

به مدار آوردن نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن قید زیست‌محیطی مبتنی بر الگوریتم چندهدفه جهش قورباغه

رسول کلانتری مقدم، محمدرضا آقاابراهیمی، محمد حاجی بابایی، حمید فلکی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند

چکیده

به مدار آوردن نیروگاه‌ها با هدف تأمین نیاز مصرف‌کنندگان همواره با مسائلی نظیر مصرف سوخت‌های فسیلی و در نتیجه آلودگی‌های زیست‌محیطی همراه بوده است که این موضوع یکی از مهم‌ترین چالش‌های سیستم‌های قدرت امروزی به‌شمار می‌رود. مسئله‌ی به مدار آوردن نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن آلودگی زیست‌محیطی (EUC) روشی برای تعیین بهینه و مناسب میزان تولید واحدهای نیروگاهی به منظور کمینه کردن هزینه‌ی بهره‌برداری و آلودگی زیست‌محیطی است. به‌طور کلی مسئله‌ی EUC سیستم‌های قدرت، مسئله‌ای چندهدفه و غیرخطی همراه با تعدادی قیود است که در این مطالعه با روش الگوریتم چندهدفه جهش قورباغه (MOSFLA) و استفاده از معیار جهشی کارا حل شده است. جهشی کارا نیز راه‌کاری برای حل مسائل به صورت چندهدفه است. در نهایت، جهشی کارای به دست آمده با توجه به تعداد جواب‌های نامغلوب و پراکندگی مناسب جواب‌ها نشان از کیفیت پاسخ نهایی دارد. این روش بر روی یک سیستم نمونه با ده واحد نیروگاهی برای یک دوره‌ی زمانی ۲۴ ساعته اعمال و نتایج حاصل از آن در این مقاله ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: "الگوریتم چندهدفه جهش قورباغه"، "به مدار آوردن نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن آلودگی زیست‌محیطی"، "توزیع اقتصادی بار"، "معیار جهشی کارا".

۱- مقدمه

فرض می‌شود که مجموع هزینه‌های بهره‌برداری همه‌ی واحدها با توجه به قیود تساوی (تعادل توان سیستم) و قیود نامساوی (ذخیره‌ی چرخان سیستم، محدودیت تولید، حداقل زمان روشن/خاموش و محدودیت نرخ افزایشی/کاهشی) کمینه شود. مسئله‌ی به مدار آوردن نیروگاه‌ها یک مسئله‌ی غیرخطی، ناپیوسته و پیچیده است [۱]. تعداد زیادی روش برای حل مسئله‌ی به مدار آوردن نیروگاه‌ها پیشنهاد شده‌اند، روش‌هایی از قبیل لیست حق تقدم [۲]، برنامه‌ریزی پویا [۳]، شاخه و کران [۴]، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط [۵]، تکرار لاگرانژ [۶]، سرد شدن تدریجی فلزات [۷] و الگوریتم‌های تکاملی

مسئله‌ی به مدار آوردن نیروگاه‌ها (UC)^۱ شامل برنامه‌ریزی روشن و خاموش کردن بهینه‌ی واحدهای تولید، و توزیع اقتصادی (ED)^۲ واحدهای روشن برای تأمین بار مصرفی پیش‌بینی شده در یک دوره زمانی خاص در کوتاه مدت است. در مسئله‌ی به مدار آوردن نیروگاه‌های تک‌هدفه کلاسیک،

¹ Unit Commitment

² Economic Dispatch

(SO₂), اکسید ازت و ترکیبات آن (NO_x), دی‌اکسید کربن (CO₂), مونواکسید کربن (CO), ذرات معلق و ازون می‌باشند. چهار مورد اول مستقیماً در اثر مصرف سوخت حاصل آمده 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 محیط‌زیست نیز آسیب وارد می‌نماید و تغییر نامطلوب الگوی آب‌وهوایی زمین را موجب می‌شود. افزایش غلظت SO₂ بیش از حد استاندارد باعث تحریک مجاری فوقانی تنفسی، تحریک تورم ریه‌ها، کاهش DNA و تغییرات کروموزومی می‌شود. همچنین، غلظت بالای این گاز در هوا برای بسیاری از گیاهان سمی است.

۳- فرمول‌بندی مسئله چندهدفه‌ی EUC

در مسئله چندهدفه‌ی EUC نیاز به یک برنامه‌ریزی بهینه است، به طوری که هزینه تولید و میزان انتشار آلاینده‌ها در یک افق زمانی برنامه‌ریزی با رعایت محدودیت‌های سیستم و محدودیت‌های بهره‌برداری کمینه شود. بنابراین، مسئله‌ی EUC باید شامل هر دو هدف کمینه کردن هزینه‌های بهره‌برداری و کمینه کردن میزان انتشار آلاینده‌ها فرمول‌بندی شود.

