

حل مسأله‌ی توزیع اقتصادی بار در سیستم‌های ترکیبی توان و حرارت مبتنی بر الگوریتم جهش قورباغی بهبود یافته

مرتضی قایدی^{۱*}، ارسلان نجفی^۲ و حمید فلقی^۳

۱- نویسنده مسئول: مربی گروه مهندسی قدرت، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، m.ghayedi@birjand.ac.ir

۲- استادیار گروه مهندسی برق، واحد سپیدان، دانشگاه آزاد اسلامی، سپیدان، ایران arsalan.najafi@iausepidan.ac.ir

۳- دانشیار گروه مهندسی قدرت، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، falaghi@birjand.ac.ir

چکیده - در این مقاله یک روش نوین مبتنی بر الگوریتم جهش قورباغی بهبود یافته برای حل مسأله‌ی توزیع اقتصادی بار در سیستم‌های ترکیبی توان و حرارت ارائه شده است. پیچیدگی و دشواری در حل مسأله‌ی توزیع اقتصادی بار در سیستم‌های تولید همزمان گرما و الکتریسیته به قیود این مسأله مرتبط است که این الگوریتم به راحتی قادر است این قیود را ارضا نماید. این الگوریتم بهینه‌سازی حوزه جستجوی عمومی گسترده‌ای دارد و این امر به الگوریتم در رسیدن به جواب بهینه مطلق کمک می‌کند. کاربرد الگوریتم جهش قورباغی بهبود یافته در توزیع اقتصادی بار در سیستم‌های ترکیبی توان و حرارت روی دو مثال آزمایش شده و نتایج عددی این حقیقت را آشکار می‌سازد که این روش دارای جواب بهتری نسبت به سایر روش‌های موجود برای حل مسأله می‌باشد.

کلیدواژه‌ها - بهینه‌سازی، سیستم‌های ترکیبی توان و حرارت، توزیع اقتصادی، الگوریتم جهش قورباغی بهبود یافته.

۱- مقدمه

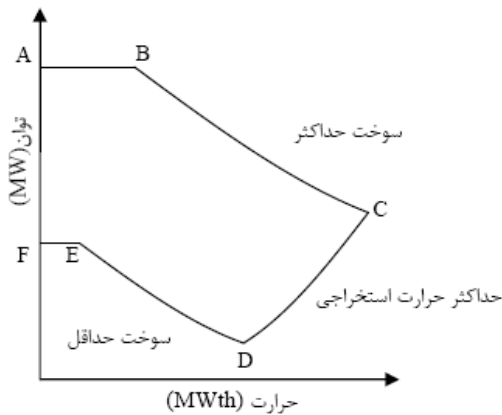
افزایش تقاضا در استفاده از سیستم‌های بازیابی (cogeneration) که به صورت همزمان حرارت و انرژی الکتریکی تولید می‌کنند کاملاً چشم‌گیر است. در بسیاری از موارد این تولید گرما و انرژی الکتریکی به صورت متقابل به هم وابسته است. بحث توزیع اقتصادی بار در سیستم‌های ترکیبی توان و حرارت (CHPED) بررسی واحدهای گرما، توان و واحدهای بازیابی را که به صورت همزمان کار می‌کنند بر عهده دارد و در آن پیدا کردن نقطه بهینه از نظر اقتصادی برای این واحدها هدف مسأله است. به عبارت بهتر در حل این مسأله هدف این است که هر واحد تولیدی چه اندازه تولید داشته باشد تا علاوه بر تولید توان و گرما به مقدار مورد نیاز، وضعیت سیستم در حالت بهینه اقتصادی که همان کمینه شدن هزینه‌های سوخت است، قرار داشته باشد. برای پیدا کردن نقطه بهینه لازم است یک سری قیود نیز رعایت شوند.

تاکنون مطالعات متعددی در این زمینه صورت گرفته است که بعضی از آنها اساس بهینه‌سازی ریاضی تحلیلی دارند مانند [۱]

که از تکنیک لاگرانژین ریلکسیشن استفاده می‌کنند. روش ارائه شده در [۲] برای حل مسأله‌ی CHPED مبتنی بر تفکیک تابع هدف مسأله‌ی موردنظر از قیود می‌باشد. جدایی پذیری تعریف شده توسط نویسندگان، بدین معنی است که تابع هدف موردنظر، مجموع توابع هزینه‌ی واحدهای مجزا از هم می‌باشد و بیشترین قیود مربوط به یک واحد معین می‌باشد. در این روش یک استراتژی دو سطحی در نظر گرفته شده است که در آن لایه‌ی پایین مسأله‌ی توزیع اقتصادی بار را برای توان و حرارت برای مقدار لامبدای داده شده حل می‌کند و لایه‌ی بالای ضرایب لامبدا را بروز می‌کند. این فرآیند تا زمانی که میزان توان و حرارت برآورده شوند ادامه می‌یابد. همچنین روش branch and bound روش دیگری است که به عنوان یک روش ریاضی برای حل این مسأله پیشنهاد شده‌اند [۳]. اما شمار بیشتر مقالات از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی بهره برده‌اند. در [۴] و [۵] از روش جستجوی تابو و الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله استفاده شده است. در [۶] از یک الگوریتم ترکیبی برای حل مسأله استفاده شده که این روش ترکیبی از الگوریتم ژنتیک با به‌روزرسانی چندلایه می‌باشد. در [۷]-[۱۱] به ترتیب روش‌های جستجوی هارمونی، الگوریتم

$$C_j(O_j, H_j) = a_j + b_j O_j + c_j O_j^2 + d_j H_j + e_j H_j^2 + f_j O_j H_j \quad (8)$$

