانک جهانی و سناریوهای

[۱] در این تحقیق دو نوع نیروگاه سیکل ترکیبی در نظر گرفته شده است. نیروگاه سیکل ترکیبی۱، همان نیروگاهی است که به صورت سیکل ترکیبی ساخته می شود، اما نیروگاه سیکل ترکیبی۲ از تبدیل نیروگاه گازی به وجود می آید.

ظرفیت برق آبی	مقدار سال پایه	به دلیل خشکسالی و محدودیت منابع، افزایشی از محل نیروگاه برق آبی ملاحظه نشده است.
		مختلف

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول (۳): مفروضات و داده‌های اختصاصی نیروگاه‌ها

پارامترهای مدل	مقدار								شرح
	بخاری	گازی	سیکل ترکیبی ۱	سیکل ترکیبی ۲	برق آبی	خورشیدی	بادی	اتمی	
چرخه عمر نیروگاه (سال)	۳۰	۳۰	۴۰	۴۰	۸۰	۲۰	۲۰	۶۰	بر اساس طول عمر نیروگاه‌ها است
زمان ساخت نیروگاه (سال)	۵	۲	۵	۵	۷	۱	۱	۷	به صورت ضمنی در پارامتر حداکثر ظرفیت سالانه نصب شده اعمال می‌شود
ساعات حضور نیروگاه در مدار(ساعت)	۵۷۶۰	۶۱۲۰	۵۷۶۰	۵۷۶۰	۱۷۲۸	۱۸۰۰	۲۱۶۰	۶۴۸۰	بر اساس ماه‌های حضور نیروگاه در مدار و ضریب نیروگاه محاسبه شده است. تمام نیروگاه‌ها به غیر از نیروگاه برق‌آبی، ۱۰ ماه و نیروگاه برق‌آبی ۶ ماه در مدار حضور دارند.
ضریب نیروگاه (درصد)	۸۰	۸۵	۸۰	۸۰	۴۰	۲۵	۳۰	۹۰	از این ضریب برای محاسبه ساعات حضور نیروگاه در مدار استفاده می‌شود
کل ظرفیت نصب شده در سال پایه (مگاوات)	۱۵۸۲۹/۲	۲۵۵۵۱/۳	۲۴۹۹۵/۱	۰	۱۲۰۲۷	۲۹۹/۲	۲۸۴/۷	۱۰۲۰	ظرفیت نیروگاه برق‌آبی ثابت در نظر گرفته شده است. وزارت نیرو
حداکثر ظرفیت سالانه نصب شده (مگاوات)	۴۰۰	۱۱۰۰	۳۶۰۰	۱۶۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۴۰۰	

حداکثر ظرفیت بالقوه نیروگاه (مگاوات)	-	-	-	۱۱۰۰۰	۱۲۰۲۷	۱۸۰۰۰	۱۸۰۰۰	۲۰۰۰۰	
تولید در سال پایه (مگاوات‌ساعت)	۸۵۶۵۴۵۰۰۰	۷۰۳۱۹۷۰۰	۱۲۹۲۰۰۷۰۰	۰	۱۵۷۶۵۱۰۰	۳۳۹۵۰۰	۵۱۸۲۰۰	۷۲۴۵۹۰۰	وزارت نیرو
ضریب انتشار CO_2 از نیروگاه (تن بر مگاوات‌ساعت)	۰/۶۷۸	۰/۸۳۷	۰/۵۰۵	۰/۵۰۵	۰	۰	۰	۰/۰۲۱	وزارت نیرو
هزینه سرمایه‌گذاری (دلار بر مگاوات)	۴۵۰۰۰۰	۴۵۰۰۰۰	۸۰۰۰۰۰	۳۶۰۰۰۰	۲۱۵۰۰۰۰	۱۳۰۰۰۰۰	۱۹۰۰۰۰۰	۳۵۰۰۰۰۰	آژانس بین‌المللی انرژی و بانک جهانی
نرخ تغییر هزینه سرمایه‌گذاری (درصد)	۱	۱	۱	۱	۱/۵	-۱	-۲	۱	تای هیپ و هافمن (۲۰۲۰)
هزینه بهره‌برداری و نگهداری (دلار بر مگاوات)	۱۶۶۶/۶۷	۱۶۶۶/۶۷	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۳۶۶۶/۶۷	۱۳۳۳/۳۴	۳۲۰۰	۱۰۶۶/۶۷	آژانس بین‌المللی انرژی و بانک جهانی در این تحقیق هزینه ثابت مدنظر است
نرخ تغییر هزینه بهره‌برداری و نگهداری (درصد)	۳	۳	۳	۳	۰/۷	۰	۰	۴	تای هیپ و هافمن (۲۰۲۰)
هزینه سوخت (دلار بر مگاوات‌ساعت)	۰/۸۸۲	۰/۹۵۴	۰/۷۰۶	۰	۰	۰	۰	۰/۰۴۷	بر اساس راندمان نیروگاه‌ها و سوخت گاز محاسبه می‌شود. تحلیل حساسیت نسبت به ارقام موجود تا جهانی
نرخ تغییر هزینه سوخت(درصد)	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۰	۰	۰	۰	۳/۲	تای هیپ و هافمن (۲۰۲۰)

منبع: یافته‌های تحقیق

۴-مدل‌سازی و طراحی سناریوهای توسعه ظرفیت برق در افق برنامه‌ریزی

در این مطالعه سناریوهای مختلف توسعه ظرفیت در صنعت برق عبارتند از:

۱- سناریو پایه بدون ملاحظات زیست‌محیطی: در این سناریو، مدل به صورت یک تابع هدف با سه متغیر هزینه سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و نگهداری، سوخت و بدون لحاظ هزینه زیست‌محیطی برآورد شده است.

