

# ارزیابی اثرات منابع انرژی تجدیدپذیر در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه تولید از دیدگاه رفاه اجتماعی

هادی صادقی، مسعود رشیدی‌نژاد و امیر عبدالهی

نیز اقتدار و شایستگی ملی به دنبال داشته باشد که از این حیث به عنوان یکی از مسایل مهم و استراتژیک لازم‌الاجرا در راهبردهای کلان برنامه‌ریزی اقتصادی و سیاست‌های انرژی تلقی می‌شود [۱]. بدین ترتیب می‌توان تدوین طرح‌های مختلف سرمایه‌گذاری در راستای انجام برنامه‌ریزی‌های بهینه را به موازات تحولات روز صنعت برق در زمره فعالیت‌هایی دانست که مسئولان برای تحقق مواردی چون حفظ پیوستگی در عرضه تقاضا، ایجاد قابلیت اعتماد کافی برای مصرف‌کنندگان، دستیابی به سطح کیفی قابل قبول، پایین نگه‌داشتن قیمت انرژی، و غیره، لازم است در دستور کار خود قرار دهند. برنامه‌ریزی توسعه انتقال و برنامه‌ریزی توسعه تولید، اهم مباحث برنامه‌ریزی بلندمدت را در سیستم‌های قدرت شامل می‌شوند که در محیط تجدید ساختار یافته صنعت برق، هر یک به صورت جداگانه توسط نهاد مربوط مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این بین، هزینه‌های هنگفت سرمایه‌گذاری، پارامترهای نامعین ورودی بسیار در برنامه‌ریزی و انعطاف‌پذیری بخش تولید (امکان اعمال تغییرات و پیاده‌سازی برنامه‌های مختلف مانند برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا یا برنامه‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی)، توجه به برنامه‌ریزی توسعه تولید را بیش از پیش نموده است.

در کنار آنچه که از اهمیت برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت و به دنبال آن از اهمیت برنامه‌ریزی توسعه تولید در بالا به آن اشاره شد، امروزه تغییرات شرایط آب و هوایی و آلودگی‌های زیست‌محیطی به بار آمده از آلاینده‌های انتشار یافته از بخش تولید، توانسته است با تهدید رفاه و حتی حیات بشر بر روی کره زمین، به اهمیت هرچه بیشتر بحث برنامه‌ریزی توسعه تولید بیانجامد. به بیانی کامل‌تر، معضلات به وجود آمده از انتشار گازهای گل‌خانه‌ای از جمله CO<sub>2</sub> و در پی آن گرمایش جهانی زمین و خسارات زیست‌محیطی، امروزه تا جایی پیش رفته است که بازنگری در مقررات، تدوین طرح‌ها و اعمال محدودیت به بخش‌های چون بخش حمل و نقل 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 داشته است. نتیجه این هم‌اندیشی در بخش حمل و نقل به ظهور خودروهای برقی و در بخش تولید انرژی الکتریکی به تدوین طرح‌هایی انجامید که امروزه با عنوان سیاست‌های انرژی یا سیاست‌های تشویقی در راستای ترویج واحدهای تولیدی مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر و همچنین کاهش آلاینده‌های انتشار یافته از بخش تولید در حال اجرا می‌باشند. توضیحات بیشتر در مورد این سیاست‌ها در بخش بعد ارائه خواهد شد.

همان طور که در مطالعات متعدد [۲] تا [۴] اشاره شده است، سیاست‌های انرژی با اجرای برنامه‌های مختلفی چون پرداخت کمک‌هزینه‌های مالی به واحدهای تولیدی تجدیدپذیر به ازای هر واحد انرژی تولیدی (الکتریسیته سبز)، اعمال محدودیت بر میزان آلاینده‌های انتشار یافته از بخش تولید در طول سال، و یا دریافت مالیات از بخش تولید

چکیده: امروزه بر همگان مبرهن است که تغییرات شرایط آب و هوایی تهدیدی جدی برای رفاه بشر بر روی کره زمین تلقی می‌شود، از این رو رشد روزافزون تقاضا برای انرژی الکتریکی و وابستگی بخش تولید به منابع سوخت‌های فسیلی، این بخش را به یکی از مهم‌ترین حوزه‌ها برای اعمال محدودیت‌ها و پیاده‌سازی راهکارها در راستای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مبدل نموده است. از جمله این راهکارها، تدوین طرح‌هایی تحت عنوان سیاست‌های تشویقی است که ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر و اعمال محدودیت بر انتشار بخش تولید را دنبال می‌کنند. در مقاله پیش رو با تکیه بر مفهوم تابع رفاه اجتماعی برگسون-سامونلسون، اثر افزایش درصد نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر تحت اجرای سیاست‌های تشویقی در برنامه‌ریزی بلندمدت توسعه تولید از دیدگاه‌های مختلفی چون مسایل زیست‌محیطی، رفاه سرمایه‌گذاران بخش تولید و رفاه مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور ابتدا با در نظر داشتن اثر یکی از رایج‌ترین سیاست‌ها تحت عنوان سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد، یک مدل جامع برای برنامه‌ریزی توسعه تولید از دید یک شرکت تولیدی ارائه می‌گردد. مدل مزبور در قالب یک مسأله غیر خطی آمیخته با اعداد صحیح با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز، طی دو سناریو حل می‌گردد. سپس با توجه به استراتژی‌های بهینه به دست آمده برای توسعه، به بررسی دیدگاه‌های مطرح شده پرداخته خواهد شد.

**کلیدواژه:** برنامه‌ریزی توسعه تولید، برنامه‌ریزی غیر خطی آمیخته با اعداد صحیح، رفاه اجتماعی، منابع تجدیدپذیر.

## ۱- مقدمه

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

برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت می‌تواند علاوه بر نقش مؤثر و تعیین‌کننده اقتصادی، اثرات قابل توجهی در ارتقای سطح رفاه اجتماعی و

این مقاله در تاریخ ۲۶ تیر ماه ۱۳۹۳ دریافت و در تاریخ ۱۹ اسفند ماه ۱۳۹۳ بازنگری شد.

هادی صادقی، عضو انجمن پژوهشگران دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، (email: hd.sadeghi65@yahoo.com).

مسعود رشیدی‌نژاد، دانشکده برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، (email: mrashidi@uk.ac.ir).

امیر عبدالهی، دانشکده برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، (email: a.abdollahi@uk.ac.ir).

اعم از سیاست‌های مربوط به کاهش آلاینده‌های انتشار یافته از بخش تولید و سیاست‌های مربوط به ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر (که در بخش بعد معرفی خواهند شد)، [۱۱] به شرح موانع موجود در اجرای سیاست‌ها و نقایص آنها از جمله تأثیر منفی بار مالی ناشی از اجرای سیاست‌ها بر برخی اقسام جامعه، ریسک‌های مربوط به تشویق غیر بهینه متأثر از پرداخت کمک‌هزینه‌های بیش از حد به بخش خصوصی و غیره می‌پردازد. در چهارچوبی نه چندان متفاوت، مزایا و معایب به بار آمده از ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر در [۱۲] و [۱۳] نیز بررسی شده است. در [۱۲] مداخله کافی سیاست‌های تشویقی در برنامه‌ریزی توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان یک ضرورت معرفی می‌شود. در این مطالعه که برنامه‌ریزی توسعه از دید یک شرکت تولیدی در محیط تجدید ساختاریافته صنعت برق انجام می‌شود، اثربخشی سیاست‌های تشویقی بر ترویج واحدهای مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر، خصوصاً واحدهای بادی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تحلیل‌های اقتصادی در این پژوهش حاکی از عدم تمایل سرمایه‌گذاران یا شرکت‌های تولیدی در شرایط عادی برای تخصیص بودجه به منابع انرژی تجدیدپذیر، متأثر از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه هنگفت و نرخ تولید پایین این منابع می‌باشد.

از دیدگاهی متفاوت در قالب برنامه‌ریزی توسعه تولید، [۱۴] جنبه سازگاری برخی از سیاست‌های تشویقی با شرایط بازار در محیط تجدید ساختار را مورد بررسی قرار می‌دهد و به لزوم هم‌زمانی اجرای برخی از سیاست‌ها، از جمله سیاست‌های حق انتشار و تعهد در سهم که در بخش بعد معرفی خواهند شد، در کنار یکدیگر اشاره می‌کند. روش‌های مؤثر در طراحی بهینه سیاست‌های تشویقی برای ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر طی برنامه‌ریزی بلندمدت توسعه تولید نیز در [۱۵] مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این پژوهش، مکانیزم حمایت از واحدهای تولیدی مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر به صورت پویا به نحوی تعیین می‌شود که در کل دوره برنامه‌ریزی، میزان کمک‌هزینه‌های تخصیص یافته از یک حد مشخص (مجموع هزینه تولید و حاشیه سود) بیشتر نگردد.

با توجه به ساختار سنتی صنعت برق نیز مطالعات عدیده‌ای در زمینه برنامه‌ریزی توسعه تولید با توجه به مسایل زیست‌محیطی و بحث تغییرات شرایط آب و هوایی انجام شده است. در قالب یک مسأله برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای چندهدفه، [۱۶] با در نظر داشتن اثر منابع انرژی تجدیدپذیر، برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا، و شاخص‌های قابلیت اطمینان، مدلی جامع با هدف کمینه‌سازی ریسک مربوط به قیمت سوخت‌های فسیلی در سرمایه‌گذاری، سایر هزینه‌های مربوط به توسعه و بهره‌برداری و مهم‌تر از همه، میزان انتشار ترکیب تولید در قالب یک مسأله خطی آمیخته با اعداد صحیح را در محیط سنتی صنعت برق ارائه می‌کند. این مطالعه در واقع، مؤثر بودن استراتژی‌های دیگر مانند برنامه‌های سمت تقاضا یا بهینه‌سازی انرژی در کاهش آلاینده‌های انتشار یافته از بخش تولید را نشان می‌دهد. چگونگی تغییر دیدگاه‌ها و راهکارهای کنترل و محدودسازی انتشار بخش تولید در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه تولید متأثر از تغییر و تحولات صنعت برق نیز در [۱۷] مرور شده است.

در مقاله پیش رو با ارائه مدلی جامع و مناسب برای برنامه‌ریزی توسعه تولید از دید یک شرکت تولیدی، به ارزیابی اثر ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر تحت اجرای یکی از رایج‌ترین سیاست‌های تشویقی (سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد) بر رفاه اجتماعی پرداخته می‌شود؛ مادامی که ترم‌های مختلفی چون هزینه معادل با خسارات زیست‌محیطی به بار آمده از آلاینده‌های بخش تولید، سود سرمایه‌گذار در بخش تولید و مازاد رفاه مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی به عنوان ترم‌های رفاه اجتماعی در

به ازای انتشار هر تن آلاینده، می‌توانند در ترویج سرمایه‌گذاری بر روی واحدهای تجدیدپذیر یا کاهش انتشار بخش تولید در درازمدت مثمر ثمر واقع شوند. با این وجود، ارزیابی اقتصادی این سیاست‌ها از یک دیدگاه جامع مانند رفاه اجتماعی در برنامه‌ریزی بلندمدت توسعه تولید، مبحثی است که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به بیانی کامل‌تر، این که سیاست‌های انرژی چگونگی و به چه میزان بر رفاه مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی، خسارت‌های زیست‌محیطی به بار آمده از فرایند تولید انرژی، سود سرمایه‌گذاران بخش تولید، و به طور کلی بر رفاه کل اجتماع اثر می‌گذارد، موضوعی است که در میان مطالعات عدیده انجام شده در بحث برنامه‌ریزی توسعه تولید، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو در مقاله حاضر سعی در آشکارسازی هرچه بیشتر این موضوع شده است. در ادامه به پاره‌ای از مطالعات انجام شده اشاره می‌شود.

