

بررسی جامع اثرات طرح‌های زیست‌محیطی-محور بر استراتژی‌های بلندمدت توسعه ظرفیت تولید در محیط تجدید ساختاریافته

هادی صادقی^۱، مسعود رشیدی‌نژاد^۲، و امیر عبدالهی^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی برق قدرت، دانشکده فنی، بخش برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، h.sadeghi@eng.uk.ac.ir

^۲ استاد بخش برق، mrashidi@uk.ac.ir، ^۳ استادیار بخش برق، a.abdollahi@uk.ac.ir، ^۴ دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

چکیده - امروزه انتشار گازهای گلخانه‌ای و به دنبال آن تغییرات شرایط آب‌وهوایی و گرمایش زمین، بخش تولید انرژی الکتریکی را به یکی از مهمترین حوزه‌ها برای بازنگری در مقررات، اعمال محدودیت‌ها، و ارائه راهکارها در راستای کاهش گازهای گلخانه‌ای مبدل نموده‌است. از جمله راهکارهای ارائه‌شده، استفاده از طرح‌های تشویقی با هدف کاهش آلاینده‌های انتشار یافته از بخش تولید، بصورت مستقیم و غیرمستقیم (ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر)، می‌باشد. علی‌رغم بدیهی بودن اثربخشی این طرح‌ها در کاهش گازهای گلخانه‌ای، اینکه این طرح‌ها چگونه بر کلیتی چون رفاه اجتماعی، مشتمل بر ترم‌هایی چون سود تولیدکننده، مازاد رفاه مصرف‌کنندگان، و خسارات زیست‌محیطی، در محیط تجدیدساختاریافته صنعت برق اثر می‌گذارند، موضوعی است که کمتر به آن توجه شده‌است. در مقاله حاضر، با ترکیب رایج‌ترین طرح‌های تشویقی با مسأله برنامه‌ریزی توسعه تولید، مدلی جامع برای تعیین استراتژی‌های بهینه توسعه ظرفیت بخش تولید طی یک افق بلندمدت، از دید یک شرکت تولیدی ارائه و در قالب یک مسأله غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح (MINLP) با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS حل می‌گردد؛ مادامیکه شاخصی مناسب نیز با عنوان شاخص قیمت مجازی، برای ارزیابی مازاد رفاه مصرف‌کنندگان ارائه می‌شود. نتایج حاصله در عین حالیکه مبتنی بر ضرورت اجرای طرح‌های تشویقی هستند، نشان‌دهنده انعکاس این طرح‌ها در رفاه اجتماعی و ترم‌های آن نیز می‌باشند.

کلید واژه- توسعه ظرفیت، رفاه اجتماعی، طرح‌های تشویقی، مسائل زیست‌محیطی، برنامه‌ریزی غیرخطی.

۱- مقدمه

رفاه اجتماعی، در تعیین استراتژی‌های توسعه ظرفیت تولید مبحثی است که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته‌است. لیکن برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر داشتن مسائل زیست‌محیطی بصورت اعمال محدودیت انتشار به بخش تولید [۳]، منابع انرژی تجدیدپذیر [۴]، تجهیزات ذخیره کربن [۵]، تجهیزات «زغال سنگ پاک» [۶]، و برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا [۸،۷] در کنار طرح‌های مختلف تدوین شده در بخش انرژی (طرح‌های زیست‌محیطی محور) [۴، ۳، ۹]، بخش عمده‌ای از موضوعات بررسی شده در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه، منابع تجدیدپذیر، بحث تغییرات شرایط آب‌وهوایی، و راهکارها و طرح‌های مربوطه را شامل می‌شوند.

در مقاله پیش‌رو، با ترکیب اثر رایج‌ترین طرح‌های زیست‌محیطی محور، تحت عنوان طرح تعهد در سهم با قابلیت دادوستد، طرح حق تعرفه، و طرح مالیات بر کربن، با مسأله برنامه‌ریزی توسعه تولید، به ارزیابی جامع اثرات منتج شده از این طرح‌ها بر رفاه اجتماعی پرداخته می‌شود. بدین منظور، ابتدا مدلی جامع برای برنامه‌ریزی توسعه از دید یک شرکت تولیدی در محیط تجدیدساختاریافته، همراه با قیود لازم برای شبیه‌سازی اثر طرح‌های فوق ارائه می‌گردد. مدل مزبور در قالب یک مسأله غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح (MINLP) در نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS پیاده‌سازی، و توسط بهینه‌ساز BARON طی چند سناریو حل می‌گردد. سپس با توجه نتایج حاصله، تغییرات رفاه اجتماعی مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ مادامیکه رفاه اجتماعی بصورت

معضلات بوجود آمده از انتشار گازهای گلخانه‌ای، از جمله CO₂، و در پی آن گرمایش جهانی زمین و خسارات زیست‌محیطی، امروزه تا جایی پیش رفته‌است که بازنگری در مقررات، تدوین طرح‌ها، و اعمال محدودیت‌ها به بخش‌های چون بخش حمل‌ونقل یا بخش تولید انرژی الکتریکی را در کانون توجه نهادهای مسئول قرار داده و جوامع جهانی را به هم‌اندیشی و چاره‌جویی در این زمینه وا داشته‌است. نتیجه این هم‌اندیشی در بخش حمل‌ونقل، به ظهور خودروهای برقی، و در بخش تولید، به تدوین طرح‌هایی انجامیده که امروزه که تحت عناوینی چون طرح‌های زیست‌محیطی محور، طرح‌های تشویقی، و سیاست‌های انرژی، در راستای ترویج واحدهای تجدیدپذیر و نیز کاهش آلاینده‌های انتشار یافته از بخش تولید، در حال اجرا می‌باشند.

