

پخش بار اقتصادی دینامیکی - زیست محیطی مبتنی بر پیشنهاد سمت مصرف با استفاده از

الگوریتم ترکیبی غذایابی باکتری و تکامل تفاضلی

حسین امیری^۱، علیرضا حاتمی^۲، علی دیهیمی^۳

۱- دانشجوی، گروه برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا - همدان - ایران

h.amiri728@gmail.com

۲- استادیار، گروه برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا - همدان - ایران

hatamisharif@basu.ac.ir

۳- دانشیار، گروه برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا - همدان - ایران

a_deihimi@yahoo.com

چکیده: یکی از وظایف اپراتور مستقل سیستم و یا اپراتور بازار، دریافت پیشنهادات سمت عرضه و تقاضا به منظور تعیین برنامه ریزی نیروگاه ها در سمت عرضه، برنامه ریزی توان مصرفی مشتریان و قیمت برق در دوره برنامه ریزی دربردارنده چندین بازه زمانی است. معیار اصلی اپراتور مستقل سیستم، حداکثر شدن رفاه اجتماعی بازیگران است. برای این منظور لازم است علاوه بر تابع هزینه سمت عرضه، تابع منفعت سمت مصرف نیز در تابع هدف گنجانده شود. در این مقاله، الگوریتم بهینه سازی ترکیبی جدیدی مبتنی بر الگوریتم غذایابی باکتری و تکامل تفاضلی برای حل مسئله پخش بار اقتصادی دینامیکی - زیست محیطی مبتنی بر حداکثر رفاه اجتماعی ارائه شده است. الگوریتم ترکیبی ارائه شده علاوه بر جست و جو در یک فضای گسترده برای دستیابی به پاسخ بهینه کلی، سرعت همگرایی پذیرفتنی را نیز داراست. برای نشان دادن کارایی الگوریتم، چندین سیستم تست بررسی شده است و نتایج به دست آمده با دیگر روش ها مقایسه شده است. نتایج نشان دهنده برتری روش پیشنهادی نسبت به دیگر روش هاست.

واژه های کلیدی: الگوریتم غذایابی باکتری و تکامل تفاضلی، پخش بار اقتصادی دینامیکی، پیشنهاد سمت مصرف.

۱- مقدمه

پخش بار اقتصادی استاتیکی که مسئله مد نظر را برای یک میزان بار مشخص در یک بازه زمانی به صورت بهینه حل می کند و پخش بار اقتصادی دینامیکی که مسئله را برای میزان بارهای متفاوت و در چندین بازه زمانی بررسی می کند. بدیهی است فرآیند محاسبات در پخش بار اقتصادی دینامیکی، پیچیده تر از حالت استاتیکی است؛ اما نتایج محاسبات آن تطابق بیشتری با نیازهای واقعی سیستم قدرت دارد [۱].

در سیستم های قدرت با نحوه مدیریت سنتی، مرکز کنترل شبکه پخش بار اقتصادی را با هدف حداقل کردن هزینه بهره برداری برای تأمین بار اجرا می کند. در زمینه پخش بار اقتصادی دینامیکی با قیود عملیاتی همچون ناحیه

پخش بار اقتصادی یکی از مسائل مهم در بهره برداری از سیستم های قدرت است که در مراکز کنترل شبکه برای تعیین توان بهینه واحدهای تولیدی استفاده می شود. بسته به بازه زمانی، دو نوع پخش بار اقتصادی معرفی می شود:

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۲۹

نام نویسنده مسئول: علیرضا حاتمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - همدان - دانشگاه بوعلی سینا -

دانشکده مهندسی - گروه برق

اقتصادی دینامیکی از دید اپراتور مستقل سیستم و با هدف حداکثر شدن رفاه اجتماعی می‌پردازد. در این بخش تحقیقات کمی صورت گرفته است [۲۶-۳۰]. مرجع [۲۶]، اولین مطالعه صورت گرفته در این زمینه را گزارش می‌دهد که در آن حداکثر کردن رفاه اجتماعی جایگزین حداقل کردن هزینه بهره‌برداری در پخش بار اقتصادی شده است. مراجع [۲۷-۲۹] نیز تابع هدفی مشابه [۲۱] در نظر گرفته‌اند و از الگوریتم‌های بهبود یافته ژنتیک ([۲۸-۲۷]) و تکامل تفاضلی ([۲۹]) برای حل مسئله مذکور استفاده کرده‌اند. در [۳۰] نیز پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن پیشنهاد، سمت مصرف مطرح شده است و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهبود یافته، مسئله برای چند سیستم تست بررسی شده است.

در این مقاله پخش بار اقتصادی دینامیکی - زیست محیطی با در نظر گرفتن پیشنهادات، سمت مصرف بررسی می‌شود. برای حل مسئله از یک الگوریتم ترکیبی جدید مبتنی بر غذایابی باکتری و تکاملی تفاضلی استفاده شده است. در الگوریتم ارائه شده، تغییرات عمده‌ای در مراحل مختلف شامل مرحله حرکت، باز تولید و تولید نسل و حذف و پراکندگی پیشنهاد شده است که سبب شده است ویژگی مثبت الگوریتم غذایابی باکتری (جست‌وجوی وسیع برای یافتن پاسخ بهینه و توقف‌نداشتن در بهینه‌های محلی) حفظ شود و سرعت همگرایی آن نیز به صورت چشمگیری بهبود یابد (جزئیات تغییرات پیشنهادی در ادامه ذکر شده است). برای اثبات کارایی الگوریتم پیشنهادی چندین سیستم تست بررسی شده است و پاسخ‌های الگوریتم پیشنهادی با دیگر الگوریتم‌ها مقایسه شده است.

۲- مدل ریاضی پخش بار اقتصادی دینامیکی

- زیست محیطی مبتنی بر حداکثر رفاه

۲-۱- تابع هدف

تابع هدف مسئله پخش بار اقتصادی دینامیکی - زیست محیطی مبتنی بر حداکثر رفاه، ماکزیم کردن منفعت اجتماعی است. این تابع هدف مطابق است با آنچه در ادامه بیان شده است.

ممنوعه در بهره‌برداری ژنراتورها، امنیت شبکه، اثر شیرهای بخار، و... تحقیقات بسیار گسترده‌ای صورت گرفته است و انواع روش‌های بهینه‌سازی (دربردارنده روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی و الگوریتم‌های زیستی الهام گرفته از طبیعت) استفاده شده است. برای نمونه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: الگوریتم هوشمند مبتنی بر آموزش و یادگیری [۲]، الگوریتم زیستی مبتنی بر جست‌وجوی فاخته [۳]، الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی غیرمغلوب [۴-۵]، الگوریتم بهبود یافته حرکت دسته‌جمعی ذرات [۶-۷]، الگوریتم کلونی زنبور عسل [۸]، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی [۹-۱۰]، الگوریتم رقابت استعماری [۱۱]، الگوریتم تکامل تفاضلی [۱۲]، و روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر کنترل پیش‌بین [۱۴-۱۳]. بخش دیگری از تحقیقات، پخش بار اقتصادی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر (مانند انرژی بادی و...) بررسی کرده است [۱۷-۱۵].

با تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت و پیدایش بازار برق، علاوه بر تولیدکنندگان، سمت مصرف نیز امکان مشارکت در بازار را داشته است و می‌تواند سطح مصرف خود را با توجه به منفعت اقتصادی و قیمت برق تنظیم کند [۱۸]. در این محیط، اپراتور مستقل سیستم (و یا اپراتور بازار) با دریافت پیشنهاد های فروش تولیدکنندگان و پیشنهادهای خرید مشتریان، پخش بار اقتصادی را با هدف حداکثر کردن منفعت شرکت‌کنندگان بازار اجرا می‌کند. در واقع، هدف از پخش بار اقتصادی حداکثر کردن رفاه اجتماعی است که حاصل تفاضل منفعت مصرف‌کنندگان و هزینه بهره‌برداری تولیدکنندگان در نظر گرفته می‌شود [۱۹].

در زمینه پخش بار اقتصادی دینامیکی مبتنی بر حداقل هزینه بهره‌برداری، تحقیقات بسیار گسترده‌ای صورت گرفته است [۲۰-۲۲]؛ در زمینه پخش بار اقتصادی و «در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها» در محیط بازار نیز تحقیقات متعددی گزارش شده است. تحقیقات صورت گرفته در این زمینه را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد: بخش اول (که عمده تحقیقات صورت گرفته را دربرمی‌گیرد) توان تولیدی نیروگاه‌ها را در بازه‌های زمانی برنامه‌ریزی (در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها) با هدف حداکثر کردن سود آن‌ها در بازار برق تعیین می‌کند [۲۳-۲۵]. بخش دوم به پخش بار

$$-D_{Ri} \cdot \Delta t \leq P_{i,t+1} - P_{i,t} \leq U_{Ri} \cdot \Delta t \quad (9)$$

در روابط فوق، D_{Ri} : حداکثر نرخ کاهش توان؛ و U_{Ri} : حداکثر نرخ افزایش توان هستند.

۳- الگوریتم ترکیبی غذایابی باکتری و تکامل تفاضلی

پاسینو (Passino)، اولین بار الگوریتم غذایابی باکتری را در سال ۲۰۰۲ مطرح کرد [۳۱]. روش این الگوریتم بر پایه غذایابی و تکثیر گونه خاصی از باکتری است که در بدن انسان زندگی می‌کند و قادر است با جهش و گام‌های کوتاه به سمت مناطقی که غذا وجود دارد، حرکت کند. این الگوریتم به علت دامنه گسترده جست‌وجو، احتمال توقف آن در نقاط بهینه محلی کم است و توانایی مناسبی در رسیدن به نقطه بهینه کلی دارد [۳۴-۳۲]. با این وجود، نسخه اصلی الگوریتم مذکور نواقصی نیز دارد؛ از جمله: پایین بودن سرعت همگرایی در مرحله تولید نسل جدید و همچنین ثابت بودن اندازه حرکت هر باکتری در هر مرحله از تکرار؛ همچنین عملکرد الگوریتم و کارایی آن با رشد و توسعه فضای جست‌وجو تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۳۳]. برای بهبود عملکرد الگوریتم، ترکیب الگوریتم غذایابی باکتری با ژنتیک الگوریتم و حرکت دسته جمعی ذرات پیشنهاد شده است [۳۶-۳۵]. در [۳۷] از الگوریتم‌های غذایابی باکتری و تکاملی تفاضلی (به صورت مجزا) برای حل مسئله پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن واحدهای بادی استفاده شده است. در الگوریتم پیشنهاد شده در [۳۸] از الگوریتم غذایابی باکتری برای بهبود همگرایی الگوریتم تکامل تفاضلی استفاده شده است. در مراجع [۴۲-۳۹] الگوریتم جدیدی برای حل مسائل بهینه‌سازی (همچون تخمین بهترین مقادیر پارامترها در مسائل بهینه‌سازی، اندازه‌گیری و تعیین فاصله بین دو رشته، مدیریت تراکم بازار برق و پخش بار اقتصادی دینامیکی) مبتنی بر ترکیب الگوریتم غذایابی باکتری و تکامل تفاضلی ارائه شده است. در الگوریتم ارائه شده که الگوریتم تفاضلی حرکتی (Chemotactic Differential Evolution) نامیده شده است،

$$\max \sum_{t=1}^T \left[\sum_{j=1}^{N_d} B_j(D_{j,t}) - \sum_{i=1}^{N_g} C_i(P_{i,t}) \right] \quad (1)$$

$$B_j(D_{j,t}) = a_{dj} D_{j,t}^2 + b_{dj} D_{j,t} + c_{dj} \quad (2)$$

$$C_i(P_{i,t}) = a_{pi} P_{i,t}^2 + b_{pi} P_{i,t} + c_{pi} + C_{Ei} \quad (3)$$

$$C_{Ei} = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 + \varepsilon_i \exp(\varphi_i P_i) \quad (4)$$

در روابط فوق، B_j : تابع سود خریدار j ام؛ C_i : تابع هزینه تولیدکننده i ام؛ C_{Ei} : هزینه مقدار آلودگی که ژنراتور ایجاد کرده است i ام؛ N_d : تعداد خریداران؛ N_g : تعداد تولیدکنندگان؛ $D_{j,t}$: میزان مصرف خریدار j ام در بازه زمانی t ام؛ $P_{i,t}$: میزان تولید ژنراتور i ام در بازه زمانی t ام؛ a_{dj}, b_{dj}, c_{dj} : ضرایب تابع سود خریدار j ام؛ a_{pi}, b_{pi}, c_{pi} : ضرایب تابع هزینه تولیدکننده i ام؛ و $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \varepsilon_i, \varphi_i$: ضرایب آلودگی ژنراتور i ام هستند.

۲-۲- قیود

- قید تعادل توان تولیدی و مصرفی

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{i,t} = \sum_{j=1}^{N_d} D_{j,t} + Loss \quad (5)$$

$$Loss = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_d} P_i B_{i,j} P_j \quad (6)$$

در روابط فوق، $Loss$: تلفات سیستم؛ و B ماتریس ضرایب تلفات سیستم است.

