فصل‌نامه مطالعات اقتصاد انرژی/ سال بیست‌ویکم / شماره ۸۴/ بهار ۱۴۰۴/ صفحات ۲۶۶-۲۳۵

مقایسه روش‌های بهینه‌سازی تک هدفه (GA) و چند هدفه (NSGA-II) در بهینه‌سازی سبد تولید انرژی برق ایران

زهرا پورخاقان شاهرضایی
دانشجوی دکتری اقتصاد نفت و گاز، دانشکده اقتصاد و حسابداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز،
zahrapourkhaghan@gmail.com
علی اصغر اسماعیل‌نیا گتابی[1]
استادیار، دانشکده اقتصاد و حسابداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، ali.ismaeel_niyaketabi@iauctb.ac.ir
سید کمیل طیبی
استاد، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، ایران، sk.tayebi@ase.ui.ac.ir
مرجان دامن کشیده
استادیار، دانشکده اقتصاد و حسابداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، m.damankeshideh@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴

چکیده

سهولت تبدیل برق به سایر انرژی‌ها موجب وابستگی شدید فعالیت‌های بشر به آن شده است. مسائل زیست‌محیطی، محدودیت منابع، توزیع ناعادلانه منابع و وابستگی شدید اقتصاد کشورها به انرژی موجب توجه بیشتر به بهینه‌سازی ترکیب منابع تولیدکننده برق شده است. همچنین باتوجه به اینکه در سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی‌های جامع، اهداف متعدد و متفاوتی مطرح می‌شود که گاها درتضاد با یکدیگر هستند؛ این موضوع که بهینه‌سازی ترکیب بهینه سبد تولید انرژی برمبنای چه‌هدفی انجام شود، بسیار مهم است. در این پژوهش سبد تولید برق، ترکیبی از گروه انرژی‌های فسیلی، تجدیدپذیر و هسته‌ای در نظر گرفته شده است و بهینه‌سازی با بکارگیری روش الگوریتم‌ژنتیک (در ۷۰۰رشته ۲۰۰ کروموزمی) با استفاده از نرم‌افزار متلب در دو حالت تک‌هدفه (GA) و چندهدفه (NSGA-II) برای ایران طی دوره ۱۴۰۳-۱۳۹۷ مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. ترکیب سبدهای بهینه‌سازی شده با روش بهینه‌سازی چند هدفه، نسبت به روش‌های تک هدفه از توازن کمتری برخوردار است، زیرا در این روش مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها معرفی می‌شود که هرکدام، یکی از اهداف را در سطح قابل قبولی برآورده می‌کنند. به‌عبارتی دستیابی به‌نقاط بهینه‌عمومی محتمل‌تر از حالت تک‌هدفه است؛ زیرا بهینه‌سازی تک‌هدفه معمولا نقاط بهینه‌محلی را معرفی می‌کند و موجب گمراهی و دورشدن از هدف اصلی می‌شود. از این رو قویا بکارگیری بهینه‌سازی چندهدفه جهت بهینه‌سازی سبد تولید برق کشور توصیه می‌شود.

طبقه‌بندی JEL: C٦١، O١٣، Q٤٣، Q١
کلید واژه‌ها: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی تک هدفه، بهینه‌سازی چند هدفه، سبد انرژی برق.

---

۱. نویسنده مسئول

۱- مقدمه

انرژی از انواع مختلفی تشکیل شده و منابع تولید آن نیز گوناگون هستند، اما به طور کلی می‌توان فرض کرد که انرژی توسط دو منبع فسیلی و غیرفسیلی تولید می‌شود. وابستگی جوامع به انرژی از کانال مصرف انرژی و یا از کانال تولید و درآمدزایی از منابع انرژی است. در ایران دو حالت در بهره برداری از منابع انرژی مطرح است؛ از یک طرف رشد و توسعه اقتصادی و بهبود سطح زندگی مردم ایجاب می‌کند که انرژی لازم برای تداوم فعالیت‌های تولیدی و گسترش آن‌ها تامین شود (کانال مصرف). از طرف دیگر اقتصاد کشور به درآمدهای ارزی حاصل از فروش نفت و بخش‌های اقتصادی و اجتماعی به بخش نفت بور انکارناپذیری وابسته است (کانال تولید و درآمدزایی از منابع). همچنین عدم توازن مالکیت نفت خام در جهان و استفاده از نفت به عنوان یک ابزار سیاسی، وابستگی بالای صنایع (حداقل برای یک دوره طولانی) به نفت خام و نوسانات قیمت آن موجب شده که ایجاد وقفه در تامین این انرژی تأثیر معنی‌داری بر تولید و اقتصاد جوامع داشته باشد. به عبارت دیگر نوسانات قیمت در بازار انرژی‌های فسیلی و خطراتی که در پی آن، کسب وکارها را تهدید می‌کند (چه تولید کننده و چه مصرف کننده) باعث شده رویکرد تازه‌ای نسبت به تامین انرژی شکل بگیرد. در واقع مصرف انرژی اولیه از یک سو و محدودیت منابع انرژی فسیلی و توزیع نامتوازن آن از سوی دیگر موجب گرایش جدی‌تر در بکارگیری سایر انرژی‌ها شده است.

افزایش تقاضا برای انرژی، منجر به افزایش مصرف سوخت و همچنین افزایش گازهای گلخانه‌ای شده است (غلامی و همکاران ۱۴۰۲). این افزایش در انتشار گازهای گلخانه‌ای یک تهدید جدی است که منجر به تغییرات آب و هوایی می‌گردد. پیش بینی شده است که دمای زمین طی سالیان آتی به دلیل افزایش گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسیدکربن بین ۳/۸ تا ۷ درجه سانتی گراد افزایش یابد (سلیمی و همکاران، ۱۴۰۲). مصرف سوخت‌های فسیلی منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی هوا می‌شود که اثرات منفی بر سلامت انسان‌ها و محیط زیست دارد. این گازها باعث بارش باران‌های اسیدی و آلودگی منابع آب می‌گردد و تأثیرات نامطلوبی بر اکوسیستم‌ها و نسل‌های آینده خواهد داشت (ریپل[1] و همکاران، ۲۰۲۳).

1. Ripple

از این رو با توجه به آلودگی رو به رشد محیط‌زیست در اثر بکارگیری انرژی‌های فسیلی و به‌منظور کاهش آلودگی‌های مختلف ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی و استفاده بهینه از نفت، گاز و زغال‌سنگ، بکارگیری انرژی‌های کمتر آلاینده و تجدیدپذیر بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین ضروری است به انرژی‌های غیرفسیلی و تجدیدپذیر که منابع سازگار با محیط هستند، توجه بیشتری شود. موضوع آلایندگی از اهمیت جهانی برخوردار است و برای رسیدن به منبع انرژی پایدار نه تنها ماهیت منبع بلکه تأثیرات زیست محیطی آن نیز باید مورد بررسی قرار گیرد. پژوهشگران بر این باورند که با توجه به کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی و پیامدهای زیست محیطی ناشی از مصرف این منابع، انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی‌های خورشیدی، بادی و زمین گرمایی به عنوان گزینه‌های مطلوب و پایدار برای تامین انرژی در آینده مطرح خواهند بود (هولچک[1] و همکاران، ۲۰۲۲).

انرژی‌های کمتر آلاینده و تجدیدپذیر با بهره‌وری‌های متفاوت می‌توانند در اکثر بخش‌ها جایگزین سوخت‌های فسیلی شوند، اما بکارگیری این انرژی‌ها معمولابه دانش فنی و سرمایه‌گذاری بالایی نیاز دارد. فن‌آوری‌های مختلف انرژی از نظر ویژگی‌های فنی، اقتصادی و زیست محیطی تفاوت‌های زیادی دارند. این پیچیدگی‌ها هر کشور را ملزم می‌کند که با توجه به شرایط خاص خود، تکنولوژی مناسب را ارزیابی و انتخاب نماید (ژائو گوانگ[2]، ۲۰۲۳).

افزایش قیمت نفت خام بر استراتژی‌های سرمایه‌گذاری در انرژی در کشورهای مصرف‌کننده و تولیدکننده تأثیر قابل توجه‌ای دارد. قیمت بالای نفت اغلب منجر به افزایش سرمایه‌گذاری در منابع انرژی تجدیدپذیر می‌شود، زیرا کشورها به دنبال تنوع بخشیدن به سبد انرژی خود و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی هستند. این تغییر با درک این امر انجام می‌شود که راه حل‌های انرژی پایدار می‌تواند پایداری بلند مدت را در برابر پس زمینه منابع سوخت فسیلی محدود فراهم کند (کیلیان و ژئو[3]، ۲۰۲۱).

در ایران در اسناد فرادستی و نمودهای برنامه توسعه (پنجم-ششم) و همچنین سند چشم انداز ۲۰ ساله، سیاست‌های کلی انرژی بیشتر متوجه بخش نفت و گاز است؛ به

1. Holechek
2. Zhaoguang liao
3. Kilian & zhou

گونه‌ای که مسیر سیاست‌گذاری‌ها با هدف استفاده و بهره‌برداری حداکثری از منابع نفت و گاز است. از جمله آن‌ها می‌توان به ۱) اتخاذ تدابیر و راهکارهای مناسب برای گسترش اکتشاف نفت و گاز و شناخت کامل منابع کشور، ۲) افزایش ظرفیت تولید صیانت شده نفت، متناسب با ذخایر موجود؛ ۳) افزایش ظرفیت تولید گاز متناسب با حجم ذخایر کشور به منظور تامین مصرف داخلی و ۴) گسترش تحقیقات بنیادی و توسعه‌ای و تربیت نیروی انسانی متخصص و ارتقای فن‌آوری در زمینه‌های منابع و صنایع نفت، گاز و پتروشیمی اشاره نمود. با توجه به روند روبه رشد مصرف سوخت‌های فسیلی و رو به اتمام بودن دوران قابل بهره‌برداری (از نظر اقتصادی) مخازن پیش‌بینی شده منابع انرژی فسیلی در چند دهه آینده به تمام خواهد رسید و جایگزینی منابع غیر فسیلی ضروری خواهد بود (آژانس بین المللی انرژی، ۲۰۲۳). اما باید توجه شود که یکی از مسائلی که در بکارگیری انواع انرژی مهم است قابلیت اطمینان منبع تامین انرژی با توجه به شرایط آب و هوایی و محیطی است. مثلا اصولا افزایش بکارگیری انرژی خورشیدی برای تمام کشورها بهینه نخواهد بود. شرایط آب و هوایی، پوشش گیاهی و حتی گونه‌های جانوری که در منطقه مورد بررسی وجود دارند در نوع انرژی که بکارگرفته می‌شود مؤثر است.