۱-۱- تحلیل حساسیت این سناریو شامل تأثیر تغییرات هزینه سرمایه‌گذاری (نیروگاه-های تجدیدپذیر) بر نتایج

۲- سناریو پایه با ملاحظات زیست‌محیطی: در این سناریو، مدل به صورت یک تابع هدف با چهار متغیر هزینه سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و نگهداری، سوخت و زیست-محیطی برآورد شده است.

۱-۲- تحلیل حساسیت تأثیر تغییرات قیمت کربن بر نتایج سناریو دوم

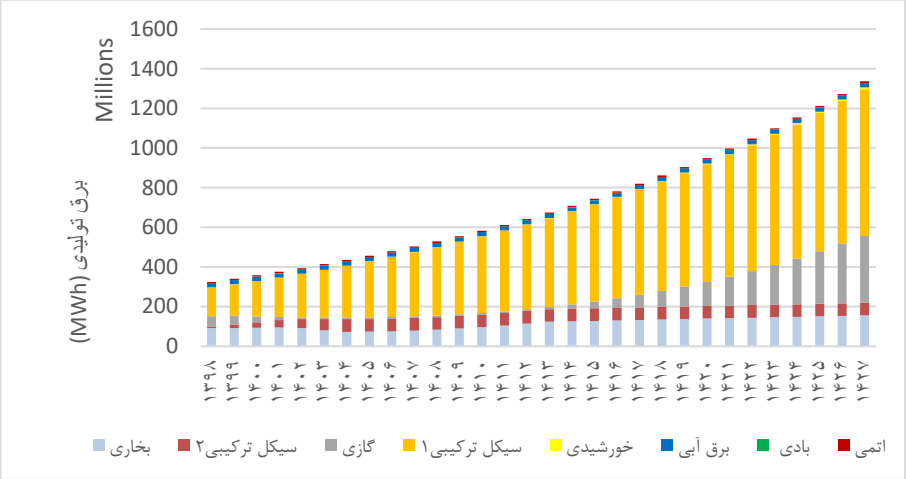
۲-۲- تحلیل حساسیت تأثیر تغییرات قیمت سوخت بر نتایج سناریو دوم

۳- سناریو تداوم تحریم‌ها: عدم دسترسی به فناوری های تجدیدپذیر و بدون کربن

۴-۱-تحلیل نتایج حاصل از اجرای مدل سناریوهای توسعه ظرفیت صنعت برق در افق برنامه‌ریزی

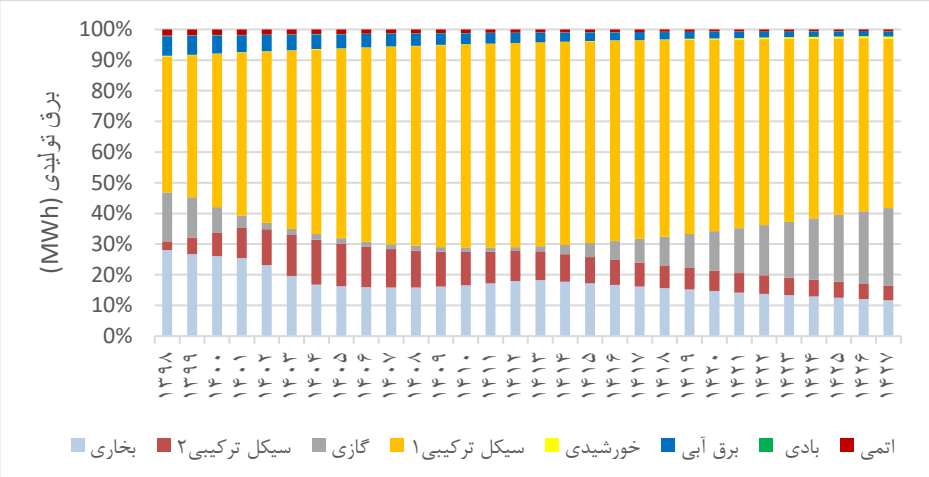
۴-۱-۱- سناریو پایه بدون ملاحظات زیست‌محیطی

این سناریو با هدف حداقل‌سازی ارزش حال هزینه‌های تولید بدون هزینه زیست‌محیطی حل گردید. کل برق تولید شده از هفت فناوری نیروگاهی روند صعودی قابل توجهی را در افق برنامه‌ریزی تجربه خواهد کرد و از ۳۲۴ تراوات‌ساعت در سال ۱۳۹۸ به ۱۳۳۶ تراوات‌ساعت در سال ۱۴۲۷ افزایش خواهد یافت. میزان برق تولیدی طی افق برنامه‌ریزی نشان می‌دهد که نیروگاه‌های سیکل‌ترکیبی۱، گازی و بخاری به ترتیب با سهم ۵۶، ۲۳ و ۱۲ درصد، بیشترین سهم را در تولید برق تشکیل می‌دهند.



شکل (۲): مقدار برق تولیدی نیروگاه‌ها در سناریو پایه بدون ملاحظات زیست‌محیطی

منبع: یافته‌های تحقیق



شکل (۳): سهم برق تولیدی نیروگاه‌ها در سناریو پایه بدون ملاحظات زیست محیطی

منبع: یافته‌های تحقیق

مقایسه سناریو پایه بدون ملاحظات زیست‌محیطی با وضعیت صنعت برق در سال پایه نشان می‌دهد که سهم کل ظرفیت نصب شده و تولید نیروگاه‌های سیکل‌ترکیبی و تجدیدپذیر به غیر از نیروگاه برق‌آبی افزایش پیدا کرده است. اما در نیروگاه‌های بخاری و گازی سهم کل ظرفیت نصب شده و تولید کاهش یافته است. اگر کاهش هزینه‌های تولید

