

سیاست‌های انرژی و بررسی جامع اثرات آن‌ها به دنبال تعیین طرح بهینه توسعه توأم ظرفیت واحدهای تجدیدپذیر و متعارف

هادی صادقی^۱، دانشجوی دکتری؛ مسعود رشیدی‌نژاد^۲، استاد؛ امیر عبدالهی^۳، دانشیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی - بخش برق، انجمن پژوهشگران جوان - دانشگاه شهید باهنر - کرمان - ایران - h.sadeghi@eng.uk.ac.ir

۲- دانشکده فنی و مهندسی - بخش برق - دانشگاه شهید باهنر - کرمان - ایران - mrashidi@uk.ac.ir

۳- دانشکده فنی و مهندسی - بخش برق - دانشگاه شهید باهنر - کرمان - ایران - a.abdollahi@uk.ac.ir

چکیده: در این مقاله، ضمن معرفی سیاست‌هایی که امروزه در کشورهای مختلف، به منظور کاهش آلاینده‌های انتشار یافته از بخش تولید و نیز ترویج واحدهای تجدیدپذیر به تصویب و اجرا رسیده‌اند، به ارزیابی اثرات برخی از آن‌ها بر مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی، در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه تولید پرداخته می‌شود. در این راستا، ابتدا با ترکیب رایج‌ترین این سیاست‌ها با مدل برنامه‌ریزی توسعه تولید، مدلی جامع تحت عنوان IRCGEP همراه با قیود لازم برای شبیه‌سازی سیاست‌های انرژی، ارائه می‌گردد؛ مدل مزبور، طی سناریوهای متعدد از دید یک شرکت تولیدی، در قالب یک مسئله غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح، با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS حل می‌شود. سپس، با توجه طرح‌های بهینه توسعه، اثر سیاست‌های در نظر گرفته شده بر مؤلفه‌هایی چون مازاد رفاه مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی، خسارت‌های زیست‌محیطی، و نیز سود شرکت تولیدی ارزیابی می‌گردد. در این میان، شاخصی مناسب تحت عنوان شاخص قیمت مجازی نیز برای محاسبه مازاد رفاه مصرف‌کننده متأثر از بار مالی برخی از سیاست‌ها، ارائه می‌شود؛ ضمن آن‌که تخمین خسارت‌های زیست‌محیطی با به‌کارگیری شاخص هزینه اجتماعی کربن صورت می‌گیرد. نتایج حاصله علاوه بر تأثیر مثبت سیاست‌های انرژی بر ترویج منابع تجدیدپذیر و کاهش انتشار آلاینده‌های بخش تولید، مبین کارآمدترین سیاست در میان سیاست‌های مورد بررسی، از دیدگاه اقتصادی - زیست‌محیطی نیز است.

واژه‌های کلیدی: سیاست‌های انرژی، طرح توسعه ظرفیت، قیمت مجازی، مازاد رفاه مصرف‌کننده، خسارت زیست‌محیطی.

Energy Policies and Comprehensive Evaluation of Their Impacts on Determining the Optimal Amalgamated Expansion Strategy of Renewable and Conventional Units Capacity

H. Sadeghi¹, Ph.D Student; M. Rashidinejad², Professor; A. Abdollahi³, Associate Professor

1- Faculty of Engineering, Electrical Engineering Department, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran, Email: h.sadeghi@eng.uk.ac.ir

2- Faculty of Engineering, Electrical Engineering Department, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran, Email: mrashidi@uk.ac.ir

3- Faculty of Engineering, Electrical Engineering Department, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran, Email: a.abdollahi@uk.ac.ir

Abstract: In this paper, the impacts of energy policies on environmental and economic issues are investigated in the context of generation expansion planning (GEP) problem. Furthermore, detailed explanations on how these policies work is elaborated. For this purpose, first, by incorporating some of the most popular energy policies into the GEP problem, a comprehensive model is proposed. Named Integrated Renewable-Conventional Generation Expansion Planning (IRCGEP), the model is based on a suitably modified objective function and additional constraints. The IRCGEP model is formulated as a mixed integer non-linear programming problem and solved in several scenarios using GAMS optimization package from a generation company point of viewed. Then, regarding the obtained optimized expansion strategies, the effects of the policies on the generation company's profit, electricity consumers surplus, and environmental damages cost is examined. In this framework, to analyze the consumer surplus affected by financial burden of the policies, an appropriate price criterion, the so called "virtual price", is also proposed. Analyzing the cost of environmental damages derived from power sector emission is accomplished by the estimated social cost of carbon. Obtained results reveal that the energy policies have positive impacts on renewable energy promotion as well as emission mitigation. In addition, among considered policies, the most effective policy is introduced from an economic-environmental perspective.

Keywords: Energy policies, capacity expansion strategy, virtual price, consumer surplus, environmental damages cost.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۱۶

نام نویسنده مسئول: مسعود رشیدی‌نژاد

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کرمان - بلوار ۲۲ بهمن - دانشگاه شهیدباهنر - دانشکده فنی و مهندسی، بخش برق.

۱- مقدمه

تولید، تدوین یافته‌اند. شرایط و ضوابط مزبور، در قالب طرح‌های مختلف با محوریت ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر (کاهش آلاینده‌های بخش تولید به صورت غیرمستقیم) و یا محدود کردن میزان انتشار آلاینده‌ها (کاهش انتشار بخش تولید به صورت مستقیم)، در سایه یک مفهوم کلی تحت عنوان «سیاست‌های انرژی» جای می‌گیرند که هم‌اکنون در بسیاری کشورها از جمله کشورهای عضو اتحادیه اروپا، در حال اجرا می‌باشند [۳]. لازم به ذکر است که طبیعت اجتناب‌ناپذیر استفاده از انرژی الکتریکی و روند رو به رشد تقاضا برای آن، باعث شده است که ترویج و توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر، به عنوان اصلی‌ترین راه کار برای مقابله با معضلات زیست‌محیطی و آب و هوایی تلقی گردد؛ چراکه علی‌رغم پیشرفت‌های حاصله در زمینه تولید انرژی با هدف حداقل ساختن میزان انتشار آلاینده‌ها، مانند تجهیزات جذب و ذخیره کربن [۴] یا سوخت زغال سنگ پاک [۵]، همچنان کاهش آلاینده‌های انتشار یافته از بخش تولید، در گرو کاهش تولید با استفاده از واحدهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی است؛ در این میان، اجرای برنامه‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی در مصارف صنعتی [۶] و خانگی [۷]، و برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا در بستر شبکه‌های هوشمند [۸-۱۰]، از دیگر راه کارهایی هستند که می‌توانند در راستای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از بخش تولید انرژی الکتریکی، مؤثر واقع شوند. لیکن با توجه به رشد تقاضای انرژی، پر واضح است که راه کارهای مزبور نمی‌توانند همانند راهکار ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر، در زمینه کاهش انتشار بخش تولید مثر واقع شوند. از این رو، ترویج و توسعه واحدهای مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر، محوریت اصلی بعضی از سیاست‌های انرژی را در بر می‌گیرد. انواع سیاست‌ها و سازوکار آن‌ها در بخش بعدی به تفصیل شرح داده می‌شوند. با توجه به مطالب فوق، می‌توان گفت دستیابی به طرح‌های بهینه توسعه در بخش تولید، با توجه به تأثیرات مختلف به بارآمده از اجرای سیاست‌های انرژی بر روند تولید، به گونه‌ای مستلزم در نظر گرفتن این سیاست‌ها در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت توسعه بخش تولید است.

چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه واحدهای نیروگاهی، نگرانی‌های زیست‌محیطی و آب و هوایی، راهکارهای ارائه شده برای کاهش انتشار بخش تولید، و به تبع، اثرات مختلف آن‌ها بر تصمیمات بهره‌برداری و توسعه بخش تولید، محوریت مطالعات متعددی را در بر می‌گیرد که طی دهه اخیر انجام شده‌اند؛ در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره می‌شود. در [۱، ۱۱، ۱۲]، در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی در برنامه‌ریزی توسعه تولید، با اضافه کردن یک قید انتشار در روند بهینه‌سازی انجام می‌گردد؛ نتایج به دست آمده در این مطالعات حاکی از آن است که اعمال محدودیت انتشار به بخش تولید، اثرات مختلفی چون، افزایش هزینه تولید، کاهش تمایل برای سرمایه‌گذاری، و در نهایت، کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها را به دنبال دارد؛ ارزیابی راه کارهای مختلف به منظور کاهش وابستگی بخش تولید به منابع سوخت‌های فسیلی در [۱۳] و برنامه‌ریزی توسعه با در نظر داشتن

توسعه شگرف علم و فناوری در جهان امروز، ظاهراً آسایش و رفاه زندگی بشر را موجب شده است؛ لیکن این توسعه یافتگی، مایع بروز مشکلات تازه‌ای نیز برای انسان‌ها شده است که از آن جمله می‌توان به آلودگی‌های زیست‌محیطی و تغییرات شرایط آب و هوایی اشاره نمود. بر همگان مبرهن است که انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف این سوخت‌ها در بخش‌هایی چون بخش حمل و نقل و یا بخش تولید انرژی الکتریکی، به عنوان عامل اصلی مشکلات فوق‌الذکر، تهدیدی جدی برای ادامه حیات بشر بر روی کره زمین محسوب می‌گردد. از این رو، طی سال‌های اخیر، دولت‌های مختلف، در پی یافتن راه کارهایی برای مواجهه با این معضل جهانی، به هم‌اندیشی برآمده‌اند. در این میان، انکارناپذیری وابستگی صنایع و بخش‌های مختلف جامعه به انرژی الکتریکی و افزایش روزافزون تقاضا برای آن، بخش تولید انرژی الکتریکی را به یکی از مهم‌ترین حوزه‌ها برای بازنگری در مقررات، اعمال محدودیت‌ها، و پیاده‌سازی راه کارها، مبدل ساخته است. این امر باعث شده است که به موازات بحث برنامه‌ریزی توسعه تولید و تأمین تقاضای انرژی، امروزه، بحث تغییرات شرایط آب و هوایی و مسائل زیست‌محیطی مربوط به آلاینده‌های گازی مختلف انتشار یافته از بخش تولید نیز در کانون توجه برنامه‌ریزان و مسئولان ذی‌ربط قرار گیرد [۱]. اشاره دقیق‌تر به آن چه که توجه جهانیان را به معضلات مزبور جلب نموده است، می‌تواند در درک هرچه بیش‌تر موضوع، مؤثر باشد.

گازهای گلخانه‌ای آزاد شده در فرایند تولید انرژی (از جمله گاز دی‌اکسید کربن)، با تشدید اثر گلخانه‌ای و لذا گرمایش جهانی زمین، باعث بالا آمدن سطح آب دریاها، تغییر در میزان بارش برف و باران، افزایش بلایای طبیعی مثل طوفان و یا سیل، افزایش میزان خشک‌سالی و توسعه مناطق بیابانی، گسترش بیماری‌هایی نظیر مالاریا، اثر نامطلوب بر روی صنایع کشاورزی مانند رسیدن زود هنگام محصولات، و غیره، می‌گردند. بحث تأثیرات آلودگی‌های هوا بر سلامت انسان‌ها نیز از دیگر جنبه‌هایی است که باعث اهمیت یافتن مسائل زیست‌محیطی، بیش از پیش گردیده است؛ به طوری که بررسی عوارض ناشی از آلودگی هوا که به صورت گسترده و پایدار سلامت ساکنان منطقه آلوده را تحت الشعاع قرار می‌دهد، آن را چهارمین عامل مرگ‌ومیر در جهان معرفی می‌کند. طبق آمار، یک میلیارد و ۴۰۰ میلیون نفر در جهان در معرض آلودگی هوا قرار دارند که سالانه ۳ میلیون نفر از آن‌ها، به دلیل عوارض مستقیم یا غیرمستقیم ناشی از آن، جان خود را از دست می‌دهند [۲].