با توجه به عوامل ذکر شده (محدودیت ذخایر نفت خام و تملک نامتوازن منابع)، مسائل زیست محیطی و اقتصادی، ترکیب بهینه انرژی برای کشورهای مختلف و حتی در طی زمان، متفاوت است. همچنین با توجه به اینکه در سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی‌های جامع، اهداف متعدد و متفاوتی مطرح می‌شود که گاها در تضاد با یکدیگر هستند؛ مسئله بهینه‌سازی و بررسی ترکیب بهینه سبد انرژی کشور با توجه به شاخص‌های فنی، اقتصادی و زیست محیطی بسیار مهم است (ژئو و همکاران، ۲۰۲۱). اینکه هر کشور کدام منابع انرژی و به چه میزانی را استفاده کند تا بیشترین بازده ممکن را داشته باشد از مهمترین مسائل بحث برانگیز برای برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران است. بنابراین پرسش اصلی تحقیق این است که آیا سهم انرژی‌ها در سبد انرژی ایران بهینه است؟ در این پژوهش بررسی بهینه بودن سبد تولید انرژی برق در دو حالت تک هدفه و چند هدفه به کمک الگوریتم ژنتیک بررسی و مقایسه شده است. بکارگیری الگوریتم ژنتیک در بهینه‌یابی و استفاده از رویکرد استواری، بررسی دقیق‌تری را رائه می‌دهد. زیرا در سایر روش‌ها فرض می‌شود که داده‌های ورودی به طور مشخص و

معادل با مقادیر اسمی است؛ در واقع تأثیر عدم اطمینان بر کیفیت و موجه بودن مدل در نظر گرفته نمی‌شود و جواب بهینه ممکن است مدت طولانی بهینه نماند یا حتی موجه بودن آن از بین برود. همچنین بررسی تفکیک شده انرژی‌های تجدیدپذیر و تحلیل جامع آن پژوهش حاضر را نسبت به سایر پژوهش‌ها متمایز می‌کند؛ زیرا در پژوهش‌های گذشته هیچ شواهدی از بکارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر و بهینه‌سازی سبد انرژی وجود ندارد.

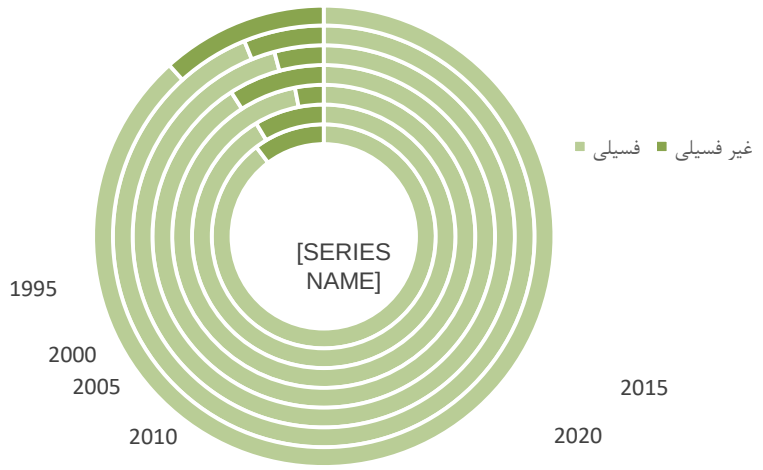
تعریف سبد انرژی

سبد انرژی در دو مفهوم کلی کاربرد دارد: ۱- سبد تولید انرژی ۲- سبد مصرف انرژی. در این پژوهش منظور از سبد انرژی همواره سبد تولید انرژی است. سبد تولید انرژی در واقع مجموعه‌ای از منابع تولید انرژی با سهم‌های مشخص و البته تا حدودی متغیر را بیان می‌کند. ترکیب منابع انرژی در سبد انرژی یک کشور تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله تکنولوژی‌های موجود، منابع طبیعی و وضعیت مالی قرار دارد. بهینه‌سازی این ترکیب برای پاسخگویی به نیازهای انرژی وکاهش اثرات زیست محیطی ضروری است (آژانس بین المللی انرژی، ۲۰۲۲). انرژی‌های نفت، زغال سنگ و گاز طبیعی بیشترین سهم را در سبد انرژی جهان دارند. در صورتی که انرژی‌ها را به دو گروه فسیلی و غیرفسیلی تقیسم نمائیم، سهم انرژی‌های فسیلی همواره بالای ۸۰ درصد و سهم انرژی‌های غیرفسیلی حداکثر ۲۰ درصد بوده است. بررسی متوسط رشد سالانه عرضه انرژی به تفکیک انرژی‌های فسیلی و غیر فسیلی نشان می‌دهد که طی دوره ۱۹۹۰ الی ۲۰۱۹ متوسط رشد سالانه انرژی‌های غیر فسیلی بیشتر از انرژی‌های فسیلی بوده است. سبد عرضه انرژی ایران در سال ۲۰۲۰ شامل ۶۷/۷ درصد گاز طبیعی، ۳۰/۶ درصد نفت، ۰/۶۸ درصد انرژی هسته‌ای، ۰/۳۶ درصد زغال سنگ، ۰/۵ انرژی آبی، ۰/۱۹ انرژی بیوماس و ۰/۰۳ درصد انرژی بادی و خورشیدی بوده است. میزان قابل توجه‌ای از انرژی عرضه شده مربوط به گاز طبیعی و نفت است و سهم سایر انرژی‌ها بسیار ناچیز می‌باشد.

سبد تولید انرژی برق

امروزه تولید برق یکی از بزرگترین چالش‌های زیست محیطی پیش روی جوامع است. به طور کلی، برق را می‌توان از منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تامین کرد، اما در بسیاری از کشورها تولید انرژی برق عمدتا مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و انرژی هسته‌ای است. از ۲۵ سال پیش، دسترسی ساکنان کشورهای در حال توسعه به برق به ۱/۳ میلیارد نفر رسیده است، در حالی که رشد جمعیت بسیار بیشتر و حدود ۲ میلیارد است؛ بنابراین حدود ۷۰۰ میلیون نفر به انرژی برق دسترسی ندارند. تقاضای انرژی در جوامع دورافتاده را می‌توان به طور مقرون به صرفه از طریق منابع انرژی تجدیدپذیر تامین کرد، زیرا می‌توانند به صورت نیروگاه‌های با ظرفیت محدود و به صورت پراکنده احداث شوند و نیاز به زیرساخت‌های انتقال انرژی و مسائل مرتبط به آن را برطرف نمایند (احمدی و همکاران، ۲۰۲۰).

در ایران که کشوری غنی از منابع فسیلی است؛ انتخاب نوع نیروگاه تولید برق عمدتا براساس حجم سرمایه‌گذاری اولیه مورد نیاز و دسترسی به منابع انرژی اولیه صورت می‌گیرد. در واقع اولویت‌بندی انواع فن‌آوری‌های تولید برق بر اساس مجموعه جامعی از معیارها و ضوابط فنی، اقتصادی، اجتماعی و سیاسی و زیست محیطی و غیره کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد (منظور و رحیمی؛ ۱۳۹۴). تولید انرژی برق در ایران بیشتر از منابع نفت، گاز طبیعی و انرژی آبی است. همچنین از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹ سهم انرژی نفت در تولید برق کاهش و سهم گاز طبیعی افزایش یافته است. در سبد تولید انرژی برق نیز سهم انرژی‌های غیر فسیلی تجدیدپذیر بسیار اندک است؛ با وجود این امکان بهینه‌سازی سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در این سبد بیشتر از سبد عرضه انرژی است. تغییرات سهم انرژی‌های فسیلی و غیر فسیلی طی دوره‌های پنج ساله از سال ۱۹۹۰ الی ۲۰۲۰ در نمودار زیر نشان داده شده است. افزایش سهم منابع غیر فسیلی در تولید برق در آخرین دوره بیش از سایر دوره‌ها می‌باشد.



نمودار ۸. سهم انرژی‌های فسیلی و غیر فسیلی در عرضه انرژی برق

منبع: آژانس بین المللی انرژی، ۲۰۲۱.

بهینه‌سازی

بهینه‌سازی[1] تولید انرژی می‌تواند به صورت موضعی و یا بصورت جامع برای یک سیستم که متشکل از چندین فرایند است، انجام شود. بر اساس تئوری بهینه‌سازی، نتیجه بهینه‌سازی برای چندین فرایند به صورت جداگانه الزاما برابر با نتیجه بهینه‌سازی به صورت جامع نیست و بنابر تعریف، بهینه‌سازی به صورت جامع می‌تواند در برگیرنده ترکیبی از دو و یا چندین فرآیند باشد. اعمال بهینه‌سازی بصورت جامع نیاز به درک صحیح دینامیک انرژی‌بری تجهیزات هر یک از فرایندها دارد و به مراتب پیچیده‌تر از به کارگیری روش بهینه‌سازی موضعی می‌باشد. به غیر از تقسیم‌بندی روش‌های بهینه‌سازی به موضعی و جامع، تقسیم‌بندی دیگری نیز وجود دارد که بر اساس هزینه‌های لازم برای انجام بهینه‌سازی می‌باشد و عبارتند از: روش‌های با هزینه پایین یا بدون هزینه (مانند انتخاب سوخت و یا حامل انرژی بهتر، تنظیم ساعات کاری، تنظیم نورپردازی)، روش‌های با هزینه متوسط و روش‌های با هزینه بالا (السوراگابی[2] و همکاران،۲۰۲۰).

1. Optimization
2. Elsoragaby

بهینه‌سازی، درواقع روشی ریاضی به‌منظور یافتن مقدار کمینه و بیشینه از یک تابع روی یک چند ضلعی محدب است. الگوریتم سیمپلکس، یک جواب قابل قبول را در یکی از رئوس چند ضلعی فراهم می‌کند و در راستای اضلاع چند ضلعی به طرف رئوس با مقدار بالاتری از تابع هدف حرکت می‌کند تا اینکه به نقطه بهینه برسد. روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی (روش‌های بهینه‌سازی که بر مبنای حساب دیفرانسل پایه‌گذاری شده) برای آن دسته از مسائل که دارای تابع هدف چندگانه و غیرصریح از متغیرهای تصمیم‌گیری است مناسب می‌باشد. برای حل مسائل با ابعاد بزرگ و مسائل بهینه‌سازی ترکیبی، روش‌های کلاسیک دشوار و گاهی غیرممکن است؛ برای این دسته از مسائل روش‌های فرا ابتکاری و تصادفی هوشمند تدوین شده است (بزرگ، ۱۳۹۶).

از بین روش‌های فراابتکاری، روش الگوریتم ژنتیک[1] معروف‌ترین و پرکاربردترین روش است که برای بررسی و حل مسئله بهینه‌سازی بکار می‌رود. الگوریتم ژنتیک برای اولین بار توسط جان هلند[2] معرفی شد و با تکیه بر این که در طبیعت از ترکیب کروموزوم‌های بهتر، نسل‌های بهتری پدید می‌آیند و در این بین، گاهی اوقات جهش‌هایی نیز در کروموزوم‌ها روی می‌دهد که ممکن است باعث بهتر شدن نسل بعدی شود؛ اقدام به حل مسائل می‌کند (مرادی و همکاران، ۱۳۹۸). در واقع الگوریتم ژنتیک تکنیک جستجویی در علم رایانه برای یافتن راه حل تقریبی برای بهینه‌سازی و مسائل جستجو است که از تکنیک‌های زیست‌شناسی فراگشتی مانند وراثت و جهش استفاده می‌کند. این الگوریتم یک تکنیک برنامه نویسی است که از تکامل ژنتیکی به عنوان یک الگوی حل مسئله استفاده می‌کند. مسئله‌ای که باید حل شود ورودی است و راه حل‌ها طبق یک الگو کدگذاری می‌شوند که تابع هدف[3] نام دارد؛ هر راه حل کاندید را ارزیابی می‌کند (مقدم پور و همکاران، ۲۰۲۱). الگوریتم ژنتیک به عنوان یک الگوریتم محاسباتی بهینه‌سازی با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از نقاط فضای جواب در هر تکرار محاسباتی به نحو مؤثری نواحی مختلف فضای جواب را جستجو می‌کند.