$$\text{Minimize } [f_c, f_e] \quad (1)$$

هدف اول کمینه کردن هزینه بهره‌برداری (f_c) سیستم است. هزینه بهره‌برداری شامل هزینه سوخت واحد تولیدی، هزینه راه‌اندازی و هزینه خاموش کردن واحد در کل دوره برنامه‌ریزی است، و به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$f_c = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [u_i^t \cdot FC_i^t + u_i^t \cdot (1 - u_i^{t-1}) \cdot ST_i^t + u_i^{t-1} \cdot (1 - u_i^t) \cdot SD_i^t] \quad (2)$$

که در آن FC_i^t هزینه سوخت واحد iام در ساعت tام، ST_i^t و SD_i^t به ترتیب هزینه‌های راه‌اندازی و خاموشی واحد iام در ساعت tام، T دوره برنامه‌ریزی، N تعداد واحدها و u_i^t بیانگر وضعیت روشن یا خاموش واحد iام در ساعت tام (روشن: ۱ و خاموش: ۰) می‌باشند.

هزینه سوخت واحد به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$FC_i^t = c_i + b_i \cdot P_i^t + a_i \cdot (P_i^t)^2 \quad (3)$$

[۱۰]-[۱۸]. جزئیات بیشتر را می‌توان در [۱۱] و [۱۲] پیدا کرد.

به‌هرحال، حل مسئله‌ی به مدار آوردن نیروگاه‌ها اغلب در قالب بهینه‌سازی تک‌هدفه برای کمینه کردن مجموعه هزینه‌ی بهره‌برداری فرمول‌بندی می‌شود. از طرف دیگر، افزایش آلودگی زیست‌محیطی ناشی از نیروگاه‌های حرارتی باعث شده که در مسئله‌ی به مدار آوردن نیروگاه‌ها علاوه بر مسائل اقتصادی، آلودگی زیست‌محیطی نیز در نظر گرفته شود، که هدف آن سوق دادن تأسیسات و ایجاد بهبود در استراتژی‌های طراحی و بهره‌برداری، به‌منظور کاهش میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی از نیروگاه‌ها است [۱۳]. مطالعات اخیر بر روی مسئله‌ی توزیع اقتصادی زیست‌محیطی (EED) به‌منظور کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها به عنوان یک تابع هدف مستقل و همچنین کمینه کردن آن انجام شده است. روش‌های متفاوتی برای حل مسئله‌ی توزیع اقتصادی بار چندهدفه از قبیل ضرایب وزنی [۱۴]، محدودیت-ε [۱۵] و بهینه‌سازی هم‌زمان [۱۶] پیشنهاد شده است. اخیراً روند تحقیقات به سمت بهینه‌سازی هم‌زمان جداگانه اهداف به وسیله‌ی غلبه، در جستجوی جبهه‌ی بهینه‌ی کارا متمایل شده است [۱۷]. در این مطالعه، فرمول‌بندی چندهدفه‌ی به مدار آوردن نیروگاه‌ها با دو زیر مسئله‌ی توزیع اقتصادی و برنامه‌ریزی روشن/خاموش واحدها با هدف کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها به صورت مسئله‌ی به مدار آوردن نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن آلودگی زیست‌محیطی (EUC) بررسی شده است.

ساختار این مقاله به این صورت است: در بخش دوم آلاینده‌های ناشی از نیروگاه‌ها، در بخش سوم فرمول‌بندی مسئله، در بخش چهارم الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جهش قورباغه، در بخش پنجم بهینه‌سازی مسئله‌ی EUC مبتنی بر الگوریتم پیشنهادی، در بخش ششم مطالعات عددی و بالاخره در بخش هفتم نتیجه‌گیری و در پایان مراجع آورده شده‌اند.

۲- نیروگاه‌ها و تولید آلاینده‌ها

نیروگاه‌های فسیلی جزء منابع ثابت در تولید آلاینده‌ها محسوب می‌شوند و طیف وسیعی از انواع آلاینده‌ها را که ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی است، وارد اتمسفر می‌نمایند. عمده گازهای تولیدشده در نیروگاه‌ها شامل دی‌اکسید گوگرد

³ Environmental Economic Dispatch

⁴ Environmental Unit Commitment

۲-۳- محدودیت ذخیره‌ی چرخان

$$\sum_{i=1}^N u_i^t \cdot P_i^t \max \geq P_d^t + SR^t \quad (8)$$

که در آن SR^t میزان ذخیره‌ی چرخان در ساعت t ام، $P_i^t \max$ حداکثر توان تولیدی واحد t ام در ساعت t ام است.

۳-۳- محدودیت حداقل زمان روشن/خاموش

$$\begin{cases} T_i^{ON} \geq MUT_i \\ T_i^{OFF} \geq MDT_i \end{cases} \quad \text{for } i=1,2,\dots,n \quad (9)$$

که در آن T_i^{ON} ، T_i^{OFF} و MUT_i به ترتیب بیانگر زمان روشن بودن، زمان خاموشی و حداقل زمان مجاز فعالیت واحد t ام هستند.

