برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر و طرح‌های حمایتی با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی

هادی صادقی[۱] **محسن محمدیان**[۲] **امیر عبدالهی**[۳] **مسعود رشیدی‌نژاد**[۴]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد - دانشکده‌ی فنی - دانشگاه شهید باهنر – کرمان – ایران
Hd.sadeghi65@yahoo.com

۲- استادیار - دانشکده‌ی فنی - دانشگاه شهید باهنر – کرمان – ایران
m.mohammadian@uk.ac.ir

۳- استادیار - دانشکده‌ی فنی - دانشگاه شهید باهنر – کرمان – ایران
a.abdollahi@uk.ac.ir

۴- استاد - دانشکده‌ی فنی - دانشگاه شهید باهنر – کرمان – ایران
mrashidi@uk.ac.ir

چکیده: در این مقاله، به بررسی اثر طرح‌های حمایتی در ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر در قالب برنامه‌ریزی توسعه تولید، ضمن در نظر داشتن محدودیّت‌های زیست‌محیطی پرداخته می‌شود. بدین منظور ابتدا یک مدل جامع، توأم با یکی از مرسوم‌ترین طرح-های حمایتی تحت عنوان FIT (Feed-In-Tariff) که مبتنی بر تشویق‌های مالی است، ارائه می‌شود؛ سپس با درنظر گرفتن یک محیط تجدید ساختاریافته، برنامه‌ریزی بهینه با حل مدل پیشنهادی از دید یک شرکت تولیدی تعیین می‌گردد. حل مسأله بهینه‌سازی حاصل با استفاده از یک روش جدید، تحت عنوان الگوریتم جستجوی گرانشی که مبتنی بر قوانین حرکت و جاذبه نیوتن می‌باشد، صورت می‌گیرد. نتایج بدست‌آمده از شبیه سازی حاکی از ضرورت اعمال طرح‌های حمایتی در گسترش منابع تجدیدپذیر در یک سطح قابل توجه و بدنبال آن کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از بخش تولید است.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی توسعه تولید، منابع تجدیدپذیر، طرح‌های حمایتی، محدودیّت‌های زیست‌محیطی

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۳/۱۹
تاریخ پذیرش مشروط : ۱۳۹۲/۶/۶
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۲/۱۰/۸
نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر مسعود رشیدی‌نژاد
نشانی نویسنده‌ی مسئول : کرمان – انتهای بلوار ۲۲ بهمن – دانشگاه شهید باهنر کرمان – دانشکده‌ی فنی – بخش برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

۱- مقدمه

امروزه با توجه به توسعه روزافزون کشورها، نیروی برق یک نیاز اساسی برای رشد اقتصادی بشمار می‌آید؛ بگونه‌ای که بدون توسعه شبکه‌های برق، رشد صنایع بعنوان مهمترین عامل توسعه کشورها متوقف می‌شود. از این‌رو، تأمین به‌موقع و به‌اندازه‌ی انرژی الکتریکی مورد نیاز مردم و صنایع، از مهمترین دغدغه‌های دولت‌هاست که علاوه بر نقش انکارناپذیر آن در توسعه اقتصادی و رفاه اجتماعی، نقش بسزایی در امنیّت ملّی نیز ایفا می‌کند [۱]. تجربه‌های جهانی و پژوهش‌های به انجام رسیده نشان می‌دهد که با اعمال برنامه‌ریزی دقیق و سیاست‌گذاری حساب‌شده می توان از بروز نابسامانی و اختلال در شبکه‌های قدرت و تأمین توان مورد تقاضا پیشگیری کرد.

از طرفی فعالیت‌های بشر برای تأمین امکانات رفاهی و تامین نیازهای زندگی و در نهایت بهبود کیفیت زیستی بطور مستقیم و غیر مستقیم بر محیط زیست اثر داشته‌است و چنانچه چاره-اندیشی نشود در دراز مدّت ممکن است نه تنها کیفیت زندگی را بهبود نبخشند بلکه آن را مختل نیز سازند. از جمله این فعالیت-ها، تولید برق با استفاده از سوخت‌های فسیلی می‌باشد که با تولید آلاینده‌هایی چون So_2، NO_x و CO_2 خسارت‌های فراوانی را به محیط زیست وارد می‌کند؛ بطوریکه سالانه هزاران نفر از ساکنین کره‌ی زمین، خصوصا در شهرهای صنعتی به سرطان-های مرتبط با آلودگی هوا دچار می‌شوند. از این حیث، در دهه-های اخیر، به موازات مسأله برنامه‌ریزی توسعه تولید، آلودگی‌های ناشی از تولید انرژی و نگرانی‌های حاصل از آن نیز بطور جدی مورد توجه قرار گرفته است [۲]. از این‌رو لازم است طراحان و سرمایه‌گذاران در برنامه‌ریزی‌های توسعه تولید، مسائل زیست‌محیطی یا استفاده از منابع جایگزین با سطح آلودگی پایین‌تر را مد نظر داشته باشند.

بر اساس آنچه که اشاره شد، 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 می‌باشد که در سال ۱۹۹۷ میلادی توسط بیش از ۱۶۱ کشور مختلف از سراسر دنیا به امضا رسید [۳]. بر اساس این پیمان، بسیاری از کشورهای صنعتی متعهد شدند که در طول یک دوره‌ی ۱۰ ساله، علاوه بر کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه خود به میزان ۵٪، کمک‌های مالی به کشورهای در حال توسعه را نیز در راستای ترویج استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، در دستور کار خود قرار دهند.

با افزایش نگرانی‌های زیست محیطی و نیز با توجه به محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی، منابع انرژی تجدیدپذیر بعنوان یکی از راهکارهای عملی مواجهه با موضوع انشار آلاینده‌های مربوط به بخش تولید و نیز کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، در سیستم‌های قدرت شناخته‌شده می‌باشند [۴]. ایجاد فرصت‌های شغلی و تولید انرژی بصورت خانگی، تامین توان بصورت مطمئن و بدون وابستگی به مسائل مربوط به تغییرات جهانی قیمت سوخت یا واردات آن، جلوگیری از افزایش دمای کره‌ی زمین، کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهبود سطح سلامت جامعه‌ی بشری، از دیگر مزایایی بشمار می‌روند که گسترش منابع انرژی تجدیدپذیر به‌همراه دارد. موضوع اساسی که در این میان کمتر مورد توجه قرار گرفته است مشکلات فنی و اقتصادی برخاسته از ویژگی‌های منابع انرژی تجدیدپذیر است که در ادامه به بعضی از این موارد به‌طور مختصر اشاره می‌شود [۵]:

- عدم قطعیت و همراه بودن عملکرد این منابع با ریسک ناشی از وابسته بودن سطح تولید به شرایط محیطی و جغرافیایی
- ناچیز بودن میزان توان خروجی در مقایسه با نیروگاه‌های متعارف (واحدهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی)
- هزینه سرمایه‌گذاری بالا و طولانی بودن طول دوره مربوط به بازگشت سرمایه
- نیاز به تعریف قوانین و محیط رقابتی جدید برای شرکت در بازارهای برق
- داشتن تأثیر منفی بر سطح قابلیت اطمینان در صورت عدم برنامه‌ریزی صحیح
- افزایش هزینه‌ی مربوط به تامین بار پیش‌بینی‌شده ناشی از بوجود آمدن یک فاصله زمانی بین تقاضای پیش‌بینی‌شده و توان تأمین‌شده توسط این منابع، مادامی که خروجی این منابع با سطح تقاضا در آن زمان انطباق نداشته باشد.

