پخش بار اقتصادی در سیستم‌های قدرت با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جستجو و نجات

مجتبی خدادادی[۱]، افشین لشکرآرا *[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران mo.khodadadi73@gmail.com

*۲- دانشیار، گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، lashkarara@alumni.iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۴/۳۰ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۱۵

چکیده: پخش بار اقتصادی برای سیستم های قدرت با هدف بهینه سازی کل هزینه تولیدی برای واحدهای فعال موجود در شبکه قدرت، از مهم ترین مباحث برای سیستم های مدرن امروزی می باشد. به بیانی دیگر هدف از مسئله پخش بار اقتصادی، برنامه ریزی بهینه و مناسب برای واحدهای تولیدی با در نظر گرفتن عوامل و محدودیت های غیرخطی موجود در شبکه قدرت و واحدهای تولیدی می باشد. و نقش بسیار مهمی را در بهره برداری اقتصادی از سیستم های قدرت ایفا می کند حل مسئله بهینه سازی پخش باراقتصادی به دلیل ابعاد عظیم تابع هدف غیرخطی، محدودیتها و قیود مختلف دارای پیچیدگی های فراوانی می باشد. با این حال استفاده از الگوریتم‌های بهینه سازی و هوش مصنوعی در حل این مسئله به کار گرفته شده است. در این تحقیق بنا به استفاده از الگوریتم جدیدی با عنوان جستجو و نجات ، که براساس رفتار فردی و گروهی انسان‌ها در جستجوی فرد یا گروهی که دچار حادثه و یا گم شده‌اند مدلسازی شده است. این الگوریتم قدرت زیادی در حل مسائل با قیود بالا دارد که می‌تواند از بهینه‌های محلی صرف نظر کند برای تایید روش پیشنهادی در مینیمم سازی هزینه و آلودگی شبیه سازی در محیط نرم افزاری (MATLAB) روی شبکه‌های آزمایشی (۳ ، ۶ ، ۱۰) واحده انجام شده است و نتایج شبیه سازی بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی نشان می دهند که دقت و سرعت پیدا کردن جواب‌ها با این روش بهبود یافته است.

کلمات کلیدی: پخش بار اقتصادی ، توابع هزینه و آلودگی صاف و ناصاف، ضریب جریمه نیروگاه‌ها، الگوریتم بهینه سازی جستجو و نجات

۱- مقدمه

الگوریتم‌های بهینه سازی تقریباً در تمامی ر شته‌ها از جمله مهند سی، علوم، اقتصاد و ... کاربردهای گسترده‌ای دارند.محققان همواره در تلاش هستند تا الگوریتم‌های بهینه‌سازی جدیدی را توسعه دهند تا بتوان این مسائل بزرگ و پیچیده را به‌طور مؤثر حل کرد. روش‌های عددی در بهینه‌سازی جهانی مشکلاتی دارند امروزه الگوریتم‌های اکتشافی مبتنی بر جمعیت و فرا ابتکاری مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. بسیاری از این الگوریتم‌ها از طبیعت، رفتار حیوانات و غیره الهام گرفته شده‌اند. پخش بار اقتصادی (ED) یک موضوع اساسی در برنامه‌ریزی سیستم قدرت الکتریکی است که هدف آن به حداکثر رساندن سود اقتصادی با تخصیص بهینه خروجی هر واحد ژنراتور است. نشان داده شده است که بیش از ۱۰ درصد از کل مصرف انرژی را می‌توان با ارسال اقتصادی ذخیره کرد. با این حال، در دهه‌های اخیر، مسائل زیست محیطی توجه قابل‌توجهی را در سراسر جهان به خود جلب کرده است و تلاش‌های زیادی برای کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم و آلودگی محیط‌زیست صورت‌گرفته‌است[۱] .

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

تا به حال مطالعات م سئله پخش بار اقت صادی/آلودگی، جهت بالا بردن اطلاعات و نیز اقتصـــادی‌تر جهت تامین تولید پیش‌بینی شـــده برای بارهای مصرفی می‌باشد. روش‌های قراردادی اغلب نتایج خوبی می‌دهند ولی وقتی ف ضای تحقیق غیرخطی و غیر پیو سته می شود حل م سئله ب سیار پیچیده و همگرایی این روش برای ج ستجوی جواب بهینه برای حل مســئله، ســرعت بســیار کمی خواهد داشــت. مســئله پخش بار اقتصــادی به‌وســیله روش‌های بهینه‌ســازی زیادی تا به حال حل شــده ا ست. اغلب این روش‌ها توانایی حل مسائل بهینه سازی با توابع نا صاف، غیر پیوســته با فضــای حل غیرخطی بازده خوب را ندارند. در ادامه به بررسی برخی مراجع مرتبط با این تحقیق پرداخته شده است.

در یک روش جدید برای حل م سائل پخش بار اقت صادی با ا ستفاده از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر کدهای واقعی با جهش هوشــمند پیشــنهاد می‌شــود.در روش پیشــن هادی کنترل لازم بر روی م قادیر مجموع کروموزوم‌ها صورت می‌گیرد در نتیجه نیازی به استفاده از هزینه جریمه در حل مســئله پخش بار اقتصــادی نخواهد بود. این روش بر روی الگوریتم ژنتیک کلاســیک جهت حل مســائل پخش بار اقتصــادی غیرمحدب پیاده شــده اســت. روش پیشــنهادی قابلیت تعمیم و پیاده سازی بر روی انواع م سائل بهینه سازی را دارد. روش پی شنهادی ضمن کاهش محدوده جستجو، تنها در محدوده منطقی و قابل قبول شروع به اکتشاف هزینه بهینه می‌نماید. برای نشان دادن کارایی و عملکرد روش پیشــن هادی، حل مســئله پخش بار اقتصــادی با انواع قیود ها در سی ستم‌های ۶ ژنراتوره، ۱۵ ژنراتوره و ۴۰ ژنراتوره با ا ستفاده از روش پیشــنهادی صــورت گرفته اســت. نتایج کار با نتایج ســایر الگوریتم‌های پیشــرفته تکنیکی مقایســه شــده اســت که نشــان دهنده برتری روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد.[۲]

در برنامه‌ریزی توان تولیدی ژنراتورهای فعال در سرتاسر یک افق زمانی م شخص ا ست؛ به‌طوری‌که در هر بازه زمانی م شخص، بار مورد تقا ضا تأمین و قیود بهره‌برداری رعایت شــوند. در ســال‌های اخیر، مزارع بادی به دل یل هزی نه پایین تول ید توان (نســبت به دیگر م نابع انرژی تجدیدپذیر) و همچنین، آلایندگی کمتر مورد توجه قرار گرفته اســت و گ سترش زیادی دا شته ا ست. در این مقاله، م سأله پخش بار اقت صادی دینامیکی سیستم قدرت شامل: واحدهای حرارتی و مزارع بادی و با در نظر گرفتن هزینه آلودگی بررســی شــده اســت. به‌منظور حل مســأله بهینه‌ســازی مورد نظر از یک روش ابتکاری کارآمد با نام الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات هم‌تکاملی ا صلاح شده ا ستفاده شده ا ست. همچنین، به‌منظور بهبود عملکرد الگوریتم مورد نظر، اصــلا حاتی از جمله اســتفاده از یک ضــریب اینرســی که به طور خطی در طول شــبیه‌ســازی کاهش می‌یابد بر روی آن اعمال شــده اســت. در نهایت، کارآیی و برتری روش پی شنهادی روی سه سی ستم نمونه IEEE (دو سی ستم بدون م شارکت مزارع بادی و یک سی ستم شامل دو مزرعه بادی) نشان داده شده است[۳] .

در روش بهینه‌ســازی جدیدی تحت عنوان pso-p برای افزایش قابلیت اکتشاف و استخراج پیشنهادشده که دارای یک ماژول آشفتگی نیز برای جلوگیری از همگرایی محلی اســت. روش پیشــنهادی برای پخش بار اقت صادی بهینه مورد ا ستفاده قرار گرفته ا ست. برای واحدهای مختلف قیود موجود در سیستم شامل تلفات سیستم انتقال، تأثیر شیر ورودی بخار، محدودیت توان تولیدی هر واحد و توازن تولید و مصــرف و نیز آلودگی نیروگاه‌ها به عنوان جزئی از تابع هدف در نظر گرفته شده است. عملکرد روش بهینه‌ســازی پیشــنهادی بر روی چهار ســیســتم قدرت مختلف ارزیابی شده که برای سیستم ۱۵ واحدی پخش بار اقتصادی به صورت دینامیکی با توجه به تقاضای بار ۲۴ ساعت صورت گرفته است. برای نشان دادن کارایی روش در سیستم های بزرگ، نتایج سیستم ۸۰ واحدی با روش‌های‌بهینه‌ســازی که در مقالات اخیر پیشــنهاد شــده، مقای سه شده ا ست. نتایج حا صل ن شان می‌دهد که روش بهینه سازی حاصــل عملکرد بســیار خوبی داشــته و برای حل مســئله پخش بار اقتصادی بسیار کارا می‌باشد[۴] .