۴-۳- محدودیت توان تولیدی واحدها

$$P_i \min \leq P_i \leq P_i \max \quad \text{for } i=1,2,\dots,N \quad (10)$$

در این رابطه $P_i \max$ حداکثر توان تولیدی واحد t ام و $P_i \min$ حداقل توان تولیدی واحد t ام است.

۴- الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جهش

قورباغه

الگوریتم جهش قورباغه کارایی بسیار مناسبی برای حل مسائل بهینه‌سازی دارد. با توجه به دقت و سرعت بالای این الگوریتم، مسئله‌ی EUC با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جهش قورباغه^۵ حل شده است.

الف) تولید جمعیت اولیه

جمعیت اولیه شامل P قورباغه به صورت تصادفی تولید می‌شود، به طوری که هر یک از قورباغه‌ها در محدوده‌ی فضای جواب باشند. قورباغه t ام به صورت $X_i=(x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{d,i})$ نمایش داده می‌شود که در آن d نشاندهنده‌ی تعداد متغیرهای تصمیم می‌باشد.

ب) دسته‌بندی

در بهینه‌سازی تک‌هدفه برازندگی هر یک از قورباغه‌ها مستقیماً بر اساس میزان تابع هدف مشخص می‌شود در حالی

که در آن a_i, b_i, c_i ضرایب تابع هزینه واحد t ام، P_i^t توان تولیدی واحد t ام در ساعت t ام است. ST_i^t را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$ST_i^t = \begin{cases} H_{start\ up} & T_i^{OFF} \leq MDT_i + (T_{cold}) \\ C_{start\ up} & T_i^{ON} > MDT_i + (T_{cold}) \end{cases} \quad (4)$$

که در آن $H_{start\ up}$ هزینه راه‌اندازی گرم، $C_{start\ up}$ هزینه راه‌اندازی سرد، T_{cold} میزان زمانی که مشخص کننده صرفه اقتصادی واحد نیروگاهی برای راه‌اندازی گرم یا سرد است و همچنین MDT_i حداقل زمان مجاز فعالیت واحد t ام می‌باشد. راه‌اندازی خود شامل دو حالت راه‌اندازی گرم و راه‌اندازی سرد است. در صورتی که میزان خاموشی از یک حد مشخص، که این میزان یکی از شاخص‌های نیروگاه است، بیشتر باشد راه‌اندازی به صورت سرد انجام می‌گیرد و در غیر این صورت راه‌اندازی به صورت گرم خواهد بود. خاموش کردن واحدهای نیروگاهی هم دارای هزینه‌ای است که این هزینه برای هر واحد دارای میزان مشخصی است.

هدف دوم کمینه کردن میزان انتشار آلاینده‌ها (f_e) است که می‌توان آن را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$f_e = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N u_i^t \cdot EC_i^t \quad (5)$$

به طوری که EC_i^t میزان آلودگی واحد t ام در ساعت t ام است و به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$EC_i^t = \alpha_i + \beta_i \cdot P_i^t + \gamma_i \cdot (P_i^t)^2 \quad (6)$$

که α_i ، β_i و γ_i ضرایب آلودگی واحد t ام می‌باشند.

در واقع حل مسئله‌ی EUC به گونه‌ای دنبال می‌شود که هزینه تولید واحدها و میزان تولید آلودگی واحدها را با رعایت قیود زیر به حداقل برساند.

۱-۳- محدودیت تعادل بار

$$\sum_{i=1}^N u_i^t \cdot P_i^t = P_d^t \quad \text{for } t=1,2,\dots,T \quad (7)$$

در این رابطه P_d^t میزان بار تقاضا در ساعت t ام می‌باشد.

⁵ Multi Objective Shuffled Frog Leaping Algorithm (MOSFLA)

در فرآیند جستجوی محلی گام‌های زیر در هر تکرار انجام می‌شود:

گام ۱) بهترین و بدترین قورباغه در دسته تعیین و به ترتیب X_w و X_b نامیده می‌شود.

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

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

$$X_w^{\text{new}} = X_w^{\text{old}} + D^k \quad (12)$$

که در روابط فوق D^k اندازه جهش قورباغه در k امین تکرار الگوریتم، c (ضریب جهش) یک مقیاس برای گسترش اندازه گام حرکتی قورباغه است و عددی بزرگ‌تر از یک می‌باشد، پارامتر u وزن اینرسی و rand یک عدد تصادفی در بازه‌ی $[0,1]$ است. X_w^{new} و X_w^{old} به ترتیب موقعیت فعلی و جدید بدترین قورباغه‌ی دسته می‌باشد. اگر جواب جدید طبق مفهوم مغلوبیت بهینه‌سازی چندهدفه جواب قبلی را مغلوب نماید قورباغه‌ی جدید جایگزین قورباغه‌ی 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 رابطه‌ی (۱۱) می‌شود و سپس با استفاده از رابطه‌ی (۱۲) قورباغه‌ی جدید به دست می‌آید. در صورتی که بهبودی در جواب حاصل شد، قورباغه‌ی جدید جایگزین قورباغه‌ی قبلی شده و فرآیند به گام ۵ می‌رود. در غیر این صورت گام ۴ اجرا می‌شود.

