

توزیع بار بین نیروگاه‌ها به منظور کاهش هم‌زمان هزینه سوخت و آلاینده‌های زیست‌محیطی

امیر امینی¹، حمید فلقی^{2*}، مریم رمضانی³

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

am.bi@yahoo.com

² استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

falaghi@birhand.ac.ir

³ استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

mramezani@ieee.org

دریافت مقاله: 91/2/13 اصلاحیه: 91/8/8

پذیرش مقاله: 91/12/14

چکیده: در توزیع اقتصادی بار که یکی از مسائل مهم در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت محسوب می‌شود، میزان تولید هر نیروگاه به منظور تأمین بار سیستم با هدف کمینه‌سازی هزینه سوخت تعیین می‌شود. در سال‌های اخیر با توجه به نگرانی روزافزون از افزایش آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از نیروگاه‌های فسیلی، مسئله توزیع اقتصادی بار با در نظر گرفتن آلودگی نیروگاه‌ها مطرح شده است که در آن، هزینه تولید و آلودگی به صورت هم‌زمان کمینه می‌شوند. در این مقاله، برای در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی در مسئله توزیع اقتصادی بار، توابع هزینه سوخت و میزان آلودگی نیروگاه‌ها با یکدیگر ترکیب شده است. علاوه بر این برای در نظر گرفتن شرایط واقعی، تلفات شبکه انتقال نیز در مدل‌سازی لحاظ شده است. برای حل مسئله از روش بهینه‌سازی جدیدی مبتنی بر جهش قورباغه که از سرعت و دقت بالایی برخوردار است، استفاده شده است. به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، مسئله برای دو سیستم 6 و 11 ژنراتوری، پیاده‌سازی و نتایج با دیگر روش‌ها مقایسه شده است. نتایج مطالعات عددی، برتری روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جهش قورباغه اصلاح شده، بهره‌برداری از سیستم قدرت، بهینه‌سازی، توزیع اقتصادی- زیست‌محیطی بار.

به گونه‌ای که مقدار آن از یک حد مجاز نباید بیشتر گردد. از این استراتژی در تحقیقات دیگر نیز برای کنترل آلودگی نیروگاه‌ها استفاده شده است [8 و 9]. بزرگ‌ترین ایراد این روش آن است که اگرچه در آن آلودگی نیروگاه‌ها تا حدی کنترل می‌شود، الزاماً میزان صدور گازهای آلاینده کمینه نمی‌گردد، ضمن اینکه در بسیاری از موارد، تعیین حد مجاز آلودگی کار ساده‌ای نیست. یکی از روش‌های برطرف کردن این مشکل، کمینه کردن هم‌زمان آلودگی و هزینه تولید توسط ترکیب توابع آلودگی و هزینه تولید نیروگاه‌هاست. در این استراتژی، توابع آلودگی و هزینه تولید با استفاده از ضریب جریمه آلودگی با یکدیگر ترکیب شده و در قالب یک تابع هدف در فرآیند توزیع اقتصادی بار وارد می‌شود [10-14]. در حقیقت در این روش، هزینه آلودگی با استفاده از ضریب جریمه آلودگی محاسبه شده و سپس با اضافه شدن به هزینه سوخت، تابع هزینه کل مسئله EED را ایجاد می‌کند.

برای حل مسئله EED روش‌های مختلفی ارائه شده است که می‌توان آن‌ها را به دو دسته کلاسیک و تکاملی تقسیم‌بندی کرد. روش‌های تحلیلی [15 و 16]، لاگرانژ [17] و نیوتن رافسون [18] از جمله اولین روش‌های ارائه شده برای حل این مسئله بودند که در دسته کلاسیک جای می‌گیرند. با مدل‌سازی واقعی‌تر، مسئله و در نظر گرفتن قیود عملی نیروگاه‌ها بر پیچیدگی مسئله افزوده می‌شود به گونه‌ای که امکان دست‌یابی به پاسخ مطلوب با استفاده از این روش‌ها وجود ندارد. به همین دلیل در سال‌های اخیر، روش‌های تکاملی برای حل این مسئله به کار گرفته شده‌اند. روش‌های تکاملی همچون الگوریتم ژنتیک [19]، اجتماع ذرات [20]، سخت‌کاری فولاد [21]، سیستم ایمنی مصنوعی [22] و تکاملی تفاضلی [23] برای حل مسئله توزیع اقتصادی بار با در نظر گرفتن آلودگی مطرح شده‌اند که از نظر سرعت اجرا و دقت با هم متفاوت‌اند.

در این مقاله، مسئله EED در قالب ترکیب توابع هزینه و آلودگی نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن تلفات شبکه انتقال مطرح شده است. برای حل مدل ریاضی مربوط، روشی مبتنی بر الگوریتم جهش قورباغه بهبودیافته پیشنهاد و مراحل کاربرد آن تشریح شده است. این الگوریتم تکاملی یکی از روش‌های نوین بهینه‌سازی محسوب می‌شود که از قابلیت بالایی در حل مدل‌های ریاضی غیرخطی برخوردار است. به منظور نمایش و بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی از دو سیستم آزمون 6 و 11 ژنراتوری استفاده شده و نتایج حل مسئله EED در حالات مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

2. فرمول‌بندی مسئله

در مسئله توزیع اقتصادی بار با در نظر گرفتن آلودگی، هدف کنترل هزینه سوخت و آلودگی ناشی از نیروگاه‌ها به صورت هم‌زمان دنبال می‌شود.

توزیع اقتصادی بار، یکی از مهم‌ترین مسائل در بهره‌برداری از سیستم قدرت است. هدف از این مسئله آن است که با تخصیص بهینه تولید هر یک از نیروگاه‌ها علاوه بر تأمین بار مورد تقاضای سیستم، هزینه سوخت کمینه گردد. از سوی دیگر، نیروگاه‌های فسیلی، یکی از مهم‌ترین منابع آلاینده محیط‌زیست محسوب می‌شوند و طیف وسیعی از انواع آلاینده‌ها را که ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی است، وارد هوا می‌کنند. عمده گازهای تولید شده در نیروگاه‌ها شامل دی‌اکسید گوگرد (SO_2)، اکسید ازت و ترکیبات آن (NO_x)، دی‌اکسید کربن (CO_2)، مونوکسید کربن (CO)، ذرات معلق و ازون می‌باشند. چهار مورد اول مستقیماً در اثر مصرف سوخت و ازون از جمله آلاینده‌های شیمیایی است که بعداً در هوا تشکیل می‌شود. هر یک از این گازها نه تنها برای انسان مضر است بلکه به گیاهان، حیوانات و محیط زیست نیز آسیب وارد می‌کند و تغییر نامطلوب الگوی آب و هوایی زمین را موجب می‌شود. با توجه به محدودیت‌های موجود در بکارگیری گسترده منابع انرژی پاک برای تولید انرژی الکتریکی، استفاده از سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای آلاینده ناشی از آن، امری غیرقابل اجتناب به نظر می‌رسد. به همین دلیل، ضروری است با توجه به مضرات این آلاینده‌ها و نیز حساسیت افکار عمومی نسبت به افزایش آن‌ها، میزان صدور این گازها در نیروگاه‌های فسیلی کاهش یابد. استراتژی‌های مختلفی برای کاهش آلودگی این نیروگاه‌ها وجود دارد که می‌توان آن‌ها را در سه دسته زیر تقسیم‌بندی کرد:

- نصب تجهیزات تمیزکننده یا فیلترکننده آلاینده‌ها در محل نیروگاه‌ها؛
- جایگزینی تجهیزات قدیمی با تجهیزات جدید و به‌روز؛
- بهره‌برداری از نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن آلاینده‌های زیست‌محیطی.

