نشریه علمی(فصلنامه) پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی

سال ششم/ شماره ۲۰/ پاییز ۱۳۹۹/ صفحات ۱۵۶ - ۱۲۴

بهینه‌یابی سهم انواع انرژی‌های فسیلی در صنایع انرژی بر ایران

پیام رشیدی

دانشجوی دکتری اقتصاد، دانشگاه فردوسی مشهد

payam.rashidi@mail.um.ac.ir

تقی ابراهیمی سالاری

استادیار گروه اقتصاد، دانشگاه فردوسی مشهد (نویسنده مسؤول)

ebrahimi@um.ac.ir

مسعود همایونی‌فر

دانشیار گروه اقتصاد، دانشگاه فردوسی مشهد

homayounifar@um.ac.ir

سید مجتبی روحانی

دانشیار گروه کامپیوتر، دانشگاه فردوسی مشهد

rouhani@um.ac.ir

اهمیت مدیریت و بهینه سازی مصرف انرژی از دو منظر امنیت انرژی و ملاحظات زیست محیطی بسیار مورد توجه سیاستگذاران حوزه انرژی و محیط زیست قرار دارد. در این مطالعه با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب، سهم بهینه انواع انرژی های فسیلی در صنایع انرژی‌بر ایران شامل صنایع تولید مواد غذایی و آشامیدنی ، تولید زغال کک، پالایشگاه نفت و سوخت هسته‌ای، تولید مواد و محصولات شیمیایی، تولید سایر محصولات کانی غیرفلزی و تولید فلزات اساسی محاسبه شده است که بر اساس آن سهم نفت سفید به ترتیب ۰/۰۹۸، ۰/۰۱۷، ۰/۰۱۶، ۰/۰۵، ۰/۰۱۴، سهم گازوئیل، ۱۲/۸۸، ۰/۹۳، ۰/۶۲، ۱/۹۷، ۰/۹۶، سهم گاز طبیعی، ۶۸/۸۱، ۸۵/۲۵، ۹۸/۲۹، ۸۰/۳۲، ۹۸، سهم گاز مایع، ۰/۱۸، ۲/۱۷، ۰/۰۸، ۲/۶۶، ۰/۳۳، سهم بنزین، ۱/۳۲، ۰/۲۹، ۰/۳۷، ۰/۱۵، ۰/۰۵۲ و سهم نفت سیاه و کوره به ترتیب ۱۶/۷، ۱۱/۱۸، ۰/۶۲، ۱۴/۸۳ و ۰/۶۵ درصد بدست آمده است. سپس با استفاده از تحلیل پوششی داده ها (مدل مازاد مبنا) کارایی اقتصادی و زیست محیطی زیربخش های منتخب صنعت با استفاده از مقادیر بهینه اندازه گیری و با کارایی در حالت مقادیر واقعی مصرف انرژی در سال های ۹۰، ۹۳، ۹۴ و ۹۵ مقایسه شده است که نشان دهنده بهبود کارایی اقتصادی و زیست محیطی در سال های مورد بررسی می باشد.

واژگان کلیدی: کارایی ، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم ژنتیک ، مدل مازاد مبنا، انرژی

تاریخ دریافت: ۳۰ / ۶ / ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: ۱۴ / ۸ / ۱۳۹۹

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

۱. مقدمه

مصرف بالای انرژی در جهان باعث دو نگرانی در مورد آینده شده است؛ نگرانی اول در مورد انرژی های پایان پذیر و نگرانی دوم در مورد انتشارگازهای آلاینده ناشی از مصرف انرژی. از طرف دیگر تفکر بکارگماری اقتصاد زیست محیطی و رشد اقتصادی به عنوان اصلی ترین هدف توسعه تلقی می‌شود. نکته اساسی در اقتصاد محیط زیست آن است که اقتصاد و محیط زیست جدا از یکدیگر نبوده و هیچ تصمیم اقتصادی یافت نمی‌شود که بر محیط طبیعی و مصنوعی تأثیر نگذارد. انرژی از جمله عواملی است که در اکثر فعالیت‌های اقتصادی مورد استفاده قرار می‌گیرد و امنیت ملی اکثر کشورها تا حدود زیادی در گرو دسترسی مطمئن به انرژی است، از این رو آینده‌ی تولید و مصرف حامل‌های انرژی و کاربرد بهینه‌ی آن‌ها از اهمیتی خاص برخوردار است. با توجه به گزارش‌های منتشر شده توسط آژانس بین المللی انرژی (IEA)[1] در سال ۲۰۱۷، شدت مصرف انرژی[2] در ایران چندین برابر کشورهای صنعتی است. به عنوان نمونه شدت انرژی در ایران پنج برابر ژاپن، ۱/۷ برابر چین، پنج برابر آمریکا و کشورهای پیشرفته (OECD)[3] و ۲/۵ برابر میانگین جهانی می‌باشد، که این امر موجب نگرانی‌های فراوانی طی دهه‌ی اخیر شده است به گونه‌ای که با ادامه‌ی این روند در چند سال آینده مقدار تولید فعلی جواب‌گوی مصرف داخلی نخواهد بود و در نتیجه یا باید بر میزان تولید داخلی اضافه گردد و یا باید با وارد کردن انرژی از کشورهای دیگر نیاز داخلی تأمین گردد.

بر اساس گزارش مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی (۱۳۹۴)، بخش صنعت کشور با وجود فراز و نشیب‌های زیاد در دهه‌های اخیر، به طور میانگین حدود ۱۸٪ از تولید ناخالص ملی را

1. International Energy Agency (IEA)
2. TPES/GDP
3. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

به خود اختصاص داده است که بر اساس کدهای دو رقمی ISIC ، زیربخش‌های صنایع تولید مواد و محصولات شیمیایی، صنایع تولید زغال کک، پالایشگاه های نفت و سوخت‌های هسته‌ای، تولید فلزات اساسی، تولید سایر محصولات کانی غیرفلزی و تولید مواد غذایی و آشامیدنی سهم عمده‌ی ارزش تولید بخش صنعت و مصرف انرژی را به خود اختصاص داده‌اند.

صنعت در زمینه‌ی نوآوری‌های فنی و تحقیق و توسعه برای نیل به توسعه‌ی اقتصادی هر کشوری از جمله ایران نقش و جایگاهی ویژه دارد و آمارهای رسمی نشان می‌دهد که یکی از بخشهای عمده‌ی مصرف کننده‌ی انرژی در ایران است. بخش صنعت سهم ۲۴ درصدی از مصرف انرژی کل کشور دارد که از نظر سهم مصرف انرژی، نسبت به میانگین جهانی و کشورهایی نظیر چین، هند، کره جنوبی، ژاپن و آلمان کمتر و نسبت به میانگین اتحادیه اروپا وکشورهای ایتالیا، انگلیس، آمریکا و کانادا بیشتر است (آژانس بین المللی انرژی، ۲۰۱۷).

همچنین شدت مصرف انرژی در بخش صنعت ایران از میانگین جهانی و کشورهای صنعتی مانند آمریکا، ژاپن، هند و کره جنوبی بیشتر می‌باشد. این درحالی است که در دهه‌های گذشته شدت مصرف انرژی در بخش صنعت در کشورهای یادشده بسیار بیشتر از ایران بوده است و این کشورها توانسته‌اند با تخصیص بهینه‌ی منابع انرژی و افزایش کارایی، شدت مصرف انرژی را کاهش دهند. شایان توجه است که در اغلب کشورهای صنعتی بیشترین کاهش شدت مصرف انرژی و انتشار گاز دی اکسید کربن بر پایه‌ی بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش صنعت این کشورها مشاهده می‌شود (شورای جهانی انرژی، ۲۰۱۵)[1].

از این رو در این مطالعه ابتدا با استفاده از روش تحلیل پوششی داده ها (مدل مازاد مبنا) ناکارایی صنایع منتخب بررسی شده سپس سهم بهینه انواع انرژی شامل گازوییل، گاز طبیعی، گاز مایع، بنزین، نفت سفید، نفت سیاه و کوره در زیر بخش های صنعت ایران با روش بهینه‌سازی چند هدفه الگوریتم

1. World Energy Council, 2015

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

ژنتیک مرتب سازی نامغلوب۲[2]، با توجه به اهداف اقتصادی و زیست محیطی، تعیین می‌شود. قلمرو این مطالعه بخش صنعت ایران می‌باشد که بر اساس تفکیک گروه‌های دو رقمیISIC ، زیربخش های تولید مواد غذایی و آشامیدنی، صنایع تولید زغال کک، پالایشگاه های نفت و سوخت‌های هسته‌ای، صنایع تولید مواد و محصولات شیمیایی، تولید سایر محصولات کانی غیرفلزی وتولید فلزات اساسی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

تفکر بهینه‌سازی مصرف انرژی در جهان از سال ۱۹۷۰ آغاز شده است، به طوری که هم اکنون مقوله‌ی مدیریت و بهینه‌سازی مصرف انرژی خود به عنوان یکی از منابع جدید انرژی، درکنار منابع فیزیکی موجود، محسوب می‌شود. منظور از بهینه‌سازی مصرف انرژی، انتخاب الگوها و اتخاذ و به‌کارگیری روش‌ها و سیاست‌هایی در مصرف درست انرژی است که از نقطه نظر اقتصاد ملی مطلوب باشد و استمرار وجود و دوام انرژی و ادامه‌ی حیات و حرکت را تضمین کند.