$$C_k(T_k) = a_k + b_k T_k + c_k T_k^2 \quad (9)$$



شکل ۱: ناحیه جواب‌های ممکن برای واحدهای بازیابی

پارامترهای مربوط به معادلات بالا در پیوست و در جدول ۶ آمده است. P_i^{\min} و P_i^{\max} محدودیت‌های توانی و H_i^{\min} و H_i^{\max} محدودیت‌های حرارتی هستند. همچنین a_i, b_i, c_i ضریب تاثیر هزینه سوخت، a_j, b_j, c_j, e_j و f_j ضریب تاثیر هزینه سوخت Z آمین واحد بازیابی و a_k, b_k, c_k ضرایب تاثیر هزینه سوخت واحد تولیدکننده گرم می‌باشند.

۳- بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم جهش قورباغه

۳.۱ معرفی الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه

الگوریتم جهش قورباغه برای اولین بار در سال ۲۰۰۳ میلادی توسط Eusuff و Lansey معرفی شد. در این الگوریتم هر قورباغه اطلاعات مربوط به یک جواب از مسأله را داراست. الگوریتم جهش قورباغه (SFLA) شامل جمعیت اولیه‌ای از پاسخ‌های ممکن مسأله است. این جواب‌ها در واقع مجموعه‌ای از قورباغه‌های مجازی می‌باشند که خود به چندین دسته تقسیم می‌شوند. هر دسته از قورباغه‌ها ویژگی‌هایی دارند که می‌تواند متأثر از خصوصیات قورباغه‌های سایر گروه‌ها تغییر کنند.

SFLA دارای یک جستجوی محلی نیز است که در آن شبیه الگوریتم اجتماع ذرات عمل می‌شود و قورباغه‌های موجود در هر گروه با تبادل اطلاعات بین یکدیگر، موقعیت خود را نسبت به غذا بهبود می‌دهند و بعد از هر جستجوی محلی اطلاعات به دست آمده از گروه‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شود [۱۵]-[۱۹].

تجمع مورچه تقویت شده، EP و SARGA به کار گرفته شده اند و در [۱۲] نیز از MOPSO در حل مسأله‌ی CHPED استفاده شده است. روش‌ها دیگری نیز در حل مسأله‌ی CHPED در مقاله‌های [۱۳] و [۱۴] آمده است.

در این مقاله از روشی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه بهبود یافته (Shuffled Frog Leaping Algorithm) برای حل مسأله‌ی CHPED استفاده شده است و نتایج حاصله با برخی از روش‌های قبلی مقایسه شده و توانایی الگوریتم ارائه شده در مقابل سایر روش‌ها برای حل مسأله‌ی مذکور نمایش داده شده است. در نهایت نشان داده شده است که روش پیشنهادی بدون استفاده از فاکتور جریمه در رعایت قیود عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشته و در زمان کمتری به جواب بهینه‌ی مطلق همگرا می‌شود.

۲- فرمول‌بندی مسأله

مسأله CHPED در واقع مشخص کردن حرارت و توان تولیدی واحدها به گونه‌ای است که هزینه‌ی نیروگاه‌ها کمینه شود در حالی که مقدار تقاضای توان و حرارت تولید شده و یک سری قیود دیگر رعایت شوند. توان خروجی واحدهای تولیدکننده‌ی توان و حرارت خروجی واحدهای تولید کننده حرارت به وسیله حد بالا و پایین آن‌ها مشخص می‌شود. برای واحدهای بازیابی نیز محدودیت‌ها به وسیله منحنی شکل ۱ (ABCDEF) مشخص می‌شود و نشان‌دهنده‌ی این است که جواب‌ها در یک ناحیه‌ی ممکن که درون این منحنی است قرار دارند. در طول منحنی مرزی BC ظرفیت حرارتی افزایش می‌یابد در حالی که ظرفیت توانی کاهش می‌یابد و در طول منحنی CD ظرفیت حرارتی کاهش می‌یابد.

تابع هدف و قیود مسأله به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\min f_{cost} = \sum_{i=1}^{N_p} C_i(P_i) + \sum_{j=1}^{N_c} C_j(O_j, H_j) + \sum_{k=1}^{N_h} C_k(T_k) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{N_p} P_i + \sum_{j=1}^{N_c} O_j = P_d \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{N_c} H_j + \sum_{k=1}^{N_h} T_k = H_d \quad (3)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad i = 1, \dots, N_p \quad (4)$$

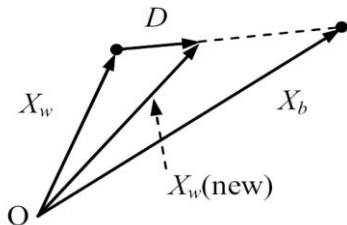
$$H_j^{\min}(O_j) \leq H_j \leq H_j^{\max}(O_j) \quad j = 1, \dots, N_c \quad (5)$$

$$T_k^{\min} \leq T_k \leq T_k^{\max} \quad k = 1, \dots, N_h \quad (6)$$

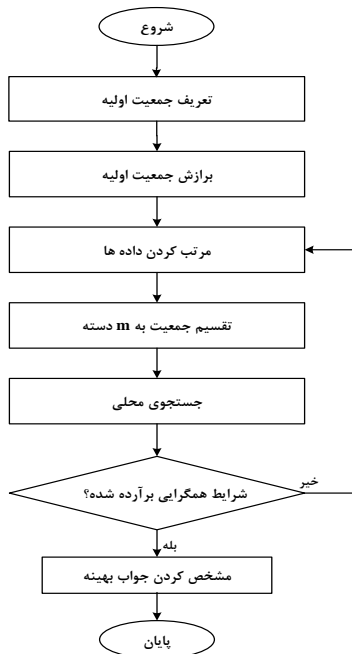
$$C_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (7)$$

۴-۵) اگر $m < ml$ است، فرآیند از گام ۲ تکرار می‌شود. اگر $y_1 < y_{max}$ فرآیند از گام ۳ تکرار می‌شود. در غیر این صورت به مرحله ۲ می‌رود.