با توجه به آن چه که تا به این جا به آن اشاره گردید، رشد روزافزون تقاضا برای انرژی الکتریکی از یکسو، و نگرانی‌های ناشی از مسائل زیست‌محیطی و تغییرات شرایط آب و هوایی 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

می‌شوند؛ معرفی و شرح ماهیت اجرایی کلیه سیاست‌های انرژی که امروزه در بسیاری از کشورهای دنیا در حال اجرا می‌باشند در بخش دوم ارائه می‌گردد. بخش سوم به ارائه مدل IRCGEP و بیان قیود مربوطه اختصاص می‌یابد؛ در این بخش همچنین نحوه محاسبه خسارات زیست‌محیطی و مازاد رفاه مصرف‌کننده نیز بیان می‌گردد. نتایج به‌دست آمده از برنامه‌ریزی توسعه تولید طی سناریوهای مختلف همراه با تحلیل نتایج در بخش چهارم گردآوری و در نهایت نتیجه‌گیری در بخش پنجم آورده می‌شود.

۲- سیاست‌های انرژی

به‌طور کلی، آن‌چه که به‌عنوان عوامل بازدارنده شرکت‌های تولیدی و یا سرمایه‌گذاران از سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر شناخته می‌شود، به هزینه‌های سرمایه‌ای بالا، نرخ تولید پایین واحدهای مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر، و طولانی‌بودن طول دوره بازگشت سرمایه مربوط می‌شود. بنابراین، محوریت آن دسته از سیاست‌های که ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر را دنبال می‌کنند، به‌نوعی در راستای رفع معضلات فوق است. این دسته از سیاست‌ها، سیاست‌های تشویقی نیز نامیده می‌شوند. در این بین، اهمیت بحث کنترل و کاهش گازهای گلخانه‌ای و جلوگیری از روند تغییرات شرایط آب‌وهوایی از یکسو، و کافی‌نبودن تأثیر ترویج و توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر در کاهش انتشار آلاینده‌های بخش تولید از سوی دیگر، به ظهور دسته‌ای دیگر از سیاست‌های انرژی انجامید که تأثیر مستقیم بر کنترل و کاهش انتشار بخش تولید دارند. علاوه بر نوع محوریت اصلی دنبال‌شده (ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر یا کاهش انتشار)، به‌طور کلی مجموعه سیاست‌های انرژی برحسب این‌که در آن‌ها قیمت (مثلاً قیمت هر واحد انرژی تولیدی) یا مقدار (مثلاً مقدار انرژی یا میزان انتشار آلاینده‌ها) مدنظر باشد، نیز به دو دسته سیاست‌های مبتنی بر قیمت و سیاست‌های مبتنی بر مقدار تقسیم‌بندی می‌شوند. در ادامه این بخش، به معرفی انواع مختلف سیاست‌های انرژی پرداخته می‌شود.

۲-۱- سیاست حق تعرفه

بنا به تعریف ارائه‌شده در [۱۷]، 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 دوره زمانی مشخص، با توجه به هزینه تولید و نوع فناوری به‌خدمت گرفته‌شده. بنابراین، سیاست حق تعرفه تأثیر مستقیم بر ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر داشته و کاهش انتشار نسبی بخش تولید، به‌عنوان یک اثر ثانویه ناشی‌شده از آن تلقی می‌گردد. همچنین، از آنجاکه تشویق‌های در نظر گرفته‌شده به‌صورت حق بیمه (یک مقدار ثابت)، مازاد بر قیمت انرژی در بازار، طی دوره زمانی مشخص، متناسب با هر مقدار (اختیاری) انرژی تولیدی به تولیدکننده پرداخت می‌شود، این نوع سیاست در زمره سیاست‌های مبتنی بر قیمت قرار می‌گیرد. به بیان دیگر، در این نوع سیاست، تعهدی مبنی بر مقدار توان، در قرارداد بین

مشارکت منابع تجدیدپذیر در [۱۴]، برخی از دیگر مطالعات انجام‌شده در این زمینه می‌باشند. همچنین مدلی جامع برای برنامه‌ریزی توسعه تولید با هدف تعیین سیاست‌های بهینه انرژی در [۱۵] ارائه می‌شود؛ مروری اجمالی نیز بر سیاست‌های انرژی، مزایا و معایب آن‌ها در چارچوب برنامه‌ریزی توسعه تولید در [۱۶] صورت می‌گیرد.

علی‌رغم مطالعات عبیده‌ای که در زمینه تأثیرپذیری طرح‌های توسعه سرمایه‌گذاران در بخش تولید از سیاست‌های انرژی و موثربودن این سیاست‌ها در ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر یا کاهش انتشار آلاینده‌های جوی از بخش تولید صورت گرفته‌است، ارزیابی جامع این سیاست‌ها از حیث بارمالی ناشی‌شده توسط آن‌ها (هزینه سیاست‌های انرژی) و نهاد متحمل‌شونده این بار مالی، و نیز چگونگی تأثیر آن‌ها بر هزینه‌های زیست‌محیطی و یا سود سرمایه‌گذاران بخش تولید، از مباحثی است که تاکنون کم‌تر به آن‌ها توجه شده است.

در مقاله پیش‌رو، با در نظر گرفتن اثر رایج‌ترین سیاست‌های انرژی با عنوان سیاست حق تعرفه^۱، سیاست تعهد در سهم^۲، و سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد^۳ در برنامه‌ریزی توسعه تولید، مدلی جامع با عنوان IRCGEP^۴ برای برنامه‌ریزی بلندمدت توسعه ظرفیت واحدهای نیروگاهی از دید یک شرکت تولیدی ارائه می‌شود. مدل مزبور در محیط نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS در قالب یک مسئله غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح (MINLP) پیاده‌سازی شده و توسط یکی از معروف‌ترین بهینه‌سازهای موجود در کتابخانه این نرم‌افزار، تحت عنوان بهینه‌ساز BARON، طی سناریوهای متعدد حل می‌گردد.

با مشخص شدن طرح‌های توسعه شرکت تولیدی متأثر از هر یک از سیاست‌های انرژی مورد نظر، مؤلفه‌هایی چون میزان انتشار یافته از ترکیب تولید در هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی، سود شرکت تولیدی، و مازاد رفاه مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی محاسبه می‌گردند. در این راستا، ارزیابی مؤلفه مازاد رفاه تحت اجرای آن دسته از سیاست‌هایی که بار مالی آن‌ها بر نهاد مصرف‌کننده تحمیل می‌شود، با ارائه شاخصی مناسب با عنوان قیمت مجازی^۵ صورت می‌گیرد. همچنین با تخمین میزان آلاینده‌های انتشار یافته در هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی، محاسبه خسارت‌های زیست‌محیطی به بار آمده، با استفاده از شاخص هزینه اجتماعی کربن انجام می‌شود. در نهایت با دانستن این‌که هر سیاست به چه میزان و چگونه می‌تواند بر مؤلفه‌های فوق‌الذکر تأثیر داشته باشد، کارآمدترین سیاست از بین سیاست‌های در نظر گرفته‌شده از دیدگاه اقتصادی - زیست‌محیطی معرفی می‌شود. بر این اساس، در چهارچوب تبیین طرح بهینه توسعه ظرفیت تولید یک شرکت تولیدی متأثر از سیاست‌های انرژی، می‌توان (۱) بررسی ماهیت رایج‌ترین سیاست‌های انرژی و اثر آن‌ها بر مازاد رفاه مصرف‌کنندگان با استفاده از یک شاخص پیشنهادی، و (۲) برآورد اثر بخشی سیاست‌های مزبور بر هزینه‌های اجتماعی به بارآمده از انتشار آلاینده‌ها از بخش تولید را به‌عنوان نوآوری‌های مقاله برشمرد. به‌منظور پوشش کامل مطالب، بخش‌های بعدی مقاله بدین ترتیب در نظر گرفته

توسعه منابع تجدیدپذیر را در مقیاس‌های کوچک حمایت می‌کند که ممکن است در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت توسعه، چندان کارآمد نباشد. این طرح به‌عنوان ترکیبی از سیاست‌های مبتنی بر مقدار و سیاست‌های مبتنی بر قیمت، تلقی می‌شود [۱۸]. پر واضح است که این طرح با حداقل کردن ریسک تخصیص تشویق بیش از حد، نسبت به سیاست حق تعرفه، از مطلوبیت کم‌تری برای شرکت‌های سرمایه‌گذار برخوردار است. لازم به ذکر است که در این سیاست نیز، هزینه سایر تشویق‌ها در نهایت بر عهده نهاد مصرف‌کننده گذارده می‌شود.

۲-۲- سیاست تعهد در سهم

داشتن شکل کاملاً رقابتی و سازگاری با محیط تجدید ساختاریافته صنعت برق، ویژگی اصلی سیاستی است که طی دهه گذشته با عنوان «تعهد در سهم با قابلیت داد و ستد» در راستای ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر، در کشورهای پیشرفته در حال اجرا است. این طرح نیز در کنار طرح حق تعرفه، از رایج‌ترین سیاست‌های انرژی است که می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای در ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر داشته باشد. اما برخلاف طرح حق تعرفه که در آن تعهد بر سر قیمت بود، در این طرح، آن چه که تولیدکننده در برابر نهاد تنظیم‌کننده متعهد می‌شود، مقدار توانی است که باید با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر تولید کند؛ بنابراین طرح تعهد در سهم، یک طرح مبتنی بر مقدار است. براساس این طرح، شرکت تولیدی برای یک مدت نسبتاً طولانی (۱۵ تا ۲۰ سال) متعهد می‌شود هر ساله معادل با درصدی مشخص از کل توانی که با استفاده از واحدهای متعارف خود تولید می‌کند، با استفاده از واحدهای تجدیدپذیر نیز اقدام به تولید و عرضه انرژی نماید.

عمل به تعهد مورد نظر، با تسلیم کردن 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)، به ازای تولید هر مگاوات ساعت انرژی مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر، از سوی نهاد تنظیم‌کننده گواهی سبز دریافت می‌کنند که قابل خرید و فروش است. حال این واحدهای تجدیدپذیر، نه تنها از فروش انرژی خود در بازار برق درآمد کسب می‌کنند، بلکه می‌توانند گواهی‌های دریافت‌شده خود را نیز به شرکت‌هایی تولیدی تحت تعهد بفروشند؛ سپس این شرکت‌ها با تسلیم کردن گواهی‌های خریداری‌شده به نهاد تنظیم‌کننده، می‌توانند از پس تعهد خود برآیند. باید توجه داشت که میزان تعهد یا تعداد گواهی‌های مقرر هر ساله 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. همان‌طور که مشاهده می‌شود طی سیاست تعهد در سهم، متناسب با رشد تقاضا برای انرژی، هر ساله درصد نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر افزایش می‌یابد؛ این در حالی است که در سیاست حق تعرفه، چنین تضمینی برای ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر وجود ندارد. همچنین با توجه به سازوکار سیاست

دولت یا نهاد تنظیم‌کننده با شرکت تولیدی، لحاظ نمی‌گردد. بدین ترتیب، واحد تولیدی نه تنها 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 خواهد کرد. مقدار حق بیمه از پیش تعریف‌شده و مشخص، تضمین در دسترس بودن شبکه و، طول دوره قرارداد طولانی (۱۵ تا ۲۰ سال)، سه ویژگی بارز در این سیاست می‌باشند [۱۶].

نکته‌ای که در مورد این سیاست کم‌تر به آن توجه شده است، مربوط به بار مالی حاصل از اجرای آن است. به بیانی کامل‌تر، این سؤال که هزینه تشویق‌ها یا حق بیمه‌های پرداختی به واحدهای مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر بر عهده چه نهادی است و چگونه بر آن نهاد تأثیر می‌گذارد، سوالی است که کم‌تر در مورد پاسخ آن، در مطالعات گذشته تحقیق شده است. در عمل، همان‌طور که در مرجع [۱۷] به آن اشاره شده است، هزینه سایر کمک‌هزینه‌های مالی تخصیص‌یافته به بخش تولید انرژی برای سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر، به‌صورت یک هزینه اضافی بر مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی بارگذاری می‌شود. این بدان معناست که تحت سیاست حق تعرفه، هر چه درصد نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در ترکیب تولید بیش‌تر باشد، مصرف‌کننده هزینه بیش‌تری را به‌ازای مصرف هر واحد انرژی مصرفی متقبل خواهد شد. این افزایش هزینه، به کاهش مازاد رفاه مصرف‌کننده می‌انجامد. از آنجا که بارگذاری این هزینه‌های اضافی به‌صورت هزینه شارژ یا مالیات به مصرف‌کننده تحمیل می‌شود، برای ارزیابی تغییرات مازاد رفاه لازم است اثر کمک‌هزینه‌های پرداخت‌شده به واحدهای مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر در قیمت هر واحد توان مصرفی دیده شود. در این‌جا برای دستیابی به این هدف، شاخصی بنام شاخص قیمت مجازی ارائه و استفاده شده است؛ توضیحات بیش‌تر در این زمینه در بخش ۳ ارائه می‌گردد.

