

توزیع بهینه اقتصادی بار با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی نیروگاه‌ها با استفاده از الگوریتم جهش قورباغه بهبودیافته

حمید فلقی^{۱*}، استادیار، امیر امینی^۲، دانشجوی کارشناسی ارشد، ارسلان نجفی^۳، دانشجوی کارشناسی ارشد

^۱ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران

falaghi@ieee.org

^۲ دانشکده مهندسی مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران

am.bi@yahoo.com

^۳ دانشکده مهندسی مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران

arsalan.najafi@gmail.com

دریافت مقاله: ۹۰/۳/۷

پذیرش مقاله: ۹۰/۷/۸

چکیده: توزیع اقتصادی بار، یکی از مسائل مهم در مدیریت تولید و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است. در این مقاله، مسئله توزیع اقتصادی بار با در نظر گرفتن تلفات شبکه انتقال، و نیز ملاحظات و محدودیت‌های عملی نیروگاه‌ها از قبیل نرخ افزایشی و کاهش تولید، نواحی ممنوعه تولید، اثر شیر بخار و سوخت‌های چندگانه مطرح شده است. برای حل این مسئله که دارای توابع هزینه غیرمحدب است، از روش جدیدی مبتنی بر الگوریتم جهش قورباغه بهبودیافته، استفاده شده است. به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی و مطالعات عددی در مثال‌های متنوع با دیگر روش‌ها مقایسه شده است. نتایج مطالعات عددی ضمن سرعت و دقت، برتری روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جهش قورباغه بهبودیافته، بهینه‌سازی، توزیع اقتصادی بار.

از قبیل اثر شیر بخار، نواحی ممنوعه، نرخ کاهش و افزایش تولیدی نیروگاه‌ها و نیز تلفات شبکه انتقال لحاظ شده است. به منظور نمایش و بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی از چند سیستم نمونه با ابعاد مختلف استفاده شده است. نتایج مطالعات عددی و مقایسه آن با سایر روش‌ها، گویای برتری روش پیشنهادی برای حل مسئله ED است.

۲. فرمول‌بندی مسئله

۱.۲. تابع هدف

هدف اصلی مسئله توزیع اقتصادی بار، کمینه کردن هزینه‌های بهره‌برداری واحدهای تولیدی در مدار سیستم قدرت است به گونه‌ای که قیود تساوی و نامساوی حاکم برآورده شود. در حالت ساده، تابع هزینه هر واحد تولیدی می‌تواند به صورت یک تابع درجه دوم بیان شود. در این صورت، تابع هدف مسئله ED به صورت زیر خواهد بود:

$$\min F_C = \sum_{i=1}^{ng} F_i(P_i) = \sum_{i=1}^{ng} a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (1)$$

در رابطه بالا F_C هزینه کل سوخت واحدهای نیروگاهی؛ $F_i(P_i)$ هزینه تولید مرتبط با واحد i ام؛ ng تعداد واحدهای تولیدی در مدار و a_i ، b_i و c_i نیز ضرایب هزینه سوخت واحد i ام هستند.

۱.۱.۲. در نظر گرفتن اثر شیر بخار

اگر در واحدهای نیروگاهی، اثر شیر بخار در نظر گرفته شود، تابع هزینه تولید آن‌ها به علت تأثیرات مکانیکی مربوطه ماهیتی ناصاف را به خود می‌گیرد. این تأثیر معمولاً با اضافه کردن یک ترم سینوسی در تابع هزینه نیروگاه‌ها در قالب ریاضی به صورت زیر مدل می‌شود:

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c + \left| e_i \times \sin(f_i \times (P_i^{\min} - P_i)) \right| \quad (2)$$

که در آن، e_i و f_i ضرایب بازگشتی تابع هزینه‌اند که نشانگر تأثیر شیر بخار است. P_i^{\min} نیز حد پایین تولید واحد i ام را نشان می‌دهد [۱].

۲.۱.۲. در نظر گرفتن اثر سوخت‌های چندگانه و شیر بخار

هنگامی که واحدهای تولیدی با چند نوع سوخت کار می‌کنند، تابع هزینه هر واحد با چند رابطه درجه دو بیان می‌شود که هر یک متناظر با یکی از انواع سوخت است. این موضوع را می‌توان در قالب ریاضی به صورت زیر بیان کرد:

۱. مقدمه

توزیع اقتصادی (ED) بار، یکی از مسائل پایه در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است. هدف از توزیع اقتصادی بار، کمینه‌سازی هزینه‌های تولید توان در نیروگاه‌ها به نحوی است که قیود حاکم بر نیروگاه‌ها و سیستم رعایت شوند. با توجه به ماهیت غیرخطی تابع هدف و وجود قیود سخت ناشی از محدودیت‌های عملی نیروگاه‌ها، حل این مسئله به سهولت امکان‌پذیر نیست [۱].

تاکنون روش‌های مختلفی با هدف دستیابی به جواب بهینه در حل مسئله توزیع اقتصادی بار ارائه شده است. در [۲ و ۳] برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی پیشنهاد شده است. برنامه‌ریزی خطی سریع و قابل اطمینان است؛ اما این روش توابع هزینه را به صورت تکه‌ای تقریب می‌زند. بنابراین، نمی‌توان از بهینه بودن جواب خروجی آن مطمئن بود. در برنامه‌ریزی غیرخطی نیز مشکل پیچیدگی و همگرایی وجود دارد. برنامه‌ریزی پویا در [۴] برای حل مسئله توزیع اقتصادی بار پیشنهاد شده است. این روش اگرچه قادر به حل یک سری مسائل توزیع اقتصادی بار خواهد بود، در مسائل با ابعاد بزرگ قادر به حل نیست و یا به زمان زیادی برای رسیدن به جواب نیازمند است. روش‌هایی از قبیل روش لاگرانژ نیز معرفی شده‌اند که پایه کار آن‌ها بر اساس مشتق‌گیری است [۵]. این روش‌ها برای در نظر گرفتن قیود عملی نیروگاه‌ها از قبیل نرخ افزایشی، ناحیه‌های ممنوعه و اثر شیر بخار به دلیل ماهیت مشتق‌ناپذیری آن‌ها، ناتوان هستند. به‌طور کلی، ماهیت ریاضی مدل مسئله باعث شده است که روش‌های تحلیلی ریاضی نتوانند قادر به حل این مسائل باشند. از این رو، بهره‌گیری از الگوریتم‌های تکاملی که در آن‌ها نگرانی از مشتق‌ناپذیری و ماهیت غیرخطی توابع هدف و قیود وجود ندارد، پیشنهاد شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به الگوریتم ژنتیک [۶-۸]، الگوریتم تجمع ذرات [۹-۱۲]، شبکه‌های عصبی مصنوعی [۱۳]، الگوریتم سخت‌کاری فولاد [۱۴]، الگوریتم تغذیه باکتری [۱۵]، الگوریتم اجتماع مورچگان [۱۶]، برنامه‌ریزی تکاملی [۱۷]، بیوگرافی [۱۸]، تفاضل تکاملی [۱۹] نام برد. علاوه بر این، روش‌هایی مبتنی بر ترکیب الگوریتم‌های مذکور نیز برای حل مسئله توزیع اقتصادی بار ارائه شده است [۲۰] که هر کدام از آن‌ها از نظر دقت و سرعت اجرا با یکدیگر متفاوت‌اند.

