توزیع اقتصادی زیست محیطی بار با اعمال محدودیت‌های غیرخطی نیروگاه‌ها مبتنی بر یک روش ترکیبی جدید

محمود عبادیان [۱]، مرتضی حق شناس [۲]، فاطمه نوری [۳]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۹۲/۰۵/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۹۲/۰۸/۰۱

چکیده:

تولید گازهای آلاینده ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های برق باعث شده است که علاوه بر هزینه‌های بهره‌برداری، کمینه‌سازی میزان آلودگی نیروگاه‌ها نیز مورد توجه ویژه‌ای قرار گیرد. در این مقاله، مسأله توزیع اقتصادی زیست‌محیطی بار بین نیروگاه‌های 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 ترکیبی زنبور عسل و جستجوی گرانشی حل شده است. در روش پیشنهادی، تبادل اطلاعات بین زنبورها بر اساس قوانین نیوتن و گرانش انجام گرفته و این عامل سبب بکارگیری تمام ظرفیت الگوریتم زنبور عسل در یافتن جواب بهینه شده است. به منظور نمایش کارایی این روش، الگوریتم پیشنهادی بر روی سیستم‌های ۳۰ و ۱۱۸ باسه IEEE در سطوح بار متفاوت آزمایش شده و نتایج بدست آمده با سایر روش‌ها مقایسه شده است. در این مقایسه، مشخص شده که روش پیشنهادی دقت و سرعت بالایی در حل مسائل پیچیده سیستم قدرت دارد و قرار گرفتن آن در نقاط بهینه محلی، بمراتب کمتر از روش‌های دیگر است. در انتها، به منظور تعیین نقطه کار نهایی بهره‌برداری از سیستم، تحلیل حساسیت نسبت به ضریب هزینه سوخت انجام و نتایج آن ارائه شده است.

کلمات کلیدی:
اثرات زیست‌محیطی نیروگاه، بهینه‌سازی، توزیع اقتصادی زیست‌محیطی بار

۱) دانشیار گروه قدرت دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه بیرجند) Mahmoud_Ebadian@yahoo.com
۲) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت دانشگاه بیرجند (نویسنده مسئول) Haghshenas.M@birjand.ac.ir
۳) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت دانشگاه بیرجند F.Nouri@birjand.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

مقدمه

امروزه با توجه به بحران‌های زیست‌محیطی ایجاد شده در اثر مصرف سوخت‌های فسیلی، علاوه بر کاهش هزینه بهره‌برداری از نیروگاه‌ها،کمینه سازی میزان آلودگی تولیدی آنها نیز اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. طبق آخرین گزارش وزارت نیرو در ترازنامه انرژی ایران ، بخش نیروگاهی صنعت برق بزرگ‌ترین تولید کننده گاز دی اکسید گوگرد (SO_2) و دومین تولید کننده بزرگ گاز اکسید نیتروژن (NO_X) در کشور است [۱]. از این رو، بایستی اثر آلودگی‌های زیست‌محیطی در توزیع بار میان نیروگاه‌های حرارتی در نظر گرفته شود. این امر نیازمند بکارگیری یک روش بهینه‌سازی مناسب باهدف کمینه سازی 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، نواحی ممنوعه تولید و ... مدل ریاضی این مسأله را به یک مدل غیرخطی تبدیل کرده است که حل آن به سهولت امکان‌پذیر نیست [۷]. تاکنون تکنیک های بهینه‌سازی مختلفی برای حل مسأله توزیع اقتصادی زیست‌محیطی بار (EED) پیشنهاد شده است. به دلیل ماهیت غیرخطی مدل مسأله، روش‌های تحلیلی مبتنی بر مشتق مانند روش لاگرانژ در حل این‌گونه مسائل ناتوان هستند [۹]. از این رو، بهره‌گیری از روش‌های تکاملی هوشمند که در آنها مشکل عدم مشتق پذیری وجود ندارد، پیشنهاد شده است. از جمله روش‌های هوشمندی که برای حل مسأله توزیع اقتصادی و زیست‌محیطی بار استفاده شده است، می‌توان به روش‌های الگوریتم بازگشتی [۸]، روش تکرار λ [۱۲] ، الگوریتم بازگشتی ساده شده (SR) [۳] ، الگوریتم ژنتیک بهبود یافته [۵] و روش تداومی SAMF [۱۴] اشاره نمود.

در این مقاله، روشی ترکیبی از الگوریتم‌های زنبور عسل و جستجوی گرانشی برای حل مسأله توزیع اقتصادی بار با در نظر گرفتن اثرات زیست‌محیطی استفاده شده است. در این بررسی، محدودیت‌های 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 این الگوریتم، روش پیشنهادی روی چند سیستم نمونه با ابعاد مختلف آزمایش شده و نتایج بدست آمده با سایر الگوریتم‌ها مقایسه شده است.

مدل‌سازی ریاضی مسأله EED

هزینه بهره‌برداری از نیروگاه‌های حرارتی

یکی از اهداف توزیع اقتصادی زیست‌محیطی بار، کمینه کردن هزینه‌های بهره‌برداری از واحدهای نیروگاهی با در نظر گرفتن محدودیت‌های حاکم بر مسأله است. تابع هزینه هر واحد تولیدی را می‌توان به صورت یک تابع درجه دوم بر حسب توان خروجی آن واحد به صورت رابطه (۱) بیان کرد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

$$F_C = \sum_{i=1}^{ng} F_i(P_i) = \sum_{i=1}^{ng} a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (۱)$$

در رابطه فوق، F_C هزینه کل بهره‌برداری از واحدهای نیروگاهی ، n_g 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. این تأثیر معمولا با اضافه کردن یک جمله سینوسی به تابع هزینه به صورت زیر مدل می‌شود [۶,۷].

$$F_C = \sum_{i=1}^{ng} a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + \left| e_i \sin(f_i (P_i^{\min} - P_i)) \right| \quad (۲)$$

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.