دو گزینه اول نیاز به نصب تجهیزات جدید یا اصلاح ساختار موجود نیروگاه‌ها دارد که مستلزم سرمایه‌گذاری بالایی است، به همین علت در برنامه‌ریزی‌های درازمدت در نظر گرفته می‌شود. اما وارد کردن ملاحظات زیست‌محیطی در بهره‌برداری از نیروگاه‌ها که در قالب توزیع اقتصادی بار با در نظر گرفتن آلاینده‌های زیست‌محیطی (EED¹) مطرح می‌شود، یک روش برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت است که در آن سعی می‌شود علاوه بر هزینه تولید، کمینه‌سازی میزان صدور گازهای آلاینده نیز در نظر گرفته شود [1]. مقالات مختلفی در زمینه توزیع اقتصادی بار بدون در نظر گرفتن آلودگی نیروگاه‌ها ارائه شده‌اند [2-6]. برای در نظر گرفتن آلودگی نیروگاه‌ها در فرآیند توزیع اقتصادی بار، راهکارهای متنوعی وجود دارد. فینگان و فواد برای اولین بار در سال 1974، آلودگی نیروگاه‌ها را در مسئله توزیع بار در نظر گرفتند [7]. در این مقاله، آلودگی به عنوان یک قید در مسئله توزیع اقتصادی بار وارد شده است

مطرح شده است [24] که در مرسوم‌ترین آن‌ها ضریب جریمه آلودگی برای هر واحد تولیدی به صورت میزان هزینه سوخت تقسیم بر مقدار آلودگی در حداکثر توان خروجی آن واحد تعریف می‌شود [25].

$$h_i = \frac{a_i P_{Gi}^{\max 2} + b_i P_{Gi}^{\max} + c_i}{\alpha_i P_{Gi}^{\max 2} + \beta_i P_{Gi}^{\max} + \gamma_i} \quad (4)$$

for $i = 1, \dots, M$

در این رابطه، h_i ضریب جریمه آلودگی و P_{Gi}^{\max} حداکثر توان خروجی نیروگاه i ام را نشان می‌دهد.

2.2. محدودیت‌ها

در مسئله EED محدودیت‌های زیر در نظر گرفته شده‌اند:

(الف) محدودیت ظرفیت تولید:

توان تخصیص داده شده به هر واحد نیروگاهی باید در محدوده مجاز توان تولیدی آن نیروگاه باشد. این قید در قالب ریاضی به صورت رابطه (5) بیان می‌شود:

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad \text{for } i = 1, \dots, M \quad (5)$$

در این رابطه P_{Gi}^{\max} و P_{Gi}^{\min} به ترتیب حداقل و حداکثر توان تولیدی مجاز نیروگاه i ام می‌باشد.

(ب) محدودیت تعادل توان:

مجموع توان تولیدی واحدهای نیروگاهی باید به گونه‌ای باشد که با مجموع توان بار سیستم و تلفات شبکه انتقال برابری کند. بنابراین این قید تساوی را می‌توان در قالب ریاضی به صورت زیر بیان نمود:

$$\sum_{i=1}^M P_{Gi} = P_D + P_L \quad (6)$$

در این رابطه، P_D بار سیستم و P_L تلفات شبکه انتقال می‌باشد. تلفات شبکه انتقال به ساختار فیزیکی شبکه و مقدار توان تولیدی بستگی دارد و از رابطه زیر به دست می‌آید [26].

$$P_L = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^M B_{0i} P_i + B_{00} \quad (7)$$

در این رابطه B_{0i} ، B_{ij} و B_{00} ضرایب رابطه تلفات شبکه هستند که به طور مستقیم با استفاده از ماتریس امپدانس شبکه به دست می‌آیند [26].

3. الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه اصلاح شده

1.3. معرفی الگوریتم جهش قورباغه

الگوریتم جهش قورباغه (SFLA¹) 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

این موضوع به صورت یک مسئله بهینه‌سازی مطرح می‌گردد که در آن تابع هدف از ترکیب توابع هزینه سوخت و آلودگی نیروگاه‌ها به دست می‌آید و محدودیت‌های مختلفی برای حل آن در نظر گرفته می‌شود.

1.2. تابع هدف

برای توزیع اقتصادی بار بین نیروگاه‌ها لازم است هزینه بهره‌برداری هر نیروگاه بر حسب توان خروجی آن بیان شود. با توجه به اینکه هزینه سوخت، اساسی‌ترین عامل هزینه نیروگاه‌هاست، معمولاً تابع هزینه بهره‌برداری واحدهای نیروگاهی بر اساس هزینه سوخت ورودی بیان می‌شود که در اکثر موارد به صورت یک تابع درجه دوم بر حسب توان اکتیو خروجی واحد نیروگاهی است؛ بنابراین تابع هزینه تولید نیروگاه‌ها به صورت زیر است:

$$F_C = \sum_{i=1}^M a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i \quad (1)$$

در این رابطه، M تعداد نیروگاه‌های در مدار سیستم، a_i ، b_i ، c_i ضرایب هزینه تولید واحد نیروگاهی i ام، P_{Gi} توان تولیدی نیروگاه i ام و F_C هزینه تولید (بر حسب دلار) می‌باشند.

با توجه به اینکه عمده آلودگی نیروگاه‌ها ناشی از تولید گازهای SO_2 و NO_x می‌باشد، به همین دلیل ضروری است به منظور کاهش آلودگی نیروگاه‌ها میزان صدور این گازها حداقل گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در میزان صدور گازهای آلاینده مزبور از نیروگاه‌ها، توان اکتیو خروجی آن‌ها می‌باشد. رابطه بین آلودگی یک نیروگاه و توان اکتیو خروجی آن، یک رابطه غیرخطی است که می‌توان آن را به صورت یک تابع درجه دوم از توان خروجی مدلسازی کرد [1]. بنابراین تابع تولید آلودگی نیروگاه‌ها به صورت زیر قابل بیان است:

$$F_E = \sum_{i=1}^M \alpha_i P_{Gi}^2 + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i \quad (2)$$

که در آن، α_i ، β_i ، γ_i ضرایب تابع آلودگی نیروگاه i ام و F_E کل آلودگی سیستم (بر حسب کیلوگرم) می‌باشد.

تابع هدفی که در مسئله EED باید کمینه گردد، از ترکیب تابع هزینه سوخت و تابع آلودگی نیروگاه‌ها به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$F_T = w \times \sum_{i=1}^M (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) + \quad (3)$$

$$(1-w) \times \sum_{i=1}^M h_i (\alpha_i P_{Gi}^2 + \beta_i P_{Gi} +$$

که در آن، w ضریب وزنی کاهش هزینه سوخت، h_i ضریب جریمه آلودگی واحد تولیدی i ام می‌باشد. ضریب جریمه آلودگی با توجه به دیدگاه بهره‌بردار و ارزش آلودگی مد نظر می‌تواند مقادیر مختلفی داشته باشد. در تحقیقات انجام شده، روش‌های متنوعی برای تعریف این ضریب

توزیع بار بین نیروگاه‌ها به منظور کاهش هم‌زمان هزینه سوخت و ... 5

گام 3) بهترین جواب کل دسته‌ها (X_g) ، جایگزین X_b در رابطه (8) می‌شود و سپس با استفاده از رابطه (9) قورباغه جدید به دست می‌آید. در صورتی که بهبودی در جواب حاصل شود، قورباغه جدید جایگزین قورباغه قبلی شده و فرآیند به گام 5 می‌رود. در غیر این صورت، گام 4 اجرا می‌شود.

گام 4) یک قورباغه جدید به صورت تصادفی تولید، و جایگزین بدترین قورباغه دسته می‌شود.

گام 5) گام‌های 1 تا 4 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 به یکی از صورت‌های زیر انتخاب شود:

- تغییرات برازندگی بهترین جواب در هر تکرار از اختلاف مجاز که از پیش تعیین شده، کمتر باشد.
- تعداد تکرارهای الگوریتم به یک حداکثر برسد.