در این مقاله، روشی مبتنی بر ویرایش بهبودیافته‌ای از الگوریتم جهش قورباغه برای حل مسئله توزیع اقتصادی بار ارائه شده است که در آن، ملاحظات و محدودیت‌های عملی مختلف سیستم و نیروگاه‌ها

بین حداکثر و حداقل تولید خود نمی‌تواند تولید کند. به نواحی که در آن نیروگاه نمی‌تواند تولید توان داشته باشد نواحی ممنوعه تولید گفته می‌شود. بنابراین، در این واحدهای تولیدی قیودی به صورت زیر اضافه می‌شود:

$$P_i \in \begin{cases} P_i^{\min} \leq P_i \leq P_{i,1}^l \\ P_{i,k-1}^u \leq P_i \leq P_{i,k}^l, \quad k=2,3,\dots, z_i, \quad i=1,\dots, nz \\ P_{i,z_i-1}^u \leq P_i \leq P_i^{\max} \end{cases} \quad (۸)$$

که در آن، $P_{i,k}^l$ و $P_{i,k}^u$ به ترتیب، حد پایین و بالای k امین ناحیه ممنوعه واحد i ام است. در این رابطه، z_i تعداد نواحی ممنوعه نیروگاه i ام و nz تعداد نیروگاه‌های دارای نواحی ممنوعه را نشان می‌دهد [۲۱].

۳. الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه بهبودیافته

۱.۳. معرفی الگوریتم جهش قورباغه

الگوریتم جهش قورباغه، یک روش بهینه‌سازی است که از رفتار گروهی قورباغه‌ها برای یافتن مکان بیشترین غذا الهام گرفته شده است. این الگوریتم، یک روش جستجو بر مبنای جمعیت است که برای اولین بار در سال ۲۰۰۳ مطرح شد [۲۲]. در این الگوریتم، به هر یک از اعضای جمعیت یک قورباغه گفته می‌شود و در آن با استفاده از دو استراتژی جستجوی محلی و جستجوی کلی، قورباغه‌های نسل بعد تولید شده و در صورت بهبود تابع هدف، جایگزین قورباغه‌های کنونی می‌گردند. این الگوریتم به طور کلی شامل سه مرحله زیر است:

الف) تولید جمعیت اولیه:

جمعیت اولیه شامل p قورباغه به صورت تصادفی تولید می‌شود به طوری که موقعیت هر یک از قورباغه‌ها در محدوده فضای جواب باشند. موقعیت قورباغه i ام به صورت $X_i = (x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{s,i})$ نمایش داده می‌شود که در آن s نشان‌دهنده تعداد متغیرهای تصمیم می‌باشد.

ب) دسته‌بندی:

در این مرحله، قورباغه‌ها بر اساس میزان برازندگی مرتب می‌شوند. سپس کل جمعیت به m دسته تقسیم می‌گردد، به گونه‌ای که هر دسته شامل n قورباغه است. در این صورت، $p = m \times n$ خواهد بود. استراتژی تخصیص قورباغه‌ها به دسته‌ها به گونه‌ای است که اولین قورباغه به اولین دسته، دومین قورباغه به دومین دسته و m امین قورباغه به m امین دسته اختصاص می‌یابد. سپس $(m+1)$ امین قورباغه در دسته اول قرار گرفته و این روند تا زمانی که تمام p قورباغه در m دسته قرار گیرند، ادامه می‌یابد.

$$F_i(P_i) = \begin{cases} a_{i1}P_i^2 + b_{i1}P_i + c_{i1}, & \text{fuel1, } P_i^{\min} \leq P_i \leq P_{i1} \\ a_{i2}P_i^2 + b_{i2}P_i + c_{i2}, & \text{fuel2, } P_{i1} \leq P_i \leq P_{i2} \\ \vdots & \vdots \\ a_{ik}P_i^2 + b_{ik}P_i + c_{ik}, & \text{fuelk, } P_{i,k-1} \leq P_i \leq P_i^{\max} \end{cases} \quad (۳)$$

که در آن، a_{ik} ، b_{ik} و c_{ik} ضرایب هزینه واحد i ام برای سوخت نوع k ام و P_i^{\max} نیز حد بالای تولیدی واحد i ام هستند. در صورتی که اثر شیر بخار نیز در کنار سوخت‌های چندگانه در نظر گرفته شود، در رابطه فوق، بخش سینوسی به هر یک از روابط درجه دو اضافه می‌شود [۱۱].

۲.۲. محدودیت‌ها

۱.۲.۲. محدودیت تعادل توان

برای تعادل تولید و مصرف، لازم است قید تساوی زیر رعایت شود:

$$\sum_{i=1}^{ng} P_i = P_{\text{load}} + P_{\text{loss}} \quad (۴)$$

که در آن، P_{load} و P_{loss} به ترتیب نشان دهنده میزان بار و تلفات سیستم است. P_{loss} را با استفاده از ماتریس تلفات شبکه انتقال به صورت زیر می‌توان به دست آورد [۲۴]:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{ng} \sum_{j=1}^{ng} P_i \cdot B_{ij} \cdot P_j + \sum_{i=1}^{ng} B_{0i} \cdot P_i + B_{00} \quad (۵)$$

که در آن، B_{ij} ، B_{0i} و B_{00} ضرایب تابع تلفات شبکه انتقال هستند.

۲.۲.۲. محدودیت کمینه و بیشینه توان تولیدی

توان تولیدی در هر نیروگاه نباید از حد بالا و پایین آن تجاوز کند. این محدودیت با نامساوی زیر بیان می‌شود:

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}, \quad i=1, \dots, ng \quad (۶)$$

۳.۲.۲. محدودیت نرخ تغییر تولید

محدوده عملی تولید نیروگاه‌ها در هر زمان با توجه به نرخ تغییر تولید آن‌ها مشخص می‌شود. در واقع این قید باعث می‌شوند که حد بالا و پایین تولید واحد نیروگاهی در هر زمان به تولید اولیه آن واحد وابسته باشد. با در نظر گرفتن این محدودیت، قید (۶) به صورت زیر تغییر پیدا می‌کند:

$$\max \{P_i^{\min}, P_i^0 - DR_i\} \leq P_i \leq \min \{P_i^{\max}, P_i^0 + UR_i\} \quad (۷)$$

در رابطه فوق، P_i^0 ، DR_i و UR_i به ترتیب توان خروجی اولیه، میزان نرخ کاهش و نرخ افزایش تولید واحد نیروگاهی i ام هستند.

۴.۲.۲. محدودیت نواحی ممنوعه

در برخی موارد به دلیل محدودیت‌های فیزیکی، نیروگاه در تمامی بازه

ج) جستجوی محلی:

محلی گرفتار شود. به همین دلیل در این مقاله، الگوریتم جهش قورباغه بهبودیافته (ISLFA^۱) معرفی شده که در آن قدرت جستجو نسبت به ویرایش استاندارد آن ارتقا یافته است. در ISLFA، حرکت بدترین قورباغه هر دسته (X_w) در هر تکرار جستجوی محلی تغییر داده شده است. در ابتدا برای بدترین جواب در هر تکرار بردار جهش زیر تولید می‌شود:

$$pre_X_w = X_g + F \times (X_{r1} - X_{r2}) \quad (11)$$

که در آن، X_{r1} و X_{r2} دو قورباغه متفاوت هستند که به صورت تصادفی از بین قورباغه‌های موجود در دسته انتخاب می‌شوند. F ضریب جهش نامیده می‌شود که دامنه اختلاف X_{r1} و X_{r2} را تعیین می‌کند و X_g بهترین جواب تولید شده تا تکرار کنونی می‌باشد.