آلودگی تولیدی نیروگاه‌های حرارتی

مهم‌ترین عامل اثرگذار 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 [۲] آن را به صورت یک تابع درجه دوم از توان خروجی مدل‌سازی کرده است.

$$E_T = \sum_{i=1}^{ng} E_i(P_i) = \sum_{i=1}^{ng} \alpha P_i^2 + \beta P_i + \gamma_i \quad (۳)$$

که در آن، E_i میزان آلودگی تولیدی واحد i ام بر حسب kg/hr ، P_i توان اکتیو تولیدی نیروگاه i ام و γ, β, α ضرایب تابع آلودگی نیروگاه‌ها می‌باشند. برای حل این مسأله تابع هدف ترکیبی به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۴].

$$FT = \omega \sum_{i=1}^{ng} F_i(P_i) + (1-\omega) \sum_{i=1}^{ng} h_i(E_i(P_i)) \quad (۴)$$

در رابطه فوق، ω ضریب وزنی کاهش هزینه سوخت است و عددی در بازه [۰ ۱] می‌باشد. توسط این ضریب می‌توان میزان اهمیت هر یک از اهداف مسأله را تغییر داد. h_i ضریب جریمه آلودگی برای نیروگاه i ام بر حسب $\$/kg$ و به صورت زیر است [۳].

$$h_i = \frac{a_i P_i^{\max\ 2} + b_i P_i^{\max} + c_i}{\alpha_i P_i^{\max\ 2} + \beta_i P_i^{\max} + \gamma_i} \quad (۵)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

قیود و محدودیت‌ها

محدودیت حداقل و حداکثر ظرفیت تولید

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 تولید نیروگاه i ام باشد، این محدودیت به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$P_i^{\min} \le P_i \le P_i^{\max} \quad (۶)$$

محدودیت تعادل توان

مجموع توان تولیدی نیروگاه‌های فعال باید به گونه‌ای 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 به صورت زیر مدل می‌شود.

$$\sum_{i=1}^{ng} P_i = P_D + P_{loss} \quad (۷)$$

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 می‌باشد[۱۵].

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{ng}\sum_{j=1}^{ng} P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^{ng} B_{0i} P_i + B_{00} \quad (۸)$$

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

محدودیت نرخ تغییر تولید

محدوده عملی تولید نیروگاه‌ها در هر زمان با توجه به نرخ تغییر تولید آنها مشخص می‌شود. در واقع، این قید باعث می‌شود که حد بالا و پایین تولید نیروگاه‌ها در هر زمان به تولید اولیه آنها وابسته باشد.

$$\max\left\{P_i^{\min}, P_i^0 - DR_i\right\} \le P_i \le \min\left\{P_i^{\max}, P_i^0 + UR_i\right\} \quad (۹)$$

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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

محدودیت نواحی ممنوعه

نیروگاه‌ها به دلایل فنی نمی‌توانند در برخی از نواحی بین حداقل و حداکثر تولیدشان، توان تولید کنند. این نواحی به عنوان نواحی ممنوعه شناخته می‌شوند و برای واحد نیروگاهی i ام به صورت زیر مشخص می‌شود .

$$P_i \in \begin{cases} P_i^{\min} \le P_i \le P_{i,1}^{l} \\ P_{i,k-1}^{u} \le P_i \le P_{i,k}^{l} \\ P_{i,z_i-1}^{u} \le P_i \le P_i^{\max} \end{cases} \quad (۱۰)$$

در رابطه فوق، $P_{i,k}^{u}$ و $P_{i,k}^{l}$ به ترتیب حد بالاو پایین kامین ناحیه ممنوعه و Z_i تعداد نواحی ممنوعه برای واحد i ام است.

الگوریتم ترکیب شده زنبور عسل و جستجوی گرانشی

الگوریتم کلونی زنبور عسل

عملکرد این الگوریتم بر مبنای رفتار زنبورهای عسل در طبیعت است و یکی از روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت می‌باشد [۱۳]. در این روش، اجتماع زنبورها به سه گروه زنبورهای کارگر، ناظر و جستجوگر تقسیم می‌شوند. زنبورهای کارگر به صورت تصادفی به دنبال منابع غذایی می‌گردند و اطلاعات خود را به اشتراک می‌گذارند. در این میان، زنبورهای ناظر از بین منابع غذایی با توجه به میزان تجربه و موقعیت خود منبع غذایی بهتر را انتخاب می‌کنند. این در حالی است که زنبورهای جستجوگر منابع غذایی را کاملا به صورت تصادفی انتخاب می‌کنند. هر منبع غذایی انتخاب شده بیانگر یک جواب ممکن در حل مسأله بوده و میزان شهد موجود در منابع بیانگر میزان برازندگی آنها می‌باشد. در این الگوریتم، اندازه جمعیت اولیه بیانگر تعداد منابع غذایی و برابر با تعداد زنبورهای کارگر است. سپس جمعیت اولیه وارد فرایند جستجوی زنبورهای کارگر، ناظر و جستجوگر می‌شود. به هر منبع غذایی با توجه به میزان شایستگی آن یک احتمال برای انتخاب شدن اختصاص داده می‌شود که این احتمال توسط رابطه (۱۱) قابل محاسبه است. در ادامه، حرکت زنبورهای ناظر طبق رابطه (۱۲) و حرکت زنبورهای جستجوگر طبق رابطه (۱۳) معرفی شده است.

$$p_i = \frac{F(\theta_i)}{\sum_{k=1}^{S} F(\theta_k)} \quad (۱۱)$$

که در آن، p_i احتمال انتخاب i امین منبع غذایی ، θ_i موقعیت زنبور کارگر i ام و S تعداد کل زنبورهای کارگر و معادل با تعداد منابع غذایی می‌باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