همانطور که در مطالعات متعدد [۱،۲] اشاره شده‌است، طرح‌های تشویقی با اجرای برنامه‌های مختلفی چون پرداخت کمک‌هزینه‌های مالی به واحدهای تولیدی تجدیدپذیر به‌ازای هر واحد انرژی تولیدی (الکتریسته سبز)، اعمال محدودیت بر میزان آلاینده‌های انتشار یافته از بخش تولید، و یا دریافت مالیات از بخش تولید به ازای انتشار هر تن آلاینده، می‌توانند در ترویج سرمایه‌گذاری بر روی واحدهای تجدیدپذیر و یا کاهش انتشار بخش تولید در دراز مدت مثر و ثمر واقع شوند. با این وجود، ارزیابی اقتصادی این سیاست‌ها، از یک دیدگاه جامع مانند

مجموع مازاد رفاه مصرف کنندگان انرژی، سود سرمایه گذار در بخش تولید، و خسارات زیست محیطی به بارآمده از آلاینده های انتشار یافته از این بخش (بصورت منفی)، در نظر گرفته می شود. در این بین شاخصی مناسب نیز با عنوان شاخص قیمت مجازی برای محاسبه مازاد رفاه مصرف کنندگان انرژی متاثر از هزینه اضافی منتج شده از اجرای طرح های تشویقی مورد نظر ارائه می گردد.

به منظور پوشش کامل مطالب، بخش های بعدی مقاله بدین ترتیب در نظر گرفته می شوند؛ در بخش دوم، ضمن معرفی اجمالی سایر طرح های تشویقی که امروزه در کشورهای مختلف در حال اجرا می باشند، تاثیر ترویج منابع انرژی تجدید پذیر و محدودیت انتشار تحت اجرای این طرح ها، از دیدگاه ها مسائل زیست محیطی، سرمایه گذاران بخش تولید، و مصرف کنندگان انرژی مورد بررسی قرار می گیرد. بخش سوم به مدل سازی قسمت های مختلف چهارچوب دنبال شده اختصاص یافته و نتایج بدست آمده از آن همراه با تحلیل در بخش چهارم گردآوری می شود. در نهایت نتیجه گیری و ارائه پیشنهادها در بخش پنجم مقاله ارائه می شود.

۲- طرح های زیست محیطی محور

حق تعرفه (Feed-In-Tariff)، مناقصه (Auction Scheme)، تعهد در سهم با قابلیت دادوستد گواهی های سبز (Quota Obligation with Tradable Green Certificate)، مالیات بر کربن (Carbon Tax)، و حق انتشار با قابلیت دادوستد (Emission Trading System)، عناوین رایج ترین طرح های منتج شده از هم اندیشی دولت ها در راستای مواجهه با مسأله تغییرات شرایط آب و هوایی در بخش انرژی الکتریکی می باشند. این طرح ها، بسته به سازوکار اجرایی، بصورت مستقیم و غیرمستقیم بر کاهش آلاینده های انتشار یافته از بخش تولید نقش دارند؛ در ادامه، به دلیل محدودیت های موجود، از شرح سازوکار تمامی طرح های مزبور اجتناب و تنها به تشریح سازوکار طرح های مورد بررسی در این مطالعه اکتفا می شود.

در طرح حق تعرفه، دولت یا نهاد تنظیمی به سرمایه گذاران این اطمینان را می دهد که در صورت سرمایه گذاری بر روی واحدهای مبتنی بر منابع انرژی تجدید پذیر، توان الکتریکی تزریق شده به شبکه، برای یک مدت طولانی (۱۵ تا ۲۰ سال)، با یک مابه التفاوت مشخص (حق بیمه) بالاتر از قیمت انرژی در بازار خریداری می شود؛ یعنی مجموع حق بیمه و قیمت بازار به تولیدکننده پرداخت می شود. هزینه های به بارآمده از حق بیمه های پرداختی به تولیدکنندگان مربوطه نیز بصورت مالیات بر عهده مصرف کنندگان گذارده می شود.

در طرح تعهد در سهم، تولیدکننده از سوی نهاد تنظیمی متعهد می شود که هر ساله، معادل با درصد مشخصی (که هر ساله نیز افزایش می یابد) از توان تولید شده با واحدهای متعارف، الکتریسیته سبز تولید نماید؛ تولیدکننده در ازای تولید هر واحد الکتریسیته سبز یک گواهی موسوم به گواهی سبز که قابلیت دادوستد را دارد، دریافت می کند؛

عمل به تعهد با تسلیم کردن گواهی های دریافتی در پایان هر سال بررسی می شود. بدین ترتیب، تولیدکنندگانی که به هر دلیلی فاقد تولید مبتنی بر منابع انرژی تجدید پذیر هستند و یا ظرفیت تجدید پذیر آنها کم است، برای عمل به تعهد خود ناچار به خرید گواهی سبز از تولیدکنندگان دیگر هستند که این امر در کنار انگیزه برای فروش گواهی های اضافی (مابه التفاوت تعهد و میزان تولید الکتریسیته سبز)، می تواند باعث تشویق شرکت های تولیدی برای سرمایه گذاری بیشتر بر روی منابع انرژی تجدید پذیر گردد. با توجه به مکانیزم طرح تعهد در سهم، پرواضح است که چون تحریک بخش تولید به سرمایه گذاری بر روی منابع انرژی تجدید پذیر بدون پرداخت تشویق های مالی مستقیم است، هزینه های اضافی بخش تولید، متاثر از بالا بودن هزینه های سرمایه ای واحدهای تجدید پذیر، خودبخود بر عهده سرمایه گذاران بخش تولید خواهد بود. طرح مالیات بر کربن، عنوان طرح تشویقی دیگریست که نه بصورت تشویق، بلکه بصورت تنبیه (جریمه مالی) تولیدکنندگان در ازای هر واحد آلاینده های انتشار یافته به جو، باعث ایجاد انگیزه برای کاهش سطح انتشار می شود. همانگونه که مشاهده می شود، طی اجرای این طرح نیز، هزینه های به بارآمده از طرح مزبور (مالیات های وضع شده) گریبان گیر شرکت های تولیدی خواهد بود.

