مجله علمی پژوهشی «علوم و فناوری‌های پدافند نوین»
سال ششم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۴؛ ص ۸۶-۷۱

ارزیابی اثرات منابع انرژی تجدیدپذیر در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه تولید از دیدگاه پدافند غیرعامل و رفاه اجتماعی

هادی صادقی[۱]، امیر عبدالهی[۲*]، محسن محمدیان[۲]، مسعود رشیدی‌نژاد[۳]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- استاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت: ۹۲/۰۵/۱۴، پذیرش: ۹۳/۰۲/۰۹)

چکیده

صنعت برق به عنوان یک صنعت زیربنایی و مادر، نقش مهمی در توسعه اقتصادی و رفاه اجتماعی دارد. در این راستا، پیوستگی در عرضه تقاضا، اطمینان در ارائه خدمات، پایین نگه‌داشتن قیمت انرژی، دست‌یابی به استانداردهای کیفی، کاهش خطرات زیست‌محیطی و حفظ موقعیت استراتژیک سامانه‌های قدرت، مستلزم برنامه‌ریزی‌های مدونی است که باید توسط مسئولان انجام گیرد. در مقاله پیش‌رو، با تکیه بر مفهوم تابع رفاه اجتماعی برگسون- ساموئلسون، اثر منابع انرژی تجدیدپذیر تحت اجرای سیاست‌های تشویقی در برنامه‌ریزی توسعه تولید، از دیدگاه‌های مختلفی چون مسائل زیست‌محیطی، پدافند غیرعامل و در نهایت رفاه سرمایه‌گذار و مصرف‌کنندگان انرژی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور ابتدا با در نظر داشتن اثر یکی از رایج‌ترین سیاست‌های تشویقی تحت عنوان سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد، یک مدل جامع برای برنامه‌ریزی توسعه تولید ارائه می‌گردد؛ سپس با توجه به نتایج به‌دست آمده از حل مدل مزبور توسط الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی گرانشی، به بررسی دیدگاه‌های مطروحه پرداخته می‌شود. نتایج حاصله حاکی از مثمر ثمربودن سیاست مورد نظر در ارتقاء سطح رفاه و امنیت،از طریق محدودنمودن میزان آلاینده‌های انتشاریافته در بخش تولید و افزایش سرمایه‌گذاری بر روی واحدهای تجدیدپذیر و دستیابی به پراکندگی و تنوع تولید است.

کلید واژه‌ها: برنامه‌ریزی توسعه، منابع تجدیدپذیر، مسائل زیست‌محیطی، پدافند غیرعامل.

Evaluating the Effects of Renewable Energy Resources from Passive Defence and Social Welfare perspectives in the Context of Expansion Planning

H. Sadeghi, A. Abdollahi[*], M. Mohammadian, M. Rashidinejad

Shahid Bahonar University of Kerman

(Received: 05/08/2013; Accepted: 29/04/2014)

Abstract

Power industry, as an infrastructure industry, plays a critical role in economic progress and social welfare. In this context, continuous load meeting, reliable service, to keep low energy price, achieving the quality standards, environmental protection and preservation of strategic position of power systems are contingent upon the precise planning which should be considered by corresponding responsible. In this paper, the role of renewable energy sources under implementation of incentive policies in generation expansion planning is evaluated from various perspectives: among them, environmental issues, passive defence, the surplus of the consumers and producers in energy production. These perspectives are modeled on the Bergson-Samuelson social welfare function. In this context, first, one of the most popular incentive policies, i.e. emission trading system, a comprehensive model is proposed for the generation expansion planning problem; then, regarding the obtained results from applying the gravitational search algorithm to the model, aforementioned perspectives are exposed to discussion. Analysis of the findings show the effectiveness of the simulated policy in improving the social welfare and energy security via emission reduction and promotion of renewable-based units and accessibility to the distributed resources.

Keywords: Expansion Planning, Renewable Energy Resources, Social Welfare, Passive Defence.

[*]Corresponding Author E-mail: a.abdollahi@uk.ac.ir

۱. مقدمه

با توجه به شرایط امروزی کشور و صنایع، بدون شک می‌توان از صنعت برق به عنوان مهم‌ترین صنعت کشور یاد نمود. اهمیت این صنعت، از وابستگی کلیه صنایع کشاورزی، نظامی و سایر بخش‌های کشور به آن قابل مشاهده بوده و خسارتی که عدم تأمین برق برای مصرف‌کنندگان ایجاد می‌کند، با بخش‌های دیگر قابل مقایسه نیست. ازاین‌رو، سامانه‌های قدرت هر کشور به عنوان یکی از پایه‌های توسعه اقتصادی و مهم‌ترین عامل حیات صنایع شناخته شده می‌باشند. تداوم و پایداری آن‌ها خود در گرو برنامه‌ریزی‌های هدفمندی است که مطالعات برنامه‌ریزی سامانه‌های قدرت نامیده می‌شود.

برنامه‌ریزی سامانه‌های قدرت می‌تواند علاوه بر نقش مؤثر و تعیین کننده اقتصادی، اثرات قابل توجهی در ارتقاء سطح امنیت و رفاه اجتماعی را در حفظ اقتدار و شایستگی ملی به دنبال داشته باشد. ازاین‌رو برنامه‌ریزی توسعه سامانه‌های قدرت یکی از مسائل مهم و استراتژیک در هر کشور است که باید در راستای راهبردهای کلان برنامه‌ریزی اقتصادی ملی و سیاست‌های انرژی انجام شود [۱]؛ به طوری که آثار و تبعات اقتصادی و اجتماعی ناشی از قطع برق در اثر بروز بحران‌های نظامی و یا بلایای طبیعی، می‌تواند زیان قابل توجهی برای شرکت‌های برق، مصرف‌کنندگان، و به طور کلی جامعه و کشور، به همراه داشته باشد. بنابراین لزوم برنامه‌ریزی دقیق سامانه‌های قدرت برای تأمین مطمئن و بهینه تقاضای روزافزون مصرف‌کنندگان، هر چه بیشتر احساس می‌گردد. تجربه‌های جهانی و پژوهش‌های به انجام رسیده نشان می‌دهد که با اعمال برنامه‌ریزی دقیق و سیاست گذاری‌های حساب شده، می‌توان از بروز نابسامانی و اختلال در سامانه‌های قدرت و تأمین توان مورد تقاضا پیشگیری کرد [۲]. با توجه به آنچه که در بالا به آن اشاره شد، می‌توان تدوین طرح‌های مختلف سرمایه‌گذاری در راستای انجام برنامه‌ریزی‌های بهینه را، به موازات تحولات روز صنعت برق، در زمره فعالیت‌های دانست که مسئولان در راستای تحقق مواردی چون، حفظ پیوستگی در عرضه تقاضا، ایجاد قابلیت اعتماد کافی برای مصرف‌کنندگان، دستیابی به سطح کیفی قابل قبول، پایین نگه‌داشتن قیمت انرژی، و مهم‌تر از همه، توجه به مسائل زیست‌محیطی و نظامی کشور، لازم است در دستور کار آتی خود قرار دهند؛ تمامی موارد مذکور در سایه کلیتی با عنوان رفاه اجتماعی جای می‌گیرند که در این مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

از منظر استراتژیک و نظامی، با توجه به توسعه روزافزون کشورها، وقوع حوادث و بلایای طبیعی، جنگ و حمله نظامی کشورهای مهاجم و غیره، می‌توان گفت که بهره‌برداری و استفاده صحیح و بهینه از انرژی الکتریکی در گرو تدوین تمهیدات و برنامه‌ریزی‌های مؤثر و کارآمد در به‌کارگیری فناوری‌های موجود و جدید مرتبط با تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی است. عملیات سایبری، روانی، تهاجم سخت، نفوذ و خرابکاری، جزء مهم‌ترین تهدیدات حوزه صنعت برق در جنگ بشمار می‌رود. با توجه به شرایط کنونی و وضع موجود، گرایش دشمنان جمهوری اسلامی ایران به جنگ نیمه‌سخت بوده و از این حیث یکی از مهم‌ترین اصول مقابله با تهدیدات، ارائه روش‌ها و مدل‌های جامع و بهینه در برنامه‌ریزی، طراحی و توسعه، با در نظر گرفتن حتی‌الامکان اصول پدافند غیرعامل است [۳]. از جمله اصولی که می‌توان در این راستا، در برنامه‌ریزی توسعه در نظر گرفت بحث پراکندگی منابع تولید و گسترش جغرافیایی آن‌ها، ابعاد فیزیکی کم و نیز کاهش وابستگی انرژی برق به منابع سوخت‌های فسیلی در تأمین توان الکتریکی است که در بخش‌های بعدی به آن‌ها پرداخته خواهد شد.

از دیگر مسائل حائز اهمیت مرتبط با صنعت برق، بحث آلودگی‌های زیست‌محیطی و تغییرات شرایط آب‌وهوایی است که اثر مستقیم بر رفاه و سلامت جامعه دارد. بنابراین با در نظر داشتن سهم بخش تولید در انتشار آلاینده‌های گازی از جمله گاز CO_2، در مقایسه با دیگر منابع آلوده‌کننده محیط‌زیست، لازم است بیش از پیش این موضوع از سوی مسئولان در بخش تولید مورد توجه قرار گیرد.

علی‌رغم اهمیت استراتژیک سامانه‌های قدرت، تاکنون مطالعات جامعی در راستای شفاف‌سازی دیدگاه‌های نظامی و اجتماعی در برنامه ریزی‌های توسعه صورت نگرفته است که از این‌رو در مطالعه حاضر سعی بر آشکارسازی هر چه بیشتر این موضوع خواهد شد. اما برنامه ریزی توسعه تولید با اهداف مختلف، با و بدون در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی و محدودیت انتشار، تاکنون در پژوهش‌های متعدد بررسی شده است؛ در این راستا، برنامه‌ریزی توسعه تولید در یک افق بلندمدت با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر [۴]، ارزیابی رفتار تولیدکنندگان مستقل برق در تأمین بار شبکه، در دوره‌های مختلف پر باری یا ساعات تراکم، کم باری و بار پایه، در برابر نهادهای دولتی و مسئول در برابر تأمین تقاضا [۵]، برنامه‌ریزی توسعه با در نظر گرفتن هم‌زمان شاخص‌های قابلیت اطمینان، رفاه اجتماعی و نرخ ترکیب سوخت [۶ و ۷]، و محدودیت‌های زیست‌محیطی در کنار افزایش نگرانی‌های ناشی از آن در برابر آلاینده‌های انتشار یافته توسط بخش تولید در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه [۸ و ۹] از جمله مواردی هستند که در پژوهش‌های مختلف به آن‌ها پرداخته شده است. همچنین چالش‌های مربوط به به‌کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر و سیاست‌های اتخاذ شده در این راستا نیز از جمله محورهایی هستند که در زمره این مطالعات قرار می‌گیرند [۱۲-۱۰]. در مطالعات عدیده‌ای نیز برنامه‌ریزی توسعه با هدف حداقل کردن سایر هزینه‌ها شامل هزینه های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری، و هزینه تولید با در نظر داشتن محیط سنتی صنعت برق صورت گرفته است [۱۳ و ۱۴].

در مقاله پیش رو، با به‌کارگیری تابع رفاه اجتماعی برگسون-ساموئلسون، به ارزیابی اثرات ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر بر ترم‌های مختلفی چون پدافند غیرعامل، مسائل زیست‌محیطی، و عاملان عرصه انرژی، اعم از تولید کننده و مصرف کننده، در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه تولید پرداخته می‌شود، ضمن آنکه یکی از رایج‌ترین سیاست‌های تشویقی تحت عنوان سیاست حق انتشار با

قابلیت دادوستد نیز با مدل برنامه‌ریزی توسعه تولید ترکیب می‌گردد. بدین منظور ابتدا مفاهیم و اهداف پدافند غیرعامل که بعضاً در صنعت برق قابل اجرا بوده و می‌توانند در برنامه‌ریزی توسعه تولید، با ترویج و توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر تحقق یابند، بیان می‌شود. به موازات این مسئله، اهمیت بحث آلودگی‌های زیست‌محیطی و تغییرات شرایط آب‌وهوایی، اثرات آن‌ها بر جامعه، و در نهایت راهکارهای ارائه‌شده در این زمینه نیز به اختصار بیان می‌شوند. سپس، ضمن بیان تعریف تابع رفاه اجتماعی برگسون- ساموئلسون و معرفی ترم‌های در نظر گرفته شده برای آن، یک مدل کامل و مقید برای برنامه‌ریزی توسعه تولید، ضمن در نظر داشتن مشارکت منابع انرژی تجدیدپذیر و اثر سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد، ارائه می‌گردد. مدل مزبور با استفاده از یک الگوریتم جدید، مبتنی بر قوانین حرکت و جاذبه نیوتن، تحت عنوان الگوریتم جستجوی گرانشی، حل شده و اثر نتایج حاصله بر ترم‌های تابع رفاه اجتماعی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها نیز توانمندی الگوریتم به‌کار گرفته شده در حل مسئله بهینه‌سازی مورد نظر، در برابر الگوریتم ژنتیک (GA) مورد آزمایش و مقایسه قرار می‌گیرد.

