نشریه علمی‌پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی
سال هشتم، شمارهٔ چهارم/ زمستان ۱۳۹۷/ صفحه ۱۲ـ۲۷

تعیین استراتژی‌های بهینهٔ سرمایه‌گذاری در بخش تولید انرژی الکتریکی متأثر از سیاست‌های سبز با در نظر داشتن اثر رد در توربین‌های بادی

هادی صادقی[۱*]، علیرضا گهرگزی[۲]، مسعود رشیدی‌نژاد[۳]

[۱] دانشجوی دکتری و عضو انجمن پژوهشگران جوان، دانشکده فنی، بخش برق، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران
h.sadeghi@eng.uk.ac.ir
[۲] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت، سازمان آموزش فنی و حرفه‌ای، کرمان، ایران
a.gohargazi@gmail.com
[۳] استاد دانشکده فنی، بخش برق، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران
mrashidi@uk.ac.ir

چکیده: در مقالهٔ حاضر، به بررسی اثرات رایج‌ترین سیاست‌های انرژی سبز بر مؤلفه‌هایی چون میزان نفوذ واحدهای تجدیدپذیر (به‌خصوص واحدهای بادی)، خسارات زیست‌محیطی به‌بارآمده از انتشار آلاینده‌ها از بخش تولید، و رفاه سرمایه‌گذار در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید پرداخته می‌شود. در این راستا، با ترکیب سیاست‌های انرژی مورد نظر، یعنی سیاست‌های «حق تعرفه» و «تعهد در سهم با قابلیت دادوستد» با مسئلهٔ برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید، مدلی جامع به‌همراه قیود لازم برای شبیه‌سازی سیاست‌های مزبور ارائه می‌شود؛ در همین راستا، به‌منظور بهبود دقت مدل ارائه‌شده، اثر «رد توربین» در مزارع بادی منتخب برای توسعه نیز در مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در بستر نرم‌افزار بهینه‌سازی **GAMS** حاکی از اثربخشی سیاست‌های مزبور در افزایش درصد نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر و در نتیجه کاهش نسبی میزان انتشار است؛ مادامی که بار مالی آن‌ها می‌تواند باعث کاهش سود تولیدکنندگان انرژی گردد. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که در نظر داشتن اثر رد توربین‌های بادی در برنامه‌ریزی توسعه، با ایجاد امکان تخصیص بهینه‌تر بودجه به این واحدها، می‌تواند منجر به طرح‌های توسعهٔ بهینه‌تر و در عین حال واقعی‌تری گردد.

واژه‌های کلیدی: سیاست‌های انرژی، برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید، واحدهای بادی، اثر رد توربین، خسارت‌های زیست‌محیطی.

* نویسنده مسئول

۱. مقدمه

توسعهٔ شگرف علم و فناوری در جهان امروز، به‌ظاهر باعث آسایش و رفاه زندگی بشر شده است؛ لیکن این توسعه‌یافتگی، مایهٔ بروز مشکلات تازه‌ای نیز برای انسان‌ها شده است که از آن جمله می‌توان به آلودگی‌های زیست‌محیطی و تغییرات آب‌وهوایی اشاره کرد. بر همگان آشکار است که انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در بخش‌هایی چون بخش تولید انرژی الکتریکی، به‌عنوان عامل اصلی مشکلات مذکور، تهدیدی جدی برای ادامهٔ حیات بشر محسوب می‌شود. ازاین‌رو، طی سال‌های اخیر، دولت‌های مختلف در پی یافتن راهکارهایی برای مواجهه با این معضل جهانی، به هم‌اندیشی برآمده‌اند. در این میان، اجتناب‌ناپذیری مصرف انرژی الکتریکی و افزایش روزافزون تقاضا برای آن، بخش تولید را به یکی از حوزه‌های بسیار مهم برای بازنگری در مقررات، اعمال محدودیت‌ها و پیاده‌سازی راهکارها مبدل ساخته است. این امر باعث شده است که به‌موازات بحث برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید و تأمین تقاضای انرژی، امروزه بحث تغییرات آب‌وهوایی و مسائل زیست‌محیطی مربوط به آلاینده‌های گازی مختلف انتشاریافته از بخش تولید نیز در کانون توجه برنامه‌ریزان و مسئولان ذی‌ربط قرار گیرد [۱]. اشارهٔ دقیق‌تر به آنچه توجه جهانیان را به معضلات مزبور جلب کرده است، می‌تواند در درک هرچه بیشتر موضوع، مؤثر باشد.

گازهای گلخانه‌ای با تشدید اثر گلخانه‌ای و گرمایش جهانی زمین، مشکلات متعددی نظیر بالاآمدن سطح آب دریاها، تغییر در میزان بارش برف و باران، افزایش بلایای طبیعی، توسعهٔ مناطق بیابانی و... را به وجود می‌آورند. بحث تأثیرات آلودگی‌های هوا بر سلامت انسان‌ها نیز از دیگر جنبه‌هایی است که باعث اهمیت بخشیدن به مسائل زیست‌محیطی، بیش از پیش شده است؛ به‌طوری که بررسی عوارض ناشی از آلودگی هوا که به‌صورت گسترده و پایدار، سلامت ساکنان منطقهٔ آلوده را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد، آن را چهارمین عامل مرگ‌ومیر در جهان معرفی می‌کند. طبق آمار، ۱ میلیارد و ۴۰۰ میلیون نفر در جهان در معرض آلودگی هوا قرار دارند که سالانه ۳ میلیون نفر از آن‌ها به‌دلیل عوارض مستقیم یا غیرمستقیم ناشی از آن، جان خود را از دست می‌دهند [۲]. با توجه به آنچه تا به اینجا به آن اشاره شد، رشد روزافزون تقاضا برای انرژی الکتریکی از یک سو و نگرانی‌های ناشی از مسائل زیست‌محیطی و تغییرات آب‌وهوایی از سوی دیگر، بخش تولید انرژی الکتریکی را در بسیاری از کشورها، ملزم به پایبندی به شرایط و ضوابطی می‌کند که در راستای کنترل و کاهش انتشار بخش تولید تدوین یافته‌اند. شرایط و ضوابط مزبور در قالب طرح‌های مختلف با محوریت ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر (کاهش انتشار بخش تولید به‌صورت غیرمستقیم) یا محدودکردن میزان انتشار آلاینده‌ها (کاهش انتشار بخش تولید به‌صورت مستقیم)، در سایهٔ یک مفهوم کلی با عنوان «سیاست‌های انرژی» جای می‌گیرند که هم‌اکنون در بسیاری کشورها از جمله کشورهای عضو اتحادیهٔ اروپا، در حال اجرا هستند [۳]. شایان ذکر است که طبیعت اجتناب‌ناپذیر استفاده از انرژی الکتریکی و روند رو به رشد تقاضا برای آن، باعث شده است که ترویج و توسعهٔ منابع انرژی تجدیدپذیر، به‌عنوان اصلی‌ترین راهکار برای مقابله با معضلات زیست‌محیطی و آب‌وهوایی تلقی گردد؛ زیرا به‌رغم پیشرفت‌های به‌دست‌آمده در زمینهٔ تولید انرژی با هدف حداقل‌ساختن میزان انتشار آلایندگی، مانند تجهیزات جذب و ذخیرهٔ کربن [۴] یا سوخت زغال‌سنگ پاک [۵]، همچنان کاهش آلاینده‌های انتشاریافته از بخش تولید، در گرو کاهش تولید با استفاده از واحدهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی است. در این میان، اجرای برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا در بخش‌های صنعتی [۶] و خانگی [۷ و ۸] و برنامه‌های افزایش کارایی انرژی [۹]، از دیگر راهکارهایی هستند که می‌توانند در راستای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط بخش تولید انرژی الکتریکی، مؤثر واقع شوند. با توجه به رشد تقاضا برای انرژی، مسلّم است که راهکارهای مزبور نمی‌توانند همانند راهکار ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر، در زمینهٔ کاهش انتشار بخش تولید مؤثر واقع شوند. ازاین‌رو، ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر، محوریت اصلی بعضی از سیاست‌های انرژی را در بر می‌گیرد. رایج‌ترین این سیاست‌ها و سازوکار آن‌ها در بخش بعدی به‌تفصیل شرح داده می‌شوند.

چهارچوب برنامه‌ریزی توسعهٔ واحدهای نیروگاهی، نگرانی‌های زیست‌محیطی و آب‌وهوایی، راهکارهای ارائه‌شده برای کاهش انتشار بخش تولید، منابع انرژی تجدیدپذیر و به‌تبع، اثرات مختلف آن‌ها بر تصمیمات بهره‌برداری و توسعه بخش تولید، محوریت مطالعات متعددی را در بر می‌گیرد که طی دههٔ اخیر انجام شده‌اند؛ در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره می‌شود.

در مرجع [۱۰]، در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی در برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید، با اضافه‌کردن یک قید انتشار در روند بهینه‌سازی انجام می‌شود؛ نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه حاکی از آن است که اعمال محدودیت انتشار به بخش تولید، اثرات مختلفی چون افزایش هزینهٔ تولید، کاهش تمایل برای سرمایه‌گذاری در این بخش و در نهایت، کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها را به دنبال دارد. ارزیابی راهکارهای مختلف به‌منظور کاهش وابستگی بخش تولید به منابع سوخت‌های فسیلی در مرجع [۱۱] و برنامه‌ریزی توسعه با در نظر داشتن مشارکت

منابع تجدیدپذیر در مرجع [۱۲]، برخی از دیگر مطالعات انجام‌شده در این زمینه‌اند. همچنین مدلی جامع برای برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید با هدف تعیین سیاست‌های بهینهٔ انرژی در مرجع [۱۳] ارائه می‌شود؛ مروری اجمالی نیز بر سیاست‌های انرژی، مزایا و معایب آن‌ها در چارچوب برنامه‌ریزی توسعه در مرجع [۱۴] صورت می‌گیرد.

از میان سایر انواع واحدهای تولیدی مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر، درصد نفوذ واحدهای بادی در ترکیب تولید انرژی الکتریکی کشورهای مختلف، رشد چشمگیری داشته است. از طرفی، در مقایسه با واحدهای تولیدی متعارف، واحدهای بادی از هزینه‌های سرمایه‌ای بیشتری برخوردارند. این امر می‌تواند دلیلی بر لزوم مدل‌سازی هرچه دقیق‌تر واحدهای بادی به‌منظور برنامه‌ریزی هرچه بهتر توسعهٔ آن‌ها باشد. با وجود این، در اغلبِ مطالعات انجام‌شده در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید [۱، ۴، ۱۰ و ۱۳ـ۱۶]، واحدهای بادی در ساده‌ترین حالت خود، یعنی به‌صورت ظرفیت ثابت در نظر گرفته شده‌اند؛ حال آنکه با ثابت فرض کردن متوسط سرعت باد طی افق توسعه، می‌توان واحدهای بادی را نه به‌صورت یک ظرفیت ثابت، بلکه به‌صورت یک ظرفیت متغیر مبنی بر متغیر فرض کردن تعداد توربین‌ها (به‌جای تعداد مزارع) ضمن در نظر داشتن اثر «رد توربین»[1] در مدل مسئله لحاظ کرد.