- حد بالا و پایین توان تولیدی و مصرفی

$$P_{i,t,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t,\max} \quad (7)$$

$$D_{j,t,\min} \leq D_{j,t} \leq D_{j,t,\max} \quad (8)$$

در روابط فوق، $P_{i,t,\min}$: کمترین میزان توان تولیدی ژنراتور i ام؛ $P_{i,t,\max}$: بیشترین میزان توان تولیدی ژنراتور i ام؛ $D_{j,t,\min}$: کمترین میزان مصرف خریدار j ام؛ $D_{j,t,\max}$: بیشترین میزان مصرف خریدار j ام هستند.

- نرخ شیب تغییرات توان تولیدی ژنراتورها

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i)\varphi(j) \quad (10)$$

$$\varphi(j) = \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i)\Delta(i)}} \quad (11)$$

در رابطه (۱۰)، $P_i^i p(j, k, l) = \theta^i(j, k, l) | i = 1, 2, \dots, S$ ، موقعیت باکتری i ام در گام حرکت j ام، باز تولید k ام، و گام l ام مرحله حذف و پراکندگی است. $\varphi(j)$ بردار واحد، مشخص کننده جهت حرکت باکتری i ام، $C(i)$ اندازه گام باکتری i ام، و Δ بردار تصادفی با ابعادی برابر با ابعاد مسئله است که عناصر آن در بازه $[-1 \ 1]$ قرار دارند.

در تمامی مراحل حرکت، ابتدا برای هر باکتری جهت حرکت تعیین می شود؛ سپس باکتری با استفاده از رابطه (۱۰) شروع به حرکت می کند. اگر موقعیت جدید از موقعیت قبلی بهتر باشد، موقعیت جدید جایگزین موقعیت قبلی می شود. این حرکت برای هر باکتری تا زمانی ادامه می یابد که مقدار تابع هدف موقعیت جدید از مقدار تابع هدف موقعیت قبلی بهتر باشد و یا الگوریتم به مقدار بیشینه تعیین شده برای تعداد حرکت رسیده باشد. تعداد بیشینه حرکت با استفاده از متغیر N_s تعیین می شود.

تولید نسل

هنگامی که همه باکتری های موجود در یک نسل، تمامی مراحل حرکت خود را طی کردند، مرحله تولید نسل اجرا می شود. در این مرحله تمامی باکتری ها براساس تابع ارزیابی، رتبه بندی می شوند (باکتری های دارای شایستگی بیشتر در ابتدا قرار می گیرند). سپس نصف باکتری هایی که در نیمه اول جمعیت قرار دارند، تولید مثل می کنند و به دو باکتری مشابه تبدیل می شوند و جایگزین باکتری های نیمه دوم جمعیت می شوند؛ بنابراین اندازه جمعیت در طول فرآیند تولید نسل ثابت می ماند. تعداد مراحل تولید نسل با متغیر N_{re} نمایش داده می شود.

حذف و پراکندگی

در طبیعت برخی از وقایع طبیعی مانند تغییرات دما، تغییرات غلظت غذا و جریان آب باعث مرگ و میر و یا جابه جایی باکتری ها به نقاط دیگر می شود [۳۴]. برای

در مرحله حرکت باکتری به جای استفاده از گام ثابت از گام متغیر و در مرحله بازتولید از برخی عملگرهای الگوریتم تفاضلی استفاده شده است. در [۴۳] از الگوریتم بهبود یافته غذایابی باکتری برای تخمین هارمونیک ها در شبکه قدرت استفاده شده است. در این الگوریتم به جای استفاده از گام های ثابت در مرحله حرکت باکتری، از گام های با اندازه متغیر (که مطابق معیار فازی تاکاگی - سوگونو تعیین می شوند) استفاده شده است.

در الگوریتم ترکیبی پیشنهادی در این مقاله، تغییرات عمده ای در مراحل مختلف الگوریتم غذایابی باکتری صورت گرفته است. در الگوریتم پیشنهادی (۱): در مرحله حرکت از قدم های متغیر کاهش استفاده شده است؛ به طوری که در ابتدای کار طول قدم ها بزرگ و با افزایش تعداد تکرارها، طول گام ها کاهش می یابد؛ (۲): در مرحله تولید نسل از استراتژی های تکامل تفاضلی برای تولید نسل جدید باکتری ها استفاده شده است؛ و (۳): در مرحله حذف و پراکندگی، باکتری انتخابی به صورت کاملاً تصادفی پراکنده نخواهد شد؛ بلکه با توجه به ابعاد مسئله، قسمتی از موقعیت آن به صورت تصادفی ایجاد می شود و بخشی دیگر را از موقعیت بهترین باکتری موجود در بین کل کاندیداهای جواب می گیرد و قسمتی از آن بدون تغییر باقی می ماند.

در این بخش، ابتدا دو الگوریتم غذایابی باکتری و تکامل تفاضلی به صورت مختصر بیان می شوند؛ سپس الگوریتم ترکیبی غذایابی باکتری و تکامل تفاضلی شرح داده می شود.

۳-۱- الگوریتم غذایابی باکتری

الگوریتم غذایابی باکتری دربردارنده سه مرحله حرکت، تولید نسل و حذف و پراکندگی است. در ادامه، توضیح مختصری برای هر سه مرحله بیان شده است.

حرکت

مرحله حرکت، جزء اصلی فرآیند الگوریتم غذایابی باکتری است [۳۳] که دربردارنده یک یا دو جهش و چند شنا است. در مرحله حرکت، موقعیت باکتری ها مطابق رابطه (۱۰) به روز می شود.

می‌شود) مقایسه می‌شود و در صورت بهتر بودن تابع هدف آن، جایگزین عضو متناظر خود می‌شود. متغیرهای موجود در این الگوریتم در بردارنده سه متغیر کنترلی ثابت جهش F ، ثابت بازترکیب C_R و اندازه جمعیت N_{pop} هستند. باقی متغیرها در بردارنده N_{dim} بعد مسئله، \max_{iter} تعداد تکرارهای مراحل الگوریتم هستند.

$$U_i = \begin{cases} P_{i,mu} & rand(0,1) \leq C_R \\ P_i & else \end{cases} \quad (12)$$

۳-۳- الگوریتم ترکیبی غذایابی باکتری و تکامل

تفاضلی

آنالیز مرحله حرکت

در یک الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند، ایجاد تعادل بین قابلیت جست‌وجو و سرعت همگرایی امری مهم است. وجود قدم‌های ثابت در مرحله حرکت الگوریتم مرسوم غذایابی باکتری، باعث کاهش سرعت همگرایی الگوریتم می‌شود؛ بنابراین در الگوریتم ترکیبی ارائه‌شده، به جای استفاده از قدم‌های ثابت در مرحله حرکت، از قدم‌های کاهشی استفاده می‌شود. مطابق رابطه (۱۳) در ابتدای الگوریتم این قدم‌ها بزرگ هستند و به تدریج کوچک می‌شوند. درخور ذکر است، این قدم‌ها متناسب با مقدار کمینه و بیشینه متغیرهای فضای مسئله انتخاب می‌شوند.