برنامه‌ریزی توسعه تولید با اهداف مختلف با و بدون در نظر گرفتن مسایل زیست‌محیطی و محدودیت انتشار، تا کنون در پژوهش‌های متعدد بررسی شده است. در این راستا برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر گرفتن اثر معروف‌ترین سیاست‌های تشویقی بر طیف وسیعی از واحدهای تولیدی مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر طی یک افق بلندمدت در [۵] مدل‌سازی شده است. در این مطالعه، برنامه‌ریزی از دید یک شرکت تولیدی در محیط تجدید ساختاریافته صنعت برق، صرف نظر از اثر سایر بازیگران بازار بر استراتژی‌های توسعه، انجام شده و نتایج حاصل حاکی از اثربخشی سیاست‌های تشویقی در تحقق اقتصاد سبز (اقتصاد مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر) است. مرجع [۶] با در نظر گرفتن یک محیط نیمه‌رقابتی، به ارزیابی رفتار تولیدکنندگان مستقل برق در تأمین بار شبکه در دوره‌های مختلف پرباری یا ساعات تراکم، کم‌باری، و بار پایه در برابر نهادهای دولتی و مسئول در برابر تأمین تقاضا می‌پردازد. در این مطالعه اثر محدودیت‌های زیست‌محیطی در قالب قید محدودیت انتشار به مدل برنامه‌ریزی توسعه اضافه می‌شود و با تخصیص دو مقدار مختلف به کل انتشار مجاز، اثر محدودیت انتشار آلاینده‌های جوی بر تصمیمات توسعه سرمایه‌گذاران بررسی می‌شود. با تعریف مفهومی تحت عنوان "اقتصاد کم‌کربن"، [۷] مدلی جامع با در نظر داشتن سایر دیدگاه‌های مطرح در کاهش آلاینده‌های انتشار یافته از بخش تولید مانند سیاست‌های مالیات بر کربن و حق انتشار با قابلیت داد و ستد، قید محدودیت انتشار، جایگزینی سوخت‌هایی فسیلی با یکدیگر (گاز به جای زغال سنگ) در قالب قید نرخ ترکیب سوخت و ذخیره‌سازهای کربن را ارائه می‌کند. برنامه‌ریزی توسعه با شبیه‌سازی سایر شرکت‌کنندگان بازار در قالب چندین شرکت تولیدی در [۸] ارائه شده است. در این مطالعه نیز قیود مختلفی به منظور لحاظ نمودن مسایل زیست‌محیطی و رفاه اجتماعی در قالب قید محدودیت انتشار و قید نرخ ترکیب سوخت، با مدل برنامه‌ریزی توسعه تجمیع شده است.

در پاره‌ای از مطالعات، به دنبال افزایش محدودیت‌های زیست‌محیطی در کنار افزایش نگرانی‌های ناشی از آن در برابر آلاینده‌های انتشار یافته توسط بخش تولید، میزان انتشار ترکیب تولید نه در قالب یک قید بلکه در قالب یک ترم از تابع هدف در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه در نظر گرفته شده است [۹] و [۱۰]. در واقع در این مطالعات، میزان انتشار در کنار سایر هزینه‌های برنامه‌ریزی در تمام طول افق توسعه کمینه می‌شود که از این حیث، مدل‌های ارائه شده، مدل‌های برنامه‌ریزی چندهدفه نام گرفته‌اند.

از جمله دیگر مواردی که در پژوهش‌های مختلف انجام شده در زمینه برنامه‌ریزی توسعه تولید به آنها پرداخته شده است، چالش‌های مربوط به به کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر و راهکارهای ارائه شده برای رفع آنها می‌باشد. در این راستا ضمن معرفی سایر سیاست‌های تشویقی ارائه شده

آلاینده‌های انتشاریافته) در سیاست‌های تشویقی مد نظر باشد، این سیاست‌ها به دو دسته سیاست‌های مبتنی بر مقدار و سیاست‌های مبتنی بر قیمت تقسیم می‌شوند [۳]. بر این اساس، سیاست‌های حق تعرفه، طرح مناقصه و مالیات بر کربن جزء سیاست‌های مبتنی بر قیمت و سیاست تعهد در سهم و حق انتشار با قابلیت داد و ستد جزء سیاست‌های مبتنی بر مقدار می‌باشند.

تقسیم‌بندی دیگری که برای سیاست‌های انرژی می‌توان در نظر گرفت تقسیم‌بندی مبتنی بر محوریت اصلی دنبال‌شده در آنها می‌باشد. به بیانی کامل‌تر، علی‌رغم آن که عموماً تمامی سیاست‌های انرژی به عنوان طرح‌های تدوین‌یافته برای حمایت از ترویج واحدهای تجدیدپذیر شناخته شده‌اند، با دقت در فرایند اجرایی آنها مشاهده می‌شود که بعضی از این سیاست‌ها نه بر ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر، بلکه بر کاهش انتشار بخش تولید تأثیر مستقیم داشته و ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان یک اثر ثانویه از اجرای آنها مشتق می‌شود. با توجه به مطالب فوق، سیاست‌های حق تعرفه، طرح مناقصه و سیاست تعهد در سهم در زمره سیاست‌هایی قرار می‌گیرند که محوریت اصلی دنبال‌شده در آنها ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر بوده و تأثیر مستقیم بر این موضوع دارند، حال آن که سیاست‌های مالیات بر کربن و یا حق انتشار با قابلیت داد و ستد که با محدودکردن انتشار آلاینده‌ها از بخش تولید به طور غیر مستقیم باعث سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر می‌شوند، در دسته دیگر قرار می‌گیرند. در اینجا به دلیل گستردگی بحث از شرح نحوه عملکرد هر یک از سیاست‌های معرفی‌شده اجتناب و تنها به بیان فرایند اجرایی سیاست در نظر گرفته‌شده در برنامه‌ریزی توسعه، یعنی سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد اکتفا می‌شود.

## ۲-۱ سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد

همان‌طور که اشاره شد، بخش اعظم سیاست‌های تشویقی اثر مستقیم بر ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر داشته و کاهش انتشار بخش تولید توسط آنها به عنوان یک اثر ثانویه شناخته می‌شود. حال آن که در دهه‌های اخیر، اهمیت بحث تغییرات شرایط آب و هوایی و لذا ضرورت تضمین در کنترل انتشار بخش تولید باعث شکل‌گیری سیاست‌هایی شده است که در آنها کاهش انتشار بخش تولید به عنوان هدف اصلی تعریف شده و سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان یک اثر ثانویه، به صورت غیر مستقیم از آنها ناشی می‌شود. از جمله این سیاست‌ها، سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد می‌باشد که در ادامه به ساز و کار آن اشاره می‌شود.

بنا به تعریف ارائه‌شده در [۱۸]، سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد عبارتست از اعمال یک حد انتشار مجاز با قابلیت خرید و فروش بر هر یک از شرکت‌های تولیدی، متناسب با میزان تولید و مشارکت آنها در تأمین تقاضا به طوری که مجموع انتشار کل شرکت‌ها از یک حد مشخص کمتر باشد. بدین ترتیب متناسب با میزان توان تولیدی، یک حد مجاز به صورت تعداد معینی حق انتشار (با واحد تن) بر میزان انتشار هر شرکت تولیدی مقرر می‌گردد. طول دوره زمانی در نظر گرفته شده برای میزان انتشار مجاز، برابر با یک سال می‌باشد؛ به بیان دیگر، هر شرکت تولیدی باید در طول یک سال، انتشاری کمتر یا برابر با حد مجاز خود داشته باشد. حال حق انتشار مشخص‌شده می‌تواند توسط نهاد یا شرکتی که کمتر از حد مجاز خود آلودگی تولید کرده است، به نهادی که میزان انتشارش در طول دوره مقرر از حد مجاز تخطی داشته است فروخته شود. بدین ترتیب مادامی که کل انتشار بخش تولید بر حسب تن بر سال با

نظر گرفته شده و با استفاده از مفهوم تابع رفاه اجتماعی برگسون-ساموئلسون مدل‌سازی می‌شوند. بدین منظور ابتدا مدل ارائه‌شده برای برنامه‌ریزی توسعه تولید در قالب یک مسأله غیر خطی آمیخته با اعداد صحیح (MINLP) در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز<sup>۱</sup> پیاده‌سازی و با استفاده از بهینه‌ساز BARON حل می‌گردد. برنامه‌ریزی در طول یک افق ۲۰ساله از دید یک شرکت تولیدی که امکان سرمایه‌گذاری بر روی فناوری‌های مختلف تولیدی، اعم از متعارف و تجدیدپذیر را داراست طی دو سناریو صورت می‌پذیرد. سپس با توجه به استراتژی‌های بهینه به دست آمده برای توسعه ظرفیت تولید شرکت تولیدی مورد نظر، هر یک از ترم‌های در نظر گرفته شده برای تابع رفاه اجتماعی محاسبه و اثر ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر تحت سیاست مربوط بر هر یک از آنها ارزیابی می‌گردد. بدیهی است با در نظر گرفتن سایر ترم‌های مورد نظر به صورت یک جا می‌توان به چگونگی تغییرات رفاه اجتماعی طی سناریوهای برنامه‌ریزی توسعه پی برد که برای دستیابی به این مهم از تابع رفاه اجتماعی برگسون-ساموئلسون استفاده شده است. در انتها نیز به منظور شفاف‌سازی هرچه بیشتر تأثیر سیاست مورد نظر بر تغییرات تابع رفاه اجتماعی، یک آنالیز حساسیت با اتخاذ قیمت‌های مختلف برای حق انتشارها در سال‌های مختلف برنامه‌ریزی صورت می‌گیرد.

به منظور پوشش کامل مطالب، بخش‌های بعدی مقاله بدین ترتیب در نظر گرفته می‌شوند: در بخش دوم ضمن معرفی سایر سیاست‌های تشویقی که امروزه در کشورهای مختلف در حال اجرا می‌باشند، تأثیر افزایش درصد نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر تحت این سیاست‌ها از دیدگاه مسایل زیست‌محیطی، سرمایه‌گذاران بخش تولید و مصرف‌کنندگان انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش سوم به معرفی تابع رفاه اجتماعی برگسون-ساموئلسون و مدل‌سازی ترم‌های آن در کنار مدل‌سازی برنامه‌ریزی توسعه تولید تحت سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد اختصاص می‌یابد. نتایج به دست آمده از حل مدل ارائه‌شده برای برنامه‌ریزی توسعه تولید همراه با تحلیل نتایج در بخش چهارم گردآوری می‌شود و در نهایت نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها در بخش پنجم مقاله آورده می‌شود.