گام ۴) یک قورباغه‌ی جدید به صورت تصادفی تولید شده و جایگزین بدترین قورباغه‌ی دسته می‌شود.

گام ۵) قورباغه‌های موجود در هر دسته با یکدیگر مقایسه شده و جبهه‌بندی می‌شوند و در نهایت بر اساس شماره جبهه مرتب می‌گردند.

گام ۶) گام‌های ۱ تا ۵ به تعداد مشخص تکرار می‌شود.

ه) توقف الگوریتم

فرآیند (ب) تا (د) برای یک تعداد تکرار مشخص اجرا می‌شود و در نهایت مجموعه جواب موجود در آرشیو به عنوان نقاط جبهه‌ی کارا و جواب نهایی مسئله انتخاب می‌گردند.

که در بهینه‌سازی چندهدفه با توجه به وجود چند تابع هدف این فرآیند مشکل‌تر می‌گردد. در الگوریتم جهش قورباغه (SFLA) قورباغه‌ها باید بر اساس میزان برازندگی مرتب شوند به طوری که در MOSFLA ابتدا تمام قورباغه‌ها بر اساس شماره‌ی جبهه مربوطه و سپس قورباغه‌هایی که در یک جبهه قرار می‌گیرند بر اساس فاصله ازدحام مرتب می‌شوند. سپس 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) آرشیو

به منظور حفظ بهترین جواب‌ها در هر تکرار و همچنین توزیع یکنواخت جبهه‌ی کارا از مکانیزم آرشیو استفاده شده است. بدین منظور در هر تکرار مجموعه جواب مغلوب نشدنی که در جبهه‌ی ۱ قرار می‌گیرد به آرشیو منتقل می‌گردد و با اعضای آرشیو مقایسه می‌شود، بهترین جواب‌ها که توسط هیچ یک از جواب‌های دیگر موجود در آرشیو مغلوب نمی‌شوند باقی مانده و بقیه جواب‌ها از آرشیو حذف می‌شوند. در صورتی که تعداد جواب‌های باقی‌مانده از ظرفیت معین آرشیو بیش‌تر باشد، اعضای موجود در آرشیو بر اساس فاصله‌ی ازدحام و به‌اندازه‌ی ظرفیت آرشیو انتخاب می‌گردند.

د) جستجوی محلی

فرآیند جستجوی محلی در هر یک از دسته‌ها به تعداد تکرار مشخص انجام می‌شود. در هر تکرار لازم است بهترین قورباغه‌ی دسته (X_b)، بدترین قورباغه‌ی دسته (X_w) و بهترین قورباغه‌ی کل (X_g) تعیین گردد. به منظور توزیع یکنواخت جواب‌ها در مجموعه‌ی جواب، بهترین قورباغه‌ی هر دسته، جوابی با بالاترین میزان فاصله‌ی ازدحام در نظر گرفته می‌شود. همچنین با توجه به اینکه جواب‌های هر دسته بر اساس شماره‌ی جبهه و فاصله‌ی ازدحام مرتب شده‌اند، آخرین عضو هر دسته به عنوان بدترین قورباغه‌ی دسته (X_w) شناخته می‌شود و برای بهترین قورباغه‌ی کل (X_g) در هر تکرار یکی از اعضای مجموعه‌ی آرشیو به صورت تصادفی انتخاب می‌گردد.

۴-۱- معیار جبهه‌ی کارا

کردن وضعیت روشن یا خاموش نیروگاه‌ها استفاده شود از ۸ عدد صحیح برای نشان دادن طول دوره روشن یا خاموش هر واحد استفاده می‌شود؛ که عدد مثبت یعنی طول دوره زمانی روشن، عدد منفی یعنی طول دوره زمانی خاموش، ضمن اینکه عدد صفر نشان دهنده این است که دوره زمانی آن واحد به پایان رسیده است.

جدول ۱: مشخصه بار و آرایش ساعات مختلف واحدها

واحد ۱								واحد ۱۰								
T_1^1	T_1^2	T_1^3	T_1^4	T_1^5	T_1^6	T_1^7	T_1^8	...	T_{10}^1	T_{10}^2	T_{10}^3	T_{10}^4	T_{10}^5	T_{10}^6	T_{10}^7	T_{10}^8
24	0	0	0	0	0	0	0	...	-3	12	-5	4	0	0	0	0

مطابق با جدول ۱ در طی ۲۴ ساعت یک واحد ممکن است به صورت کامل روشن باشد یا همانند واحد ۱۰ چندین تغییر وضعیت داشته باشد.