در هر تکرار هر یک از رشته‌های موجود در جمعیت رشته‌ها، رمزگشایی شده و مقدار تابع هدف برای آن به دست می‌آید. بر اساس مقادیر به‌دست آمده تابع هدف در

1. Genetic Algorithm
2. John holand
3. fitness funcation

جمعیت رشته‌ها، به هر رشته یک عدد برازندگی نسبت داده می‌شود. این عدد برازندگی احتمال انتخاب را برای هر رشته تعیین خواهد کرد. بر اساس این احتمال انتخاب، مجموعه‌ای از رشته‌ها انتخاب شده و با اعمال عملکردهای ژنتیکی روی آنها رشته‌های جدید جایگزین رشته‌هایی از جمعیت اولیه می‌شوند تا تعداد جمعیت رشته‌ها در تکرارهای محاسباتی مختلف ثابت باشد (گنجه‌کویری و همکاران، ۲۰۱۷). بطور کلی در این الگوریتم ضمن آنکه در هر تکرار محاسباتی، توسط عملگرهای ژنتیکی نقاطی جدید از فضای جواب مورد جستجو قرار می‌گیرند، مکانیزم انتخاب روند جستجو نواحی‌ای از فضا را که متوسط آماری تابع هدف در آنها بیشتر است، کنکاش می‌کند.

مزایای الگوریتم ژنتیک در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی

امتیاز این الگوریتم آن است که هیچ محدودیتی برای تابع بهینه شونده، مثل مشتق‌پذیری یا پیوستگی ندارد و در روند جستجو خود تنها به تعیین مقدار تابع هدف در نقاط مختلف نیاز دارد و از هیچ اطلاعات کمکی دیگری، مثل مشتق تابع استفاده نمی‌کند. لذا در مسائل مختلف اعم از خطی، پیوسته یا گسسته استفاده می‌شود و به سهولت با مسائل مختلف قابل تطبیق است.

یکی دیگر از نقاط قوت الگوریتم ژنتیک موازی بودن آن است. به این معنی که در الگوریتم ژنتیک جمعیتی از نقاط به صورت موازی و هم زمان به جای یک نقطه مورد جستجو قرار می‌گیرند. روش‌های پرکاربرد دیگر همچون بهینه‌سازی انبوه ذرات، موازی نبوده و یک نقطه یا مسیر پیش روی تصادفی انتخاب می‌شود. در صورت بهتر نبودن این مسیر از مسیر قبلی، کل کارهای انجام شده بیهوده بوده و کنار گذاشته می‌شود و الگوریتم از گام‌های اول دوباره شروع می‌شود. با توجه به اینکه الگوریتم ژنتیک چند نقطه شروع دارد، در یک لحظه می‌تواند فضای مساله را از چند جهت مختلف جستجو کند و در صورت به نتیجه نرسیدن سایر راه‌ها ادامه می‌یابد. گرچه الگوریتم ژنتیک عموما روش بهینه‌سازی سریعی محسوب نمی‌شود، ولی موازی بودن روند پیش روی آن سبب می‌شود که نسبت به سایر روش‌های تکاملی و احتمالی سریع‌تر باشد. از طرفی با توجه به موازی بودن الگوریتم ژنتیک، این روش برای مسائلی که فضای مساله چند بعدی و وسیعی دارند بسیار مناسب است. همچنین الگوریتم ژنتیک چیزی از طبیعتِ مساله‌ای که حل می‌کند نمی‌داند. این موضوع باعث می‌شود که تمام فضای سه بعدی را

بدون ارجحیت قائل شدن برای بخشی از فضا، جستجو کند. همچنین از الگوریتم ژنتیک به راحتی می‌توان برای مسائل تک هدفه و نیز چند هدفه استفاده کرد.

همان طور که قبلا نیز بیان شد در این الگوریتم نیاز به اطلاع از مشتقات تابع هدف نیست و کافی است بتوان یک تابع هدف (برازش) برای آن تعریف کرد، به گونه‌ای که میزان شایستگی تابع هدف را مشخص کند. لذا بر خلاف روش‌های بهینه‌سازی قطعی که نیاز به مشتقات تابع هدف دارند، الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی احتمالی است. قابل ذکر است که با افزایش دادن ضریب جهش می‌توان پراکندگی ژن‌ها را در مراحل بعدی افزایش داد. این مساله موجب پوشش دادن کل فضای جستجو شده و لذا الگوریتم ژنتیک در مسائل با فضای جستجو نویزی مفید و کارآمد است. همچنین روش‌های متعددی برای سرعت دهی به الگوریتم و بهبود کیفیت جواب وجود دارد که به محض افزایش آگاهی از دامنه مساله از این روش‌ها می‌توان استفاده کرد و رفته‌رفته سرعت پیش روی الگوریتم را افزایش داد.

مطالعات پیشین:

دهقانی و همکاران (۱۴۰۰)، در پژوهشی با عنوان «بررسی تأثیر انواع منابع انرژی‌های تجدیدپذیر بر تولید برق در ایران با استفاده از روش خود توضیح برداری، روش جوهانسون-جوسیلیوس» به بررسی تأثیر منابع تجدیدپذیر بر تولید برق در ایران طی دوره ۱۳۶۰ الی ۱۳۹۶ پرداخته‌اند. نتیجه پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که در بلند مدت با افزایش متغیرهای قیمت برق، مصرف برق و انواع منابع انرژی تجدیدپذیر افزایش می‌یابد. همچنین انرژی خورشیدی در مقایسه با سایر منابع تولید برق اثر بیشتری بر تولید برق دارد و سرمایه‌گذاری در آن در اولویت است.

ستاره و همکاران، (۱۴۰۰)، در مقاله‌ای با عنوان «بررسی تطبیقی ظرفیت نصب شده، شاخص‌های اقتصادی و کسب و کار، چشم اندازها و اسناد بالادستی حوزه نیروگاه‌های تولید برق تجدیدپذیر مبتنی بر زیست توده»، به معرفی فن‌آوری‌های استحصال انرژی از منابع زیست توده و روند توسعه و جایگاه آن در جهان و ایران پرداخته‌اند. نتایج پژوهش مذکور حاکی از آن است که در ایران، مقررات معتبر بالادستی مرتبط با این موضوع وجود ندارد.

جنگ‌آور و همکاران (۱۳۹۸)، در پژوهشی با عنوان «بررسی امکان‌پذیری تحقق اهداف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق تولید برق از منابع تجدیدپذیر در ایران، به منظور بکارگیری ظرفیت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر کشور تا سال ۱۴۰۹»، جهت تامین تقاضای برق کشور سناریوهای مختلفی را مورد بررسی قرار داده اند. نتایج بررسی آن‌ها نشان می‌دهد که با توسعه ظرفیت تولید برق خورشیدی، بادی و زمین گرمایی به ترتیب میزان ۲۵۰۰۰، ۱۲۰۰۰ و ۵۰۰ مگاوات، کاهش انتشاری معادل با تعهدات کشور در توافقنامه پاریس محقق خواهد شد.

شاهورن و همکاران (۱۳۹۸)، در پژوهشی با عنوان «پیش‌بینی سهم انرژی زمین‌گرمایی در سبد انرژی جهانی در سال ۲۰۳۰، میزان ظرفیت نصب شده انرژی زمین گرمایی برای تولید برق در سال ۲۰۳۰» را حدود ۲۰ مگاوات پیش‌بینی کرده‌اند. استفاده از انرژی زمین گرمایی برای تولید این میزان برق، موجب کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی (زغال سنگ، گاز طبیعی و نفت) است.

اباذری (۱۳۹۶) در پژوهشی با عنوان «تأثیر بکارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق بر رشد اقتصادی ایران با استفاده از روش خودرگرسیون برداری بیزی»، رابطه بین مصرف انرژی تجدیدپذیر و رشد اقتصادی را برای ایران طی دوره ۱۳۹۱-۱۳۶۰ بررسی کرده است. با بهره‌گیری از مدل BVAR با پیشین‌های لیترمن-مینسوتا و نرمال-فلت، توابع واکنش آنی بیانگر پاسخ مثبت رشد اقتصادی به مصرف انرژی تجدیدپذیر و ظرفیت تولید انرژی تجدیدپذیر بوده است.

بزرگ (۱۳۹۶)، در پژوهشی با عنوان «بررسی همزمان اثرات ردپای آب و ظرفیت فعلی نیروگاهی کشور به منظور بهینه‌سازی بلند مدت سبد تولید برق»، با استفاده از داده‌های بارپیک مصرفی برق، میزان نیاز برق کشور را محاسبه و با در نظر گرفتن سهم هر یک از چهار عامل آب، زمین، کربن و هزینه تولید بهینه‌سازی کرده است. نتایج پژوهش حاکی از آن است که نیروگاه‌های خورشیدی، حرارتی، گازی، هسته‌ای و برقآبی بیشترین سهم از بار شبکه را به خود اختصاص داده‌اند.

منظور و رحیمی (۱۳۹۴)، در مطالعه‌ای با عنوان «اولویت‌بندی نیروگاه‌های تولید برق در ایران با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه»، با در نظر گرفتن معیارهای مختلف اقتصادی، محیط‌زیستی، سیاسی و اجتماعی، امنیت انرژی و فنی و با

استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی برای وزن دهی به معیارهای و محاسبه میزان معیارهای کیفی و کمی به ارزیابی و اولویت‌بندی گزینه‌های مختلف تولید برق پرداخته‌اند. در بین ۲۳ معیار مورد بررسی، هزینه‌های تمام‌شده برای هر کیلووات ساعت در رتبه اول، امنیت تامین منابع ورودی نیروگاه در رتبه دوم، سرمایه‌گذاری اولیه در رتبه سوم، تأثیر در حفظ و صرفه‌جویی در منابع پایان‌پذیر در رتبه چهارم و تأثیر در تنوع بخشی به سیستم عرضه در رتبه پنجم قرار گرفته‌اند. همچنین مشخص شده است که به ترتیب نیروگاه‌های بادی، برق آبی، فتوولتائیک، سیکل ترکیبی، هسته‌ای، گازی و بخاری در اولویت قرار دارند.

صادقی و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای با عنوان «نقش تولید برق از منابع تجدیدپذیر در کاهش گازهای گلخانه‌ای: یک رویکرد اقتصادسنجی»، بر خلاف مطالعات بسیاری که عوامل موثر بر انتشار کربن دی اکسید و آزمون فرضیه کوزنتس را مورد توجه قرار داده‌اند، بر ارزیابی تأثیر برق تولیدی از انرژی‌های تجدیدپذیر در کاهش انتشار کربن دی‌اکسید ایران با بهره‌گیری از روش خود رگرسیونی با وقفه‌های گسترده تمرکز نموده‌اند. مطابق نتایج برآورد مدل تجربی پژوهش، یک درصد افزایش در تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر با کاهش ۳۱ درصدی انتشار سرانه کربن دی‌اکسید همراه خواهد بود. به این ترتیب، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و بهبود کارایی انرژی نقش قابل توجهی در کاهش گازهای گلخانه‌ای دارند.

خاکسار و صادقی (۱۳۹۳) در پژوهشی با عنوان «ارائه یک الگوی بهینه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران با استفاده از رویکرد بهینه‌یابی استوار»، به بهینه‌یابی تامین منابع انرژی با هدف تولید برق با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی استوار پرداخته است. نتایج حاصل از پژوهش آنها حاکی از تولید ۳۶/۷۱ درصدی انرژی برق آبی کوچک،۱۸/۲۲ درصدی انرژی باد، ۱۷/۱۹ درصدی انرژی زیست توده، ۱۳/۴۳ درصدی انرژی زمین گرمایی، ۱۲/۵۳ درصدی انرژی جزرومد و یک درصدی انرژی خورشیدی است.