## ۲- سیاست‌های تشویقی و اثرات ناشی از افزایش درصد نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر

در این بخش با اشاره به فرایند اجرایی برخی از رایج‌ترین طرح‌هایی که امروزه در کشورهای مختلف در راستای ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر و کاهش آلاینده‌های انتشاریافته از بخش تولید انرژی الکتریکی به کار بسته شده‌اند، اثرات آنها بر سایر ترم‌های در نظر گرفته شده در رفاه اجتماعی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

حق تعرفه<sup>۲</sup>، طرح مناقصه<sup>۳</sup>، تعهد در سهم با قابلیت داد و ستد<sup>۴</sup>، گواهی‌های سبز<sup>۵</sup>، مالیات بر کربن<sup>۶</sup> و حق انتشار با قابلیت داد و ستد<sup>۷</sup>، عناوین رایج‌ترین سیاست‌های اعمال‌شده به بخش تولید را شامل می‌شوند. بسته به این که "مقدار" یا "قیمت" (الکتریسیته سبز یا

1. GAMS
2. Feed-in-Tariff
3. Auction Scheme
4. Quota Obligation with Tradable Green Certificate
5. Carbon Tax
6. Emission Trading System

کاهش رفاه تولیدکننده را در نتیجه مواردی چون کاهش سطح تولید، پرداخت مالیات، یا سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر به دنبال داشته باشد. بدین ترتیب با توجه به مکانیزم سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد، تبعیت شرکت تولیدی از سقف انتشار مجاز و در نتیجه آن خرید حق انتشار یا سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر (علی‌رغم امکان فروش حق انتشارهای اضافی) ممکن است باعث کاهش سود شرکت تولیدی (به عنوان ترمی از تابع رفاه اجتماعی) و لذا کاهش رفاه اجتماعی گردد. در مقاله حاضر به ارزیابی این موضوع نیز پرداخته خواهد شد.

### ۳- مدل‌سازی مسأله

در این بخش ضمن ارائه تعریف تابع رفاه اجتماعی برگسون-ساموئلسون و مدل‌سازی ترم‌های در نظر گرفته شده برای آن در چهارچوب مورد نظر، به مدل‌سازی مسأله برنامه‌ریزی توسعه تولید تحت سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد پرداخته می‌شود.

#### ۳-۱ تابع رفاه اجتماعی برگسون-ساموئلسون

مبدأ موضوعی بحث تابع رفاه اجتماعی، مسأله نحوه قضاوت در مورد سطح رفاه و مطلوبیت کلی در سطح جامعه است که این بحث پیشینه‌ای اقتصادی دارد. در علم اقتصاد، رضایتمندی، لذت درونی یا احساس خرسندی از مصرف یا تولید یک کالا یا استفاده از یک خدمت به عنوان مطلوبیت شناخته می‌شود. با توجه به مفهوم مطلوبیت، تفاوت میان مطلوبیت کل یک کالا (مجموع مطلوبیت‌های به دست آمده از مصرف هر واحد کالا) و ارزش کل بازاری آن نیز (حاصل ضرب قیمت هر واحد کالا در تعداد کل واحدها) به عنوان اضافه رفاه یا مازاد رفاه مصرف‌کننده از آن نام برده می‌شود [۱۹]. اما آنچه که امروزه تحت عنوان تابع رفاه اجتماعی در زمینه‌های مختلف اقتصادی، صنعتی و غیره شناخته می‌شود، ضابطه‌ای است که به وسیله آن می‌توان مطلوبیت تمام افرادی یا نهادهایی که در یک جامعه قرار دارند را در قالب یک ترجیح مشترک یا ترجیح اجتماعی با یکدیگر جمع یا ترکیب نمود. یکی از معروف‌ترین و در عین حال ساده‌ترین ضوابط ارائه‌شده برای رفاه اجتماعی، تابع رفاه اجتماعی برگسون-ساموئلسون است که در این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در تابع مطلوبیت یا رفاه اجتماعی برگسون-ساموئلسون که توسط اقتصاددانانی با همین نام در سال ۱۹۳۸ ارائه شد، رفاه اجتماعی به عنوان تابعی از مطلوبیت تک‌تک افراد جامعه به صورت (۱) تعریف می‌شود [۲۰]

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

که در آن  $\lambda_j$  تابع مطلوبیت نهاد  $z$  ام و  $\tau_j$  کالا، خدمت، فعالیت یا تأثیر به بار آمده از نهاد  $z$  ام در جامعه می‌باشد. مطلوبیت نیز معیار رضایتمندی تعریف می‌شود که نهاد  $z$  با مصرف، تولید، دریافت خدمت یا در ازای ارائه خدمت به دنبال آن است. با گذشت زمان، تابع رفاه اجتماعی تحت تأثیر پیشرفت‌هایی اقتصادی تکامل یافت، به گونه‌ای که با تفکیک (دسته‌بندی) نهادهای مختلف در یک جامعه مانند تولیدکننده و مصرف‌کننده در بازار که هر یک منفی با واحد یکسان را دنبال می‌کنند، پردازش و ارزیابی‌های اقتصادی با استفاده از تابع رفاه اجتماعی، جامه عمل به خود گرفت. شایان ذکر است که در تابع رفاه برگسون-ساموئلسون، مطلوبیت تک‌تک نهادها به صورت خطی با یکدیگر جمع می‌شود.

تعداد کل حق انتشارهای تخصیص‌یافته به شرکت‌های مختلف برابر باشد می‌توان گفت انتشار بخش تولید در یک مرز معین کنترل شده است. از طرفی، انگیزه برای فروش حق انتشار می‌تواند باعث ترغیب شرکت‌های تولیدی در ترویج منابع تجدیدپذیر گردد، چرا که افزایش درصد نفوذ واحدهای تجدیدپذیر در ترکیب تولید به معنای تولید توان و شرکت در بازار بدون نیاز به حق انتشار خواهد بود. لذا شرکت تولیدی می‌تواند بسته به درصد به کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر، مقداری از حق انتشارهای خود را در همان سال یا در طی سال‌های بعدی به فروش برساند. شایان ذکر است که در این سیاست، میزان انتشار مجاز تعیین شده برای هر شرکت تولیدی دارای شیب کاهشی بوده و حق انتشارها هر ساله کمتر می‌شود. صرف نظر از دیدگاه زیست‌محیطی و آب و هوایی که از آن نظر اثربخشی سیاست‌های تشویقی محرز است، برای تفهیم بهتر این که سیاست‌های تشویقی چگونه بر عاملان عرصه انرژی، اعم از تولیدکننده و مصرف‌کننده، اثر می‌گذارند لازم است دسته‌بندی دیگری برای این سیاست‌ها در نظر گرفته شود. در ادامه به این موضوع پرداخته می‌شود.

#### ۲-۲ اثرات منابع انرژی تجدیدپذیر و سیاست‌های

#### تشویقی از دیدگاه مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان عرصه انرژی

با توجه به طبیعت اجتناب‌ناپذیر مصرف انرژی الکتریکی، بر همگان مبرهن است که منابع انرژی تجدیدپذیر اصلی‌ترین راهکار برای مقابله با آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی و مهم‌تر از آن، مقابله با تغییرات شرایط آب و هوایی می‌باشند. در این میان، آنچه که تا کنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است، در نظر داشتن نهادی است که بار مالی مشتق‌شده از اجرای سیاست‌های تشویقی را متحمل می‌شود. بر این اساس می‌توان سیاست‌های تشویقی را در دو گروه جای داد: گروه اول سیاست‌هایی هستند که در آنها سایر هزینه‌های به بار آمده از تولید مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر یا کنترل انتشار بخش تولید بر عهده نهاد مصرف‌کننده گذارده می‌شود (مانند سیاست حق تعرفه یا طرح مناقصه) و گروه دوم مربوط به سیاست‌هایی است که در آنها نهاد تولیدکننده متحمل هزینه‌های مزبور می‌گردد. به عنوان مثال در سیاستی مانند سیاست حق تعرفه [۱۲] که در آن واحدهای مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر به صورت بلندمدت تحت تشویق‌های مالی قرار می‌گیرند، در مقابل کاهش ریسک سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر برای شرکت‌های تولیدی، مازاد رفاه مصرف‌کننده کاهش خواهد یافت [۱۹]، مادامی که بار مالی مربوط به تشویق‌های مزبور در این سیاست بر عهده نهاد مصرف‌کننده گذارده شود. به بیانی کامل‌تر در وضعیتی که هزینه‌های به بار آمده از ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر در نتیجه اجرای سیاست‌های تشویقی متوجه مصرف‌کننده باشد، هزینه تمام‌شده به ازای هر واحد انرژی در این حالت برای مصرف‌کننده بیشتر از حالتی خواهد بود که در آن هزینه‌های مربوط به گسترش منابع انرژی تجدیدپذیر بر نهاد مصرف‌کننده بارگذاری نمی‌گردد. این افزایش هزینه تمام‌شده برای هر واحد انرژی، کاهش مازاد رفاه مصرف‌کننده را به دنبال دارد و چنین وضعیتی می‌تواند در مورد رفاه شرکت‌های تولیدی نیز تحت اجرای بعضی از دیگر سیاست‌های تشویقی رخ دهد، چرا که مکانیزم بعضی از سیاست‌های تشویقی به گونه‌ای است که در آنها هزینه‌های مربوط به تشویق واحدهای تجدیدپذیر یا کاهش انتشار بخش تولید متوجه شرکت‌های تولیدی است. به عنوان مثال، چنانچه سرمایه‌گذاری و ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر ناشی از اعمال محدودیت انتشار باشد، می‌تواند

دانست که اجتماع، ناشی از خسارات زیست‌محیطی و آب و هوایی مربوط به تولید انرژی متحمل می‌شود. این هزینه، هزینه اجتماعی کربن نامیده شده و طبق تعریف ارائه‌شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا عبارتست از ارزش فعلی هزینه معادل با خسارت‌هایی که هر تن انتشار  $CO_2$  (به عنوان اصلی‌ترین گاز گلخانه‌ای) در درازمدت به محیط زیست و جامعه وارد می‌کند. بنابراین می‌توان گفت هزینه اجتماعی کربن، هزینه‌ای است که از اثرات مخرب و سوء به بار آمده از انتشار آلاینده‌های گازی بر محصولات کشاورزی، اکوسیستم، مواد، سلامت انسان‌ها و غیره ناشی می‌شود. این شاخص حاصل تجزیه و تحلیل‌های پیچیده‌ای است که در مطالعات مربوط به اثرات زیست‌محیطی و آب و هوایی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی انجام گرفته است. اطلاعات جغرافیایی، اطلاعات فیزیکی، اطلاعات آزمایشگاهی، شاخص‌های اجتماعی مانند میزان نگرانی مردم، جمعیت و پارامترهای آماری مربوط به سایر بخش‌های جامعه از جمله مواردی هستند که در محاسبه شاخص مزبور در نظر گرفته می‌شوند [۲۱]. از این حیث در مقاله حاضر تخمین خسارات وارده از سوی آلاینده‌های بخش تولید با به کارگیری شاخص هزینه اجتماعی کربن انجام می‌شود.

