

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۵/۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۵/۷

استفاده از الگوریتم جست و جوی ابرکروی به منظور برنامه ریزی تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن مدل پیک بار و اثر دریچه های بخار

سجاد باقری^{۱*}، رضا جهان تاش^۲، گنورگ قره پتیان^۳

^۱ استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران

s-bagheri@iau-arak.ac.ir

^۲ کارشناسی ارشد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران

reza.jahantash@gmail.com

^۳ استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

grptian@aut.ac.ir

چکیده: تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی، یک روش صرفه جویی انرژی است که در آن، برق و حرارت به طور همزمان تولید می شوند. از ویژگی های مهم واحدهای حرارتی و الکتریکی، وجود یک وابستگی متقابل بین مقدار تولید برق و حرارت است که بر پیچیدگی مسئله می افزاید و می توان توسط روش های بهینه سازی قدرتمند مسئله را حل کرد. در این مقاله، برنامه ریزی و بهینه سازی تولید همزمان برق و حرارت شامل تأمین توان الکتریکی و حرارتی مورد نیاز شبکه انجام خواهد شد. این هدف با دو رویکرد کلی شامل اثر باز شدن دریچه های بخار و بررسی این اثر به همراه مدل نمودن پیک بار با حضور ذخیره سازهای انرژی از نوع باتری که از نوآوری های اصلی تحقیق به شمار می رود، صورت گرفته است. این مقاله استفاده از الگوریتم های جست و جوی ابرکروی و بهینه سازی ازدحام ذرات به منظور بهینه سازی و حل مسئله پخش اقتصادی بارهای الکتریکی و حرارتی در واحدهای بزرگ و مقایسه و اعتبارسنجی نتایج را پیشنهاد می دهد. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد که می توان از روش های پیشنهادی به عنوان روش مطمئن برای حل مسئله پخش بار اقتصادی بارهای الکتریکی و حرارتی با لحاظ نمودن قيود مختلف استفاده کرد.

واژه های کلیدی: تولید همزمان برق و حرارت، اثر باز شدن دریچه های بخار، مدل سازی پیک بار، سیستم های ذخیره ساز انرژی، باتری، الگوریتم جست و جوی ابرکروی.

۱. مقدمه

با توسعه سریع اقتصاد جهانی در سال‌های اخیر، میزان نیاز به تأمین تقاضای بار در ساعات پیک مصرف افزایش داشته است. به‌علت ساختار شبکه‌های قدرت، یک نوع عدم انعطاف در پاسخ سریع به نیازهای بار وجود خواهد داشت. این امر به‌ویژه در ساعات پیک، مصرف خودش را بیشتر نشان خواهد داد؛ بنابراین برای رویارویی عملی با پدیده پیک بار و انجام پیک‌سایی، می‌توان از روش‌های برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی پخش بار اقتصادی نیروگاه‌های تولید همزمان برق و حرارت و استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی استفاده کرد. از طرفی، تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بزرگ نقش بسزایی در زمینه مدیریت مصرف انرژی ایفا خواهند کرد. از جمله کاربردهای این تکنولوژی‌ها می‌توان به پیک‌سایی، تسطیح منحنی بار، آربیتراژ انرژی و تثبیت فرکانس اشاره کرد. مرجع [۱] از یک الگوریتم بهینه‌سازی مرکب شامل الگوریتم جست‌وجوی باکتریایی و الگوریتم مهاجرت پرندگان برای حل مسئله پخش بار اقتصادی در نیروگاه‌های تولید همزمان برق و حرارت^۱ با در نظر گرفتن اثر نقطه شیر، استفاده کرده است. همچنین، تأثیر این روش بر روی سیستم‌های مقیاس کوچک و بزرگ لحاظ شده است. در مرجع [۲] از الگوریتم جست‌وجوی کوکو^۲ برای حل پخش بار اقتصادی واحدهای تولید همزمان برق و حرارت استفاده شده که با در نظر گرفتن اثر دریچه بخار همراه شده است. در این روش حل، پاسخ نسبتاً سریعی در مقایسه با سایر روش‌ها دیده شده است. در مرجع [۳] با استفاده از الگوریتم کاوش باکتریایی دینامیکی تطبیقی (DABFA)^۳ به حل مسئله پخش بار اقتصادی پرداخته شده است. در این تحقیق، توان باد نیز در فرمول‌بندی مسئله لحاظ شده است. در مرجع [۴] از یک روش بهینه‌سازی متقاطع (CSO)^۴ برای حل مسئله پخش بار اقتصادی واحدهای تولید همزمان برق و حرارت در مقیاس بزرگ استفاده شده است. در مراجع [۵] و [۶] از الگوریتم جست‌وجوی فاخته تکاملی ناهمگون، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامعلوم و الگوریتم مهاجرت پرندگان به‌منظور حل مسئله پخش بار اقتصادی در نیروگاه‌های تولید همزمان برق و حرارت مقیاس بزرگ با در نظر گرفتن اثر نقطه شیر بخار، اثرات آلودگی و هزینه‌های سوخت استفاده کرده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها در این مقاله نشان می‌دهند که این الگوریتم‌ها می‌تواند سالانه میلیون‌ها دلار

صرفه‌جویی در برخی سیستم‌های بزرگ را فراهم آورند. مرجع [۷] از یک مدل برنامه‌نویسی ریاضیاتی دو مرحله‌ای به‌منظور رسیدگی به عدم همگرایی و عدم تمایز اثرات نقطه شیر بخار در توابع هزینه واحدهای تولید توان در حل مسائل پخش بار اقتصادی نیروگاه‌های تولید همزمان برق و حرارت استفاده کرده است. نکته مهم در تحقیقات گذشته این است که اثر ذخیره‌سازهای انرژی از جمله باتری‌ها و اضافه شدن آن‌ها در مواقع پیک بار و اثرات آن روی برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی تولید همزمان برق و حرارت دیده نشده است. در مرجع [۸]، از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی چندهدفه به‌منظور توزیع اقتصادی توان و حرارت با در نظر گرفتن آلاینده‌ها و قیود عملیاتی نیروگاه‌ها استفاده شده است. در این تحقیق، تأثیر افزایش توان الکتریکی و حرارتی مورد تقاضا بر هزینه سوخت و میزان آلاینده‌ها در نیروگاه‌ها بررسی شده است. در مرجع [۹]، به ارائه روش‌هایی برای کاربردهای بلندمدت در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در سیستم‌های قدرت پرداخته شده است. در این تحقیق، به‌طور مشخص، به پیک‌سایی بار توسط چند ذخیره‌ساز انرژی اشاره شده است. در مراجع [۱۰] و [۱۱]، آشکارا از روش الگوریتم جست‌وجوی ابرکروی به‌منظور بهینه‌کردن هزینه انرژی در یک سیستم انرژی خانگی و همچنین بهینه‌سازی مسائل غیرخطی استفاده شده است. در مرجع [۱۲]، از ترکیب الگوریتم جست‌وجوی هارمونی و الگوریتم بهینه‌سازی ذرات به‌منظور حل یک مسئله پخش بار اقتصادی غیرخطی استفاده شده است. مرجع [۱۳] به‌منظور بهینه کردن ظرفیت تجهیزات نصب‌شده در سیستم تولید همزمان برق و حرارت، از دو روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات و برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط استفاده کرده است. در مرجع [۱۴]، یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی حرارتی جدید در ساختمان‌های هوشمند بر اساس مواد تغییر فازی ارائه شده است. مطالعات شبیه‌سازی در مرجع [۱۴] روی یک ساختمان هوشمند نشان داده که سیستم ذخیره‌سازی حرارتی پیشنهادی یک راه‌حل امکان‌پذیر و مقرون‌به‌صرفه برای حل پیک‌سایی بار و نوسان توان است.

