فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی
سال چهارم/ شماره ۱۰/ بهار ۱۳۹۷/ صفحات ۳۹-۷

برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت‌های تولید برق با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی

مهدیه احسان‌بخش
کارشناس ارشد مهندسی برق قدرت دانشگاه شهید بهشتی
(نویسنده مسئول)
m.ehsanbakhsh@mail.sbu.ac.ir

محمد احمدیان
استادیار دانشگاه شهید بهشتی
m_ahmadian@sbu.ac.ir

در گذشته، در برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت تولید برق، تامین بار مصرفی، سطح قابل‌قبول قابلیت اطمینان و کمینه بودن هزینه‌ها نقش اصلی را ایفا می‌کرد. امروزه رعایت ملاحظات زیست‌محیطی از اولویت‌های مهم برنامه‌ریزی به شمار می‌آید. این رویکرد هزینه توسعه ظرفیت تولید را افزایش می‌دهد. دوست‌داران محیط‌زیست ادعا دارند این افزایش با کاهش هزینه‌های خارجی ناشی از کاهش آلایندگی طرح‌های توسعه جبران می‌شود. برای اثبات این ادعا، مطالعات چندانی بویژه با استفاده از داده‌های واقعی صورت نگرفته است. در مقاله حاضر با شبیه سازی شبکه‌ای نزدیک به شبکه برق ایران، اثر محدودیت انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی بر برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت نیروگاه‌ها در بازه زمانی سال‌های ۱۴۰۵- ۱۳۸۴ مطالعه و تغییر در هزینه‌های توسعه سیستم قدرت با تغییر در هزینه آسیب‌های زیست‌محیطی، مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش هزینه ناشی از اعمال محدودیت در میزان انتشار آلاینده‌ها در بلندمدت با کاهش هزینه خارجی ناشی از انتشار آنها جبران می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آلاینده‌های زیست‌محیطی، برنامه‌ریزی توسعه‌تولید، هزینه اجتماعی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۹/۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۶

۱. مقدمه

امروزه پذیرفته شده است که تداوم رشد اقتصادی بدون توجه به تاثیرات مخرب نحوه تولید و مصرف بر محیط‌زیست ممکن نیست. در نتیجه، با توجه به رابطه مستقیم رشد اقتصادی با مصرف برق (مهرآرا و دیگران، ۱۳۹۵) و سهم قابل‌توجه نیروگاه‌های فسیلی در آلودگی‌های زیست‌محیطی، برای تداوم رشد اقتصادی کشور، تلاش برای کاهش آلاینده‌ها بویژه انتشار گازهای SO_2 و NO_X، در فرایند تولید برق دارای اهمیت زیادی می‌باشد (صادقی و دیگران، ۱۳۹۶). میزان آلاینده‌ها در فرایند تولید برق عمدتا به نوع نیروگاه و سوخت مصرفی آن وابسته است، لذا برای کاهش معنادار آن باید در اولویت‌های حاکم بر برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت تولید تجدیدنظر کرد.

از جنبه نظری، برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت تولید در یک سیستم قدرت، بخشی از برنامه‌ریزی کلان انرژی است و عموما بر اساس سیاست‌های خاص توسعه، در جهت منافع ملی هر کشور انجام می‌شود. هدف این برنامه‌ریزی، یافتن بهترین طرح توسعه ظرفیت، متناسب با میزان مصرف می‌باشد به طوری که طرح توسعه علاوه بر اقتصادی بودن از محدوده‌های مجاز قابلیت اطمینان و مسائل زیست‌محیطی و سایر قیود خارج نشود (تقی‌پور رضوان، ۱۳۸۵). گرچه برای تعیین سهم بهینه فناوری‌های مختلف برق با در نظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی، مطالعاتی انجام شده (استادزاد، ۱۳۹۲؛ عفت‌نژاد و زارع برگ‌آبادی، ۱۳۹۲)، اما در عمل، تاکنون ملاحظات فنی و اقتصادی نسبت به ملاحظات زیست‌محیطی وزن بمراتب بیشتری داشته‌اند. یکی از دلایل عمده این وضعیت، هزینه نسبتا بالایی است که باید برای سازگاری طرح‌های توسعه با ملاحظات زیست‌محیطی پرداخته شود. این در حالی است که منافع حاصل از رعایت ملاحظات زیست‌محیطی، کمتر به صورت کمی و مشخص محاسبه شده‌اند. به بیان دیگر، به منظور کنترل سطح آلودگی ناشی از تولید برق و عرضه پایدار انرژی، لازم است خسارات وارده به واسطه انتشارآلاینده‌های ناشی از تولید برق محاسبه و در تابع هزینه تولید برق نیروگاه‌ها لحاظ شوند. به این منظور، در هزینه نیروگاه‌ها علاوه بر هزینه

خصوصی[1] یا مستقیم که شامل هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری[2]، سوخت[3]، هزینه‌های ثابت بهره‌برداری و نگهداری[4] و هزینه های متغیر بهره‌برداری و نگهداری[5] است، هزینه خارجی یا غیرمستقیم را هم باید به حساب آورد. هزینه خارجی[6]، هزینه‌ای است که به واسطه تولید بر جامعه تحمیل می‌شود، اما تولیدکننده، آن را پرداخت نمی‌کند. در ادبیات اقتصادی از مفهوم هزینه‌های اجتماعی[7] برای بیان مجموع هزینه‌های تولید، اعم از خارجی (غیرمستقیم) و خصوصی (مستقیم)، استفاده می‌شود. (رحیمی، ۱۳۸۸)

در برخی مطالعات صورت‌گرفته (حسینی، ۱۳۹۴) در زمینه توسعه سیستم قدرت، همان‌گونه که انتظار می‌رود، نشان داده شده که با لحاظ نمودن قید محدودکنندگی آلاینده‌ها، هزینه‌های توسعه ظرفیت سیستم افزایش می‌یابد و ادعا شده است که این افزایش هزینه‌ها، با منفعت زیست‌محیطی حاصل از کاهش آلاینده‌ها پوشش داده می‌شود، اما برای اثبات این ادعا، مقایسه‌ای بین افزایش هزینه توسعه سیستم قدرت و منفعت زیست‌محیطی حاصل از کاهش انتشار آلاینده‌ها صورت نگرفته است. مرور مقالات منتشر شده در این حوزه، از عدم توجه جدی برای انجام این مقایسه بخصوص برای سیستم‌های قدرت واقعی حکایت دارد.

در این تحقیق برای پرکردن این خلأ و شفاف‌کردن تاثیر در نظر گرفتن محدودیت‌های زیست‌محیطی بر ترکیب نیروگاه‌ها و هزینه‌های توسعه ظرفیت سیستم قدرت، برای یک سیستم با ویژگی‌های بسیار نزدیک به شبکه سراسری برق ایران، هزینه اجتماعی (مجموع هزینه مستقیم و هزینه ناشی از انتشار آلاینده‌ها) تولید برق در دو حالت اعمال قید محدودیت انتشار آلاینده‌های SO_2

1. Private Cost
2. Capital Investment Cost
3. Fuel Cost
4. Fixed Operation and Maintenance Cost
5. Variable Operation and Maintenance Cost
6. External Cost
7. Social Cost

و NO_X و بدون اعمال این قید محاسبه می‌شود. سپس با مقایسه این هزینه‌ها در دو حالت یادشده، به این پر سش مهم پا سخ داده می شود که آیا کاهش هزینه خارجی تولید برق نا شی از کاهش انت شار آلاینده‌های زیست‌محیطی در حالتی که برنامه‌ریزی توسعه تولید با اعمال محدودیت در میزان انتشار این آلاینده‌ها صورت می‌گیرد، افزایش هزینه توسعه نیروگاه‌ها را جبران می‌کند. با مشخص شدن پاسخ این سؤال، مسئولین سیاستگذاری با اطمینان بیشتری می‌توانند در مورد لزوم اعمال قید آلایندگی در برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت تولید تصمیم‌گیری نمایند.

در بخش‌های دوم و سوم به ترتیب پیشینه تحقیق و مبانی نظری تو ضیح داده می شود. از آنجا که در این تحقیق از نرم‌افزار WASP [1] استفاده شده است، در بخش چهارم برای تبیین روش تحقیق، تو ضیحاتی در مورد این نرم‌افزار و چگونگی اعمال قیود آلایندگی در آن ارائه می شود. مشخصات سیستم مورد مطالعه، داده‌ها و فرضیات شبیه‌سازی در بخش پنجم آورده خواهد شد. در بخش ششم، نتایج شبیه سازی مطرح و تحلیل می شود و بخش هفتم و پایانی، به جمع‌بندی مقاله و ارائه پیشنهادها اختصاص دارد.

۲. پیشینه تحقیق

بیکل و فریدریچ [2] (۲۰۰۵) به معرفی و بررسی روش مسیر تاثیرگذاری [3] پرداخته‌اند که روشی پذیرفته شده از طرف جامعه علمی در زمینه محا سبه هزینه‌های خارجی وارد شده به محیط‌زیست به شمار می‌رود. این روش یک رویکرد ارزیابی از پایین به بالاست. در این روش، مزایا و هزینه‌های زیست‌محیطی با دنباله‌روی از مسیر انتشار آلاینده‌ها تا اثرات فیزیکی ناشی از تغییرات در کیفیت هوا، خاک و آب برآورد می‌شود. این روش به مسائلی مانند اثرات شدید ناشی از آلودگی بر

1. Wien Automatic System Planning
2. Bickel and Friedrich
3. The Impact Pathway Approach

سلامتی، ارزش پولی این اثرات و ارزیابی دیگر تاثیرات حاصل از آلودگی مانند گرم شدن کره زمین و اسیدشدگی می‌پردازد. در این مرجع، نگارندگان شش اصل کلی را برای روش معرفی شده بیان کرده‌اند: ارزیابی و یا تعیین وزن اثرات شدید ناشی از آلایندگی که تا حد ممکن باید با روش‌های کمّی انجام شود؛ تبدیل اثرات شدید آلایندگی به معادل ریالی آنها تا بتوان به عنوان مثال، اثرات خارجی حاصل از آلایندگی‌ها را در پرداخت مالیات لحاظ نمود؛ ارزیابی اثرات شدید آلاینده‌های تولیدشده، بر مبنای رجحان جمعیت مطلع و تحت تاثیر؛ توجه افراد مصاحبه‌شونده به تغییراتی که در نتیجه اثرات شدید ارزیابی‌شده ایجاد می‌شوند؛ روش مورد استفاده باید قادر به محاسبه مکان و زمان وابسته به هزینه‌های اجتماعی باشد و فقط یک محاسبه دقیق از پایین به بالا، درکی صحیح از وابستگی به مکان، زمان و فناوری به دست می‌دهد. بنابراین، برای ارزیابی بهتر اثرات شدید محیط‌زیستی، روش مسیر تاثیرگذاری مورد استفاده قرار می‌گیرد و در نهایت اینکه، بسته به ماهیت درخواست سیاسی، متوسط هزینه اجتماعی و یا کل آن می‌تواند پس از آن محاسبه شود.