### ۳-۳ مدل‌سازی مسأله برنامه‌ریزی توسعه تولید

در این بخش، یک مدل جامع برای برنامه‌ریزی توسعه با در نظر داشتن مشارکت منابع انرژی تجدیدپذیر تحت سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد تشریح می‌شود. برنامه‌ریزی، طی یک افق زمانی ۲۰ساله از دید یک شرکت تولیدی انجام می‌شود که ضمن رعایت قیود مختلف به دنبال حداکثر ساختن سود حاصل از تصمیمات سرمایه‌گذاری است. در ادامه به مدل‌سازی تابع هدف و قیود مربوط پرداخته می‌شود.

#### ۳-۳-۱ تابع هدف

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

$$\max : \sum_{i=1}^{N^y} (1+r)^{-i} (U_{v_i}^G + U_{v_i}^G - U_{v_i}^G) \quad (4)$$

$$U_{v_i}^G = \sum_{i \in Z_i^{ex}} (\pi_i^m - v_{i,t}) \varepsilon_i^{ex} + \sum_{i \in Z_i^{new}} (\pi_i^m - v_{i,t}) \varepsilon_i^{new} \quad (5)$$

$$U_{v_i}^G = (ER_i^s - ER_i^b) \cdot \pi_i^{ER} \quad (6)$$

$$U_{v_i}^G = \sum_{i \in Z_i^{new}} I_{i,t} \cdot c_i \cdot n_{i,t} \quad (7)$$

در روابط فوق  $r$  نرخ بهره،  $i$  شاخص سال،  $\pi_i^m$  قیمت هر مگاوات ساعت انرژی در بازار متناظر با سال  $i$  ( $\$/MWh$ )،  $\varepsilon_i^{ex}$  و  $\varepsilon_i^{new}$  کل انرژی تولیدشده به ترتیب توسط واحدهای موجود و جدید اضافه‌شده ( $MWh$ )،  $t$  شاخص مربوط به نوع فناوری،  $v_{i,t}$  هزینه تولید هر واحد انرژی ( $\$/MWh$ )،  $ER_i^s$  و  $ER_i^b$  به ترتیب تعداد حق انتشارهای فروخته‌شده و خریداری‌شده در قیمت  $\pi_i^{ER}$  ( $\$/ton$ )،  $I_{i,t}$  هزینه سرمایه‌گذاری مربوط به فناوری نوع  $t$  ( $\$/MW$ )،  $c_i$  ظرفیت واحد

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

با توجه به تعریف ارائه‌شده از تابع رفاه اجتماعی برگسون-ساموئلسون و چهارچوب در نظر گرفته شده در این مقاله، سود شرکت تولیدی، مازاد رفاه مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی و خسارات زیست‌محیطی به بار آمده از انتشار آلاینده‌ها از بخش تولید به عنوان ترم‌های تابع رفاه در نظر گرفته می‌شوند. لذا با توجه به (۱) می‌توان این ترم‌ها را به صورت (۲) تعریف نمود

$$\begin{cases} \lambda_1(\tau_1) \triangleq Genco \text{ profit} \\ \lambda_2(\tau_2) \triangleq Consumer \text{ surplus} \\ \lambda_3(\tau_3) \triangleq Environmental \text{ damages} \end{cases} \quad (2)$$

که در آن  $\tau_1$  به صورت خدمت "فروش انرژی" تحت تابع مطلوبیت شرکت تولیدی یعنی  $\lambda_1$  تعریف می‌شود. مطلوبیت نیز به صورت سود حاصل از فروش انرژی با واحد (M€) در نظر گرفته می‌شود. به همین ترتیب  $\tau_2$  به صورت دریافت خدمت یعنی "مصرف انرژی" با تابع مطلوبیت  $\lambda_2$  برای نهاد مصرف‌کننده تعریف می‌شود که مطلوبیت او مازاد رفاه با واحد (M€) است.  $\tau_3$  نیز در قالب تأثیر به بار آمده از خدمت تولید انرژی به صورت "خسارت‌های زیست‌محیطی" با تابع مطلوبیت  $\lambda_3$  در نظر گرفته می‌شود. این ترم از جنس هزینه با واحد (M€) بوده و در آن مطلوبیت به صورت منفی تعریف می‌شود، یعنی هرچه میزان این ترم کمتر باشد، مطلوبیت بیشتر خواهد بود. بنابراین در تابع رفاه برگسون-ساموئلسون، رفاه اجتماعی را می‌توان حاصل تفاضل مجموع سود شرکت تولیدی و مازاد رفاه مصرف‌کننده با هزینه معادل با خسارت‌های زیست‌محیطی دانست. لذا (۲) به صورت (۳) قابل بازنویسی خواهد بود

$$SW = \frac{\sum_{i=1}^{N^y} [(U_{v_i}^G + U_{v_i}^G - U_{v_i}^G) + U_i^C - U_i^E]}{(1+r)^{i-1}} \quad (3)$$

که در آن  $U_{v_i}^G$  (M€) تابع سود شرکت تولیدی حاصل از فروش انرژی،  $U_{v_i}^G$  (M€) تابع سود شرکت تولیدی حاصل از سیاست تشویقی و  $U_{v_i}^G$  (M€) تابع مربوط به هزینه سرمایه‌گذاری‌های انجام‌شده توسط شرکت مورد نظر می‌باشد. لذا همان طور که مشاهده می‌شود، ترم اول تابع رفاه اجتماعی، خود مشتمل بر سه تابع به شرح فوق می‌باشد.  $U_i^C$  نیز تابع مطلوبیت مصرف‌کننده بر حسب (M€) و در نهایت  $U_i^E$  (M€) تابع مطلوبیت در نظر گرفته شده معادل با خسارت‌های زیست‌محیطی می‌باشد. از میان ترم‌های تابع رفاه، سود شرکت تولیدی حاصل از سرمایه‌گذاری در بخش تولید مستقیماً از شبیه‌سازی مسأله برنامه‌ریزی توسعه به دست می‌آید. سپس با توجه به ترکیب تولید بهینه شرکت تولیدی در هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی، میزان آلاینده‌های انتشار یافته تخمین و با استفاده از شاخصی تحت عنوان "هزینه اجتماعی کربن"، هزینه معادل با خسارات وارده محاسبه می‌شود. توضیحات بیشتر در مورد شاخص مزبور در ادامه همین بخش ارائه شده است. در مورد محاسبه دیگر ترم تابع رفاه یعنی مازاد رفاه مصرف‌کننده، لازم به ذکر است که در این مقاله به دلیل گستردگی بحث از ارائه روابط مربوط به نحوه محاسبه آن صرف نظر شده است و سایر توضیحات لازم در این باره در [۱۹] موجود می‌باشد.

### ۳-۲-۱ هزینه اجتماعی کربن

به طور کلی هزینه اجتماعی، معادل با ارزشی نهایی است که مصرف‌کننده برای هر واحد محصول یا خدمت پرداخت می‌کند. حال در بخش تولید انرژی می‌توان این هزینه را مجموع هزینه تولید با هزینه‌ای

در (۱۰)  $M_i^{\min}$  و  $M_i^{\max}$  نرخ ترکیب سوخت حداقل و حداکثر مربوط به واحد نوع  $t$  ام می‌باشد.

### ۳-۲-۳-۴ حداکثر ظرفیت قابل ساخت واحدها

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

$$\begin{cases} 0 \leq n_{i,t} \leq \bar{n}_i \\ 0 \leq \sum_i n_{i,t} \leq \bar{W}_i \end{cases} \quad (11)$$

در (۱۱)  $\bar{n}_i$  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 گرفته شده در ابتدای برنامه‌ریزی یعنی  $\bar{W}_i$  باشد.

### ۳-۲-۳-۵ قید محدودیت انتشار در سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد

همان‌طور که 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 سطح آن یا همان سقف مجاز انتشار، به طور سالانه کاهش می‌یابد. این محدودیت با استفاده از تعداد حق انتشارهایی مشخص می‌شود که هر ساله توسط نهاد تنظیم‌کننده یا دولت به شرکت تولیدی تخصیص داده می‌شود. هر حق انتشار معادل با انتشار یک تن آلاینده‌ی بوده و ترکیب تولید در پایان هر سال، پس از تأمین کل انرژی مورد تقاضا، باید میزان انتشاری (تن بر سال) معادل با تعداد کل حق انتشارهای تخصیص‌یافته داشته باشد. در صورتی که شرکت تولیدی با به کارگیری 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 و بالعکس، در صورتی که سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر یا تغییر ترکیب تولید (استفاده از واحدهای گازی با سطح آلودگی پایین)، نسبت به عدم رعایت سطح انتشار مجاز و 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 (۶) لحاظ شده است اما برای تکمیل مدل‌سازی سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد لازم است قید محدودیت انتشار نیز به صورت (۱۲) لحاظ گردد. این قید علاوه بر محدود کردن حداکثر تعداد حق انتشارهایی که شرکت تولیدی می‌تواند به فروش برساند، حداکثر سطح انتشار ترکیب تولید را نیز متناسب با حق انتشارهای اضافی خریداری‌شده، محدود می‌کند. مثبت بودن تعداد حق انتشارهای فروخته یا خریداری‌شده نیز با استفاده از قید نامساوی (۱۳) در نظر گرفته می‌شود

$$\sum_{t \in Z_i^{con,ex}} E_{i,t} + ER_i^s - ER_i^b = E_i^{cap} \quad (12)$$

نوع  $t$  (MW) و  $n_{i,t}$  تعداد واحدهای نوع  $t$  که در سال  $i$  به ترکیب تولید اضافه می‌شوند، می‌باشد.  $Z_i^{ex}$  و  $Z_i^{new}$  نیز به ترتیب مجموعه واحدهای موجود در حال بهره‌برداری و مجموعه واحدهای جدیدی را که از ابتدای سال  $i$  مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند نشان می‌دهند.

### ۳-۲-۳-۳ قید توسعه

به منظور تحقق هرچه بیشتر یک مدل کارآمد برای برنامه‌ریزی توسعه تولید در این بخش علاوه بر قیود فنی و اقتصادی مختلف، یک قید اضافی نیز در راستای اجرای سیاست حق انتشار ارائه می‌شود.