به‌منظور رویارویی با مشکلات مزبور، راهکارهای مختلف اقتصادی و فنی ارائه شده‌است که در مرجع [۵] کاملا مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بین موارد برشمرده‌شده، بالا بودن هزینه سرمایه‌گذاری و بلند بودن طول دوره‌ی مربوط به بازگشت سرمایه با توجه به سطح پایین تولید، از جمله عواملی هستند که مانع از سرمایه‌گذاری شرکت‌های سرمایه‌گذار و اختصاص بودجه قابل توجه به این منابع در برنامه‌ریزی‌های توسعه می‌گردند. از این‌رو طرح‌های حمایتی مختلفی برای تشویق سرمایه‌گذاران در ترویج منابع مبتنی بر انرژی‌های نو و تأمین درصد بیشتری از

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

تقاضا با استفاده از این منابع، توسط دولت در کشورهای مختلف تدوین شده‌است [۶]. لذا با در نظر داشتن تأثیر سیاست‌های تشویقی در گسترش منابع تجدیدپذیر، می‌توان گفت لحاظ کردن اثر آنها در انجام یک برنامه‌ریزی دقیق و مقیّد به محدودیّت‌های زیست‌محیطی، ضروری است. در این راستا پژوهش‌های متعدّدی در قالب مقالات مختلف انجام شده‌است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود.

در مرجع [۷] پیشگیری از انتشار آلاینده‌های جوّی توسط بخش تولید بعنوان یک ضرورت در عصر اقتصاد سبز و کم کربن معرفی می‌شود و از این دیدگاه برنامه‌ریزی توسعه بعنوان یک راهبرد عملی برای کاهش انتشار آلودگی تلقّی می‌گردد. اقتصادی‌ترین طرح‌های سرمایه‌گذاری در برنامه‌ریزی توسعه، برای بهره‌برداری از تکنولوژی‌های مختلف، ضمن در نظر داشتن شاخص‌های زیست‌محیطی و قابلیت اطمینان در مرجع [۸] ارزیابی شده‌است. مدلی جامع برای توسعه تولید در یک محیط نیمه تجدید ساختاریافته، با در نظر گرفتن همزمان رفاه اجتماعی، نرخ ترکیب سوخت، قابلیت اطمینان و محدودیّت انتشار در برنامه‌ریزی توسعه، در مرجع [۹] ارائه می‌شود. در مرجع [۱۰] مداخله‌ی کافی سیاست‌های تشویقی در برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر امری ضروری معرفی می‌شود. اثر طرح‌های حمایتی مختلف بر تصمیمات سرمایه‌گذاری در راستای ترویج منابع تجدیدپذیر به موازات واحدهای تولیدی متعارف، با در نظر داشتن اثرات زیست‌محیطی نیز در [۱۱] مورد بحث قرار می‌گیرد. در مرجع [۱۲]، کارآمدی سیاست‌های مختلف مبتنی بر تشویق‌های مالی در کاهش ریسک سرمایه‌گذاری و روند گسترش منابع تجدیدپذیر، در قالب مسأله برنامه‌ریزی توسعه تولید بررسی می‌شود.

در مقاله پیش‌رو، یک مدل جامع برای برنامه‌ریزی توسعه تولید با مشارکت منابع انرژی تجدیدپذیر در کنار واحدهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی ارائه می‌شود. برنامه‌ریزی در یک محیط تجدید ساختاریافته با افق زمانی میان‌مدت، ضمن در نظر داشتن محدودیّت مربوط به انتشار آلاینده‌های گازی صورت می‌گیرد. همچنین به منظور ترغیب شرکت‌های تولیدی در سرمایه‌گذاری بر بروی منابع انرژی تجدیدپذیر، یکی از مرسوم‌ترین طرح‌های حمایتی مبتنی بر تشویق‌های مالی با مدل مزبور ترکیب شده‌است. در نهایت برای حل مدل منتجه، از یک الگوریتم ابتکاری جدید، مبتنی بر قوانین حرکت و جاذبه نیوتن، تحت عنوان الگوریتم جستجوی گرانشی استفاده می‌گردد ؛ارزیابی کارآمدی الگوریتم مزبور تیز، با مقایسه عملکرد آن با الگوریتم انبوه ذرات (PSO) در حل مسأله بهینه‌سازی مورد نظر صورت می‌گیرد.

به‌منظور پوشش کامل مطالب، بخش‌های بعدی مقاله بدین ترتیب در نظر گرفته می‌شوند؛ مروری اجمالی بر مرسوم‌ترین طرح‌های حمایتی که امروزه در بسیاری از کشورهای اروپایی اجرا می‌شوند در بخش دوم ارئه می‌گردد و بخش سوم به معرفی و بیان سازو کار الگوریتم جستجوی گرانشی می‌پردازد. بخش چهارم به ارائه مدل در نظر گرفته شده و بیان قیود مربوطه اختصاص می‌یابد و نتایج بدست آمده از آن در برنامه‌ریزی توسعه نیز همراه با تحلیل نتایج در بخش پنجم گردآوری می‌شود. در نهایت نتیجه گیری و ارائه پیشنهادها در بخش ششم ارائه می‌شود.

۲- طرح‌های حمایتی (سیاست‌های تشویقی)

در این بخش به معرفی برخی از رایج‌ترین طرح‌های حمایتی، که در بسیاری از کشورها به منظور گسترش بکارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر در تأمین تقاضا اجرا می‌شوند، پرداخته می‌شود. طرح‌های مزبور بر اساس نوع تعهّد و ضوابطی که بر اساس آنها طراحی می‌گردند، بطور کلی به دو دسته‌ی مبتنی بر مقدار و مبتنی بر قیمت تقسیم می‌شوند که در ادامه سه نمونه از مرسوم‌ترین آنها معرفی می‌شود [۱۳].

- Feed-in-tariff، حق تعرفه یا حق بیمه یکی از پرکابردترین طرح‌هایی است که امروزه در ترویج منابع تجدیدپذیر بکار می‌رود. این نوع تشویق مبتنی بر قیمت بوده و در آن نهاد تنظیم‌کننده یا دولت، طی یک قرارداد با طول دوره مشخص متعهّد می‌شود که به هر یک از منابع انرژی تجدیدپذیر بسته به نوع فناوری، یک مبلغ مشخص بعنوان تشویق، مازاد بر قیمت بازار یا حق بیمه، به‌ازای هر واحد توان تولیدی پرداخت نماید. از جمله ویژگی‌های این طرح، مشخص بودن میزان تشویق‌ها در هر یک از سال‌های قرارداد و نیز تضمین خرید کل توان تولیدی از این واحدها در تمام طول دوره قرارداد می‌باشد. بدین ترتیب در این نوع تشویق، مبلغی که شرکت سرمایه‌گذار یا شرکت تولیدی به ازای هر مگاوات ساعت توان تولیدشده توسط منابع تجدیدپذیر دریافت می‌کند، از متغیرهای اقتصادی مانند تورم یا تغییرات قیمت بازار ناشی از نوسان قیمت سوخت در بازارهای جهانی مصونیّت دارد که این امر موجب کاهش ریسک سرمایه‌گذاری بر روی این نوع از منابع می‌گردد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

• Quota obligation یا تعهّد در سهم، یکی دیگر از رایج‌ترین سیاست‌های تشویقی است. این طرح مبتنی بر مقدار توان تولیدی بوده و بر اساس آن هر شرکت تولیدی متعهّد می‌شود درصد مشخصی از توان را با استفاده از منابع تجدیدپذیر تامین نماید. به بیان دیگر در این نوع طرح، به‌ازای تولید انرژی با استفاده از واحدهای متعارف، هر تولیدکننده‌ی توان باید مقدار مشخصی تولید نیز با استفاده از منابع تجدیدپذیر، در برنامه‌ی تولیدی خود داشته‌باشد. در برابر این تعهّد، هر شرکت تولیدی به‌ازای میزان توان تامین‌شده با استفاده از منابع تجدیدپذیر، اوراق بهادار دریافت می‌کند که در بازار برق در بین سایر تولیدکنندگان قابل خرید و فروش خواهد بود. قابل خرید و فروش بودن تشویق در این نوع طرح، با ساختار رقابتی بازار برق انطباق بیشتری دارد که این امر در کشورهایی که از یک فضای رقابتی کامل برای تولید و فروش برق برخوردار می‌باشند، موجب ارجعیّت این طرح حمایتی نسبت به FIT، از دید بازار و مکانیزم عرضه و تقاضا، می‌گردد.