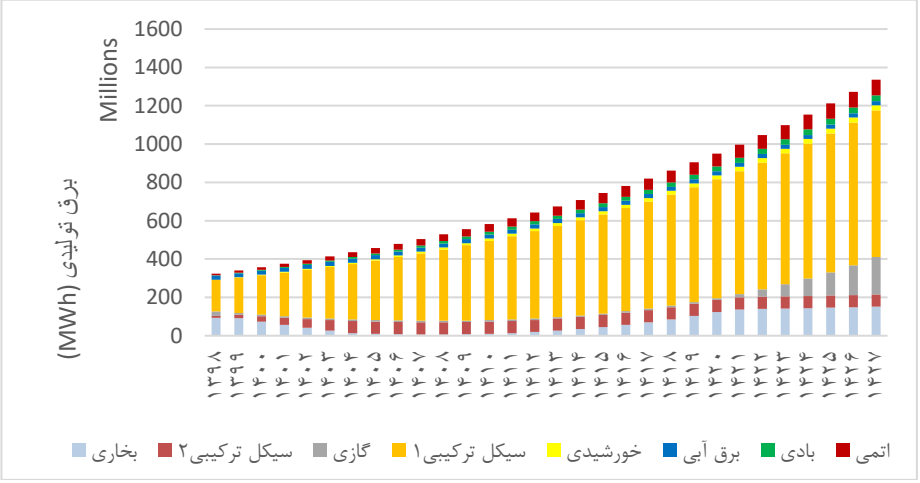
برق مدنظر باشد، نیاز به گسترش ظرفیت تولید برق از طریق نیروگاه‌های فسیلی است. زیرا این نیروگاه‌ها با قیمت‌های موجود در مقایسه با نیروگاه‌های تجدیدپذیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری و نگهداری کمتری دارند.

۱-۱-۴- تحلیل حساسیت مدل توسعه ظرفیت نیروگاه‌ها در سناریو پایه بدون ملاحظات زیست‌محیطی نسبت به کاهش ۱۵ درصدی هزینه سرمایه-گذاری

به دلیل شتاب در ارتقاء فناوری نیروگاه‌های تجدید پذیر، مدل با هدف حداقل‌سازی ارزش حال هزینه‌های سیستم با کاهش ۱۵ درصدی هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه‌های تجدیدپذیر حل گردید. مطابق نتایج، ظرفیت جدید نصب شده نیروگاه‌های خورشیدی واتمی نسبت به سناریو پایه بدون ملاحظات زیست‌محیطی افزایش یافته است؛ این نیروگاه‌ها به ترتیب از سال ۱۴۱۴ و ۱۴۲۶ شروع به گسترش پیدا کرده‌اند، زیرا زمانی که هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه‌های تجدیدپذیر کاهش می‌یابد، سرمایه‌گذاری برای ساخت این نیروگاه‌ها توجیه اقتصادی پیدا می‌کند.

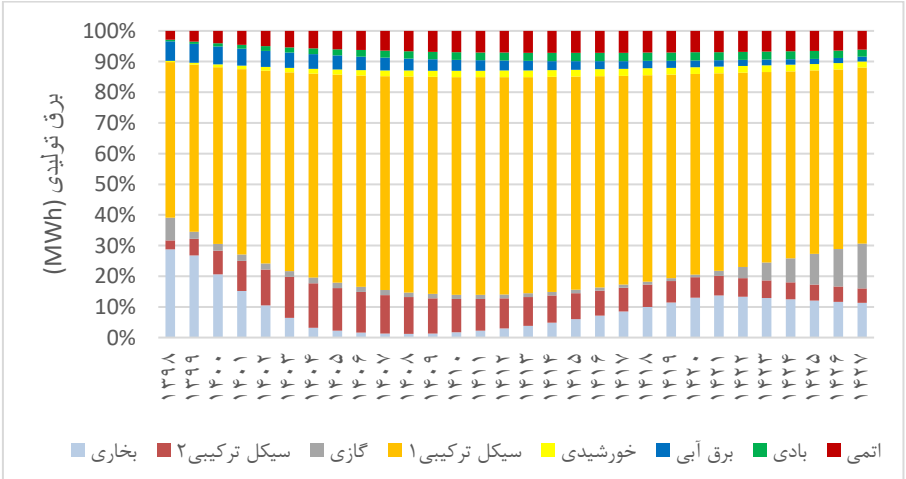
۲-۱-۴- سناریو پایه با ملاحظات زیست‌محیطی

این سناریو با هدف حداقل‌سازی ارزش حال هزینه‌های تولید و هزینه زیست‌محیطی حل گردید. براساس نتایج، ظرفیت نیروگاه‌های بخاری و گازی نسبت به سناریو پایه بدون ملاحظات زیست‌محیطی کاهش و نیروگاه‌های سیکل‌ترکیبی۱، خورشیدی، بادی و اتمی افزایش یافته است.



شکل (۳): مقدار برق تولیدی نیروگاه ها در سناریو پایه با ملاحظات زیست‌محیطی

منبع: یافته‌های تحقیق



شکل (۵): سهم برق تولیدی نیروگاه‌ها در سناریو پایه با ملاحظات زیست‌محیطی

منبع: یافته‌های تحقیق

مقایسه سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که ظرفیت تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر به غیر از نیروگاه برق‌آبی توسعه یافته است. به طوری که گسترش ظرفیت نیروگاه خورشیدی با ۱۴۵۰۰ مگاوات، نیروگاه بادی با ۱۴۰۰۰ مگاوات و نیروگاه اتمی با ۱۱۶۰۰ مگاوات، سهم معناداری در تولید دارند. این بدان مفهوم است که اگر کاهش هزینه‌های تولید و زیست-

محیطی به‌طور همزمان مدنظر باشد، زمانی ممکن است که ظرفیت تولیدی نیروگاه‌های تجدیدپذیر باید افزایش یابد تا در کنار تولید برق از طریق نیروگاه‌های فسیلی، تقاضای برق را پوشش دهند.