### ۳-۲-۳-۳-۱ قید تعادل انرژی

این قید، متناظر با هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی، نشان‌دهنده تعادل بین انرژی فروخته‌شده در قیمت بازار و کل انرژی تولیدی توسط مجموعه واحدهای موجود و جدید بوده و به صورت (۸) ارائه می‌شود که در آن  $E_i^T$  کل انرژی عرضه‌شده به بازار می‌باشد. لازم به ذکر است که در محیط تجدید ساختار، بحث پیش‌بینی و تأمین تقاضا مادامی که برنامه‌ریزی از دید یک شرکت تولیدی انجام می‌شود، مطرح نیست. این امر در واقع در زمره وظایف بهره‌بردار مستقل سیستم می‌باشد و از این حیث، پارامتر  $E_i^T$  نه یک مقدار ثابت، بلکه یک متغیر است

$$E_i^T = \sum_{t \in Z_i^{ex}} E_t^{ex} + \sum_{t \in Z_i^{new}} E_t^{new} \quad (8)$$

### ۳-۲-۳-۳-۲ قید بودجه

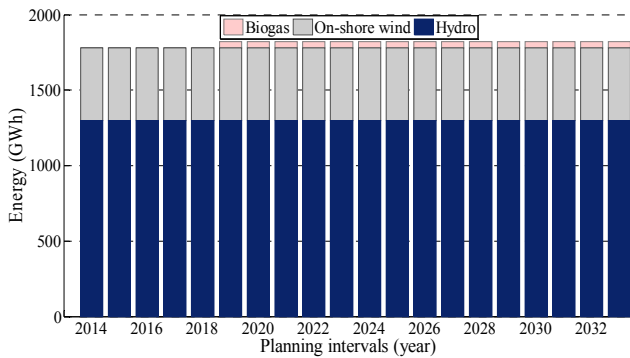
این قید حداکثر بودجه سرمایه‌گذاری شده توسط شرکت تولیدی مورد نظر را در طول افق برنامه‌ریزی محدود می‌کند. به عبارت دیگر با استفاده از روش ارزش فعلی، سرمایه‌گذاری‌های انجام‌شده در طول هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی با کل بودجه موجود تا آن سال مقایسه شده و انتخاب واحدهای جدید متناسب با آن بودجه صورت می‌گیرد. این قید به صورت (۹) در نظر گرفته می‌شود که در آن  $Im_{tot}^{bud}$  کل بودجه موجود در سال پایه (سال قبل از شروع برنامه‌ریزی) است

$$\sum_i \sum_{t \in Z_i^{new}} (1+r)^{-i} (I_{i,t}.C_t.n_{i,t}) \leq Im_{tot}^{bud} \quad (9)$$

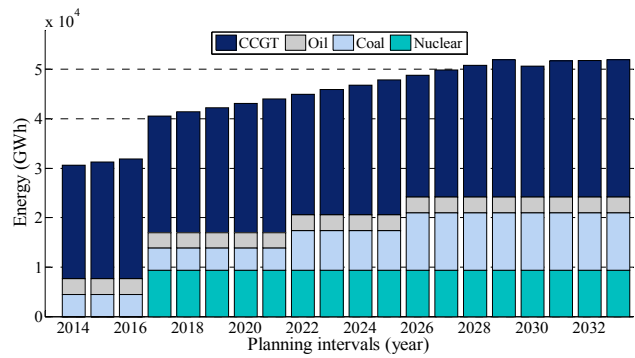
### ۳-۲-۳-۳-۳ قید نرخ ترکیب سوخت

در مسأله برنامه‌ریزی توسعه تولید انواع مختلف واحدهای تولیدی که از سوخت‌های مختلفی مانند نفت، گاز طبیعی، زغال‌سنگ و سوخت هسته‌ای استفاده می‌کنند وجود دارند. زمانی که ترکیب تولید مناسب نباشد، کوچک‌ترین حادثه پیش‌بینی نشده (مانند تحریم نفتی سال ۱۹۷۳ کشورهای عربی) هزینه‌های تولید انرژی الکتریکی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. با استفاده از قید نرخ ترکیب سوخت، نهاد برنامه‌ریز می‌تواند با در نظر گرفتن منابع سوخت در دسترس، ترکیب تولید سیستم را به گونه‌ای انتخاب کند که ریسک وابستگی به یک نوع سوخت کاهش یافته و اصل تنوع در سبد انرژی رعایت گردد. با توجه به توضیحات فوق قید نرخ ترکیب سوخت به صورت (۱۰) در مدل برنامه‌ریزی توسعه تولید در نظر گرفته می‌شود که واحدهای منتخب به همراه واحدهای موجود باید آن را برآورده کنند [۷]

$$M_i^{\min} \leq \frac{n_{i,t}.C_t}{\sum_{t \in (Z_i^{new} + Z_i^{ex})} n_{i,t}.C_t} \leq M_i^{\max} \quad (10)$$



شکل ۲: رفتار تولید انرژی مربوط به واحدهای تجدیدپذیر طی سناریوی اول.



شکل ۱: رفتار تولید انرژی مربوط به واحدهای متعارف طی سناریوی اول.

و (۹) به منظور انجام محاسبات با استفاده از روش ارزش فعلی، نرخ بهره برابر با ۵٪ برای یک افق ۲۰ ساله (از سال ۲۰۱۴ تا سال ۲۰۳۳) در نظر گرفته می‌شود. اطلاعات مورد نیاز مانند قیمت انرژی در بازار، اطلاعات مربوط به سیاست حق انتشار، هزینه تخمینی برای شاخص هزینه اجتماعی کربن و غیره از [۵]، [۱۸] و [۲۱] اتخاذ می‌شوند. کل ظرفیت تولید شرکت تولیدی در سال مینا حدود ۶۳۰۰ (MW) مشتمل بر واحدهای زغالی<sup>۱</sup>، سیکل ترکیبی (CCGT)، نفت خام<sup>۲</sup>، بادی<sup>۳</sup> و برق آبی<sup>۴</sup> برق آبی می‌باشد. مجموع ۸ نوع فناوری تولیدی مختلف اعم از واحدهای غیر تجدیدپذیر و تجدیدپذیر چون هسته‌ای<sup>۵</sup>، زیست‌توده<sup>۶</sup>، بیوگاز<sup>۷</sup>، ضایعات<sup>۸</sup> و غیره به عنوان واحدهای منتخب برای سرمایه‌گذاری در نظر گرفته می‌شوند. جداول ۱ و ۲ به ترتیب اطلاعات مربوط به ترکیب تولید سال پایه و واحدهای منتخب را نشان می‌دهند.

در ادامه، ابتدا نتایج حاصل از برنامه‌ریزی توسعه طی دو سناریو ارائه می‌شود، سناریوی اول برنامه‌ریزی توسعه تولید بدون در نظر داشتن سیاست تشویقی و سناریوی دوم برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر داشتن سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد است. سپس با توجه به نتایج به دست آمده از برنامه‌ریزی توسعه طی سناریوهای مزبور، ترم‌های تابع رفاه اجتماعی محاسبه شده و در نهایت تغییرات کلی رفاه اجتماعی متأثر از ترویج و توسعه منابع تجدیدپذیر و نیز تغییرات قیمت حق انتشار مورد بحث قرار می‌گیرد.

#### ۴-۱ نتایج حاصل از برنامه‌ریزی توسعه طی سناریوی اول

برای حذف اثر سیاست حق انتشار از مدل ارائه شده طی (۴) تا (۷)، قیمت حق انتشار  $\pi_i^{ER}$  در (۶) برابر صفر قرار داده می‌شود. بر این اساس، جدول ۳ نتایج به دست آمده از برنامه‌ریزی توسعه مینی بر تعداد و نوع واحدهای منتخب، همراه با سال ورود هر واحد به ترکیب تولید را نشان می‌دهد. شکل‌های ۱ و ۲ نیز به ترتیب، رفتار تولید انرژی مربوط به هر یک از انواع واحدها، اعم از واحدهای جدید و موجود را نشان می‌دهند. با توجه به جدول ۳، طی سناریوی اول برنامه‌ریزی، دو واحد زغالی،

جدول ۱: اطلاعات مربوط به ترکیب تولید سال پایه.

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

$$ER_i^s \geq 0 \quad (13)$$

$$ER_i^b \geq 0$$

در (۱۲)  $E_i^{cap}$  سقف انتشار مجاز بر حسب تن بر سال و  $E_{i,t}$  نیز کل میزان انتشار مجموعه واحدهای نوع  $t$  مبتنی بر سوخت‌های فسیلی در طول سال مربوط است. در این مقاله برای محاسبه میزان انتشار هر یک از انواع واحدهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، متناسب با میزان توان تولیدی مربوط از مدل چندجمله‌ای - نمایی انتشار به صورت (۱۴) استفاده می‌شود [۲۲]

$$E_{i,t} = \left[ \sum_{n_{i,t}} (\alpha_i + \beta_i \cdot P_{i,t} + \gamma_i \cdot P_{i,t}^2 + \mu_i \exp(\lambda_i P_{i,t})) \right] \cdot \bar{h}_i \quad (14)$$

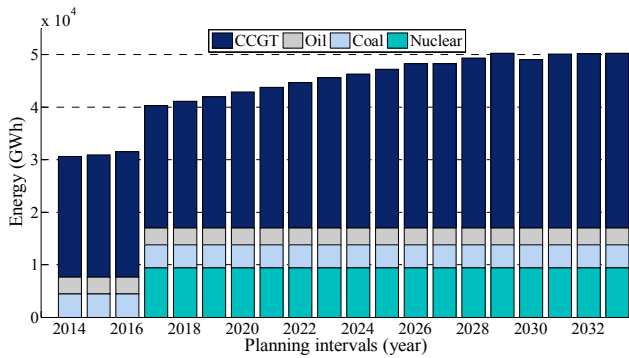
$$\forall t \in Z_i^{con,ex}$$

که در آن  $\alpha_i$ ،  $\beta_i$ ،  $\gamma_i$ ،  $\mu_i$  و  $\lambda_i$  ضرایب انتشار متناظر با هر یک از فناوری‌های مبتنی بر سوخت فسیلی و  $\bar{h}_i$  پارامتر «ساعات استفاده» در سال می‌باشد. این پارامتر بر اساس اطلاعات مربوط به حداقل ساعات کارکرد مطمئن هر یک از انواع واحدها در طی سال‌های گذشته تخمین زده می‌شود [۵]. به بیانی کامل‌تر در مقاله حاضر، عدم قطعیت مربوط به تولید هر یک از انواع واحدهای تولیدی، اعم از تجدیدپذیر و متعارف در قالب پارامتری به نام ساعات استفاده لحاظ شده است به طوری که طبق توضیحات ذکر شده، این پارامتر بر حسب اطلاعات مربوط به حداقل ساعات دسترس‌پذیری هر یک از انواع واحدها طی سال‌های گذشته (که شامل سایر اطلاعات مربوط به عدم قطعیت‌های واحدهای مبتنی بر منابع تجدیدپذیر و واحدهای متعارف، در کنار مسایل تعمیرات و نگهداری و نرخ خروج اجباری واحدهای متعارف می‌باشد) حداقل ساعات ممکن برای بهره‌برداری از یک واحد تولیدی را طی یک سال به دست می‌دهد.

