

بهینه‌سازی هم‌زمان پخش بار اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم ابتکاری کلونی زنبور عسل چندهدفه

سید حکیم حسینی، سید جواد جواد مقدم و محمدرضا غلامی ده‌بالایی

دنیال دارد. در سال‌های اخیر، بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های قدرت با هدف کاهش هزینه‌های تولید و هم‌زمان کاهش اثرات زیست‌محیطی به یکی از اولویت‌های اصلی در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت تبدیل شده است [۱]. این ضرورت، مسئله پخش بار اقتصادی^۱ را از یک مسئله تک‌هدفه به مسئله‌ای چندهدفه با عنوان پخش بار اقتصادی-زیست‌محیطی^۲ (EED) تغییر داده است که هدف آن دستیابی به تعادل بهینه بین حداقل‌سازی هزینه‌های سوخت و کاهش انتشار آلاینده‌ها است. این تغییر پارادایم، نیاز به روش‌های محاسباتی پیشرفته‌ای را برجسته می‌کند که بتوانند پیچیدگی‌های این مسائل چندهدفه را به طور مؤثر مدیریت کنند [۲].

مسئله EED به دلیل ماهیت غیرخطی، غیرمحدب، چندبعدی و چندمحدودیتی خود، یکی از مسائل پیچیده در بهینه‌سازی سیستم‌های قدرت محسوب می‌شود. روش‌های سنتی بهینه‌سازی که اغلب با تبدیل مسائل چندهدفه به مسائل تک‌هدفه از طریق تکنیک‌هایی مانند وزن‌دهی خطی عمل می‌کنند [۳]، با چالش‌هایی نظیر ناتوانی در دستیابی به تعادل مناسب بین اهداف متضاد، توزیع ذهنی وزن‌ها و کاهش قابلیت اطمینان نتایج مواجه هستند. در مقابل، رویکردهای مبتنی بر حل مستقیم مجموعه راه‌حل‌های بهینه پارتو، امکان ارائه مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه را فراهم می‌کنند که تصمیم‌گیرندگان می‌توانند از میان آن‌ها، طرحی متناسب با نیازهای خود انتخاب کنند [۴]. این رویکرد، با توجه به پیچیدگی‌های مسئله EED، نیازمند الگوریتم‌های ابتکاری و هوشمندی است که بتوانند به طور مؤثر با این چالش‌ها مقابله کنند. الگوریتم‌های ابتکاری نظیر الگوریتم کلونی زنبور عسل^۳ (ABC) به دلیل استحکام، سادگی و توانایی همگرایی مناسب، به عنوان یکی از روش‌های مؤثر در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه شناخته شده‌اند [۵]. الگوریتم کلونی زنبور عسل چندهدفه^۴ (MOABC) با بهره‌گیری از مکانیزم‌های جستجوی هوشمند و تطبیقی، قادر است تا با مدیریت تنوع جمعیت و جلوگیری از گیر افتادن در بهینه‌های محلی، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه پارتو را تولید کند [۶]. این الگوریتم با استفاده از استراتژی‌های جستجوی هدفمند و ترکیب دانش تکاملی، امکان بهبود کارایی محاسباتی و کاهش زمان اجرا را فراهم می‌کند، که آن را به گزینه‌ای مناسب برای حل مسئله EED تبدیل کرده است [۷].

در این پژوهش، هدف اصلی بهینه‌سازی هم‌زمان پخش بار اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم MOABC است. ابتدا،

چکیده: هدف اصلی این تحقیق بهینه‌سازی هم‌زمان پخش بار اقتصادی و زیست‌محیطی (EED) سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم ابتکاری کلونی زنبور عسل چندهدفه (MOABC) بود. یک مدل پخش بار اقتصادی محیطی چندهدفه سیستم قدرت با حداقل هزینه اقتصادی و انتشار آلودگی به عنوان اهداف بهینه‌سازی برای پاسخگویی به چالش‌های توزیع سیستم قدرت ناشی از بحران انرژی جهانی و گرم شدن آب و هوا و ترویج تحقق هدف کربن دوگانه ایجاد شده است. یک الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی چندهدفه بر اساس مرتب‌سازی غیر غالب و معیار حریص بهبودیافته با توجه به ویژگی‌های مدل طراحی شده است. در طراحی الگوریتم از روش تاگوشی برای بهینه‌سازی پارامترها، روش ابتکاری برای پردازش قیود به صورت پویا و انواع شاخص‌های ارزیابی جامع برای ارزیابی عملکرد الگوریتم استفاده می‌شود. در تحلیل شبیه‌سازی، یک سیستم قدرت شش ماشینی و یک سیستم قدرت ده ماشینی شبیه‌سازی شده و با الگوریتم‌های مختلف مقایسه می‌شود تا منطقی بودن و اثربخشی مدل پیشنهادی تایید شود. در نهایت، تکنیک اولویت سفارش با شباهت به روش راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS) برای تعیین راه‌حل سازش بهینه برای ارائه مرجعی برای تصمیم‌گیری علمی توزیع کنندگان استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد نتایج نشان می‌دهد که از بین چهار الگوریتم، الگوریتم MOABC کمترین هزینه اقتصادی (104×2.771 \$) و انتشار آلودگی (103×3.639 کیلوگرم) را برای هر دو راه‌حل بهینه‌سازی اقتصادی و بهینه‌سازی محیطی به دست می‌آورد. علاوه بر این، الگوریتم MOABC نیز در به‌دست آوردن بهترین راه‌حل سازشی (104×2.821 \$ و 103×4.005 کیلوگرم) بهتر عمل می‌کند.

کلیدواژه: بهینه‌سازی اقتصادی و زیست‌محیطی، نیروگاه‌ها، سیستم‌های قدرت، الگوریتم کلونی زنبور عسل.

۱- مقدمه

انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از فعالیت نیروگاه‌های حرارتی، یکی از چالش‌های اساسی در صنعت تولید برق به شمار می‌رود که تأثیرات مخربی بر محیط زیست و گرمایش جهانی به

این مقاله در تاریخ ۱۵ مرداد ماه ۱۴۰۴ دریافت و در تاریخ ۱۷ دی ماه ۱۴۰۴ بازنگری شد.

سید حکیم حسینی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی برق، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، (email: mshhmbs@gmail.com).

سیدجواد جواد مقدم، گروه مهندسی برق، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، (email: javadi5599@gmail.com).

محمدرضا غلامی ده‌بالایی، گروه مهندسی برق، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، (email: gholami_0062@pnu.ac.ir).

1. Economic Dispatch
2. Environmental Economic Dispatch
3. Artificial Bee Colony
4. Multi-Objective Artificial Bee Colony

شده است. همچنین با توجه به توابع هزینه تولید، آلودگی محیطی و تلفات، موضوع توزیع بار که یکی از مهمترین مسائل در سیستم انرژی است، مورد بررسی قرار گرفته است. در الگوریتم پیشنهادی، پاسخ بهینه-شده نهایی، معیاری برای توقف بهینه‌سازی برنامه در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، برای بهبود جستجوی پاسخ نهایی، بهبودهایی در ساختار جستجوی محلی و نهایی انجام شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که کارایی این الگوریتم در حل مسئله توزیع بار اقتصادی بهتر از سایر الگوریتم‌ها است.

