



مدل سازی استفاده هم زمان از منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر با رویکرد توسعه پایدار در صنایع مادر

میثم احمدوند^{1*}، رکسانا فکری²، محمد ساويز اسدی لاری³

1- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

2- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

3- استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

* تهران، 1657191671، meysam.ahmadvand65@gmail.com

چکیده

یکی از مباحث کلیدی در سیاست گذاری انرژی در دهه اخیر، توسعه پایدار انرژی است. با توجه به محدودیت منابع انرژی تجدیدناپذیر و اهمیت روزافزون انرژی های تجدیدپذیر، این پژوهش باهدف بهینه سازی استفاده هم زمان از این منابع در صنایع مادر انجام شده است. اگرچه هزینه های اولیه و سرمایه گذاری بالا از موانع اصلی استفاده از انرژی های تجدیدپذیر در کشور به شمار می رود، اما قوانین بالادستی و مشوق های اخیر، روند سرمایه گذاری در این بخش را تسهیل کرده است. روش تحقیق مقاله از نوع کاربردی و مطالعه موردی بر روی داده های واقعی است. پژوهش شامل مرور مبانی نظری، طراحی مدل ریاضی چندهدفه و حل آن به روش وزن دهی است. مدل ارائه شده، اهداف اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی را شامل می شود. داده های مورد استفاده از یک کارخانه سیمان جمع آوری شده و مدل با استفاده از داده های واقعی صحت سنجی شده است. نتایج نشان داد که با رویکرد توسعه پایدار، استفاده از نیروگاه خورشیدی نسبت به نیروگاه های گازی اولویت دارد. در این حالت، حدود 65% برق مورد نیاز کارخانه باید از انرژی خورشیدی تأمین شود. مدل ریاضی پیشنهادی، به عنوان یک مدل سه هدفه غیرخطی عدد صحیح، ابزار مؤثری برای برنامه ریزی انرژی در صنایع مادر فراهم می کند و رویکردی نوآورانه برای تلفیق توسعه پایدار در فرایند تصمیم گیری ارائه می دهد. این پژوهش می تواند چارچوبی کاربردی برای سیاست گذاران و مدیران صنایع جهت بهینه سازی مصرف انرژی با در نظر گرفتن الزامات اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی فراهم آورد.

کلیدواژه ها: توسعه پایدار، انرژی تجدیدپذیر، انرژی تجدیدناپذیر، مدل ریاضی، بهینه سازی چندهدفه

Modeling the simultaneous use of renewable and non-renewable energy sources with a sustainable development approach in parent industries

Meysam Ahmadvand^{1*}, Roksana Fekri², Mohamad Saviz Assadi Lari³

1- PhD student, Department of Industrial Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1657191671, Tehran, Iran, meysam.ahmadvand65@gmail.com

Received: 21 May 2024 Accepted: 02 September 2025

Abstract

One of the key issues in energy policy in the last decade is the sustainable development of energy. Considering the limitation of non-renewable energy sources and the growing importance of renewable energies, this research has been carried out with the aim of optimizing the simultaneous use of these resources in parent industries. Although the initial costs and high investment are the main obstacles to the use of renewable energy in the country, the upstream laws and recent incentives have facilitated the investment process in this sector. and the research includes reviewing the theoretical foundations, designing a multi-objective mathematical model, and solving it by weighting method. The presented model includes economic, environmental and social goals. The data used was collected from a cement factory and the model was validated using real data. The results showed that with the approach of sustainable development, the use of solar power plants has priority over gas power plants. In this case, about 65% of the factory's electricity needs should be

provided by solar energy. The proposed mathematical model, as an integer non-linear three-objective model, provides an effective tool for energy planning in parent industries and provides an innovative approach to integrate sustainable development in the decision-making process. This research can be a practical framework for policy makers and industry managers to optimize consumption. Provide energy by considering economic, environmental and social requirements.

Keywords: Sustainable Development, Renewable Energy, Non-Renewable Energy, Mathematical Model, Multi-Objective Optimization

1- مقدمه

انرژی ورودی اصلی اقتصاد و تحولات اجتماعی جهان است. مصرف انرژی هر کشوری از نرخ رشد آن کشور بر حسب تولید ناخالص داخلی و سایر شاخص های رشد صحبت می کند. در بررسی مدل های پیش بینی انرژی مشاهده شد که این مدل ها به طور گسترده برای برنامه ریزی انرژی مورد استفاده قرار گرفته اند. تولید ناخالص داخلی، تولید ناخالص ملی، جمعیت، درآمد ناخالص، درآمد سرانه، تولید انرژی، امنیت انرژی پارامترهای مهمی هستند که برای مدل سازی در نظر گرفته می شوند. در سال های اخیر، مدل های کوتاه مدت، میان مدت و بلندمدت توسط محققان مختلف ایجاد شده است. اکثر برنامه ریزان انرژی به این نتیجه رسیدند که منابع انرژی تجدیدپذیر مهم ترین جایگزین انرژی برای سوخت های متعارف است و همچنین برای برنامه ریزی خود حداکثر نفوذ این منابع را به شبکه در نظر گرفتند [1].

به صورت سنتی برنامه ریزی انرژی به مفهوم شناسایی کاراترین منابع تأمین انرژی برای تقاضای پیش بینی شده انرژی، با کمترین هزینه ممکن است. در این زمینه مدل های تخصیص منابع انرژی مختلفی نیز ارائه شده اند. با گذر زمان، برنامه ریزان انرژی با مسائل دیگری در حوزه انرژی مواجه شدند که روال روبه کاهش منابع انرژی فسیلی و تجدیدناپذیر یکی از این مشکلات بود. از طرف دیگر تغییرات اقلیم آب و هوایی ناشی از افزایش گرمایش جهانی و روند روبه افزایش انتشار گازهای گلخانه ای موضوعاتی بودند که مفهوم جدیدی از برنامه ریزی انرژی را پایه ریزی کردند. برنامه ریزی انرژی علاوه بر اینکه باید بر کاهش هزینه های تأمین انرژی مورد تقاضا متمرکز باشد، لازم است کمترین اثرات مخرب محیط زیستی را نیز به همراه داشته باشد [2].

مباحث مورد توجه دهه اخیر در حوزه سیاست گذاری بخش انرژی، توسعه پایدار انرژی است که از ابعاد مختلفی برخوردار است. مواجهه با چالش های ملی و بین المللی از جمله نوسانات عرضه و قیمت انرژی، بسیاری از کشورها را بر آن داشته است تا امنیت انرژی خود را در خطر ببینند و به عنوان یکی از اجزای اصلی سیاست گذاری های خود در نظر بگیرند. توجه به انرژی های تجدیدپذیر می تواند از جمله راهکارهای تولید پایدار انرژی باشد [3].

باتوجه به پیش بینی های به عمل آمده، میزان مصرف انرژی تا سال ۲۰۲۵ به مقدار 57٪ افزایش می یابد. کاهش روزافزون منابع فسیلی و مشکلات زیست محیطی به وجود آمده از سوخت های فسیلی، توجه بیشتر کشورهای پیشرفته جهان را به استفاده از انرژی های نو و تجدیدپذیر جلب کرده است [4]. منابع تجدیدپذیر پایدار است و خسارات بسیار کمتری به محیط زیست وارد می کند. اما هزینه تولید انرژی از این منابع بالاتر از منابع فسیلی است. باتوجه به افزایش مشکلات زیست محیطی ناشی از افزایش مصرف جهانی انرژی، برنامه ریزی انرژی و بهره گیری از ابزارهای طراحی سیاست های انرژی و زیست محیطی از اهمیت بیشتری برخوردار شده اند. مشکلات مربوط به انرژی همچنان به عنوان یکی از موانع اصلی رشد اقتصادی در کشورهای در حال توسعه

که سرمایه گذاری در بخش انرژی قسمت اعظم سرمایه های عمومی را به خود اختصاص می دهد، مطرح است. به منظور دستیابی به اهداف زیست محیطی و تأمین انرژی مناسب همراه با سیستم عرضه مطمئن برای جمعیت روبه رشد یک کشور در یک مسیر سازگار با محیط زیست، به سرمایه گذاری های عمده نیاز است. پیچیدگی های انرژی و محیط زیست را می توان با فعل و انفعالات موجود بین انرژی، اقتصاد و محیط زیست شناسایی کرد.