2.3. الگوریتم جهش قورباغه اصلاح شده

در الگوریتم قورباغه کلاسیک که در بخش قبل تشریح شد، حرکت بدترین قورباغه در هر دسته بین بهترین (X_b) و بدترین موقعیت (X_w) محدود شده است، در حالی که ممکن است موقعیت بهتری در همسایگی X_b قرار داشته باشد. برای در نظر گرفتن این حالت می‌توان با استفاده از رابطه زیر به جای رابطه (8)، محدوده جستجو و حرکت قورباغه را گسترش داد:

$$D = c \times \text{rand} \times (X_b - X_w) \quad (10)$$

در اینجا c (ضریب جهش) یک مقیاس برای گسترش اندازه گام حرکتی قورباغه است و عددی بزرگ‌تر از 1 می‌باشد. لازم به توضیح است که c نمی‌تواند خیلی بزرگ انتخاب شود، زیرا ممکن است فاصله از بهترین موقعیت بسیار زیاد شود و یا الگوریتم دچار همگرایی زود هنگام گردد. علاوه بر این، با توجه به اینرسی حرکتی، هر قورباغه تمایل دارد که وضعیت حرکت کنونی خود را حفظ کند؛ بنابراین رابطه جهش هر قورباغه را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد [23]:

$$D^k = u \times D^{k-1} + c \times \text{rand} \times (X_b - X_w) \quad (11)$$

در این رابطه، D^k اندازه جهش در k امین تکرار الگوریتم است که وابسته به اندازه حرکت در تکرار قبلی می‌باشد. پارامتر u ، وزن اینرسی است. مقادیر بزرگ u در جستجوی کلی و مقادیر کوچک u در جستجوی محلی برای یافتن جواب بهینه دخالت دارند. استراتژی

برای اولین بار در سال 2003 مطرح شد [27]. در این الگوریتم به هر یک از اعضای جمعیت، یک قورباغه گفته می‌شود که در آن با استفاده از دو استراتژی جستجوی محلی و جستجوی کلی، قورباغه‌های نسل بعد تولید می‌شوند 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 هر یک از قورباغه‌ها در محدوده فضای جواب باشند. 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 است.

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 نحوی 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.

ج) جستجوی محلی:

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 می‌یابد. برای این منظور به تعداد تکرارهای مشخص برای هر دسته از قورباغه‌ها گام‌های زیر تکرار می‌شود.

گام 1) بهترین و بدترین قورباغه دسته بر اساس مقدار ارزش موقعیت تعیین و به ترتیب X_w و X_b نامیده می‌شود.

گام 2) موقعیت بدترین قورباغه دسته (X_w) با توجه به موقعیت بهترین قورباغه دسته (X_b) به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$D = \text{rand} \times (X_b - X_w) \quad (8)$$

$$X_w^{\text{new}} = X_w^{\text{old}} + D \quad (9)$$

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 شود، قورباغه جدید جایگزین قورباغه قبلی می‌شود و فرآیند به گام 5 می‌رود. در غیر این صورت، گام 3 اجرا می‌شود.

سمت رعایت کامل قید تساوی مسئله هدایت خواهند شد؛ بنابراین، گام‌های زیر برای تولید موقعیت اولیه هرکدام از قورباغه‌ها اجرا می‌شود:

گام (1) $i = 1$ قرار داده می‌شود.

گام (2) یک درایه (به عبارت دیگر یک واحد نیروگاهی) از موقعیت قورباغه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود.

گام (3) مقدار درایه منتخب (به عبارت دیگر، میزان تولید واحد نیروگاهی مربوط) با استفاده از رابطه زیر به صورت تصادفی در بازه مجاز آن تولید می‌شود:

$$P_{Gi} = P_{Gi}^{\min} + \text{rand} \times (P_{Gi}^{\max} - P_{Gi}^{\min}) \quad (13)$$

که در آن rand یک عدد تصادفی یکنواخت بین صفر و یک می‌باشد.

گام (4) اگر $i = M - 1$ است، فرآیند به گام 5 می‌رود، در غیر این صورت $i = i + 1$ قرار داده می‌شود و فرآیند از گام 2 تکرار می‌شود.

گام (5) مقدار آخرین درایه موقعیت قورباغه با کم کردن مقادیر دیگر درایه‌ها از بار سیستم P_D تعیین می‌شود. اگر این مقدار در محدوده مجاز تولید واحد نیروگاهی مربوط است، فرآیند پایان می‌یابد در غیر این صورت از گام 1 تکرار می‌شود.

با به‌کارگیری مراحل فوق، موقعیت اولیه قورباغه‌ها ضمن برخورداری از ماهیت تصادفی همواره قیود نامساوی و نیز قید تساوی بدون در نظر گرفتن تلفات را رعایت خواهند کرد. این امر می‌تواند به کاهش حجم محاسبات در راستای رعایت قیود مسئله و نیز دستیابی به پاسخ مطلوب کمک کند.

ب) محاسبه برآزش قورباغه‌ها:

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

$$F_T' = F_T + \lambda \times \left| \sum_{i=1}^M P_{Gi} - (P_D + P_L) \right| \quad (14)$$

که در آن، F_T' تابع تعیین برآزش قورباغه‌ها و λ ضریب جریمه محدودیت تعادل توان است. بدیهی است اگر قید تساوی (6) برای موقعیت یک قورباغه رعایت شود، تابع فوق برابر تابع هدف مسئله خواهد بود. در غیر این صورت، یک مقدار مثبت متناسب با میزان

معمول استفاده شده بدین ترتیب است که در تکرارهای اولیه به منظور جستجوی کلی جواب بهینه از مقادیر بزرگ برای این پارامتر استفاده می‌شود و به تدریج به منظور افزایش دقت الگوریتم جهت یافتن جواب بهینه مطلق از مقدار u کاسته می‌شود.

$$u = u_{\max} - \frac{u_{\max} - u_{\min}}{k_{\max}} \times k \quad (12)$$

در این رابطه، u_{\max} و u_{\min} به ترتیب، وزن اولیه و نهایی اینرسی و k شمارنده تکرار الگوریتم است. k_{\max} نیز حداکثر تعداد تکرار الگوریتم را نشان می‌دهد.

با گسترش مناسب گام حرکتی قورباغه، احتمال توقف الگوریتم در جواب‌های بهینه محلی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، با توجه به اینکه حرکت هر قورباغه به گام قبلی آن وابسته است، این الگوریتم حافظه‌دار می‌باشد. این امر سبب می‌شود گام بعدی هر قورباغه در راستای گام قبلی آن تعیین شود و از حرکت هر قورباغه برای رسیدن به جواب بهینه استفاده شود.

3.3 کاربرد الگوریتم جهش قورباغه اصلاح شده در مسئله

EED

در این مقاله، روشی مبتنی بر الگوریتم جهش قورباغه اصلاح شده ($MSFLA^1$) برای حل مسئله EED ارائه شده است. جزئیات به کارگیری این الگوریتم در مسئله حاضر که در قالب فلوجارت در شکل (1) نمایش داده شده است، در ادامه تشریح می‌گردد.

الف) ساختار قورباغه‌ها و مقداردهی اولیه:

در فرآیند مقداردهی اولیه، موقعیت مجموعه‌ای از قورباغه‌ها به صورت تصادفی تولید می‌شود. در این مقاله، موقعیت هر یک از قورباغه‌ها یک پاسخ از مسئله EED و درایه‌های آن تولید واحدهای نیروگاهی را نشان می‌دهد؛ بنابراین، موقعیت قورباغه j را می‌توان به صورت بردار $X_j = (P_{G1,j}, P_{G2,j}, \dots, P_{GM,j})$ نمایش داد که در آن، M تعداد واحدهای نیروگاهی است. در فرآیند جستجو لازم است موقعیت قورباغه‌ها به گونه‌ای انتخاب شود که قیود نامساوی (5) و قید تساوی (6) رعایت شوند. در روش پیشنهادی این مقاله به منظور رعایت قید تساوی مسئله از راهکار ضریب جریمه در برآزش استفاده شده است. با وجود این، به منظور افزایش کارایی الگوریتم، فرآیند مقداردهی اولیه موقعیت قورباغه‌ها به گونه‌ای تدوین شده است که تا حد امکان به رعایت قید تساوی نزدیک باشد. به این منظور در تولید تصادفی موقعیت اولیه قورباغه‌ها سعی می‌شود تا قید (6) بدون در نظر گرفتن تلفات شبکه انتقال رعایت شود. بدیهی است پاسخ‌ها در مراحل تکرار الگوریتم با به کارگیری ضریب جریمه در برآزش به

(د) جستجوی محلی:

برای هر یک از دسته‌های قورباغه‌ها، جستجوی محلی مطابق با فرآیند ارائه شده در بخش 1.3 ج و مبتنی بر راهکار اصلاحی که در بخش 2.3 تشریح شده است، انجام می‌شود.