دشتدر و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۲۲ از الگوریتم هیبریدی کرم شب‌تاب^۵ (FA) و الگوریتم ژنتیک برای حل مشکل پخش اقتصادی زیست‌محیطی توان بین نیروگاه‌های حرارتی به منظور کاهش هزینه‌های عملیاتی و آلودگی محیطی و در عین حال در نظر گرفتن محدودیت‌های غیرخطی توان استفاده کرده‌اند. گیاهانی مانند اثر شیر بخار، مناطق ممنوعه تولید و نرخ تغییر نسل گیاهان^۶ (GA). بر اساس مزیت این دو الگوریتم بهینه سازی، برنامه پیشنهادی ترکیبی بین این الگوریتم‌ها ایجاد کرده و به این نتیجه رسیده است که یک الگوریتم چند هدفه ترکیبی FA-GA دارد که می‌تواند این مشکل بهینه سازی پیچیده را حل کند. الگوریتم با مجموعه ای از کرم شب‌تاب شروع می‌شود که به طور تصادفی در فضای مسئله توزیع می‌شوند و این ذرات در طول مراحل تکامل به حل بهینه مسئله همگرا می‌شوند. سپس یک طرح جستجوی محلی به عنوان راهی برای جستجوی محله برای بهبود کیفیت پاسخ‌ها ارائه و اجرا می‌شود. این بخش از الگوریتم برای جستجوی مناطق کم جمعیت برای یافتن پاسخ‌های غالب استفاده می‌شود. برای بهبود الگوریتم، تغییراتی در معیارهای تعیین بهترین بهینه جهانی برای هر کرم شب‌تاب و همچنین بهترین بهینه محلی ایجاد شده است. استفاده از این روش باعث افزایش یکنواختی منحنی پارتنر شده است و در نهایت الگوریتم پیشنهادی با تعیین شاخص‌های تلفات، پایداری ولتاژ و انتشار آلاینده‌ها در مسئله چند هدفه بر روی سیستم IEEE۳۹ شینه اعمال شده و نتایج نشان‌دهنده عملکرد آن است. عملکرد مناسب در مقایسه با سایر روش‌ها در واقع، برنامه کنترلی پیشنهادی برای مشاهده حداقل هزینه و انتشار گاز روی پنج الگوریتم مرسوم دیگر استفاده شده است.

غلامی ده‌بالایی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۲۰ یک الگوریتم هیبریدی جدید تپه‌نوردی^۷ (HHC) را برای حل مسئله پخش اقتصادی^۸ معرفی کردند. این الگوریتم مشکلات ED را با ساختار جستجوی سیستماتیک با جستجوی سراسری حل می‌کند. نتایج به دست آمده از یک الگوریتم تکاملی را با جستجوی محلی بهبود می‌بخشد و به بهترین راه حل ممکن که دقت مشکل را جلب می‌کند، همگرا می‌شود. مهم‌ترین هدف توزیع بار اقتصادی، تخصیص بهینه سهم هر ژنراتور برای تامین بار و کاهش هزینه‌های واحدهای فعال در سیستم قدرت است. محدودیت‌های تولید برق، محدودیت‌های سرعت شیب دار و تلفات انتقال. این الگوریتم بر روی سه سیستم تست ۱۳ واحدی، ۱۵ واحدی و ۴۰ واحدی با شرایط عملیاتی متفاوت و همچنین برای همان سه سیستم آزمایشی در ترکیب با الگوریتم PSO^۹ تکاملی پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی کارایی الگوریتم پیشنهادی را در حل مسائل ED

یک مدل ریاضی چندهدفه برای پخش بار سیستم قدرت طراحی شده است که محدودیت‌های عملیاتی نظیر تعادل انرژی و حدود تولید واحدها را در نظر می‌گیرد. سپس، الگوریتم MOABC با تنظیم پارامترهای خاص و مکانیزم‌های پردازش محدودیت توسعه داده شده است تا کارایی و دقت آن در حل مسئله EED بهبود یابد. در نهایت، این الگوریتم بر روی یک سیستم قدرت شش واحدی آزمایش شده است تا اثربخشی و منطقی بودن مدل پیشنهادی تأیید شود. نتایج این مطالعه می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان در صنعت برق کمک کند تا برنامه‌ریزی تولید را با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی به طور مؤثرتری انجام دهند [۸] و [۹].

۲- پیشینه پژوهش

باکوس و جیاکومیس [۱۰] در سال ۲۰۲۴ یک الگوریتم عددی برای توزیع بار زیست‌محیطی/اقتصادی (EELD) با محدودیت‌های انتشار ارائه کردند که تأثیر سیستم تجارت انتشار گازهای گلخانه‌ای را بر هزینه تولید برق در نظر می‌گیرد و با استفاده از یک برنامه کامپیوتری پایتون پیاده‌سازی می‌شود. برنامه توسعه‌یافته برای یک سیستم قدرت از شش واحد تولید برق با سوخت فسیلی با محدودیت‌های CO_2 و SO_2 و NO_x اعمال می‌شود و ثابت شده است که نه تنها برای محیط زیست، بلکه برای شرکت برق و مصرف‌کنندگان نیز مفید است. الگوریتم پیشنهادی از بهینه‌سازی چند هدفه استفاده می‌کند و هزینه‌های سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای را در بر می‌گیرد. برنامه زمان‌بندی واحدهای تولید محاسبه شده و آزمایش تمامی ترکیبات ضریب وزنی ممکن با وضوح ۰/۰۱ انجام شده است که نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی سریع، مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست است.

سونی و باتاچارجی [۱۱] در سال ۲۰۲۴ خودروهای برقی^۱ (PEV) با مدل توزیع بار انتشار دینامیک اقتصادی^۲ (DEELD) ادغام کردند تا هزینه سوخت و سطوح آلودگی را کاهش دهند. با این حال، پس از ادغام RES و PEVs، چالش‌های جدیدی در شبکه برق وجود دارد. بنابراین، چارچوب جدید مدل DEELD با باد، خورشید و PEV با نام مدل WSPEV DEELD، برای اولین بار برای صاف کردن شارژ و دشارژ PEVs پیشنهاد شده است. هزینه جریمه برای انرژی بادی و خورشیدی در دست کم و بیش برآورد. در این مقاله، یک تکنیک موثر به نام بهینه سازی تعادل (EO) برای حل مسائل بسیار پیچیده WSPEV DEELD با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی مختلف پیشنهاد شده است. الگوریتم EO بر روی سیستم‌های مختلف ۱۰ واحدی برای بررسی عملکرد و اعتبار مدل و الگوریتم پیشنهادی آزمایش شده است.

حبیب و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۳ در پژوهشی، یک نسخه جهش یافته از الگوریتم بهینه سازی جفت گیری زنبور عسل^۳ (HBMO) بر اساس هوش جمعی برای پخش انتشار-اقتصادی سیستم قدرت^۴ (E-ED) پیشنهاد شده کردند. الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله E-ED با توابع هزینه غیرخطی از جمله محدودیت‌های ناشی از کارخانه مانند دریچه‌های ورودی بخار، متعادل کردن تولید و مصرف در سیستم، مناطق محدود، محدودیت‌های تولید و نرخ‌های افزایش و کاهش استفاده

5. Hybrid Firefly Algorithm
6. Generation Change Rate of Plants
7. Hybrid Hill-Climbing Algorithm
8. Solving the Economic Dispatch
9. Particle Swarm Optimization

1. Plug-in Electric Vehicles
2. Dynamic Economic Emission Load Dispatch
3. Honey Bee Mating Optimization
4. Economic-Emission Dispatch

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (۱)$$

و قید توازن توان

$$\sum P_i = P_{load} + P_{loss} \quad (۲)$$

محدب هستند. به این معنی که مجموعه مقادیر توان تولیدی که این قیود را رعایت می‌کنند، یک مجموعه صاف و پیوسته است و اگر دو راه حل معتبر داشته باشیم، ترکیب خطی آن‌ها نیز معتبر خواهد بود در مقابل برخی محدودیت‌های پیچیده‌تر مانند محدودیت‌هایی با روابط غیرخطی نا متعارف یا چند شاخه‌ای نامحدب^۲ هستند. در این حالت، مجموعه جواب‌ها ممکن است شکسته یا خمیده باشد و ترکیب دو راه‌حل معتبر همیشه جواب معتبر ندهد. وجود قیود محدب در کنار تابع هدف محدب باعث می‌شود حل مسئله با الگوریتم‌های بهینه‌سازی ثابت و قابل اعتماد باشد و راه حل بهینه هم اقتصادی و محیط‌زیستی مناسب و هم عملیاتی و قابل اجرا در شبکه واقعی باشد.