۳- مدل سازی مسأله

در این بخش، ضمن ارائه یک مدل جامع برای تعیین استراتژی های بهینه توسعه ظرفیت تحت اجرای طرح های مورد نظر، نحوه محاسبه مازاد رفاه مصرف کنندگان و همچنین ارزش خسارات زیست محیطی به بارآمده از آلاینده های بخش تولید تشریح می شود. استراتژی های توسعه، طی یک افق زمانی ۲۰ ساله از دید یک شرکت تولیدی برنامه ریزی می شود که ضمن رعایت قیود مختلف، به دنبال حداکثر ساختن سود حاصل از تصمیمات سرمایه گذاری خود است. در ادامه به مدل سازی تابع هدف و قیود مربوطه پرداخته می شود.

• تابع هدف

تابع هدف در نظر گرفته شده شامل حداکثر کل سود حاصل از فروش انرژی تولیدی در سایر سال های برنامه ریزی در طول یک افق N^p ساله می باشد. به منظور ایجاد امکان مقایسه اقتصادی طرح های مختلف توسعه با یکدیگر، محاسبات سود بر اساس روش ارزش فعلی صورت می گیرد. بودجه سرمایه گذاری شده در هر دوره به میزان انرژی عرضه شده به بازار، قیمت بازار، میزان تعهد، و نوع فناوری های منتخب و موجود برای توسعه بستگی دارد. بر این اساس، تابع هدف مسأله بصورت زیر طی رابطه (۱) بیان می گردد. در رابطه مزبور r نرخ بهره، i شاخص سال، Π_i^m قیمت هر مگاوات ساعت انرژی در بازار متناظر با سال i ، ϵ_i^{ex} و ϵ_i^{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

$$0 \leq n_{i,t} \leq \bar{n}_i, \quad 0 \leq \sum_t n_{i,t} \leq \bar{W}_i \quad (4)$$

• قید نرخ ترکیب سوخت

برای کاهش وابستگی بخش تولید به یک نوع سوخت خاص و لذارعایت تنوع در سبد انرژی، لازم است نهاد برنامه ریز این موضوع را در برنامه ریزی خود مد نظر داشته باشد. در اینجا این مسأله بصورت (5) مدل سازی می شود که در آن M_t^{min} و M_t^{max} به ترتیب نرخ ترکیب سوخت حداکثر و حداقل مربوط به فناوری نوع t می باشد.

$$M_t^{min} \leq n_{i,t} \cdot C_t / \sum_{t \in S_i^{tot}} n_{i,t} \cdot C_t \leq M_t^{max} \quad (5)$$

• قید تعهد در سیاست تعهد در سهم

متناظر با ترم چهارم تابع هدف، که سود شرکت تولیدی حاصل از فروش گواهی های سبز دریافت شده در هر سال را نشان می دهد، لازم است شرکت تولیدی هر ساله درصد مشخصی الکتریسته سبز نیز در ترکیب تولید خود داشته باشد. لذا، برای اطمینان از اجرای طرح تعهد در سهم، یک قید نامساوی بصورت رابطه (6)، در مدل برنامه ریزی توسعه تولید در نظر گرفته می شود. طبق رابطه (6)، کل انرژی تولیدی توسط سایر واحدهای تجدیدپذیر، باید بزرگتر یا مساوی با درصدی از کل انرژی تولیدی توسط واحدهای متعارف باشد.

$$\sum_{t \in Z_i^{ren,ex}} \varepsilon_t^{ex} \geq \delta_i \cdot \sum_{t \in Z_i^{con,ex}} \varepsilon_t^{ex} \quad (6)$$

• مازاد رفاه مصرف کننده و شاخص قیمت مجازی

به طور کلی، در علم اقتصاد، رضایتمندی و یا احساس خرسندی از مصرف یا تولید یک کالا، یا استفاده از یک خدمت، بعنوان مطلوبیت شناخته می شود. با توجه به مفهوم مطلوبیت، تفاوت میان مطلوبیت کل یک کالا (مجموع مطلوبیت های بدست آمده از مصرف هر واحد کالا) و ارزش کل بازاری آن (حاصل ضرب قیمت هر واحد کالا در تعداد کل واحدها)، مازاد رفاه مصرف کننده نامیده می شود. در اینجا، بدلیل محدودیت، از شرح نحوه محاسبه مازاد رفاه اجتناب می شود. توضیحات کامل در این باره در [10] موجود می باشد. در مقاله حاضر، برای محاسبه مازاد رفاه، همانگونه که در شکل 1 نشان داده شده است، منحنی تقاضا بصورت خطی فرض شده است؛ لذا رابطه بین قیمت و تقاضا، بصورت $\pi = a - bQ$ خواهد بود که در آن b - شیب منحنی تقاضا و a طول از مبدا می باشد. بدین ترتیب، با توجه به شکل 1، مازاد رفاه در قیمت π برابر $\pi \cdot Q^2 / (2b)$ خواهد بود [11]. لازم به ذکر است که قیمت انرژی در بازار بصورت یک قیمت متوسط، و مقدار Q برابر با حداکثر توان تولیدی شرکت مورد نظر فرض می شود. با توجه به مطالب فوق، پر واضح است که تحمیل هزینه های مربوط به طرح های تشویقی بر مصرف کنندگان، با افزایش هزینه تمام شده برای هر واحد انرژی، به کاهش مازاد رفاه می انجامد. برای دانستن اینکه در این شرایط مازاد رفاه چه میزان کاهش می یابد، لازم است میزان افزایش در هزینه واقعی پرداختی به ازای هر واحد انرژی مشخص گردد. برای دستیابی به این مهم، در اینجا از شاخص قیمت مجازی استفاده می شود.