در این مقاله، برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی تولید همزمان برق و حرارت شامل تأمین توان الکتریکی و حرارتی مورد نیاز شبکه صورت خواهد گرفت. این هدف با دو رویکرد کلی شامل در نظر گرفتن اثر دریچه‌های بخار و بررسی این اثر به‌همراه استفاده از ذخیره‌ساز انرژی از نوع باتری در هنگام پیک بار که از نوآوری‌های اصلی تحقیق به شمار می‌رود، صورت گرفته است. با توجه به ماهیت غیرمحدب و غیرخطی بودن مسئله بهینه‌سازی مذکور، برای

1. Combined Heat and Power (CHP)
2. Cuckoo Search Algorithm
3. Dynamic Adaptive Bacterial Foraging Algorithm
4. Crisscross Optimization Algorithm

بار مقدار بار را برای نیروگاه‌ها به منظور کم کردن هزینه‌ها معین می‌کند. هدف مسئله پخش اقتصادی بارهای ترکیبی الکتریکی و حرارتی، حداقل نمودن هزینه‌های تولید حرارت و توان الکتریکی می‌باشد. مدل ریاضی تابع هدف را می‌توان به صورت رابطه (۱) بیان کرد؛ که در آن F_{pi} , F_{coj} و F_{hk} به ترتیب توابع هزینه مربوط به واحدهای تولید توان الکتریکی، واحدهای تولید همزمان و واحدهای تولید حرارت هستند. N_{pi} و N_{co} و N_{hk} به ترتیب معرف تعداد واحدهای تولید توان الکتریکی، واحدهای تولید همزمان و واحدهای تولید حرارت در شبکه هستند.

$$\min \sum_{i=1}^{N_p} F_{pi}(P_{pi}) + \sum_{j=1}^{N_{co}} F_{coj}(P_{coj}, H_{coj}) + \sum_{k=1}^{N_H} F_{hk}(H_{hk}) \quad (1)$$

در مسئله پخش بار اقتصادی سنتی، تابع هدف معمولاً به صورت تابع درجه دوم و سوم از توان خروجی واحدها به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$F_{pi}(P_{pi}) = a_{pi} + b_{pi} P_{pi} + C_{pi} P_{pi}^2 \quad (2)$$

اما از دیدگاه عملی، باز شدن دریاچه‌های بخار شکل تابع سوخت را از مدل سنتی آن خارج می‌کند. این اثر را می‌توان به صورت یک ترم سینوسی به تابع درجه دو اضافه کرد. هزینه واحدهای تولید توان الکتریکی، واحدهای تولید همزمان و واحدهای تولید حرارت به صورت زیر است.

$$f_i(P_i^p) = \alpha_i + \beta_i(P_i^p) + \gamma_i(P_i^p)^2 + \left| \lambda_i(\sin \rho_i(P_i^{pmin} - P_i^p)) \right| \quad (3)$$

$$f_j(P_{coj}, H_{coj}) = a_j + b_j(P_{coj}) + C_j(P_{coj}^2) + d_j(H_{coj} P_{coj}) + e_j(H_{coj}) + g_j(H_{coj}^2) \quad (4)$$

$$f_k(H_{hk}) = m_k + n_k(H_{hk}) + q_k(H_{hk}^2) \quad (5)$$

f_i و f_j و f_k به ترتیب معادلات هزینه واحدهای تولید توان الکتریکی، تولید همزمان و تولید حرارت هستند و α_i , β_i , γ_i , λ_i ضرایب هزینه واحدهای تولید توان الکتریکی بوده و همچنین، ρ_i ضرایب مدل سازی اثر باز شدن دریاچه‌های بخار هستند.

همچنین ضرایب a_j , b_j , C_j , d_j , e_j , g_j ضرایب هزینه سوخت واحدهای تولید همزمان و ضرایب m_k , n_k , q_k ضرایب واحدهای تولید حرارت هستند. همچنین P_{coj} , P_{pi} توان‌های مربوط به واحدهای تولید توان الکتریکی و تولید همزمان و نیز H_{hk} توان حرارتی منابع تولید حرارت هستند. در مسئله CHP-ED سه قید در نظر گرفته می‌شود که عبارت‌اند از:

الف. تعادل توان الکتریکی: در حالت کلی توان تولیدشده توسط

همه واحدهای الکتریکی و تولید همزمان باید به میزان کل توان

اولین بار از الگوریتم جست‌وجوی ابرکروی (HSS)^۱ برای حل این موضوع استفاده خواهد شد و برای مقایسه نتایج نیز از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)^۲ استفاده شده است.

روند ادامه مقاله به این صورت است: در بخش ۲، پخش بار اقتصادی در نیروگاه‌های تولید همزمان برق و حرارت بیان خواهد شد. در بخش ۳، مفهوم پیک بار و پیک‌سایبی توضیح داده شده است. بخش ۴ سازوکار الگوریتم جست‌وجوی ابرکروی را تشریح می‌کند. در بخش ۵، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها روی سیستم مورد مطالعه بررسی می‌شود. در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش ۶ انجام خواهد شد.

۲. پخش بار اقتصادی در نیروگاه‌های CHP و اثر

باز شدن دریاچه بخار

واحدهای تولید همزمان برق و حرارت به دلیل داشتن راندمان بالا و همچنین برای فراهم کردن انرژی الکتریکی و حرارتی به صورت همزمان، گزینه مناسبی به منظور بالا بردن راندمان به شمار می‌آید.

در سیستم‌های قدرت، بدون حضور واحدهای تولید همزمان برق و حرارت، مسئله پخش بار می‌تواند به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی مستقل مطرح شود که با حل آن سهم تولید هریک از واحدهای در مدار برای تأمین تقاضای توان الکتریکی هر ساعت مشخص می‌شود. با حضور واحدهای CHP مسئله پخش بار به مسئله CHP-ED^۳ تبدیل می‌شود که هدف آن حداقل نمودن مجموعه هزینه‌های تولید برای تأمین تقاضای توان الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن قیود واحدها شامل اثر باز شدن دریاچه بخار و مدل پیک بار است. از ویژگی‌های واحدهای CHP وجود وابستگی متقابل بین تولید برق و حرارت است که بر پیچیدگی این مسئله می‌افزاید. حل مسئله CHP-ED با در نظر گرفتن اثر باز شدن دریاچه بخار و مدل پیک بار مستلزم استفاده از یکی از روش‌های بهینه‌سازی می‌باشد که در این مقاله از الگوریتم HSS و PSO استفاده شده است.

توزیع اقتصادی بار روشی با بیشترین کارآمدی، کمترین هزینه و بهره‌برداری قابل اطمینان یک سیستم قدرت را به وسیله پخش مناسب منابع تولید انرژی برای تأمین بار سیستم تعیین می‌کند. هدف اولیه آن به حداقل رساندن هزینه کل تولید با در نظر گرفتن محدودیت‌های بهره‌برداری منابع تولید است. مسئله توزیع اقتصادی

1. Hyper Spherical Search
2. Particle Swarm Optimization
3. Combined Heat and Power Economic Dispatch

۳. مفهوم پیک‌بار و پیک‌سای

همان‌طور که مشخص است، تغییرات بار مصرفی نسبت به یک دوره زمانی مشخص نظیر ساعت، روز، ماه و سال را منحنی بار می‌نامند. الگوی زمانی مصرف در گروه‌های مختلف مصرف‌کنندگان تا حد زیادی مشابه است و در منحنی بار روزانه منجر به ایجاد پیک (قله) یا دره می‌شود. در ساعات دره به دلیل کاهش تقاضای مصرف، میزان تولید انرژی مازاد بر نیاز مصرف است و در نتیجه نیاز به سرمایه‌گذاری برای ظرفیت‌های جدید کاهش می‌یابد. این در حالی است که در زمان پیک، حداکثر مصرف را خواهیم داشت و نیاز به ظرفیت‌های جدید تولید افزایش پیدا می‌کند. کاهش پیک بار، مفهوم پیک‌سای شبکه را دنبال می‌کند، به طوری که ظرفیت ذخیره چرخان شبکه افزایش و نیاز به احداث نیروگاه‌های جدید کاهش می‌یابد. جابه‌جایی یا تغییر ساعات یکی از مواردی است که هدف فوق را دنبال می‌کند. ساعات اوج بار برحسب فصول سال و مناطق مختلف متفاوت است، اما می‌توان این مدت‌زمان را با توجه به ساعات رسمی کشور در شش‌ماهه اول سال حدوداً از ساعت ۱۱ تا ۱۵ به عنوان پیک ظهرگاهی و از ساعت ۱۹ تا ۲۳ به عنوان پیک شبانه و در شش ماه دوم سال ساعت ۱۷ تا ۲۱ به عنوان پیک شبانه در نظر گرفت. امروزه، با توجه به وجود منابع CHP و CCHP می‌توان در ساعات پیک بار از حداکثر توان تولیدی الکتریکی این منابع، که به صورت محسوسی در پیک‌سای اثر دارند و تأمین‌کننده بخشی از سیستم گرمایش و سرمایش نیز هستند، استفاده کرد [۱۵]. به منظور پیک‌سای و جلوگیری از خاموشی‌ها روش معمول نصب منبع تغذیه اضطراری است. راه‌حل دیگر، استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی است که در این مقاله به آن پرداخته شده است.