(ه) رعایت قیود نامساوی:

هنگام تولید یک موقعیت جدید برای بدترین قورباغه‌ها در فرآیند جستجوی محلی این امکان وجود دارد که قیود نامساوی مسئله نقض گردد؛ بنابراین، برای این‌گونه قورباغه‌ها، درایه‌های (توان تولیدی) مربوط به واحدهای نیروگاهی که قیود حداقل یا حداکثر تولید در آن‌ها رعایت نشده است، به ترتیب روی حد پایین یا حد بالای تولید واحدهای مربوط تنظیم می‌شوند. این موضوع را می‌توان به صورت زیر در قالب ریاضی بیان کرد.

$$P_{i,w}^{new} = \begin{cases} P_{i,w}^{min} & \text{if } P_{i,w}^{old} + d_i^k < P_{i,w}^{min} \\ P_{i,w}^{old} + d_i^k & \text{if } P_{i,w}^{min} \leq P_{i,w}^{old} + d_i^k \leq P_{i,w}^{max} \\ P_{i,w}^{max} & \text{if } P_{i,w}^{old} + d_i^k > P_{i,w}^{max} \end{cases} \quad (15)$$

for $i = 1, \dots, M$

در این رابطه، d_i^k درایه i ام بردار جهش D در تکرار k ام الگوریتم است. $P_{i,w}^{old}$ و $P_{i,w}^{new}$ نیز به ترتیب مقادیر فعلی و جدید درایه i ام موقعیت بدترین قورباغه را نشان می‌دهد.

(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.

4. مطالعات عددی و نتایج

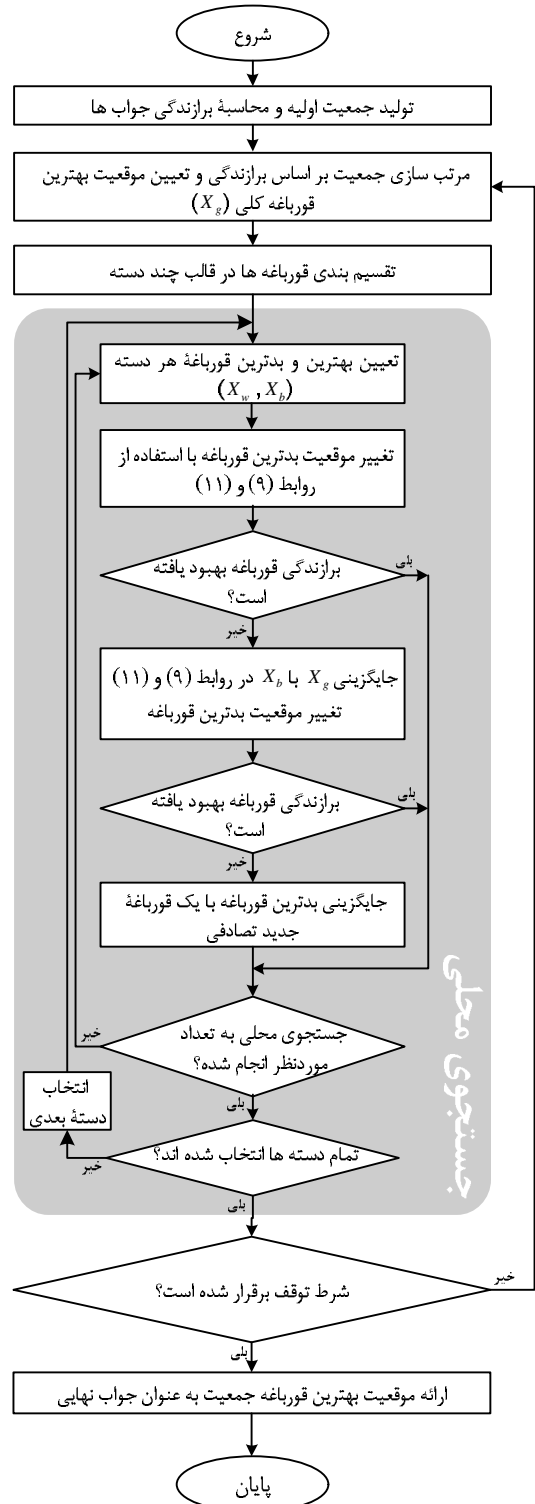
1.4. حل مسئله برای سیستم‌های آزمایش مختلف

در این قسمت، نتایج حاصل از به کارگیری الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله EED ارائه و مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. برای انجام مطالعات عددی و نمایش کارایی روش پیشنهادی از دو سیستم آزمون 6 و 11 واحد نیروگاهی استفاده و نتایج حاصل از اعمال این روش ارائه و با دیگر روش‌های موجود مقایسه شده است. مطالعات عددی توسط یک ماژول نرم‌افزاری که مبتنی بر الگوریتم پیشنهادی در محیط MATLAB تهیه شده، بر روی یک رایانه پنتیوم IV، 2/60 GHz با حافظه 2 GB اجرا شده است.

تخطی قید مربوط به تابع هدف افزوده و موجب کاهش برانزنگی موقعیت قورباغه مزبور خواهد شد.

(ج) مرتب‌سازی و دسته‌بندی:

قورباغه‌ها بر اساس میزان برآزش موقعیت آن‌ها مرتب و مطابق با استراتژی ارائه شده در بخش 1.3 ب دسته‌بندی می‌شوند.



شکل (1): فلوچارت الگوریتم MSLFA

جدول (2): ضرایب هزینه سوخت برای سیستم 6 واحدی [25]

ضرایب هزینه سوخت					واحد
P_{Gi}^{max}	P_{Gi}^{min}	c_i	b_i	a_i	تولیدی
125	10	756/8	38/54	0/1525	G ₁
150	10	451/325	46/16	0/1060	G ₂
225	35	1050	40/40	0/0280	G ₃
210	35	1243/53	38/10	0/0355	G ₄
325	130	1658/57	36/328	0/0211	G ₅
315	125	1356/66	38/270	0/0180	G ₆

جدول (3): ضرایب تابع آلودگی نیروگاه‌ها برای سیستم 6 واحدی [25]

ضرایب تابع آلودگی			واحد تولیدی
γ_i	β_i	α_i	
13/86	0/33	0/00420	G ₁
13/86	0/33	0/00420	G ₂
40/267	-0/54551	0/00683	G ₃
40/267	-0/54551	0/00683	G ₄
42/900	0/5112	0/00460	G ₅
42/900	0/5112	0/00460	G ₆

$$B = 10^{-4} \times \begin{bmatrix} 1/4 & 0/17 & 0/15 & 0/19 & 0/26 \\ 0/17 & 0/6 & 0/13 & 0/16 & 0/15 \\ 0/15 & 0/13 & 0/65 & 0/71 & 0/3 \\ 0/19 & 0/16 & 0/17 & 0/71 & 0/3 \\ 0/26 & 0/15 & 0/24 & 0/3 & 0/69 \\ 0/22 & 0/2 & 0/19 & 0/25 & 0/32 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$B_{\alpha} = 0, \quad B_{00} = 0$$

حالت الف-1: بدون در نظر گرفتن تلفات

در حالت بدون تلفات، نتایج به دست آمده با الگوریتم‌های تکرار λ [24]، بازگشتی [25]، بازگشتی ساده شده [24]، تکاملی تفاضلی [24]، اجتماع ذرات [24] و سخت‌کاری فولاد [29] مقایسه شده است و در جدول‌های (4) و (5) نمایش داده شده است. به منظور امکان مقایسه، همانند مراجع اشاره شده ضریب وزنی اهمیت هر یک از اهداف برابر 0/5 فرض شده است.