در مســئله پخش بار اقتصــادی با در نظر گرفتن محدودیت‌های غیر خطی از جمله تلفات شبکه انتقال، اثر شیر بخار بر تابع هزینه تولیدی، توازن تولید و مصرف در سیستم، حدود تولید، به یک مساله بهینه‌سازی تبدیل‌شــده و در نهایت با اســتفاده از الگوریتم جســتجوی کلونی ویروس VCS و در محیط نرم افزاری MATLAB به حل آن پرداخته شده ا ست. نتایج شبیه سازی، کارآیی الگوریتم VCS پی شنهاد شده را برای کیفیت راه حل نشــان می‌دهد. به منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهاد شده، سیستم‌های آزمایشی ۶ و ۱۳ واحده به عنوان مطالعات موردی با توابع هزینه ســوخت افزایشــی اســتفاده شــده‌اند. نتایج شبیه سازی به د ست آمده تو سط این الگوریتم پی شنهادی با نتایج به د ست آمده تو سط دیگر الگوریتم‌های موجود در مقالات مقای سه شده است. بر اساس نتایج عددی، الگوریتم VCS توانایی ارائه‌ی راه حل‌های بهتری را با در نظر گرفتن اثر شــیر بخار نســبت به دیگر روش‌های گزارش شده از نظر هزینه ی سوخت دارد[۵] .

در م سأله پخش بار اقت صادی با در نظر گرفتن محدودیت‌های‌غیرخطی ازجمله تلفات شبکه انتقال، اثر شیربخاربرتابع هزینه‌تولیدی،توازن تولید و مصــرف در ســیســتم، مناطق عملیاتی ممنوع، حدود تولید و نرخ‌های افزایشی و کاهشی (ramp rate) به یک مسأله بهینه‌سازی تبدیل شده

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

و در نهایت با استفاده از الگوریتم سینوس کسینوس (SCA) و در محیط نرم افزاری MATLAB به حل آن پرداخته شده است. به منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهاد شده، سیستم‌های آزمایشی ۶ و ۱۳ واحده به عنوان مطالعات موردی با توابع هزینه سوخت افزایشی استفاده شده‌اند. نتایج شبیه سازی به دست آمده توسط این الگوریتم پیشنهادی با نتایج به دست آمده توسط دیگر الگوریتم‌های موجود در مراجع مقایسه شده است .نتایج عددی، توانایی حل مسأله پخش بار اقتصادی با الگوریتم SCA را نسبت به سایر الگوریتم‌ها نشان می‌دهد[۶] .

در مسئله DEED به‌صورت ترکیبی با برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP) جهت کمینه کردن هم‌زمان هزینه سوخت و آلودگی و مشخص کردن مبلغ تشویقی بهینه مورد برر سی قرار گرفته است .EDRP یکی از انواع برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر تشویق است که در آن به مشترکین مبلغی به‌عنوان تشویق پرداخت می‌شود تا مصرف خود را طی ساعات پیک بار کاهش داده یا به ساعات کم‌باری انتقال دهند. ترکیب مسائل DEED و EDRP یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی پیچیده است که روش‌های معمول قادر به حل آن نیستند. دراین مقاله، مسئله فوق توسط چهار الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر جمعیت حل شده و مدل پیشنهادی روی یک سیستم ده واحدی و برای یک بازه زمانی ۲۴ ساعته پیاده‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل ارائه شده در کاهش هزینه سوخت و آلودگی و بهبود مشخصات منحنی بار بسیار مؤثر است [۷] .

در برای حل مسئله توزیع بار اقتصادی با در نظر گرفتن آلودگی در سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای، الگوریتم بهینه سازی فاخته پیشنهاد شده‌است. در سال‌های اخیر، توزیع بار اقتصادی در سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای، مورد توجه محققین واقع شده‌است، اما در هیچ‌یک از این تحقیقات، به معضل آلودگی ناشی از سوخت‌های فسیلی توجه نشده است. مدل ارائه‌شده در این تحقیق، قید آلودگی را نیز اِعمال نموده است و از این لحاظ مدلی جدید از مسالهٔ مذکور به‌شمار می‌رود. الگوریتم بهینه سازی فاخته، یک الگوریتم جستجوی تکاملی است که در سال های اخیر توسط محققین پیشنهاد و در زمینه های مختلف مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. با این وجود، قابلیت این الگوریتم برای حل مسائل بهره‌برداریِ سیستم‌های قدرت بررسی نشده است. در این مقاله، توانایی الگوریتم بهینه‌سازی فاخته، برای حل مسئله توزیع بار اقتصادی با در نظر گرفتن تابع آلودگی (مدل جدید پیشنهادی) در سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای بررسی شده است. الگوریتم بهینه‌سازی فاخته در مسائل مختلف توزیع بار اقتصادی در چند سیستم‌های تک‌ناحیه‌ای (۶، ۱۰ و۴۰ واحدی) و توزیع بار اقتصادی با در نظرگرفتن تابع آلودگی تحت قیود ایمنی در سیستم تک ناحیه‌ای (۶ واحدی، ۳۰ باسه) اِعمال شده است. در نهایت قابلیت الگوریتم بهینه‌سازی فاخته در حل مسئله توزیع بار اقتصادی در سیستم ۴ واحدی و دو ناحیه‌ای و مسئله توزیع بار اقتصادی با در نظر گرفتن تابع آلودگی در سیستم ۴۰ واحدی و دو ناحیه‌ای با قیود تکمیلی بررسی شده است. مقایسه عملکرد این الگوریتم با دیگر الگوریتم‌های جستجوی تصادفی، توانمندی الگوریتم بهینه‌سازی فاخته را نشان می‌دهد[۸] .

در حل مسئله پخش بار اقتصادی به روش الگوریتم غذایابی باکتری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با مطالعه بر روی ساختار الگوریتم، تغییراتی در روند آن اعمال گردید که منجر به بالا رفتن کارایی (دقت) آن شد. در تعریف مسئله پخش بار اقتصادی توابع هدف مختلف و همچنین محدودیت‌های گوناگون مسئله تعریف و مورد برر سی قرار گرفته شده است. توابع هدف این مسئله شامل تابع هزینه تولید نیروگاه‌ها و همچنین تابع انتشار گازهای آلاینده که هر دوی این توابع باید به کمترین مقدار خود بر سند. این دو تابع هدف از نظر بهینه سازی، توابع متقابلی هستند به این معنی که با کمتر شدن یکی، دیگری افزایش می‌یابد. در طول حل مسئله بهینه‌سازی یا یکی از این اهداف در نظر گرفته می‌شود (تابع تک هدفه، که معمولا تابع هزینه تولید نیروگاه‌ها ست) یا هر دوی این توابع مورد برر سی قرار گرفته می شود، که برای حل مسئله در حالت دوم (چند هدفه) از روش مجموع وزن‌ها استفاده شده است، که این روش یکی از ساده‌ترین روش‌های تبدیل توابع چند هدفه به تک هدفه است. مسئله پخش بار اقتصادی را می‌توان به شکل های مختلفی تعریف کرد به این معنی که هم در انتخاب هدف و هم در انتخاب محدودیت‌ها حق انتخاب‌های مختلفی وجود دارد به عنوان مثال می‌توان تابع هدف را تک هدفه انتخاب کرد و از بین چند محدودیت، تعدادی را انتخاب کرد. این شیوه‌ی تعریف مسئله پخش بار اقتصادی باعث می‌شود که بتوان مسائل پخش بار اقتصادی را به شیوه‌های گوناگونی تعریف کرد و ما شاهد مقالات بسیار زیادی (با الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف) در این زمینه هستیم ، ابعادی از مسئله پخش بار اقتصادی انتخاب شده و با استفاده از الگوریتم غذایابی باکتری بهبود یافته پیشنهادی، این مسئله حل شده است و سپس با سایر روش‌های ارائه شده (الگوریتم‌های تکاملی) مقایسه گردیده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که الگوریتم بهبود یافته پیشنهادی کارایی بهتری نسبت به الگوریتم غذایابی باکتری مرسوم دارد و همچنین نسبت به سایر روش‌هایی ارائه شده در مقالات

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

که تاکنون بر روی مسئله مورد نظر اعمال شده‌اند نیز جواب دقیق‌تری را ارائه می‌کند [۹] .

الگوریتم‌های کلاسیک مانند برنامه ریزی درجه دوم (QP)[۱۰] ، برنامه ریزی پویا (DP) [۱۱] و رویکرد لاگرانژی[۱۲] این الگوریتم‌ها را برای گیرکردن در بهینه محلی استفاده می‌کنند.در[۱۳] یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر زندگی اجتماعی شیرها (LOA) معرفی کردند که بر اساس سبک زندگی شیرها و ویژگی‌های همکاری آن‌ها است در [۱۴] یک الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری نهنگ (WOA) معرفی کردند، که از رفتار اجتماعی نهنگ‌های عنبر الهام گرفته شده ارائه شده‌اند. در [۱۵] الگوریتم بهینه سازی موج آب (WWO) که از نظریه موج آب کم عمق الهام گرفته شده است را ارائه داد. در[۱۶] الگوریتم ژنتیک (GP). در [۱۷] الگوریتم های جهش قورباغه را می توان به عنوان طراحی الگوریتم عامل هوشمند با در نظر گرفتن رفتار جمعی‌حشرات یا حیوانات تعریف کرد. چندین تکنیک مبتنی براین الگوریتم توسعه یافته است که یکی از آن ها شامل بهینه‌سازی الگوریتم کلونی زنبور عسل [۱۸] است.