مرحله ۵) اگر شرایط همگرایی حاصل نشده است، فرآیند جستجو از مرحله ۲ تکرار می‌شود. در غیر این صورت الگوریتم متوقف شده و بهترین جواب به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲: بهبود موقعیت قورباغه‌ها



شکل ۳: فلوجارت الگوریتم جهش قورباغه

۳.۲. بهبود الگوریتم جهش قورباغه

الگوریتم قورباغه‌ی کلاسیک در مواقعی که قورباغه‌های با بدترین برازش موقعیت خود را نسبت به گروه یا بهترین قورباغه تقویت می‌کنند، در امتداد خطی بین X_w و X_b قرار می‌گیرند. این امر ممکن است الگوریتم را به سمت جواب‌های اشتباه سوق دهد. به همین دلیل روشی برای بهبود این الگوریتم معرفی می‌گردد. ایده‌ی اصلی این روش، ایجاد گسترش جهت و طول جهش هر

به‌طور کلی مراحل SFLA که در شکل ۳ نشان داده شده است به صورت زیر است [۲۰].

مرحله ۱) جمعیت اولیه‌ای به صورت تصادفی به تعداد NP تولید و سپس برازش اعضای این جمعیت تعیین می‌شود.

مرحله ۲) اعضای جمعیت بر اساس برازش به صورت صعودی مرتب می‌شوند.

مرحله ۳) قورباغه‌ها به m گروه تقسیم می‌شوند به گونه‌ای که هر گروه شامل n قورباغه است. به عبارت دیگر $NP = n \times m$. این تقسیم‌بندی باید به گونه‌ای باشد که اولین قورباغه از جمعیت مرتب شده به اولین گروه، دومین قورباغه به دومین گروه و m امین قورباغه به m امین گروه اختصاص داده شود. سپس $(m+1)$ امین قورباغه در گروه اول و به همین شکل فرآیند تخصیص ادامه می‌یابد تا این که در هر یک از m گروه، n قورباغه قرار گیرد.

مرحله ۴) در این مرحله جستجوی محلی شامل گام‌های زیر انجام می‌شود:

۴-۱) $ml = 0$ قرار داده می‌شود وقتی که ml تعداد دسته‌ها را شمارش می‌کند و با مجموع تعداد دسته‌ها (m) مقایسه می‌شود. $y_1 = 0$ قرار داده می‌شود وقتی که y_1 تعداد مراحل جستجوی محلی را شمارش می‌کند و با حداکثر تعداد مراحل جستجوی محلی (y_{max}) مقایسه می‌شود.

۴-۲) قرار داده می‌شود $ml = ml + 1$.

۴-۳) قرار داده می‌شود $y_1 = y_1 + 1$.

۴-۴) برای هر دسته، قورباغه‌ی با بهترین برازش و قورباغه‌ی با بدترین برازش پیدا می‌شود و به ترتیب X_w و X_b نامیده می‌شود. موقعیت بهترین برازش در بین تمامی قورباغه‌ها نیز X_g نامیده می‌شود. سپس موقعیت قورباغه‌ها با استفاده از رابطه‌ی زیر مطابق شکل ۲ بهبود پیدا می‌کند.

$$D_i = rand \times (X_b - X_w) \quad (10)$$

$$X_w^{new} = X_w^{old} + D_i \quad (11)$$

$$-D_{max} \leq D_i \leq D_{max} \quad (12)$$

که در آن $rand$ یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ و D_{max} حداکثر تغییر در موقعیت قورباغه‌هاست.

اگر در طی این مرحله قورباغه‌ی بهتری (جواب بهتری) حاصل شد با قورباغه‌های قبلی جایگزین می‌شود در غیر این صورت در رابطه‌ی (۱۰) به جای X_b از X_g استفاده می‌شود و مراحل فوق دوباره تکرار می‌شود و اگر جواب بهتری حاصل شد، جایگزین جواب قبلی می‌شود. در غیر این صورت یک قورباغه به صورت تصادفی تولید و با قورباغه‌ی قبلی جایگزین می‌شود.

قورباغه می‌باشد به همین دلیل از همگرایی اشتباه الگوریتم جلوگیری می‌کند [۲۱].

در این روش اگر چهار قورباغه اول در بین قورباغه‌های مرتب شده $(X_{g,4}, X_{g,3}, X_{g,2}, X_{g,1})$ به صورت تصادفی به گونه‌ای انتخاب شوند که $X_{g,4} \neq X_{g,3} \neq X_{g,2} \neq X_{g,1}$ باشد، آنگاه تغییر بردار موقعیت قورباغه‌ها به صورت زیر انتخاب می‌شود.

$$X_{change} = X_{g,1} + rand_1 \times (X_{g,2} - X_{g,3}) + rand_2 (X_g - X_{g,4}) \quad (13)$$

$$X_{w,j}^{new} = \begin{cases} X_{change} & \text{if } rand_3 \leq rand_4 \text{ or } j = randperm \\ X_g & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

که در آن t شماره تکرار را نشان می‌دهد و $randperm$ عددی تصادفی بین ۱ و تعداد دسته‌ها را نشان می‌دهد. $rand1$ ، $rand2$ ، $rand3$ و $rand4$ نیز اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ هستند.