در انجام مطالعات عددی، پارامترهای مرتبط با الگوریتم قورباغه اصلاح شده به صورت جدول (1) در نظر گرفته شده است. انتخاب دقیق این پارامترها می‌تواند در رسیدن به جواب بهینه مؤثر باشد؛ برای مثال، افزایش جمعیت تا حد مشخصی، سبب افزایش کیفیت و در عین حال، کاهش سرعت الگوریتم می‌شود، به همین دلیل برای انتخاب اندازه جمعیت باید یک مصالحه منطقی بین دقت و سرعت الگوریتم به عمل آید. تعداد دسته‌ها نیز باید به گونه‌ای انتخاب گردد که تعداد قورباغه‌های موجود در هر دسته نه خیلی زیاد باشند که سبب افت کیفیت دسته گردد و نه خیلی کم که سبب محدود شدن حرکت قورباغه‌ها و در نتیجه، گرفتار شدن در یک بهینه محلی گردد. با توجه به تأثیرپذیری حرکت هر یک از اعضای یک گروه از یکدیگر، حداکثر تکرار مفید جستجوی محلی برابر اندازه دسته است. حداکثر تکرار الگوریتم نیز معمولاً به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که جواب‌های مسئله با دقت مناسبی در کمترین زمان ممکن به دست آید. در ادامه، آزمایش‌های انجام شده روی دو سیستم آزمایش مختلف تشریح و نتایج عددی حاصل از الگوریتم پیشنهادی ارائه شده‌اند.

جدول (1): پارامترهای مورد نیاز برای اجرای الگوریتم MSLFA

مقدار	پارامتر
30	اندازه جمعیت
10	تعداد دسته
3	تعداد تکرار جستجوی محلی در هر دسته
30	حداکثر تکرار الگوریتم
2	ضریب جهش
0/9	اینرسی اولیه
0/4	اینرسی نهایی

الف) سیستم 6 واحدی

ضرایب تابع هزینه سوخت و محدوده تولید واحدهای نیروگاهی و نیز ضرایب تابع آلودگی هر واحد این سیستم به ترتیب در جدول‌های (2) و (3) لیست شده است [25]. ضرایب فرمول تلفات شبکه انتقال این سیستم در رابطه (16) نشان داده شده است [28]. مسئله EED برای این سیستم در دو حالت با و بدون تلفات در سطوح بار متغیر از 500 تا 1100 مگاوات، با استفاده از الگوریتم MSLFA حل شده است.

9 توزیع بار بین نیروگاه‌ها به منظور کاهش هم‌زمان هزینه سوخت و ...

جدول (4): مقایسه هزینه سوخت در بارهای مختلف در سیستم 6 واحدی بدون تلفات

هزینه سوخت ($\$.hr^{-1}$)							بار (MW)
روش پیشنهادی	سخت‌کاری فولاد [29]	اجتماع ذرات [24]	تکاملی تفاضلی [24]	بازگشتی ساده‌شده [24]	بازگشتی [25]	تکرار λ [24]	
27091/1	27092/4	27097/5	27098/1	27092/5	27092/5	27092/4	500
31627/7	31628/6	31634/9	31629/2	31628/6	31628/6	31628/7	600
36312/4	36313/9	36314/2	36314/0	36313/9	36313/9	36314/0	700
41147/7	41148/3	41160/3	41152/6	41148/3	41148/3	41148/4	800
46130/1	46131/9	46160/6	46132/1	46131/8	46131/8	46131/8	900
51263/9	51264/4	51269/6	51264/5	51264/5	51264/5	51264/6	1000
56545/7	56546/1	56556/7	56546/6	56546/2	56546/2	56546/4	1100

جدول (5): مقایسه میزان صدور آلودگی در سیستم 6 واحدی بدون تلفات

آلودگی ($kg.hr^{-1}$)							بار (MW)
روش پیشنهادی	سخت‌کاری فولاد [29]	اجتماع ذرات [24]	تکاملی تفاضلی [24]	بازگشتی ساده‌شده [24]	بازگشتی [25]	تکرار λ [24]	
261/552	261/63	262/225	261/859	261/634	261/634	261/635	500
338/94	338/99	339/820	339/065	338/992	338/992	338/993	600
434/330	434/38	434/605	434/453	434/380	434/380	434/380	700
547/747	547/79	547/844	547/802	547/796	547/796	547/797	800
679/171	679/24	679/724	679/283	679/241	679/241	679/241	900
828/698	828/71	828/863	828/715	828/715	828/715	828/720	1000
996/101	996/22	996/672	996/222	996/218	996/218	996/224	1100

جدول (6): نتایج توان‌های تولیدی واحدها حاصل از توزیع اقتصادی - زیست محیطی بار در سیستم 6 واحدی بدون تلفات

میزان تولید هر واحد تولیدی (MW)							بار (MW)
P_6	P_5	P_4	P_3	P_2	P_1		
137/988	144/036	90/636	92/044	14/879	20/417	500	
160/529	166/405	105/074	107/651	28/444	31/897	600	
183/239	118/959	118/275	123/667	41/745	44/115	700	
206/730	211/507	131/497	138/817	55/969	55/748	800	
228/692	234/960	146/127	153/338	69/715	67/168	900	
249/904	257/750	159/848	170/266	82/881	79/351	1000	
272/443	281/597	173/948	184/117	96/591	91/304	1100	

جدول (7): نتایج بهترین جواب در بارهای مختلف در سیستم 6 واحدی با در نظر گرفتن تلفات

آلودگی ($kg.hr^{-1}$)	هزینه سوخت ($\$.hr^{-1}$)	میزان تولید هر واحد و تلفات سیستم (MW)							بار (MW)
		P_L	P_6	P_5	P_4	P_3	P_2	P_1	
266/792	27528/554	9/208	139/290	144/300	91/575	92/674	20/199	21/163	500
349/712	32246/826	13/074	164/434	166/393	106/670	110/549	31/446	33/583	600
451/731	37180/946	17/580	185/397	192/214	119/599	127/404	46/787	46/179	700
574/599	42312/869	22/818	206/872	217/056	134/385	144/465	61/748	58/292	800
718/046	47654/173	28/777	228/766	240/497	151/208	160/863	77/374	70/069	900
882/322	53223/762	35/487	253/675	261/996	162/883	180/404	93/0108	83/517	1000
1065/515	59060/706	42/949	275/189	288/136	178/866	192/255	112/423	96/081	1100

جدول (7) نتایج حل مسئله EED را در این حالت که شامل توان تولیدی هر یک از نیروگاه‌ها، تلفات خطوط انتقال و نیز هزینه سوخت و میزان صدور گازهای آلاینده سیستم است، نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج، در این حالت به دلیل در نظر گرفتن توان تلف شده در شبکه انتقال، هزینه سوخت و آلودگی در تمام سطوح بار به میزان جزئی نسبت به حالت بدون تلفات افزایش یافته است؛ برای مثال برای بار 500 MW هزینه تولید در حالت بدون تلفات $27021/1 \text{ \$} \cdot \text{hr}^{-1}$ بوده، در حالی که اگر تلفات در نظر گرفته شود، هزینه تولید به میزان $27528/554 \text{ \$} \cdot \text{hr}^{-1}$ می‌رسد و آلودگی تولیدی نیروگاه‌ها بر اثر تلفات از $261/552 \text{ kg} \cdot \text{hr}^{-1}$ به $266/792 \text{ kg} \cdot \text{hr}^{-1}$ افزایش می‌یابد.

ب) سیستم 11 واحدی

مشخصات این سیستم، شامل ضرایب تابع هزینه سوخت، محدوده مجاز تولید و ضرایب تابع آلودگی هر واحد نیروگاهی در جدول‌های (8) و (9) آمده است [24]. در این حالت، مسئله EED برای این سیستم در سطوح بار مختلف از 1000 MW تا 2500 MW حل شده است.

همان‌طور که نتایج جدول‌های (4) و (5) نشان می‌دهد، هزینه سوخت برای سطح بار 500 MW برابر $27091/1 \text{ \$} \cdot \text{hr}^{-1}$ می‌باشد و با افزایش سطح بار به 1100 MW، هزینه سوخت افزایش می‌یابد و به میزان $56545/7 \text{ \$} \cdot \text{hr}^{-1}$ می‌رسد. همچنین با افزایش سطح بار سیستم با توجه به افزایش تولید، آلودگی نیروگاه‌ها نیز از مقدار $261/552 \text{ kg} \cdot \text{hr}^{-1}$ در سطح بار 500 MW به $996/101 \text{ kg} \cdot \text{hr}^{-1}$ در سطح بار 1100 MW افزایش می‌یابد.