لی و همکاران (۲۰۲۲)، در مقاله‌ای با عنوان «بهینه‌سازی چند هدفه و تحلیل چند جنبه‌ای یک سیستم انرژی چند نسلی مبتنی بر انرژی زمین گرمایی برای تولید برق و آب شیرین»، با بکارگیری الگوریتم ژنتیک چندهدفه در سناریوهای مختلف بهینه‌سازی،

محصولات پایدار با کارایی بالاتر در سیستم چندنسلی زمین گرمایی را در پنج مرحله امکان سنجی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که توانایی سیستم برای تولید برق و آب شیرین به ترتیب ۷۸۲ کیلووات و ۲۸۶ کیلوگرم بر ثانیه است. در سناریوی بهینه‌سازی هزینه اگزرژی، بازده اگزرژی و مجموع هزینه هر واحد تولید به ترتیب ۴۶/۴۴ درصد و ۳/۹۸ دلار بر گیگاژول برآورد شده است.

رینالدی و همکاران (۲۰۲۱)، در مقاله‌ای با عنوان «تحلیل امکان‌سنجی اقتصادی و بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر ترکیبی برای برق‌رسانی روستایی در پرو»، به تجزیه و تحلیل فنی-اقتصادی سیستم‌های هیبریدی، خورشیدی، بادی و دیزلی برای برق رسانی به مناطق خارج از شبکه در سه منطقه خارج از شبکه برق (دارای شرایط آب و هوایی متفاوت) در پرو پرداخته‌اند. به در نظرگرفتن داده‌های هواشنایی و ویژگی جمعیتی و قیمت سوخت‌های دیزلی و هزینه تجهیزات با استفاده از نرم افزار هومر[1]، اندازه سیستم‌های تولید برق را بر مبنای کمترین هزینه خالص فعلی بهینه‌سازی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که برای همه مناطق مورد بررسی سیستم هیبریدی-خورشیدی و بادی-دیزلی از نظر اقتصادی مناسب‌تر است.

احمدی و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی با عنوان «بهینه‌سازی نیروگاه‌های تولید برق با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران»، عدم سرمایه‌گذاری در بخش برق را ناشی از ریسک سرمایه‌گذاری در این صنعت دانسته و بیان می‌کنند که سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر، ریسک سرمایه‌گذاری در بخش برق را کاهش می‌دهد. همچنین خطرات مرتبط با هزینه انرژی ورودی (در نیروگاه‌های فسیلی) را جبران می‌کند؛ زیرا این هزینه‌ها ناشی از نوسان قیمت سوخت‌های فسیلی، نگهداری و بهره برداری و هزینه‌های زیست محیطی است. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد که ایران از نظر تئوری می‌تواند حدود ۳۳ درصد از برق مورد نیاز خود را از منابع تجدیدپذیر تامین کند. همچنین تجزیه و تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که با تغییر معادل ۱۰ درصد در هزینه سوخت‌های فسیلی، درصد تامین برق از انرژی‌های تجدیدپذیر تنها تا حدی تحت تأثیر قرار می‌گیرد، اما هزینه تولید برق حدود ۳۲ درصد تغییر می‌کند.

1. HOMER

اوکوبا و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی با عنوان «تجزیه و تحلیل تصمیم چند معیاره مرکب برای بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر ترکیبی برای مناطق ژئوپلیتیکی در نیجریه»، هشت سیستم تولید انرژی برق از انرژی‌های تجدیدپذیر ترکیبی را در شش منطقه ژئوپلیتیکی با استفاده از تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره با در نظرگرفتن معیارهای فنی، اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی با نرم افزار هومر بهینه‌سازی کردند. نتایج نشان می‌دهد که برای هر هشت منطقه سیستم بهینه فنی-اقتصادی، سیستم مولد زیست توده-خورشیدی و خورشیدی با باطری است؛ این سیستم‌ها آلایندگی بسیار کمتری نسبت به سایر سیستم‌ها دارند که برای کاهش تغییرات آب و هوایی مطلوب است. طبق برآوردهای انجام شده هزینه انرژی برق تولیدی از این سیستم‌ها در محدوده ۰/۱۵۱-۰/۱۵۶ دلار بر کیلووات ساعت قرار دارد که قابل رقابت با برق تولید شده از انرژی‌های فسیلی است.

السوراگابی و همکاران (۲۰۲۰)، در مقاله‌ای با عنوان «استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه توسعه یافته برای بهینه‌سازی ورودی‌های انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید برنج تالابی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه توسعه یافته»، مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را در تولید برنج در مالزی بهینه‌سازی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که با بهینه‌سازی مصرف انرژی، حدود ۳۷ الی ۴۰ درصد انرژی کمتری استفاده می‌شود و انتشار گازهای گلخانه‌ای حدود ۲۳۶/۱۳ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن کاهش می‌یابد. البته باید دقت شود که مدل الگوریتم ژنتیک چندهدفه توسعه یافته انرژی مصرفی را بیش از حد نشان می‌دهد.

سایپراساد و همکاران (۲۰۱۹)، در مقاله‌ای با عنوان «تجزیه و تحلیل سه گانه خط پایین و اندازه بهینه انرژی‌های تجدیدپذیر با استفاده از بهینه‌سازی ترکیبی بهبود یافته با استفاده از الگوریتم ژنتیک: مطالعه موردی از هند»، با تکیه بر تجزیه و تحلیل خط پایین سه گانه[1]، بیان می‌کنند که خالص هزینه‌های موجود[2] به عنوان عامل اصلی تصمیم‌گیری در مورد اقتصادی بودن سیستم‌های تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر است. اندازه سیستم انرژی تجدیدپذیر، هزینه‌های خالص فعلی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و اشتغال‌زایی را تعیین می‌کند؛ سیستم‌های کوچک هزینه و اشتغال‌زایی کمتر، انتشار

1. Triple bottom line
2. Net present cost

گازگلخانه‌ای بیشتری دارند. از این رو تعادل بین این عوامل می‌تواند بر بهینه‌سازی سیستم انرژی تجدیدپذیر تأثیرگذار باشد. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که بین سیستم‌های با انتشار کربن کمتر و سیستم‌های با خالص هزینه‌های موجود کمتر هماهنگی وجود دارد؛ اما در مجموع انرژی‌ای که از طریق شبکه به جامعه هند می‌رسد در مقایسه با سیستم انرژی تجدیدپذیر ارزان‌تر است و این بزرگترین مانع برای دستیابی و پذیرش سیستم انرژی‌های تجدیدپذیر در هند است.

ژائو و همکاران (۲۰۲۳)، در مطالعه‌ای با عنوان «مدلسازی انرژی با هدف توسعه کم کربن پکن در سال ۲۰۳۰»، با استفاده از داده‌های سال ۲۰۱۴ و با مدل انرژی پلن، اقدام به ارائه سناریوهای مختلف جایگزینی منابع انرژی تجدیدپذیر با منابع تجدیدناپذیر کردند. در بهترین سناریوی جایگزینی منابع تجدیدپذیر و با استفاده از انرژی خورشید، زیست توده و پسماندهای جامد شهری و بهینه‌سازی سیستم‌های گرمایشی، این امکان وجود دارد که در سال ۲۰۳۰، میزان مصرف سوخت‌های اولیه نسبت به سناریوی مرجع تا ۷۲ درصد کاهش یابد.

در اکثر پژوهش‌های مطرح شده یک انرژی مورد توجه بوده است یا یکی از روش‌های بهینه‌سازی (تک هدفه یا چند هدفه) بکارگرفته شده است. همچنین اکثر پژوهش‌ها بهینه‌سازی را برای چند نیروگاه یا مناطق محدود انجام داده اند. از این رو در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن پتانسیل منابع انرژی، محدودیت‌های فنی و ضریب اطمینان عرضه منابع، بهینه‌سازی کل سبد تولید برق کشور از طریق بهینه‌سازی تک هدفه و چندهدفه الگوریتم ژنتیک برای گروه انرژی‌های فسیلی، تجدیدپذیر و هسته‌ای صورت گرفته است.

مدل سازی مسئه بهینه‌سازی طبق الگوریتم انتخابی پژوهش

جهت بهینه‌سازی سبد تولید انرژی برق، ترکیبی از منابع تولید بهینه در نظر گرفته می‌شود که آلایندگی و هزینه کمتری داشته باشد. این هدف به دو صورت می‌تواند مورد ارزیابی قرار گیرد؛ یکی به صورت مجزا و دیگری به صورت ترکیبی. به عبارتی می‌توان اهداف بهینه‌سازی که کمینه کردن میزان آلایندگی و هزینه تولید انرژی است را در دو تابع مجزا مدل سازی کرد و یا به صورت ترکیبی در یک تابع در نظر گرفت. بیان مجزای اهداف، امکان قرارگیری جواب هایی که حتی یکی از معیارها در آن بهینه است وجود

دارد و با اعمال وزن حاصل از آن با هر شرایطی می‌توان جواب بهینه را بدست آورد (بزرگ،۱۳۹۶). در پژوهش‌های بهینه‌سازی سبد انرژی از شاخص‌های مختلف اما الگوهای یکسانی استفاده می‌شود. برخی از پژوهشگران بهینه‌سازی تک هدفه را برگزیده اند و برخی بهینه‌سازی ترکیبی و چندهدفه را معتبرتر می‌دانند (ترابی و همکاران، ۲۰۲۰). از این رو در این پژوهش بهینه‌سازی با استفاده از الگوی چند هدفه (شامل دو مدل (مدل اول، حداقل سازی میزان آلودگی محیط زیست بر اثر تولید برق و مدل دوم، حداقل سازی میزان هزینه تولید برق)) و دو الگوی مجزا (مدل اول، حداقل سازی میزان آلودگی محیط زیست بر اثر تولید برق و مدل دوم، حداقل سازی میزان هزینه تولید برق) در نظرگرفته شده است تا بهترین ترکیب انرژی بدست آید. الگوی ریاضی که در اکثر پژوهش‌ها استفاده شده است به شرح زیر است (فلاحی و همکاران، ۲۰۱۵، ترابی و همکاران، ۲۰۲۰).

$$\min \mathrm{EEI} = \sum \mathrm{EEI_i X_i} \qquad (۱)$$

$$\min \mathrm{FI} = \sum \mathrm{FI_i X_i}$$

که در آن:

EEI_i = شاخص محیط زیستی منبع انرژی i

FI_i= شاخص اقتصادی منبع انرژی i

X_i = میزان برداشت از منبع انرژی i

i= منابع انرژی

شاخص اقتصادی، درواقع بیشینه سرمایه مود نیاز برای تامین همه انرژی مورد نیاز کشور است. بیشینه سرمایه مورد نیاز تامین انرژی سالیانه کشور(از یک منبع خاص)، از ضرب هزینه تولید یک منبع خاص در میزان انرژی مورد نیاز سالیانه کشور بدست می‌آید؛ که جهت بی ابعاد کردن شاخص، بیشینه سرمایه مورد نیاز به تولید ناخالص داخلی سالیانه کشور تقسیم می‌شود.

$$\text{شاخص اقتصادی} = \frac{\text{بیشینه سرمایه‌ی مورد نیاز}}{GDP} \qquad (۲)$$

$$\text{بیشینه سرمایه‌ی مورد نیاز} = \text{هزینه تولید} \times \text{میزان انرژی سالانه موردی نیاز کشور} \qquad (۳)$$