• Emission trading یا حق انتشار با قابلیت داد و ستد، از دیگر طرح‌های مبتنی بر مقدار برای ممانعت از میزان انتشار غیرمجاز و به‌نوعی ترویج منابع مبتنی بر انرژی‌های نو می‌باشد. در این طرح، ابتدا یک حد مجاز (تن بر ساعت) برای میزان انتشار هر نهاد تولیدی، با توجه به میزان تولید توان مربوطه و حد مجاز کلی انتشار برای بخش تولید، توسط نهاد تنظیم‌کننده مشخص می‌شود. حال حق انتشار مشخص‌شده می‌تواند توسط نهادی که کمتر از حد مجاز خود آلودگی تولید کرده‌است (تولید توان با بکارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر داشته‌است) به نهادی که میزان انتشار آن از حد مجازش تخطی کرده‌است فروخته شود. مجموع حق انتشارهای صادرشده باید کمتر یا برابر با حد مجاز کلی باشد که منجر به حفظ میزان انتشار در یک سطح قابل قبول و لذا گسترش منابع انرژی تجدیدپذیر برای فراهم کردن امکان فروش حق انتشار می‌گردد.

۳- الگوریتم جستجوی گرانشی

الگوریتم جستجوی گرانشی (Gravitational Search Algorithm یا GSA)، یک الگوریتم وابسته به هوش جمع و البته بدون حافظه است. به عبارت دیگر هیچ یک از عامل‌ها موقعیّت قبلی خود را به خاطر نمی سپارد. این الگوریتم با الگو برداری از قوانین گرانش و حرکت عوامل در یک سیستم مصنوعی در زمان گسسته طراحی شده است که در آن، فضای سیستم همان محدوده‌ی تعریف مسأله است. در این الگوریتم مجموعه‌ای از اجرام، فضا را بصورت تصادفی جستجو کرده و از نیروی جاذبه به عنوان ابزاری جهت تبادل اطلاعات استفاده می‌کنند؛ بطوری 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 مسأله تعیین می شود، موقعیت اجرام با گذشت زمان بهبود پیدا می‌کند. از این‌رو تمام عامل‌ها متناسب با جرمشان بر روی یکدیگر تأثیر می‌گذارند که این اثر بر روی عامل‌های همسایه بیشتر از عامل‌های دیگر است. بعد از تشکیل فضای سیستم که مشتمل بر یک دستگاه مختصات چند بعدی در فضای مسأله است، قوانین حاکم بر آن که شامل قوانین حرکت و گرانش می باشند تعریف می‌گردد. بدین ترتیب در یک سیستم با N جرم، موقعیّت هر جرم، نقطه‌ای از این فضاست و جوابی از مسأله محسوب می شود [۱۴]. موقعیّت در بُعد d از جرم i با x_i^d نشان داده می شود و طبق رابطه (۱) بیان می‌گردد:

$$X_i = (x_i^1, ..., x_i^d, ..., x_i^n) \quad \forall i = 1, 2, ..., N \qquad (۱)$$

در رابطه فوق n بُعد مسأله است. حال هر عامل بصورت تصادفی در یک نقطه از فضای جستجو قرار می‌گیرد سپس اندازه و مقدار نرمالایز شده‌ی جرم هر یک از آنها با توجه به تابع هدف مسأله طبق روابط (۲) و (۳) تعیین می‌شود:

$$m_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \qquad (۲)$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^{N} m_j} \qquad (۳)$$

در روابط فوق $m_i(t)$ و $fit_i(t)$ به ترتیب بیانگر اندازه‌ی جرم و مقدار برازندگی عامل iام در زمان یا تکرار t می‌باشند. $M_i(t)$ نیز مقدار نرمالیزه شده‌ی جرم عامل مورد نظر را نشان می‌دهد. مقادیر $best(t)$ و $worst(t)$ نیز به ترتیب نشان دهنده‌ی بهترین و بدترین مقدار برازندگی در کل جمعیت در زمان t هستند و با استفاده از روابط (۴) و (۵) تعیین می‌گردند. در این حالت مقدار نیروی وارده به هر جرم i از سوی جرم j در جهت بُعد d طبق روابط (۶) و (۷) بصورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$best(t) = \max fit_j(t) \quad \forall j \in \{1, 2, ..., N\} \qquad (۴)$$

$$worst(t) = \min fit_j(t) \quad \forall j \in \{1, 2, ..., N\} \qquad (۵)$$

$$F_{ij}^d = G(t) \frac{M_i(t).M_j(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \qquad (۶)$$

$$R_{ij}(t) = \left\| x_i(t), x_j(t) \right\|^2 \qquad (۷)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

در رابطه (۶) $G(t)$ 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 مسأله پرداخته و در مراحل پایانی باید با افزایش توان بهره-وری به بهبود جواب‌های دیده‌شده بپردازد، گزینه مناسب برای ثابت گرانش آن است که با یک مقدار اولیّه بزرگ شروع شده و با گذشت زمان مقدار آن کاهش یابد.

در رابطه (۷) 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 در زمان t برابر مجموع ضریب‌های تصادفی از تمام نیروهایی است که سایر اجرام سیستم بر این جرم وارد می-کنند که با استفاده از رابطه (۸) بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j\neq i}^{N} rand_j . F_{ij}^d(t) \qquad (۸)$$

طبق قانون دوم نیوتن، هر عامل در راستای بُعد d شتابی می-گیرد که با نیروی وارد بر آن در راستای d متناسب و با جرم آن، رابطه عکس دارد و بصورت رابطه (۹) بیان می‌شود:

$$a_i^d = \frac{F_i^d(t)}{M_i(t)} \qquad (۹)$$

در رابطه فوق 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 (۱۰) تعریف می‌شود؛ همچنین موقعیت جدید هر عامل از مجموع موقعیت فعلی و سرعت آن طبق رابطه (۱۱) بدست می‌آید.

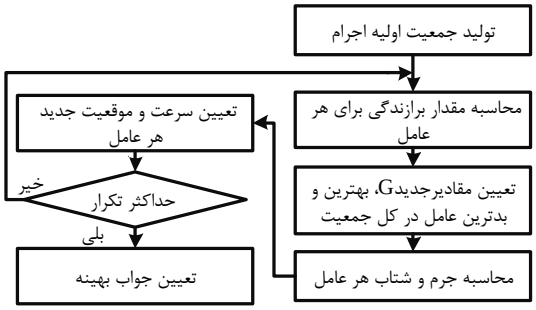
$$v_i^d(t+1) = rand_i \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \qquad (۱۰)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \qquad (۱۱)$$

در روابط (۸) و (۱۰) توابع $rand_j$ و $rand_i$ 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 (۱۲) استفاده می‌شود. طبق این رابطه ضریب گرانش به مرور زمان کاهش می‌یابد که شیب کاهشی آن بسته به مسأله مورد بررسی می‌تواند مقادیر مختلفی را به خود اختصاص دهد و تنظیم آن در بهبود عملکرد الگوریتم موثر خواهد بود.

$$G(t) = G_0 . e^{-\beta \frac{t}{T}} \qquad (۱۲)$$

در رابطه فوق G_0 و β ضرایب مثبت و ثابت و T بیانگر طول عمر سیستم یا تعداد کل تکرارهای در نظر گرفته شده می‌باشد. باید توجه داشت که تنظیم دو پارامتر G_0، بعنوان ثابت اولیه و β بعنوان شیب کاهشی می‌توانند تاثیر بسزایی در کارایی الگوریتم داشته باشند. شکل (۱) فلوچارت مربوط به این الگوریتم را نشان می‌دهد.