۴. الگوریتم جست‌وجوی ابرکروی

این الگوریتم فرااکتشافی را اولین بار دکتر گنورک قره‌پتیان و همکاران ایشان در سال ۲۰۱۴ در مرجع [۱۰] مدل‌سازی و معرفی کرد. از دیدگاه عمومی، بهینه‌سازی فرایندی است که برای بهبود مسائلی که به صورت زیر مدل می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\min\{f(x) | x \in X\} \quad (10)$$

$$g(x) \geq 0 \text{ and } h(x) = 0$$

به طوری که انتظار می‌رود که $f(x)$ در طول فرایند بهینه‌سازی، حداقل شود. همه مسائل دنیای واقعی دارای تعدادی قید یا محدودیت هستند که به صورت قیود برابری $h(x)$ و قیود نابرابری $g(x)$ دسته‌بندی می‌شوند. مقدار $f(x)$ به مجموعه متغیرهای تصمیم

مصرفی و تلفات باشد؛ از این روابط (۶) و (۷) برای آن‌ها در نظر گرفته شده است.

$$\sum_{i=1}^N P_{pi} + \sum_{j=1}^N P_{cj} = P_D + P_L \quad (6)$$

$$P_L = \sum_{i=1}^N P_i^{P+N_{co}} \sum_{j=1}^N P_i^{P+N_{co}} B_{ij} P_j + \sum_{j=1}^N P_i^{P+N_c} B_{i0} P_i + B_{00} \quad (7)$$

که B_{ij} ، B_{i0} و B_{00} ضرایب ثابت مربوط به ماتریس تلفات شبکه هستند.

ب. معادلات تعادل حرارت: این معادلات به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\sum_{j=1}^{N_{co}} \sum_{k=1}^{N_h} H_{coj} + \sum_{k=1}^{N_h} H_{hk} = H_D \quad (8)$$

در این قسمت، H_D میزان بار حرارتی است که میزان توان تولیدی حرارتی برابر با بار حرارتی است.

ج. محدودیت ظرفیت واحدهای الکتریکی و حرارتی و تولید همزمان:

محدودیت ظرفیت واحدهای الکتریکی و حرارتی و تولید همزمان به‌طور جداگانه برای واحدهای تولید توان، واحدهای تولید همزمان و واحدهای تولید حرارت به صورت زیر است:

$$P_{pi, \min} \leq P_{pi} \leq P_{pi, \max} \quad (9)$$

$$P_{coj, \min}(H_{coj}) \leq P_{coj} \leq P_{coj, \max}(H_{coj})$$

$$H_{coj, \min}(P_{coj}) \leq H_{coj} \leq H_{coj, \max}(P_{coj})$$

$$H_{hk, \min} \leq H_{hk} \leq H_{hk, \max}$$

که $P_{pi, \max}$ و $P_{pi, \min}$ حد پایین و حد بالای مربوط به واحد نام تولید توان الکتریکی است. $P_{coj, \min}(H_{coj})$ و $P_{coj, \max}(H_{coj})$ نیز حد پایین و حد بالای واحد نام تولید توان الکتریکی واحدهای همزمان را معرفی می‌کند و $H_{coj, \min}(P_{coj})$ و $H_{coj, \max}(P_{coj})$ حدود تولید حرارت واحد تولید همزمان نام می‌باشد و $H_{hk, \min}$ و $H_{hk, \max}$ حد بالا و حد پایین واحدهای تولید حرارت هستند.

اثر باز شدن دریچه بخار در منابع تولید همزمان با روابط فوق بیان و دیده شد که یک قید سینوسی به تابع سوخت اضافه گردید. باید توجه داشت که این به معنای کم شدن بخار رسیده به توربین و کاهش توان الکتریکی است؛ از این رو بسته به اینکه در طول پیک مصرف هستیم یا اینکه از لحاظ هزینه، تولید بخار برای مصارف سرمایشی (چیلرهای جذبی) یا گرمایشی، به صرفه است یا خیر، می‌توان از خصوصیت CHP و CCHP^۱ها استفاده کرد تا هزینه‌ها را به حداقل ممکن رساند.

بستگی دارد که دارای یک محدوده حداقل و حداکثر است. فرایند این الگوریتم به پنج مرحله زیر تقسیم می‌شود [۱۰-۱۲]:

مرحله اول: مقداردهی اولیه ذرات

این گام الگوریتم جست‌وجوی ابرکروی را مقداردهی اولیه می‌کند و خود دارای چهار زیربخش است.

الف. مقداردهی اولیه پارامترها

تعدادی از پارامترهای این الگوریتم باید توسط کاربر تعیین شوند، مانند N_{pop} (تعداد جمعیت اولیه)، N_{sc} (تعداد مراکز کره)، r_{min} (شعاع داخلی کره)، r_{max} (شعاع خارجی کره)، Pr_{angle} و N_{newpar} که در بخش‌های بعد معرفی می‌شوند.

ب. تولید جمعیت اولیه

این الگوریتم با تعداد N_{pop} پاسخ تولیدشده تصادفی شروع می‌شود و به صورت تصادفی از بازه $[X_{i,min}, X_{i,max}]$ که دارای توزیع یکنواخت است، انتخاب شده‌اند. برای هر پاسخ، که ذره نامیده می‌شود، تابع هدف محاسبه می‌شود.

ج. نام‌گذاری مراکز کره

ذرات بر اساس مقدار تابع هدف محاسبه‌شده آن‌ها به صورت صعودی منظم می‌شوند و بهترین ذرات با کمترین مقدار برای تابع هدف، به تعداد N_{sc} برای مراکز کره انتخاب می‌شوند. در مسئله بهینه‌سازی N بعدی ذرات با یک بردار $(I \times N)$ به صورت $[p_1, p_2, \dots, p_N]$ نشان داده می‌شوند، که p_i هم تغییرهای تصمیم i هستند و $f(p_1, p_2, \dots, p_N)$ مقادیر تابع هدف به ازای هر ذره هستند.

د. توزیع ذرات بین کره‌ها

تعداد N_{sc} از جمعیت به عنوان مرکز دایره‌ها (SC_s) انتخاب می‌شوند. مابقی ذرات با توجه به غلبه SC ها، که به صورت معکوس با مقادیر تابع هدف متناظر با آن‌ها متناسب است، در میان SC ها توزیع می‌شوند. میزان غلبه SC به صورت نرمالیزه شده برای هر SC با معادله زیر تعریف می‌شود.

$$D_{sc} = \left| \frac{0 FD_{SC}}{\sum_{i=1}^{N_{SC}} 0 FD_i} \right| \quad (11)$$

که در آن، (OFD) اختلاف تابع هدف برای هر SC می‌باشد. پس طبق رابطه زیر، تعداد اولیه ذرات متعلق به SC است که به صورت تصادفی به وسیله هر SC از ذرات باقی مانده انتخاب شده است.

$$0 FD_{SC} = f_{sc} - \max_{SC_s} \{f\} \quad (12)$$

$$round \{D_{SC} \times (N_{pop} - N_{SC})\}$$

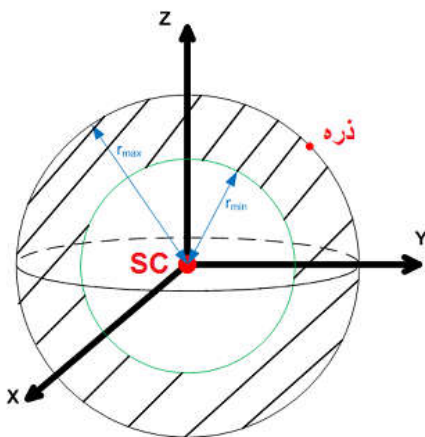
مرحله دوم: جست‌وجو

یک ذره با جست‌وجو در فضای محدودشده به وسیله یک کره که مرکز آن با یک SC از قبل مشخص شده و شعاع r که برابر فاصله بین ذره و مرکز کره است، به دنبال یک پاسخ بهتر می‌گردد. بنابراین مرکز مختصات در مرکز کره تنظیم می‌شود. فرایند جست‌وجو با تغییر پارامترهای ذره در مختصات کروی یعنی r و θ انجام خواهد شد.

در این الگوریتم، هر زاویه ذره به اندازه α رادیان با احتمال Pr_{angle} تغییر داده می‌شود. α در هر تکرار به صورت تصادفی با یک توزیع یکنواخت بین $(0, 2\pi)$ انتخاب می‌شود. بعد از زوایای ذرات، فاصله بین ذرات و SC متناظر با آن‌ها به صورت تصادفی در بازه $[r_{min}, r_{max}]$ انتخاب می‌شود که r_{max} در یک کره N بعدی به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$r_{max}^2 = \sum_{i=1}^N (P_{i,center} - P_{i,particle})^2 \quad (13)$$

موقعیت‌های ممکن ذره برای یک مورد سه‌بعدی در شکل (۱) به صورت فضای هاشورزده نشان داده شده است. در این الگوریتم، هر ذره کره خود را با توجه به SC آن جست‌وجو می‌کند و عملگر فرایند جست‌وجو به وسیله رابطه $Q[r_{min}, r_{max}, Pr_{angle}, SC]$ نشان داده می‌شود.



شکل (۱): فضای جست‌وجوی ممکن به صورت قسمت هاشورخورده [۱۱]

لذا در این لحظه، برجسب‌های این ذره و SC عوض خواهند شد؛ یعنی نقش ذره SC جدید را می‌گیرد که ذره قبلی بوده است. حال الگوریتم به وسیله SC جدید در موقعیت جدید به جست‌وجوی خود ادامه می‌دهد. این وضعیت در هر تکرار بعد از فرایند جست‌وجو باید بررسی شود [۱۰-۱۲].