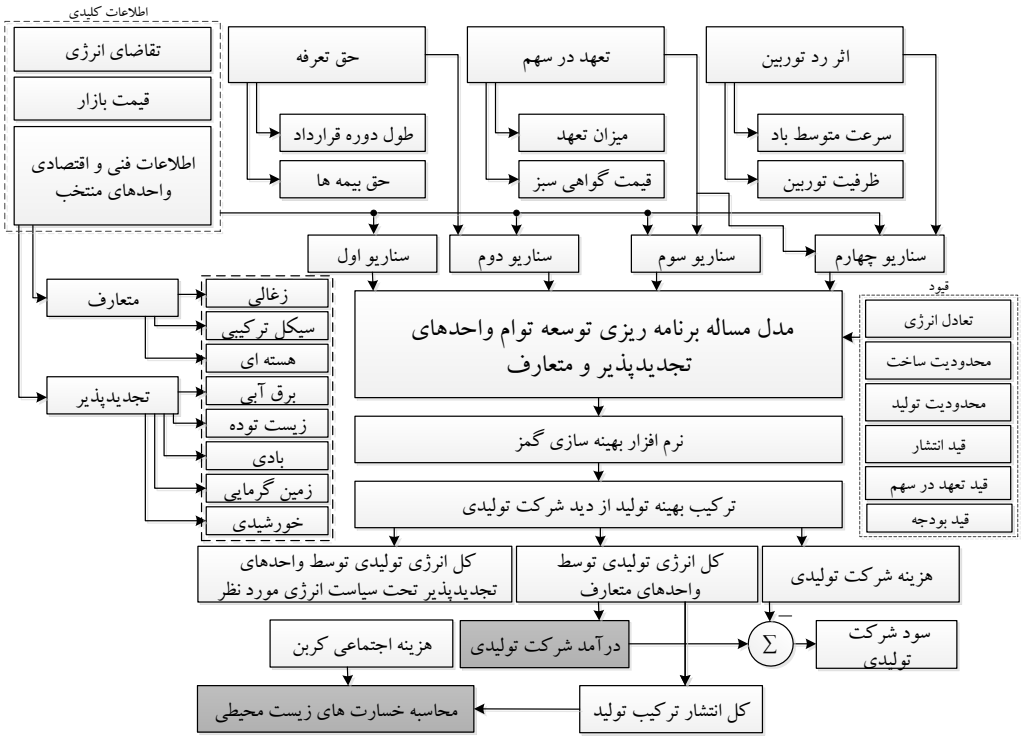
در مقالهٔ پیش رو، با در نظر گرفتن اثر رایج‌ترین سیاست‌های انرژی با عنوان سیاست حق تعرفه[2] و سیاست تعهد در سهم[3] در برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید، مدلی جامع برای برنامه‌ریزی توسعهٔ همزمان واحدهای متعارف و تجدیدپذیر از دید یک شرکت تولیدی ارائه می‌شود. در این راستا، از میان سایر فناوری‌های تولیدی منتخب تجدیدپذیر، واحدهای بادی با تمرکز بیشتری مطالعه می‌شوند؛ به‌طوری که ظرفیت سایر فناوری‌های تولیدی تجدیدپذیر منتخب از زمان ورود به ترکیب تولید، ثابت، اما ظرفیت مزارع بادی منتخب، ناشی از متغیر فرض کردن تعداد توربین‌ها و نیز میزان تولید آن‌ها تحت اثر رد توربین، متغیر در نظر گرفته می‌شود. این امر با ایجاد انعطاف‌پذیری در فرایند سرمایه‌گذاری روی واحدهای مربوط می‌تواند به طرح‌های توسعهٔ بهینه‌تر، به‌خصوص تحت اجرای سیاست‌های تعهدآور ترویج منابع تجدیدپذیر برای شرکت‌های تولیدی، و در عین حال واقعی‌تر منجر گردد؛ که از این حیث می‌توان آن را به‌عنوان نوآوری مقالهٔ حاضر در نظر گرفت. مدل مزبور در محیط نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS در قالب مسئلهٔ غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح[4] پیاده‌سازی شده و توسط یکی از معروف‌ترین بهینه‌سازهای موجود در کتابخانهٔ این نرم‌افزار، با عنوان بهینه‌ساز BARON «توضیحات بیشتر در پیوست ارائه شده است»، طی سناریوهای متعددی حل می‌شود. با مشخص شدن استراتژی‌های توسعهٔ شرکت تولیدی متأثر از هریک از سیاست‌های انرژی مورد نظر، مؤلفه‌هایی چون میزان CO_2 انتشاریافته از ترکیب تولید در هریک از سال‌های برنامه‌ریزی، سود شرکت تولیدی، و درصد نفوذ واحدهای بادی در ترکیب تولید نهایی محاسبه و ارزیابی می‌شوند. در نهایت با دانستن اینکه هر سیاست چگونه می‌تواند بر مؤلفه‌های مذکور اثرگذار باشد، سیاست کارآمدتر از دیدگاه اقتصادی‌ـزیست‌محیطی معرفی می‌شود. بر اساس این توضیحات، روندنمای چهارچوب پیشنهادی در شکل (۱) آمده است.

به‌منظور پوشش کامل مطالب، بخش‌های بعدی مقاله بدین ترتیب در نظر گرفته می‌شوند؛ سازوکار سیاست‌های انرژی درنظرگرفته‌شده که امروزه نیز در بسیاری از کشورهای دنیا در حال اجرا هستند، در بخش دوم تشریح می‌شود. بخش سوم به شرح اثر «رد توربین» و نحوهٔ محاسبهٔ میزان توان تولیدی واحدهای بادی منتخب در هریک از سال‌های برنامه‌ریزی پرداخته می‌شود. بخش چهارم به ارائهٔ مدل برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید و بیان قیود مربوط، ضمن در نظر داشتن اثر سیاست‌های حق تعرفه و تعهد در سهم اختصاص می‌یابد؛ در این بخش همچنین نحوهٔ محاسبهٔ خسارات زیست‌محیطی نیز بیان می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده از برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید طی سناریوهای مختلف همراه با تحلیل نتایج در بخش پنجم گردآوری، و در نهایت نتیجه‌گیری در بخش ششم ارائه می‌شود.

۲. سیاست‌های انرژی

به‌طور کلی، آنچه به‌عنوان عوامل بازدارندهٔ شرکت‌های تولیدی از سرمایه‌گذاری روی واحدهای تجدیدپذیر شناخته می‌شود، به هزینه‌های سرمایه‌ای بالا، نرخ تولید پایین، و به‌تبع، طولانی‌بودن دورهٔ بازگشت سرمایه مربوط می‌شود. در راستای رفع موانع فوق، طرح‌های مختلفی از سوی دولت‌ها تدوین و اجرا شده‌اند که «سیاست‌های انرژی» نامیده می‌شوند. به‌طور کلی، مجموعه سیاست‌های انرژی برحسب اینکه در آن‌ها قیمت (مثلاً قیمت هر واحد انرژی) یا مقدار (مثلاً مقدار انرژی یا میزان انتشار آلاینده‌ها) مد نظر باشد، به دو دسته سیاست‌های مبتنی بر قیمت و سیاست‌های مبتنی بر مقدار تقسیم‌بندی می‌شوند. انواع این سیاست‌ها عبارت‌اند از: سیاست حق تعرفه، تعهد در سهم، حق انتشار با قابلیت دادوستد، و سیاست مالیات بر کربن. در ادامه، به‌دلیل گستردگی بحث از شرح عملکرد سایر سیاست‌های مزبور اجتناب، و تنها به بیان سازوکار سیاست‌های درنظرگرفته‌شده در مقالهٔ حاضر اکتفا می‌شود.

1. Wake Effect
2. Feed-In-Tariff
3. Quota Obligation with Tradable Green Certificate
4. Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP)



شکل (۱): روند نمای چهارچوب پیشنهادی

۱.۲. سیاست حق تعرفه[1]

بنا به تعریف ارائه‌شده در [۱۵]، سیاست حق تعرفه یا حق بیمه عبارت است از: اعطای تشویق‌های مالی به هر واحد انرژی تولیدشده توسط واحدهای مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر، طی یک دورهٔ زمانی مشخص، با توجه به هزینهٔ تولید و نوع فناوری به خدمت گرفته‌شده. بنابراین، سیاست حق تعرفه تأثیر مستقیم بر ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر دارد و کاهش انتشار نسبی بخش تولید، به‌عنوان یک اثر ثانویهٔ ناشی‌شده از آن تلقی می‌شود. همچنین، از آنجا که تشویق‌های درنظرگرفته‌شده به‌صورت حق بیمه (یک مقدار ثابت)، مازاد بر قیمت انرژی در بازار، طی دورهٔ زمانی مشخص، متناسب با هر مقدار (اختیاری) انرژی تولیدی به تولیدکننده پرداخت می‌شود، این نوع سیاست در زمرهٔ سیاست‌های مبتنی بر قیمت قرار می‌گیرد. به بیان دیگر، در این نوع سیاست، تعهدی مبنی بر مقدار توان، در قرارداد بین دولت یا نهاد تنظیم‌کننده با شرکت تولیدی لحاظ نمی‌گردد. بدین ترتیب، واحد تولیدی نه‌تنها از فروش انرژی تولیدی خود در بازار انرژی درآمد کسب می‌کند، بلکه مقداری ثابت و مازاد بر قیمت انرژی در آن سال را نیز دریافت می‌کند. مقدار حق بیمهٔ ازپیش‌تعریف‌شده و مشخص، تضمین در دسترس بودن شبکه و طول دورهٔ قرارداد طولانی (۱۵ تا ۲۰ سال)، سه ویژگی بارز در این سیاست است [۱۴].

۲.۲. سیاست تعهد در سهم[2]

داشتن شکل کاملاً رقابتی و سازگاری با محیط تجدید ساختاریافتهٔ صنعت برق، ویژگی اصلی سیاستی است که طی دههٔ گذشته با عنوان «تعهد در سهم با قابلیت دادوستد»، در راستای ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر، در کشورهای پیشرفته در حال اجراست. این طرح همانند طرح حق تعرفه، از رایج‌ترین سیاست‌های انرژی است که توانسته تأثیر چشمگیری در ترویج منابع مورد نظر داشته باشد؛ اما برخلاف طرح حق تعرفه که در آن تعهد بر سر قیمت از سوی دولت یا نهاد تنظیمی بود، در این طرح، آنچه تولیدکننده در برابر نهاد تنظیم‌کننده به آن متعهد می‌شود، مقدار توانی است که باید با استفاده از منابع تجدیدپذیر تولید کند؛ بنابراین، طرح تعهد در سهم، طرح مبتنی بر مقدار است که طی آن، شرکت تولیدی برای یک مدت ۱۵ تا ۲۰ سال، متعهد به تأمین انرژی از منابع تجدیدپذیر، به‌میزان مشخص (معادل با درصدی از کل توانی که با استفاده از واحدهای متعارف خود تولید می‌کند) می‌شود.

عمل به تعهد مورد نظر، با تسلیم‌کردن تعداد مشخصی مجوز که به «گواهی سبز» موسوم است، به‌صورت سالانه صورت می‌گیرد. به بیانی کامل‌تر، در کنار شرکت‌های تولیدی، واحدهای تجدیدپذیر مشخصی (متعلق به شرکت تولیدی یا مستقل از آن)، به‌ازای تولید هر مگاوات ساعت انرژی مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر، از سوی نهاد تنظیم‌کننده،

1. Feed-In-Tariff Policy

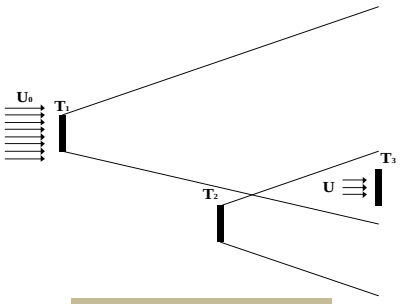
2. Quota Obligation Policy

گواهی سبز دریافت می‌کنند که قابل خریدوفروش است. حال این واحدها، نه‌تنها از فروش انرژی خود در بازار برق درآمد کسب می‌کنند، بلکه می‌توانند گواهی‌های دریافت‌شدهٔ خود را نیز به شرکت‌هایی تولیدی تحت تعهد بفروشند؛ سپس این شرکت‌ها با تسلیم‌کردن گواهی‌های خریداری‌شده به نهاد تنظیم‌کننده، می‌توانند از پس تعهد خود برآیند. باید توجه داشت که هرساله میزان تعهد افزایش می‌یابد. بدین ترتیب رقابتی بین واحدهای تولیدی مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر در فروش گواهی‌های خود به شرکت‌های تولیدی دیگر به وجود می‌آید که می‌تواند از دیدگاه بازار حائز اهمیت باشد. همان طور که مشاهده می‌شود، طی سیاست تعهد در سهم، متناسب با رشد تقاضا برای انرژی و به‌تبع رشد تولید، هرساله درصد نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر نیز افزایش می‌یابد؛ این در حالی است که در سیاست حق تعرفه، چنین تضمینی برای ترویج منابع تجدیدپذیر وجود ندارد. همچنین با توجه به سازوکار سیاست تعهد در سهم، می‌توان دریافت که در این سیاست، هزینه‌های اضافی به‌بارآمده (هزینهٔ مربوط به خرید گواهی‌های سبز) از ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر، می‌تواند باعث ترغیب شرکت‌های تولیدی برای سرمایه‌گذاری روی واحدهای مربوط گردد. به عبارتی دیگر، شرکت تولیدی برای برآمدن از پس تعهد خود، می‌تواند به‌جای خرید گواهی‌های سبز، خود، اقدام به سرمایه‌گذاری روی واحدهای تجدیدپذیر کند تا علاوه بر تأمین سقف انرژی مقرر توسط واحدهای مربوط، گواهی‌های مازاد را نیز در قیمت بازار به فروش برساند [۱۷].

۳. اثر رد توربین

اهداف گوناگونی می‌تواند در طراحی یک مزرعهٔ بادی دنبال شود؛ از جمله: ۱. حداکثر ساختن میزان توان خروجی مزرعه که خود تابعی از شرایط جغرافیایی و نوع منطقه (سرعت باد) است؛ ۲. کاهش دادن هزینه‌های سرمایه‌ای مانند هزینهٔ فنداسیون، زمین، کابل، دکل، توربین و...؛ ۳. جذب حداکثر انرژی از باد با حداقل ساختن اثر رد توربین و... .