همان‌طور که دیده می‌شود، نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با دیگر روش‌های موجود از برتری قابل توجهی برخوردار است و روش مبتنی بر الگوریتم MSLFA علاوه بر هزینه سوخت از دیدگاه تولید گازهای آلاینده نیز نتایج برتری را نسبت به سایر روش‌ها ایجاد نموده است. جزئیات توان تولیدی هر ژنراتور در بارهای مختلف در جدول (6) آمده است.

حالت الف-2: با در نظر گرفتن تلفات

در این حالت به منظور مدل‌سازی واقعی‌تر مسئله EED، تلفات شبکه انتقال نیز در سیستم 6 واحدی در محاسبات در نظر گرفته شده است. در این حالت، بار مورد تقاضای سیستم مشابه حالت الف-1، در چند سطح از 500 MW تا 1100 MW تغییر یافته و پاسخ مسئله در هر حالت با استفاده از الگوریتم پیشنهادی به دست آمده است.

جدول (9): ضرایب تابع آلودگی نیروگاه‌ها برای سیستم 11 واحدی [24]

ضرایب تابع آلودگی			واحد تولیدی
γ_i	β_i	α_i	
33/93	-0/67767	0/00419	G ₁
24/62	-0/69044	0/00461	G ₂
33/93	-0/67767	0/00419	G ₃
27/14	-0/54551	0/00683	G ₄
24/15	-0/40060	0/00751	G ₅
27/14	-0/54551	0/00683	G ₆
24/15	-0/40006	0/00751	G ₇
30/45	-0/51116	0/00355	G ₈
25/59	-0/56228	0/00417	G ₉
30/45	-0/41116	0/00355	G ₁₀
25/59	-0/56228	0/00417	G ₁₁

جدول (8): ضرایب هزینه سوخت برای سیستم 11 واحدی [24]

ضرایب هزینه سوخت					واحد تولیدی
P_{Gi}^{max}	P_{Gi}^{min}	c_i	b_i	a_i	
250	20	387/85	1/92699	0/00762	G ₁
210	20	441/62	2/11969	0/00838	G ₂
250	20	422/57	2/19196	0/00523	G ₃
300	60	552/50	2/01983	0/00140	G ₄
210	20	557/75	2/22181	0/00154	G ₅
300	60	562/18	1/91528	0/00177	G ₆
215	20	568/39	2/10681	0/00195	G ₇
455	100	682/93	1/99138	0/00106	G ₈
455	100	741/22	1/99802	0/00117	G ₉
460	110	617/83	2/12352	0/00089	G ₁₀
465	110	674/61	2/10487	0/00098	G ₁₁

به منظور ایجاد امکان مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی با روش‌های دیگر از تلفات شبکه انتقال صرف نظر شده و ضریب وزنی w برابر 0/5 فرض شده است.

جدول (10): مقایسه هزینه سوخت در بارهای مختلف در سیستم 11 واحدی

هزینه سوخت ($\$/hr$)							
بار (MW)	تکرار λ [24]	بازگشتی [25]	بازگشتی ساده شده [24]	تکاملی تفاضلی [24]	اجتماع ذرات [24]	سخت‌کاری فولاد [29]	روش پیشنهادی
1000	8502/30	8502/29	8502/29	8505/81	8508/24	8502/30	8502/02
1250	9108/38	9108/38	9108/38	9117/63	9114/42	9108/38	9107/57
1500	9733/54	9733/54	9733/54	9736/22	9737/33	9733/53	9732/83
1750	10377/78	10377/77	10377/77	10377/86	10380/82	10377/78	10376/92
2000	11041/08	11041/08	11041/08	11041/08	11041/09	11041/09	11040/79
2250	11723/47	11723/47	11723/47	11723/54	11725/68	11723/47	11723/224
2500	12424/94	12424/94	12424/94	12425/06	12428/63	NA	12423/55

NA: در مرجع مربوط ارائه نشده است.

جدول (11): مقایسه میزان صدور آلودگی در بارهای مختلف در سیستم 11 واحدی

آلودگی (kg/hr)							
بار (MW)	تکرار λ [24]	بازگشتی [25]	بازگشتی ساده شده [24]	تکاملی تفاضلی [24]	اجتماع ذرات [24]	سخت‌کاری فولاد [29]	روش پیشنهادی
1000	205/205	205/204	205/204	205/206	208/012	205/20	205/181
1250	339/870	339/870	339/870	339/935	345/669	339/87	339/751
1500	540/545	540/544	540/544	544/298	545/307	540/540	540/010
1750	807/220	807/220	807/220	807/236	812/863	807/23	806/770
2000	1139/912	1139/911	1139/911	1139/911	1142/182	1139/91	1139/835
2250	1538/600	1538/600	1538/600	1538/659	1540/465	1538/60	1538/436
2500	2003/301	2003/300	2003/300	2003/350	2009/720	2003/300	2002/903

جدول (12): نتایج توان تولیدی واحدها حاصل از تورب اقتصاد - زیست محیطی بار در سیستم 11 واحدی

بار (MW)							تولید هر واحد
2500	2250	2000	1750	1500	1250	1000	
138/833	131/482	120/983	113/673	102/549	95/100	86/874	P ₁
112/597	105/999	100/917	92/678	87/927	82/932	73/038	P ₂
146/121	135/618	127/119	116/220	108/146	94/632	89/432	P ₃
221/629	199/015	176/199	144/557	125/704	101/317	76/323	P ₄
136/070	123/151	109/977	93/665	80/910	61/873	50/250	P ₅
218/301	192/275	173/713	147/075	125/101	97/464	78/499	P ₆
144/685	123/486	108/942	94/942	80/243	70/226	52/087	P ₇
346/727	313/036	271/704	240/515	204/383	170/226	124/540	P ₈
324/536	292/488	261/696	227/461	186/550	156/984	123/872	P ₉
362/267	323/688	279/665	246/017	198/439	156/686	125/284	P ₁₀
348/234	309/762	269/084	233/196	200/048	162/458	119.800	P ₁₁

همان‌طور که در جدول‌های (10) و (11) دیده می‌شود، نتایج عددی مربوط به هزینه سوخت و میزان آلودگی در سطوح بار مختلف در الگوریتم پیشنهادی دارای دقت بسیار مناسبی برای حل مسئله EED است و در مقایسه با سایر الگوریتم‌های محاسباتی در این سیستم کمترین هزینه سوخت و میزان آلودگی را در هر یک از سطوح بار ارائه داده است. میزان تولید تخصیص داده شده به هر یک از واحدهای نیروگاهی در بارهای مختلف در جدول (12) آمده است در جدول (13) زمان انجام محاسبات حل مسئله EED با استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای دو سیستم مذکور آمده است.

همان‌طور که در جدول‌های (10) و (11) دیده می‌شود، نتایج عددی مربوط به هزینه سوخت و میزان آلودگی در سطوح بار مختلف در الگوریتم پیشنهادی دارای دقت بسیار مناسبی برای حل مسئله EED است و در مقایسه با سایر الگوریتم‌های محاسباتی در این سیستم کمترین هزینه سوخت و میزان آلودگی را در هر یک از سطوح

برای بررسی و تحلیل حساسیت نتایج مسئله EED نسبت به اهمیت اهداف مسئله، در این بخش به ازای مقادیر مختلف ضریب وزنی مذکور، تابع هزینه کل با توجه به رابطه (3) محاسبه و با استفاده از الگوریتم پیشنهادی کمینه می‌گردد. در این تحلیل برای سیستم 6 واحدی سطح بار 700 MW و در سیستم 11 واحدی سطح بار MW 2000 در نظر گرفته شده است.

