

برنامه‌ریزی تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن اثر دریچه‌های بخار و نواحی ممنوعه تولید توسط الگوریتم ترکیبی BF-PSO

محسن وطن‌پور^۱، احمد صادقی یزدانخواه^{۲*}، یوسف نظری^۳

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

m_vatanpour@sut.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

sadeghi@sut.ac.ir

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

yousef.nazari@yahoo.com

چکیده: منابع تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی دارای مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی، نسبت به سایر منابع تولید انرژی هستند. با حل مسئله پخش اقتصادی بارهای الکتریکی و حرارتی، میان منابع تولید با در نظر گرفتن قیود سیستم، یک برنامه بهینه برای بهره‌برداری از منابع تولید انرژی به دست می‌آید. در ریز شبکه‌ها، وابستگی متقابل بین تولید حرارت و توان الکتریکی در منابع تولید همزمان، موضوع پخش بار اقتصادی را به یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی و پیچیده تبدیل می‌کند. در این مقاله، یک الگوریتم بهینه‌سازی مرکب از الگوریتم جست‌وجوی باکتریایی و الگوریتم مهاجرت پرندگان جهت حل این مسئله به کار برده شده است. در مدل‌سازی واحدهای حرارتی اثر باز شدن دریچه‌های بخار و نواحی ممنوعه تولید، در نظر گرفته شده‌اند که منجر به ناهمواری در تابع هدف و قیود مسئله می‌شود. تأثیر روش پیشنهادی روی سیستم‌های در مقیاس کوچک و مقیاس بزرگ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی‌های حاصل از روش پیشنهادی در مقایسه با نتایج کارهایی که اخیراً در این زمینه انجام گرفته، نشان می‌دهد که روش پیشنهادی منجر به بهبود پاسخ‌ها شده و می‌توان از آن به‌عنوان یک روش مطمئن برای حل مسئله پخش اقتصادی بارهای الکتریکی و حرارتی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تولید همزمان برق و حرارت، بهینه‌سازی سیستم قدرت، پخش بار اقتصادی، تابع هدف ناهموار، الگوریتم جست‌وجوی باکتریایی، نواحی تولید ممنوعه.

۱. مقدمه

Attainment برای بهینه‌سازی به‌کار برده شده است. برخی از محققان از روش‌های مبتنی بر تجزیه مسئله CHP-ED به دو زیر مسئله حرارتی و توان الکتریکی استفاده کرده‌اند. بر این اساس این دو زیر مسئله از طریق قید ناحیه قابل قبول مربوط به واحدهای CHP به یکدیگر مرتبط می‌شوند. فرایند ارتباط ما بین دو زیر مسئله، مستلزم استفاده از یک الگوریتم رهاسازی لاگرانژ دولایه است [۶-۸]. از دیدگاه عملی، این روش توانایی حل مسئله CHP-ED با در نظر گرفتن اثر باز شدن دریچه‌های بخار را ندارد.

در مرجع [۹]، یک الگوریتم مبتنی بر روش تجزیه Benders برای حل مسئله CHP-ED به‌کار برده شده است. اگرچه این الگوریتم توانایی اعمال به مسائل بهینه‌سازی با نواحی قابل قبول غیر محدب را دارد، اثر باز شدن دریچه‌های بخار در آن در نظر گرفته نشده است. در این میان بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر جست‌وجو برای حل این مسئله نتایج قابل قبولی را از دیدگاه زمان اجرای برنامه ارائه کرده است که از آن جمله الگوریتم جست‌وجوی هارمونی (HS°) [۱۰]، الگوریتم ژنتیک بهبود یافته (IGA^1) [۱۱]، الگوریتم بهینه‌سازی متقاطع CSO^y [۱۲]، الگوریتم جست‌وجوی فاخته (CSA^h) [۱۳]. در مرجع [۱۴]، الگوریتم مهاجرت پرندگان بهبود داده شده با ضرایب متغیر با زمان ($TVAC-PSO^q$) به‌کار گرفته شده است. پاسخ این روش نسبت به روش PSO بهبود یافته است. در مرجع [۱۵]، عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی گروهی بهبود یافته ($IGSO^{11}$)، بررسی شده و روی دو نمونه سیستم در مقیاس بزرگ اجرا شده است. همچنین در این مرجع یک سری نواحی ممنوعه برای واحدهای تولیدی توان الکتریکی معرفی شده است که موجب می‌شود قیود مسئله نیز همانند تابع هدف غیر محدب شوند. در روش‌های مذکور که سازوکار آن‌ها بر اساس جست‌وجوی فضای پاسخ مسئله است، تابع هدف به صورت غیرخطی و با لحاظ کردن اثر باز شدن دریچه‌های بخار است. در مرجع [۱۶]، حداقل کردن هزینه‌ها و آلودگی هر دو در تابع هدف مسئله گنجانده شده‌اند. همچنین در این مقاله ذخیره چرخان، نرخ شیب افزایشی و کاهش در قیود مسئله در نظر گرفته شده است. روش بهینه‌سازی مورد استفاده الگوریتم گرگ خاکستری (GWO^{11}) است.

در این مقاله، هدف حل مسئله پخش اقتصادی بارهای الکتریکی و

تولید توان الکتریکی توسط واحدهای سنتی راندمان نسبتاً پایینی دارد، بنابراین صنعت به دنبال بهره‌برداری از واحدهای جایگزین با راندمان نسبتاً بالاست. واحدهای تولید همزمان برق و حرارت (CHP^1) به دلیل داشتن راندمان بالا و همچنین برای فراهم کردن انرژی الکتریکی و حرارتی به طور همزمان، گزینه مناسبی به شمار می‌آیند [۱]. با وجود چند واحد تولید انرژی در ریزشبه‌ها، ارائه یک برنامه تولید بهینه برای واحدهای تولیدی می‌تواند در بهبود راندمان کل مجموعه بسیار موثر باشد. در سیستم‌های قدرت بدون حضور واحدهای تولید همزمان برق و حرارت، مسئله پخش بار اقتصادی^۲ می‌تواند به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی مستقل مطرح شود که با حل آن سهم تولید هر یک از واحدهای در مدار برای تأمین تقاضای توان الکتریکی هر ساعت مشخص می‌شود. همچنین در حل مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها در تولید، پخش بار اقتصادی به‌عنوان یک زیر مسئله بهینه‌سازی در هر ساعت از دوره برنامه‌ریزی اجرا می‌شود [۲ و ۳]. با حضور بارهای حرارتی و واحدهای CHP مسئله به پخش اقتصادی بارهای الکتریکی و حرارتی ($CHP-ED^2$) تبدیل می‌شود که در آن هدف حداقل کردن مجموع هزینه‌های تولید برای تأمین تقاضای توان الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن قیود واحدها، اثر دریچه‌های بخار و قید نواحی ممنوعه تولید است. از ویژگی‌های واحدهای CHP وجود یک وابستگی متقابل بین مقدار تولید حرارت و برق است که بر پیچیدگی این مسئله می‌افزاید [۴]. حل مسئله CHP-ED با در نظر گرفتن اثر باز شدن دریچه‌های بخار و نواحی تولید ممنوعه (POZ^3) در واحدهای حرارتی، مستلزم استفاده از یک روش بهینه‌سازی قدرتمند است.

با توجه به جنبه‌های اقتصادی، در سال‌های اخیر مطالعات زیادی روی مسئله CHP-ED انجام شده است. در مرجع [۵]، روشی برای حل CHP-ED ارائه شده که مبتنی بر تفکیک‌پذیری تابع هدف به توابع هزینه هر یک از واحدهاست. در مقاله مذکور، تابع هزینه از درجه اول و بنابراین خطی است و ناحیه قابل قبول تولید برای واحدهای CHP یک ناحیه محدب فرض شده است.

در مرجع [۶]، مسئله CHP-ED به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی تصادفی با تابع چندهدفه مدل‌سازی شده است. در مرجع مذکور بار الکتریکی و بار حرارتی به صورت متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده‌اند و تأثیر آن‌ها در تابع هدف مدل‌سازی شده است. روش Goal

5. Harmony Search
6. Improved Genetic Algorithm
7. Crisscross Optimization Algorithm
8. Cuckoo Search Algorithm
9. Particle Swarm Optimization with Time Varying Acceleration Coefficients
10. Improved Group Search Optimization
11. Grey Wolf Optimization

1. Combined Heat and Power
2. Economic Dispatch
3. Combined Heat and Power Economic Dispatch
4. Prohibited Operating Zones

۱.۲. تابع هدف در مسئله CHP-ED

هدف مسئله پخش اقتصادی بارهای ترکیبی الکتریکی و حرارتی، حداقل کردن هزینه‌های تولید حرارت و توان الکتریکی است، به طوری که تمام قیود سیستم و قیود هر یک از واحدها برقرار باشند. مدل ریاضی تابع هدف را می‌توان به صورت رابطه (۱) بیان کرد.

$$\min \sum_{i=1}^{N_p} f_i(P_i^p) + \sum_{j=1}^{N_{co}} f_j(P_j^{co}, H_j^{co}) + \sum_{k=1}^{N_H} f_k(H_k^h) \quad (1)$$