۲-۲- طرح مناقصه

سیاست دیگری که امروزه در راستای ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر، در بعضی و نه بسیاری از کشورهای دنیا در حال اجراست، طرح مناقصه^۶ نام دارد. این طرح تقریباً شبیه سیاست حق تعرفه است با این تفاوت که اولاً، طول دوره‌های قرارداد در طرح مناقصه کاهش می‌یابد؛ ثانیاً، میزان تشویق‌های اختصاص داده‌شده به هر یک از انواع واحدهای تجدیدپذیر، طی فرایند مناقصه تعیین می‌شود. بدین ترتیب، کم‌ترین قیمت پیشنهادی در بین تولیدکنندگان الکتریسیته سبز (الکتریسیته حاصل از منابع انرژی تجدیدپذیر)، به‌عنوان برنده محسوب شده و طی مدت مقرر، با تحویل مقدار مشخصی از انرژی به شبکه، از تشویق‌های مالی بهره‌مند خواهد شد؛ بنابراین وجه تمایز دیگر این طرح با طرح حق تعرفه این است که میزان توان تولیدی نیز مشخص است و تولیدکننده موظف است آن مقدار را به شبکه تزریق کند. ویژگی‌های این طرح (مانند رقابتی بودن) اگرچه بعضاً نسبت به ویژگی‌های سیاست حق تعرفه ارجحیت دارد، اما کوتاه‌بودن طول دوره آن، به‌نوعی ترویج و

حال حق انتشار مشخص شده می‌تواند توسط شرکتی که کم‌تر از حد مجاز خود آلودگی تولید کرده است، به نهادی که میزان انتشارش در طول دوره مقرر، از حد مجاز تخطی داشته است، فروخته شود؛ بدین ترتیب، مادامی که کل انتشار بخش تولید بر حسب تن بر سال، با تعداد کل حق انتشارهای تخصیص یافته به شرکت‌های مختلف برابر است، می‌توان گفت میزان انتشار در یک مرز معین کنترل شده است. علاوه بر مزیت فوق، یعنی کنترل میزان آلاینده‌ها در یک سقف مشخص، طی سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد، انگیزه برای فروش حق انتشار می‌تواند باعث ترغیب شرکت‌های تولیدی در ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر گردد. چراکه، افزایش درصد نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در ترکیب تولید، به معنای تأمین تقاضا بدون نیاز به حق انتشار خواهد بود؛ لذا شرکت تولیدی می‌تواند، بسته به درصد به‌کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر، مقداری از حق انتشارهای خود را در همان سال، یا در طی سال‌های بعدی به فروش برساند. نکته دیگری که در مورد این سیاست وجود دارد، نرخ نزولی حق انتشارهای تخصیص یافته به شرکت‌های تولیدی است؛ به عبارتی دیگر، یک شرکت تولیدی، هر ساله باید میزان انتشار آلاینده‌هایش کم‌تر از سال قبل باشد. با توجه به چهارچوب سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد، به راحتی می‌توان دریافت که در این سیاست، هزینه‌های اضافی به بارآمده از خرید حق انتشار یا سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر، بر عهده شرکت تولیدی خواهد بود.

با توجه به آنچه که از ماهیت سیاست‌های انرژی به آن‌ها اشاره شد، به راحتی می‌توان دریافت که در واقع، سیاست‌هایی مانند سیاست‌های «حق انتشار با قابلیت داد و ستد» و «تعهد در سهم»، به ترتیب، شکل تکامل و تطابق یافته سیاست‌های «مالیات بر کربن» و «طرح مناقصه» در فضای تجدید ساختار یافته صنعت برق می‌باشند. از این حیث، این طرح‌ها، امروزه در بسیاری از کشورها، جایگزین طرح‌های سنتی و ناسازگار با فضای رقابتی گردیده‌اند. لذا از آنجاکه هدف در مقاله حاضر، نه بررسی ساختار پیشین و سنتی سیاست‌ها با ساختار تکامل یافته آن‌ها باهم، بلکه ارزیابی اثرات بلندمدت سیاست‌های جاری از دیدگاه مازاد رفاه و هزینه‌های اجتماعی در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت واحدهای متعارف و تجدیدپذیر است، از میان سایر طرح‌ها، تنها سه طرح «حق تعرفه»، «حق انتشار با قابلیت داد و ستد»، و «تعهد در سهم»، در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته می‌شوند. در بخش بعد، با ترکیب سیاست‌های فوق‌الذکر با مدل برنامه‌ریزی توسعه، به ارزیابی اقتصادی - زیست‌محیطی - اجتماعی آن‌ها پرداخته می‌شود.

۳- مدل‌سازی مسئله

در این بخش، علاوه بر ارائه مدل IRCGEP برای برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر داشتن سیاست‌های انرژی، سایر دیگر پارامترهای مورد نیاز برای ارزیابی اثر سیاست‌های در نظر گرفته شده بر مازاد رفاه مصرف‌کننده و خسارت‌های زیست‌محیطی نیز مدل‌سازی می‌گردند.

تعهد در سهم، می‌توان دریافت که در این سیاست، هزینه‌های اضافی به بارآمده (هزینه مربوط به خرید گواهی‌های سبز) از ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر، بجای مصرف‌کننده، این بار گریبان‌گیر تولیدکننده است. این امر خود می‌تواند باعث ترغیب شرکت تولیدی برای سرمایه‌گذاری بر روی واحدهای تجدیدپذیر گردد. به عبارتی دیگر، شرکت تولیدی برای برآمدن از پس تعهد خود، می‌تواند بجای خرید گواهی‌های سبز، خود اقدام به سرمایه‌گذاری بر روی واحدهای تجدیدپذیر نماید تا علاوه بر تأمین سقف انرژی مقرر توسط واحدهای مربوطه، گواهی‌های مازاد را نیز در قیمت بازار به فروش برساند [۱۹].

۴-۲- سیاست مالیات بر کربن

موانع موجود بر سر راه ترویج واحدهای تجدیدپذیر و لذا ناچیزبودن تأثیر آن‌ها در کاهش انتشار بخش تولید از یکسو، و رشد تقاضا برای نیروی برق از سوی دیگر، باعث شد که دولت‌ها، با تدوین سیاست‌های قاطع‌تری، عملاً انتشار آلاینده‌های بخش تولید را محدود کنند. از جمله این سیاست‌ها، سیاست مالیات بر کربن (Carbon Tax) است که طبق تعریف ارائه شده در [۲۰] عبارت است از: مالیات به‌ازای هر تن انتشار گازهای گلخانه‌ای در اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی. بدین ترتیب، انعکاس حاصل از اجرای این سیاست می‌تواند کاهش خروجی‌های زیان‌بار نیروگاه‌ها، و به تبع، ایجاد انگیزه برای تولید انرژی مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر، باشد. سیاست مزبور، که امروزه در بعضی از کشورهایی چون استرالیا، متأثر از ظهور و اجرای سیاست‌های کارآمدتر دیگر اجرا نمی‌شود، از جمله سیاست‌های مبتنی بر قیمت بوده که اثر مستقیم بر کنترل انتشار بخش تولید دارد. بدیهی است که در این سیاست، هزینه‌های به بار آمده بر عهده تولیدکننده خواهد بود.

۵-۲- سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد

نیاز به ترکیب رویکردهای بازار محور در سیاست‌های انرژی تدوین یافته برای کاهش انتشار آلاینده‌ها از یکسو، و اهمیت بحث تغییرات شرایط آب و هوایی و لذا ضرورت تضمین در کنترل انتشار بخش تولید از سوی دیگر، باعث شکل‌گیری سیاست دیگری تحت عنوان حق انتشار با قابلیت داد و ستد گردید. بنا به تعاریف ارائه شده در [۱۶، ۲۰] و سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد یا همان Cap-and-trade سابق، عبارت است از: اعمال یک حد انتشار مجاز با قابلیت خرید و فروش بر هر یک از شرکت‌های تولیدی، متناسب با میزان تولید و مشارکت آن‌ها در تأمین تقاضا، به طوری که مجموع انتشار کل شرکت‌ها، از یک حد مشخص کم‌تر باشد. بدین ترتیب می‌توان گفت، طرح انتشار با قابلیت داد و ستد، یک طرح مبتنی بر مقدار است که در آن، متناسب با میزان توان تولیدی، یک حد مجاز به صورت تعداد معینی حق انتشار (با واحد تن)، بر میزان انتشار هر شرکت تولیدی مقرر می‌گردد. طول دوره زمانی در نظر گرفته شده برای میزان انتشار مجاز، برابر با یک سال است؛ به عبارتی کامل‌تر، هر شرکت تولیدی باید در طول یک سال، انتشاری کم‌تر یا برابر با حد مجاز خود داشته باشد.

۳-۱-۱ مدل IRCGEP

در این قسمت از مقاله، به ارائه یک مدل جامع با عنوان IRCGEP، که برنامه‌ریزی توسعه تولید را به صورت ترکیب شده با مشارکت منابع انرژی تجدیدپذیر در قالب سیاست‌های انرژی، در نظر می‌گیرد، پرداخته می‌شود. برنامه‌ریزی از دید یک شرکت تولیدی که با داشتن امکان سرمایه‌گذاری بر روی فناوری‌های مختلف تولیدی، به دنبال حداکثر سود ممکن است، انجام می‌پذیرد. به منظور مقایسه طرح‌های سرمایه‌گذاری مختلف در سال پایه، با توجه به کل بودجه در دسترس، از روش ارزش فعلی در محاسبه درآمدها و هزینه‌ها استفاده می‌گردد. ظرفیت بهینه هر یک از واحدهای جدید اضافه شده در طول هر مرحله از برنامه‌ریزی، تعداد، و سال ورود آن‌ها به ترکیب تولید، از جمله متغیرهای مسئله بهینه‌سازی می‌باشند که در کنار متغیرهای مربوط به سیاست‌های انرژی، منجر به تبدیل مسئله بهینه‌سازی مورد نظر به یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح می‌گردند. در ادامه هر یک از بخش‌های مدل IRCGEP تشریح خواهد شد.

۳-۱-۱-۱ 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€)، هزینه 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. بودجه سرمایه‌گذاری شده در هر دوره، به میزان عرضه انرژی در بازار، متوسط قیمت انرژی، نوع سیاست اعمال شده، و همچنین، نوع فناوری‌های منتخب در دسترس برای توسعه، بستگی دارد. کل درآمد حاصل از فروش انرژی، از مجموع درآمدهای به دست آمده از فروش کل انرژی تولیدی ترکیب تولید (اعم از تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر) در قیمت بازار، و درآمد ناشی شده از سیاست‌های انرژی است. تفاضل مجموع این دو مؤلفه از درآمد شرکت تولیدی با کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری مربوط به واحدهای جدید اضافه شده به ترکیب تولید، و هزینه‌های تولید انرژی، کل سود خالص حاصل از برنامه‌ریزی توسعه تولید را به دست می‌دهد. تابع هدف در نظر گرفته شده همراه با مؤلفه‌های فوق‌الذکر، به ترتیب طی روابط (۱) تا (۴) در ذیل آورده شده‌اند.