در جدول (14) نتایج هزینه سوخت و میزان صدور گازهای آلاینده به ازای ضرایب وزنی مختلف نشان داده شده است. زمانی که $w = 1$ می‌باشد، مسئله EED به توزیع اقتصادی بار تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر، در این حالت کاهش هزینه سوخت تنها هدف مسئله می‌باشد و در نتیجه همان‌طور که دیده می‌شود، با کمترین هزینه سوخت بار مورد نیاز سیستم تأمین می‌گردد، اما به دلیل اینکه هیچ کنترلی بر آلودگی نیروگاه‌ها وجود ندارد، در این حالت بیشترین میزان آلودگی تولید می‌شود. همچنین به طور مشابه در حالت $w = 0$ مسئله EED به توزیع زیست‌محیطی بار تبدیل شده که در آن، میزان تولید واحدهای نیروگاهی تنها با هدف کاهش آلودگی نیروگاه‌ها تعیین می‌گردد. در این حالت نیز همان‌طور که در جدول (14) ملاحظه می‌شود، کمترین میزان آلودگی و با توجه به اینکه هیچ کنترلی بر هزینه سوخت اعمال نمی‌شود، بالاترین میزان هزینه سوخت به دست آمده است.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، الگوریتم MSLFA علاوه بر دقت از سرعت محاسباتی قابل قبولی نیز برخوردار است. این امر کارایی این روش بهینه‌سازی در کاربردهای بهره‌بردار را که در آن سرعت انجام محاسبات اهمیت زیادی دارد، نشان می‌دهد.

جدول (13): زمان اجرا برای سیستم‌های مورد مطالعه

حالت	زمان اجرا (ثانیه)
سیستم 6 واحدی حالت الف-1 (بدون تلفات)	0/110
سیستم 6 واحدی حالت الف-2 (با تلفات)	0/126
سیستم 11 واحدی (بدون تلفات)	0/237

2.4. حل مسئله برای ضرایب وزنی مختلف

در واقعیت ممکن است اهمیت هر یک از اهداف هزینه سوخت و آلودگی از دیدگاه بهره‌بردار سیستم یکسان نباشد. برای در نظر گرفتن این مسئله در مدل‌سازی تابع هدف از ضریب وزنی w استفاده شد. ضریب وزنی w نشان‌دهنده اهمیت میزان هزینه سوخت می‌باشد و می‌تواند مقداری بین صفر و یک را دارا باشد به طوری که در $w = 0$ کمترین اهمیت برای هزینه سوخت و بیشترین اهمیت برای آلودگی و بالعکس در $w = 1$ بیشترین اهمیت برای هزینه سوخت و کمترین اهمیت برای آلودگی در نظر گرفته می‌شود.

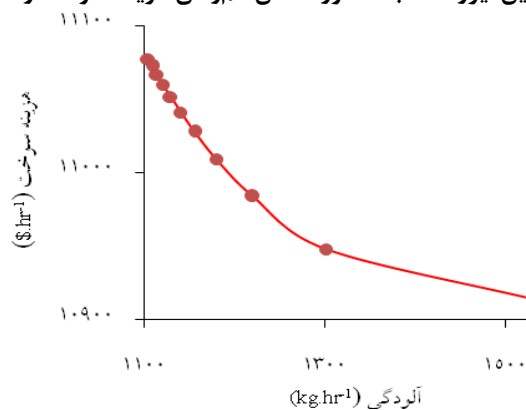
جدول (14): هزینه سوخت و میزان صدور آلودگی در ضرایب وزنی مختلف

ضریب وزنی هزینه سوخت (w)	سیستم 6 واحدی		سیستم 11 واحدی	
	هزینه سوخت ($$.hr^{-1}$)	آلودگی ($kg.hr^{-1}$)	هزینه سوخت ($$.hr^{-1}$)	آلودگی ($kg.hr^{-1}$)
0	36529/548	425/909	11077/064	1104/510
0/1	36495/289	426/915	11072/341	1108/702
0/2	36457/211	428/158	11066/727	1113/849
0/3	36414/731	429/721	11059/947	1120/316
0/4	36367/200	431/731	11051/421	1128/956
0/5	36312/441	434/331	11040/790	1139/835
0/6	36254/326	437/985	11027/464	1155/758
0/7	36188/159	443/106	11009/228	1179/712
0/8	36116/389	450/856	10983/823	1220/068
0/9	36043/592	464/015	10947/884	1301/132
1	36004/139	486/771	10912/329	1540/356

علاوه بر این، ملاحظه می‌شود که در هر دو سیستم با افزایش ضریب وزنی، با توجه به افزایش تأثیر هزینه سوخت و کاهش اثر آلودگی در تابع هزینه کل، هزینه تولید کاهش، و میزان آلودگی افزایش می‌یابد. تغییرات هزینه سوخت و میزان صدور گازهای آلاینده به ازای

ضرایب وزنی مختلف هزینه سوخت برای سیستم‌های مورد مطالعه، به صورت گرافیکی در شکل‌های (2) و (3) نیز نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییرات آلودگی و هزینه سوخت نسبت به تغییر در ضرایب وزنی اهداف مسئله از یک روند غیرخطی

13 توزیع بار بین نیروگاه‌ها به منظور کاهش هم‌زمان هزینه سوخت و ...



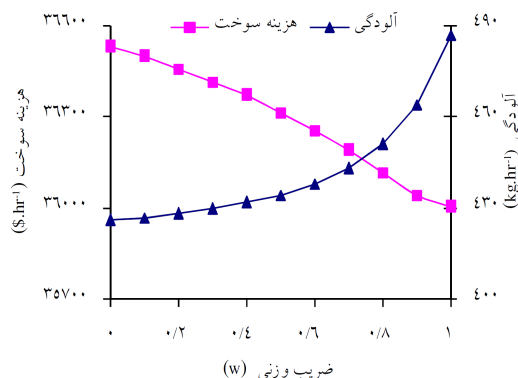
شکل (5): منحنی تعامل بین اهداف در سیستم 11 واحدی

با در نظر گرفتن هزینه سوخت و میزان آلودگی متناظر با آن در هر یک از ضرایب وزنی، می‌توان منحنی تعامل بین اهداف مسئله را به دست آورد. شکل‌های (4) و (5) به ترتیب منحنی تعامل بین هزینه سوخت و آلودگی را در سیستم‌های 6 و 11 واحدی نمایش می‌دهند. این منحنی‌ها این امکان را برای بهره‌بردار فراهم می‌آورند که با توجه به اهمیت هر یک از اهداف و مشاهده نحوه تغییرات هزینه و آلودگی نسبت به یکدیگر، نقطه کار نهایی بهره‌بردار از سیستم را به عنوان جواب مسئله EED انتخاب کند.

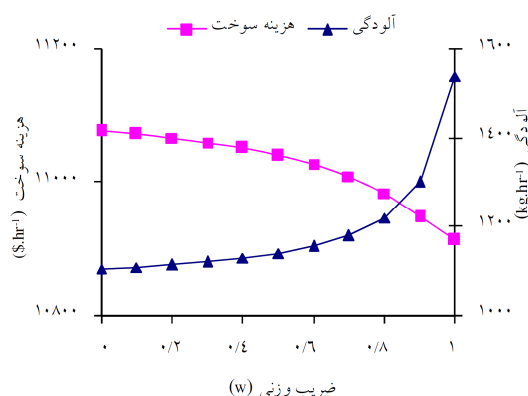
5. نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از آلودگی نیروگاه‌های فسیلی، ضروری است در توزیع بار بین نیروگاه‌ها، علاوه بر مسائل اقتصادی، ملاحظات زیست‌محیطی نیز در نظر گرفته شود. در این مقاله، مسئله توزیع اقتصادی- زیست‌محیطی بار که هدف آن کمینه کردن هم‌زمان هزینه سوخت و آلودگی ناشی از نیروگاه‌ها می‌باشد، مطرح شده است. برای مدل‌سازی این مسئله، از روش ترکیب توابع هدف استفاده شده و سپس مسئله مذکور با بهره‌گیری از روش مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه اصلاح شده حل شده است. به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، مطالعات عددی متنوعی انجام و نتایج به دست آمده با روش‌های مختلف موجود مقایسه شده است. نتایج حاصل حاکی از برتری روش MSFL نسبت به سایر روش‌های موجود بوده و نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی از سرعت و دقت بالایی در حل مسئله EED برخوردار است.