صنایع مادر، صنایعی هستند که محصولات و خدمات آن ها مورد نیاز سایر صنایع است. این صنایع پایه و اساس توسعه سایر صنایع هستند و نقش مهمی در اقتصاد ایفا می کنند. در ایران، صنایع مادر شامل صنایع نفت و گاز، پتروشیمی، فولاد، سیمان، آلومینیوم، خودروسازی، ماشین سازی، کشتی سازی و داروسازی است. این صنایع نقش مهمی در اقتصاد ایران ایفا می کنند و زمینه را برای رشد و توسعه سایر صنایع فراهم می کنند. صنایع مادر بخش عمده ای از مصرف انرژی را شامل می شوند و تأمین انرژی این صنایع تنها از منابع انرژی تجدیدپذیر امکان پذیر نیست. از این رو در پژوهش حاضر تأمین انرژی این صنایع بررسی و مدل تأمین انرژی برق این کارخانه ها با استفاده هم زمان از انرژی های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر ارائه شده است. برای مدل سازی با رویکرد توسعه پایدار سعی در شناسایی پارامترهای تأثیرگذار در هر یک از ابعاد اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی داشته ایم و از این رو مدلی چندهدفه ارائه می گردد. سوالات اصلی پژوهش جاری به شرح ذیل هستند:

عوامل اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی منظر توسعه پایدار جهت تصمیم گیری در خصوص تأمین انرژی برق در صنایع مادر کدام هستند؟ چگونه مدل چندهدفه ریاضی می تواند بهینه سازی مصرف انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر را در صنعت سیمان با هدف کاهش هزینه و افزایش پایداری محیط زیستی ممکن سازد؟ برای تأمین برق واحد صنعتی استفاده از چه نوع انرژی و به چه مقدار بهینه ترین حالت است؟ سهم هر یک از منابع تأمین انرژی در سه سناریو مرتبط با توسعه پایدار در حالت بهینه چقدر است؟ در شرایط محدودیت منابع مالی و زیست محیطی، چه ترکیب بهینه ای از انرژی های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر می تواند نیازهای برق واحدهای صنعتی را تأمین کند؟ کدام راهبردها برای بهبود ناترازی انرژی برق و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای در صنایع مادر، با رویکرد توسعه پایدار مناسب تر هستند؟

1-1- پیشینه تحقیق

پیشینه اولین مدل های انرژی به زمان اولین بحران نفتی در دهه ۷۰ برمی گردد، یعنی زمانی که نیاز به جایگزینی نفت آشکار شد. هدف این مطالعات، حرکت در مسیر دستیابی به یک سبد سوختی بهینه برای سیستم عرضه انرژی بود. بدین منظور ارزیابی پتانسیل همه منابع موجود ضروری می نمود، در حالی که ابزارهای تکنولوژیکی انرژی در گذشته روی موضوعات خاصی تمرکز داشتند. روش شناسی آن ها اغلب تنها روی یک جنبه از مشکل، مثل هزینه، آسیب های زیست محیطی یا امنیت عرضه انرژی متمرکز بود. معمولاً یکی از بخش های

اقتصادی مثل بخش خانگی یا صنعت مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گرفت یا تنها یکی از حامل‌های انرژی مثل برق، مدنظر قرار می‌گرفت [1].

اولین مدل‌های انرژی بر مبنای تئوری‌های اقتصادسنجی بوده و تقاضای انرژی را با شاخص‌های اقتصاد کلان مثل تولید ناخالص ملی، همبسته می‌کردند. این مدل‌ها با استفاده از زبان‌های ساخت‌یافته ایجاد می‌شدند و متکی بر الگوریتم‌های ریاضی بودند.

مدل‌های قبلی برای طرح‌های برنامه‌ریزی پیچیده مناسب نبودند. به واسطه ساختار ناکارآمد این مدل‌ها، اثرات گسترش مصرف انرژی روی محیط‌زیست در دهه هفتاد نادیده گرفته شد. برای یکپارچه کردن موضوعات انرژی، اقتصاد و محیط‌زیست در یک چارچوب واحد به ابزارهای برنامه‌ریزی جدید نیاز بود. ارزیابی اثرات محیطی سیستم انرژی از اهمیت بیشتری برخوردار شد که این امر موجبات ناسازگاری عرضه انرژی ارزان‌قیمت و حفاظت زیست‌محیطی را فراهم آورد. هدف اصلی فعالیت‌های مدل‌سازی ترویج، توسعه و انتقال مدل‌هایی است که برای حل معضلات بین‌المللی، ملی و منطقه‌ای مناسب هستند. مدل‌های زیادی برای برنامه‌ریزی در چند سال اخیر توسعه داده شده‌اند که اکثر آن‌ها در سطح ملی مطرح بوده‌اند. از مدل‌های اقتصادسنجی گرفته تا مدل‌های فنی - اقتصادی که مصارف انرژی‌بخش‌های انرژی با جزئیات تجزیه و تحلیل می‌کنند [5].

در خصوص مدل‌سازی انرژی‌های پایدار با درنظرگرفتن جنبه‌های توسعه پایدار پژوهش‌هایی صورت گرفته است. هم‌چنین به‌صورت جداگانه مقالاتی با درنظرگرفتن اثرات آن‌ها موردتوجه قرار گرفته است. در پژوهش فتحی‌پور، مسئله برنامه‌ریزی انرژی پایدار محور اصلی بوده و در پی ارائه یک برنامه برای تأمین انرژی موردنیاز است، به‌نحوی که کمترین آسیب‌های زیست‌محیطی را در پی داشته باشد و از منظر اجتماعی پیامدهای مثبتی را داشته باشد. ارائه مدل‌های کاربردی در برنامه‌ریزی انرژی پایدار با درنظرگرفتن ابعاد امنیت انرژی در شرایط عدم قطعیت، مفاهیمی از امنیت انرژی از قبیل کاهش وابستگی به واردات، خیرسازی انرژی و پراکنده‌سازی را در طراحی مدل‌های ریاضی برنامه‌ریزی انرژی پایدار مبنا قرار داده است. به‌طورکلی سه مدل ریاضی مختلف برای پوشش مفاهیم برنامه‌ریزی انرژی، پایداری انرژی و امنیت انرژی ارائه شد است [6].

در مقاله‌ای دیگر از فتحی‌پور و همکاران، مسئله برنامه‌ریزی انرژی پایدار مبتنی بر رویکرد تصادفی پی - استوار¹ بررسی شده است. عدم قطعیت موجود در مسئله، با پی - استوار پوشش داده شده است. در این رویکرد ضمن تولید سناریوهایی در قالب رویکرد تصادفی و حداقل کردن متوسط هزینه‌های تمام سناریوها، مقدار تأسف برای هر سناریو از سطح حفظ می‌شود. مدل پیشنهادی برای یک مطالعه موردی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از رویکرد تصادفی استوار می‌توان با اندک افزایشی در متوسط هزینه‌های برنامه‌ریزی انرژی، برای هر یک از سناریوها جواب‌هایی با اختلاف کم از مقادیر بهینه آن‌ها به دست آورد [2].

نخعی‌نژاد و همکاران، طراحی مدل برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش انرژی برق استفاده از رویکرد تلفیقی برنامه‌ریزی خطی و پویایی‌شناسی سیستمی را موضوع پژوهش خود قرار داده‌اند. این تحقیق با استفاده از فن‌های تحقیق در عملیات، به ارائه مدل ریاضی برای مشخص کردن

میزان تولید انرژی برق از نیروگاه با شرایط اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی پرداخته است. در این مقاله از داده‌های آماری و کتابخانه‌ای استفاده شده است. سپس به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای با مدل برنامه‌ریزی ریاضی و پویایی‌شناسی سیستمی در دو بخش تولید و مصرف برق پرداخته شده است. مدل ریاضی ارائه‌شده در این پژوهش به‌صورت برنامه‌ریزی قطعی است. در ابتدا درصد میزان تولید برق در نیروگاه‌های متفاوت کشور با توجه به تعریف ضرایب فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای محاسبه و سپس در بخش مصارف، اثر انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر بر میزان درصد کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بررسی می‌شود [4].