که در آن f_i ، f_j و f_k به ترتیب توابع هزینه مربوط به واحدهای تولید توان الکتریکی، واحدهای تولید همزمان و واحدهای تولید حرارت بوده و بر حسب دلار بر ساعت (\$/h) می‌باشند. N_p ، N_{co} و N_H به ترتیب معرف تعداد واحدهای تولید توان الکتریکی، واحدهای تولید همزمان و واحدهای تولید حرارت در شبکه هستند. در مسئله پخش بار اقتصادی سستی تابع هدف معمولاً به صورت یک تابع درجه دوم یا سوم از توان خروجی واحدها در نظر گرفته می‌شود [۶، ۱۱، ۱۷ و ۱۸]. اما از دیدگاه عملی اثر باز شدن درجه‌های بخار شکل تابع مصرف سوخت را از مدل سستی آن خارج می‌کند. این اثر را می‌توان به صورت یک عبارت سینوسی به تابع درجه دو اضافه کرد [۱۹]. هزینه سوخت واحدهای تولیدی توان و واحدهای تولید همزمان و واحدهای تولید حرارت به ترتیب در معادلات (۲) تا (۴) ارائه شده است.

$$f_i(P_i^p) = \alpha_i + \beta_i (P_i^p) + \gamma_i (P_i^p)^2 + \lambda_i \sin(\rho_i (P_i^{\min} - P_i^p)) \quad (2)$$

$$f_j(P_j^{co}, H_j^{co}) = a_j + b_j (P_j^{co}) + c_j (P_j^{co})^2 + d_j H_j^{co} P_j^{co} + e_j (H_j^{co}) + g_j (H_j^{co})^2 \quad (3)$$

$$f_k(H_k^h) = m_k + n_k (H_k^h) + q_k (H_k^h)^2 \quad (4)$$

که در آن α_i ، β_i و γ_i ضرایب هزینه واحدهای تولید توان الکتریکی بوده و λ_i و ρ_i ضرایب برای مدل‌سازی اثر باز شدن درجه‌های بخارند. همچنین ضرایب a_j ، b_j ، c_j ، d_j ، e_j و g_j ضرایب هزینه سوخت واحدهای تولید همزمان هستند. به همین ترتیب m_k ، n_k و q_k ضرایب واحدهای تولید حرارت‌اند.

۲.۲. قیدهای مسئله

در مسئله بهینه‌سازی CHP-ED دو دسته قیود در نظر گرفته شده‌اند: یکی قیود سیستم شامل تعادل توان الکتریکی و تعادل حرارت و دیگری قیود مربوط به بهره‌برداری هر یک از واحدها.

۱.۲.۲. تعادل توان الکتریکی

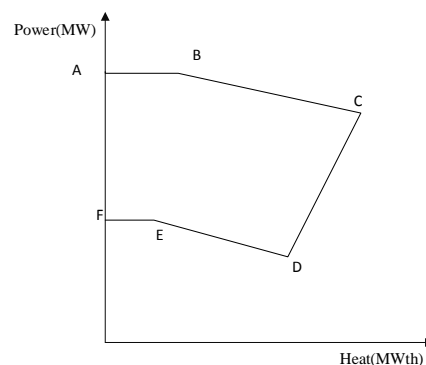
$$\sum_{i=1}^{N_p} P_i^p + \sum_{j=1}^{N_{co}} P_j^{co} = P_D + P_L \quad (5)$$

حرارتی با در نظر گرفتن قیود مسئله شامل تأمین توان الکتریکی و حرارتی مورد نیاز شبکه و همچنین قیود هر یک از واحدهای تولید توان الکتریکی، واحدهای تولید توان حرارتی و واحدهای تولید همزمان برق و حرارت است. با توجه به در نظر گرفتن اثر درجه‌های بخار و نواحی ممنوعه تولید و ماهیت غیر محدب مسئله بهینه‌سازی مذکور، الگوریتم بهینه‌سازی باکتریایی جهت داده شده با PSO (BF-PSO) برای حل مسئله غیرخطی و غیرمحدب CHP-ED به کار برده شده است. برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، مسئله CHP-ED برای چند سیستم نمونه، حل و نتایج آن ارزیابی خواهد شد. همچنین نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از روش‌های دیگری از قبیل TVAC، PSO، GWO، JGSO و CSA که در مقالات ارائه شده، مقایسه خواهد شد.

روند ادامه مقاله به شرح زیر است: در بخش ۲ مسئله CHP-ED بیان خواهد شد. بخش ۳ سازوکار الگوریتم BF-PSO را تشریح می‌کند. بخش ۴ نحوه اعمال روش پیشنهادی بر مسئله CHP-ED را ارائه می‌دهد. در بخش ۵ نتایج حاصل از شبیه‌سازی روی سیستم‌های نمونه مختلف بررسی می‌شود. در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش ۶ انجام خواهد شد.

۲. مسئله پخش اقتصادی بارهای حرارتی و الکتریکی

سیستم تحت مطالعه شامل واحدهای تولید توان الکتریکی، واحدهای تولید همزمان برق و حرارت (Co-Generation) و واحدهای تولید حرارت است. در سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت، وابستگی متقابل مابین حرارت خروجی و برق تولیدی، روی ناحیه تولید قابل قبول تأثیرگذار است. نقطه کار واحدهای تولید همزمان باید درون ناحیه قابل قبول قرار بگیرد. شکل (۱) یک نمونه از ناحیه تولید قابل قبول را برای واحدهای تولید همزمان نشان می‌دهد که با منحنی ABCDEF احاطه شده است.



شکل (۱): ناحیه قابل قبول تولید واحدهای CHP

۳. الگوریتم BF-PSO

در این مقاله، از الگوریتم ترکیبی BF-PSO برای حل مسئله بهینه‌سازی CHP-ED استفاده شده است. این در حالی است که الگوریتم BF فرایند جست‌وجو برای جهت‌گیری حرکت ذرات یک رفتار تصادفی دارد. این رفتار باعث می‌شود که الگوریتم، فضای جست‌وجوی گسترده‌ای را پوشش دهد، ولی در عین حال از سرعت همگرایی آن بکاهد. با به‌کارگیری استراتژی جهت‌گیری الگوریتم PSO در ساختار الگوریتم BF، الگوریتم ترکیبی BF-PSO حاصل می‌شود. به این ترتیب انتظار می‌رود سرعت همگرایی BF-PSO نسبت به BF بهبود یابد، درحالی‌که توانایی‌های ساختاری الگوریتم BF حفظ شده است.

۱.۳ الگوریتم جست‌وجوی باکتریایی BF

الگوریتم BF از حرکت دسته‌جمعی گونه‌ای از باکتری‌ها به نام E.coli الهام گرفته است. رفتار این باکتری‌ها در گام‌های حرکتی آن‌ها در چند مرحله مدل‌سازی شده است: مرحله حرکت به سمت ماده غذایی^۱، مرحله تولید نسل^۲ و مرحله حذف و پراکندگی^۳ [۲۱].

الف. مرحله حرکت به سمت ماده غذایی

در الگوریتم BF طول حرکت هر ذره در یک جهت تصادفی به پرش و طول حرکت ذره در همان راستای قبلی به شنا کردن موسوم است. گام‌های حرکت باکتری‌ها در این مرحله می‌تواند شامل چند پرش پشت سر هم باشد یا یک پرش و متعاقب آن چند گام شنا می‌تواند اتفاق بیفتد. مراحل شنا کردن زمانی متوقف می‌شود که به تعداد مجاز حرکت شنا انجام شده باشد یا حرکت باکتری در راستای حرکت قبلی با بهبود وضعیت همراه نباشد. شاخص وضعیت در اینجا می‌تواند همان تابع هدف مسئله بهینه‌سازی باشد. حرکت z ام از ذره i ام با استفاده از رابطه (۱۳) نمایش داده می‌شود.

$$\theta(i, j, k, l) = \theta(i, j - 1, k, l) + \Delta(i, j - 1, k, l) \quad (13)$$

که در آن، θ موقعیت ذره است و Δ جهت حرکت است که در الگوریتم BF معمولی با استفاده از رابطه (۱۴) به‌دست می‌آید. در این رابطه، $c(i, j, k, l)$ معمولاً یک مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود و $\varphi(i, j, k, l)$ جهت حرکت است که به‌صورت تصادفی تعیین می‌شود. در اینجا i, j, k, l به ترتیب شماره ذره، شماره گام حرکت به سمت ماده غذایی، شماره نسل و شماره مرحله حذف و پراکندگی را مشخص می‌کنند.

که در آن، P_D میزان بار الکتریکی P_L تلفات شبکه قدرت است.

$$P_L = \sum_{i=1}^{N_p+N_{co}} \sum_{j=1}^{N_p+N_{co}} P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^{N_p+N_{co}} B_{0i} P_i + B_{00} \quad (6)$$

که در آن B_{0i} و B_{00} ضرایب ثابت مربوط به ماتریس تلفات شبکه‌اند.

۲.۲.۲ معادله تعادل حرارت

$$\sum_{j=1}^{N_{co}} \sum_{k=1}^{N_h} H_j^{co} + \sum_{k=1}^{N_h} H_k = H_D \quad (7)$$

که در آن، H_D میزان بار حرارتی مجموعه است.

