

برنامه‌ریزی بهینه تولید برای واحدهای حرارتی با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی نیروگاه‌ها مبتنی بر روش بهبود یافته ABC و نظریه آشوب

مرتضی حق‌شناس^۱، حمید فلقی^۲، محمدرضا آقا‌ابراهیمی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه بیرجند. Haghshenas.M@birjand.ac.ir

۲- استادیار گروه مهندسی قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه بیرجند. Falaghi@birjand.ac.ir

۳- دانشیار گروه مهندسی قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه بیرجند. Aghaebrahimi@birjand.ac.ir

چکیده: تولید گازهای آلاینده ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های برق باعث شده است که علاوه بر هزینه بهره‌برداری، کمینه‌سازی میزان آلودگی نیروگاه‌ها نیز مورد توجه ویژه‌ای قرار گیرد. در این مقاله مسئله برنامه‌ریزی اقتصادی و زیست‌محیطی تولید برای واحدهای حرارتی با هدف کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری و آلودگی‌های زیست‌محیطی با در نظر گرفتن محدودیت‌های غیرخطی نیروگاه‌ها از جمله اثر شیر بخار، نواحی ممنوعه تولید و نرخ تغییر توان تولیدی نیروگاه‌ها توسط الگوریتم بهبود یافته کلونی زنبور عسل (IABC) و نظریه آشوب حل شده است. در روش پیشنهادی تبادل اطلاعات بین عامل‌ها براساس قوانین نیوتن و گرانش انجام گرفته و این امر باعث به‌کارگیری تمام ظرفیت این الگوریتم در یافتن جواب بهینه شده است. این روش بر روی سیستم ۱۱۸ باسه IEEE با ۱۱ واحد نیروگاهی در سطوح بار متفاوت آزمایش شده و نتایج حاصل از آن با سایر روش‌ها مقایسه شده است. بر اساس این مقایسه، روش پیشنهادی دقت و سرعت بالایی در حل مسائل پیچیده سیستم قدرت دارد و قرار گرفتن آن در نقاط بهینه محلی، به مراتب کمتر از روش‌های دیگر می‌باشد. در انتها به منظور تعیین نقطه کار نهایی بهره‌برداری از سیستم، آنالیز حساسیت نسبت به ضریب هزینه سوخت انجام و نتایج آن ارائه شده است.

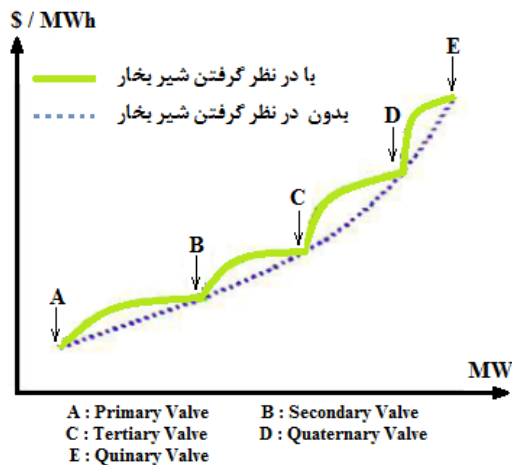
واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری بهینه از نیروگاه‌های حرارتی، آلودگی زیست‌محیطی ناشی از تولید برق، نیروگاه‌های حرارتی، الگوریتم IABC، نظریه آشوب

محیطی در توزیع بار میان نیروگاه‌های حرارتی در نظر گرفته شود. این امر نیازمند بکارگیری یک روش بهینه‌سازی مناسب با هدف کمینه‌سازی میزان آلودگی تولیدی نیروگاه‌ها، تلفات شبکه انتقال و هزینه‌های تولید توان در نیروگاه‌ها به نحوی است که قیود حاکم بر نیروگاه‌ها و شبکه رعایت شوند. در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی نیروگاه‌ها همچون اثر شیر بخار، نرخ تغییر توان تولیدی و نواحی ممنوعه تولید مدل ریاضی این مسئله را به یک مدل غیرخطی تبدیل کرده است که حل آن به سهولت امکان‌پذیر نیست [۲]. تا کنون تکنیک‌های بهینه‌سازی مختلفی برای برنامه‌ریزی تولید واحدهای حرارتی پیشنهاد شده