در این چارچوب تعیین سهم صورت‌های مختلف انرژی در سبد انرژی هر جامعه با توجه به امکانات دراز مدت آن جامعه، همچنین بکارگیری پربازده‌ترین شیوه‌ی استفاده از آن ها که متضمن کاهش تخریب منابع انرژی و نیز کاهش تأثیرات سوء ناشی از استفاده‌ی ناصحیح از انرژی بر عوامل دیگر حیات و محیط زیست باشد مدنظر است. این استفاده‌ی درست و به جا از انرژی نه تنها متضمن استمرار حیات و توسعه‌ی پایدار جامعه است بلکه منجر به بقاء انرژی برای همگان و نسلهای آتی و مانعی برای تولید و گسترش آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از مصرف نادرست انرژی خواهد بود.

2. Nondominated Sorting Genetic Algorithm II

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

ژانگ[1] و همکاران(۲۰۲۰) در مطالعه ای تأثیر سیستم تجارت انتشار بر کاهش انتشار دی اکسید کربن را در زیربخش های صنعت کشور چین بررسی نمودند. این تحقیق در راستای تحقق توسعه اقتصاد کم کربن در کشور چین با استفاده از داده های پنل در سطح استانی انجام شده است و پژوهشگران نتیجه گرفته اند که اجرای سیاست های محدودکننده انتشار Co2 همزمان با توسعه فن آوری می‌تواند ۱۴/۵ درصد انتشار دی اکسید کربن را کاهش دهد درحالیکه تأثیر آن بر تولید ناخالص داخلی ۴/۸- درصد خواهد بود. وانگ[2] و همکاران (۲۰۱۹) با توجه به محدودیت های ظرفیت ذغال سنگ در تأمین انرژی کشور چین، طرح تخصیص سهمیه بهینه ذغال سنگ در استان های کشور چین را ارایه نموده اند. در این مطالعه از روش بهینه سازی چند هدفه ازدحام ذرات (PSO) در دو سطح ملی و استانی استفاده شده است. براساس مقادیر و سهمیه بهینه بدست آمده نرخ رشد بهره وری کل در سطح ملی و استانی به نرتیب ۲/۱۴ و ۰/۶ درصد افزایش می یابد و همچنین افزایش منافع زیست محیطی به میزان ۷۳ و ۷۱ میلیارد یوان به ترتیب در سطح ملی و سطح استانی را در پی خواهد داشت. سلاماه[3] و همکاران(۲۰۱۹) به بررسی شدت انرژی در زیربخش صنعت نساجی در کشور اندونزی پرداختند. محققان برای تشخیص اثرات ساختاری و شدت انرژی از روش تجزیه دیویژیا[4] استفاده نمودند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که شدت انرژی بین سال های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۴ در حال کاهش بوده است. لی[5] و همکاران(۲۰۱۸) به منظور بهینه سازی مصرف انرژی، عوامل مؤثر بر بهره وری انرژی را در صنایع انرژی بر منطقه پکن با استفاده از شاخص مالم کوئیست برسی نمودند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد منطقه هبی[6] دارای بالاترین شاخص بهره وری

1. Zhang
2. Wang
3. Salamah
4. Divisia
5. Li
6. Hebi

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

کل در تولید و تأمین انرژی الکتریکی و منطقه تیانجین[1] دارای بالاترین شاخص میانگین بازده انرژی در تولید مواد خام و محصولات شیمیایی و ذوب و فرآوری فلزات می‌باشد. ژیانگ[2] و همکاران(۲۰۱۷) برای تحقق اهداف توسعه پایدار در بخش انرژی، یک مدل ترکیبی از تحلیل پوششی داده ها و تئوری بازی ها را در بهینه سازی مصرف انرژی در استان های کشور چین ارایه نمودند. براساس این مدل وزنی پیش بینی می‌شود که تا سال ۲۰۲۰ هرچند تسلط ذغال سنگ بر تأمین انرژی از بین نخواهد رفت ولی هدف تنوع بخشی به تأمین انرژی در ساختار انرژی مناطق مختلف تحقق خواهد یافت. کراتیپرانون و چویچام[3] (۲۰۱۷) با استفاده از الگوریتم بهینه سازی چند هدفه ژنتیک، سهم و مقدار بهینه انواع انرژی را برای تولید انرژی برق درکشور تایلند تعیین کردند. اهداف این مدل شامل حداکثرسازی تولید انرژی الکتریکی و حداقل کردن هزینه تولید بوده است. ژو[4] و همکاران(۲۰۱۷) به منظور کاهش انتشار کربن در استان‌های چین از یک مدل ترکیبی استفاده نمودند. این تحقیق با هدف بیشینه کردن کارایی تخصیصی انجام گردید و متدولوژی آن بکاگیری ترکیب تحلیل پوششی داده‌ها و تئوری بازی‌ها می‌باشد. محققان در قسمت تحلیل پوششی داده‌ها از روش مازاد مبنا (SBM) و در تئوری بازی‌ها از رویکرد مجموع صفر(Zero-Sum-Gain) استفاده کرده‌اند. لیو[5] و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک و بهینه سازی چندهدفه، به بهینه سازی مصرف انرژی پرداخته اند. در این مطالعه تأکید بیشتری بر فرصت های ذخیره سازی انرژی در شرکت های تولیدی شده و مدل بهینه سازی چند هدفه بر مبنای روش الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب توسعه داده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک در

1. Tianjin
2. Xiong
3. Keeratipranon & Choeichum
4 . Guo
5 . Liu

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

حل مسائل بهینه سازی چند هدفه از اثربخشی و کارایی بالایی برخوردار است. فضل الهی[1] و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای یک مدل چند هدفه–چند دوره ای برای بهینه سازی مصرف انرژی در ژنو در کشور سوئیس ارائه دادند. آنان در این مطالعه از یک الگوی بهینه‌سازی غیرخطی با در نظر گرفتن محدودیت های زیست محیطی استفاده کردند. اهداف این مدل شامل حداکثر کردن کارایی و حداقل کردن آلودگی ناشی از مصرف انرژی و هزینه های مصرف انرژی است. نتایج این مطالعه نشان داد که با انتخاب مناسب منابع انرژی، تکنولوژی های صرفه جویی در مصرف انرژی به صورت متمرکز و غیر متمرکز و همچنین شبکه های توزیع مناسب، آلودگی محیط زیست قابل کاهش بین ۵۰ تا ۶۵ درصد و هزینه های سالانه نیز قابل کاهش بین ۲۲ تا ۲۷ درصد هستند. گنزالس[2] و همکاران(۲۰۱۵) با استفاده از الگوریتم ژنتیک کارایی فنی را در مدل تحلیل پوششی داده‌ها حداکثر نمودند. محققان در این پژوهش از مدل مازاد مبنا برای محاسبه کارایی فنی استفاده نموده و برای حداقل کردن فاصله متغیرهای مدل از مرز کارای تولید، مدل بهینه یابی الگوریتم ژنتیک را به کار برده‌اند. براساس بکارگیری این مدل ترکیبی غیرپارامتری و فرا ابتکاری، زمان بهینه یابی به حداقل رسیده است.

همچنین هالکوس و تزرمیس[3] (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای ارتباط بین مصرف انرژی تجدیدپذیر وکارایی اقتصادی را با استفاده از برآوردگرهای شرطی تحلیل پوششی داده ها همراه با رگرسیون های ناپارامتریک برای یک نمونه ۲۵ عددی از کشورهای اروپایی در سال ۲۰۱۰ مورد مطالعه قرار دادند. شی[4] و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهشی یک مدل گسترش یافتهDEA را با ستانده های نامطلوب به عنوان ورودی هایی برای ارزیابی کارایی انرژی در بخش صنعت در چین توسعه دادند.

1 . Fazlollahi
2. Gonzalez
3. Halkos & Tzeremes
4. Shi

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

سیتونن[1] و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای به بررسی عوامل مؤثر بر کارایی انرژی و انتشار CO_2 در صنعت فولاد پرداخته‌اند. اونوت[2] و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای به بهینه سازی منابع انرژی در بخش صنعت کشور ترکیه با استفاده از روش برنامه ریزی خطی فیزیکی پرداختند. مژر[3] و همکاران(۱۹۹۸) با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی چندهدفه، صادقی و حسینی (۲۰۰۶) با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و محقر و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه و روش برنامه‌ریزی آرمانی به بهینه‌سازی مصرف انرژی پرداخته‌اند.

۳. مبانی نظری

انرژی به عنوان یکی از نهاده‌های مهم در تولید کالاها وخدمات محسوب شده و نقش مهمی را در طرف عرضه و تقاضای اقتصاد ایفا می‌کند. روند مصرف انرژی در طول دهه‌های مختلف تحت تأثیر عوامل مختلفی بوده است که می‌توان آن‌ها را در دو گروه طبقه بندی نمود: اول افزایش مهار نشدنی مصرف انرژی تحت تأثیر تغییر سطح و استانداردهای زندگی می‌باشد که استفاده از وسایل انرژی‌بر را افزایش داده است. دوم تغییر ساختار مصرف انرژی است که توسط اقتصاددانان انرژی دوره گذار نامیده می‌شود و دربرگیرنده‌ی تغییرات در نوع مصرف و نوع انرژی می‌باشد(پیرسن[4]،۱۹۸۸).

در دهه های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ سیاست های بهینه سازی خاصی برای مصرف انرژی وجود نداشت و در بهترین حالت در برخی از زیربخش‌ها بدون توجه به هماهنگی بین بخشی، سیاست‌هایی اعمال می شد که دلیل آن هم به طور مشخص تصور فراوانی انرژی بود. پیشرفت‌های صنعتی و اقتصادی شگرف که با دسترسی به منابع عظیم انرژی به ویژه نفت میسر گشته از جنگ دوم جهانی تا کنون نقشی پویا و سازنده در اقتصاد داشته است. انرژی در کشورهای در حال توسعه به مانند کشورهای

1. Siitonen
2. Onut
3. Mezher
4. Pearson

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

در حال توسعه اهمیت ویژه ای یافته است هرچند که ماهیت مسایل و چالش های انرژی در میان این دو گروه از کشورها متفاوت است لیکن بنیادی‌ترین مشکل اقتصادی در کشورهای در حال توسعه انتخاب سیاست های انرژی می باشد به ویژه درکشورهایی که با کمبود منابع مواجه می باشند تأثیر انتخاب سیاست های انرژی بر اقتصاد شدیدتر می‌باشد(استیونس[۱]، ۲۰۰۰).