مرحله سوم: تغییر فضای جست‌وجوی نامناسب

هر SC و ذرات آن، یک مجموعه ذرات را درست می‌کنند. ذرات نامناسب در یک فضای جست‌وجو مانند شکل (۲) به SC های دیگر

عوض می شوند.

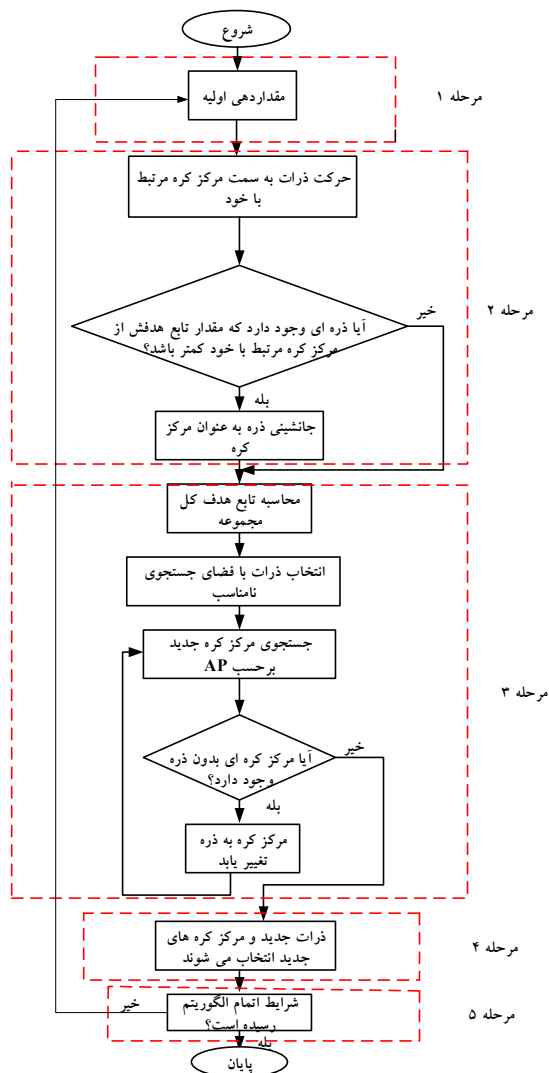
در این گام، برای منعطف تر کردن الگوریتم و جست و جوی بهتر فضا، تعداد N_{newpar} از بدترین ذرات که نتوانسته اند به موقعیت مناسبی برسند، حذف شده و با همین تعداد ذره جدید تولید شده جایگزین خواهند شد. تعداد N_{newpar} ، به میزان ۵٪ از جمعیت اولیه تنظیم می شود. این ذرات همانند آنچه در گام یک شرح داده شد، به SC اختصاص می یابند.

مرحله پنجم: آزمون همگرایی

همه SCها به استثنای بهترین آنها بعد از مدتی حذف خواهند شد و همه ذرات به بهترین SC اختصاص خواهند یافت. به محض رسیدن به یکی از شرایط زیر الگوریتم قطع خواهد شد:

الف. به حداکثر تعداد تکرارها برسد؛ ب. اختلاف بین بهترین SCها در دو تکرار مهم کمتر از مقدار آستانه شود.

در شکل زیر، روندنمای الگوریتم جست و جوی ابرکروی نشان داده شده است.



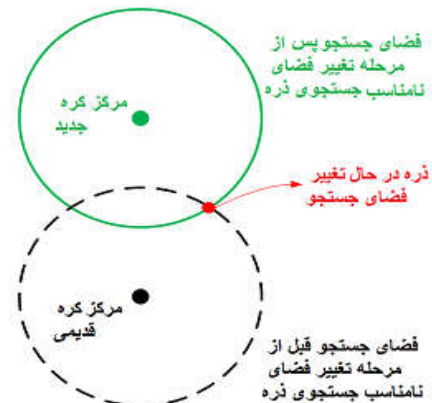
شکل (۳): روندنمای الگوریتم جست و جوی ابرکروی

اختصاص می یابند. در ابتدا، مجموعه های ذرات باید برای یافتن بدترین مجموعه که ذرات نامناسب را دارد، بر اساس مقدار تابع هدف مجموعه (SOF) مرتب شوند. SOF مجموعه اساساً تحت تأثیر SC برای f است، مقدار تابع هدف ذرات نسبت به تابع هدف مرکز کره خیلی تأثیرگذار نیست. این واقعیت به وسیله تعریف SOF هر مجموعه با رابطه زیر مدل می شود:

$$SOF = f_{SC} + \gamma \text{mean}\{f_{particles\ of\ SC}\} \quad (14)$$

مقادیر کوچک γ باعث می شوند که SOF به وسیله تابع هدف SC تعیین شود و افزایش γ نقش ذرات را در تعیین SOF پررنگ تر می کند. به این منظور، اختلاف SOF برای هر مجموعه به صورت زیر تعیین می شود:

$$DSOF = SOF - \max_{groups} \{SOF\ of\ groups\} \quad (15)$$



شکل (۲): تغییر فضای جست و جوی نامناسب ذره [۱۱]

با توجه به DSOF محاسبه شده، ذره به یکی از SCها اختصاص می یابد. احتمال تخصیص هر SC به صورت رابطه زیر محاسبه می شود:

$$AP = \left| \frac{NTOF}{\sum_{i=1}^{N_{SC}} NTOF_i} \right| \quad (16)$$

بردار $AP = [AP_1, AP_2, \dots, AP_{NSC}]$ برای تقسیم ذرات مذکور بر اساس AP آنها در بین SCها تشکیل می شود و بدترین مجموعه (با بیشترین SOF)، ذرات با فضای جست و جوی نامناسب خود را از دست خواهند داد. این ذرات از بین همه SCها و بر اساس AP آنها به دنبال SC جدید می گردند. اگر یک SC هیچ ذره ای نداشته باشد، به یک ذره تغییر یافته و با استفاده از همین فرایند به دنبال یک SC جدید خواهد گشت.

مرحله چهارم: تولید ذرات جدید

بعد از جست و جو احتمال دارد یک ذره به موقعیتی با مقدار تابع هدف کمتر از SC متناظر برسد. در صورت وقوع چنین اتفاقی که بعد از هر جست و جو احتمال دارد رخ بدهد، موقعیت SC و ذره

۵. نتایج شبیه‌سازی

در مرحله اول، به بررسی CHP-ED با وجود تلفات در شبکه و در نظر گرفتن اثر باز شدن دریاچه‌های بخار و پیک بار توسط الگوریتم جست‌وجوی ابرکروی پرداخته خواهد شد. سپس، همه مراحل توسط الگوریتم PSO نیز صورت می‌پذیرد. تمام شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار متلب انجام خواهد شد. روندنمای مراحل شبیه‌سازی روی سیستم مورد مطالعه در شکل (۴) ارائه شده است. سیستم مورد مطالعه یک نیروگاه ۴۸ واحدی تولید همزمان برق و حرارت شامل ۲۶ واحد تولید توان الکتریکی، ۱۲ واحد تولید همزمان و ۱۰ واحد تولید حرارت می‌باشد که مشخصات کامل آن از قبیل پارامترها و ضرایب توابع هزینه واحدها، محدوده تولید واحدهای تولید توان الکتریکی، پارامترهای واحدهای تولید حرارت و پارامترهای واحدهای تولید همزمان در [۴] ارائه شده است. توان الکتریکی مورد نیاز ۴۷۰۰ مگاوات و توان حرارتی مورد نیاز ۲۵۰۰ مگاوات است. شبیه‌سازی‌ها در دو مرحله صورت خواهد گرفت: مرحله اول شبیه‌سازی با در نظر گرفتن اثر باز شدن دریاچه بخار و مرحله دوم شبیه‌سازی با در نظر گرفتن مدل پیک بار با اضافه کردن ظرفیت در نظر گرفته توسط باتری‌ها که خود نیز در طی دو رویکرد انجام می‌شود، بررسی خواهد شد.