بوزیسیویک و دیگران[1] (۲۰۰۵)، به ذکر مطالعه صورت‌گرفته در برآورد هزینه خارجی نیروگاه‌های فسیلی کشور روسیه پرداخته‌اند. در پژوهش مذکور به صدمات جبران‌ناپذیر واردشده به سلامتی انسان در محاسبه هزینه خارجی تأکید شده است. در این مطالعه، با استفاده از GIS (نرم‌افزار اطلاعات جغرافیایی)، نیروگاه‌های منطقه مکان‌یابی شده، غلظت و پراکنش آلاینده‌ها در نقاط مختلف کشور مزبور تعیین مقدار شده و سپس با تعیین تراکم جمعیت در نقاط مختلف و از روی‌هم‌گذاری لایه‌های اطلاعاتی، نقشه نهایی با اطلاعات مکانی نیروگاه، تراکم جمعیت و میزان غلظت آلاینده‌ها تعیین گردیده است. در این مقاله، با توجه به مطالعات صورت‌گرفته در آمریکا و اروپا به ارزش‌گذاری مالی صدمات وارده به سلامت انسان، ارزش‌گذاری اثرات مرگ و میر، علائم

1. Bozicevic, et al

و نشانه‌های بیماری پرداخته شده است. نتیجه این مقاله، برآورد هزینه‌های بهداشتی ناشی از آلودگی تحت عنوان هزینه‌های خارجی منفی است.

میراسگدیس و دیگران[1](۲۰۰۰) در مطالعه خود به مقایسه بین هزینه‌های خارجی تولید برق در نیروگاه‌های انرژی نو و فسیلی ایسلند جهت انتخاب بهترین روش تولید انرژی الکتریکی با بالاترین بازده و هزینه خصوصی و خارجی پایین پرداخته‌اند. به این منظور، سه نوع نیروگاه شامل نیروگاه‌های فسیلی، نیروگاه‌های با انرژی تجدیدپذیر محدود (استفاده حداکثر از نیروگاه‌های فسیلی و استفاده محدود از نیروگاه‌های با انرژی تجدیدپذیر) و نیروگاه‌های با انرژی متمرکز (منظور استفاده حداکثر و متمرکز از نیروگاه‌های با انرژی تجدیدپذیر و استفاده محدود از نیروگاه‌های فسیلی) تعریف و هزینه خصوصی و خارجی هر یک برآورد شده است. در این مطالعه، برای محاسبه هزینه‌های خارجی، دو روش مستقیم (هزینه کاهش) و غیرمستقیم (هزینه تخریب)، مثل ارزش‌گذاری آمار حیاتی[2]، ارزش‌گذاری ترجیحی، سال‌های عمر از دست‌رفته[3] و هزینه‌های درمان معرفی شده است. در نمونه مورد مطالعه، هزینه‌های خصوصی با توجه به هزینه‌های تعمیر و نگهداری، هزینه‌های سوخت مصرفی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری محاسبه شده است و هزینه‌های خارجی بر اساس اثرات گرمایش جهانی و هزینه‌های مرگ و میر با روش‌های ارزش‌گذاری آمار حیاتی و سال‌های عمر از دست‌رفته به دست آمده‌اند. با توجه به نتایج حاصل، بالا بودن هزینه خارجی سوخت فسیلی منجر به جاذبه پایین این گزینه گردیده و درمیان سه گزینه، نیروگاه‌های فسیلی و انرژی متمرکز جهت توسعه سیستم برق منطقه ایسلند انتخاب شده‌اند.

صادقی و ترکی (۱۳۸۷) به بررسی هزینه‌های خارجی حاصل از انتشار آلاینده‌های SO_2 و NO_2 در تولید برق نیروگاه شهید رجائی پرداخته‌اند. در این مقاله، برای اندازه‌گیری گازهای آلاینده

1. Mirasgedis, et al
2. Value Statistical Life
3. Years of Life Lost

خروجی از دودکش (SO_2 و NO_2)، از دستگاه سنجش TESTO استفاده شده است. برای محاسبه انتشار آلاینده‌ها از دودکش نیروگاه در محوطه اطراف نیروگاه از نرم‌افزار SCREEN طراحی‌شده بر اساس مدل گوس استفاده گردیده است. برای انجام این کار از اطلاعات هواشناسی (سرعت باد، دمای هوا) و همچنین مشخصات دودکش، سرعت و مقدار گاز خروجی استفاده شده است و بعد از انجام محاسبات، نحوه انتشار و میزان SO_2 و NO_2 در اطراف محوطه نیروگاه برای فواصل ۵۰۰ الی ۵۰۰۰ متری از دودکش در شرایط عادی، حداکثر بار، شرایط بحرانی و کلاس‌های محتمل هوا در چهار فصل سال تعیین شده است. به این ترتیب، حداکثر غلظت آلاینده‌ها محاسبه شده و پس از مقایسه آن با استاندار بین‌المللی هوای آزاد، میزان انحراف به دست می‌آید. مؤلفین در مواردی که میزان حداکثر غلظت آلایندگی در محدوده مجاز، مطابق با استاندارد نبوده است، با محاسبه ارزش ریالی یک واحد گاز SO_2 و NO_2 به تعیین مقدار هزینه خارجی برحسب ریال بر کیلووات‌ساعت پرداخته‌اند.

خوش‌اخلاق و دیگران (۱۳۹۱) در تحقیق خود هزینه خصوصی و هزینه اجتماعی نهایی تولید برق در منطقه اصفهان را برای یک روز مشخص از آذرماه سال ۱۳۸۸ محاسبه نموده اند. تابع هدف در این مدل، هزینه‌های اجتماعی است که با توجه به دو قید محدودیت عرضه انرژی توسط نیروگاه‌ها (محدودیت تولید) و مقدار تقاضای منطقه (محدودیت بار الکتریکی) در هر یک از ساعت‌های شبانه‌روز بهینه شده است. هزینه اجتماعی شامل هزینه خصوصی (هزینه تولید انرژی الکتریکی) و هزینه‌های خارجی است. هزینه خارجی تابعی از هزینه کنترل آلودگی و مقدار آلودگی باقیمانده است و به صورت یک تابع درجه دوم بر حسب توان اکتیو تولیدی تعریف می شود. در محاسبه هزینه خصوصی تولید برق در نیروگاه، تنها هزینه‌های سوخت نیروگاه لحاظ شده است و تابع هزینه خصوصی به صورت یک تابع درجه دو برحسب تولید نیروگاه ارائه شده است. مدل

ارائه شده در این مقاله در راستای مدل EED [1] (مدلی که در آن پخش بار اقتصادی و محیط‌زیستی با هم در نظر گرفته می‌شود)، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی با هدف حداقل‌سازی هزینه اجتماعی ناشی از تولید در نیروگاه‌های منطقه اصفهان است. این مدل به همراه محدودیت‌های آن توسط نرم‌افزار GAMS [2] اجرا می‌شود و در آن هزینه خارجی نهایی تولید در منطقه مورد مطالعه برای سه حالت کم‌باری، بار میانی و پرباری محاسبه شده است.

خداداد کاشی و دیگران (۱۳۹۵) در پژوهش خود به محاسبه هزینه اجتماعی انتشار دی‌اکسیدکربن در استان‌های مختلف ایران بر اساس سه رویکرد مختلف در بازه زمانی ۱۳۹۱-۱۳۸۰ پرداخته‌اند. این سه رویکرد شامل استفاده از شاخص‌های مطالعات بانک جهانی و سازمان حفاظت محیط‌زیست، بررسی میزان تجهیزات و کالاهای زیست‌محیطی مختلف جهت گریز از آثار زیان بار آلودگی و محاسبه میزان تمایل به پرداخت برای گریز از آثار زیان‌بار آلودگی با استفاده از الگوی قیمت هدانیک می‌باشد. در این پژوهش، میزان انتشار دی‌اکسیدکربن در هر استان به روش غیرمستقیم یعنی مشاهده رفتار افراد در مورد آلودگی در بازارهای واقعی اندازه‌گیری می‌شود. نتیجه این تحقیق نشان می‌دهد هزینه اجتماعی هر واحد کربن در استان‌های ایران متفاوت است و این موضوع لزوم اعمال سیاست‌های متفاوت در زمینه کنترل آلودگی و قیمت‌گذاری آلاینده‌ها را نشان می‌دهد.

۳. مبانی نظری

اگر فعالیت اقتصادی افراد یا بنگاه‌ها برای افراد یا بنگاه‌های دیگر ایجاد هزینه یا زحمت کند، گفته می‌شود که تولید و مصرف این کالا همراه با پیامد خارجی غیراقتصادی یا هزینه‌های خارجی می‌باشد. برای مثال، یک نیروگاه همراه تولید برق مقداری گازهای آلاینده را در هوا پخش می‌کند. این آلاینده‌ها

1. Environmental Economic Dispatch
2. General Algebraic Modeling System

که یک تولید جانبی برای نیروگاه به حساب می‌آیند، برای محیط‌زیست زیان‌بار خواهند بود. در این موارد، مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان در بازار، توجهی به هزینه‌های خارجی نکرده و سطح تولید و مصرف را فقط با در نظر گرفتن هزینه‌های داخلی تعیین می‌کنند که عاملی برای نقض کارایی در تولید می‌باشد. بنابراین، به علت وجود پیامدهای خارجی غیراقتصادی در یک بازار رقابتی، سطح تولید کارآمد و متعادل از یکدیگر جدا شده و سیستم بازار، ناتوان از برقراری موقعیت حداکثر کارایی می‌گردد. در نتیجه، برای برقراری و حفظ سطح تولید کارآمد، چاره‌ای جز ایجاد نیرویی خارج از بازار نیست. این نیرو می‌باید سطح تولید کارآمد را ایجاد و با برطرف کردن عوامل عدم تعادل در آن، سطح تولید کارآمد را حفظ کند. در نتیجه، دخالت دولت در چنین بازارهایی برای افزایش کارایی بازار ضرورت می‌یابد. برخی از روش‌های معمول برای اعمال محدویت بر پیامدهای خارجی منفی حاصل از تولید عبارتند از:

- وضع مالیات: دولت برای ایجاد و نگهداری سطح تولید کارآمد می‌باید انگیزه افزایش تولید از سطح تولید کارآمد به سطح تولید متعادل در بازار رقابتی را از بین ببرد. اگر مالیاتی معادل تفاوت قیمت پرداختی مصرف‌کنندگان و هزینه نهایی تولید واحد کالای کارآمد یا حداقل بهای موردنظر عرضه‌کنندگان برقرار شود، دیگر تمایلی از طرف عرضه‌کنندگان در جهت افزایش تولید وجود نخواهد داشت. بنابراین، دولت مالیاتی که برابر هزینه نهایی خارجی است، وضع می‌کند تا تخصیص موثر منابع صورت گیرد.
- تغییر روش تولید: ممکن است بر اساس وضعیت تقاضا، هزینه‌های داخلی و خارجی به گونه‌ای باشند که جمع هزینه‌های داخلی و هزینه نهایی خارجی تولید نخستین واحد کالا، بیشتر از فایده نهایی باشد که به وسیله آن واحد ایجاد می‌گردد. در این صورت، اگر دولت مالیاتی برابر هزینه نهایی خارجی وضع کند، از آنجا که قیمت برای مصرف‌کننده‌ای که بالاترین فایده نهایی را خواهد برد بیشتر از فایده نهایی ایجاد شده است، تقاضا برابر صفر و تولید متوقف می‌شود. قبل از اینکه چنین بنگاه هایی در مورد متوقف کردن تولید تصمیمی اتخاذ کنند، مناسب است