قابلیت اطمینان سیستم قدرت به وسیله ایجاد کردن تعادل بین بار و تولید، می‌باشد.در این مسئله مقدار تولید بهینه اقتصادی هر یک از واحدهای تولید مشخص می شود. از آنجا که مشکلات زیست‌محیطی امروزه اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند و قوانین متعددی برای کم‌کردن این مشکلات وضع شده به همین منظور امروزه مسئله انتشار آلاینده‌ها در پخش بار اقتصادی نیز مدنظر قرار می‌گیرد. لذا ارائه الگوریتمی جدید برای حل این‌گونه مسائل به منظور دقت در پیدا کردن جواب و افزایش سرعت پیدا کردن جواب هدف ما از این تحقیق می‌باشد لذا اهداف اصلی ما به صورت زیر ارائه می‌شود:

- فرمول بندی و حل مسئله بهینه سازی پخش بار اقتصادی توام با پخش آلودگی ناشی از انتشار گاز در نیروگاه‌های سوخت فسیلی با روش جستجو و نجات.
- از آنجا که در عمل تابع هزینه یک نیروگاه سوخت فسیلی صاف نبوده و دارای نقاط زانویی شکل سوار بر منحنی سوم می‌با شد، لذا پخش بار اقتصادی / آلودگی با محدودیت‌های عملی بررسی خواهد شد.
- با توجه به اینکه بارپایه شبکه کشوری توسط نیروگاه‌های سوخت فسیلی وحرارتی تامین می‌شود و این نیروگاه‌ها اثرات مخربی بر محیط زیست دارند لذا انجام پخش بار توام اقتصادی/آلودگی ضروری است .

اقتصاد بهره‌برداری تولید، انتقال و توزیع توان به دو بخش تقسیم می شود. یک بخش در مورد حداقل نمودن هزینه تولید بحث می‌کند که پخش بار اقتصادی نام دارد. بخش دیگر در مورد حداقل نمودن تلفات توان تحویلی به مصرف‌کننده بحث می‌کند. در سال‌های اخیر بخش دیگری به این بخش‌ها اضافه شده که بخش آلودگی نام دارد. در کل اقتصاد بهره‌برداری در مورد حداقل هزینه تولید، حداقل تولید آلایندگی نیروگاه‌ها و حداقل نمودن تلفات خط انتقال بحث خواهد کرد. پخش بار اقتصادی یکی از روش‌های بهره برداری از سیستم‌های قدرت به منظور افزایش بازدهی، کاهش هزینه‌ها است [۱۹].

۲- پخش بار اقتصادی

یکی از مهمترین مسائل در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت مسئله پخش بار اقتصادی می‌باشد. هدف از این مسئله‌حداقل نمودن تابع هزینه سوخت به ازای تولید مقدار خاصی از توان تولیدی می‌باشد. پخش بار به گونه‌ای انجام شود که سایر محدودیت‌های‌حاکم بر میزان تولیدرا برآورده سازد. با بزرگ‌ترشدن سیستم‌های قدرت پخش بار اقتصادی نیز پیچیده‌تر می‌شود. در نتیجه به دلیل وجود نقاط بهینه محلی یافتن پخش بار بهینه عمومی مشکل‌تر می‌شود. برای حل یک مسئله بهینه سازی پخش بار اقتصادی روش‌های زیادی وجود دارد ولی گاهی به دلیل پیچیدگی تابع هزینه و وجود محدودیت‌ها زیاد رسیدن به نقطه بهینه واقعی مشکل می‌شود. یکی از محدودیت‌های عملی مسئله پخش بار اقتصادی در نظر گرفتن فرم واقعی تابع هزینه سوخت می‌باشد. ساده‌ترین مدل از نظر استاندارد ISO برای پخش بار اقتصادی یک تابع درجه دوم می‌باشد [۲۰].

در بعضی از مقالات برای رسیدن به یک جواب دقیق و بهتر تابع هزینه سوخت را توابع درجه سوم در نظرمی‌گیرند[۲۱]. در این مقاله مدل کردن تابع هزینه سوخت را با توابع درجه دوم و توابع درجه سوم را توابع صاف تعریف می‌کنیم. ولی در واقعیت تابع هزینه یک واحد نیروگاهی یک تابع صاف نمی‌باشد بلکه دارای ماکزیمم و مینیمم‌های محلی‌روی این توابع می‌باشد. که معمولاً در این نقاط تابع هزینه مشتق پذیر نمی‌باشد. برای نمایش این خاصیت می‌توان تابع هزینه درجه دوم و قسمت دوم تابع هزینه قدر مطلق یک تابع سینوسی می‌با شد. این روش نمایش تابع هزینه در بعضی از مقالات مورد بررسی‌قرار گرفته است که به این توابع ناصاف می‌گویند[۲۲].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

۲-۲- مدل کردن توابع هزینه سوخت برای تولید توان نیروگاه در مسئله پخش بار اقتصادی

در حقیقت تابع هزینه سوخت برای تولید توان در یک نیروگاه به صورت مدل‌های توابع صاف و ناصاف در نظر گرفته می‌شود. بدین منظور هزینه سوخت مصرفی برای تولید Pi در نیروگاه iام به‌وسیله Fi مشخص می‌شود. از طرفی نرخ هزینه کل سیستم مساوی مجموع نرخ هزینه‌های واحدها می‌باشد.

۲-۲-۱- مدل توابع هزینه صاف جهت پخش بار اقتصادی

۲-۲-۱-۱- مدل توابع هزینه سوخت نیروگاه با توابع درجه دوم

$$\text{minimize } Fcost = \sum_{i=1}^{n} (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2) \qquad (۱)$$

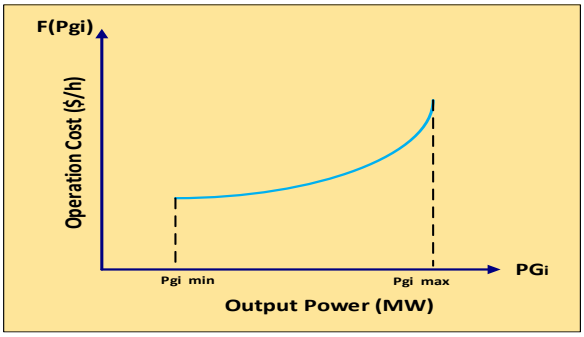
$$Fcost = F_1 + F_2 + \cdots \ldots \ldots + F_n \qquad (۲)$$

Fcost : هزینه سوخت کل نیروگاه‌ها

a_i, b_i, c_i : ضرایب هزینه سوخت واحد نیروگاه iام

n: تعداد نیروگاه‌ها سوخت فسیلی

در شکل(۱) مدل توابع هزینه سوخت نیروگاه‌ها با توابع صاف درجه دوم را نشان می‌دهد.



شکل (۱): مدل توابع هزینه سوخت نیروگاه با توابع صاف درجه دوم[۳]

۲-۲-۱-۲- مدل توابع هزینه سوخت نیروگاه با توابع درجه سوم

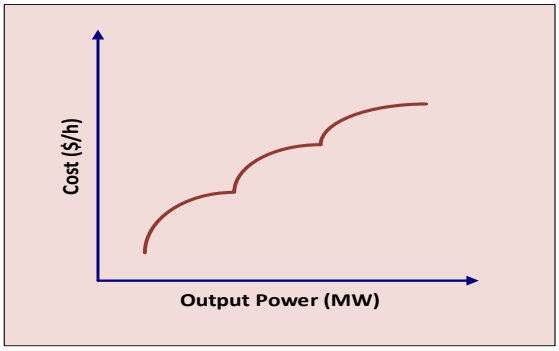
$$\text{minimize } Fcost = \sum_{i=1}^{n} (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + d_i P_i^3) \qquad (۳)$$

$$Fcos = F_1 + F_2 + \cdots \ldots \ldots . F_n \qquad (۴)$$

۲-۲-۲- مدل توابع هزینه ناصاف جهت پخش بار اقتصادی

$$minimize\ Fcost = \sum_{i=1}^{n} a_i + b_i P_i + |e_i \times \sin(fi\ (P_{imin}) - P_i)| \qquad (۵)$$

در شکل(۲) مدل توابع هزینه سوخت نیروگاه‌ها با توابع ناصاف را نشان می‌دهد.



شکل (۲): مدل توابع هزینه سوخت نیروگاه با توابع ناصاف [۳]

۲-۳- قیود مسئله

جهت افزایش دقت در حل مسئله پخش بار اقتصادی باید قیود مسئله را لحاظ نمود.