شاخص زیست محیطی معیاری برای نشان دادن آثار مخرب تولید برق بر محیط زیست است. در این پژوهش مهم ترین اثر مخرب تولید برق، تولید گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفته شده است؛ از این رو شاخص زیست محیطی در این پژوهش، نشان دهنده میزان آلایندگی منبع است؛ که با توجه به اینکه آلایندگی منابع مختلف بر حسب (گرم‌کربن/کیلووات ساعت) نشان داده می‌شود و نیاز است که شاخص مورد استفاده بدون واحد باشد، بنابراین حجم آلایندگی کل انرژی مصرفی کشور که بر مبنای هر منبع بدست می‌آید بر وزن اتمسفر تقسیم می‌شود.

$$\text{شاخص زیست محیطی} = \frac{\text{حجم آلایندگی منبع}}{\text{وزن اتمسفر}} \qquad (۴)$$

$$\text{حجم آلایندگی منبع} = \text{کل انرژی مصرفی کشور} \times \text{حجم دی اکسید کربن تولیدی هرواحد منبع خاص} \qquad (۵)$$

قیود در نظرگرفته شده برای این مدل، شامل قید محدودیت پتانسیل تولید، محدودیت ماکزیمم مصرف، محدودیت اطمینان، محدودیت ضمنی و محدودیت استواری است. قید اول (محدودیت پتانسیل تولید)، میزان برداشت از هر منبع انرژی است که باید از میزان شاخص فنی کمتر باشد.

$$\text{محدودیت تولید پتانسیل} \qquad X_i \leq R_i \qquad (۶)$$

طبق گزارش معاونت پژوهش‌های زیربنایی کشور، اگر حداکثر انرژی قابل برداشت از یک منبع انرژی به کل انرژی مورد نیاز یک سال کشور تقسیم شود یک شاخص فنی بدون ابعاد بدست می‌آید که برای مقایسه منابع مختلف مناسب است.

$$\text{حداکثر مصرف کشور از کل انرژی} = \frac{\text{پتانسیل انرژی}}{\text{دوره زمانی}} \qquad (۷)$$

$$\text{شاخص فنی} = \frac{\text{حداکثر مصرف انرژی}}{\text{کل تقاضای انرژی}} \qquad (۸)$$

R_i= شاخص فنی منبع انرژی i

R_k= حداکثر مصرف کشور از کل انرژی

قید دوم (محدویت ماکزیمم مصرف)، مجموع میزان انرژی‌های مصرفی است که باید تقاضای کشور را تامین کنند که با توجه به رشد جمعیت و رشد مصرف انرژی باید بیشتر از حداکثر مصرف فعلی باشد.

$$\sum_{i=1}^{5} X_i \geq R_k \qquad \text{مصرف ماکزیمم محدودیت} \qquad (۹)$$

برای اطمینان از تطابق ظرفیت تولید و انتقال با مصرف برق، مبحثی با عنوان برنامه‌ریزی ظرفیت نیروگاهی مطرح است که یکی از متغیرهای کلیدی مطرح درآن شناخت قابلیت اطمینان به تولید در نیروگاه‌ها است. با توجه به عدم قطعیت‌هایی که در نیروگاه‌های خورشیدی و بادی وجود دارد، این موضوع در نیروگاه‌های تجدیدپذیر اهمیت بالاتری برخوردار است تا در مواقع نیاز، شبکه برق دچار مشکل نشود. ظرفیت واقعی تولید یک نیروگاه با احتمال بالای ۹۹ درصد در مواقع ضروری، مفهومی است که اخیرا با عنوان ظرفیت مطمئن نیروگاهی[1] از آن یاد می‌شود. بنابراین قید سوم (محدودیت ضریب اطمینان)، به منظور برآورد الگوی بهینه عرضه قابل اطمینان برق ناشی از انرژی‌های تجدیدپذیر است.

$$\beta_i X_i \leq R_i \qquad \text{اطمینان ضریب محدودیت} \qquad (۱۰)$$

قید چهارم (محدودیت ضمنی)، منفی نبودن بودن متغیرهای تصمیم مدل را در نظر می‌گیرد.

$$\mathbf{0} \leq \boldsymbol{X_i} \qquad \text{ضمنی محدودیت} \qquad (۱۱)$$

با توجه به اینکه در نیروگاه‌های فسیلی (سیکل ترکیبی، بخار و گاز)، منابع تامین انرژی اولیه مشترک است؛ امکان برآورد شاخص‌ها و قیود به صورت تفکیکی برای انواع نیروگاه‌های فسیلی وجود ندارد. از این رو نیروگاه‌های فسیلی به صورت گروهی بیان شده‌اند. بنابراین در بررسی سهم انواع انرژی در سبد تولید برق، گروه انرژی‌ها به صورت (فسیلی، تجدیدپذیر، اتمی) در نظر گرفته شده است.

محدودیت ضمنی (منفی نبودن متغیرها) بکار گرفته شده در اکثر پژوهش‌ها، حداقل میزان تولید از هر انرژی را صفر در نظر می‌گیرد. این به این معناست که در سبد

1. capacity credit (or Power Credit or Capacity Value)

بهینه امکان صفر شدن میزان انرژی‌ها وجود دارد؛ اما باید توجه شود که سرمایه‌گذاری فرایندی بازگشت‌پذیر نیست یا بازگشت‌پذیری بسیار پایینی دارد و صفر درنظر گرفتن حداقل تولید به معنای عدم در نظر گرفتن سرمایه‌گذاری‌های انجام شده است. از این رو محدودیت ضمنی بهتر است که صفر در نظر گرفته نشود. برای ساده‌تر شدن برآوردها فرض می‌شود که هیچ سرمایه‌گذاری جدید و بدون برنامه‌ای تا تعیین سبد بهینه تولید برق انجام نشود و درصدی از تولید فعلی مبنای محدودیت ضمنی قرار می‌گیرد که هم منفی نیست و هم سرمایه‌گذاری‌های انجام شده در نظر گرفته می‌شود.

محدودیت ضمنی:

$$X^{Min}_{\text{فسیلی}} \leq X_{\text{فسیلی}}$$
$$X^{Min}_{\text{هسته ای}} \leq X_{\text{هسته ای}}$$
$$X^{Min}_{\text{تجدیدپذیر}} \leq X_{\text{تجدیدپذیر}}$$

در این حالت کل انرژی‌های تجدیدپذیر با بدبینانه ترین ضریب اطمینان گروهی در نظر گرفته می‌شود تا تمام نااطمینانی‌های تولید برق با انرژی‌های تجدیدپذیر را پوشش دهد.

$$10X_{\text{تجدیدپذیر}} \leq R_{\text{تجدیدپذیر}} \qquad (۱۲)$$

در مجموع مدل‌های پژوهش به همراه قیود آن به شرح زیر است:

قیود	
$X_{\text{تجدیدپذیر}} \leq R_{\text{تجدیدپذیر}}$ $X_{\text{هسته ای}} \leq R_{\text{هسته ای}}$ $X_{\text{فسیلی}} \leq R_{\text{فسیلی}}$	محدودیت پتانسیل تولید
$\sum_1^3 X_i \geq R_k \qquad i=1,2,3$	محدودیت ماکسیمم مصرف
$10X_{\text{تجدیدپذیر}} \leq R_{\text{تجدیدپذیر}}$	محدودیت ضریب اطمینان
$X^{Min}_{\text{فسیلی}} \leq X_{\text{فسیلی}}$ $X^{Min}_{\text{هسته ای}} \leq X_{\text{هسته ای}}$ $X^{Min}_{\text{تجدیدپذیر}} \leq X_{\text{تجدیدپذیر}}$	محدودیت ضمنی

بهینه‌سازی چند هدفه

$$\min EEI=\sum EEI_iX_i= EEI_{\text{تجدیدپذیر}}X_{\text{تجدیدپذیر}}+EEI_{\text{فسیلی}}X_{\text{فسیلی}}+EEI_{\text{ای هسته}}X_{\text{ای هسته}}$$

$$\min FI=\sum FI_iX_i=FI_{\text{تجدیدپذیر}}X_{\text{تجدیدپذیر}}+FI_{\text{فسیلی}}X_{\text{فسیلی}}+FI_{\text{ای هسته}}X_{\text{ای هسته}}$$

الگوی بهینه‌سازی تک هدفه

برمبنای شاخص زیست محیطی	$\min EEI=\sum EEI_iX_i= EEI_{\text{تجدیدپذیر}}X_{\text{تجدیدپذیر}}+EEI_{\text{فسیلی}}X_{\text{فسیلی}}+EEI_{\text{ای هسته}}X_{\text{ای هسته}}$
برمبنای شاخص اقتصادی	$\min FI=\sum FI_iX_i=FI_{\text{تجدیدپذیر}}X_{\text{تجدیدپذیر}}+FI_{\text{فسیلی}}X_{\text{فسیلی}}+FI_{\text{ای هسته}}X_{\text{ای هسته}}$

داده‌ها

داده‌های پژوهش عمدتا از ترازنامه انرژی ایران، آژانس بین المللی انرژی‌های تجدیدپذیر، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، وزارت نیرو و بانک جهانی و برخی از مقالات گرفته شده است. شاخص‌ها بر اساس الگوهای مطرح شده در پژوهش برآورد شده است. متغیرها و شاخص‌های برآورد شده به شرح زیر است.

جدول ۱. داده‌های مورد نیاز برای برآورد شاخص زیست محیطی

متغیر/شاخص	اتمی	جمع فسیلی	تجدیدپذیر	واحد
حجم تولید co2 به ازای هر کیلووات	۱/۴	۶۳۷/۹	۱۸/۸	گرم بر کیلووات
حجم انتشار co2 برای تولید کل نیاز برق کشور از یک منبع خاص	۳۹۹،۹۷۴،۱۹۰،۰۰۰	۱۸۲،۲۳۹،۹۲۵،۶۲۸،۴۳۷	۵،۳۶۹،۶۳۲،۲۲۱،۴۰۷	گرم
وزن اتمسفر	۵،۱۵۰،۰۰۰			میلیارد تن

منبع: داده‌های متغیرهای حجم تولید co2 به ازای هر کیلووات، حجم انتشار Co2 برای تولید کل نیاز برق کشور و وزن اتمسفر به ترتیب از ترازنامه انرژی ۱۳۹۶، محاسبات محقق و مرکز پیش بینی میان مدت هواشناسی اروپا بدست آمده است.

جدول ۲. داده‌های مورد نیاز برای برآورد شاخص اقتصادی

متغیر/شاخص	اتمی	جمع فسیلی	تجدیدپذیر	واحد
GDP	۴۱۷،۹۸۳،۵۸۳،۵۶۶			دلار
هزینه تولید برق از هر منبع	۰/۱۶۴	۰/۱۳۳	۰/۰۴۸	دلار بر مگاوات ساعت
بیشینه سرمایه مورد نیاز برای تولید کل نیاز برق کشور از یک منبع خاص	۴۶،۸۵۴،۱۱۹،۴۰۰	۳۷،۸۶۶،۹۳۹،۵۲۸	۱۳،۶۸۹،۸۹۲،۶۵۹	دلار

منبع: داده‌های متغیرهای تولید ناخالص داخلی، هزینه تولید برق از هر منبع و بیشینه سرمایه مورد نیاز برای تولید کل نیاز برق کشور به ترتیب از بانک جهانف، اداره اطلاعات انرژی ۲۰۲۰ و محاسبات محقق بدست آمده است.