اثر رد توربین در واقع به تغییر میزان انرژی جذب‌شده توسط توربین از باد در اثر تغییر در آرایش توربین‌ها برمی‌گردد؛ به‌طوری که وقتی باد به یک توربین برخورد می‌کند، سرعت باد در پشت آن توربین کاهش یافته و فلوی پشت توربین حالت چرخشی به خود می‌گیرد. اگر توربین‌های دیگری در همان جهت فلوی باد قرار گیرند، سرعت باد در محل این توربین‌ها کاهش می‌یابد و باعث کاهش توان استخراج‌شده از توربین می‌شود؛ به این پدیده، رد توربین می‌گویند. گسترش رد توربین می‌تواند اثر منفی روی توربین‌های همسایه بگذارد و توان خروجی آن‌ها را تحت‌تأثیر قرار دهد. شکل (۲) مفهوم اثر رد توربین را نشان می‌دهد. شکل مزبور در واقع اثر رد توربین‌های T_1 و T_2 را بر توربین T_3 نشان می‌دهد؛ به‌طوری که این توربین‌ها باعث کاهش سرعت باد از U_0 به U در برخورد به توربین T_3 می‌شوند. بدیهی است تغییر آرایش توربین‌ها و میزان فاصلهٔ آن‌ها از یکدیگر (فاصلهٔ هر ردیف توربین با ردیف بالادست) منجر به تغییر اثر رد توربین‌ها بر یکدیگر می‌شود.



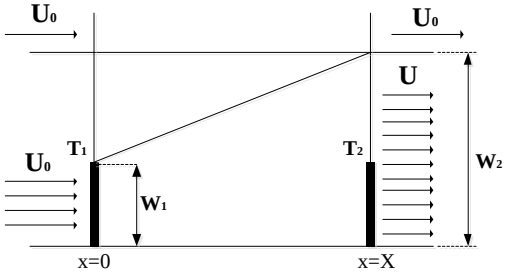
شکل (۲): مفهوم اثر رد توربین

با دقت در ماهیت مسئلهٔ برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید، می‌توان گفت که از میان اهداف دنبال‌شده از طراحی یک مزرعهٔ بادی، تاکنون تنها بحث هزینه‌های سرمایه‌گذاری مربوط به آن‌ها، آن هم به‌صورت مقدار مشخص در ازای ظرفیت تولیدی ثابت، در نظر گرفته شده است. در مقالهٔ پیش رو، شبیه‌سازی اثر رد توربین که خود مستلزم متغیر فرض کردن تعداد توربین‌ها (به‌جای تعداد مزارع بادی) در هر بازهٔ برنامه‌ریزی است، نه‌تنها می‌تواند به استراتژی‌های توسعهٔ بهینه‌تری در افق توسعه، مادامی که برنامه‌ریزی به محدودیت بودجه مقید است، منجر گردد بلکه بهبود دقت مدل‌سازی و نتایج عملی و کاربردی‌تری را به دنبال خواهد داشت. به بیانی کامل‌تر، در صورتی که برنامه‌ریزی توسعه به‌ازای مزارع بادی با ظرفیت و هزینهٔ سرمایه‌گذاری مشخص انجام گردد، ممکن است قید بودجه مانع از سرمایه‌گذاری روی واحدهای بادی طی بعضی از سال‌های برنامه‌ریزی گردد؛ حال آنکه با متغیر فرض کردن تعداد توربین‌ها در هر مزرعه، میزان سرمایه‌گذاری روی مزارع بادی به‌نوعی انعطاف‌پذیرتر و بهینه‌تر خواهد بود؛ مادامی که توان تولیدی واحدهای بادی نیز مقادیر واقعی‌تری را به خود می‌گیرند. این امر به‌خصوص در اجرای سیاست تعهد در سهم، زمانی که شرکت تولیدی موظف به تولید درصد مشخصی الکتریسیتهٔ سبز (توان تولیدی با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر) است، می‌تواند امکان برنامه‌ریزی بهینه‌تر را فراهم کند.

متناسب با وضعیت جغرافیایی، توربین‌ها در یک مزرعه، در فواصل مشخص و در یک آرایش متقارن نصب می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که با توجه به شرایط غالب منطقه از حیث جهت وزش باد، حتی‌الامکان در بیشتر مواقع قادر به جذب بیشترین توان از باد باشند. در مقالهٔ حاضر، تغییر در تعداد توربین‌ها و میزان تولید آن‌ها متأثر از اثر رد توربین، صرف‌نظر از حالات مختلف آرایش توربین‌ها، ناهمواری منطقه، و نیز تغییرات سرعت باد، در برنامه‌ریزی لحاظ می‌گردد. علاوه بر این، سرعت باد در

یک مقدار متوسط طی هریک از سال‌های توسعه در نظر گرفته می‌شود.

در مراجع مختلف، تاکنون مدل‌های مختلفی برای فرموله‌کردن اثر رد توربین ارائه شده است؛ از آن جمله می‌توان به مدل Jensen [۱۸]، Ainslie [۱۹]، و مدل Larsen [۲۰] اشاره کرد. به‌عنوان یک مدل تحلیلی ساده، از مدل Jensen در مقالات به‌کرّات استفاده شده است. در مقالهٔ حاضر نیز از این مدل برای شبیه‌سازی اثر رد توربین استفاده شده است. برای درک بهتر مدل مزبور، شکل (۳) را در نظر بگیرید.



شکل (۳): اثر رد توربین طبق مدل Jensen [۱۸]

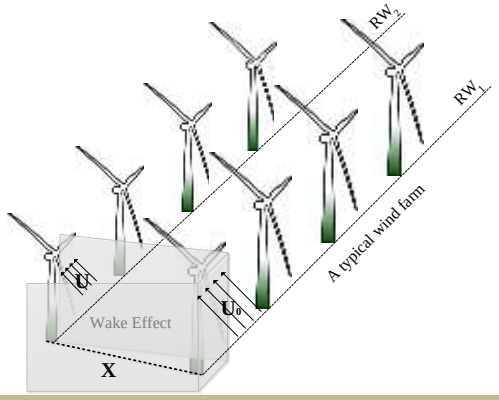
بر اساس شکل (۳)، سرعت کاهش‌یافته در فاصلهٔ x از پشت توربین با استفاده از رابطهٔ (۱) محاسبه می‌شود. در این رابطه، U_0 سرعت اولیه، x فاصلهٔ بین دو توربین، τ شعاع رتور توربین بالادست، C_t ضریب گشتاور و k ضریب کاهش رد توربین است که مشخص می‌کند به‌ازای هر متر فاصله از توربین بالادست، عرض رد[1] چقدر افزایش می‌یابد.

$$U = U_0\left(1-\left(1-\sqrt{1-C_t}\right)\left(\frac{\tau}{\tau+kx}\right)^2\right) \qquad (۱)$$

پرواضح است که هرچه فاصلهٔ توربین پایین‌دست (T_2) از توربین بالادست (T_1) بیشتر باشد، عرض رد و به‌تبع اثر رد توربین کمتر می‌شود؛ زیرا باد فرصت بیشتری برای بازگشت به سرعت اولیه دارد و معمولاً به‌ازای زمان مشخص، باد در برخورد به توربین پایین‌دست، کاملاً به سرعت اولیهٔ خود بازمی‌گردد. ضریب کاهش رد توربین به پارامترهایی مانند اغتشاش محیط و پایداری جو بستگی دارد و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$k = 0.01/\ln(h/z_0) \qquad (۲)$$

به‌طوری که h ارتفاع توربین و z_0 ضخامت سطح است. ضریب k معمولاً برای مزارع بادی واقع در خشکی[2] ۰/۰۷۵، و برای مزارع نصب‌شده در دریا[3] برابر با ۰/۰۴ در نظر گرفته می‌شود [۲۱]. بدین ترتیب، مطابق با شکل (۴)، با در نظر گرفتن آرایشی منظم برای مجموعه‌توربین‌هایی که در هر مرحله از برنامه‌ریزی به ترکیب تولید اضافه می‌شوند، میزان توان تولیدی مزرعهٔ بادی حاصل مطابق با توضیحات ذیل، قابل محاسبه خواهد بود؛ مادامی که برای هر توربین فقط اثر رد توربین بالادستی هم‌راستا لحاظ شده و از اثر رد توربین‌های دیگر صرف‌نظر شود.



شکل (۴): مدل‌سازی اثر رد توربین در یک آرایش منظم

اگر Q_i برابر با تعداد توربین‌های منتخب در بازهٔ برنامه‌ریزی iام، $\overline{RW}$ حداکثر تعداد ردیف‌هایی که با فاصلهٔ X از یکدیگر، توربین‌ها در امتداد آن‌ها نصب می‌شوند، $\overline{NT}$ حداکثر تعداد توربین‌های قابل نصب در هر ردیف، $\bar{n}_{i,wind} = \overline{NT}.\overline{RW}$ حداکثر تعداد توربین‌های قابل احداث در هر مرحله از برنامه‌ریزی، RW_j تعداد توربین‌های ردیف jام، و U_j سرعت متوسط باد متناظر در آن ردیف باشد، توان حاصل از مزرعهٔ بادی در بازهٔ برنامه‌ریزی مورد نظر، یعنی P_i^{WF}، طی روابط (۳) تا (۵) قابل محاسبه خواهد بود:

$$RW_j = \begin{cases} \overline{NT} & if\ res(Q_i/\overline{RW}) = 0, \quad j = 1,2,...,\overline{RW} \\ \overline{NT} & if\ res(Q_i/\overline{RW}) \neq 0, \quad j = 1,2,...,m \\ & m = (Q_i - (res(Q_i/\overline{RW})))/\overline{RW} \\ res(Q_i/\overline{RW}), & j = m+1 \end{cases} \qquad (۳)$$

$$P_j = \sum_{RW_j} C_p.\rho.AU_j^3 \qquad (۴)$$

$$P_i^{WF} = \sum_{j}^{m+1} P_j \qquad (۵)$$

که $res(.)$ تابع مربوط به بازگردانی باقی‌ماندهٔ یک تقسیم، C_p ضریب کارایی توربین، ρ چگالی هوا برحسب (kg/m^3)، و A سطح مقطع در معرض باد برحسب مترمربع است.

۴. مدل‌سازی مسئلهٔ برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید

در این بخش، علاوه بر ارائهٔ مدلی جامع و مناسب برای برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید ترکیب‌شده با مشارکت منابع انرژی تجدیدپذیر در قالب سیاست‌های انرژی، مؤلفه‌های مورد نیاز برای ارزیابی اثر سیاست‌های

1. Wake Width
2. On-shore Wind
3. Off-shore Wind

درنظرگرفته‌شده بر خسارت‌های زیست‌محیطی نیز مدل‌سازی می‌شوند. برنامه‌ریزی از دید یک شرکت تولیدی که با داشتن امکان سرمایه‌گذاری روی فناوری‌های مختلف تولیدی، به‌دنبال حداکثر سود ممکن است، انجام می‌پذیرد. به‌منظور مقایسهٔ طرح‌های سرمایه‌گذاری مختلف در سال پایه، با توجه به کل بودجهٔ در دسترس، از روش ارزش فعلی در محاسبهٔ درآمدها و هزینه‌ها استفاده می‌شود؛ اطلاعات کامل دربارهٔ این روش در مرجع [۲۲] موجود است. ظرفیت بهینهٔ هریک از واحدهای جدید اضافه‌شده در طول هر مرحله از برنامه‌ریزی، تعداد و سال ورود آن‌ها به ترکیب تولید، از جمله متغیرهای مسئلهٔ بهینه‌سازی هستند که در کنار متغیرهای مربوط به سیاست‌های انرژی، منجر به تبدیل مسئلهٔ بهینه‌سازی مورد نظر به یک مسئلهٔ برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح می‌گردد. در ادامه، هریک از بخش‌های مدل ارائه‌شده تشریح می‌شود.