$$x_i(t+1) = \theta_i^j + \phi(\theta_i^j - \theta_k^j) \quad (۱۲)$$

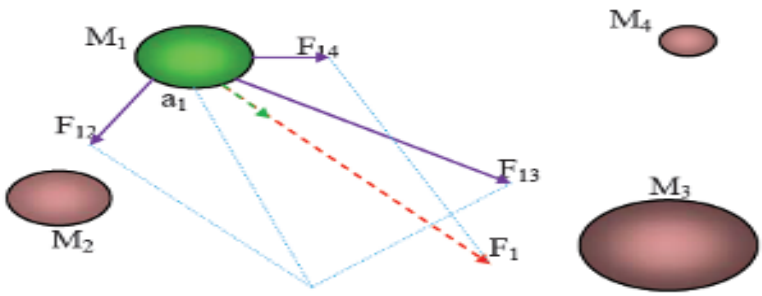
در رابطه فوق، x_i موقعیت i امین زنبور ناظر ، t شماره تکرار ، θ_k موقعیت k امین زنبور کارگر، j بعد جواب و ϕ یک عدد تصادفی در بازه [۱ -۱] می‌باشد. موقعیت‌های جدید پس از تولید و برازش با موقعیت‌های قبلی مقایسه شده و اگر دارای کیفیت بهتری باشند، جایگزین آنها خواهند شد. ضمناً اگر موقعیتی بهبود پیدا نکرده باشد، آن منبع غذایی متروکه اعلام شده و با منبع جدیدی که توسط زنبورهای جستجو گر پیدا شده، مطابق با رابطه زیر جایگزین خواهد شد.

$$\theta_i^j = \theta_i^j \min + rand.(\theta_i^j \max - \theta_i^j \min) \quad (۱۳)$$

پس از اینکه منابع غذایی جدید تولید و برازش شد، از بین منابع جدید عمل انتخاب صورت می‌گیرد.

تعمیم قوانین نیوتن و گرانش به رفتار زنبورهای عسل

طبق قوانین گرانش ، هر جرم محل و وضعیت اجرام دیگر را از طریق جاذبه گرانشی درک می‌کند. بنابراین، از این نیرو می‌توان برای تبادل اطلاعات استفاده کرد [۱۰]. مطابق با اصول الگوریتم جستجوی گرانشی، در یک سیستم با n جرم موقعیت هر جرم نقطه‌ای از فضا و جوابی از مسأله است. اگر موقعیت جرم i ام به صورت $X_i = (X_i^1, ..., X_i^j, ..., X_i^n)$ نشان داده شود، n بعد مسأله و X_i^j بعد از جرم i را نشان می‌دهد. در این حالت، به جرم i در زمان t و در جهت بعد j نیرویی با مقدار $F_{ik}^j(t)$ وارد می‌شود. شکل (۱) اثر نیروی متقابل بین اجرام را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱)، نیرویی که به هر جرم وارد می‌شود، معادل با مجموع تمام نیروهایی است که از طرف سایر اجرام به جرم مورد نظر وارد می‌گردد.



شکل ۱) اثر نیروی متقابل بین اجرام

$$F_{ik}^j(t) = G(t)\frac{M_{pi}(t) \times M_{ak}(t)}{R_{ik}(t) + \varepsilon} \times (X_k^j(t) - X_i^j(t)) \quad (۱۴)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

در رابطه فوق، M_{ak} جرم گرانشی فعال جسم k ، M_{pi} جرم گرانشی غیرفعال جسم i ، $G(t)$ ثابت گرانش در زمان t و R_{ij} فاصله بین دو جرم i و k است. ثابت گرانش یک پارامتر مناسب برای کنترل توانایی‌های جستجو و بهره‌وری به شمار می‌آید و با رابطه زیر بیان می‌شود.

$$G(t) = G_0 . e^{\frac{-at}{T}} \qquad (۱۵)$$

که در آن، α و G_0 ضرایب کنترلی الگوریتم جستجوی گرانشی و T بیانگر طول عمر سیستم است. همچنین هر یک از جرم‌ها دارای یک سرعت و یک شتاب می‌باشد. طبق قانون دوم نیوتن، هر جرم در جهت بعد j شتابی می‌گیرد که با نیروی وارد بر جرم در آن بعد رابطه مستقیم دارد [۱۰].

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_i(t)} \qquad (۱۶)$$

سرعت هر عامل را می‌توان به صورت مجموع ضریبی از شتاب عامل و سرعت کنونی آن به صورت زیر بیان کرد.

$$V_i^j(t+1) = rand \times V_i^j(t) + a_i^j(t) \qquad (۱۷)$$

زمانی که شتاب و سرعت هر جرم محاسبه شد، موقعیت جدید جرم i ام در بعد j محاسبه می‌شود. موقعیت‌های جدید به عنوان مکان‌های جدید در فضای جستجو در نظر گرفته می‌شوند. به طریقی مشابه می‌توان روابط گرانشی فوق را بر اساس میزان شایستگی به رفتار زنبورهای عسل تعمیم داد. لازم به ذکر است که شدت نیروی بین عامل‌ها در مسائل با بیش از یک بعد بایستی به صورت جداگانه برای هر بعد محاسبه شود. اثر نیروی متقابل بین دو زنبور i ام و k ام برای بعد j ام در رابطه (۱۸) مدل‌سازی شده است [۱۱].

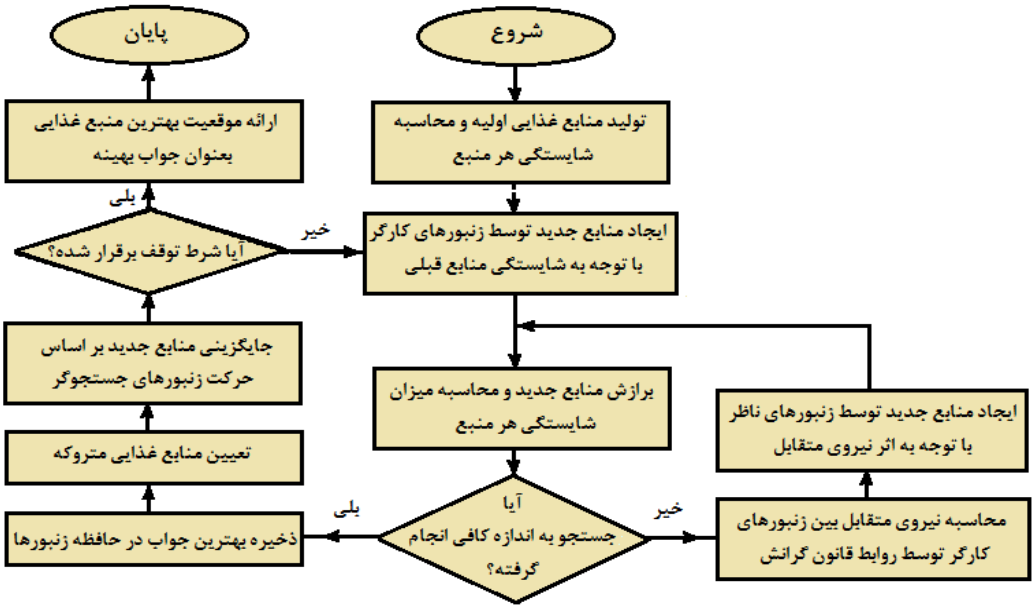
$$F_{ik}^j(t) = G(t) \frac{F(\theta_i) \times F(\theta_k)}{(\theta_k^j - \theta_i^j)^2} \cdot \frac{\theta_k^j - \theta_i^j}{\left|\theta_k^j - \theta_i^j\right|} \qquad (۱۸)$$