در تئوری های نوین اقتصادی علاوه بر سرمایه و نیروی کار اعم از متخصص و غیر متخصص که از مهمترین عوامل مؤثر بر رشد اقتصادی هستند، عامل انرژی نیز وارد مدل شده است که در توابع رشد در نظر گرفته می‌شود ولی اهمیت آن در مدل‌های مختلف یکسان نیست. استرن[۲] (۱۹۹۳) به نقل از آیرس و نایر[۳] (۱۹۸۴) بیان می‌کند که در مدل‌های بیوفیزیکی رشد، انرژی مهمترین عامل رشد است، زیرا نیروی کار و سرمایه عوامل واسطه‌ای هستند که برای به‌کارگیری به انرژی وابسته‌اند. همچنین استرن (۱۹۹۳) به نقل از اقتصاددانان نئوکلاسیک مانند برنت[۴] (۱۹۷۳) و دنیسون[۵] (۱۹۷۹، ۱۹۸۵) بیان می‌کند که انرژی از طریق تأثیری که بر روی نیروی کار و سرمایه دارد به صورت غیرمستقیم بر رشد اقتصادی نیز مؤثر است، ولی اثر مستقیمی بر رشد اقتصادی ندارد.

اقتصاددانان نئوکلاسیک مانند برندت و وود[۶] (۱۹۷۵) انرژی را عامل تولیدی در تابع تولید کل می‌دانند. آنان تابع تولیدی به صورت زیر پیشنهاد کردند:

$$Q = f(G(K,E),L) \qquad (۱)$$

به این مفهوم که انرژی و سرمایه با هم ترکیب شده و عامل تولید G را ایجاد می‌کنند، که پس از ترکیب با نیروی کار محصول به‌دست می‌آید. بنابراین انرژی ارتباط تفکیک‌پذیر ضعیفی با نیروی کار دارد (فطرس و دیگران، ۱۳۹۱).

5. Stevens
2. Stern
3. Ayres & Nair
4. Bernet
5. Denison
6. Berndt & Wood

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

٤- روش پژوهش

واژه‌ی بهینه‌سازی[1] در ریاضیات مفهوم خاص خود را دارد و در کشور ما نیز در زمینه‌های مختلف از جمله انرژی مورد استفاده قرارگرفته است. بهینه‌سازی مصرف انرژی برای یک فرایند می‌تواند به صورت موضعی و یا به صورت جامع برای یک سیستم که متشکل از چندین فرایند است، انجام شود. بر اساس تئوری بهینه‌سازی، نتیجه‌ی بهینه‌سازی برای چندین فرایند به صورت جداگانه الزاماً برابر با نتیجه‌ی بهینه‌سازی به صورت جامع نیست و بنا بر تعریف، بهینه‌سازی به صورت جامع می‌تواند در برگیرنده‌ی ترکیبی از دو فرآیند و یا چندین فرآیند باشد. تا کنون مدل‌های زیادی برای تخصیص بهینه‌ی منابع انرژی ارائه شده است. برخی مدل‌های موجود انرژی مانند مسیج[2] (مدل آلترناتیوهای سیستم‌های عرضه انرژی و اثرات کلی زیست محیطی آن‌ها) و تایمز[3]، به بهینه‌سازی سیستم انرژی می‌پردازند(جبراج و اینیان، ۲۰۰۶)[4]. اکثر این مدل‌ها دارای فرضیاتی هستند که استفاده از آن ها را برای ایران با مشکل مواجه می‌کند. از جمله موارد دیگری که استفاده از این مدل‌ها را در ایران با مشکل مواجه خواهد ساخت، نیاز به ورودی‌های متنوع و فراوان است، که متأسفانه داده‌هایی با این جزئیات در ایران وجود ندارد. از این رو در اغلب موارد به ناچار باید از داده‌های تخمینی استفاده کرد.

به دلایل فوق، اخیراً تمرکز بیشتری بر روش‌های ابتکاری یا فرا ابتکاری با جستجوی تصادفی صورت گرفته است. روش‌های جستجوی ابتکاری، روش‌هایی هستند که می‌توانند جوابی خوب

1. Optimization
2. MASSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact)
3. TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System)

۴- در رابطه با بهینه سازی، مدل های زیادی توسط اقتصاد دانان انرژی ارایه و بکار گرفته شده است که از جمله می‌توان به مدل های (BESOM)، (TESOM)، (MPEEE)، (AEPSOM) و (OREM) اشاره نمود که برای مطالعه بیشتر می توان به مقاله ی "مروری برمدلهای انرژی" نوشته جبراج و اینیان (S. Jebraj & S. Inyan) مراجعه نمود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

(نزدیک به بهینه) در زمانی محدود برای یک مسأله ارائه کنند. روش‌های جستجوی ابتکاری عمدتاً بر مبنای روش‌های شمارشی می‌باشند، با این تفاوت که از اطلاعات اضافی برای هدایت جستجو استفاده می‌کنند. این روش‌ها از نظر حوزه کاربرد، کاملاً عمومی هستند و می‌توانند مسائل خیلی پیچیده را حل کنند. عمده این روش‌ها، تصادفی بوده و از طبیعت الهام گرفته شده‌اند(فروزان و نیرومند، ۱۳۹۰) .

در این مطالعه برای تعیین سهم بهینه حامل‌های انرژی فسیلی در زیربخش‌های انرژی‌بر صنعت ایران از الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب۲ (NSGAII) استفاده شده است لیکن ابتدا این پرسش مطرح می‌شود که آیا مصرف انرژی در زیربخش های صنعت ایران بهینه است؟ برای پاسخ به این پرسش کارایی اقتصادی و زیست محیطی کدهای اصلی صنعت ایران شامل صنایع تولید مواد غذایی و آشامیدنی، صنایع تولید زغال کک، پالایشگاه های نفت و سوخت‌های هسته‌ای، صنایع تولید مواد و محصولات شیمیایی، صنایع تولید سایر محصولات کانی غیرفلزی و صنایع تولید فلزات اساسی محاسبه می‌شود.

برای این منظور ارزش تولید به عنوان ستانده مطلوب، انتشار گاز دی اکسید کربن به عنوان ستانده نامطلوب و نهاده های غیر انرژی شامل نیروی کار و سرمایه و منابع انرژی فسیلی شامل نفت سفید، نفت گاز (گازوئیل)، گاز طبیعی، گاز مایع، بنزین و نفت خام در نظر گرفته می‌شوند. محاسبه کارایی به روش تحلیل پوششی داده ها (DEA)[1] و مدل مازاد مبنا (SBM)[2] انجام می‌شود و عدم کارایی نشانه‌ی عدم تخصیص بهینه‌ی منابع انرژی در زیربخش‌های صنعت ایران می‌باشد.

1. Data Envelopment Analysis
2 .Slack Based Measure

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

الگوریتم ژنتیک[1]

الگوریتم ژنتیک روش بهینه سازی الهام گرفته از طبیعت جاندار است که می‌توان در طبقه بندی‌ها از آن به عنوان یک روش عددی، جستجوی مستقیم و تصادفی یادکرد. این الگوریتم، الگوریتمی مبتنی بر تکرار است و اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس گردیده و با تقلید از تعدادی از فرایندهای مشاهده شده در یک جمعیت از تکامل طبیعی استفاده می کند تا راه حل های جدید و بهبود یافته را ایجاد کند. این الگوریتم در مسایل متنوعی نظیر بهینه‌سازی، شناسایی و کنترل سیستم، پردازش تصویر و مسائل ترکیبی، تعیین توپولوژی و آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم‌های مبتنی بر تصمیم و قاعده به کار می‌رود. همچنین الگوریتم ژنتیک یکی از انواع الگوریتم‌های فراابتکاری (فرامکاشفه‌ای) به شمار می‌رود که در دهه هفتاد میلادی توسط جان هلند[2] ابداع شد(بهشتی نیا، ۱۳۹۵). این الگوریتم براساس نظریه تکامل داروین بنا نهاده شده است و مفاهیم اساسی آن وراثت و جهش می‌باشد.

الگوریتم ژنتیک یک رویه‌ی تکراری بوده که شامل یک جمعیت با اندازه‌ی ثابت است. هر یک از افراد این جمعیت با توجه به یک رشته‌ی محدود از سمبل‌ها ارائه می‌شوند که از آن‌ها تحت عنوان ژنوم یاد می‌شود. هر یک از این ژنوم‌ها یک راه حل ممکن در فضای مسأله را پر می‌کنند. از فضای مسأله به فضای جستجو تعبیر می‌شود که این فضا تمام راه‌حل‌های ممکن مسأله را در بر می‌گیرد. منصرف از تفاوت روش‌های مختلف، یک الگوریتم ژنتیک استاندارد به صورت زیر عمل می کند:

ابتدا یک جمعیت اولیه به صورت تصادفی و یا اکتشافی فراهم آورده می‌شود و هر مرحله تکاملی یک نسل نامیده می‌شود. هر یک از افراد جمعیت بر مبنای یک سری ملاک‌های کیفی از

1. Genetic Algorithm
2. John Holland

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

پیش تعریف شده ارزیابی می‌شوند. این کار توسط تابع شایستگی انجام شده و نتیجه‌ی کار تحت عنوان میزان شایستگی فرد شناخته می‌شود. برای شکل‌گیری یک جمعیت جدید (نسل بعدی) افراد بر مبنای میزان شایستگی‌شان انتخاب می‌شوند. روش‌های مختلفی برای انجام این انتخاب وجود دارند که ساده‌ترین آن‌ها توسط هالند مطرح شده است. در این روش افراد با احتمالی متناسب با میزان شایستگی‌شان انتخاب می‌شوند. به این ترتیب افراد شایسته‌تر چندین بار برای حضور در جمعیت جدید انتخاب شده و به این ترتیب شانس بیشتری برای تولید مثل خواهند داشت. این در حالی است که افراد با شایستگی کمتر محو شده و شانسی برای انتخاب و تولید مثل پیدا نمی‌کنند(نجار پور و صادق زاده، ۱۳۸۹).