طراحی الگوریتم

مراحل طراحی MOABC به شرح زیر است:

مرحله ۱: مقداردهی اولیه جمعیت؛

$$X_i = X_i^{\min} + rand(T, N) * (X^{\max} - X_i^{\min}) \quad (۳)$$

که در آن $X_i^{\min}$ حداقل مقدار توان الکتریکی واحد را نشان می‌دهد و ماتریسی با ابعاد $T \times N$ است که در آن تعداد ردیف‌های ماتریس T ردیف است، بنابراین نشان می‌دهد که فاصله زمان‌بندی ۱ ساعت است. N ستون ماتریس تعداد واحدها را نشان می‌دهد.

مرحله ۲: افراد جمعیت اولیه اغلب از شرایط معادله تعادل بار توان، محدودیت‌های خروجی واحد و محدودیت‌های نابرابری مختلف راضی نیستند. بنابراین اصلاح افراد فراتر از محدوده امکان‌پذیر با استفاده از روش‌های زیر ضروری است.

۱. محدودیت نابرابری، اگر هر عنصری در فرد محدودیت خروجی واحد را نقض کند، مقدار آن به محدوده محدودیت زیر محدود می‌شود:

$$\begin{cases} X_i^{\min}, & X_i \leq X_i^{\min} \\ X^{\max}, & X_i \geq X^{\max} \end{cases} \quad (۴)$$

۲. محدودیت برابری. روش اکتشافی تکراری زیر [۱۷] برای مقابله موثر با محدودیت تعادل بار سیستم اتخاذ شده است.

الف. تعداد تکرارها را $l = 0$ قرار دهید.

ب. ارزش تخلفات فردی سیستم را محاسبه کنید.

محدودیت متعادل کننده بار؛

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N P_{i,t}^E - P_t^E \quad (۵)$$

اگر $\Delta P = 0$ باشد، فرآیند تکراری پایان می‌یابد. در غیر این صورت، به مرحله ج بروید.

ج. واحد i به طور تصادفی انتخاب می‌شود و خروجی آن به

$$P_{i*} = P_i - \Delta P \quad (۶)$$

تنظیم می‌شود. اگر P_{i*} محدودیت خروجی واحد را نقض کند، P_{i*} با استفاده از فرمول (۵) پردازش می‌شود.

نشان می‌دهد.

در سال ۲۰۲۵، چندین پژوهش جدید به بررسی مسئله پخش بار اقتصادی و انتشار آلاینده‌ها در سیستم‌های تولید برق پرداخته‌اند. در مطالعه‌ای، مدل پخش بار اقتصادی-انتشاری با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع بادی، خورشیدی و برق آبی کوچک به کمک یک الگوریتم چندهدفه هیبرید ارائه شده است که اهمیت به‌کارگیری بهینه منابع تجدیدپذیر در بهینه‌سازی تولید برق را نشان می‌دهد. گو و همکاران [۱۵] آنالیز پخش بار اقتصادی سیستم‌های انرژی شامل نیروگاه‌های تجدیدپذیر را با استفاده از پاسخ تقاضا پیشنهاد کرده‌اند که به بهبود کارایی عملیاتی کمک می‌کند. در پژوهش دیگری، یک روش بهینه‌سازی چندهدفه برای پخش بار در شبکه‌های قدرت چندمنبع ارائه شده که علاوه بر هزینه، جوانب محیطی را نیز مدنظر قرار می‌دهد. چنکسوان و همکاران [۱۶] به بهینه‌سازی پخش بار اقتصادی کم‌کربن در سیستم‌های انرژی یکپارچه با تکنولوژی‌های نوین مانند CCS و Power-to-Gas پرداخته‌اند که نشان‌دهنده توجه به کاهش انتشار آلاینده‌ها در نیروگاه‌های تولید برق است. همچنین، مطالعاتی در زمینه پخش بار اقتصادی و محیطی در ریزشبکه‌ها با منابع انرژی بادی و ذخیره‌ساز باتری انجام شده که نتایج قابل توجهی در کاهش هزینه و آلاینده‌ها ارائه می‌دهند.

۳- روش پیشنهادی

مسئله بهینه‌سازی EED دارای تابع هدف غیرخطی مرتبه بالایی است که حل تحلیلی با استفاده از تکنیک‌های ریاضی را چالش‌برانگیز می‌کند. الگوریتم‌های هوش ازدحام را می‌توان برای حل این مشکل برنامه‌ریزی غیرخطی مرتبه بالا به کار برد. بنابراین، یک الگوریتم کلونی زنبور عسل چندهدفه (MOABC) برای بهینه‌سازی راه‌حل استفاده می‌شود. مراحل حل، توصیف الگوریتم، ارزیابی عملکرد الگوریتم، و انتخاب طرح زمان‌بندی بهینه در مجموعه راه‌حل پارتو طراحی شده‌اند.

تابع هدف

تابع هدف مسئله بیان‌کننده معیار کمی است که به منظور یافتن بهترین پاسخ بهینه‌سازی می‌شود. به‌طور مشخص تابع هدف ترکیبی از معیارهای اصلی مسئله شامل هزینه‌های عملیاتی و کیفیت سرویس و محدودیت‌های زمانی را سنجیده و به صورت یک عبارت ریاضیاتی مینیمم‌سازی می‌کند. تابع هدف در این مسئله، معیاری است که هم‌زمان هزینه تولید برق و آلودگی ناشی از تولید برق را کمینه می‌کند، به طوری که شبکه بتواند تقاضای بار را با کمترین هزینه و کمترین اثرات زیست‌محیطی تأمین کند

قیود مسئله محدب

در مسائل پخش بار اقتصادی-محیطی با تلفات شبکه، قیود عملیاتی ژنراتورها و شبکه باید رعایت شوند. بسیاری از این قیود محدود هستند، یعنی مجموعه مقادیر توان تولیدی که این قیود را رعایت می‌کنند، یک مجموعه محدب^۱ است. به این معنا که مجموعه مجاز جواب‌ها که توسط تمام قیود تعیین می‌شود یک مجموعه محدب است به زبان ساده اگر دو راه حل درست داشته باشیم هر ترکیب خطی بین آن‌ها هم درست است در مسائل پخش بار اقتصادی-زیست‌محیطی برخی قیود عملیاتی ژنراتورها و شبکه، مانند محدودیت توان ژنراتورها

```

1 For each  $x_i$  do
2    $x_i^* = x_i + rand() (x_i - x_k)$ ;
3   If  $x_i^* > x_i$ 
4      $P' = P' \cup \{x_i^*\}$ ;
5      $trial(i) = 0$ ;
6   Else
7      $trial(i) = trial(i) + 1$ ;
8     If  $trial(i) > limit$ 
9        $x_i = X^{min} + rand() * (X^{max} - X^{min})$ ;
10    End
11  End
12End

```

شکل ۲: الگوریتم قانون حریص بهبود یافته به روز شده منبع شهید.

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (9)$$

که در آن D_i^+ و D_i^- به ترتیب فاصله از ایده آل مثبت و ایده آل منفی است.

- انتخاب راه حل بهینه نهایی: راه حل با بیشترین مقدار C_i به عنوان بهترین تعادل بین هزینه کم، آلودگی کم و تلفات کم انتخاب می شود

استفاده از TOPSIS باعث می شود انتخاب راه حل نهایی شفاف، قابل تکرار و مبتنی بر معیارهای کمی باشد و بتوان به طور علمی ادعا کرد که این راه حل بهترین تعادل را بین سه معیار کلیدی مسئله ارائه می دهد.