در رابطه فوق، $F(\theta_i)$ میزان شایستگی زنبور کارگر انتخاب شده توسط روش چرخ رولت و $F(\theta_k)$ میزان شایستگی زنبور کارگر انتخاب شده به صورت تصادفی می‌باشد. نقش نیروی متقابل بین زنبورهای کارگر را می‌توان به صورت رابطه زیر در رفتار و حرکت زنبورهای ناظر تأثیر داد.

$$x_i^j(t+1) = \theta_i^j(t) + F_{ik}^j . [\theta_i^j(t) - \theta_k^j(t)] \qquad (۱۹)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

در شکل (۲) نمودار جریانی الگوریتم پیشنهادی برای حل مسأله توزیع اقتصادی زیست‌محیطی بار نشان داده شده است.



شکل ۲) نمودار جریانی الگوریتم پیشنهادی

نتایج شبیه‌سازی و مطالعات عددی

در این بخش، نتایج حل مسأله EED توسط الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌گردد. جهت نمایش کارایی روش پیشنهادی، مطالعات عددی بر روی شبکه‌های۳۰ باسه IEEE با ۶ واحد نیروگاه و ۱۱۸باسه IEEE با ۱۱ واحد نیروگاهی انجام گرفته و نتایج بدست آمده با مقالات دیگر مقایسه می‌گردد. پارامترهای اولیه الگوریتم پیشنهادی در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱) پارامترهای اصلی روش پیشنهادی و زمان اجرای برنامه برای سیستم های مورد مطالعه

پارامتر	٦ نیروگاه بدون تلفات	٦ نیروگاه با تلفات	۱۱ نیروگاه بدون تلفات	۱۱ نیروگاه با تلفات
جمعیت اولیه	۳۰	۳۰	۸۰	۸۰
حداکثر تکرار	۱۰۰	۱۰۰	۱۲۰	۱۲۰
زمان حل (ثانیه)	۰,٤۹۷	۰,۷۱٦	۱,۰٦٥	۱,٥۷۲

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

شبکه ۳۰ باسه IEEE با ۶ واحد نیروگاهی

در شبیه‌سازی این شبکه، ضرایب تابع هزینه سوخت، ضرایب تابع آلودگی و محدوده تولید نیروگاه‌ها مطابق با اطلاعات مراجع [۵,۳] در نظر گرفته شده است. تولید بهینه هر نیروگاه برای سطوح بار مختلف در جدول (۲) نشان داده شده است. نتایج ارائه‌شده، بهترین جواب پس از ۱۵ بار اجرای برنامه می‌باشد. در ادامه، هزینه‌های سوخت و میزان آلودگی تولیدی نیروگاه‌ها که توسط روش پیشنهادی محاسبه شده، در جدول‌های (۳) و (۴)با نتایج مقالات دیگر مقایسه شده است.

جدول ۲) نتایج بهترین جواب حاصل از توزیع اقتصادی زیست‌محیطی بار در سیستم ٦ واحدی

No. Gen	LOAD (MW)						
	۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۸۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰
PG1	۲۰/۹۱۸	۳۲/۰۰۵	۴۴/۸۸۳	۵۶/۰۱۹	۶۶/۹۴۰	۷۸/۸۹۷	۹۲/۰۰۳
PG2	۱۵/۶۲۱	۲۷/۹۱۴	۴۱/۶۱۲	۵۶/۲۱۱	۶۸/۴۱۰	۸۲/۳۰۵	۹۶/۴۷۵
PG3	۹۱/۸۹۰	۱۰۷/۱۰۱	۱۲۲/۷۱۹	۱۳۹/۱۴۷	۱۵۲/۹۲۱	۱۷۰/۶۷۲	۱۸۳/۱۲۲
PG4	۸۸/۴۴۲	۱۰۵/۱۶۰	۱۱۳/۵۵۱	۱۲۴/۷۹۵	۱۴۳/۷۱۷	۱۵۵/۹۹۲	۱۶۸/۵۴۱
PG5	۱۴۵/۰۱۹	۱۶۶/۷۵۱	۱۹۳/۹۹۰	۲۱۶/۸۰۹	۲۳۹/۷۹۳	۲۶۲/۰۳۴	۲۸۷/۸۶۶
PG6	۱۳۸/۱۱۰	۱۶۱/۰۶۹	۱۸۳/۲۴۵	۲۰۷/۰۱۹	۲۲۸/۲۱۹	۲۵۰/۱۰۰	۲۷۱/۹۹۳
Fuel Cost ($/hr)	۲۷۰۸۳/۲۹	۳۱۶۲۴/۳۰	۳۶۳۰۷/۴۱	۴۱۱۴۱/۴۰	۴۶۱۱۳/۴۲	۵۱۲۴۳/۱۱	۵۶۴۹۸/۱۴
Emission (kg/hr)	۲۵۹/۱۴۳۲	۳۳۸/۳۱۶۹	۴۳۳/۷۰۳۴	۵۴۵/۲۸۰۱	۶۷۷/۳۱۲۸	۸۲۲/۷۴۱۹	۹۸۸/۱۲۳۷

جدول۳) مقایسه هزینه‌های بهره‌برداری از نیروگاه‌ها در سیستم ٦ واحدی ($/hr)