۱- مقدمه

امروزه با توجه به بحران‌های زیست‌محیطی ایجاد شده در اثر مصرف سوخت‌های فسیلی، علاوه بر کاهش هزینه بهره‌برداری از نیروگاه‌ها کمینه‌سازی میزان آلودگی تولیدی آنها نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. طبق آخرین گزارشات وزارت نیرو در ترازنامه انرژی ایران، بخش نیروگاهی صنعت برق بزرگترین تولید کننده گاز دی‌اکسید گوگرد (SO_2) و دومین تولید کننده بزرگ گاز اکسید نیتروژن (NO_x) در کشور است [۱]. از این رو بایستی اثر آلودگی‌های زیست

در رابطه فوق F_C هزینه کل بهره‌برداری از واحدهای نیروگاهی، ng تعداد واحدهای در مدار، $F_i(P_i)$ هزینه تولید واحد i ام، P_i توان تولیدی واحد i ام و a, b, c ضرایب تابع هزینه برای هر واحد می‌باشند. در نظر گرفتن اثر موقعیت شیر بخار در واحدهای نیروگاهی باعث می‌شود تابع هزینه به یک تابع غیر محدب تبدیل شود. شکل ۱ به منظور نمایش اثر شیر بخار بر روی تابع هزینه سوخت در یک واحد حرارتی ارائه شده است.



شکل ۱. اثر تغییرات شیر بخار بر تابع هزینه نیروگاه حرارتی
اثر تغییرات شیر بخار معمولاً با اضافه کردن یک ترم سینوسی به تابع هزینه بصورت زیر مدل می‌شود [۲، ۱۱].

$$F_C = \sum_{i=1}^{ng} a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + \left| e_i \sin(f_i (P_i^{min} - P_i)) \right| \quad (2)$$

که e_i و f_i ضرایب بازگشتی تابع هزینه برای مدل کردن اثر شیر بخار و P_i^{min} حد پایین تولید نیروگاه i ام است.

۲-۲- آلودگی تولیدی نیروگاه‌های حرارتی

مهمترین عامل اثر گذار در میزان صدور گازهای آلاینده نیروگاه‌ها توان اکتیو خروجی آنها می‌باشد. رابطه بین آلودگی تولیدی نیروگاه و توان اکتیو خروجی آن یک رابطه غیرخطی است که مرجع [۱۲] آن را بصورت یک تابع درجه دوم از توان خروجی مدل‌سازی کرده است.

$$E_T = \sum_{i=1}^{ng} E_i(P_i) = \sum_{i=1}^{ng} \alpha P_i^2 + \beta P_i + \gamma_i \quad (3)$$

که در آن E_i و P_i به ترتیب میزان آلودگی و توان تولیدی نیروگاه i ام است و α, β, γ ضرایب آلودگی نیروگاه‌های

است. به دلیل ماهیت غیرخطی مدل مسئله روش‌های تحلیلی مبتنی بر مشتق مانند روش لاگرانژ در حل اینگونه مسائل ناتوان هستند [۳]. از این رو، بهره‌گیری از روش‌های تکاملی هوشمند که در آنها مشکل عدم مشتق‌پذیری وجود ندارد پیشنهاد شده است. از جمله روش‌های هوشمند که برای حل مسئله توزیع اقتصادی و زیست محیطی بار استفاده شده می‌توان به الگوریتم بازگشتی [۴]، روش تکرار λ [۵]، الگوریتم بازگشتی ساده شده [۶]، الگوریتم ژنتیک بهبود یافته [۷]، روش تداومی SAMF [۸]، الگوریتم جهش قورباغه بهبود یافته [۹] و روش بهبود یافته کلونی زنبور عسل (IABC) [۱۰] اشاره نمود.

در این مقاله از روش بهبود یافته کلونی زنبور عسل مبتنی بر نظریه آشوب، برای حل مسئله برنامه ریزی بهینه تولید واحدهای حرارتی با در نظر گرفتن اثرات زیست محیطی استفاده شده است. در این بررسی قیود عملی نیروگاه‌ها همچون حدود تولید، توازن تولید و مصرف در سیستم، نواحی ممنوعه تولید، نرخ تغییرات توان تولیدی نیروگاه‌ها و اثر شیر بخار لحاظ شده است. به منظور نمایش توانایی روش پیشنهادی، این روش بر روی سیستم‌های نمونه با ابعاد مختلف آزمایش شده و مقایسه نتایج با سایر الگوریتم‌ها عملکرد مطلوب این روش را برای حل مسائل پیچیده بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت تأیید می‌کند.