فضل‌الله تبار، به برنامه‌ریزی زنجیره تأمین انرژی‌های تجدیدپذیر با درنظرگرفتن ارزش تولید پایدار پرداخته است. در این تحقیق تلاش بر این بوده تا با درنظرگرفتن سه بعد پایداری اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، به مدل‌سازی زنجیره تأمین و تصمیم‌گیری در سطح برنامه‌ریزی کلان پرداخته شود. مدل‌سازی با درنظرگرفتن پویایی ارزش‌گذاری شاخص‌ها در قالب زنجیره تأمین صورت گرفته و با حل مدل به‌وسیله نرم‌افزار لینگو، به راه‌حلی پایدارتر در سطح برنامه‌ریزی زنجیره تأمین دست‌یافته است. درنظرگرفتن قابلیت فرایند، به‌عنوان یک معیار کیفی در فرایند ارزیابی شاخص‌های انرژی تجدیدپذیر و نیز ارزش‌گذاری شاخص‌ها در مرحله اول به کمک تحلیل پوششی داده‌ها ازجمله نوآوری‌های این مدل بود. نتایج حل این مسئله مجموعه‌ای از شاخص‌ها بود که با توجه به شرایط مسئله مورد مطالعه و میزان اهمیت هر شاخص در هر لایه از زنجیره تأمین، می‌توان از میان آن‌ها با اهمیت‌ترین آن‌ها را انتخاب کرد و با توجه به داده‌های موجود یک چارچوب برنامه استراتژیک مناسب برای توسعه این نوع انرژی‌ها در کشور تدوین نمود [7].

راب و همکاران، در مقاله‌ای کاربرد روش برنامه‌ریزی خطی در ساخت مدل ریاضی بهینه‌سازی انرژی توزیع شده را بررسی کرده‌اند. هدف این مقاله تضمین امنیت انرژی در شرایط انرژی‌های نوآورانه، زیست‌محیطی و رقابت‌پذیر منطقه‌ای با استفاده از منابع انرژی محلی است [8].

دهقان، به مدل‌سازی رشد پایدار صنعت برق ایران و سیاست‌های مختلفی پرداخته است که کمک به توسعه و رشد پایدار صنعت برق ایران از منظر اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی در سال‌های آینده می‌نماید. ابتدا با مدل‌سازی عرضه و تقاضای برق در یک سیستم متمرکز و تنظیم شده، بررسی می‌شود که با ادامه روند فعلی متغیرهای کلیدی صنعت برق چه روندی را خواهند داشت. سپس، با درنظرگرفتن ذی‌نفعان سیستم، قیمت‌های بهینه تعیین می‌شود و اثر آن‌ها بر زیرسیستم‌های مختلف شبیه‌سازی می‌گردد [3]. پنگ و همکاران، برنامه‌ریزی بلندمدت گسترش ریزشکه با تاب‌آوری و مزایای زیست‌محیطی با استفاده از یادگیری تقویتی عمیق را در مقاله‌ای بررسی کرده است. یک چارچوب جدید برای برنامه‌ریزی توسعه ریزشکه بلندمدت که در آن یک ریزشکه به‌عنوان یک سیستم برق پشتیبان در صورت قطع شبکه اصلی از منظر اقتصاد، تاب‌آوری و انتشار گازهای گلخانه‌ای عمل می‌کند، پیشنهاد می‌شود. روش یادگیری تقویت عمیق برای حل این مسئله بهینه‌سازی پویا و تصادفی با درنظرگرفتن عدم قطعیت‌ها و محدودیت‌های مختلف برای برنامه‌ریزی طولانی‌مدت استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی گسترش ریزشکه را می‌توان به طور مؤثر با سطوح مختلف تقاضای بار و

¹. P-Robust

روی آن تمرکز ندارد. از منظر توسعه پایدار نیز، با در نظر گرفتن هر سه بعد و به خصوص مدل سازی ریاضی بعد اجتماعی جدید و نوآورانه خواهد بود.

1-3- مرور ادبیات توسعه پایدار

توسعه پایدار، مفهومی فراگیر و چندوجهی است که به دنبال ایجاد تعادلی میان نیازهای اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی نسل حاضر و نسل های آینده است. این مفهوم در تلاش است تا با استفاده از منابع موجود، رفاه و آسایش انسان را در بلندمدت تضمین کند. کمیسیون جهانی محیط زیست و توسعه در گزارش آینده مشترک ما [16] توسعه پایدار را این گونه تعریف می کند: "توسعه ای که نیازهای نسل حاضر را بدون به مخاطره انداختن توانایی نسل آینده در تحقق نیاز آن ها پاسخ دهد."

تحقق اهداف اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی به عنوان سه رکن یا سه هدف توسعه پایدار است. امروز پایداری یک مفهوم با گستردگی بسیار است که در تمامی جنبه های زندگی بشر تأثیر می گذارد. توسعه پایدار در نقطه اشتراک سه جنبه مهم پایداری اجتماعی، زیست محیطی و اقتصادی حاصل می شود که شکل ۱ بیانگر این مفهوم است.



شکل ۱ ابعاد توسعه پایدار

۱-۳-۱- اهداف اقتصادی

بعد اقتصادی توسعه پایدار نقشی کلیدی در دستیابی به توسعه پایدار ایفا می کند. با اتخاذ سیاست های مناسب و سرمایه گذاری در زمینه های مختلف، می توان به رشد اقتصادی عادلانه و فراگیر، استفاده پایدار از منابع و حفظ محیط زیست برای نسل های آینده دست یافت.

از جمله اهداف اقتصادی که در واحدهای صنعتی مدنظر است می توان به: افزایش سودآوری، کاهش هزینه های تولید اشاره کرد. سایر پارامترهای اقتصادی می توانند تابعی از این مقادیر باشند.

۱-۳-۲- اهداف محیط زیستی

اهداف محیط زیستی توسعه پایدار به طور خاص بر حفظ محیط زیست و منابع طبیعی برای نسل های آینده تمرکز دارند. برخی از اهداف کلیدی محیط زیستی توسعه پایدار عبارتند از:

حفاظت از تنوع زیستی: حفاظت از تنوع زیستی، شامل حفظ گونه های گیاهی و جانوری و اکوسیستم های مختلف، برای حفظ تعادل و پایداری محیط زیست ضروری است.

سناریوهای مختلف تغییرات قیمت تحت چارچوب پیشنهادی تطبیق داد. این کار برای تصمیم گیرندگان برای اجرای برنامه ریزی توسعه ریزش شبکه مقرون به صرفه و انعطاف پذیر با مزایای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای در درازمدت مفید است [9].

در پژوهش مختار و همکاران، مدل سه فاز ی یکپارچه و کمک به مدیران کارخانه برای انتخاب و سرمایه گذاری مناسب ترین پروژه ها ارائه شده است. ابزار پیشنهادی که مبتنی بر یک مدل تصمیم گیری چندمعیاره است، به مدیران سیمان در دستیابی به اهداف صرفه جویی در انرژی کمک می کند. این ابزار برای ۳ مورد آزمایش شده است که کاربرد آن را با داده های واقعی نشان می دهد که منجر به فهرست رتبه بندی فرصت ها برای هر یک از کارخانه ها می شود [10].

در مقاله صاحبی و همکاران، مدلی چندهدفه برای طراحی شبکه تأمین بیه انرژی از انواع مختلف زیست توده با در نظر گرفتن مفاهیم رابطه آب - انرژی و انتشار کربن ارائه گردیده است. مدل ارائه شده با استفاده از برنامه ریزی آرمانی مینی - ماکس^۱ برای استان های کشور ایران با افق ده ساله حل شده بود [11]. در پژوهشی دیگر که به بررسی زنجیره تأمین با رویکرد توسعه پایدار انجام شده و مدل سازی ریاضی گردیده است، زینب سازور و همکاران به ارائه یک زنجیره تأمین روبه جلو با تصمیم گیری متمرکز با سه هدف اقتصادی، زیست محیطی، اجتماعی پرداخته اند. استفاده از تکنیک های خطی سازی یک مدل برنامه ریزی خطی برای تعیین توأم سیاست بهینه موجودی و حمل ارائه شد [12].

الغصاب، ارزیابی و تجزیه و تحلیل یک سیستم کنترل انرژی تجدیدپذیر بلندمدت با محافظت سیستم در برابر حملات سایبری را در پژوهشش انجام داده و از تکنیک تاپسیس استفاده شده است [13].