$$C_i = C_{max} + (C_{min} - C_{max}) \times \left(\frac{iter}{\max_{iter}} \right) \quad (13)$$

$$C_{max} = rand(0,1) \times [var_{max} - var_{min}] \quad (14)$$

var_{max} حد بالای جواب‌های مسئله

var_{min} حد پایین جواب‌های مسئله

آنالیز مرحله تولید نسل

همان‌گونه که در بخش (۳-۱) توضیح داده شد، در مرحله تولید نسل الگوریتم مرسوم غذایابی باکتری، موقعیت نیمی از کاندیدهای جواب مسئله از دست می‌رود و امکان جست‌وجوی فضای مسئله کاهش می‌یابد. در الگوریتم ترکیبی پیشنهادی، مرحله تولید نسل حذف می‌شود و در عوض از استراتژی‌های الگوریتم تکامل تفاضلی برای تولید

شبیه‌سازی این واقعیت، مرحله حذف و پراکنندگی به الگوریتم غذایابی باکتری افزوده شده است. این مرحله، بعد از اینکه تمامی مراحل تولید نسل به پایان رسید، آغاز می‌شود. بدین صورت که برای هر باکتری یک مقدار تصادفی بین صفر و یک ایجاد می‌شود. اگر این مقدار تصادفی از متغیر از پیش تعیین شده (که با P_{ed} نمایش می‌دهند) کوچک‌تر بود، باکتری حذف می‌شود و یک باکتری دیگر به صورت تصادفی جایگزین آن می‌شود.

۳-۲- الگوریتم تکامل تفاضلی

الگوریتم تکامل تفاضلی جزء دسته الگوریتم‌های تکاملی است که $price$ و $storn$ آن را برای حل مسائل بهینه‌سازی مطرح کردند [۴۴]. از مزایای این الگوریتم می‌توان به ساختار ساده، استفاده آسان و سرعت بالای این الگوریتم اشاره کرد [۴۵]. این الگوریتم، سه مرحله اصلی تولید نسل، ارزیابی و انتخاب دارد که تا زمان پایان یافتن الگوریتم در هر مرحله از تکرار اجرا می‌شوند. الگوریتم تکامل تفاضلی به جای استفاده از عملگرهای بازترکیب و جهش سنتی، از استراتژی‌های خاص خودش استفاده می‌کند که برخی از آن‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): استراتژی‌های DE برای انجام مرحله جهش

استراتژی	نحوه انجام جهش
DE/rand	$P_{mu} = P_c + F(P_a - P_b)$
DE/best	$P_{mu} = P_{best} + F(P_a - P_b)$
DE/rand to best	$P_{mu} = P_c + F(P_a - P_b) + F(P_{best} - P_c)$

P_{mu} عضو جهش یافته، P_{best} موقعیت بهترین عضو از تکرار قبلی و P_a ، P_b و P_c موقعیت سه عضو تصادفی از جمعیت فعلی هستند. با استفاده از یکی از استراتژی‌های بیان‌شده در جدول (۱) برای هر عضو از جمعیت، یک عضو جهش یافته ایجاد می‌شود. سپس با استفاده از عملگر بازترکیب که در رابطه (۱۲) نشان داده شده است، یک بردار آزمایشی استخراج می‌شود و بخشی از موقعیت هر دو عضو فعلی و جهش یافته را به ارث می‌برد. درنهایت، این بردار آزمایشی با عضو متناظر خود (که بردار هدف نامیده

به این ترتیب در هر تکرار، هر باکتری مناسب‌ترین استراتژی را برای انجام جهش انتخاب می‌کند.

آنالیز مرحله حذف و پراکندگی

در مرحله حذف و پراکندگی، هر باکتری با احتمال P_{ed} حذف می‌شود. برای اینکه جمعیت در یک نسل ثابت بماند، یک باکتری دیگر که در بازه فضای مسئله قرار دارد، به صورت تصادفی جایگزین آن می‌شود. در واقع، مرحله حذف و پراکندگی باعث می‌شود که احتمال گیرافتادن الگوریتم در مینیمم‌های محلی کاهش یابد. این مرحله از الگوریتم نواقصی نیز دارد. اگر باکتری انتخابی نزدیک به جواب بهینه مسئله باشد، حذف و پراکندگی آن باعث دور شدن الگوریتم از جواب بهینه مسئله می‌شود و در نتیجه کاهش سرعت و دقت در همگرایی الگوریتم را در پی خواهد داشت. برای جلوگیری از این مشکل در الگوریتم ترکیبی ارائه‌شده، باکتری انتخابی در مرحله حذف و پراکندگی به صورت کاملاً تصادفی پراکنده نخواهد شد؛ بلکه با توجه به ابعاد مسئله، قسمتی از موقعیت آن به صورت تصادفی ایجاد می‌شود و بخشی دیگر را از موقعیت بهترین باکتری موجود در بین کل کاندیداهای جواب می‌گیرد و قسمتی از آن بدون تغییر باقی می‌ماند. فرمول‌بندی این روش در رابطه (۲۰) انجام شده است.

$$P = \begin{cases} P_{best}^d & r < P_g \\ LB^d + r \times (UB^d - LB^d) & else \end{cases} \quad (20)$$

$$P_g = P_{g,max} + (P_{g,min} - P_{g,max}) \times \frac{ell}{N_{ed}} \quad (21)$$

r عددی تصادفی بین صفر و یک؛

P_g احتمال حرکت باکتری در حال پراکندگی به سمت بهترین باکتری موجود.

در واقع، رابطه (۲۱) نشان می‌دهد که P_g در ابتدای تکرار حلقه حذف و پراکندگی بزرگ است و به تدریج کوچک می‌شود. فلوجارت الگوریتم ترکیبی ارائه‌شده در شکل (۱) نشان داده شده است.