مرحله ۵: مرحله زنبورهای تماشاگر. زیر تمام راه حل ها با استفاده از (۱۰) محاسبه می شود، یک راه حل به طور تصادفی انتخاب می گردد و جستجوی همسایگی دوباره با استفاده از (۸) انجام می شود.

$$P_i = \frac{dom(i) / Foodnumber}{\sum_{j=1}^{Foodnumber} [dom(j) / Foodnumber]} \quad (10)$$

که در آن $dom(i)$ تعداد راه حل هایی را نشان می دهد که راه حل می تواند در جمعیت غالب باشد و عدد غذا نشان دهنده تعداد زنبورهای شاغل در جمعیت است.

مرحله ۶: مرحله پیشاهنگ زنبور عسل. هنگامی که منبع شهد بهینه در چندین تکرار به روزرسانی نشود، این منبع شهد رها شده و به دنبال منبع شهد جدید می گردد، در نتیجه از قرار گرفتن فرآیند جستجو در حد مطلوب محلی جلوگیری می کند (شکل ۲).

$$\begin{cases} D(X_k) = \sum_{q=1}^r d_q(X_k) \\ d_q(X_k) = \frac{|f_q(X_k) - f_q(X_i)|}{f_q^{max}(X_k) - f_q^{min}(X_k)} \end{cases} \quad (11)$$

که در آن $D(X_k)$ نشان دهنده فاصله ازدحام هر X_k در مجموعه غیر غالب است. $f_q(X_k)$ و $f_q(X_i)$ نزدیک ترین جواب های غیر غالب تابع هدف q را نشان می دهند و f_q^{max} و f_q^{min} به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل تمام راه حل های غیر غالب در تابع هدف q را نشان می دهند.

جزئیات به روزرسانی ها و ساختار جستجوی محلی در الگوریتم MOABC

به روزرسانی های الگوریتم MOABC و ساختار جستجوی محلی شامل تنظیم پارامترها به منظور افزایش کیفیت راه حل ها جهت جستجوی محلی

```

1  $P' = \text{find\_nondominated\_front}(P)$ 
2 For each  $p' \in P \wedge p' \notin P'$  do
3    $P' = P' \cup \{p'\}$ 
4   For each  $q \in P' \wedge q \neq p'$  do
5     If  $p' > q$  do
6        $P' = P' \setminus \{q\}$ 
7     Else  $p' < q$  do
8        $P' = P' \setminus \{p'\}$ 
9   End
10 End
11 End

```

شکل ۱: الگوریتم مرتب سازی غیرمجاز.

$$l = l + 1 \quad \text{if} \quad l \leq l_{max} \quad (V)$$

سپس به مرحله ب بروید. در غیر این صورت، فرآیند تکراری خاتمه می یابد.

مرحله ۳: مقدار دهی اولیه یکی از مهم ترین مراحل الگوریتم ژنتیک مرتب سازی غیر غالب است. این مقدار اولیه معمولاً تعیین کننده کیفیت و سرعت همگرایی الگوریتم به یک راه حل بهینه است. تا مقداردهی اولیه مجموعه غیر غالب تکمیل شود. فرآیند خاص به صورت زیر ارائه می شود: ابتدا اولین راه حل از مجموعه راه حل های امکان پذیر به دست می آید و راه حل بهینه در مجموعه راه حل های پارتو در نظر گرفته می شود. دوم، محلول دوم از مجموعه محلول و محلول اول در مجموعه محلول پارتو خارج می شود. یک راه حل مقایسه می شود، راه حل پایین حذف می شود و راه حل برتر حفظ می شود. راه حل سوم با مجموعه راه حل پارتو مقایسه می شود و این فرآیند تا زمانی که تمام راه حل های امکان پذیر طی شود، تکرار می شود. مراحل دقیق طراحی روش در شکل ۱، نشان داده شده است.

مرحله ۴: فاز زنبور عسل به کار گرفته شده. جستجوی محله تحت هدایت راه حل های غیر مسلط انجام می شود. رابطه تسلط بین راه حل های اصلی و محله با استفاده از الگوریتم شکل، برای به دست آوردن یک راه حل بهبود یافته قضاوت می شود. در زیر عبارتی از فرمول جستجوی محلی آمده است:

$$X_i = X_i + rand(X_i - X_k) \quad (8)$$

که در آن X_k نشان دهنده راه حلی است که به طور تصادفی در مجموعه غیر غالب انتخاب شده است.

مراحل تحلیل با: TOPSIS

- ایجاد ماتریس تصمیم: تمامی راه حل های غیر غالب و مقادیر آنها برای سه معیار هزینه، آلودگی و تلفات شبکه در ماتریس قرار گیرد.
- نرمال سازی ماتریس: مقادیر معیارها به یک مقیاس یکسان تبدیل شوند تا تاثیر معیارهای با مقادیر بزرگتر از معیارهای کوچکتر غلبه نکنند.

- وزن دهی به معیارها: هر معیار بر اساس اهمیت نسبی خود وزن دهی شود (مثلاً وزن بیشتری به هزینه یا تلفات داده شود).
- تعیین نقاط ایده آل: نقطه ایده آل مثبت (A^+) حداقل هزینه، حداقل آلودگی و حداقل تلفات و نقطه ایده آل منفی (A^-) بیشترین هزینه، بیشترین آلودگی و بیشترین تلفات
- محاسبه فاصله از نقاط ایده آل: فاصله هر راه حل از نقطه ایده آل مثبت و منفی محاسبه شود.

- شاخص نزدیکی به ایده آل: برای هر راه حل، شاخص نزدیکی به ایده آل مثبت محاسبه گردد

جدول ۱: پارامترهای واحدها.

واحد	a	b	c	Pmax (MW)	Pmin (MW)	α	β	γ	ξ	λ
۱	۱۰	۲/۰	۰/۰۱۰	۱۵۰	۵	۴/۹۱	$-۵/۵۵۴e^{-۲}$	$۶/۴۹۰e^{-۴}$	$۲/۰۰e^{-۴}$	$۲/۸۵۷e^{-۲}$
۲	۱۰	۱/۵	۰/۰۱۲	۱۵۰	۵	۲/۵۴۳	$-۶/۰۴۷e^{-۲}$	$۵/۶۳۸e^{-۴}$	$۵/۰۰e^{-۴}$	$۳/۳۳۳e^{-۲}$
۳	۲۰	۱/۸	۰/۰۰۴	۱۵۰	۵	۴/۲۵۸	$-۵/۰۹۴e^{-۲}$	$۴/۵۸۶e^{-۴}$	$۱/۰۰e^{-۶}$	$۸/۰۰۰e^{-۲}$
۴	۱۰	۱/۰	۰/۰۰۶	۱۵۰	۵	۵/۳۲۶	$-۳/۵۵۰e^{-۲}$	$۳/۳۸۰e^{-۴}$	$۲/۰۰e^{-۲}$	$۲/۰۰۰e^{-۲}$
۵	۲۰	۱/۸	۰/۰۰۴	۱۵۰	۵	۴/۲۵۸	$-۵/۰۹۴e^{-۲}$	$۴/۵۸۶e^{-۴}$	$۱/۰۰e^{-۶}$	$۸/۰۰۰e^{-۲}$
۶	۱۰	۱/۵	۰/۰۱۰	۱۵۰	۵	۶/۱۳۱	$-۵/۵۵۵e^{-۲}$	$۵/۱۵۱e^{-۴}$	$۱/۰۰e^{-۵}$	$۶/۶۶۷e^{-۲}$

جدول ۲: مقدار پارامترهای کلیدی.