جدول ۳. سایر متغیرهای مورد نیاز جهت برآورد الگوی پژوهش

متغیر/شاخص	اتمی	جمع فسیلی	تجدیدپذیر	واحد
تولید ناویژه برق	۷،۴۵۰،۴۵۲،۰۰۰	۲۸۴،۹۸۷،۷۵۸،۰۰۰	۱۶،۰۱۴،۰۰۹،۴۰۴	کیلووات
راندمان نیروگاه ها	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۶۶	درصد
میزان انرژی مورد نیاز سالانه کشور	۲۸۵،۶۹۵،۸۵۰،۰۰۰			کیلووات ساعت
نرخ رشد مصرف برق	۰/۱			درصد

منبع: ترازنامه انرژی ۱۳۹۷

جدول۴. شاخص‌های برآورد شده پژوهش

شاخص	اتمی	جمع فسیلی	تجدیدپذیر
شاخص فنی	۱/۰	۷/۵	۴۳/۶
شاخص اقتصادی	۰/۱۱۲	۰/۰۹۱	۰/۰۳۳
شاخص زیست محیطی	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۴۱۳	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۱۲

منبع: محاسبات محقق

بهینه‌سازی سبد انرژی تولید برق بر مبنای شاخص زیست محیطی

برمبنانی شاخص زیست محیطی انتظار می‌رود که انرژی که کمترین میزان تولید کربن دی‌اکسید را دارد امتیاز بیشتری در تولید برق و سهم بیشتری در سبد تولید انرژی داشته باشد. اما باید توجه شود که بررسی‌ها با توجه به پتانسیل منابع و شاخص فنی هر انرژی و ضریب اطمینان آن انرژی انجام شده که در بهینه‌سازی سبد انرژی تأثیرگذار است. طبق شاخص برآورد شده گروه انرژی‌های فسیلی بیشترین میزان شاخص زیست محیطی را داشته که به معنای بیشترین میزان آلایندگی در بین گروه انرژی‌های مورد بررسی است. نتایج بهینه‌سازی سبد انرژی تولید برق بر مبنای شاخص زیست‌محیطی در قالب روش الگوریتم ژنتیک و با کمک نرم افزار متلب به شرح زیر است.

جدول ۵. ترکیب سبدهای بهینه‌سازی هم تراز شده تولید انرژی برق.

سبد	هسته ای	فسیلی	تجدیدپذیر
سبد ۱	۳۹،۵۰۶،۴۵۷،۵۹۹	۱۷۰،۹۹۲،۶۵۴،۸۰۰	۸۱،۴۲۱،۴۷۵،۵۸۸
سبد ۲	۴۹،۸۸۵،۴۸۲،۱۱۲	۱۷۰،۹۹۲،۶۵۴،۸۰۰	۸۷،۰۲۰،۵۲۷،۶۸۵
سبد ۳	۵۲،۲۴۶،۵۴۲،۷۵۱	۱۷۰،۹۹۲،۶۵۴،۸۰۰	۸۵،۵۶۰،۱۷۶،۱۴۹
سبد ۴	۷۴،۲۸۶،۰۹۹،۷۴۷	۱۷۱،۰۱۱،۳۳۰،۹۳۴	۱۱۶،۳۵۲،۱۴۳،۷۰۹
سبد ۵	۸۳،۳۴۲،۹۷۷،۳۱۳	۱۷۱،۱۲۰،۲۹۶،۸۷۰	۱۱۹،۶۳۰،۳۸۲،۸۱۴

منبع: محاسبات محقق

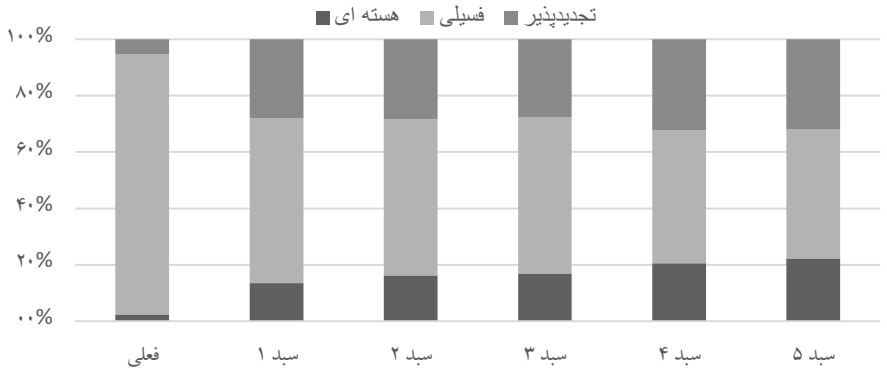
با توجه به نتایج بدست آمده بر مبنای شاخص زیست محیطی سهم بهینه منابع تجدیدپذیر در سبد تولید انرژی برق بین ۲۸ الی ۳۲ درصد، سهم منابع فسیلی بین ۴۶ الی ۵۹ درصد و سهم انرژی هسته‌ای بین ۱۴ الی ۲۲ درصد است. سهم هر یک از گروه انرژی‌های مذکور در سبدهای بهینه‌سازی شده به شرح زیر است.

جدول ۶. سهم گروه انرژی‌های هسته ای، فسیلی و تجدیدپذیر در سبدهای بهینه‌سازی شده بر مبنای شاخص زیست محیطی

سبد	هسته‌ای	فسیلی	تجدیدپذیر
سبد ۱	۱۳/۵	۵۸/۶	۲۷/۹
سبد ۲	۱۶/۲	۵۵/۵	۲۸/۳
سبد ۳	۱۶/۹	۵۵/۴	۲۷/۷
سبد ۴	۲۰/۵	۴۷/۳	۳۲/۲
سبد ۵	۲۲/۳	۴۵/۷	۳۲/۰

منبع: محاسبات محقق

در صورت مقایسه سبد فعلی تولید برق با سبدهای بهینه‌سازی هم تراز (حجم تولید برق تقریبا یکسان) مقایسه شود مشخص می‌شود که بر اساس شاخص زیست محیطی سبد تولید برق فعلی بهینه نیست و سهم هر سه منبع انرژی فسیلی، هسته‌ای و تجدیدپذیر اختلاف زیادی با سهم بهینه برآوردی دارد. در نمودار زیر مقایسه بین سبد فعلی تولید برق و پنج سبد هم تراز نشان داده شده است.



نمودار ۹. مقایسه سبد تولید برق فعلی با سبدهای بهینه هم تراز بر اساس شاخص زیست محیطی

منبع: محاسبات محقق

بهینه‌سازی سبد انرژی تولید برق بر مبنای شاخص اقتصادی

بر اساس شاخص اقتصادی انرژی که کمترین هزینه را داشته باشد، سهم بیشتری در تولید برق خواهد داشت. با توجه به شاخص اقتصادی برآورد شده انرژی‌های تجدیدپذیر کمترین میزان شاخص اقتصادی را دارند. سبدهای هم تراز بهینه‌سازی شده بر اساس این شاخص در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول ۱۹. سبدهای بهینه‌سازی شده بر اساس شاخص اقتصادی

سبد	هسته ای	فسیلی	تجدیدپذیر
سبد بهینه ۱	۱۶۰،۳۳۶،۰۰۰،۷۰۸	۱۷۴،۲۰۰،۱۰۴،۵۲۸	۹،۶۰۸،۴۰۵،۶۴۲
سبد بهینه ۲	۱۷۳،۵۵۱،۸۴۱،۳۸۳	۱۸۴،۵۲۲،۳۹۴،۶۵۴	۹،۶۰۸،۴۰۵،۶۴۲
سبد بهینه ۳	۱۶۴،۵۴۱،۶۷۰،۷۷۲	۱۷۰،۹۹۲،۶۵۴،۸۰۰	۳۷،۹۳۷،۸۰۸،۱۶۸
سبد بهینه ۴	۱۷۷،۵۴۷،۸۴۴،۳۰۲	۱۷۰،۹۹۲،۶۵۴،۸۰۰	۳۶،۱۲۷،۹۲۳،۲۰۰
سبد بهینه ۵	۱۸۱،۰۵۱،۴۰۷،۲۸۸	۱۷۰،۹۹۲،۶۵۴،۸۰۰	۳۴،۶۵۳،۴۱۳،۵۷۶

منبع: محاسبات محقق

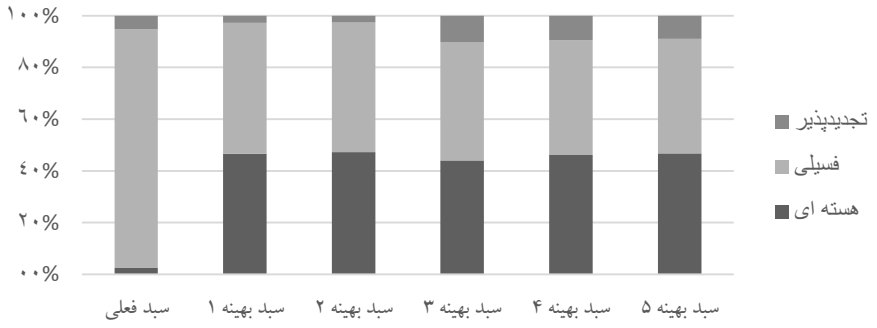
با توجه به نتایج بدست آمده بر مبنای شاخص اقتصادی سهم بهینه منابع تجدیدپذیر در سبد تولید انرژی برق بین ۳ الی ۱۰ درصد، سهم منابع فسیلی بین ۴۴ الی ۵۰ درصد و سهم انرژی هسته‌ای بین ۴۴ الی ۴۷ درصد است. سهم هر یک از گروه انرژی‌های مذکور در سبدهای بهینه‌سازی شده به شرح زیر است.

جدول ۲۰. سهم گروه انرژی‌های هسته ای، فسیلی و تجدیدپذیر در سبدهای بهینه‌سازی شده بر مبنای شاخص اقتصادی

سبد	هسته ای	فسیلی	تجدیدپذیر
سبد بهینه ۱	۴۶/۵۹	۵۰/۶۲	۲/۷۹
سبد بهینه ۲	۴۷/۲۰	۵۰/۱۹	۲/۶۱
سبد بهینه ۳	۴۴/۰۶	۴۵/۷۸	۱۰/۱۶
سبد بهینه ۴	۴۶/۱۶	۴۴/۴۵	۹/۳۹
سبد بهینه ۵	۴۶/۸۲	۴۴/۲۲	۸/۹۶

منبع: محاسبات محقق

سهم منابع تولید انرژی برق در سبد تولید برق فعلی با سبدهای بهینه‌سازی شده هم تراز آن بر اساس شاخص اقتصادی، تفاوت بسیار زیادی دارد. همچنین برخلاف انتظار، سهم بهینه منابع تجدیدپذیر بیش از سایر منابع برآورد نشده است که علت آن می‌تواند مربوط به پتانسیل تولید و شاخص فنی و ضریب اطمینان هر منبع انرژی باشد؛ زیرا این عوامل فاکتورهای موثری در تابع بهینه‌سازی و الگوریتم ژنتیک هستند. در نمودار زیر مقایسه بین سبد فعلی تولید برق و پنج سبد هم تراز نشان داده شده است.