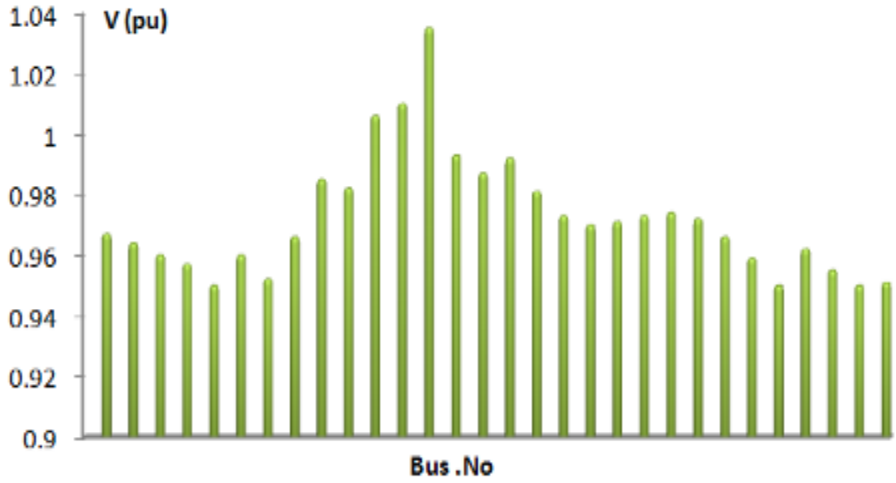
Method	LOAD (MW)						
	۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۸۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰
λ -Iteration[12]	۲۷۰۹۲/۵	۳۱۶۲۸/۷	۳۶۳۱۴/۰	۴۱۱۴۸/۴	۴۶۱۳۱/۸	۵۱۲۶۴/۶	۵۶۵۴۶/۴
Recursive[8]	۲۷۰۹۲/۵	۳۱۶۲۸/۶	۳۶۳۱۳/۹	۴۱۱۴۸/۳	۴۶۱۳۱/۸	۵۱۲۶۴/۵	۵۶۵۴۶/۲
PSO [3]	۲۷۰۹۷/۵	۳۱۶۳۴/۹	۳۶۳۱۴/۲	۴۱۱۶۰/۳	۴۶۱۶۰/۶	۵۱۲۶۹/۶	۵۶۵۵۶/۷
DE [3]	۲۷۰۹۸/۱	۳۱۶۲۹/۲	۳۶۳۱۴/۰	۴۱۱۵۲/۶	۴۶۱۵۲/۶	۵۱۲۶۴/۶	۵۶۵۴۶/۶
SR [3]	۲۷۰۹۲/۵	۳۱۶۲۸/۶	۳۶۳۱۳/۹	۴۱۱۴۸/۳	۴۶۱۳۱/۸	۵۱۲۶۴/۶	۵۶۵۴۶/۲
SAMF [14]	۲۷۰۹۲/۵۷	۳۱۶۳۲/۰۴	۳۶۳۱۴/۵۲	۴۱۱۴۴/۶۶	۴۶۱۳۳/۴۶	۵۱۲۷۴/۲۶	۵۶۵۴۸/۳۳
refrence [5]	۲۷۰۸۹/۴۵	۳۱۶۲۶/۷۹	۳۶۳۱۰/۸۰	۴۱۱۴۴/۴۷	۴۶۱۲۴/۵۴	۵۱۲۶۲/۳۱	۵۶۵۴۲/۰۱
Porposed Method	**۲۷۰۸۳/۲۹**	**۳۱۶۲۴/۳۰**	**۳۶۳۰۷/۴۱**	**۴۱۱۴۱/۴۰**	**۴۶۱۱۳/۴۲**	**۵۱۲۴۳/۱۱**	**۵۶۴۹۸/۱۴**

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

جدول٤) مقایسه میزان آلایندگی نیروگاه‌ها در سیستم ٦ واحدی (kg/hr)

Method	LOAD (MW)						
	۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۸۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰
λ - Iteration[12]	۲۶۱/۶۳۵	۳۳۸۹۹۳	۴۳۴/۳۸۰	۵۴۷/۷۹۷	۶۷۹/۲۴۱	۸۲۸/۷۲۰	۹۹۶/۲۲۴
Recursive[8]	۲۶۱/۶۳۴	۳۳۸/۹۹۲	۴۳۴/۳۸۰	۵۴۷/۷۹۶	۶۷۹/۲۴۱	۸۲۸/۷۱۵	۹۹۶/۲۱۸
PSO [3]	۲۶۲/۲۲۵	۳۳۹/۸۲۰	۴۳۴/۶۰۵	۵۴۷/۸۴۴	۶۷۹/۷۲۴	۸۲۸/۸۶۳	۹۹۶/۶۷۲
DE [3]	۲۶۱/۸۵۹	۳۳۹/۰۶۵	۴۳۴/۴۵۳	۵۴۷/۸۰۲	۶۷۹/۲۸۳	۸۲۸/۷۱۵	۹۹۶/۲۲۲
SR [3]	۲۶۱/۶۳۴	۳۳۸/۹۹۲	۴۳۴/۳۸۰	۵۴۷/۷۹۶	۶۷۹/۲۴۱	۸۲۸/۷۱۵	۹۹۶/۲۱۸
SAMF [14]	۲۶۱/۶۲۷۸	۳۳۸/۷۴۱۲	۴۳۴/۲۸۱۶	۵۴۷/۹۶۴۵	۶۷۹/۰۹۲۲	۸۲۸/۲۸۲۹	۹۹۶/۱۸۲۸
refrence [5]	۲۶۱/۳۳۰۷	۳۳۸/۴۳۹۷	۴۳۳/۶۴۰۹	۵۴۶/۷۸۳۱	۶۷۸/۲۹۰۶	۸۲۷/۲۶۱۲	۹۹۴/۵۲۰۵
Porposed Method	**۲۵۹/۱۴۳۲**	**۳۳۸/۳۱۶۹**	**۴۳۳/۷۰۳۴**	**۵۴۵/۲۸۰۱**	**۶۷۷/۳۱۲۸**	**۸۲۲/۷۴۱۹**	**۹۸۸/۱۲۳۷**

پس از مشخص شدن میزان توان تولیدی نیروگاه‌ها توسط روش پیشنهادی ، با اعمال پخش بار بر روی شبکه ۳۰ باسه ولتاژ باس‌های شبکه محاسبه شده و در شکل زیر ارائه شده است. با توجه به پروفیل ولتاژ شبکه، مشخص است که ولتاژ تمام باس‌های شبکه در محدوده مجاز قرار دارد.