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، $E_{i,t}$ میزان آلاینده های انتشار یافته از واحد متعارف نوع t در سال i (ton/year)، $\Pi_i^{CO_2}$ ، جریمه مالیاتی به ازای انتشار هر واحد آلاینده گی (€/ton)، $I_{i,t}$ هزینه سرمایه گذاری 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 می شوند، می باشد. Z_i^{ex} و Z_i^{new} نیز به ترتیب مجموعه واحدهای موجود در حال بهره برداری و مجموعه واحدهای جدیدی که از ابتدای سال i مورد بهره برداری قرار می گیرند را نشان می دهند؛ مجموع واحدهای متعارف و تجدیدپذیر (اعم از جدید و موجود) نیز در هر سال برنامه ریزی، به ترتیب با نمادهای $Z_i^{ren,ex}$ و $Z_i^{con,ex}$ مشخص شده اند.

$$\begin{aligned} \text{Max} \left\{ \sum_{i=1}^{N^y} (1+r)^{-i} \left[\sum_{t \in Z_i^{ex}} (\Pi_i^m - v_{i,t}) \varepsilon_t^{ex} \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{t \in Z_i^{new}} (\Pi_i^m - v_{i,t}) \varepsilon_t^{new} + \sum_{t \in Z_i^{ren,ex}} \varepsilon_t^{ex} \cdot \Pi_i^{FIT} \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{t \in Z_i^{con,ex}} \varepsilon_t^{ex} \cdot \Pi_i^{TGC} \cdot \delta_i - \sum_{t \in Z_i^{con,ex}} E_{i,t} \cdot \Pi_i^{CO_2} - \sum_{t \in Z_i^{new}} I_{i,t} \cdot C_t \cdot n_{i,t} \right] \right\} \quad (1) \end{aligned}$$

• قید تعادل تولید و عرضه انرژی

طبق رابطه (2)، میزان انرژی که شرکت تولیدی در سال i تصمیم به عرضه آن به بازار می گیرد، باید با کل توان تولیدی توسط مجموع واحدهای موجود و واحدهای جدید اضافه شده برابر باشد.

$$E_i^T = \sum_{t \in Z_i^{ex}} \varepsilon_t^{ex} + \sum_{t \in Z_i^{new}} \varepsilon_t^{new} \quad (2)$$

• قید بودجه

مطابق با رابطه (3)، بدلیل محدود بودن میزان بودجه در سال پایه (سال مبنا یا سال قبل از شروع برنامه ریزی)، سرمایه گذاری های انجام شده در طول هر یک از سال های برنامه ریزی، با استفاده از روش ارزش فعلی، با کل بودجه موجود تا آن سال مقایسه شده و تصمیمات سرمایه گذاری متناسب با آن بودجه صورت می گیرد. در رابطه (3)، In_{tot}^{bud} کل بودجه موجود در سال پایه می باشد.

$$\sum_i \sum_{t \in Z_i^{new}} (1+r)^{-i} (I_{i,t} \cdot C_t \cdot n_{i,t}) \leq In_{tot}^{bud} \quad (3)$$

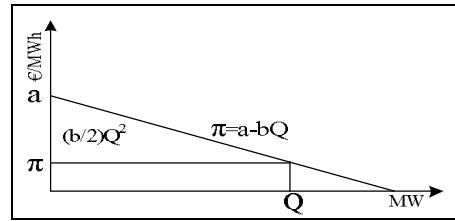
• قید حداکثر ظرفیت قابل ساخت واحدها

در عمل، دلایل فنی، اقتصادی، و یا اجرایی، منجر به محدود شدن تعداد واحدهای احداث شده از هر فناوری، به یک سقف مشخص در طول هر دوره از برنامه ریزی می گردند. در اینجا، این موضوع بصورت (4) در نظر گرفته شده است. در (4)، \bar{n}_i حداکثر تعداد واحدهای مجاز از نوع t می باشد که می تواند در طول هر مرحله از برنامه ریزی انتخاب گردد. همچنین در پایان افق توسعه، تعداد کل واحدهای انتخاب شده از هر فناوری نیز باید کوچکتر یا برابر با حداکثر تعداد واحدهای در نظر گرفته شده در ابتدای برنامه ریزی، یعنی \bar{W}_i باشد.