۲-۳-۱- شرط برابری تولید و مصرف با در نظر گرفتن تلفات

شبکه انتقال دارای n واحد تولیدی را در نظر بگیرید که نیروگاه‌های آن به‌وسیله خطوط انتقال به همدیگر متصل و مصرف کننده را تغذیه می‌کنند. همان گونه که می‌دانید این خطوط انتقال دارای تلفات هستند اگر تلفات حاصل از انتقال توان در سیستم در نظر گرفته نشود حل مسئله پخش بار اقتصادی با مساوی قرار دادن مجموع میزان تولید نیروگاه‌ها با مقدار بار مصرفی شبکه صورت می‌گیرد که این فرض خلاف واقعیت است. پس به منظور در نظر گرفتن شرایط واقعی در سیستم قدرت باید میزان تلفات انتقال توان را نیز در مسئله وارد نمود در این صورت توان نیروگاه‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sum_{i=1}^{n} P_i = P_d + P_L \qquad (۶)$$

که مقدار P_L از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_L = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} P_i . B_{ij} . P_j + \sum_{i=1}^{n} B_{oi} . P_i + B_{oo} \qquad (۷)$$

B_{oo} و B_{oi} و B_{ij}:ضرایب تابع تلفات خطوط انتقال

P_d : توان مصرفی سیستم

P_L: توان تلفاتی خطوط انتقال

۲-۳-۲- محدودیت تولید ژنراتورها

این محدودیت‌ها به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$P_{i.min} \le P_i \le P_{i.max} \qquad (۸)$$

$P_{i.min}$: حداقل مجاز تولید توان در نیروگاه iام

$P_{i.max}$: حداکثر مجاز تولید توان در نیروگاه iام

۲-۳-۲-۱-اعمال نرخ شیب نیروگاه‌ها

در شرایط واقعی مشاهده شده است که تغییرات تولید در هر ساعت نسبت به ساعت قبل دارای محدودیت می‌باشد. در این صورت محدودیت حداکثر افزایش و یا حداقل تولید در سیستم موجود می‌آید. با در نظر

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

گرفتن این محدودیت‌ها شرایط مسئله به شرایط واقعی نزدیک‌تر می‌شود این شرایط را با معادلات زیر می‌توان مشاهده کرد.

$$P_{im-}P_{i(m-1)} \le UR_i \qquad i \in n \, , m \in M \qquad (۹)$$

$$P_{i(m-1)} - P_{im} \le DR_i \qquad i \in n \, , m \in M \qquad (۱۰)$$

UR_i: حداکثر افزایش تولید نسبت به ساعت قبل نیروگاه iام

DR_i: حداکثر مقدار کاهش تولید نسبت به تولید ساعت قبل نیروگاه iام

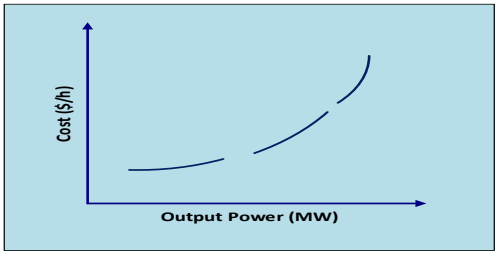
M: تعداد ساعت شبانه روز

n: تعداد نیروگاه‌ها

m : ساعتی از شبانه روز

شرط استفاده از روابط (۹) و (۱۰) استفاده هم زمان از محدودیت‌ها سایر قیود می‌باشد.

در شکل (۳) مدل توابع هزینه سوخت نیروگاه‌ها با توابع صاف با اعمال نرخ شیب نیروگاه‌ها را نشان می‌دهد



شکل (۳): توابع هزینه سوخت نیروگاه‌ها با توابع صاف با اعمال نرخ شیب نیروگاه‌ها [۳]

۳- پخش بار آلودگی در سیستم‌های قدرت

یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی بشر در دهه آینده به طور قطع کاهش آلودگی هوا خواهد بود. تولید انرژی الکتریکی ناشی از سوخت‌های فسیلی، چندین ماده مختلف مثل دی اکسید گوگرد، اکسید نیتروژن و دی اکسید کربن را در هوا پخش می‌کند[۲۳]. هوای آلوده نه تنها تأثیرات منفی روی زندگی انسان‌ها بلکه روی زندگی حیوانات، پرندگان و ماهی‌ها و درختان دارد. در این حالت باعث آسیب‌های جهانی کاهش میدان دید، و در کل باعث گرم شدن زمین خواهد شد. با توجه به اهمیت محیط زیست و داشتن هوای پاک از یک طرف و افزایش مصرف انرژی ما را مجبور به تولید ارزان برق و کاهش آلودگی خواهد کرد. دو نمونه از مهم‌ترین این ترکیبات که در اثر نیروگاه‌های قدرت تولید می‌شوند، اکسید نیتروژن NO_X و دی اکسید گوگرد SO_2 می‌باشند. گوگرد به عنوان یک بخش از سوخت وارد دیگ بخار (بویلر) شده و این گوگرد با اکسیژن به میزان معینی ترکیب می‌شود و SO_2 را تشکیل می‌دهد. باقیمانده گوگرد به عنوان خاکستر در موارد ناشی از احتراق ماده سوختنی در بویلر قرار می‌گیرد. ابتدایی‌ترین راه برای از بین بردن آن، استفاده از دودکش‌های مخصوص است که تحت اثر فیلترهای مخصوص قرار می‌گیرند که بدین ترتیب از انتشار SO_2 تا حدی در هوا جلوگیری می‌شود. اما امروزه با روش‌های جدید نظیر استفاده از ترکیب سوخت، سوئیچ سوخت، پاک کننده مالشی می‌توان به میزان زیاد از انتشار SO_2 در هوا جلوگیری کرد. با بررسی میزان آلوده کننده‌ها، NO_X و SO_Xخروجی از نیروگاه‌ها مشاهده شده است که عوامل زیادی بر روی نرخ آلاینده خروجی نیروگاه‌ها تأثیر دارد که مهم‌ترین آن‌ها توان اکتیو تولیدی نیروگاه‌ها می‌باشد. از طرف دیگر با بررسی رابطه بین میزان آلودگی منتشره و توان اکتیو تولیدی مشاهده می‌شود که این رابطه، یک رابطه غیرخطی می‌باشد. ساده‌ترین مدل آلودگی از نظر استاندارد ISO برای پخش بار آلودگی یک تابع درجه دوم می‌باشد. اما در بعضی از مقالات جهت رسیدن به یک جواب دقیق‌تر تابع هزینه آلایندگی یک نیروگاه را مجموع یک تابع درجه دوم و یک تابع نمایی بر حسب توان اکتیو تولیدی فرض می‌کند. هدف کل از مسئله پخش بار آلودگی، کاهش میزان آلایندگی خروجی نیروگاه‌ها می‌باشد. بنابراین در حال حاضر داشتن هوای پاک مستلزم بهبود و اصلاح در کاهش گازهای تولیدی از نیروگاه‌های حرارتی از جمله ترکیبات SO_X و ترکیبات NO_X می‌باشد. راه حل‌های زیادی تا به حال ارائه شده است. چندین راه حل جهت کاهش آلودگی محیط زیست در این زمینه پیشنهاد و مطرح شده است. از جمله نصب تجهیزات تمیز کننده آلودگی، سوئیچینگ در سوخت جهت کاهش انتشار آلودگی، بکار بردن سیستم‌های فتوولتائیک و پخش بار آلودگی می‌باشد. سه روش اول نیازمند تجهیزات جدید و اصلاح سیستم موجود است که این اهداف در طولانی مدت عملی خواهد بود. به طوری که در یک دوره کوتاه مدت پیشنهاد پخش بار اقتصادی/آلودگی جهت کاهش آلودگی محیط و کاهش هزینه سوخت توان اکتیو تولیدی نیروگاه‌ها جالب توجه می‌باشد[۲۴].

۴- مدل کردن توابع هزینه سوخت نیروگاه‌ها در مسئله پخش بار آلودگی

در حقیقت تابع هزینه سوخت در پخش بار آلودگی به صورت مدل‌های توابع صاف و توابع ناصاف در نظر گرفته می‌شود.

۴-۱- مدل توابع هزینه صاف، جهت پخش بار آلودگی

$$\text{minimize Ecost} = \sum_{i=1}^{n}(\alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2) \qquad (۱۱)$$

$$E_{cost} = E_1 + E_2 + \cdots E_n \qquad (۱۲)$$

E_{cost} : میزان آلودگی کل نیروگاه‌ها

γ_iو β_i و $\propto_i$: ضرایب آلودگی ژنراتورها

n : تعداد نیروگاه‌ها سوخت فسیلی

۴-۲- مدل توابع هزینه ناصاف برای پخش بار آلودگی

$$\text{minimize Ecost} = \sum_{i=1}^{n}(\alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 + \delta_i e^{\lambda_i P_i}) \qquad (۱۳)$$

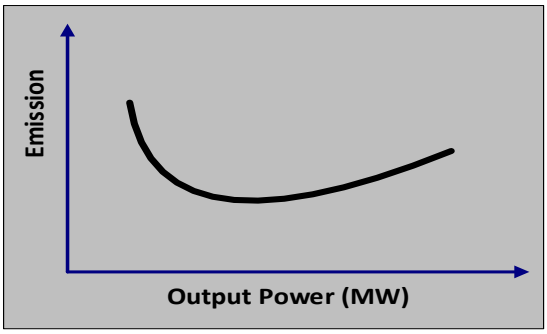
E_{cost} : میزان آلودگی کل نیروگاه‌ها

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, c_i, \lambda_i$: ضرایب آلودگی نیروگاه‌ها

n : تعداد نیروگاه‌ها سوخت فسیلی

در شکل (۴) مدل توابع هزینه آلایندگی نیروگاه‌ها با توابع ناصاف را نشان می‌دهد.