الگوریتم ژنتیک از مزایای متعددی برخوردار است که در اینجا به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. الگوریتم ژنتیک به سرعت می‌تواند مجموعه‌ای بزرگ از راه‌حل‌ها را پویش نماید. طبیعت الگوریتم ژنتیک به‌گونه‌ای است که نیازی به دانستن هیچ قاعده‌ای در ارتباط با مسأله مورد حل ندارد و تنها با قواعد داخلی خودش عمل می‌کند. الگوریتم ژنتیک به صورت کارا و مؤثری فضای مدل را جستجو می‌کند، بنابراین شانس بیشتری نسبت به روش‌های بهینه‌سازی محلی برای یافتن نقطه‌ی بهینه‌ی سراسری خواهد داشت. سرانجام این‌که این روش نیازی به محاسبه مشتقات جزئی ندارد.

در روش الگوریتم ژنتیک از عملگرهای مختلفی وجود دارد که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

- تلفیق: عملگر تلفیق وظیفه آمیزش و ترکیب نقاط انتخاب شده برای ایجاد نسل آینده الگوریتم را برعهده دارد. نقاط یا رشته هایی که در قسمت انتخاب به عنوان والد در نظر گرفته شدند ژنهایشان را با هم مبادله می‌کنند و اعضای جدید بوجود می‌آورند.
- جهش: همانطور که در طبیعت پدیده جهش ژنتیکی وجود دارد در الگوریتم ژنتیک نیز این پدیده با عملگر جهش ایجاد می‌شود به گونه ای که یک ژن از رشته ها به صورت تصادفی تغییر می‌کند . این عمل باعث افزایش تنوع در خصوصیات جمعیت تولید شده می‌شود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

ـ انتخاب: همانطور که عنوان شد برای ایجاد نسل جدید باید از میان جمعیت اولیه والدین مناسب برای تلفیق انتخاب شود که به نوعی می توان گفت عملگر انتخاب به عنوان رابط دو نسل عمل می‌نماید. هرچند تصور اولیه این است که بهترین اعضا از نظر تطابق باید برای ایجاد نسل جدید انتخاب شوند ولی باید توجه داشت که در الگوریتم ژنتیک تمرکز روی بهترین ژن ها می‌باشد.

ـ اختتام الگوریتم: روش ها و معیارهای گوناگونی برای تشخیص زمان پایان دادن به ایجاد جواب های جدید و توقف الگوریتم وجود دارد که می‌توان به همگرایی کل جمعیت یا فاصله ارزیابی (برازندگی) بهترین فرد جمعیت از متوسط ارزیابی ها (برازندگی ها) اشاره نمود.

تحلیل پوششی داده ها: مدل مازاد مبنا

روش تحلیل پوششی داده ها واحدهای ناکارا را روی مرز تولید مشخص می‌نماید. مدل های CCR و BCC که برمبنای مدل فارل[1] (۱۹۵۷) به عنوان مدل های اولیه توسط چارنز[2] و همکاران (۱۹۷۸) ارایه گردید، از دو جهت ورودی محور و خروجی محور کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده را اندازه گیری می‌کنند. در حالت ورودی محور کاهش هرچه بیشتر ورودی ها با ثابت در نظر گرفتن خروجی ها و در حالت خروجی محور افزایش هرچه بیشتر خروجی ها با ثابت در نظر گرفتن ورودی‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد(میرحسنی، ۱۳۹۴).

براساس محاسبه ناکارایی در مدل های CCR و BCC ، میزان کاهش در ورودی یا افزایش در خروجی بدون تغییر در ترکیب ورودی‌ها یا خروجی‌ها مشخص می‌گردد. به عبارت دیگر مدل‌های مذکور تنها ناکارایی تکنیکی[3] را مشخص می کنند و نمی‌توان براساس آن ناکارایی

1. Farrell
2.Charez, et al
5. Technical Inefficiency

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

ترکیبی[1] واحدهای تصمیم‌گیری را از بین برد. اما حالت سومی هم وجود دارد که کمبود خروجی و مازاد ورودی همزمان مورد توجه می‌باشد. مدل های مازاد مبنا و مدل های جمعی[2] از جمله مدل‌های غیرشعاعی می باشند که در محاسبه کارایی، کمبود ستانده و مازاد نهاده را به طور همزمان مورد محاسبه و ارزیابی قرار می‌دهند که در مدل های نهاده گرا و ستاده گرا امکان پذیر نمی‌باشد(کوپر و همکاران، ۲۰۰۷). در مدل مازاد مبنا که توسط تن[3] در سال ۲۰۰۱ ارایه گردید، مشکل تغییر کارایی بر اثر تغییر واحد اندازه گیری که در مدل‌های شعاعی دیده می‌شود وجود ندارد (شهیکی تاش و همکاران، ۱۳۹۴) و سه اصل شاخص کارایی، تغییر ناپذیری واحدها و یکنواختی حفظ شده است(ممی پور و نجف زاده، ۱۳۹۵).

برای اندازه گیری کارایی اقتصادی در صنایع مورد بررسی از مدل مازاد مبنا استفاده می‌شود که به صورت ذیل تعریف می‌گردد:

$$\rho = min \frac{1 - \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{n}\sum_{r=1}^{t}\frac{s_j^+}{y_{r0}}} \qquad (۲)$$

s.t:

$$x_0 = \sum \lambda_j x_{ij} + s_0^-$$

$$y_0^g = \sum \lambda_j y_j^g - s_0^{g+}$$

$$\sum \lambda_j = 1$$

$$\lambda, s^+, s^- \geq 0$$

$$i = 1, \ldots, m$$

[1]. Mix Inefficiency
[2]. Additive model
[3]. Tone

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

بطوریکه ρ بیانگر کارایی اقتصادی، j بیانگر هر یک از صنایع یا کدهای ISIC مورد بررسی، i بیانگر نهاده ها (نیروی کار، سرمایه و انرژی) ، y^g بیانگر ستانده مطلوب، s^- متغیر مازاد، s^+ متغیر کمبود و λ بیانگر وزن ستاده ها و نهاده ها می باشد(تن، ۲۰۰۱).

رابطه (۲) را می توان به صورت ذیل بازنویسی نمود:

$$\left(\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{x_{j0}-s_i^-}{x_{i0}}\right)\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{y_{j0}+s_j^+}{y_{j0}}\right)^{-1} \qquad (۳)$$

که عبارت اول بیان کننده متوسط نرخ کاهش نسبی ورودی ها یا ناکارایی نهاده ها و عبارت دوم بیان کننده نرخ متوسط افزایش در خروجی‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر مدل SBM کارایی واحد تصمیم گیری را براساس نسبت ناکارایی ورودی به خروجی اندازه گیری می کند(تن، ۲۰۰۱).

در این مدل فرض می‌شود که مقادیر نهاده‌ها و ستانده‌ها نسبت به تغییر واحدها ثابت و یا به عبارت دیگر اندازه کارایی نسبت به واحد اندازه گیری عوامل ورودی و خروجی پایا[1] (مستقل از واحد) است. همچنین این اندازه برحسب هر یک از متغیرهای کمکی ورودی و خروجی به طور یکنوا[2] کاهشی است. براساس مدل ارایه شده، یک واحد تصمیم گیری زمانی کارا می‌باشد که مقدار تابع هدف برابر یک باشد و این زمانی محقق می گردد که جواب بهینه فاقد مازاد ورودی و کمبود خروجی باشد. به عبارت دیگر مقدار نهاده ها و ستانده های واحد مورد بررسی معادل واحد مرجع باشد(تن،۲۰۰۱):

$$\rho^* = 1 \qquad (۴)$$

$$s^{-*} = 0 \ , \ s^{+*} = 0$$

1 - Unit Invariant

2- Monotone

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

همچنین برای ارزیابی کارایی زیست محیطی صنایع مورد بررسی از مدل مازاد مبنای جهت دار- نهاده استفاده می‌گردد که برمبنای مدل تن، توسط ژو[1] و همکاران در سال ۲۰۱۷ به صورت روابط ذیل ارایه گردید:

$$\beta = min1 - \frac{1}{m}\sum_{r=1}^{k}\frac{s_0^{b-}}{y_{rb}^{b}} \qquad (۵)$$

s.t:

$$x_0 = \sum \lambda_j x_{ij} + s_0^-$$
$$y_0^g = \sum \lambda_j y_j^g - s_0^{g+}$$
$$y_0^b = \sum \lambda_j y_{rj}^b - s_0^{g+}$$
$$\sum \lambda_j = 1$$
$$\lambda, s_0^-, s_0^{b-}, s_0^{g+} \geq 0$$
$$i = 1,\ldots,m$$
$$j = 1,\ldots,n$$
$$r = 1,\ldots,k$$

در این رابطه β بیانگر کارایی زیست محیطی، j بیانگر هر یک از صنایع یا کدهای ISIC مورد بررسی، i بیانگر نهاده ها (نیروی کار، سرمایه و انرژی) ، yb بیانگر ستاده نامطلوب، s متغیر کمبود و λ بیانگر وزن ستاده ها و نهاده ها می‌باشد. و یک واحد تصمیم گیری زمانی کارا خواهد بود که مازاد ستانده نامطلوب آن مانند مازاد نهاده و کمبود ستانده مطلوب صفر و در نتیجه مقدار کارایی برابر یک باشد.