۳.۲.۲ محدودیت ظرفیت واحدها

$$P_i^{P \min} \leq P_i^P \leq P_i^{P \max} \quad i = 1, 2, \dots, N_p \quad (8)$$

$$P_j^{co \min}(H_j^{co}) \leq P_j^{co} \leq P_j^{co \max}(H_j^{co}) \quad j = 1, 2, \dots, N_{co} \quad (9)$$

$$H_j^{co \min}(P_j^{co}) \leq H_j^{co} \leq H_j^{co \max}(P_j^{co}) \quad j = 1, 2, \dots, N_{co} \quad (10)$$

$$H_k^{h \min} \leq H_k^h \leq H_k^{h \max} \quad k = 1, 2, \dots, N_h \quad (11)$$

که در آن، $P_i^{P \min}$ و $P_i^{P \max}$ حد پایین و بالا مربوط به واحد i ام تولید توان است. $P_j^{co \min}(H_j^{co})$ و $P_j^{co \max}(H_j^{co})$ حد پایین و بالای واحد z ام تولید همزمان را بیان می‌کند که تابعی از تولید حرارت توسط همان واحد (H_j^{co}) است. $H_j^{co \min}(P_j^{co})$ و $H_j^{co \max}(P_j^{co})$ حدود تولید حرارت واحد تولید همزمان z ام می‌باشند. در نهایت $H_k^{h \min}$ و $H_k^{h \max}$ حدود تولید واحدهای تولید حرارت‌اند.

۴.۲.۲ نواحی تولید ممنوعه

از دیدگاه عملی، واحدهای تولید توان الکتریکی دارای قیود مکانیکی هستند که نواحی تولید ممنوعه درون محدوده، تولید این واحدها را باعث می‌شوند. برای داشتن یک حل دقیق از مسئله پخش بار اقتصادی، این قید باید طبق رابطه (۱۲) در نظر گرفته شود [۲۰].

$$\left\{ \begin{array}{l} P_i^{P \min} \leq P_i^P \leq P_{i,1}^l \\ P_{i,j}^u \leq P_i^P \leq P_{i,j+1}^l \quad \text{where } j = 1, 2, \dots, N_{poz} \\ P_{i,N_{poz}}^u \leq P_i^P \leq P_i^{P \max} \quad \text{where } i = 1, 2, \dots, N_p \end{array} \right\} \quad (12)$$

که در آن $P_{i,1}^l$ و $P_{i,j}^u$ به ترتیب حدود بالا و پایین ناحیه ممنوعه z ام و N_{poz} تعداد نواحی ممنوعه هر واحد است.

1. Chemotaxis
2. Reproduction
3. Elimination and Dispersal

R_1 و R_2 مقادیر تصادفی با تابع توزیع یکنواخت‌اند. اطلاعات بیشتر درباره الگوریتم PSO در [۲۲] در دسترس است.

در الگوریتم BF-PSO جهت‌گیری در حرکت در هر گام از مرحله حرکت به سمت ماده غذایی که با Δ بیان می‌شود، با استفاده از رابطه سرعت ذرات در الگوریتم PSO محاسبه می‌شود.

۴. به‌کارگیری الگوریتم BF-PSO برای حل مسئله CHP-ED

برای بهره‌مندی از الگوریتم BF-PSO برای حل مسئله بهینه‌سازی غیرمحدب CHP-ED، الگوریتم مذکور باید با توجه به ویژگی‌های مختص مسئله CHP-ED تطبیق داده شود. در ادامه، روند مراحل اعمال روش پیشنهادی روی مسئله بیان می‌شود.

۱.۴. مقداردهی اولیه به باکتری‌ها

همان‌طور که در بخش قبلی گفته شد، هر باکتری دارای دو ویژگی سرعت و موقعیت است. موقعیت هر باکتری که با بردار θ_i مشخص می‌شود، یک پاسخ قابل قبول برای مسئله CHP-ED را ارائه می‌دهد. در این مسئله، θ_i از دو قسمت تشکیل شده است: قسمت اول توان الکتریکی تولیدی توسط مجموعه واحدهای تولید توان الکتریکی و واحدهای تولید همزمان است و قسمت دوم مربوط به توان حرارتی است که توسط واحدهای تولید همزمان با مشارکت واحدهای تولید حرارت تأمین می‌شود. این تقسیم‌بندی در رابطه (۱۷) نشان داده شده است.

$$\theta_i = \theta_i \left(\overbrace{\underbrace{(P_{i1}^p, P_{i2}^p, \dots, P_{iN_p}^p)}_{\text{power only units}}, \underbrace{(P_{i1}^{co}, P_{i2}^{co}, \dots, P_{iN_{co}}^{co})}_{\text{CHP units}}}_{\text{electric power}}, \overbrace{\underbrace{(H_{i1}^{co}, H_{i2}^{co}, \dots, H_{iN_{co}}^{co})}_{\text{CHP units}}, \underbrace{(H_{i1}^h, H_{i2}^h, \dots, H_{iN_H}^h)}_{\text{heat only units}}}_{\text{heat power}} \right) \quad (17)$$

همچنین سرعت حرکت باکتری که با Δ_i نمایش داده می‌شود، در رابطه (۱۸) نشان داده شده است.

$$\Delta_i = \Delta_i \left(\overbrace{\underbrace{(\delta_{i1}^p, \delta_{i2}^p, \dots, \delta_{iN_p}^p)}_{\text{power only units}}, \underbrace{(\delta_{i1}^{co,p}, \delta_{i2}^{co,p}, \dots, \delta_{iN_{co}}^{co,p})}_{\text{CHP units}}}_{\text{electric power}}, \overbrace{\underbrace{(\delta_{i1}^{co,h}, \delta_{i2}^{co,h}, \dots, \delta_{iN_{co}}^{co,h})}_{\text{CHP units}}, \underbrace{(\delta_{i1}^h, \delta_{i2}^h, \dots, \delta_{iN_H}^h)}_{\text{heat only units}}}_{\text{heat power}} \right) \quad (18)$$

مرحله اول، مقداردهی اولیه به ذرات است که در آن بار الکتریکی سیستم به‌صورت تصادفی بین واحدهای تولید توان الکتریکی و واحدهای تولید همزمان در بازه قابل قبول آن‌ها توزیع می‌شود. در این

$$\Delta(i, j, k, l) = c(i, j, k, l) \angle \varphi(i, j, k, l) \quad (14)$$

ب. سایر مراحل الگوریتم BF

در طول اجرای مرحله حرکت به سمت ماده غذایی، اثر اجتماعی ذرات می‌تواند در نظر گرفته شود. این اثر مربوط به ارتباط مابین باکتری‌ها با یکدیگر است. به این ترتیب هر ذره سعی می‌کند به سمت سایر ذرات جهت‌گیری کند و در عین حال خیلی هم به آن‌ها نزدیک نشود. بعد از اتمام مراحل حرکت به سمت ماده غذایی، مرحله تولید نسل اتفاق می‌افتد که طی آن ذراتی که وضعیت مناسبی دارند، بدون تغییر، تولید نسل می‌کنند. در مرحله نهایی، پدیده حذف و پراکندگی اتفاق می‌افتد. در این مرحله، تمام ذرات با یک احتمال از پیش تعیین‌شده حذف و ذره‌ای جدید در موقعیت تصادفی دیگری پدیدار می‌شود. جزئیات بیشتر در مورد این مراحل در [۲۱] ارائه شده است.

مشکل اصلی در مورد الگوریتم BF سرعت همگرایی آن است که وابسته به مقدار Δ در گام‌های حرکت است. برای سرعت بخشیدن به همگرایی فرایند می‌توان Δ را با استفاده از الگوریتم PSO تعیین کرد.

۲.۳. استفاده از PSO در الگوریتم BF

الگوریتم PSO در [۲۲] پیشنهاد شده و اساس آن الهام‌گرفته از حرکت دسته‌جمعی پرندگان است. در این الگوریتم، موقعیت و سرعت دو ویژگی منحصربه‌فرد هر ذره در یک فضای جست‌وجوی Π بعدی است که به ترتیب با θ_i ($\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{in}$) و V_i ($v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}$) نشان داده می‌شوند. موقعیت ذره نام بعد از یک گام حرکت با استفاده از رابطه (۱۵) به دست می‌آید که در آن سرعت حرکت ذره، طول حرکت و جهت حرکت را برای آن ذره تعیین می‌کند. سرعت ذره با توجه به اطلاعات خود ذره و اطلاعات کل مجموعه که در گام‌های قبلی حاصل شده است تعیین می‌شود. در هر گام، سرعت ذره نام با توجه به بهترین موقعیت تجربه‌شده توسط خود ذره (θ_i^{best}) و بهترین موقعیت تجربه‌شده توسط کل مجموعه ذرات (θ_i^{gbest}) و سرعت ذره در گام قبلی (V_i^t) به دست می‌آید. هریک از فاکتورهای بیان‌شده با استفاده از ضرایب وزنی مطابق با رابطه (۱۶) در تعیین سرعت ذره تأثیرگذار خواهند بود.

$$\theta_i^{t+1} = \theta_i^t + V_i^{t+1} \quad (15)$$

$$V_i^{t+1} = w * V_i^t + C_1 * R_1 (\theta_i^{best} - \theta_i^t) + C_2 * R_2 (\theta_i^{gbest} - \theta_i^t) \quad (16)$$

w ، C_1 و C_2 ضرایب وزنی ویژه‌اند که اهمیت هریک از فاکتورهای بیان‌شده را در تعیین سرعت ذره مشخص می‌کنند. همچنین

برنامه‌ریزی تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن اثر... ۷

مرحله، معادله تعادل توان الکتریکی (۵) باید در نظر گرفته شود. سپس با توجه به تولید توان الکتریکی هریک از واحدهای تولید همزمان و ناحیه قابل قبول تولید، حد بالا و پایین تولید حرارت برای هریک از آن‌ها تعیین می‌شود. تعیین حد بالا و پایین واحدهای تولید همزمان، با رسم یک خط افقی در منحنی مربوط به ناحیه قابل قبول این واحدها همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده، قابل حصول است.