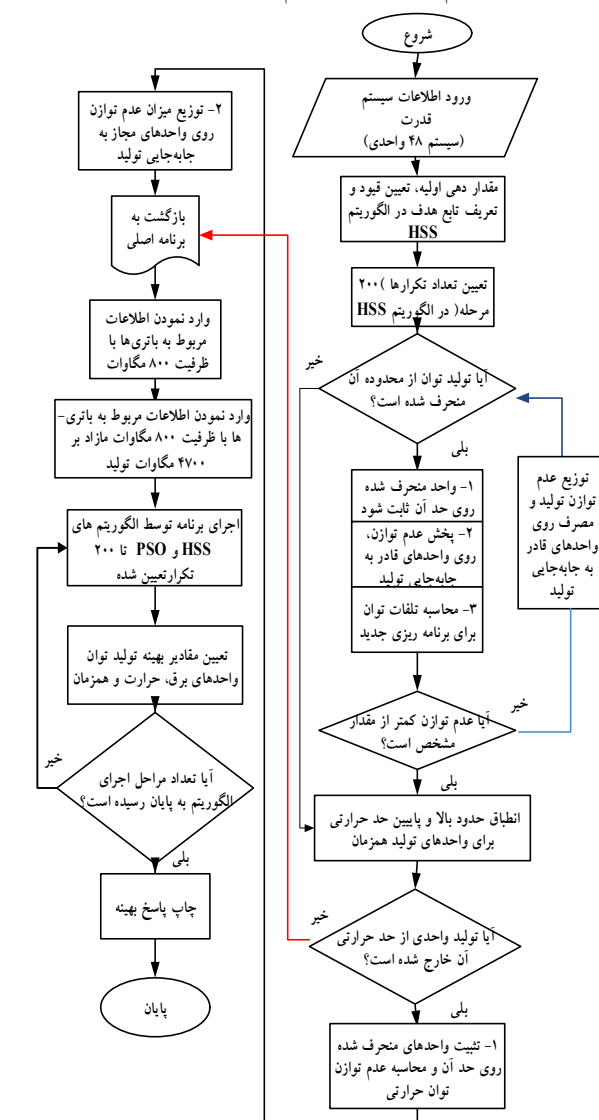
بعد از وارد کردن توابع هدف و قیود مربوط در برنامه الگوریتم‌های جست‌وجوی ابرکروی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات در نرم‌افزار متلب، برنامه با ۲۰۰ تکرار اجرا می‌شود. نتایج حاصل از توان تولیدی به دست آمده هر واحد به تفکیک، توسط الگوریتم‌های جست‌وجوی ابرکروی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات با در نظر گرفتن اثر باز شدن دریاچه بخار مطابق جدول (۱) به دست آمده است. همچنین، مشخصه همگرایی دو روش مطابق شکل (۵) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۵) پیداست، الگوریتم HSS پس از ۱۵۰ تکرار به همگرایی رسیده است که از دلایل این امر ماهیت الگوریتم جست‌وجوی مراکز کره برحسب AP و تعیین مراکز کره‌های جدید در داخل الگوریتم می‌باشد. مقادیر هزینه سوخت بهینه و مدت‌زمان محاسبه هزینه و مجموع تلفات توان مربوط به دو الگوریتم در جدول (۲) نمایش داده شده است.

الگوریتم جست‌وجوی ابرکروی در محدوده تکرار ۱۵۰، در زمان ۳۹۱/۳۶ ثانیه و با مجموع تلفات توان ۳۱/۲۰۸۳ مگاوات به همگرایی رسیده و هزینه نهایی به دست آمده ۳۱۷۰۱۵/۱۲۶۵ دلار است و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در محدوده تکرار ۲۰ در زمان ۲۸۵/۷۴ ثانیه و با مجموع تلفات توان ۴۱/۵۶۰۲ مگاوات به همگرایی

رسیده و هزینه نهایی به دست آمده ۲۲۲۶۳۱/۶۴۷ دلار است.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی در مرحله اول می‌توان دریافت که هزینه نهایی در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات از لحاظ زمان رسیدن به جواب نهایی و نیز از لحاظ هزینه سوخت بهینه، نسبت به الگوریتم جست‌وجوی ابرکروی دارای شرایط بهتری است، ولی مجموع تلفات توان محاسبه شده در الگوریتم جست‌وجوی ابرکروی نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، شرایط بهتری دارد.



شکل (۴): روندنمای روش ارائه شده

۱.۵. مرحله دوم شبیه‌سازی (استفاده از ذخیره‌ساز

انرژی در هنگام پیک بار)

تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی در مقیاس بزرگ، نقش بسزایی در زمینه مدیریت مصرف انرژی ایفا کرده‌اند؛ از جمله کاربردهای این تکنولوژی‌ها می‌توان به پیک‌سایی، تسطیح منحنی بار، آربیتراژ انرژی و تثبیت فرکانس اشاره کرد.

در این قسمت، توان تولیدی به دست آمده هر واحد به تفکیک توسط الگوریتم‌های پیشنهادی با در نظر گرفتن اثر درجه‌های بخار و استفاده از ذخیره‌ساز انرژی در هنگام پیک بار به صورت همزمان بررسی خواهد شد. برای انجام پیک‌سایمی می‌توان از روش‌های گوناگون برای کاهش مصرف یا جبران‌سازی تولید استفاده کرد.

در این مقاله، با توجه به مقدار ثابت تقاضای انرژی الکتریکی که ۴۷۰۰ مگاوات است، می‌توانیم از تعدادی ذخیره‌ساز انرژی از نوع باتری برای پیک‌سایمی شبکه استفاده کنیم؛ به نحوی که بخشی از توان مورد نیاز را با توجه به محدودیت‌های واحدها، باتری‌ها تأمین کنند و مابقی توان الکتریکی مورد نیاز توسط واحدهای تولید توان الکتریکی تأمین شود. به عنوان مازاد تولید به توان اصلی ۴۷۰۰ مگاوات در شبکه

اضافه می‌شود. مشخصات باتری‌های مورد استفاده طبق استاندارد IEC ۶۰۸۹۶ مطابق جدول (۳) در نظر گرفته شده است.

شرط استفاده از هر مجموعه باتری برای واحدها بدین صورت است که حداقل توان الکتریکی آن واحد باید بیشتر از ۵۰ مگاوات باشد تا در صورت در مدار قرار گرفتن مجموعه باتری برای هر واحد، توان تحویلی از حداقل توان آن واحد بیشتر نشود. بنابراین واحدهایی که حداقل توان خروجی‌شان بالاتر از ۵۵ مگاوات است، مجموعه باتری برای آن واحد لحاظ می‌شود. طبق اطلاعات هر واحد، باس‌هایی که مجموعه باتری برای آن‌ها نصب می‌شود (۱۶ واحد)، مطابق با جدول (۴) است.

جدول (۱): توان تولیدی به دست آمده هر واحد به تفکیک توسط الگوریتم‌های جست‌وجوی ابرکروی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات

با در نظر گرفتن اثر باز شدن درجه بخار

توان‌های تولیدی واحدهای الکتریکی			توان‌های تولیدی واحدهای همزمان			توان‌های تولیدی واحدهای حرارتی			
شماره واحد	بهینه‌سازی ازدحام ذرات (MW)	جست‌وجوی ابرکروی (MW)	شماره واحد	بهینه‌سازی ازدحام ذرات (MW)	جست‌وجوی ابرکروی (MW)	شماره واحد	بهینه‌سازی ازدحام ذرات (MW)	جست‌وجوی ابرکروی (MW)	
P1	۸۹/۷۳۸	۲۸۶/۹۰۳	P27	۹۸/۱۷۵	۹۸/۸۰۰	H39	۱۲۵/۴۶۲	۲۲/۸۴۱	
P2	۱۵۷/۱۰۴	۱۲۸/۷۲۸	P28	۴۳/۳۷۵	۴۴	H40	۳۸/۰۸۳	۰	
P3	۱۵۱/۱۳۲	۳۳/۷۱۷	P29	۹۸/۱۷۵	۹۸/۸۰۰	H41	۲۶/۰۴۶	۶۰	
P4	۱۸۵/۸۳۰	۲۱۴/۱۵۹	P30	۴۳/۳۷۵	۴۴	H42	۶۷/۴۴۳	۰	
P5	۱۸۵/۸۳۰	۲۱۴/۱۵۹	P31	۲۰	۲۰	H43	۹۲/۱۵۰	۱۲۰	
P6	۱۸۵/۸۳۰	۱۴۸/۴۴۸	P32	۳۴/۳۷۵	۳۵	H44	۳۰۴/۸۴۹	۰	
P7	۱۸۵/۸۳۰	۱۶۵/۲۹۲	P33	۹۰/۰۲۵	۹۸/۸۰۰	H45	۳۴/۷۴۵	۲۶/۷۷۱	
P8	۱۸۵/۸۳۰	۲۰۹/۰۰۹	P34	۴۳/۳۷۵	۴۴	H46	۱۴/۰۲۷	۰	
P9	۱۸۵/۸۳۰	۲۱۴/۱۵۹	P35	۹۵/۱۰۵	۹۸/۸۰۰	H47	۹۶/۲۶۷	۰	
P10	۱۲۳/۶۷۸	۱۴۱/۰۵۴	P36	۴۳/۳۷۵	۴۴	H48	۳۵/۴۷۰	۰	
P11	۱۲۳/۶۷۸	۱۴۱/۰۵۴	P37	۱۹/۲۲۶	۲۰	مجموع توان الکتریکی ۴۷۰۰ مگاوات مجموع توان حرارتی ۲۵۰۰ مگاوات			
P12	۱۲۳/۶۷۸	۱۴۱/۰۵۴	P38	۳۴/۳۷۵	۳۵				
P13	۱۲۳/۶۷۸	۱۴۱/۰۵۴	H27	۱۵۶/۶۱۵	۴۲/۰۷۲				
P14	۱۰۵/۹۵۹	۱۰۹/۴۴۷	H28	۰	۰				
P15	۱۵۶/۸۱۵	۰	H29	۰	۰				
P16	۱۵۶/۹۱۳	۱۲۰/۹۷۴	H30	۰	۰				
P17	۱۸۵/۸۳۰	۲۱۴/۱۵۹	H31	۰	۰				
P18	۱۸۵/۸۳۰	۱۲۶/۵۷۸	H32	۰	۰				
P19	۱۸۵/۸۳۰	۲۱۰/۳۰۴	H33	۴۷/۹۹۸	۰				
P20	۱۸۵/۸۳۰	۱۶۸/۵۲۱	H34	۰	۰				
P21	۱۸۵/۸۳۰	۱۹۰/۸۹۱	H35	۱۹/۹۹۵	۰				
P22	۱۸۵/۸۳۰	۲۱۴/۱۵۹	H36	۰	۰				
P23	۱۲۳/۶۷۸	۸۸/۷۸۳	H37	۳۱/۳۱۶	۰				
P24	۱۲۳/۶۷۸	۱۴۱/۰۵۴	H38	۰	۰				
P25	۱۲۳/۶۷۸	۱۱۳/۹۹۶							
P26	۱۲۳/۶۷۸	۱۴۱/۰۵۴							