پارامتر	۱	۲	۳
Pop	۵۰	۸۰	۱۰۰
Setgen	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰
Limit	۱۰	۳۰	۵۰

تعداد تکرار Setgen، و تعداد منابع عسل^۱ تعیین شده برای رهاشدن Limit است. جدول ۲، فهرستی از مقدار سه پارامتر را ارائه می‌دهد. عملکرد الگوریتم پیشنهادی با تاثیر این سه عامل با استفاده از روش تاگوچی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۳ اثر روند سطح عامل پارامترهای کلیدی را نمایش می‌دهد.

تحلیل شبیه سازی

الگوریتم‌های MOWDO، NSGA-II، و MOABCSO که معمولاً در این زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرند، برای آزمایش‌های مقایسه‌ای برای تأیید اثربخشی الگوریتم MOABCSO در زمان‌بندی سیستم توان قدرت استفاده می‌شوند. پارامترهایی مانند میزان جمعیت و تعداد تکرارهای الگوریتم‌های مقایسه، با پارامترهای MOABCSO برای اطمینان از قابلیت اطمینان نتایج تجربی سازگار هستند. احتمال متقاطع الگوریتم NSGA-II روی ۰/۹ و احتمال جهش روی ۰/۱ تنظیم شد. در MOWDO ضریب یادگیری ۲ و وزن لختی^۲ ۰/۹ بود. در MOWDO ضریب اصطکاک ۰/۹ ثابت شتاب گرانش ۰/۶۵ ضریب نفوذ نیروی گرایان فشار ۱/۵ و ضریب نفوذ نیروی کوریولیس ۱/۵ بود. PF چهار الگوریتم پس از یک اجرا در شکل ۴ نشان داده شده است

همانطور که در شکل ۴، نشان داده شده است، هزینه اقتصادی و انتشار آلودگی سیستم یک رابطه معکوس غیرخطی مشهود و متناقض را نشان می‌دهد که یکدیگر را محدود می‌کند. هزینه تولید برق باید با توجه به قیمت افزایش انتشار آلودگی کاهش یابد و بالعکس، زیرا هزینه اقتصادی سیستم و انتشار آلودگی جزئی است. از این‌رو، راه‌حل پارتو^۳ MOABCSO نسبت به اکثر راه‌حل‌های الگوریتم MOWDO، الگوریتم NSGA-II، ایده‌آل است. الگوریتم MOABCSO به طور مستقل ۲۰ بار اجرا می‌شود تا تأثیر تصادفی بودن بر عملکرد الگوریتم کاهش یابد. مجموعه راه‌حل بهینه‌سازی که به طور یکنواخت بر روی PF واقعی-تقریبی توزیع شده است در جدول ۳، ارائه شده است و میانگین عملکرد هر شاخص ارزیابی در جدول ۴، مقایسه

اجرا می‌شود جستجوی محلی برای هر راه حل تا M تلاش شامل جابجایی مختصات یا تغییر گام انجام می‌دهد؛ معیار خاتمه محلی تکرار بدون بهبود است. در زیر مراحل به‌روزرسانی‌ها مشاهده می‌شود:

- به‌روزرسانی حل‌کنندگان اولیه (Employed Bees): اصلاح اولیه مقادیر توان ژنراتورها با توجه به تابع هدف چند معیاره
- به‌روزرسانی جستجوی محلی (Onlooker Bees/Local Search): بهبود راه‌حل‌های منتخب با تغییرات کوچک در توان تولید و کاهش تابع هدف
- به‌روزرسانی نهایی (Scout Bees/Final Search): یافتن بهترین راه‌حل‌ها برای رسیدن به حداقل هم‌زمان هزینه، انتشار آلاینده و تلفات شبکه

هر مرحله به‌روزرسانی طوری طراحی شده که محدودیت‌های ژنراتورها و شبکه رعایت شود و الگوریتم قابل بازتولید و پایدار در شبکه‌های بزرگ باشد معیار توقف الگوریتم و پاسخ بهینه نهایی معیار توقف رسیدن به حداکثر تعداد تکرار و عدم بهبود تابع هدف طی چند تکرار و همگرایی راه‌حل‌ها تغییرات کمتر از آستانه ϵ است و پاسخ بهینه نهایی شامل توان تولید ژنراتورها (P_i) و هزینه کل تولید و انتشار آلاینده‌ها و تلفات شبکه است.

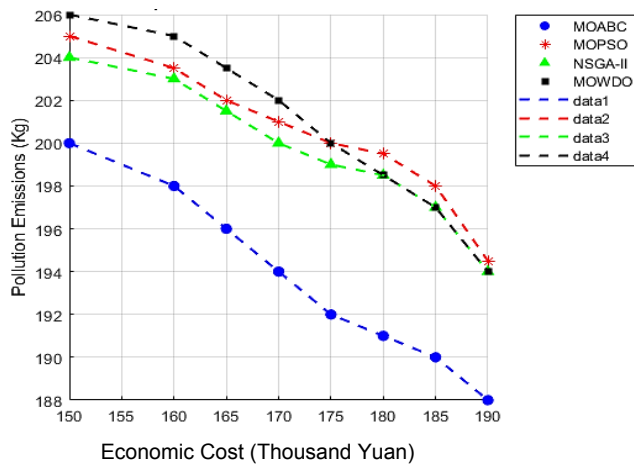
مرحله ۷: به‌روزرسانی مجموعه بدون تسلط. راه‌حل‌های بهینه پارتو به مجموعه غیرمسلط اضافه می‌شوند و راه‌حل‌های پایین‌تر از مجموعه غیرغالب پس از تکمیل این دور جستجو از طریق الگوریتم شکل ۱، حذف می‌شوند. فاصله ازدحام هر فرد در مجموعه غیر غالب زمانی محاسبه می‌شود که تعداد محلول‌های ذخیره شده در مجموعه غیرغالب به حداکثر برسد. هنگامی که تعداد راه‌حل‌های ذخیره شده در مجموعه غیرغالب به حداکثر برسد، فردی که حداقل فاصله ازدحام را دارد حذف می‌شود تا به‌روزرسانی مجموعه غیرغالب را درک کند. فاصله ازدحام به صورت زیر محاسبه می‌شود.

۴- شبیه‌سازی و بررسی نتایج

ساخت‌پذیری مدل با استفاده از داده‌های خام مربوط به یک سیستم شش واحدی از منبع [۱۸] استخراج و بررسی می‌شود. پارامترهای واحد در جدول ۱، فهرست شده است. مثال ساختار محاسبه قدرت/توان دارای شش واحد توان حرارتی، یک ساعت دوره پخش بار و مجموع خروجی توان الکتریکی سیستم ۲۸۳/۴ مگاوات است.

تنظیم پارامتر

پارامترهای اساسی الگوریتم MOABCSO شامل میزان جمعیت POP،



شکل ۴: تعادل بهینه میان هزینه اقتصادی و آلودگی زیست محیطی.

جدول ۴: میانگین ارزش شاخص ارزیابی.