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

$$U_{1_i}^G = \sum_{t \in Z_i^{ex}} (\Pi_i^m - v_{i,t}) \varepsilon_t^{ex} + \sum_{t \in Z_i^{new}} (\Pi_i^m - v_{i,t}) \varepsilon_t^{new} \quad (2)$$

$$U_{2_i}^G = \sum_{t \in Z_i^{ren,ex}} \varepsilon_t^{ex} \cdot \Pi_i^{FIT} + \sum_{t \in Z_i^{com,ex}} \varepsilon_t^{ex} \cdot \Pi_i^{TGC} \cdot \delta_i + (ER_i^s - ER_i^b) \cdot \Pi_i^{ER} \quad (3)$$

$$U_{3_i}^G = \sum_{t \in Z_i^{new}} I_{i,t} \cdot C_t \cdot n_{i,t} \quad (4)$$

در روابط (۴)-(۱)، نرخ بهره، i شاخص سال، Π_i^m قیمت هر مگاوات ساعت انرژی در بازار متناظر با سال i (€/MWh)، ε_t^{ex} و ε_t^{new} کل انرژی تولید شده به ترتیب توسط واحدهای موجود و جدید اضافه شده (MWh)، t شاخص مربوط به نوع فناوری، $v_{i,t}$ هزینه تولید هر واحد انرژی (€/MWh)، Π_i^{FIT} حق بیمه پرداخت شده به هر واحد الکتریسیته 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، ER_i^s و ER_i^b ، به ترتیب تعداد حق انتشارهای فروخته شده و خریداری شده در قیمت Π_i^{ER} (€/ton) در سال i ، $I_{i,t}$ ، هزینه سرمایه‌گذاری مربوط به فناوری نوع t در سال i (M€/MWh)، C_t ظرفیت واحد نوع t (MW) و $n_{i,t}$ تعداد واحدهای نوع t که در سال i به ترکیب تولید اضافه می‌شوند، است. Z_i^{new} و Z_i^{ex} نیز به ترتیب مجموعه واحدهای موجود در حال بهره‌برداری و مجموعه واحدهای جدیدی که از ابتدای سال i مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند را نشان می‌دهند؛ ضمن آن که مجموع واحدهای متعارف و تجدیدپذیر (اعم از جدید و موجود) نیز در هر سال برنامه‌ریزی، به ترتیب با نمادهای $Z_i^{con,ex}$ و $Z_i^{ren,ex}$ مشخص شده‌اند.

۳-۱-۲-۲ قید تعادل انرژی

این قید که به صورت رابطه (۵) ارائه شده است، متناظر با هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی، نشان‌دهنده تعادل بین انرژی فروخته شده 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 عرضه آن دارد، باید با کل توان تولیدی توسط مجموع واحدهای موجود و واحدهای جدید اضافه شده به ترکیب تولید شرکت تولیدی مورد نظر تا آن سال از افق توسعه برابر باشد.

$$E_i^T = \sum_{t \in Z_i^{ex}} \varepsilon_t^{ex} + \sum_{t \in Z_i^{new}} \varepsilon_t^{new} \quad (5)$$

۳-۱-۳-۳ قید بودجه

این قید حداکثر بودجه سرمایه‌گذاری شده توسط شرکت تولیدی در طول افق برنامه‌ریزی را محدود می‌کند. به عبارتی دیگر، با استفاده از روش ارزش فعلی، سرمایه‌گذاری‌های انجام شده در طول هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی با کل بودجه موجود تا آن سال مقایسه شده و انتخاب واحدهای جدید متناسب با آن بودجه صورت می‌گیرد. این قید به صورت رابطه (۶) در نظر گرفته می‌شود که در آن In_{tot}^{bud} کل بودجه موجود در سال پایه (سال مبنا یا همان سال قبل از شروع برنامه‌ریزی) است [۱۱].

$$\sum_i \sum_{t \in Z_i^{new}} (1+r)^{-i} (I_{i,t} \cdot C_t \cdot n_{i,t}) \leq In_{tot}^{bud} \quad (6)$$

۳-۱-۴- قید محدودیت تولید

عملاً واحدهای متعارف، در حین درمدار بودن، نمی‌توانند میزان تولید خود را از یک سطح مجاز پایین‌تر آورند. به بیان دیگر، نیروگاه‌های حرارتی، ضمن راه‌اندازی و ورود به مدار، همواره دارای یک سطح تولید حداقل نیز می‌باشند که دستیابی و 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 رابطه (۷) فرمول‌بندی می‌گردد که در آن $P_{i,t}$ نرخ تولید توان اکتیو هر واحد تولیدی نوع t در سال i با حد بالا و پایین P_i^{\max} و P_i^{\min} است.

$$P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max} \quad (7)$$

۳-۱-۵- محدودیت احداث

ممکن است برخی دلایل فنی، اقتصادی، و اجرایی، مانند حداقل طول دوره زمانی لازم برای ساخت هر یک از انواع واحدهای تولیدی، در عمل حداکثر تعداد واحدهایی را که می‌توانند در طول یک دوره مشخص به بهره‌برداری برسند را محدود کند. از این حیث، در این مقاله 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 رابطه (۸) در نظر گرفته می‌شود [۲۱].

$$\begin{cases} 0 \leq n_{i,t} \leq \bar{n}_i \\ 0 \leq \sum_i n_{i,t} \leq \bar{W}_i \end{cases} \quad (8)$$

در رابطه فوق، \bar{n}_i ، حداکثر تعداد واحدهای مجاز از نوع t است که می‌تواند در طول هر مرحله از برنامه‌ریزی انتخاب گردد. همچنین در پایان افق توسعه، تعداد کل واحدهای انتخاب‌شده از هر فناوری نیز باید کوچک‌تر یا برابر با حداکثر تعداد واحدهای در نظر گرفته‌شده در ابتدای برنامه‌ریزی، یعنی \bar{W}_i ، باشد.

۳-۱-۶- قید تعهد در سیاست تعهد در سهم

متناظر با مؤلفه دوم رابطه (۳)، که سود شرکت تولیدی حاصل از فروش گواهی‌های سبز دریافت‌شده در سال مربوطه را نشان می‌دهد، لازم است شرکت تولیدی هر ساله درصد مشخصی الکتریسیته سبز نیز در ترکیب تولید خود داشته‌باشد. لذا، برای اطمینان از اجرای سیاست تعهد در سهم، یک قید نامساوی به‌صورت رابطه (۹)، در مدل برنامه‌ریزی توسعه تولید در نظر گرفته می‌شود. طبق رابطه مزبور، کل انرژی تولیدی توسط سایر واحدهای تجدیدپذیر، باید بزرگ‌تر یا مساوی با درصدی از کل انرژی تولیدی توسط واحدهای متعارف باشد.

$$\sum_{t \in Z_i^{com,ex}} \varepsilon_t^{ex} \geq \delta_i \cdot \sum_{t \in Z_i^{com,ex}} \varepsilon_t^{ex} \quad (9)$$

۳-۱-۷- محدودیت انتشار در سیاست حق انتشار با قابلیت داد

و ستند

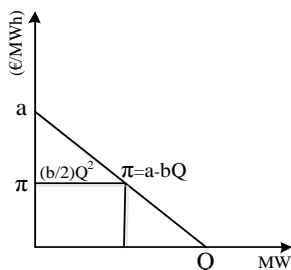
همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شد، در سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد، شرکت تولیدی هر ساله تحت یک اجبار برای حفظ میزان انتشار ترکیب تولید خود قرار می‌گیرد که سقف مجاز در آن، به‌طور سالانه کاهش می‌یابد؛ این محدودیت، با استفاده از تعداد حق انتشارهایی مشخص می‌شود که هر ساله توسط نهاد تنظیم‌کننده یا دولت، به شرکت تولیدی تخصیص داده می‌شود. هر حق انتشار معادل با انتشار یک تن آلاینده‌گی بوده و ترکیب تولید در پایان هر سال، پس از تأمین کل انرژی مورد تقاضا، باید میزان انتشاری (تن بر سال) معادل با تعداد کل حق انتشارهای تخصیص‌یافته داشته باشد. در صورتی‌که شرکت تولیدی با به‌کارگیری راه‌کارهایی مانند سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر، سطح انتشار خود را پایین‌تر از سطح مجاز حفظ کند، می‌تواند مازاد حق انتشارهای خود را نزد شرکت‌های تولیدی دیگر، به فروش برساند. برعکس، در صورتی‌که، سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر یا تغییر ترکیب تولید (مثلاً با سرمایه‌گذاری بر روی واحدهای حرارتی مبتنی بر سوخت گاز طبیعی)، نسبت به عدم رعایت سطح انتشار مجاز و لذا خرید حق انتشارهای اضافی، صرفه اقتصادی کم‌تری داشته باشد، شرکت تولیدی اقدام به خرید حق انتشارهای اضافی خواهد نمود؛ بدین ترتیب، شرکت تولیدی اجازه انتشار بیش از حد مقرر خود را پیدا خواهد کرد. بخش درآمدزایی یا ایجاد هزینه‌های اضافی، به ترتیب ناشی از فروش و خرید حق انتشار در سیاست مورد نظر، توسط مؤلفه آخر رابطه (۳) لحاظ شده است. اما برای تکمیل مدل‌سازی سیاست مورد نظر، لازم است قید محدودیت انتشار نیز به‌صورت رابطه (۱۰) لحاظ گردد تا علاوه بر محدود کردن حداکثر تعداد حق انتشارهایی که شرکت تولیدی می‌تواند به فروش برساند، حداکثر سطح انتشار ترکیب تولید نیز، متناسب با حق انتشارهای اضافی خریداری‌شده، محدود گردد. مثبت بودن تعداد حق انتشارهای فروخته یا خریداری‌شده نیز با استفاده از قید نامساوی رابطه (۱۱) در نظر گرفته می‌شود.

$$\sum_{t \in Z_i^{com,ex}} E_{i,t} + ER_i^s - ER_i^b = E_i^{cap} \quad (10)$$

$$ER_i^s \geq 0, ER_i^b \geq 0 \quad (11)$$

در رابطه (۱۰)، E_i^{cap} ، سقف انتشار مجاز بر حسب تن بر سال و $E_{i,t}$ ، کل میزان انتشار مجموعه واحدهای نوع t مبتنی بر سوخت‌های فسیلی در طول سال مربوطه است. در این مقاله، برای محاسبه مجموع انتشار هر یک از انواع واحدهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، متناسب با میزان توان تولیدی مربوطه در هر سال، از مدل چندجمله‌ای-نمایی انتشار به‌صورت رابطه (۱۲) استفاده می‌شود [۲۲]. کل انتشار ترکیب تولید نیز با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

بر اساس هر یک از منحنی‌های نشان داده شده در شکل ۱، مبلغی که مصرف‌کننده به ازای مصرف Q مایل به پرداخت آن است برابر با کل سطح زیر منحنی، از صفر تا Q است؛ این مقدار، «تمایل مصرف‌کننده برای پرداخت» به ازای میزان مصرف مورد نظر نامیده می‌شود. بنابراین در قیمتی مانند π_1 ، کل مبلغ یا ارزشی که مصرف‌کننده مایل است برای مصرف Q_1 پرداخت نماید، برابر با مجموع سطوح A، B، C، D، و E خواهد بود که در شکل ۱ قسمت (a) نشان داده شده است. اما در عمل، مصرف‌کننده، ارزش یا مبلغی که برای مصرف Q_1 در قیمت π_1 می‌پردازد، برابر با مجموع سطوح E و D خواهد بود که در شکل ۱ قسمت (b) نشان داده شده است؛ تفاضل سطوح هاشورخورده در دو منحنی تقاضای نشان داده شده در شکل مورد نظر که برابر با مجموع سطوح A، B و C است، کل مازاد رفاهی را نشان می‌دهد که مصرف‌کننده از مصرف توان Q_1 در قیمت π_1 به دست می‌آورد. بدیهی است افزایش قیمت از π_1 به π_2 ، باعث کاهش مازاد رفاه از سطح $\{A+B+C\}$ به سطح A می‌گردد. در این مقاله، برای محاسبه مازاد رفاه، همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، منحنی تقاضا به صورت خطی فرض شده است؛ در این حالت رابطه بین قیمت و تقاضا، به صورت $\pi = a - bQ$ خواهد بود که در آن $-b$ شیب منحنی تقاضا و a طول از مبدأ است. بدین ترتیب، با توجه به شکل ۲، مازاد رفاه در قیمت π برابر با $Q^2(b/2)$ خواهد بود [۲۴].