در این صورت، مقدار پارامتر z ام بردار X_w^{new} در تکرار بعدی با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$x_{wj}^{new} = \begin{cases} pre_x_{wj} & \text{if } rand < CR_g \text{ or } j = rm \\ x_{wj}^{old} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

در این رابطه، $rand$ یک عدد تصادفی یکنواخت در بازه $[0,1]$ ، CR_g ثابت تقاطع عمومی است و مقداری بین $[0,1]$ دارد. rm یک عدد تصادفی است که از بازه تعداد پارامترهای جواب انتخاب می‌شود و بیان می‌کند که حداقل یکی از پارامترهای x_{wj}^{new} از مقادیر pre_x_{wj} انتخاب می‌گردد.

اگر مقدار برازندگی جواب جدید بهتر از جواب گذشته باشد، قورباغه جدید جایگزین قورباغه قبلی می‌شود. در غیر این صورت، رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) با جایگزینی، بهترین جواب هر دسته (X_b) با X_g و ثابت تقاطع محلی (CR_b) با ثابت تقاطع عمومی (CR_g) دوباره تکرار می‌شود. در صورتی که در این مرحله نیز جواب بهتری تولید نگردد، یک قورباغه تصادفی در محدوده فضای جواب، تولید و جایگزین قورباغه قبلی می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مراحل اجرای ISLFA مشابه الگوریتم جهش قورباغه کلاسیک که در بخش ۱-۳-۱ تا ۱-۳-۳ توضیح داده شده، می‌باشد با این تفاوت که در روش پیشنهادی به منظور افزایش کارایی روش، حرکت بدترین قورباغه در جستجوی محلی اصلاح شده است و بدین منظور، رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) جایگزین رابطه‌های (۹) و (۱۰) در بخش ۳ می‌گردند. روند اجرای ISLFA به صورت گام به گام در شکل (۱) نمایش داده شده است.

در جستجوی محلی موقعیت بدترین قورباغه هر دسته، با توجه به موقعیت بهترین جواب آن دسته یا حتی بهترین جواب کل دسته‌ها بهبود می‌یابد و از این طریق میانگین برازندگی قورباغه‌ها افزایش پیدا می‌کند. برای این منظور به تعداد تکرارهای مشخص برای هر دسته از قورباغه‌ها گام‌های زیر تکرار می‌شود:

گام ۱) بهترین و بدترین قورباغه دسته بر اساس مقدار ارزش موقعیت تعیین و به ترتیب X_b و X_w نامیده می‌شود.

گام ۲) موقعیت بدترین قورباغه دسته (X_w) با توجه به موقعیت بهترین قورباغه دسته (X_b) به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$D = rand \times (X_b - X_w) \quad (9)$$

$$X_w^{new} = X_w^{old} + D \quad (10)$$

در این روابط، D بردار جهش قورباغه و $rand$ یک عدد تصادفی در بازه $[0,1]$ است. X_w^{old} و X_w^{new} به ترتیب، موقعیت فعلی و جدید بدترین قورباغه دسته می‌باشد. اگر طی این مرحله جواب بهتری نسبت به حالت قبل حاصل شد، قورباغه جدید جایگزین قورباغه قبلی می‌شود و فرآیند به گام ۵ می‌رود. در غیر این صورت، گام ۳ اجرا می‌شود.

گام ۳) بهترین جواب کل دسته‌ها X_g ، جایگزین X_b در رابطه (۹) می‌شود و سپس با استفاده از رابطه (۱۰) قورباغه جدید به دست می‌آید. در صورتی که بهبودی در جواب حاصل شد، قورباغه جدید جایگزین قورباغه قبلی می‌شود و فرآیند به گام ۵ می‌رود. در غیر این صورت، گام ۴ اجرا می‌شود.

گام ۴) یک قورباغه جدید به صورت تصادفی تولید، و جایگزین بدترین قورباغه دسته می‌شود.

گام ۵) گام‌های ۱ تا ۴ به تعداد مشخص تکرار می‌شود.

د) توقف:

فرآیند دسته‌بندی و جستجوی محلی تا زمانی که معیار توقف الگوریتم برآورده شود، ادامه می‌یابد. معمولاً معیار توقف الگوریتم می‌تواند بر مبنای ثابت ماندن تغییرات برازندگی بهترین جواب یا تکرار الگوریتم تا یک تعداد مشخص انتخاب شود.

۲.۳. الگوریتم جهش قورباغه بهبودیافته

اگرچه الگوریتم جهش قورباغه دارای سرعت بسیار بالایی است، در حل مدل‌های ریاضی پیچیده و غیرخطی ممکن است در بهینه‌های

صورت تصادفی تولید می‌شود. در این مقاله، موقعیت هر یک از قورباغه‌ها یک پاسخ از مسئله ED و درایه‌های آن تولید واحدهای نیروگاهی را نشان می‌دهد. بنابراین، موقعیت قورباغه j را می‌توان به صورت بردار $X_j = (P_{1,j}, P_{2,j}, \dots, P_{ng,j})$ نمایش داد. در فرآیند مقاردهی اولیه، موقعیت هر یک از قورباغه‌ها به گونه‌ای انتخاب شود که قیود نامساوی و محدودیت تساوی رعایت شوند.

ب) محاسبه برازش قورباغه‌ها:

برای تعیین برازش هر یک از قورباغه‌ها باید میزان تابع هدف متناظر با هر یک از آن‌ها مشخص گردد. از طرف دیگر، در این مقاله برای رعایت محدودیت تعادل توان از ضریب جریمه در تابع هدف مسئله استفاده شده است. بنابراین، قورباغه‌ای دارای برازندگی بیشتری خواهد بود که موقعیت آن، مقدار کمتری از تابع زیر را ایجاد کند:

$$F'_C = F_C + \lambda \times \left[\sum_{i=1}^{ng} P_i - (P_{load} + P_{loss}) \right] \quad (13)$$

که در آن، F'_C تابع تعیین برازش قورباغه‌ها و λ ضریب جریمه محدودیت تعادل توان است. بدیهی است اگر محدودیت تساوی تعادل توان (۴) برای موقعیت یک قورباغه رعایت شود، تابع فوق برابر تابع هدف مسئله خواهد بود. در غیر این صورت، یک مقدار مثبت متناسب با میزان تخطی محدودیت مربوطه به تابع هدف افزوده و موجب کاهش برازندگی موقعیت قورباغه مزبور خواهد شد.

ج) مرتب‌سازی و دسته‌بندی:

قورباغه‌ها بر اساس میزان برازش موقعیت آن‌ها مرتب و مطابق با استراتژی ارائه شده در بخش ۳-۱-۳ ب دسته‌بندی می‌شوند.