شکل (۱): فلوچارت الگوریتم جستجوی گرانشی

۴- مدل‌سازی برنامه‌ریزی توسعه تولید

مبنی بر تعقیب اهداف مختلف در گسترش بکارگیری منابع مبتنی بر انرژی‌های نو در قالب تولیدات پراکنده، دیدگاه‌های مختلفی چون کاهش تلفات، بهبود تراکم، قابلیت اطمینان و غیره، در مدل‌های برنامه‌ریزی توسعه تولید دنبال شده‌است؛ به بیانی کامل‌تر، در ساختار سنتی صنعت برق، به‌دلیل واحد بودن نهاد تصمیم‌گیرنده در سایر بخش‌های این صنعت، دیدگاه‌های فوق، اهم اهداف برنامه‌ریزی توسعه را، در کنار حداقل‌کردن سایر هزینه‌ها، شامل می‌شوند [۱۸-۱۵]. لیکن، رخداد تجدید ساختار و ایجاد رویکردهای بازار محور برای ایجاد یک محیط رقابتی، تاثیر بسزایی بر روی مسائل برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت از جمله برنامه‌ریزی توسعه تولید داشته‌است؛ بطوریکه با تفکیک بخش‌های مختلف صنعت برق به چندین نهاد مجزا و تعریف فضای رقابتی، برنامه‌ریزی توسعه بهینه بر اساس حداکثر ساختن سود به ازای رعایت یک‌سری قیود، توسط نهادهای تولیدی انجام می‌شود؛ این امر اساس تمایز بین مدل‌های ارائه‌شده برای توسعه، در دو محیط سنتی و تجدید ساختاریافته را شامل می‌شود. از طرفی با توجه به توسعه روزافزون منابع انرژی تجدیدپذیر، متأثر از مواردی چون تدوین و اجرای طرح‌های حمایتی در کنار محدودیت‌های زیست‌محیطی، ترکیب مدل‌های امروزی برنامه‌ریزی توسعه با موارد مطروحه اجتناب‌ناپذیر به‌نظر می‌رسد؛

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

از این‌رو در این مطالعه مدلی سازگار با این محتوا برای برنامه‌ریزی توسعه تولید در نظر گرفته شده‌است.

در این بخش به ارائه یک مدل جامع برای برنامه‌ریزی توسعه تولید، مقیّد به محدودیّت‌های مختلف بویژه محدودیّت انتشار، با مشارکت منابع انرژی تجدیدپذیر و تشویق‌های مالی مبتنی بر FIT پرداخته می‌شود. برنامه‌ریزی توسعه با در نظر گرفتن محیط رقابتی از دیدگاه یک شرکت سرمایه‌گذار که با داشتن امکان سرمایه‌گذاری بر روی فناوری‌های مختلف مربوط به واحدهای تولیدی بدنبال حداکثر سود ممکن است، انجام می‌پذیرد. به‌منظور مقاسیه طرح‌های سرمایه‌گذاری مختلف در سال پایه، با توجه به کل بودجه در دسترس، از روش ارزش فعلی در محاسبه‌ی درآمد و هزینه‌ها استفاده می‌گردد. در ادامه، تابع هدف و قیود در نظر گرفته شده به شرح زیر ارائه می‌شود.

۴-۱- 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 می‌باشد. بودجه سرمایه‌گذاری‌شده در هر دوره، به حداکثر بار پیشبینی شده مربوط به هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی، قیمت بازار، تشویق‌های در نظر گرفته‌شده متناظر با هر یک از فناوری‌های تجدیدپذیر، سطح انتشار مجاز و نوع فناوری‌های منتخب و موجود برای توسعه بستگی دارد. بر این اساس تابع هدف مسأله بصورت زیر بیان می‌گردد.

$$Max:\left\{\sum_{y=1}^{N^y}(1+i)^{1-i}\left(\pi_y E_y^T-\sum_{t\in Z_y^{ex}}GC_{y,t}E_{y,t}^{ex}+\sum_{t\in Z_y^{new}}(\pi_{y,t}^{FIT}-GC_{y,t})E_{y,t}^{new}-\mathrm{I}_{y,t}CP_tN_{y,t}^u\right)\right\} \quad (۱۳)$$

در رابطه فوق i نرخ بهره، y شاخص سال، π_y قیمت هر مگاوات ساعت انرژی در بازار، متناظر با سال y، E_y^T کل انرژی فروخته شده (تولید شده) توسط شرکت تولیدی مورد نظر در سال مربوطه، t شاخص مربوط به نوع فناوری، GC هزینه تولید هر واحد انرژی، $E_{y,t}^{ex}$ کل انرژی تولیدی توسط واحدهای موجود در سال y از نوع t، $E_{y,t}^{new}$ انرژی تولیدی توسط واحدهای جدید مورد بهره‌برداری از سال y و نوع t، I هزینه سرمایه‌گذاری اولیّه، CP_t ظرفیت واحد نوع t و $N_{y,t}^u$ تعداد واحدهای تولیدی از نوع t است که از سال y مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. Z^{ex} و Z^{new} به ترتیب مجموعه واحدهای موجود در حال بهره‌برداری و مجموعه واحدهای جدیدی که از ابتدای همان سال جاری مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند می‌باشند. $\pi_{y,t}^{FIT}$ نیز مجموع تشویق‌های مالی متناظر با فناوری تجدیدپذیر و قیمت بازار را در سال مربوطه نشان می‌دهد.

بر این اساس، در رابطه (۱۳)، ترم اول معرف کل درآمد حاصل از فروش انرژی در سال مربوطه، ترم دوم مجموع هزینه‌های تولید متناظر، ترم سوم درآمد ناشی از انرژی تولیدی توسط واحدهای تجدیدپذیر منتخب و ترم چهارم معرف هزینه سرمایه‌گذاری مربوط به واحدهای جدید در سال مورد نظر می‌باشد.

۴-۲- قیود مسأله

به‌منظور تحقق هر چه بیشتر یک مدل کارآمد برای برنامه‌ریزی توسعه تولید، در این بخش علاوه بر قید مربوط به انتشار آلاینده‌های ناشی از واحدهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، قیود فنی و اقتصادی مختلفی به شرح ذیل در نظر گرفته می‌شوند.

- **قید تعادل انرژی**

این قید، متناظر با هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی، نشان دهنده‌ی تعادل بین انرژی فروخته شده و کل انرژی تولیدی توسط مجموعه واحدهای موجود و جدید می‌باشد. به بیان دیگر، واحدهای اضافه‌شده در هر مرحله (سال) از برنامه‌ریزی باید به نحوی انتخاب گردند که علاوه بر حداکثر کردن سود سرمایه‌گذار، تأمین تقاضای پیشبینی‌شده را نیز تضمین کنند. این قید بصورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$E_y^T=\sum_{t\in Z_y^{ex}}E_{y,t}^{ex}+\sum_{t\in Z_y^{new}}E_{y,t}^{new} \quad (۱۴)$$

- **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 بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\sum_{y=1}^{N^y}\sum_{t\in Z_y^{new}}(1+i)^{1-y}(\mathrm{I}_{y,t}CP_tN_{y,t}^u)\le In_{tot}^{bud} \quad (۱۵)$$

که در آن، In_{tot}^{bud} کل بودجه موجود در سال پایه را نشان می‌دهد.