۲- مدل‌سازی ریاضی مسئله EED

۲-۱- هزینه بهره‌برداری از نیروگاه‌های حرارتی

یکی از اهداف مورد نظر در برنامه‌ریزی تولید نیروگاه‌های حرارتی، کمینه کردن هزینه‌های بهره‌برداری از واحدهای نیروگاهی با در نظر گرفتن محدودیت‌های حاکم بر مسئله است. تابع هزینه هر واحد تولیدی را می‌توان به صورت یک تابع درجه دوم بر حسب توان خروجی آن واحد بصورت رابطه (۱) بیان کرد.

$$F_C = \sum_{i=1}^{ng} F_i(P_i) = \sum_{i=1}^{ng} a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (1)$$

۳-۳- محدودیت نرخ تغییر در تولید نیروگاهها

محدوده عملی تولید نیروگاههای حرارتی در هر زمان با توجه به نرخ تغییر تولید آنها مشخص می شود. در واقع این قید باعث می شود که حد بالا و پایین تولید نیروگاههای حرارتی در هر زمان به تولید اولیه آنها وابسته باشد.

$$\max\{P_i^{\min}, P_i^0 - DR_i\} \leq P_i \leq \min\{P_i^{\max}, P_i^0 + UR_i\} \quad (9)$$

در رابطه فوق DR_i, P_i^0 و UR_i به ترتیب توان خروجی اولیه، نرخ کاهش و نرخ افزایش تولید نیروگاه i ام هستند.

۳-۴- محدودیت نواحی ممنوعه

نیروگاهها به دلایل فنی نمی توانند در برخی از نواحی ما بین حداقل و حداکثر تولید شان، توان تولید کنند. این نواحی به عنوان نواحی ممنوعه شناخته می شوند و برای واحد نیروگاهی i ام به صورت زیر مشخص می شود.

$$P_i \in \begin{cases} P_i^{\min} \leq P_i \leq P_{i,1}^l \\ P_{i,k-1}^u \leq P_i \leq P_{i,k}^l \\ P_{i,z_i-1}^u \leq P_i \leq P_i^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

در رابطه فوق $P_{i,k}^u$ و $P_{i,k}^l$ به ترتیب حد بالا و پائین k امین ناحیه ممنوعه و Z_i تعداد نواحی ممنوعه برای نیروگاه i ام می باشد.

۴- روش پیشنهادی برای بهینه سازی مسئله

۴-۱- الگوریتم بهینه سازی IABC

الگوریتم زنبور عسل یکی از روش های بهینه سازی مبتنی بر جمعیت می باشد که اولین بار در [۱۵] ارائه شده است. در این روش اجتماع زنبورها به سه گروه زنبورهای کارگر، ناظر و جستجوگر تقسیم می شوند. هر منبع غذایی در این الگوریتم بیانگر یک جواب ممکن در حل مسئله بوده و میزان شهد موجود در منابع بیانگر میزان برازندگی آنها می باشد. همچنین اندازه جمعیت اولیه بیانگر تعداد منابع غذایی و برابر با تعداد زنبورهای کارگر است. در این روش به هر منبع غذایی با توجه به میزان شایستگی آن یک احتمال برای انتخاب شدن اختصاص داده می شود. توضیحات بیشتر در رابطه با این الگوریتم به همراه روابط حاکم بر آن در [۱۵] ارائه شده است.

حرارتی می باشند. برای حل این مسئله تابع هدف ترکیبی صورت زیر در نظر گرفته شده است [۱۲].

$$FT = \omega \sum_{i=1}^{ng} F_i(P_i) + (1-\omega) \sum_{i=1}^{ng} h_i(E_i(P_i)) \quad (4)$$

در رابطه فوق ω ضریب وزنی کاهش هزینه سوخت است و عددی در بازه [۰ ۱] می باشد. این ضریب می تواند اهمیت هر یک از اهداف مسئله را تغییر دهد. h_i ضریب جریمه آلودگی برای نیروگاه i ام و بصورت زیر است [۶].

$$h_i = \frac{\alpha_i P_i^{\max 2} + b_i P_i^{\max} + c_i}{\alpha_i P_i^{\max 2} + \beta_i P_i^{\max} + \gamma_i} \quad (5)$$

۳- مدل سازی محدودیت های مسئله

۳-۱- محدودیت ظرفیت تولید نیروگاهها

توان اختصاص داده شده به هر واحد نیروگاهی باید در محدوده مجاز تولید آن نیروگاه باشد. در صورتی که P_i^{\min} و P_i^{\max} به ترتیب حداقل و حداکثر میزان مجاز تولید نیروگاه i ام باشد این محدودیت بصورت زیر در نظر گرفته می شود.