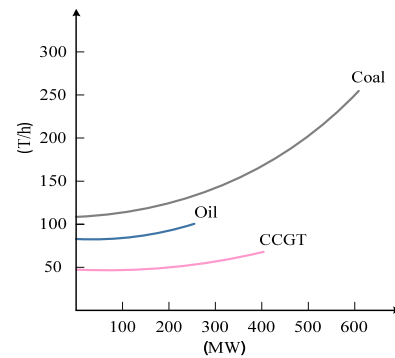
#### ۴-۲ شبیه‌سازی و ارائه نتایج

در این بخش به ارائه نتایج مربوط به برنامه‌ریزی توسعه تولید و ارزیابی اثرات آنها بر ترم‌های تابع رفاه اجتماعی پرداخته می‌شود و در این راستا برنامه‌ریزی توسعه تولید طی دو سناریو شبیه‌سازی می‌شود. با توجه به (۴)

1. Coal
2. Oil
3. On-Shore Wind
4. Hydro
5. Nuclear
6. Biomass
7. Biogas
8. Waste



شکل ۴: رفتار تولید انرژی مربوط به واحدهای متعارف طی سناریوی دوم.



شکل ۳: مدل انتشار هر یک از واحدهای مبتنی بر سوخت فسیلی [۲۲].

جدول ۲: مشخصات فنی و اقتصادی واحدهای منتخب [۵].

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

جدول ۴: نتایج برنامه‌ریزی توسعه تولید طی سناریوی اول.

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

جدول ۳: نتایج برنامه‌ریزی توسعه تولید طی سناریوی اول.

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

بر این اساس با در نظر گرفتن مدل‌های انتشار نشان داده شده در شکل ۳ برای هر یک از واحدهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، جدول ۴ نتایج برنامه‌ریزی را بر اساس تعداد، نوع و سال ورود واحدهای جدید اضافه‌شده نشان می‌دهد. رفتار تولید انرژی توسط هر یک از انواع واحدهای متعارف و تجدیدپذیر نیز به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند.

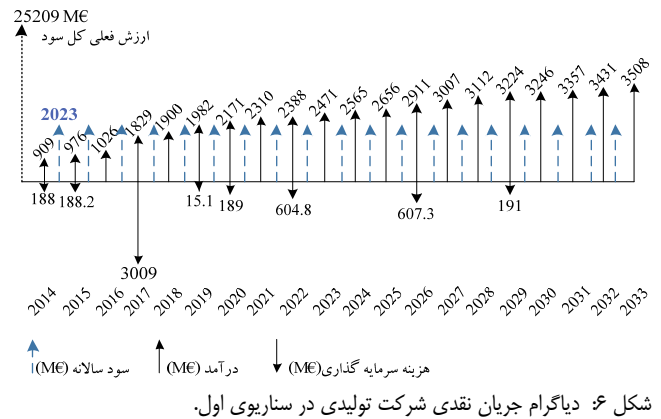
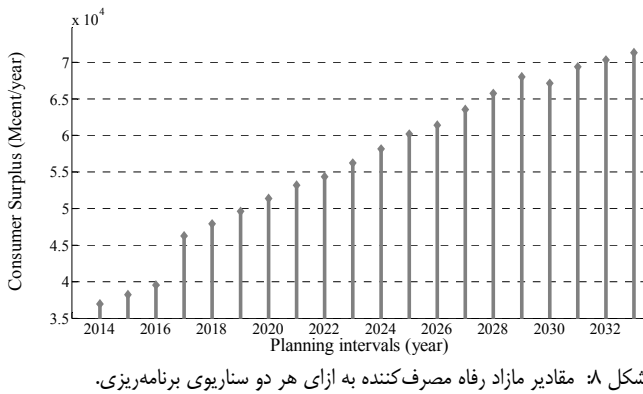
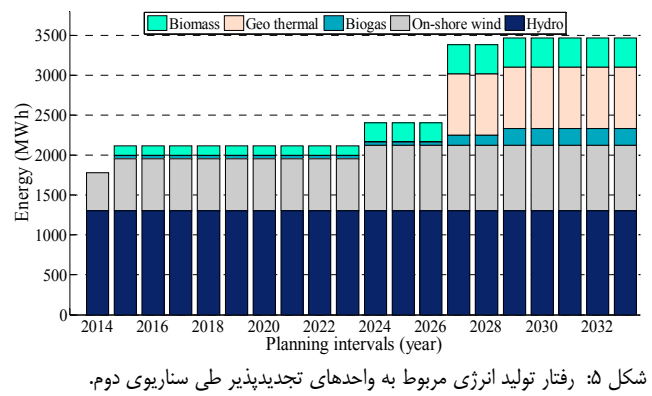
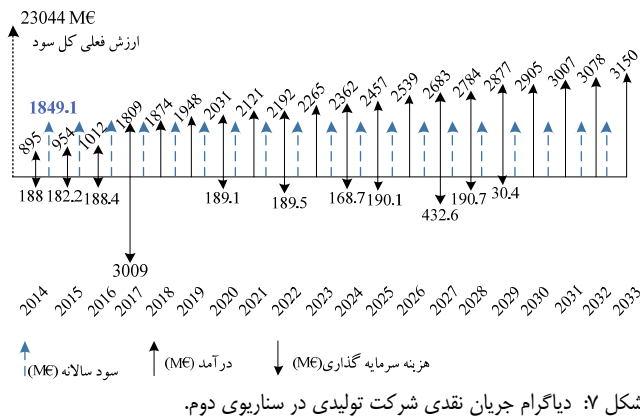
همان‌طور که مشاهده می‌شود، تحت سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد، هیچ واحد زغالی به ترکیب تولید سال پایه در طول افق توسعه اضافه نشده است. توجه داشته باشید که این واحدها بیشترین میزان انتشار آلاینده‌ها را در بین سایر واحدهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی دارا می‌باشند. این امر به خوبی اثر اعمال محدودیت از سوی سیاست‌مورد نظر را نشان می‌دهد اما آنچه که جایگزین این واحدها در ترکیب تولید شده است، نه منابع انرژی تجدیدپذیر به طور قابل توجه، بلکه واحدهای سیکل ترکیبی می‌باشند به طوری که در پایان افق توسعه، شش واحد ۴۰۰ مگاواتی سیکل ترکیبی در ترکیب تولید مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. با این وجود می‌توان گفت که محدودیت‌های ایجادشده مربوط به انتشار بخش تولید (با توجه به میزان انتشار سال پایه و حد مجاز انتشار در طول افق برنامه‌ریزی) باعث شده است که شرکت تولیدی در برخی از سال‌ها، سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر را بر خرید حق انتشار ترجیح دهد به طوری که ترکیب تولید در این سناریو، نسبت به سناریوی

چهار واحد سیکل ترکیبی و یک واحد هسته‌ای از میان واحدهای متعارف منتخب و تنها یک واحد بیوگاز از میان واحدهای تجدیدپذیر منتخب به ترکیب تولید سال پایه اضافه می‌گردند. این نتایج حاکی از آن است که شرکت تولیدی به دلیل ظرفیت کم تولید و نیز هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا، تمایلی برای سرمایه‌گذاری بر روی واحدهای تجدیدپذیر ندارد. این امر به خوبی ضرورت اعمال سیاست‌های تشویقی به بخش تولید را نشان می‌دهد. با توجه به رفتار تولید انرژی مجموعه واحدهای متعارف نیز می‌توان دریافت که بیشترین مشارکت در فرایند تولید انرژی مربوط به واحدهای سیکل ترکیبی می‌باشد. این امر در میان واحدهای تجدیدپذیر مربوط به واحدهای برق‌آبی موجود از ترکیب تولید سال پایه می‌باشد. لازم به ذکر است که در مورد واحدهای تجدیدپذیر فرض بر این است که به هنگام بهره‌برداری همواره در حداکثر ظرفیت خود قرار می‌گیرند.

## ۲-۴ نتایج حاصل از برنامه‌ریزی توسعه طی سناریوی دوم

در این بخش به ارائه نتایج حاصل از سناریوی دوم پرداخته می‌شود. در مورد سیاست حق انتشار، فرض می‌شود که قیمت هر حق انتشار به صورت خطی از ۱۵/۰۸ (€/t) در سال اول به ۳۶/۷۰ (€/t) در سال بیستم از افق توسعه افزایش می‌یابد، مادامی که سقف انتشار مجاز مربوط به شرکت تولیدی به صورت خطی از ۷/۶ (Mt/year) در ابتدای افق برنامه‌ریزی به ۷/۱۵ (Mt/year) در انتهای افق توسعه کاهش می‌یابد [۵].





با  $1849.1$  بوده که نسبت به سناریوی اول به میزان  $174$  (ME) کاهش داشته است و کل ارزش فعلی سود شرکت تولیدی در سناریوی دوم توسعه نیز برابر با  $23044$  (ME) می‌باشد. این امر بخوبی بیانگر این است که سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد می‌تواند با اعمال محدودیت انتشار و تحت تأثیر قرار دادن تصمیمات سرمایه‌گذاری شرکت تولیدی، باعث کاهش رفاه تولیدکننده گردد، حال آن که مازاد رفاه مصرف‌کننده تحت این سیاست تغییری پیدا نمی‌کند. به بیانی کامل‌تر، مطابق با (۲) در ارزیابی ترم دوم تابع رفاه یعنی مازاد رفاه مصرف‌کننده، با توجه به مکانیزم اجرایی سیاست تشویقی مورد نظر، هیچ هزینه‌ای متوجه مصرف‌کننده نمی‌باشد. این در حالی است که تحت سیاست‌های تشویقی دیگر چون سیاست حق تعرفه که در آن واحدهای تجدیدپذیر مستقیماً از سوی دولت تشویق‌های مالی دریافت می‌کنند، بارگذاری هزینه تشویق‌ها بر نهاد مصرف‌کننده می‌تواند به کاهش مازاد رفاه آنها بیانجامد و از این رو می‌توان گفت که مقادیر مازاد رفاه مصرف‌کننده در سناریوهای در نظر گرفته شده در این مطالعه با یکدیگر برابر می‌باشند. بر این اساس، با توجه به قیمت در نظر گرفته شده برای هر واحد انرژی در طول افق برنامه‌ریزی، شکل ۸ مقادیر مازاد رفاه طی هر یک از سال‌های افق توسعه را نشان می‌دهد.

بر اساس مقادیر نشان داده شده در شکل ۸، ارزش فعلی مازاد رفاه مصرف‌کننده برابر با  $699720$  (ME) است که نسبت به سود شرکت تولیدی از مقدار قابل توجهی برخوردار می‌باشد.