در پژوهش فونسکا و همکاران، طراحی مفهومی سیستم های انرژی پراکنده با استفاده از یک استراتژی بهینه سازی چندهدفه می پردازد تا به طور هم زمان به جنبه های اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی در طراحی سیستم انرژی بپردازد. در ابتدا، مصرف آب و شاخص های ایمنی ذاتی از طریق دو مسئله بهینه سازی تک هدفی معرفی و ارزیابی شدند تا تجزیه و تحلیل ابعاد زیست محیطی و اجتماعی پایداری را افزایش دهند. سپس، چارچوبی شامل هزینه کل سالانه، انتشار دی اکسید کربن، مصرف آب، وابستگی به شبکه و شاخص ایمنی ذاتی برای انجام تحلیل چندهدفه استفاده شد [14].

تیلانی و همکاران، در مقاله ای با موضوع بهینه سازی چندهدفه برای تأمین تقاضای برق با استفاده از زمان بندی منابع تجدیدپذیر و منابع معمول، به مدل سازی تأمین برق از منابع پرداخته اند. این مسئله به صورت دوهدفه باهدف حداقل کردن هزینه و حداکثر کردن قابلیت اطمینان بود [15].

۱-۳-۲- شکاف پژوهشی و ضرورت تحقیق

پژوهش های قبلی عمدتاً بر روی تولیدکننده انرژی تمرکز داشته اند و برنامه ریزی و بهینه سازی برای تولید انرژی بوده است. ولی پژوهش حاضر از منظر مصرف کننده و در صدد پیدا کردن نقطه ایده آل برای مصرف کننده می باشد. هم چنین به طور هم زمان دو منبع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر را بررسی می کند و الزاماً به بررسی انتخاب یکی از این منابع و بهینه سازی بر

^۱. MINMAX

استفاده از داده‌های کارخانه مورد مطالعه مدل‌سازی ریاضی انجام و سپس اعتبارسنجی و صحت‌سنجی می‌گردد. مراحل انجام پژوهش به ترتیب ذیل است:

- مرور ادبیات مرتبط و مقالات مرتبط با مدل‌سازی انرژی با رویکرد پایدار و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر،
- شناسایی و تعریف ابعاد توسعه پایدار،
- شناسایی ابعاد و پارامترهای مرتبط با بعد اقتصادی،
- شناسایی ابعاد و پارامترهای مرتبط با بعد محیط زیستی،
- شناسایی ابعاد و پارامترهای مرتبط با بعد اجتماعی،
- طراحی و تهیه مدل مفهومی کار،
- مدل‌سازی ریاضی ابعاد شناسایی شده،
- صحت‌سنجی و اعتبارسنجی مدل با مطالعه مورد تحت بررسی.

۲-۱- روش حل مدل‌های چندهدفه

در تحقیق در عملیات، مسائلی که با چندین هدف متناقض سروکار دارند، به‌عنوان مسائل چندهدفه شناخته می‌شوند. مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه دنبال بهینه‌سازی چندین هدف هستند که ممکن است در تضاد با یکدیگر باشند. در این گونه مدل‌ها، هر هدف معمولاً به یک تابع هدف تبدیل می‌شود و با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و روابط، سعی می‌شود تا بهینه‌ی مشترک بین این هدف‌ها محاسبه گردد.

یکی از روش‌های حل مدل‌های چندهدفه روش وزنی می‌باشد. در روش وزن‌دهی برای حل مدل‌های برنامه‌ریزی چندهدفه، ابتدا به هر هدف یک وزن نسبت داده می‌شود. این وزن معمولاً نمایانگر اهمیت یا اولویت هر هدف در مسئله است. این وزن‌ها می‌توانند توسط تصمیم‌گیرنده یا کاربر تعیین شوند، بر اساس دانش فنی یا تجربه‌ی قبلی در مورد مسئله باشد.

سپس، با استفاده از این وزن‌ها، هر یک از اهداف مسئله به یک تابع هدف واحد تلفیق می‌شود. این تابع هدف واحد معمولاً به‌عنوان یک ترکیب خطی از اهداف با وزن‌های متناسب با اهمیت هر هدف تعریف می‌شود.

پس از تعریف تابع هدف واحد، مسئله به یک مسئله بهینه‌سازی تک هدف تبدیل می‌شود که می‌توان از الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی برای حل آن استفاده کرد. این روش برای مسائلی که تعداد اهداف کم و ترکیب خطی از اهداف مناسب است، بسیار کارآمد است. به طور خلاصه، روش وزن‌دهی اهداف در مدل‌های برنامه‌ریزی چندهدفه به ما کمک می‌کند تا اهداف مختلف را با در نظر گرفتن اهمیت وزن‌دهی شده آن‌ها، به طور هم‌زمان بهینه‌سازی و جوابی بهینه را برای مسئله محاسبه گردد.

در این پژوهش نیز باتوجه به اینکه به دنبال سه سناریو مختلف هستیم و باتوجه به ابعاد مطالعه موردی از روش وزن‌دهی برای حل مدل استفاده شده است. هم‌چنین در مدل‌های چندهدفه، نرمال‌سازی ضرایب تابع هدف به‌منظور تطبیق و توازن بین اهداف مختلف استفاده می‌شود. این نرمال‌سازی معمولاً باهدف تبدیل ضرایب تابع هدف به یک مقیاس مشترک یا مقیاس استاندارد انجام می‌شود که اهمیت هر تابع هدف به‌درستی در نظر گرفته شود. در این پژوهش با تقسیم هریک از ضرایب تابع هدف بر بیشینه آنها ضریب‌ها نرمال می‌شوند:

کاهش آلودگی: کاهش آلودگی هوا، آب‌و‌خاک از طریق اقداماتی مانند کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، تصفیه فاضلاب و مدیریت پسماند برای حفظ سلامت انسان و محیط‌زیست ضروری است.

مقابله با تغییرات آب‌وهوایی: کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و اتخاذ سیاست‌های مناسب برای مقابله با تغییرات آب‌وهوایی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی امروز جهان است.

استفاده پایدار از منابع: استفاده از منابع طبیعی مانند آب، خاک و جنگل‌ها به‌گونه‌ای که نیازهای نسل‌های آینده نیز تأمین شود، از اصول کلیدی توسعه پایدار است.

حفاظت از اکوسیستم‌های طبیعی: حفاظت از اکوسیستم‌های طبیعی مانند جنگل‌ها، تالاب‌ها و دریاها برای حفظ تعادل و پایداری محیط‌زیست ضروری است.

۱-۳-۳- اهداف اجتماعی

اهداف اجتماعی توسعه پایدار به طور خاص بر عدالت اجتماعی، رفاه انسان و توانمندسازی جوامع تمرکز دارند.

جهت جامعیت بخشیدن به مدل‌سازی، جنبه‌های اجتماعی لازم و مرتبط با برنامه‌ریزی انرژی، در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. چراکه بدون در نظر گرفتن جنبه‌های اجتماعی آمادگی جامعه جهت استفاده و استقبال از انواع مختلف انرژی و روش‌های تولید آن ممکن است نتایج غیرقابل‌اجرایی را داشته باشد. چرا که امروزه اولویت‌های فردی برای جامعه مصرف‌کننده انرژی با عنوان "نه در حیط خلوت من" به وجود آمده است که ضرورت پرداختن به تمایلات اجتماعی بیش‌ازپیش روشن می‌نماید [6] برخی از اهداف کلیدی اجتماعی توسعه پایدار عبارت‌اند از:

کاهش فقر و نابرابری: توسعه پایدار به دنبال ایجاد جوامعی عادلانه‌تر است که در آن همه افراد به فرصت‌های برابر اقتصادی و اجتماعی دسترسی داشته باشند.

ترویج آموزش و پرورش باکیفیت: آموزش و پرورش باکیفیت برای همه افراد جامعه، صرف‌نظر از جنسیت، نژاد، قومیت یا وضعیت اجتماعی و اقتصادی، ضروری است.

ترویج برابری جنسیتی: توسعه پایدار به دنبال ایجاد جوامعی است که در آن زنان و مردان از حقوق و فرصت‌های برابر برخوردار باشند.

ترویج سلامت و رفاه انسان: توسعه پایدار به دنبال ارتقای سلامت و رفاه همه افراد جامعه است.

توانمندسازی جوامع: توسعه پایدار به دنبال توانمندسازی جوامع برای حل مشکلات خود و دستیابی به اهداف آن‌ها است.