به منظور پوشش کامل مطالب، بخش‌های بعدی مقاله بدین ترتیب در نظر گرفته می‌شوند؛ اثر تدوین طرح‌های توسعه با در نظر داشتن منابع انرژی تجدیدپذیر و سیاست‌های تشویقی از دیدگاه‌هایی چون پدافند غیرعامل، رفاه شرکت تولیدی، رفاه مصرف کنندگان انرژی و در نهایت مسائل زیست‌محیطی، در بخش دوم بیان می‌گردد. همچنین در این بخش اثر ترویج واحدهای مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر از دیدگاه‌های مطروحه بر رفاه اجتماعی نیز بررسی می شود. در بخش سوم ضمن معرفی تابع رفاه اجتماعی و ترم‌های در نظر گرفته شده برای آن، به ارائه یک مدل جامع برای برنامه‌ریزی توسعه تولید تحت سیاست تشویقی مورد نظر و بیان قیود مربوطه پرداخته می‌شود. بخش چهارم به معرفی و بیان سازوکار الگوریتم جستجوی گرانشی اختصاص یافته و نتایج به‌دست آمده از آن در برنامه‌ریزی توسعه، همراه با تحلیل نتایج در بخش پنجم گردآوری می‌شود، کارایی الگوریتم جستجوی گرانشی نیز در این بخش ارزیابی می‌گردد. در نهایت نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها در بخش ششم آورده می‌شود.

۲. ارزیابی منابع انرژی تجدیدپذیر از دیدگاه‌های مختلف و تأثیر آن‌ها بر رفاه اجتماعی

با توجه به سهم بخش تولید در انتشار آلاینده‌های گازی، به ویژه CO_2 که از اصلی‌ترین گازهای گلخانه‌ای مؤثر در تغییر شرایط آب‌وهوایی بشمار می‌رود، منابع انرژی تجدیدپذیر قادرند از منظر مسائل زیست‌محیطی، نقش تعیین‌کننده‌ای در سلامت جامعه و تداوم بقای بشر بر روی کره زمین ایفا کنند. اما اثرات مشتق‌شده دیگر از منابع انرژی تجدیدپذیر و سیاست‌های مربوطه که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند، مربوط به دیدگاه‌هایی چون پدافند غیرعامل، رفاه مصرف‌کننده و رفاه سرمایه‌گذار (تولیدکننده) در عرصه انرژی، در قالب یک مفهوم کلی مانند رفاه اجتماعی است. به عنوان مثال، با کاهش وابستگی سبد انرژی به منابع سوخت‌های فسیلی، اصل پراکندگی تولید و نیز تخصیص ابعاد کم برای نصب تجهیزات، واحدهای تجدیدپذیر می‌توانند از منظر پدافند غیرعامل مؤثر واقع شوند که این امر به نوبه خود می‌تواند یک اثر مثبت در امنیت انرژی و بنابراین ارتقاء رفاه اجتماعی تلقی گردد. به منظور تفهیم بیشتر مطالب فوق، در ادامه هر یک از دیدگاه‌های مطروحه به طور جداگانه بیان می‌شود.

۲-۱. اثرات منابع تجدیدپذیر از دیدگاه مسائل زیست‌محیطی

فعالیت‌های بشر برای تأمین امکانات رفاهی و تأمین نیازهای زندگی و در نهایت بهبود کیفیت زیستی، به طور مستقیم و غیرمستقیم بر محیط‌زیست اثر داشته است و چنانچه چاره‌اندیشی نشود در دراز مدت ممکن است نه تنها کیفیت زندگی را بهبود نبخشد بلکه آن را مختل نیز سازد. از جمله این فعالیت‌ها، می‌توان به تولید برق با استفاده از سوخت‌های فسیلی اشاره کرد که با تولید آلاینده‌هایی چون SO_2، NO_x و CO_2 خسارت‌های فراوانی را به محیط‌زیست وارد می‌کند، به طوری که سالانه هزاران نفر از ساکنین کره زمین به سرطان‌های مرتبط با آلودگی هوا دچار می‌شوند [۱۵].

آلودگی هوا چهارمین عامل مرگ‌ومیر در جهان است. طبق آمار، یک میلیارد و ۴۰۰ میلیون نفر در جهان در معرض آلودگی هوا قرار دارند و سالانه ۳ میلیون نفر در دنیا جان خود را به دلیل عوارض مستقیم یا غیرمستقیم آلودگی هوا از دست می‌دهند. وسایط نقلیه، کارخانه‌ها و مهم‌تر از همه نیروگاه‌های تولید برق، از جمله عوامل آلودگی هوا به شمار می‌آیند. ازن، دی اکسیدکربن، اکسیدهای گوگرد و نیتروژن، سرب، ذرات معلق و ترکیبات سمی مانند بنزن و فرمالدئید ترکیباتی هستند که از احتراق سوخت‌های فسیلی ایجاد شده و هوا را آلوده می‌کنند. تماس با سطوح بالای آلودگی هوا با بیماری‌های ریوی، ناراحتی‌های قلبی و عروقی، آسیب به سامانه عصبی، سرطان و مرگ زودرس ارتباط دارد [۱۶]. با توجه به تحقیقات به عمل آمده، ایران به عنوان یک کشور در حال توسعه، یکی از بزرگ‌ترین کشورهای آلوده جهان به شمار می‌آید. تحقیقات انجام شده حاکی از آن است که در شرایط بحران آلودگی هوا، احتمال مرگ‌ومیر سالانه پنج هزار نفر در پایتخت کشور وجود دارد. گذشته از اثرات مستقیم آلاینده‌های گازی بر زندگی بشر، مانند تشدید بیماری‌های قلبی و غیره که در بالا به آن اشاره گردید، تغییرات شرایط آب‌وهوایی در اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز از دیگر مواردی است که می‌تواند به عنوان اثرات زیان‌بار و غیرمستقیم آلاینده‌های گازی محسوب گردد. به بیان کامل‌تر، سرطان‌های پوستی، گرم شدن کره زمین و بنابراین ذوب شدن یخ‌های قطب شمال و جنوب، و به دنبال آن بالا آمدن سطح آب دریاها، تغییرات اکولوژی زیست‌جانوری، نابودی جنگل‌ها و کشاورزی، و انهدام بسیاری از گیاهان و گونه‌های جانوری از جمله اثرات آلاینده‌های گازی است که امروزه بیش از پیش شناسایی شده و مورد توجه قرار

می‌گیرند. در این چهارچوب، ارزیابی اقتصادی سایر خسارت‌های به بار آمده به ازای انتشار هر تن از آلاینده‌های فوق‌الذکر، با استفاده از شاخصی تحت عنوان هزینه اجتماعی کربن صورت می‌گیرد که در این بخش، بعد از اشاره به راهکارهای ارائه شده برای مواجهه با مشکلات فوق در عرصه انرژی، به اختصار توضیحاتی در مورد آن ارائه می‌شود.

تمام آنچه که در بالا بیان شد، حاکی از ضرورت ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر در تأمین انرژی الکتریکی به عنوان اصلی‌ترین راهکار در کاهش میزان آلودگی‌های منتشرشده از احتراق سوخت‌های فسیلی است. به بیان دیگر، با توجه به طبیعت اجتناب‌ناپذیر مصرف انرژی الکتریکی و افزایش روزافزون تقاضا برای آن، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند در میان راهکارهای چون بهینه‌سازی مصرف انرژی یا مدیریت سمت تقاضا، به عنوان کارآمدترین راهکار در مواجهه با بحث انتشار بخش تولید تلقی شود. به بدین ترتیب، در دهه‌های اخیر، به موازات مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید، آلودگی های ناشی از تولید انرژی و نگرانی‌های حاصل از آن نیز به طور جدی مورد توجه قرار گرفته است [۱۷]. ازاین‌رو لازم است طراحان و سرمایه‌گذاران در برنامه‌ریزی‌های توسعه تولید، مسائل زیست‌محیطی یا استفاده از منابع جایگزین با سطح آلودگی پایین‌تر را مدنظر داشته باشند.

با توجه به مطالب فوق‌الذکر، رشد روزافزون تقاضا برای انرژی الکتریکی، بسیاری از کشورها را ملزم به پایبندی شرایطی می‌کند که به رعایت ضوابط مختلف برای پیشگیری از انتشار آلاینده‌های ناشی از تولید برق اشاره دارند. از جمله اقدامات بارز در این راستا تصویب پیمان کیوتو است که در سال ۱۹۹۷ میلادی توسط بیش از ۱۶۱ کشور مختلف از سراسر دنیا به امضا رسید [۱۸]. بر اساس این پیمان بسیاری از کشورهای صنعتی متعهد شدند که در طول یک دوره ۱۰ ساله، علاوه بر کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه خود به میزان ۵٪، کشورهای در حال توسعه را نیز مورد حمایت مالی قرار دهند تا درصد استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در این کشورها افزایش یابد. با وجود این حمایت‌ها، عواملی چون، هزینه‌های سرمایه‌ای بالا، نرخ تولید پایین، و طولانی بودن دوره بازگشت سرمایه را می‌توان از جمله دلایلی دانست که باعث عدم بلوغ کافی منابع انرژی تجدیدپذیر در زمینه تأمین انرژی الکتریکی شده‌اند. برای رویارویی با این معضلات، امروزه در کشورهای متعدد طرح‌های مختلفی تحت عنوان سیاست های تشویقی تدوین و اجرا گردیده‌اند. در اینجا به دلیل گسترده بودن مباحث مربوطه در این زمینه، از معرفی و ذکر جزئیات در مورد سایر انواع این سیاست‌ها خودداری شده و تنها به معرفی یکی از این سیاست‌ها که اثر آن در این مطالعه نیز لحاظ شده است، اکتفا می‌گردد.

هزینه اجتماعی کربن: به طور کلی هزینه اجتماعی، معادل با ارزشی نهایی است که مصرف کننده برای هر واحد محصول یا خدمت پرداخت می‌کند. حال در بخش تولید انرژی می‌توان این هزینه را مجموع هزینه تولید با هزینه‌ای دانست که اجتماع، ناشی از خسارات زیست‌محیطی و آب‌وهوایی مربوط به تولید انرژی، متحمل می‌شود. این هزینه، هزینه اجتماعی کربن نامیده شده و طبق تعریف ارائه شده توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا عبارت است از: هزینه معادل با خسارت‌هایی که هر تن انتشار CO_2 (به عنوان اصلی‌ترین گاز گلخآن‌های) به محیط‌زیست و جامعه وارد می‌کند. بنابراین می‌توان گفت، هزینه اجتماعی کربن، هزینه‌ای است که از اثرات مخرب و سوء به بار آمده از انتشار آلاینده‌های گازی، بر محصولات کشاورزی، اکوسامانه، مواد، سلامت انسآن‌ها و غیره، ناشی می‌شود. این شاخص حاصل تجزیه و تحلیل‌هایی پیچیده‌ای است که در مطالعات مربوط به اثرات زیست‌محیطی و آب‌وهوایی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی، انجام گرفته است. اطلاعات جغرافیایی، اطلاعات فیزیکی، اطلاعات آزمایشگاهی، شاخص‌های اجتماعی مانند میزان نگرانی مردم، جمعیت، و پارامترهای آماری مربوط به سایر بخش‌های جامعه، از جمله مواردی هستند که در محاسبه شاخص مزبور، در نظر گرفته می‌شوند [۱۹].

با توجه به آنچه که از آلودگی‌های زیست‌محیطی، مخاطرات مربوط به تغییرات شرایط آب‌وهوایی، و ضرورت ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر تا به اینجا به آن اشاره شد، می‌توان گفت ترویج و توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند با کاهش خسارت‌های زیست‌محیطی مربوط به بخش تولید انرژی، باعث بهبود رفاه اجتماعی گردد؛ حال آنکه سیاست‌های تشویقی نیز خود می‌توانند بر رفاه مصرف کننده و یا تولید کننده، بسته به نوع سازوکار اجرایی، تأثیرگذار باشند. این موضوع که در زمینه ترویج و توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است، در بخش بعد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲. اثرات منابع انرژی تجدیدپذیر و سیاست‌های تشویقی از دیدگاه مصرف کنندگان و تولید کنندگان عرصه انرژی

همان‌طور که اشاره شد با توجه به طبیعت اجتناب‌ناپذیر مصرف انرژی، منابع انرژی تجدیدپذیر می‌توانند به عنوان اصلی‌ترین راهکار برای مقابله با آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی و مهم‌تر از آن، مقابله با تغییرات شرایط آب‌وهوایی تلقی شوند. در این میان، آنچه که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است، در نظر داشتن نهادی است که بار مالی مشتق شده از اجرای سیاست‌های تشویقی را متحمل می‌شود. به عنوان مثال، در سیاستی مانند سیاست حق تعرفه (Feed-In-Tariff) [۴]، که در آن واحدهای مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر به صورت بلند مدت تحت تشویق های مالی قرار می‌گیرند، در مقابل کاهش ریسک سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر برای شرکت‌های تولیدی، مازاد رفاه مصرف کننده [۲۰] کاهش خواهد یافت، مادامی که بار مالی مربوط به تشویق‌های مزبور در این سیاست بر عهده نهاد مصرف کننده گذارده شود. به بیانی کامل‌تر، در وضعیتی که هزینه‌های به بار آمده از ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر در نتیجه اجرای سیاست‌های

تشویقی متوجه مصرف کننده باشد، هزینه تمام شده به ازای هر واحد انرژی در این حالت برای مصرف کننده بیشتر از حالتی خواهد بود که در آن هزینه‌های مربوط به گسترش منابع انرژی تجدیدپذیر بر نهاد مصرف‌کننده بارگذاری نمی‌گردد، این افزایش هزینه تمام شده برای هر واحد انرژی، کاهش مازاد رفاه مصرف کننده را به دنبال دارد. چنین وضعیتی می‌تواند در مورد رفاه شرکت‌های تولیدی نیز تحت اجرای بعضی از دیگر سیاست‌های تشویقی رخ دهد، چراکه سازوکار بعضی از سیاست‌های تشویقی به‌گونه‌ای است که در آن هزینه‌های مربوط به تشویق واحدهای تجدیدپذیر یا کاهش انتشار بخش تولید متوجه شرکت‌های تولیدی است. به عنوان مثال، چنانچه سرمایه گذاری و ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر ناشی از اعمال محدودیت انتشار باشد، می‌تواند کاهش رفاه تولید کننده را در نتیجه مواردی چون کاهش سطح تولید، پرداخت مالیات، یا سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر، به دنبال داشته باشد. برای تفهیم بهتر اینکه سیاست مورد نظر در این مطالعه، یعنی سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد، چگونه می‌تواند بر رفاه مصرف کننده یا تولید کننده و در نهایت بر رفاه اجتماعی اثرگذار باشد، در ادامه به بیان سازوکار و سازوکار اجرایی این سیاست پرداخته می‌شود.

سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد: در مورد سیاست‌های تشویقی اشاره به این نکته ضروری است که این سیاست‌ها اثر مستقیم بر ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر داشته و کاهش انتشار بخش تولید توسط آن‌ها به عنوان یک اثر ثانویه شناخته می‌شود. حال آنکه در دهه‌های اخیر، اهمیت بحث تغییرات شرایط آب‌وهوایی و بنابراین ضرورت تضمین در کنترل انتشار بخش تولید باعث شکل‌گیری سیاست‌های شده است که در آن‌ها کاهش انتشار بخش تولید به عنوان هدف اصلی تعریف شده و سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان یک اثر ثانویه، به صورت غیرمستقیم از آن‌ها ناشی می‌شود. از جمله این سیاست‌ها، سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد است. بنا به تعریف ارائه شده در مرجع [۲۱]، سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد عبارت است از: اعمال یک حد انتشار مجاز با قابلیت خرید و فروش بر هر یک از شرکت‌های تولیدی، متناسب با میزان تولید و مشارکت آن‌ها در تأمین تقاضا، به طوری که مجموع انتشار کل شرکت‌ها، از یک حد مشخص کمتر باشد. بدین ترتیب، متناسب با میزان توان تولیدی، یک حد مجاز به صورت تعداد معینی حق انتشار (با واحد تن)، بر میزان انتشار هر شرکت تولیدی مقرر می‌گردد. طول دوره زمانی در نظر گرفته شده برای میزان انتشار مجاز، برابر با یک سال است؛ به بیان دیگر، هر شرکت تولیدی باید در طول یک سال، انتشاری کمتر یا برابر با حد مجاز خود داشته باشد. حال حق انتشار مشخص‌شده می‌تواند توسط نهاد یا شرکتی که کمتر از حد مجاز خود آلودگی تولید کرده است، به نهادی که میزان انتشارش در طول دوره مقرر، از حد مجاز تخطی داشته است، فروخته شود؛ بدین ترتیب، مادامی که کل انتشار بخش تولید برحسب تن بر سال، با تعداد کل حق انتشارهای تخصیص‌یافته به شرکت‌های مختلف برابر باشد، می‌توان گفت انتشار بخش تولید در یک مرز معین کنترل شده است. از طرفی، انگیزه برای فروش حق انتشار می‌تواند باعث ترغیب شرکت‌های تولیدی در ترویج منابع تجدیدپذیر گردد؛ چراکه، افزایش درصد نفوذ واحدهای تجدیدپذیر در ترکیب تولید، به معنای تأمین تقاضا بدون نیاز به حق انتشار خواهد بود؛ بنابراین شرکت تولیدی می‌تواند، بسته به درصد به‌کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر، مقداری از حق انتشارهای خود را در همان سال، یا در طی سال‌های بعدی به فروش برساند. شایان ذکر است که در این سیاست میزان انتشار مجاز تعیین شده برای هر شرکت تولیدی، دارای شیب کاهشی بوده و حق انتشارها هر ساله کمتر می‌شود.

با توجه به سازوکار سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد، تبعیت شرکت تولیدی از سقف انتشار مجاز و در نتیجه آن، خرید حق انتشار، یا سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر، (علی‌رغم امکان فروش حق انتشارهای اضافی) ممکن است باعث کاهش سود شرکت تولیدی (به عنوان ترمی از تابع رفاه اجتماعی) و بنابراین کاهش رفاه اجتماعی گردد. در مقاله حاضر به ارزیابی این موضوع نیز پرداخته خواهد شد.

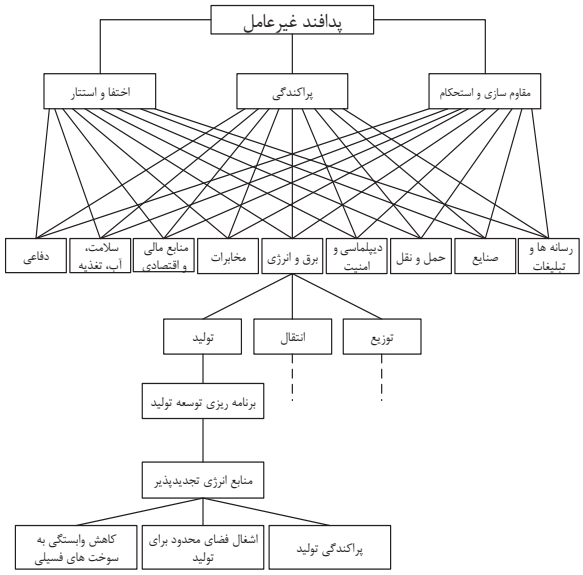
۲-۳. اثرات منابع انرژی تجدیدپذیر از دیدگاه نظامی

با توجه به اصول مهم در برنامه‌ریزی توسعه صنعت برق، می‌توان گفت آنچه که در این چهارچوب کمتر مورد توجه قرار گرفته است، اثری است که ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند در حفظ جایگاه استراتژیک و نظامی این صنعت و اجرای مفاهیم پدافند غیرعامل به دنبال داشته باشد. در یک نگاه اجمالی می‌توان پدافند غیرعامل را مجموعه‌ای از تمهیدات، اقدامات و طرح‌هایی دانست که با استفاده از ابزار و شرایط موجود و حتی‌المقدور بدون نیاز به اعمال نیروی انسانی، به صورت خوداتکا انجام می‌گیرند. استتار و اختفا، پراکندگی، و مقاوم‌سازی و استحکام، مفاهیمی هستند که در اکثر منابع علمی و نظامی دنیا، به عنوان اصول پدافند غیرعامل شامل شناخته شده و در طراحی و اقدامات اجرایی مورد توجه قرار گیرند [۲۲ و ۲۳].

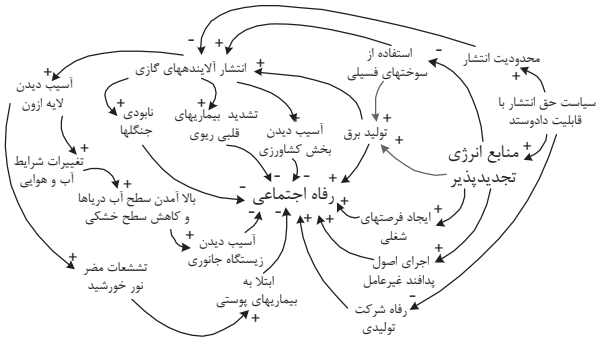
با توجه به اصل استتار و اختفا که مربوط به حفاظت از نیروها و تأسیسات از دید دشمن است، نیروگاه‌های عمده تولید برق با در نظر داشتن وسعت فضای اشغال یافته توسط تجهیزات بخش تولید، عملاً نمی‌توانند بستری برای اجرای این اصل فراهم آورند. حال آنکه منابع انرژی تجدیدپذیر به دلیل عدم نیاز به سامانه‌هایی خنک کننده، مخزن‌های سوخت و غیره، به نسبت توان تولیدی خود، به ابعاد و فضای کمتری برای تولید توان نیاز دارند. ازاین‌رو می‌توان گفت به‌کارگیری این منابع می‌تواند به نحوی دربردارنده اصل اختفا و استتار باشد. همچنین با توجه به توزیع بهتر شرایط لازم جغرافیایی برای بهره‌برداری از این منابع در مقایسه با منابع فسیلی، این منابع با امکان نصب به صورت پراکنده قادرند تا حدودی تمرکززدایی لازم را در بخش تولید ایجاد کنند. شکل (۱)، حوزه‌های مختلف تحت

تأثیر پدافند غیرعامل و نحوه ارتباط آن‌ها با مفاهیم برنامه‌ریزی توسعه تولید را نشان می‌دهد. نکته مهم دیگری که در قالب اصول پدافند غیرعامل به آن اشاره نشد، موضوع کاهش وابستگی سبد انرژی، به منابع سوخت‌های فسیلی است که در شکل (۱) نیز نشان داده شده است. بنابراین ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر در قالب تولیدات پراکنده می‌تواند در موقع بحران، اطمینان خاطر بیشتری از حیث تأمین انرژی ایجاد کند. ازاین‌رو می‌توان ادعا کرد که ترویج و توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند از دیدگاه پدافند غیرعامل، تأثیر مثبت در ارتقاء رفاه اجتماعی به دنبال داشته باشد.

با توجه به سایر دیدگاه‌های مطروحه در این بخش، می‌توان ارتباط بین عوامل مختلف و مؤثر بر رفاه اجتماعی و همچنین نوع و نحوه اثرگذاری آن‌ها را به صورت دیاگرام سببی شکل (۲) نشان داد.



شکل ۱. نحوه ارتباط پدافند غیرعامل با منابع انرژی تجدیدپذیر



شکل ۲. دیاگرام سببی مربوط به تأثیر عوامل مختلف بر رفاه اجتماعی

۳. مدل‌سازی مسئله

در این بخش، ضمن ارائه تعریف تابع رفاه اجتماعی برگسون-ساموئلسون و معرفی ترم‌های در نظر گرفته شده برای آن در چهارچوب مورد نظر، به مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید ضمن در نظر داشتن اثر سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد پرداخته می‌شود.

۳-۱. تابع رفاه اجتماعی برگسون-ساموئلسون

مبدأ موضوعی بحث تابع رفاه اجتماعی، مسئله نحوه قضاوت در مورد سطح رفاه و مطلوبیت کلی در سطح جامعه است. این بحث پیشینه‌ای اقتصادی دارد، اما آنچه که امروزه تحت عنوان تابع رفاه اجتماعی در زمینه‌های مختلف اقتصادی، صنعتی و غیره شناخته می‌شود، ضابطه‌ای است که به وسیله آن می‌توان مطلوبیت تمام افرادی یا نهادهایی که در یک جامعه قرار دارند را در قالب یک ترجیح مشترک یا ترجیح اجتماعی، با یکدیگر جمع یا ترکیب نمود. یکی از معروف‌ترین و در عین حال ساده‌ترین ضوابط ارائه‌شده برای رفاه اجتماعی، تابع رفاه اجتماعی برگسون- ساموئلسون است که در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تابع مطلوبیت یا رفاه اجتماعی برگسون– ساموئلسون که توسط اقتصاددانانی با همین نام در سال ۱۹۳۸ ارائه شد، رفاه اجتماعی به عنوان تابعی از مطلوبیت تک‌تک افراد جامعه به صورت رابطه (۱) در نظر گرفته می‌شود [۲۴]:

$$Social\,Welfare = SW\{\lambda_j(\tau_j)\} \quad \forall\ j \in \{1,2,...,n\} \qquad (۱)$$

که در آن، λ_j تابع مطلوبیت نهاد jام، و τ_j، کالا، خدمت، فعالیت یا تأثیر به بار آمده از نهاد jام در جامعه است. مطلوبیت نیز معیار رضایتمندی تعریف می‌شود که نهاد jبا مصرف، تولید، دریافت خدمت یا در ازای ارائه خدمت، به دنبال آن است. با گذشت زمان، تابع رفاه اجتماعی، تحت تأثیر پیشرفت‌هایی اقتصادی تکامل یافت؛ به‌گونه‌ای که با تفکیک (دسته‌بندی) نهادهای مختلف در یک جامعه، مانند تولیدکننده و مصرف‌کننده در بازار، که هر یک منافعی با واحد یکسان را دنبال می‌کنند، پردازش و ارزیابی‌های اقتصادی با استفاده از تابع رفاه اجتماعی، جامه عمل به خود گرفت.