جدول (۳): مشخصات باتری‌های مورد مطالعه

نام باتری	کاربرد	قدرت	انرژی	نوع باتری	تعداد باتری‌ها	ولتاژ هر باتری	ولتاژ خروجی (DC)	ولتاژ خروجی (AC)	سازنده باتری
Super Power 40HQ Container	پیک‌سایبی	۵۰۰ کیلووات	۱۰۰۰ کیلووات ساعت	لیتیومی	۱۵۷ سلول	۳/۲ ولت برای هر سلول	۵۰۰ ولت	۳۸۰ ولت	Electric Car Parts Company

جدول (۴): واحدهای تولید توان الکتریکی، که باتری روی شینه (باس) خروجی شان متصل شده

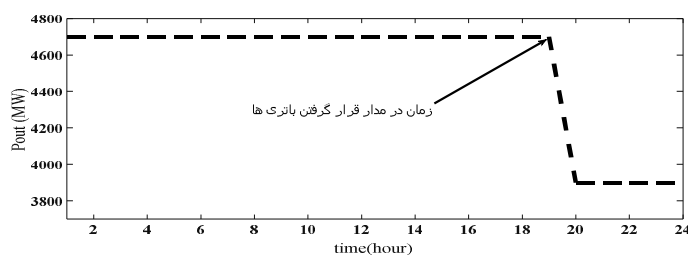
شماره واحد	حداقل توان (MW)	استفاده از باتری	شماره واحد	حداقل توان (MW)	استفاده از باتری
P۱	۰	خیر	P۱۴	۰	خیر
P۲	۰	خیر	P۱۵	۰	خیر
P۳	۰	خیر	P۱۶	۰	خیر
P۴	۶۰	بله	P۱۷	۶۰	بله
P۵	۶۰	بله	P۱۸	۶۰	بله
P۶	۶۰	بله	P۱۹	۶۰	بله
P۷	۶۰	بله	P۲۰	۶۰	بله
P۸	۶۰	بله	P۲۱	۶۰	بله
P۹	۶۰	بله	P۲۲	۶۰	بله
P۱۰	۴۰	خیر	P۲۳	۴۰	خیر
P۱۱	۴۰	خیر	P۲۴	۴۰	خیر
P۱۲	۵۵	بله	P۲۵	۵۵	بله
P۱۳	۵۵	بله	P۲۶	۵۵	بله

۱.۱.۵. رویکرد اول در مرحله دوم شبیه‌سازی

در این مرحله، ۸۰۰ مگاوات از توان خواسته‌شده را باتری‌ها تأمین می‌کنند و مابقی توان درخواستی که ۳۹۰۰ مگاوات است، توسط واحدهای تولید توان الکتریکی تولید می‌شود. بعد از وارد کردن توابع هدف و قیود مربوط در برنامه الگوریتم‌های جست‌وجوی ابرکروی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات در نرم‌افزار متلب، برنامه‌ها با ۲۰۰ تکرار اجرا می‌شود. الگوریتم جست‌وجوی ابرکروی در محدوده تکرار ۱۳۰، زمان ۳۲۰/۳۷۴ ثانیه و با مجموع تلفات توان ۳۷/۵۷۱ مگاوات به همگرایی رسیده است.

هزینه نهایی به‌دست‌آمده ۲۲۳۶۰۷/۷۱۰۹ دلار است و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در محدوده تکرار ۲۰، زمان ۳۱۲/۷۵۹ ثانیه و با مجموع تلفات توان ۴۲/۲۲۳۹ مگاوات به همگرایی رسیده و هزینه نهایی به‌دست‌آمده ۲۱۴۵۷۶/۶۷۰۹ دلار می‌شود؛ در نتیجه پس از

شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته توسط دو الگوریتم پیشنهادی، نتایج در جدول (۵) که مربوط به توان تولیدی هر واحد به تفکیک می‌باشد، مشخص شده است. همچنین در شکل (۶)، ساعت تزریق توان ۸۰۰ مگاوات به شبکه و توان کاهش‌یافته هر واحد بعد از پیک‌سایبی و در شکل (۷) نیز مشخصه همگرایی تابع هدف برای سیستم مورد مطالعه توسط دو الگوریتم مورد نظر نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، هزینه نهایی در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، از لحاظ زمان رسیدن به جواب نهایی و نیز از لحاظ هزینه سوخت بهینه، نسبت به الگوریتم جست‌وجوی ابرکروی دارای شرایط بهتری است، اما مجموع تلفات توان محاسبه‌شده در الگوریتم جست‌وجوی ابرکروی نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، شرایط بهتری دارد. در نهایت، مقادیر هزینه سوخت بهینه و مدت‌زمان محاسبه هزینه مربوط به دو الگوریتم در جدول (۶) نمایش داده شده است.



شکل (۶): ساعت تزریق توان ۸۰۰ مگاوات به شبکه و توان کاهش‌یافته هر واحد بعد از پیک‌سایبی

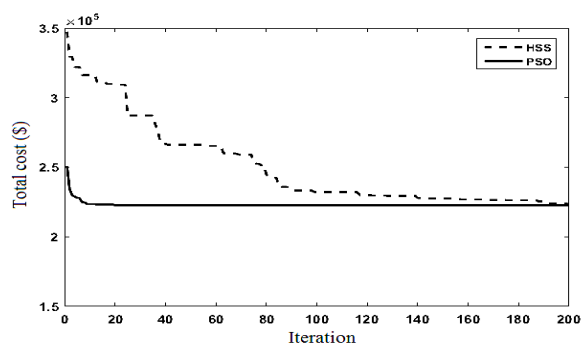
جدول (۵): توان تولیدی به دست آمده هر واحد به تفکیک، توسط الگوریتم های جست و جوی ابرکروی و بهینه سازی ازدحام ذرات (مدل پیک بار مرحله اول)

توان های تولیدی واحدهای الکتریکی					توان های الکتریکی واحدهای همزمان			
شماره واحد	جست و جوی ابرکروی (MW)	بهینه سازی ازدحام ذرات (MW)	شماره واحد	جست و جوی ابرکروی (MW)	بهینه سازی ازدحام ذرات (MW)	شماره واحد	جست و جوی ابرکروی (MW)	بهینه سازی ازدحام ذرات (MW)
P1	۱۷۹/۱۰۶	۹۷/۰۱۲۳	P14	۹۲/۹۰۳	۹۱/۹۴۵۴	Pco27	۹۸/۸	۸۰/۶۳
P2	۱۷۶/۱۰۹	۱۶۸/۵	P15	۲۴۳/۶۳۱	۱۱۴/۱۳۶۱	Pco28	۴۴	۴۳/۱۹۲۴
P3	۱۰۷/۵۴۸	۱۹۴/۹۴۶۲	P16	۳۲۳/۷۷۸	۱۷۲/۷۰۵	Pco29	۹۸/۸	۹۷/۹۹۲۴
P4	۱۰۶/۱۶۸	۱۳۴/۶۷۱۴	P17	۱۰۶/۱۶۸	۱۳۰/۰۴۳۹	Pco30	۴۴	۴۳/۱۹۲۴
P5	۱۰۶/۱۶۸	۱۳۴/۶۷۱۴	P18	۱۰۶/۱۶۸	۱۳۴/۶۷۱۴	Pco31	۲۰	۳۱/۲۶۱۵
P6	۱۰۶/۱۶۸	۱۳۴/۲۱۲۷	P19	۱۰۶/۱۶۸	۱۳۴/۶۷۱۴	Pco32	۳۵	۳۴/۱۹۲۴
P7	۱۰۶/۱۶۸	۱۳۴/۶۷۱۴	P20	۱۴۸/۸۲۱	۱۳۴/۶۷۱۴	Pco33	۹۸/۸	۹۷/۹۹۲۴
P8	۱۰۶/۱۶۸	۱۳۴/۶۷۱۴	P21	۱۰۶/۱۶۸	۱۳۴/۶۷۱۴	Pco34	۴۴	۴۳/۱۹۲۴
P9	۱۰۶/۱۶۸	۱۳۴/۶۷۱۴	P22	۱۰۶/۱۶۸	۱۳۴/۶۷۱۴	Pco35	۹۸/۸	۹۷/۹۹۲۴
P10	۹۷/۰۱۱	۱۲۲/۸۴۵۱	P23	۱۲۲/۲۹۸	۱۲۲/۸۴۵۱	Pco36	۴۴	۴۳/۱۹۲۴
P11	۹۷/۰۱۱	۱۲۲/۸۴۵۱	P24	۱۳۲/۵۴۷	۱۲۲/۸۴۵۱	Pco37	۲۰	۲۰
P12	۸۲/۵۴۷	۷۲/۸۴۵۰	P25	۸۲/۵۴۷	۷۲/۸۴۵۰	Pco38	۳۵	۳۴/۱۹۲
P13	۱۸۹/۸۰	۷۲/۸۴۵۰	P26	۸۲/۵۴۷	۷۲/۸۴۵۰	جمع تولید توان ۳۹۰۰ مگاوات		