برتری این حالت نسبت به روش‌های باینری این است که بسیاری از حالت‌های ناممکن در تولید جمعیت اولیه حذف می‌شوند. بر همین اساس روش زیر برای تولید جمعیت اولیه معرفی می‌شود که رابطه‌ی آن به صورت زیر می‌باشد:

$$T_i^1 = \begin{cases} +rand(\max(0, MUT_i - T_i^0), T) & \text{if } T_i^0 > 0 \\ -rand(\max(0, MDT_i + T_i^0), T) & \text{if } T_i^0 < 0 \end{cases} \quad (13)$$

که در آن شرایط اولیه سیستم است.

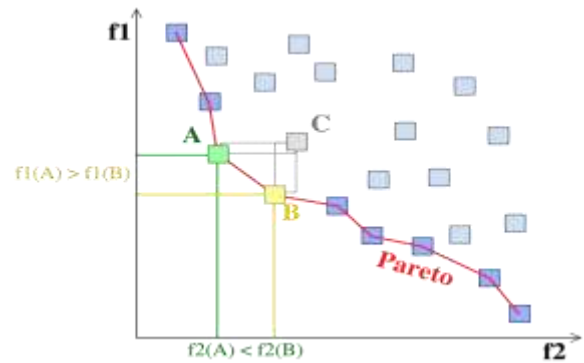
برای تعیین مدت‌زمان دوره‌های بعدی به صورت زیر عمل می‌شود:

➤ اگر $T_i^{c-1} < 0$ باشد یعنی دوره قبلی خاموش بوده، لذا دوره بعدی یعنی c روشن می‌شود که مدت‌زمان آن طبق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$T_i^c = \begin{cases} +rand(MUT_i, RT_i^{c-1}) & \text{if } (RT_i^{c-1} > MUT_i) \\ +RT_i^{c-1}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

➤ اگر $T_i^{c-1} > 0$ باشد یعنی دوره قبلی روشن بوده، لذا دوره بعدی یعنی c خاموش می‌شود که مدت‌زمان آن طبق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

در حل مسائلی که چند تابع هدف دارند جواب‌های مناسب محدود به یک جواب نیستند و دارای یک مجموعه جواب می‌شوند که هیچ یک از این جواب‌ها از دیگری بهتر یا بدتر نیستند، مگر اینکه ترجیحاتی را در تصمیم‌گیری نهایی لحاظ کنیم. برای به دست آوردن مجموعه جواب‌های خوب روش‌های مختلفی همچون ضرایب وزنی و معیار جبهه‌ی کارا وجود دارد که در اینجا به دلیل سرعت معیار جبهه‌ی کارا از آن استفاده شده است. در معیار جبهه‌ی کارا جواب‌های نامغلوب تعیین‌کننده هستند و به جواب‌هایی گفته می‌شوند که حداقل در یکی از تابع هدف‌ها از جواب‌های دیگر بهتر بوده و در سایر اهداف نیز بدتر نباشد. به مجموعه جواب‌های نامغلوب جبهه کارا می‌گویند. هر چقدر تعداد جواب‌های نامغلوب بیشتر و دارای پراکندگی بیشتری باشند نشان از کیفیت معیار جبهه‌ی کارا دارند.



شکل ۱: جبهه‌ی کارا

همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است نقاط A و B هر کدام در یک هدف نسبت به دیگری برتری دارد ولی در هدف دیگر جواب ضعیف‌تری دارد. در حالت کلی نمی‌توان گفت که کدام یک از این جواب‌ها بهتر است. اما هر دوی این نقاط نسبت به C در هر دو هدف بهتر هستند و این دو جواب، پاسخ‌های نامغلوب هستند.

۵- بهینه‌سازی مسئله‌ی EUC مبتنی بر

الگوریتم چندهدفه جهش قورباغه

طبق مشخصه بار شکل ۲ در یک دوره زمانی ۲۴ ساعته یک واحد نیروگاهی چندین بار روشن یا خاموش می‌شود. مشخصه بار روزانه همواره دارای دو مقدار پیک است و هر واحد نیروگاهی طبق این مشخصه ۸ سیکل زمانی روشن یا خاموش دارد. بنابراین به جای اینکه از ۲۴ عدد باینری برای مشخص

$$\begin{cases} T_i^{c+1} = T_i^{c+1} - T_i^c + MUT_i \\ T_i^c = MUT_i \end{cases} \quad (19)$$

برای $T_i^c < 0$ ، اگر $-T_i^c < MDT_i$ سیکل‌های بعد به صورت زیر تغییر می‌کنند:

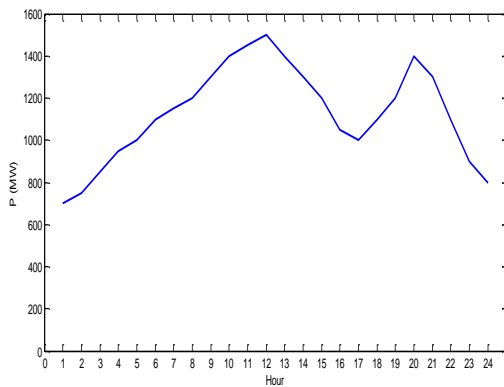
$$\begin{cases} T_i^{c+1} = T_i^{c+1} - T_i^c - MDT_i \\ T_i^c = MDT_i \end{cases} \quad (20)$$