1- Guo

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب

یکی از کارآمدترین و مشهورترین الگوریتم‌های بهینه‌یابی چند هدفه، الگوریتم ژنتیک مرتب-سازی نامغلوب (NSGA-II) است که توسط دب[1] و همکاران (۲۰۰۲) ارائه شد. این الگوریتم یکی از سریع‌ترین و توانمندترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی است که نسبت به سایر روش‌ها از پیچیدگی عملیاتی کمتری برخوردار بوده و با استفاده از اصل عدم تسلط و یا عدم غلبه کردن و محاسبه فاصله ازدحام[2]، نقاط بهینه پارتو را به دست می‌آورد که از گستردگی مطلوبی در حوزه تغییرات توابع اهداف برخوردارند و به طراح آزادی انتخاب طراحی مورد نظر خود را از میان طراحی‌های بهینه شده می‌دهد به‌طوری‌که همزمان حفظ نخبه‌گرایی و پراکندگی مد نظر قرار گرفته است. در این روش ابتدا دو گروه از فرزندان با جمعیت N عضو در نظر گرفته می‌شود. این دو جمعیت با هم ادغام می‌شوند و یک جمعیت با 2N عضو را به‌وجود می‌آورند. این جمعیت با استفاده از مرتب سازی نامغلوب دسته‌بندی شده و در نهایت جمعیت جدید شامل بهترین اعضاء با N عضو به‌دست می‌آید.

زمانی‌که برای حل مسأله‌ای از یک الگوریتم چند هدفه استفاده می‌شود به این معناست که حداقل دو تابع هدف مد نظر هستند، و دیگر به آسانی نمی‌توان در مورد بعضی از جواب‌ها نظر قطعی داد. در شرایطی که دستیابی به بهترین جواب امکانپذیر نباشد، جداسازی جوابهایی که بهتر از سایرین هستند، موجب کاهش گزینه‌های تصمیم‌گیری برای تصمیم‌گیرنده می‌شوند.

در مسائل چند هدفه یک جواب موجه وقتی به وسیله‌ی جواب موجه دیگر مغلوب می‌شود که حداکثر بر مبنای تمامی اهداف به خوبی جواب موجه اول باشد و دست کم براساس یک تابع هدف بدتر از جواب موجه اول باشد. در اکثر موارد نقاطی یافت می‌شوند که هیچکدام بر دیگری برتری کامل ندارد و نمی‌توان با مفهوم غلبه‌ی دو به دو بین آن ها مقایسه‌ای انجام داد، لذا برای به دست آوردن بهترین جواب‌ها باید آن‌ها را بر اساس یک معیار مرتب کرد(دب و همکاران، ۲۰۰۲).

1. Deb
2-Crowding Distance

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

در این الگوریتم به هر جواب یک رتبه اختصاص داده می‌شود که بر اساس تعداد مغلوب شدن آن‌ها نسبت به سایر نقاط انجام می‌شود. برای هر جوابی مانند P با توجه به تعریف جواب‌های نامغلوب یک شمارنده (Np) که نشاندهنده‌ی تعداد دفعات مغلوب شدن(p) به وسیله‌ی سایر اعضای جمعیت و یک مجموعه(Sp) که شامل اعضایی ازجمعیت که توسط P مغلوب می شوند، ایجاد می‌شود. تمامی اعضای جمعیت دو به دو با یکدیگر مقایسه می شوند و مقادیر Np و Sp برای آنها محاسبه می‌گردد. با توجه به این مقادیر، رتبه‌ی مجموعه‌ی اعضای جمعیت تعیین خواهد شد. در پایان الگوریتم، نقاطی که بهترین رتبه، یعنی رتبه یک را دارا باشند، به عنوان مجموعه جواب یا نقاط پارتو فرانت انتخاب می‌شوند (میرحسینی و همکاران، ۱۳۹۱).

برای مقایسه‌ی اعضای جمعیت در الگوریتم NSGAII ، اگر بارتبه بندی اعضا نسبت به هم نتوان آنها را با یکدیگر مقایسه کرد، برای تعیین برتری اعضا نسبت به یکدیگر به یک معیار ثانویه نیازمندیم که این معیار ثانویه فاصله‌ی ازدحامی نامیده می‌شود (دب و همکاران، ۲۰۰۲). فاصله ازدحام در تعیین جمعیت و همچنین در زمان استفاده از عملگر انتخاب کاربرد دارد. الگوریتم NSGAII براساس ارزیابی نقاط و تشکیل جبهه‌های پارتو رتبه بندی شده و شروع به ساخت نسل بعدی جمعیت می‌کند تا جاییکه به حد N عضو جدید برسد لیکن برای انتخاب از آخرین جبهه پارتو برای اینکه از جمعیت N نفر تجاوز ننماید، اعضای اضافی سطح آخر را با استفاده از معیار فاصله ازدحام حذف می‌کند به این صورت که هر چه فاصله ازدحام یک عضو بیشتر باشد اولویت بالاتری برای رفتن به نسل بعد را خواهد داشت. همچنین زمانی که دو عضو از هر نظر شبیه یکدیگر باشند، عملگر انتخاب عضوی را که دارای فاصله ازدحام بالاتری می‌باشد به عنوان والد انتخاب خواهد کرد(دب و همکاران، ۲۰۰۲).

فاصله ازدحام براساس رابطه‌ی ذیل محاسبه می گردد:

$$\boldsymbol{\mathcal{T}}[\boldsymbol{i}]_{\text{distance}} = \boldsymbol{\mathcal{T}}[\boldsymbol{i}]_{\text{distance}} + (\boldsymbol{\mathcal{T}}[\boldsymbol{i}+1].\boldsymbol{m} - \boldsymbol{\mathcal{T}}[\boldsymbol{i}-1].\boldsymbol{m}) / (\max f_m - \min f_m) \qquad (۶)$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

براساس رابطه‌ی فوق برای محاسبه فاصله ازدحام ابتدا نقاط جمعیت براساس هر یک از توابع هدف به صورت جداگانه رتبه بندی شده و فاصله ازدحام نقاط ابتدا و انتهای جبهه پارتو بینهایت فرض می‌شود. فاصله ازدحام برای سایر نقاط به ازای هریک از توابع هدف عبارت است از نسبت تفاضل مقدار نقاط همسایه عضو مورد بررسی به تفاضل مقادیر بیشینه وکمینه‌ی تابع. در نهایت فاصله ازدحام برای هر عضو جمعیت از مجموع فاصله ازدحام محاسبه شده در هر یک توابع بدست می آید. هرچه فاصله ازدحام برای یک نقطه بیشتر باشد نشان می‌دهد که آن عضو جمعیت در ناحیه خلوت‌تری قرار گرفته است و بیانگراین است که نسبت به سایر جواب ها تنوع بیشتری در جمعیت ایجاد خواهد کرد(دب و همکاران، ۲۰۰۲).

۵. ساختار الگوی پیشنهادی

با توجه به اینکه در مدل بهینه یابی اهداف اقتصادی و زیست محیطی در نظر گرفته شده است برای الگوریتم ژنتیک (NSGAII) نیز متناسب با اهداف مذکور، توابع تولید، هزینه و انتشار گاز Co_2 به عنوان توابع هدف تعیین گردید.

تابع تولید

به منظور تخمین تابع تولید، فرم تابعی کاب- داگلاس برآورد شد. در این مطالعه اثر نهاده‌ی انرژی در کنار دو نهاده‌ی سرمایه و نیروی کار بر تولید زیر بخش های منتخب صنعت ایران شامل تولید مواد غذایی و آشامیدنی، صنایع تولید زغال کک، پالایشگاه‌های نفت و سوخت‌های هسته‌ای، صنایع تولید مواد و محصولات شیمیایی، تولید سایر محصولات کانی غیرفلزی و تولید فلزات اساسی با استفاده از داده های سال های ۱۳۹۳-۱۳۷۴ بررسی گردید. شایان ذکر است تولید همان ستانده مطلوب در مدل مازاد مبنا می باشد.

$$log(Y_j) = -۷/۸۹۱ + ۱/۰۰۳ log(Lab_j) + ۰/۸۹٤ log(Cap_j) + ۰/٦۱۷ log(Ene_j) \qquad (۷)$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

که در رابطه فوق Lab، تعداد نیروی کار، Cap، میزان سرمایه ، Ene ، مقدار انرژی و A، α، β و γ ضرایب مدل می‌باشند. برای برازش تابع فوق از روش داده‌های تابلویی استفاده شد که زیربخش های صنعت به عنوان مقطع و سال های ۷۴ تا ۹۳ به عنوان سری زمانی در نظر گرفته شده است.

تابع هزینه انرژی

با توجه به اینکه در مدل بهینه سازی، هدف تعیین مقادیر و سهم بهینه حامل های انرژی می باشد و تغییر در میزان مصرف انرژی، مقدار تولید و هزینه بکارگیری آن را تحت تأثیر قرار خواهد داد، تابع هزینه انرژی براساس رابطه بین هزینه انرژی با مقدار استفاده از انرژی های مورد استفاده برحسب بشکه معادل نفت خام به شکل ذیل برآورد می گردد:

$$log(Ec_j) = ٦٨٨/٥٧٧ + ٧٤/٦\,log(Ene_j) + ٢/٠٣٣\,log(Ene_j)^٢ \qquad (٨)$$

با توجه به شکل لگاریتمی تابع (ترانسلوگ) برای برآورد آن از تخمین زننده حداقل مربعات معمولی استفاده می گردد.