راه‌حل‌هایی را در جهت ادامه فعالیت اقتصـــادی در نظر بگیرند. از جمله این راه‌حل‌ها، تغییر روش تولید در جهت کاهش هزینه خارجی یا کنترل آلودگی محیط در جهت داخلی کردن هزینه‌های خارجی اسـت. از آنجا که بنگاه‌های تولیدی بدون در نظر گرفتن هزینه خارجی در شـرایط حداقل هزینه فعالیت می‌کردند، هر تغییر در روش تولید همراه با افزایش هزینه خواهد بود. به عبارت دیگر، داخلی کردن بخشی یا همه هزینه خارجی، همراه با افزایش هزینه داخلی می‌باشد. اگر منحنی جمع هزینه‌های نهایی داخلی و خارجی پس از تغییر روش تولید، منحنی تقاضـــا را قطع کند، در این صـــورت، تغییر روش تولید، موثر بوده و بنگاه با داخلی کردن هزینه‌های خارجی، در مجموع، هزینه‌های همراه تولید را کاهش می‌دهد. در غیر این صـــورت، عوامل کاهش‌دهنده آلودگی یا هزینه خارجی تاثیر مثبت نخواهند گذاشـــت. بنابراین، اگر داخلی کردن بخشـــی یا همه هزینه خارجی، سطح تولید بیشتری را نسبت به قبل به دنبال داشته باشد، دولت می‌تواند با برقراری نرخ مناســـب مالیاتی، بنگاه‌های تولیدکننده آلودگی را به تغییر روش تولید در جهت کاهش هزینه خارجی وادار سازد.

- تغییر محل فیزیکی بنگاه تولیدی: تغییر محل فیزیکی بنگاه‌های تولیدی به محل‌های کم‌جمعیت‌تر، انتخاب دیگری برای باقی ماندن در صـنعت و ادامه تولید محسـوب می‌شـود. در مواردی، با انتقال بنگاه تولیدی به نقاط کم‌جمعیت‌تر، هزینه خارجی کاهش خواهد یافت در حالی که انتظار می‌رود این عمل همراه با افزایش در هزینه‌های بنگاه تولیدی باشد. افزایش در هزینه‌های داخلی می‌تواند به صـــورت ثابت و مســـتقل از ســـطح تولید بوده یا همراه با هزینه‌ای متغیر، تابع ســـطح تولید باشد. (پژویان، ۱۳۸۴)

مالیات بر کربن نمونه‌ای از تلاش‌های انجام‌شـــده برای اعمال محدودیت در انتشـــار آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از فعالیت نیروگاه‌های برق از طریق وضع مالیات می‌باشد. انتظار می‌رود این رویکرد با افزایش هزینه تولید برق از طریق سوخت‌های فسیلی رونق استفاده از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر را به

دنبال داشته باشد. استفاده از فیلترهای نوین برای جذب آلاینده‌های زیست‌محیطی در دودکش نیروگاه‌ها از جمله تلاش‌هایی است که برای بهبود روش تولید برق به کار گرفته شده است. جابجایی نیروگاه‌ها به دلیل هزینه‌های بالا و ملاحظات فنی در عمل، جز در موارد بسیار نادر، امکان‌پذیر نیست. بنابراین، گرچه استفاده از رویکردهای یاد شده می‌تواند تا حدودی برای بهبود تولید و کنترل و کاهش انتشار آلاینده‌های حاصل از تولید در شبکه‌های موجود برق به کارگرفته شود، اما اثربخشی آنها در مقایسه با اعمال ملاحظات زیست‌محیطی در مرحله برنامه‌ریزی توسعه و صدور مجوزهای احداث برای نیروگاه‌های سازگار با محیط‌زیست بمراتب کمتر است.

برنامه‌ریزی توسعه نیروگاه‌ها[1] یکی از مهم‌ترین بخش‌های برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های قدرت می‌باشد. هدف از این برنامه‌ریزی، یافتن الگوی مناسب برای افزایش ظرفیت نیروگاه‌هاست و خروجی آن نوع، ظرفیت و زمان احداث نیروگاه‌های جدید می‌باشد و معمولا برای یک دوره زمانی بین ۱۰ تا ۳۰ سال انجام می شود. این برنامه‌ریزی در بیان ریاضی خود یک مساله بهینه سازی است. تابع هدف در این مساله، کمینه کردن مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری در دوره زمانی برنامه‌ریزی و مهم‌ترین قیود آن حفظ سطح قابل قبولی از قابلیت اطمینان و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی است.

تعداد زیاد متغیرها، پیچیدگی و غیرخطی بودن روابط و حضور هم‌زمان متغیرهای پیوسته و عدد صحیح، این مساله را در زمره دشوارترین مسائل عملی بهینه‌سازی قرار داده است. تاکنون روش‌های متنوعی برای حل مساله برنامه‌ریزی توسعه تولید مطرح شده است.

در یک نگاه کلی، این روش‌ها به دو دسته کلاسیک مانند استفاده از برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی پویا و روش‌های تجزیه و دسته ابتکاری مانند استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) [2]، الگوریتم جهش قورباغه‌های بهم‌آمیخته (SFL) [3]، جست‌وجوی تابو، شبیه سازی سرد کردن فلزات، الگوریتم برنامه‌ریزی

1. Generation Expansion Planning (GEP)
2. Genetic Algorithm
3. Shuffled Frog Leaping Algorithm

تکاملی، الگوریتم رقابت استعماری، اجتماع ذرات و یا تکامل تفاضلی تقسیم می‌شوند (پیر و دیگران، ۱۳۹۲). تمام این روش‌ها برای حل مساله برنامه‌ریزی توسعه تولید در یک شبکه با ابعاد شبکه‌های واقعی برق با محدودیت مواجه می‌باشند. در نتیجه، از فرضیاتی برای ساده سازی مساله استفاده می‌کنند. یکی از فرضیاتی که به طور گسترده در اکثر مدل‌های برنامه‌ریزی توسعه تولید در نظر گرفته می‌شود، تمرکز تمامی بارها و واحدهای تولیدی بر روی یک گره یا شین است، به این ترتیب، از قیود مرتبط با شبکه برق صرف‌نظر می‌شود. مدلی که بر این اساس استوار است، به مدل برنامه‌ریزی توسعه تولید تک‌گره‌ای[1] موسوم است. نرم‌افزارهای تجاری ازجمله WASP از آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، WIGPLAN از شرکت وستینگهاوس آمریکا و MNI از شرکت برق فرانسه همگی از مدل برنامه‌ریزی توسعه تولید تک‌گره‌ای استفاده می‌کنند. (جدیدالاسلام زیدآبادی و دیگران، ۱۳۹۰)

برای در نظر گرفتن سطح قابل قبول قابلیت اطمینان، روش‌های گوناگونی ارائه شده که سه روش ذیل کاربرد بیشتری پیدا کرده‌اند. (موحد و امینی، ۱۳۸۲)

- ذخیره ثابت: در این روش با توجه به تجربیات کارشناسان، درصد مشخصی از ظرفیت به عنوان ذخیره مورد نیاز سیستم تعیین می‌شود. این ذخیره باید اثر خروج‌های اضطراری و تعمیرات نیروگاه‌ها و یا تاخیرات احتمالی در اجرای طرح‌های احداث نیروگاه‌ها را پوشش دهد. با توجه به روند افزایش سالانه حداکثر بار و با فرض حفظ ذخیره مورد نیاز، ظرفیت نیروگاهی لازم طی دوره مطالعه محاسبه می‌گردد.

- ریسک ثابت: در این روش، یکی از شاخص‌های قابلیت اطمینان به عنوان نمونه، احتمال عدم تأمین بار[2]، انتخاب و برنامه‌ریزی توسعه تولید با فرض حفظ این شاخص در یک محدوده مشخص

1. Nodal Single
2. Loss of Load Probability

انجام می‌پذیرد. در این روش، قابلیت دسترسی[1] واحدهای نیروگاهی تاثیر زیادی بر مقدار افزایش ظرفیت تولید دارد.

- احتساب قیمت خاموشی: برخلاف دو روش قبلی که قابلیت اطمینان به صورت یک قید در نظر گرفته می شد، در این روش، هزینه هر کیلووات ساعت انرژی تامین‌نشده برآورد و در تابع هدف منظور می‌شود.

گرچه در سال‌های اخیر روش‌های ابتکاری در برنامه‌ریزی توسعه تولید توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند، اما کماکان روش‌های کلاسیک بخصوص روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا بیشترین کاربرد را در نرم‌افزارهای مطرح به خود اختصاص داده‌اند. روش برنامه‌ریزی پویا یک روش کارآمد ریاضی برای حل مسائل تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای است که از سال ۱۹۵۰ گسترش یافت و بسته به مسیر حرکت در بین حالات تعریف‌شده به دو نوع پیشرو یا پسرو دسته‌بندی می‌شود. (بلمن و لی[2]، ۱۹۸۴)

در یک مساله تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای، در هر مرحله تصمیماتی اتخاذ می‌شود به نحوی که مجموعه تصمیمات، یک تابع هدف را کمینه (یا بیشینه) نماید. نکته مهم این است که تصمیات هر مرحله بر تصمیمات مراحل بعد تاثیر داشته و تعیین پاسخ بهینه مستلزم در نظر گرفتن تمام مراحل و ارتباطات و وابستگی‌های بین آنهاست. در برنامه‌ریزی توسعه تولید معمولا هر مرحله یک سال در نظر گرفته می‌شود. تصمیمات مرتبط با هر مرحله، انتخاب نوع و ظرفیت نیروگاه‌هایی است که باید در آن سال به شبکه برق اضافه شوند. (سیفی و سپاسیان[3]، ۲۰۱۱)

1. Availability
2. Bellman and Lee
3. Seifi and Sepasian

۴. روش تحقیق

با توجه به اینکه این پژوهش با کمک نرم‌افزار WASP انجام می‌شـــود، در این بخش ابتدا این نرم‌افزار و چگونگی در نظر گرفتن قید آلایندگی زیست‌محیطی در آن و سپس نحوه اجرای نرم‌افزار و استخراج نتایج معرفی می‌شوند.