تحلیل ارزش حال هزینه توسعه ظرفیت سناریوهای مختلف نشان می دهد، هزینه سرمایه‌گذاری سناریو پایه با ملاحظات زیست‌محیطی نسبت به سناریو پایه بدون ملاحظات زیست‌محیطی ۶۰ درصد رشد دارد. این بدان مفهوم است که با ورود هزینه زیست‌محیطی به مدل، آرایش بهینه نیروگاه‌ها به سمت گسترش ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر سوق پیدا می‌کند و به دلیل این که این نوع از نیروگاه‌ها هزینه‌های سرمایه-گذاری و بهره‌برداری و نگهداری بسیار بالایی دارند، هزینه توسعه ظرفیت افزایش پیدا می‌کند. به طور کلی اگر کاهش هزینه‌های تولید و زیست‌محیطی به‌طور همزمان مدنظر سیاست‌گذاران باشد، نیاز به سرمایه‌گذاری درگسترش ظرفیت تولید برق از طریق نیروگاه‌های سیکل‌ترکیبی و خورشیدی بیشتر از سایر نیروگاه‌ها است. زیرا آلایندگی نیروگاه سیکل‌ترکیبی در مقایسه با سایر نیروگاه‌های فسیلی پایین‌تر می‌باشد و نیروگاه خورشیدی نیز در مقایسه با سایر نیروگاه‌های تجدیدپذیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری و نگهداری کمتری دارد. هزینه توسعه ظرفیت شبکه برق ایران در افق برنامه ریزی برای سناریو پایه ۱۱۴ میلیارد دلار و با ملاحظه کاهش دی‌اکسیدکربن در حدود تعهدات پیمان پاریس ۱۸۳ میلیارد دلار می‌باشد.

۱-۲-۱-۴- تحلیل حساسیت مدل توسعه ظرفیت نیروگاه‌ها در سناریو پایه با ملاحظات زیست‌محیطی نسبت به افزایش دو درصدی قیمت کربن

در این تحلیل حساسیت، مدل با هدف حداقل‌سازی ارزش حال هزینه‌های سیستم و افزایش دو درصدی قیمت کربن حل گردید. مطابق نتایج، ظرفیت جدید نصب شده نیروگاه‌های بخاری، خورشیدی، بادی و اتمی نسبت به سناریو پایه با ملاحظات زیست-محیطی افزایش پیدا کرده، در مقابل ظرفیت نیروگاه گازی کاهش یافته است. گسترش بقیه نیروگاه‌ها نیز همانند سناریو پایه است.

۴-۱-۲-۲- تحلیل حساسیت مدل توسعه ظرفیت نیروگاه‌ها در سناریو پایه با ملاحظات زیست‌محیطی نسبت به تغییر قیمت سوخت

در این تحلیل حساسیت، مدل با هدف حداقل‌سازی ارزش حال هزینه‌های سیستم و افزایش قیمت سوخت حل گردید. پس از حل مدل، ظرفیت جدید نصب شده نیروگاه‌های بخاری، خورشیدی، بادی و اتمی نسبت به سناریو پایه با ملاحظات زیست‌محیطی افزایش و نیروگاه گازی کاهش یافته است. اما گسترش بقیه نیروگاه‌ها همانند سناریو پایه است.
به طور کلی مقایسه تحلیل حساسیت قیمت سوخت با سناریو پایه با ملاحظات زیست-محیطی نشان می‌دهد که گسترش ظرفیت نیروگاه‌های تولید برق از طریق نیروگاه‌های تجدیدپذیر است، چرا که این نیروگاه‌ها هزینه سوخت ندارند یا مانند نیروگاه اتمی هزینه سوخت کمتری نسبت به دیگر نیروگاه‌ها دارند.

۴-۱-۳- سناریو تداوم تحریم‌ها

تداوم تحریم‌ها باعث عدم دستیابی به منابع مالی و فناوری جهت توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر می‌شود، بنابراین در این سناریو پس از کاهش ۲۰ درصدی از حداکثر ظرفیت سالانه نیروگاه‌های تجدیدپذیر، مدل با هدف حداقل‌سازی ارزش حال هزینه‌های سیستم حل گردید. بر اساس نتایج، ظرفیت تولید نیروگاه‌های فسیلی نسبت به سناریو پایه با ملاحظات زیست‌محیطی افزایش یافته است. هر نوع عدم توانایی برای جذب فناوری‌های مدرن تجدیدپذیر (با هر نرخ کاهشی مثلا ۲۰ درصدی) توام با افزایش سهم نیروگاه‌های فسیلی و افزایش لایندگی است. سناریوی تداوم تحریم‌ها کشور را از دست‌یابی به اهداف تعهدات پاریس دور خواهد کرد.

۴-۲- سهم تولید بهینه نیروگاه‌ها در سناریوها و تحلیل حساسیت‌های مختلف

در جدول ۴ برای محاسبه سهم تولید بهینه هر یک از نیروگاه‌ها درسناریوها و تحلیل حساسیت‌های مختلف، ابتدا تولید هر یک از نیروگاه‌ها در طول دوره افق برنامه‌ریزی جمع و سپس سهم آن‌ها در تولید انباشته محاسبه شد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، سهم تولید بهینه نیروگاه‌های بخاری و گازی از ۹/۵ تا ۱۶/۲ و ۳/۶ تا ۱۱/۳ درصد در نوسان هستند. بیشترین سهم تولید بهینه آن‌ها زمانی است که هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه‌های تجدیدپذیر کاهش پیدا می‌کند، چرا که این نیروگاه‌ها نسبت به سایر نیروگاه-

ها هزینه سرمایه‌گذاری کمتری دارند. در این تحقیق، خروجی مدل تأکید به این دارد که از حداکثر ظرفیت نیروگاه سیکل‌ترکیبی۱ استفاده شود، لذا زمانی که مدل تعریف می-شود، بلافاصله از تمام ظرفیت این نیروگاه استفاده می‌گردد. این بدان علت است که نیروگاه سیکل‌ترکیبی۱ هزینه سوخت و آلایندگی کمتری دارد، بنابراین کمترین نوسان و بیشترین سهم تولید برای این نیروگاه است.