نسل جدید استفاده می‌شود. درخور ذکر است که برخلاف الگوریتم اصلی تکامل تفاضلی که تنها از یک استراتژی خود برای انجام جهش استفاده می‌کند، الگوریتم ترکیبی مطرح‌شده از هر سه استراتژی نشان داده شده در جدول (۱) بهره می‌گیرد (نحوه استفاده از هر سه استراتژی در ادامه توضیح داده می‌شود). به این صورت که برای هر باکتری یک بردار آزمایشی ایجاد می‌شود. پس از آن، این بردار مطابق رابطه (۱۵) با باکتری متناظر مقایسه می‌شود و در صورت بهتر بودن، جایگزین آن می‌شود.

$$\text{if } f(u_i) < f(P_i) \text{ then } P_{i+1} = U_i \text{ else } P_{i+1} = P_i \quad (15)$$

طریقه استفاده از هر سه استراتژی

در ابتدای الگوریتم، هر سه استراتژی دارای احتمال یکسان هستند. برای هر سه استراتژی، شمارنده CNT_B در نظر گرفته می‌شود. مقدار اولیه این شمارنده برابر صفر است. در هر مرحله از تکرار الگوریتم، باکتری‌ها با توجه به شایستگی براساس تابع ارزیابی، مرتب می‌شوند و مطابق رابطه (۱۶) مقادیر وزنی برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود.

$$W_i = \frac{\log(S - i + 1)}{\sum_{k=1}^S \log k}; i = 1, \dots, S \quad (16)$$

مطابق رابطه (۱۶)، باکتری بهتر ضریب بالاتری را دریافت می‌کند. سپس شمارنده CNT_B براساس رابطه (۱۷) به‌روز می‌شود.

$$CNT_B = CNT_B + \frac{W_h}{W_m}; h = 1, \dots, N_m \quad (17)$$

N_m تعداد باکتری‌های استراتژی B استفاده می‌کنند. با استفاده از شمارنده CNT_B احتمال هر سه استراتژی مطابق رابطه (۱۸) به‌روز می‌شوند.

$$P_B = (1 - \lambda) \times P_B - \lambda \times \frac{CNT_B}{iter} \quad (18)$$

λ ضریب ثابتی است که تعادل بین هر سه احتمال را در مرحله آخر برقرار می‌سازد. سپس هر سه احتمال مطابق رابطه (۱۹) نرمالیزه می‌شوند.

$$P_B = \frac{P_B}{\sum_{B=1}^3 P_B} \quad (19)$$

باکتری با تابع ارزیابی بررسی می‌شود. تابع ارزیابی به صورتی در نظر گرفته می‌شود که تابع رفاه اجتماعی حداکثر شود و قیود عملیاتی مسئله برآورده شوند. برای تبدیل بهینه‌سازی مقید به نامقید می‌توان قیود مسئله را با ضرایبی در تابع هدف گنجانده. تابع ارزیابی باکتری که باید حداقل شود به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\text{Evaluation Function} = \sum_{i=1}^{N_g} C_i(P_{i,t}) - \sum_{j=1}^{N_d} B_j(D_{j,t}) + \xi \left(\sum_{i=1}^{N_g} P_{i,t} - \sum_{j=1}^{N_d} D_{j,t} - \text{Loss} \right)^2 \quad (25)$$

رابطه فوق به ازای بازه زمانی خاصی محاسبه می‌شود؛ همچنین ضریب ξ عدد بسیار بزرگی انتخاب می‌شود. انجام عملگر حرکت روی باکتری‌ها (گام چهارم): هر باکتری (برداری از توان‌های بهینه ژنراتورها و بارها) مطابق روابط (۱۰)، (۱۱)، (۱۳)، و (۱۴) حرکتی تصادفی انجام می‌دهد. اگر موقعیت قبلی بهتر از موقعیت جدید باشد، موقعیت قبلی حفظ می‌شود (از نظر تابع ارزیابی)؛ در غیر این صورت موقعیت جدید حفظ می‌شود و باکتری در همان جهت، قدم بعدی را برمی‌دارد و اگر موقعیت جدید از موقعیت قبلی بهتر باشد، جایگزین موقعیت قبلی می‌شود. عملیات باز تولید و تولید نسل (گام پنجم): در این مرحله به ازای هر باکتری، یک بردار آزمایشی (مطابق آنچه که در الگوریتم ترکیبی پیشنهادی ارائه شد) براساس روابط (۱۶) تا (۱۹) و عملگرهای جدول (۱) ایجاد می‌شود؛ سپس بردار آزمایشی تولید می‌شود و باکتری مربوطه مطابق رابطه (۲۵) ارزیابی می‌شود و در صورتی که شایستگی بردار آزمایشی بیشتر باشد، جایگزین باکتری می‌شود. عملیات باز تولید برای همه باکتری‌ها انجام می‌شود.

عملیات حذف و پراکندگی (گام ششم): در مرحله حذف و پراکندگی، هر باکتری با احتمال P_{ed} حذف می‌شود و برای اینکه جمعیت در یک نسل ثابت بماند، یک باکتری

۳-۴- مراحل اجرای الگوریتم ترکیبی پیشنهادی

مراحل اجرای الگوریتم برای حل مسئله به شرح زیر است.

تنظیم پارامترها (گام اول): در این گام پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی همچون تعداد جمعیت باکتری، ابعاد مسئله، تعداد گام‌های مراحل حرکت، باز تولید و تولید نسل و حذف و پراکندگی، مقادیر اولیه و نهایی، احتمال‌های مرتبط به جهش و حذف و پراکندگی، ضرایب تابع هدف، قیود عملیاتی مسئله (دربردارنده حدود پایین و بالای متغیرها و نرخ‌های مجاز کاهش و یا افزایش توان تولیدی ژنراتورها و بارها) و تعداد تکرارها انتخاب می‌شوند.

مقدار دهی جمعیت اولیه باکتری‌ها (گام دوم): در این گام برای جمعیت باکتری، باکتری‌ها به صورت کاملاً تصادفی، تولید و نسبت به حداقل و حداکثر توان تولیدی نیروگاه‌ها و سطوح بار مشتری مطابق رابطه زیر نرمالیزه می‌شوند. باکتری \mathbf{m} به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\theta^i(1,1,1) = (P_{i1}^n, P_{i2}^n, \dots, P_{iN_g}^n, D_{i1}^n, D_{i2}^n, \dots, D_{iN_d}^n) \quad (22)$$

$$i = 1, 2, \dots, S$$

در رابطه فوق، P_{im}^n, D_{io}^n به ترتیب سطح بار خریدار \mathbf{m} و ژنراتور \mathbf{m} هستند.