تابع انتشار گاز دی اکسید کربن

انتشار گاز دی اکسید کربن یا همان ستانده نامطلوب در مدل کارایی زیست محیطی براساس میزان استفاده از حامل‌های انرژی و ضریب انتشار دی‌اکسید کربن برای هر واحد از هر یک از انرژی های فسیلی مورد بررسی به صورت ذیل بدست می‌آید:

$$y_r^b = ٥/١٤e_{١i} + ٠/٩٨٧e_{٢i} + ٩/٧٦٤e_{٣i} + ١/٦٦٩e_{٤i} + ٥/٠٤e_{٥i} + ٢.٥٣٣e_{٦i} \qquad (٩)$$

در تمامی توابع مذکور Ene، مقدار انرژی برحسب بشکه معادل نفت خام می‌باشد که از رابطه ذیل برحسب ضریب تبدیل هر یک از حامل های انرژی بدست می‌آید:

$$Ene_j = ٧/٣٦e_{١i} + ٥.٤٩٨/٩٨٧e_{٢i} + ٦/١٧٦٤e_{٣i} + ٥/٨٨e_{٤i} + ٧/٠٦e_{٥i} + ٦/١٦e_{٦i} \qquad (١٠)$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

محدودیت های مدل بهینه یابی

محدودیت‌های مدل نیز به سه نوع زیر تقسیم‌بندی می شود:

- محدودیت‌های نوع اول: تعادل در انرژی مصرفی

محدودیت‌های نوع اول به گونه‌ای اعمال می‌شود که مجموع تخصیص هر یک از شش منبع انرژی فسیلی مورد بررسی به هر یک از صنایع مختلف مورد بررسی، بیشتر از کل انرژی فسیلی مصرفی در صنایع مورد بررسی نباشد. این محدودیت ها عبارتنداز:

$$
\begin{aligned}
&c_1 : \sum_{j=1}^{5} e_{1j} \le E_1 \\
&c_2 : \sum_{j=1}^{5} e_{2j} \le E_2 \\
&c_3 : \sum_{j=1}^{5} e_{3j} \le E_3 \\
&c_4 : \sum_{j=1}^{5} e_{4j} \le E_4 \\
&c_5 : \sum_{j=1}^{5} e_{5j} \le E_5 \\
&c_6 : \sum_{j=1}^{5} e_{6j} \le E_6
\end{aligned}
\qquad (۱۱)
$$

C_1: محدودیت مربوط به تخصیص گاز مایع

C_2: محدودیت مربوط به تخصیص بنزین

C_3: محدودیت مربوط به تخصیص نفت گاز (گازوئیل)

C_4: محدودیت مربوط به تخصیص نفت سفید

C_5: محدودیت مربوط به تخصیص نفت سیاه و نفت کوره

C_6: محدودیت مربوط به تخصیص گاز طبیعی

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

- محدودیت‌های نوع دوم: محدودیت تخصیص انرژی در بخش صنعت

این نوع از محدودیت باید به‌گونه‌ای لحاظ شود که مجموع انرژی های فسیلی مورد بررسی تخصیص داده شده به هر یک از صنایع مورد بررسی (۵ صنعت)، بزرگتر از کل انرژی مصرفی در آن صنعت نباشد. این محدودیت ها عبارتنداز:

$$
\begin{aligned}
c_7 &: \sum_{i=1}^{6} E_{i1} \le Ene_1^0 \\
c_8 &: \sum_{i=1}^{6} E_{i2} \le Ene_2^0 \\
c_9 &: \sum_{i=1}^{6} E_{i3} \le Ene_3^0 \\
c_{10} &: \sum_{i=1}^{6} E_{i4} \le Ene_4^0 \\
c_{11} &: \sum_{i=1}^{6} E_{i5} \le Ene_5^0
\end{aligned}
\qquad (۱۲)
$$

C_7: محدودیت مربوط به تخصیص انرژی به صنایع کد ۱۵ (صنایع تولید مواد غذایی و آشامیدنی)

C_8: محدودیت مربوط به تخصیص انرژی به صنایع کد ۲۳ (صنایع تولید زغال کک، پالایشگاه های نفت و سوخت‌های هسته‌ای)

C_9: محدودیت مربوط به تخصیص انرژی به صنایع کد ۲۴ (صنایع تولید مواد و محصولات شیمیایی)

C_{10}: محدودیت مربوط به تخصیص انرژی به صنایع کد ۲۶ (صنایع تولید سایر محصولات کانی غیرفلزی)

C_{11}: محدودیت مربوط به تخصیص انرژی به صنایع کد ۲۷ (صنایع تولید فلزات اساسی)

- محدودیت‌های نوع سوم: محدودیت‌های مربوط به نامنفی بودن متغیرها

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

محدودیت دیگری که بایستی در مدل تحقیق لحاظ شود این است که متغیرهای مورد نظر نباید کوچکتر از صفر باشند.

$$\text{All Variables} \geq 0 \qquad (۱۳)$$

٦. نتایج حاصل از اجرای مدل

محاسبه کارایی اقتصادی و زیست محیطی

اندازه‌ی کارایی اقتصادی بر اساس نهاده‌های انرژی شامل نفت سفید، گازوییل، گاز طبیعی، گاز مایع، نفت سیاه و کوره و بنزین و دو نهاده‌ی غیر انرژی نیروی کار و میزان سرمایه به عنوان ورودی مدل و ارزش ستانده به عنوان خروجی محاسبه شد. جدول ذیل نتایج محاسبه‌ی کارایی اقتصادی در صنایع مورد بررسی را با استفاده از داده های سال ۱۳۹۵ بر اساس خروجی نرم افزار GAMS نشان می‌دهد:

جدول(۳) کارایی اقتصادی صنایع مورد بررسی در سال ۱۳۹۵

کد ISIC	نیروی کار (نفر)	ارزش سرمایه (میلیون ریال)	انرژی (بشکه معادل نفت خام)	ارزش ستانده (میلیون ریال)	کارایی اقتصادی
(۱۵)	۳۰۱۳۵۹	۲۴۱۵۳۳۲۰	۱۵۲۸۷۹۰۹/۰۲	۷۵۱۳۷۲۱۶۷	۱
(۲۳)	۳۱۵۵۳	۱۴۶۹۰۶۲	۳۰۳۵۵۶۱۸/۶۲	۱۰۶۷۳۱۲۸۵۲	۱
(۲۴)	۱۳۴۷۲۴	۲۰۷۳۰۸۱۱	۷۵۰۴۹۰۴۸/۱۳	۹۱۵۹۴۴۳۴۶	۰/۸۵۸
(۲۶)	۲۲۲۸۸۷	۱۷۴۲۷۱۶۳	۷۱۵۶۸۰۱۹/۵۶	۲۶۶۶۳۱۳۳۸	۰/۲۴۹
(۲۷)	۱۵۶۸۳۶	۱۰۵۵۹۷۳۵	۳۹۹۳۵۷۶۶/۲۷	۶۶۳۸۳۶۴۶۶	۰/۶۲۲

منبع: ترازنامه انرژی وزارت نیرو، ۱۳۹۵ و یافته های پژوهش

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، کارایی اقتصادی صنایع تولید مواد و محصولات شیمیایی، صنایع تولید سایر محصولات کانی غیرفلزی و صنایع تولید فلزات اساسی کمتر از یک می‌باشد که نشان دهنده‌ی استفاده ناکارا از منابع یا تولید ناکارا و یا هر دو مشکل در صنایع مذکور است. در جدول (۴) نیز کارایی زیست محیطی صنایع مورد بررسی با لحاظ نمودن انتشار گاز دی اکسید کربن به عنوان خروجی و ستانده نامطلوب محاسبه شده است. مشابه جدول قبل اندازه کارایی کوچکتر از یک نشاندهنده‌ی وجود ناکارایی در میزان انتشار گاز دی اکسید کربن می‌باشد.

جدول(۴) کارایی زیست محیطی صنایع مورد بررسی در سال ۱۳۹۵

کد ISIC	نیروی کار (نفر)	ارزش سرمایه (میلیون ریال)	انرژی (بشکه معادل نفت خام)	گازهای آلاینده (تن)	کارایی زیست-محیطی
(۱۵)	۳۰۱۳۵۹	۲۴۱۵۳۳۲۰	۱۵۲۸۷۹۰۹/۰۲	۷۵۸۰۲۷۲/۵۶	۱
(۲۳)	۳۱۵۵۳	۱۴۶۹۰۶۲	۳۰۳۵۵۶۱۸/۶۲	۱۴۸۱۴۵۰۴/۰۱	۱
(۲۴)	۱۳۴۷۲۴	۲۰۷۳۰۸۱۱	۷۵۰۴۹۰۴۸/۱۳	۳۶۸۲۶۷۷۶/۲۱	۰/۶۰
(۲۶)	۲۲۲۸۸۷	۱۷۴۲۷۱۶۳	۷۱۵۶۸۰۱۹/۵۶	۳۴۶۹۹۳۳۱/۶۹	۰/۵۸۲
(۲۷)	۱۵۶۸۳۶	۱۰۵۵۹۷۳۵	۳۹۹۳۵۷۶۶/۲۷	۱۹۶۶۶۶۳۶/۰۶	۰/۷۲۳

منبع: ترازنامه انرژی وزارت نیرو، ۱۳۹۵ و یافته های پژوهش

بهینه‌یابی مصرف انرژی در صنایع مورد بررسی

با اثبات وجود ناکارایی در مصرف انرژی، مقدار و سهم بهینه‌ی استفاده از نهاده‌های انرژی با استفاده از مدل الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب۲ محاسبه می‌گردد. این الگوریتم با استفاده از اصل عدم تسلط و یا عدم غلبه کردن و محاسبه فاصله ازدحام، نقاط بهینه پارتو را به دست می‌آورد که مجموعه ای از نقاط بهینه را ارایه می‌نماید. از این رو برای انتخاب بهترین ترکیب یا نقاط از جبهه‌ی پارتو بدست آمده، کارایی اقتصادی و زیست محیطی برای هر یک از نقاط در هر یک از صنایع