- **قید محدودیّت ساخت تعداد واحدها**

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

زمان ساخت مربوط به واحدهای تولیدی، متناسب با نوع آنها، در عمل حداکثر تعداد واحدهایی که می‌توانند در طول یک دوره مشخص به بهره‌برداری برسند را محدود می‌کند. از این حیث در این مقاله با توجه به نوع فناوری‌های موجود و نیز ظرفیت تولید آنها برای هر نوع واحد تولیدی در طول افق برنامه‌ریزی، یک حد مشخص برای تعداد واحدهای انتخاب شده در هر مرحله از برنامه‌ریزی در نظر گرفته می‌شود که بصورت رابطه (۱۶) ارائه می‌گردد:

$$\begin{cases} 0 \le N^{u}_{y,t} \le N^{u^{\max}}_{y,t} \\ 0 \le \sum_{y=1}^{N^{y}} N^{u}_{y,t} \le W^{\max}_{t} \end{cases} \qquad (۱۶)$$

در رابطه فوق، $N^{u^{\max}}_{y,t}$ حداکثر تعداد واحدهای مجاز از نوع t است که می‌توانند در هر سال انتخاب گردند. همچنین در پایان افق توسعه، تعداد کل واحدهای انتخاب شده از هر فناوری در طول دوره برنامه‌ریزی نیز باید کوچکتر یا برابر با تعداد واحدهای در نظر گرفته‌شده در ابتدای برنامه‌ریزی، یعنی $W^{\max}_{t}$ باشد.

- **قید نرخ ترکیب سوخت**

در مسأله برنامه‌ریزی توسعه تولید انواع متنوعی از واحدهای تولیدی مبتنی بر سوخت‌های مختلف مانند زغال سنگ، گاز طبیعی، نفت و سوخت هسته‌ای در کنار سایر دیگر منابع مانند منابع بادی و خورشیدی وجود دارند که هر کدام برای تأمین دوره‌های خاصی از تقاضا، مناسب تلقّی می‌شوند. از این حیث، یک طرح بهینه برای توسعه، طرحی است که ترکیب مناسبی از سایر منابع در دسترس را شامل شود بگونه‌ای که به ازای کمترین هزینه، سایر دوره‌های بار شامل پایه، متوسط و حداکثر، به طور مطمئن تأمین گردند. بدین منظور لازم است مجموع ظرفیت واحدهای مناسب برای تأمین بار حداکثر (بار پیک) از درصد مشخصی از مجموع ظرفیت مربوط به واحدهای مناسب برای تامین بار پایه، بیشتر باشد. با توجه به توضیحات فوق قید نرخ ترکیب سوخت بصورت رابطه زیر در مدل برنامه‌ریزی توسعه تولید در نظر گرفته می‌شود که واحدهای جدید و موجود باید آن را برآورده سازند.

$$\sum_{t \in Z^{ex,base}_{y}} \xi N^{u}_{y,t} CP_{t} \le \sum_{t \in Z^{ex,peak}_{y}} N^{u}_{y,t} CP \qquad (۱۷)$$

در رابطه فوق، ζ نرخ ترکیب سوخت، و $Z^{ex,peak}_{y}$ و $Z^{ex,base}_{y}$ نیز مجموعه واحدهای موجود در سال y که به ترتیب برای تأمین بار حداکثر و پایه مناسب می‌باشند را نشان می‌دهند.

- **قید انتشار آلاینده‌های گازی**

تولید انرژی برق با استفاده از سوخت‌های فسیلی، باعث ورود آلاینده‌های مختلفی چون So_2، NO_x و بویژه CO_2، که بعد از بخار آب بیشترین درصد گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص می‌دهد، به جوّ می‌گردد. از این‌رو به منظور دستیابی به یک برنامه‌ریزی موثر در توسعه تولید از دیدگاه اجتماعی و زیست‌محیطی، میزان آلاینده‌های ناشی از بخش تولید باید در فرایند برنامه‌ریزی در نظر گرفته شوند. لذا شرکت‌های تولیدی موظفند میزان انتشار آلاینده‌های خود را در تمام طول دوره‌های برنامه‌ریزی کمتر از یک حد مشخص حفظ کنند.

در مقالات مختلف میزان انتشار واحدهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی با استفاده از توابع چند جمله‌ای یا نمایی یا ترکیبی از هر دو، بر حسب میزان توان تولیدی بیان شده‌است. در این مطالعه نیز، برای مدل‌کردن میزان انتشار واحدهای مختلف از ترکیب توابع چند جمله‌ای و نمایی استفاده می‌شود [۱۹]. بدین ترتیب قید محدودیّت انتشار بصورت زیر فرمول‌بندی می‌گردد:

$$\sum_{t}^{Z^{ex}_{y}} \left\{ \alpha_t + \beta_t P_{y,t} + \gamma_t P^{2}_{y,t} + \eta_t \exp(\mu_t P_{y,t}) \right\} \le EL^{\max} \qquad (۱۸)$$

در رابطه (۱۸) EL^{max} حداکثر میزان مجاز انتشار بر حسب تن بر ساعت، $P_{y,t}$ توان اکتیو تولیدی واحد نوع t در سال y (MW)، و α، β، γ، η و μ نیز ضرایب انتشار متناظر با هر یک از فناوری‌های تولید مبتنی بر سوخت‌های فسیلی می‌باشد.

۵- شبیه‌سازی و ارائه نتایج

در این بخش، نتایج مربوط به برنامه‌ریزی توسعه تولید در طول یک افق ۶ ساله ارائه می‌گردد. به منظور انجام محاسبات با استفاده از روش ارزش فعلی، نرخ بهره برابر با ۵٪ در نظر گرفته می‌شود. اطلاعات مربوط به واحدهای منتخب و نیز تشویق‌های مالی اختصاص داده‌شده به هر یک از واحدهای تجدیدپذیر بصورت حق بیمه به ترتیب از مراجع [۱۳] و [۶] اتّخاذ می‌شوند. کل بار سیستم در سال مبنا (سال قبل از شروع برنامه‌ریزی یا سال صفر) برابر با ۲۵۰۰ مگاوات بوده که توسط شرکت تولیدی مورد نظر با بکارگیری نیروگاه‌هایی مشتمل بر واحدهای با سوخت زغال سنگ، نفت خام، واحدهای سیکل ترکیبی و هسته‌ای تأمین می‌گردند [۲]. اطلاعات فنی و اقتصادی مربوط به ترکیب تولید متناظر با سال مبنا در جدول (۱)، و اطلاعات مربوط به بار پیش‌بینی‌شده و نیز قیمت بازار در هر یک از

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

سال‌های مربوطه نیز در جدول (۲) نشان داده شده‌است؛ جدول (۳) نیز مشخصات فنی و اقتصادی مربوط به منابع منتخب را نشان می‌دهد.