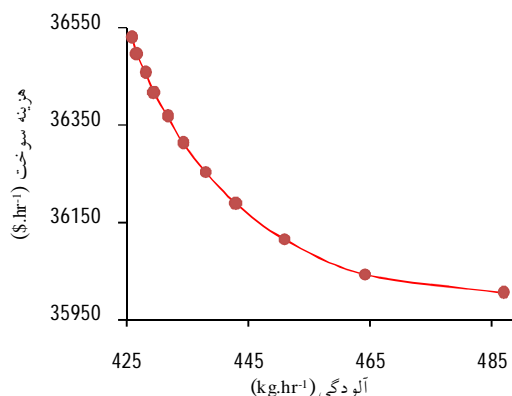
برخوردار است. این امر، ضرورت انجام مطالعه و بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی در حل مسئله توزیع اقتصادی- زیست‌محیطی بار در سیستم قدرت را نشان می‌دهد.



شکل (2): تغییرات تابع هزینه سوخت و آلودگی بر حسب ضریب وزنی کاهش هزینه سوخت در سیستم 6 واحدی



شکل (3): تغییرات تابع هزینه تولید و آلودگی بر حسب ضریب وزنی کاهش هزینه سوخت در سیستم 11 واحدی



شکل (4): منحنی تعامل بین اهداف در سیستم 6 واحدی

- [1] Talaq, J. H., El-Hawary, M. E., "A Summary of Environmental/Economic Dispatch Algorithms", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 1508–1516, 1994.
- [2] Saber, A. H., "Economic Dispatch Using Particle Swarm Optimization with Bacterial Foraging Effect", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 34, No. 1, pp. 38-46, 2012.
- [3] Kumar, R., Sharma, D., Sadu, A., "A Hybrid Multi-agent Based Particle Swarm Optimization Algorithm for Economic Power Dispatch", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 33, No. 1, pp. 115-123, 2011.
- [4] Jeyakumar, D. N., Jayabarathi, T., Raghunathan, T., "Particle Swarm Optimization for Various Types of Economic Dispatch Problems", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 28, No. 1, pp. 36-42, 2006.
- [5] 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.
- [6] حمید فلقی، امیر امینی و ارسلان نجفی، «توزیع بهینه اقتصادی بار با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی نیروگاه‌ها با استفاده از الگوریتم جهش قورباغه بهبودیافته»، مجله مدیریت انرژی، شماره اول، سال اول، صفحه 48.38، پاییز 1390.
- [7] Finnigan, E., Fouad, A. A., "Economic Dispatch with Pollution Constraints", IEEE Winter Meeting Paper, New York, 1974.
- [8] Brodsky, S. F., Hahn, R. W., "Assessing the Influence of Power Pools on Emission Constrained Economic Dispatch", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 57–62, 2007.
- [9] Granelli, G. P., Montagna, M., Pasini, G. L., Marannino, P., "Emission Constrained Dynamic Dispatch", Electric Power Systems Research, Vol. 24, No. 1, pp. 55–64, 1992.
- [10] Abou, A. A., Ela, El., Abido, M. A., Spea, S. R., "Differential Evolution Algorithm for Emission Constrained Economic Power Dispatch Problem", Electric Power Systems Research, Vol. 80, No. 10, pp.1286–1292, Oct. 2010.
- [11] Hazra, J., Sinha, A. K., "Environmental Constrained Economic Dispatch Using Bacteria Foraging Optimization", Power System Technology and IEEE Power India Conference, New Delhi, pp. 1–6, 2008.
- [12] AlRashidi, M. R., El-Hawary, M. E., "Economic Dispatch with Environmental Considerations Using Particle Swarm Optimization", Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, Halifax, pp. 41–46, 2006.
- [13] Xu, J. X., Chang, C. S., Wang, X. W., "Constrained Multiobjective Global Optimization of Longitudinal Interconnected Power System by Genetic Algorithm", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 143, No. 5, pp. 435–446, Sep. 1996.
- [14] Dhillon, J. S., Parti, S. C., Kothari, D. P., "Stochastic Economic Emission Load Dispatch", Electric Power Systems Research, Vol. 26, No. 3, pp. 179–186, Apr. 1993.
- [15] Palanichamy, C., Babu, N., "Analytical Solution for Combined Economic and Emissions Dispatch", Electric Power Systems Research, Vol. 78, No. 7, pp. 1129–37, 2008.
- [16] Dhillon, J., Parti, S., Kothari, D., "Stochastic Economic Emission Load Dispatch", Electric Power Systems Research, Vol. 26, No. 3, pp. 179–188, 1993.
- [17] 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.
- [18] Chena, S., Chen, J., "A Direct Newton–Raphson Economic Emission Dispatch", Electric Power Systems Research, Vol. 25, No. 5, pp. 411–417, 2003.
- [19] Yalcinoz, T., Altun, H., "Environmentally Constrained Economic Dispatch via a Genetic Algorithm with Arithmetic Crossover", IEEE Africon Conference, Africa, pp. 923 - 928, 2002.
- [20] Songfeng, L., Chengfu, S., "An Improved Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization Method for Short-term Combined Economic Emission Hydrothermal Scheduling", Energy Conversion and Management, Vol. 51, No. 3, pp. 561–571, 2010.
- [21] Hota, P. K., Chakrabarti, R., Chattopadhyay, P.K., "A Simulated annealing-Based goal-attainment method for economic Emission Load Dispatch with Nonsmooth Fuel Cost and Emission Level Functions", Electric Machines and Power Systems, Vol. 28, No. 11, pp. 1037–1051, 2000.
- [22] Geetha, R., Bhuvaneswari, R., Subramanian, S., "Artificial Immune System Based Combined Economic and Emission Dispatch", IEEE Region 10 Conference TENCON, Hyderabad, pp.1–6, 2008.
- [23] Abou, A. A., Abido, M. A., Spea, S. R., "Differential Evolution Algorithm for Emission Constrained Economic Power Dispatch Problem", Electric Power Systems Research, Vol. 80, No. 10, pp. 1286–1292, 2010.
- [24] Balamurugan, R., Subramanian, S., "A Simplified Recursive Approach to Combined Economic Emission Dispatch", Electric Power Components and Systems, Vol. 36, No. 1, pp. 17–24, 2008.
- [25] Muralidharan, S., Srikrishna, K., Subramanian, S., "Emission Constrained Economic Dispatch: a New Recursive Approach", Electric Power Components and Systems, Vol. 34, No. 3, pp. 343–353, 2006.
- [26] Wood A. J., Wollenberg, B. F., "Power Generation, Operation and Control", New York: Wiley, 1984.
- [27] 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.

15 توزیع بار بین نیروگاه‌ها به منظور کاهش هم‌زمان هزینه سوخت و ...

- [28] Xuebin, L., " *Study of multi-objective optimization and multi-attribute decision-making for economic and environmental power dispatch*", Electric Power Systems Research, Vol. 79, No. 5, pp. 789-795, 2009.
- [29] Sasikala, J., Ramaswamy, M., " *Optimal λ Based Economic Emission Dispatch Using Simulated Annealing*", International Journal of Computer Applications, Vol. 1, No. 10, pp. 69-83, 2010.
- [30] Li, X., Luo, J., Chen, M. R., Wang, N., " *An Improved Shuffled Frog-Leaping Algorithm with Extremal Optimisation for Continuous Optimization*", Information Science, Vol. 192, No. 1, pp. 143-151, 2012.
- [31] Rahimi-Vahed, A., Mirzaei, A. H., " *Solving a Bi-Criteria Permutation Flow-Shop Problem Using Shuffled Frog-Leaping Algorithm*", Soft Computing-A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, Vol. 12, No. 5, pp. 435-452, 2007.
- [32] Luo, X. H., Yang, Y., Li, X., " *Solving TSP with Shuffled Frog Leaping Algorithm*", International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, Kaohsiung, Taiwan, pp. 228-232, 2008.