۱.۴.۴. رهاسازی معادله تعادل توان

به محض آنکه تغییراتی در هر ذره به وجود بیاید، قید تعادل توان ممکن است از حدود خود منحرف شود. برای رهاسازی قید تعادل توان، بردار تولید توان باکتری i ام در وضعیت جدید (PG_i^*) در یک ضریب نرمال‌سازی مطابق با معادله (۱۹) ضرب خواهد شد.

$$\begin{cases} \overline{PG}_i^* = \overline{PG}_i^* \times \left(\frac{P_D + P_L(\overline{PG}_i^*)}{\sum_{j=1}^{N_p} P_{ij}^p + \sum_{j=1}^{N_{co}} P_{ij}^{co}} \right) & i = 1, 2, \dots, S \\ \overline{PG}_i^* = (P_{i1}^p, P_{i2}^p, \dots, P_{iN_p}^p, P_{i1}^{co}, P_{i2}^{co}, \dots, P_{iN_{co}}^{co}) \end{cases} \quad (19)$$

که در آن، S تعداد باکتری‌ها در مجموعه است. در نظر گرفتن تلفات در معادله تعادل توان باعث پیچیده‌تر شدن مدل‌سازی این معادله می‌شود. تلفات توان به تولید توان واحدها وابسته است $(P_L(\overline{PG}_i^*))$ ، و این وابستگی منجر به غیرخطی شدن معادله (۱۹) می‌شود. بنابراین می‌توان از فرایندهای تکراری برای حل این معادله غیرخطی استفاده کرد. در ادامه، حدود تولید توان باید بررسی شود.

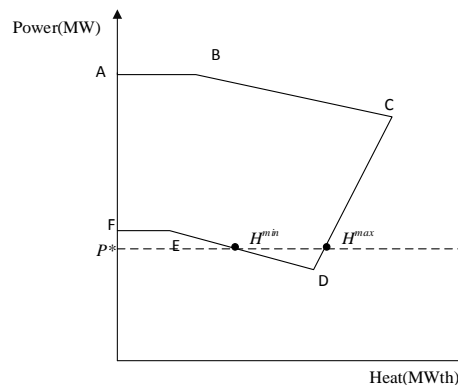
۲.۴.۴. حدود تولید توان و حرارت

برای یک باکتری جابه‌جاشده، برای قرار گرفتن توان واحدها مابین حدود بالا و پایین، مجموع انحرافات تولید توان به‌عنوان عدم تعادل تولید و مصرف محاسبه می‌شود که این عدم تعادل باید با واحدهای دارای ظرفیت جبران شود. بر این اساس، کران‌های توان حرارتی واحدهای تولید همزمان باید با توجه به تولید توان الکتریکی و منحنی توان-حرارت آن واحدها همانند شکل (۲) منطبق شود. سپس انحرافات از حدود تولید حرارت باید بررسی شود. اگر انحرافی در متغیرها وجود داشته باشد، آنگاه متغیر منحرف‌شده از قید مربوطه، باید روی کران آن ثابت شود.

۳.۴.۴. تعادل حرارتی تولیدی و مصرفی

طبق رابطه (۷)، مجموع توان حرارتی تولیدشده واحدهای تولید همزمان و واحدهای تولید حرارت باید با بار حرارتی مجموعه در تعادل باشد. بنابراین پس از هر تغییری در تولید حرارت ذرات، در فرایند تکامل الگوریتم، تعادل توان حرارتی مجدداً بررسی می‌شود. عدم تعادل تولید و مصرف محاسبه شده باید توسط واحدهای دارای ظرفیت حرارتی جبران شود. در شکل (۳)، طرح‌واره الگوریتم BF-PSO به کار برده شده برای

تعیین حدود توان حرارتی واحدهای CHP



شکل (۲): تعیین حدود توان حرارتی واحدهای CHP

در ادامه، میزان توان حرارتی مصرفی مجموعه میان واحدهای تولید همزمان و واحدهای تولید حرارت بطور تصادفی توزیع می‌شود. در این قسمت معادله تعادل توان حرارتی (۷) در نظر گرفته می‌شود. همچنین در مرحله مقداردهی اولیه برای هر ذره یک سرعت اولیه تصادفی نیز در نظر گرفته می‌شود.

۲.۴. به‌روزرسانی بردار سرعت

پس از مقداردهی اولیه باکتری‌ها به‌عنوان راه حل‌های اولیه برای مسئله CHP-ED، میزان شایستگی ذرات با عنوان θ^{gbest} برای بهترین موقعیت کل مجموعه باکتری‌ها و θ_i^{lbest} بهترین موقعیتی که ذره نام تا آن مرحله تجربه کرده است تعیین می‌شود. سپس در هر گام حرکت، θ_i^{lbest} و θ^{gbest} به‌روزرسانی می‌شوند و در نهایت، سرعت جدید هر باکتری با استفاده از رابطه (۱۶) به‌دست می‌آید.

۳.۴. توقف الگوریتم

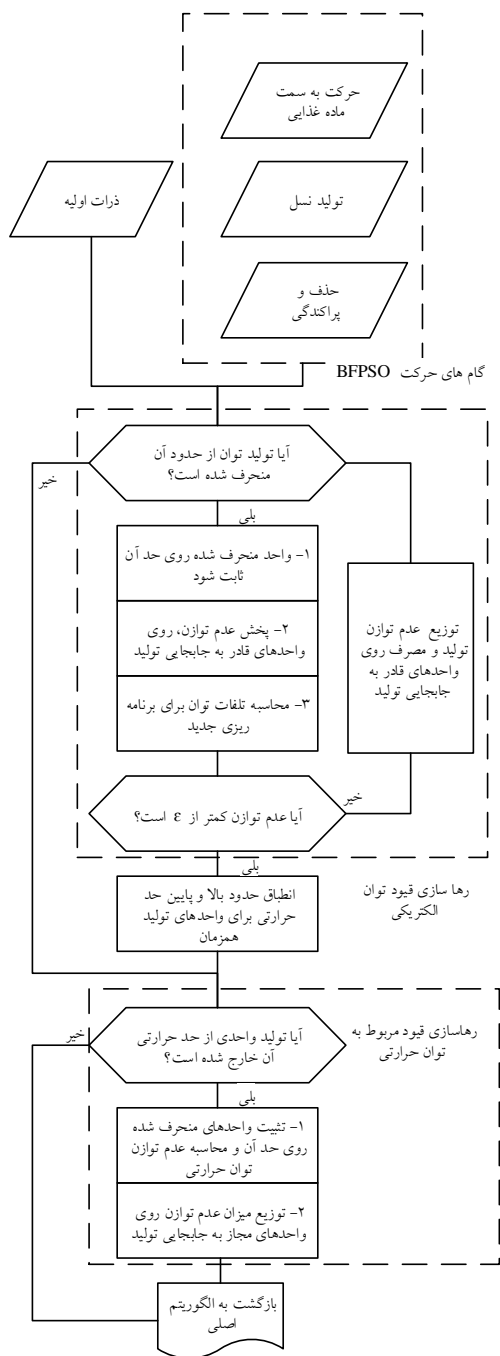
پس از انجام همه مراحل حرکت به سمت ماده غذایی، تولید نسل و حذف و پراکندگی، الگوریتم متوقف می‌شود.