جدول (۱): اطلاعات مربوط به واحدهای موجود در سال مبنا [2]

فناوری تولید	هزینه تولید (€/MWh)	ظرفیت (MW)	تعداد واحدها	ساعات استفاده (H/year)	نرخ تولید (MW)
Coal	۳۳/۹۶	۴۰۰	۱	۶۰۰۰	۳۸۳
CCGT	۷۲/۴۶	۲۰۰	۱	۵۰۰۰	۱۹۶
Nuclear	۱۳/۹۵	۷۵۰	۲	۷۸۰۰	۱۴۵۱
Oil	۶۱/۱۴	۲۵۰	۲	۴۱۰۰	۴۳۱

جدول (۲): اطلاعات مربوط بار پیشبینی شده و قیمت برق [13]

سال	۱	۲	۳	۴	۵	۶
تقاضا(MW)	۳۷۰۰	۴۸۰۰	۶۱۰۰	۷۴۰۰	۸۳۰۰	۹۱۰۰
قیمت(€/MW)	۸۸/۷۵	۹۰/۲۵	۹۱/۶۳	۹۳	۹۴/۳۸	۹۵/۷۵

جدول (۳): مشخصات فنی و اقتصادی واحدهای منتخب [13]

نوع فناوری	هزینه تولید (€/MWh)	هزینه سرمایه گذاری (M€/MW)	ظرفیت (MW)	ساعات استفاده (H/year)
Coal	۳۶/۹۶	۱	۶۰۰	۶۰۰۰
CCGT	۷۲/۴۶	۰/۴۷	۴۰۰	۵۰۰۰
Nuclear	۱۳/۹۵	۲/۵	۱۲۰۰	۷۸۰۰
Hydro	۱۹/۶۷	۳	۱۰	۳۴۰۰
Wind	۴۴/۷۹	۱/۲	۱۰۰	۱۷۰۰
Biomass	۱۴۶/۷۴	۲/۳۵	۲۰	۶۱۰۰
Waste	۵۸/۳۱	۴	۵۰	۵۰۰۰
Solar	۸۳/۵۳	۴	۱	۱۴۰۰

همانگونه که در جدول (۳) آمده‌است، اطلاعات مربوط به ساعات بکارگیری هر یک از انواع واحدها در کنار نرخ تولید هر واحد، حاصل از برنامه‌ریزی بهینه، تعیین‌کننده میزان انرژی است که واحد مربوطه می‌تواند در طول هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی به بازار توان عرضه کند. با اشاره به مرجع [۱۳]، پارامتر «ساعات استفاده»، بکاررفته در این مطالعه، مبتنی بر مواردی چون طول دوره تعمیرات سالانه مربوط به هر یک از انواع فناوری‌های تولید (واحدهای متعارف)، نرخ خروج اجباری، و نوسانات تولید با توجه به منابع انرژی غیر قابل توزیع (nondispatchable sources)، می‌باشد. این پارامتر می‌تواند در مورد هر یک از انواع واحدها، با توجه به اطلاعات مربوط به بهره‌برداری آنها در طول سال‌های گذشته، بطور قابل قبولی تخمین زده شود. به طریق مشابه، با توجه به ماهیت واحدهای تجدیدپذیر از لحاظ عدم قطعیت و غیر قابل پیشبینی‌بودن میزان تولید آنها، بکارگیری این منابع در برنامه‌ریزی توسعه تولید می‌تواند با انتخاب یک مقدار مناسب برای پارامتر ساعات استفاده در سال، متناظر با هر نوع فناوری، صورت گیرد. به بیان دیگر، تخمین میزان تولید هر یک از انواع واحدهای تجدیدپذیر، با در نظر داشتن وابستگی سطح تولید به شرایط جغرافیایی (در بعضی از انواع فناوری‌های تجدیدپذیر در نظر گرفته‌شده) و عدم قطعیت مربوطه، در سایه مفهومی تحت عنوان ساعات استفاده، که با توجه به اطلاعات ثبت‌شده در سال‌های قبل، ساعات در دسترس‌بودن این منابع را در طول سال آتی مشخص می‌کند، محقق می‌گردد.

پارامتر مورد نیاز دیگری که لازم است قبل از انجام برنامه‌ریزی توسعه مشخص باشد میزان تشویق‌هایی است که به صورت حق بیمه از سوی نهاد تنظیم‌کننده یا دولت به هر یک از انواع منابع تجدیدپذیر تعلّق می‌یابد. بدیهیست میزان این تشویق‌ها و نیز طول دوره مشخص شده برای تأمین توان و بهره‌مندی از طرح‌های حمایتی، بسته به هزینه‌ی تولید و نیز طول عمر هر یک از واحدهای تجدیدپذیر متفاوت خواهد بود. در این مقاله مقادیر در نظر گرفته‌شده برای هر یک از انواع واحدهای تجدیدپذیر منتخب، بصورت حق بیمه و مازاد بر قیمت بازار در قالب طرح FIT، در جدول (۴) آورده شده‌است.

جدول (۴): ضمانت‌های در نظر گرفته شده بعنوان FIT (€/MWh)[6]

	سال‌های برنامه‌ریزی					
فناوری	۱	۲	۳	۴	۵	۶
Hydro	۳۱/۷۲	۲۹/۳۱	۳۶/۰۶	۳۵/۶۱	۳۱/۶۹	۴۲/۷۱
Wind	۲۸/۰۸	۲۸/۹۲	۳۷/۳۷	۳۶/۳۵	۳۵/۹۷	۴۲/۷۵
Biomass	۳۰/۵۴	۲۷/۸۷	۳۵/۱۷	۴۶/۷۱	۵۳/۰۶	۷۳/۱
Waste	۲۲/۶۵	۲۰/۲۹	۳۳/۱۸	۳۷/۴	۳۵/۸۴	۶۱/۱
Solar	۳۲۲/۵۲	۳۴۰/۴	۳۷۴/۰۶	۳۹۲/۱۴	۳۸۸/۷۴	۴۲۹/۳۳

لازم به یادآوری است که، علی‌رغم انطباق بیشتر طرح تشویقی تعهّد در سهم با ساختار رقابتی بازار و نیز روند قیمت‌گذاری بر اساس مکانیزم عرضه و تقاضا، این طرح در مقایسه با طرح حق تعرفه، تاثیر کمتری در ترویج منابع تجدیدپذیر دارد؛ به بیان دیگر، با توجه به اینکه هزینه‌های مربوط به طرح‌های تشویقی در نهایت بصورت مستقیم یا غیرمستقیم بر روی مصرف‌کنندگان تحمیل می‌شود، از حیث رقابت بازار و رفاه مصرف‌کنندگان، طرح تعهّد در سهم، نسبت به طرح حق تعرفه برتری دارد؛ چراکه در مکانیزم تشویقی حق تعرفه، میزان کمک‌های مالی مشخص و در طول یک دوره ثابت می‌باشد و هیچ رقابتی در آن تعریف نمی‌شود. این در حالیست که اگر معیار قیاس این دو طرح، میزان تاثیرگذاری بر ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر باشد به دلایلی چون کاهش ریسک

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.12- No.1 Spring & Summer 2015
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

سرمایه‌گذاری ناشی از مجزا بودن طرح مربوطه با شرایط بازار و غیره، طرح حق تعرفه تاثیر بیشتری در ترویج منابع تجدیدپذیر، و لذا در درک ضروری‌بودن پیاده‌سازی این طرح‌ها در چهارچوب سیاست‌های انرژی دارد. از این‌رو، با توجه به اهداف دنبال‌شده در این مطالعه، اثر این طرح حمایتی در گسترش تولیدات مبتنی بر انرژی‌های نو در برنامه‌ریزی توسعه، لحاظ شده‌است.

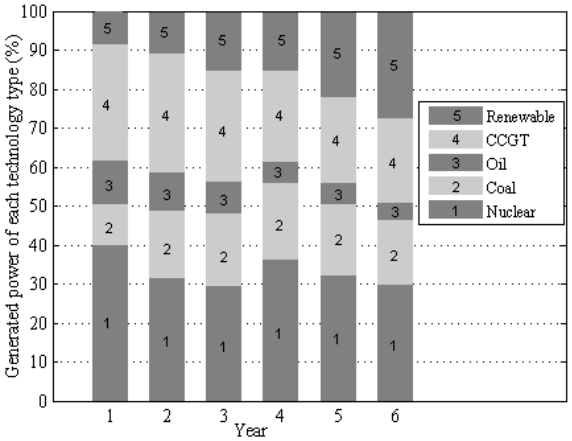
با در نظر گرفتن حد ۱۱۵۰۰ تن بر ساعت برای محدودیّت انتشار و ۸۵ میلیون دلار بعنوان کل بودجه موجود در سال مبنا، جدول (۵) نتایج بدست‌آمده از برنامه‌ریزی توسعه را بر اساس تعداد و نوع واحدهای منتخب و سال شروع بهره‌برداری، با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی نشان می‌دهد.