تحویلی ۵۵۰۰ مگاوات می شود.

این مرحله از شبیه سازی نیز با الگوریتم های جست و جوی ابرکروی و بهینه سازی ازدحام ذرات انجام می گیرد. برنامه ها با ۲۰۰ تکرار اجرا می شود. الگوریتم جست و جوی ابرکروی در محدوده تکرار ۱۵۰، زمان ۲۹۹/۷۵۸ ثانیه و با مجموع تلفات توان ۳۱/۲۰۸۳ مگاوات به همگرایی رسیده است و هزینه نهایی به دست آمده ۲۲۳۱۶۷/۱۰۵۴ دلار محاسبه می شود؛ همچنین الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات در محدوده تکرار ۴۰، زمان ۲۵۱/۶۳۵ ثانیه و با مجموع تلفات توان ۴۱/۶۶۳۷ مگاوات به همگرایی رسیده است. هزینه نهایی نیز برابر ۲۱۹۴۶۹/۱۶۶۲ دلار محاسبه شده است. نتایج در جدول (۷) که مربوط به توان تولیدی واحدهای تولید توان الکتریکی بعد از پیک سابی مرحله دوم بوده، مشخص شده است؛ همچنین در شکل (۸) ساعت تزریق توان ۸۰۰ مگاوات به شبکه، مازاد بر تولید توان الکتریکی جهت پیک سابی نشان داده شده است. در شکل (۹) نیز مشخصه همگرایی تابع هدف برای سیستم مورد مطالعه توسط دو الگوریتم پیشنهادی بعد از ۲۰۰ تکرار نشان داده شده است.

مطابق نتایج گرفته شده، مجموع تلفات توان محاسبه شده در الگوریتم جست و جوی ابرکروی نسبت به الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات که در جدول (۸) مقایسه شده اند، دارای عملکرد بهتری است.



شکل (۷): مشخصه همگرایی تابع هدف برای سیستم مورد مطالعه توسط الگوریتم های جست و جوی ابرکروی و بهینه سازی ازدحام ذرات بعد از ۲۰۰ تکرار (مدل پیک بار مرحله اول)

جدول (۶): مقایسه هزینه سوخت بهینه نهایی و مدت زمان محاسبه هزینه و تلفات توان (مدل پیک بار مرحله اول)

نام الگوریتم	الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات	الگوریتم جست و جوی ابرکروی
هزینه سوخت بهینه (دلار)	۲۱۴۵۷۶/۶۷۰۹	۲۲۳۶۰۷/۷۱۰۹
مدت زمان محاسبه هزینه (ثانیه)	۳۱۲/۷۵۹	۳۲۰/۳۷۴
مجموع تلفات توان (مگاوات)	۴۲/۲۲۳۹	۳۷/۵۷۱

۲.۱.۵. رویکرد دوم در مرحله دوم شبیه سازی

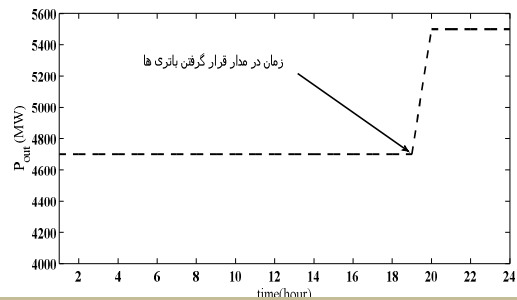
توان باتری ها که معادل ۸۰۰ مگاوات است، به همراه توان اصلی (۴۷۰۰ مگاوات) به شبکه تزریق می شود و مقدار توان نهایی

جدول (۷): توان تولیدی واحدهای تولید توان الکتریکی بعد از پیک‌سایه مرحله دوم

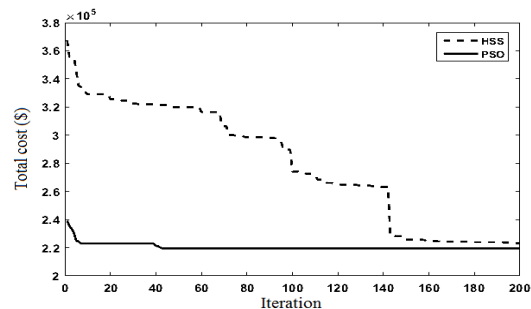
توان‌های تولیدی واحدهای الکتریکی						توان‌های الکتریکی واحدهای همزمان		
شماره واحد	جست‌وجوی ابرکروی (MW)	بهینه‌سازی ازدحام ذرات (MW)	شماره واحد	جست‌وجوی ابرکروی (MW)	بهینه‌سازی ازدحام ذرات (MW)	شماره واحد	جست‌وجوی ابرکروی (MW)	بهینه‌سازی ازدحام ذرات (MW)
P ₁	۱۴۸/۸۳۳۶	۱۲۹/۶۳۰۹	P _{۱۴}	۱۳۹/۵۱۰۷	۲۱۹/۲۲۹۲	P _{co27}	۸۱/۳۴۶۷	۹۸/۸
P _۲	۲۷۰/۱۲۴۷	۲۲۶/۱۵۶۶	P _{۱۵}	۱۸۹/۴۲۸۵	۶۳/۵۳۹۸	P _{co28}	۴۴/۲۰۸۴	۴۴
P _۳	۲۵۰/۱۳۴۴	۱۹۹/۱۳۹۳	P _{۱۶}	۱۶۸/۸۹۸۶	۱۶۹/۸۴۱۸	P _{co29}	۹۸/۵۷۶۵	۹۸/۸
P _۴	۲۵۱/۳۸۱۷	۲۳۹/۲۹۷۳	P _{۱۷}	۱۸۹/۲۹۷۳	۲۰۱/۴۹۱۷	P _{co30}	۴۳/۸۹۱۳	۴۴
P _۵	۲۰۵/۵۱۷۵	۲۳۹/۲۹۷۳	P _{۱۸}	۱۸۹/۲۹۷۳	۲۰۱/۴۹۱۷	P _{co31}	۲۳/۲۳۱۰	۲۰
P _۶	۲۰۹/۹۶۶۴	۲۳۹/۲۹۷۳	P _{۱۹}	۱۸۹/۲۹۷۳	۲۰۱/۴۹۱۷	P _{co32}	۳۴/۷۷۶۵	۳۵
P _۷	۲۵۱/۴۹۱۷	۲۳۹/۲۹۷۳	P _{۲۰}	۱۸۹/۲۹۷۳	۲۰۱/۴۹۱۷	P _{co33}	۹۸/۵۷۶۵	۹۸/۸
P _۸	۲۵۱/۴۹۱۷	۲۳۹/۲۹۷۳	P _{۲۱}	۱۸۹/۲۹۷۳	۲۰۱/۴۹۱۷	P _{co34}	۴۳/۷۷۶۵	۴۴
P _۹	۱۸۰/۲۲۱۱	۲۳۹/۲۹۷۳	P _{۲۲}	۱۸۹/۲۹۷۳	۱۳۰/۲۲۱۱	P _{co35}	۹۸/۵۷۶۵	۹۸/۸
P _{۱۰}	۱۷۰/۵۲۵۶	۱۷۶/۱۲۳۸	P _{۲۳}	۱۲۶/۱۲۳۸	۷۸/۸۷۸۲	P _{co36}	۴۵/۱۶۳۷	۴۴
P _{۱۱}	۱۹۵/۷۷۱۶	۱۷۶/۱۲۳۸	P _{۲۴}	۱۲۶/۱۲۳۸	۱۰۲/۰۵۵۳	P _{co37}	۱۹/۷۷۶۵	۲۰
P _{۱۲}	۱۹۵/۷۷۱۶	۱۷۶/۱۲۳۸	P _{۲۵}	۱۲۶/۱۲۳۸	۱۴۵/۷۷۱۶	P _{co38}	۳۴/۷۷۶۵	۳۵
P _{۱۳}	۱۹۵/۷۷۱۶	۱۷۶/۱۲۳۸	P _{۲۶}	۱۲۶/۱۲۳۸	۱۲۴/۸۰۱۶	جمع تولید توان ۵۵۰۰ مگاوات		