۲- روش پژوهش

برنامه‌ریزی و طراحی سیستم‌هایی جهت تأمین انرژی نیازمند تعریف یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده است. در این پژوهش علاوه بر بررسی مبانی نظری پژوهش و مطالعات انجام شده، سعی بر به‌کارگیری مفهوم توسعه پایدار است. برای به‌دست آوردن بهترین راه‌حل از مدل‌سازی ریاضی استفاده گردید. روش اصلی پژوهش مبتنی بر بررسی مبانی نظری و سپس ارائه مدل ریاضی چندهدفه برای بهینه‌سازی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر است. در واقع مقاله از نوع کاربردی و در مطالعه موردی با مطالعه میدانی و

(1)

$$\text{ضریب اولیه} = \frac{\text{ضریب نرمال شده}}{\text{max (ضرایب)}}$$

3- تعریف مسئله و مدل سازی ریاضی

در مسئله پیشرو به دنبال بهینه سازی مصرف انرژی در کارخانه تولیدی با رویکرد مبتنی بر توسعه پایدار هستیم. در اکثر مطالعات گذشته مسئله برنامه ریزی و مدل سازی ریاضی استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی که مبتنی بر توسعه پایدار بوده است، تمرکز بر توزیع کننده انرژی و مسئله تأمین انرژی مطرح بوده است. در مطالعه حاضر از دید مصرف کننده بررسی می گردد.

فرض اصلی دسترسی مصرف کننده به منابع انرژی تجدیدناپذیر به عنوان منبع اصلی تأمین انرژی خط تولید بوده و امکان سرمایه گذاری و بهره برداری از انرژی تجدیدپذیر به عنوان یکی دیگر از منابع انرژی وجود دارد. یعنی دسترسی به منابع انرژی فسیلی از جمله گاز و برق و در واقع این منابع، تأمین کنندگان اصلی انرژی صنایع در کشور ایران هستند. ولی باتوجه به محدودیت های سالیان اخیر در خصوص تأمین انرژی ناگزیر برنامه ریزی و استفاده از سایر منابع در دست اقدام قرار گرفته است. هم چنین رویکرد مبتنی بر توسعه پایدار و توجه به نسل آینده و محیط زیست می تواند در ترغیب استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی اثرگذار باشد. در نقطه مقابل از منظر اقتصادی، نظر واحدهای صنعتی به عنوان بنگاه های اقتصادی باید از نظر سودآوری و توجیه اقتصادی نیز برآورده گردد و ذی نفعان اقتصادی نیز مورد توجه قرار گیرد.

باتوجه به مباحث مطرح شده لزوم استفاده از رویکردی مبتنی بر توسعه پایدار که هر سه بعد اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی را در تصمیم گیری مدنظر داشته باشد، الزامی می باشد و می تواند در تهیه طرح های امکان سنجی و بررسی های استراتژیک واحدهای صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه نیز با تمرکز بر صنایع مادر به عنوان بخش عمده از صنعت کشور ایران که از مصرف کنندگان بارز انرژی هم هستند به مدل سازی استفاده بهینه از منابع انرژی پرداخته شده است.

تابع هدف اول: حداقل کردن هزینه استفاده از منابع انرژی. برابر با مجموع هزینه ثابت استفاده از هر منبع انرژی (تجدیدپذیر یا تجدیدناپذیر) و هزینه نگهداری منبع انرژی و کل هزینه متغیر استفاده از منبع انرژی انتخاب شده می باشد.

$$\text{Min } Z_1 = \sum_i A_i \cdot x_i^s + x_i \cdot c_i + H_i \cdot x_i^s + \sum_j A_j \cdot y_j^s + y_j \cdot c_j + H_j \cdot y_j^s \quad (2)$$

تابع هدف دوم: حداقل کردن مقدار گاز گلخانه ای منتشر شده و حداقل کردن ضرر ناشی از عدم رعایت قوانین زیست محیطی بالادستی. برابر با مجموع مقدار گاز گلخانه منتشر شده منبع انرژی و مقدار هزینه تحمیلی قوانین و مقررات الزامی زیست محیطی استفاده از منبع انرژی انتخاب شده (تجدیدپذیر یا تجدیدناپذیر) می باشد.

$$\text{Min } Z_2 = \sum_i LO_i \cdot x_i^s + x_i \cdot g_i + \sum_j LO_j \cdot y_j^s + y_j \cdot g_j \quad (3)$$

تابع هدف سوم: حداکثر کردن میزان رضایت ذی نفعان از به کارگیری منابع انرژی است. برابر است با حداکثر کردن میزان رضایت ذی نفعان در صورت استفاده از هریک از منابع انرژی می باشد

$$\text{Max } Z_3 = \sum_i SC_i \cdot x_i^s + \sum_j SC_j \cdot y_j^s \quad (4)$$

محدودیت بالانس: حداقل یک شاخص از هر لایه انتخاب می شود. درواقع این محدودیت، محدودیت بالانس می باشد.

$$\sum x_i + y_j \geq 1 \quad (5)$$

محدودیت تأمین حداقل دیماند مورد نیاز:

$$\sum_i x_i + \sum_j y_j \geq D \quad (6)$$

محدودیت رعایت حداکثر بودجه مورد نظر برای تأسیس نیروگاه:

$$\sum_i A_i \cdot x_i^s + \sum_j A_j \cdot y_j^s \leq B \quad (7)$$

دامنه متغیرها:

$$\begin{aligned} x_i^s &= 0 \text{ or } 1 \\ y_j^s &= 0 \text{ or } 1 \\ x_i &\geq 0 \\ y_j &\geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

مدل فوق به طور کلی برای مسائل تخصیص منبع انرژی با رویکرد توسعه پایدار در اکثر صنایع و به طور خاص صنایع مادر ارائه می گردد. تعریف هریک از متغیرها و نمایه های مدل به شرح جدول ۱ می باشد.

جدول 1 نمایه های به کاررفته شده در مدل ریاضی

نمایه	توضیحات
i	نوع منبع انرژی تجدیدناپذیر
J	نوع منبع انرژی تجدیدپذیر
x_i^s	ام برابر ۱ و عدم انتخاب منبع انرژی تجدیدناپذیر انتخاب آن برابر
y_j^s	ام برابر ۱ و عدم انتخاب منبع انرژی تجدیدپذیر انتخاب آن برابر
x_i	مقدار انرژی مصرفی از منبع انرژی تجدیدناپذیر
y_j	مقدار انرژی مصرفی از منبع انرژی تجدیدپذیر
D	تقاضای انرژی واحد صنعتی در طی دوره
A	هزینه ثابت برای استفاده از منابع انرژی
C	هزینه متغیر برای استفاده از منابع انرژی
H	هزینه نگهداری منابع انرژی طی دوره
g	مقدار گاز گلخانه منتشر شده برای تولید یک واحد انرژی
LO	مقدار رعایت قوانین و الزامات قانونی زیست محیطی استفاده از منابع انرژی
SC	مقدار رضایت ذی نفعان از استفاده منبع انرژی
B	حداکثر بودجه در نظر گرفته برای هزینه های ثابت تأمین انرژی

4- مطالعه موردی و اعتبارسنجی مدل

علاوه بر مشوق‌های ذکر شده، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در کارخانه‌های سیمان موجب بهبود برند و تصویر اجتماعی کارخانه می‌گردد. درواقع استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به بهبود برند و تصویر اجتماعی کارخانه‌های سیمان در بین مشتریان و جامعه کمک کند. در حال حاضر، تعدادی از کارخانه‌های سیمان در ایران در حال استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر هستند. به‌عنوان مثال، کارخانه سیمان هرمزگان از انرژی خورشیدی و کارخانه سیمان اصفهان از انرژی بادی برای تأمین بخشی از برق موردنیاز خود استفاده می‌کنند. باتوجه به مزایای متعددی که استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای کارخانه‌های سیمان به همراه دارد، انتظار می‌رود که استفاده از این منابع در سال‌های آینده در این صنعت افزایش یابد. در این پژوهش تأمین برق برای یک سال کارخانه سیمانی با ظرفیت یک میلیون تن تولید سالانه سیمان مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این کارخانه سیمان تأمین‌کننده اصلی برق، برق سراسری از شبکه سراسری توزیع برق می‌باشد (سوخت فسیلی برای تولید برق استفاده شده است). ولی باتوجه به محدودیت‌های برق سنوات اخیر و ناترازی توزیع برق در کشور و ازدست‌رفتن بخشی از تولید و به‌تبع آن سود کارخانه‌های صنعتی از این محدودیت‌ها، احداث نیروگاه تولید برق در دستور کار قرار گرفته است. دو گزینه برای تولید برق موردنیاز بررسی می‌شود. گزینه اول تولید برق با احداث نیروگاه گازی و دیگری احداث نیروگاه خورشیدی می‌باشد. از جمله اهداف توسعه پایدار در صنعت سیمان می‌توان به رعایت قوانین و مقررات ابلاغی و هم چنین رضایت ذی‌نفعان از طرح‌های جدید اشاره نمود. در این مطالعه اهداف محیطی زیستی مدنظر باتوجه به ماهیت تولیدی و تولید پیوسته کاهش گازهای گلخانه‌ای مدنظر گرفته شده است. هم چنین می‌توان اثر منفی بر کاهش منابع انرژی سوخت‌های فسیلی نیز مدنظر قرارداد. با بومی‌سازی مدل ارائه شده در این پژوهش در کارخانه مورد مطالعه، مدل ریاضی به شرح ذیل به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_1 = & 1950 \cdot x_1 + 240000000000 \cdot x_2^s \\ & + 8400 \cdot x_2 + 300000000000 \cdot y_3^s \\ & + 1500 \cdot y_3 + 28050 \cdot (11000000 - y_3) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{Min } Z_2 = 550 \cdot x_1 + 550 \cdot x_2 \quad (10)$$