د) جستجوی محلی:

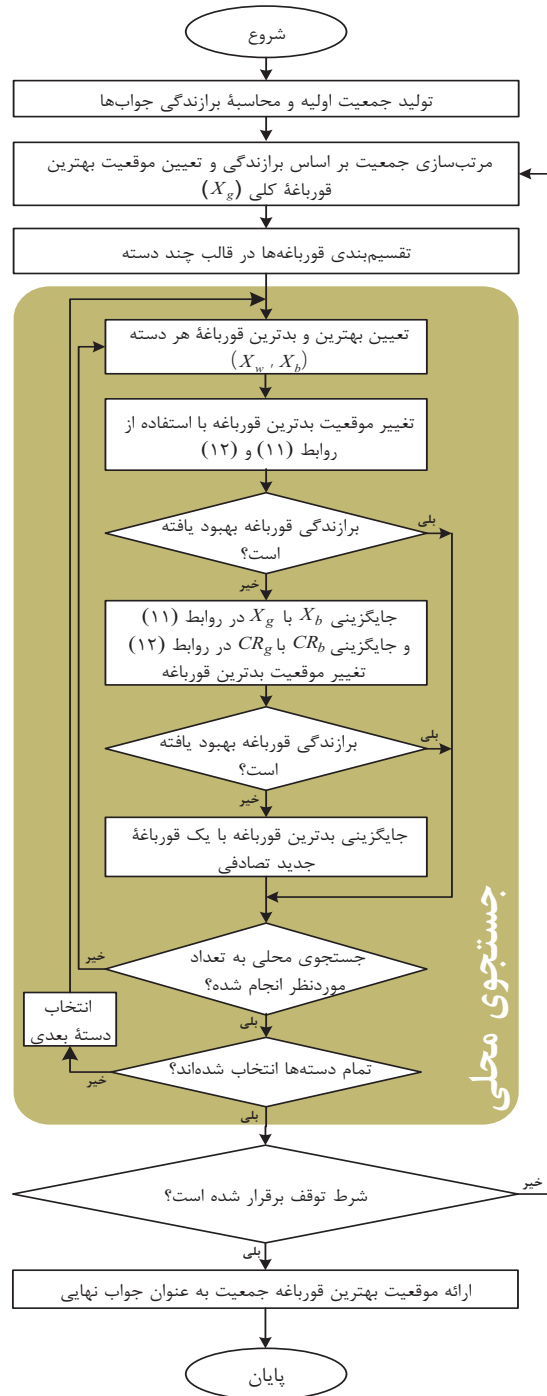
برای هر یک از دسته‌ها جستجوی محلی مطابق با فرآیند ارائه شده در بخش ۳-۱-۳ ج و مبتنی بر راهکار اصلاحی که در بخش ۳-۲ تشریح شده است، انجام می‌شود.

ه) رعایت محدودیت‌های نامساوی:

هنگام تولید یک موقعیت جدید برای بدترین قورباغه‌ها در فرآیند جستجوی محلی، این امکان وجود دارد که قیود نامساوی مسئله نقض گردد. در این مقاله، برای برقراری قید نامساوی (رابطه ۸) از قاعده جذب دیوار [۲۳]، مطابق با رابطه‌های (۱۴) و (۱۶) استفاده شده است.

$$PP_i^{\min} = \max(P_i^{\min}, P_i^0 - DR_i) \quad (14)$$

$$PP_i^{\max} = \min(P_i^{\max}, P_i^0 + UR_i) \quad (15)$$



شکل (۱): فلوچارت ISLFA

۳.۳. کاربرد الگوریتم جهش قورباغه‌ بهبودیافته در حل مسئله ED

در این مقاله، روشی مبتنی بر ISLFA برای حل مسئله ED ارائه شده است. جزئیات به کارگیری این الگوریتم در مسئله حاضر، در ادامه تشریح می‌گردد.

الف) ساختار قورباغه‌ها و مقاردهی اولیه:

در فرآیند مقاردهی اولیه، موقعیت مجموعه‌ای از قورباغه‌ها به

و تلفات شبکه انتقال در نظر گرفته شده‌اند. بار سیستم ۱۲۶۳ مگاوات است. اطلاعات مربوط به ضرایب تابع هزینه سوخت و ماتریس تلفات شبکه انتقال این سیستم در [۹] آمده است.

میزان توان تولیدی هر یک از واحدهای نیروگاهی، در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): نتایج توان‌های تولیدی واحدها در سیستم ۶ واحدی

تولید واحد	مقدار (MW)	تولید واحد	مقدار (MW)
P_1	۴۴۷.۰۷۲۱	P_4	۱۳۹.۰۵۰۵
P_2	۱۷۳.۱۸۱۱	P_5	۱۶۵.۵۷۴۳
P_3	۲۶۳.۹۱۷۱	P_6	۸۶.۶۲۰۸
مجموع توان تولیدی: ۱۲۷۵.۴۱۵۹		تلفات: ۱۲.۴۱۵۹	

در جدول (۳) نتایج حاصل از ۳۰ بار اجرای الگوریتم پیشنهادی با روش‌های دیگر مقایسه شده است. همان‌طور که نتایج این جدول نشان می‌دهد، در این سیستم روش پیشنهادی همواره به یک جواب همگرا شده است که در مقایسه با دیگر روش‌های موجود از برتری قابل توجهی برخوردار است.

جدول (۳): مقایسه نتایج حاصله با سایر روش‌ها در سیستم ۶ واحدی

روش	بهترین جواب	متوسط جواب‌ها	بدترین جواب	زمان (s)
PSO ¹ [۹]	۱۵۴۵۰	۱۵۴۵۴	۱۵۴۹۲	۱۴.۸۶
GA ² [۹]	۱۵۴۵۹	۱۵۴۶۹	۱۵۴۶۹	۴۱.۵۸
BBO ³ [۱۸]	۱۵۴۴۳.۱	۱۵۴۴۳.۱	۱۵۴۴۳.۱	---
SOH-PSO ⁴ [۱۸]	۱۵۴۴۶	۱۵۴۹۷.۳	۱۵۴۹۷.۳	---
PSO-LRS ⁵ [۱۸]	۱۵۴۵۰	۱۵۴۵۴	۱۵۴۵۴	---
NPSO ⁶ [۱۸]	۱۵۴۵۰	۱۵۴۵۲	۱۵۴۵۲	---
NPSO-LRS ⁷ [۱۸]	۱۵۴۵۰	۱۵۴۵۰.۵	۱۵۴۵۰.۵	---
ISLFA	۱۵۴۴۲.۶۷	۱۵۴۴۲.۶۷	۱۵۴۴۲.۶۷	۲.۳۴

شکل (۲) روند همگرایی ISLFA به جواب بهینه در کمتر

1. Particle Swarm Optimization
2. Genetic Algorithm
3. Biogeography-Based Optimization
4. Self-Organizing Hierarchical Particle Swarm Optimization
5. Particle Swarm Optimization- local random search
6. New Particle Swarm Optimization
7. New Particle Swarm Optimization-Local Random Search

$$P_i = \begin{cases} PP_i^{\min} & \text{if } P_i < PP_i^{\min} \\ P_i & \text{if } PP_i^{\min} \leq P_i \leq PP_i^{\max} \\ PP_i^{\max} & \text{if } P_i > PP_i^{\max} \end{cases} \quad (16)$$

برای رعایت محدودیت نواحی ممنوعه تولید، اگر تولید واحدها در ناحیه ممنوعه k قرار بگیرد، میزان تولید آن به صورت زیر روی نزدیک‌ترین حد ناحیه ممنوعه مربوطه تنظیم می‌شود.

$$P_i = \begin{cases} P_{i,k}^l & \text{if } P_{i,k}^l < P_i \leq 0.5 \times (P_{i,k}^u + P_{i,k}^l) \\ P_{i,k}^u & \text{if } 0.5 \times (P_{i,k}^u + P_{i,k}^l) < P_i < P_{i,k}^u \end{cases} \quad (17)$$

(و) شرط توقف:

در این مقاله، شرط توقف الگوریتم، حداکثر تکرار مجاز در نظر گرفته شده است به گونه‌ای که فرآیند جستجو برای یک تعداد تکرار مشخص اجرا و در نهایت موقعیت بهترین قورباغه به عنوان پاسخ نهایی مسئله در نظر گرفته می‌شود.