۴.۴. رهاسازی قیود

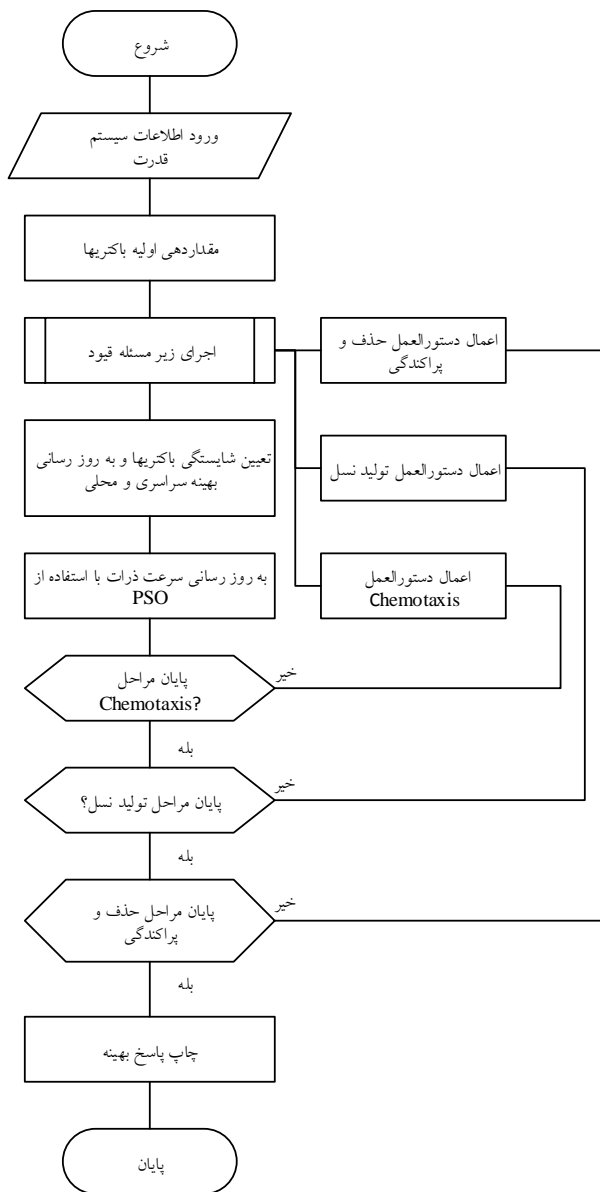
در این مقاله، از روش‌های رهاسازی ابتکاری برای باکتری‌هایی که در فرایند تکامل، بردار موقعیت آن‌ها تغییر می‌یابد استفاده می‌شود تا به این طریق انحرافات به‌وجودآمده از حدود قیودها برطرف گردد. بنابراین پیش از تعیین شایستگی هر باکتری، قیود (۵) تا (۱۲) باید

حل مسئله CHP-ED نشان داده شده است.

شکل (۴) چگونگی رهاسازی قیود در اجرای مرحله زیرمسئله را نشان می‌دهد.



شکل (۴): طرح‌واره حل زیرمسئله رهاسازی قیود



شکل (۳): طرح‌واره حل CHP-ED با استفاده از BFPPO

۱.۵. سیستم نمونه ۱ (۷ واحد تولید)

برای نشان دادن توانایی الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله CHP-ED با وجود تلفات در شبکه و در نظر گرفتن اثر باز شدن در پیچه‌های بخار این سیستم نمونه ۱ انتخاب شده است. این سیستم شامل ۴ واحد تولید توان الکتریکی، ۲ واحد تولید همزمان و ۱ واحد تولید حرارت برای تأمین توان الکتریکی ۶۰۰ مگاوات و توان حرارتی ۱۵۰ مگاوات است. اطلاعات سیستم از قبیل ضرایب توابع هزینه واحدها، محدوده تولید واحدها و نواحی کار واحدهای تولید همزمان در جدول (۱) آورده شده است.

۵. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، الگوریتم پیشنهادی روی ۳ سیستم مختلف که مربوط به یک سیستم مقیاس کوچک و دو نمونه سیستم در مقیاس بزرگ معرفی شده، در [۱۴] و [۱۵] اعمال شده است. همچنین برای مقایسه عملکرد دو الگوریتم BF و BF-PSO تمام موارد برای الگوریتم BF نیز اجرا شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار MATLAB و با استفاده از رایانه با پردازشگر ۲/۴ GHz انجام شده‌اند.

برنامه‌ریزی تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن اثر... ۹

$$[B_{ij}] = \begin{bmatrix} 49 & 14 & 15 & 15 & 20 & 25 \\ 14 & 45 & 16 & 20 & 18 & 19 \\ 15 & 16 & 39 & 10 & 12 & 15 \\ 15 & 20 & 10 & 40 & 14 & 11 \\ 20 & 18 & 12 & 14 & 35 & 17 \\ 29 & 19 & 15 & 11 & 17 & 39 \end{bmatrix} \times 10^{-6} \text{ (MW}^{-1}\text{)} \quad (20)$$

$i = 1, \dots, 6 \quad j = 1, \dots, 6$

جدول (۲) نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد که در مقایسه با کارهای انجام گرفته پیشین، الگوریتم پیشنهادی نتایج خوبی را برای حل مسئله ارائه می‌کند. مجموع هزینه تولید واحدها ۲۸۹۲/۱۰۰۹۴ دلار محاسبه شده است. به علاوه تلفات توان در روش پیشنهادی ۰/۶۲۳۶ مگاوات است که کمتر از سایر روش‌هاست.

جدول (۱): اطلاعات مربوط به سیستم نمونه ۱							
واحدهای تولید توان	α	β	γ	λ	ρ	P^{min}	P^{max}
۱	۰/۰۰۸۰	۲/۰	۲۵/۰۰	۱۰۰/۰۰	۰/۰۴۲۰	۱۰/۰۰	۷۵/۰۰
۲	۰/۰۰۳۰	۱/۸	۶۰/۰۰	۱۴۰/۰۰	۰/۰۴۰۰	۲۰/۰۰	۱۲۵/۰۰
۳	۰/۰۰۱۲	۲/۱	۱۰۰/۰	۱۶۰/۰۰	۰/۰۳۸۰	۳۰/۰۰	۱۷۵/۰۰
۴	۰/۰۰۱۰	۲/۰	۱۲۰/۰	۱۸۰/۰۰	۰/۰۳۷۰	۴۰/۰۰	۲۵۰/۰۰
واحدهای تولید همزمان	a	b	c	d	e	g	Power – Heat feasible region
۵	۰/۰۳۴۵	۱۴/۵	۲۶۵۰	۰/۰۳	۴/۲	۰/۰۳۱	[۹۸/۸, ۰], [۸۱, ۱۰۴/۸], [۲۱۵, ۱۸۰], [۲۴۷, ۰], [۴۴, ۰], [۴۴, ۱۵/۹], [۴۰, ۷۵], [۱۱۰/۲, ۱۳۵/۶], [۱۲۵/۸, ۳۲/۴], [۱۲۵/۸, ۰]
۶	۰/۰۴۳۵	۳۶	۱۲۵۰	۰/۰۲۷	۰/۶	۰/۰۱۱	[۱۱۰/۲, ۱۳۵/۶], [۱۲۵/۸, ۳۲/۴], [۱۲۵/۸, ۰]
واحدهای تولید حرارت	m	n	q			H^{min}	H^{max}
۷	۰/۰۳۸	۲/۰۱۰۹	۹۵۰			۰	۲۶۹۵/۲

ضرایب مربوط به تابع تلفات سیستم در (۶) در رابطه (۲۰) آورده

شده است.

جدول (۲): نتایج شبیه‌سازی برای سیستم نمونه ۱

تولید	DE [4]	RCGA [19]	BCO [19]	TVAC-PSO [14]	OTLBO [23]	BF	BF-PSO
P1	۴۴/۲۱۲	۷۴/۶۸۳	۴۳/۹۴۶	۴۷/۳۳۸	۴۵/۸۸۶	۴۵/۶۲۴	۴۵/۸۴۸
P2	۹۸/۵۳۸	۹۷/۹۵۸	۹۸/۵۸۹	۹۸/۵۴	۹۸/۵۴	۹۸/۶۳۳	۹۸/۵۳۲
P3	۱۱۲/۶۹	۱۶۷/۲۳	۱۱۲/۹۳	۱۱۲/۶۷	۱۱۲/۶۷	۱۱۲/۸۳	۱۱۲/۷
P4	۲۰۹/۷۷	۱۲۴/۹۱	۲۰۹/۷۷	۲۰۹/۸۲	۲۰۹/۸۱	۲۰۹/۸۳	۲۰۹/۸۲
P5	۹۸/۸۲۲	۹۸/۸۰۱	۹۸/۸	۹۲/۳۷۲	۹۳/۸۲۵	۹۳/۷۱۲	۹۳/۷۲۸
P6	۴۴	۴۴	۴۴	۴۰	۴۰	۳۹/۹۹۸	۴۰
H5	۱۲/۵۳۸	۵۸/۰۹۷	۱۲/۰۹۷	۳۷/۸۴۷	۲۹/۲۹۱	۲۹/۹۵۹	۲۹/۸۶۲
H6	۷۸/۳۴۸	۳۲/۴۱۲	۷۸/۰۲۴	۷۵	۷۵	۷۴/۹۹۸	۷۵
H7	۵۹/۱۱۴	۵۹/۴۹۲	۵۹/۸۷۹	۳۷/۱۵۳	۴۵/۷۰۸	۴۵/۰۴۳	۴۵/۱۳۸
توان تولیدی	۶۰۸/۰۴	۶۰۷/۵۸	۶۰۸/۰۴	۶۰۰/۷۴	۶۰۰/۷۴	۶۰۰/۶۲	۶۰۰/۶۲
حرارت تولیدی	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
هزینه (\$)	۱۰۳۱۷	۱۰۶۶۷	۱۰۳۱۷	۱۰۱۰۰/۳	۱۰۰۹۴/۳۵	۱۰۰۹۵/۴۳	۱۰۰۹۴/۳

۲.۵. سیستم نمونه ۲: (۲۴ واحد تولیدی)

۱.۲.۵. نتایج شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن قید نواحی ممنوعه

در جدول (۴) مقایسه‌ای بین نتایج الگوریتم‌های BF و BF-PSO با الگوریتم‌هایی که اخیراً روی این سیستم اعمال شده، صورت گرفته است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که هزینه بهره‌برداری از سیستم با به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی، در مقایسه با راه‌حل‌های پیشنهادی توسط روش‌های TVAC-PSO, IGSO, OTLBO, GWO, CSO و به ترتیب ۲۹۰، ۲۱۷، ۲۳، ۱۴ و ۷۴ دلار صرفه‌جویی حاصل شده است. منحنی همگرایی الگوریتم‌های BF و BF-PSO در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت عملکرد BF-PSO نسبت به BF سریع‌تر بوده و زودتر به پاسخ همگرا می‌شود.