$$\text{Max } Z_3 = 1 \cdot x_1^s + 5 \cdot x_2^s + 9 \cdot y_3^s \quad (11)$$

$$x_2^s + y_3^s \leq 12 \quad (12)$$

$$x_1 = K_1 \cdot x_1^s \quad (13)$$

$$x_2 = K_2 \cdot x_2^s \quad (14)$$

$$y_3 = K_3 \cdot y_3^s \quad (15)$$

$$x_1 + x_2 + y_3 \geq 110000000 \quad (16)$$

$$x_2 + y_3 \geq 18333333 \quad (17)$$

$$\begin{aligned} 0 \cdot x_1^s + 240000000000 \cdot x_2^s + 300000000000 \\ \cdot y_3^s \leq 300000000000 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \{x_1^s, x_2^s, y_3^s\} = N = \{0, 1, 2, 3, \dots\} \\ x_1 \geq 0 \\ x_2 \geq 0 \\ y_3 > 0 \\ K_2 > 0 \\ K_3 > 0 \end{aligned} \quad (19)$$

جدول ۲ نمایه‌های به‌کاررفته‌شده در مدل ریاضی مطالعه موردی

به‌منظور اعتبارسنجی مدل ارائه‌شده در پژوهش، کاربرد مدل در صنعت سیمان به‌عنوان یکی از صنایع مادر کشور ایران ارائه می‌گردد. بازار سیمان نقش اساسی در رشد اقتصادی کشورهای در حال توسعه دارد. این سهم را می‌توان با ارزش افزوده تولید سیمان به تولید داخلی ملی و فرصت‌های شغلی نشان داد. تقاضا برای سیمان در ساخت‌وساز باعث تولید می‌شود و بدون هیچ مانعی در سمت تقاضا، انتظار می‌رود تولید سیمان به طور پیوسته رشد کند. در دهه گذشته، تولید سالانه به‌سرعت افزایش یافته و به 3/4 میلیارد تن رسیده است. تولید سیمان نیازمند فرایندهای انرژی بر است و تقریباً 15٪ از کل تقاضای انرژی در صنعت را مصرف می‌کند. به طور متوسط برای تولید یک تن سیمان، ۳۰۴ کیلووات انرژی حرارتی (در فرایند خشک) و ۱۱۰ کیلووات ساعت انرژی الکتریکی موردنیاز است. علاوه بر این، تولید یک تن سیمان ۰.۷۳-۰.۹۹ تن دی‌اکسید کربن آزاد می‌کند که در درجه اول به نسبت کلینکر به سیمان و عوامل دیگر بستگی دارد [17].

طبق مطالعات صورت‌گرفته توسط توکلی، به‌منظور کاهش گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۳۰، بهترین و منطقی‌ترین گزینه در کاهش سهم سوخت‌های فسیلی در سبد انرژی تا ۴۰٪ و اتکا بر منابع تجدیدپذیر انرژی است [17]. نتایج حاصل از پژوهش صادقی و همکاران، نشان داد که با افزایش یک‌درصدی تولید الکتریسته از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان در بلندمدت ۰.۳۱٪ و در کوتاه‌مدت 0/07 از انتشار کربن دی‌اکسید به‌عنوان اصلی‌ترین گاز گلخانه‌ای کاست [18].

در مقایسه، نیروگاه‌های تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های بادی و خورشیدی هیچ گاز گلخانه‌ای منتشر نمی‌کنند. صنایع انرژی‌بر که سال‌ها نگرانی چندانی از نظر تأمین برق در تابستان نداشتند از یک‌سو تأثیر ناترازی برق را در کسب‌وکارشان می‌بینند و از سوی دیگر بر اساس ماده ۱۶ قانون جهش تولید دانش‌بنیان باید سالانه یک درصد از انرژی مصرفی‌شان را از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین کنند، تا ظرف ۵ سال این میزان به 5٪ برسد. در غیر این صورت، 1٪ تا 5٪ از برق مصرفی این صنایع با نرخ تجدیدپذیر محاسبه و در قبض آن‌ها اعمال می‌شود. راهکاری که هرچند ممکن است منجر به استقبال برخی صنایع از تجدیدپذیرها شود، اما به دلیل نبود مشوق‌های لازم و در نظر نگرفتن سازوکارهای اجرایی به نتیجه موردنظر منتهی نمی‌شود. به‌منظور استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مشوق‌های مختلفی برای کارخانه‌های سیمان در نظر گرفته شده است. این مشوق‌ها شامل موارد زیر می‌شوند:

معافیت‌های مالیاتی: معافیت مالیاتی برای سود حاصل از سرمایه‌گذاری در احداث و بهره‌برداری از نیروگاه‌های تجدیدپذیر - معافیت گمرکی برای واردات تجهیزات نیروگاه‌های تجدیدپذیر،

تسهیلات بانکی: اعطای تسهیلات بانکی با نرخ سود پایین برای احداث نیروگاه‌های تجدیدپذیر - ارائه ضمانت‌نامه‌های بانکی برای سرمایه‌گذاران در پروژه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر،

تعرفه‌های خرید تضمینی: تضمین خرید برق تولیدی از نیروگاه‌های تجدیدپذیر توسط دولت با قیمت‌های توافقی، سایر مشوق‌ها: اولویت در دریافت مجوز احداث نیروگاه-ارائه زمین رایگان برای احداث نیروگاه - اعطای گواهی‌نامه‌های انرژی پاک.

جبران خواهد کرد و علاوه بر این سهام داران و جامعه نیز رضایت نسبی خواهد داشت. در بدترین حالت از منظر اجتماعی استفاده از برق سراسری بوده که سطح رضایت ۱ لحاظ می گردد.

برای محدودیت های تعریف شده در مدل که بر اساس مفروضات مطالعه موردی و داده های واقعی است، توضیحات به شرح ذیل می باشد:

کل دیماندهای لحظه ای برق برای کارخانه حداکثر ۱۸ مگاوات است که از این مقدار حداکثر ۱۲ مگاوات از تأسیس نیروگاه تأمین شود و حداقل ۶ مگاوات سراسری باشد. (معادله ۱۲)

در صورت استفاده از منابع انرژی بدیهی است دیماندهای لحظه ای آنها باید مخالف سفر باشد و این مهم در معادلات ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است.

برق مورد نیاز برای یک سال و تولید یک میلیون تن سیمان برابر با ۱۱۰ میلیون کیلووات ساعت است. (معادله ۱۶)

باتوجه به سوابق سال های گذشته و محدودیت برق سراسری کارخانه سیمان، حداقل برای دو ماه یعنی یک ششم برق مورد نیاز سالانه از یکی از نیروگاه های خود تأمین استفاده گردد. (معادله ۱۷)

حداکثر بودجه در نظر گرفته شده برای تأسیس نیروگاه ۳۰۰ میلیارد تومان می باشد. (معادله ۱۸)

متغیرهای x_i^f ها مربوط به دیماندهای نیروگاه است که اعداد صحیحی از ۰ تا ۱۸ هستند. x_i ها نیز برق مصرفی هر نیروگاه است که پیوسته و بزرگتر از صفر هستند و مقادیر K هم اعداد ثابت بزرگتر از صفر باید باشند. (معادلات ۱۹).