بعد \mathbf{m} باکتری از روابط زیر به دست می‌آید.

$$P_{im}^n = P_{i,m}^{\min} + \text{rand} \times (P_{i,m}^{\max} - P_{i,m}^{\min}) \quad (23)$$

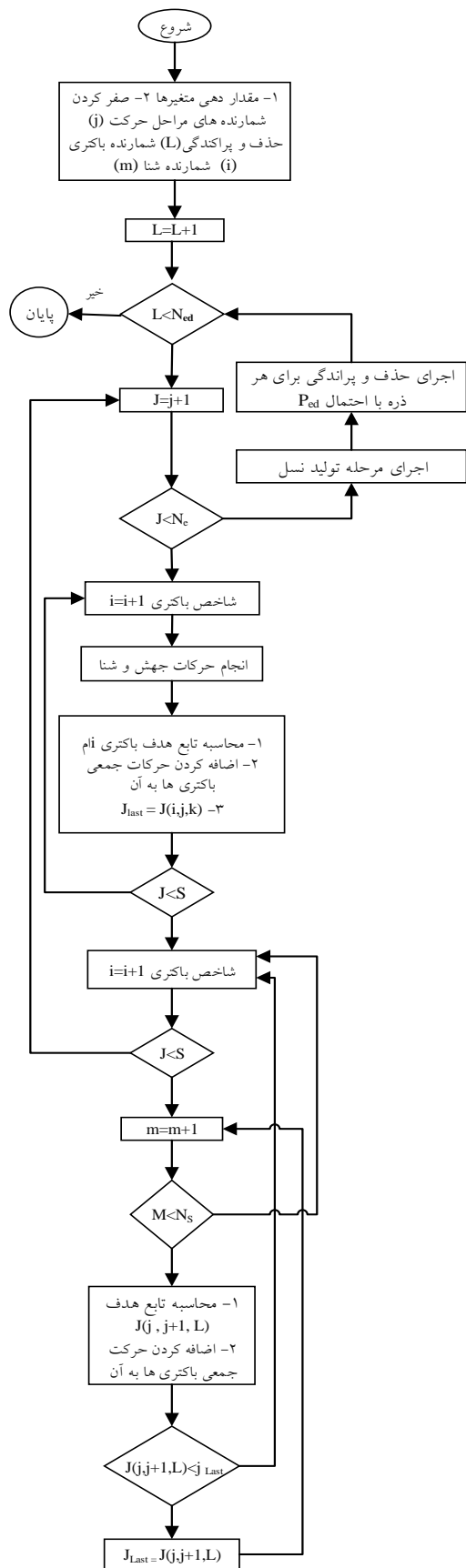
$$D_{im}^n = D_{i,m}^{\min} + \text{rand} \times (D_{i,m}^{\max} - D_{i,m}^{\min})$$

در روابط فوق rand تابع توزیع تصادفی یکنواخت در [۰-۱] است. برای در نظر گرفتن شیب مجاز کاهش و یا افزایش توان، می‌توان از رابطه زیر، مقادیر حداقل و حداکثر بازه مجاز توان تولیدی ژنراتورها (و بارها) را اصلاح کرد.

$$\text{Max}(P_i^{\min}, P_i^0 - DR_i) \leq P_i \quad (24)$$

$$P_i \leq \text{Min}(P_i^{\max}, P_i^0 + UR_i)$$

ارزیابی جمعیت باکتری (گام سوم): شایستگی هر



شکل ۱: فلوجارت الگوریتم ترکیبی غذایی باکتری و تکامل تفاضلی

دیگر که در بازه فضای مسئله قرار دارد، جایگزین آن می‌شود. با استفاده از رابطه (۲۰)، قسمتی از باکتری به صورت تصادفی ایجاد می‌شود و بخشی دیگر را از موقعیت بهترین باکتری موجود در بین کل کاندیداهای جواب می‌گیرد و قسمتی از آن بدون تغییر باقی می‌ماند.

انجام گام‌های دوم تا ششم برای همه بازه زمانی مورد مطالعه (گام هفتم): $t = 1, 2, \dots, T$

معیار توقف (گام هشتم): گام‌های دوم تا هفتم تا رسیدن تعداد تکرارها به مقدار حداکثر تکرار مشخص شده انجام می‌شود و بهترین پاسخ، ذخیره و انتخاب می‌شود.

۴- شبیه‌سازی

سیستم تست ۱: در این سیستم تست الگوریتم ترکیبی غذایی باکتری و تکامل تفاضلی برای حل مسئله پخش بار اقتصادی دینامیکی - زیست محیطی مبتنی بر حداکثر رفا، بر روی سیستم ۳۰ باسه IEEE به کار گرفته شده است. پیشنهادات (مناقصه) پرداخت خریداران براساس ضرایب تابع سود ارائه شده، به سه دسته پیشنهاد پرداخت کم، متوسط و زیاد تقسیم شده‌اند [۴۴]. داده‌های مربوط به تولیدکنندگان در جدول (۲)، داده‌های مربوط به خریداران در جدول (۳) و ضرایب هزینه آلودگی که ژنراتورها ایجاد کرده‌اند در جدول (۴) و همچنین ماتریس ضرایب تلفات نیز در شکل (۲) نشان داده شده است. گفتنی است، داده‌های مذکور از [۳۰] و [۴۵] اخذ شده‌اند.

فرض شده است در هر سه حالت پیشنهاد (مناقصه) پرداخت خریداران، دو مصرف‌کننده در سیستم وجود دارد که پیشنهاد خود را به اپراتور مستقل سیستم ارائه می‌دهند. مطابق جدول (۳) برای هر سه حالت، مقدار ضریب a_{dj} متفاوت، اما مقدار b_{dj} ثابت است؛ به طوری که برای خریدار اول و در سه حالت، مقدار a_{dj} ۰/۰۱، ۰/۰۷، ۰/۰۶- و b_{dj} ۲۰ است.

ترکیبی غذایی باکتری و تکامل تفاضلی الگوریتمی کارا برای حل مسئله پخش بار اقتصادی دینامیکی - زیست محیطی مبتنی بر حداکثر رفاه است.

جدول (۲): اطلاعات تولیدکنندگان سیستم ۱

G	a_{pi}	b_{pi}	P_{min}	P_{max}	U_{Ri}	D_{Ri}
۱	۰/۰۰۳۷۵	۲	۵۰	۲۰۰	۶۵	۸۵
۲	۰/۰۱۷۵	۱/۷۵	۲۰	۸۰	۱۲	۲۰
۳	۰/۰۰۶۲۵	۱	۱۵	۵۰	۱۲	۱۵
۴	۰/۰۰۸۳۴	۳/۲۵	۱۰	۳۵	۸	۱۶
۵	۰/۰۲۵	۳	۱۰	۳۰	۶	۹
۶	۰/۰۲۵	۳	۱۲	۴۰	۸	۱۶

جدول (۳): اطلاعات خریداران سیستم ۱

$a_{ij} (\$/MWh^2)$	خریدار اول			خریدار دوم		
	low	med	high	low	med	high
	-	0.07	0.01	-	0.05	0.09
$b_{ij} (\$/MWh)$	۲۰			۱۵		
Load at period 1 (MW)	Min=100 Max=150			Min=50 Max=100		
Load at period 2 (MW)	Min=20 Max=70			Min=100 Max=200		