۱.۴. تابع هدف

تابع هدف مسئله در هر سال از برنامه‌ریزی مشتمل بر سه مؤلفه $U_{1_i}^G$ (M€)، سود حاصل از فروش انرژی تولیدی توسط مجموع واحدهای موجود و جدید، $U_{2_i}^G$ (M€)، سود (یا هزینه) حاصل از سیاست‌های انرژی و $U_{3_i}^G$ (M€)، هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیه مربوط به واحدهای جدید است. بدین ترتیب تابع هدف، کل سود حاصل از تولید انرژی در سایر سال‌های برنامه‌ریزی در طول یک افق N^Y ساله را در بر می‌گیرد. بودجهٔ سرمایه‌گذاری‌شده در هر دوره، به‌میزان عرضهٔ انرژی در بازار، متوسط قیمت انرژی، نوع سیاست اعمال‌شده و همچنین، نوع فناوری‌های منتخب در دسترس برای توسعه، بستگی دارد. کل درآمد حاصل از فروش انرژی، از مجموع درآمدهای به‌دست‌آمده از فروش کل انرژی تولیدی ترکیب تولید (اعم از تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر) در قیمت بازار، و درآمد ناشی‌شده از سیاست‌های انرژی است. تفاضل مجموع این دو مؤلفه از درآمد شرکت تولیدی با کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری مربوط به واحدهای جدید اضافه‌شده به ترکیب تولید، و هزینه‌های تولید انرژی، کل سود خالص حاصل از برنامه‌ریزی توسعه را به دست می‌دهد. تابع هدف درنظرگرفته‌شده همراه با هریک از مؤلفه‌های مذکور، به‌ترتیب طی روابط (۶) تا (۹) در ذیل آورده شده‌اند.

$$Max: \sum_{i=1}^{N^Y}(1+r)^{1-i}\left(U_{1_i}^G + U_{2_i}^G - U_{3_i}^G\right) \qquad (۶)$$

$$U_{1_i}^G = \sum_{t\in Z_i^{ex}}(\Pi_i^m - \upsilon_{i,t})\varepsilon_t^{ex} + \sum_{t\in Z_i^{new}}(\Pi_i^m - \upsilon_{i,t})\varepsilon_t^{new} \qquad (۷)$$

$$U_{2_i}^G = \sum_{t\in Z_i^{ren,ex}} \varepsilon_t^{ex}.\Pi_t^{FIT} + \sum_{t\in Z_i^{con,ex}} \varepsilon_t^{ex}.\Pi_i^{TGC}.\delta_i \qquad (۸)$$

$$U_{3_i}^G = \sum_{t\in Z_i^{new}} \mathrm{I}_{i,t}.C_t.n_{i,t} \qquad (۹)$$

شاخص‌ها در این روابط عبارت‌اند از: r نرخ بهره، i شاخص دورهٔ برنامه‌ریزی (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 تولیدشده به‌ترتیب توسط واحدهای موجود و جدید اضافه‌شده (MWh)، t شاخص مربوط به نوع فناوری، $\upsilon_{i,t}$ هزینهٔ تولید هر واحد انرژی (€/MWh)، Π_t^{FIT} حق بیمهٔ پرداخت‌شده به هر واحد الکتریسیتهٔ سبز تولیدی توسط فناوری تجدیدپذیر نوع t (€/MWh)، Π_i^{TGC} قیمت هر عدد گواهی سبز (€/MWh)، δ_i درصد تعهد متناظر در سال i مربوط به سیاست تعهد در سهم، $\mathrm{I}_{i,t}$ هزینهٔ 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. Z_i^{ex} و Z_i^{new} نیز به‌ترتیب مجموعه واحدهای موجود در حال بهره‌برداری و مجموعه واحدهای جدیدی را که از ابتدای سال i مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند نشان می‌دهند؛ ضمن آنکه مجموع واحدهای متعارف و تجدیدپذیر (اعم از جدید و موجود) نیز در هر سال برنامه‌ریزی، به‌ترتیب با نمادهای $Z_i^{con,ex}$ و $Z_i^{ren,ex}$ مشخص شده‌اند.

۲.۴. قیود

در این بخش، به‌منظور شبیه‌سازی هرچه عملی‌تر استراتژی‌های توسعهٔ سرمایه‌گذاری در بخش تولید، قیود متعددی در نظر گرفته می‌شوند که در ادامه به نحوهٔ مدل‌سازی آن‌ها پرداخته می‌شود.

۱.۲.۴. قید تعادل انرژی

این قید که به‌صورت رابطهٔ (۱۰) ارائه شده، متناظر با هریک از سال‌های برنامه‌ریزی، نشان‌دهندهٔ تعادل بین انرژی فروخته‌شده در بازار، E_i^T، و کل انرژی تولیدی توسط مجموعه واحدهای موجود و جدید است. به بیان دیگر، میزان انرژی که شرکت تولیدی در سال i تصمیم به عرضهٔ آن دارد، باید با کل توان تولیدی توسط مجموع واحدهای موجود و واحدهای جدید اضافه‌شده برابر باشد.

$$E_i^T = \sum_{t\in Z_i^{ex}} \varepsilon_t^{ex} + \sum_{t\in Z_i^{new}} \varepsilon_t^{new} \qquad (۱۰)$$

۲.۲.۴. قید بودجه

این قید حداکثر بودجهٔ سرمایه‌گذاری‌شده توسط شرکت تولیدی مورد نظر در طول افق برنامه‌ریزی را محدود می‌کند. به عبارت دیگر، با استفاده از روش ارزش فعلی، مجموع سرمایه‌گذاری‌های انجام‌شده در طول هریک از سال‌های برنامه‌ریزی با کل بودجهٔ موجود تا آن سال مقایسه می‌شود و انتخاب واحدهای جدید متناسب با آن بودجه صورت می‌گیرد. این قید به‌صورت رابطهٔ (۱۱) در نظر گرفته می‌شود [۹]:

$$\sum_{i}^{N^y}\sum_{t\in Z_i^{new}}(1+r)^{1-i}\left(\mathrm{I}_{i,t}\cdot C_t\cdot n_{i,t}\right)\le In_{tot}^{bud} \qquad (۱۱)$$

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

۳.۲.۴. قید محدودیت تولید توان

عملاً واحدهای متعارف در حین در مدار بودن، نمی‌توانند میزان تولید خود را از یک سطح مجاز پایین‌تر بیاورند. به بیان دیگر، نیروگاه‌های حرارتی، ضمن راه‌اندازی و ورود به مدار، همواره دارای یک سطح تولید حداقل نیز می‌باشند که دستیابی یا در مدار ماندن واحد مربوطه به‌ازای خروجی کمتر از آن، امکان‌پذیر نیست. حداکثر توان تولیدی یا همان ظرفیت تولید هر واحد نیز دارای یک حد مشخص است که به مشخصات فیزیکی واحد مربوط می‌شود. این قید به‌صورت رابطهٔ (۱۲) فرمول‌بندی می‌شود که در آن $P_{i,t}$ نرخ تولید توان اکتیو هر واحد تولیدی نوع t در سال i با حد بالا و پایین $P_t^{\max}$ و $P_t^{\min}$ است.

$$P_t^{\min}\le P_{i,t}\le P_t^{\max} \qquad (۱۲)$$

۴.۲.۴. قید محدودیت احداث

ممکن است برخی دلایل فنی، اقتصادی و اجرایی مانند حداقل طول دورهٔ زمانی لازم برای ساخت هریک از انواع واحدهای تولیدی، در عمل حداکثر تعداد واحدهایی را که می‌توانند در طول یک دورهٔ مشخص به بهره‌برداری برسند، محدود کند. از این حیث با توجه به نوع فناوری‌های موجود و همچنین ظرفیت تولید آن‌ها، یک حد مشخص برای تعداد واحدهای که می‌توانند در هر مرحله انتخاب شوند، به‌صورت رابطهٔ (۱۳) در نظر گرفته می‌شود [۲۳]:

$$0\le n_{i,t}\le\overline{n_t},\quad 0\le\sum_{i}^{N^Y}n_{i,t}\le\overline{W_t} \qquad (۱۳)$$

که $\overline{n_t}$ حداکثر تعداد واحدهای مجاز از نوع t است که می‌تواند در طول هر مرحله از برنامه‌ریزی انتخاب شود. در خصوص توربین‌های بادی، این قید روی حداکثر تعداد توربین‌ها، مطابق با آنچه در انتهای بخش سوم به آن اشاره شد، تعریف می‌شود. همچنین در پایان افق توسعه، تعداد کل واحدهای انتخاب‌شده از هر فناوری نیز باید کوچک‌تر یا برابر با حداکثر تعداد واحدهای درنظرگرفته‌شده در ابتدای برنامه‌ریزی، یعنی $\overline{W_t}$، باشد.

۵.۲.۴. قید تعهد در سیاست تعهد در سهم

متناظر با مؤلفهٔ دوم رابطهٔ (۸) که سود شرکت تولیدی حاصل از فروش گواهی‌های سبز دریافت‌شده در سال مربوط را نشان می‌دهد، لازم است شرکت تولیدی هرساله درصد مشخصی الکتریستهٔ سبز نیز در ترکیب تولید خود داشته باشد. بنابراین برای اطمینان از اجرای سیاست تعهد در سهم، یک قید نامساوی به‌صورت (۱۴) در مدل برنامه‌ریزی لحاظ می‌شود. طبق رابطهٔ مزبور، کل انرژی تولیدی توسط سایر واحدهای تجدیدپذیر در هر سال، باید بزرگ‌تر یا مساوی با درصدی از کل انرژی تولیدی توسط واحدهای متعارف در آن سال باشد.

$$\sum_{t\in Z_i^{ren,ex}}\varepsilon_t^{ex}\ge\delta_i.\sum_{t\in Z_i^{con,ex}}\varepsilon_t^{ex} \qquad (۱۴)$$

۶.۲.۴. قید نرخ ترکیب سوخت

در مسئلهٔ برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید، با توجه به‌میزان دسترسی به منابع، انواع متنوعی از واحدهای متعارف و تجدیدپذیر، ممکن است در برنامه‌ریزی در نظر گرفته شوند. از این حیث، یک طرح بهینه برای توسعه، طرحی است که ترکیب مناسبی از سایر منابع در دسترس را شامل شود؛ به‌گونه‌ای که به‌ازای کمترین هزینه، سایر دوره‌های بار شامل پایه، متوسط و حداکثر، به‌طور 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 تأمین بار پایه بیشتر باشد. علاوه بر این، امنیت انرژی، تنوع هرچه بیشتر سبد انرژی و به‌تبع ترکیب تولید را ایجاب می‌کند. با توجه به این توضیحات، قید نرخ ترکیب سوخت به‌صورت رابطهٔ (۱۵) در مدل برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید در نظر گرفته می‌شود که واحدهای جدید و موجود باید آن را برآورده سازند.

$$\sum_{t\in Z_i^{ex,base}}\sum_{i}\xi n_{i,t}C_t\le\sum_{t\in Z_i^{ex,peak}}\sum_{i}n_{i,t}C_t \qquad (۱۵)$$

که ξ نرخ ترکیب سوخت و $Z_i^{ex,peak}$ و $Z_y^{ex,base}$ نیز مجموعه واحدهای موجود در سال i را که به‌ترتیب برای تأمین بار حداکثر و پایه مناسب‌اند، نشان می‌دهد.

۷.۲.۴. قید محدودیت انتشار آلاینده‌های گازی

تولید انرژی برق با استفاده از سوخت‌های فسیلی، باعث ورود آلاینده‌های مختلفی چون So_2، NO_x و به‌ویژه CO_2، که بعد از بخار آب بیشترین درصد گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص می‌دهد، به جَو می‌گردد. ازاین‌رو به‌منظور دستیابی به برنامه‌ریزی مؤثر برای توسعهٔ تولید از دیدگاه اجتماعی و زیست‌محیطی، میزان آلاینده‌های ناشی از بخش تولید باید در فرایند برنامه‌ریزی در نظر گرفته شوند. لذا شرکت‌های تولیدی موظف‌اند میزان انتشار آلاینده‌های خود را در طول هریک از دوره‌های برنامه‌ریزی کمتر از یک حد مشخص، طبق رابطهٔ (۱۸) حفظ کنند. در مقالات مختلف میزان انتشار واحدهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی با استفاده از توابع چندجمله‌ای یا نمایی یا ترکیبی از هر دو، برحسب میزان توان تولیدی بیان شده است. در مقالهٔ حاضر،

به‌منظور محاسبهٔ مجموع انتشار هریک از انواع واحدهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، متناسب با میزان توان تولیدی مربوط در هر سال، از مدل چندجمله‌ای-نمایی انتشار به‌صورت رابطهٔ (۱۶) استفاده می‌شود [۲۴]. بدین ترتیب، کل انتشار ترکیب تولید نیز با استفاده از رابطهٔ (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{E}_{i,t}=\left(\sum_{n_{i,t}}\left(\alpha_t+\beta_t\cdot P_{i,t}+\gamma_t\cdot P_{i,t}^2+\gamma_t\cdot P_{i,t}^2+\mu_t\cdot\exp(\lambda_t\cdot P_{i,t})\right)\right)\cdot\hbar_t \quad \forall t\in Z_i^{con,ex} \tag{۱۶}$$

$$\mathrm{E}_i^{tot}=\sum_{t\in Z_i^{con,ex}}\mathrm{E}_{i,t} \tag{۱۷}$$

$$\mathrm{E}_i^{tot}\le\overline{EM}_i \tag{۱۸}$$

که در آن، α_t، β_t، γ_t، μ_t و λ_t ضرایب انتشار متناظر با هریک از فناوری‌های مبتنی بر سوخت فسیلی، $\overline{EM}_i$، سقف انتشار مجاز ترکیب تولید در سال i، و $\hbar_t$، پارامتر ساعات استفاده در سال است که بر اساس اطلاعات مربوط به حداقل ساعات کارکرد مطمئن هریک از انواع واحدها در طی سال‌های گذشته تخمین زده می‌شود [۱۴]. E_i^{tot} نیز میزان کل آلاینده‌های انتشاریافته را نشان می‌دهد.