جدول (۴): سهم تولید بهینه نیروگاه‌ها در سناریوها و تحلیل حساسیت‌های مختلف در طول دوره

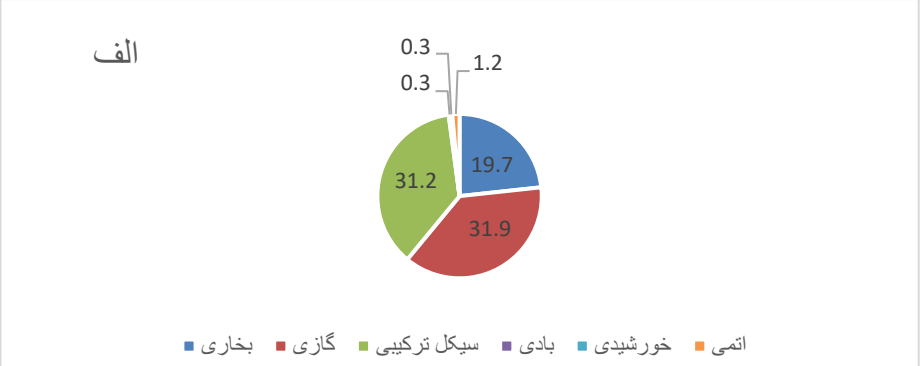
سناریو و تحلیل حساسیت‌ها	بخاری	گازی	سیکل‌ترکیبی ۱	سیکل‌ترکیبی ۲	برق‌آبی	خورشیدی	بادی	اتمی
سناریو پایه بدون ملاحظات زیست-محیطی	۱۶	۱۱	۶۰/۹	۸	۲/۸	۰/۳۲	۰/۰۸	۰/۹
تحلیل حساسیت به کاهش هزینه سرمایه‌گذاری	۱۶/۲	۱۱/۳	۶۰/۱	۸	۲/۸	۰/۵۲	۰/۰۸	۱
سناریو پایه با ملاحظات زیست-محیطی	۹/۵	۴/۲	۶۴/۷	۸	۲/۸	۲	۲/۴	۶/۵
سناریو تداوم تحریم‌ها	۱۳/۸	۷/۸	۶۴/۷	۸	۲/۸	۰/۴	۰/۵	۲
تحلیل حساسیت به افزایش ۲ درصدی قیمت کربن	۹/۶	۳/۷	۶۴/۷	۸	۲/۸	۲/۱	۲/۵	۶/۶
تحلیل حساسیت به افزایش۲۰ درصدی قیمت کربن	۹/۶	۳/۶	۶۴/۷	۸	۲/۸	۲/۱	۲/۶	۶/۶
تحلیل حساسیت نسبت به افزایش قیمت سوخت	۹/۶	۳/۶	۶۴/۷	۸	۲/۸	۲/۱	۲/۶	۶/۶

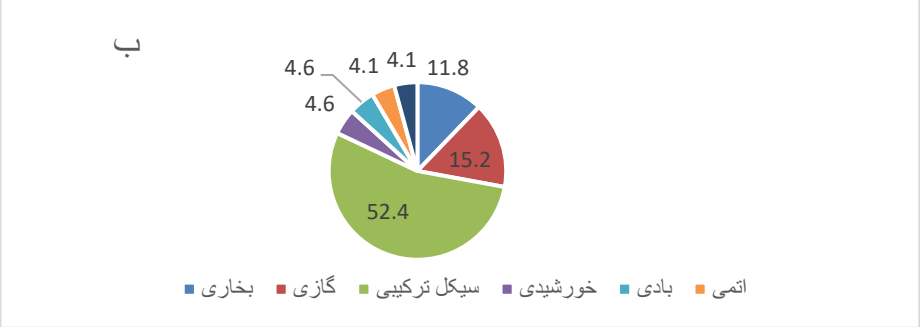
منبع: یافته‌های تحقیق

بیشترین سهم تولید برای نیروگاه سیکل ترکیبی ۱ و حدود ۶۲ درصد می‌باشد. سهم تولید نیروگاه سیکل‌ترکیبی ۲ در تمام سناریوها و تحلیل حساسیت‌های مختلف ثابت است و تغییری نمی‌کند، چرا که از تمام ظرفیت این نیروگاه در سال‌های ابتدایی دوره برنامه-ریزی استفاده می‌شود. سهم تولید بهینه نیروگاه‌های خورشیدی، بادی و اتمی نیز نوسان بالایی دارد. کمترین سهم تولید آن‌ها مربوط به سناریو پایه بدون ملاحظات زیست-محیطی است، این بدان مفهوم است که هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری و نگهداری این نیروگاه‌ها بالا هستند. با وجود این که هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه‌های تجدیدپذیر ۱۵ درصد کاهش پیدا کرد، اما از ظرفیت نیروگاه بادی در تحلیل حساسیت تغییر هزینه سرمایه‌گذاری استفاده نشده است.

۴-۳- مقایسه ترکیب و آرایش نیروگاهی وضعیت موجود در سال ۱۳۹۷ با وضعیت مطلوب در افق ۳۰ ساله با ملاحظات زیست‌محیطی

با توجه به شکل ۶، سهم کل ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های بخاری و گازی به ترتیب از ۱۹/۷ و ۳۱/۹ درصد در سال پایه به ۱۱/۸ و ۱۵/۲ درصد در افق برنامه‌ریزی کاهش یافته است، اما سهم نیروگاه‌های سیکل‌ترکیبی، اتمی، خورشیدی و بادی به ترتیب از ۳۱/۲، ۱/۲، ۰/۳ و ۰/۳ درصد در سال پایه به ۵۲/۴، ۴/۱، ۴/۶ و ۴/۶ درصد در افق برنامه‌ریزی افزایش پیدا کرده است.