۳-۲. ترم‌های تابع رفاه اجتماعی در چهارچوب مورد نظر

با توجه به تعریف ارائه‌شده از تابع رفاه اجتماعی برگسون–ساموئلسون و چهارچوب در نظر گرفته شده در این مقاله، سود شرکت تولیدی، مازاد رفاه مصرف کنندگان انرژی الکتریکی، خسارت‌های زیست محیطی، و امنیت انرژی از حیث اصول پدافند غیرعامل، می‌توانند به عنوان ترم‌های تابع رفاه در نظر گرفته شوند؛ بنابراین با توجه به رابطه (۱)، می‌توان این ترم‌ها را به صورت رابطه (۲) تعریف نمود:

$$\begin{cases} \lambda_1(\tau_1) \equiv GENCO\ profit \\ \lambda_2(\tau_2) \equiv Consumer\ surplus \\ \lambda_3(\tau_3) \equiv Environmental\ damages \\ \lambda_4(\tau_4) \equiv Security\ (Passive\ Defense) \end{cases} \qquad (۲)$$

که در آن، τ_1 به صورت خدمت «فروش انرژی» تحت تابع مطلوبیت شرکت تولیدی، یعنی λ_1، تعریف می‌شود. مطلوبیت نیز به صورت سود حاصل از فروش انرژی با واحد (M€) در نظر گرفته می‌شود. به همین ترتیب، τ_2 به صورت دریافت خدمت یعنی «مصرف انرژی»، با تابع مطلوبیت λ_2 برای نهاد مصرف کننده تعریف می‌شود که مطلوبیت او مازاد رفاه با واحد (M€) است. τ_3 نیز در قالب تأثیر به بار

آمده از خدمت تولید انرژی، به صورت «خسارت‌های زیست‌محیطی»، با تابع مطلوبیت λ_3 در نظر گرفته می‌شود. این ترم از جنس هزینه با واحد (M€) بوده و در آن مطلوبیت به صورت منفی تعریف می‌شود؛ یعنی هر چه میزان این ترم کمتر باشد، مطلوبیت بیشتر خواهد بود.

به طور مشابه، در مورد τ_4 نیز می‌توان آن را در قالب یک تأثیر به بار آمده از خدمت تولید انرژی با استفاده از واحدهای تجدیدپذیر، به صورت «امنیت» در تأمین انرژی فرض نمود که از مواردی چون پراکندگی یا ابعاد کم مربوط به واحدهای تجدیدپذیر ناشی می‌گردد، ارزیابی اقتصادی این ترم از تابع رفاه اجتماعی می‌تواند با برآورد خسارت‌های که در شرایط بحران، در اثر اختلال در سامانه قدرت ممکن است به بار آیند، صورت گیرد؛ مادامی که استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و تأمین حتی‌الامکان تقاضا در محل، می‌تواند در شرایط مورد نظر، در کاهش خسارت‌های مزبور مؤثر باشد.

به بیانی روشن‌تر، از دیدگاه پدافند غیرعامل، ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر با به همراه داشتن یکسری ویژگی‌ها، می‌تواند با افزایش امنیت در تأمین انرژی و به تبع، کاهش خسارت‌های مربوط به قطع انرژی، در ارتقاء رفاه اجتماعی مؤثر باشد. بدین ترتیب تابع مطلوبیت λ_4 نیز مانند λ_3 به صورت هزینه و یک ترم منفی با واحد مشابه تعریف می‌شود. بنابراین، تابع رفاه اجتماعی را می‌توان به صورت مجموع سود شرکت تولیدی که برنامه‌ریزی توسعه را انجام می‌دهد، مازاد رفاه مصرف کننده که انرژی تولیدی را مصرف می‌کند، هزینه معادل با خسارت‌های زیست‌محیطی (شامل تغییرات آب‌وهوایی، بیماری‌های انسانی، و غیره) که از تولید انرژی الکتریکی ناشی می‌شود، و خسارت‌های به بار آمده از عدم دسترسی به انرژی در شرایط خاص، در نظر گرفت. بنابراین رابطه (۲) به صورت رابطه (۳) قابل بازنویسی خواهد بود:

$$SW=\frac{\sum_{i=1}^{N^Y}\left[\left(U_{1_i}^{G}+U_{2_i}^{G}-U_{3_i}^{G}\right)+U_i^{C}-U_i^{E}-U_i^{P}\right]}{(1+r)^{i-1}} \qquad (۳)$$

که در آن، $U_{1_i}^{G}$ (M€)، تابع سود شرکت تولیدی حاصل از فروش انرژی، $U_{2_i}^{G}$ (M€)، تابع سود شرکت تولیدی حاصل از سیاست‌های تشویقی، و $U_{3_i}^{G}$ (M€)، تابع مربوط به هزینه سرمایه‌گذاری‌های انجام‌شده توسط شرکت مورد نظر است؛ بنابراین، همان‌طور که مشاهده می‌شود، تابع مطلوبیت یا ترم اول تابع رفاه اجتماعی، خود مشتمل بر سه تابع به شرح فوق است. U_i^C نیز تابع مطلوبیت مصرف کننده بر حسب (M€)، U_i^E (M€)، تابع مطلوبیت در نظر گرفته شده معادل با خسارت‌های زیست‌محیطی، و در نهایت U_i^P (M€)، معرف تابع مطلوبیت مربوط به خسارت‌های ناشی شده از عدم تأمین انرژی از دید پدافند غیرعامل است.

۳-۳. مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید

در این بخش، به تشریح یک مدل جامع برای برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر داشتن مشارکت منابع انرژی تجدیدپذیر تحت سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد پرداخته می‌شود. برنامه‌ریزی، طی یک افق زمانی ۲۰ ساله در محیط تجدید ساختاریافته، از دید یک شرکت تولیدی انجام می‌شود که ضمن رعایت قیود مختلف، به دنبال حداکثر ساختن سود حاصل از تصمیمات سرمایه‌گذاری است. لازم به ذکر است که در این مطالعه برنامه‌ریزی توسعه به صورت تک شین و بدون در نظر داشتن شبکه انتقال صورت می‌گیرد. ازاین‌رو، در ارزیابی رفاه اجتماعی، از اثربخشی منابع انرژی تجدیدپذیر از دیدگاه پدافند غیرعامل و برآوردهای اقتصادی مربوطه صرف‌نظر شده است.

۳-۴. تابع هدف

تابع هدف در نظر گرفته شده شامل حداکثر کل سود حاصل از فروش انرژی تولیدی در سایر سال‌های برنامه‌ریزی در طول یک افق N^y ساله است. به منظور ایجاد امکان مقایسه اقتصادی طرح‌های مختلف توسعه با یکدیگر، محاسبات سود بر اساس روش ارزش فعلی صورت می‌گیرد. بودجه سرمایه‌گذاری شده در هر دوره (سال) به حداکثر بار پیشبینی شده در طول افق توسعه، قیمت بازار، سطح انتشار مجاز، و نوع فناوری‌های منتخب و موجود برای توسعه بستگی دارد. بر این اساس، تابع هدف مسئله به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Max:\sum_{i=1}^{N^Y}(1+r)^{1-i}\left(U_{1_i}^{G}+U_{2_i}^{G}-U_{3_i}^{G}\right) \qquad (۴)$$

$$U_{1_i}^{G}=\sum_{t\in Z_i^{ex}}(\pi_i^m-\upsilon_{i,t})\varepsilon_t^{ex}+\sum_{t\in Z_i^{new}}(\pi_i^m-\upsilon_{i,t})\varepsilon_t^{new} \qquad (۵)$$

$$U_{2_i}^{G}=\left(ER_i^s-ER_i^b\right).\pi_i^{ER} \qquad (۶)$$

$$U_{3_i}^{G}=\sum_{t\in Z_i^{new}}\mathrm{I}_{i,t}.c_t\,.\,n_{i,t} \qquad (۷)$$

در روابط فوق، r نرخ بهره، i شاخص سال، π_i^m قیمت هر مگاوات ساعت انرژی در بازار متناظر با سال i (€/MWh)، ε_t^{ex} و ε_t^{new} کل انرژی تولید شده به ترتیب توسط واحدهای موجود و جدید اضافه شده (MWh)، t شاخص مربوط به نوع فناوری، $\upsilon_{i,t}$ هزینه تولید هر واحد انرژی (€/MWh)، ER_i^s و ER_i^b، به ترتیب تعداد حق انتشارهای فروخته شده و خریداری شده در قیمت π_i^{ER} (€/ton) در سال مربوطه، $\mathrm{I}_{i,t}$، هزینه سرمایه‌گذاری مربوط به فناوری نوع t در سال i (M€/MW)، c_t ظرفیت واحد نوع t (MW)، و $n_{i,t}$ تعداد واحدهای نوع t که در سال i به ترکیب تولید اضافه می‌شوند، است. Z_i^{ex} و Z_i^{new} نیز به ترتیب مجموعه واحدهای موجود در حال بهره‌برداری و مجموعه واحدهای جدیدی که از ابتدای سال i مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، را نشان می‌دهند.

۳-۵. قیود مسئله

به منظور تحقق هر چه بیشتر یک مدل کارآمد برای برنامه‌ریزی توسعه تولید، در این بخش علاوه بر قیود فنی و اقتصادی مختلف، یک قید اضافی نیز در راستای اجرای سیاست حق انتشار با قابلیت

دادوستد ارائه می‌شود.

قید تعادل انرژی: این قید، متناظر با هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی، نشان دهنده تعادل بین انرژی فروخته شده در قیمت بازار و کل انرژی تولیدی توسط مجموعه واحدهای موجود و جدید است. به بیان دیگر واحدهای اضافه شده در هر مرحله از برنامه‌ریزی باید به نحوی انتخاب گردند که علاوه بر حداکثر کردن سود شرکت تولیدی، تأمین کل انرژی تقاضا شده در طول هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی را نیز تضمین کنند [۴]. این قید به صورت زیر فرمول بندی می‌شود:

$$E_i^T = \sum_{t\in Z_i^{ex}} \varepsilon_t^{ex} + \sum_{t\in Z_i^{new}} \varepsilon_t^{new} \qquad (۸)$$

که در آن، E_i^T کل انرژی عرضه‌شده به بازار است.

قید بودجه: این قید حداکثر بودجه سرمایه‌گذاری شده توسط شرکت تولیدی مورد نظر در طول افق برنامه‌ریزی را محدود می‌کند. به عبارت دیگر با استفاده از روش ارزش فعلی، سرمایه‌گذاری‌های انجام شده در طول هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی با کل بودجه موجود تا آن سال مقایسه شده و انتخاب واحدهای جدید متناسب با آن بودجه صورت می‌گیرد. این قید به صورت زیر در نظر گرفته می شود [۴]:

$$\sum_{i}^{N^y}\sum_{t\in Z_i^{new}} (1+r)^{1-i}\,(\mathrm{I}_{i,t}\cdot c_t\cdot n_{i,t}) \le In_{tot}^{bud} \qquad (۹)$$

که در آن، In_{tot}^{bud} کل بودجه موجود در سال پایه (سال مبنا یا سال قبل از شروع برنامه‌ریزی) است.

قید نرخ ترکیب سوخت: علاوه بر آنچه که در ارتباط با منابع انرژی تجدیدپذیر در راستای کاهش وابستگی منابع تولید توان به سوخت‌های فسیلی گفته شد، موضوع مشابه دیگری که باید در راستای امنیت و خوداتکایی ملی مورد توجه قرار گیرد بحث تأمین توان با استفاده از ترکیب مناسبی از منابع مختلف و موجود است. به بیان کامل‌تر، در مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید انواع مختلف واحدهای تولیدی که از سوخت‌های مختلفی مانند نفت، گاز طبیعی، زغال‌سنگ و سوخت هسته‌ای استفاده می‌کنند، وجود دارند. زمانی که ترکیب تولید مناسب نباشد، کوچک‌ترین حادثه پیش‌بینی نشده (مانند تحریم نفتی سال ۱۹۷۳ کشورهای عربی) هزینه‌های تولید انرژی الکتریکی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. با استفاده از قید نرخ ترکیب سوخت مسئولین می‌توانند با در نظر گرفتن منابع سوخت در دسترس، ترکیب تولید سامانه را به گونه‌ای انتخاب کنند که ریسک وابستگی به یک نوع سوخت کاهش یابد. با توجه به توضیحات فوق قید نرخ ترکیب سوخت به صورت رابطه (۱۰) در مدل برنامه‌ریزی توسعه تولید در نظر گرفته می‌شود [۷] که واحدهای منتخب به همراه واحدهای موجود باید آن‌ها برآورده کنند.

$$M_t^{\min} \le \frac{n_{i,t}\cdot c_t}{\sum_{t\in(Z_i^{new}+Z_i^{ex})} n_{i,t}\cdot c_t} \le M_t^{\max} \qquad (۱۰)$$

در رابطه (۴)، $M_t^{\min}$ و $M_t^{\max}$ نرخ ترکیب سوخت حداقل و حداکثر مربوط به واحد نوع tام است.

حداکثر ظرفیت قابل ساخت واحدها: ممکن است برخی دلایل فنی، اقتصادی و یا اجرایی در هر مرحله برنامه‌ریزی، اجازه ساخت بیشتر از یک تعداد مشخص از یک نوع واحد را ندهد. در این میان تصمیم‌گیرندگان می‌بایست چنین محدودیت‌هایی را در حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید در نظر بگیرند. محدودیت مذکور، با استفاده از رابطه زیر در نظر گرفته شده است [۷]:

$$\begin{cases} 0\le n_{i,t}\le \overline{n_t} \\ 0\le \sum_{i}^{N^Y} n_{i,t}\le \overline{W_t} \end{cases} \qquad (۱۱)$$

در رابطه فوق، $\overline{n_t}$، حداکثر تعداد واحدهای مجاز از نوع t است که می‌تواند در طول هر مرحله از برنامه‌ریزی انتخاب گردد. همچنین در پایان افق توسعه، تعداد کل واحدهای انتخاب شده از هر فناوری نیز باید کوچک‌تر یا برابر با حداکثر تعداد واحدهای در نظر گرفته شده در ابتدای برنامه‌ریزی، یعنی $\overline{W_t}$، باشد.