۴. نتایج شبیه‌سازی و مطالعات عددی

در این بخش، نتایج حاصل از به کارگیری الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله ED ارائه و مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای نمایش کارایی روش پیشنهادی مطالعات عددی بر روی سیستم‌های ۶، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ واحدی انجام و نتایج حاصله با دیگر روش‌های موجود مقایسه شده است. مطالعات عددی توسط یک مازول نرم‌افزاری که مبتنی بر الگوریتم پیشنهادی در محیط MATLAB تهیه شده، بر روی یک رایانه پنتیوم IV، 2.60GHz با حافظه 3GB اجرا شده است. در انجام مطالعات عددی، پارامترهای مرتبط با الگوریتم قورباغه بهبودیافته به صورت جدول (۱) در نظر گرفته شده است.

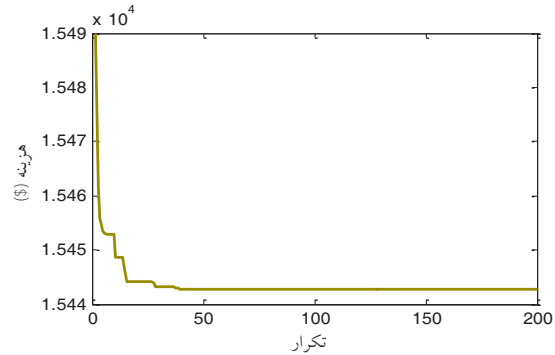
جدول (۱): پارامترهای مورد نیاز برای اجرای ISLFA

پارامتر	مقدار
اندازه جمعیت	۱۰۰
تعداد دسته	۱۰
تعداد تکرار جستجوی محلی در هر دسته	۸
ضریب جهش	۰.۸
ثابت تقاطع عمومی	۰.۳
ثابت تقاطع محلی	۰.۸۵

۴.۱. سیستم ۶ واحدی

در این آزمایش، مسئله ED برای یک سیستم ۶ واحدی حل شده است. در این سیستم، محدودیت‌های نواحی ممنوعه، نرخ تغییر تولید

از ۵۰ تکرار را نشان می‌دهد که گویای سرعت بسیار مناسب این الگوریتم است.



شکل (۲): روند همگرایی الگوریتم ISLFA در سیستم ۶ واحدی

۲.۴. سیستم ۱۰ واحدی

در این آزمایش، مسئله ED برای یک سیستم دارای ۱۰ واحد تولیدی حل شده است که در آن، ملاحظات مرتبط با سوخت چندگانه و اثر شیر بخار نیروگاه‌ها لحاظ شده است [۷]. در این سیستم، میزان بار ۲۷۰۰ مگاوات است و از تلفات شبکه انتقال صرف نظر شده است. در جدول (۴) ترکیب بهینه توان تولیدی واحدهای نیروگاهی و همچنین نوع سوخت مصرفی آن‌ها در پاسخ حاصله نشان داده شده و با دیگر روش‌ها مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوریتم پیشنهادی بهترین جواب را در بین روش‌های موجود ارائه می‌دهد.

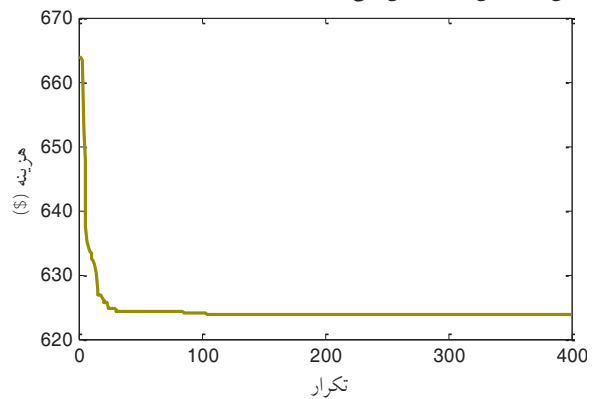
جدول (۴): مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی با سایر روش‌ها در سیستم ۱۰ واحدی

روش‌ها												تولید واحد
ISLFA		BBO* [۱۸]		CBPSO-RVM3 [۱۱]		PSO [۱۱]		IGA_MU2 [۷]		CGA_MU1 [۷]		
Fuel	P (MW)	Fuel	P (MW)	Fuel	P (MW)	Fuel	P (MW)	Fuel	P (MW)	Fuel	P (MW)	
۲	۲۱۸.۵۹۴	۲	۲۱۲.۹۶	۲	۲۱۹.۲۰۸	۲	۲۲۴.۷۰۶	۲	۲۱۹.۱۲۶	۲	۲۲۲.۰۱۱	P_1
۱	۲۱۱.۶۶۰	۱	۲۰۹.۴۳	۱	۲۱۰.۲۲۰	۱	۲۱۲.۳۸۸	۱	۲۱۱.۱۶۴	۱	۲۱۱.۶۳۵	P_2
۱	۲۸۰.۶۵۷	۳	۳۳۲.۰۲	۱	۲۷۸.۵۴۶	۱	۲۸۳.۴۴۰	۱	۲۸۰.۶۵۷	۱	۲۸۳.۹۴۵	P_3
۳	۲۴۰.۸۴۹	۳	۲۳۸.۳۴	۳	۲۳۹.۳۷۰	۳	۲۳۹.۹۵۳	۳	۲۳۸.۴۷۷	۳	۲۳۷.۸۰۵	P_4
۱	۲۷۹.۹۳۴	۱	۲۶۹.۲۵	۱	۲۷۶.۴۱۲	۱	۲۸۳.۸۱۹	۱	۲۷۶.۴۱۸	۱	۲۸۰.۴۴۸	P_5
۳	۲۳۹.۱۰۲	۳	۲۳۷.۶۴	۳	۲۴۰.۵۸۰	۳	۲۴۱.۰۰۲	۳	۲۴۰.۴۶۷	۳	۲۳۶.۰۳۳	P_6
۱	۲۸۷.۷۲۷	۱	۲۸۰.۶۱	۱	۲۹۲.۳۳۷	۱	۲۸۷.۸۶۷	۱	۲۸۷.۷۴۰	۱	۲۹۲.۰۵۰	P_7
۳	۲۳۹.۲۳۶	۳	۲۳۸.۴۷	۳	۲۳۷.۷۵۶	۳	۲۴۰.۶۲۴	۳	۲۴۰.۷۶۱	۳	۲۴۱.۹۷۱	P_8
۳	۴۲۶.۳۷۲	۳	۴۱۴.۸۶	۳	۴۲۹.۴۰۱	۳	۴۰۷.۹۸۷	۳	۴۲۹.۳۳۷	۳	۴۲۴.۲۰۱	P_9
۱	۲۷۵.۸۶۹	۱	۲۶۶.۳۸	۱	۲۷۶.۱۸۱	۱	۲۷۸.۲۱۲	۱	۲۷۵.۸۵۲	۱	۲۶۹.۹۰۱	P_{10}
۲۷۰۰		۲۷۰۰		۲۷۰۰		۲۷۰۰		۲۷۰۰		۲۷۰۰		مجموع تولید
۶۲۳.۸۳۸۱		۶۲۸.۶۷۶۹		۶۲۳.۹۵۸۸		۶۲۴.۳۵۰۶		۶۲۴.۵۱۷۸		۶۲۴.۷۱۹۳		هزینه کل