همان‌گونه که اشاره شد، برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت تولید در عمل یک مساله بهینه سازی است. در نرم‌افزار WASP تابع هدف و قیود این مسـاله بهینه‌سـازی به صـورت روابط (۱) تا (۶) می‌باشـند. (جدیدالاسلام زیدآبادی و دیگران، ۱۳۹۰؛ پیر و دیگران، ۱۳۹۲)

$$Min.C = \sum_{t=1}^{T} [\bar{I}(U_t) + \bar{M}(X_t) + \bar{O}(X_t) - \bar{S}(U_t)] \qquad (۱)$$

I: هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه

M: هزینه‌های ثابت و متغیر (شامل هزینه سوخت مصرفی) بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری

O: هزینه ناشی از خروج اضطراری واحدها (هزینه انرژی تامین‌نشده)

S: ارزش بازیافتی سرمایه‌گذاری‌های انجام‌شده

U_t: بردار افزایش ظرفیت سیستم درمرحله tام

X_t : بردار تجمعی ظرفیت سیستم در مرحله tام شامل همه انواع واحدهای موجود و منتخب

t: مرحله برنامه‌ریزی $t = 1,2,\dots,T$

T: افق برنامه‌ریزی

رابطه (۱) تابع هدف را که کمینه نمودن هزینه (خصوصی) تولید برق است، نشان می‌دهد. هزینه تولید برق شـــامل چهار مولفه هزینه ســـرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های ثابت و متغیر بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری، هزینه انرژی تامین‌نشده و ارزش بازیافتی هزینه‌های سرمایه‌گذاری است.

$$0 \le U_t \le U_{max,t} \quad (۲)$$

$U_{max,t}$: حداکثر ظرفیت ساخت واحدها در مرحله tام برنامه‌ریزی

ممکن است برخی دلایل فنی، اقتصادی و یا اجرایی در هر مرحله برنامه‌ریزی اجازه ساخت بیشتر از یک ظرفیت مشخص از یک نوع واحد را ندهد. این محدودیت با رابطه (۲) در نظر گرفته شده است.

$$(1+R_{\min}) \times D_t \le X_t \le (1+R_{\max}) \times D_t \quad (۳)$$

رابطه (۳) قید حاشیه رزرو سیستم می‌باشد. در این رابطه، X_t کل ظرفیت نصب شده سیستم شامل واحدهای موجود و جدید و D_t پیک تقاضای بار در مرحله t و R_{max} و R_{min} حداکثر و حداقل حاشیه رزرو قابل قبول می‌باشند.

$$M^{j}_{\min} \le \frac{X_{t,j}}{X_t} \le M^{j}_{\max} \quad (۴)$$

M^j_{min}: نرخ ترکیب سوخت کمینه مربوط به واحد نوع jام

M^j_{max}: نرخ ترکیب سوخت بیشینه مربوط به واحد نوع jام

j: نوع واحدها بر حسب نوع سوخت (گازوئیل، گاز طبیعی، زغال‌سنگ، هسته‌ای و ...)

و $j = 1,2, \dots, N$

با استفاده از رابطه (۴) می‌توان با در نظر گرفتن منابع سوخت در دسترس مانند مازوت، گازوئیل، گاز طبیعی، زغال سنگ و یا هسته‌ای ترکیب تولید سیستم را به‌گونه‌ای انتخاب کرد که ریسک وابستگی به یک نوع سوخت کاهش یابد. $X_{t,j}$ در این رابطه مجموع ظرفیت نیروگاه‌هایی است که در مرحله t از سوخت نوع j استفاده می‌کنند.

$$LOLP(X_t) \le \varepsilon \quad (۵)$$

احتمال عدم تامین بار یکی از شاخص‌های مهم و متداول در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم تولید است. بر اساس رابطه (۵)، احتمال عدم تامین بار که تابعی است از مجموع ظرفیت واحدهای موجود و جدید، در مرحله t باید از یک سقف مجاز یعنی ε کمتر باشد.

$$k = 1,2 \quad R_k . W_k \le LIMIT_k \qquad (۶)$$

R_k: میزان آلاینده ایجادشده برحسب کیلوگرم در نیروگاه kام

w_k: ضریب وزنی اهمیت میزان آلودگی نیروگاه kام بسته محل احداث آن

$LIMIT_k$: حد مجاز آلاینده‌ها در طرح kام

رابطه (۶) قید مربوط به انتشار آلاینده‌ها را نشان می‌دهد. در نرم‌افزار WASP امکان در نظرگرفتن همزمان دو نوع آلاینده زیست‌محیطی وجود دارد. در این پژوهش، آلاینده‌ها SO_2 و NO_X در نظر گرفته شده‌اند.

محدودیت‌های قابل اعمال در نرم‌افزار در رابطه با آلاینده‌های زیست‌محیطی که به طور سالانه در نظر گرفته می‌شوند به صورت دسترسی به سوخت، انتشار آلاینده نوع ۱، انتشار آلاینده نوع ۲، انرژی حرارتی مورد استفاده برای تولید الکتریسیته و میزان تولید الکتریسیته تعریف می‌شوند. در نرم‌افزار WASP به دلایل عملی، تعداد تصمیمات ممکن در هر سال به ۵۰۰ و تعداد تصمیمات در کل دوره مطالعه به ۵۰۰۰ محدود شده است. در نتیجه، کاربر باید با اعمال قیودی در خصوص تعداد و نوع نیروگاه‌هایی که در هر سال می‌توانند به شبکه اضافه شوند، تعداد تصمیمات ممکن را به مقادیر فوق محدود کند. پس از معرفی روند رشد حداکثر بار سالانه و منحنی تداوم بار[1] برای کل دوره مطالعه و تعیین مشخصات نیروگاه‌های موجود و نیروگاه‌های نامزد برای حضور در برنامه توسعه، نرم‌افزار طرح توسعه بهینه سیستم تولید را با حداقل نمودن مجموع ارزش حال هزینه‌های

1. Load Duration Curve

سـر مایه گذاری، بهره‌برداری و خاموشـی طی دوره مطالعه تعیین و به همراه پیام هایی گزارش می‌نماید. (علیمیرزا، ۱۳۷۳)

این پیام‌ها نشـان می‌دهند که آیا پاسـخ تحت تاثیر محدودیت‌های اعمال‌شـده بر نوع و تعداد نیروگاه‌هایی که در هر سال می‌توانند به شبکه اضافه شوند، قرار داشته است یا نه. در صورت مثبت بودن پاسخ این سؤال، طرح توسعه پیشنهادی ممکن است بهینه کامل نباشد. در این صورت، کاربر باید با آزادسازی برخی قیود، مطالعه را تا آنجا تکرار کند تا پاسخ متاثر از قیود اعمالی نباشد.

در تحقیق حاضر، این مطالعه در دو حالت اعمال محدودیت روی میزان انتشار آلاینده‌ها و بدون اعمال این محدودیت صورت پذیرفته است.

۵. داده‌ها و فرضیات تحقیق

در این مطالعه که برای یک دوره ۲۲ ساله از سال ۱۳۸۴ الی ۱۴۰۵ انجام شده است، برای تمرکز روی سؤال اصلی تحقیق، برای معرفی بار فقط از یک منحنی تداوم بار برای طول سال و برای معرفی شرایط آب و هوایی فقط از یک شرایط آب و هوایی استفاده شده است.

تکرار مطالعه با استفاده از ظرفیت کامل نرم‌افزار وسپ، یعنی دوازده نوع منحنی تداوم بار و چهار نوع شرایط آب و هوایی بدون دشواری خاصی قابل انجام است. سیستم مورد مطالعه، شبکه سراسری برق ایران است که بنا به ملاحظاتی تغییرات جزیی در آن داده شده است.

مقادیر حداکثر بار برای سال‌های برنامه‌ریزی با استفاده از پیش‌بینی بار انجام شده توسط شرکت توانیر در جدول(۱) ارائه شده است.

جدول ۱. حداکثر بار در هر سال بر حسب مگاوات

سال	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶	۱۳۸۷	۱۳۸۸	۱۳۸۹	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴
حداکثر بار	۳۲۲۱۷	۳۳۸۶۵	۳۶۰۶۹	۳۸۴۲۲	۴۰۹۳۵	۴۳۶۱۹	۴۶۴۸۰	۴۹۵۳۵	۵۲۷۹۹	۵۶۲۸۸	۶۰۰۱۹
سال	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹	۱۴۰۰	۱۴۰۱	۱۴۰۲	۱۴۰۳	۱۴۰۴	۱۴۰۵
حداکثر بار	۶۴۰۰۱	۶۸۲۶۲	۷۲۸۲۲	۷۷۷۰۳	۸۲۹۳۱	۸۸۵۲۱	۹۴۵۱۱	۱۰۰۹۳۱	۱۰۷۸۱۲	۱۱۵۱۹۱	۱۲۳۱۰۴

مأخذ: شرکت توانیر

نیروگاه‌های موجود شامل نیروگاه حرارتی و برق‌آبی هستند. نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای در این مطالعه در نظر گرفته نشده است. سوخت مصرفی نیروگاه‌های حرارتی موجود شامل سه نوع «گازوئیل»، «ترکیب گاز طبیعی و مازوت» و «ترکیب گاز طبیعی و گازوئیل» می‌باشد. مشخصات نیروگاه‌های حرارتی موجود که در این مطالعه به کار گرفته شده‌اند، در جدول (۲) گردآوری شده است.

«در صدآلاینده‌های NO_X و SO_2 حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی» از روی میزان جرم گازهای منتشرشده ناشی از احتراق و مقدار سوخت مصرفی در نیروگاه‌های کشور به تفکیک نوع محاسبه شده است (ترازنامه انرژی وزارت نیرو، **۱۳۹۲**). به این ترتیب، «درصد وزنی انتشار آلاینده SO_2» از سوخت‌های مذکور به ترتیب ۱/۱، ۰/۹۷ و ۰/۱۸ و «درصد وزنی انتشار آلاینده‌های NO_X» از این سوخت‌ها به ترتیب ۲/۳، ۱ و ۱/۲ می‌باشد. ارزش حرارتی سوخت‌های یادشده بر حسب کیلوکالری بر کیلوگرم به ترتیب ۱۰۹۸۶/۰۸، ۱۰۶۴۳/۵ و ۱۰۷۹۳/۵ در نظر گرفته شده است. قیمت انواع سوخت‌های مذکور در این مطالعه ۱۶۲۲ سنت بر میلیون کالری است.