شکل(۴): مدل توابع هزینه آلایندگی نیروگاه‌ها با توابع ناصاف [۳]

۳-۴- پخش بار اقتصادی/آلودگی

مسئله پخش بار اقتصادی (ELD) و مسئله پخش بار آلودگی (EED) برای بهینه کردن هزینه سوخت و کاهش آلودگی نیروگاه‌ها به‌صورت هم‌زمان در این مقاله بکار رفته است.

۱-۳-۴-مسائل پخش بار اقتصادی و پخش بار آلودگی

مسائل پخش بار اقتصادی و پخش بار آلودگی به صورت جداگانه امکان پذیر می‌باشد. از طرفی معمولا پخش بار اقتصادی میزان هزینه سوخت را کاهش می‌دهد ولی در عوض میزان آلایندگی افزایش می‌یابد. برخلاف این موضوع پخش بار بر اساس آلودگی باعث کاهش آلایندگی می‌شود ولی با رسیدن به این هدف، هزینه سوخت افزایش می‌یابد، با در نظر گرفتن این تأثیرات باید در یک نقطه کار معلوم مابین دو روش مذکور مصالحه‌ای انجام داد و هر دو روش را تواما استفاده نمود در این صورت تابع هدف بهینه‌سازی به صورت زیر تغییر می‌نماید:

$$\min(F_{Cost}, E_{Cost}) \qquad (۱۴)$$

رابطه (۱۴) یک واسطه کلی است که برای استفاده عملی از این رابطه می‌توان آن را به روش‌های مختلفی انجام داد اغلب توابع مسائل بهینه‌سازی به صورت هم زمان و چند منظوره بکار می‌روند این توابع معمولا نسبت به هم نامتناسب و ناسازگار هستند بهینه‌سازی توابع چند منظوره و ناسازگار نسبت به هم، جهت راه حل بهینه مسئله، با هم رقابت می‌کند و در عوض یک راه حل بهینه وجود دارد که نسبت به راه حل‌های دیگر، توابع را نسبت به هم ارتباط می‌دهد. این راه حل بهینه و مشهور، به نام راه حل بهینه پارتو POF نامیده می‌شود. در این فصل روش‌های مختلفی جهت حل مسئله بهینه‌سازی توابع ناسازگار ارائه می‌شود [۲۵].

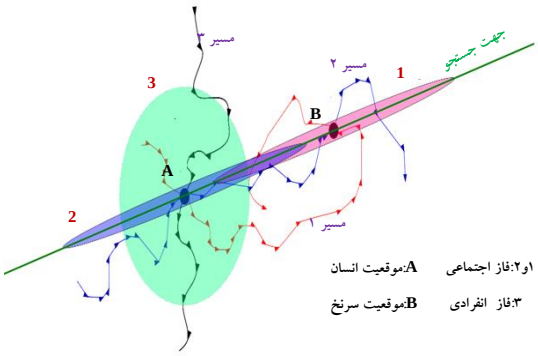
۵- الگوریتم بهینه‌سازی جستجو و نجات

در طبیعت، بسیاری از موجودات به صورت اجتماعی زندگی می‌کنند و به دنبال اهداف مختلفی مانند شکار و یافتن منابع غذایی به صورت گروهی هستند. آن‌ها از استراتژی‌های مختلفی برای جستجو استفاده می‌کنند. به همین ترتیب، انسان‌ها به عنوان گروه‌ها به دنبال اهداف مختلفی هستند.به عنوان مثال، آن‌ها به دنبال شکار، یافتن منابع غذایی یا افراد گمشده می‌گردند. یکی از انواع اکتشافات گروهی، عملیات جستجو و نجات است جستجو یک عملیات سیستماتیک با استفاده از پرسنل و امکانات موجود برای مکان‌یابی افراد در مضیقه است. نجات عملیاتی است برای بازیابی افراد در مضیقه و تحویل آن‌ها به مکانی امن. گاهی اوقات عملیات جستجو و نجات برای یافتن افراد خاصی که گم شده‌اند انجام می‌شود. جستجوی انسان به صورت گروهی متشکل از اعضای گروه است و هر یک از این گروه‌های جستجوگر شیوه‌های خود را سازماندهی می‌کنند تا برای عملیات مربوطه خود آماده شوند انسان‌ها (اعضای گروه) می‌توانند بر اساس آموزش‌های دریافت شده،سرنخ‌ها و ردپای افراد گمشده را شناسایی کنند. سرنخ‌های یافت شده اهمیت متفاوتی دارند و اطلاعات متفاوتی در مورد افراد گمشده ارائه می‌دهند. به عنوان مثال، برخی از سرنخ‌ها احتمال حضور افراد گمشده را در آن مکان نشان می‌دهد. هر یک از اعضای گروه سرنخ‌ها را بر اساس آموزش خود ارزیابی می‌کند و این اطلاعات سرنخ‌های یافت شده را از طریق تجهیزات ارتباطی به سایر اعضا تحویل می‌دهد. در نهایت بر اساس درجه اهمیت این سرنخ‌ها و اطلاعاتی که می‌توان از آن‌ها به‌دست آورد جستجو می‌کنند. اعضای گروه عموماً سرنخ‌های یافت شده را جستجو می‌کنند یا آن‌ها را به یکدیگر متصل می‌کنند و در آن جهت‌ها جستجو می‌کنند بنابراین روند جستجوهای انسانی در عملیات جستجو و نجات را می‌توان به دو مرحله فردی و اجتماعی تقسیم کرد. در مرحله جستجوی فردی، جستجو بدون توجه به موقعیت و اهمیت سرنخ هایی که توسط دیگران یافت می‌شود انجام می‌شود.در مرحله اجتماعی،اعضای گروه بر اساس موقعیت سرنخ‌های یافت‌شده و اهمیت آن‌ها در مناطقی که احتمالاً سرنخ‌های مهم‌تری به دست می‌آورند، جستجو می کنند. دو نوع سرنخ وجود دارد:

۱. سرنخ نگه داشته شده: یکی از اعضای گروه در آنجا حضور دارد و اطراف آن را جستجو می‌کند.

۲. سرنخ‌رها شده: عضو گروهی که سرنخ را پیدا کرده است آن را برای یافتن سرنخ‌های مهم‌تری رها کرده است، اما اطلاعات این سرنخ برای دیگران در دسترس است[۲۶].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]



شکل (۵): دو نوع رفتار انسانی در امر جستجو ونجات[۲۶]

۱-۵- الگوریتم بهینه‌سازی جستجو و نجات پیشنهادی

در این بخش، مدل ریاضی الگوریتم پیشنهادی برای حل «مسئله بهینه سازی» تو ضیح داده شده ا ست. در این مدل، موقعیت ا نسان با حل مسئله بهینه‌سازی مطابقت دارد و اهمیت سرنخ یافت شده در این موقعیت، تناسب این راه حل را نشان می‌دهد. راه حل بهتر نشان دهنده سرنخ مهم‌تری است و بالعکس [۲۶].

۱-۱-۵-حل مسئله اقتصادی/آلودگی مورد نظر با الگوریتم جستجو و نجات

برای حل یک مسئله از اقتصادی و آلودگی بر اساس حرارت و توان (CHPED)، هدف ما بهینه‌سازی توان و گرمای واحدها به منظور مینیمم‌سازی هزینه عملیاتی است. لذا لازم است تا تقاضای حرارت و توان نیز در نظر گرفته شود . با در نظر گرفتن این اهداف تابع هدف اصلی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$C = F_P + F_{(P,H)} + F_H \qquad (۱۵)$$

که F_P هزینه تولید برای واحدهای گرمایی، $F_{(P,H)}$ هزینه تولید برای کمپانی‌ها و F_H هزینه تولید برای واحدهای حرارتی است.که این سه تابع به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$F_P = \sum_{i=1}^{n} \Big(a_i G_i^2 + b_i G_i + \big| g_i \times \sin\big(h_i \times (G_i^{min} - G_i)\big)\big| \Big) \qquad (۱۶)$$

که G_i توان اکتیو تولید شده توسط واحد تولیدی iام می‌باشد و بقیه ضرایب در ابتدای فصل توصیف شدند. تابع هدف $F_{(P,H)}$ طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود :

$$F_{(P,H)} = \sum_{i=1}^{m} (a_i G_i^2 + b_i G_i + c_i + d_i H_i^2 + e_i H_i + f_i H_i P_i) \qquad (۱۷)$$

که P_i و H_i توان و حرارت تولیدی کمپانی iام هست .و تابع هدف F_H را از رابطه زیر محاسبه می‌کنیم:

$$F_P = \sum_{i=1}^{n} (a_i H_i^2 + b_i H_i + c_i) \qquad (۱۸)$$

که H_i حرارت تولیدی واحد حرارتی iام هست.