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (6)$$

۳-۲- محدودیت تعادل توان

مجموع توان تولیدی نیروگاههای فعال باید به گونه ای باشد که با مجموع توان بارهای سیستم و تلفات شبکه انتقال برابری کند. اگر P_D بار کل سیستم و P_{loss} تلفات شبکه انتقال باشد این محدودیت بصورت زیر مدل می شود.

$$\sum_{i=1}^{ng} P_i = P_D + P_{loss} \quad (7)$$

در رابطه فوق P_{loss} به ساختار فیزیکی شبکه و توان تولید شده در سیستم بستگی دارد و با استفاده از ماتریس تلفات شبکه انتقال قابل محاسبه می باشد [۱۴].

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{ng} \sum_{j=1}^{ng} P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^{ng} B_{0i} P_i + B_{00} \quad (8)$$

که در آن B_{00}, B_{ij} و B_{0i} ضرایب تابع تلفات شبکه است.

۴-۳- نحوه اعمال الگوریتم بر مسئله برنامه‌ریزی

بهینه تولید

در این بخش به بیان الگوی استفاده شده برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید واحدهای حرارتی با کمک الگوریتم پیشنهادی پرداخته شده است. مدل ایجاد شده در گام‌های زیر قابل پیگیری است.

گام اول: در این مرحله با توجه به محدودیت‌های مسئله، مجموعه جواب‌های اولیه در فضای جستجو را بصورت زیر در نظر می‌گیریم.

$$X_{cls}^0 = [X_{cls,0}^1, X_{cls,0}^2, \dots, X_{cls,0}^{Ng}] \quad (14)$$

$$cx_0 = [cx_0^1, cx_0^2, \dots, cx_0^{Ng}] \quad (15)$$

$$cx_0^i = \frac{X_{cls,0}^i - P_i^{\min}}{P_i^{\max} - P_i^{\min}}, \quad i = 1, \dots, Ng \quad (16)$$

که برای این معادلات خواهیم داشت:

$$X_{cls}^j = [X_{cls,j}^1, \dots, X_{cls,j}^{Ng}], \quad j = 1, \dots, N_{chaos} \quad (17)$$

$$x_{cls,j}^i = cx_{j-1}^i \times (P_i^{\max} - P_i^{\min}) + P_i^{\min} \quad (18)$$

گام دوم: در این بخش متغیرهای آشوبناک با توجه به تابع آشوبناک به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشند.

$$cx_j = [cx_j^1, cx_j^2, \dots, cx_j^{Ng}], \quad j = 1, \dots, N_{chaos} \quad (19)$$

$$cx_{j+1}^i = \begin{cases} 2cx_j^i, & \text{if } 0 < cx_j^i < 0.5 \\ 2(1-cx_j^i), & \text{if } 0.5 < cx_j^i < 1 \end{cases}, \quad i=1, \dots, Ng \quad (20)$$

گام سوم: در این گام برای جمعیت تولید شده یک برازندگی بر اساس توابع هدف محاسبه می‌شود.

گام چهارم: ایجاد کردن متغیرهای تعریف شده بر اساس توابع تصمیم‌گیری در فضای جستجو.

گام پنجم: ارتقاء ذرات با توجه به نسبت دادن شتاب و سرعت هر ذره توسط روابط حاکم بر رفتار زنبورهای عسل.

گام ششم: اگر شرط خاتمه محقق شده باشد متوقف می‌شود.

در غیر اینصورت اگر جواب این مرحله از مرحله قبل بهتر باشد باید به عنوان بهترین جواب جایگزین شود و اگر بهبودی در جواب‌ها حاصل نشده بود این منبع غذایی به عنوان یک منبع غذایی متروکه معرفی می‌شود [۱۰]. شکل ۲ فضای جستجو را با وجود محدودیت‌های مختلف و شکل ۳ روند همگرایی حاصل از بهینه‌سازی توسط روش

طبق قوانین گرانش، هر جرم وضعیت و موقعیت اجرام دیگر را از طریق جاذبه گرانشی درک می‌کند. بنابراین می‌توان از این نیرو برای تبادل اطلاعات استفاده کرد. نحوه بکارگیری این نیرو در حل مسائل بهینه‌سازی بطور کامل تحت عنوان الگوریتم جستجوی گرانشی در [۱۶] ارائه شده است. مطابق با اصول این الگوریتم، در یک سیستم با n جرم موقعیت هر جرم نقطه‌ای از فضا و جوابی از مسئله است. به طریقی مشابه می‌توان روابط گرانش را بر اساس میزان شایستگی به رفتار زنبورهای عسل تعمیم داد [۱۰ و ۱۷]. به این منظور اثر نیروی متقابل بین دو زنبور کارگر i ام و k ام در بعد z ام جواب مسئله بصورت رابطه (۱۱) و اثر نیروی متقابل بر رفتار زنبورهای ناظر بصورت رابطه (۱۲) مدل شده است.