۴- شبیه‌سازی و ارائه نتایج

در این بخش، ابتدا، استراتژی‌های بهینه توسعه ظرفیت طی یک افق ۲۰ ساله (از ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۵) طی دو سناریو S1 و S2، به ترتیب مبنی بر عدم‌اعمال و اعمال طرح‌های مورد نظر، ارائه می‌گردد؛ سپس با توجه به استراتژی‌های بهینه توسعه، به ارزیابی رفاه اجتماعی پرداخته می‌شود. به منظور انجام محاسبات با استفاده از روش ارزش فعلی، نرخ بهره برابر با ۵٪ در نظر گرفته می‌شود. کل ظرفیت ترکیب تولید در سال مبنا برابر با ۶۳۰۰ MW، مشتمل بر واحدهای بخاری با سوخت زغال‌سنگ (Coal) و نفت‌خام (Oil)، واحدهای سیکل ترکیبی (CCGT)، و واحدهای برق‌آبی (Hydro) و بادی ساحلی (On-shore Wind)، می‌باشد. اطلاعات کامل در مورد ترکیب تولید سال پایه و همچنین اطلاعات فنی و اقتصادی واحدهای منتخب، مشتمل بر واحدهای زغالی، سیکل ترکیبی، هسته‌ای (Nuclear)، برق‌آبی، زیست‌توده (Biomass)، بادی ساحلی، زمین‌گرمایی (Geo Thermal)، خورشیدی (Thermal solar)، و بیوگاز (Biogas)، در مرجع [۱۳] موجود می‌باشد. اطلاعات مربوط به طرح‌های تشویقی مانند حق بیمه مربوط به هر یک از انواع واحدهای تجدیدپذیر، درصد تعهد و قیمت گواهی سبز، میزان مالیات به ازای هر واحد آلاینده‌گی، و هزینه اجتماعی کربن نیز از مراجع [۲۰، ۱۰، ۱۲] اتخاذ می‌گردند. با پیاده‌سازی مدل ارائه‌شده در بخش ۳ در محیط نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS در قالب یک مسئله MINLP، جدول ۱، در ازای بودجه‌ای برابر با ۱۰۰۰ M€ در سال پایه، استراتژی‌های بهینه توسعه، مبنی بر نوع، تعداد، و سال ورود واحدهای جدید اضافه‌شده طی هر دو سناریو را نشان می‌دهد. در این جدول، برای درک بهتر اثر طرح‌های تشویقی، تعداد واحدهای تجدیدپذیر اضافه‌شده بصورت سایه‌دار مشخص شده‌اند. مطابق با نتایج نشان داده‌شده، طی سناریو S1، دو واحد ۶۰۰ مگاواتی زغالی، پنج واحد ۴۰۰ مگاواتی سیکل ترکیبی، یک واحد ۱۲۰۰ مگاواتی هسته‌ای، و تنها دو واحد تجدیدپذیر ۱۰ مگاواتی بیوگاز، 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 طرح‌های تشویقی است.

برنامه‌ریزی توسعه با در نظر گرفتن اثر طرح‌های حق تعارف، تعهد در سهم با قابلیت دادوستد، و طرح مالیات بر کربن، طی سناریو S2 شبیه‌سازی می‌شود. با فرض اینکه درصد تعهد δ_i بصورت خطی از ۹٪ در سال ۲۰۱۶ به ۲۲٪ در سال ۲۰۳۵، قیمت هر گواهی سبز در این بازه بصورت خطی از ۸۸/۳۸ €/MWh به ۶۲/۲۵ €/MWh، و میزان مالیات وضع‌شده به ازای انتشار هر تن آلاینده‌گی از ۱۰/۷۹ €/ton به ۳۳/۱۶ €/ton تغییر کند، خلاصه تصمیمات توسعه شرکت تولیدی در جدول ۱ آورده شده‌است. با توجه به نتایج حاصله، مشاهده می‌شود که طی سناریو دوم توسعه، تعداد قابل‌توجهی واحد تجدیدپذیر، در مقایسه با سناریو اول، به ظرفیت تجدیدپذیر سال پایه اضافه شده‌است؛ چراکه، ماهیت طرح تعهد در سهم چنین ایجاب می‌کند.



شکل ۱: منحنی خطی تقاضا و محاسبه مازاد رفاه [۱۱]

با توجه به ماهیت طرح‌های مورد بررسی، می‌توان دید که تنها تحت طرح حق تعارف، بار مالی مربوطه بر عهده نهاد مصرف‌کننده گذارده می‌شود. از این‌رو، محاسبه مازاد رفاه تحت اجرای این طرح با استفاده از شاخص قیمت مجازی صورت می‌گیرد؛ در حالیکه در مورد دیگر طرح‌های در نظر گرفته‌شده، مازاد رفاه به ازای قیمت انرژی در بازار محاسبه می‌شود. شاخص قیمت مجازی، در واقع برابر با مجموع قیمت بازار و میانگین تشویق‌های پرداختی در طرح حق تعارف به واحدهای تجدیدپذیر در هر سال از افق توسعه می‌باشد و بصورت زیر فرمول‌بندی می‌گردد:

$$VPI_i = \Pi_i^m + \frac{\sum_{t \in Z_i^{con,ex}} \Pi_i^{FIT} \cdot \mathcal{E}_i^{ex}}{E_i^T} \quad (7)$$

که در آن VPI_i (€/MWh) شاخص مورد نظر در سال i می‌باشد.