اگر این بهبود منجر به جوابی بهتر شد، جایگزین جواب قبلی می‌شود در غیر این صورت یک پاسخ تصادفی تولید شده و جایگزین جواب قبلی می‌گردد.

۳.۳. بکارگیری الگوریتم قورباغه در حل مسأله CHPED

در الگوریتم پیشنهادی هر قورباغه اطلاعات تولید نیروگاه‌ها را دربردارد و یک پاسخ از مسأله را نشان می‌دهد. مراحل تطابق الگوریتم SFLA در حل مسأله‌ی مورد مطالعه به ترتیب زیر است:

گام اول: تنظیمات پارامترها

در این مرحله اطلاعات مربوط به NP ، بعد مسأله، تعداد تکرارهای جست و جوی محلی، تعداد تکرارهای کل برنامه و تعداد گروه‌ها ($memplexes$) وارد می‌شود.

گام دوم: تولید جمعیت اولیه به صورت رندوم

در این مرحله با توجه به قیودی که برای مسأله CHPED وجود دارد (منحنی بسته ABCDEF در شکل ۱)، جمعیتی به تعداد زیاد تولید می‌شود و اولین NP تعدادی که در درون مرز بسته باشد، به عنوان جمعیت اولیه انتخاب می‌شوند. مابقی مراحل بهبود جواب بر روی همین داده‌ها انجام می‌شود.

گام سوم: برازش NP جمعیت اولیه تولید شده و مرتب کردن داده‌ها به ترتیب صعودی

گام چهارم: مشخص کردن دسته‌ها، X_b و X_w برای دسته‌ها و X_g برای کل داده‌ها

گام پنجم: تولید X_w های جدید با توجه به X_b و X_w و X_g و برازش آن‌ها

گام ششم: مرتب کردن داده‌ها
گام هفتم: چک کردن شرایط توقف
گام هشتم: معرفی بهترین جواب به عنوان خروجی برنامه

۳.۴. دست‌یابی برای قیود

برای رعایت قید (۱۶)، P_1 و T_1 به صورت شناور در نظر گرفته و بقیه داده‌ها به صورت تصادفی تولید می‌شوند. برای ارضای قید (۲۰) متغیرهایی که از حد بالا و پایین تجاوز می‌کنند، به ترتیب در حد بالا و پایین تنظیم می‌شوند. برای برآورده کردن قیود (۱۷) تا (۱۹) نیز همان گونه که ذکر شد، به تعداد زیاد پاسخ تصادفی تولید می‌شود و اولین تعداد که قیود مذکور را رعایت کند، به عنوان جمعیت اولیه منظور می‌شوند.

۴- سیستم‌های مورد مطالعه

در این مقاله جهت کارایی بالای روش پیشنهادی در حل مسأله‌ی CHPED دو سیستم مورد مطالعه ارائه شده است که در ادامه جزئیات آن‌ها ذکر خواهد شد. برنامه‌ی کامپیوتری مبتنی بر الگوریتم پیشنهادی در محیط MATLAB تدوین شده و مطالعات عددی روی یک کامپیوتر PIV و با پردازنده‌ی 2180 dual core و RAM ۱ گیگابایت اجرا شده است.

۴.۱. سیستم مورد مطالعه ۱

برای بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی از یک مثال استفاده شده است که از مرجع [۷] اخذ شده است. این مثال شامل یک واحد منحصراً توان، سه واحد بازیابی و یک واحد منحصراً گرما می‌باشد. تابع هدف و قیود و ناحیه جواب‌های ممکن واحدهای شماره‌ی یک، دو و سه بازیابی به ترتیب در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ آورده شده است. مدل ریاضی مسأله به صورت زیر است:

تابع هدف:

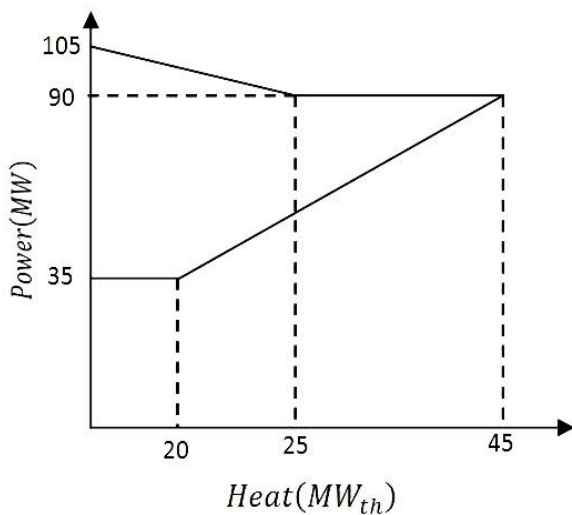
$$\min f_{cost} = C_1(P_1) + \sum_{j=1}^3 C_1(O_j, H_j) + C_1(T_1)$$