جدول (۵): نتایج برنامه‌ریزی توسعه تولید

سال	فناوری	Coal	CCGT	Nuclear	Hydro	Wind	Biomass	Waste	Solar
۱	تعداد واحد	۰	۳	۰	۱	۳	۱	۰	۰
	تولید (MW)	۰	۹۱۵	۰	۱۰	۳۰۰	۲۰	۰	۰
۲	تعداد واحد	۱	۱	۰	۰	۱	۲	۱	۱
	تولید (MW)	۴۲۲	۱۰۹	۰	۰	۱۰۰	۴۰	۵۰	۱
۳	تعداد واحد	۱	۰	۱	۲	۳	۲	۱	۲
	تولید (MW)	۲۲۲	۰	۲۸۱	۲۰	۳۰۰	۴۰	۵۰	۲
۴	تعداد واحد	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۰
	تولید (MW)	۰	۰	۰	۰	۲۰۰	۰	۰	۰
۵	تعداد واحد	۰	۱	۰	۲	۴	۴	۴	۴
	تولید (MW)	۰	۸۱	۰	۲۰	۴۰۰	۸۰	۲۰۰	۴
۶	تعداد واحد	۰	۰	۰	۱	۴	۳	۴	۰
	تولید (MW)	۰	۰	۰	۱۰	۴۰۰	۶۰	۲۰۰	۰

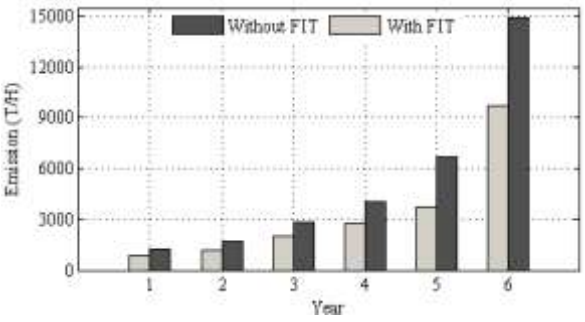
در مورد نتایج مندرج در جدول (۵) باید توجه داشت که در این مقاله فرض شده‌است که واحد تجدیدپذیر منتخب در طول دوره برنامه‌ریزی، همواره با حداکثر ظرفیت خود مورد بهره‌برداری واقع می‌گردند. درصد مشارکت هر یک از منابع منتخب در تامین بار مورد نیاز در هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی نیز در شکل (۲) نشان داده شده‌است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که سیاست‌های تشویقی و محدودیّت انتشار می‌توانند بطور مستقیم و غیر مستقیم، نحوه‌ی تصمیم‌گیری شرکت‌های تولیدی را در سرمایه‌گذاری و گسترش منابع تجدیدپذیر، تحت تأثیر قرار دهند. با توجه به میزان تقاضا در سال‌های ابتدایی افق توسعه و پایین بودن میزان انتشار نسبت به حد مجاز، نتایج حاصله، کم بودن تمایل شرکت تولیدی در سرمایه‌گذاری بر روی واحدهای تجدیدپذیر را نشان می‌دهد که این امر ناشی از کم بودن میزان تشویق‌ها در این سال‌ها در برابر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نیز پایین بودن سطح خروجی واحدهای تجدیدپذیر است. در مقابل، با توجه به جدول (۴)، در طول افق توسعه با افزایش ضمانت‌های FIT، سهم بیشتری از بار با استفاده منابع تجدیدپذیر تامین می‌شود. به بیان دیگر، بدون اعمال تشویق‌های کافی تنها، تعداد اندکی از فناوری‌های تجدیدپذیر در نظر گرفته شده از نظر اقتصادی ممکن است ارضا گردند که این امر منجر به کاهش سرمایه‌گذاری بر روی این منابع می‌گردد.

به منظور درک بهتر نقش طرح‌های حمایتی در ترویج منابع تجدیدپذیر و تاثیر این واحدها در کاهش میزان انتشار، برنامه‌ریزی توسعه بار دیگر به ازای حذف تشویق‌های مالی و نیز محدودیّت انتشار انجام شده است. میزان انتشار مربوط به هر دو حالت برنامه‌ریزی توسعه در شکل (۳) و تعداد واحدهای تجدیدپذیر انتخاب شده برای سرمایه‌گذاری در طرح توسعه، بدون اعمال FIT نیز در جدول (۶) نشان داده شده‌است.



شکل (۲): درصد تولید هر یک از منابع در سال‌های برنامه‌ریزی

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol12- No.1 Spring & Summer 2015
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]



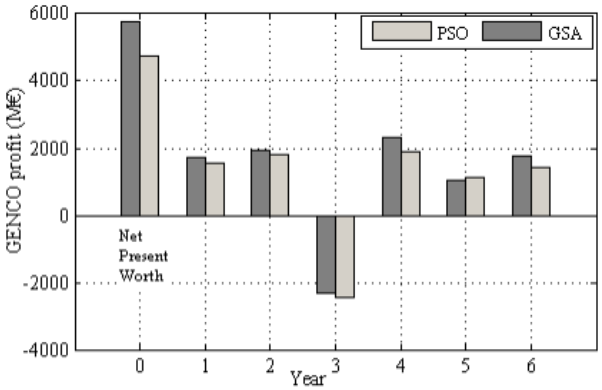
شکل (۳): میزان انتشار در هر دو حالت برنامه‌ریزی (تن بر ساعت)

جدول (۶): تعداد واحدهای تجدیدپذیر بدون در نظرگرفتن FIT

	سال‌های برنامه‌ریزی					
فناوری	۱	۲	۳	۴	۵	۶
Hydro	۰	۰	۰	۰	۱	۱
Wind	۱	۱	۱	۰	۲	۲
Biomass	۰	۱	۱	۰	۰	۱
Waste	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Solar	۰	۰	۰	۰	۰	۰

مقایسه تعداد واحدهای تجدیدپذیر منتخب در هر دو حالت برنامه‌ریزی، کم بودن تمایل سرمایه‌گذاری بر روی این نوع از منابع را نشان می‌دهد که از هزینه‌ی اولیّه بالا و سطح تولید کم مربوط به این منابع ناشی می‌شود. با توجه به شکل (۳) نیز واضح است که با کاهش سهم منابع تجدیدپذیر در تامین تقاضا، میزان انتشار در اثر افزایش مشارکت واحدهای متعارف در تأمین بار بیشتر خواهد بود.