جدول۲. مشخصات نیروگاه‌های حرارتی موجود

نام نیروگاه		تعداد واحدها	ظرفیت هر واحد MW		ارزش حرارتی kcal/kwh			نرخ خروج اضطراری (٪)	تعداد روزهای تعمیر در سال	هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری	
			حداقل	حداکثر	حداقل	متوسط افزایشی				ثابت $/kw-month	متغیر $/Mwh
شهید بهشتی		۲	۶۰	۱۲۰	۲۶۴۹	۲۵۷۵		۸/۵	۴۲	۰/۱۲۹	۲۵/۲۳
اصفهان (اسلام‌آباد)		۵	۸۳	۱۶۶	۲۴۶۵	۱۹۶۴		۱۰/۹	۵۳	۰/۱۲۹	۲۵/۲۴
بندرعباس		۴	۱۶۰	۳۲۰	۱۹۵۹	۱۸۵۲		۲۸	۵۸	۰/۱۲۳	۲۵/۱
تبریز		۲	۲۲۵	۳۵۰	۲۲۳۵	۲۲۷۱		۱۷/۱	۵۹	۰/۱۲۵	۲۵/۱
مشهد		۲	۳۰	۶۰	۳۱۰۰	۲۹۹۱		۱۰/۳	۳۷	۰/۱۲۹	۲۵/۲۴
رامین اهواز		۶	۲۲۰	۳۰۵	۲۱۰۶	۲۰۸۳		۳۱	۵۸	۰/۱۱	۲۵/۲۳
شهید مدحج		۲	۶۰	۱۴۵	۲۴۲۷	۲۳۶۶		۳۰/۸	۴۲	۰/۱۲۹	۲۵/۲۴
چرخه‌ترکیبی گیلان		۳	۲۰۰	۳۸۴	۱۸۵۲	۱۵۸۳		۱۲/۵	۴۳	۰/۰۴	۱۵/۹۶
شهید رجائی تهران		۴	۱۲۵	۲۵۰	۲۳۴۵	۲۱۳۹		۲/۳	۵۰	۰/۱۲۹	۲۵/۲۴
شهید سلیمی		۴	۲۲۰	۴۲۰	۲۳۶۴	۲۲۷۲		۲/۵	۵۹	۰/۱۲۹	۲۵/۲۴
شهید محمد منتظری		۸	۱۴۳	۲۰۰	۲۵۲۷	۲۲۰۸		۹/۸	۵۵	۰/۱۲۶	۲۵/۰۸
شهید منتظر قائم		۴	۸۰	۱۵۰	۲۴۵۰	۲۴۴۴		۷/۹	۴۵	۰/۱۲۹	۲۵/۲۴
بیستون		۲	۱۶۰	۳۲۰	۲۳۵۲	۲۲۱۰		۲/۴	۵۸	۰/۱۲۹	۲۵/۲۴
توس		۴	۹۰	۱۵۰	۲۴۶۰	۲۴۳۷		./۷	۳۹	۰/۱۴۷	۲۵/۰۶
ایرانشهر		۴	۳۵	۶۴	۳۹۷۷	۳۴۶۷		۱۵	۳۷	۰/۱۱۷	۲۵/۳۳
شهید مفتح		۴	۱۲۵	۲۵۰	۲۵۰۸	۲۱۶۵		۱/۴	۵۰	۰/۱۲۹	۲۵/۲۴
سایر بخاری‌ها		۶	۱۶۲	۳۲۵	۲۳۸۹	۲۱۳۷		۱۲/۹	۵۷	۰/۱۱۷	۲۵/۳۳
سایر چرخه‌ترکیبی‌ها		۱۶	۱۵۰	۳۰۰	۲۰۰۰	۱۵۸۳		۱۲/۵	۴۰	۰/۰۲۷	۲۸/۱۶
زنجان		۲	۲۵	۲۵	۴۲۷۷	۴۲۷۷		۳۱/۷	۳۷	۱/۵۸	۲۸/۳۱
سبلان		۱	۸۰	۱۵۹	۳۱۳۹	۱۸۷۵		۱۰/۲	۴۰	۰/۰۲۷	۲۸/۱۶
تجمیع گازی	بزرگ	۲۵	۶۵	۱۲۷	۳۱۳۹	۱۸۷۵		۱۰/۲	۴۰	۰/۳۴	۱۵/۸۷
	متوسط	۱۶	۵۶	۹۸	۳۴۴۰	۱۹۳۵		۱۰/۲	۴۰	۰/۰۲۷	۲۸/۱۶
	کوچک	۷	۰/۱	۶۰/۲	۳۸۳۱	۳۸۳۱		۲۵/۹	۲۳	۰/۰۶۷	۲۷/۶
	خیلی کوچک	۸۹	۰/۱	۱۸	۳۸۳۱	۳۸۳۱		۲۵/۹	۲۳	۰/۰۶۷	۲۷/۶
جمع دیزلی‌ها		۱	۰/۱	۳۸۹	۲۸۶۷	۲۸۶۷		۵	۵	۰/۵۴	۵/۲۷

مأخذ: شرکت توانیر

در جدول (۳) اطلاعات نیروگاه‌های برق‌آبی موجود ارائه شده است. این نیروگاه‌ها دو نوع هستند که شامل تعدادی واحدهای زیرمجموعه خود هستند. علامت منفی در ظرفیت نصب‌شده تعدادی از واحدها به معنای خروج واحد موردنظر از مدار تولیدی شبکه سراسری برق در سال موردنظر است.

جدول۳. مشخصات نیروگاه‌های برق‌آبی موجود

نام واحد	ظرفیت نصب شده MW	انرژی سالانه GWh	سال بهره‌برداری
مسجد سلیمان	۱۰۰۰	۱۴۰۷	۱۳۸۴
شهید عباسپور	۲۰۰۰	۱۴۷۹	۱۳۸۲
دز	۵۲۰	۶۶۰	۱۳۵۰
مسجد سلیمان	۱۰۰۰	۱۴۰۷	۱۳۸۷
کارون ۳	۲۰۰۰	۱۰۸۰	۱۳۸۵
کارون ۴	۱۰۰۰	۸۲۲	۱۳۸۹
گتوند	۱۰۰۰	۱۵۶۲	۱۳۹۱
سیمره	۴۸۰	۳۸۲	۱۳۹۰
رودبار لرستان	۳۸۵	۱۴۰/۳	۱۳۹۱
کرخه	۴۰۰	۴۳۶	۱۳۸۲
مارون	۷۵	۶۵	۱۳۸۳
کوهرنگ	۳۹	۲۵	۱۳۸۴

مأخذ: شرکت توانیر

نیروگاه‌های نامزد برای توسعه شامل هشت نوع نیروگاه حرارتی با مشخصات مندرج در جدول (۴) است. با توجه به هدف مطالعه که تاثیر قید آلایندگی است، نیروگاه‌های برق‌آبی و تلمبه‌ذخیره‌ای به عنوان نامزد توسعه در نظر گرفته نشده‌اند.

سوخت مورد استفاده در نیروگاه‌های نامزد، «هسته‌ای»، «گاز طبیعی» و «زغال‌سنگ» است. ذخیره چرخان مشابه نیروگاه‌های موجود ۱ در صد در نظر گرفته شده است. «در صد وزنی انتشار آلاینده SO_2» از سوخت زغال سنگ ۳ درصد می‌باشد.

سوخت‌های هسته‌ای و گاز طبیعی، SO_2 منتشر نمی‌کنند. «درصد وزنی انتشار آلاینده NO_X» از سوخت‌های نامبرده به ترتیب ناچیز، ۲/۰ و ۰/۹۹ می‌باشد. قیمت سوخت مورد نیاز برای نیروگاه هسته‌ای ۲۰۰ سنت بر میلیون کیلوکالری و برای سایر سوخت های مورد استفاده در نیروگاه‌های نامزد ۱۶۲۲ سنت بر میلیون کیلوکالری می‌باشد.

جدول ۴. مشخصات نیروگاه‌های منتخب

نوع نیروگاه	مدت ساخت سال	عمر نیروگاه سال	ظرفیت (MW)		ارزش حرارتی (kcal/kwh)			نرخ خروج اضطراری (٪)	تعمیرات سالانه (روز)	هزینه احداث ($/kw)	هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری		ارزش حرارتی سوخت (kcal/kg)
			حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	متوسط افزایشی				ثابت $/kw-month	متغیر $/kwh-month	
هسته‌ای	۷	۶۰	۸۰۰	۱۰۰۰	۲۵۲۹	۲۲۷۱		۲/۳	۲۸	۳۳۰۰	۴	۰/۸	۱۵۵×۱۰^۳
ذغال‌سوز	۵	۳۰	۱۵۱	۳۰۲	۲۳۸۹	۲۱۳۷		۴	۴۰	۲۳۵۵/۹	۰/۶۲۵	۲۶/۳۵	۵۹۰۰
گازی پک	۷	۳۰	۱۵۱	۳۰۲	۲۲۶۳	۲۰۳۷		۴	۴۰	۱۹۳۵/۹	۰/۵۲۱	۱۷/۸۴	۱۰۷۵۵
چرخه‌ترکیبی۱	۵	۳۰	۲۳۲	۴۶۴	۲۱۸۳	۱۲۵۷		۲/۵	۲۷	۱۱۷۴/۷	۰/۷۳	۱۲/۴۸	۱۰۷۵۵
چرخه‌ترکیبی۲	۴	۳۰	۳۸۵	۷۷۰	۱۷۴۸	۱۲۱۸		۳/۵	۳۱	۶۷۶/۸	۰/۹۰۴	۱۰/۹	۱۰۷۵۵
گازی دو	۳	۲۵	۰/۱	۱۵۶	۲۵۷۵	۲۵۷۵		۱/۵	۲۴	۵۲۰	۰/۹۳۳	۱۸/۸	۱۰۷۵۵
گازی سه	۳	۲۵	۰/۱	۲۹۶	۲۲۲۸	۲۲۲۸		۲/۵	۲۷	۴۴۷/۴	۱/۱۷	۱۶/۳۶	۱۰۷۵۵

مأخذ: شرکت توانیر

علاوه بر داده‌های یاد شده، این تحقیق بر دو پیش‌فرض اساسی استوار است: اول اینکه، الگوی مصرف و در نتیجه، شکل منحنی تداوم بار در دوره مطالعه تغییر محسوسی نخواهد داشت. گرچه شکل منحنی تداوم بار بر ترکیب بهینه نیروگاه‌ها تاثیر دارد، اما به دلیل در دسترس نبودن برآوردهای قابل‌اتکا از شکل منحنی تداوم بار در سال‌های آتی، ناگزیر از این پیش فرض استفاده شده است.

در صورت وجود چنین برآوردهایی، استفاده از منحنی‌های متفاوت تداوم بار در سال‌های آتی به سهولت ممکن است. پیش‌فرض دوم، ثابت ماندن الگوی آلایندگی نیروگاه‌های نامزد و سوخت مصرفی آنها در سال‌های آتی است. به دلیل روند توسعه فناوری و حساسیت روزافزون نسبت به ملاحظات زیست‌محیطی، احتمال معقولی برای مناسب‌تر شدن این الگوها نسبت به وضع موجود

وجود دارد. در این صـــورت، نتایج این تحقیق که توجیه‌پذیر بودن اعمال محدودیت روی انتشـــار آلاینده‌های زیست‌محیطی حتی با نگاه صرفا اقتصادی است، با قوت بیشتری قابل طرح خواهد بود.

۶. نتایج شبیه‌سازی

بدون در نظر گرفتن محدودیت برای انتشار آلاینده‌های SO_2 و NO_X

برای به دســـت آوردن بهترین طرح توســـعه تولید در حالت عدم اعمال محدودیت روی میزان آلایندگی، برای ســـقف انتشـــار ســـالانه آلاینده‌های SO_2 و NO_X حد بســـیار بالایی در نظر گرفته می‌شـود. برای نیروگاه‌های نامزد، تنها نیروگاه ذغال‌سـنگ‌سـوز در گروه محدودیت انتشـار آلاینده SO_2 (گروه ۲) قرار می‌گیرد. در گروه محدودیت انتشـار آلاینده NO_X (گروه ۳)، تمام نیروگاه‌های منتخب جز نیروگاه هسـته‌ای قرار دارند. نتایج شـبیه‌سـازی در این حالت نشـان می‌دهد ترکیب بهینه توسـعه نیروگاه‌ها فقط متشـکل از نیروگاه‌های چرخه‌ترکیبی (یک واحد نوع یک و ۱۳۱ واحد نوع دو) با ســوخت گاز طبیعی با ظرفیت ۱۴۲۴۹۳ مگاوات اســت. ارزش حال هزینه انباشـته طرح بهینه توسـعه (تابع هدف بهینه‌سـازی) با نرخ تنزیل ۱۰ درصـد، ۱۲۲ میلیارد دلار خواهد بود. این هزینه بر اسـاس رابطه (۱)، برابر با مجموع هزینه احداث واحدهای جدید، هزینه بهره‌برداری و نگهداری تمام واحدهای در مدار و معادل هزینه انرژی تامین‌نشـــده منهای ارزش بازیافتی واحدهای احداث‌شـــده می باشـد. حداکثر احتمال از دسـت رفتن بار کمتر از ۰/۲۶۰ درصـد تقریبا معادل با ۱ روز در سـال خواهد بود. میزان آلاینده‌های خروجی از دودکش نیروگاه‌ها در این حالت در جدول (۵) ارائه شده اسـت. در این جدول، خسـارت زیسـت‌محیطی ناشـی از انتشـار گازهای آلاینده بر اسـاس مطالعات گزارش‌شـده در (مسـائلی و دیگران، ۱۳۸۷)، با احتسـاب خسـارت زیسـت‌محیطی هر کیلوگرم SO_2 برابر ۰/۱۳۱ دلار و هر کیلوگرم NO_X برابر ۰/۲۸ دلار محاسبه شده است.