با حل مدل ارائه‌شده طی روابط (۶) تا (۱۸)، علاوه بر استراتژی‌های توسعه و سود شرکت تولیدی تحت هریک از سیاست‌های در نظر گرفته‌شده، میزان انتشار ترکیب تولید نیز مشخص خواهد شد. با استفاده از این اطلاعات می‌توان خسارات زیست‌محیطی را به‌ازای اجرای هریک از سیاست‌ها تعیین کرد. در ادامهٔ این بخش به نحوهٔ محاسبهٔ خسارات زیست‌محیطی پرداخته خواهد شد.

۳.۴. خسارت‌های زیست‌محیطی

در این بخش، برای تخمین خساراتی که بخش تولید با واردکردن آلاینده‌های گازی، به‌خصوص CO_2، به جو باعث می‌شود از شاخص هزینهٔ اجتماعی کربن استفاده می‌شود. این شاخص طبق تعریف ارائه‌شده توسط سازمان حفاظت زیست آمریکا عبارت است از: هزینهٔ معادل با خسارت‌هایی که هر تن انتشار CO_2 به محیط‌زیست و جامعه وارد می‌کند [۲۵]. در واقع می‌توان گفت هزینهٔ اجتماعی کربن، هزینه‌ای است که اثرات سوء به‌بارآمده از انتشار بخش تولید بر محصولات کشاورزی، اکوسیستم، مواد، سلامت انسان‌ها و... را در بر می‌گیرد. بدین ترتیب، با توجه به کل انتشار ترکیب تولید (تن بر سال) در طول هر مرحله از برنامه‌ریزی، هزینهٔ معادل با خسارت‌های وارده، ED_i (M€)، با استفاده از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$ED_i=\mathrm{E}_i^{tot}.\partial_i^{scc} \tag{۱۹}$$

که در آن ∂_i^{scc} هزینهٔ اجتماعی کربن (€/ton) در سال i می‌باشد.

۵. شبیه‌سازی و ارائه نتایج

در این بخش، ابتدا نتایج حاصل از حل مدل ارائه‌شده در طول یک افق ۲۰ ساله (۲۰۱۶ تا ۲۰۳۶)، طی چهار سناریوی مختلف ارائه می‌شود. جدول (۱) جزئیات درنظرگرفته‌شده در هر سناریو را نشان می‌دهد. همان گونه که از جدول مزبور برمی‌آید، به‌منظور ایجاد امکان مقایسه، در سناریوی اول (S1)، برنامه‌ریزی توسعه بدون در نظر گرفتن اثر سیاست‌های انرژی و نیز اثر رد توربین انجام می‌شود. در سناریوی دوم (S2)، به‌منظور ارزیابی اثر سیاست حق تعرفه بر مؤلفه‌های چون میزان نفوذ واحدهای تجدیدپذیر در ترکیب تولید (واحدهای بادی)، رفاه سرمایه‌گذار (سود شرکت تولیدی) و خسارات زیست‌محیطی، برنامه‌ریزی تنها با در نظر گرفتن اثر این سیاست انجام می‌شود. به‌طور مشابه، سناریوی سوم برنامه‌ریزی (S3) نیز، تنها با در نظر داشتن اثر سیاست تعهد در سهم انجام می‌شود.

جدول (۱): سناریوهای برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید

	سناریو			
	S4	S3	S2	S1
سیاست حق تعرفه	–	–	√	–
سیاست تعهد در سهم	√	√	–	–
اثر رد توربین در مزارع بادی	√	–	–	–

در تمام سناریوهای S1-S3 ظرفیت واحدهای بادی ثابت در نظر گرفته شده و از متغیر بودن تعداد توربین‌ها و نیز اثر رد توربین صرف‌نظر می‌شود. با توجه به مکانیزم سیاست تعهد در سهم با قابلیت دادوستد، در سناریوی چهارم (S4)، اثر این سیاست با لحاظ کردن اثر رد توربین و در نتیجه متغیر فرض کردن تعداد توربین‌های واحدهای بادی اجرا می‌شود. پرواضح است انعطاف در ظرفیت مزارع بادی منتج از متغیر در نظر گرفتن تعداد توربین‌ها در هر مرحله، در کنار لحاظ نمودن اثر رد توربین، می‌تواند باعث سرمایه‌گذاری بهینه‌تری از سوی شرکت تولیدی گردد؛ مادامی که شرکت تولیدی موظف به تولید درصد مشخصی الکتریسیتهٔ سبز در هر سال از افق توسعه است.

در راستای اجرای سناریوهای تعریف‌شده، با توجه به تابع هدف مسئله، روابط (۹) تا (۶)، می‌توان دید که مدل ارائه‌شده از قابلیت لازم برای حذف اثر هریک از سیاست‌ها از برنامه‌ریزی توسعه برخوردار است؛ این امر به‌راحتی با برابر صفر قراردادن پارامترهای متناظر Π_t^{FIT} و Π_i^{TGC} در تابع هدف صورت می‌پذیرد. پس از ارائهٔ نتایج حاصل از برنامه‌ریزی توسعه، به‌ازای هریک از چهار استراتژی توسعهٔ به‌دست‌آمده، مؤلفهٔ خسارت‌های زیست‌محیطی در طول کل افق توسعه، با استفاده از شاخص هزینهٔ اجتماعی محاسبه می‌شود؛ ضمن

آنکه مؤلفه سود شرکت تولیدی متأثر از هریک از سیاست‌ها و میزان ترویج واحدهای تجدیدپذیر خود به‌طور مستقیم از برنامه‌ریزی توسعه حاصل می‌شود. در نهایت، با در نظر گرفتن مجموع مؤلفه‌های فوق طی هر سناریو، از میان سیاست‌های مورد بررسی، سیاست کارآمدتر از دیدگاه اقتصادی ـ زیست‌محیطی معرفی می‌شود.

به‌منظور انجام محاسبات با استفاده از روش ارزش فعلی، نرخ بهره برابر با ۵٪ در نظر گرفته می‌شود. کل بودجهٔ موجود در سال مبنا نیز برابر با ۵۰۰۰ M€ قرار داده می‌شود. ترکیب تولید سال پایه شامل واحدهای سیکل‌ترکیبی[1] با مجموع ظرفیت ۴۲۵۶ MW، واحدهای زغالی[2]، ۷۴۰ MW، واحدهای با سوخت نفت خام[3] ۷۴۱ MW، واحدهای برق‌آبی کوچک[4] ۳۴۰ MW، و واحدهای بادی (از نوع نصب در خشکی) با مجموع ظرفیت ۲۸۰ MW بوده که در کل قادر به تولید ۳۰۷۰۰ GWh انرژی می‌باشند. میزان انتشار متناظر با ترکیب تولید سال پایه نیز برابر با ۷/۱۵ Mt/year است. مجموع ۹ نوع فناوری تولید مشتمل بر واحدهای زغالی، هسته‌ای[5]، سیکل‌ترکیبی، برق‌آبی، بادی، زمین‌گرمایی[6]، زیست‌توده[7]، بیوگاز[8] و خورشیدی[9]، به‌عنوان مجموعه فناوری‌های موجود برای سرمایه‌گذاری در نظر گرفته می‌شوند. سایر اطلاعات مورد نیاز اعم از هزینهٔ سرمایه‌گذاری و تولید، ظرفیت و میزان ساعات استفاده در سال مربوط به هریک از واحدهای منتخب از [۱۴] اتخاذ می‌شود. سایر دیگر اطلاعات مورد نیاز مانند اطلاعات مربوط به سیاست‌های انرژی، قیمت انرژی در بازار، هزینهٔ اجتماعی کربن، ضریب کارایی و ظرفیت توربین‌های بادی، متوسط سرعت در نظرگرفته‌شده برای باد و... نیز از مراجع [۱۱]، [۱۶]، [۲۶] و [۲۷] گردآوری می‌شود. بدین‌ترتیب با پیاده‌سازی مدل ارائه‌شده در محیط نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS در قالب یک مسئله MINLP، جدول (۲) نتایج به‌دست‌آمده از برنامه‌ریزی، طی سناریوهای S1 تا S4، بر اساس نوع، تعداد و سال ورود واحدهای اضافه‌شده را نشان می‌دهد. در این جدول، تعداد واحدهای تجدیدپذیر اضافه‌شده به ترکیب تولید در هر سناریو به‌صورت سایه‌دار مشخص شده است. دربارهٔ واحدهای بادی نیز باید در نظر داشت که اعداد مندرج در جدول (۲)، طی سناریوهای S1-S3 بیانگر تعداد مزارع بادی ۱۰۰MW و در سناریو S4 نشان‌دهندهٔ تعداد توربین‌های نصب‌شده در بازه‌های مرتبط است. مطابق با نتایج نشان داده‌شده در جدول مزبور، طی سناریوی S1، دو واحد۶۰۰ MW زغالی، پنج واحد ۴۰۰ MW سیکل‌ترکیبی، یک واحد ۱۲۰۰ MW هسته‌ای از میان واحدهای متعارف، و تنها دو واحد ۱۰ MW بیوگاز، از میان واحدهای تجدیدپذیر منتخب، به ترکیب تولید پایه اضافه می‌شوند.

جدول (۲): نتایج برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید طی سناریوهای S1 تا S4

سناریو	سال ورود به ترکیب تولید	نوع فناوری تولیدی									
		Biogas	Thermal Solar	Geo Thermal	On-shore Wind	Biomass	Small Hydro	Nuclear	CCGT	Coal
S1	۲۰۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
	۲۰۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
	۲۰۱۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
	۲۰۲۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
	۲۰۲۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
	۲۰۲۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
	۲۰۲۵	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۲۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
S2	۲۰۱۶	۰	۱	۰	۱	۰	۲	۰	۱	۰
	۲۰۱۷	۲	۱	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۱۸	۱	۲	۰	۲	۰	۱	۰	۱	۰
	۲۰۱۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
	۲۰۲۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
	۲۰۲۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
	۲۰۲۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
S3	۲۰۱۶	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰
	۲۰۱۷	۰	۰	۰	۲	۱	۰	۰	۱	۰
	۲۰۱۸	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰
	۲۰۱۹	۱	۰	۰	۱	۱	۲	۰	۰	۰
	۲۰۲۱	۲	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۲۲	۱	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۱
	۲۰۲۵	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱
	۲۰۲۷	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
S4	۲۰۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
	۲۰۱۷	۰	۰	۰	۶۰	۰	۰	۱	۰	۰
	۲۰۱۸	۰	۰	۰	۴۱	۰	۰	۰	۱	۰
	۲۰۱۹، ۲۰۲۰	۰	۰	۰	۹۸	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۲۱	۰	۰	۰	۵۸	۰	۰	۰	۱	۰
	۲۰۲۲	۰	۰	۰	۲۷	۰	۰	۰	۱	۰
	۲۰۲۶_۲۰۲۴	۰	۰	۰	۱۲۵	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۲۷	۰	۰	۰	۵	۱	۰	۰	۰	۰
	۲۰۳۵_۲۰۲۸	۰	۰	۰	۲۲۷	۰	۰	۰	۰	۰

1. Combined-Cycle Gas Turbine (CCGT)
2. Coal-Fired Units (Coal)
3. Oil-Fired Units (Oil)
4. Small Hydro
5. Nuclear
6. Geo Thermal
7. Biomass
8. Biogas
9. Thermal Solar

نتایج حاصل از سناریوی اول حاکی از عدم تمایل شرکت تولیدی برای سرمایه‌گذاری بیشتر روی واحدهای تجدیدپذیر و در نتیجه، ضرورت اعمال سیاست‌های انرژی در بخش تولید است؛ به‌طوری که بنا به دلایلی که قبلاً به آن‌ها اشاره شد، واحدهای تجدیدپذیر از حیث هزینهٔ تمام‌شده به‌ازای هر واحد انرژی نمی‌توانند در شرایط عادی (بدون حمایت‌های تشویقی) با واحدهای متعارف رقابتی داشته باشند.