برای ارزیابی توانمندی الگوریتم بکارگرفته‌شده در حل مسأله بهینه‌سازی مورد نظر در این مقاله، عملکرد این الگوریتم با الگوریتم انبوه ذرات مقایسه می‌شود. بدین منظور، با اعمال الگوریتم انبوه ذرات به مدل ارائه‌شده در بخش چهار، بار دیگر برنامه‌ریزی توسعه تولید انجام می‌شود. پارامترهای اولیه مربوط به الگوریتم انبوه ذرات نیز از مرجع [۲۰] اتخاذ می‌شود. بدین ترتیب شکل (۴) مقادیر بدست‌آمده برای تابع هدف (سود شرکت تولیدی)، متناظر با هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی، با استفاده از دو الگوریتم مورد نظر را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست‌آمده بعنوان سود ناشی از سرمایه‌گذاری شرکت تولیدی (ارزش فعلی کل سود دوره برنامه‌ریزی در سال صفر) می‌توان گفت که الگوریتم جستجوی گرانشی جواب بهینه‌تری را نسبت به الگوریتم انبوه ذرات بدست داده‌است. شایان ذکر است که بر خلاف الگوریتم جستجوی گرانشی، الگوریتم انبوه ذرات، یک الگوریتم حافظه‌دار بوده که در آن هر ذره از اطلاعات گذشته خود و اطلاعات مربوط به بهترین ذره در رسیدن به موقعیت بهتر سود می‌برد [۲۱]؛ این امر می‌تواند پیچیدگی محاسبات و کندی روند جستجو را بدنبال داشته‌باشد.



شکل (۴): سود شرکت تولیدی در طول سال‌های برنامه‌ریزی بدست‌آمده از الگوریتم انبوه ذرات و الگوریتم جستجوی گرانشی

لازم به ذکر است که در شکل (۴)، مقادیر داده‌شده در سال صفر، مجموع ارزش فعلی سودهای بدست‌آمده از هر دو روش در سایر سال‌های برنامه‌ریزی برای شرکت تولیدی است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر طرح‌های تشویقی در ترویج انرژی‌های نو، در قالب برنامه‌ریزی توسعه تولید، مقیّد به محدودیّت انتشار، در محیط تجدید ساختار یافته بررسی شده است. بدین منظور یکی از مرسوم‌ترین طرح‌های تشویقی تحت عنوان FIT یا حق تعرفه، در مدل برنامه‌ریزی توسعه در نظر گرفته می‌شود. حل مدل منتجه با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی که مبتنی بر قوانین گرانش و حرکت نیوتن است صورت می‌گیرد؛ کارایی الگوریتم مزبور در حل مسأله بهینه‌سازی مورد نظر، با مقایسه عملکرد آن با الگوریتم انبوه ذرات بررسی می‌شود. ارزیابی نتایج بدست‌آمده از برنامه‌ریزی واحدهای منتخب در طول افق توسعه و میزان آلودگی‌های انتشاریافته، حاکی از ضروری بودن طرح‌های حمایتی در گسترش منابع تجدیدپذیر در یک سطح قابل توجه است که علاوه بر مزایای مختلفی چون کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، باعث کاهش آسیب‌های وارده از بخش تولید به محیط زیست نیز می‌گردد. از این‌رو طراحی و اجرای سیاست‌های بهینه در گسترش انرژی‌های نو، باید به موازات تأمین تقاضای رو به رشد و توجه به مسائل زیست‌محیطی، در دستور کار نهادهای تنظیم‌کننده قرار گیرد.

در نظر گرفتن هزینه‌های ناشی از خسارت آلاینده‌های زیست‌محیطی در اثر انتشار بخش تولید و کاهش هزینه‌های مربوطه در اثر ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر و، بررسی این هزینه‌ها با هزینه مربوط به طرح‌های حمایتی می‌تواند در زمره‌ی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

مطالعاتی قرار گیرند که در این راستا حائز اهمیت بوده و می‌توانند در آشکارسازی هرچه بیشتر ضرورت ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر موثر واقع شوند.

مراجع

[۱] خراسانی، حمید، رشیدی‌نژاد، مسعود، "یک روش ترکیبی برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال نهم، شماره اول، ۱۳۹۱.

[2] Sirikum, J., Techanitisawad, A., "A new efficient GA-benders' decomposition method: For power generation expansion planning with emission controls", IEEE Trans on Power Systems, Vol. 22, No. 3, pp. 1092-1100, 2007.

[3] K. Protocol, United Nations framework convention on climate change, Kyoto Protocol, Kyoto, 1997.

[4] 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 Trans on Energy Conversion, Vol. 25, No. 4, pp. 465-473, 2010.

[5] Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y. Seyboth, K., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., von Stechow, C., Renewable energy sources and climate change mitigation: special report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, 2011.

[6] Barroso, L.A., Rudrick, H., Sensfuss,F., Linares, P., "The green effect", IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 8, pp. 22-35, 2010.

[7] Pereira, A.J., Saraiva, J.T., "A long term generation expansion planning model using system dynamics– Case study using data from the Portuguese/Spanish generation system", Electric Power Systems Research, Vol. 97, pp. 41-50, 2013.

[8] Chen, Q., Kang, C., Xia, Q., Zhong, j. "Power generation expansion planning model towards low-carbon economy and its application in China", IEEE Trans on Power Systems, Vol.25, NO. 2, pp.1117-1125. 2010.

[9] Kannan, S., Slochanal, S.M.R., Baskar, S., Murugan, P., "Application and comparison of metaheuristic techniques to generation expansion planning in the partially deregulated environment", IET generation, transmission & distribution, Vol. 1, No. 1, pp. 111-118, 2007.

[10] Martin, N.J., Rice, J.L., "Developing renewable energy supply in Queensland, Australia: A study of the barriers, targets, policies and actions" Renewable Energy, Vol. 44, pp. 119-127, 2012.

[11] Ding, J., Somani, A., "A long-term investment planning model for mixed energy infrastructure integrated with renewable energy", IEEE Green Technologies Conference, Vol. 22, pp. 1-10. 2010.

[12] Mondol, J.D., Koumpetsos, N., "Overview of challenges, prospects, environmental impacts and policies for renewable energy and sustainable development in Greece", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 23, pp. 431-442, 2013.

[13] Careri, F. Genesi, C., Marannino, P., Montagna, M., Rossi, S., Siviero, I., "Generation expansion planning in the age of green economy", IEEE Trans on Power Systems, Vol. 26, No. 4, pp. 2214-2223, 2011.

[14] Rashedi, E. Nezamabadi-Pour, H., Saryazdi, S., "GSA: a gravitational search algorithm", Information sciences, Vol. 179, No. 13, pp. 2232-2248, 2009.

[15] Tekiner, H., D. Coit, W., Felder, F. A., "Multi-period multi-objective electricity generation expansion planning problem with Monte-Carlo simulation" Electric Power Systems Research, Vol. 80, No. 12, pp. 1394-1405, 2010.

[16] Hemmati, R., Hooshmand, R.-A., Khodabakhshian, A., "Comprehensive review of generation and transmission expansion planning" Generation, Transmission & Distribution, IET, Vol. 7, No. 9, pp. 955-964, 2013.

[17] Becerra-López, H. R., Golding, P., "Multi-objective optimization for capacity expansion of regional power-generation systems: Case study of far west Texas", Energy Conversion and Management, Vol. 49, No. 6, pp. 1433-1445, 2008.

[18] Farghal, S., Abdel Aziz, M., "Generation expansion planning including the renewable energy sources" IEEE Trans on Power Systems, Vol. 3, No. 3, pp. 816-822, 1988.

[19] Farag, A., Al-Baiyat, S., Cheng, T., "Economic load dispatch multi objective optimization procedures using linear programming techniques", IEEE Trans on Power Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 731-738, 1995.

[20] Shayeghi, H., Pirayeshnegab, A., Jalili, A., Shayanfar, H., "Application of PSO technique for GEP in restructured power systems," Energy Conversion and Management, Vol. 50, No. 9, pp. 2127-2135, 2009.

[21] Aghashabani, M., Milimonfared, J., Kaviani, A. K., Ashabani, M., "A Neural Network-PSO Based Control for Brushless DC Motors for Minimizing Commutation Torque Ripple" Journal of Irainian Association of Electrical and Electronics Engineers,Vol. 7, No. 2, pp. 15-22, 2010.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol12- No.1 Spring & Summer 2015

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]