سیستم نمونه ۲ به‌عنوان یک سیستم بزرگ در دو حالت مختلف بدون در نظر گرفتن قید نواحی ممنوعه [۱۴] و با در نظر گرفتن قید نواحی ممنوعه [۱۵] انتخاب شده است. در این قسمت، الگوریتم پیشنهادی برای یافتن بهترین پاسخ، روی هر دو سیستم فوق‌الذکر اعمال شده است. در این سیستم ۱۳ واحد تولید توان الکتریکی، ۶ واحد تولید همزمان و ۵ واحد تولید حرارت وجود دارند. اطلاعات مربوط به واحدها در جدول (۳) آورده شده است. میزان مصرف توان الکتریکی ۲۳۵۰ مگاوات و مصرف توان حرارتی ۱۲۵۰ مگاوات است. در قسمت‌های بعدی نتایج شبیه‌سازی برای هر دو حالت مختلف ارائه شده است.

جدول (۴): نتایج شبیه‌سازی‌ها برای سیستم نمونه ۲ بدون POZ

واحد	TVAC-PSO [14]	IGSO [15]	OTLB O [23]	GWO [16]	CSO [12]	BF	BF-PSO
P1	۵۳۸/۵۶	۶۲۸/۱۵	۵۳۸/۵۷	۵۳۸/۵۸	۴۴۸/۸	۶۲۸/۳۱۶	۶۲۸/۳۲۲
P2	۲۲۴/۴۶	۲۹۹/۴۸	۲۹۹/۲۱	۲۹۹/۳۴	۲۲۵/۲	۲۹۹/۷۳۴	۲۲۴/۴۲۴
P3	۲۲۴/۴۶	۱۵۴/۵۵	۲۹۹/۱۲	۲۹۹/۳۴	۲۹۹/۲	۲۲۴/۷۴۲	۲۹۹/۲۴۱
P4	۱۰۹/۸۷	۶۰/۸۴۶	۱۰۹/۹۹	۱۰۹/۹۷	۱۰۹/۹	۱۱۰/۵۴۴	۱۰۹/۸۶۵
P5	۱۰۹/۸۷	۱۰۳/۸۵	۱۰۹/۹۵	۱۰۹/۹۷	۱۰۹/۹	۱۵۸/۷۷۱	۱۰۹/۹۰۹
P6	۱۰۹/۸۷	۱۱۰/۰۶	۱۱۰/۴	۱۰۹/۹۷	۱۵۹/۷	۶۰/۰۲۷	۱۵۹/۸۳۱
P7	۱۰۹/۸۷	۱۵۹/۰۸	۱۰۹/۸	۱۰۹/۹۷	۱۵۹/۷	۱۶۰/۴۹۳	۱۰۹/۹۵۹
P8	۱۰۹/۸۷	۱۰۹/۸۳	۱۰۹/۶۹	۱۰۹/۹۷	۱۵۹/۷	۱۱۰/۲۸۶	۱۰۹/۸۸۵
P9	۱۰۹/۸۷	۱۵۹/۹۹	۱۰۹/۹	۱۰۹/۹۷	۱۰۹/۹	۶۰/۰۲۶۵	۱۰۹/۸۸۴
P10	۷۷/۵۲۱	۴۱/۱۰۳	۷۷/۴۹۹	۷۷/۶۲۲	۴۰	۴۰/۰۸۹۲	۴۰/۰۲۳۲
P11	۷۷/۵۲۱	۷۷/۰۶	۷۷/۸۳۶	۷۷/۶۲۲	۷۷/۴	۴۰/۲۴۶۶	۴۰
P12	۱۲۰	۹۴/۹۷۷	۵۵/۲۲۳	۵۵	۹۲/۴	۵۵/۶۴۴۹	۵۵/۰۱۰۳
P13	۱۲۰	۵۵/۷۱۴	۵۵/۰۸۶	۵۵	۵۵	۹۲/۵۳۴۴	۵۵/۱۹۵۲
P14	۸۸/۳۵۱	۸۳/۹۵۴	۸۱/۷۵۲	۸۳/۴۶۵	۸۷/۵۵	۸۳/۵۶۱۲	۸۸/۹۴۸۷
P15	۴۰/۵۶۱	۴۰	۴۱/۷۶۲	۴۰	۴۰	۴۰/۲۳۱۴	۴۰/۰۳۱۷
P16	۸۸/۳۵۱	۸۵/۷۱۳	۸۲/۲۷۳	۸۲/۷۷۳	۹۰/۶۱	۹۵/۵۹۲۹	۸۳/۳۱۹
P17	۴۰/۵۶۱	۴۰	۴۰/۵۶	۴۰	۴۰	۴۴/۰۰۱۵	۴۰/۱۱۹۷
P18	۱۰/۰۲۵	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰/۰۰۰۳
P19	۴۰/۴۲۹	۳۵	۳۱/۴۶۸	۳۱/۴۵۷	۳۵	۳۵/۱۵۷۸	۳۶/۰۳۱۳
H14	۱۰۸/۹۳	۱۰۶/۴۶	۱۰۵/۲۲	۱۰۶/۱	۱۰۸/۵	۱۰۶/۲۳۷	۱۰۹/۲۶۱
H15	۷۵/۴۸۴	۷۴/۹۹۸	۷۶/۵۲۱	۷۵	۷۵	۷۵/۱۹۹۸	۷۵/۰۲۷۴
H16	۱۰۸/۹۳	۱۰۷/۴۱	۱۰۵/۵۱	۱۰۵/۷۹	۱۱۰/۲	۱۱۲/۹۸۹	۱۰۶/۱۰۱
H17	۷۵/۴۸۴	۷۴/۹۹۸	۷۵/۴۸۳	۷۵	۷۵	۷۸/۴۵۳۲	۷۵/۱۰۳۴
H18	۴۰/۰۱	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰/۰۰۰۱
H19	۲۲/۴۶۸	۲۰	۱۸/۳۹۴	۱۸/۳۷۸	۲۰	۲۰/۰۷۱۷	۲۰/۴۶۸۸
H20	۴۵۸/۷	۴۶۶/۲۶	۴۶۸/۹	۴۶۹/۷۳	۴۶۱/۳	۴۵۷/۰۴۸	۴۶۴/۰۳۸
H21	۶۰	۶۰	۵۹/۹۹۹	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
H22	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
H23	۱۲۰	۱۲۰	۱۱۹/۹۹	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰
H24	۱۲۰	۱۱۹/۸۸	۱۱۹/۹۸	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰
حداقل (\$) (\$)	۵۸۱۲۳	۵۸۰۴۹	۵۷۸۵۶	۵۷۸۴۶	۵۷۹۰۷	۵۷۹۵۲	۵۷۸۳۲/۴۳
میانگین (\$) (\$)	۵۸۱۹۸	۵۸۱۵۶	۵۷۸۸۳	۵۷۸۷۳	۵۷۹۰۸	۵۸۰۱۲	۵۷۸۶۳/۴۹
حداکثر (\$) (\$)	۵۸۳۵۹	۵۸۲۱۹	۵۷۹۱۳	۵۷۹۱۰	۵۷۹۱۱	۵۸۳۱۳	۵۷۹۰۸/۶۰
زمان (sec)	۵۲/۲۵	۳۵/۵۴	۵/۸۲	۵/۵۲	۲۴/۹۸	۳۵/۹۴	۳۳/۸۷