شکل ۲: منحنی خطی تقاضا و محاسبه مازاد رفاه [۲۴]

۳-۲-۱- شاخص قیمت مجازی

با توجه به آن‌چه که از مفهوم مازاد رفاه مصرف‌کننده در بخش قبل به آن اشاره شد، پر واضح است که تحمیل هزینه‌های مربوط به سیاست‌های انرژی بر مصرف‌کنندگان، با افزایش هزینه تمام‌شده به ازای هر واحد انرژی مصرفی، به کاهش مازاد رفاه می‌انجامد. برای دانستن این‌که مازاد رفاه به چه میزان تحت اجرای سیاست‌هایی مانند سیاست حق تعرفه کاهش می‌یابد، لازم است میزان افزایش در هزینه واقعی پرداختی برای هر واحد انرژی مشخص گردد. برای دستیابی به این مهم، در این‌جا شاخص تحت عنوان قیمت مجازی پیشنهاد می‌شود. با توجه به ماهیت سیاست‌های مورد بررسی، می‌توان دید که تنها تحت سیاست حق تعرفه، بار مالی مربوطه بر عهده نهاد مصرف‌کننده گذارده می‌شود. از این‌رو، محاسبه مازاد رفاه تحت اجرای این سیاست با استفاده از شاخص قیمت مجازی صورت می‌گیرد؛

$$E_{i,t} = \left(\sum_{n_{i,t}} (\alpha_t + \beta_t \cdot P_{i,t} + \gamma_t \cdot P_{i,t}^2 + \gamma_t \cdot P_{i,t}^2 + \mu_t \cdot \exp(\lambda_t \cdot P_{i,t})) \right) \cdot \bar{n}_t \quad \forall t \in Z_i^{con,ex} \quad (12)$$

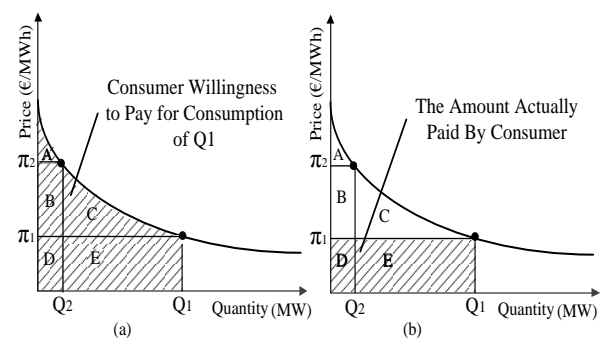
$$E_i^{tot} = \sum_{t \in Z_i^{con,ex}} E_{i,t} \quad (13)$$

در روابط فوق، α_t ، β_t ، γ_t ، μ_t ، و λ_t ضرایب انتشار متناظر با هر یک از فناوری‌های مبتنی بر سوخت فسیلی، و \bar{n}_t پارامتر ساعات استفاده در سال است که بر اساس اطلاعات مربوط به حداقل ساعات کارکرد مطمئن هر یک از انواع واحدها در طی سال‌های گذشته تخمین زده می‌شود [۱۶]. E_i^{tot} نیز میزان کل آلاینده‌های انتشار یافته است.

با دقت در مجموعه قیود ارائه شده طی زیربخش‌های ۱-۳ تا ۱-۷ می‌توان دریافت که قیود مربوط به سیاست‌های تعهد در سهم و حق انتشار با قابلیت داد و ستد، نه از دید شرکت تولیدی، بلکه از دید بهره‌بردار مستقل سیستم، در راستای تضمین صحت اجرای سیاست‌های مورد نظر، مدل‌سازی شده‌اند. با حل مدل ارائه شده طی روابط (۱) تا (۱۳)، علاوه بر طرح‌های توسعه و سود شرکت تولیدی تحت هر یک از سیاست‌های در نظر گرفته شده، میزان انتشار ترکیب تولید و همچنین تشویق‌های مالی پرداختی به واحدهای تجدیدپذیر در سیاست حق تعرفه نیز مشخص خواهند شد. با استفاده از این اطلاعات می‌توان مؤلفه مازاد رفاه و نیز خسارات زیست‌محیطی را به ازای اجرای هر یک از سیاست‌ها تعیین نمود. در ادامه این بخش به نحوه محاسبه مازاد رفاه، شاخص قیمت مجازی، و خسارات زیست‌محیطی پرداخته خواهد شد.

۳-۲-۲- مازاد رفاه مصرف‌کننده

با اشاره به مرجع [۲۳]، مازاد رفاه مصرف‌کننده، برابر با اختلاف بین مبلغی که مصرف‌کننده برای مصرف یک کالا تمایل به پرداخت آن دارد، و مبلغی که در عمل پرداخت می‌کند، است. برای محاسبه مازاد رفاه از منحنی تقاضا که نشان‌دهنده رابطه بین قیمت یک کالا و مقدار تقاضا برای آن است، استفاده می‌شود. برای درک بهتر این موضوع، به شکل ۱ توجه کنید.



شکل ۱: منحنی تقاضا و مفهوم مازاد رفاه [۲۳]

سیاست‌ها، 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، کارآمدترین سیاست از دیدگاه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی معرفی می‌شود. علاوه بر این، در راستای درک بهتر اثرات هر یک از سیاست‌های شبیه‌سازی شده، حساسیت مؤلفه‌های مورد نظر به پارامترهای اصلی آن‌ها بررسی می‌شود.

به‌منظور انجام محاسبات با استفاده از روش ارزش فعلی، نرخ بهره برابر با ۵٪ در نظر گرفته می‌شود. کل بودجه موجود در سال مبنا نیز برابر ۵۰۰۰ M€ قرار داده می‌شود. با توجه به بلند بودن افق توسعه و در نظر گرفتن بازه‌های برنامه‌ریزی به‌صورت یک‌ساله، در نظر گرفتن نوسانات قیمت انرژی در بازار طی یک افق ۲۰ ساله منطقی به نظر نمی‌رسد؛ از این حیث، در این‌جا، مطابق با مرجع [۱۶]، یک قیمت متوسط برای هر بازه برنامه‌ریزی در نظر گرفته می‌شود. ترکیب تولید سال پایه شامل واحدهای سیکل ترکیبی (CCGT) با مجموع ظرفیت ۴۲۵۶ (MW)، واحدهای زغالی (Coal) ۷۴۰ (MW)، واحدهای با سوخت نفت خام (Oil)، ۷۴۱ (MW)، واحدهای برق‌آبی کوچک Small (Hydro) ۳۴۰ (MW)، و واحدهای بادی (On-shore wind) 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 (Nuclear)، سیکل ترکیبی، برق‌آبی، بادی، زمین‌گرمایی (Geo thermal)، زیست‌توده (Biomass)، بیوگاز (Biogas)، و خورشیدی (Thermal Solar)، به‌عنوان مجموعه فناوری‌های موجود برای سرمایه‌گذاری در نظر گرفته می‌شوند. سایر اطلاعات مورد نیاز اعم از هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه تولید، ظرفیت، و میزان ساعات استفاده در سال مربوط به هر یک از واحدهای منتخب از مرجع [۱۶] اتخاذ می‌گردد. سایر دیگر اطلاعات مورد نیاز مانند اطلاعات مربوط به سیاست‌های انرژی (میزان تشویق‌ها، در صد تعهد، قیمت گواهی‌های سبز و یا قیمت حق انتشار)، هزینه اجتماعی کربن، و غیره نیز از مراجع [۱۳]، [۱۸]، [۲۰]، و [۲۵] گردآوری می‌گردند.

با توجه به سناریوهای در نظر گرفته‌شده، میزان انرژی فروخته‌شده در بازار طی هر بازه برنامه‌ریزی، میزان تولید واحدهای جدید و موجود در ترکیب تولید (اعم از واحدهای تجدیدپذیر و متعارف) هر سال، و تعداد حق انتشار و گواهی‌های سبز فروخته یا خریداری‌شده در هر بازه از برنامه‌ریزی، مجموعه متغیرهای مسئله بهینه‌سازی مورد نظر را در بر می‌گیرند که با توجه به انواع واحدهای منتخب برای سرمایه‌گذاری، تنوع آن‌ها، و نیز تعداد بازه‌های برنامه‌ریزی، تعداد متغیرها قابل توجه خواهد بود. با پیاده‌سازی مدل IRCGEP در محیط نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز در قالب یک مسئله MINLP، اجراشده توسط یک رایانه با پردازشگر ۵ هسته (Intel-Core i5) و RAM ۴ گیگابایتی، جدول ۱ نتایج به‌دست آمده از سناریوهای S1 تا S4 را، بر اساس نوع، تعداد، و

درحالی‌که در مورد دیگر سیاست‌های در نظر گرفته‌شده، مازاد رفاه به ازای قیمت انرژی در بازار محاسبه می‌شود. شاخص قیمت مجازی، که با نماد VPI_i (€/MWh) نشان داده شده است، درواقع برابر با مجموع قیمت بازار و میانگین تشویق‌های پرداختی به واحدهای تجدیدپذیر در هر سال از افق توسعه است و طی رابطه (۱۴) فرمول‌بندی می‌گردد.

$$VPI_i = \Pi_i^m + \frac{\sum_{t \in Z_i^{rem,ex}} \Pi_i^{FIT} \cdot \mathcal{E}_i^{ex}}{E_i^T} \quad (14)$$

۳-۳- خسارات زیست‌محیطی

در این بخش، برای تخمین خساراتی که بخش تولید با واردکردن آلاینده‌های گازی، خصوصاً CO₂، به جو باعث می‌شود، از شاخص هزینه اجتماعی کربن استفاده می‌شود. این شاخص طبق تعریف ارائه‌شده توسط سازمان حفاظت زیست آمریکا عبارت است از: هزینه معادل با خسارت‌هایی که هر تن انتشار CO₂ (به‌عنوان اصلی‌ترین گاز گلخانه‌ای) به محیط زیست و جامعه وارد می‌کند [۲۵]. درواقع می‌توان گفت، هزینه اجتماعی کربن، هزینه‌ای است که اثرات مخرب و سوء به بارآمده از انتشار بخش تولید بر محصولات کشاورزی، اکوسیستم، مواد، سلامت انسان‌ها، و غیره را در بر می‌گیرد. بدین ترتیب، با توجه به کل انتشار ترکیب تولید (تن بر سال) در طول هر مرحله از برنامه‌ریزی، هزینه معادل با خسارت‌های وارده، ED_i (M€)، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$ED_i = \sum_{t \in Z_i^{rem,ex}} E_i^{tot} \cdot \partial_i^{sc} \quad (15)$$

که در آن ∂_i^{sc} هزینه اجتماعی کربن (€/ton) در سال i است.