* هزینه تولید پیشنهادی توسط الگوریتم BBO در [۱۸] به اشتباه ۶۰۵.۶۳۸۷ ذکر شده است.

شکل (۳): نیز همگرایی الگوریتم پیشنهادی در تکرارهای مختلف

در این آزمایش را نمایش می‌دهد.



شکل (۳): روند همگرایی ISLFA در سیستم ۱۰ واحدی

۳.۴. سیستم ۲۰ واحدی

در این آزمایش، سیستم شامل ۲۰ واحد نیروگاهی در نظر گرفته شده است. میزان بار این سیستم ۲۵۰۰ مگاوات است و برای حل مسئله ED تلفات شبکه انتقال نیز در نظر گرفته شده است. اطلاعات کامل مربوط به این سیستم در [۱۳] ذکر شده است. با به کارگیری الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله، میزان تولید واحدهای نیروگاهی در پاسخ حاصله به صورت جدول (۵) خواهد بود.

۴.۴. سیستم ۴۰ واحدی

برای بررسی کارایی روش پیشنهادی در حل مسائل با ابعاد بزرگ، در این آزمایش، مسئله ED برای یک سیستم شامل ۴۰ واحد تولیدی حل شده است. بار این سیستم ۱۰۵۰۰ مگاوات می‌باشد و تأثیر شیر بخار در آن لحاظ شده است [۱۷]. میزان توان تولیدی هر واحد نیروگاهی در پاسخ به دست آمده در این آزمایش در جدول (۷) و مقایسه نتایج حاصله در ۳۰ بار اجرا با سایر روش‌ها در جدول (۸) آمده است. ملاحظه می‌شود که الگوریتم پیشنهادی از کارایی بالاتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است.

جدول (۷): نحوه توزیع توان در ژنراتورها در سیستم ۴۰ واحدی

تولید واحد	مقدار (MW)	تولید واحد	مقدار (MW)
P_1	۱۱۴	P_{21}	۵۲۳.۲۷۹۵
P_2	۱۱۴	P_{22}	۵۲۳.۲۷۹۵
P_3	۱۲۰	P_{23}	۵۲۳.۲۷۹۴
P_4	۱۷۹.۷۳۳۲	P_{24}	۵۲۳.۲۷۹۵
P_5	۹۷	P_{25}	۵۲۳.۲۷۹۶
P_6	۱۴۰	P_{26}	۵۲۳.۲۷۹۶
P_7	۲۵۹.۶۱۵۱	P_{27}	۱۰.۰۰۱
P_8	۲۸۵.۶۹۴۸	P_{28}	۱۰.۰۰۱
P_9	۳۰۰	P_{29}	۱۰.۰۰۰۱
P_{10}	۲۰۴.۸	P_{30}	۹۷
P_{11}	۹۴.۰۰۰۴	P_{31}	۱۹۰
P_{12}	۹۴.۰۰۰۱	P_{32}	۱۹۰
P_{13}	۲۱۴.۷۵۹۹	P_{33}	۱۹۰
P_{14}	۲۱۴.۷۶	P_{34}	۲۰۰
P_{15}	۳۰۴.۵۱۹۷	P_{35}	۲۰۰
P_{16}	۴۸۴.۰۳۹۳	P_{36}	۲۰۰
P_{17}	۴۸۹.۲۷۹۵	P_{37}	۱۱۰
P_{18}	۴۸۹.۲۷۹۶	P_{38}	۱۱۰
P_{19}	۵۱۱.۲۷۹۶	P_{39}	۱۱۰
P_{20}	۵۱۱.۲۷۹۵	P_{40}	۵۱۱.۲۷۹۷

مجموع توان تولیدی: ۱۰۵۰۰

جدول (۵): نتایج توان‌های تولیدی واحدها در سیستم ۲۰ واحدی

تولید واحد	مقدار (MW)	تولید واحد	مقدار (MW)
P_1	۵۱۲.۷۹۵۲	P_{11}	۱۵۰.۲۸۸۸
P_2	۱۶۹.۰۲۶۷	P_{12}	۲۹۲.۶۴۸۴
P_3	۱۲۶.۸۱۵۴	P_{13}	۱۱۹.۲۵۰۴
P_4	۱۰۲.۷۵۰۳	P_{14}	۳۰.۹۵۴۲
P_5	۱۱۳.۷۷۷۷	P_{15}	۱۱۵.۹۱۳۷
P_6	۷۳.۶۰۰۸	P_{16}	۳۶.۲۷۶۱
P_7	۱۱۵.۲۲۲۸	P_{17}	۶۶.۸۳۹
P_8	۱۱۶.۳۵۵۵	P_{18}	۸۷.۹۶۶۷
P_9	۱۰۰.۵۱۵۹	P_{19}	۱۰۰.۷۱۲۹
P_{10}	۱۰۵.۹۵۷۸	P_{20}	۵۴.۳۱۴۶

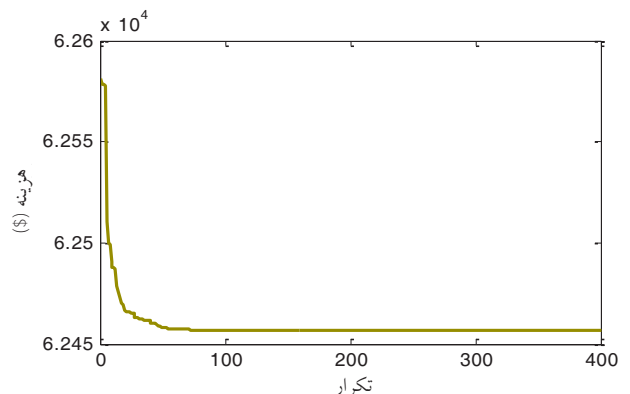
مجموع توان تولیدی: ۲۵۹۱.۹۸۳۱ تلفات: ۹۱.۹۸۳۱

نتایج ۳۰ بار اجرای الگوریتم پیشنهادی با دیگر روش‌های موجود در جدول (۶) مقایسه شده است که گویای عملکرد بهتر روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌هاست.

جدول (۶): مقایسه نتایج حاصله با دیگر روش‌ها در سیستم ۲۰ واحدی

روش	بهترین جواب	متوسط جواب‌ها	بدترین جواب	زمان (s)
BBO [۱۸]	۶۲۴۵۶.۷۹	۶۲۴۵۶.۷۹	۶۲۴۵۶.۷۹	----
LAMBDA [۱۸]	۶۲۴۵۶.۶۳	----	----	----
HM ¹ [۱۳]	۶۲۴۵۶.۶۳۴	----	----	----
ISLFA	۶۲۴۵۶.۶۳۳	۶۲۴۵۶.۶۳۷	۶۲۴۵۶.۶۵۶	۱۱.۴۳

در شکل (۴) نحوه همگرایی ISLFA به جواب بهینه مسئله در این آزمایش، نمایش داده شده است.

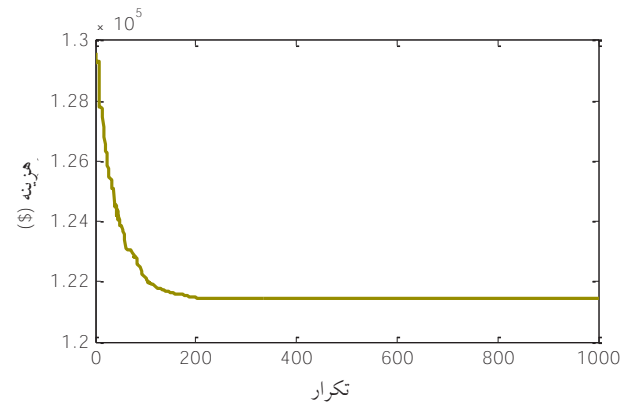


شکل (۴): روند همگرایی الگوریتم ISLFA در سیستم ۲۰ واحدی

جدول (۸): مقایسه نتایج حاصله با سایر روش‌ها در سیستم ۴۰ واحدی

روش	بهترین جواب	متوسط جواب‌ها	بدترین جواب	زمان (s)
HDE ¹ [۱۹]	۱۲۱۸۱۳.۲۶	۱۲۲۷۰۵.۶۶	----	----
ST-HDE ² [۱۹]	۱۲۱۶۹۸.۵۱	۱۲۲۳۰۴.۳	----	----
BBO [۱۸]	۱۲۱۴۲۶.۹۵	۱۲۱۵۰۸.۰۳۲	۱۲۱۶۸۸.۷	----
PSO-SQP3 [۱۱]	۱۲۲۰۹۴.۶۷	۱۲۲۲۴۵.۲۵	----	----
CBPSO-RVM [۱۱]	۱۲۱۵۵۵.۳۲	۱۲۲۲۸۱.۱۴	۱۲۳۰۹۵	----
QPSO4 [۱]	۱۲۱۴۴۸.۲۱	۱۲۲۲۲۵.۰۷	----	----
TSARGA5 [۸]	۱۲۱۴۶۳.۰۷	۱۲۲۹۲۸.۳۱	۱۲۴۲۹۶.۵	۶۹۶.۰۱
ISLFA	۱۲۱۴۲۴.۰۳	۱۲۱۵۴۵.۲۹	۱۲۱۸۵۵.۳۴	۱۴.۱۶

شکل (۵) نحوه همگرایی ISLFA به جواب بهینه مسئله در این آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل (۵): روند همگرایی الگوریتم ISLFA در سیستم ۴۰ واحدی

مشاهده می‌شود که با افزایش اندازه جمعیت دقت الگوریتم در رسیدن به جواب بهینه، افزایش می‌یابد، اما از طرف دیگر، سرعت انجام محاسبات کاهش می‌یابد.

۵. آنالیز حساسیت

در این بخش، تأثیر پارامترهای الگوریتم جهش قورباغه بهبودیافته بر روی دقت و سرعت پاسخ بررسی شده است. برای این منظور، آنالیز حساسیت در سیستم ۱۰ واحدی انجام شده است. در جدول (۹) حساسیت ISLFA نسبت به تغییرات ضریب جهش (F) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حالتی که ضریب جهش برابر ۰/۸ است، الگوریتم بهترین عملکرد را ارائه می‌کند.

جدول (۹): تأثیر تغییرات ضریب جهش در جواب نهایی ED

F	بهترین جواب	متوسط جواب‌ها	بدترین جواب
۰.۱	۶۲۴.۷۰۲	۶۲۷.۸۴۳	۶۳۱.۹۸
۰.۲	۶۲۴.۱۶۷	۶۲۶.۳۰۳	۶۳۱.۰۵۲
۰.۳	۶۲۴.۰۰۶	۶۲۵.۱۲۴	۶۲۷.۲۴۱
۰.۴	۶۲۳.۸۹۵	۶۲۴.۵۳۷	۶۲۶.۵۸۱
۰.۵	۶۲۳.۸۴۳	۶۲۳.۹۴۲	۶۲۴.۱۲۷
۰.۶	۶۲۳.۸۴۱	۶۲۳.۹۲۵	۶۲۴.۴۵۲
۰.۷	۶۲۳.۸۴	۶۲۳.۹۰۴	۶۲۴.۰۴۹
۰.۸	۶۲۳.۸۳۸	۶۲۳.۹۰۴	۶۲۴.۰۳۸
۰.۹	۶۲۳.۸۴۳	۶۲۳.۹۱۴	۶۲۴.۰۲۷
۱	۶۲۳.۸۸۵	۶۲۴.۱۰۳	۶۲۶.۳۹۹

در جدول‌های (۱۰) و (۱۱) آنالیز حساسیت روی پارامترهای ثابت تقاطع عمومی (CR_g) و ثابت تقاطع محلی (CR_b) انجام شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد بهترین مقدار CR_g و CR_b برای همگرایی مطلوب الگوریتم، به ترتیب ۰/۳ و ۰/۸۵ است.

جدول (۱۰): تأثیر تغییرات ثابت تقاطع عمومی در جواب نهایی ED

CR_g	بهترین جواب	متوسط جواب‌ها	بدترین جواب
۰.۱	۶۲۳.۸۴۲	۶۲۳.۹۱۸	۶۲۴.۰۶۱
۰.۲	۶۲۳.۸۵۲	۶۲۳.۹۰۸	۶۲۴.۰۳۳
۰.۳	۶۲۳.۸۳۸	۶۲۳.۹۰۴	۶۲۴.۰۳۸
۰.۴	۶۲۳.۸۴۶۶	۶۲۳.۹۱۷	۶۲۴.۰۱۴
۰.۵	۶۲۳.۸۴۴	۶۲۳.۸۹۶	۶۲۳.۹۹۶
۰.۶	۶۲۳.۸۶	۶۲۳.۹۲	۶۲۴.۱۶۵
۰.۷	۶۲۳.۸۴	۶۲۳.۸۹۴	۶۲۳.۹۷۶
۰.۸	۶۲۳.۸۴۷	۶۲۳.۹۰۲	۶۲۴.۰۴۲۸
۰.۹	۶۲۳.۸۴۴	۶۲۳.۸۹۹	۶۲۴.۰۵۷
۱	۶۲۳.۸۵۹	۶۲۳.۹۱۴	۶۲۴.۰۱۹۹