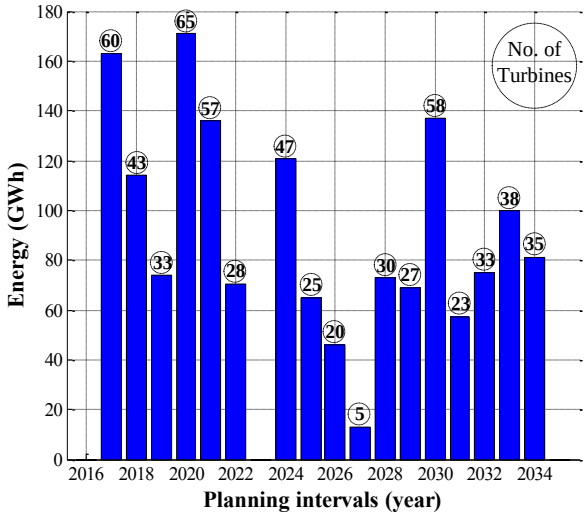
ارزیابی اثر سیاست حق تعرفه بر تصمیمات توسعهٔ شرکت تولیدی طی سناریوی S2 صورت می‌گیرد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی این سناریو، به‌راحتی می‌توان افزایش درصد نفوذ منابع تجدیدپذیر را در مقایسه با سناریوی اول مشاهده کرد. طی سناریوی S2، در واقع سه واحد۱۰MW برق‌آبی، پنج واحد بادی ۱۰۰ MW، چهار واحد ۱۰ MW خورشیدی و سه واحد بیوگاز به ظرفیت تجدیدپذیر سال پایه اضافه می‌شوند. هریک از انواع واحدهای تجدیدپذیر مذکور، به‌ترتیب به‌میزان ۴۲/۷۱ €/MWh، ۴۲/۷۵، ۲۸۰، و ۷۱/۱ به‌ازای هر واحد انرژی تولیدی، از سال شروع بهره‌برداری تا پایان افق برنامه‌ریزی حق بیمه دریافت می‌کنند.

برنامه‌ریزی توسعه با در نظر گرفتن سیاست تعهد در سهم با قابلیت دادوستد، طی سناریو S3 شبیه‌سازی می‌شود. با فرض اینکه درصد تعهد δ_i به‌صورت خطی از ۹٪ در سال ۲۰۱۶ به ۲۲٪ در سال ۲۰۳۵، و قیمت هر گواهی سبز نیز به‌صورت خطی در این بازه از۸۸/۳۸ €/MWh به ۶۲/۲۵ €/MWh تغییر کند، خلاصهٔ تصمیمات توسعهٔ شرکت تولیدی در جدول (۲) آورده شده است.

با توجه به نتایج حاصل مشاهده می‌شود که طی سناریوی سوم توسعه، بیشترین تعداد واحدهای تجدیدپذیر در مقایسه با سناریوهای اول و دوم، به ظرفیت تجدیدپذیر سال پایه اضافه شده است؛ زیرا ماهیت سیاست تعهد در سهم چنین ایجاب می‌کند که متناظر با افزایش ظرفیت واحدهای متعارف در طول افق توسعه، ظرفیت واحدهای تجدیدپذیر نیز افزایش یابد؛ این امر به سرمایه‌گذاری سالانهٔ شرکت تولیدی روی واحدهای تجدیدپذیر انجامیده است؛ به‌طوری که در طول افق برنامه‌ریزی، چهار واحد برق‌آبی، چهار واحد ۲۰ MW زیست‌توده، چهار واحد بادی ۱۰۰ MW، یک واحد ۱۰۰ MW زمین‌گرمایی و چهار واحد بیوگاز مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. شایان ذکر است که این واحدها بسته به پارامتر ساعات استفاده، مقادیر متفاوتی انرژی در طول سال تولید می‌کنند. همان گونه که مشاهده می‌شود، طی اجرای سیاست تعهد در سهم در برنامه‌ریزی، طیف متنوعی از واحدهای تجدیدپذیر، به ترکیب تولید سال پایه اضافه شده‌اند. پاسخ به این سؤال که آیا چنین تنوعی در ترکیب تولید، از عدم وجود انعطاف‌پذیری در ظرفیت واحدهای تجدیدپذیر ناشی می‌گردد یا خیر، را می‌توان در تحلیل نتایج سناریوی چهارم پیدا نمود.

اثر رد توربین و متغیر بودن ظرفیت مربوط به مزرعهٔ بادی منتخب، منتج از متغیر در نظر گرفتن تعداد توربین‌ها، بر استراتژی‌های توسعهٔ شرکت تولیدی، طی سناریوی S4 مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این سناریو، ظرفیت توربین‌های بادی منتخب برابر با ۳ MW، متوسط سرعت باد به‌صورت تصادفی بین ۶ تا ۸ متر بر ثانیه، و محدودیت ساخت سالانه برابر با ۶۵ توربین در سال در نظر گرفته می‌شود [۲۸]. شایان ذکر است که نوع توربین درنظرگرفته‌شده (از حیث ظرفیت) متأثر از نوع و طول افق برنامه‌ریزی است؛ مادامی که در مسائل برنامه‌ریزی توسعهٔ بلندمدت و بزرگ‌مقیاس، واحدهای تجدیدپذیر اغلب در ظرفیت‌های قابل توجه مدنظرند. محدودهٔ سرعت انتخابی نیز متناظر با متوسط سرعت باد در نواحی بادخیز جنوب شرق کشور در نظر گرفته شده است. در خصوص محدودیت نصب (احداث) توربین‌های بادی نیز فرض شده است نیروی متخصص و تجهیزات کافی برای نصب حداکثر این تعداد توربین طی هر دورهٔ برنامه‌ریزی موجود باشد.

همان گونه که از نتایج ارائه‌شده در جدول (۲) می‌توان مشاهده کرد، در نظر گرفتن تعداد توربین‌های بادی به‌جای تعداد مزارع بادی به‌عنوان متغیر بهینه‌سازی، منجر به تغییر قابل توجه استراتژی توسعهٔ شرکت تولیدی طی سناریوی مورد نظر در مقایسه با سناریوی S3 شده است؛ به‌گونه‌ای که در سناریوی S4، شرکت تولیدی بخش کثیری از بودجهٔ خود را به سرمایه‌گذاری روی واحدهای بادی با ظرفیت‌های مختلف تخصیص داده است. به بیانی کامل‌تر، با توجه به نتایج حاصل از S4، در نظر گرفتن اثر رد توربین در برنامه‌ریزی توسعهٔ ظرفیت واحدهای تجدیدپذیر، آن‌گونه که در این مقاله به آن پرداخته شده است، در عین حال که باعث نزدیک‌شدن استراتژی‌های توسعه به شرایط واقعی و نیز تخمین بهتر انرژی تولیدی آن‌ها می‌شود، با ایجاد انعطاف‌پذیری در سرمایه‌گذاری روی واحدهای بادی، طرح‌های توسعهٔ بهینه‌تری را به دست می‌دهد. گفتنی است که در جدول (۲)، از ذکر دقیق تعداد توربین‌های اضافه‌شده طی هریک از سال‌های برنامه‌ریزی به‌دلیل صفربودن تعداد دیگر واحدهای اضافه‌شده در آن سال‌ها اجتناب شده است. به‌منظور ارائهٔ بهتر نتایج مربوط به توسعهٔ واحدهای بادی متأثر از شبیه‌سازی سیاست تعهد در سهم و اثر رد توربین، تعداد توربین‌ها منتخب و میزان تولید آن‌ها طی هریک از سال‌های برنامه‌ریزی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): میزان تولید مزارع بادی منتخب با تعداد توربین‌های متناظر

رفتار تولید انرژی هریک از انواع واحدهای متعارف و تجدیدپذیر، اعم از واحدهای جدید و موجود، در طول افق برنامه‌ریزی به‌ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، در میان واحدهای متعارف، بیشترین سهم در انرژی تولیدی مربوط به واحدهای سیکل‌ترکیبی است. محدودیت انتشار بخش تولید می‌تواند دلیلی برای توجیه این امر باشد؛ زیرا از میان سایر واحدهای متعارف درنظرگرفته‌شده، بیشترین میزان آلایندگی به‌ازای هر واحد انرژی مربوط به واحدهای زغالی، و کمترین میزان انتشار مربوط به واحدهای سیکل ترکیبی با سوخت گاز است. شایان ذکر است که واحدهای با سوخت نفت خام جزء واحدهای منتخب نبوده و تولید آن‌ها از ترکیب تولید سال پایه تا انتهای افق برنامه‌ریزی ثابت در نظر گرفته شده است. از طرفی، طی تمامی سناریوها تنها روی یک واحد هسته‌ای سرمایه‌گذاری شده که به‌رغم عاری بودن آن‌ها از آلاینده‌های جوی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری هنگفت می‌تواند دلیل عدم سرمایه‌گذاری بیشتر روی آن‌ها بوده باشد.

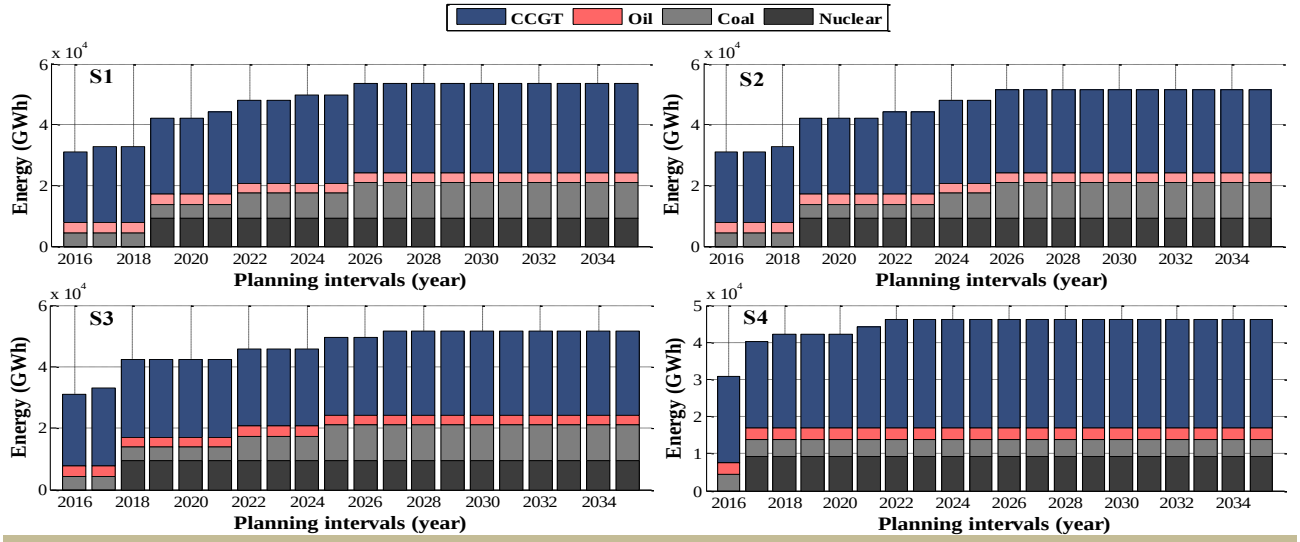
مؤثر بودن سایر سیاست‌های انرژی بر افزایش نرخ نفوذ واحدهای تجدیدپذیر نیز در ترکیب تولید سال پایه نیز در شکل (۷) قابل مشاهده است؛ به‌طوری که متوسط انرژی تولیدی سالانه توسط واحدهای تجدیدپذیر، تقریباً از ۱۸۰۰ GWh در سناریوی اول، به ۲۷۸۰ GWh و ۳۹۰۰، به‌ترتیب طی سناریوهای دوم و سوم برنامه‌ریزی افزایش می‌یابد. همانند نتایج مندرج در جدول (۲)، تأثیر قابل توجه شبیه‌سازی اثر رد توربین و به‌دنبال آن متغیر فرض کردن تعداد توربین‌ها، بر استراتژی‌های توسعه نیز به‌خوبی از مقایسهٔ رفتار تولید انرژی واحدهای تجدیدپذیر طی سناریوهای S3 و S4 قابل مشاهده است. همچنین از مقایسهٔ رفتار تولید انرژی واحدهای متعارف و تجدیدپذیر در سناریوی S4 نیز می‌توان دریافت که علی‌رغم عدم افزایش تولید انرژی با استفاده از واحدهای متعارف از سال ۲۰۲۲ تا انتهای افق توسعه، متناسب با افزایش درصد تعهد در سیاست تعهد در سهم، نرخ نفوذ واحدهای بادی افزایش داشته است؛ که این امر حاکی از اثربخشی بیشتر و به‌نوعی تضمینی سیاست مزبور در ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر، در مقایسه با سیاست حق تعرفه است. اما از چنین مقایسه‌ای در سناریوی S3 می‌توان دریافت که شرکت تولیدی به‌نوعی با سرمایه‌گذاری روی واحدهای تجدیدپذیر با ظرفیتی بیش از آنچه برای عمل به تعهد به آن نیاز داشته است، از فروش مازاد گواهی‌های سبز کسب درآمد کرده است. اینکه طی کدام استراتژی توسعه، شرکت تولیدی بیشترین سود را داشته، در گرو مقایسهٔ ارزش فعلی کل سود حاصل از سناریوهای مختلف برنامه‌ریزی است. بدین منظور، ارزش فعلی مربوط به کل سود شرکت تولیدی طی سناریوهای اجراشده در جدول (۳) آورده شده است. در این جدول همچنین، ارزش فعلی خسارات زیست‌محیطی برآورد شده با استفاده از شاخص هزینهٔ اجتماعی کربن طی هر سناریو، نیز ارائه شده است.