قید انتشار در سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد: همان‌طور که اشاره شد، در سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد، شرکت تولیدی هر ساله تحت یک اجبار برای حفظ میزان انتشار ترکیب تولید خود قرار می‌گیرد که سطح آن، یا همان سقف مجاز انتشار، به طور سالانه کاهش می‌یابد؛ این محدودیت، با استفاده از تعداد حق انتشارهایی مشخص می‌شود که هر ساله توسط نهاد تنظیم‌کننده یا دولت، به شرکت تولیدی تخصیص داده می‌شود. هر حق انتشار معادل با انتشار یک تن آلایندگی بوده و ترکیب تولید در پایان هر سال، پس از تأمین کل انرژی مورد تقاضا، باید میزان انتشاری (تن بر سال) معادل با تعداد کل حق انتشارهای تخصیص‌یافته داشته باشد. در صورتی که شرکت تولیدی با به‌کارگیری راهکارهایی مانند سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر، سطح انتشار خود را پایین‌تر از سطح مجاز حفظ کند، می‌تواند مازاد حق انتشارهای خود را نزد شرکت‌های تولیدی دیگر، به فروش برساند. برعکس، در صورتی که، سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر یا تغییر ترکیب تولید (استفاده از واحدهای گازی با سطح آلودگی پایین)، نسبت به عدم رعایت سطح انتشار مجاز و بنابراین خرید حق انتشارهای اضافی، صرفه اقتصادی کمتری داشته باشد، شرکت تولیدی اقدام به خرید حق انتشارهای اضافی خواهد نمود؛ بدین ترتیب، شرکت تولیدی اجازه انتشار بیش از حد مقرر خود را پیدا خواهد کرد. بخش درآمدزایی یا ایجاد هزینه‌های اضافی، به ترتیب ناشی از فروش و خرید حق انتشار در سیاست مورد نظر، توسط رابطه (۶) لحاظ شده است. اما برای تکمیل

مدل‌سازی سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد، لازم است قید محدودیت انتشار نیز به صورت رابطه (۱۱) ملحوظ گردد؛ این قید، علاوه بر محدود کردن حداکثر تعداد حق انتشارهایی که شرکت تولیدی می‌تواند به فروش برساند، حداکثر سطح انتشار ترکیب تولید را نیز، متناسب با حق انتشارهای اضافی خریداری‌شده، محدود می‌کند. مثبت بودن تعداد حق انتشارهای فروخته یا خریداری‌شده نیز با استفاده از قید نامساوی رابطه (۱۲) در نظر گرفته می‌شود.

$$\sum_{t\in Z_i^{con,ex}} \mathrm{E}_{i,t} + ER_i^s - ER_i^b = E_i^{cap} \qquad (۱۱)$$

$$ER_i^s \geq 0,\ ER_i^b \geq 0 \qquad (۱۲)$$

در رابطه (۱۱)، E_i^{cap}، سقف انتشار مجاز بر حسب تن بر سال است. $\mathrm{E}_{i,t}$ نیز کل میزان انتشار مجموعه واحدهای نوع t مبتنی بر سوخت‌های فسیلی در طول سال مربوطه است. در این مقاله، برای محاسبه میزان انتشار هر یک از انواع واحدهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، متناسب با میزان توان تولیدی مربوطه، از مدل چندجمله‌ای-نمایی انتشار به صورت زیر استفاده می‌شود [۲۵]:

$$\mathrm{E}_{i,t} = \left[\sum_{n_{i,t}} \left(\alpha_t + \beta_t.P_{i,t} + \gamma_t.P_{i,t}^2 + \mu_t \exp(\lambda_t P_{i,t})\right)\right]\cdot \hbar_t \quad \forall t \in Z_i^{con,ex} \qquad (۱۳)$$

که در آن، α_t، β_t، γ_t، μ_t و λ_t ضرایب انتشار متناظر با هر یک از فناوری‌های مبتنی بر سوخت فسیلی، و $\hbar_t$، پارامتر ساعات استفاده در سال است که بر اساس اطلاعات مربوط به حداقل ساعات کارکرد مطمئن هر یک از انواع واحدها در طی سال‌های گذشته تخمین زده می‌شود [۴]. حل مدل حاصل، در قالب یک مسئله بهینه سازی گسسته، غیرخطی، پویا و مقید، با استفاده از یکی از جدیدترین روش‌های ابتکاری، تحت عنوان الگوریتم جستجوی گرانشی انجام می‌شود. بخش بعد به معرفی و بیان سازوکار این الگوریتم می‌پردازد.

۴. الگوریتم جستجوی گرانشی

الگوریتم جستجوی گرانشی[1] یا به اختصار، GSA، یک الگوریتم وابسته به هوش جمع و البته بدون حافظه است. به عبارت دیگر هیچ یک از عامل‌ها موقعیت قبلی خود را به خاطر نمی‌سپارد. این الگوریتم با الگوبرداری از قوانین گرانش و حرکت عوامل در یک سامانه مصنوعی در زمان گسسته طراحی شده است که در آن، فضای سامانه همان محدوده تعریف مسئله است. در این الگوریتم مجموعه‌ای از اجرام، فضا را به صورت تصادفی جستجو کرده و از نیروی جاذب به عنوان ابزاری جهت تبادل اطلاعات استفاده می‌کنند، به طوری که هر جرم (عامل) از طریق تأثیر نیروی سایر اجرام به درک تقریبی از فضایی پیرامون خود می‌رسد. با تنظیم جرم عامل‌ها، که با توجه به تابع هدف مسئله تعیین می‌شود، موقعیت اجرام با گذشت زمان بهبود پیدا می‌کند. ازاین‌رو تمام عامل‌ها متناسب با جرمشان بر روی یکدیگر تأثیر می گذارند که این اثر بر روی عامل‌های همسایه بیشتر از عامل‌های دیگر است. بعد از تشکیل فضای سامانه که مشتمل بر یک دستگاه مختصات چند بعدی در فضای مسئله است، قوانین حاکم بر آنکه شامل قوانین حرکت و گرانش می‌باشند، تعریف می‌گردد. بدین ترتیب در یک سامانه با N جرم، موقعیت هر جرم، نقطه‌ای از این فضاست و جوابی از مسئله محسوب می‌شود [۲۶]. موقعیت در بُعد d از جرم i با x_i^d نشان داده می‌شود و طبق رابطه (۱۴) بیان می‌گردد:

$$X_i = (x_i^1, ..., x_i^d, ..., x_i^n) \quad \forall i = 1, 2, ..., N \qquad (۱۴)$$

که در آن، n بُعد مسئله است. حال هر عامل به صورت تصادفی در یک نقطه از فضای جستجو قرار می‌گیرد سپس اندازه و مقدار نرمالایز شده جرم هر یک از آن‌ها با توجه به تابع هدف مسئله طبق روابط (۱۵ و ۱۶) تعیین می‌شود.

$$m_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \qquad (۱۵)$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^{N} m_j} \qquad (۱۶)$$

در روابط فوق، $m_i(t)$ و $fit_i(t)$ به ترتیب بیانگر اندازه جرم و مقدار برازندگی عامل iام در زمان یا تکرار t می‌باشند. $M_i(t)$ نیز مقدار نرمالیزه شده جرم عامل مورد نظر را نشان می‌دهد. مقادیر $best(t)$ و $worst(t)$ نیز به ترتیب نشان دهنده بهترین و بدترین مقدار برازندگی در کل جمعیت در زمان t هستند و با استفاده از روابط (۱۷ و ۱۸) تعیین می‌شوند. در این حالت مقدار نیروی وارده به هر جرم i از سوی جرم j در جهت بُعد d طبق روابط (۱۹ و ۲۰) به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود.

$$best(t) = \max\ fit_j(t) \quad \forall j \in \{1, 2, ..., N\} \qquad (۱۷)$$

$$worst(t) = \min\ fit_j(t) \quad \forall j \in \{1, 2, ..., N\} \qquad (۱۸)$$

$$F_{ij}^d = G(t)\frac{M_i(t).M_j(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon}(x_j^d(t) - x_i^d(t)) \qquad (۱۹)$$

$$R_{ij}(t) = \left\| x_i(t), x_j(t) \right\|^2 \qquad (۲۰)$$

در رابطه (۱۹) $G(t)$ ثابت گرانش در زمان t است که یک پارامتر مناسب برای کنترل توانایی‌های کاوش و بهره‌وری در این الگوریتم به شمار می‌رود. مقادیر بزرگ برای این پارامتر باعث تقویت توانایی کاوش الگوریتم و مقادیر کوچک آن باعث افزایش توانایی بهره‌وری الگوریتم می‌شود. از آنجا که در مراحل اولیه جستجو لازم است که الگوریتم به جستجوی نقاط جدیدی در فضا مسئله پرداخته و در مراحل پایانی باید با افزایش توان بهره‌وری به بهبود جواب‌های دیده-

[1] Gravitational Search Algorithm

شده بپردازد، گزینه مناسب برای ثابت گرانش آن است که با یک مقدار اولیه بزرگ شروع شده و با گذشت زمان مقدار آن کاهش یابد. در رابطه (۲۰) نیز $R_{ij}(t)$ فاصله اقلیدسی بین دو جرم i و j، و ε یک عدد بسیار کوچک است. بدین ترتیب کل نیروی وارد بر جرم i در بُعد d و زمان t برابر مجموع ضریب‌های تصادفی از تمام نیروهایی است که سایر اجرام سامانه بر این جرم وارد می‌کنند که با استفاده از رابطه (۲۱) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j\neq i}^{N} rand_j . F_{ij}^d(t) \qquad (۲۱)$$

طبق قانون دوم نیوتن، هر عامل در راستای بُعد d شتابی می‌گیرد که با نیروی وارد بر آن در راستای d متناسب و با جرم آن، رابطه عکس دارد و به صورت رابطه (۲۲) بیان می‌شود:

$$a_i^d = \frac{F_i^d(t)}{M_i(t)} \qquad (۲۲)$$

که در آن، a_i^d شتاب جرم در جهت بُعد d در زمان t است. سرعت هر جرم برابر مجموع ضریبی از سرعت فعلی جرم و شتاب جرم است که طبق رابطه (۲۳) تعریف می‌شود. همچنین موقعیت جدید هر عامل از مجموع موقعیت فعلی و سرعت آن طبق رابطه (۲۴) به‌دست می‌آید.

$$v_i^d(t+1) = rand_i \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \qquad (۲۳)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \qquad (۲۴)$$

در روابط (۲۱ و ۲۳) توابع $rand_i$ و $rand_j$ مربوط به تولید اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه [۱-۰] هستند که باعث حفظ خاصیت تصادفی روند جستجو می‌گردند. برای تنظیم ثابت گرانش نیز از رابطه (۲۵) استفاده می‌شود. طبق این رابطه ضریب گرانش به مرور زمان کاهش می‌یابد که شیب کاهشی آن بسته به مسئله مورد بررسی می‌تواند مقادیر مختلفی را به خود اختصاص دهد و تنظیم آن در بهبود عملکرد الگوریتم مؤثر خواهد بود.

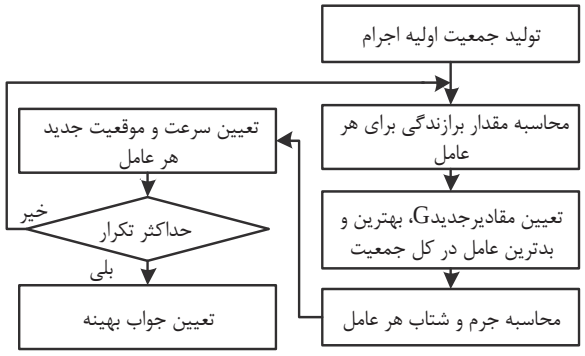
$$G(t) = G_0 . e^{-\beta \frac{t}{T}} \qquad (۲۵)$$

در رابطه (۲۵) G_0 و β ضرایب مثبت و ثابت و T بیانگر طول عمر سامانه یا تعداد کل تکرارهای در نظر گرفته‌شده است. بر اساس آنچه که در این بخش به آن اشاره شد، فلوچارت مربوط به الگوریتم جستجوی گرانشی در شکل (۳) نشان داده می‌شود.

در ادامه، گام‌های مربوط به عملکرد الگوریتم جستجوی گرانشی در حل مسئله بهینه‌سازی مورد نظر، به طور مختصر بیان می‌شود. به بیان دیگر، الگوریتم بعد از تنظیم پارامترهای ورودی توسط کاربر، طی گام های مزبور، به تعیین استراتژی بهینه توسعه از دید شرکت تولیدی مورد نظر، با توجه به محدودیت‌های در نظر گرفته‌شده می‌پردازد. در این مطالعه، به منظور دستیابی به عملکرد هرچه دقیق‌تر الگوریتم جستجوی گرانشی، طی چندین آزمایش بهترین پارامترهای ورودی سازگار با ساختار مسئله مورد نظر تعیین گردیده و در نهایت جواب‌های مربوط به بهترین حالت در اینجا آورده شده است. پارامترهای ورودی تنظیم شده در این حالت عبارت‌اند از: N=100, T=400, β=16, G_0=0.2.