جدول (۴): ضرایب آلودگی

$\alpha.10^{-2}$	$\beta.10^{-4}$	$\gamma.10^{-6}$	$\varepsilon.10^{-4}$	$\phi.10^{-2}$
۴/۰۹۱	-۵/۵۵۴	۶/۴۹۰	۲	۲/۵۸۷
۲/۵۴۳	-۶/۰۴۷	۵/۶۳۸	۵	۳/۳۳۳
۴/۲۵۸	-۵/۰۹۴	۴/۵۸۶	۰/۰۱	۸
۵/۳۲۶	-۲/۵۵۰	۳/۳۸۰	۲۰	۲
۴/۲۵۸	-۵/۰۹۴	۴/۵۸۶	۰/۰۱	۸
۶/۱۳۱	-۵/۵۵۵	۵/۱۵۱	۱۰	۶/۶۶۷

$$B = \begin{bmatrix} 2 & 0.1 & 0.15 & 0.05 & 0 & -0.3 \\ 0.1 & 3 & -0.2 & 0.01 & 0.12 & 0.1 \\ 0.15 & -0.2 & 1 & -0.1 & 0.1 & 0.08 \\ 0.05 & 0.01 & -0.1 & 1.5 & 0.06 & 0.5 \\ 0 & 0.12 & 0.1 & 0.06 & 2.5 & 0.2 \\ -0.3 & 0.1 & 0.08 & 0.5 & 0.2 & 2.1 \end{bmatrix} \times 10^{-4}$$

شکل (۲): ماتریس ضرایب تلفات سیستم

همچنین در بازه زمانی اول، میزان بار درخواستی مشتری اول بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ مگاوات و مشتری دوم بین ۵۰ تا ۱۰۰ مگاوات است. با استفاده از الگوریتم ترکیبی ارائه شده، پخش بار اقتصادی بر روی سیستم مدل نظر اعمال شده است و مقدار بهینه خروجی ژنراتورها، بار مصرف کنندگان و میزان منفعت اجتماعی به دست آمده است. جداول (۵) و (۶) نتیجه پخش بار را برای هر سه حالت و به ترتیب در بازه زمانی اول و دوم نشان می دهند. همچنین در جدول (۷) منفعت اجتماعی به دست آمده در هر سه حالت درج شده است.

مطابق جداول ارائه شده، مشاهده می شود میزان توان تولیدی ژنراتورها با افزایش پیشنهاد پرداخت خریداران افزایش می یابد. به این صورت که در بازه زمانی اول از مقدار ۱۷۱/۳۹ مگاوات در حالت پیشنهاد پرداختی کم به مقدار ۲۷۶/۸۰ مگاوات در حالت پیشنهاد پرداختی زیاد، افزایش یافته است. این مقادیر نشان می دهند در حالت پیشنهاد پرداخت زیاد، خریداران پول بیشتری را بابت خرید توان پرداخت می کنند. همچنین اگرچه در این حالت میزان هزینه توان تولیدی ژنراتورها نسبت به حالت های قبل افزایش یافته است، اما به دلیل اینکه خریداران پول بیشتری برای خرید توان پرداخت می کنند، منفعت اجتماعی افزایش یافته است. شکل های (۳)، (۴) و (۵) نیز همگرایی الگوریتم ترکیبی ارائه شده برای به دست آوردن بیشترین منفعت اجتماعی را در سه حالت پیشنهاد پرداختی نشان می دهد. جدول (۸) نیز مقایسه بین الگوریتم های مختلف در حل مسئله پخش بار اقتصادی دینامیکی - زیست محیطی مبتنی بر حداکثر رفاه در ۲۰ مرتبه اجرای الگوریتم ها را نشان می دهد. مقایسه الگوریتم ها نیز در شرایط یکسان توقف صورت گرفته است. گفتنی است، مؤلفان به غیر از موارد ذکر شده در جدول (۸)، نتایج مابقی الگوریتم ها (با برنامه نویسی) را به دست آورده اند.

با توجه به جدول (۸)، مشاهده می شود الگوریتم ترکیبی مطرح شده، عملکرد بهتری نسبت به بقیه الگوریتم ها در هر سه حالت پیشنهاد پرداخت خریداران دارد. همچنین میزان انحراف معیار کم الگوریتم مطرح شده نسبت به بقیه الگوریتم ها در اجرای ۲۰ بار نشان می دهد که الگوریتم

جدول (۸): مقایسه نتایج روش‌های مختلف سیستم ۱

strategy	algorithm	Social profit \$ (average)	SD
LOW	PSO [30]	۳۰۹۸۳	۱۲۸/۸
	DE [30]	۳۱۶۷/۵	۳۰/۱
	Biogeography optimization	۳۲۰۲/۲	۹۹/۲
	Artificial Bee Colony	۳۱۲۸	۱۶/۴
	Bacterial Foraging	۳۱۴۸/۳	۳۶/۹
	Cultural Algorithm	۲۷۵۶۷	۲۴۹/۳
	Harmony Search	۲۹۷۳/۵	۸۲/۲
	Hybrid SA and GA	۲۹۷۱/۷	۱۳۴/۳
	Hybrid BF and DE	۳۲۴۳/۲	۲/۶
MEDIUM	PSO	۱۱۹۸۴/۹	۳۷/۰
	DE	۱۱۹۹۶/۸	۲۸/۳
	Biogeography optimization	۱۲۰۱۳/۲	۲۰۷/۲
	Artificial Bee Colony	۱۱۹۴۲/۴	۳۰/۵
	Bacterial Foraging	۱۱۹۵۴/۳	۴۷/۷
	Cultural Algorithm	۱۱۲۲۷/۴	۳۳۳/۵
	Harmony Search	۱۱۵۳۳/۳	۱۴۹/۱
HIGH	PSO	۱۴۵۹۸/۵	۶۰/۶
	DE	۱۴۶۱۰/۱	۴۴/۲
	Biogeography optimization	۱۴۶۳۹/۴	۱۰۳/۳
	Artificial Bee Colony	۱۴۶۰۲/۹	۶۴/۹
	Bacterial Foraging	۱۴۷۰۳/۵	۵۴/۳
	Cultural Algorithm	۱۳۸۸۷/۴	۷۶۲/۴
	Harmony Search	۳۰۹۸۳	۲۹۶/۳
	Hybrid SA and GA	۱۳۹۴۷/۶	۴۵۶/۴
	Hybrid BF and DE	۱۴۷۰۸/۲	۱۱/۶

جدول (۵): نتایج پخش بار در سه حالت پیشنهاد (مناقصه)