۴- شبیه‌سازی و ارائه نتایج

در این بخش، ابتدا نتایج حاصل از حل مدل IRCGEP در طول یک افق ۲۰ ساله (۲۰۱۷ تا ۲۰۳۶)، طی چهار سناریو مختلف ارائه می‌شود. به‌منظور ایجاد امکان مقایسه، در سناریو اول (S1)، برنامه‌ریزی توسعه بدون در نظر گرفتن اثر سیاست‌های انرژی، و در سناریوهای دوم تا چهارم (S2-S4)، برنامه‌ریزی با در نظر داشتن اثر سیاست‌های انرژی انجام می‌شود؛ از طرفی، برای ارزیابی اثر هر سیاست بر تصمیمات توسعه، هر بار برنامه‌ریزی تنها با در نظر داشتن اثر یکی از سیاست‌های در نظر گرفته‌شده صورت می‌گیرد. در این راستا، با توجه به تابع هدف مسئله برنامه‌ریزی توسعه، می‌توان دید که مدل ارائه‌شده از قابلیت لازم برای حذف اثر هر یک از سیاست‌ها از برنامه‌ریزی توسعه برخوردار است؛ این امر به‌راحتی با برابر صفر قراردادن پارامترهای متناظر Π_i^{FIT} ، Π_i^{TGC} ، و Π_i^{ER} در تابع هدف، صورت می‌پذیرد. پس از ارائه نتایج حاصل از برنامه‌ریزی توسعه، به ازای هر یک از چهار طرح توسعه به‌دست‌آمده، مؤلفه‌های مازاد رفاه و خسارت‌های زیست‌محیطی در طول کل افق توسعه، با استفاده از شاخص‌های مربوطه محاسبه می‌شوند؛ ضمن آن‌که مؤلفه سود شرکت تولیدی متأثر از هر یک از

واحد ۱۲۰۰ مگاواتی هسته‌ای از میان واحدهای متعارف، و تنها دو واحد ۱۰ مگاواتی بیوگاز از میان واحدهای تجدیدپذیر منتخب، طی دهه اول افق توسعه به ترکیب تولید سال پایه اضافه می‌گردند. عدم تمایل شرکت تولیدی برای سرمایه‌گذاری بیش‌تر بر روی واحدهای تجدیدپذیر حاکی از ضرورت اعمال سیاست‌های انرژی در بخش تولید است. ارزیابی اثر سیاست حق تعرفه بر تصمیمات توسعه شرکت تولیدی طی سناریو S2 صورت می‌گیرد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی این سناریو، به‌راحتی می‌توان افزایش درصد نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر را در مقایسه با سناریو اول مشاهده نمود. به‌طوری‌که، طی سناریو S2، سه واحد ۱۰ مگاواتی برق‌آبی، پنج واحد بادی ۱۰۰ مگاواتی بادی، چهار واحد ۱۰ مگاواتی خورشیدی، و سه واحد بیوگاز، به ظرفیت تجدیدپذیر سال پایه اضافه می‌گردند. هر یک از انواع واحدهای تجدیدپذیر فوق‌الذکر، به ترتیب، به میزان ۴۲/۷۱، ۴۲/۷۵، ۲۸۰، و ۷۱/۱ €/MWh به ازای 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 داد و ستد، طی سناریو S3 شبیه‌سازی می‌شود. با فرض این‌که درصد تعهد δ_i به‌صورت خطی از ۹٪ در سال ۲۰۱۵ به ۲۲٪ در سال ۲۰۳۴، و قیمت هر گواهی سبز نیز به‌صورت خطی در این بازه از ۸۸/۳۸ €/MWh به ۶۲/۲۵ €/MWh تغییر کند، خلاصه تصمیمات توسعه شرکت تولیدی در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به نتایج حاصله، مشاهده می‌شود که طی سناریو سوم توسعه، بیش‌ترین تعداد واحدهای تجدیدپذیر، در مقایسه با سناریوهای اول و دوم، به ظرفیت تجدیدپذیر سال پایه اضافه شده است. چراکه، 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 سالانه شرکت تولیدی بر روی واحدهای تجدیدپذیر انجامیده است؛ به‌طوری‌که در طول افق برنامه‌ریزی، چهار واحد برق‌آبی، چهار واحد ۲۰ مگاواتی زیست‌توده، چهار واحد بادی، یک واحد ۱۰۰ مگاواتی زمین‌گرمایی، و چهار واحد بیوگاز مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که این واحدها، بسته به پارامتر ساعات استفاده، مقادیر متفاوتی انرژی در طول سال تولید می‌کنند.

ارزیابی تأثیر سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد بر طرح‌های توسعه شرکت تولیدی، طی سناریو S4 صورت می‌گیرد. در این سناریو، تعداد حق انتشارهای تخصیص‌یافته به شرکت تولیدی و یا به عبارتی سقف انتشار مجاز آن، برابر با ۷/۶ میلیون تن در سال ۲۰۱۷ در نظر گرفته می‌شود که این مقدار با شیب ۲٪ هر ساله کاهش می‌یابد. در مورد قیمت حق انتشارها نیز فرض شده است که به ازای انتشار هر تن آلاینده‌های گازی، این قیمت از ۱۹/۳۴ € در ابتدای افق توسعه، به‌صورت خطی به ۳۸/۱۸ € در انتهای برنامه‌ریزی افزایش یابد. با دقت

سال ورود واحدهای جدید اضافه‌شده نشان می‌دهد. حداکثر زمان اجرای برنامه طی سناریوهای مختلف نیز ۱۱ دقیقه بوده است.

جدول ۱: نتایج برنامه‌ریزی توسعه تولید طی سناریوهای S1 تا S4

سناریو	سال	نوع فناوری تولیدی										
		Coal	CCGT	Nuclear	Small Hydro	Biomass	On-shore Wind	Geo Thermal	Thermal Solar	Biogas		
S1	۲۰۱۷	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۱۸	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۲۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۲۲	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰
	۲۰۲۳	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۲۵	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۲۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰
	۲۰۲۷	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
S2	۲۰۱۷	۰	۱	۰	۲	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰
	۲۰۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۱	۲	۰	۰
	۲۰۱۹	۰	۱	۰	۱	۰	۲	۰	۲	۱	۰	۰
	۲۰۲۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۲۲	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۲۵	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۲۷	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
S3	۲۰۱۷	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۱۸	۰	۱	۰	۰	۱	۲	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۱۹	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰
	۲۰۲۰	۰	۰	۰	۲	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰
	۲۰۲۲	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۲	۰	۰
	۲۰۲۳	۱	۰	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
	۲۰۲۶	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۲۸	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
S4	۲۰۱۷	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۱۸	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۱۹	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۲۲	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
	۲۰۲۳	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۰۲۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
	۲۰۲۷	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰

در جدول ۱، S1، معرف سناریو برنامه‌ریزی توسعه بدون در نظر گرفتن سیاست‌های انرژی، S2، سناریو برنامه‌ریزی با در نظر داشتن سیاست حق تعرفه، S3، سناریو برنامه‌ریزی توسعه تحت سیاست تعهد در سهم، و S4، معرف سناریو برنامه‌ریزی توسعه با در نظر گرفتن اثر سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد است. در این جدول همچنین، تعداد واحدهای تجدیدپذیر اضافه‌شده به ترکیب تولید طی هر یک از سناریوهای مزبور به‌صورت سایه‌دار مشخص شده است.

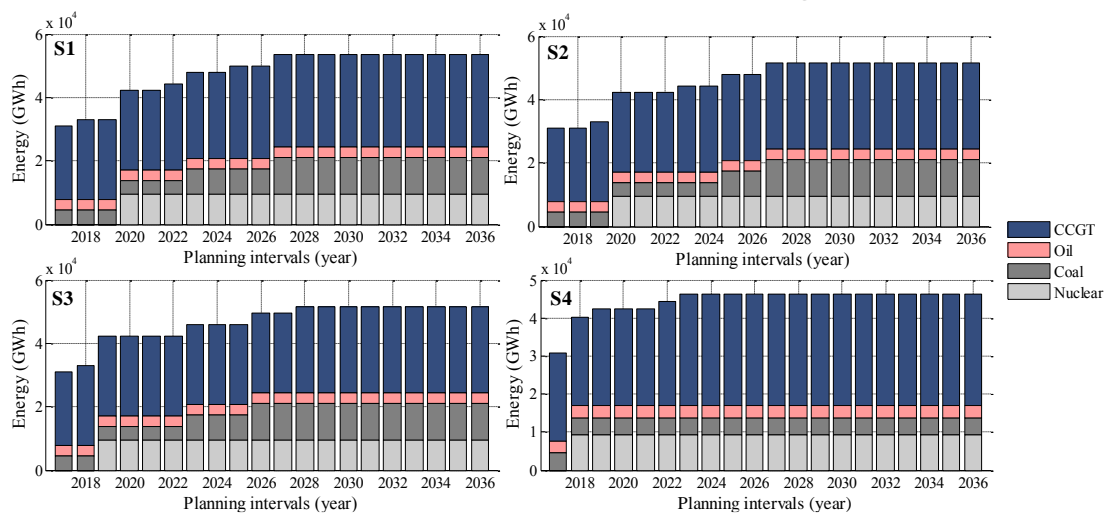
مطابق با نتایج نشان داده‌شده در جدول ۱، طی سناریو S1، دو واحد ۶۰۰ مگاواتی زغالی، پنج واحد ۴۰۰ مگاواتی سیکل ترکیبی، یک

سیاست‌های انرژی بر افزایش نرخ نفوذ واحدهای تجدیدپذیر نیز در شکل ۴ قابل مشاهده است.

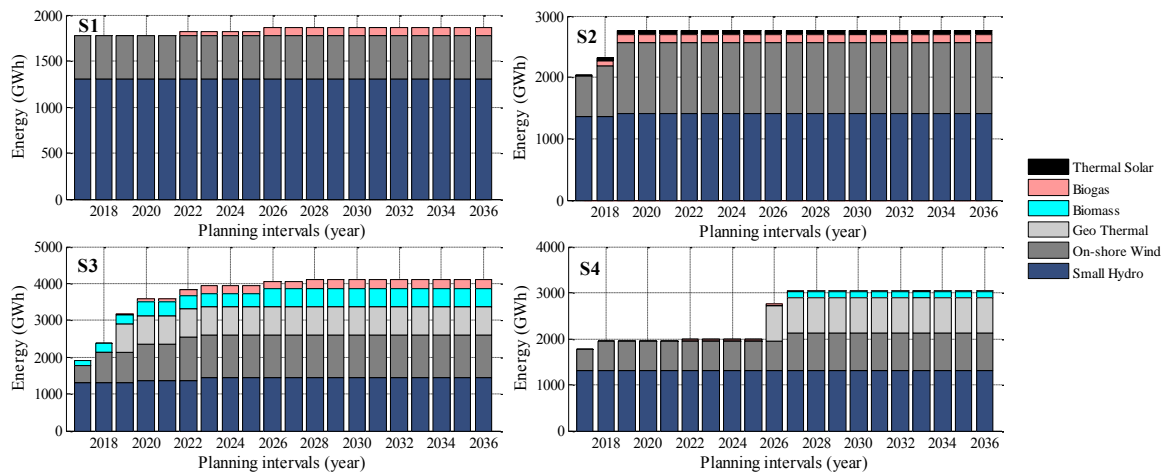
به منظور ارزیابی سیاست‌های مورد نظر از دیدگاه‌های زیست‌محیطی، اقتصادی، و اجتماعی، در ادامه مقادیر به‌دست‌آمده برای مازاد رفاه مصرف‌کنندگان انرژی، خسارات زیست‌محیطی، و سود شرکت تولیدی، طی هر یک از سناریوهای S1 تا S4 ارائه می‌شود. با توجه به میزان حق بیمه‌های دریافت‌شده توسط شرکت تولیدی در سناریو دوم توسعه، شکل ۵، شاخص قیمت مجازی را در مقایسه با قیمت بازار نشان می‌دهد. مقادیر به‌دست‌آمده برای مازاد رفاه متناظر با قیمت بازار و قیمت مجازی، و هزینه خسارات زیست‌محیطی مربوط به هر طرح توسعه نیز در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که از نتایج مربوط به مازاد رفاه مصرف‌کنندگان در جدول مزبور پیداست، در سیاست حق تعرفه، یعنی سناریو دوم برنامه‌ریزی توسعه، بارگذاری بار مالی مربوط به تشویق واحدهای تجدیدپذیر بر مصرف‌کنندگان، به کاهش قابل توجه مازاد رفاه آن‌ها انجامیده است. این در حالی است که اجرای سیاست‌های تعهد در سهم یا حق انتشار، تهدیدی برای مازاد رفاه مصرف‌کنندگان محسوب نمی‌شود؛ چراکه هزینه‌های اضافی به بار آمده تحت این سیاست‌ها بر عهده نهاد تولیدکننده است. از این‌رو، مازاد رفاه در سناریوهای S1، S3، و S4 با هم برابر و در هر سه‌ی آن‌ها مقدار مازاد رفاه در قیمت بازار محاسبه می‌شود.