• ارزش خسارات زیست‌محیطی به بارآمده از بخش تولید

برای تخمین خساراتی که بخش تولید با وارد کردن آلاینده‌های گازی، خصوصاً CO_2 ، 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 CO_2 (بعنوان اصلی‌ترین گاز گلخانه‌ای) به محیط زیست و جامعه وارد می‌کند [۱۲]. 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 روابط (۹)–(۷) محاسبه می‌گردد که در آنها، ∂_i^{acc} هزینه اجتماعی کربن (€/ton) در سال i ، α_i ، β_i ، و γ_i ضرائب تابع انتشار، و \bar{h}_i پارامتر ساعات استفاده در سال می‌باشد که بر اساس اطلاعات مربوط به حداقل ساعات کارکرد مطمئن هر یک از انواع واحدها در طی سال‌های گذشته تخمین زده می‌شود [۲].

$$ED_i = \sum_{t \in Z_i^{con,ex}} E_{i,t}^{tot} \cdot \partial_i^{acc} \quad (7)$$

$$E_{i,t}^{tot} = \sum_{t \in Z_i^{con,ex}} E_{i,t} \quad (8)$$

$$E_{i,t} = \sum_{n_{i,t}} (\alpha_i + \beta_i \cdot P_{i,t} + \gamma_i \cdot P_{i,t}^2) \bar{h}_i \quad \forall t \in Z_i^{con,ex} \quad (9)$$

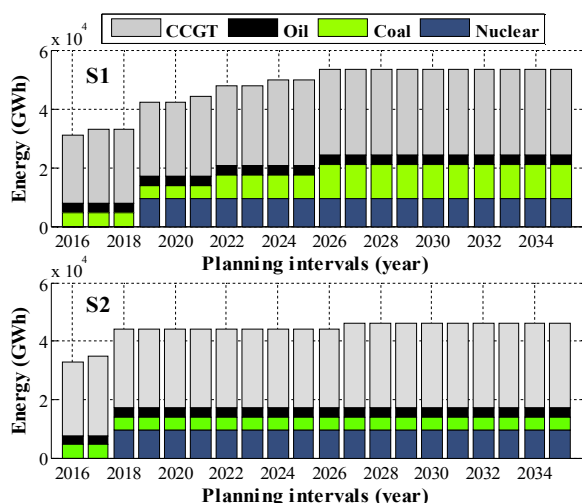
با حل مدل ارائه‌شده طی روابط (۹)–(۱)، علاوه بر استراتژی‌های توسعه و سود سرمایه‌گذار متأثر از طرح‌های زیست‌محیطی محور در نظر گرفته‌شده، میزان انتشار ترکیب تولید و همچنین تشویق‌های مالی پرداختی به واحدهای تجدیدپذیر در طرح حق تعارف نیز مشخص خواهند شد. در نهایت با استفاده از این اطلاعات می‌توان ترم‌های مازاد رفاه و خسارات زیست‌محیطی را تعیین نمود.

جدول ۱: نتایج برنامه‌ریزی توسعه تولید طی سناریوهای S1 و S2

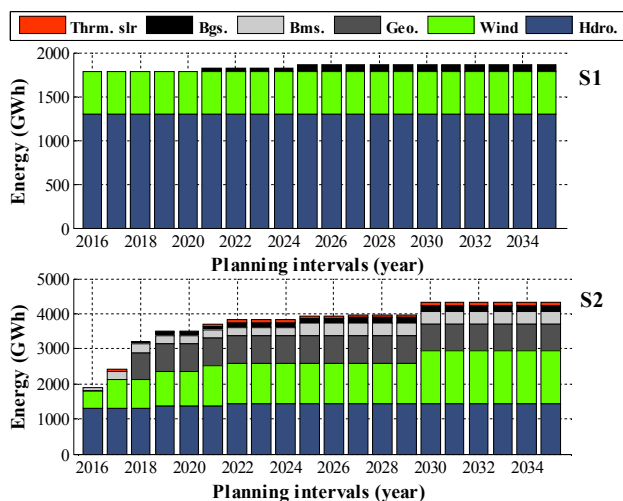
سناریو	سال	نوع فناوری تولیدی									
		Coal	CCGT	Nuclear	Small Hydro	Biomass	On-shore Wind	Geo Thermal	Thermal Solar	Biogas	
S1	۲۰۱۶	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
	۲۰۱۷	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
	۲۰۱۹	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
	۲۰۲۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	
	۲۰۲۲	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
	۲۰۲۴	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
	۲۰۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	
	۲۰۲۶	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
S2	۲۰۱۶	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	
	۲۰۱۷	۰	۱	۰	۰	۱	۲	۰	۲	۰	
	۲۰۱۸	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	
	۲۰۱۹	۰	۰	۰	۲	۰	۱	۰	۰	۱	
	۲۰۲۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۲	۰	
	۲۰۲۲	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۱	
	۲۰۲۵	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	
	۲۰۲۷	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	
	۲۰۲۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
	۲۰۳۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۰	

واحدهای جدید و موجود، در طول افق برنامه‌ریزی به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در میان واحدهای متعارف، بیشترین سهم در انرژی تولیدی مربوط به واحدهای سیکل ترکیبی می‌باشد. موثر بودن سایر طرح‌های تشویقی بر افزایش نرخ نفوذ واحدهای تجدیدپذیر نیز در شکل ۳ قابل مشاهده است.

به منظور ارزیابی طرح‌های شبیه‌سازی شده، در ادامه مقادیر بدست‌آمده برای مازاد رفاه مصرف‌کنندگان انرژی، خسارات زیست‌محیطی، و سود سرمایه‌گذار، طی سناریوهای S1 و S2 ارائه می‌شود. با توجه به میزان حق بیمه‌های دریافت‌شده توسط شرکت تولیدی در سناریو S2، شکل ۴، شاخص قیمت مجازی را در مقایسه با قیمت بازار نشان می‌دهد. متناظر با شکل ۴، شکل ۵ میزان کاهش در مازاد رفاه مصرف‌کنندگان را در نتیجه افزایش قیمت پرداخت‌شده در عمل از سوی مصرف‌کننده به‌ازای هر واحد انرژی را نشان می‌دهد. همانطور که از نتایج مربوط به مازاد رفاه مصرف‌کنندگان پیداست، طرح حق تعرفه و تحمیل بار مالی تشویق‌های مربوطه به مصرف‌کنندگان، به کاهش قابل توجه مازاد رفاه آنها انجامیده است.