جدول ۵. میزان آلاینده‌های خروجی از دودکش نیروگاه‌ها و هزینه خسارت زیست‌محیطی آنها در حالت عدم اعمال محدودیت روی انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی

سال	میزان SO_2 برحسب کیلوتن	خسارت زیست‌محیطی SO_2 برحسب دلار	میزان NOx برحسب کیلوتن	خسارت زیست‌محیطی NOx برحسب دلار
۱۳۸۴	۱۳/۵۲	۱۷۷۱۰۹۵	۲۵۷/۸۹	۷۲۲۰۹۴۴۳
۱۳۸۵	۱۱/۰۱	۱۴۴۲۹۱۱	۲۷۲/۴۳	۷۶۲۷۹۲۷۷
۱۳۸۶	۱۳/۱۰	۱۷۱۴۰۳۸	۲۸۱/۵۲	۷۸۸۲۴۶۹۸
۱۳۸۷	۱۴/۴۰	۱۸۸۶۹۳۴	۳۰۱/۰۲	۸۴۲۸۵۹۲۲
۱۳۸۸	۱۳/۵۰	۱۷۶۳۳۳۶	۳۲۰/۴۰	۸۹۷۱۳۱۱۷
۱۳۸۹	۱۵/۱۰	۱۹۸۰۶۸۸	۳۴۲/۳۸	۹۵۸۶۵۵۸۲
۱۳۹۰	۱۵/۴۰	۲۰۲۰۲۸۳	۳۶۵/۰۳	۱۰۲۲۰۹۶۸۲
۱۳۹۱	۱۷/۸۱	۲۳۳۲۹۶۶	۳۹۰/۵۱	۱۰۹۳۴۳۴۲۷
۱۳۹۲	۱۵/۵۰	۲۰۲۹۰۳۶	۴۱۴/۷۸	۱۱۶۱۳۷۰۵۰
۱۳۹۳	۱۵/۶۲	۲۰۴۵۸۱۵	۴۴۲/۶۹	۱۲۳۹۵۲۸۸۱
۱۳۹۴	۱۶/۳۰	۲۱۳۴۱۶۵	۴۷۲/۷۰	۱۳۲۳۵۵۴۶۵
۱۳۹۵	۱۷/۷۰	۲۳۲۳۶۸۰	۵۰۶/۷۹	۱۴۱۹۰۲۴۳۲
۱۳۹۶	۱۷/۲۰	۲۲۵۱۴۷۷	۵۴۰/۳۸	۱۵۱۳۰۷۰۸۶
۱۳۹۷	۱۷/۱۰	۲۲۴۳۳۷۳	۵۷۸/۵۱	۱۶۱۹۸۱۷۹۴
۱۳۹۸	۲۷/۵۰	۳۶۰۷۳۴۷	۶۳۴/۹۳	۱۷۷۷۸۰۷۷۵
۱۳۹۹	۲۵/۹۰	۳۳۹۰۴۶۷	۶۷۶/۹۴	۱۸۹۵۴۳۲۸۶۳
۱۴۰۰	۲۲/۳۰	۲۹۱۹۳۰۶	۷۱۶/۴۹	۲۰۰۶۱۶۲۷۳
۱۴۰۱	۱۶/۰۱	۲۰۹۸۱۲	۷۵۶/۰۷	۲۱۱۶۹۸۵۷۸
۱۴۰۲	۱۲/ ۸۰	۱۶۷۸۲۰۱	۸۰۳/۴۶	۲۲۴۹۶۸۳۱۰
۱۴۰۳	۹/۸۰	۱۲۸۹۴۸۴	۸۵۶/۷۴	۲۳۹۸۸۶۰۳۵
۱۴۰۴	۸/۲۰	۱۰۷۸۲۹۵	۹۱۷/۵۱	۲۵۶۹۰۲۲۵۶/۸۰
۱۴۰۵	۷/۱۰	۹۲۷۰۳۹	۹۸۳/۴۶	۲۷۵۳۶۸۵۸۴

مأخذ: یافته‌های تحقیق

با در نظر گرفتن محدودیت برای انتشار آلاینده‌های SO_2 و NO_X

برای به دست آوردن ترکیب بهینه نیروگاه‌ها در حالت اعمال محدودیت زیست‌محیطی، امکان انتشار SO_2 و NO_X توسط تمام نیروگاه‌های حرارتی موجود در نظر گرفته شده است. از بین نیروگاه‌های نامزد، در گروه محدودیت انتشار آلایندگی SO_2 نیروگاه ذغال سوز و در گروه NO_X ، نیروگاه چرخه‌ترکیبی ۲ قرار می‌گیرند. در ارتباط با نیروگاه های موجود، محدودیت سالانه انتشار آلاینده SO_2 و NOX به‌ترتیب ۱۰۰ و ۶۰۰ هزارتن لحاظ شده است.

نتایج شبیه سازی در این حالت نشان می‌دهد تا سال ۱۴۰۵، ۸۷ نیروگاه چرخه‌ترکیبی ۲ و یک نیروگاه چرخه‌ترکیبی ۱ با سوخت گاز طبیعی در ترکیب بهینه انتخاب و بقیه ظرفیت مورد نیاز از ۳۳ واحد هسته‌ای انتخاب می‌شود. مجموع ظرفیت در حال ساخت در این حالت در افق برنامه‌ریزی برابر ۱۴۱۶۱۳ مگاوات خواهد بود.

ارزش حال هزینه انباشته طرح بهینه توسعه (تابع هدف بهینه‌سازی) با نرخ تنزیل ۱۰ درصد در این حالت برابر ۱۲۳ میلیارد دلار و حداکثر احتمال از دست رفتن بار در این مدت کمتر از ۰/۲۷ درصد، یعنی تقریبا برابر یک روز در سال می‌باشد. بر اساس خروجی این مطالعه، ترکیب بهینه نیروگاه‌ها از سال ۱۳۸۴ تا سال ۱۳۹۹ مشابه ترکیب نیروگاه‌ها در طی این سال‌ها در حالت عدم اعمال قید آلایندگی زیست‌محیطی است، چراکه در این سال‌ها میزان SO_2 و NO_X انتشاریافته از حد مجاز تعیین‌شده کمتر می‌باشد. لازم به ذکر است با توجه به آنکه سوخت بیشتر نیروگاه‌های نامزد گاز طبیعی است و این سوخت اکسید گوگرد منتشر نمی‌کند و تنها نیروگاه نامزد با قابلیت انتشار دهنده آلاینده SO_2 نیروگاه ذغال سوز می‌باشد، میزان انتشار SO_2 بسیار پایین‌تر از حد مجاز تعیین‌شده برای آن یعنی ۱۰۰ هزار تن در سال است. حتی در حالت عدم اعمال شرط آلایندگی، میزان انتشار SO_2 در تمامی سال‌ها کمتر از

۲۸ هزارتن گزارش شده است. لذا در رعایت سقف مجاز انتشار آلاینده‌ها عملا فقط NO_X موثر می‌باشد. در سال ۱۳۹۹ با توجه به آنکه میزان انتشار آلاینده NO_X به حد مجاز آن که ۶۰۰ هزار تن است، نزدیک می‌شود.

ترکیب نیروگاه‌های منتخب در سال ۱۴۰۰ با ترکیب نیروگاه‌ها در حالت عدم اعمال آلایندگی متفاوت است و برای آنکه حد مجاز انتشار آلایندگی رعایت گردد، تعداد نیروگاه‌های چرخه‌ترکیبی به ۷۶ نیروگاه محدود شده است و ۲ نیروگاه هسته‌ای که فاقد آلایندگی هستند، وارد مدار می شوند. در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ میزان انتشار آلاینده NO_X از ۶۰۰ هزار تن بیشتر شده است که در چهار مرحله با جابجایی تولید واحدهای نیروگاه‌های مختلف میزان انتشار آلاینده NO_X در این دو سال به سقف مجاز آن که ۶۰۰ هزارتن است، محدود می‌شود.

مطابق جدول (۷) ، در اولین مرحله در سال ۱۴۰۲ میزان آلاینده NO_X ۶۰۱/۲۳ هزار تن می‌باشد که از حد مجاز تعیین‌شده برای این آلاینده بالاتر است. از آنجا که میزان انتشار آلاینده‌ها متناسب با میزان انرژی خروجی نیروگاه‌هاست، لذا در دومین مرحله، میزان تولید نیروگاه‌های دارای محدودیت انتشار آلاینده NO_X به میزان قابل‌توجهی کاهش و سهم تولید دیگر نیروگاه‌ها افزایش داده می‌شود. به این ترتیب، میزان NO_X حدود ۴۰۹ و میزان SO_2 برابر ۲۷/۵ هزار تن خواهد بود. در این حالت، برای کنترل میزان انتشار آلاینده‌ها، خروجی نیروگاه اصفهان تقریبا GWH ۷۷ کاهش یافته است. کاهش تولید تعداد دیگری از نیروگاه‌ها برای کنترل انتشار آلاینده‌ها برابر است با نیروگاه بندرعباس به میزان ۲۷۶، تبریز برابر ۷۳، رامین اهواز برابر ۲۲۳، شهید مدحج زرگان برابر ۱۵، منتظر قائم برابر ۲۶ و شهید مفتح

همدان برابر ۱۵۱ گیگاوات ساعت. در مرحله سوم، با توجه به آنکه میزان SO_2 انتشاریافته در مرحله دوم افزایش یافته، با تمرکز بر روی میزان، SO_2 ، سهم تولید نیروگاه‌های موثر در انتشار SO_2 کاهش داده می‌شود. در این مرحله، تولید نیروگاه‌های اصفهان، تبریز، شهید مدحج زرگان، شهید مفتح همدان، منتظر قائم و بیستون نسبت به تولید پایه آنها در مرحله اول به ترتیب به میزان ۷۴، ۷۰، ۱۴، ۱۳۲، ۲۶ و ۱۰۱ گیگاوات‌ساعت کاهش داده شده است و برای جبران این کاهش تولید، بنا چار تعدادی از نیروگاه ها، حتی نیروگاه های موثر بر آلایندگی NO_X تولید خود را افزایش داده‌اند.