با توجه به جدول (۳)، از مقایسهٔ سایر سناریوهای با سناریوی اول، می‌توان به مؤثر بودن سیاست‌های تشویقی در حمایت از تولیدکننده در راستای ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر، به طرق متفاوت اشاره کرد؛ به‌طوری که سود شرکت تولیدی، تحت سیاست حق تعرفه، بیشترین مقدار را در مقایسه با دیگر سناریوهای شبیه‌سازی‌شده دارد. دلیل این امر را به‌خوبی می‌توان در مکانیزم سیاست حق تعرفه جست؛ زیرا این سیاست حمایت بی‌قیدوشرط و تضمینی از سرمایه‌گذار در سرمایه‌گذاری روی واحدهای تجدیدپذیر را به دنبال دارد.

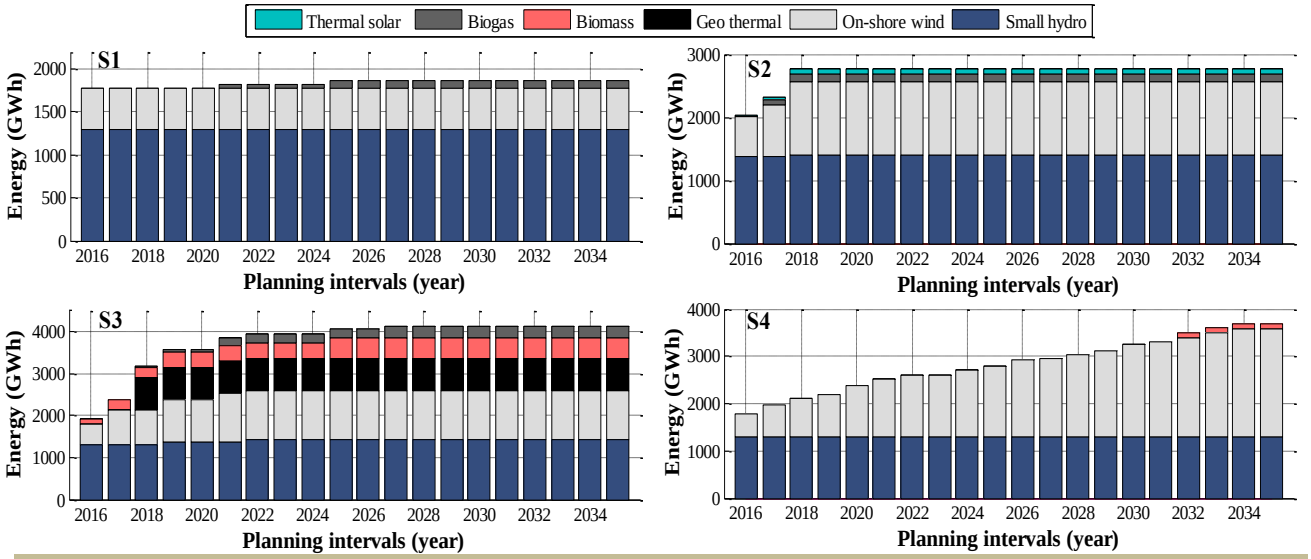
از مقایسهٔ سناریوهای سوم و چهارم با سناریوی دوم، می‌توان دید که تحت اجرای سیاست تعهد در سهم، سود کمتری عاید شرکت تولیدی می‌شود. در این راستا، نکتهٔ قابل توجه دیگر مربوط به مقایسهٔ سود شرکت تولیدی تحت سناریوهای سوم و چهارم برنامه‌ریزی است؛ به‌گونه‌ای که سود شرکت تولیدی تحت سناریوی چهارم بیشتر از سناریوی سوم بوده که این امر حاکی از اثربخشی چهارچوب پیشنهادی برای شبیه‌سازی مزارع بادی در برنامه‌ریزی توسعه بر بهینه‌تر شدن استراتژی‌های توسعه است.

جدول (۳): مؤلفه‌های مطرح در دیدگاه اقتصادی ـ زیست‌محیطی

مقادیر ارزش فعلی (M€)	سناریو			
	S1	S2	S3	S4
سود شرکت	۲۶۷۲۳	۳۰۰۵۸/۶	۲۷۷۲۵/۴	۲۸۰۲۹/۵
خسارات زیست‌محیطی	۲۰۵۱۸۳/۶	۱۹۶۸۷۹	۱۷۶۴۷۲	۱۸۰۵۴۱



شکل (۶): رفتار تولید انرژی واحدهای متعارف طی S1 تا S4



شکل (۷): رفتار تولید انرژی واحدهای تجدیدپذیر طی S1 تا S4

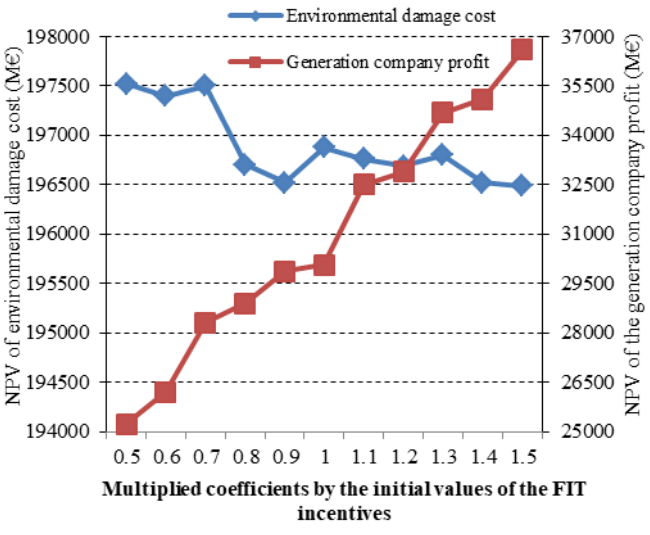
از مقایسهٔ هزینه‌های مربوط به خسارت‌های زیست‌محیطی نیز می‌توان به مؤثر بودن سیاست‌های انرژی بر کاهش هزینه‌های مربوطه پی برد. از آنجا که میزان خسارات تخمین‌زده‌شده در تمامی حالات، بسیار بیشتر از سود شرکت تولیدی است، انتخاب سیاست کارآمدتر از دیدگاه اقتصادی-زیست‌محیطی، می‌تواند تنها از مقایسه خسارات زیست‌محیطی صورت گیرد. در این راستا، نه‌تنها از مقایسهٔ هزینه‌های برآوردشده در جدول (۳)، بلکه از مقایسهٔ نسبت میزان مشارکت منابع انرژی تجدیدپذیر در ترکیب تولید در پایان افق توسعه (میزان الکتریسیتهٔ سبز تولیدی) به کل انرژی عرضه‌شده توسط شرکت تولیدی طی هریک از سیاست‌های حق تعرفه و تعهد در سهم (یعنی سناریوهای S2 و S3 در شکل‌های ۶ و ۷) می‌توان بهره جست. همان گونه که مقایسه‌ها مشاهده می‌شود، سیاست تعهد در سهم، با تضمین افزایش سالانهٔ درصد نفوذ واحدهای تجدیدپذیر، می‌تواند تأثیر بیشتری در کاهش نسبی خسارات زیست‌محیطی مربوط به آلاینده‌های انتشاریافته از بخش تولید به دنبال داشته باشد و از این حیث به‌عنوان سیاستی کارآمدتر در مقایسه با سیاست حق تعرفه معرفی می‌شود.

۱.۵. تحلیل حساسیت

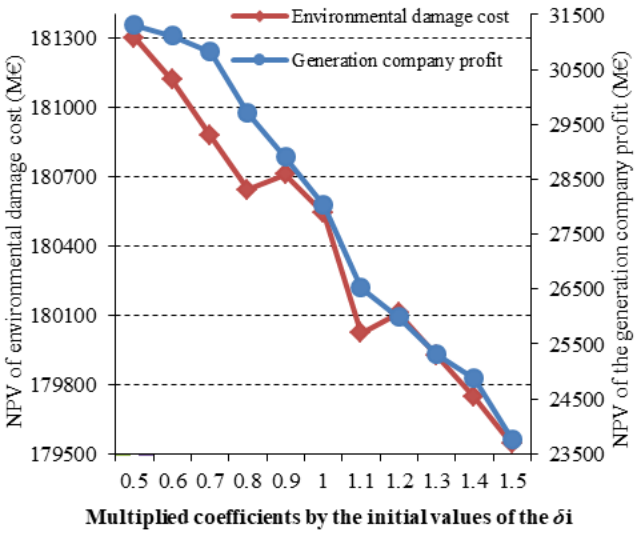
در این بخش به‌منظور درک بهتر اثر سیاست‌های شبیه‌سازی‌شده، حساسیت مؤلفه‌هایی چون سود شرکت تولیدی و خسارات زیست‌محیطی به پارامترهای اصلی این سیاست‌ها، یعنی میزان تشویق‌ها در سیاست حق تعرفه و درصد تعهد در سیاست تعهد در سهم، مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، هریک از سناریوهای

S2 و S4، طی ده تکرار مجدداً شبیه‌سازی می‌شوند؛ مادامی که مقادیر درنظرگرفته‌شده به‌عنوان حق تعرفه در سناریوی S2، همانند مقادیر درصد تعهد سالانه، یعنی δ_i در سناریو S4، در یک ضریب که مقدار آن برای تکرار اول تا دهم، به‌ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷تا ۱/۳، ۱/۴، و ۱/۵ در نظر گرفته شده است، ضرب می‌شوند.

همان‌گونه که از شکل (۸) مشاهده می‌شود، طی سناریوی S2، تغییر میزان تشویق‌ها علی‌رغم آنکه میزان سود شرکت تولیدی را دستخوش تغییر قرار داده است، اثر قابل توجهی در کاهش میزان انتشار ترکیب تولید و به‌تبع، خسارات زیست‌محیطی وارده نداشته است. دلیل این امر را می‌توان در ماهیت سیاست حق تعرفه جست؛ مادامی که در این سیاست، هیچ محدودیت مستقیمی بر میزان انتشار ترکیب تولید وارد نمی‌شود. اگرچه این ادعا دربارهٔ سیاست تعهد در سهم نیز صحیح است، تضمینی بودن افزایش درصد نفوذ واحدهای تجدیدپذیر از یک سو و محدودیت بودجه از سوی دیگر، مانع از سرمایه‌گذاری شرکت تولیدی روی واحدهای متعارف و لذا افزایش سهم تولید از واحدهای فسیلی و فروش انرژی در بازار توسط این واحدها از سوی شرکت تولیدی می‌گردد. بدیهی است این امر به کاهش نسبی سود سرمایه‌گذار و نیز خسارات زیست‌محیطی وارده از سوی آن به جامعه، همان گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، منجر خواهد شد.



شکل (۸): حساسیت سود شرکت تولید و خسارات زیست‌محیطی به تشویق‌های پرداخت‌شده طی سیاست حق تعرفه



شکل (۹): حساسیت سود شرکت تولیدی و خسارات زیست‌محیطی به درصد تعهد در سیاست تعهد در سهم

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، به ارزیابی اثر رایج‌ترین سیاست‌های انرژی از دیدگاه‌های مختلفی چون میزان نفوذ واحدهای تجدیدپذیر در ترکیب تولید (به‌خصوص واحدهای بادی)، خسارات زیست‌محیطی به‌بارآمده از آلاینده‌های بخش تولید، و رفاه سرمایه‌گذار در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعهٔ واحدهای نیروگاهی پرداخته می‌شود. بدین منظور، ابتدا با ترکیب سیاست‌های حق تعرفه و تعهد در سهم با مدل برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید، مدلی جامع برای برنامه‌ریزی همزمان توسعهٔ ظرفیت واحدهای متعارف و تجدیدپذیر ارائه می‌شود. در این راستا، به‌جای متغیر فرض کردن تعداد واحدهای بادی ظرفیت-ثابت، با در شبیه‌سازی اثر رد توربین در مزارع بادی، تعداد توربین‌های واحدهای منتخب به‌عنوان متغیر بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود؛ مدل مزبور در قالب یک مسئلهٔ غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح، طی چندین سناریو، در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS پیاده‌سازی و با استفاده از بهینه‌ساز BARON از دید یک شرکت تولیدی حل می‌شود. سپس با توجه به استراتژی‌های بهینهٔ توسعه، اثر سیاست‌های مورد نظر بررسی می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از مؤثر بودن سیاست‌های انرژی بر ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر و نیز کاهش آلاینده‌های انتشاریافته از بخش تولید است. علاوه بر این، بررسی‌ها نشان می‌دهد که شبیه‌سازی اثر رد توربین در واحدهای بادی در برنامه‌ریزی توسعه تحت اجرای سیاست تعهد در سهم، همان گونه که انتظار می‌رفت، می‌تواند علاوه بر دستیابی به نتایجی عملی‌تر، به استراتژی توسعهٔ بهینه‌تری نیز بینجامد؛ مادامی که علی‌رغم افزایش درصد نفوذ واحدهای بادی مطابق با درصد تعهد در سیاست تعهد در سهم، مدل‌سازی دقیق‌تر واحدهای بادی، باعث افزایش سود نهاد برنامه‌ریز شده است.