$$F_{ik}^j(t) = G(t) \frac{F(\theta_i) \times F(\theta_k)}{(\theta_k^j - \theta_i^j)^2} \frac{\theta_k^j - \theta_i^j}{|\theta_k^j - \theta_i^j|} \quad (11)$$

$$x_i^j(t+1) = \theta_i^j(t) + F_{ik}^j \cdot [\theta_i^j(t) - \theta_k^j(t)] \quad (12)$$

در روابط فوق $F(\theta_i)$ و $F(\theta_k)$ به ترتیب میزان شایستگی زنبورهای کارگر i ام و k ام، θ_i و θ_k موقعیت زنبورهای i ام و k ام، t بیان کننده شماره تکرار و G ثابت گرانش است.

۴-۲- الگوریتم مبتنی بر نظریه آشوب

یکی از ایده‌های جدید در حل مسائل پیچیده با توابع غیرخطی استفاده از روش جستجوی آشوبناک در کنار روش‌های هوشمند به منظور افزایش قابلیت‌های الگوریتم استاندارد است. در این راستا، تئوری آشوبناک یک روش مبتنی بر توابع غیرخطی و غیر محدب می‌باشد که امروزه بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله از معادله زیر برای ارتقاء جستجوی محلی و سراسری الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است. در این معادله cx معرف ذرات آشوبناک بکار گرفته شده در هر مرحله بهینه‌سازی می‌باشد.

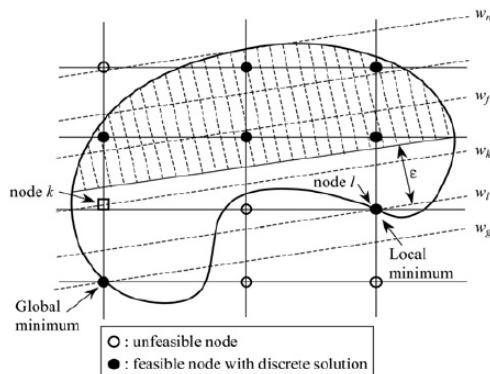
$$cx_{j+1}^i = \begin{cases} 2cx_j^i, & \text{if } 0 < cx_j^i < 0.5 \\ 2(1-cx_j^i), & \text{if } 0.5 < cx_j^i < 1 \end{cases}, \quad i=1, \dots, Ng \quad (13)$$

۵- نتایج شبیه‌سازی و مطالعات عددی

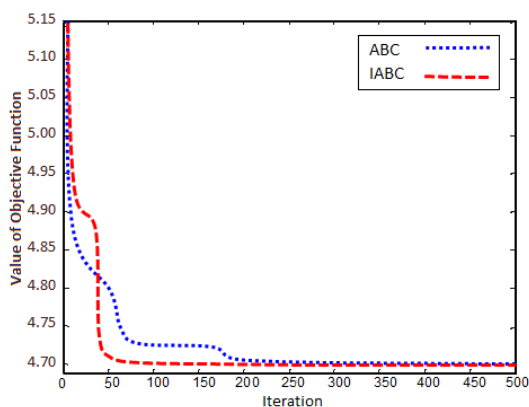
در این بخش نتایج حل مسئله توسط الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌گردد. جهت نمایش کارایی روش پیشنهادی، مطالعات عددی بر روی شبکه ۱۱۸ باسه IEEE با ۱۱ واحد نیروگاهی در سطوح بار مختلف انجام گرفته و نتایج بدست آمده با سایر روش‌ها مقایسه می‌گردد.

در شبیه‌سازی این شبکه اطلاعات هر یک از واحدهای حرارتی شامل ضرایب تابع هزینه و تابع آلودگی مطابق با مراجع [۶,۷] در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج بهترین جواب برای تولید بهینه نیروگاه‌ها در سطوح بار مختلف پس از ۱۵ بار اجرای برنامه در جدول ۲ ارائه شده است. در ادامه مقادیر محاسبه شده‌ی هزینه سوخت و میزان آلودگی تولیدی نیروگاه‌ها در جدول‌های ۳ و ۴ با نتایج مقالات دیگر مقایسه شده است.

پیشنهادی را نشان می‌دهد. نتایج این شکل سرعت و دقت مناسب روش پیشنهادی را در تعیین میزان تولید بهینه واحدهای حرارتی تأیید می‌کند. بدیهی است که این تغییر در روند همگرایی، در اثر بکارگیری روابط گرانش در رفتار زنبورهای عسل و همچنین اعمال روابط آشوب بر ساختار مسئله ایجاد شده است.