شکل ۳) پروفیل ولتاژ شبکه ۳۰ باسه IEEE در بار ۸۰۰ مگاوات

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

شبکه ۱۱۸ باسه IEEE با ۱۱ واحد نیروگاهی

در شبیه‌سازی این شبکه، از اطلاعات مراجع [۵,۳] استفاده شده است. نتایج بهترین جواب برای تولید بهینه نیروگاه‌ها در سطوح بار مختلف پس از ۱۵ بار اجرای برنامه در جدول (۵) نشان داده شده است. در ادامه، مقادیر محاسبه شده هزینه سوخت و میزان آلودگی تولیدی نیروگاه‌ها در جدول‌های (۶) و (۷) با نتایج مقالات دیگر مقایسه شده است.

جدول ۵) نتایج بهترین جواب حاصل از توزیع اقتصادی زیست‌محیطی بار در سیستم ۱۱ واحدی

No. Gen	LOAD (MW)						
	۱۰۰۰	۱۲۵۰	۱۵۰۰	۱۷۵۰	۲۰۰۰	۲۲۵۰	۲۵۰۰
PG1	۸۶/۱۵۲۱	۹۳/۸۲۲۵	۱۰۶/۶۶۱۱	۱۱۳/۰۹۵۱۴	۱۱۹/۹۹۹۳	۱۲۸/۰۰۸۱	۱۴۰/۳۳۵۴
PG2	۷۷/۱۱۰۲	۸۳/۱۴۳۲	۸۶/۷۶۹۴	۹۴/۳۸۷۱	۱۰۱/۰۰۰۷	۱۰۸/۵۴۱۲	۱۱۲/۹۱۰۵
PG3	۸۵/۲۳۲۱	۹۶/۱۴۳۲	۱۰۵/۶۱۸۸	۱۱۴/۲۲۳۱	۱۲۷/۸۰۹۱	۱۳۵/۸۲۰۰	۱۴۷/۰۷۲۴
PG4	۷۳/۸۹۲۵	۹۹/۱۷۴۰	۱۲۸/۸۸۰۹	۱۴۹/۶۷۹۱	۱۷۳/۶۰۷۱	۱۹۹/۰۰۳۳	۲۲۱/۵۹۱۶
PG5	۴۹/۲۰۰۹	۶۴/۷۹۳۷	۸۴/۷۱۵۱	۹۵/۰۵۱۷۷	۱۰۶/۷۵۵۸	۱۲۰/۷۱۷۱	۱۳۷/۶۷۱۹
PG6	۸۱/۰۱۷۴	۱۰۱/۳۰۱۱	۱۲۴/۱۲۰۰	۱۴۵/۰۹۵۰	۱۷۱/۱۰۶۹	۱۹۵/۸۱۲۷	۲۱۲/۵۵۸۴
PG7	۵۵/۹۰۸۳	۶۳/۰۱۱۳	۷۷/۳۱۶۹	۹۸/۷۱۲۶	۱۱۰/۴۲۳۱	۱۲۵/۰۱۴۹	۱۴۲/۷۴۵۲
PG8	۱۳۱/۶۸۵۹	۱۶۷/۹۱۲۲	۲۱۵/۵۳۲۹	۲۳۵/۸۸۰۳	۲۷۶/۰۲۱۱	۳۱۴/۳۶۴۱	۳۴۶/۹۲۲۵
PG9	۱۱۸/۹۱۱۲	۱۶۰/۶۵۱۵	۱۹۰/۳۱۶۱	۲۲۳/۳۱۰۶	۲۵۹/۸۴۱۲	۲۹۶/۷۱۸۲	۳۲۷/۵۹۳۰
PG10	۱۲۰/۵۵۷۵	۱۶۰/۸۲۱۶	۱۹۲/۷۷۱۰	۲۴۳/۳۷۱۲	۲۸۴/۷۳۲۸	۳۱۸/۸۷۰۰	۳۶۲/۳۹۳۳
PG11	۱۲۰/۳۳۱۹	۱۵۹/۲۲۵۷	۱۸۷/۳۰۰۷	۲۳۷/۱۹۴۱	۲۶۸/۷۰۳۹	۳۰۷/۱۳۲۴	۳۴۸/۲۰۵۸
Fuel Cost ($/hr)	۸۴۹۸/۵۳	۹۱۰۳/۴۷	۹۷۲۹/۹۳	۱۰۳۷۲/۱۹	۱۱۰۳۱/۷۲	۱۱۷۱۶/۵۷	۱۲۴۱۴/۱۴
Emission (kg/hr)	**۲۰۵/۱۰۱**	**۳۴۰/۰۰۶**	**۵۳۹/۹۹۷**	**۸۰۵/۹۱۹**	**۱۱۳۷/۵۲۱**	**۱۵۳۵/۱۴۰**	**۲۰۰۲/۰۱۳**

جدول ٦) مقایسه هزینه‌های بهره‌برداری از نیروگاه‌ها در سیستم ۱۱ واحدی ($/hr)