به عنوان مثال، نیروگاه بندرعباس که در مرحله دوم ۲۷۶ گیگاوات‌ساعت کاهش تولید داشته است، در این مرحله به تولید پایه خود یعنی ۲۸۶/۳ گیگاوات ساعت بازگشته است. در پایان مرحله سوم، میزان انتشار SO_2 و NO_X برابر ۰/۱۱۹۳۶ و ۶۰۰/۹۲ هزار تن می‌باشد که میزان NO_X اندکی از سقف مجاز فراتر رفته است. برای محدود کردن انتشار NO_X به حد مجاز خود و در عین حال پایین نگهداشتن SO_2 منتشرشده، در مرحله چهارم، تمام نیروگاه‌های دارای قید آلایندگی SO_2 و NO_X جز نیروگاه مشهد تولید انرژی خروجی خود را کاهش و بقیه نیروگاه‌ها برای جبران این کاهش، ظرفیت تولیدی خود را نسبت به ظرفیت پایه خود افزایش داده‌اند. در این حالت، میزان انتشار SO_2 و NO_X به ترتیب برابر ۰/۲۵۱۲ و ۶۰۰ هزار تن و در حد مجاز می‌باشد. تحلیل نتایج در سال ۱۴۰۳ نیز مشابه سال ۱۴۰۲ است.

جدول ۶ میزان آلاینده‌های خروجی از دودکش نیروگاه‌ها و هزینه خسارت زیست‌محیطی آنها در حالت اعمال محدودیت انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی

سال مطالعه	میزان SO_2 برحسب تن	خسارت زیست‌محیطی SO_2 برحسب دلار	میزان NO_X برحسب تن	خسارت زیست‌محیطی NO_X برحسب دلار
۱۳۸۴	۱۴۰	۱۸۶۸۸	۲۰۳۳۵۰	۵۶۹۳۶۸۲۱
۱۳۸۵	۸/۴	۱۱۰۴	۲۱۶۵۴۰	۶۰۶۳۰۸۸۱
۱۳۸۶	۱/۴	۱۷۷	۲۱۸۰۲۹	۶۱۰۴۸۰۵۳
۱۳۸۷	۰/۳	۳۷	۲۲۶۵۵۰	۶۳۴۳۳۳۷۳
۱۳۸۸	۰/۲	۲۹	۲۳۴۲۴۰	۶۵۵۸۷۷۳۵
۱۳۸۹	۰/۴	۵۰	۲۵۰۴۴۰	۷۰۱۲۴۵۳۳
۱۳۹۰	۰/۷	۸۸	۲۷۴۰۷۰	۷۶۷۳۹۵۵۰
۱۳۹۱	۱/۵	۱۹۵	۲۹۸۷۹۰	۸۳۶۶۱۸۶۱
۱۳۹۲	۴	۵۲۸	۳۲۸۸۲۰	۹۲۰۷۰۷۴۰
۱۳۹۳	۲۱	۲۷۲۹	۳۶۰۰۰۵	۱۰۰۸۰۱۴۷۰
۱۳۹۴	۵۵	۷۱۸۰	۳۹۱۴۵۰	۱۰۹۶۰۶۴۵۶
۱۳۹۵	۱۵۰	۲۰۲۱۱	۴۲۳۲۴۰	۱۱۸۵۰۸۱۸۸
۱۳۹۶	۲۳۰	۲۹۷۸۵	۴۶۰۴۰۰	۱۲۸۹۱۲۱۲۶
۱۳۹۷	۴۱۰	۵۳۷۲۳	۴۹۷۳۹۰	۱۳۹۲۷۰۶۳۱
۱۳۹۸	۴۶۸	۱۹۲۳۱۳	۵۱۴۰۰۵	۱۴۳۹۲۱۲۶۶
۱۳۹۹	۱۷۸۰	۲۳۳۵۲۲	۵۵۷۲۳۰	۱۵۶۰۵۳۱۳۹
۱۴۰۰	۱۳۷۰	۱۷۹۴۶۵	۵۹۵۴۴۰	۱۶۶۷۲۳۴۴۱
۱۴۰۱	۱۲۵۰	۱۶۳۴۷۶	۵۹۶۷۱۰	۱۶۷۰۷۶۵۶۸
۱۴۰۲	۲۵۰	۳۲۹۰۷	۶۰۰۰۰۰	۱۶۸۰۰۰۰۰۰
۱۴۰۳	۲۲۰	۲۸۷۰۹	۶۰۰۰۰۰	۱۶۸۰۰۰۰۰۰
۱۴۰۴	۹۶۰	۱۲۵۴۴۳	۵۹۲۰۶۸	۱۶۵۷۷۹۰۵۴
۱۴۰۵	۹۰۱	۱۱۸۰۸۳	۵۹۷۵۰۴	۱۶۷۳۰۱۲۸۲

مأخذ: یافته‌های تحقیق

جدول ۷. تولید نیروگاه‌ها در سال ۱۴۰۲ برای رساندن میزان آلایندگی به حد مجاز در مراحل چهارگانه

تولید بر حسب گیگاوات‌ساعت

نیروگاه	مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	مرحله ۴
شهید بهشتی لوشان	۲۱/۶۰	۱۷۰۲/۳۷	۳۷/۵۰	۴۵/۵
اسلام‌آباد اصفهان	۸۵/۶۰	۸/۴۰	۱۱/۳۰	۱۱/۳
بندرعباس	۲۸۶/۳۰	۱۰/۶۰	۲۸۶/۳۰	۲۸۴/۹
تبریز	۷۹/۶۰	۶/۸۰	۹/۳۰	۹/۲۸
مشهد	۲/۳۰	۰/۸۴	۷/۸۰	۷/۷۷
رامین اهواز	۲۵۳/۵۰	۳۰/۸۰	۲۵۳/۵۰	۲۵۲/۴
شهید مدحج زرگان	۱۵/۹۰	۱/۰۸	۲/۱۳	۲/۱۲
زنجان	۰/۲۵	۲۶۸/۸۰	۱/۵۰	۲/۸
شهید رجائی تهران	۲۵۷/۵۰	۷۳۸۶/۲۰	۲۷۵/۰۰	۳۰۹/۲
شهید سلیمی نکا	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
شهید محمد منتظری	۱۴۷/۹۰	۸۰۵۳/۱۰	۱۵/۳۰	۵۴
منتظر قائم	۲۸/۸۰	۲/۵۰	۲/۳۰	۲/۳۰
بیستون	۱۱۶/۹۰	۴۶۰۲/۳۰	۱۶/۰۴	۳۸/۱۰
توس	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
ایرانشهر	۴/۱۰	۱۷۱۳/۰۰	۱۴/۹۰	۲۳/۱۰
شهید مفتح همدان	۱۶۷/۴۰	۱۶/۱۰	۲۰۰/۰۴	۱۹۹/۲۰
چرخه‌ترکیبی گیلان	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
سایر چرخه‌ترکیبی‌ها	۱۱۲۰۹/۹۰	۴۵۰۴۵/۰۰	۱۱۲۰۹/۹۰	۱۱۳۷۲/۹۰
سایر بخاری‌ها	۳۷۱/۷۰	۱۲۵۵۴/۹۰	۳۹۹/۶۰	۴۵۸/۲۰
اتمی بوشهر	۷۴۱۰/۰۰	۷۴۱۰/۰۰	۷۴۱۰/۰۰	۷۴۱۰/۰۰
سیلان	۱۲۶/۶۷	۱۳۳۶۴/۲۰	۲۴۶/۳۰	۳۰۹/۴۰
گازی بزرگ	۲۳۳۹/۷۱	۳۹۱۴۰/۵۰	۲۳۳۹/۷۰	۲۵۱۷/۰۰
گازی متوسط	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
گازی کوچک	۱/۶۰	۱۴۶۴/۶۰	۸/۵۰	۱۵/۵۰
گازی خیلی کوچک	۱۰/۲۸	۶۱۳۰/۸۰	۴۴/۱۰	۷۳/۴۰
اتمی جدید	۱۱۰۶۲۷/۷۰	۱۱۰۶۲۷/۷۰	۱۱۰۶۲۷/۷۰	۱۱۰۶۲۷/۷۰
چرخه‌ترکیبی۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
چرخه‌ترکیبی۲	۴۲۹۶۴۷/۷۰	۲۷۰۴۱۰/۷۰	۴۲۹۶۴۷/۷۰	۴۲۸۸۸۰/۶۰
زغال‌سوز	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
گازی یک	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
گازی دو	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
گازی سه	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
جمع دیزلی‌ها	۵۵۶/۵۸	۳۱۹۲/۹۰	۵۵۶/۵۸	۵۶۹/۳۰
میزان SO_2 منتشرشده (هزارتن)	۱/۰۱	۲۷/۵۰	۰/۱۲	۰/۲۵
میزان NO_x منتشرشده (هزارتن)	۶۰۱/۲۳	۴۰۹/۰۴	۶۰۰/۹۲	۶۰۰/۰۰

مأخذ: یافته‌های تحقیق

مقایسه نتایج محاسبات در دو وضعیت اعمال و عدم اعمال محدودیت آلایندگی

جدول (۸) خلاصه نتایج محاسبات ارائه‌شده در بخش‌های قبل را نشان می‌دهد. این نتایج شامل میزان آلاینده‌های انتشاریافته از نیروگاه‌ها، هزینه خصوصی، هزینه خارجی و هزینه اجتماعی فرایند توسعه ظرفیت تولید در افق برنامه‌ریزی می‌باشد. هزینه خصوصی مستقیما از طریق نرم‌افزار WASP و هزینه خارجی با استفاده از میزان جرم آلاینده‌های SO_2 و NO_X منتشرشده و شاخص ارائه‌شده در مرجع ۷ محاسبه می‌شوند.

هزینه اجتماعی مجموع دو مولفه هزینه خصوصی و هزینه خارجی می‌باشد. از اطلاعات ارائه‌شده در جدول (۸) می‌توان نتایج ذیل را به دست آورد:

هزینه مستقیم (خصوصی) توسعه ظرفیت تولید نیروگاه‌ها در ۲۲ سال در حالت بدون در نظر گرفتن محدودیت های زیست‌محیطی تقریبا ۱۲۲ میلیارد و ۵۷۰ میلیون دلار و با در نظر گرفتن محدودیت های زیست‌محیطی تقریبا ۱۲۳ میلیارد و ۳۸۲ میلیون دلار برآورد می‌شود. به بیان دیگر، در اثر اعمال قید آلایندگی SO_2 و NO_X، هزینه توسعه تولید تقریبا ۸۱۲ میلیون دلار افزایش یافته است.

هزینه خارجی حاصل از خسارت زیست‌محیطی در حالت عدم اعمال محدودیت آلایندگی تقریبا ۳ میلیارد و ۳۵۸ میلیون دلار و در حالت در نظر گرفتن محدودیت زیست‌محیطی آلاینده‌ها ۲ میلیارد و ۵۳۱ میلیون دلار است. به بیان دیگر، اعمال قید آلایندگی SO_2 و NO_X کاهش تقریبا ۸۳۰ میلیون دلاری هزینه های خارجی ناشی از توسعه ظرفیت تولید را به دنبال دارد.