شکل ۲. نحوه جستجو در فضای مورد مطالعه.



شکل ۳. مقایسه روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی و ABC اولیه.

جدول ۱. اطلاعات واحدهای حرارتی فعال در سیستم ۱۱۸ باسه استاندارد IEEE [۶، ۷].

Gen. No	a_i	b_i	c_i	α_i	β_i	γ_i	P_{Gi}^{\min}	P_{Gi}^{\max}
G1	0.00762	1.92699	387.85	0.00419	-0.67767	33.93	20	250
G2	0.00838	2.11969	441.62	0.00461	-0.69044	24.62	20	210
G3	0.00523	2.19196	422.57	0.00419	-0.67767	33.93	20	250
G4	0.00140	2.01983	552.50	0.00683	-0.54551	27.14	60	300
G5	0.00154	2.22181	557.75	0.00751	-0.40060	24.15	20	210
G6	0.00177	1.91528	562.18	0.00683	-0.54551	27.14	60	300
G7	0.00195	2.10681	568.39	0.00751	-0.40006	24.15	20	215
G8	0.00106	1.99138	682.39	0.00355	-0.51116	30.45	100	455
G9	0.00117	1.99802	741.22	0.00417	-0.56228	25.59	100	455
G10	0.00089	2.12352	617.83	0.00355	-0.41116	30.45	110	460
G11	0.00098	2.10487	674.61	0.00417	-0.56228	25.59	110	465

جدول ۲. میزان تولید بهینه برای واحدهای نیروگاهی در سیستم ۱۱ واحدی در سطوح بار مختلف (بهترین جواب در ۱۵ بار اجرای برنامه).

No. Gen	LOAD (MW)						
	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500
PG1	86.1521	93.8225	106.6611	113.09514	119.9993	128.0081	140.3354
PG2	77.1102	83.1432	86.7694	94.3871	101.0007	108.5412	112.9105
PG3	85.2321	96.1432	105.6188	114.2231	127.8091	135.8200	147.0724
PG4	73.8925	99.1740	128.8809	149.6791	173.6071	199.0033	221.5916
PG5	49.2009	64.7937	84.7151	95.05177	106.7558	120.7171	137.6719
PG6	81.0174	101.3011	124.1200	145.0950	171.1069	195.8127	212.5584
PG7	55.9083	63.0113	77.3169	98.7126	110.4231	125.0149	142.7452
PG8	131.6859	167.9122	215.5329	235.8803	276.0211	314.3641	346.9225
PG9	118.9112	160.6515	190.3161	223.3106	259.8412	296.7182	327.5930
PG10	120.5575	160.8216	192.7710	243.3712	284.7328	318.8700	362.3933
PG11	120.3319	159.2257	187.3007	237.1941	268.7039	307.1324	348.2058
Fuel Cost (\$/hr)	8498.63	9104.47	9730.05	10371.91	11031.09	11716.88	12415.01
Emission (kg/hr)	205.101	340.006	539.997	805.919	1138.501	1534.940	2001.913

جدول ۳. مقایسه هزینه‌های بهره برداری از واحدهای حرارتی در سیستم ۱۱ واحدی با سطوح بار مختلف (\$/hr).

Method	LOAD (MW)						
	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500
λ -Iteration[5]	8502.30	9108.38	9733.54	10377.78	11041.08	11723.47	12424.94
Recursive[4]	8502.29	9108.38	9733.54	10377.77	11041.08	11723.47	12429.94
PSO [6]	8508.24	9114.42	9737.33	10380.82	11041.09	11725.68	12428.63
DE [6]	8505.81	9117.63	9736.22	10377.86	11041.08	11723.54	12425.06
SR [6]	8502.29	9108.38	9733.54	10377.77	11041.08	11723.47	12429.94
SAMF [8]	8502.87	9109.20	9734.47	10378.92	11041.56	11724.15	12425.85
reference [7]	8501.85	9107.99	9733.22	10377.01	11040.84	11723.25	12423.77
MSLFA [9]	8502.02	9107.57	9732.83	10376.92	11040.79	11723.224	12423.55
IABC [10]	8498.53	9103.47	9729.93	10372.19	11031.72	11716.87	12414.14
Proposed Method	8497.19	9106.91	9731.20	10377.29	11037.27	11721.31	12420.09