گام‌های مذکور به شرح زیر است:

- گام اول: شناسایی فضای جستجو
- گام دوم: تولید جمعیت اولیه بین حداقل و حداکثر مقادیر مربوط به متغیرها مسئله بهینه‌سازی
- گام سوم: محاسبه مقدار تابع هدف متناظر با هر عامل برای مسئله برنامه‌ریزی توسعه
- گام چهارم: بروزرسانی مقادیر G، $best(t)$، $worst(t)$ و M_i برای تمام عامل‌ها
- گام پنجم: محاسبه مجموع نیروها در جهت‌های مختلف
- گام ششم: محاسبه شتاب و سرعت
- گام هفتم: بروزرسانی موقعیت هر عامل
- گام هشتم: تکرار گام‌های سوم تا هفتم مادامی که شرط توقف برآورده شود.
- گام نهم: تعیین جواب بهینه یافته شده در فضای تعریف شده



شکل ۳. فلوچارت الگوریتم جستجوی گرانشی [۲۶]

۵. شبیه‌سازی و ارائه نتایج

در این بخش به ارائه نتایج مربوط به برنامه‌ریزی توسعه تولید و ارزیابی اثرات آن‌ها بر ترم‌های در نظر گرفته شده در تابع رفاه اجتماعی، مطابق با دیدگاه‌های مطروحه در بخش ۲، پرداخته می‌شود؛ در این راستا، برنامه‌ریزی توسعه تولید طی دو سناریو، با و بدون در نظر گرفتن اثر سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد، شبیه‌سازی می‌شود. همچنین به منظور صحه‌گذاری بر قابل اعتماد بودن الگوریتم GSA در حل مسئله بهینه‌سازی مورد نظر، عملکرد آن از طریق شاخص انحراف معیار و آنالیز حساسیت، با الگوریتم ژنتیک مقایسه می‌گردد. با توجه به روابط (۴) و (۹)، به منظور انجام محاسبات با استفاده از روش ارزش فعلی، نرخ بهره برابر با ۵٪ برای یک افق ۲۰ساله (از ۲۰۱۴ تا ۲۰۳۳) در نظر گرفته می شود. اطلاعات مورد نیاز مانند روند تغییرات تقاضا، اطلاعات مربوط به سیاست حق انتشار، مانند قیمت و سقف انتشار مجاز، قیمت انرژی در بازار، هزینه تخمینی برای شاخص هزینه

اجتماعی کربن، و غیره، از مراجع اتخاذ می‌شوند[۴، ۱۹، ۲۱ و ۲۷].

کل ظرفیت تولید شرکت تولیدی در سال مبنا حدود ۶۳۰۰ (MW)، مشتمل بر واحدهای زغالی[1]، سیکل ترکیبی[2]، نفت خام[3]، بادی[4] و برق‌آبی[5] است. مجموع ۸ نوع فناوری تولیدی مختلف، اعم از واحدهای غیرتجدیدپذیر و تجدیدپذیر چون هسته‌ای[6]، زیست‌توده[7]، بیوگاز[8]، ضایعات (Waste)، و غیره، به عنوان واحدهای منتخب برای سرمایه‌گذاری در نظر گرفته می شوند. جدول‌های (۱) و (۲)، به ترتیب اطلاعات مربوط به ترکیب تولید در سال پایه، و اطلاعات مربوط به واحدهای منتخب را نشان می‌دهند.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به ترکیب تولید سال پایه

فناوری تولید	کل ظرفیت موجود (MW)	نرخ تولید (GWh)	میزان انتشار (t/year)
زغالی	۷۴۰	۴۴۴۰	۲۰۰۹۰۰۰
CCGT	۴۲۵۶	۲۱۲۸۰	۴۰۰۱۲۰۰
نفت خام	۷۴۰	۳۲۰۰	۱۳۵۰۹۵۱
آبی‌برق	۳۴۰	۱۳۰۰	-
بادی	۲۸۰	۴۸۰	-

جدول ۲. مشخصات فنی و اقتصادی واحدهای منتخب [۴]

نوع فناوری	هزینه تولید (€/MWh)	هزینه سرمایه‌گذاری (M€/MW)	ظرفیت (MW)	ساعات استفاده (H/year)
زغالی	۳۶/۹۶	۱	۶۰۰	۶۰۰۰
CCGT	۷۲/۴۶	۰/۴۷	۴۰۰	۵۰۰۰
هسته‌ای	۱۳/۹۵	۲/۵	۱۲۰۰	۷۸۰۰
آبی‌برق	۱۹/۶۷	۳	۱۰	۳۴۰۰
بادی	۴۴/۷۹	۱/۲	۱۰۰	۱۷۰۰
زیست‌توده	۱۴۶/۷۴	۲/۳۵	۲۰	۶۱۰۰
ضایعات	۵۸/۳۱	۴	۵۰	۵۰۰۰
بیوگاز	۲۷/۳۶	۱/۵	۱۰	۴۲۰۰

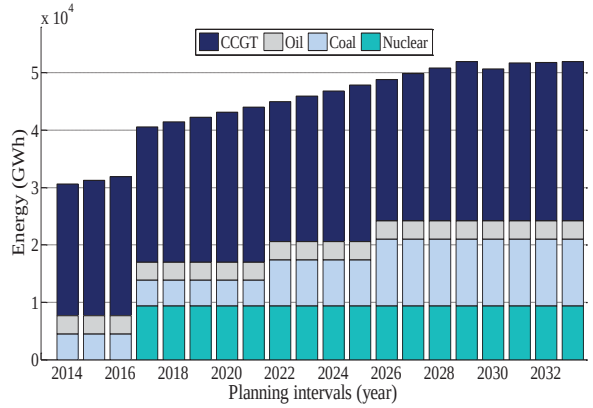
در ادامه، ابتدا نتایج حاصل از برنامه‌ریزی توسعه طی دو سناریو ارائه می‌شود. سناریو اول: برنامه‌ریزی توسعه تولید بدون در نظر داشتن سیاست تشویقی، و سناریو دوم: برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر داشتن سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد. سپس با توجه به نتایج به‌دست آمده از برنامه‌ریزی توسعه طی سناریوهای مزبور، ترم های تابع رفاه اجتماعی محاسبه، و در نهایت تغییرات کلی رفاه اجتماعی متأثر از ترویج و توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر مورد ارزیابی و بحث قرار می‌گیرد.

۵-۱. نتایج حاصل از برنامه‌ریزی توسعه طی سناریو اول

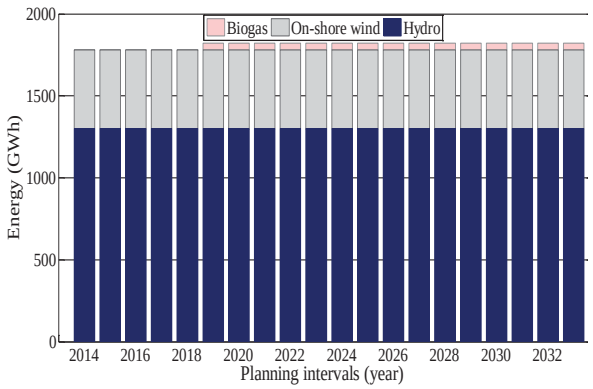
برای حذف اثر سیاست حق انتشار از مدل ارائه‌شده طی روابط (۴) تا (۷)، قیمت حق انتشار، π_i^{ER}، در رابطه (۶) برابر صفر قرار داده می‌شود. بر این اساس، جدول (۳) نتایج به‌دست آمده از برنامه‌ریزی توسعه، مبنی بر تعداد و نوع واحدهای منتخب، همراه با سال ورود هر واحد به ترکیب تولید را نشان می‌دهد؛ شکل‌های (۴) و (۵) نیز، به ترتیب، رفتار تولید انرژی مربوط به هر یک از واحدهای متعارف و تجدیدپذیر، اعم از واحدهای جدید و موجود، را نشان می‌دهند.

جدول ۳. نتایج برنامه‌ریزی توسعه تولید طی سناریو اول

فناوری تولید	تعداد واحدها	سال ورود
زغالی	۲	۲۰۲۲-۲۰۲۶
CCGT	۴	۲۰۱۱-۲۰۱۵-۲۰۲۰-۲۰۲۹
هسته‌ای	۱	۲۰۱۷
بیوگاز	۱	۲۰۱۹



شکل ۴. رفتار تولید انرژی مربوط به واحدهای متعارف طی سناریو اول



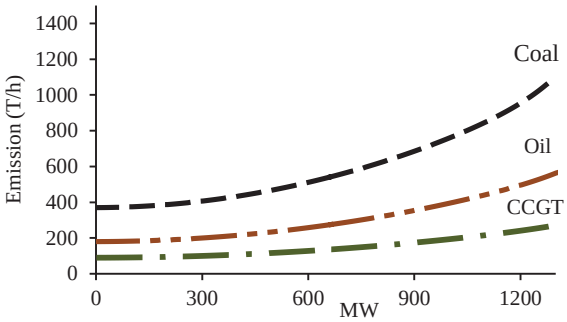
شکل ۵. رفتار تولید انرژی مربوط به واحدهای تجدیدپذیر طی سناریو اول

[1] Coal
[2] CCGT
[3] Oil
[4] On-Shore Wind
[5] Hydro
[6] Nuclear
[7] Biomass
[8] Biogas

با توجه به جدول (۳)، نتایج حاصله حاکی از عدم تمایل شرکت تولیدی در سرمایه‌گذاری بر روی واحدهای مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر است؛ به طوری که طی سناریو اول، تنها یک واحد بیوگاز از سال ۲۰۱۹ به ترکیب واحدهای تجدیدپذیر موجود اضافه می‌شود. توجه داشته باشید که در مورد واحدهای تجدیدپذیر فرض بر این است که به هنگام بهره‌برداری همواره در حداکثر ظرفیت خود قرار می‌گیرند.

۵-۲. نتایج حاصل از برنامه‌ریزی توسعه طی سناریو دوم

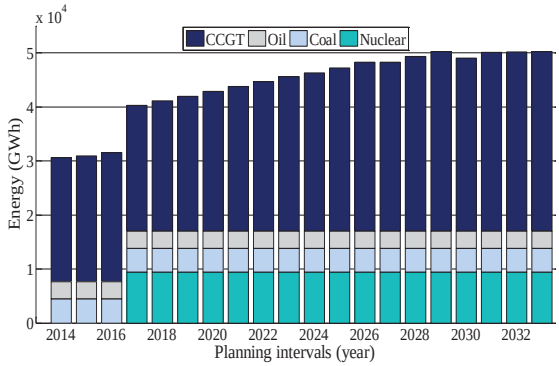
در این بخش به ارائه نتایج حاصل از سناریو دوم پرداخته می‌شود. در مورد این سیاست، فرض می‌شود که قیمت هر حق انتشار به صورت خطی از ۱۵/۰۸(€/t) در سال اول برنامه‌ریزی به ۳۶/۷۰ (€/t) در سال بیستم از افق توسعه افزایش می‌یابد. مادامی که سقف انتشار مجاز مربوط به شرکت تولیدی نیز به صورت خطی، از ۷/۶ (Mt/year) در ابتدای افق برنامه‌ریزی به ۷/۱۵ (Mt/year) در انتهای افق توسعه کاهش می‌یابد. بر این اساس، با در نظر گرفتن مدل‌های انتشار نشان داده شده در شکل (۶) برای هر یک از واحدهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، جدول (۴) نتایج برنامه‌ریزی را بر اساس تعداد، نوع، و سال ورود واحدهای جدید اضافه شده به ترکیب تولید سال مبنا را نشان می دهد. چگونگی تولید انرژی توسط هر یک از انواع واحدهای متعارف و تجدیدپذیر نیز به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده‌اند.