شکل ۲: رفتار تولید انرژی واحدهای متعارف در سناریوهای S1 و S2



شکل ۳: رفتار تولید انرژی واحدهای تجدیدپذیر در سناریوهای S1 و S2

به بیانی کامل‌تر، در طرح تعهد در سهم، با افزایش ظرفیت واحدهای متعارف در طول افق توسعه، باید ظرفیت واحدهای تجدیدپذیر نیز افزایش یابد؛ این امر به سرمایه‌گذاری سالانه شرکت تولیدی بر روی واحدهای تجدیدپذیر انجامیده‌است؛ بطوریکه در طول افق برنامه‌ریزی، چهار واحد ۱۰ MW برق‌آبی، شش واحد ۱۰۰ MW بادی، دو واحد ۱۰۰ MW زمین‌گرمایی، و سه واحد ۲۰ MW زیست‌توده متاثر از طرح مزبور مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. در نتیجه طرح حق تعرفه نیز، چهار واحد ۱۰ MW خورشیدی (گرمایی) و چهار واحد ۱۰ MW بیوگاز به ترکیب تولید اضافه شده‌اند که هریک از آنها به ترتیب به میزان ۴۲/۷۱ و ۴۲/۷۵ €/MWh به‌ازای هر مگاوات انرژی، از سال شروع بهره‌برداری تا پایان افق برنامه‌ریزی حق بیمه دریافت می‌کنند. لازم به ذکر است که این واحدها، بسته به پارامتر η_f ، مقادیر متفاوتی انرژی در طول سال تولید می‌کنند.

با توجه به مکانیزم سیاست مالیات بر کربن، می‌توان گفت اجرای این طرح نه بر ترویج واحدهای تجدیدپذیر، بلکه بر کاهش کل میزان تولید، با عدم سرمایه‌گذاری بر روی واحدهای زغالی، که بیشترین میزان انتشار را در میان سایر انواع واحدهای متعارف دارند، اثرگذار بوده‌است؛ چراکه طی سناریو S2، در مقایسه با S1، هیچ واحد زغالی به ترکیب تولید سال پایه اضافه نشده‌است. علی‌رغم عاری بودن واحدهای هسته‌ای از آلاینده‌های جوی، عدم سرمایه‌گذاری بیشتر سرمایه‌گذار بر روی این واحدها را در طول افق توسعه می‌توان نتیجه گزاف‌بودن هزینه سرمایه‌ای اولیه و محدود بودن بودجه دانست. رفتار تولید انرژی هر یک از انواع واحدهای متعارف و تجدیدپذیر، اعم از

جدول ۲: مقادیر ارزش فعلی ترم‌های رفاه اجتماعی

سناریو	مقادیر ارزش فعلی (M€)		
	مازاد رفاه	سود سرمایه‌گذار	خسارات زیست‌محیطی
S1	۷۷۶۳۴۹	۲۴۳۱۹	۱۸۹۵۲۳
S2	۷۷۵۱۲۸	۲۲۹۲۴	۱۸۰۹۳۱

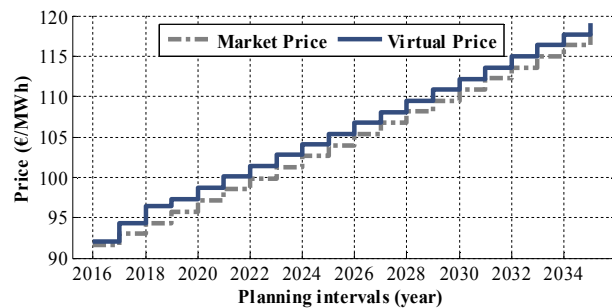
۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، با شبیه‌سازی اثر رایج‌ترین طرح‌های تشویقی، یعنی طرح‌های حق تعرفه، تعهد در سهم، و مالیات بر کربن، به ارزیابی جامع آنها بر استراتژی‌های بهینه توسعه ظرفیت بخش تولید در محیط تجدید ساختاریافته صنعت برق، از دیدگاه رفاه اجتماعی پرداخته می‌شود. بدین منظور، ابتدا طی دو سناریو مختلف، استراتژی‌های بهینه توسعه طی یک افق ۲۰ ساله تعیین شده و سپس با توجه به استراتژی‌های بهینه توسعه، ارزش خسارات زیست‌محیطی به بارآمده، سود شرکت سرمایه‌گذار، مازاد رفاه مصرف‌کنندگان، و نهایتاً رفاه اجتماعی بررسی می‌شود. نتایج حاصله حاکی از اثربخشی طرح‌های مزبور بر ارتقاء رفاه اجتماعی، علی‌رغم کاهش مازاد رفاه مصرف‌کنندگان و سود سرمایه‌گذار بخش تولید، است.