شکل (۶): سهم کل ظرفیت نصب شده نیروگاهی در (الف) وضعیت موجود در سال ۱۳۹۷ (ب) وضعیت مطلوب در افق ۳۰ ساله

منبع: یافته‌های تحقیق. وزارت نیرو، ۱۳۹۹

۵-نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدل های پیشنهادی از توسعه شبکه برق ایران در سناریوهای مختلف از جمله سناریوهای پایه بدون ملاحظات زیست‌محیطی و سناریو پایه با ملاحظات زیست-محیطی مبتنی بر شرایط واقعی و سال پایه شبیه سازی گردید. پس از تحلیل سناریوها، حساسیت مدل نسبت به برخی از پارامترها از جمله هزینه سرمایه‌گذاری، قیمت کربن و قیمت سوخت نیز مورد بررسی قرار گرفت. سپس آرایش بهینه هر یک از نیروگاه‌ها در سناریوهای مختلف و میزان انتشار دی‌اکسیدکربن تحلیل شد. با توجه به یافته‌های تحقیق در سناریو پایه بدون ملاحظات زیست‌محیطی، سهم تولید بهینه نیروگاه‌های فسیلی بیشتر از نیروگاه‌های تجدیدپذیر است، زیرا این نیروگاه‌ها در مقایسه با نیروگاه‌های تجدیدپذیر هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری و نگهداری کمتری دارند.

در سناریو پایه با ملاحظات زیست‌محیطی علاوه بر هزینه‌های تولید، هزینه زیست‌محیطی وارد مدل می‌شود. در این سناریو سهم تولید بهینه نیروگاه‌های تجدیدپذیر به غیر از نیروگاه برق‌آبی افزایش یافته است. به طور کلی اگر کاهش هزینه‌های تولید و زیست-محیطی به طور همزمان مدنظر باشد، نیاز به گسترش ظرفیت تولید در نیروگاه‌های سیکل‌ترکیبی و تجدیدپذیر است.

در سناریو تداوم تحریم‌ها با کاهش حداکثر ظرفیت سالانه نیروگاه‌های تجدیدپذیر، سهم تولید بهینه نیروگاه‌های بخاری و گازی نسبت به سناریو پایه با ملاحظات زیست‌محیطی افزایش یافته است. در این سناریو دسترسی به فناوری و منابع مالی برای توسعه نیروگاه

های تجدیدپذیر میسر نیست و ناگزیر برای جبران کاهش ظرفیت تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر، افزایش ظرفیت نیروگاه‌های فسیلی برای تأمین تقاضای برق ضروری می‌باشد. ارزش حال هزینه توسعه ظرفیت نشان می دهد هزینه سرمایه‌گذاری سناریو پایه با ملاحظات زیست‌محیطی نسبت به سناریو پایه بدون ملاحظات زیست‌محیطی ۶۰ درصد رشد داشته‌اند. این بدان مفهوم است که با ورود هزینه زیست‌محیطی به مدل، آرایش بهینه نیروگاه‌ها به سمت گسترش ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر سوق پیدا می‌کند و به دلیل این که نیروگاه‌ها هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری و نگهداری بسیار بالایی دارند، هزینه توسعه ظرفیت افزایش پیدا می‌کند.

با افزایش قیمت کربن، ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر گسترش پیدا کرده است. با توجه به یافته‌های تحقیق، سهم ظرفیت جدید نیروگاه‌های خورشیدی، بادی و اتمی نسبت به سناریو پایه با ملاحظات زیست‌محیطی افزایش یافته است، این افزایش به این علت است که آلایندگی نیروگاه‌های تجدیدپذیر نسبت به نیروگاه‌های فسیلی کمتر می‌باشد.

افزایش قیمت سوخت نیز باعث گسترش ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر می‌شود. یافته-های تحقیق نشان می‌دهد که سهم ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی، بادی و اتمی افزایش پیدا کرده و در مقابل سهم ظرفیت نیروگاه‌های سیکل‌ترکیبی و گازی کاهش یافته است ، چرا که نیروگاه‌های تجدیدپذیر هزینه سوخت ندارند یا مانند نیروگاه اتمی هزینه سوخت بسیار کمی نسبت به نیروگاه‌های فسیلی دارند.

در این تحقیق مفروضات بسیار منعطف هستند و فرض می‌شود که سیاست‌گذاران به منابع مالی دسترسی آزاد دارند. اگر این مفروضات پذیرفته شود، نتایج منطبق با سناریوها می‌شود. اما اگر سیاست‌گذار دسترسی آزاد به منابع مالی نداشته باشد، دیگر نمی‌تواند نیروگاه‌های پرهزینه را بسازد و اهداف زیست محیطی را تامین کند.

سهم کل ظرفیت اسمی و تولید نیروگاه‌های بخاری و گازی در افق برنامه‌ریزی نسبت به سال پایه کاهش و نیروگاه‌های سیکل‌ترکیبی، اتمی، خورشیدی و بادی افزایش یافته است. مقایسه وضعیت موجود با وضعیت مطلوب ، نشان‌دهنده تغییرات عمیق در آرایش بهینه نیروگاهی می‌باشد، زیرا در این مطالعه فرض بر این است که از تمام ظرفیت نیروگاه سیکل‌ترکیبی به دلیل هزینه سرمایه‌گذاری، سوخت و آلایندگی پایین نسبت به سایر نیروگاه‌های فسیلی، استفاده شود. از طرف دیگر با وجود ملاحظات زیست‌محیطی، گسترش ظرفیت نیروگاه‌ها به سمت نیروگاه‌های تجدیدپذیر سوق پیدا کرده است.

در مدل یک راندمان مفروض برای نیروگاه‌ها در نظر گرفته شد، اما اگر راندمان نیروگاهی را افزایش دهیم، هزینه انتشار دی‌اکسیدکربن کاهش پیدا می‌کند.