۵-۱-۲- برآورده کردن قید ذخیره‌ی چرخان

در حل باینری، برای هر واحد نیروگاهی طی شبانه‌روز ۲۴ عدد باینری صفر یا یک وجود دارد که عدد صفر نشان دهنده‌ی خارج از مدار بودن و عدد یک بیانگر در مدار بودن واحد است. بر این اساس و برای ساعت‌هایی که در آن‌ها میزان ذخیره‌ی چرخان رعایت نشده باشد، واحدهای خاموش طبق لیست حق تقدم، وارد مدار می‌شوند تا زمانی که میزان ذخیره‌ی چرخان در هر ساعت برآورده شود. استفاده از این روش سبب می‌شود که به مرور واحدهای نیروگاهی ارزان‌تر جای واحدهای گران‌تر را بگیرند و جواب‌ها سریع‌تر به سمت جواب بهینه همگرا شوند. در این مطالعه میزان ذخیره چرخان هر ساعت به میزان ۱۰ درصد از بار همان ساعت در نظر گرفته شده است.

۶- مطالعات عددی و نتایج

در این مقاله، مسئله‌ی EUC با در نظر گرفتن هزینه راه‌اندازی و همچنین رعایت قید ذخیره‌ی چرخان برای یک سیستم نمونه‌ی ۱۰ واحده‌ی IEEE، که مشخصات واحدهای آن در [۱۰] و [۱۸] آمده است، برای تأمین یک بار نمونه ۲۴ ساعته، که اندازه‌ی آن نیز در شکل ۲ آمده است، بررسی می‌شود.



شکل ۲: منحنی بار روزانه

$$T_i^c = \begin{cases} -rand(MDT_i, RT_i^{c-1}) & \text{if } (RT_i^{c-1} > MDT_i) \\ -RT_i^{c-1}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

در روابط فوق RT_i^{c-1} طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$RT_i^{c-1} = T - \sum_{k=1}^{c-1} |T_i^k| \quad (16)$$

که بعد از به‌روز کردن جمعیت اولیه، این احتمال وجود دارد که مجموع زمان‌های حالت‌های روشن یا خاموش بودن واحدها از ۲۴ ساعت بیشتر یا کمتر شود. به همین دلیل مقدار اضافه‌تر یا کمتر از ۲۴ ساعت را به‌صورت نسبی بین جواب‌های جدید اضافه یا کم می‌کنیم. همچنین، چون الگوریتم به‌صورت پیوسته استفاده می‌شود لذا همه‌ی جواب‌ها باید گرد شوند. بعد از گرد شدن جواب‌ها این احتمال وجود دارد که مجموع زمان‌های حالت‌های روشن یا خاموش واحدها ۲۳ یا ۲۵ ساعت شود. در این صورت این یک ساعت اختلاف در آخرین سیکل غیر صفر تأثیر می‌یابد تا مجموع ساعات دوره‌ها ۲۴ ساعت شود.

۵-۱- رعایت قیود

۵-۱-۱- برآورده کردن قیدهای حداقل زمان روشن / خاموش

بعد از تولید جواب‌های جدید باید قیدهای حداقل زمان روشن و خاموشی واحدها رعایت شوند. به همین دلیل برای هر واحد نیروگاهی، ابتدا سیکل اول و سپس سیکل‌های ۲ تا ۸ تصحیح می‌شوند.

برای $T_i^1 > 0$ ، اگر $T_i^1 < \max(0, MUT_i - T_i^0)$ باشد آنگاه سیکل ۱ و ۲ به‌صورت زیر تغییر می‌کنند:

$$\begin{cases} T_i^2 = T_i^2 - T_i^1 + \max(0, MUT_i - T_i^0) \\ T_i^1 = \max(0, MUT_i - T_i^0) \end{cases} \quad (17)$$

برای $T_i^1 < 0$ ، اگر $-T_i^1 < (\max(0, MDT_i + T_i^0))$ باشد آنگاه سیکل ۱ و ۲ به‌صورت زیر تغییر می‌کنند:

$$\begin{cases} T_i^2 = T_i^2 - T_i^1 - \max(0, MDT_i + T_i^0) \\ T_i^1 = \max(0, MDT_i + T_i^0) \end{cases} \quad (18)$$

به همین صورت برای سیکل‌های بعد، برای $T_i^c > 0$ ، اگر $T_i^c < MUT_i$ ، سیکل‌های بعد به‌صورت زیر تغییر می‌یابند:

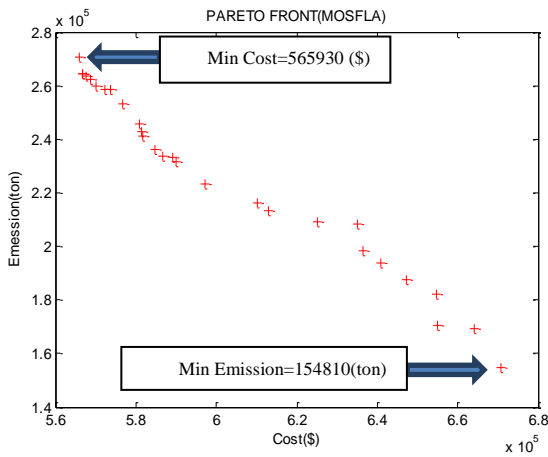
۱-۶- مقایسه همگرایی مناسب و عملکرد تک هدفه

نمودار همگرایی الگوریتم اعمال شده برای محاسبه هزینه بهره‌برداری و میزان آلودگی تولیدی در حالت تک‌هدفه روی سیستم ۱۰ واحدی در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. جدول ۱ هزینه‌ی به‌دست آمده با استفاده از الگوریتم SFLA در مقایسه با دیگر روش‌های حل شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مقایسه با نتایج بهینه‌سازی هزینه تک‌هدفه در سیستم ۱۰ واحدی

روش‌ها	مقدار هزینه برای ۱۰ واحد (\$)
GA [۱۹]	۵۶۵۸۲۵
SA [۲۰]	۵۶۵۸۲۸
NSGA-II [۲۱]	۵۶۵۸۹۸
SFLA (present study)	۵۶۵۵۰۰

۲-۶- ارزیابی عملکرد بهینه‌سازی چندهدفه



شکل ۵: جبهه‌ی کارا حاصل از الگوریتم

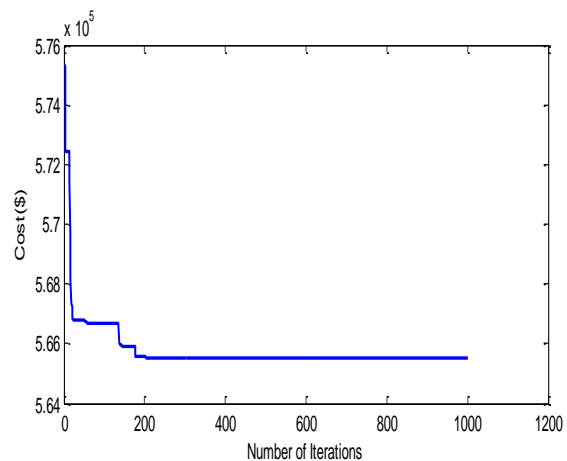
جدول ۳: میزان هزینه و آلودگی در بهینه‌سازی چندهدفه

آلودگی (ton)	هزینه (\$)
۲۶۳۵۱۰	۵۶۵۹۳۰
۱۵۴۸۱۰	۶۷۰۸۵۰

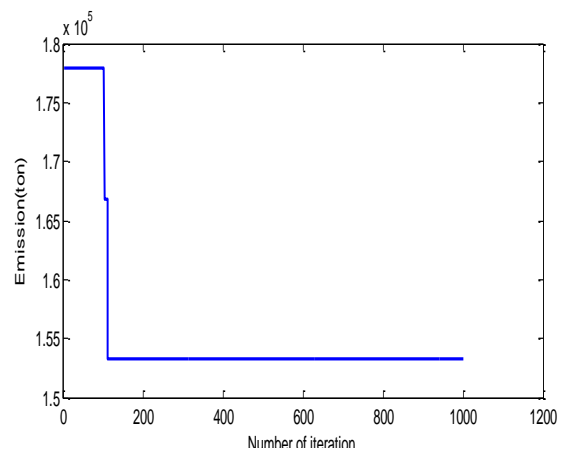
بهینه‌سازی تک‌هدفه دارای یک جواب است در حالی که بهینه‌سازی چندهدفه دارای یک مجموعه جواب است که از میان این جواب‌ها می‌توان جواب موردنظر را انتخاب کرد. جبهه کارا حاصل از الگوریتم در شکل ۵ آورده شده است. تعداد جواب‌های نامغلوب در این معیار جبهه‌ی کارا ۲۸ عدد است و پراکندگی نسبتاً مناسبی دارد، برای یافتن یک جواب دلخواه در آن می‌توان محدوده هزینه و آلودگی را مشخص کرد و بر اساس آن‌ها نزدیک‌ترین جواب‌ها را انتخاب نمود که این انتخاب بستگی به نظر بهره‌بردار دارد. همانطور که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود به ازای کمترین هزینه مقدار آلودگی آن نشان داده شده است و همچنین به ازای کمترین آلودگی، هزینه آن نیز مشخص شده است. که این انتخاب بستگی به نظر بهره‌بردار دارد که کدام یک از اهداف آلودگی و هزینه برای آن اهمیت بیشتری دارد و می‌تواند با اهمیت داشتن آن هدف کمترین مقدار آن را در نظر بگیرد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مسئله‌ی به مدار آوردن نیروگاه‌ها با قید زیست‌محیطی بررسی شده است. ابتدا، در حالت تک‌هدفه با مقایسه نتایج الگوریتم SFLA با دیگر روش‌های حل شده در می‌یابیم که روش SFLA دارای جواب‌های بهتر و سرعت حل بالاتری می‌باشد و در ادامه از روش الگوریتم جهش قورباغه‌ی چندهدفه برای حل مسئله‌ی EUC استفاده شده