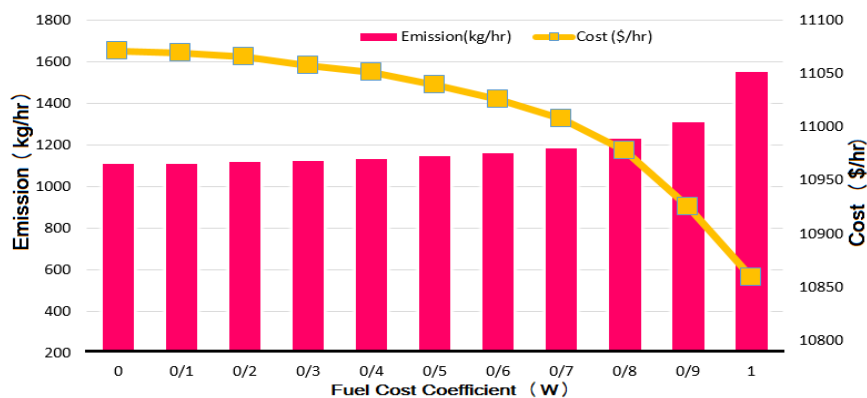
جدول ۴. مقایسه میزان آلاینده‌گی نیروگاه‌ها در سیستم ۱۱ واحدی با سطوح بار مختلف (kg/hr).

Method	LOAD (MW)						
	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500
λ -Iteration[5]	205.205	339.870	540.545	807.220	1139.912	1538.600	2003.301
Recursive[4]	205.204	339.870	540.544	807.220	1139.911	1538.600	2003.300
PSO [6]	208.012	345.669	545.347	812.263	1142.182	1540.465	2003.720
DE [6]	205.206	339.935	544.298	807.236	1139.911	1538.659	2003.350
SR [6]	205.204	339.870	540.544	807.220	1139.911	1538.600	2003.300
SAMF [8]	204.8865	339.3336	540.0017	806.2654	1139.632	1537.867	2001.959
reference [7]	205.175	339.706	539.493	807.214	1138.279	1538.319	2003.030
MSLFA [9]	205.181	339.751	540.010	806.770	1139.835	1538.436	2002.903
IABC [10]	205.101	340.006	539.997	805.919	1137.521	1535.140	2002.013
Proposed Method	205.181	339.063	539.257	807.016	1137.002	1537.766	2002.904

۶- آنالیز حساسیت

نتایج بدست آمده برای سیستم های مورد مطالعه در بخش قبل با در نظر گرفتن ضرایب برابر برای اهداف مسئله بدست آمده است. این در حالی است که ممکن است اهمیت اهداف مسئله از دید بهره بردار سیستم یکسان نباشد. در این بخش به منظور بررسی و تحلیل حساسیت نتایج بدست آمده نسبت به تغییر ضریب هزینه سوخت، نتایج هزینه و آلودگی تولیدی نیرو گاه ها در شبکه ۱۱۸ باسه به ازای ضرایب مختلف محاسبه شده و نتایج بدست آمده در شکل ۴ ارائه شده است.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش ضریب هزینه سوخت، اثر هزینه در تابع هدف بیشتر شده و هزینه‌های تولید کاهش می‌یابد. این در حالی است که اهمیت تولید گازهای آلاینده در تابع هدف کاهش یافته و میزان آلودگی نیروگاه‌ها زیاد می‌شود. همانطور که از نتایج ارائه شده در شکل ۵ مشخص است، نرخ تغییر هزینه بهره‌برداری نسبت به تغییرات آلودگی کمتر می‌باشد. در این روش انتخاب عدد یک بعنوان ضریب هزینه سوخت، مسئله را به توزیع اقتصادی بار تبدیل می‌کند و در صورتی که عدد صفر به عنوان ضریب هزینه سوخت استفاده شود تنها توزیع زیست محیطی بار بدون اثر هزینه‌های بهره‌برداری انجام می‌گیرد.



شکل ۴. اثر تغییر ضریب هزینه سوخت بر پاسخ سیستم ۱۱۸ باسه در سطح بار ۲۰۰۰ مگاوات

چگونگی تغییر هزینه‌های بهره‌برداری و میزان آلودگی تولیدی نیروگاه‌ها نسبت به هم این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان با توجه به اهمیت هر یک از اهداف، نقطه کار نهایی بهره‌برداری از سیستم را به عنوان پاسخ بهینه مسئله برنامه‌ریزی تولید تعیین کرد. در پژوهش‌های آتی می‌توان این مسئله را در حضور نیروگاه‌های بادی و خورشیدی با اعمال عدم قطعیت‌ها در تقاضای بار و میزان تولید انجام داد.