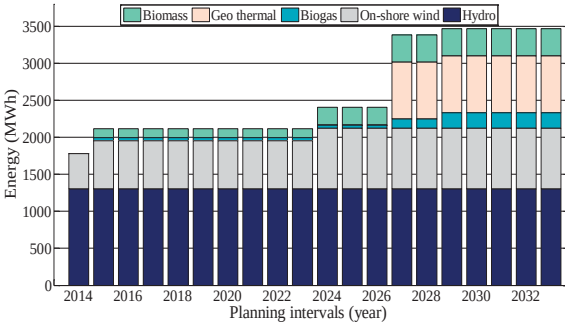
شکل ۶. مدل انتشار هر یک از واحدهای مبتنی بر سوخت فسیلی [۲۵]

جدول ۴. نتایج برنامه‌ریزی توسعه تولید طی سناریو اول

فناوری تولید	تعداد واحدها	سال ورود
CCGT	۶	۲۰۱۴-۲۰۱۶-۲۰۲۰-۲۰۲۲-۲۰۲۵-۲۰۲۷
هسته‌ای	۱	۲۰۱۷
بادی	۲	۲۰۱۵-۲۰۲۴
زمین گرمایی	۱	۲۰۲۷
زیست‌توده	۳	۲۰۱۵-۲۰۲۴-۲۰۲۷
بیوگاز	۵	۲۰۱۵-۲۰۲۷-۲۰۲۷-۲۰۲۹-۲۰۲۹



شکل ۷. رفتار تولید انرژی مربوط به واحدهای متعارف طی سناریو دوم



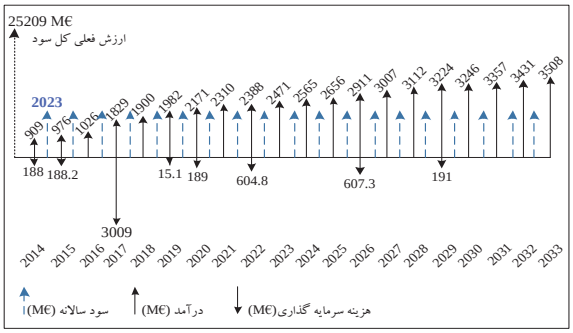
شکل ۸. رفتار تولید انرژی مربوط به واحدهای تجدیدپذیر طی سناریو دوم

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تحت سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد، هیچ واحد زغالی به ترکیب تولید سال پایه در طول افق توسعه اضافه نشده است. توجه داشته باشید که این واحدها بیشترین میزان انتشار آلایندگی را در بین سایر دیگر واحدهای مبتنی بر سوخت های فسیلی را دارا می‌باشند. این امر به خوبی اثر اعمال محدودیت از سوی سیاست مورد نظر را نشان می‌دهد. اما آنچه که جایگزین این واحدهای در ترکیب تولید شده است، نه منابع انرژی تجدیدپذیر به طور قابل توجه، بلکه واحدهای سیکل ترکیبی می‌باشند؛ به طوری که در پایان افق توسعه، شش واحد ۴۰۰ مگاواتی سیکل ترکیبی در ترکیب تولید مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. با این وجود، می‌توان گفت که محدودیت‌های ایجادشده مربوط به انتشار بخش تولید (با توجه به میزان انتشار سال پایه و حد مجاز انتشار در طول افق برنامه‌ریزی) باعث شده است که شرکت تولیدی در برخی از سال‌ها، سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر را بر خرید حق انتشار ترجیح دهد. به طوری که ترکیب تولید در این سناریو، نسبت سناریو اول، از مشارکت بیشتر منابع انرژی تجدیدپذیر برخوردار است. به بیانی کامل‌تر، با توجه به ترکیب تولید در سال پایه و میزان انتشار آن‌ها در طول سال از یکسو، و سقف انتشار مجاز تخصیص‌یافته به شرکت تولیدی و شیب کاهشی آن از سوی دیگر، پر واضح است که در سال های ابتدایی دهه‌ی دوم افق توسعه، ترکیب تولید شرکت تولیدی با انتشاری بیش از حد مجازش روبرو خواهد بود، حتی اگر هیچ واحد متعارف دیگری تا آن مرحله از برنامه‌ریزی به ترکیب تولید سال مبنا اضافه نگردد. بدین ترتیب شرکت تولیدی ناچار به خرید حق انتشارهای اضافی و یا سرمایه‌گذاری بر روی واحدهای تجدیدپذیر خواهد بود؛ این امر می‌تواند کاهش سود (رفاه) شرکت تولیدی را به دنبال داشته باشد که در بخش‌های بعدی به این موضوع پرداخته می‌شود.

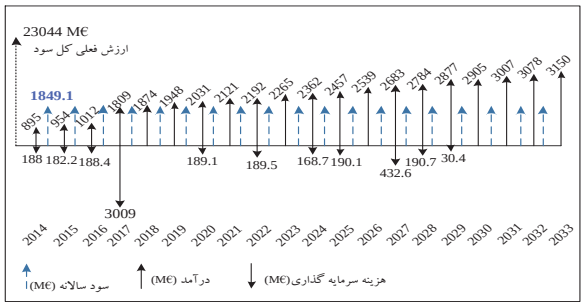
۵-۲. ارزیابی رفاه اجتماعی متأثر از ترویج منابع تجدیدپذیر

در این بخش به ارزیابی ترم‌های در نظر گرفته شده برای تابع رفاه اجتماعی در چهارچوب مورد نظر پرداخته می‌شود. در این راستا، مطابق با ترم‌های معرفی شده طی رابطه (۲)، در ابتدا رفاه شرکت تولیدی که همان سود حاصل از تولید و فروش انرژی است، بررسی می‌شود. برای درک بهتر اثر ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر تحت سیاست تشویقی مورد نظر، دیاگرام جریان نقدی شرکت تولیدی طی هر دو سناریو برنامه‌ریزی در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.

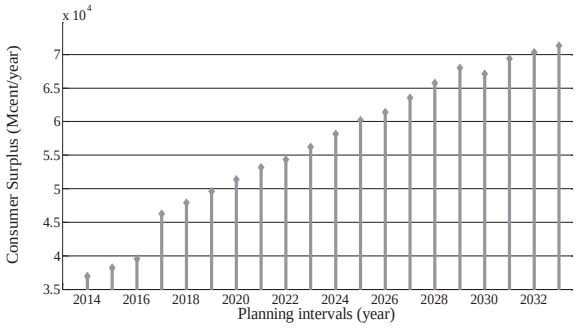
همان‌طور که مشاهده می‌شود، ارزش فعلی سود شرکت تولیدی، یعنی تفاضل سایر هزینه‌ها و درآمدها در سال پایه، برابر با ۲۵۲۰۹ (M€) خواهد بود. به تبع، میزان سود سالانه دریافتی به صورت یکنواخت، با توجه به طول کل دوره برنامه‌ریزی و نرخ بهره در نظر گرفته‌شده، مقداری برابر با ۲۰۲۳ (M€) خواهد داشت. این در حالی است که تحت اعمال سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد، سود سالانه شرکت تولیدی برابر با ۱۸۴۹/۱ بوده که نسبت به سناریو اول به میزان ۱۷۴ (M€) کاهش داشته است. کل ارزش فعلی سود شرکت تولیدی در سناریو دوم توسعه نیز برابر با ۲۳۰۴۴ (M€) است. این امر به‌خوبی مبین این است که سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد، می‌تواند با اعمال محدودیت انتشار و تحت تأثیر قرار دادن تصمیمات سرمایه‌گذاری شرکت تولیدی، باعث کاهش رفاه تولیدکننده گردد. حال آنکه مازاد رفاه مصرف‌کننده تحت این سیاست تغییری پیدا نمی‌کند. به بیان کامل‌تر، مطابق با رابطه (۲)، در ارزیابی ترم دوم تابع رفاه یعنی مازاد رفاه مصرف کننده، با توجه به سازوکار اجرایی سیاست تشویقی مورد نظر، هیچ هزینه‌ای متوجه مصرف کننده نیست. این در حالی است که تحت سیاست‌هایی تشویقی دیگر، چون سیاست حق تعرفه که در آن واحدهای تجدیدپذیر مستقیماً از سوی دولت تشویق‌های مالی دریافت می‌کنند، بارگذاری هزینه تشویق ها بر نهاد مصرف‌کننده می‌تواند به کاهش مازاد رفاه آن‌ها بیانجامد؛ ازاین‌رو می‌توان گفت که مقادیر مازاد رفاه مصرف‌کننده در سناریوهای در نظر گرفته شده در این مطالعه با یکدیگر برابر می‌باشند. بر این اساس، با توجه به قیمت در نظر گرفته شده برای هر واحد انرژی در طول افق برنامه‌ریزی، شکل (۱۱)، مقادیر مازاد رفاه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که به دلیل گستردگی بحث در مورد نحوه محاسبه مازاد رفاه مصرف کننده از توضیح آن در این مقاله اجتناب شده است. اطلاعات لازم دراین‌باره در مراجع [۲۰] موجود است.



شکل ۹. دیاگرام جریان نقدی شرکت تولیدی در سناریو اول

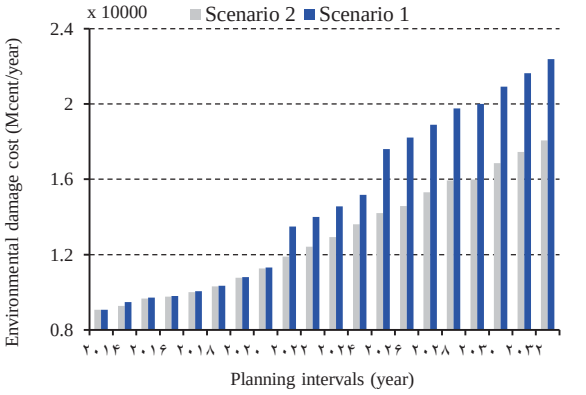


شکل ۱۰. دیاگرام جریان نقدی شرکت تولیدی در سناریو دوم



شکل ۱۱. مقادیر مازاد رفاه مصرف کننده به ازای هر دو سناریو برنامه‌ریزی

بر اساس مقادیر نشان داده شده در شکل (۱۱)، ارزش فعلی مازاد رفاه مصرف کننده برابر با ۶۹۹۷۲۰ (M€) است که نسبت به سود شرکت تولیدی، از مقدار قابل توجهی برخوردار می‌باشد. آخرین ترم از تابع رفاه اجتماعی که به صورت اقتصادی در این مطالعه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، خسارت‌های زیست‌محیطی به بار آمده از آلاینده‌های گازی انتشاریافته توسط بخش تولید است. بدین منظور با استفاده از شاخص هزینه اجتماعی کربن که در بخش دوم مقاله به آن اشاره شد، و نیز مدل‌های انتشار در نظر گرفته شده در شکل (۶)، می‌توان به محاسبه میزان خسارت‌های ناشی شده طی هر یک از سناریوهای در نظر گرفته شده پرداخت. بنابراین، با توجه به میزان مشارکت هر یک از این واحدها در تأمین تقاضا و هزینه اجتماعی کربن متناظر با هر یک از سال‌های توسعه، شکل (۱۲) میزان خسارت‌های برآورد شده، طی هر یک از سناریوهای برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد.



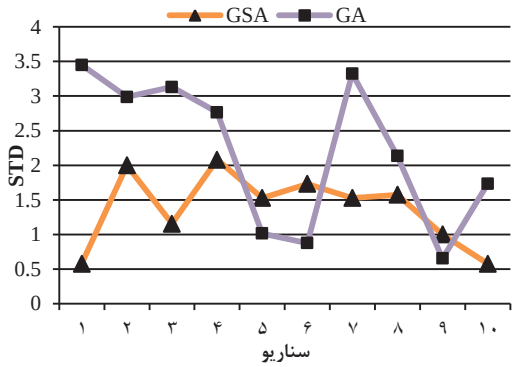
شکل ۱۲. هزینه معادل با خسارت‌های زیست‌محیطی طی سناریو اول و دوم

همان‌طور که مشاهده می‌شود، سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد توانسته است با محدود کردن میزان انتشار، تأثیر قابل توجهی در کاهش هزینه‌های متناظر با خسارت‌های زیست‌محیطی داشته باشد. به طوری که ارزش فعلی کل خسارت‌های به بار آمده در طول افق توسعه از ۱۷۸۴۹۰ (M€) در سناریو اول، به ۱۵۹۵۵۰ (M€) در سناریو دوم کاهش یافته است. بدین ترتیب می‌توان گفت که ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر و اعمال محدودیت انتشار تحت سیاست مورد نظر، با کاهش هزینه‌های مربوطه به میزان ۱۸۹۴۰ (M€)، می‌تواند تأثیر بسزایی در ارتقاء رفاه اجتماعی داشته باشد. در گام آخر، برای ارزیابی تغییرات کلی تابع رفاه اجتماعی در نتیجه ترویج و توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر و اجرای سیاست‌های تشویقی، لازم است سایر ترم‌های رفاه اجتماعی در قالب تابع رفاه برگسون- ساموئلسون، با یکدیگر جمع گردند. با توجه به مقادیر ارزش فعلی به‌دست آمده برای هر یک از ترم‌های تابع رفاه، یعنی سود شرکت تولیدی، مازاد رفاه مصرف کننده و هزینه مربوط به خسارت‌های زیست‌محیطی طی هر یک از سناریوهای برنامه‌ریزی، مقادیر به‌دست آمده برای تابع رفاه اجتماعی (مجموع سایر ترم‌ها) برابر با ۵۴۶۴۳۹ (M€) در سناریو اول، و ۵۶۳۲۱۴ (M€) به ازای سناریو دوم است. بنابراین می‌توان گفت که ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر تحت سیاست تشویقی حق انتشار با قابلیت دادوستد، علی‌رغم کاهش رفاه تولید کننده، می‌تواند با کاهش خسارت‌های زیست‌محیطی، تأثیر مثبت در ارتقاء رفاه کل جامعه داشته باشد. در ادامه، به منظور صحه‌گذاری بر توانایی و کارایی الگوریتم به‌کار گرفته شده در این مطالعه، به ارزیابی عملکرد آن پرداخته می‌شود.

۵-۳. ارزیابی عملکرد الگوریتم جستجوی گرانشی

در این بخش به‌منظور ارزیابی کارآمدی الگوریتم GSA در حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید از آنالیز حساسیت و شاخص انحراف معیار (STD) استفاده می‌شود [۵]. برای دستیابی به این منظور، مسئله بهینه‌سازی مورد نظر، یعنی مدل ارائه شده طی روابط (۱۳-۴)، به ازای تعداد قابل توجهی سناریو، مبنی بر در نظر گرفتن تقاضای تقاضا به صورت متغیر، با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی حل می‌شود. سپس شاخص انحراف معیار برای مقادیر برازندگی (ارزش فعلی سود شرکت تولیدی) مربوط به هر یک از حالت‌ها محاسبه می‌شود. جدول (۵)، ضرایب بار (LF) متناظر با سناریوهای تعریف شده و نیز مقادیر برازندگی به‌دست آمده از اعمال الگوریتم جستجوی گرانشی به سناریوهای مزبور را، طی ۳ بار اجرای برنامه، نشان می‌دهد. باید توجه داشت که ضرایب بار در نظر گرفته شده برای هر سناریو در تقاضای کل افق توسعه ضرب می‌گردد.