نمودار ۱۰. مقایسه سهم منابع انرژی در سبد تولید برق فعلی با سبدهای بهینه بر اساس شاخص اقتصادی

منبع: محاسبات محقق

بهینه‌سازی چندهدفه سبد انرژی تولید برق (بر مبنای شاخص زیست محیطی و اقتصادی)

الگوی چندهدفه متشکل از دو الگو کمینه ساز بر مبنای شاخص‌های اقتصادی و زیست محیطی است و به عبارتی هر سه شاخص اقتصادی، زیست محیطی و فنی را جهت برآورد سبد انرژی بهینه، در نظر می‌گیرد. نتایج سبدهای بهینه برآورد شده با روش الگوریتم ژنتیک در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول ۲۱. سبدهای بهینه‌سازی شده بر اساس شاخص اقتصادی، زیست محیطی و فنی

سبد	هسته ای	فسیلی	تجدیدپذیر
سبد بهینه ۱	۴۹۴۴۷۱۹۴۴۸۴,۴۹	۱۷۰۹۹۲۶۵۴۸۰۰,۰۰	۷۱۶۵۸۲۴۰۳۳۲,۱۸
سبد بهینه ۲	۶۰۸۵۴۳۲۷۸۷۹,۷۱	۱۷۰۹۹۲۶۵۴۸۰۰,۰۰	۶۰۵۸۵۷۳۸۳۵۵,۷۵
سبد بهینه ۳	۳۸۴۷۵۰۸۲۰۸۵,۳۶	۱۷۰۹۹۲۶۵۴۸۰۰,۰۰	۸۴۹۰۵۳۸۰۲۵۱,۸۴
سبد بهینه ۴	۶۱۰۱۶۸۵۲۳۱۱,۴۲	۱۷۰۹۹۲۶۵۵۰۰۲,۳۷	۷۷۷۶۵۷۰۳۰۱۰,۳۱
سبد بهینه ۵	۷۸۲۹۵۸۱۴۰۷۵,۴۲	۱۷۰۹۹۲۶۵۴۸۰۰,۰۰	۶۲۰۹۹۱۰۴۸۹۲,۷۳

منبع: محاسبات محقق

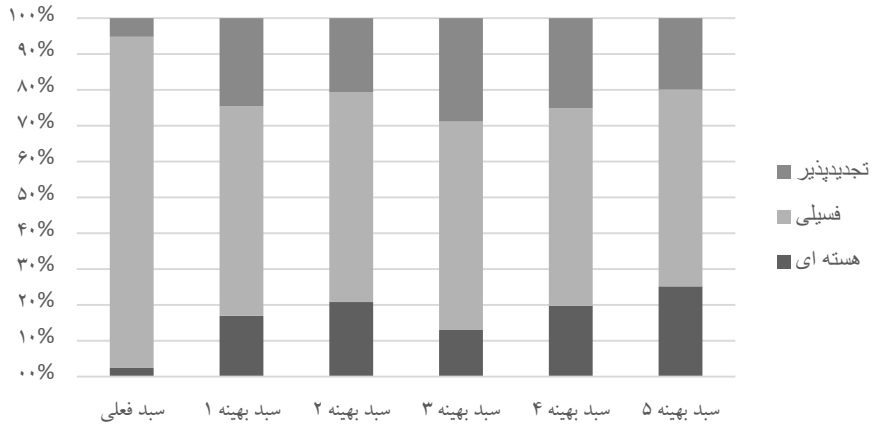
با توجه به نتایج بدست آمده بر مبنای شاخص‌های سه گانه، سهم بهینه منابع تجدیدپذیر در سبد تولید انرژی برق بین ۲۰ الی ۲۹ درصد، سهم منابع فسیلی بین ۵۵ الی ۵۸ درصد و سهم انرژی هسته‌ای بین ۱۳ الی ۲۵ درصد است. سهم هر یک از گروه انرژی‌های مذکور در سبدهای بهینه‌سازی شده به شرح زیر است.

جدول ۲۲. سهم گروه انرژی‌های هسته ای، فسیلی و تجدیدپذیر در سبدهای بهینه‌سازی شده بر مبنای شاخص‌های سه گانه

سبد	هسته ای	فسیلی	تجدیدپذیر
سبد بهینه ۱	۱۶/۹۳	۵۸/۵۴	۲۴/۵۳
سبد بهینه ۲	۲۰/۸۱	۵۸/۴۷	۲۰/۷۲
سبد بهینه ۳	۱۳/۰۷	۵۸/۰۹	۲۸/۸۴
سبد بهینه ۴	۱۹/۷۰	۵۵/۲۰	۲۵/۱۰
سبد بهینه ۵	۲۵/۱۴	۵۴/۹۱	۱۹/۹۴

منبع: محاسبات محقق

در صورتی که سبد تولید برق فعلی با سبدهای بهینه‌سازی شده هم تراز آن مقایسه شود مشخص خواهد شد که سهم انرژی‌های تجدیدپذیر، فسیلی و هسته‌ای بهینه نیست. سهم انرژی‌های فسیلی در سبد تولید برق فعلی، حدود ۳۰ درصد بیشتر از میزان بهینه است که منطقا به علت دسترسی آسان به منابع فسیلی است.

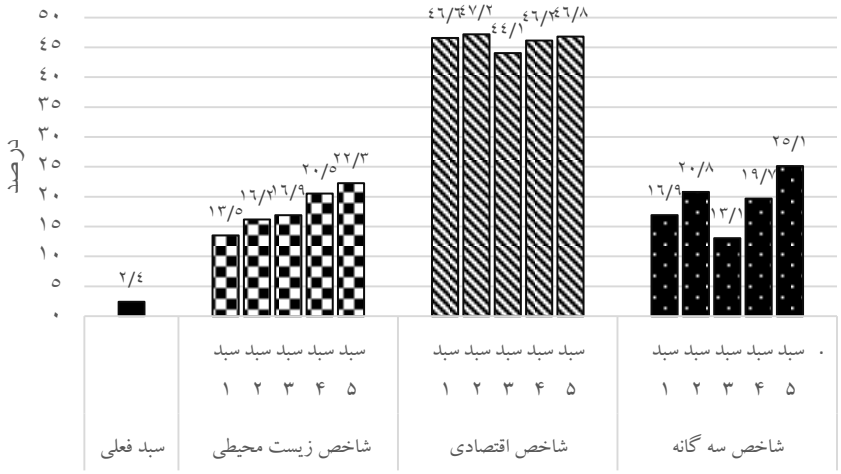


نمودار ۱۱. مقایسه سبد تولید فعلی با سبدهای بهینه پیشنهادی بر اساس شاخص‌های سه گانه

منبع: محاسبات محقق

مقایسه سهم منابع انرژی در بهینه‌سازی‌های تک هدفه و چند هدفه

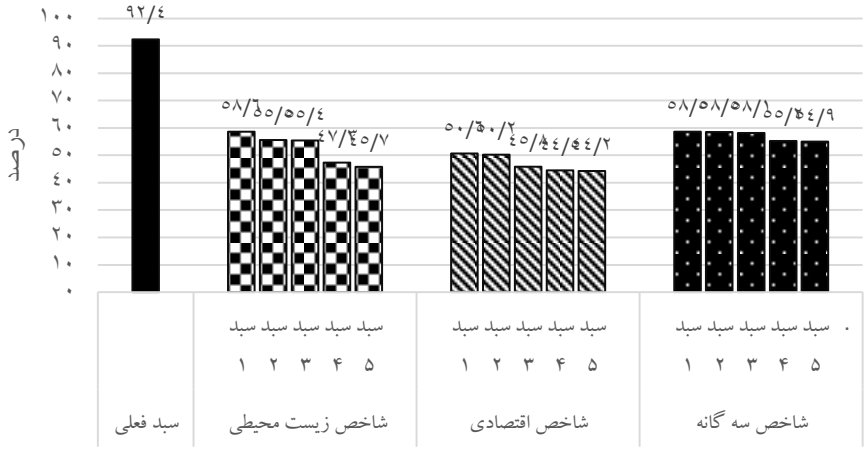
همین طور که در نمودار زیر مشخص است سهم بهینه‌سازی شده انرژی هسته‌ای چه به صورت تک هدفه و چه به صورت چندهدفه با میزان فعلی این انرژی در سبد تولید برق متفاوت است. همچنین سهم انرژی هسته‌ای در بهینه‌سازی تک هدفه بر اساس شاخص اقتصادی تقریبا ۲ برابر سهم بهینه‌سازی تک هدفه بر اساس شاخص زیست محیطی و بهینه‌سازی چندهدفه بر اساس شاخص‌های سه گانه است. مقایسه روش‌های بهینه‌سازی تک هدفه و چندهدفه برای انرژی هسته‌ای نشان می‌دهد که بررسی همزمان عامل زیست‌محیطی و اقتصادی موجب تعدیل تأثیرات متغیر اقتصادی شده است.



نمودار ۱۲. مقایسه سهم انرژی هسته‌ای در بهینه‌سازی تک هدفه و چند هدفه

منبع: محاسبات محقق

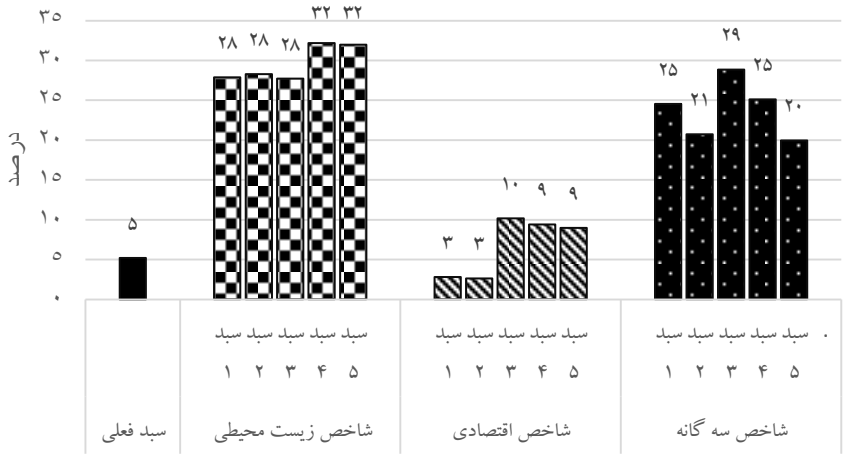
سهم بهینه‌سازی برای انرژی‌های فسیلی چه در حالت تک هدفه و چه در حالت چندهدفه تقریبا در یک محدوده (حداقل ۴۴ و حداکثر ۵۹ درصد) است. با این حال سهم بهینه‌سازی شده برای انرژی‌های فسیلی در هر دو حالت، حداکثر (دو سوم) سهم فعلی این گروه از انرژی‌ها است که به معنای بهینه نبودن سهم فعلی این گروه از انرژی در سبد تولید برق کشور است.



نمودار ۱۳. مقایسه سهم انرژی‌های فسیلی در بهینه‌سازی تک هدفه و چند هدفه

منبع: محاسبات محقق

سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد تولید برق فعلی با میزان بهینه‌سازی شده در حالت‌های تک هدفه و چندهدفه بسیار متفاوت است؛ به عبارت دیگر سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد تولید برق فعلی بهینه نیست. سهم انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی هسته‌ای در حالت بهینه‌سازی تک هدفه بر اساس شاخص زیست محیطی و بهینه‌سازی چندهدفه بر اساس شاخص‌های سه گانه تقریبا در یک محدوده است و می‌توان بیان کرد که در حالت بهنیه سازی چندهدفه، اثرات شاخص اقتصادی تا حدودی تعدیل می‌شود. مقایسه سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در حالات مختلف بهینه‌سازی و سبد فعلی در نمودار زیر نشان داده شده است.