الگوریتم‌ها	IGD	HV	MS
MOABC	1.047×10^{-2}	1.017×10^{-2}	۱,۰۰۰
MOPSO	1.501×10^{-2}	0.800×10^{-2}	۱,۰۰۰
NSGA-II	1.233×10^{-2}	0.300×10^{-2}	۰,۹۴۲
MOWDO	1.168×10^{-2}	0.210×10^{-2}	۰,۹۶۵

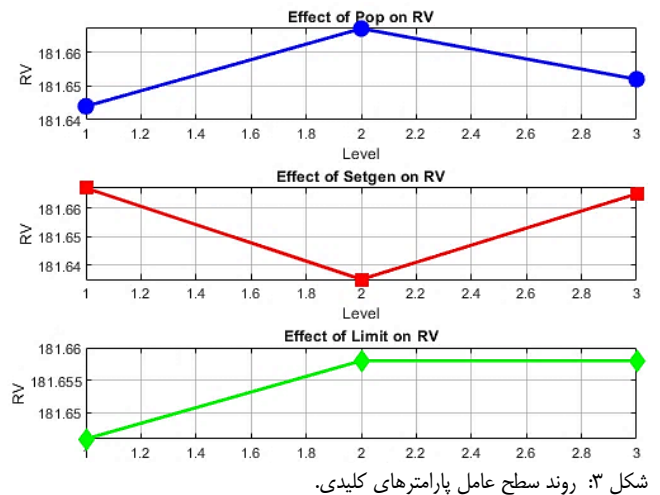
بهتر از الگوریتم‌های دیگر است. مقدار شاخص MS نشان داد که پوشش PF به دست آمده توسط MOABC بهتر از سایر الگوریتم‌ها است. منحنی‌های همگرایی تابع هدف شکل‌های ۵ و ۶ نشان دادند که سرعت همگرایی الگوریتم MOABC سریع‌ترین و مقدار بهینه‌سازی، کوچک‌ترین است. بنابراین الگوریتم MOABC از نظر راه‌حل/پاسخ‌گویی توزیع به بهینه‌سازی و همگرایی در پخش بار سیستم قدرت/توان نسبت به MOPSO، NSGA-II و MOWDO برتری دارد.

جبهه پارتو حاصل از بهینه‌سازی نشان‌دهنده تعادل میان اهداف متناقض کاهش هزینه و کاهش آلودگی است. شکل ۷ نمودار جبهه پارتو را برای سیستم مورد مطالعه نشان می‌دهد در نقاط اولیه جبهه، هدف اصلی کاهش آلودگی است که هزینه بالاتری به همراه دارد. در نقاط میانی، تعادلی میان دو هدف ایجاد شده است. در نقاط انتهایی، هزینه به حداقل ممکن کاهش یافته اما آلودگی افزایش یافته است. فاصله میان نقاط نشان‌دهنده حساسیت سیستم نسبت به تغییرات اولویت‌ها است. به عنوان مثال، در برخی بخش‌ها کاهش اندکی در هزینه ممکن است به افزایش قابل توجهی در آلودگی منجر شود.

مقایسه طرح‌های زمان‌بندی بهینه‌سازی اقتصادی، بهینه‌سازی ذهنی-محیطی، و بهینه‌سازی در معرض خطر در نتایج محاسباتی الگوریتم‌های مختلف برای تایید بیشتر کارایی الگوریتم MOABC در جدول ۵، ارائه شده است.

نتایج نشان می‌دهد که راه‌حل‌های افراطی و سازشی به دست آمده توسط الگوریتم MOABC بهتر از راه‌حل‌های MOPSO، MOWDO و NSGA II هستند و در نتیجه برتری MOABC را در حل مساله EED تایید می‌کنند. خروجی هر واحد در راه‌حل مصالحه بهینه‌سازی الگوریتم‌های مختلف در جدول ۶ نشان داده شده است.

برای یک سیستم شش واحدی چهار الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه شامل MOABC کلونی زنبور، MOPSO، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (NSGA-II) (الگوریتم ژنتیک چندهدفه) و MOWDO (بهینه‌سازی وزنی تصمییم) بررسی شدند مقدار تلفات توان برای هر الگوریتم تعیین شد.



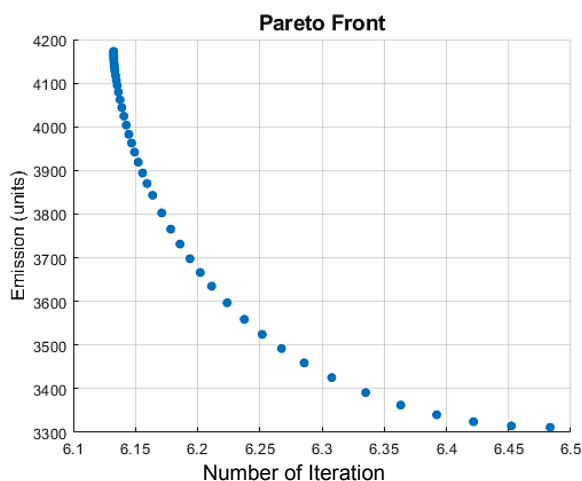
شکل ۳: روند سطح عامل پارامترهای کلیدی.

جدول ۳: طرح مجموعه زمان‌بندی غیرفرعی که توسط الگوریتم MOABC به دست آمده در مقایسه با بهترین پاسخ‌های حاصل از الگوریتم‌های مختلف.

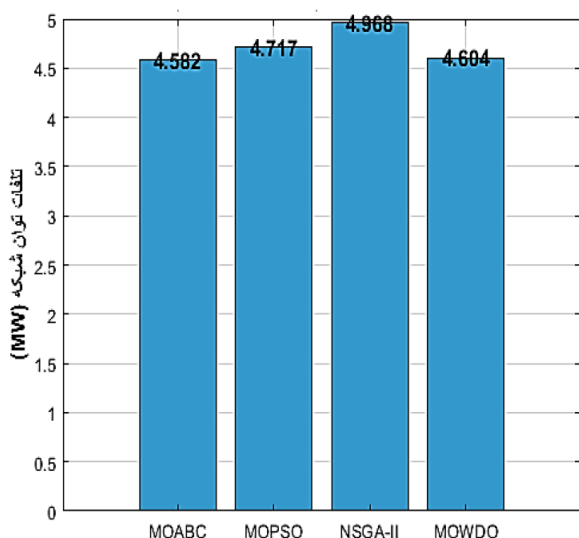
شماره	هزینه اقتصادی ($10^3 \$$)	انتشار آلودگی (kg)	شماره	هزینه اقتصادی ($10^3 \$$)	انتشار آلودگی (kg)
۱	۱۶۷,۶۷۹	۱۹۷,۳۷۷	۱۱	۱۷۵,۹۰۰	۱۹۵,۳۴۹
۲	۱۶۸,۶۰۳	۱۹۷,۰۱۴	۱۲	۱۷۷,۰۰۹	۱۹۵,۱۴۵
۳	۱۶۹,۳۸۳	۱۹۶,۸۰۳	۱۳	۱۷۷,۷۶۲	۱۹۵,۰۵۵
۴	۱۷۰,۲۲۳	۱۹۶,۵۴۰	۱۴	۱۷۸,۸۴۷	۱۹۴,۹۲۰
۵	۱۷۱,۰۱۶	۱۹۶,۲۹۸	۱۵	۱۷۹,۷۶۹	۱۹۴,۸۱۱
۶	۱۷۱,۷۴۸	۱۹۶,۱۱۶	۱۶	۱۸۰,۵۱۹	۱۹۴,۷۷۱
۷	۱۷۲,۴۱۱	۱۹۵,۹۷۷	۱۷	۱۸۱,۷۱۸	۱۹۴,۶۴۲
۸	۱۷۳,۳۱۳	۱۹۵,۸۲۹	۱۸	۱۸۲,۷۶۱	۱۹۴,۶۳۲
۹	۱۷۴,۳۰۳	۱۹۵,۶۹۶	۱۹	۱۸۳,۶۸۹	۱۹۴,۵۴۷
۱۰	۱۷۵,۱۱۷	۱۹۵,۴۴۲	۲۰	۱۸۶,۷۹۹	۱۹۴,۴۶۴

شده است. جدول ۳ طرح مجموعه زمان‌بندی غیرفرعی که توسط الگوریتم MOABC به دست آمده است. که با بهترین پاسخ‌های بدست آمده از الگوریتم‌های مختلف مقایسه شده است زمان‌بندی غیر فرعی^۱ مفهومی است که در برخی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و مدیریت منابع استفاده می‌شود. این مفهوم معمولاً به رویکردی اشاره دارد که در آن کارها، وظایف یا فرایندها بدون وابستگی سلسله‌مراتبی به یکدیگر زمان‌بندی می‌شوند. در الگوریتم‌هایی مانند MOABC (کلونی زنبور عسل چندهدفه)، وظایف مختلف بدون سلسله مراتب مشخصی پردازش می‌شوند تا همگرایی سریع‌تر باشد.