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتم‌های جست‌وجوی ابرکروی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌منظور برنامه‌ریزی تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن مدل پیک بار و اثر دریاچه‌های بخار به کار برده شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها بر روی یک سیستم نمونه ۴۸ واحدی مقیاس بزرگ که دارای نقاط بهینه محلی بسیاری است، مورد مطالعه قرار گرفت. شبیه‌سازی‌ها در طی دو مرحله شامل انجام پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن اثر باز شدن دریاچه بخار و همچنین در نظر گرفتن مدل پیک بار با حضور ذخیره‌ساز انرژی از نوع باتری، با هدف محاسبه هزینه تمام‌شده برای رسیدن به توان الکتریکی ۴۷۰۰ مگاوات و توان حرارتی ۲۵۰۰ مگاوات صورت گرفت. استفاده از باتری نیز با دو رویکرد متفاوت که شامل تأمین ۸۰۰ مگاوات از توان خواسته‌شده توسط باتری‌ها و مابقی توان درخواستی، که ۳۹۰۰ مگاوات است، توسط واحدهای تولید توان الکتریکی تولید شد؛ همچنین تزریق ۸۰۰ مگاوات به توان اصلی شبکه که برابر ۵۵۰۰ مگاوات توان نهایی تحویلی به شبکه می‌شود، صورت پذیرفت. مقایسه نتایج دو الگوریتم نشان داد که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات از لحاظ زمان رسیدن به جواب نهایی و نیز از لحاظ هزینه سوخت بهینه، نسبت به الگوریتم جست‌وجوی ابرکروی دارای شرایط بهتری است. اما مجموع تلفات توان محاسبه‌شده در الگوریتم جست‌وجوی ابرکروی نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات دارای شرایط بهتری بوده است.



شکل (۸): ساعت تزریق توان ۸۰۰ مگاوات به شبکه، مازاد بر تولید توان الکتریکی برای پیک‌سایه



شکل (۹): مشخصه همگرایی تابع هدف برای سیستم مورد مطالعه توسط الگوریتم‌های جست‌وجوی ابرکروی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات بعد از ۲۰۰ تکرار (مدل پیک بار مرحله دوم)

جدول (۸): هزینه نهایی و زمان محاسبه هزینه (مدل پیک بار مرحله دوم)

نام الگوریتم	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات	الگوریتم جست‌وجوی ابرکروی
هزینه سوخت بهینه (دلار)	۲۱۹۴۶۹/۱۶۶۲	۲۳۳۱۶۷/۱۰۵۴
مدت زمان محاسبه هزینه (ثانیه)	۲۵۱/۶۳۵	۲۹۹/۷۵۸
مجموع تلفات توان (مگاوات)	۴۱/۶۶۳۷	۳۱/۲۰۸۳

فهرست علائم		توان های مربوط به واحدهای تولید توان الکتریکی و تولید همزمان توان حرارتی منابع تولید حرارت
F_{hk} و F_{coj} , F_{pi}	P_{coj} , P_{pi}	توان های مربوط به واحدهای تولید توان الکتریکی و تولید همزمان توان حرارتی منابع تولید حرارت
N_H و N_{co} , N_P	H_{hk}	ضرایب ثابت مربوط به ماتریس تلفات شبکه میزان بار حرارتی
f_k و f_j , f_i	H_D	حد پایین و حد بالای مربوط به واحد آم تولید توان الکتریکی
γ_{pi} , β_{pi} , α_{pi}	$P_{pi\ max}$ و $P_{pi\ min}$	حد پایین و حد بالای واحد آم و تولید توان الکتریکی واحدهای همزمان
ρ_i , λ_i	$P_{coj,\ min}(H_{coj})$	حد پایین و حد بالای واحد آم و تولید توان الکتریکی واحدهای همزمان
$g_j, e_j, d_j, C_j, b_j, a_j$	$P_{coj,\ max}(H_{coj})$	حدود تولید حرارت واحد تولید همزمان آم
q_k, n_k, m_k	$H_{coj,\ max}(P_{coj})$	حد بالا و حد پایین واحدهای تولید حرارت
	$H_{coj,\ min}(P_{coj})$	
	$H_{hk,\ min}$ و $H_{hk,\ max}$	
		ضرایب ثابت برای مدل سازی اثر باز شدن دریچه های بخار
		ضرایب هزینه سوخت واحدهای تولید همزمان
		ضرایب واحدهای تولید حرارت

مراجع

- [1] Vatanpour, M., Yazdankhah, A. S. and Nazari, Y., "Combined Heat and Power Economic Dispatch Considering Valve Point Effect and Prohibited Zones by BFPPO", Energy Engineering & Management, Vol. 6, No. 3, pp. 2-13, 2016.
- [2] Nguyen, T. T., Vo, D. N. and 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.
- [3] Afzalan, E. and Joorabian, M., "Application of Dynamic Adaptive Bacterial Foraging Algorithm for Optimum Economic Dispatch with Valve-Point Effects and Wind Power", Intelligent Systems in Electrical Engineering, Vol. 3, No. 4, pp. 1-14, 2013
- [4] Meng, A., Mei, P., Yin, H., Peng, X. and Guo, Z., "Crisscross Optimization Algorithm for Solving Combined Heat and Power Economic Dispatch Problem", Energy Conversion and Management, Vol. 105, pp. 1303-1317, 2015.
- [5] HUANG, Z., GAO, Z., QI, L. and Duan, H., "A Heterogeneous Evolving Cuckoo Search Algorithm for Solving Large-scale Combined Heat and Power Economic Dispatch Problems", IEEE Access, Vol. 7, pp. 111287-111301, 2019.
- [6] SUNDARAM, A., "Combined Heat and Power Economic Emission Dispatch Using Hybrid NSGA II-MOPSO Algorithm Incorporating an Effective Constraint Handling Mechanism", IEEE Access, Vol. 8, pp. 13748-13768, 2020.
- [7] Moradi-Dalvand, M., Nazari-Heris, M., Mohammadi-ivatloo, B., Galavani, S. and Rabiee, A., "A Two-Stage Mathematical Programming Approach for the Solution of Combined Heat and Power Economic Dispatch", IEEE Systems Journal, Vol. 14, No. 2, pp. 2873-2881, 2020.
- [8] Sharifi, H. and Sadegh, M. O., "Economic Dispatch of Power and Heat Considering the Environmental Pollutants and Operational Constraints of Power Plants with the Multi-objective Harmony Search Algorithm (MOHS)", Energy Engineering & Management, Vol. 9, No. 1, pp. 14-25, 2019.
- [9] Choi, W. B. and Song, H., "Mixed Integer Linear Programming-Based Peak Shaving Algorithm Considering Multiple Energy Storage Systems", International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 11, No. 13, pp. 7986-7988, 2016.
- [10] Sanjari, M. J., Karami, H., Yatim, A. H. and Gharehpetian, G. B., "Application of Hyper-Spherical Search Algorithm for Optimal Energy Resources Dispatch in Residential Microgrids", Applied Soft Computing, Vol. 37, pp. 15-23, 2015.
- [11] Karami, H., Sanjari, M. J. and Gharehpetian, G. B., "Hyper-Spherical Search (HSS) Algorithm: a Novel Meta-Heuristic Algorithm to Optimize Nonlinear Functions", Neural Computing and Applications, Vol. 25, No. 6, pp. 1455-1465, 2014.
- [12] Heris, M. N., Babaei, A. F. and Ivatloo, B. M., "A Novel Hybrid Harmony Search and a Particle Swarm Optimization Method for Solving Combined Heat and Power Economic Dispatch", Smart Grid Conference (SGC), IEEE, Tehran, Iran, 20-21 Dec. 2017.
- [13] Takada, K. and Ikegami, T., "Long Term Planning Method for a CHP System using Particle Swarm Optimization Algorithm and Mixed Integer Linear Programming", International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), IEEE, Sevilla, Spain, 10-12 Sept. 2018.
- [14] Wei, F., Li, Y., Sui, Q., Lin, X., Chen, L., Chen, Z. and Li, Z., "A Novel Thermal Energy Storage System in Smart Building Based on Phase Change Material", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 10, No. 3, pp. 2846-2857, 2019.
- [15] Yang, L., Zhang, X. and Gao, P., "Research on Heat and Electricity Coordinated Dispatch Model for Better Integration of Wind Power Based on Electric Boiler with Thermal Storage", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 12, No. 15, pp. 3736-3743, 2018.