با اعمال محدودیت روی انتشار آلاینده های زیست محیطی، در مجموع، هزینه اجتماعی انتشار آلاینده‌های SO_2 و NO_X در مقایسه با حالت بدون در نظر گرفتن محدودیت تقریبا ۱۵ میلیون دلار کاهش یافته و انتشار آلاینده‌های SO_2 و NO_X نیز معادل ۳۱۳۰ هزارتن کمتر شده است.

جدول ۸ میزان آلاینده‌ها و هزینه‌های خصوصی، خارجی و اجتماعی توسعه تولید در دو حالت محدودیت و عدم محدودیت آلاینده‌ها

شرایط آلایندگی	میزان آلاینده‌ها (kton)	هزینه خصوصی توسعه تولید ($)	هزینه خارجی توسعه تولید ($)	هزینه اجتماعی توسعه تولید ($)
بدون در نظر گرفتن محدودیت انتشار آلاینده‌ها	۱۲،۱۷۵/۵۸	۱۲۲،۵۷۰،۷۶۰،۰۰۰	۳،۳۵۸،۰۶۰،۰۲۴	۱/۲۵۹۳×۱۰^۱۱
با در نظر گرفتن محدودیت انتشار آلاینده‌ها	۹،۰۴۵/۶۱	۱۲۳،۳۸۲،۶۱۶،۰۰۰	۲،۵۳۱،۳۹۵،۶۰۸	۱/۲۵۹۱×۱۰^۱۱

مأخذ: یافته‌های تحقیق

۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پس از مقدمه‌ای در ارتباط با اهمیت در نظر گرفتن محدودیت های انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی در برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت تولید و همچنین مبانی نظری و پیشینه داخلی و خارجی مرتبط با موضوع، به روش مورد استفاده در این تحقیق و معرفی نرم‌افزار WASP و چگونگی در نظر گرفتن قید آلایندگی زیست‌محیطی در این برنامه پرداخته شده است. سپس با ارائه مشخصات شبکه مورد استفاده، طرح توسعه تولید ظرفیت نیروگاه‌ها برای شبکه‌ای بسیار نزدیک به شبکه سراسری برق ایران در دو حالت اعمال محدودیت برای انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی و بدون اعمال این محدودیت‌ها با کمک نرم‌افزار WASP بررسی شد.

با توجه به توضیحات درج‌شده در بخش مبانی نظری و تجربیات عملی در سیستم‌های قدرت، روش‌های معمول برای اعمال محدودیت بر انتشار آلاینده‌های حاصل از تولید توان در نیروگاه‌ها مانند وضع مالیات یا تغییر روش تولید و یا جابجایی در محل، در مقایسه با انتخاب مناسب نوع نیروگاه‌ها در فرایند برنامه‌ریزی توسعه تولید، از اثربخشی کمتری برخوردار می‌باشند. آنچه سیاست‌گذاران را برای اعمال محدودیت در مرحله برنامه‌ریزی با تردید مواجه می‌سازد، تفاوت قابل‌توجه هزینه اولیه احداث نیروگاه‌های مورد نیاز در صورت اعمال این محدودیت‌هاست. نتایج

این تحقیق به طور کمی و روشـن نشـان می‌دهد که اعمال محدودیت در میزان انتشـار آلاینده‌ها اگر چه هزینه‌های توسعه ظرفیت تولید را افزایش می‌دهد، اما موجب کاهش خسارت آلاینده‌ها بر محیط پیرامونی می‌گردد به طوری که در مجموع هزینه‌های اجتماعی تولید برق کاهش می‌یابد. بنابراین، سـیاسـت‌گذاران می‌توانند با اطمینان بیشـتر و حتی با نگاه صـرفا اقتصـادی نیروگاه‌های دوسـت‌دار محیط‌زیست را در مرحله برنامه‌ریزی انتخاب نمایند.

لازم به تاکید است که در این تحقیق، خسارت زیست‌محیطی آلاینده‌ها بر اساس شاخص‌هایی محاسبه شده است که تنها تاثیرات منفی انتشار آلاینده‌ها بر سلامتی انسان‌ها را در نظر می‌گیرند. در صورت احتساب دیگر پیامدهای منفی ناشی از انتشار آلاینده‌ها در فرایند تولید برق، مزیت اعمال محدودیت در میزان انتشـــار آلاینده‌ها در فرایند برنامه‌ریزی توســـعه ظرفیت تولید نمایان‌تر خواهد شد.

بر اساس نتایج این تحقیق، توصیه می‌شود برنامه‌ریزان صنعت برق ضمن توجه جدی به خسارات زیسـت‌محیطی تولید برق در نیروگاه‌های فسـیلی، هزینه این خسـارات را در مطالعات فنی اقتصـادی خود منظور و به این ترتیب، در انتخاب ســـبد تولید برق کشـــور برای منافع دراز مدت اولویت قائل شوند.

منابع

استادزاد، علی‌حسین (۱۳۹۲)، "پیش‌بینی بلندمدت سهم بهینه انرژی‌های تجدیدپذیر از کل انرژی در قالب یک الگوی رشد پایدار: مورد ایران (۱۳۸۷-۱۴۲۰)" ، *فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی*، سال ۱، شماره ۱، صص ۲۸-۵.

پیر، عبدالرضا؛ گیتی‌زاده، محسن و مصطفی میرزاده (۱۳۹۲)، "برنامه‌ریزی بهینه توسعه تولید در سیستم قدرت با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم رقابت استعماری" ، *کنگره ملی مهندسی برق، کامپیوتر و فناوری اطلاعات*، مشهد، موسسه آموزش عالی خیام.

پژویان، جمشید (۱۳۸۴)، *اقتصاد بخش عمومی (هزینه‌های دولت)*، تهران: انتشارات جنگل، چاپ ۷.

ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۲، وزارت نیرو، معاونت امور انرژی.

تقی‌پور رضوان، علیرضا (۱۳۸۵)، "برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت تولید برق با استفاده از روش‌های ابتکاری"، *اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی*، تهران، موسسه پژوهش در مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی، دانشکده فنی دانشگاه تهران.

جدیدالاسلام زیدآبادی، مرتضی؛ بی‌جامی، احسان و اکبر ابراهیمی (۱۳۹۰)، "برنامه‌ریزی توسعه تولید با ارائه الگوریتم پیشنهادی SFL اصلاح‌شده "، *سیستم‌های هوشمند در مهندسی برق*، سال ۲، شماره ۱.

حسینی، سیده زهرا (۱۳۹۴)، "برر سی تاثیر آلاینده‌های زیست‌محیطی بر برنامه توسعه تولید با کمک نرم‌افزار WASP" ، *پایان‌نامه کارشناسی مهندسی برق*، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی.

خداداد کاشی، فرهاد؛ اکابری تفتی، مهدی؛ موسوی جهرمی، یگانه و علی‌اکبر خسروی‌نژاد (۱۳۹۵)، "محاسبه هزینه اجتماعی انتشار دی‌اکسید کربن به تفکیک استان‌های مختلف در ایران" ، *فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی*، سال ۲ ، شماره ۲، صص ۱۱۰-۷۷.

خوش‌اخلاق، رحمان؛ شریفی، علیمراد و حامد پاروند (۱۳۹۱)، " ارائه الگویی جهت محاسبه هزینه اجتماعی نهایی کوتاه‌مدت تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی، مطالعه موردی نیروگاه‌های شهید محمد منتظری و اسلام‌آباد اصفهان " ، *فصلنامه تحقیقات مدلسازی اقتصادی*، شماره ۱۰.

رحیمی، نسترن؛ کارگری، نرگس؛ صمدیار، حسن و محمد نیکخواه منفرد (۱۳۹۳)، " تعیین هزینه‌های اجتماعی (خارجی) انتشار SO_2، NO_X و CO_2 در بخش انرژی کشور (نیرو گاه ها) "، *علوم و تکنولوژی محیط‌زیست*، دوره ۱۶، شماره ۳.

صادقی، سید کمال؛ سجودی، سکینه و فهیمه احمدزاده دلجوان (۱۳۹۶)، " تاثیر انرژی‌های تجدیدپذیر بر رشد اقتصادی و کیفیت محیطزیست در ایران" ، *فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی*، سال ۳، شماره ۶، صص ۲۰۲-۱۷۱.

صادقی، مهدی، و مع صومه ترکی (۱۳۸۷)، " بررسی هزینه‌های خارجی تولید برق در ایران (مطالعه موردی: نیروگاه برق شهید رجائی با تأکید بر آلاینده‌های SO_2 و NO_2)"، *مقاله مرتبط با اقتصاد محیطزیست.*

عفت‌نژاد، ر ضا و اکرم زارع برگ‌آبادی (۱۳۹۲)، " برنامه‌ریزی بهینه برق با محدودیت‌های زی ستمحیطی با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی"، *فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی*، سال ۱، شماره ۳، صص ۱۱۲-۹۷.

علیمیرزا، سهراب (۱۳۷۳)، " توسعه سیستم تولید برق بر اساس بررسی نیروگاه‌های موجود و طبق طرح کشور"، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعت آب و برق.

مسائلی، مریم؛ جوادیان، سید علی‌محمد و محمودرضا حقی‌فام (۱۳۸۷)، " ارزیابی منافع زیست‌محیطی منابع تولید پراکنده و مقایسه هزینه تولید آنها با نیروگاه‌های حرارتی با در نظر گرفتن تاثیر آلودگی تولیدی بر سلامتی انسان" ، *بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق.*

موحد، محسن و فرخ امینی (۱۳۸۲)، "برر سی اثر قیمت خامو شی بر تو سعه بهینه سیستم تولید برق کشور"، *هجدهمین کنفرانس بین‌المللی برق.*

مهرآرا، مح سن؛ ر ضائی برگ شادی، صادق و سهیلا حامدی (۱۳۹۵)، " تاثیر مصرف انرژی بر رشد اقتصادی ایران؛ رهیافت بیزی"، *فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی*، سال ۲، شماره ۳، صص ۱۰۱-۶۱.

Bellman, R. and E. Lee (1984), "History and Development of Dynamic Programming", *IEEE Magazine on Control System*, Vol.4, Issue 4.

Bickel, Peter and Rainer Friedrich (2005), "ExternE-Extrnalities of Energy, Methodology 2005 Update", *European Commission*.

Bozicevic, Maja; Tomsic, Zeljko and Nenad Debrecin (2005), "External Cost of Electricity Generation: Case Study Croatia", *Energy policy*, Vol. 33, pp.1385-1395.

International Atomic Energy Agency (2000), "Wien Automatic System Planning (WASP) Package", *A Computer Code for Power Generating System Expansion Planning Version WASP-IV, User's Manual*, VIENNA 2000.

Mirasgedis, S; Diakouiaki, D; Papagianakis, L. and A. Zervos (2000), "Impact of Social Costing on the Competitiveness of Renewable Energies: the Case of Crete", *Energy Policy*, Vol.28, pp.67-73.

Seifi, Hossein and Mohammad Sadegh Sepasian (2011), "Electric Power System Planning Issues, Algorithms and Solutions", Springer.