مقادیر مرتبط با MOABC نتایج بهتری را نسبت به سایر الگوریتم‌ها نشان می‌دهد. که با بهترین پاسخ‌های به دست آمده از الگوریتم‌های مختلف مقایسه شده است با توجه به شاخص IGD، میانگین مقدار IGD به دست آمده توسط MOABC، 1.017×10^{-2} است، که کوچکتر از آن میزان به دست آمده، توسط سه الگوریتم دیگر است. این یافته نشان‌دهنده همگرایی و یکنواختی توزیع رضایت‌بخش PF به دست آمده توسط MOABC است. با توجه به شاخص HV، میانگین HV باصل توسط MOABC از الگوریتم‌های دیگر معنادارتر قابل توجه‌تر است. این یافته همچنین نشان داد که همگرایی PF به دست آمده توسط MOABC



شکل ۷: جبهه پارتو برای سیستم مورد مطالعه.



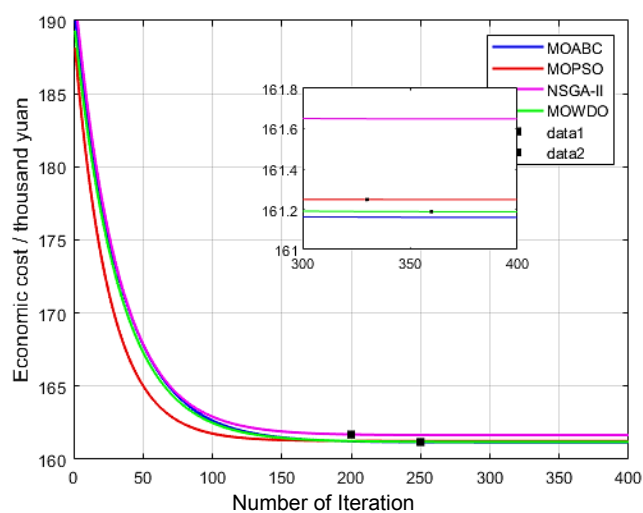
شکل ۸: مقایسه تلفات توان در الگوریتم‌های مورد مقایسه برای سیستم شش واحدی.

جدول ۶: مقایسه طرح‌های زمان‌بندی سازشی و بهینه‌سازی.

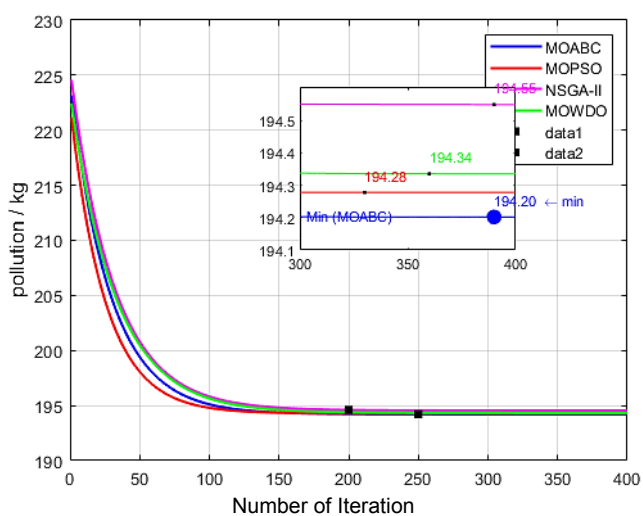
طرح زمان‌بندی	MOABC	MOPSO	NSGA-II	MOWDO
G_1/MW	۵۲,۴۷۸	۵۳,۴۰۸	۴۹,۷۷۴	۵۳,۲۲۲
G_2/MW	۵۴,۰۱۸	۵۳,۸۳۳	۵۳,۵۵۵	۵۳,۰۱۴
G_3/MW	۳۵,۵۷۵	۳۴,۵۷۶	۳۵,۵۲۷	۳۵,۶۹۲
G_4/MW	۵۱,۷۹۰	۵۰,۲۶۱	۵۱,۶۸۶	۵۳,۰۲۹
G_5/MW	۳۴,۹۵۷	۳۵,۴۰۸	۳۶,۷۷۱	۳۵,۴۵۱
G_6/MW	۵۴,۵۸۲	۵۵,۹۱۴	۵۶,۰۷۶	۵۲,۹۸۹
هزینه اقتصادی ($10^3 \$$)	۱۶۳,۵۳۱	۱۶۳,۴۶۲	۱۶۴,۳۶۲	۱۶۳,۶۹۳
انتشار آلودگی (kg)	۱۹۹,۷۲۹	۱۹۹,۸۵۶	۱۹۹,۷۵۴	۱۹۹,۷۳۸

بهتری برای کاهش تلفات توان پیدا می‌کند. مدیریت انرژی مؤثر استفاده از مرتب سازی غیرمسلط باعث انتخاب راه حل‌هایی می‌شود که کمترین هدررفت انرژی دارند

در مسئله بهینه‌سازی پخش بار اقتصادی-محیطی این پرسش مهم است که اهمیت هزینه انتقال بیشتر است یا تلفات انتقال؟ در روش پیشنهادی علاوه بر کمینه کردن هزینه سوخت تولید، تلفات شبکه نیز به صورت مستقیم در تابع هدف لحاظ شده است. این موضوع باعث می‌شود



شکل ۹: منحنی هدفمند مربوط به هزینه اقتصادی.



شکل ۱۰: منحنی هدفمند مربوط به انتشار آلاینده.

جدول ۵: مقایسه راه‌حل‌های افراطی و سازشی.

الگوریتم	هدف	هزینه اقتصادی ($10^3 \$$)	انتشار آلودگی (kg)
MOABC	بهینه‌سازی اقتصادی	۱۶۱,۱۵۹	۲۰۵,۱۸۸
	بهینه‌سازی محیطی	۱۹۰,۹۵۳	۱۹۴,۲۰۲
	بهینه‌سازی سازشی	۱۶۳,۵۳۱	۱۹۹,۷۲۹
MOPSO	بهینه‌سازی اقتصادی	۱۶۱,۲۴۸	۲۰۳,۳۵۸
	بهینه‌سازی محیطی	۱۹۱,۷۶۵	۱۹۴,۲۷۸
	بهینه‌سازی سازشی	۱۶۳,۴۶۲	۱۹۹,۸۵۶
NSGA-II	بهینه‌سازی اقتصادی	۱۶۱,۶۴۸	۲۰۱,۹۹۶
	بهینه‌سازی محیطی	۱۸۲,۹۷۱	۱۹۴,۵۴۹
	بهینه‌سازی سازشی	۱۶۴,۳۶۳	۱۹۹,۷۵۴
MOWDO	بهینه‌سازی اقتصادی	۱۶۱,۱۸۸	۲۰۵,۲۶۹
	بهینه‌سازی محیطی	۲۰۰,۲۸۳	۱۹۴,۳۳۵
	بهینه‌سازی سازشی	۱۶۳,۶۹۳	۱۹۹,۷۳۸

داده‌ها در قالب شکل ۸ نشان داده شده‌اند که شامل نام الگوریتم و میزان تلفات توان (MW) آن است.

جستجوی تطبیقی MOABC با استفاده از کلونی زنبورها، راه‌حل‌های

Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, vol. 7, pp. 2683-2699, Feb. 2024.