جدول (۳): اطلاعات واحدها در سیستم نمونه ۲

واحدهای تولید توان	α	β	γ	λ	ρ	P^{min}	P^{max}
۱	۰/۰۰۰۲۸	۸/۱	۵۵۰	۳۰۰	۰/۰۳۵	۰	۶۸۰
۲	۰/۰۰۰۵۶	۸/۱	۳۰۹	۲۰۰	۰/۰۴۲	۰	۳۶۰
۳	۰/۰۰۰۵۶	۸/۱	۳۰۹	۲۰۰	۰/۰۴۲	۰	۳۶۰
۴	۰/۰۰۳۲۴	۷/۷۴	۲۴۰	۱۵۰	۰/۰۶۳	۶۰	۱۸۰
۵	۰/۰۰۳۲۴	۷/۷۴	۲۴۰	۱۵۰	۰/۰۶۳	۶۰	۱۸۰
۶	۰/۰۰۳۲۴	۷/۷۴	۲۴۰	۱۵۰	۰/۰۶۳	۶۰	۱۸۰
۷	۰/۰۰۳۲۴	۷/۷۴	۲۴۰	۱۵۰	۰/۰۶۳	۶۰	۱۸۰
۸	۰/۰۰۳۲۴	۷/۷۴	۲۴۰	۱۵۰	۰/۰۶۳	۶۰	۱۸۰
۹	۰/۰۰۳۲۴	۷/۷۴	۲۴۰	۱۵۰	۰/۰۶۳	۶۰	۱۸۰
۱۰	۰/۰۰۲۸۴	۸/۶	۱۲۶	۱۰۰	۰/۰۸۴	۴۰	۱۲۰
۱۱	۰/۰۰۲۸۴	۸/۶	۱۲۶	۱۰۰	۰/۰۸۴	۴۰	۱۲۰
۱۲	۰/۰۰۲۸۴	۸/۶	۱۲۶	۱۰۰	۰/۰۸۴	۵۵	۱۲۰
۱۳	۰/۰۰۲۸۴	۸/۶	۱۲۶	۱۰۰	۰/۰۸۴	۵۵	۱۲۰
واحدهای تولید همزمان	a	b	c	d	e	g	Power – Heat feasible region
۱۴	۰/۰۳۴۵	۱۴/۵	۲۶۵۰	۰/۰۳	۴/۲	۰/۰۳۱	[۹۸/۸۰,], [۸۱, ۱۰۴/۸], [۲۱۵, ۱۸۰], [۲۴۷, ۰]
۱۵	۰/۰۴۳۵	۳۶	۱۲۵۰	۰/۰۲۷	۰/۶	۰/۰۱۱	[۴۴, ۰], [۴۴, ۱۵/۹], [۴۰, ۷۵], [۱۱۰/۲, ۱۳۵/۶], [۱۲۵/۸, ۳۲/۴], [۱۲۵/۸, ۰]
۱۶	۰/۰۳۴۵	۱۴/۵	۲۶۵۰	۰/۰۳	۴/۲	۰/۰۳۱	[۹۸/۸۰, ۰], [۸۱, ۱۰۴/۸], [۲۱۵, ۱۸۰], [۲۴۷, ۰]
۱۷	۰/۰۴۳۵	۳۶	۱۲۵۰	۰/۰۲۷	۰/۶	۰/۰۱۱	[۴۴, ۰], [۴۴, ۱۵/۹], [۴۰, ۷۵], [۱۱۰/۲, ۱۳۵/۶], [۱۲۵/۸, ۳۲/۴], [۱۲۵/۸, ۰]
۱۸	۰/۱۰۳۵	۳۴/۵	۲۶۵۰	۰/۰۲۵	۲/۲۰۳	۰/۰۵۱	[۲۰, ۰], [۱۰, ۴۰], [۴۵, ۵۵], [۶۰, ۰]
۱۹	۰/۰۷۲	۲۰	۱۵۶۵	۰/۰۲	۲/۳۴	۰/۰۴	[۳۵, ۰], [۳۵, ۲۰], [۹۰, ۴۵], [۹۰, ۲۵], [۱۰۵, ۰]
واحدهای تولید حرارت	m	n	q	H^{hmin}	H^{hmax}		
۲۰	۰/۰۳۸	۲/۰۱۰۹	۹۵۰	۰	۲۶۹۵/۲		
۲۱	۰/۰۳۸	۲/۰۱۰۹	۹۵۰	۰	۶۰		
۲۲	۰/۰۳۸	۲/۰۱۰۹	۹۵۰	۰	۶۰		
۲۳	۰/۰۵۲	۳/۰۶۵۱	۴۸۰	۰	۱۲۰		
۲۴	۰/۰۵۲	۳/۰۶۵۱	۴۸۰	۰	۱۲۰		

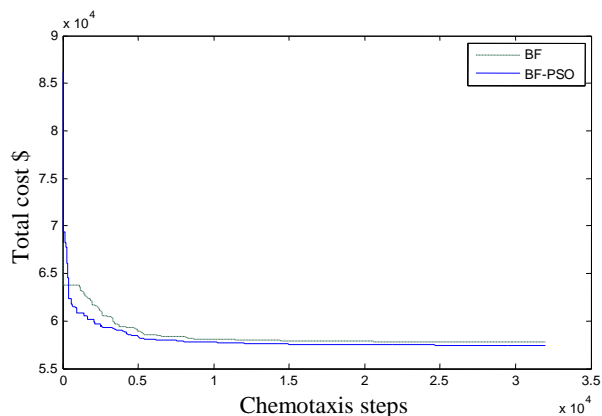
برنامه‌ریزی تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن اثر... ۱۱

جدول (۵): نواحی ممنوعه واحدهای تولید توان [۱۵]

واحد	ناحیه ۱	ناحیه ۲	واحد	ناحیه ۱	ناحیه ۲
۱	[۱۰۰-۱۵۰]	[۶۱۰-۶۴۰]	۸	[۷۰-۱۰۰]	-
۲	[۱۲۰-۱۶۰]	[۳۱۰-۳۴۰]	۹	[۷۰-۱۰۰]	-
۳	[۱۲۰-۱۶۰]	[۳۱۰-۳۴۰]	۱۰	[۶۰-۸۰]	-
۴	[۷۰-۱۰۰]	-	۱۱	[۶۰-۸۰]	-
۵	[۷۰-۱۰۰]	-	۱۲	[۸۰-۱۰۰]	-
۶	[۷۰-۱۰۰]	-	۱۳	[۸۰-۱۰۰]	-
۷	[۷۰-۱۰۰]	-			

جدول (۶): نتایج شبیه‌سازی‌ها برای سیستم نمونه ۲ با POZ

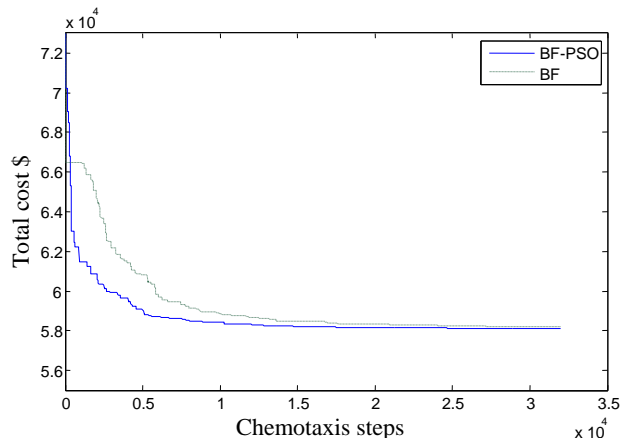
واحد	GSO [15]	IGSO [15]	BF	BF-PSO
P1	۲۶۹/۷۵۰۴	۲۶۸/۹۴۳۸	۵۳۸/۹۴۱	۵۳۹/۱۶۳
P2	۳۶۰	۲۲۴/۱۵۲۷	۲۹۸/۸۱۶	۲۲۴/۹۱۲
P3	۷۷/۰۹۴۷	۲۹۴/۹۱۰۲	۲۲۶/۸۰۲	۲۲۴/۸۰۴
P4	۱۶۱/۱۸۰۳	۱۶۲/۲۵۹۱	۱۶۰/۵۴۲	۱۶۰/۵۴۲
P5	۱۱۶/۴۷۱۱	۱۱۰/۲۸۲۲	۱۰۸/۲۱۸	۱۵۹/۶۴
P6	۱۶۰/۱۱۸	۱۵۹/۰۵۵۲	۱۶۴/۲۳۹	۱۰۹/۳۰۵
P7	۱۲۳/۱۱۵۱	۱۵۸/۸۷۲۳	۱۱۶/۶۳۶	۱۱۰/۸۳۷
P8	۱۶۲/۲۶۴۶	۱۰۹/۶۵۳	۱۰۹/۸۹۴	۱۶۱/۰۵
P9	۱۶۱/۹۵۵۶	۱۰۹/۵۵۲۱	۱۱۰/۳۴۶	۱۱۱/۱۰۴
P10	۱۱۳/۸۵۲	۲۶۸/۹۴۳۸	۴۱/۵۶۲۳	۴۶/۸۲۱۳
P11	۱۱۶/۹۸۹	۱۱۴/۶۳۹	۴۱/۲۱۷۵	۴۰
P12	۱۲۰	۱۱۴/۴۰۶	۶۴/۶۸۸۸	۱۰۰/۱۷۱
P13	۱۱۴/۲۸۳	۱۱۷/۴۳۲۳	۵۹/۸۸۸۸	۶۰/۰۵۱۸
P14	۸۱	۱۱۸/۲۴۵۹	۸۱	۸۲/۷۹۱
P15	۴۰	۸۱/۲۴۲۹	۴۶/۸۲۴۷	۴۲/۳۴۵۹
P16	۸۵/۴۳۷۷	۴۰	۸۴/۹۹۴۴	۸۹/۹۵۳۷
P17	۴۰	۸۱/۳۵۳۴	۴۶/۶۸۳۶	۴۰/۴۰۱۷
P18	۱۰	۴۰	۱۰	۱۰
P19	۳۶/۴۸۸۶	۱۰	۳۸/۷۰۶۴	۳۶/۲۱۸۴
H14	۱۰۴/۸۰۳	۳۵	۱۰۴/۸	۱۰۵/۷۹۸
H15	۷۴/۹۹۸	۱۰۴/۹۴	۸۰/۸۹۱۴	۷۷/۰۲۵۱
H16	۱۰۷/۲۸۹۸	۷۴/۹۹۸	۱۰۷/۰۴۲	۱۰۹/۸۲۵
H17	۷۴/۹۹۸	۱۰۴/۹۹	۸۰/۷۶۹۶	۷۵/۳۴۶۸
H18	۴۰/۰۰۱	۷۴/۹۹۸	۴۰	۴۰
H19	۲۰/۶۷۷۳	۴۰/۰۰۱	۲۱/۶۸۴۷	۲۰/۵۵۳۸
H20	۴۶۷/۵۸۲۵	۲۰	۴۵۴/۸۱۳	۴۶۱/۴۵۱
H21	۶۰	۴۷۰/۰۹	۶۰	۶۰
H22	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
H23	۱۱۹/۸۷۹۱	۶۰	۱۲۰	۱۲۰
H24	۱۱۹/۸۷۱۱	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰
حدافل (\$):	۵۸۶۵۰/۲۸	۵۸۲۹۲/۰۵	۵۸۲۰۴/۲۸۳	۵۸۱۱۱/۷۹۶
میانگین (\$):	۵۸۷۰۶/۱۲	۵۸۳۱۱/۸۴۴	۵۸۲۳۱/۳۴۹	۵۸۱۱۸/۱۱۰
حداکثر (\$):	۵۸۷۶۳/۹۱	۵۸۵۴۵/۴۷	۵۸۳۱۷/۷۹۳	۵۸۲۸۰/۱۴۶
زمان (sec):	--	--	۴۱/۲۹	۴۱/۶۴