نتایج نشان می‌دهد که برای کاهش ۱۵ درصدی هزینه‌های زیست‌محیطی، باید هزینه سرمایه‌گذاری بیشتری به منظور ساخت نیروگاه‌های تجدیدپذیر در نظر گرفته شود.

یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که میزان انتشار CO_2 در سناریو اول نسبت به سناریوهای دیگر بیشتر است؛ زیرا در سناریو اول هزینه زیست‌محیطی در نظر گرفته نمی‌شود و مقدار تولید برق در نیروگاه‌های فسیلی افزایش یافته است، اما میزان انتشار CO_2 در سناریو دوم کمتر از سایر سناریوها است، زیرا علاوه بر اعمال ملاحظات زیست‌محیطی، حداکثرظرفیت سالانه نیروگاه‌های تجدیدپذیر نیز بیشتر از سناریو سوم می‌باشد.

هزینه توسعه ظرفیت شبکه برق ایران در افق برنامه ریزی برای سناریو پایه ۱۱۴ میلیارد دلار و با ملاحظه کاهش دی اکسید کربن در حدود تعهدات پیمان پاریس ۱۸۳ میلیارد دلار می باشد.

-اگر سیاست‌گذاران صنعت برق به دنبال کاهش همزمان هزینه‌های تولید و زیست-محیطی باشند، گزینه مطلوب گسترش نیروگاه‌های سیکل‌ترکیبی و خورشیدی می‌باشد. با توجه به وجود تکنولوژی نیروگاه سیکل‌ترکیبی و خورشیدی در ایران، توسعه این نیروگاه‌ها می‌تواند نقشه راه صنعت برق ایران باشد.

-کاهش انتشار آلاینده‌ها مستلزم گسترش نیروگاه‌های تجدیدپذیر است، اما این نیروگاه‌ها هزینه سرمایه‌گذاری بسیار بالایی دارند. بنابراین پیشنهاد می‌شود که سیاست‌گذاران با انجام اقداماتی از جمله حمایت از تولیدکننده‌های داخلی این تکنولوژی‌ها، موجب کاهش هزینه سرمایه‌گذاری این نیروگاه‌ها شوند.

- هر نوع عدم توانایی برای جذب فناوری‌های مدرن تجدیدپذیر (با هر نرخ کاهشی مثلا ۲۰ درصدی) توام با افزایش سهم نیروگاه‌های فسیلی و افزایش آلایندگی است. سناریوی تداوم تحریم‌ها به مفهوم ناتوانی در جذب فناوری‌های مدرن تجدید پذیر است و کشور را از دست‌یابی به اهداف تعهدات پاریس دور خواهد کرد.

تضاد منافع

نویسندگان نبود تضاد منافع را اعلام می‌دارند.

فهرست منابع

۱. آمار و داده (۱۳۹۹). بانک مرکزی ایران.

۲. تقی‌زاده یزدی، محمدرضا (۱۳۹۱). *طراحی مدل ریاضی توسعه ظرفیت تولید برق در ایران با هدف کنترل گازهای گلخانه‌ای*. رساله دکترا، دانشگاه تهران.

۳. حاتمی، یحیی (۱۳۹۸). *برنامه‌ریزی توسعه تولید توان با در نظر گرفتن شرایط زیست-محیطی تحت شرایط عدم قطعیت و توزیع بار بین نیروگاه‌ها*. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۴. شرکت مادر تخصصی توانیر (۱۳۹۸). *آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژه مدیریت راهبردی در سال ۱۳۹۸*: تهران.

۵. شیری‌پور، مرتضی (۱۳۹۳). *ارائه یک مدل بهینه‌سازی جدید برای مسئله برنامه‌ریزی افزایش ظرفیت تولید برق تحت شرایط عدم قطعیت و ملاحظات زیست‌محیطی*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

۶. مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی (۱۳۹۵). *اظهارنظر کارشناسی درباره: لایحه موافقتنامه پاریس*. دفاتر مطالعات زیربنایی و مطالعات حقوقی.

۷. منظور، داوود و آریان‌پور، وحید (۱۳۹۷). نقدی بر توسعه ظرفیت نیروگاهی کشور؛ ارزیابی میزان انحراف از حالت بهینه. *فصلنامه پژوهش‌های رشد و توسعه اقتصادی*، ۸(۳۰)، ۸۲-۶۷.

۸. نکوئی، ندا (۱۳۹۶). *تحلیل تجزیه مکانی آلودگی ناشی از مصرف انرژی نیروگاه‌های برق ایران*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۹. وزارت نیرو (۱۳۹۹). *مروری بر ۳۱ سال آمار انرژی کشور*. دفتر برنامه‌ریزی واقتصاد کلان برق و انرژی.

۱۰. وزارت نیرو (۱۳۹۹). *ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۷*. دفتر برنامه‌ریزی واقتصاد کلان برق و انرژی.