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

مورد بررسی محاسبه می‌شود و براساس نتایج بدست آمده میزان مصرف بهینه هر یک از انرژی های فسیلی در صنایع مورد بررسی با توجه به کارایی اقتصادی و کارایی زیست تعیین می‌شود. برای این منظور داده‌های سال ۱۳۹۵ به عنوان جمعیت اولیه در الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب نسخه۲ استفاده می‌شود و سپس الگوریتم با لحاظ تعاریف و محدودیت‌های تعریف شده برای آن، داده ها را تجزیه و تحلیل و خروجی مدل به کمک نرم‌افزار MATLAB استخراج می‌شود. جدول(۵) مشخصات الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نسخه۲ (NSGA-II) استفاده شده در تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول(۵) مشخصات الگوریتم (NSGA-II)

معادل فارسی مشخصه	معادل انگلیسی مشخصه	مقیاس
تابع انتخاب	Selection type	مسابقه ای
نرخ عملگر تقاطع	Crossover rate	۰/۷
تابع عملگر تقاطع	Crossover function	حسابی
نرخ جهش	Mutation rate	۰/۰۷

منبع: یافته های پژوهش

جدول(۶) نتایج مربوط به بهترین جواب از میان نقاط بهینه پارتو ایجاد شده توسط الگوریتم مرتب سازی نامغلوب۲ می‌باشد که بالاترین کارایی اقتصادی و زیست محیطی را در زیربخش‌های منتخب صنعت دارند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

جدول(۶) نتایج مدل NSGA-II جهت تعیین سهم بهینه مصرف انرژی‌های فسیلی در صنایع مورد بررسی در مقایسه باسهم واقعی آن‌ها (درصد)

	نفت سفید		گازوئیل		گاز طبیعی		گاز مایع		بنزین		نفت سیاه و نفت کوره		مصرف کل معادل هزار بشکه نفت خام	
	واقعی	بهینه	واقعی	بهینه	واقعی	بهینه	واقعی	بهینه	واقعی	بهینه	واقعی	بهینه	واقعی	بهینه
مواد غذایی و آشامیدنی (۱۵)	۰/۰۶	۰/۰۹۸	۶/۶۳	۱۲/۸۸	۸۹/۳۶	۶۸/۸۱	۰/۳۹	۰/۱۸	۰/۷۸	۱/۳۲	۲/۷۹	۱۶/۷	۱۵۵۲۰۱۱۲	۱۰۰۷۳۳۴۱
زغال کک، پالایشگاه نفت و سوخت هسته‌ای (۲۳)	۰/۰۰۳	۰/۱۷	۱/۰۱	۰/۹۳	۸۵/۹۸	۸۵/۲۵	۰/۱	۲/۱۷	۰/۱۲	۰/۲۹	۰/۰۱	۱۱/۱۸	۳۰۳۴۹۵۷۵	۲۴۲۸۲۶۸۸
مواد و محصولات شیمیایی (۲۴)	۰/۰۲	۰/۰۱۶	۰/۷۶	۰/۶۲	۹۸/۹۸	۹۸/۲۹	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۲۷	۰/۳۷	۰/۲۸	۰/۶۲	۷۴۹۵۷۲۳۶	۴۰۵۳۳۵۰۹
سایر محصولات کانی غیرفلزی (۲۶)	۰/۰۴	۰/۰۵	۳/۱۸	۱/۹۷	۸۳/۸۳	۸۰/۳۲	۰/۱۱	۲/۶۶	۰/۱۷	۰/۱۵	۱۲/۶۶	۱۴/۸۳	۷۱۱۹۶۷۹۴	۵۶۲۱۳۶۷۳
فلزات اساسی (۲۷)	۰/۰۳	۰/۰۱۴	۱/۹۷	۰/۹۶	۹۱/۸۰	۹۸	۰/۱۸	۰/۳۳	۰/۱۷	۰/۰۵۲	۵/۸۶	۰/۶۵	۴۰۰۶۳۴۰۶	۴۰۲۸۸۰۲۲
جمع کل													۲۳۲۰۸۷۱۲۵	۱۷۱۳۹۱۲۳۴

منبع: یافته های پژوهش

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

در مرحله بعدی باید تأثیر این تغییرات در کارایی اقتصادی و زیست محیطی زیربخش‌های صنعت در مقایسه با مقادیر واقعی انرژی مصرفی در آن‌ها بررسی گردد. نتایج این بررسی در جداول (۷) و (۸) با استفاده از مدل مازاد مبنا به صورت تفکیکی در هر یک از سال‌های مذکور محاسبه و مقایسه شده است. در ادامه برای مقایسه‌ی زیربخش‌های منتخب در تمامی سال‌ها، هرکدام از آن‌ها به عنوان یک واحد تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده و دوباره کارایی اقتصادی و زیست محیطی محاسبه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد نتیجه الگوریتم بهینه‌یابی مورد استفاده، دارای کارایی اقتصادی بالاتر در همه صنایع منتخب و کارایی زیست محیطی بیشتر در تمام صنایع به جز در صنایع تولید فلزات اساسی می‌باشد که البته این کاهش بسیار ناچیز می‌باشد.

جدول(۷) مقایسه کارایی اقتصادی مصرف انرژی بهینه یابی شده با وضعیت مصرف انرژی واقعی

کد ISIC	۱۳۹۰	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۵	بهینه
تولید مواد غذایی و آشامیدنی (۱۵)	۱	۱	۱	۱	۱
تولید زغال کک، پالایشگاه نفت و سوخت هسته‌ای (۲۳)	۱	۱	۱	۱	۱
تولید مواد و محصولات شیمیایی (۲۴)	۰/۶۸۸	۰/۵۸۲	۰/۷۹۵	۰/۸۵۸	۱
تولید سایر محصولات کانی غیرفلزی (۲۶)	۰/۳۲۶	۰/۱۳۴	۰/۲۴۲	۰/۲۴۹	۰/۶۱۲
تولید فلزات اساسی (۲۷)	۰/۳۶۲	۰/۴۱۹	۰/۶۰۲	۰/۶۲۲	۰/۷۹۹

منبع: یافته های پژوهش

جدول(۸) مقایسه کارایی زیست محیطی مصرف انرژی بهینه یابی شده با وضعیت مصرف انرژی واقعی

کد ISIC	۱۳۹۰	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۵	بهینه
تولید مواد غذایی و آشامیدنی (۱۵)	۱	۱	۱	۱	۱
تولید زغال کک، پالایشگاه نفت و سوخت هسته‌ای (۲۳)	۱	۱	۱	۱	۱
تولید مواد و محصولات شیمیایی (۲۴)	۰/۵۸۹	۰/۶۳۸	۰/۶۱۳	۰/۶۰	۱
تولید سایر محصولات کانی غیرفلزی (۲۶)	۰/۵۶۰	۰/۵۸۴	۰/۵۸۶	۰/۵۸۲	۰/۵۹۴
تولید فلزات اساسی (۲۷)	۰/۷۱۳	۰/۶۷۵	۰/۷۲۰	۰/۷۲۳	۰/۶۴۸

منبع: یافته های پژوهش

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

۷. جمع‌بندی:

بهینه یابی مصرف انرژی های فسیلی در صنایع مورد بررسی توسط مدل NSGAII، کارایی اقتصادی صنایع ناکارا را نسبت به وضعیت واقعی افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده، مقادیر بهینه ضمن حفظ کارایی کامل صنایع کارا در وضعیت واقعی (صنایع تولید مواد غذایی و آشامیدنی و صنایع تولید زغال کک، پالایشگاه نفت و سوخت هسته‌ای)، کارایی صنایع تولید مواد و محصولات شیمیایی، صنایع تولید سایر محصولات کانی غیرفلزی و صنایع تولید فلزات اساسی را به ترتیب، ۰/۱۴۲، ۰/۳۶۳ و ۰/۱۷۷ واحد افزایش داده است.

از سوی دیگر استفاده از مقادیر انرژی های فسیلی منتخب حاصل از الگوریتم بهینه یابی باعث افزایش کلی کارایی زیست محیطی در صنایع مورد بررسی می‌شود. مقادیر بهینه بدست آمده کارایی زیست محیطی صنایع تولید مواد غذایی و آشامیدنی و صنایع تولید زغال کک، پالایشگاه نفت و سوخت هسته‌ای را که در وضعیت واقعی دارای کارایی کامل بودند تغییر نمی‌دهد ولی باعث افزایش کارایی در صنایع تولید مواد و محصولات شیمیایی و صنایع تولید سایر محصولات کانی غیرفلزی می‌گردد که افزایش کارایی در صنایع یادشده به ترتیب ۰/۴۰ و ۰/۰۱۲ واحد می‌باشد. تنها در صنایع تولید فلزات اساسی کارایی زیست محیطی به میزان ناچیزی(۰/۰۷۵ واحد) کاهش می‌یابد. شایان توجه است که بیشترین افزایش کارایی زیست محیطی در زیربخش صنایع تولید مواد و محصولات شیمیایی حاصل می‌شود که دارای بیشترین مقدار مصرف انرژی و انتشار گازهای آلاینده می‌باشد.