شکل (۵): منحنی‌های همگرایی در سیستم نمونه ۲ بدون نواحی ممنوعه

۲.۲.۵. نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن قید نواحی ممنوعه

نواحی ممنوعه واحدهای تولید توان برای سیستم نمونه ۲ مطابق با جدول (۵) در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی مطابق جدول (۶)، ملاحظه می‌شود که بدون لحاظ کردن قید نواحی ممنوعه، تولید واحد ۱ ($P_1=۶۲۸/۳۲$) در ناحیه ممنوعه قرار می‌گیرد. بنابراین به‌ازای در نظر گرفتن این قید هزینه‌ای اضافی معادل با ۲۷۹/۳۶۶ دلار به سیستم تحمیل می‌شود. شکل (۶) برای مقایسه همگرایی الگوریتم‌های پیشنهادی برای حل مسئله CHP-ED با حضور قید نواحی ممنوعه تولید ارائه شده است. بهبود عملکرد الگوریتم BF-PSO در مقایسه با BF در رسیدن به پاسخ بهینه سراسری و افزایش سرعت همگرایی آن در این شکل مشاهده می‌شوند.



شکل (۶): منحنی‌های همگرایی برای سیستم نمونه ۲ با نواحی ممنوعه تولید

۶. نتیجه گیری

نقاط بهینه محلی فراوانی هستند، نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم BF معمولی و سایر الگوریتم‌هایی که اخیراً برای حل CHP-ED به کار گرفته شده‌اند، توانمندتر است. همچنین مقایسه عملکرد BF-PSO برای حل CHP-ED با وجود قید نواحی ممنوعه، با الگوریتم جست‌وجوی گروهی تقویت‌شده (IGSO) نشان می‌دهد که BF-PSO پاسخ بهتری دارد. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم BF-PSO با بهره‌مندی از ساختار جست‌وجوی قوی الگوریتم BF و به‌کارگیری استراتژی جهت‌گیری الگوریتم PSO می‌تواند یک الگوریتم قدرتمند و با ثبات در حل مسئله CHP-ED، در مقیاس‌های مختلف باشد.

در این مقاله، الگوریتم‌های جست‌وجوی باکتریایی BF و جست‌وجوی باکتریایی جهت داده شده با PSO برای حل مسئله پخش اقتصادی بارهای الکتریکی و حرارتی CHP-ED به کار برده شده‌اند. برای نشان دادن عملکرد الگوریتم پیشنهادی، ۳ نمونه سیستم مورد مطالعه قرار گرفت. مقایسه پاسخ الگوریتم پیشنهادی برای سیستم نمونه ۱ که یک سیستم در مقیاس کوچک است، با پاسخ سایر الگوریتم‌هایی که در کارهای اخیر استفاده شده، مؤید عملکرد مناسب این الگوریتم است. اعمال الگوریتم پیشنهادی روی سیستم‌های در مقیاس بزرگ که دارای

مراجع

- [1] United States Environmental Energy Agency, *CHP Benefits*, Available: <https://www.epa.gov/chp/chp-benefits>, accessed 04/04/2016.
- [2] Ebrahimi, J., Hosseinian, S. H., Gharehpetian, G. B., "Unit Commitment Problem Solution Using Shuffled Frog Leaping Algorithm", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 26, No.2, pp. 573-581, 2011.
- [3] Wu, L., Shahidehpour, M., Li, Z., "Comparison of Scenario-Based and Interval Optimization Approaches to Stochastic SCUC", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 27, No.2, pp. 913-921, 2012.
- [4] Basu, M., "Combined Heat and Power Economic Dispatch by Using Differential Evolution", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 38, No.11, pp. 996-1004, 2010.
- [5] Chang, C. S., Fu, W., "Stochastic Multiobjective Generation Dispatch of Combined Heat and Power Systems", *IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 145, No.5, pp. 583-591, 1998.
- [6] Guo, T., Henwood, M. I., Van Ooijen, M., "An Algorithm for Combined Heat and Power Economic Dispatch", *Power Systems*, *IEEE Transactions on*, Vol. 11, No.4, pp. 1778-1784, 1996.
- [7] Sashirekha, A., Pasupuleti, J., Moin, N. H., Tan, C. S., "Combined Heat and Power (CHP) Economic Dispatch Solved Using Lagrangian Relaxation with Surrogate Subgradient Multiplier Updates", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 44, No.1, pp. 421-430, 2013.
- [8] Dieu, V. N., Ongsakul, W., "Augmented Lagrange—Hopfield Network for Economic Load Dispatch with Combined Heat and Power", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 37, No.12, pp. 1289-1304, 2009.
- [9] Abdolmohammadi, H. R., Kazemi, A., "A Benders Decomposition Approach for a Combined Heat and Power Economic Dispatch", *Energy Conversion and Management*, Vol. 71, pp. 21-31, 2013.
- [10] Khorram, E., Jaberipour, M., "Harmony Search Algorithm for Solving Combined Heat and Power Economic Dispatch Problems", *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No.2, pp. 1550-1554, 2011.
- [11] Subbaraj, P., Rengaraj, R., Salivahanan, S., "Enhancement of Combined Heat and Power Economic Dispatch Using Self Adaptive Real-Coded Genetic Algorithm", *Applied Energy*, Vol. 86, No.6, pp. 915-921, 2009.
- [12] Meng, A., Mei, P., Yin, H., Peng, X., Guo, Z., "Crisscross Optimization Algorithm for Solving Combined Heat and Power Economic Dispatch Problem", *Energy Conversion and Management*, Vol. 105, pp. 1303-1317, 2015.
- [13] Nguyen, T. T., Vo, D. N., Dinh, B. H., "Cuckoo Search Algorithm for Combined Heat and Power Economic Dispatch", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 81, pp. 204-214, 2016.
- [14] Mohammadi-Ivatloo, B., Moradi-Dalvand, M., Rabiee, A., "Combined Heat and Power Economic Dispatch Problem Solution Using Particle Swarm Optimization with Time Varying Acceleration Coefficients", *Electric Power Systems Research*, Vol. 95, pp. 9-18, 2013.
- [15] Hagh, M. T., Teimourzadeh, S., Alipour, M., Aliasghary, P., "Improved Group Search Optimization Method for Solving CHPED in Large Scale Power Systems", *Energy Conversion and Management*, Vol. 80, pp. 446-456, 2014.
- [16] Jayakumar, N., Subramanian, S., Ganesan, S., Elanchezian, E. B., "Grey Wolf Optimization for Combined Heat and Power Dispatch with Cogeneration Systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 74, pp. 252-264, 2016.
- [17] Rooijers, F. J., Van Amerongen, R. a. M., "Static Economic Dispatch for Co-Generation Systems", *Power Systems*, *IEEE Transactions on*, Vol. 9, No.3, pp. 1392-1398, 1994.
- [18] Su, C. T., Chiang, C. L., "An Incorporated Algorithm for Combined Heat and Power Economic Dispatch", *Electric Power Systems Research*, Vol. 69, No.2, pp. 187-195, 2004.
- [19] Basu, M., "Bee Colony Optimization for Combined Heat and Power Economic Dispatch", *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No.11, pp. 13527-13531, 2011.
- [20] Niknam, T., Mojarad, H. D., Meymand, H. Z., "Non-Smooth Economic Dispatch Computation by Fuzzy and

برنامه‌ریزی تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن اثر... ۱۳

- Self Adaptive Particle Swarm Optimization*", Applied Soft Computing, Vol. 11, No.2, pp. 2805-2817, 2011.
- [21] Passino, K. M., "*Biomimicry of Bacterial Foraging for Distributed Optimization and Control*", Control Systems, IEEE, Vol. 22, No.3, pp. 52-67, 2002.
- [22] Kennedy, J., Eberhart, R., "*Particle Swarm Optimization*", IEEE International Conference on Neural Networks 1995 Proceedings, Vol.4, pp. 1942-1948, 1995.
- [23] Roy, P. K., Paul, C., Sultana, S., "*Oppositional Teaching Learning Based Optimization Approach for Combined Heat and Power Dispatch*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 57, pp. 392-403, 2014.