در صورتی که:

$$C_1(P_1) = 254.8863 + 7.6997P_1 + 0.00172P_1^2 + 0.000115P_1^3$$

$$C_1(O_1, H_1) = 1250 + 36O_1 + 0.0435O_1^2 + 0.6H_1 + 0.027H_1^2 + 0.011O_1H_1$$

$$C_2(O_2, H_2) = 2650 + 34.5O_2 + 0.1035O_2^2 + 2.203H_2 + 0.025H_2^2 + 0.051O_2H_2$$



شکل ۳: ناحیه عملکرد واحد ۳

جدول ۱: نتایج الگوریتم پیشنهادی و سایر روش‌ها

Power/Heat	GA [5]	HS [7]	MSFLA
P1	199.22	134.67	135
O1	45.12	52.99	40
O2	15.82	10.11	10
O3	69.89	52.23	65
H1	78.94	85.69	75
H2	22.63	39.73	40
H3	18.40	4.18	14.49
T1	54.99	45.40	45.40
Pd	250	250	250
Hd	175	175	175
Total cost	12327.37	12284.45	12116.60

برای مقایسه‌ی پاسخ الگوریتم پیشنهادی با سایر روش‌های موجود، در جدول ۱ نتایج حاصله با جمعیت اولیه‌ی ۱۰۰ در کنار پاسخ حاصل از الگوریتم ژنتیک (GA) و جست و جوی هارمونی (HS) در مقاله‌ی [۷] ارائه شده است. همان گونه که از نتایج پیداست دو روش ذکر شده هیچ کدام نتوانسته‌اند به جواب حاصل از الگوریتم پیشنهادی دست پیدا کنند ولی الگوریتم ارائه شده در این مقاله با زمانی قابل توجه به جواب بهینه مطلق رسیده است.

برای بررسی کارایی روش پیشنهادی، الگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده برای جمعیت‌های اولیه‌ی ۱۶، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ اجرا شده است. برای جمعیت اولیه ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ از ۵ دسته در الگوریتم و برای جمعیت اولیه ۱۶ تا از ۴ دسته در الگوریتم استفاده شده است. برنامه برای جمعیت‌های مختلف ۱۰۰ مرتبه اجرا شده است و بهترین، بدترین و میانگین و انحراف معیار پاسخ‌ها در ۱۰۰ اجرا برای سیستم مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است.

$$C_3(O_3, H_3) = 1565 + 20O_3 + 0.072O_3^2 + 2.3H_3 + 0.02H_3^2 + 0.04O_3H_3$$

$$C_1(T_1) = 950 + 2.0109T_1 + 0.038T_1^2$$

قیود تأمین بار:

$$P_1 + O_1 + O_2 + O_3 = P_d$$

$$H_1 + H_2 + H_3 + T_1 = H_d$$

قیود واحدهای بازیابی شماره‌ی ۱، ۲ و ۳ واحدهای تولید توان و گرما به ترتیب:

$$1.158415842H_1 - O_1 - 46.88118818 \leq 0$$

$$0.151162791H_1 + O_1 - 130.6976744 \leq 0$$

$$-0.067681895H_1 - O_1 + 45.07614213 \leq 0$$

$$-0.25H_2 - O_2 + 20 \leq 0$$

$$2.333333333H_2 - O_2 - 83.333333333 \leq 0$$

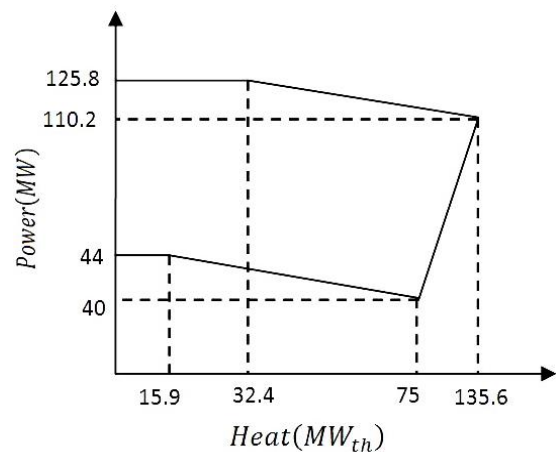
$$0.272727272727H_2 + O_2 - 60 \leq 0$$

$$2.2H_3 - O_3 - 8.999999999 \leq 0$$

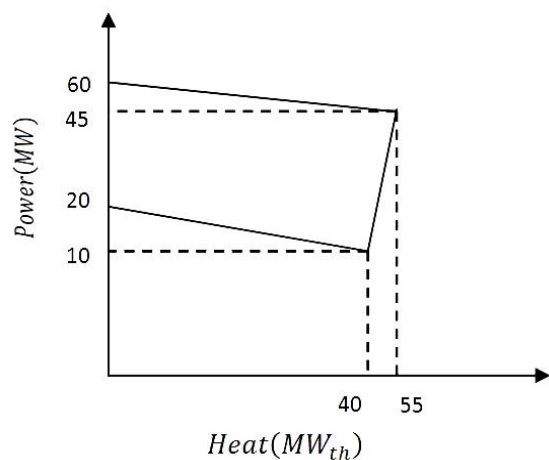
$$0.6H_3 + O_3 - 105 \leq 0$$

$$35 \leq P_1 \leq 135$$

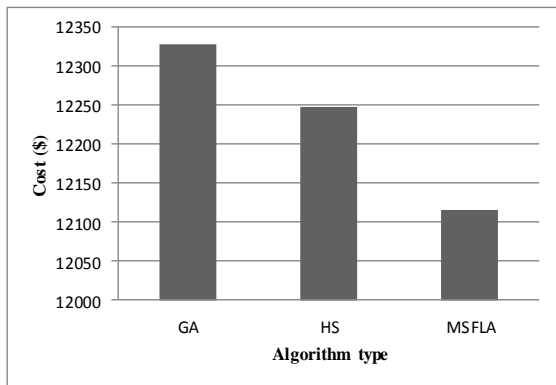
$$0.00 \leq T_1 \leq 60$$



شکل ۴: ناحیه عملکرد واحد از مورد ۱ و واحد ۳ از مورد ۲



شکل ۵: ناحیه عملکرد واحد ۲



شکل ۹: مقایسه‌ی هزینه‌ی الگوریتم‌ها

۴.۲. سیستم مورد مطالعه ۲

این سیستم مورد مطالعه یک سیستم با چهار واحد که شامل یک واحد منحصراً توان، یک واحد منحصراً گرما و دو واحد بازیابی می‌باشد [۱]. توان الکتریکی و گرمای مورد نیاز به ترتیب شامل ۲۰۰ و ۱۱۵ MW می‌باشد. نواحی عملکرد ممکن نواحی بازیابی در شکل ۴ و ۱۰ نشان داده شده است. معادلات زیر بیان‌کننده‌ی تابع هدف و روابط قیود می‌باشند.