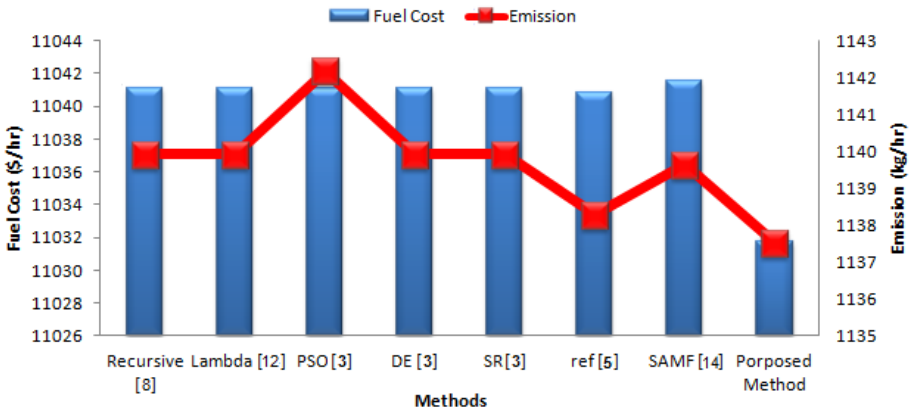
Method	LOAD (MW)						
	۱۰۰۰	۱۲۵۰	۱۵۰۰	۱۷۵۰	۲۰۰۰	۲۲۵۰	۲۵۰۰
λ -Iteration[12]	۸۵۰۲/۳۰	۹۱۰۸/۳۸	۹۷۳۳/۵۴	۱۰۳۷۷/۷۸	۱۱۰۴۱/۰۸	۱۱۷۲۳/۴۷	۱۲۴۲۴/۹۴
Recursive[8]	۸۵۰۲/۲۹	۹۱۰۸/۳۸	۹۷۳۳/۵۴	۱۰۳۷۷/۷۷	۱۱۰۴۱/۰۸	۱۱۷۲۳/۴۷	۱۲۴۲۹/۹۴
PSO [3]	۸۵۰۸/۲۴	۹۱۱۴/۴۲	۹۷۳۷/۳۳	۱۰۳۸۰/۸۲	۱۱۰۴۱/۰۹	۱۱۷۲۵/۶۸	۱۲۴۲۸/۶۳
DE [3]	۸۵۰۵/۸۱	۹۱۱۷/۶۳	۹۷۳۶/۲۲	۱۰۳۷۷/۸۶	۱۱۰۴۱/۰۸	۱۱۷۲۳/۵۴	۱۲۴۲۵/۰۶
SR [3]	۸۵۰۲/۲۹	۹۱۰۸/۳۸	۹۷۳۳/۵۴	۱۰۳۷۷/۷۷	۱۱۰۴۱/۰۸	۱۱۷۲۳/۴۷	۱۲۴۲۹/۹۴
SAMF [14]	۸۵۰۲/۸۷۵	۹۱۰۹/۲۰۶	۹۷۳۴/۴۷۴	۱۰۳۷۸/۹۲۰	۱۱۰۴۱/۵۶	۱۱۷۲۴/۱۵	۱۲۴۲۵/۸۵
refrence [5]	۸۵۰۱/۸۵	۹۱۰۷/۹۹	۹۷۳۳/۲۲	۱۰۳۷۷/۰۱	۱۱۰۴۰/۸۴	۱۱۷۲۳/۲۵	۱۲۴۲۳/۷۷
Porposed Method	**۸۴۹۸/۵۳**	**۹۱۰۳/۴۷**	**۹۷۲۹/۹۳**	**۱۰۳۷۲/۱۹**	**۱۱۰۳۱/۷۲**	**۱۱۷۱۶/۸۷**	**۱۲۴۱۴/۱۴**

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

جدول ۷) مقایسه میزان آلایندگی نیروگاه‌ها در سیستم ۱۱ واحدی (kg/hr)

Method	LOAD (MW)						
	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500
λ -Iteration[12]	۲۰۵/۲۰۵	۳۳۹/۸۷۰	۵۴۰/۵۴۵	۸۰۷/۲۲۰	۱۱۳۹/۹۱۲	۱۵۳۸/۶۰۰	۲۰۰۳/۳۰۱
Recursive[8]	۲۰۵/۲۰۴	۳۳۹/۸۷۰	۵۴۰/۵۴۴	۸۰۷/۲۲۰	۱۱۳۹/۹۱۱	۱۵۳۸/۶۰۰	۲۰۰۳/۳۰۰
PSO [3]	۲۰۸/۰۱۲	۳۴۵/۶۶۹	۵۴۵/۳۴۷	۸۱۲/۲۶۳	۱۱۴۲/۱۸۲	۱۵۴۰/۴۶۵	۲۰۰۳/۷۲۰
DE [3]	۲۰۵/۲۰۶	۳۳۹/۹۳۵	۵۴۴/۲۹۸	۸۰۷/۲۳۶	۱۱۳۹/۹۱۱	۱۵۳۸/۶۵۹	۲۰۰۳/۳۵۰
SR [3]	۲۰۵/۲۰۴	۳۳۹/۸۷۰	۵۴۰/۵۴۴	۸۰۷/۲۲۰	۱۱۳۹/۹۱۱	۱۵۳۸/۶۰۰	۲۰۰۳/۳۰۰
SAMF [14]	۲۰۴/۸۸۶۵	۳۳۹/۳۳۳۶	۵۴۰/۰۰۱۷	۸۰۶/۲۶۵۴	۱۱۳۹/۶۳۲	۱۵۳۷/۸۶۷	۲۰۰۱/۹۵۹
refrence [5]	۲۰۵/۱۷۵	۳۳۹/۷۰۶	۵۳۹/۴۹۳	۸۰۷/۲۱۴	۱۱۳۸/۲۷۹	۱۵۳۸/۳۱۹	۲۰۰۳/۰۳۰
Porposed Method	**۲۰۵/۱۰۱**	**۳۴۰/۰۰۶**	**۵۳۹/۹۹۷**	**۸۰۵/۹۱۹**	**۱۱۳۷/۵۲۱**	**۱۵۳۵/۱۴۰**	**۲۰۰۲/۰۱۳**

همان طور که از نتایج ارائه شده در جداول فوق مشخص است، استفاده از روش پیشنهادی بهبود قابل ملاحظه‌ای در جواب‌های مسأله ایجاد کرده است. به منظور مقایسه بهتر نتایج، نمودار زیر برای سیستم ۱۱ واحدی تهیه شده است.