به منظور انجام مقایسه، سناریوهای مذکور با استفاده از الگوریتم ژنتیک نیز تکرار می‌شود. نتایج مربوط به تغییرات انحرافات معیار طی اعمال هر دو الگوریتم در شکل (۱۳) آمده است. بررسی نتایج حاصل از آنالیز حساسیت از طریق شاخص STD، حاکی از عدم وجود تغییرات زیاد در بین جواب‌های به‌دست‌آمده از اجرای الگوریتم GSA در مقایسه با روش GA، در برنامه‌ریزی توسعه تولید بوده که کارایی الگوریتم جستجوی گرانشی را در حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید، به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی مقید و پیچیده، نشان می‌دهد. به بیان دیگر، الگوریتم جستجوی گرانشی قادر به ردیابی دقیق‌تر جواب در پی تغییرات ایجاد شده بوده که خود دلیلی بر توانمندی این الگوریتم در تعیین جواب بهینه است.



شکل ۱۳. تغییرات شاخص STD طی ۱۰ سناریو مختلف الگوریتم GSA طی ۱۰ سناریو مختلف

جدول ۵. نتایج ارزیابی عملکرد

سناریو	LF	برازندگی طی اجراهای مختلف (M€)				
		اول	دوم	سوم	بهترین	STD
۱	۰/۷۳	۲۲۵۱۳	۲۲۵۱۳	۲۲۵۱۴	۲۲۵۱۴	۰/۵۷۷۴
۲	۰/۷۶	۲۲۶۷۷	۲۲۶۷۳	۲۲۶۷۵	۲۲۶۷۷	۲
۳	۰/۷۹	۲۲۷۴۲	۲۲۷۴۴	۲۲۷۴۲	۲۲۷۳۴	۱/۱۵۴۷
۴	۰/۸۱	۲۲۸۱۷	۲۲۸۲۰	۲۲۸۱۶	۲۲۸۲۰	۲/۰۸۱۷
۵	۰/۸۴	۲۲۸۸۱	۲۲۸۸۴	۲۲۸۸۳	۲۲۸۸۴	۱/۵۲۷۵
۶	۰/۸۷	۲۲۹۲۶	۲۲۹۲۶	۲۲۹۲۹	۲۲۹۲۹	۱/۷۳۲۱
۷	۰/۹۰	۲۲۹۷۲	۲۲۹۷۱	۲۲۹۷۴	۲۲۹۷۴	۱/۵۲۷۵
۸	۰/۹۳	۲۳۰۰۵	۲۳۰۰۷	۲۳۰۰۵	۲۳۰۰۷	۱/۵۷۴۷
۹	۰/۹۶	۲۳۰۳۱	۲۳۰۳۲	۲۳۰۳۰	۲۳۰۳۲	۱
۱۰	۰/۹۹	۲۳۰۴۲	۲۳۰۴۲	۲۳۰۴۱	۲۳۰۴۲	۰/۵۷۷۴

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله به ارزیابی جامع اثرات به بار آمده از ترویج و توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر بر کلیتی با عنوان رفاه اجتماعی در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه تولید پرداخته می‌شود. بدین منظور ابتدا با تشریح نحوه ارتباط منابع انرژی تجدیدپذیر با سایر ترم‌های در نظر گرفته شده برای تابع رفاه اجتماعی، یعنی رفاه تولید کنندگان انرژی، رفاه مصرف کنندگان انرژی، خسارت‌های زیست‌محیطی به بار آمده از انتشار آلاینده‌های مربوط به سوخت‌های فسیلی در بخش تولید، و امنیت انرژی از دیدگاه پدافند غیرعامل، ارزشمندی این منابع و اهمیت ترویج آن‌ها در کنار معضلات و راهکارهای ارائه شده بحث می‌شود. ضمن آنکه رفاه اجتماعی به صورت مجموع ترم‌های مزبور در قالب تابع رفاه برگسون- ساموئلسون، در نظر گرفته می‌شود. سپس، با ارائه یک مدل جامع برای برنامه‌ریزی توسعه تولید و لحاظ کردن اثر یکی از رایج‌ترین سیاست‌های تشویقی، با عنوان سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد، در آن، استراتژی‌های توسعه از دید یک شرکت تولیدی در طول یک افق ۲۰ساله، طی دو سناریو مختلف تعیین می‌گردند. مادامی‌که حل مسئله بهینه‌سازی مورد نظر، در قالب یک مسئله غیرخطی، مقید، گسسته و پویا، با به‌کارگیری یک الگوریتم کارآمد و جدید تحت عنوان الگوریتم جستجوی گرانشی انجام می‌گیرد. در انتها، اثر نتایج حاصل از برنامه‌ریزی توسعه بر سایر ترم‌های تابع رفاه اجتماعی و نیز بر مجموع ترم‌ها، یعنی رفاه اجتماعی، ارزیابی می‌گردد. علاوه بر این، به منظور صحه‌گذاری بر توانمندی الگوریتم به‌کار برده شده در این مطالعه، عملکرد آن در حل مسئله بهینه‌سازی مورد نظر، با عملکرد الگوریتم ژنتیک، از طریق آنالیز حساسیت مقایسه می‌شود. . بدین‌ترتیب می‌توان آشکارسازی اثر ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر در نتیجه اجرای سیاست حق انتشار با قابلیت دادوستد بر استراتژی‌های توسعه ظرفیت بخش تولید انرژی الکتریکی، خسارت‌های زیست‌محیطی به بارآمده از این بخش، و در نهایت بر رفاه اجتماعی، در کنار تبیین و تشریح اهمیت واحدهای تجدیدپذیر از دیدگاه امنیت انرژی و پدافند غیرعامل، و همچنین ارزیابی عملکرد یکی از جدیدترین روش‌های ابتکاری بهینه‌سازی در حل مسأله بهینه‌سازی برنامه‌ریزی توسعه تولید در قالب یک مسأله غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح را اهم دستاوردهای حاصل از مطالعه حاضر دانست که خلاصه آنها در ادامه ارائه می‌شود.

با توجه به چهارچوب ارائه شده، مشاهدات حاکی از آن است که ترویج و توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر، با وجود هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا، می‌تواند باعث بهبود رفاه اجتماعی شود. به بیانی کامل‌تر، ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه تولید تحت سیاست‌های تشویقی و اعمال محدودیت‌های زیست‌محیطی، می‌تواند با کاهش خسارت‌های زیست‌محیطی مربوط به انتشار آلاینده‌های بخش تولید، باعث ارتقاء سطح رفاه گردد؛ علی رغم آنکه، هزینه‌های اضافی ناشی شده از ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر و سیاست‌های تشویقی، می‌تواند کاهش رفاه تولید کننده (یا مصرف کننده) را به دنبال داشته باشد. در کنار آنچه که از اثرات منابع انرژی تجدیدپذیر بر رفاه تولیدکننده، مصرف کننده و خسارت های زیست‌محیطی به آن اشاره شد، پر واضح است که مواردی چون پراکندگی تولید، تنوع سبد انرژی، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، و در نهایت امنیت انرژی، نیز در زمره مزایایی قرار می‌گیرند که این منابع در راستایی تحقق اصول پدافند غیرعامل می‌توانند به دنبال داشته باشند که از دید رفاه در جامعه حائز اهمیت است. ازاین‌رو با توجه به نقش حیاتی سامانه‌های قدرت چه از دیدگاه استراتژیک نظامی و ملی، و چه از دیدگاه اجتماعی، می‌توان تدوین طرح‌های توسعه در بخش تولید را با در نظر داشتن منابع انرژی تجدیدپذیر و سیاست‌های مؤثر در توسعه آن‌ها، امری مهم برشمرد که با توجه به امکانات و تجهیزات موجود، می‌تواند در دستور کار آتی مسئولین قرار گیرد.

۷. مراجع

[1] Wang , X.; McDonald, J. "Modern Power Systems Planning"; McGraw-Hill Book Company, England, 1994.

[2] Kazeroonian, S. K. "Generation Expansion Planning Based on Constraint of Static Voltage Stability and Environmental Pollution"; MSc. Thesis, Shahid Bahonar University, Keraman, Iran, 2011.

[3] Namazi, H.; Fakoori, M. "Process for Detecting Passive Defence Acpects"; Department of Sustaining Human Resources, Central Education and Military Service Office, Iran, 2008.

[4] Careri, F.; Genesi, C.; Marannino, P.; Montagna, M.; Rossi, S.; Siviero, I. "Generation Expansion Planning in the Age of Green Economy"; IEEE T. Power Syst. 2011, 26, 2214-2223.

[5] Shayeghi, H.; Pirayeshnegab, A.; Jalili, A.; Shayanfar, H. "Application of PSO Technique for GEP in Restructured Power Systems"; J. Energ. Convers. Manage. 2009, 50, 2127-2135.

[6] Chen, Q.; Kang, C.; Xia, Q.; Zhong, J. "Power Generation Expansion Planning Model Towards Low-carbon Economy and Its Application in China"; IEEE T. Power Syst. 2010, 25, 1117-1125.

[7] Moghddas-Tafreshi, S.; Shayanfar ,H.; Saliminia Lahiji, A.; Rabiee, A.; Aghaei, J. "Generation Expansion Planning in Pool Market: A Hybrid Modified Game Theory and Particle Swarm Optimization"; J. Energ. Convers. Manage. 2011, 52, 1512-1519.

[8] Meza, J. L. C.; Yildirim, M. B.; Masud, A. S. M. "A Model for the Multiperiod Multiobjective Power Generation Expansion Problem". IEEE T. Power Syst. 2007, 22, 871–878.

[9] Fuss, S.; Szolgayova, J; Obersteiner, M.; Gusti, M. "Investment Under market and Climate Policy Uncertainty"; J. Appl. Energ. 2008, 85, 708–721.

[10] Mondol, J. D.; Koumpetsos, N. "Overview of Challenges, Prospects, Environmental Impacts and Policies for Renewable Energy and Sustainable Development in Greece"; J. Renew. Sust. Energ. Rev. 2013, 23, 431-442.

[11] Alishahi, E.; Moghaddam, M. P.; Sheikh-El-Eslami, M. K. "An Investigation on the Impacts of Regulatory Interventions on Wind Power Expansion in Generation Planning"; J. Energ. Policy 2011, 39, 4614-4623.

[12] Pereira, A. J.; Saraiva, J. T.; "Generation Expansion Planning (GEP)–A Long-term Approach Using System Dynamics and Genetic Algorithms (Gas)"; J. Energy 2011, 36, 5180-5199.

[13] Chen, S. L.; Zhan ,T. S.; Tsay, M. T. “Generation Expansion Planning of the Utility with Refined Immune Algorithm”; Elect. Power Syst. Res. 2006, 76, 251–258.

[14] Kagiannas, A. G.; Askounis, D. T.; Psarras, J. “Power Generation Planning: a Survey from Monopoly to Competition”; Int. J. Elect. Power 2004, 26, 413-421.

[15] He, Y.; Wang, L.; Wang, J. “Cap-and-Trade Vs. Carbon Taxes: A Quantitative Comparison from a Generation Expansion Planning Perspective”; J. Comput. Ind. Eng. 2012, 63,708-716.

[16] Kampa, M.; Castanas, E. “Human Health Effects of Air Pollution”; J. Environ. Pollut. 2008, 151, 362-367.

[17] Beard, L. M.; Cardell, J. B.; Dobson, I.; Galvan, F.; Hawkins, D.; Jewell, W.; Kezunovic, M.; Overbye, T. J.; Sen, P.; Tylavsky, D. J. “Key Technical Challenges for the Electric Power Industry and Climate Change”; IEEE T. Energy Conver. 2010, 25, 465-473.

[18] K. Protocol “United Nations Framework Convention on Climate Change”; Kyoto Protocol, Kyoto, (1997).

[19] EPA “Social Cost of Carbon”; http://www.epa.gov /climatechange/EPAactivities/economics/scc.html

[20] Varian, H. R. “Microeconomic Analysis”; Norton New York, 1992.

[21] Perdan, S.; Azapagic, A. “Carbon Trading: Current Schemes and Future Developments”; J. Energ. Policy 2011, 39, 6040-6054.

[22] Karbasian, M.; Abedi, S. “A Multiple Objective Nonlinear Programming Model for Site Selection of the Facilities Based on the Passive Defence Principles”; Int. J. Ind. Engineering & Production Research 2011, 22, 243-250.

[23] Jared, C.; Antoniazzi, M. M.; Jordao, A. E.; Silva, J. R.; Greven, H.; Rodrigues, M. T. “Parotoid Macroglands in Toad (Rhinella jimi): Their Structure and Functioning in Passive Defence”; J. Toxicon. 2009, 54, 197-207.

[24] Perloff, J. “Microeconomics”; 2nd ed. Reading, MA: Addison Wesley Longman, 2001.

[25] Farag, A.; Al-baiyat, S.; Cheng, T. C. “Economic Load Dispatch Multi Objective Optimization Procedures Using Linear Programming Techniques”; IEEE T. Power Syst. 1995, 10, 731-738.

[26] Rashedi, E.; Nezamabadi-Pour, H.; Saryazdi, S. “GSA: A Gravitational Search Algorithm”; J. Inform. Sci. 2009, 179, 2232-2248.

[27] Bianco, V.; Manca, O.; Nardini, S. “Electricity Consumption Forecasting in Italy Using Linear Regression Models”; J. Energy 2009, 34, 1413-1421.