شکل ۳: نمودار همگرایی هزینه در حالت تک هدفه



شکل ۴: نمودار همگرایی آلودگی در حالت تک هدفه

- [11] N. P. Padhy, "Unit commitment -a bibliographical survey," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 1196–2005, May 2004.
- [12] J. Raglend and N. P. Padhy, "Comparison of practical unit commitment solutions," *Elect. Power Compon. Syst.*, vol. 36, no. 8, pp. 844–863, 2008.
- [13] M. A. Abid, "Environmental/economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithms," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 4, pp. 1529–1537, Nov. 2003.
- [14] J. S. Dhillon, S. C. Parti, and D. P. Kothari, "Stochastic economic emission load dispatch," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 26, pp. 186–197, 1993.
- [15] R. Yokoyama, S. H. Bae, T. Morita, and H. Sasaki, "Multiobjective generation dispatch based on probability security criteria," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 317–324, Feb. 1988.
- [16] J. J. Cai, X. Q. Ma, Q. Li, L. X. Li, and H. P. Peng, "A multi-objective chaotic ant swarm optimization for environmental/economic dispatch," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 32, no. 5, pp. 337–344, 2010.
- [17] E. Zitzler, "Two decades of evolutionary multi-objective optimisation: A glance back and a look ahead," in *Proc. IEEE Symp. Computational Intelligence in Multi Criteria Decision Making*, Honolulu, HI, USA, 2007.
- [18] X. Wu, B. Zhang, K. Wang, J. Li, Y. Duan, "A quantum-inspired Binary PSO algorithm for unit commitment with wind farms considering emission reduction," *IEEE PES ISGT ASIA*, pp. 1–6, 2012.
- [19] S. A. Kazarlis, A. G. Bakirtzis, and V. Petridis, "A genetic algorithm solution to the unit commitment problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 1, pp. 83–92, Feb. 1996.
- [20] D. N. Simopoulos, S. D. Kavatza, and C. D. Vournas, "Unit commitment by an enhanced simulated annealing algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 68–76, Feb. 2006.
- [21] Y. Li, N. Pedroni, E. Zio, "A Memetic Evolutionary Multi-Objective Optimization Method for Environmental Power Unit Commitment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 2660–2669, Aug 2013.

است. این الگوریتم با بهره‌گیری از تکنیک معیار جبهه‌ی کارا به حل مسئله‌ی EUC به صورت چندهدفه می‌پردازد و کارایی این الگوریتم نشان داده شده است. از این رو، الگوریتم MOSFLA مبتنی بر معیار جبهه‌ی کارا را می‌توان به عنوان یک روش حل بسیار قوی و کارآمد در حل مسئله‌ی EUC قلمداد کرد که باعث ایجاد یک مدیریت کارآمد در مصرف سوخت‌های فسیلی و همچنین منجر به حداقل‌سازی آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید برق نیروگاه‌ها، می‌شود.

مراجع

- [1] G. Damousis, A. G. Bakirtzis, and P. S. Dokopoulos, "A solution to the unit-commitment problem using integer-coded genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 1165–1172, May 2004.
- [2] T. Senjyu, K. Shimabukuro, K. Uezato, and T. Funabashi, "A fast technique for unit commitment problem by extended priority list," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 882–888, May 2003.
- [3] P. G. Lowery, "Generating unit commitment by dynamic programming," *IEEE Trans. Power App. and Syst.*, vol. PAS-85, no. 5, pp. 422–426, 1966.
- [4] C. L. Chen and S. C. Wang, "Branch-and-Bound scheduling for thermal generating units," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 8, no. 2, pp. 184–189, Jun. 1993.
- [5] M. Carrion and J. M. Arroyo, "A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 3, pp. 1371–1378, 2006.
- [6] A. Merlin and P. Sandrin, "A new method for unit commitment at Electricite de France," *IEEE Trans. Power App. and Syst.*, vol. PAS-102, no. 5, pp. 1218–1225, 1983.
- [7] D. N. Simopoulos, S. D. Kavatza, and C. D. Vournas, "Unit commitment by an enhanced simulated annealing algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 68–76, Feb. 2006.
- [8] T. W. Lau, C. Y. Chung, K. P. Wong, T. S. Chung, and S. L. Ho, "Quantum-inspired evolutionary algorithm approach for unit commitment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 1503–1512, Aug. 2009.
- [9] J. Valenzuela and A. E. Smith, "A seeded memetic algorithm for large unit commitment problems," *J. Heurist.*, vol. 8, pp. 173–195, 2002.
- [10] J. Ebrahimi, S. H. Hosseinian, and G. B. Gharehpetian, "Unit commitment problem solution using shuffled frog leaping algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 573–581, May 2011.