نمودار ۱۴. مقایسه سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در بهینه‌سازی تک هدفه و چند هدفه

منبع: محاسبات محقق

نتیجه‌گیری

مسائل زیست محیطی، محدودیت منابع، توزیع ناعادلانه منابع انرژی و وابستگی شدید اقتصاد کشورها (چه در حالت واردکننده و چه در حالت صادرکننده انرژی) زمینه‌ساز توجه بیشتر به مسئله بهینه‌سازی منابع شده است. بهینه‌سازی منابع می‌تواند در سبد تولید و مصرف صورت گیرد. در این پژوهش بهینه‌سازی سبد تولید برق از طریق الگوریتم ژنتیک و در دو حالت تک هدفه و چند هدفه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. قابل ذکر است که در هر بار برآورد الگوهای مذکور، نرم افزار یک نقطه بهینه

جدید را تعیین می‌کند؛ از این رو هر الگو ۵ مرتبه برآورد شده و در هر برآورد ۷۰۰ بار سبد انرژی در دسته‌های ۲۰۰ تایی بررسی شده است. مقایسه تطبیقی بهینه‌سازی تک هدفه (یک بار برمبنای شاخص اقتصادی و یک بار بر مبنای شاخص زیست محیطی) و بهینه‌سازی چندهدفه نشان داد که سهم‌های بهینه‌سازی شده برای انرژی‌های هسته ای، فسیلی و تجدید پذیر برای بهینه‌سازی تک هدفه بر مبنای شاخص اقتصادی با دو حالت بهینه‌سازی تک هدفه بر مبنای شاخص زیست محیطی و بهینه‌سازی چندهدفه تفاوت زیادی دارد؛ که این موضوع بیشتر بخاطر این است که اغلب در بهینه‌سازی تک هدفه نقطه بهینه محلی به عنوان نقطه بهینه کلی در نظر گرفته می‌شود. در بهینه‌سازی چندهدفه، اهداف به ترتیب اولویت مرتب و بهینه می‌شوند؛ از این رو برداشت کلی از نتایج برآوردهای صورت گرفته در حالت بهینه‌سازی چندهدفه بیشتر تعدیل اثرات شاخص اقتصادی است. نکته دیگر در مورد بهینه‌سازی چند هدفه این است که ترکیب سبدهای بهینه‌سازی شده با استفاده از این روش نسبت به روش‌های تک هدفه از توازن کمتری برخوردارند. به عبارت دیگر از طریق بهینه‌سازی چندهدفه مجموعه‌ای از راه حل‌ها معرفی می‌شود که هر کدام هر یک از اهداف را در سطح قابل قبولی برآورده می‌کنند. در این حالت دستیابی به نقاط بهینه عمومی محتمل‌تر از حالت بهینه‌سازی تک هدفه است که معمولا نقاط بهینه محلی را معرفی می‌کند و موجب گمراهی و دور شدن استفاده کننده از هدف اصلی می‌شود. از این رو قویا بکارگیری بهینه‌سازی چندهدفه جهت بهینه‌سازی سبد تولید برق کشور توصیه می‌شود. همچنین توجه به پیوستگی بین توسعه اقتصادی و حفاظت از محیط زیست در فرآیندهای تصمیم گیری و برنامه‌ریزی می‌تواند به تحقق اهداف توسعه پایدار کمک کند؛ بنابراین بهینه‌سازی مسائل جامع کشوری باید با روش چندهدفه انجام شود. انجام درست و عملی شدن مناسب فرایندهای بهینه‌سازی پیشنهاد می‌شود برای متخصصان و تصمیم گیرندگان برنامه‌های آموزشی در زمینه بهینه‌سازی منابع انرژی با استفاده از تکنیک‌های نوین، از جمله الگوریتم ژنتیک، طراحی و اجرا شود و چارچوب‌های قانونی و تشویقی برای بهبود شرایط پیاده سازی نتایج بهینه‌سازی ایجاد گردد.

منابع

- اباذری فیروزجاه، سوده (۱۳۹۶)، تأثیر به کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق بر رشد اقتصادی ایران با استفاده از روش خودرگرسیون برداری بیزی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه الزهرا (س).
- بزرگ، محسن (۱۳۹۶)، بررسی همزمان اثرات ردپای آب و ظرفیت فعلی نیروگاهی کشور به منظور بهینه‌سازی بلند مدت سبد تولید برق، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی.
- ترازنامه انرژی (۱۳۹۷)، وزارت نیرو، معاونت برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی.
- جنگ آور، حسن و همکاران (۱۳۹۸)، بررسی امکان پذیری تحقق اهداف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق تولید برق از منابع تجدیدپذیر در ایران، فصلنامه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، شماره ۲، ۷۰-۶۲.
- خاکسار آستانه، سمانه، صادقی، حسین (۱۳۹۳)، اراده یک الگوی بهینه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران با استفاده از زویکرد بهینه یابی استوار، پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، شماره ۱۱، ۱۹۴-۱۵۹.
- دهقانی، علی و همکاران (۱۴۰۰)، بررسی تأثیر انواع منابع انرژی‌های تجدیدپذیر بر تولید برق در ایران، فصنامه انرژی‌های تجدیدپذیر، شماره ۱، ۴۷-۴۱.
- ستاره، محمد و همکاران (۱۴۰۰)، بررسی تطبیقی ظرفیت نصب شده، شاخص‌های اقتصادی و کسب و کار، چشم اندازها و اسناد بالادستی حوزه نیروگاه‌های تولید برق تجدیدپذیر مبتنی بر زیست توده، فصلنامه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، شماره ۲، ۸۵-۷۵.
- فلاحی، اسمائیل و همکاران (۱۳۹۵)، ارائه مدل مدیریت تامین انرژی در ایران بر اساس معیارهای فنی، اقتصادی و زیست محیطی، اقتصاد انرژی ایران، شماره ۱۸، صص ۲۹-۶۰.
- سلیمی وحید، پیری مهدی. (۱۴۰۲)، الزامات قانونی گذار از انرژی فسیلی به تجدیدپذیر با مقایسه نظام حقوقی اتحادیه اروپا، چین و ایران. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، ۱۹(۷۷): ۵۷-۳۳.

- شاهورن، اسرافیل و همکاران (۱۳۹۸)، پیش بینی سهم انرژی زمین گرمایی در سبد انرژی جهانی در سال ۲۰۳۰، فصلنامه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، شماره ۱، ۹۰-۸۴.
- صادقی، حسین، آذر، عادل، خاکسار آستانه، سمانه (۱۳۹۴)، بهینه یابی تامین منابع انرژی با هدف تولید برق، چشم انداز ایران در افق ۱۴۰۴. فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی، شماره ۳، ۱۱۸-۹۱.
- مرادی، بهروز، ولدان زوج، محمد جواد، جنتی، مجتبی، یاوری، سمیه،(۱۳۹۸)، ارزیابی جامع الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک استاندارد، ژنتیک بهبود یافته و ازدحام ذرات بهبود یافته در کشف ترکیب بهینه ترم‌های توابع کسری وابسته به زمین، سنجش از دور و GIS ایران، شماره ۱، ۴۱، ۱-۱۸.
- منظور، داود، رحیمی، علیرضا (۱۳۹۴)، اولویت‌بندی نیروگاه‌های تولید برق در ایران با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه، پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، شماره ۱۴، ۲۱۵-۱۹۱.
- غلامی، آرین، نیک پور ساغر، میرکی فائزه. (۱۴۰۲)، بررسی تأثیر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر بر شاخص توسعه انسانی در ایران. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، ۱۹ (۷۸): ۱۰۱-۶۹.
- Ahmadi. Seyedeh asra and al (2020). Portfolio optimization of power plants by using renewable energy in Iran. International Journal of Low-Carbon Technologies, 16, 463–475.
- Elsoragaby and all (2020). Applying multi-objective genetic algorithm (MOGA) to optimize the energy inputs and greenhouse gas emissions (GHG) in wetland rice production, Energy Reports, Vol 6, 2988-2998.
- Ganjehkaviri. A and et (2017),Genetic algorithm for optimization of energy systems Solution, Energy, Vol 119, Pp 167-177.
- Holechek, J.L, Geli, H, (2022), Sawalhah,M, Valdea, R, A Global Assessment: Can Renewable Energy REPLACE Fossil Fuels By 2050?, sustainability 2022, 14,4792.
- IEA: International Energy Agency, 2021,2023, Energy investment in 2023.
- Li. K and all (2022). Multi-objective optimization and multi-aspect analysis of an innovative geothermal-based multi-generation energy

system for power, cooling, hydrogen, and freshwater production. Energy. Vol 245.

- Moghaddampoor. F. Najafi. B. Marchesi.R (2021). Economic feasibility analysis and optimization of hybrid renewable energy systems for rural electrification in Peru. Clean Technologies and Environmental Policy .23:731–748.
- Ripple. J, Wolf. C,(2023), The 2023 state of the climate report: entering uncharted territory, Bio Sciene ,vol 73, Issue 12.
- Saiprasad. N. Kalam. A. Zayegh.A (2019). Triple Bottom Line Analysis and Optimum Sizing of Renewable Energy Using Improved Hybrid Optimization Employing the Genetic Algorithm: A Case Study from India. Energies. 12, 349.
- Torabi. S, Bellone. M and Wahde.M (2020), Energy minimization for an electric bus, European Transport Research Review, 12:2.
- Ukoba.M . Diemuodeke. O. Alghassab.M .Njoku.H .Imran.M . Khan.Z (2020). Composite Multi-Criteria Decision Analysis for Optimization of Hybrid Renewable Energy Systems for Geopolitical Zones in Nigeria., 12, 5732.
- Zhou, J, Abdel-Khalik, H, Talbot, P, Rabiti, C, (2021), A Hybrid energy system Workflow for Energy portfolio Optimization. Energies, 14, 4392.
- Zhao, G. Guerrero, J. Jiang, K. Chen, S (2023) , Energy modeling towards low carbon development of Beijing in 2030, Energy, No. 121, pp: 107 – 113.
- World Energy Council (2020,2023). Availablev at: https://www.worldenergy.org/.

Comparison of Single-Objective (GA) and Multi-Objective (NSGA-II) Optimization Methods in Optimizing Iran's Electricity Generation Portfolio

Zahra Pourkhaghan Shahrezaei
PhD student in oil and gas economics, Islamic Azad University, Tehran branch, center, Iran, (zahrapourkhaghan@gmail.com)

Ali Asghar Esmaeelinia Getabi [٢]
Assistant Professor, Faculty of Economics and Accounting, Islamic Azad University, Tehran Center Branch, Iran, (ali.ismaeel_niyaketabi@iauctb.ac.ir)

Seyed Komail Tayebi
Professor, Faculty of Administrative Sciences and Economics, Isfahan University, Iran. (sk.tayebi@ase.ui.ac.ir)

Marjan Daman Keshideh
Assistant Professor, Faculty of Economics and Accounting, Islamic Azad University, Tehran Center Branch, Iran. (m.damankeshideh@yahoo.com)

Received: ٢٠٢٤/٠٧/٣١ **Accepted:** ٢٠٢٥/٠٢/٠٢

Abstract

The ease of converting electricity into other energies has caused human activities to be highly dependent on it. Environmental issues, limited resources, unfair distribution of resources and the strong dependence of countries' economies on energy have caused more attention to be paid to optimizing the mix of electricity producing resources. Also, different goals are proposed in policy-making and comprehensive planning, which are in conflict with each other; so It's important to optimize the composition of the energy production portfolio is based on what purpose. In this research, the electricity generation portfolio is a combination of fossil, renewable and nuclear energy groups, and optimization is done using the genetic algorithm method with MATLAB software in single-objective (GA) and multi-objective (NSGA-II) modes. The comparison of optimization methods showed that the share of energies for single-objective optimization based on economic index is different from modes based on environmental index and Multi-purpose optimization. Through multi-objective optimization, a set of solutions is introduced, each of which fulfills one of the objectives at an acceptable level. In other words, achieving general optimal points is more likely than single-objective mode. single-objective optimization usually introduces local optimal points and leads to misguidance and moving away from the main goal.

JEL Classification: C٦١, O١٣, Q٤٣, Q١

Keywords: genetic algorithm, single-objective optimization, multi-objective optimization, electric energy portfolio.

[٢]. Corresponding Author