همچنین یافته‌های حاصل از مطالعهٔ حاضر مؤید آن است که در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه، سیاست تعهد در سهم در مقایسه با سیاست حق تعرفه، از حیث اثربخشی بر ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر و نیز کاهش خسارات زیست‌محیطی به‌بارآمده از آلاینده‌های گازی بخش تولید کارآمدتر است.

پیوست: برنامه‌ریزی غیرخطی در نرم‌افزار GAMS

محدودهٔ وسیعی از مسائل بهینه‌سازی غیرخطی، شامل متغیرهای عدد صحیح یا گسسته، همراه با متغیرهای پیوسته‌اند. این دسته از مسائل بهینه‌سازی در بسیاری از کاربردهای واقعی ظاهر می‌شوند و به‌صورت مسائل عدد صحیح آمیخته غیرخطی، یا همان برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح، نمایش داده می‌شوند. متغیرهای گسسته در برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید می‌توانند برای مثال، برای مدل‌سازی تعداد واحدها منتخب برای سرمایه‌گذاری، سال ورود به ترکیب تولید یا تعداد گواهی‌های مبادله‌شده در سیاست تعهد در سهم، یا حتی برای مشخص کردن در مدار بودن یا نبودن یک واحد (به‌صورت باینری)، به کار برده شوند. متغیرهای پیوسته نیز می‌توانند برای مدل‌سازی ظرفیت بهینهٔ تولید هر واحد، در طول هریک از سال‌های برنامه‌ریزی، مورد استفاده قرار گیرند.

حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی به‌صورت کلاسیک (و نه ابتکاری)، مستلزم به‌کارگیری یکی از الگوریتم‌های MINLP می‌باشد؛ از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم شاخه و کران، تقریب خارجی[1] و الگوریتم تقریب خارجی با کاهش قیود تساوی[2] اشاره کرد.

بهینه‌ساز BARON به‌عنوان یکی از بهینه‌سازهای قدرتمند در کتابخانهٔ GAMS، طراحی‌شده برای حل مدل‌های غیرخطی مقید همراه با برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته بدون مداخلهٔ کاربر، در واقع مبتنی بر الگوریتم‌های شاخه و کران و تقریب خارجی با کاهش است. بهینه‌ساز مزبور، زمانی که گزینه‌های حل زیادی برای یک مسئله موجود باشد، به‌صورت خودکار، بسته به تعداد حد مجاز تکرارها و طول بازهٔ زمانی فرایند حل، تمام یا بخش بیشتر این انتخاب‌ها را برای رسیدن به مقدار بهینه، محاسبه و امتحان می‌کند. ازاین‌روست که روش‌های حل برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح، در مقایسه با برنامه‌ریزی خطی آمیخته یا برنامه‌ریزی خطی خالص، از حجم محاسبات بسیار بالاتر و به‌تبع، زمان پردازش طولانی‌تر برخوردارند. در ادامه، به‌اختصار، به نحوهٔ بررسی وضعیت جواب‌ها در خروجی نرم‌افزار، از حیث بهینه‌بودن جواب‌ها، رسیدن متغیرها به کران قیود و... پرداخته می‌شود.

خروجی برنامهٔ GAMS، علاوه بر مقادیر یافته‌شده برای متغیرها، شامل اطلاعات مفیدی برای بررسی و درک مدل، و نیز عملکرد بهینه‌ساز به کار گرفته‌شده برای حل مدل است. پنجرهٔ خروجی که در زبانه‌ای با پسوند .lst بعد از اتمام فرایند بهینه‌سازی ظاهر می‌شود، در واقع، مجموعه اطلاعاتی کامل از خطاهای احتمالی، جزئیات خروجی مدل، مقادیر متغیرها در محدوده‌های تعریف‌شده در قالب قیود، متغیرهای میل‌کرده به کران‌های قیود و... را نمایش می‌دهد. حال، در مجموعه اطلاعات ظاهرشده در زبانهٔ مزبور، اطلاعاتی از خلاصهٔ حل (روند بهینه‌سازی)، با عنوان Solve Summary وجود دارد؛ این خلاصه شامل چند بخش بوده که دو قسمت آن، تحت عناوین SOLVER STATUS و MODEL STATUS، به‌ترتیب با یک کد (Flag)، جزئیاتی در مورد مدل مسئله، با محوریت اینکه آیا مدلی منطبق با مدل‌سازی مسئله انتخاب شده است یا خیر، در کنار جزئیاتی از عملکرد بهینه‌ساز به کار گرفته‌شده را ارائه می‌دهند. بسته به پارامترهایی چون نحوهٔ مدل‌سازی، نوع مدل (میزان انطباق نوع مدل انتخابی با مدل‌سازی مسئله)، نوع بهینه‌ساز، تعداد متغیرها و نیز بسته به حد زمان اجرا و تعداد تکرارهای در نظر گرفته‌شده، کدهای مزبور برای وضعیت بهینه‌ساز و وضعیت مدل، به‌ترتیب بازه اعداد صحیح ۱ تا ۶، و بازه اعداد صحیح ۱ تا ۱۱ را در بر می‌گیرند و هر عدد در واقع متناظر با توضیحاتی از وضعیت‌های مدل و بهینه‌ساز می‌باشند. حال چنانچه به‌صورت زیر، کد ظاهرشده در جلوی هر دو عبارات SOLVER STATUS و MODEL STATUS عدد ۱ باشد، معانی آن‌ها به‌ترتیب عبارت‌اند از:

SOLVER STATUS: 1 NORMAL COMPLETION

ـ «بهینه‌ساز با مدل مسئله سازگار بوده و جواب را در یک فرایند عادی، یعنی بدون رسیدن به محدودیت کران‌های بالای زمان اجرا و تکرار، به دست آورده است.» این وضعیت در واقع یکی از شروط بهینگی سراسری جواب در نرم‌افزار بهینه‌سازی مورد نظر است؛

MODEL STATUS: 1 OPTIMAL

ـ «مسئله با استفاده از بهینه‌ساز مورد نظر به جواب بهینه همگرا شده و جواب حاصل جواب بهینهٔ سراسری می‌باشد.» این وضعیت در واقع شرط کافی برای پذیرش قطعی بودن مقادیر یافته‌شده برای متغیرهای مسئله است.

نظر به اینکه مدل ارائه‌شده در مقالهٔ حاضر به وضعیت مطلوب فوق در فرایند بهینه‌سازی ختم شده است، می‌توان آن‌ها را جواب‌های بهینهٔ سراسری در فضای جست‌وجوی مسئلهٔ بهینه‌سازی قلمداد کرد. شایان ذکر است که با توجه به ماهیت مسئلهٔ برنامه‌ریزی مورد نظر، یعنی برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید، از حیث افق برنامه‌ریزی، و لذا مطرح نبودن طول زمان حل مسئلهٔ بهینه‌سازی، در نظر گرفتن یک بازه طولانی برای

1. Outer Approximation
2. Relaxation

زمان اجرا، در کنار یک حد بالا برای تعداد تکرارها می‌تواند در همگرایی مسائل برنامه‌ریزی غیرخطی به جواب بهینهٔ سراسری حائز اهمیت باشد؛ مادامی که در این طیف از این مسائل برنامه‌ریزی، یعنی مسائل برنامه‌ریزی غیرخطی، تخصیص زمان اجرا به‌صورت کوتاه یا تعداد تکرارهای پایین، متأثر از اهمیت بازهٔ زمانی حل مسئله، می‌تواند ترکیب‌های مختلفی را برای وضعیت مدل و بهینه‌ساز رقم زند.

مراجع

[1] Lu, Z., Qi, J., Wen, B. and Li, X.,"*A Dynamic Model For Generation Expansion Planning Based on Conditional Value-at-Risk theory under Low-Carbon Economy*", Electric Power Systems Research, Vol. 141, pp. 363-371, 2016.

[2] Kampa, M., Castanas, E., "*Human Health Effects of Air Pollution*" Environmental Pollution, Vol. 151, No. 2, pp. 362-367, 2008.

[3] Carfora, A., et al., "*Renewable Energy Development and Green Public Policies Complementarities: The Case of Developed and Developing Countries*", Renewable Energy, Vol. 115, No. 3, pp. 741-749, 2018.

[4] Nie, S., et al., "*The Potential Role of Carbon Capture and Storage Technology in Sustainable Electric-Power Systems Under Multiple Uncertainties*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 80, No. 7, pp. 467-480, 2017.

[5] Tang, X., et al., "*Clean Coal Use in China: Challenges and Policy Implications*", Energy Policy, Vol. 87, No. 4, pp. 517-523, 2015.

[6] Summerbell, D.L., et al., "*Cost and Carbon Reductions from Industrial Demand-side Management: Study of potential Savings at a Cement Plant*", Applied Energy, Vol. 197, No. 5, pp. 100-113, 2017.

[7] Wolisz, H., et al., "*Feasibility and Potential of Thermal Demand Side Management in Residential Buildings Considering Different Developments in the German Energy Market*", Energy Conversion and Management, Vol. 107, No. 5, pp. 86-95, 2016.

[۸] جدیدالاسلام، مرتضی، ابراهیمی، اکبر، «**برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید با در نظر گرفتن برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا با استفاده از الگوریتم ABC**»، نشریه علمی‌پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال چهارم، شمارهٔ اول، صفحهٔ ۲ـ۱۵، ۱۳۹۳.

[9] Motie, S., et al., "*Generation Expansion Planning by Considering Energy-Efficiency Programs in a Competitive Environment*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 80, No. 6, pp. 109-118, 2016.

[10] Rajesh, K., Kannan, S., and Thangaraj, C., "*Least Cost Generation Expansion Planning with Wind Power Plant Incorporating Emission Using Differential Evolution Algorithm*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 80, No. 1, pp. 275-286, 2016.

[11] Barroso, L., et al., "*The Green Effect*", Power and Energy Magazine, IEEE, Vol. 8, No. 5, pp. 22-35, 2010.

[12] Pereira, A.J., and 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, No. 3, pp. 41-50, 2013.

[13] Zhou, Y., Wang, L., Calley, JD., "*Designing Effective and Efficient Incentive Policies for Renewable Energy in Generation Expansion Planning*", Applied Energy. Vol. 88, No. 6, pp. 2201-9, 2011.

[14] Sadeghi, H., Abdollahi, A., Rashidinejad, M., "*Evaluating the Impact of FIT Financial Burden on Social Welfare in Renewable Expansion Planning*", Renewable Energy, Vol. 75, No. 3, pp. 199-209, 2015.

[15] Sijm, J.P.M., "*The Performance of Feed-In Tariffs to Promote Renewable Electricity in European Countries*", Energy research Centre of the Netherlands ECN, 2002.

[16] 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*", Energy Policy, Vol. 39, No. 8, pp. 4614-4623, 2011.

[17] Ragwitz, M., et al., "*Assessment and Optimization of Renewable Eenergy Support Schemes in the European Electricity Market*", Fraunhofer IRB Verlag, 2007.

[18] Jensen, N.O., "*A Note on Wind Generator Interaction*", Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, Tech. Report M2411, November 1983.

[19] Ainslie, J.F., "*Calculating the Flowfield in the Wake of Wind Turbines*", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 27, No. 3, pp. 213–224, 1988.

[20] Larsen, G. C., "*A Simple Wake Calculation Procedure*", RISO National Laboratory, Roskilde, DK-4000, Denmark, Dec. 1988.

[21] Mortensen, N.G., et al., "*Wind Atlas Analysis and Application Program: WAsP 8 Help Facility. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark. 335 topics*", pp. 181-185, 2005.

[22] Luenberger D.G., "*Microeconomic Theory*", New York: McGraw-Hill, 1995.

[۲۳] محسنی، عادل، عابدی، مهرداد، قره‌پتیان، گئورک، «**برنامه‌ریزی توسعهٔ تولید انرژی الکتریکی و جایابی نیروگاه بر پایهٔ الگوریتم ژنتیک ارتقایافته و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی**»، نشریه علمی‌پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال سوم، شمارهٔ دوم، صفحهٔ ۲ـ۱۳، ۱۳۹۲.

[24] Farag, A., Al-Baiyat, S., Cheng, T., "*Economic Load Dispatch Multi Objective Optimization Procedures Using Linear Programming Techniques*", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 731-738, 1995.

[25] Environmental Protection Agency (EPA): http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/global.html.

[26] D'Amico, G., Petroni, F. and Prattico, F., "*Economic Performance Indicators of Wind Energy Based on Wind Speed Stochastic Modeling*", Applied Energy, Vol. 154, pp. 290-297, 2015.

[27] Available online: https://www. wind-energy-the-facts.org/images/chapter1.pdf.