همانگونه که در بررسی های انجام شده و یافته‌های تحقیق مشخص گردید، میزان مصرف انرژی در زیربخش‌های صنعت ایران ناکارا می‌باشد و علاوه برآن انتشار گازهای آلاینده ناشی از آن، در صنایع مورد بررسی در مقایسه با متوسط جهانی بسیار بالاتر است. بر همین اساس و مبتنی بر نتایج الگوریتم بهینه یابی می‌توان گفت این صنایع قابلیت افزایش کارایی در مصرف انرژی و انتشار گازهای آلاینده را دارند که با استراتژی‌های مختلف و متنوع

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

می‌توان به آن دست یافت. استفاده از انرژی‌های کم کربن، تغییر در شیوه‌ی تولید و ایجاد تنوع در سبد حامل های انرژی از جمله راهکارهایی است که می‌تواند موجب ارتقای کارایی و کاهش انتشار گازهای آلاینده گردد.

با توجه به میزان مصرف بالای انرژی در صنایعی که کارایی زیست محیطی کمتری دارند از جمله راهکارهایی که برای کاهش مصرف انرژی و آلاینده‌های زیست محیطی در این صنایع پیشنهاد می‌شود، می‌توان به جایگزینی سوخت‌های سبک کم کربن به جای سوخت‌های سنگین اشاره نمود. همچنین با بررسی روند تغییرات مصرف حامل‌های انرژی در سال های اخیر در صنایع منتخب مشخص می‌گردد جایگزینی گازطبیعی به جای سایر حامل های انرژی اتفاق افتاده است که هرچند به عنوان سوخت کم کربن مطلوب می‌باشد ولی نتایج تعیین سهم بهینه انرژی‌های منتخب نشان می دهد این جایگزینی بدون استراتژی مشخصی انجام شده است و علی رغم این اتفاق، کارایی زیست محیطی به صورت مطلوب تغییر نکرده است. دلیل اصلی این انحراف از سهم بهینه را می توان در تعیین قیمت حامل‌های انرژی و تفاوت قیمت در صنایع مختلف جستجو نمود. از سوی دیگر تفاوت سهولت دسترسی به انواع حامل‌های انرژی و نامتوازن بودن شبکه‌های توزیع بر این موضوع می‌تواند تأثیر گذار باشد.

با توجه به مطلب مذکور می‌توان گفت: دستیابی به اهداف بهینه سازی سهم منابع انرژی نیازمند تنظیم مقررات زیست محیطی برای تولیدکنندگان نیز می‌باشد که با توجه به بررسی پژوهش‌های مرتبط پیشین، تغییر در شیوه ی تولید می‌تواند بدون کاهش در تولید یا با تأثیر محدود، منجر به کاهش در مصرف انرژی و افزایش قابل توجه در کارایی اقتصادی و زیست محیطی گردد. برقراری مالیات بر محصول نامطلوب یکی از متداول ترین راه‌ها برای افزایش انگیزه‌ی تولیدکنندگان در جهت بکارگیری روش ها و فن آوری سازگار با محیط زیست و کاهش مصرف انرژی است، بنابراین توصیه می‌شود که قوانین و مقررات زیست محیطی مربوط به تولیدکنندگان

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

این صنایع مورد بازبینی قرار گرفته و با سخت گیری بیشتری تنظیم شود تا تولیدکنندگان برای افزایش کارایی زیست محیطی خود تلاش نمایند.

همانطور که در نتایج الگوریتم بهینه یابی چند هدفه مورد استفاده مشاهده شد، به جهت دستیابی به بالاترین کارایی اقتصادی و زیست محیطی به طور همزمان که نیازمند ایجاد گونه ای اعتدال بین میزان تولید، مصرف انرژی و انتشار گازهای آلاینده می‌باشد، میزان مصرف برخی از حامل‌های انرژی کاهش و برخی افزایش یافته اند. در این شرایط و وجود قوانین زیست محیطی و وضع مالیات بر انتشار گازهای آلاینده، سیستم تجارت کربن نیز می‌تواند به عنوان راهکار مکمل سیاست‌های اصلاح مصرف انرژی و انتشار دی اکسید کربن بکار گرفته شود که در بررسی مطالعات پیشین نیز به آن اشاره شده است.

منابع

استیونز، پل. (۲۰۰۰). اقتصاد انرژی (ترجمه ع. طاهری‌فرد؛ ج. حسینی؛ ج. دهنوی). تهران: انتشارات دانشگاه امام صادق(ع).

بهشتی نیا، محمد علی (۱۳۹۳)، *الگوریتم ژنتیک کاربردی*، نشر دانشگاه سمنان.

دب، کالیانموی (۲۰۰۱)، *الگوریتم‌های ژنتیک با رویکرد بهینه یابی چند هدفه*، ترجمه: جعفر رضایی و منصور داودی منفرد، تهران: نشر پلک

شهیکی تاش، محمدنبی؛ خواجه‌حسنی، مصطفی و سعید جعفری (۱۳۹۴)، محاسبه کارایی زیست محیطی در صنایع انرژی بر ایران با استفاده از رویکرد تابع فاصله جهت‌دار، *فصلنامه نظریه‌های کاربردی اقتصاد*، سال دوم، شماره ۱، صص ۱۲۰-۹۹.

صادقی، حسین؛ سهرابی‌وفا، حسین و فاطمه نوری (۱۳۹۳)، کاربرد شبکه عصبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در پیش بینی تقاضای بلندمدت انرژی، *فصلنامه نظریه‌های کاربردی اقتصاد*، ۱(۲)، صص۵۲-۲۹.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

عالم تبریز، اکبر؛ زندیه، مصطفی و علیرضا محمدرحیمی (۱۳۹۲)، *الگوریتم های فراابتکاری در بهینه سازی ترکیبی(ژنتیک، شبکه عصبی، آنیل شبیه سازی شده، جستجو ممنوع و الگوریتم مورچگان*، تهران: نشر صفار.

مرکز آمار ایران(۱۳۹۵)، *نتایج طرح آمارگیری از کارگاه های صنعتی ۱۰ نفر کارکن و بیشتر*.

ممی‌پور، سیاب و بهزاد نجف‌زاده (۱۳۹۵). ارزیابی کارایی زیست محیطی شرکت های برق منطقه ای: مقایسه مدل های شعاعی و غیرشعاعی، *فصلنامه نظریه‌های کاربردی اقتصاد*، ۳(۸)، صص۱۷۸-۱۵۳.

وزارت نیرو(۱۳۹۵). *ترازنامه انرژی*، دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی، معاونت امور برق و انرژی.

Cooper, W., Seiford, L and K. Tone (2007). Some Models and Measure for Evaluating Performances with DEA: Past Accomplishments and Future Prospects, *journal of Productivity Analysis*, 28, PP. 151-163.

Deb, K (1999). *An introduction to genetic algorithms*. India: Sadhana, 24, PP. 293-315.

Deb, K (2001). *Multi- objective optimization using evolutionary algorithms. England*: John Wiley and Sons.

Deb,K., Pratap, A., Sameer Agarwal and T. Meyarivan (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computayion*, 6(2), PP. 182-197.

Deb, S. and J. Sundar (2006). Refrence Point Based Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. *USA: GECCO*, 6, PP. 635-642.

Deb, K (2011). Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms: An Introduction. http://www.iitk.ac.in/kangal/deb.htm

Farrell, M. (1957), The Measurement of Productive Efficiency, *Journal of Royal Statistical Society*, 120(3), PP. 253-290.

Fazlollahi, S., Becker, G., Ashouri, A. and F. Maréchal (2015). Multi-objective, multi-period optimization of district energy systems: IV – A case study, *Energy*, 84(C), PP. 365-381.

Goldberg, D (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, USA: Addison-Wesley Publishing Company.

Gonzalez, M., Lopez, J., Aparicio, J., Gimenez, D and P. Jesus (2015). Using Genetic Algorithms for Maximizing Technical Efficiency in Data Envelopment Analysis, *Procedia Computer Science*, 51, PP. 374-383.

Guo, W., sun, T. and H. Dai (2017). Efficiency Allocation of Provincial Carbon Reduction Target in China's "13·5" Period: Based on Zero-Sum-Gains SBM Model, *Sustainability*, 9, PP. 167-185.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]

Keeratipranon, N., and A. Choeichum (2017). "Multi-Fuel Allocation for Power Generation Using Genetic Algorithms," *Journal of Reviews on Global Economics*, Lifescience Global, vol. 6, PP. 258-268.

Li, J., Xiang, Y., Jia, H., and L. Chen (2018). "Analysis of Total Factor Energy Efficiency and Its Influencing Factors on Key Energy-Intensive Industries in the Beijing-Tianjin-Hebei Region," *Sustainability, MDPI, Open Access Journal*, vol. 10(1), PP 1-17, January.

Pearson, P (1988). Energy Transition in Les-Developed Countries: Analytical Frameworks for Practical Undestanding, *Energy Discussion*, Cambrige Energy Research Group.

Tone, K (2001). A Slaks Based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis, *Eur J Oper Res*, 130, PP. 498-509.

Tone, K (2004). Dealing with Undesirable Outputs in DEA: A Slacks-Based Meassure (SBM) Approach, *GRIPS Reseerch Report Series*, 1.2003_0005.

Wang, D., Liu, Y., Wang, Y., Shi, X. and X. Song(2020). "Allocation of coal de-capacity quota among provinces in China: A bi-level multi-objective combinatorial optimization approach," *Energy Economics*, Elsevier, vol. 87(C).

Xiong, S., Tian, Y., Ji, J., and X. Ma (2017). "Allocation of Energy Consumption among Provinces in China: A Weighted ZSG-DEA Model," *Sustainability, MDPI, Open Access Journal*, vol. 9(11), pages 1-12, November.

Zhang, H., Zhang, R., Li, G., Li, W. and Y. Choi (2020). Has China's Emission Trading System Achieved the Development of a Low-Carbon Economy in High-Emission Industrial Subsectors?, *Sustainability*, 12(13),PP. 53-70.

www.iea.org/data-and-statistics.

www.worldenergy.org/publications.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-21]