در ترکیب تولید بهینه به‌دست‌آمده برای واحدهای متعارف طی سناریو S4، مندرج در جدول ۱، تأثیر مستقیم این سیاست بر میزان انتشار ترکیب تولید قابل مشاهده است؛ به‌طوری‌که در مقایسه با سناریوهای قبل، در سناریو S4، هیچ واحد زغالی جدیدی به ترکیب تولید سال پایه اضافه نشده است. همچنین بیش‌ترین تعداد واحدهای سیکل ترکیبی نیز طی این سناریو مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که در مدل انتشار در نظر گرفته‌شده (رابطه (۱۲))، بیش‌ترین میزان انتشار مربوط به واحدهای زغالی، و کم‌ترین آن‌ها مربوط به واحدهای سیکل ترکیبی است. نکته دیگری که از بررسی نتایج به‌دست‌آمده از سناریو S4 قابل استنباط است، تمایل شرکت تولیدی به سرمایه‌گذاری بر روی واحدهای تجدیدپذیر است؛ به‌طوری‌که طی سناریو S4، در مقایسه با سناریو اول، ظرفیت واحدهای تجدیدپذیر افزایش قابل توجهی داشته است. در مورد واحدهای هسته‌ای نیز می‌توان گفت که علی‌رغم عاری‌بودن این واحدها از انتشار آلاینده‌های جوی، گزاف‌بودن هزینه سرمایه‌گذاری اولیه مانع از سرمایه‌گذاری بیش‌تر بر روی این واحدها شده است.

رفتار تولید انرژی هر یک از انواع واحدهای متعارف و تجدیدپذیر، اعم از واحدهای جدید و موجود، در طول افق برنامه‌ریزی نیز به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در میان واحدهای متعارف، بیش‌ترین سهم در انرژی تولیدی مربوط به واحدهای سیکل ترکیبی است. موثر بودن سایر



شکل ۳: رفتار تولید انرژی واحدهای متعارف طی S1 تا S4



شکل ۴: رفتار تولید انرژی واحدهای تجدیدپذیر طی S1 تا S4

از مقایسه مقادیر مربوط به هزینه خسارات زیست‌محیطی نیز ملاحظه می‌شود که موثرترین سیاست در کاهش انتشار ترکیب تولید و لذا کاهش خسارات مربوطه، سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد است. برای درک بهتر این‌که هر سیاست چگونه بر مؤلفه‌های مازاد رفا، خسارات زیست‌محیطی، و سود سرمایه‌گذاران بخش تولید تأثیر می‌گذارد، مقادیر ارزش فعلی هر یک از مؤلفه‌های مزبور در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: مؤلفه‌های مطرح در دیدگاه اقتصادی - زیست‌محیطی

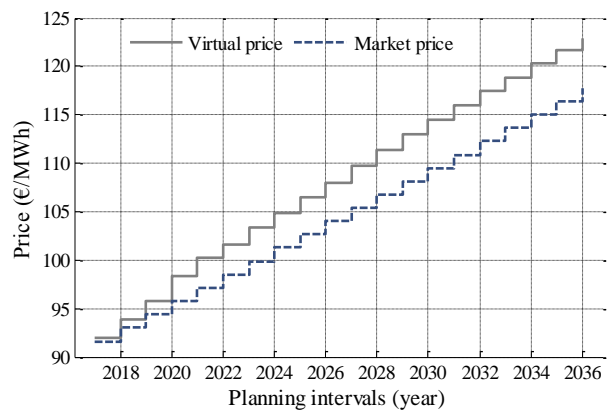
سناریو				مقادیر ارزش فعلی (M€)
S4	S3	S2	S1	
۲۱۸۵۴	۲۶۱۱۴	۲۷۳۲۶	۲۵۲۰۹	سود شرکت تولیدی
۷۷۵۵۵۹	۷۷۵۵۵۹	۷۷۴۳۳۸	۷۷۵۵۵۹	مازاد رفا مصرف‌کننده
۱۶۱۹۱۱	۱۹۰۹۳۱	۱۸۷۵۰۴	۱۹۵۴۱۳	خسارات زیست‌محیطی
۶۳۵۵۰۲	۶۱۰۷۴۲	۶۱۴۱۶۰	۶۰۵۳۵۵	شاخص انتخاب

بدیهی است با در نظر گرفتن هر سه مؤلفه به صورت یک‌جا، می‌توان کارآمدترین سیاست را از دیدگاه اقتصادی - زیست‌محیطی شناسایی نمود. بر این اساس، کارآمدترین سیاست را می‌توان سیاستی دانست که بیش‌ترین تأثیر بر کاهش هزینه خسارات زیست‌محیطی را در برابر کم‌ترین تأثیر بر کاهش سود سرمایه‌گذار و رفا مصرف‌کنندگان به دنبال داشته باشد. از این‌رو، در این‌جا، تفاضل مجموع مؤلفه‌های سود شرکت تولیدی و مازاد رفا با هزینه خسارات زیست‌محیطی را به‌عنوان «شاخص انتخاب» کارآمدترین سیاست در نظر گرفته شده است.

با توجه به مقادیر حاصله برای شاخص انتخاب، می‌توان سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد را به‌عنوان کارآمدترین سیاست از دیدگاه مورد نظر در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه تولید معرفی نمود؛ به‌طوری‌که تحت اجرای این سیاست، اگرچه سود شرکت تولیدی از ۲۵۲۰۹ M€ در سناریو S1 به ۲۱۸۵۴ M€ در سناریو S4 کاهش می‌یابد، اما متناسب با این کاهش، هزینه‌های زیست‌محیطی نیز به‌طور متناظر از ۱۹۵۴۱۳ M€ به ۱۶۱۹۱۱ M€ کاهش می‌یابد. این امر در

جدول ۲: قیمت مجازی، مازاد رفا و هزینه خسارات زیست‌محیطی

ED_i (M€)				مازاد رفا (M€) در		سال
S4	S3	S2	S1	VPI_i	II_i^m	
۹۲۸۲	۹۲۸۲	۹۲۸۲	۹۲۸۲	۳۷۳۷۹	۳۷۴۰۲	۲۰۱۷
۹۴۳۷	۹۸۹۴	۹۴۳۷	۹۸۹۴	۴۱۳۷۳	۴۱۴۳۹	۲۰۱۸
۱۰۰۵۶	۱۰۰۵۶	۱۰۰۵۶	۱۰۰۵۶	۴۹۳۷۸	۴۹۵۰۰	۲۰۱۹
۱۰۲۱۸	۱۰۲۱۸	۱۰۲۱۸	۱۰۲۱۸	۵۱۵۶۳	۵۱۶۶۴	۲۰۲۰
۱۰۳۸۰	۱۰۳۸۰	۱۰۳۸۰	۱۰۳۸۰	۵۳۳۰۸	۵۳۴۰۸	۲۰۲۱
۱۱۰۲۹	۱۰۵۴۳	۱۰۵۴۳	۱۱۰۲۹	۵۳۷۵۸	۵۳۸۵۹	۲۰۲۲
۱۱۸۷۱	۱۳۰۶۵	۱۱۳۶۹	۱۳۵۶۶	۵۸۳۱۳	۵۸۴۱۷	۲۰۲۳
۱۲۲۲۵	۱۳۴۵۵	۱۱۷۰۸	۱۳۹۷۲	۵۹۱۳۲	۵۹۲۳۵	۲۰۲۴
۱۲۵۷۹	۱۳۸۴۵	۱۴۳۷۶	۱۴۹۰۸	۵۹۹۵۸	۶۰۰۵۴	۲۰۲۵
۱۲۹۳۴	۱۶۶۲۹	۱۴۷۸۱	۱۵۳۲۸	۶۴۵۹۶	۶۴۶۹۹	۲۰۲۶
۱۳۲۸۸	۱۷۰۸۵	۱۷۶۴۷	۱۸۲۰۸	۶۵۴۵۹	۶۵۵۵۴	۲۰۲۷
۱۳۶۴۲	۱۸۱۱۷	۱۸۱۱۷	۱۸۶۹۴	۶۸۹۴۶	۶۹۰۴۷	۲۰۲۸
۱۳۹۹۷	۱۸۵۸۸	۱۸۵۸۸	۱۹۱۷۹	۶۹۸۳۶	۶۹۹۳۶	۲۰۲۹
۱۴۳۵۱	۱۹۰۵۸	۱۹۰۵۸	۱۹۶۶۵	۷۰۷۲۶	۷۰۸۲۵	۲۰۳۰
۱۴۷۰۵	۱۹۵۲۹	۱۹۵۲۹	۲۰۱۵۰	۷۱۶۱۵	۷۱۷۱۵	۲۰۳۱
۱۵۰۶۰	۱۹۹۹۹	۲۰۰۰۰	۲۰۶۳۴	۷۲۵۰۴	۷۲۶۰۴	۲۰۳۲
۱۵۵۹۱	۲۰۷۰۵	۲۰۷۰۵	۲۱۳۶۴	۷۳۴۹۴	۷۳۴۹۳	۲۰۳۳
۱۶۱۲۳	۲۱۴۱۱	۲۱۴۱۱	۲۲۰۹۳	۷۴۲۸۳	۷۴۲۸۳	۲۰۳۴
۱۶۶۵۴	۲۲۱۱۷	۲۲۱۱۷	۲۲۸۲۱	۷۵۱۷۳	۷۵۲۷۲	۲۰۳۵
۱۷۱۸۶	۲۲۸۲۳	۲۲۸۲۳	۲۳۵۴۹	۷۶۰۶۱	۷۶۱۶۲	۲۰۳۶



شکل ۵: شاخص قیمت مجازی به‌دست آمده در هر بازه و قیمت بازار

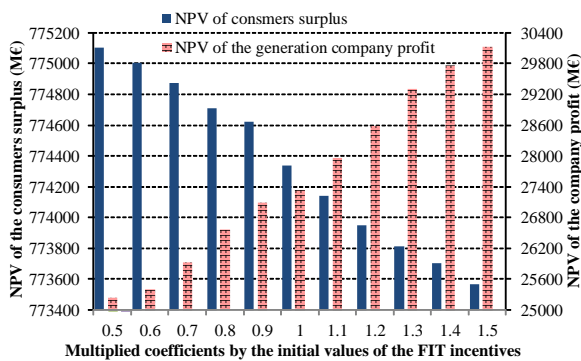
شرایط مزاد رفاه ثابت، باعث می‌شود که از میان سیاست‌های مورد بررسی، سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد به‌عنوان موثرترین سیاست از دیدگاه اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی شناخته شود.

۴-۱- تحلیل حساسیت

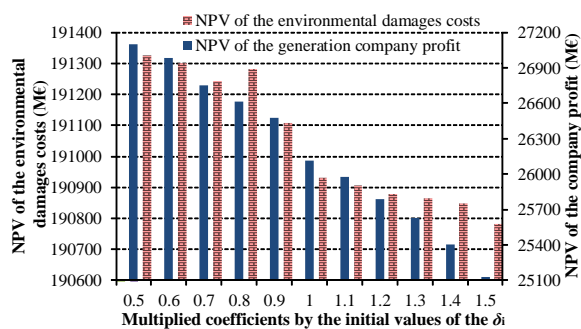
در این بخش، به‌منظور درک بهتر اثر بلندمدت سیاست‌های انرژی بر سایر حوزه‌هایی که نتایج حاصل از اجرای این سیاست‌ها به آن‌ها برمی‌گردد، حساسیت مولفه‌های مزاد رفاه، خسارت‌های زیست‌محیطی، و سود شرکت تولیدی، به پارامترهای اصلی سیاست‌های مورد نظر، مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ متناسب با هر یک از سیاست‌های شبیه‌سازی‌شده، جزئیات تحلیل حساسیت‌های صورت‌گرفته به شرح ذیل است:

- سیاست حق تعرفه: در مورد این طرح، حساسیت مزاد رفاه و سود شرکت تولیدی نسبت به تغییرات حق تعرفه‌های در نظر گرفته‌شده، به میزان نصف تا ۱/۵ برابر مقادیر اولیه این تعرفه‌ها برای هر یک از انواع واحدهای تجدیدپذیر در سناریو S2، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین ترتیب با ضرب حق تعرفه یا همان تشویق‌های در نظر گرفته‌شده اولیه در ضریب‌های ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ... تا ۱/۳، ۱/۴، ۱/۵ و طی ۱۰ تکرار، مسئله شبیه‌سازی، و ارزش فعلی کل سود شرکت تولیدی و نیز مزاد رفاه مصرف‌کنندگان انرژی، محاسبه شده‌اند.
- سیاست تعهد در سهم: در مورد این طرح، حساسیت سود شرکت تولیدی و خسارت زیست‌محیطی به تغییرات درصد تعهد در سهم در هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی، به میزان ۰/۵ تا ۱/۵ برابر مقدار اولیه در سناریو S3 تحلیل شده است. به بیانی کامل‌تر، در مورد سیاست تعهد در سهم، با توجه به سازوکار آن، به بررسی حساسیت سود شرکت تولیدی و خسارت زیست‌محیطی نسبت به تغییرات پارامتر درصد تعهد، یعنی δ_i پرداخته می‌شود؛ مادامی که مقادیر اولیه در نظر گرفته‌شده برای پارامتر مورد نظر در سناریو S3، در ضرایب ۰/۵، ۰/۶، ...، ۱/۴ و ۱/۵ ضرب شده و به ازای هر پارامتر جدید، مقادیر مورد بررسی محاسبه می‌شوند.
- سیاست حق انتشار: در مورد این طرح نیز، حساسیت سود شرکت تولیدی و خسارت زیست‌محیطی، به تغییرات سقف مجاز انتشار سالانه در هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی، ارزیابی شده است. مشابه با دو تحلیل فوق، در مورد سیاست مورد نظر نیز، با ضرب نمودن ده ضریب در نظر گرفته‌شده، یعنی ۰/۵، ۰/۶، ...، ۱/۴، ۱/۵، در مقدار اولیه سقف مجاز انتشار شرکت تولیدی در سناریو S4، مقادیر ارزش فعلی سود شرکت تولیدی و خسارت زیست‌محیطی محاسبه می‌گردند.