$$\min f_{cost} = C_1(P_1) + \sum_{j=2,3} C_j(P_j, H_j) + C_4(H_4)$$

در صورتی که:

$$C_1(P_1) = 50P_1$$

$$C_2(P_2, H_2) = 2650 + 14.5P_2 + 0.0345P_2^2 + 4.2H_2 + 0.03H_2^2 + 0.031P_2H_2$$

$$C_3(P_3, H_3) = 1250 + 36P_3 + 0.0435P_3^2 + 0.6H_3 + 0.027H_3^2 + 0.011P_3H_3$$

$$C_4(H_4) = 23.4H_4$$

در رابطه با:

$$P_1 + P_2 + P_3 = P_d$$

$$H_2 + H_3 + H_4 = H_d$$

$$1781914894H_2 - P_2 - 105.7446809 \leq 0$$

$$0.177777778H_2 + P_2 - 247.00 \leq 0$$

$$-0.169847328H_2 - P_2 + 98.8 \leq 0$$

$$1.158415842H_3 - P_3 - 46.88118818 \leq 0$$

$$0.151162791H_3 + P_3 - 130.6976744 \leq 0$$

$$-0.067681895H_3 - P_3 + 45.07614213 \leq 0$$

$$0 \leq H_3 \leq 32.4 \quad \text{if} \quad P_3 = 125.8$$

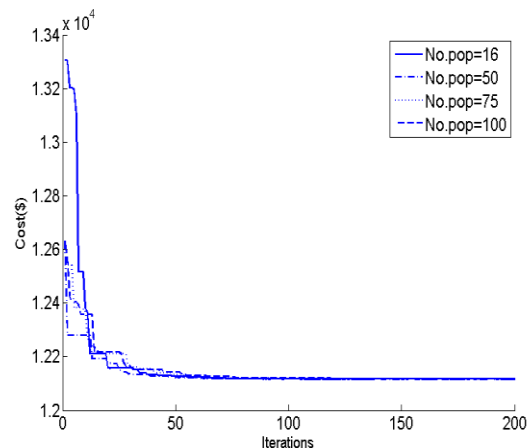
$$0 \leq H_3 \leq 15.9 \quad \text{if} \quad P_3 = 44$$

$$0.00 \leq P_1 \leq 150.00$$

اعلام‌شده در این جدول زمان میانگین ۱۰۰ بار اجرا می‌باشد همچنین در این مثال برای همه جمعیت‌ها زمان اعلام‌شده زمان ۲۰۰ تکرار می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوریتم پیشنهادی قادر است حتی با تعداد کم جمعیت اولیه نیز به بهترین پاسخ مسأله دست پیدا کند.

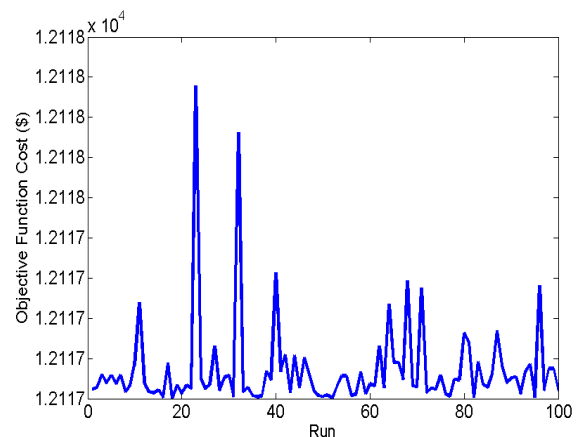
جدول ۲: نتایج اجرا با جمعیت‌های مختلف

جمعیت اولیه	بهترین جواب	متوسط جواب‌ها	بدترین جواب	انحراف معیار	زمان اجرا
16	12116.60	12117.95	12173.94	7.23	0.75
50	12116.60	12117.25	12173.93	3.10	1.29
75	12116.60	12116.70	12119.73	0.39	1.90
100	12116.60	12116.74	12118.16	0.23	2.17



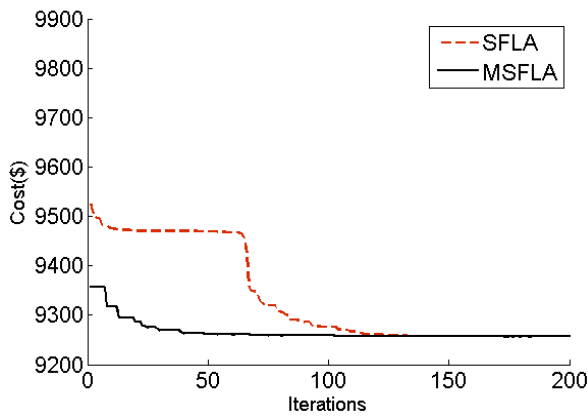
شکل ۷: نمودار همگرایی با جمعیت‌های مختلف

نمودار شکل ۷ نشان‌دهنده‌ی چگونگی رسیدن به جواب بهینه برای جمعیت‌های مختلف است. در شکل ۸ نتایج ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم MSFLA به صورت گرافیکی ارائه شده است. در شکل ۹ نیز مقایسه‌ی هزینه‌ی الگوریتم پیشنهادی، GA و HS در سیستم مورد مطالعه آمده است.