1. Amirnekooei, K., Ardehali, M. M., & Sadri, A. (2012). Integrated resource planning for Iran: Development of reference energy system, forecast, and long-term energy-environment plan. *Energy*, 46(1), 374-385.
2. Begum, R. A., Sohag, K., Abdullah, S. M. S., & Jaafar, M. (2015). CO2 emissions,energy consumption, economic and population growth in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 594-601.
3. Petroleum, B., Statistical Review of World Energy. 2022, BP
4. Cong, R. G. (2013). An optimization model for renewable energy generation and its application in China: a perspective of maximum utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17,
5. Emissions, G. G. (2011). Comparison of lifecycle greenhouse gas emissions of various electricity generation sources.
6. Felver, T. B. (2020). How can Azerbaijan meet its Paris Agreement commitments: assessing the effectiveness of climate change-related energy policy options using LEAP modeling. *Heliyon*, 6(8), e04697.
7. Guerra, O. J., Tejada, D. A., Rodríguez, R., & Reklaitis, G. V. (2015). A spatial multi-period mixed integer linear programming (MILP) model for optimal power planning: CO2 emissions mitigation. *In Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 37, pp. 2345-2350). Elsevier.
8. Hashim, H., Douglas, P., Elkamel, A., & Croiset, E. (2005). Optimization model for energy planning with CO2 emission considerations. *Industrial & engineering chemistry research*, 44(4), 879-890.
9. Hatami, Y. (2019). *Planning the development of power generation considering environmental conditions under conditions of uncertainty and load distribution between power plants. PhD Thesis,* Shahid Bahonar University, Kerman (In Persian).
10. Henggeler, C. A., Martins, A. G., & Brito, I. S. (2004). A multiple objective mixed intege linear programming model for power generation expansion planning**.** *Energy*, 29(4), 613-627.
11. Hobbs, B. F. (1995). Optimization methods for electric utility resource planning. *Europea Journal of Operational Research*, 83(1), 1-20.

12. Islamic Council Research Center. (2016). Expert opinion on: Paris Agreement bill. *Offices of basic studies and legal studies.* Machine gun number: 25015072, available at: http://www.rc.maglis.ir (In Persian).
13. Lund, H., & Mathiesen, B. V. (2012). The role of carbon capture and storage in a future sustainable energy system. *Energy*, 44(1), 469-476.
14. Manzor, D., & Aryanpour, V. (2018). A critique on the development of the country's power plant capacity; Evaluation of the degree of deviation from the optimal state. *Scientific research quarterly, economic growth and development researches.* Year 8, Number 30, 67-82 (In Persian).
15. Mathiesen, B. V., Lund, H., & Karlsson, K. (2011). 100% Renewable energy systems, climate mitigation and economic growth. *Applied energy*, *88*(2), 488-501.
16. Ministry of Power. (2019). *A review of 31 years of energy statistics of the country. Bureau of Electricity and Energy Planning and Macroeconomics* (In Persian).
17. Ministry of Power. (2019). Energy balance sheet for 2017. *Bureau of Electricity and Energy Planning and Macroeconomics* (In Persian).
18. Mirzaesmaeeli, H. 2007. A Multi-Period Optimization Model for Energy Planning with CO2 Emission Consideration. *Master Thesis, Univ. of Waterloo, St Ontario,* Canada.
19. Nakhaeinejad, M., Abbasi, M., ZareMehrjerdy, Y., & Asadi Zarch, A. (2022).Greenhouse gas emission reduction model: an integrated approach of linear programming and system dynamics The case of Iranian power plants. *Journal of Production and Operations Management*, 13(1), 51-77.
20. Nekouei, N. (2017). *Spatial analysis of energy consumption and pollution from power plants in Iran. Master thesis,* Shahid Bahonar University, Kerman (In Persian).
21. O'Mahony, T., Zhou, P., & Sweeney, J. (2013). Integrated scenarios of energy-related CO2 emissions in Ireland: A multi-sectoral analysis to 2020. *Ecological Economics*, 93, 385-397.
22. Pfeiffer, A., Hepburn, C., Vogt-Schilb, A., & Caldecott, B. (2018). Committed emissions from existing and planned power plants and asset

stranding required to meet the Paris Agreement. *Environmental Research Letters*, 13(5), 054019.

23. Rentizelas, A. A., Tolis, A. I., & Tatsiopoulos, I. P. (2012). Investment planning in electricity production under CO2 price uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 140(2), 622-629.
24. Shirmohammadi, R., Soltanieh, M., & Romeo, L. M. (2018). Thermoeconomic analysis and optimization of post-combustion CO2 recovery unit utilizing absorption refrigeration system for a natural-gas-fired power plant. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 37(3), 1075-1084.
25. Shiripour, M. (2014*). A new optimization model for power generation expansion planning under uncertainty considerations and environmental considerations*. *Master thesis*, University of Tehran, Tehran (In Persian).
26. Statistics and data. (2020). *Central bank.* Available at: http://www.cbi.ir (In Persian).
27. Taghizadeh Yazdi, M. (2012). *Designing a mathematical model for the development of electricity production capacity in Iran with the aim of controlling greenhouse gases. PhD Thesis*, University of Tehran, Tehran (In Persian).
28. Tavanir specialized parent company. (2019). Detailed statistics of Iran's electricity industry, *especially for strategic management in 2019*. Tehran (In Persian).
29. Teng, F., Wang, X., & Zhiqiang, L. V. (2014). Introducing the emissions trading system to China's electricity sector: Challenges and opportunities. *Energy Policy*, 75, 39-45.
30. Thi Hiep, D. & Hoffmann, C. (2020). A power development planning for Vietnam under the CO2 emission reduction targets. *Energy Reports*, 6, 19-24.
31. Vazhayil, J. P., & Balasubramanian, R. (2013). Optimization of India's power sector strategies using weight-restricted stochastic data envelopment analysis. *Energy Policy*, 56, 456-465.

32. Wu, J. H., & Huang, Y. H. (2014). Electricity portfolio planning model incorporating renewable energy characteristics. *Applied energy*, 119, 278-287.

33. Xydis, G., & Koroneos, C. (2012). A linear programming approach for the optimal planning of a future energy system. Potential contribution of energy recovery from municipal solid wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 369-378.

34. Zhang, D., Liu, P., Ma, L., & Li, Z. (2013). A multi-period optimization model for optimal planning of China's power sector with consideration of carbon mitigation—The optimal pathway under uncertain parametric conditions. *Computers & chemical engineering*, 50, 196-206.

35. Zhang, D., Liu, P., Ma, L., Li, Z., & Ni, W. (2012). A multi-period modelling and optimization approach to the planning of China's power sector with consideration of carbon dioxide mitigation. *Computers & Chemical Engineering*, 37, 227-247.