آخرین ترم از تابع رفاه اجتماعی که به صورت اقتصادی در این مطالعه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، خسارت‌های زیست‌محیطی به بار آمده از آلاینده‌های گازی انتشار یافته توسط بخش تولید است. بدین منظور با استفاده از شاخص هزینه اجتماعی کربن که در بخش دوم مقاله به آن اشاره شد و نیز مدل‌های انتشار در نظر گرفته شده در شکل ۳، می‌توان به محاسبه میزان خسارت‌های به بار آمده طی هر یک از سناریوهای در نظر

اول از مشارکت بیشتر منابع انرژی تجدیدپذیر برخوردار است. به بیانی کامل‌تر با توجه به ترکیب تولید در سال پایه و میزان انتشار آنها در طول سال از یک سو و سقف انتشار مجاز تخصیص یافته به شرکت تولیدی و شیب کاهشی آن از سوی دیگر، پروضح است که در سال‌های ابتدایی دهه دوم افق توسعه، ترکیب تولید شرکت تولیدی با انتشاری بیش از حد مجازش روبه‌رو خواهد بود، حتی اگر هیچ واحد متعارف دیگری تا آن مرحله از برنامه‌ریزی به ترکیب تولید سال مینا اضافه نگردد. بدین ترتیب شرکت تولیدی ناچار به خرید حق انتشارهای اضافی یا سرمایه‌گذاری بر روی واحدهای تجدیدپذیر خواهد بود که این امر می‌تواند کاهش سود (رفاه) شرکت تولیدی را به دنبال داشته باشد که در بخش‌های بعدی به این موضوع پرداخته می‌شود.

### ۳-۴ ارزیابی رفاه اجتماعی متأثر از ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر

در این بخش به ارزیابی ترم‌های در نظر گرفته شده برای تابع رفاه اجتماعی در چهارچوب مورد نظر پرداخته می‌شود. در این راستا، مطابق با ترم‌های معرفی شده در (۲)، در ابتدا رفاه شرکت تولیدی که همان سود حاصل از تولید و فروش انرژی می‌باشد، بررسی می‌شود. برای درک بهتر اثر ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر تحت سیاست تشویقی مورد نظر، دیاگرام جریان نقدی شرکت تولیدی طی هر دو سناریو برنامه‌ریزی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

همان طور که مشاهده می‌شود، ارزش فعلی سود شرکت تولیدی یعنی تفاضل سایر هزینه‌ها و درآمدها در سال پایه، برابر با  $25209$  (ME) خواهد بود و به تبع، میزان سود سالانه دریافتی به صورت یکنواخت با توجه به طول کل دوره برنامه‌ریزی و نرخ بهره در نظر گرفته شده، مقداری برابر با  $2023$  (ME) خواهد داشت. این در حالیست که تحت اعمال سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد، سود سالانه شرکت تولیدی برابر

جدول ۵: نتایج آنالیز حساسیت رفاه اجتماعی به سیاست حق انتشار.

قیمت حق انتشار (€/t)	مقادیر ارزش فعلی (M€)		
	سود شرکت تولیدی	خسارات زیست محیطی	رفاه اجتماعی*
$\pi_i^{ER}$	۲۳۰۴۴	۱۵۹۵۵۰	۵۶۳۲۱۴
$۰.۹ \times \pi_i^{ER}$	۲۴۴۸۱	۱۷۱۳۴۳	۵۵۲۸۵۸
$۰.۹۵ \times \pi_i^{ER}$	۲۳۷۳۹	۱۶۶۴۹۳	۵۵۶۹۶۶
$۱.۰۵ \times \pi_i^{ER}$	۲۲۴۱۷	۱۵۰۰۹۸	۵۷۲۰۳۹
$۱.۱ \times \pi_i^{ER}$	۲۱۸۹۷	۱۴۷۲۶۵	۵۷۴۳۵۲

\* مقدار مازاد رفاه مصرف کننده در تمامی حالات فوق ثابت و برابر با ۶۹۹۷۲۰ (M€) می باشد.

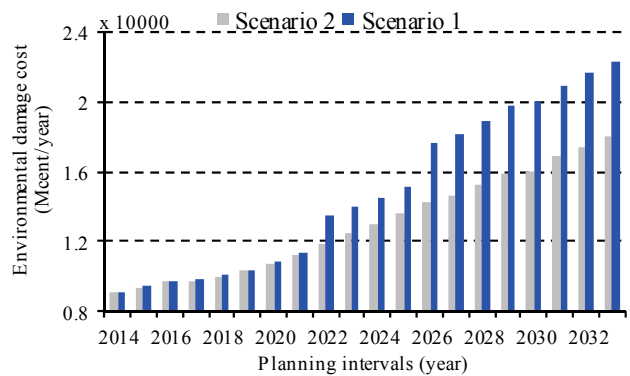
قیمت‌های جدید به دست آمده برای حق انتشارها، مسأله برنامه‌ریزی توسعه حل می‌شود. مقادیر مربوط به ارزش فعلی سود شرکت تولیدی، خسارات زیست محیطی و تابع رفاه اجتماعی، متناظر با هر یک از ضرایب ذکر شده در جدول ۵ خلاصه شده است. همچنین به منظور ایجاد امکان مقایسه بهتر، نتایج حاصل از سناریوی دوم برنامه‌ریزی نیز در این جدول آمده است.

همان طور که مشاهده می‌شود رفاه اجتماعی نسبت به تغییرات اندک حق انتشار از حساسیت قابل توجهی برخوردار است، به طوری که افزایش قیمت حق انتشار در طول افق توسعه، باعث کاهش سود شرکت تولیدی و نیز هزینه‌های مربوط به خسارت‌های زیست محیطی می‌گردد. عکس این حالت نیز صادق است، به طوری که با کاهش قیمت تخصیص یافته به حق انتشار طی سال‌های مختلف، سود شرکت تولیدی و به دنبال آن خسارات زیست محیطی افزایش یافته است.

با توجه به ثابت بودن سقف انتشار در هر یک از حالات مندرج در جدول فوق، روند تغییرات رفاه اجتماعی را چنین می‌توان ارزیابی نمود که با کاهش قیمت حق انتشار در طول افق توسعه، نه تنها انگیزه شرکت تولیدی برای سرمایه‌گذاری بر روی واحدهای تجدیدپذیر کم می‌شود، بلکه تمایل شرکت تولیدی برای خرید حق انتشارهای بیشتر و لذا یافتن مجوز برای تولید توان بیشتر با استفاده از واحدهای متعارف نیز افزایش می‌یابد. این امر افزایش سود شرکت تولیدی و هزینه معادل با خسارت‌های زیست محیطی را در مقابل کاهش رفاه اجتماعی به دنبال دارد. علت را می‌توان در متفاوت بودن واکنش خسارت‌های زیست محیطی به تغییرات قیمت حق انتشار در مقایسه با واکنش سود شرکت تولیدی به تغییرات قیمت حق انتشار دانست چرا که افزایش سود شرکت تولیدی در اثر افزایش تولید با استفاده از واحدهای متعارف، بسیار کمتر از هزینه‌های افزایش یافته در اثر افزایش انتشار ترکیب تولید شرکت تولیدی است. بنابراین می‌توان گفت افزایش قیمت حق انتشار به افزایش رفاه اجتماعی منجر می‌گردد. البته توجه به این نکته ضروریست که با افزایش قیمت حق انتشارها اگرچه شرکت تولیدی ترغیب به سرمایه‌گذاری بر روی واحدهای مبتنی بر منابع تجدیدپذیر می‌گردد، اما پایین بودن سطح تولید این منابع و نیز هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالای این واحدها را می‌توان به عنوان دلایلی تلقی نمود که باعث کم‌تر بودن سود شرکت تولیدی در مقایسه با سود مربوط در قیمت‌های پایین حق انتشار می‌گردد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به ارزیابی جامع اثرات به بارآمده از ترویج و توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر بر کلیتی با عنوان رفاه اجتماعی در چهارچوب



شکل ۹: هزینه معادل با خسارت‌های زیست محیطی طی سناریوی اول و دوم.

گرفته شده پرداخت. لذا با توجه به میزان مشارکت هر یک از انواع واحدهای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی در تأمین تقاضا و هزینه اجتماعی کربن متناظر با هر یک از سال‌های توسعه، شکل ۹ میزان خسارت‌های زیست محیطی برآورده شده طی هر یک از سناریوهای برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد.

همان طور که مشاهده می‌شود، سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد توانسته است با محدود کردن میزان انتشار، تأثیر قابل توجهی در کاهش هزینه‌های متناظر با خسارت‌های زیست محیطی داشته باشد به طوری که ارزش فعلی کل خسارت‌های به بار آمده در طول افق توسعه از ۱۷۸۴۹۰ (M€) در سناریوی اول به ۱۵۹۵۵۰ (M€) در سناریوی دوم کاهش یافته است. بدین ترتیب می‌توان گفت که ترویج منابع تجدیدپذیر و اعمال محدودیت انتشار تحت سیاست مورد نظر با کاهش هزینه‌های مربوط به میزان ۱۸۹۴۰ (M€) می‌تواند تأثیر به سزایی در ارتقای رفاه اجتماعی داشته باشد.

در گام آخر برای ارزیابی تغییرات کلی تابع رفاه اجتماعی در نتیجه افزایش درصد نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر تحت اجرای سیاست تشویقی مورد نظر، لازم است سایر ترم‌های رفاه اجتماعی در قالب تابع رفاه برگسون-ساموئلسون با یکدیگر جمع گردند. با توجه به مقادیر ارزش فعلی به دست آمده برای هر یک از ترم‌های تابع رفاه یعنی سود شرکت تولیدی، مازاد رفاه مصرف کننده و هزینه مربوط به خسارت‌های زیست محیطی طی هر یک از سناریوهای برنامه‌ریزی، مقادیر به دست آمده برای تابع رفاه اجتماعی برابر با ۵۴۶۴۳۹ (M€) در سناریوی اول و ۵۶۳۲۱۴ (M€) به ازای سناریوی دوم می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر تحت سیاست تشویقی حق انتشار با قابلیت داد و ستد، علی‌رغم کاهش رفاه تولیدکننده می‌تواند با کاهش خسارت‌های زیست محیطی، تأثیر مثبتی در ارتقای رفاه کل جامعه داشته باشد.