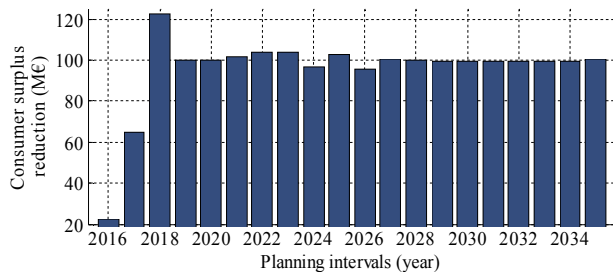
مراجع

- [1] 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, pp. 4614-4623, 2011.
- [2] F. Careli, C. Genesi, P. Marannino, M. Montagna, S. Rossi, and I. Siviero, "Generation expansion planning in the age of green economy," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 26, pp. 2214-2223, 2011.
- [3] K. Rajesh, A. Bhuvanesh, S. Kannan, and C. Thangaraj, "Least cost generation expansion planning with solar power plant using Differential Evolution algorithm," *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 677-686, 2016.
- [4] Barroso, L. A., Rudrick, H., Sensfuss, F., Linares, P., "The green effect," *Power and Energy Magazine, IEEE*, Vol. 8, No. 5, pp. 22-35, 2010.
- [5] M. van den Broek, A. Faaij, and W. Turkenburg, "Planning for an electricity sector with carbon capture and storage: case of the Netherlands," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 2, pp. 105-129, 2014.
- [6] W. Chen and R. Xu, "Clean coal technology development in China," *Energy Policy*, vol. 38, pp. 2123-2130, 2010.
- [7] C. Unsihuay-Vila, J. Marangon-Lima, A. Z. De Souza, and I. Perez-Arriaga, "Multistage expansion planning of generation and interconnections with sustainable energy development criteria: A multiobjective model," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, pp. 258-270, 2011.
- [8] A. Ghaderi, M. P. Moghaddam, and M. Sheikh-El-Eslami, "Energy efficiency resource modeling in generation expansion planning," *Energy*, vol. 68, pp. 529-537, 2014.
- [9] 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.
- [10] H. Sadeghi, A. Abdollahi, and M. Rashidinejad, "Evaluating the impact of FIT financial burden on social welfare in renewable expansion planning," *Renewable Energy*, vol. 75, pp. 199-209, 2015.
- [11] Chang, M.-C., Hu, J.-L., Han, T.-F., "An analysis of a feed-in tariff in Taiwan's electricity market," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 44, No. 1, pp. 916-920, 2013.
- [12] The United States Environmental Protection Agency (EPA): <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/global.html>

[۱۳] هادی صادقی، محسن محمدیان، امیر عبدالمی، مسعود رشیدی‌نژاد، "ارزیابی اثر سیاست‌های انرژی در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه تولید"، بیست‌ودومین کنفرانس مهندسی برق ایران (ICEE2014)، تهران، ایران، ۱۳۹۳.

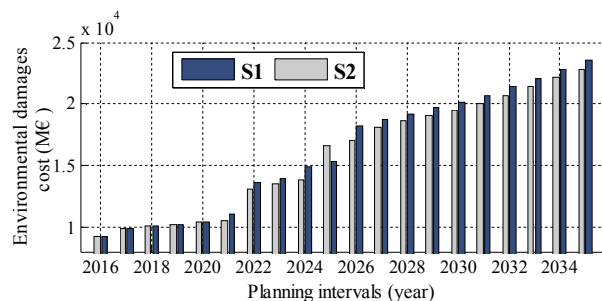


شکل ۴: تغییرات شاخص قیمت مجازی در مقایسه با قیمت بازار



شکل ۵: میزان کاهش مازاد رفاه در نتیجه اجرای طرح حق تعرفه

اجرای طرح تعهد در سهم یا مالیات بر کربن، تهدیدی برای مازاد رفاه مصرف‌کنندگان محسوب نمی‌شود؛ چراکه هزینه‌های اضافی به بار آمده تحت این طرح‌ها بر عهده نهاد تولیدکننده می‌باشد. متناظر با هر یک از سناریوهای برنامه‌ریزی، هزینه اجتماعی منتج‌شده از خسارات زیست‌محیطی به بارآمده از انتشار بخش تولید نیز در شکل ۶ نشان داده شده‌است. همانطور که از شکل مزبور ملاحظه می‌شود، تحت اجرای طرح‌های زیست‌محیطی محور، خسارات زیست‌محیطی وارده از سوی بخش تولید کاهش داشته‌است. برای درک بهتر این موضوع و اینکه طرح‌های مورد نظر چگونه بر رفاه اجتماعی اثرگذارند، مقادیر ارزش فعلی هر یک از ترم‌های مازاد رفاه مصرف‌کنندگان، هزینه خسارات زیست‌محیطی، سود شرکت تولیدی، و مجموع این ترم‌های بعنوان رفاه اجتماعی در جدول ۲ آورده شده‌است. با توجه به مقادیر ارزش فعلی موجود در جدول ۲ می‌توان دید که علی‌رغم کاهش سود سرمایه‌گذار در بخش تولید و همچنین مازاد رفاه مصرف‌کنندگان در نتیجه اجرای طرح‌های تشویقی، رفاه اجتماعی، یعنی مجموع هر سه ترم سود سرمایه‌گذار، مازاد رفاه، و ارزش خسارت زیست‌محیطی (ترم منفی)، بهبود یافته‌است؛ چراکه میزان کاهش بدست‌آمده در خسارات زیست‌محیطی که عمده‌تأثیربران‌ناپذیرند، بسیار بیشتر از کاهش سود سرمایه‌گذار بخش تولید و مازاد رفاه مصرف‌کنندگان است.



شکل ۶: مقایسه خسارات زیست‌محیطی برآوردشده طی سناریوهای S1-S2