جدول (۱۱): تأثیر تغییرات ثابت تقاطع محلی در جواب نهایی ED

CR_b	بهترین جواب	متوسط جواب‌ها	بدترین جواب
۰.۱	۶۲۴.۲۱۸	۶۲۴.۴	۶۲۴.۵۵۲
۰.۲۵	۶۲۴.۱۵۷	۶۲۴.۲۵۴	۶۲۴.۳۶۴
۰.۴	۶۲۴.۰۸۷	۶۲۴.۱۹۴	۶۲۴.۲۷۷
۰.۵۵	۶۲۴.۰۲۴	۶۲۴.۱۳۵	۶۲۴.۲۳
۰.۷	۶۲۳.۸۴۳	۶۲۳.۹۵۸	۶۲۴.۱۲۲
۰.۸۵	۶۲۳.۸۳۸	۶۲۳.۹۰۴	۶۲۴.۰۳۸
۱	۶۲۳.۸۶۷	۶۲۴.۰۴۴	۶۲۵.۵۳۹

- Hybrid Differential Evolution
- Self Tuning Hybrid Differential Evolution
- Particle Swarm Optimization and Sequential Quadratic Programming
- Quantum Particle Swarm Optimization
- Taguchi Self-Adaptive Real-Coded Genetic Algorithm

- [5] El-Keib, A.A., Ma, H., Hart, J.L., "Environmentally Constrained Economic Dispatch Using the Lagrangian Relaxation Method", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 4, pp. 1723–1729, 1994.
- [6] Walters, D.C., Sheble, G.B. "Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with Valve Point Loading", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 1325–1332, 1993.
- [7] Chiang, C.L., "Improved Genetic Algorithm for Power Economic Dispatch of Units with Valve-Point Effects and Multiple Fuels", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 4, pp. 1690–1699, 2005.
- [8] Subbaraj, P., Rengaraj, R., Salivahanan, S., "Enhancement of Self-adaptive Real-coded Genetic Algorithm Using Taguchi Method for Economic Dispatch Problem", Applied Soft Computing, Vol. 11, No. 1, pp. 83–92, 2011.
- [9] Gaing, Z.L., "Particle Swarm Optimization to Solving the Economic Dispatch Considering the Generator Constraints", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 3, pp. 1187–1195, 2003.
- [10] Park, J.B., Lee, K.S., Shin, J.R., Lee, K.Y. "A Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Nonsmooth Cost Functions", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 1, pp. 34–42, 2005.
- [11] Lu, H., Sriyanyong, P., Song, Y.H., Dillon, T., "Experimental Study of a New Hybrid PSO with Mutation for Economic Dispatch with Non-smooth Cost Function", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 32, No. 9, pp. 921–935, 2010.
- [12] Selvakumar, A.I., Thanushkodi, K., "New Particle Swarm Optimization Solution to Nonconvex Economic Dispatch Problems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 1, pp. 42–51, 2007.
- [13] Su, C.T., Lin, C.T., "New Approach with a Hopfield Modeling Framework to Economic Dispatch", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 2, pp. 541–545, 2000.
- [14] Wong, K.P., Fung, C.C., "Simulated Annealing Based Economic Dispatch Algorithm", IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution, Vol. 140, No. 6, pp. 509–515, 1993.
- [15] Panigrahi, B.K., Pandi, V.R., "Bacterial Foraging Optimization: Nelder-Mead Hybrid Algorithm for Economic Load Dispatch", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 2, No. 4, pp. 556–565, 2008.
- [16] Pothiya, S., Ngamroo, I., "Ant Colony Optimisation for Economic Dispatch Problem With Non-smooth Cost

در جدول (۱۲) نیز تأثیر اندازه جمعیت بر جواب نهایی بررسی شده است.

جدول (۱۲): تأثیر اندازه جمعیت در جواب نهایی ED

جمعیت اولیه	بهترین جواب	متوسط جواب‌ها	بدترین جواب	زمان (S)
۲۰	۶۲۳۸۶۵	۶۲۴۰۶۵۷	۶۲۶۰۹۸۰	۴۰۵
۴۰	۶۲۳۸۴۷	۶۲۳۰۹۹۱	۶۲۴۰۹۱۳	۴۰۵
۶۰	۶۲۳۸۴۲	۶۲۳۰۹۱۸	۶۲۴۰۶۲	۵۰۵
۸۰	۶۲۳۸۴۲	۶۲۳۰۹۱۱	۶۲۴۰۶۸	۵۰۵
۱۰۰	۶۲۳۸۳۸	۶۲۳۰۹۰۴	۶۲۴۰۳۸	۵۰۵

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه بهبودیافته برای حل مسئله توزیع اقتصادی بار با در نظر گرفتن ملاحظات و محدودیت‌های عملی نیروگاه‌ها ارائه شد. برای بررسی کارایی روش پیشنهادی از چند سیستم نمونه، استفاده و نتایج عددی به دست آمده ارائه شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی با دیگر روش‌های موجود گویای برتری روش پیشنهادی از نظر سرعت و دقت نسبت به سایر روش‌هاست. نتایج به دست آمده در سیستم‌های متفاوت با محدودیت‌های عملی مختلف نشان می‌دهد که روش ارائه شده ابزار مناسبی برای حل مسئله ED در سیستم‌های قدرت است.

مراجع

- [1] Meng, K., Wang, H.G., Dong, Z.Y., Wong, K. P., "Quantum-Inspired Particle Swarm Optimization for Valve-point Economic Load Dispatch", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, No. 1, pp. 215–222, 2010.
- [2] Granville, S., "Optimal Reactive Dispatch through Interior Point Methods", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 136–146, 1994.
- [3] Chen, C.L., Wang, S.C., "Branch-and-Bound Scheduling for Thermal Generating Units", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 8, No. 2, pp. 184–189, 1993.
- [4] Liang, Z.X., Glover, J.D., "A Zoom Feature for a Dynamic Programming Solution to Economic Dispatch Including Transmission Losses", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 2, pp. 544–550, 1992.

- Functions*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 32, No. 5, pp. 478–487, 2010.
- [17] Sinha, N., Chakrabarti, R., Chattopadhyay, P. K., "Evolutionary Programming Techniques for Economic Load Dispatch", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 7, No. 1, pp. 83–94, 2003.
- [18] Bhattacharya, A., Chattopadhyay, P.K., "Biogeography-Based Optimization for Different Economic Load Dispatch Problems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, No. 2, pp. 1064–1077, 2010.
- [19] Wang, S.K., Chiou, J.P., Liu, C.W., "Non-smooth/Non-convex Economic Dispatch by a Novel Hybrid Differential Evolution Algorithm", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 1, No. 5, pp. 793–803, 2007.
- [20] Bhattacharya, A., Chattopadhyay, P.K., "Hybrid Differential Evolution with Biogeography-Based Optimization for Solution of Economic Load Dispatch", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, No. 4, pp. 1955–1964, 2010.
- [21] Neto, J.X.V., Bernert, D.L.A., Coelho, L.S., Improved Quantum-inspired Evolutionary Algorithm with Diversity Information Applied to Economic Dispatch Problem with Prohibited Operating Zones, Energy Conversion and Management, in press.
- [22] Eusuff, M.M., Lansey, K.E., "Optimization of Water Distribution Network Design Using the Shuffled Frog Leaping Algorithm", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 129, No. 3, pp. 210–225, 2003.
- [23] Robinson, J., Samii, R., "Particle Swarm Optimization in Electromagnetic", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 52, No. 2, pp. 397–407, 2004.
- [24] Wood A.J., Wollenberg B.F., Power Generation, Operation and Control, New York: Wiley, 1984.