❖ قیود مسئله:

❖ محدودیت ظرفیت :

بسیار حائز اهمیت است که همه واحدهای تولیدی ترکیبی، کمپانی و حرارتی در یک محدوده تعریف شده تولید توان داشته باشند:

$$P_i^{min} \le P_i \le P_i^{max} \qquad (۱۹)$$

$$H_i^{min} \le H_i \le H_i^{max} \qquad (۲۰)$$

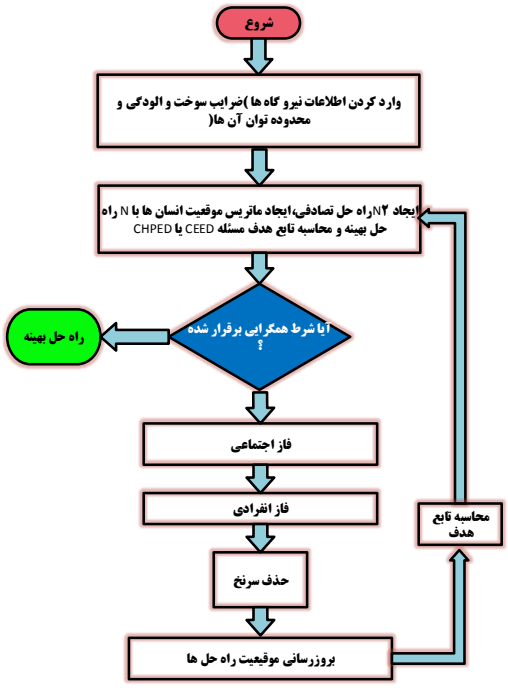
❖ قید تعادل حرارت و توان :

میزان‌توان تولیدی کمپانی‌ها و تولید کننده‌های ترکیبی و حرارت تولیدی واحد های حرارتی باید با میزان توان و حرارت تقاضا شده برابر باشد که به صورت ریاضی آن را می‌توان به صورت زیر نشان داد :

$$\sum_{i=1}^{n}(H_i) + \sum_{i=1}^{m}(H_i) = H_D \qquad (۲۱)$$

$$\sum_{i=1}^{n}(P_i) + \sum_{i=1}^{m}(P_i) = P_D \qquad (۲۲)$$

فلوچارت حل مسئله پیشنهادی با الگوریتم جستجو و نجات در شکل(۶) ارائه شده است.



شکل (۶): فلوچارت حل مسئله پیشنهادی [۲۶]

۶- نتایج شبیه سازی

۱-۶- شبیه سازی روی شبکه‌های مختلف

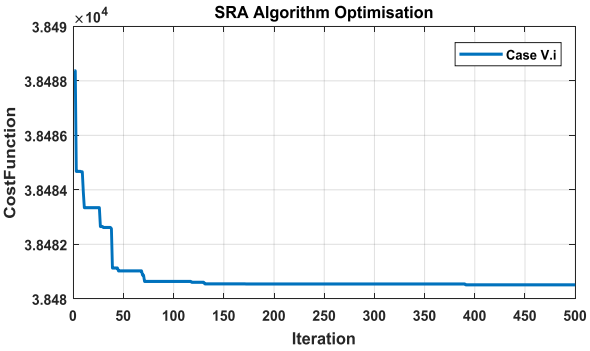
در این بخش، شبیه سازی‌ها را روی شبکه‌های۵ باسه شامل سه واحد نیروگاهی و اطلاعات مندرج در جدول (۱) و سپس شبکه ۱۰ واحده با

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

اطلاعات وارد شده در جدول (۲) و در حالت سوم روی شبکه ۳۰ باسه با ۶ واحد تولیدی که اطلاعات مربوط به هزینه سوخت و آلودگی این شبکه در جدول (۳) ارائه شده است که اطلاعات آن‌ها از مرجع [۲۵] استخراج شده است انجام می‌دهیم .طبق جدول (۴) با بهره‌گیری از نرم‌افزار MATLAB، یک برنامه کامپیوتری جهت حل مسئله پخش بار اقتصادی/آلودگی CEED در چندین سناریو توسط الگوریتم جستجو و نجات پیشنهادی تهیه شده است که محدودیت‌های تولید نیروگاه‌ها و تلفات شبکه انتقال لحاظ شده‌اند. هر سناریو ۱۵ مرتبه با ۵۰۰ تکرار و ۱۵۰ واحد جمعیت اولیه شبیه سازی شده‌اند. نتایج شبیه سازی در جدول (۵) ارائه شده است که همه روش‌ها به غیر از الگوریتم جستجو و نجات از مرجع [۲۶] استخراج شده‌اند.

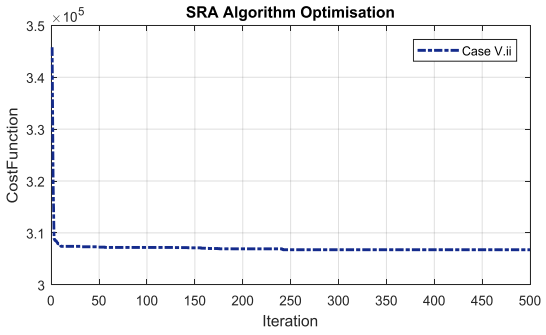
۲-۶- شبیه سازی چند سیستم با تابع هدف CEED

برای تجزیه و تحلیل روش پیشنهادی با دیگر روش‌ها ، برخی از نتایج موجود از تکنیک‌های شناخته شده مانند : الگوریتم ژنتیک[۱۶]، الگوریتم جهش قورباغه ای [۱۷] ،الگوریتم گرده افشانی گلها [۱۸]، نیز که از مرجع [۲۶]، استخراج شده‌اند.در جدول (۵) ارائه شده‌اند. مشاهده می شود که تکنیک‌های پیشنهادی بهتر از تکنیک‌های موجود عمل می‌کند.

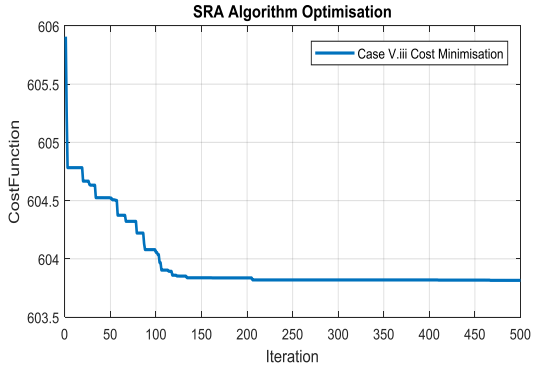


شکل (۷): رفتار همگرایی تابع هدف برای حالت (V.i) سیستم ۳ واحده

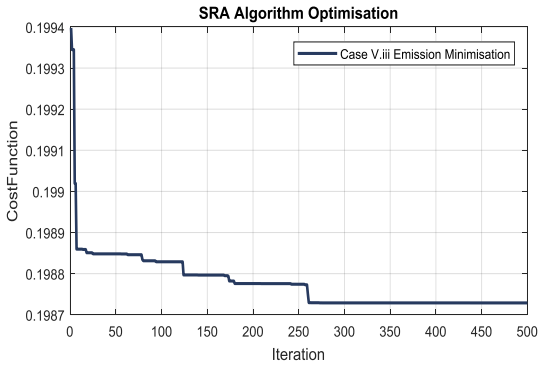
با مقایسه تکنیک‌های ذکر شده در بالا، مشاهده می‌شود که SRA پیشنهادی کمترین نرخ انتشار آلایندگی را ارائه می‌دهد در حالی که LFA بهترین هزینه سوخت را ارائه می‌دهد. نمودار رفتار همگرایی هدف در شکل (۷و ۸ و ۹ و ۱۰) **را** مشاهده می‌کنید.



شکل (۸):رفتار همگرایی تابع هدف برای حالت(V.ii) سیستم ۱۰واحده



شکل (۹): نمودار همگرایی هزینه برای حالت(V.III) مینیمم سازی هزینه سیستم ۶ واحده(۱)



شکل (۱۰): نمودار همگرایی هزینه برای حالت(V.III)مینیمم سازی آلودگی سیستم ۶ واحده(۲)

در چند دهه‌گذشته، واحدهای‌ترکیبی‌حرارت و نیرو توجه محققان را به خود جلب کرده‌است. این واحدها در زمینه صرفه جویی در انرژی و حفاظت از محیط زیست،بسیار محبوب هستند،زیرا راندمان‌این واحدها می‌تواند تا ۹۰ درصد افزایش یابد الگوریتم بهینه سازی ازدحام جوجه [۲۷] و الگوریتم شناخت اجتماعی[۲۸]. آن‌ها به اندازه کافی قادر به کاهش نرخ انتشار آلایندگی هستند که می‌تواند بین ۱۳٪ تا ۱۸٪ متغیر باشد. بر خلاف یک برنامه پخش بار اقتصادی یا یک برنامه CEED، هدف در حل برنامه یکسان است، یعنی واحدها را برای برآورده کردن تقاضای مورد نیاز راه اندازی شوند و در عین حال همه محدودیت‌ها باید برآورده شوند. اما پیچیدگی این سیستم‌ها زیاد است زیرا محدودیت‌های بیشتری باید مدیریت شود. در الگوریتم ژنتیک رمز گذاری شده [۲۹] و الگوریتم برنامه ریزی واحدهای تولیدی، ترکیبی [۳۰] ارائه شده است. تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که تکنیک SRA پیشنهادی واحدها را به طور مؤثرتری برنامه ریزی می‌کند و بنابراین بهترین نتایج را در مقایسه با تکنیک‌های موجود در جداول (۶و۷و۸و۹) ارائه می‌دهد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

جدول (۱): ضرایب توابع هزینه سوخت و آلودگی سیستم ۳ واحده [۲۵]