شکل ۸: نتایج ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم MSFLA در سیستم

در بیشتر تحقیق‌ها، الگوریتم SFLA توسط نویسنده همانند الگوریتم MSFLA اجرا شده است. شکل ۱۲ دیاگرام همگرایی الگوریتم‌های SFLA و MSFLA را نشان می‌دهد. روش پیشنهادی در حل مسأله‌ی بهینه‌سازی در تکرار کمتری نسبت به SFLA همگرا می‌شود. از این شکل همگرایی خوب الگوریتم MSFLA را می‌توان نتیجه گرفت.



شکل ۱۲: دیاگرام همگرایی الگوریتم‌های SFLA و MSFLA در مورد ۲

جواب‌های CHPED با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و تعدادی دیگر از روش‌های موجود در این مورد مطالعه در جدول ۵ پیوست آمده است. نتایج گزارش شده‌ی الگوریتم‌های SFLA و MSFLA با ۱۰۰ جمعیت اولیه و ۲۰۰ تکرار بدست آمده است. مقایسه‌ی نتایج بدست آمده با دیگر روش‌ها، برتری روش پیشنهاد شده را نشان می‌دهد. همچنین روش MSFLA می‌تواند در زمان کمتری نسبت به دیگر روش‌ها به حل کلی بهینه‌سازی برسد.

همان‌گونه که نتایج حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی نشان می‌دهد، این الگوریتم در مقایسه با روش‌های دیگر از کارایی بهتری برخوردار بوده و به خوبی می‌تواند فضای مقید مسأله را برای رسیدن به پاسخ نهایی و مطلوب جست و جو نماید.

۵- نتیجه‌گیری

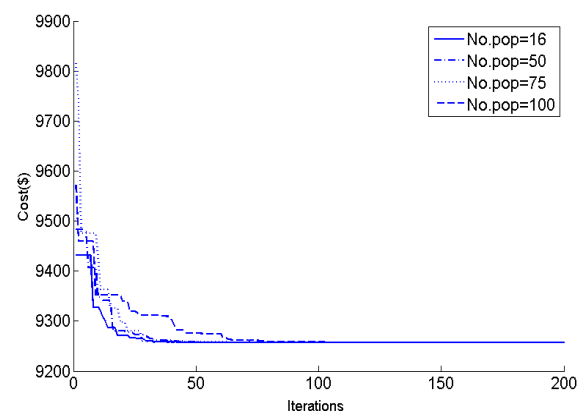
در این مقاله روش جدیدی را برای حل مسأله CHPED معرفی شد که قادر است در زمانی اندک به نواحی جواب‌های ممکن و قیدهای CHP دسترسی پیدا کند و همچنین این توانایی را دارد که با جمعیت اولیه‌ی اندک به بهترین جواب مسأله برسد. نتایج مطالعات عددی حاکی از آن است که روش معرفی شده می‌تواند در بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های ترکیبی گرما و توان به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گیرد.

$$0.00 \leq H_4 \leq 2695.20$$

به طوری که اثر تعداد جمعیت اولیه در عملکرد فرآیند بهینه‌سازی نشان داده می‌شود، روش پیشنهادی با جمعیت‌های اولیه‌ی متفاوت اجرا خواهد شد و نتایج بدست آمده حاصل از ۱۰۰ بار اجرا می‌باشد که در جدول ۳ آمده است. وضعیت همگرایی در ۱۰۰ بار اجرا برای این مورد در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که جدول‌ها نشان می‌دهند، MSFLA با هر تعداد از جمعیت اولیه می‌تواند به بهترین جواب برسد. اگرچه انحراف معیار مربوط به جواب‌های نهایی با جمعیت کوچک دارای عدد بزرگی می‌باشد. هزینه‌ی کل متفاوت در نمودار همگرایی الگوریتم MSFLA برای اندازه‌ی جمعیت‌های مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ماکزیمم تعداد تکرار در برنامه حل شده برابر ۲۰۰ می‌باشد.

جدول ۳: اثر تعداد جمعیت اولیه الگوریتم MSFLA در مورد ۲

جمعیت اولیه	بهترین جواب	متوسط جواب‌ها	بدترین جواب	انحراف معیار	زمان اجرا
16	9257.07	9258.11	9322.95	6.66	0.76
50	9257.07	9257.40	9286.41	2.94	0.98
75	9257.07	9257.26	9265.10	0.94	1.13
100	9257.07	9257.08	9257.22	0.024	1.29



شکل ۱۱: فرآیند همگرایی الگوریتم پیشنهادی با جمعیت مختلف

جدول ۴: تعداد دفعات همگرایی در ۱۰۰ اجرا برای مورد ۲

جمعیت اولیه	محدود هزینه: 9257-9258	محدود هزینه: 9258-9259	محدود هزینه: 9259-9260	محدود هزینه: 9260-9261	محدود هزینه: بیشتر از 9261
16	90	1	4	-	5
50	98	1	-	-	1
75	96	1	1	-	2
100	100	-	-	-	-