## ۴-۴ آنالیز حساسیت رفاه اجتماعی به قیمت حق انتشار

همان گونه که از بررسی نتایج به دست آمده از سناریوهای در نظر گرفته شده برمی‌آید، اجرای سیاست حق انتشار تأثیر به سزایی بر استراتژی‌های توسعه بخش تولید و لذا هزینه‌های آن، خسارات زیست محیطی به بار آمده از آلاینده‌های انتشار یافته از بخش تولید و در نهایت بر تابع رفاه اجتماعی دارد. در این بخش به منظور آشکارسازی هرچه بیشتر تأثیر سیاست حق انتشار بر رفاه اجتماعی، یک آنالیز حساسیت بر روی تغییرات قیمت حق انتشار در طول افق توسعه انجام می‌شود. برای دستیابی به این مهم، قیمت‌های در نظر گرفته شده در سناریوی دوم برنامه‌ریزی برای حق انتشار در هر یک از سال‌های توسعه، در چهار ضریب ۰.۹، ۰.۹۵، ۱.۰۵ و ۱.۱ ضرب و به ازای هر یک از

## مراجع

- [1] X. Wang and J. McDonald, *Modern Power Systems Planning*, McGraw-Hill Book Company, England, 1994.
- [2] S. Zhang, P. Andrews-Speed, X. Zhao, and Y. He, "Interactions between renewable energy policy and renewable energy industrial policy: a critical analysis of China's policy approach to renewable energies," *Energy Policy*, vol. 62, no. 6, pp. 342-353, Nov. 2013.
- [3] P. Menanteau, D. Finon, and M. L. Lamy, "Prices versus quantities: choosing policies for promoting the development of renewable energy," *Energy Policy*, vol. 31, no. 8, pp. 799-812, Jun. 2003.
- [4] G. Schmid, "The development of renewable energy power in India: which policies have been effective?," *Energy Policy*, vol. 45, no. 1, pp. 317-326, Jun. 2012.
- [5] F. Careri, C. Genesi, P. Marannino, M. Montagna, S. Rossi, and I. Siviero, "Generation expansion planning in the age of green economy," *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2214-2223, Nov. 2011.
- [6] H. Shayeghi, A. Pirayeshnegab, A. Jalili, and H. Shayanfar, "Application of PSO technique for GEP in restructured power systems," *Energy Conv. & Management*, vol. 50, no. 9, pp. 2127-2135, Sep. 2009.
- [7] Q. Chen, C. Kang, Q. Xia, and J. Zhong, "Power generation expansion planning model towards low-carbon economy and its application in China," *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 1117-1125, May 2010.
- [8] S. Moghddas-Tafreshi, H. Shayanfar, A. Saliminia Lahiji, A. Rabiee, and J. Aghaei, "Generation expansion planning in pool market: a hybrid modified game theory and particle swarm optimization," *Energy Conv. & Management*, vol. 52, no. 2, pp. 1512-1519, Feb. 2011.
- [9] J. L. C. Meza, M. B. Yildirim, and A. S. Masud, "A model for the multiperiod multiobjective power generation expansion problem," *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 871-878, May 2007.
- [10] S. Fuss, J. Szolgayova, M. Obersteiner, and M. Gusti, "Investment under market and climate policy uncertainty," *Appl. Energy*, vol. 85, no. 8, pp. 708-721, Aug. 2008.
- [11] J. D. Mondol and N. Koumpetsos, "Overview of challenges, prospects, environmental impacts and policies for renewable energy and sustainable development in Greece," *Renew. and Sust. Energy Rvivs*, vol. 23, no. 1, pp. 431-442, Jul. 2013.
- [12] 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. 4614-4623, Aug. 2011.
- [13] A. J. Pereira and J. T. Saraiva, "Generation expansion planning (GEP)-a long-term approach using system dynamics and genetic algorithms (GAs)," *Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 5180-5199, Aug. 2011.
- [14] P. Linares, F. Javier Santos, M. Ventosa, and L. Lapedra, "Incorporating oligopoly, CO2 emissions trading and green certificates into a power generation expansion model," *Automatica*, vol. 44, no. 6, pp. 1608-1620, Jun. 2008.
- [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. 2201-2209, Jun. 2011.
- [16] J. Aghaei, M. Akbari, A. Roosta, M. Gitizadeh, and T. Niknam, "Integrated renewable-conventional generation expansion planning using multiobjective framework," *IET Generation, Transmission, & Distribution*, vol. 6, no. 8, pp. 773-784, Mar. 2012.
- [17] A. G. Kagiannas, D. T. Askounis, and J. Psarras, "Power generation planning: a survey from monopoly to competition," *Int. J. Elec. Power & Energy Syst.*, vol. 26, no. 6, pp. 413-421, Jul. 2004.
- [18] S. Perdan and A. Azapagic, "Carbon trading: current schemes and future developments," *Energy Policy*, vol. 39, no. 10, pp. 6040-6054, Oct. 2011.
- [19] H. R. Varian, *Microeconomic Analysis*, vol. 2, New York: Norton, 1992.
- [20] K. J. Perloff, *Microeconomics*, 2nd Ed: Reading, MA: Addison Wesley, 2000.
- [21] Environmental Protection Agency, "Social cost of carbon," <http://www.epa.gov/climatechange/EPAactivities/economics/scc.html>
- [22] A. Farag, S. Al-Baiyat, and T. Cheng, "Economic load dispatch multiobjective optimization procedures using linear programming techniques," *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 731-738, Sep. 1995.

برنامه‌ریزی توسعه تولید پرداخته شد. بدین منظور ابتدا با تشریح نحوه ارتباط منابع انرژی تجدیدپذیر با سایر ترم‌های در نظر گرفته شده برای تابع رفاه اجتماعی یعنی رفاه تولیدکنندگان انرژی، رفاه مصرف‌کنندگان انرژی و خسارت‌های زیست‌محیطی به بار آمده از انتشار آلاینده‌های مربوط به سوخت‌های فسیلی در بخش تولید انرژی الکتریکی، ارزشمندی این منابع و اهمیت ترویج آنها در کنار معضلات و راهکارهای ارائه‌شده بحث می‌شود، ضمن آن که رفاه اجتماعی در قالب تابع رفاه برگسون-ساموئلسون مدل‌سازی می‌گردد. سپس با ارائه یک مدل جامع برای برنامه‌ریزی توسعه تولید و لحاظ کردن اثر یکی از رایج‌ترین سیاست‌های تشویقی با عنوان سیاست حق انتشار با قابلیت داد و ستد، استراتژی‌های توسعه از دید یک شرکت تولیدی در طول یک افق ۲۰ ساله طی دو سناریوی مختلف تعیین می‌گردند، مادامی که مسأله بهینه‌سازی مورد نظر در قالب یک مسأله غیر خطی آمیخته با اعداد صحیح در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز پیاده‌سازی و با استفاده از بهینه‌ساز BARON حل می‌شود. در انتها اثر نتایج حاصل از برنامه‌ریزی توسعه بر سایر ترم‌های تابع رفاه اجتماعی و نیز بر مجموع ترم‌ها، یعنی رفاه اجتماعی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. علاوه بر این با انجام آنالیز حساسیت، واکنش رفاه اجتماعی به تغییرات قیمت حق انتشار در طول افق برنامه‌ریزی نیز بررسی می‌شود.

با توجه به چهارچوب ارائه‌شده، مشاهدات حاکی از آن است که ترویج و توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر با وجود هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا می‌تواند باعث بهبود رفاه اجتماعی گردد. به بیانی کامل‌تر، ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه تولید، تحت سیاست‌های تشویقی و اعمال محدودیت‌های زیست‌محیطی می‌تواند با کاهش خسارت‌های زیست‌محیطی مربوط به انتشار آلاینده‌های بخش تولید، باعث ارتقای سطح رفاه گردد، علی‌رغم آن که هزینه‌های اضافی ناشی از ترویج منابع انرژی تجدیدپذیر و سیاست‌های تشویقی، می‌تواند کاهش رفاه تولیدکننده یا مصرف‌کننده را به دنبال داشته باشد. در کنار آنچه که از اثرات منابع انرژی تجدیدپذیر بر رفاه تولیدکننده، مصرف‌کننده و خسارت‌های زیست‌محیطی به آن اشاره شد، پرواضح است که مواردی چون تنوع در سبد انرژی، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و در نهایت امنیت انرژی نیز در زمره مزایایی قرار می‌گیرند که این منابع در راستای تحقق توسعه پایدار می‌توانند به دنبال داشته باشند. از این رو با توجه به نقش حیاتی سیستم‌های قدرت چه از دیدگاه اقتصادی و چه از دیدگاه اجتماعی و زیست‌محیطی می‌توان تدوین طرح‌های توسعه در بخش تولید را با در نظر داشتن منابع انرژی تجدیدپذیر و سیاست‌های مؤثر در توسعه آنها، امری مهم برشمرد که با توجه به امکانات و تجهیزات موجود می‌تواند در دستور کار آتی مسئولین قرار گیرد.

به منظور دستیابی به ارزیابی‌های دقیق‌تر در چهارچوب برنامه‌ریزی توسعه تولید، منابع انرژی تجدیدپذیر، سیاست‌های تشویقی و رفاه اجتماعی، توجه به مسایلی چون سالخوردگی واحدهای نیروگاهی و بحث از مدار خارج شدن آنها، اثر سایر دیگر سیاست‌های تشویقی، تعریف ترم‌های دیگری مانند امنیت انرژی در تابع رفاه و به کارگیری دیگر توابع رفاه اجتماعی تعریف‌شده در علم اقتصاد می‌تواند حایز اهمیت باشد. از این حیث مطالعات بیشتری با توجه به مسایل مزبور احساس می‌شود که در پژوهش‌های آتی به آنها پرداخته خواهد شد.

**امیر عبدالهی** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق قدرت، به ترتیب در دانشگاه شهید باهنر کرمان در سال ۱۳۸۶ و دانشگاه صنعتی شریف در سال ۱۳۸۸ به پایان رسانده است. وی تحصیلات تکمیلی خود را در مقطع دکتری در دانشگاه تربیت مدرس ادامه داد و در سال ۱۳۹۱ موفق به اخذ مدرک دکتری در رشته مهندسی برق از این دانشگاه گردید. دکتر عبدالهی بلافاصله بعد از اتمام مقطع دکتری در سال ۱۳۹۱، به عضویت هیأت علمی دانشگاه شهید باهنر کرمان درآمد و در حال حاضر استادیار بخش برق می باشد. زمینه های علاقمندی ایشان، بازار برق، شبکه های هوشمند، برنامه ریزی سیستم های قدرت، و مدیریت انرژی می باشد.

**هادی صادقی** تحصیلات خود را در مقطع کاردانی در دانشکده فنی و حرفه ای شهید باهنر شیراز، مقطع کارشناسی ناپیوسته در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، و مقطع کارشناسی ارشد را در دانشگاه شهید باهنر کرمان، به ترتیب در سال های ۱۳۸۷، ۱۳۹۰، و ۱۳۹۲ در رشته مهندسی برق قدرت به پایان رسانده و از سال ۱۳۹۳ در دانشگاه شهید باهنر کرمان در مقطع دکتری مشغول به تحصیل می باشد. زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه وی عبارتند از: برنامه ریزی سیستم های قدرت، منابع انرژی تجدیدپذیر، روش های بهینه سازی ابتکاری، و سیاست های انرژی.

**مسعود رشیدی نژاد** در سال ۱۳۶۵ مدرک کارشناسی و در سال ۱۳۶۹ مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق از دانشگاه صنعتی اصفهان دریافت نموده اند. طی سال های ۱۳۷۰ تا ۱۳۷۶ نامبرده به عنوان مربی به عضویت هیأت علمی دانشگاه شهید باهنر کرمان درآمد و به تدریس مشغول بود و پس از آن به دوره دکتری در دانشگاه بروئل انگلستان وارد گردید و در سال ۱۳۸۰ موفق به اخذ درجه دکتری و پس از آن درجه پسادکتری از همان دانشگاه در سال ۱۳۸۲ در رشته مهندسی برق گردید. دکتر رشیدی نژاد در حال حاضر استاد بخش برق دانشگاه شهید باهنر کرمان می باشد. زمینه های علمی مورد علاقه ایشان، برنامه ریزی توسعه و بهره برداری سیستم های قدرت، ادوات FACTS، تجدید ساختار سیستم های قدرت، بازار برق، و مدیریت انرژی می باشد.