Unit	γ_i	β_i	α_i	P_{imin}	P_{imax}	a_i	b_i	C_i
1	0.12951	40.5407	1000.403	10	55	0.04702	_3.9864	360.0012
2	0.10908	39.5804	950.606	20	80	0.04652	_3.9524	350.0056
3	0.12511	36.5104	900.705	47	120	0.04652 _	3.9023	330.0056
4	0.12111	39.5104	800.705	20	130	0.04652 _	3.9023	330.0056
5	0.15247	38.539 99	756.7	50	160	0.0042	0.3277	13.8593
6	0.10587	46.1592	451.325	70	240	0.0042	0.3277	13.8593
7	0.03546	38.3055	1243.531	60	300	0.0068	_0.5455	40.2669
8	0.02803	40.3965	1049.998	70	340	0.0068	_0.5455	40.2669
9	0.02111	36.3278	1658.569	135	470	0.0046	_0.5112	42.8955
10	0.01799	38.2704	1356.659	150	470	0.0046	_0.5112	42.8955

جدول (۲): ضرایب توابع هزینه سوخت و آلودگی سیستم ۱۰ واحده [۲۵]

Unit	a_i	b_i	C_i	α_i	β_i	γ_i	P_{imin}	P_{imax}
1	0.03546	38.30553	1243.5311	0.00683	_0.54551	40.26690	35	**210**
2	0.02111	36.32782	1658.5696	0.00461	_0.51160	42.89553	130	**325**
3	0.01799	38.27041	1356.6592	0.00461	_0.51160	42.89553	125	**315**

جدول (۳): ضرایب توابع هزینه سوخت و آلودگی سیستم ۶ واحده [۲۵]

Unit	a_i	b_i	C_i	α_i	β_i	P_{imin}	P_{imax}
1	0.01	2	10	0.004091	_0.5554	5	50
2	0.012	1.5	10	0.002543	_0.6047	5	60
3	0.004	1.8	20	0.004258	_0.5094	5	100
4	0.006	1	10	0.005426	_0.355	5	120
5	0.004	1.8	20	0.004258	_0.5094	5	100
6	0.01	1.5	10	0.006131	_0.5555	5	60

جدول (۴): حالت‌های مختلف حل مسئله پخش بار اقتصادی/آلودگی

ردیف	مسئله	سیستم	تعداد واحدها	توان تقاضا شده	حرارت تقاضا شده	تلفات
1	CEED	V.i [17]	3	500	-	?
2		V.ii [18]	10	2000	-	?
3		V.iii [19]	6	2834	-	?

جدول (۵): مقایسه نتایج شبیه سازی برای همه حالات به صورت خلاصه

سیستم	روش	بهترین	بدترین	متوسط	استاندارد
حالت ۱,۱ (V.i)	KKO[20]	39199.7	39200	39199.77	0.121106
	PSO[20]	39210.20	39261	39229.02	23.29
	FPA[20]	39210.15	39244.9	39216.49	15.48465
	SRA	39168.54	39197.6	39178	1.54
حالت ۲,۱ (V.ii)	KKO[20]	311995	322464	322218.8	177.5696
	FPA[20]	321927	322604	322201	356.4
	LFA[20]	320914	322087	321278.66	701.15
	SRA	313776	319876	316936	435.43
حالت ۳,۱ (V.III)	KKO[20]	605.68	610.364	606.8468	2.106488
	MHBA[20]	607.3897	607.5692	607.4492	–
	SRA	604.65	609.43	605.55	1.76

جدول (۶): نتایج و مقایسه به دست آمده برای حالت V.i سیستم ۳ واحده

روش	G1	G2	G3	C	Fc	FE	LP
FA	128.8249	192.5856	190.2825	39209.93	–	311.15	11.6936
BA	128.8280	192.5792	190.2858	39209.94	–	311.15	11.6936
HYB	128.8343	192.5670	190.2918	39209.96	-	311.15	11.6936
GA	128.997	192.683	190.11	39220	-	311.27	11.6964

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

11.6919	311.150	–	39210.20	190.063	192.645	128.984	**PSO**
11.6938	311.155	–	39210.15	190.2958	192.5906	128.8074	**FPA**
11.6927	311.1638	–	39209.81	191.389	191.964	128.338	**MSFLA)**
11.6874	311.013	25490.5	39199.7	190.274	192.303	129.011	**KKO**
11.658	311.06	25459.2	38481.54	190.875	192.27	129.394	**SRA**

جدول (۷): نتایج و مقایسه به دست آمده برای حالت V.ii سیستم۱۰ واحده

خروجی	NSGA-II	PDE	SPEA-2	GSA	ABC-PSO	EMOCA	FPA	LFA	KKO	SRA
G1	51.9515	54.9853	52.9761	54.9992	55	55	53.188	54.9920	54.9923	54.657
G2	67.2584	79.3803	72.813	79.9586	80	80	79.975	78.7689	78.8914	79.548
G3	73.6879	83.9842	78.1128	79.4341	81.14	83.5594	78.105	87.7168	78.7946	83.538
G4	91.3554	86.5942	83.6088	85	84.213	84.6031	97.119	78.1055	88.7479	87.766
G5	134.0522	144.4386	137.2432	142.1063	138.3377	146.5632	152.74	140.6272	159.814	145.79
G6	174.9504	165.7756	172.9188	166.5670	167.5086	169.2481	163.08	157.0936	160.555	170.651
G7	289.4350	283.2122	287.2023	292.8749	296.8338	300	258.61	299.9954	262.174	288.77
G8	314.0556	312.7709	326.4023	313.2387	311.5824	317.3496	302.22	309.2219	308.857	316.91
G9	455.6978	440.1135	448.8814	441.1775	420.3363	412.9183	433.21	439.32434	430.307	430.88
G10	431.8054	432.6783	423.9025	428.6306	449.1598	434.3133	466.07	438.6947	461.039	455.65
F_c	1.13539	1.1351	1.1352	1.1349	1.1342	1.13445	1.1337	1.13246	1.13481	1.1338
F_E	4130.2	4111.4	4109.1	4111.4	4120.1	4113.98	3997.7	4139.89	3982.85	3886.7
L_P	84.25	83.9	84.1	83.9869	84.1736	83.56	84.3	84.37	84.17	84.11

جدول (۸): نتایج به دست آمده برای مینیمم سازی هزینه حالت V.iiiسیستم ۶ واحده (۱)

خروجی	MHBA	FSBF	NSBF	KKO	SRA
G1	10.94	19.43	17.80	0.129546	13.6
G2	29.85	37.26	33.66	0.322445	38.7
G3	58.29	68.57	72.92	0.541935	70.5
G4	99.48	59.19	59.08	0.969029	87.6
G5	51.81	60.85	57.66	0.529524	58.9
G6	36.20	40.61	44.74	0.36548	43.6
Fc	607.39	619.3679	619.6086	605.68	603.65
FE	0.2208	0.2015	0.2027	0.217897	0.2013
LP	3.204	2.51	2.46	0.02396	2.42

جدول (۹): نتایج به دست آمده برای مینیمم سازی هزینه حالتV.iii سیستم ۶ واحده (۲)

خروجی	MHBA	FSBF	NSBF	KKO	SRA
G1	40.94	41.19	40.47	0.412812	40.66
G2	45.15	46.62	45.33	0.461706	45.88
G3	53.30	54.21	54.39	0.545594	54.18
G4	40.51	38.48	39.21	0.386772	39.44
G5	54.25	54.31	54.54	0.545754	54.37
G6	52.14	51.60	52.46	0.516297	52.16
Fc	643.3760	645.6193	644.4141	646.457	643.25
FE	0.1942	0.1942	0.1942	0.194185	0.1911
LP	2.92	3.01	3	0.03493	3.05

۷-نتیجه‌گیری

دراین تحقیق مسئله بهینه‌سازی پخش بار اقتصادی/آلودگی با استفاده از الگوریتم جستجو ونجات SRA انجام شده است به این منظور در مسئله پخش بار محدودیت‌های مختلفی از جمله در نظر گرفتن توابع هزینه با نقاط، کاهش‌میزان آلودگی،محدویت‌های‌توان تولیدی، و درنظر گرفتن تلفات و همچنین نیروگاه‌های حرارتی سیستم می‌با شد. در این تحقیق از

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

الگوریتم پیشـــنهادی برای کاهش هزینه و آلودگی‌در مدلCEED روی سیستم های۳، ۱۰، ۶ واحده در نظر گرفتیم و شبیه‌سازی‌ها را مطابق فصـــل قبل ارائه دادیم که نتایج موید کارایی روش جستجو و نجات در پیدا کردن‌بهترین راه حل برای مسئله پخش بار اقتصادی آلودگی می‌باشد در این تحقیق نتایج زیر حاصل شده است.

- ❖ کاهش تلفات سیستم نسبت به پخش بار اقتصادی
- ❖ کاهش انتشار آلایندگی نسبت به پخش بار اقتصادی
- ❖ کاهش هزینه کل نسـبت به پخش بار اقتصـادی و پخش بار آلودگی

مراجع

[1] Storn, R., Price, K., 1997, "*Differential Evolution—A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces*", J. Glob. Optim, 11, 341–359.