مراجع

- [1] دفتر برنامه ریزی کلان انرژی، معاونت امور برق و انرژی وزارت نیرو، ترازنامه انرژی سال ۱۳۸۹.
- [2] Meng, K., Wang, H.G., Dong, Z.Y., Wong, K. P., "Quantum-Inspired Particle Swarm Optimization for Valve-point Economic Load Dispatch", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, No. 1, pp. 215-222, 2010.
- [3] Pothiya, S., Ngamroo, I., "Ant Colony Optimization for Economic Dispatch Problem With Non-smooth

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله برنامه‌ریزی بهینه تولید واحدهای حرارتی با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی نیروگاه‌ها و هدف تعیین میزان تولید بهینه هر نیروگاه توسط الگوریتم بهبود یافته کلونی زنبور عسل و نظریه آشوب حل شد. مقایسه نتایج روش پیشنهادی با سایر روش‌ها در سیستم ۱۱۸ باسه IEEE با ۱۱ واحد نیروگاه حرارتی در سطوح بار متفاوت، توانایی این روش را در حل مسائل پیچیده سیستم قدرت تأیید می‌کند. همچنین با توجه به پارامترهای الگوریتم پیشنهادی زمان حل مسئله در مقایسه با روش‌های دیگر کاهش قابل توجهی داشته و از قرار گرفتن در نقاط بهینه محلی جلوگیری شده است. در ادامه اثر ضریب هزینه سوخت بر روی پاسخ‌های بدست آمده بررسی شده و نتایج آن برای شبکه ۱۱۸ باسه ارائه شده است. اطلاع از

[۱۷] محمد حاجی بابایی، مرتضی حق‌شناس، حمید فلقی و محسن فرشاد " مدیریت بهینه بهره‌برداری از یک میکروشبکه با منابع تولید پراکنده چندگانه مبتنی بر روش چند منظوره MOIABC به منظور تحقق اهداف شبکه‌های هوشمند"، کنفرانس شبکه‌های هوشمند در حوزه انرژی، پردیس شهید عباسپور دانشگاه شهید بهشتی، تهران (۱۳۹۲).

Cost Functions", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 32, No. 5, pp. 478–487, 2010.

- [4] Muralidharan, S., Srikrishna, K., Subramanian, S, " Emission constrained economic dispatch – A new recursive approach", *Electric Power Components and Systems*. 34, 343-353, 2006.
- [5] Sasikala, J., Ramaswamy, M., " Optimal λ based economic emission dispatch using simulated annealing", *International Journal of Computer Application*, vol. 1, no. 10, pp. 69-83, 2010.
- [6] Balamurugan, R. and Subramanian, S. "A simplified recursive approach to combined economic emission dispatch", *Electric Power Components and Systems*. 36, 17-27, 2008.
- [7] Güvenc, U., " Combined economic emission dispatch solution using genetic algorithm based on similarity crossover", *Scientific Research and Essays* Vol. 5, pp. 2451-2456, 4, 2010.
- [8] Subramanian, S., Ganesan, S., " A Simple Approach for Emission Constrained Economic Dispatch Problems ", *International Journal of Computer Applications* .Vol. 8. no.11, 2010.

[۹] امیر امینی، حمید فلقی و مریم رضائی، " توزیع بار بین نیروگاه‌ها به منظور کاهش همزمان هزینه سوخت و آلاینده‌های زیست‌محیطی"، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، سال سوم، شماره اول، صفحه ۱۵-۲، بهار ۱۳۹۲.

[۱۰] محمود عبادیان، مرتضی حق‌شناس و فاطمه نوری، " توزیع اقتصادی زیست‌محیطی بار با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی نیروگاه‌ها مبتنی بر یک روش ترکیبی جدید"، نشریه انرژی ایران، سال شانزدهم، شماره چهارم، صفحه ۴۶-۳۳، زمستان ۱۳۹۲.

- [11] KrishnaRao, C. V. G., Yesuratnam, G., " Emission Constrained optimal power flow by BIG-BANG and BIG-CRUNCH optimization", *Journal of Electrical System.*, pp. 256-266, 2013.
- [12] Abido, M. A., " Environmental Economic power dispatch using multi objective evolutionary algorithms", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no.4, pp.1529-1537, 2003.
- [13] Emmanuel, D. M., Nicodemus, A. O., " Combined Economic and Emission Dispatch Solution Using ABC-PSO Hybrid Algorithm with Valve Point Loading Effect ", *International Journal of Scientific and Research Publications*, Volume 2, Issue 12, December 2012.
- [14] Wood. A.J., Wollenberg. B.F, "Power Generation, Operation and Control", NEWYORK 1984.
- [15] D. Karaboga, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization," Technical Report TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.
- [16] E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, S.Saryazdi, "A Gravitational Search Algorithm," *Elsevier, Information Sciences*, vol.179, pp.2232–2248, 2009.