- [18] M. Alinia Ahandani, N. Pourqorban Shirjoposht, R. Banimahd, "job-shop scheduling using hybrid shuffled frog leaping" *Proceedings of the 14th International CSI Computer Conference IEEE*, 2009.
- [19] J. Ebrahimi, S. H. Hosseinian, "Unit commitment problem solution using shuffled frog leaping algorithm" *IEEE Trans. Power Syst.* Vol. 26, No. 2, pp. 573-581, 2011.
- [20] T. Niknam, E. AzadFarsani, "A hybrid self-adaptive particle swarm optimization and modified shuffled frog leaping algorithm for distribution feeder reconfiguration" *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 23, No. 8, pp. 1340-1349, 2010.
- [21] Janez Brest, Viljem Zumer, Mirjam Sepesy Maučec, "self-adaptive differential evolution algorithm in constrained real-parameter optimization" *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 2006.
- [1] T. Guo, M.I. Henwood, M. Van Ooijen, "An algorithm for combined heat and power economic dispatch" *IEEE Trans. Power Syst.* Vol. 11, pp. 1778-1784, 1996.
- [2] F.J. Rooijers, V. Amerongen RAM, "Static economic dispatch for co-generation systems" *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 9, No. 3, pp. 1392-1398, 1994.
- [3] A. Rong, R. Lahdelma, "An efficient envelope-based branch-and-bound algorithm for non-convex combined heat and power production planning" *Eur J Oper Res*, Vol. 183, No. 1, pp. 412-431, 2007.
- [4] M. Sudhakaran, S.M.R. Slochanal, "Integrating genetic algorithms and tabu search for combined heat and power economic dispatch" *Proc. of Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region, TENCON 1(2003)* 67-71.
- [5] Y. H. Song, Q. Y. Xuan, "Combined heat and power economic dispatch using genetic algorithm based penalty function method" *Electr Power Comp Syst.* Vol. 26, No. 4, pp. 363-372, 1998.
- [6] C. T. Su, C. L. Chiang, "An incorporated algorithm for combined heat and power economic dispatch" *Electr Power Syst Res.* Vol. 69, No. 2-3, pp. 187-195, 2004.
- [7] A. Vasebi, M. Fesanghary, S. M. T. Bathaee, "Combined heat and power economic dispatch by harmony search algorithm" *Int J Electr Power Energy Syst.* Vol. 29, pp. 713-719, 2007.
- [8] E.Khorram, M.Jaberipour, "Harmony search algorithm for solving combined heat and power economic dispatch problems, *Energy Conversion and Management*" Vol. 52, pp. 1550-1554, 2011.
- [9] Y. H. Song, C. S. Chou, T. J. Stonham, "Combined heat and power dispatch by improved ant colony search algorithm" *Electr Power Syst Res.* Vol. 52, pp. 115-121, 1999.
- [10] K.P.Wong, C. Algie, "Evolutionary programming approach for combined heat and power dispatch" *Electr Power Syst Res.* Vol. 61, pp. 227-232, 2002.
- [11] P. Subbaraj, R. Rengaraj, S. Salivahanan, "Enhancement of combined heat and power economic dispatch using self adaptive real-coded genetic algorithm" *Applied Energy.* Vol. 86, pp. 915-921, 2009.
- [12] L.F. Wang, C. Singh, "combined heat and power dispatch based on multi-objective particle swarm optimization" *Int J Electr Power Energy Syst.* Vol. 30, pp. 226-234, 2008.
- [13] V. N. Dieu, W. Ongsakul, "Augmented Lagrange Hopfield network for economic load dispatch with combined heat and power" *Electr Power Comp Syst.*, Vol. 37, No. 12, pp. 1289-1304, 2009.
- [14] S.S.S.Hosseini, A.Jafarnejad, A.H. Behrooz, A.H.Gandomi, "Combined heat and power economic dispatch by mesh adaptive direct search algorithm" *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No. 6, pp. 6556-6564, 2011.
- [۱۵] ا. نجفی، م. قایدی، ح. فلقی، "کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه‌ی بهبود یافته در توزیع اقتصادی بار میان نیروگاه‌ها با توابع هزینه‌ی ناصاف"، بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق PSC2010، مقاله‌ی 10-F-LEM-2041، آبان ۱۳۸۹، تهران.
- [16] T. Hoang Huynh, "A modified shuffled frog leaping algorithm for optimal tuning of multivariable PID controllers" *IEEE international conference*, 2008.
- [17] T. Hoang Huynh, D.Hoang Nguyen, "fuzzy controller design using a new shuffled frog leaping algorithm" *IEEE international conference*, 2009.

Combined Heat and Power Economic Dispatch Using Modified Shuffled Frog Leaping Algorithm

Morteza Ghayedi^{1*}, Arsalan Najafi² and Hamid Falaghi³

1* - Corresponding Author: Department of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

2- Department of Engineering, Sepidan Branch, Islamic Azad University, Sepidan, Iran.

3- Department of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

^{1*}m.ghayedi@birjand.ac.ir, ²arsalan.najafi@iausepidan.ac.ir, ³falaghi@birjand.ac.ir

Abstract- In this paper a new method has been proposed to solve Combined Heat and Power Economic Dispatch (CHPED) based on Modified Shuffled Frog Leaping Algorithm (MSFLA). Difficulty on complexity of the problem is related to its constraints. This algorithm can satisfy constraints simply. This optimization algorithm has a wide spread search space and this characteristic helps to achieve optimum solutions. Application of MSFLA in CHPED problem has been simulated on two test cases. Numerical results show that MSFLA has proposed better solutions in comparison with other existing methods.

Keywords- optimization, combined heat and power systems, economic dispatch, modified shuffled frog leaping algorithm.