سود شرکت تولیدی افزایش، اما مزاد رفاه به‌شدت کاهش می‌یابد. همان‌طور که از شکل مورد نظر مشاهده می‌شود، پر واضح است که حساسیت رفاه مصرف‌کنندگان در مقابل سود شرکت تولیدی به تغییرات میزان تشویق‌های در نظر گرفته‌شده برای منابع انرژی تجدیدپذیر بسیار بیش‌تر بوده که این امر حساس بودن تخمین نرخ تشویق‌های مربوطه و جلوگیری از حمایت بیش از حد تولیدکنندگان الکتریسیته سبز را نشان می‌دهد. در مورد شکل ۷، همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش δ_i ، سود شرکت تولیدی و خسارت زیست‌محیطی هر دو کاهش می‌یابند؛ کاهش در سود شرکت تولیدی را می‌توان در نتیجه سخت‌تر شدن محدودیت اعمال‌شده از سوی بهره‌بردار مستقل سیستم دانست؛ مادامی که عمل به تعهد در این طرح اجباری است. از طرف دیگر، تأمین بخش بیش‌تری از انرژی فروخته‌شده در بازار با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، باعث کاهش هزینه متناظر با خسارت‌های زیست‌محیطی گردیده است. البته، همان‌طور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود، قطعی نبودن اثرگذاری طرح تعهد در سهم در کاهش میزان آلاینده‌ها کاملاً مشخص است؛ چراکه در ضریب‌های بالای ۱/۲، ارزش فعلی خسارت‌های زیست‌محیطی چندان تغییری نکرده که این امر به هدف دنبال‌شده در طراحی طرح مورد نظر (یعنی ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر و نه کاهش میزان آلاینده‌ها) مربوط می‌شود. تغییراتی مشابه با طرح تعهد در سهم در مورد خسارت زیست‌محیطی و سود شرکت تولیدی نسبت به تغییرات سقف انتشار مجاز در شکل ۸ دیده می‌شود.



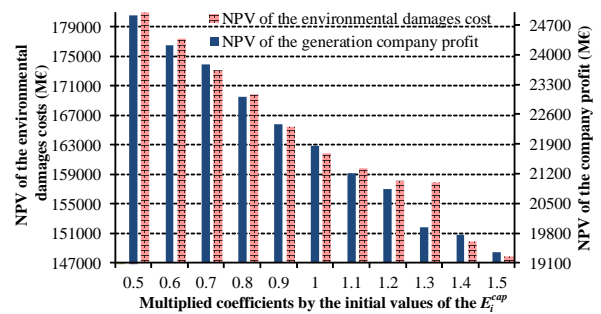
شکل ۶: حساسیت مزاد رفاه و سود شرکت تولیدی به میزان تشویق‌ها



شکل ۷: حساسیت سود سرمایه‌گذار و خسارت زیست‌محیطی به δ_i

شکل‌های ۶ الی ۸، تحلیل حساسیت‌های صورت‌گرفته، به ترتیب در مورد سیاست حق تعرفه، تعهد در سهم، و طرح حق انتشار را نشان می‌دهند. همان‌گونه که از شکل ۶ مشاهده می‌شود، با کاهش میزان تشویق‌ها در سیاست حق تعرفه، سود شرکت تولیدی کاهش، اما مزاد رفاه مصرف‌کنندگان افزایش می‌یابد؛ بلعکس، با افزایش میزان تعرفه‌ها،

- [2] M. Kampa and E. Castanas, "Human health effects of air pollution," *Environmental Pollution*, vol. 151, no. 2, pp. 362-367, 2008.
- [3] O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, S. Kadner, T. Zwickel, et al., "Renewable energy sources and climate change mitigation: special report of the intergovernmental panel on climate change," Cambridge University Press, 2011.
- [4] N. E. Koltsaklis and M. C. Georgiadis, "A multi-period, multi-regional generation expansion planning model incorporating unit commitment constraints" *Appl. Energy*, vol. 158, no. 6, pp. 310-331, 2015.
- [5] W. Chen and R. Xu, "Clean coal technology development in China," *Energy Policy*, vol. 38, no. 5, pp. 2123-2130, 2010.
- [6] M. Ferreira, M. Almeida, and A. Rodrigues, "Cost-optimal energy efficiency levels are the first step in achieving cost effective renovation in residential buildings with a nearly-zero energy target" *Energy and Buildings*, vol. 133, pp. 724-737, 2016.
- [7] M. Martiskainen and J. Coburn, "The role of information and communication technologies in household energy consumption: prospects for the UK," *Energy Efficiency*, vol. 4, no. 2, pp. 209-221, 2011.
- [8] A. Abdollahi, M. P. Moghaddam, M. Rashidinejad and M. K. Sheikh-El-Eslami, "Investigation of economic and environmental-driven demand response measures incorporating UC," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 12-25, 2012.
- [9] حسن براتی و فرشید عشیر، «مدیریت و کمیته‌سازی هزینه انرژی با ساختار نیروگاه مجازی و در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۲، صفحه ۴۱۲-۴۰۱، ۱۳۹۶.
- [۱۰] جمیل جنتی و داریوش نظریور، «مدیریت انرژی پارکینگ هوشمند خودروهای برقی در یک ریزشبهه با در نظر گرفتن اثرات برنامه پاسخ‌گویی بار»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۲، صفحه ۴۶۷-۴۵۵، ۱۳۹۶.
- [11] J. Sirikum, A. Techanitisawad and V. Kachitvichyanukul, "A new efficient GA-benders' decomposition method: For power generation expansion planning with emission controls," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 3, pp. 1092-1100, 2007.
- [12] S. Moghddas-Tafreshi, H. Shayanfar, A. S. Lahiji, A. Rabiee and J. Aghaei, "Generation expansion planning in Pool market: A hybrid modified game theory and particle swarm optimization," *Energy Conv. and Manag.*, vol. 52, no. 2, pp. 1512-1519, 2011.
- [13] L. Barroso, H. Sensfuss, and P. Linares, "The green effect," *IEEE Power & Energy Mag.*, vol. 8, no. 5, pp. 22-35, 2010.
- [14] A.J. Pereira and J.T. Saraiva, "A long term generation expansion planning model using system dynamics—Case study using data from the Portuguese/Spanish generation system", *Elec. Power Syst. Res.*, vol. 97, no. 3, pp. 41-50, 2013.
- [15] Y. Zhou, L., Wang and J. D. McCalley, "Designing effective and efficient incentive policies for renewable energy in generation expansion planning". *Appl. Energy*. vol. 88, no. 6, pp. 2201-9, 2011.
- [16] F. Careri, C. Genesi, P. Marannino, M. Montagna, S. Rossi and I. Siviero, "Generation expansion planning in the age of green economy", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2214-2223, 2011.
- [17] J. P. M. Sijm, *The performance of feed-in tariffs to promote renewable electricity in European countries: Energy research Centre of the Netherlands*, ECN, 2002.



شکل ۸: حساسیت سود سرمایه‌گذار و خسارات زیست‌محیطی به E_i^{cap}

اثرگذاری بیش‌تر افزایش محدودیت در طرح حق انتشار بر کاهش خسارت‌های زیست‌محیطی در مقایسه با طرح تعهد در سهم، بارزترین تفاوت میان شکل‌های ۷ و ۸ است؛ البته میزان کاهش سود شرکت تولیدی طی طرح تعهد در سهم در مقایسه با طرح حق انتشار کم‌تر است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به ارزیابی اثر رایج‌ترین سیاست‌های انرژی از دیدگاه اقتصادی - زیست‌محیطی در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه واحدهای نیروگاهی پرداخته می‌شود. بدین منظور، ابتدا، با ترکیب سیاست‌های حق تعرفه، تعهد در سهم، و سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد با مدل برنامه‌ریزی توسعه تولید، مدلی جامع با تابع هدف اصلاح‌شده و قیود اضافی، تحت عنوان مدل IRCGEP ارائه می‌شود. مدل مزبور در قالب یک مسئله 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 طرح‌های بهینه توسعه، اثر سیاست‌های مورد نظر بر مؤلفه‌های چون سود شرکت تولیدی، مزاد رفاه مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی، و هزینه معادل با خسارت‌های زیست‌محیطی به بار آمده از آلاینده‌های انتشار یافته از بخش تولید بررسی می‌گردد. در این بین شاخصی مناسب با عنوان قیمت مجازی، برای مدل کردن اثر سیاست حق تعرفه بر هزینه تمام‌شده برای هر واحد انرژی مصرفی نیز ارائه می‌شود. نتایج به‌دست آمده حاکی از موثر بودن سیاست‌های انرژی بر ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر و نیز کاهش آلاینده‌های انتشار یافته از بخش تولید است. علاوه بر این، بررسی‌ها مؤید آن است که از میان سیاست‌های در نظر گرفته‌شده، سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد، کارآمدترین سیاست از دیدگاه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه است.

مراجع

- [1] Z. Lu, J. Qi, B. Wen and X. Li, "A dynamic model for generation expansion planning based on Conditional Value-at-Risk theory under Low-Carbon Economy," *Elec Power Sys. Res.*, vol. 141, pp. 363-371, 2016.

مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۴، شماره ۲، صفحه ۱۰-۱، ۱۳۹۳.

[22] A. Farag, S. Al-Baiyat and T. Cheng, "Economic load dispatch multi objective optimization procedures using linear programming techniques", IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, no. 2, pp. 731-738, 1995.

[23] D Luenberger, *Microeconomic theory*, McGraw-Hill, NY, 1995.

[24] M.-C. Chang, J.-L. Hu and T.-F. Han, "An analysis of a feed-in tariff in Taiwan's electricity market," *Int J. of Elec. Power & Energy Syst.*, vol. 44, no. 1, pp. 916-920, 2013.

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

[18] E. Alishahi, M. P. Moghaddam and M. K. Sheikh-El-Eslami, "An investigation on the impacts of regulatory interventions on wind power expansion in generation planning," *Energy Policy*, vol. 39, no. 8, pp. 4614-23, 2011.

[19] M. Ragwitz, A. Held, G. Resch and T. Faber, *Assessment and optimization of renewable energy support schemes in the European electricity market: Fraunhofer IRB Verlag*, 2007.

[20] Y. He, L. Wang and J. Wang, "Cap-and-trade vs. carbon taxes: A quantitative comparison from a generation expansion planning perspective," *Comps. & Ind. Eng.*, vol. 63, no. 3, pp. 708-716, 2012.

[۲۱] رضا اعتماد، محمدصادق سپاسیان، مهرداد، ستایش‌نظر، محمدصادق قاضی‌زاده، «پیشنهاد یک روش جدید جهت برنامه‌ریزی توسعه تولید (GEP) بر مبنای تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)»،

زیرنویس‌ها

¹ Feed-In-Tariff

² Quota obligation

³ Emission trading system

⁴ Integrated Renewable-Conventional Generation Expansion Planning

⁵ Virtual price

⁶ Renewable auction mechanism