۵- حل مدل و تفسیر نتایج

یکی از روش های حل دقیق مسائل چندهدفه استفاده از روش وزنی است. در این روش، به هر یک از اهداف، وزن عددی (بین ۰ و ۱) اختصاص داده می شود. سپس، مجموع وزنی مقادیر هدف در هر راه حل محاسبه می شود و راه حلی که این مجموع را به حداقل برساند، به عنوان راه حل بهینه در نظر گرفته می شود. در مسئله حاضر نیز با سه سناریو اقتصادمحور، محیط زیست محور و اجتماعی با سه مجموعه ضریب مسئله حل و نتایج بررسی می گردد. در ابتدا برای حل راحت تر مدل باید محدودیت های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ که به صورت غیرخطی هستند، خطی شوند. برای این کار باتوجه به اینکه می توان x_i^f ها را بر حسب x_i محاسبه کرد. در مدل مقادیر را جایگزین می کنیم. در واقع با محاسبه دیماندهای لحظه ای معادل مصرف برق کل با احتساب ۳۰۰ روز کاری در صنعت سیمان و ۲۴ ساعت روزانه، هزینه های ثابت تقسیم بر ۷۲۰۰ (حاصل ضرب ۳۰۰ در ۲۴) خواهند شد و متغیر x_i و y_i جایگزین x_i^f و y_i^f می شوند و محدودیت های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ حذف و مدل خطی می شود. حال مدل به راحتی با استفاده از نرم افزاری نظیر گمز یا لینگو قابل حل خواهد بود. از دیگر مشکلات مدل سه هدفه پیشرو مقیاس های مختلف سه تابع هدف می باشد. تابع هدف اول از جنس هزینه و واحد ریال می باشد، تابع هدف دوم مقدار انتشار گاز گلخانه ای و بر مقیاس گرم می باشد و تابع هدف سوم در واقع میزان رضایت مطلوبیت که امتیاز است. برای رفع این مشکل و اسکار سازی تابع های هدف، از روش توضیح داده شده در معادله ۱ استفاده می گردد. بعد از خطی سازی

نمایه	توضیحات
$I=1$	منبع انرژی تجدیدناپذیر ۱: شرکت توزیع برق سراسری
$I=2$	منبع انرژی تجدیدناپذیر ۲: نیروگاه خود تأمین گازی
$j=2$	۱: استفاده از نیروگاه خورشیدی منبع انرژی تجدیدپذیر
$J=3$	نوع منبع انرژی تجدیدپذیر
x_1	میزان انرژی مصرفی از برق سراسری
x_2	میزان انرژی مصرفی از نیروگاه گازی
y_3	میزان انرژی مصرفی از نیروگاه خورشیدی
c_1	متوسط هزینه هر کیلووات برق مصرفی سراسری = ۱۹۵۰ ریال
c_2	هزینه هر کیلووات برق مصرفی نیروگاه گازی = ۱۰۰۰۰ ریال (برابر است با هزینه گاز مصرفی نیروگاه)
c_3	هزینه هر کیلووات برق مصرفی نیروگاه خورشیدی = ۰ ریال
A_1	هزینه اولیه و نگهداری استفاده از برق سراسری = ۰ ریال
A_2	هزینه اولیه و نگهداری تأسیس نیروگاه گازی به ازای هر مگاواتی = ۲۴۰ میلیارد ریال
A_3	هزینه اولیه و نگهداری تأسیس نیروگاه خورشید به ازای هر مگاواتی = ۳۰۰ میلیارد ریال
g_1	مقدار دی اکسید کربن منتشر شده برای تولید هر کیلووات برق تولیدی سراسری = ۵۵۰ گرم
g_2	مقدار دی اکسید کربن منتشر شده برای تولید هر کیلووات برق تولیدی از نیروگاه گازی = ۵۵۰ گرم
g_3	مقدار دی اکسید کربن منتشر شده برای تولید هر کیلووات برق تولیدی از نیروگاه خورشیدی = ۰ گرم
SC_1	مقدار پذیرش اجتماعی استفاده از انرژی فسیلی برق سراسری
SC_2	مقدار پذیرش اجتماعی استفاده از انرژی فسیلی نیروگاه گازی
SC_3	مقدار پذیرش اجتماعی استفاده از انرژی خورشیدی

متغیر LO که در مدل اولیه ارائه گردید، در مطالعه موردی در تابع هدف اول دیده شده است. کارخانه های سیمان ملزم به استفاده به مقدار ۱٪ انرژی برق خود از انرژی سبز هستند که این رقم تا ۵ سال آینده به ۵٪ خواهد رسید. برای سال ۱۴۰۳، هر کیلووات برق سبز برابر با ۳۰۰۰۰ ریال است و در واقع در صورت استفاده از نیروگاه خورشیدی تا ۱٪ برق مورد نیاز (به مقدار ۱۱۰۰۰۰۰ کیلووات ساعت) باید با هزینه حدود ۲۳۰۵۰ ریال محاسبه گردد.

در تابع هدف دوم مقدار دی اکسید کربن منتشر شده به ازای هر کیلووات ساعت برق مصرفی از منابع انرژی شماره ۱ و ۲ که سوخت فسیلی هستند برابر با ۵۵۰ گرم لحاظ شده است.

در تابع هدف سوم، سطح رضایت ذی نفعان و به طور عمده جامعه مرتبط با کارخانه بر اساس طیف لیکرت و بر اساس مصاحبه موردی و مشاهدات تعیین شده است. به این صورت که با استفاده از منبع انرژی خورشیدی بالاترین سطح رضایت برابر ۹ و در صورت استفاده از منبع انرژی خود تأمین گازی سطح رضایت ۵ لحاظ می گردد. در واقع اگر چه از منظر زیست محیطی بین منابع انرژی اول و دوم تفاوت معناداری وجود ندارد ولیکن دسترسی خود کارخانه به نیروگاه تولید برق علاوه بر جلوگیری از فرصت ازدست رفته تولید محصول در زمان های محدودیت برق سراسری، بخشی از ناترازی برق منطقه مسکونی را

مدل و نرمال سازی تابع های هدف بر اساس سناریوهای ارائه شده و با استفاده از نرم افزار گمز¹ مدل حل می شود.

در سناریو اول - اقتصادمحور: هدف اول وزن بالاتری نسبت به دو هدف دیگر تخصیص داده می شود و برای اهداف دوم و سوم وزن یکسان در نظر گرفته می شود. در این حالت بردار وزن اهداف برابر است با:

$$w_1 = (0.8, 0.1, 0.1) \quad (20)$$

سناریو دوم- محیط زیست محور: به هدف دوم وزن بالاتر تخصیص داده می شود. در این حالت بردار اوزان اهداف برابر است با:

$$w_2 = (0.1, 0.8, 0.1) \quad (21)$$

سناریو سوم- جامعه محور: به هدف دوم وزن بالاتر تخصیص داده می شود. در این حالت بردار اوزان اهداف برابر است با:

$$w_3 = (0.1, 0.1, 0.8) \quad (22)$$

نتایج حاصل از حل مدل چندهدفه به روش وزنی و بر اساس سه سناریو بالا به شرح جدول ۳ می باشد.

بر اساس جواب های به دست آمده مشخص می شود اگر با رویکرد اقتصادی به مسئله تأسیس نیروگاه برای تأمین برق نگاه کنیم و وزن بیشتر به هدف اقتصادی تخصیص داده شود. جواب ایده آل تنها تأسیس یک نیروگاه ۶ مگاواتی خورشیدی را برای تأمین برق پیشنهاد می کند، و مابقی برق مورد نیاز از برق سراسری تأمین گردد.

همچنین نتایج نشان می دهد برای دو سناریو دوم و سوم جواب بهینه برابر است و این می تواند به دلیل محدودیت بودجه در نظر گرفته شده برای تأسیس نیروگاه باشد که امکان سرمایه گذاری بیشتر را نخواهد داد. از طرفی نتایج نشان می دهد با توجه به بحث محیط زیستی و هم چنین جنبه اجتماعی سرمایه گذاری در بخش نیروگاه خورشیدی بر تأسیس نیروگاه گازی اولویت دارد.