[۲] بابائی، ابراهیم، قربانی، ناصر، "**الگوریتم ژنتیک مبتنی بر کد واقعی با جهش هوشمند برای حل مسائل پخش بار اقتصادی غیرمحدب**"، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۹.

[۳] حاتمی، علیرضا، "**حل مسأله‌ی پخش بار اقتصادی- آلودگی دینامیکی با مشارکت مزارع بادی با استفاده ازالگوریتم فرا ابتکاری ازدحام ذرات هم‌تکاملی اصلاح شده**"، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، ۱۳۹۴.

[۴] صیادی شهرکی، فهیمه، اسماعیلی، سعید، "**پخش بار اقتصادی دینامیکی بهینه با استفاده از p-pso پیشنهادی**"، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان، ۱۳۹۴.

[۵] لشکرآرا، افشین، مجاهد، ویدا، "**پخش بار اقتصادی نیروگاه های حرارتی با الگوریتم جستجوی کلونی ویروس و در نظر گرفتن اثر شیر بخار**"، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول – دانشکده فنی و مهندسی، ۱۳۹۳.

[۶] لشکرآرا، افشین، رأفت پور، افروز، "**پخش بار اقتصادی نیروگاه‌های حرارتی با در نظر گرفتن اثر شیر بخار و با استفاده از الگوریتم سینوس کسینوس**"، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول – دانشکده فنی و مهندسی، ۱۳۹۴.

[۷] محمدی، فرید، عبدی، حمدی، دهنوی، احسان، "**حل مسئله توزیع بار اقتصادی هزینه-آلودگی دینامیک همراه با برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری بهینه تحت قیود اثر نقطه-دریچه و ذخیره چرخان**"، دانشگاه رازی - دانشکده فنی و مهندسی، ۱۳۹۵.

[۸] صابر ارمغانی، نیما امجدی، "**توزیع بار اقتصادی با در نظر گرفتن آلودگی در سیستمهای قدرت چندناحیه‌ای با استفاده ازالگوریتم بهینه سازی فاخته**"، دانشگاه سمنان ، ۱۳۹۱.

[۹] فرجیان‌پور، سجاد، "**حل مسئله‌پخش باراقتصادی با استفاده از الگوریتم جستجوی باکتریایی**"، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده برق و کامپیوتر، ۱۳۹۳.

[10] Frank, M., Wolfe, P., "*An algorithm for quadratic programming*", Nav. Res. Logist.3 (1–2), 95–110,1956.

[11] Bellman, R. "*Dynamic Programming. Courier Corporation*", 2013.

[12] Bertsekas, D.P. "*Nonlinear Programming, Athena scientific Belmont*" . 1999

[13] Yazdani, M., Jolai, F., "*Lion optimization algorithm (LOA): a nature-inspired metaheuristic algorithm*", J. Comput. Design Eng. 3 (1), 24–36, 2016.

[14] Mirjalili, S., Lewis, A. "*The whale optimization algorithm, Adv*". Eng. Softw, 95,51–67, 2016.

[15] Zheng, Y.J. "*Water wave optimization: a new nature-inspired metaheuristic*" .Comput, Oper. Res. 55, 1–11, 2015.

[16] Banzhaf, W., Nordin, P., Keller, R.E., Francone, F.D., "*Genetic Programming*", Springer, 1998.

[17] Elattar, E.E. "*Environmental economic dispatch with heat optimization in the presence of renewable energy based on modified shuffle frog leaping algorithm, Energy*", vol. 171, pp. 256-269, Mar, 2019.

[18] Karaboga, D., Akay, B. "*A comparative study of artificial bee colony algorithm*", Appl. Math. Comput. 214 (1), 108–132, 2009.

[19]Liang, H., Liu, Y., Li, F., Shen, Y. "*A multiobjective hybrid bat algorithm for combined economic/emission dispatch*", Int. J. Elect. Power Energy Syst., vol. 101, pp. 103-115, Oct 2018.

[20] Kheshti, M., Kang, X., Li, J., Regulski, P. Terzija, V. "*Lightning flash algorithm for solving non-convex combined emission economic dispatch with generator constraints*", IET Gener. Transm. Distrib, vol. 12, no. 1, pp. 104-116, Feb 2018.

[21] Deb, S., Fong, S., Tian, Z. "*Elephant search algorithm for optimization problems.In: Digital Information Management*", ICDIM, 2015 Tenth International Conference on. IEEE, pp. 249–255, 2015.

[22] Rajagopalan, A., Kasinathan, P., Nagarajan, K., Ramachandaramurthy, V.K., Sengoden, V., Alavandar, S. "*Chaotic self-adaptive interior search algorithm to solve combined economic emission dispatch problems with security constraints*" , International Transactions on Electrical Energy Systems, pp. e12026, 2019.

[23] Gherbi, Y.A., Bouzeboudja, H., Gherbi, F.Z. "*The combined economic environmental dispatch using new hybrid metaheuristic, Energy*", vol. 115, pp. 468-477, Nov, 2016.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[24] Abdelaziz, A., Ali, E., Elazim, S.A. "*Implementation of flower pollination algorithm for solving economic load dispatch and combined economic emission dispatch problems in power systems, Energy*", vol. 101, pp. 506-518, Apr 2016.
[25] Srivastava, A., Das, D.K. "*A new Kho-Kho optimization Algorithm: An application to solve combined emission economic dispatch and combined heat and power economic dispatch problem*", Engineering Applications of Artificial Intelligence 94 103763, 2020.
[26] Shabani, A., Asgarian, B. "*Search and Rescue Optimization Algorithm for Size Optimization of Truss Structures with Discrete Variables*", Numerical Methods in Civil Engineering, Vol. 3, No. 3, March 2019.
[27] Meng, X., Liu, Y., Gao, X., Zhang, H. "*A new bio-inspired algorithm: chicken swarm optimization*". In: International Conference in Swarm Intelligence, Springer, pp. 86–94, 2014.
[28] Sun, J., Li, Y. "*Social cognitive optimization with tent map for combined heat and power economic dispatch*", International Transactions On Electrical Energy Systems Volume 29 Issue1, January 2019.
[29] Haghrah, A., Nazari-Heris, M., Mohammadi-ivatloo, B. "*Solving combined heat and power economic dispatch problem using real coded genetic algorithm with improved Mühlenbein mutation*", Applied Thermal Engineering, Volume 99, 25 April, Pages 465-475, 2016.
[30] Alipour, M., Zare, K., Mohammadi-ivatloo, B. "*Short-term scheduling of combined heat and power generation units in the presence of demand response programs*", May, Proceedings of the ICE - Energy 71, 2014.

رزومه

افشین لشکرآرا محمره در سال (۱۳۵۲) در تهران متولد شد. مدارک کارشناسی ، کارشناسی ارشد و دکترای خود را در سالهای (۱۳۷۴) ، (۱۳۸۰) و (۱۳۸۹) به ترتیب از دانشگاه ازاد اسلامی واحد دزفول، دانشگاه مازندران و دانشگاه علم و صنعت ایران در رشته مهندسی برق قدرت اخذ نموده است. ایشان هم اکنون عضو ارشد انجمن مهندسی برق و الکترونیک آمریکا (IEEE Senior Member) و از سال (۱۳۸۰) تا کنون عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول می باشند. زمینه تحقیقاتی ایشان مطالعات استاتیکی و دینامیکی سیستم های قدرت، پایداری و کنترل و ادوات FACTS می‌باشد.



مجتبی خدادادی در سال(۱۳۷۳) در شوشتر متولد شده است تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق قدرت (الکتروتکنیک) از دانشگاه ازاد اسلامی واحد شوشتر (۱۳۹۶)، کارشناسی ارشد مهندسی برق سیستم های قدرت از دانشگاه ازاد اسلامی واحد دزفول (۱۴۰۲) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه مندی ایشان در زمینه ادوات FACTS و بهره برداری از سیستمهای قدرت می‌باشد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023

Economic Dispatch in Power Systems Using Search and Rescue Optimization Algorithm

Mojtaba Khodadadi [1], Afshin Lashkar Ara [2*]

1-MSc, Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran, mo.khodadadi73@gmail.com
2- Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran, lashkarara@alumni.iust.ac.ir

Abstract: Economic Dispatch for power systems with the aim of optimizing the total production cost for active units in the power network is one of the most important topics for today's modern systems. In other words, the purpose of the economic Dispatch problem is optimal and appropriate planning for production units, taking into account the nonlinear factors and limitations in the power network and production units. And it plays a very important role in the economic exploitation of power systems Solving the problem of economic Dispatch optimization is very complex due to the huge dimensions of the nonlinear objective function, various restrictions and limitations. However, the use of optimization algorithms and artificial intelligence has been used to solve this problem. In this research, based on the use of a new algorithm called search and rescue, which is modeled based on the individual and group behavior of humans in searching for an individual or a group that has had an accident or is lost. This algorithm has great power in solving problems with high constraints, which can ignore local optima to confirm the proposed method in minimizing the cost and pollution of simulation in the software environment (MATLAB) on test networks (3, 6, 10) units done and the simulation results obtained from the proposed algorithm show that the accuracy and speed of finding the answers have been improved with this method.

Keywords: Economic Dispatch، Smooth and rough cost and pollution functions، Penalty coefficient of power plants، search and rescue optimization algorithm.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]