- [12] S. Habib, M. Ahmadi Kamarposhti, H. Shokouhandeh, I. Colak, and E. M. Barhoumi, "Economic dispatch optimization considering operation cost and environmental constraints using the HBMO method," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 1718-1725, Nov. 2023.
- [13] M. Dashtdar, et al. "Solving the environmental/economic dispatch problem using the hybrid FA-GA multi-objective algorithm," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 13766-13779, Nov. 2022.
- [14] M. R. Gholami Dehbalae, G. H. Shaeisi, and M. A. Valizadeh, "A proposed improved hybrid hill climbing algorithm with the capability of local search for solving the nonlinear economic load dispatch problem," *International Journal of Engineering*, vol. 33, no. 4, 575-585, Apr. 2020.
- [15] D. W. Gong, Y. Zhang, and C. L. Qi, "Power system economic emission dispatch considering uncertainties of wind, solar, and small runoff hydropower via a hybrid multi-objective optimization algorithm," *Expert Systems with Applications*, vol. 278, Article ID: 127375. doi:10.1016/j.eswa.127375. Jun. 2025.
- [16] G. Chu, R. Li, C. Cao, and B. Li, "Low-carbon economic dispatch of power systems based on wind energy and flexible carbon capture devices," *Discover Applied Sciences*, vol. 7, Article ID: 1259, 2025.
- [17] Xingwen Jiang, J. Zhou, H. Wang, and Y. Zhang, "Dynamic environmental economic dispatch using multiobjective differential evolution algorithm with expanded double selection and adaptive random restart," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 49, pp. 399-407, Jul. 2013.
- [18] S. Das and P. N. Suganthan, "Differential evolution: A survey of the state-of-the-art," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 15, no. 1, pp. 4-31, Oct. 2010.

سید حکیم حسینی در سال ۱۳۹۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق- فناوری شبکه های انتقال برق خود را از دانشگاه علمی کاربردی صنعت آب و برق خوزستان و در سال ۱۴۰۴ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق- افزارهای میکرو و نانو الکترونیک خود را از دانشگاه پیام نور تهران شمال دریافت نمود. و از سال ۱۳۸۷ در شرکت برق منطقه ای خوزستان مشغول است. زمینه های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند مهندسی شبکه های انتقال برق و پژوهش مدل سازی و بهینه سازی EED سیستم های قدرت با استفاده از الگوریتم های فرا ابتکاری و همچنین افزارهای میکرو و نانوالکترونیک و هوش مصنوعی در مهندسی برق می باشد

سید جواد جواد مقدم در سال ۱۳۷۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق- کنترل خود را از دانشگاه فردوسی مشهد و در سال ۱۳۷۶ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی پزشکی بیوالکتریک خود را از دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود. از سال ۱۳۸۱ الی ۱۳۸۴ نامبرده به عنوان عضو هیأت علمی دانشگاه زابل به کار مشغول بود و پس از آن به دوره دکترای مهندسی برق و کامپیوتر در دانشگاه پلی تکنیک آتن کشور یونان وارد گردید و در سال ۱۳۸۴ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق الکترونیک از دانشگاه مذکور گردید. ایشان از سال ۱۳۹۲ در دانشکده مهندسی دانشگاه پیام نور در استان تهران مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می باشد. زمینه های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ایده های نو در طراحی آی سی و مدارهای مجتمع و شبکه های عصبی و نیز تبدیل موجک می باشد.

محمدرضا غلامی ده بالایی در سال ۱۳۸۲ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی اصفهان و در سال ۱۳۸۴ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه آزاد واحد نجف آباد اصفهان دریافت نمود. از سال ۱۳۸۶ تا کنون نامبرده به عنوان عضو هیأت علمی دانشگاه پیام نور در گروه مهندسی برق و کامپیوتر به کار مشغول است. ایشان در سال ۱۳۹۳ دوره دکترای مهندسی برق در دانشگاه رازی کرمانشاه وارد گردید و در سال ۱۳۹۸ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. زمینه های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند سیستم های قدرت، پخش بار اقتصادی، الکترونیک قدرت و هوش مصنوعی در مهندسی برق می باشد.

راه حل بهینه نه تنها از نظر اقتصادی، بلکه از نظر راندمان انتقال انرژی و کاهش انتشار آلاینده ها نیز بهینه باشد. بنابراین اهمیت تلفات انتقال به ویژه در شبکه های بزرگ و با تعداد زیاد ژنراتور از اهمیت مستقیم هزینه انتقال بیشتر است چرا که کاهش تلفات هم هزینه را کم می کند و هم به اهداف زیست محیطی کمک می کند.

۵- نتیجه گیری

در روش پیشنهادی برای اولین بار مسئله پخش بار اقتصادی- محیطی (EED) با در نظر گرفتن تلفات شبکه و با استفاده از الگوریتم چندهدفه (MOABC) حل گردید ویژگی های نوآورانه این روش عبارتند از: مدل سازی تلفات شبکه در تابع هدف، برخلاف مطالعات پیشین که تنها هزینه تولید یا انتشار آلاینده ها را بهینه می کردند، در این تحقیق تلفات انرژی شبکه به طور مستقیم در تابع هدف وارد شده است. این امر باعث می شود راه حل نهایی بهینه تر از نظر اقتصادی زیست محیطی و عملیاتی باشد. در این تحقیق، الگوریتم به صورت چندهدفه توسعه یافت تا بتواند به طور همزمان هزینه، انتشار آلاینده ها و تلفات شبکه را کمینه کند. قابلیت حل شبکه های بزرگ با تعداد زیاد ژنراتور، این روش پیشنهادی برای شبکه های با تعداد زیاد پارامتر و ژنراتور قابل استفاده است و پایداری و دقت بالا دارد، که در مطالعات پیشین به طور محدود ارائه شده است.

مراجع

- [1] L. Wang, Y. Liu, X. Pang, Q. Wang and X. Wang, "Environmental economic dispatch method of power system based on multiobjective artificial bee colony algorithm," *Electrical Engineering*, vol. 105, pp. 867-879, 2023.
- [2] H. M. Hasanien, "Optimal economic environmental power dispatch by using artificial bee colony algorithm," *International Journal of Artificial Intelligence*, vol. 12, no. 2, pp. 101-110, Jul. 2023.
- [3] L. Wang, Y. Liu, X. Pang, Q. Wang and X. Wang, "Environmental economic dispatch method of power system based on multiobjective artificial bee colony algorithm," *Electrical Engineering*, vol. 106, pp. 567-579, 2024.
- [4] M. Sutar and H. T. Jadhav, "An economic/emission dispatch based on a new multi-objective artificial bee colony optimization algorithm and NSGA-II," *Evolutionary Intelligence*, vol. 17, pp. 1127-1162, 2022.
- [5] D. C. Chen, W. Y. Zhang, "Multiobjective environment /economic power dispatch using evolutionary programming and an artificial bee colony algorithm," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 33, no. 6, pp. 6144-6156, Nov. 2018.
- [6] R. Akbari, R. Hedayatzadeh, K. Ziarati, and B. Hassanizadeh, "A multi-objective artificial bee colony algorithm," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 2, no. 1, pp. 39-52, Feb. 2012.
- [7] E. E. Hassan, et al., "Optimal economic environmental power dispatch by using artificial bee colony algorithm," *International Journal of Artificial Intelligence*, vol. 13, no. 2, pp. 101-110, Jun. 2023.
- [8] M. Geravandi and H. Moradi Cheshmeh Beigi, "The problem of resilient stochastic unit commitment with consideration of existing uncertainties using the rate of change of frequency," *Journal of Renewable Energy and Environment*, vol. 9, no. 4, pp. 34-47, May 2022.
- [9] H. Moradi Cheshmeh Beigi and M. Geravandi, "Unit commitment risk evaluation considering load uncertainty and wind power," *Journal of Energy Management and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 134-141, Summer 2023.
- [10] C. Bakos and A. Giakoumis, "Numerical algorithm for environmental/economic load dispatch with emissions constraints," *Scientific Reports*, vol. 14, Article ID: 3327, Feb. 2024.
- [11] J. Soni and K. Bhattacharjee, "Equilibrium optimizer for multi-objective dynamic economic emission dispatch integration with plug-in electric vehicles and renewable sources," *Multiscale and*