جدول ۳ نتایج حل سه مدل بر اساس وزن های سه سناریو تعریف شده

	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳
x_1^s	۱۲	۶	۶
x_2^s	۰	۰	۰
y_3^s	۶	۱۰	۱۰
x_1	۹۱۶۶۶۷۰	۳۷۹۹۸۸۵۰	۳۷۹۹۸۸۵۰
x_2	۰	۰	۰
y_3	۱۸۳۳۳۳۳۰	۷۲۰۰۱۱۵۰	۷۲۰۰۱۱۵۰
Z_1	۲۰۰۶۲۵۰۰۰۰۰۰	۳۱۸۲۱۰۰۰۰۰۰۰	۳۱۸۲۱۰۰۰۰۰۰۰
	۰	۰	۰
Z_2	۵۰۴۱۶۶۶۸۵۰۰	۲۰۸۹۹۳۶۷۵۰۰	۲۰۸۹۹۳۶۷۵۰۰
Z_3	۶۶	۹۶	۹۶

۶- نتیجه گیری و پیشنهادها

در سالیان اخیر باتوجه به مشکلات محیط زیستی ناشی از انتشار گازهای گلخانه ای و هم چنین محدودیت حامل های انرژی در برخی فصول، بحث تأسیس نیروگاه خود تأمین برق در صنایع کشور مطرح و مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی هزینه اولیه بالای احداث نیروگاه به عنوان محدودیتی بزرگ برای این مهم است و از طرف دیگر قوانین بالادستی و وضع جریمه برای عدم استفاده از سوخت پاک برای صنایع به عنوان مشوقی برای تأسیس نیروگاه می تواند باشد.

در مطالعات پیشین تنها از دید تولیدکننده انرژی سعی در تصمیم گیری شده بود و همچنین در صورت توجه به مقوله اقتصادی به تنهایی تأسیس نیروگاه های خورشیدی در کوتاه مدت مسلماً در دستور کار نخواهند بود. از این رو در پژوهش حاضر سعی گردید بر اساس رویکرد توسعه پایدار و با در نظر گرفتن ابعاد محیط زیستی و اجتماعی در کنار بعد اقتصادی مدل ریاضی چندهدفه برای تصمیم گیری تأسیس نیروگاه و تأمین برق صنایع مادر ارائه شود.

هدف اول به دنبال حداقل کردن هزینه تأمین برق بوده است و با رویکرد اقتصادی تعریف شد. هدف دوم با رویکرد محیط زیستی به دنبال حداقل کردن انتشار گازهای گلخانه ای می باشد و هدف سوم نیز با رویکرد توجه به ذی نفعان جامعه، به دنبال حداکثر کردن میزان رضایت ذی نفعان می باشد. مدل ارائه شده به صورت سه هدفه و بر اساس محدودیت های بودجه، دیمانند مورد نیاز کل، دیمانند لحظه ای و... تعریف گردید. برای بررسی عملکرد مدل و سنجش کارایی آن در مطالعه موردی بر اساس داده های یک کارخانه سیمان یک میلیون تنی مدل بومی سازی و ارائه گردید. باتوجه به ماهیت مدل ریاضی که مسئله برنامه ریزی عدد صحیح مختلط غیر خطی بود، بعد از خطی سازی با روش وزنی حل گردید. بر اساس سه سناریو اقتصادمحور، محیط زیست محور و جامعه محور وزن تخصیص داده شد و مدل حل و نتایج مقایسه گردید.

بر اساس نتایج به دست آمده از مدل مطالعه موردی، تأمین ۶ مگاوات برق لحظه ای از نیروگاه سراسری برق و حدود ۳۵٪ برق مورد نیاز از برق سراسری و هم چنین تأسیس نیروگاه ۱۰ مگاواتی خورشیدی و تأمین ۶۵٪ برق مورد نیاز به عنوان ایده آل ترین راهکار ارائه گردید.

برای توسعه مدل در تحقیقات آتی می توان بازه زمانی سرمایه گذاری را بلندمدت تر یا متغیر و پویا در نظر گرفت و مدل بر این اساس تهیه گردد. برای حل مدل در ابعاد بالاتر می توان از الگوریتم های فراابتکاری نظیر الگوریتم ژنتیک اصلاح شده نیز استفاده کرد و جواب های پارتویی به دست آمده را بررسی نمود. همچنین در مدل سازی ابعاد اجتماعی می توان تابع هدف را گسترش داد و معیارهای دیگری نظیر نرخ بیکاری و... را در تابع هدف اجتماعی استفاده کرد. برای این منظور می توان از ابزارهایی نظیر پرسش نامه نیز استفاده نمود.

۷- مراجع

- [1] M. M. Wagh and V. V. Kulkarni, Modeling and optimization of integration of renewable energy resources (RER) for minimum energy cost, minimum CO2 emissions and sustainable development, in recent years: A review, *Materials today: proceedings*, Vol. 5, No. 1, pp. 11–21, 2018.
- [2] F. Fathipour, M. Saidi-Mehrabad, and H. Shakouri Ganjavi, Sustainable energy planning based on stochastic P-Robust, *Journal*

- of industrial engineering research in production systems, Vol. 7, No. 14, pp. 1-11. (in Persian), 2019.
- [3] H. Dehghan, *Sustainable modeling of Iran's electricity industry*, Dissertation for receiving a specialized doctorate in industrial engineering. Tehran: Tarbiat Modares University 2021. (in Persian)
- [4] M. Nakhaeinejad, M. Abbasi, Y. Zare Mehrjerdy, and A. Asadi Zarch, Greenhouse gas emission reduction model: an integrated approach of linear programming and system dynamics The case of Iranian power plants, *Research in production and operations management*, Vol. 13, No. 1, pp. 51-77, 2022. (in Persian)
- [5] *Modeling and optimization of integration of renewable energy*. <https://www.energyinformation.ir/2016-04-20-05-26-30/584-2014-10-13-14-49-57>.
- [6] F. Fathipour, Sustainable energy planning considering the concept of energy security in conditions of uncertainty, *Doctoral thesis of Industrial Engineering*, University of Science and Technology. (in Persian)
- [7] H. Fazlollahab, Renewable Energy Supply Chain Planning considering Sustainable Production Value, *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, Vol. 10, No. 21, pp. 135-149, 2023. (in Persian)
- [8] M. Rabe, Y. Bilan, K. Widera, and L. Vasa, Application of the linear programming method in the construction of a mathematical model of optimization distributed energy, *Energies*, Vol. 15, No. 5, pp. 1-15, 2022.
- [9] K. Pang, J. Zhou, S. Tsianikas, D. W. Coit, and Y. Ma, Long-term microgrid expansion planning with resilience and environmental benefits using deep reinforcement learning, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 191, p. 114068, 2024.
- [10] A. Mokhtar and M. Nasooti, A decision support tool for cement industry to select energy efficiency measures, *Energy Strategy Reviews*, Vol. 28, p. 100458, 2020.
- [11] Hadi Sahebi, N. Mahjoub, and A. Teymouri, Mathematical modelling of second and third generations of biomass networks considering water-energy nexus, *Quarterly journal of energy policy and planning research*, Vol. 5, No. 2, pp. 7-39, 2019. (in Persian)
- [12] Z. Sazour, Feasibility planning model of sustainable supply chain of perishable products with economic, environmental and social goals, *Journal of Sharif Industrial Engineering and Management*, Vol. 1, No. 2, p. 2016. (in Persian)
- [13] M. Alghassab, Quantitative assessment of sustainable renewable energy through soft computing: Fuzzy AHP-TOPSIS method, *Energy Reports*, Vol. 8, pp. 12139-12152, 2022.
- [14] J. D. Fonseca, J. M. Commenge, M. Camargo, L. Falk, and I. D. Gil, Sustainability analysis for the design of distributed energy systems: A multi-objective optimization approach, *Applied Energy*, Vol. 290, p. 116746, 2021.
- [15] N. Khalilpour Tilami, J. Rezaeian, and I. Mahdavi, Multi-objective optimization of schedule to meet the demand for electricity using renewable sources and conventional sources TT, *iejqp*, Vol. 7, No. 1, pp. 102-113, 2018. (In Persian)
- [16] G. H. Brundtland, *Our common future world commission on environment and development*, Oxford University Press, 1987.
- [17] A. Tavakoli, Decomposition and Analysis of Driving Forces of GHG Emissions and Emission Reduction Potentials in Iran, *Quarterly Energy Economics Review*, Vol. 15, No. 60, pp. 77-108, 2019. (in Persian)
- [18] H. Sadeghi, M. Noori shirazi, and K. Biabany Khameneh, Electricity generation from renewable sources and environmental emissions in Iran TT, *NECjournals*, Vol. 17, No. 3, 2014.