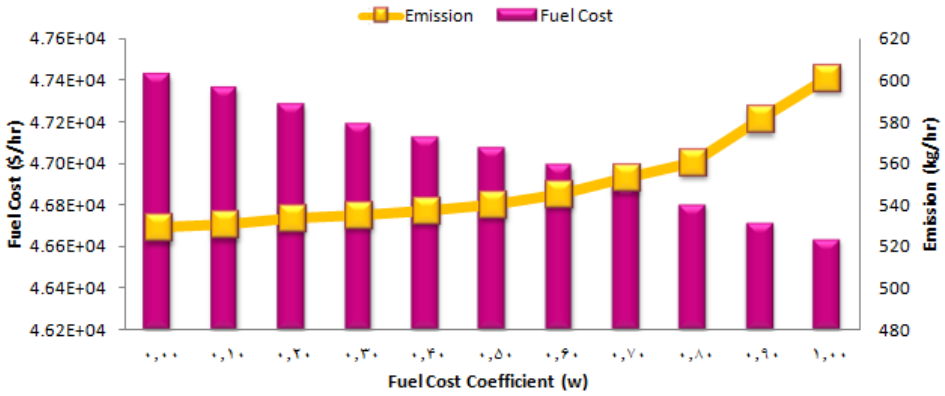
شکل ٤) نمودار مقایسه هزینه سوخت و میزان آلودگی نیروگاه‌ها در روش‌های مختلف (بار سیستم ۲۰۰۰ مگاوات)

تحلیل حساسیت

نتایج بدست آمده برای سیستم های مورد مطالعه در بخش قبل با در نظر گرفتن ضرایب برابر برای اهداف مسأله به دست آمده است. این در حالی است که ممکن است اهمیت اهداف مسأله از دید بهره‌بردار سیستم یکسان نباشد. در این

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

بخش، به منظور بررسی و تحلیل حساسیت نتایج بدست آمده نسبت به تغییر ضریب هزینه سوخت، نتایج هزینـه و آلـودگی تولیدی نیروگاه‌ها در شبکه ۳۰ باسه به ازای ضرایب مختلف محاسبه شده و نتایج بدست آمده در شکل (۵) ارائه شده است.



شکل ۵) اثر تغییر ضریب هزینه سوخت بر پاسخ سیستم ۳۰ باسه در بار ۸۰۰ مگاوات

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با افزایش ضریب هزینه سوخت، اثر هزینه در تابع هدف بیشتر شده و هزینه‌های تولیـد کاهش می‌یابد. این در حالی است که اهمیت تولید گازهای آلاینده در تابع هدف کاهش یافته و میزان آلودگی زیاد می‌شود. انتخاب عدد ۱ به عنوان ضریب هزینه سوخت، مسأله را به توزیع اقتصادی بار تبدیل می‌کند و در صورتی که عدد صـفر بـه عنوان ضریب هزینه سوخت در نظر گرفته شود، تنها توزیع زیست‌محیطی بار بدون اثر هزینه‌ها انجام می‌گیرد.

نتیجه گیری

در این مقاله، مسأله توزیع اقتصادی زیست‌محیطی بار با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی نیروگاه‌ها و هـدف تعیـین میزان تولید بهینه هر نیروگاه با در نظر گرفتن آلودگی‌های زیست‌محیطی توسط الگوریتم ترکیبی زنبور عـسل و جـستجوی گرانشی حل شد. مقایسه نتایج روش پیشنهادی با سایر روش‌ها در سیستم های ۶ و ۱۱ واحدی، توانایی این روش در حـل مسائل پیچیده سیستم قدرت را تأیید می‌کند. همچنین با توجه به پارامترهای الگـوریتم پیـشنهادی، زمـان حـل مـسأله در مقایسه با روش‌های دیگر کاهش قابل توجهی داشته و از قرار گرفتن در نقاط بهینه محلی جلوگیری شـده اسـت. در ادامـه اثر ضریب هزینه سوخت بر روی پاسخ‌های بدست آمده بررسی شده و نتایج آن برای شبکه ۳۰ باسه ارائه شده است. اطلاع از چگونگی تغییر هزینه‌های بهره‌برداری و میزان آلودگی نیروگاه‌ها نسبت به هم، این امکان را فراهم می‌کند کـه بتـوان بـا توجه به اهمیت هر یک از اهداف، نقطه کار نهایی بهره‌برداری از سیستم را به عنوان پاسخ بهینه مسأله EED تعیین کـرد. در پژوهش‌های آتی می‌توان توزیع اقتصادی زیست‌محیطی بار را در حضور نیروگاه‌های بادی و خورشیدی بـا اعمـال عـدم قطعیت‌ها در تقاضای بار و میزان تولید انجام داد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

منابع

[۱] دفتر برنامه ریزی کلان انرژی، معاونت امور برق و انرژی وزارت نیرو ترازنامه انرژی سال ۱۳۸۹.

[2] 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.

[3] Balamurugan, R. and Subramanian, S. "A simplified recursive approach to combined economic emission dispatch", *Electric Power Components and Systems*. 36, 17-27, 2008.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] Muralidharan, S., Srikrishna, K. , Subramanian, S, " Emission constrained economic dispatch – A new recursive approach", *Electric Power Components and Systems*. 34, 343-353, 2006.

[9] Pothiya, S., Ngamroo, I., "Ant Colony Optimization for Economic Dispatch Problem With Non-smooth Cost Functions", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 32, No. 5, pp. 478–487, 2010.

[10] Rashidi, E., Nezamabadipour, H and Saryazdi, S., " Filter Modeling using Gravitational search algorithm ", *Engineering application of Artificial Intelligence*. 18 May 2010.

[11] Sai, P.W.T., Pan, J.S., Liao, B. Y. Chu, S.C.," Enhanced Artificial Bee Colony Optimization". *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, Vol. 5, No. 12, pp. 1–12, 2009.

[12] 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.

[13] Sishaj, S.H., Simon, P., "Artificial bee colony algorithm for economic load dispatch problem with non-smooth cost functions", *Electric Power Components and Systems*, vol. 38, no. 7, pp. 786- 803, 2010.

[14] Subramanian, S., Ganesan, S., " A Simple Approach for Emission Constrained Economic Dispatch Problems ", *International Journal of Computer Applications* .Vol. 8. no.11, 2010.

[15] Wood. A.J., Wollenberg. B.F, "Power Generation, Operation and Control" , NEWYORK 1984.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]