پرداخت خریداران در بازه زمانی اول

Bid	Low	Medium	High
G1 (MW)	۱۰۵/۵۹	۱۳۱/۹۳	۱۶۷/۳۴
G2 (MW)	۳۱/۶۶	۴۵/۹۸	۲۶
G3 (MW)	۴۹/۹۸	۴۴/۵۵	۱۵
G4 (MW)	۱۰/۸۳	۱۰/۰۳	۱۷/۶۳
G5 (MW)	۱۰	۱۰/۰۲	۱۱/۹۷
G6 (MW)	۱۳/۹۴	۱۲	۱۸/۰۸
Cus1 (MW)	۱۴۲/۴۴	۱۴۹/۹۹	۱۵۰
Cus2 (MW)	۷۶/۵۹	۱۰۰	۱۰۰
Total.G	۲۲۲/۰۳	۲۵۴/۵۴	۲۵۶/۰۵
Total.D	۲۱۹/۰۳	۲۴۹/۹۹	۲۵۰
Loss	۲/۹۹	۴/۵۶	۶/۰۳
Total cost (\$)	۴۹۸/۸۶	۵۹۷/۲۷	۶۵۹/۰۴
Income (\$)	۲۳۱/۰۴	۶۵۷/۴/۷	۷۶۵۰

جدول (۶): نتایج پخش بار در سه حالت پیشنهاد (مناقصه)

پرداخت خریداران در بازه زمانی دوم

Bid	Low	Medium	High
G1 (MW)	۶۴	۱۳۳/۱۶	۱۷۳/۷۳
G2 (MW)	۲۵/۲۱	۴۲/۳۱	۳۷/۸۷
G3 (MW)	۴۷/۰۵	۴۸/۱۸	۱۶/۴۱
G4 (MW)	۱۱/۵۷	۱۷/۴۵	۱۶/۶۲
G5 (MW)	۱۰/۱۵	۱۳/۸۹	۱۷/۴۷
G6 (MW)	۱۳/۳۹	۱۹/۶۵	۱۴/۶۷
Cus1 (MW)	۷۰	۷۰	۷۰
Cus2 (MW)	۱۰۰	۲۰۰	۲۰۰
Total.G	۱۷۱/۳۹	۲۷۴/۶۶	۲۷۶/۸۰
Total.D	۱۷۰	۲۷۰	۲۷۰
Loss	۱/۳۸	۴/۶۶	۶/۷۹
Total cost (\$)	۳۷۲/۱۶	۶۶۲/۹۰	۷۱۷/۹۵
Income (\$)	۱۸۰/۶	۶۷۴/۳	۸۴۹۰

جدول (۷): مقادیر منفعت اجتماعی برای سه حالت پیشنهاد

پرداخت (مناقصه) خریداران

Bid	Low	Medium	High
Social profit (\$)	۳۲۴۵/۸۹	۱۲۰۵۷/۳۵	۱۴۷۱۶/۹۰

از این پخش بار نیز در جدول (۱۱) نشان داده شده است.

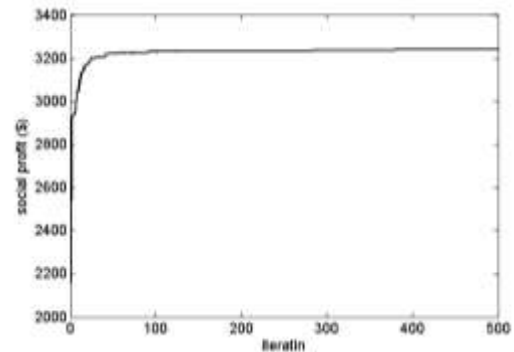
جدول (۹): اطلاعات تولیدکنندگان سیستم ۲

G	a_{pi}	b_{pi}	c_{pi}	P_{min}	P_{max}	U_{Ri}	D_{Ri}
۱	۰/۰۰۰۴۳	۲۱/۶۰	۹۵۸/۲۰	۱۵۰	۴۷۰	۸۰	۸۰
۲	۰/۰۰۰۶۳	۲۱/۰۵	۱۳۱/۶۰	۱۳۵	۴۶۰	۸۰	۸۰
۳	۰/۰۰۰۳۹	۲۰/۸۱	۶۰۴/۹۷	۷۳	۳۴۰	۸۰	۸۰
۴	۰/۰۰۰۷۰	۲۳/۹۰	۴۷۱/۶۰	۶۰	۳۰۰	۵۰	۵۰
۵	۰/۰۰۰۷۹	۲۱/۶۲	۴۸۰/۲۹	۷۳	۲۴۳	۵۰	۵۰
۶	۰/۰۰۰۵۶	۱۷/۸۷	۶۰۱/۷۵	۵۷	۱۶۰	۵۰	۵۰
۷	۰/۰۰۲۱۱	۱۶/۵۱	۵۰۲/۷۰	۲۰	۱۳۰	۳۰	۳۰
۸	۰/۰۰۴۸۰	۲۳/۲۳	۶۳۹/۴۰	۴۷	۱۲۰	۳۰	۳۰
۹	۰/۱۰۹۰۸	۱۹/۵۸	۴۵۵/۶۰	۲۰	۸۰	۳۰	۳۰
۱۰	۰/۰۰۹۵۱	۲۲/۵۴	۶۹۲/۴۰	۵۵	۵۵	۳۰	۳۰

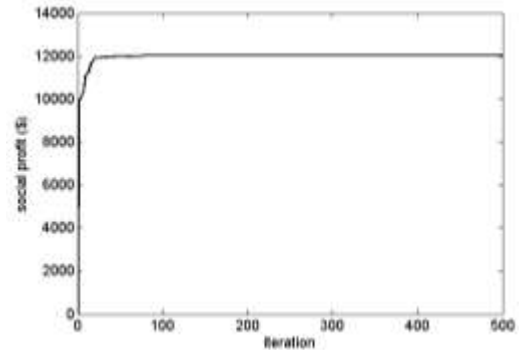
جدول (۱۰): اطلاعات خریداران سیستم ۲

خریدار	D1	D2	D3	D4	D5	D6	
$a_{dj} (\$/MWh^2)$	۲۰	۱۹	۱۷	۱۶	۱۵	۱۲	
$b_{dj} (\$/MWh)$	۲۰	۱۹	۱۷	۱۶	۱۵	۱۲	
بیشترین بار درخواستی در هر بازه زمانی (MW)	۱	۳۰۰	۱۸۰	۱۳۰	۲۰۰	۱۱۶	۱۱۰
	۲	۱۹۰	۲۲۰	۱۰۰	۲۰۰	۱۵۰	۲۵۰
	۳	۲۰۸	۱۵۰	۲۵۰	۳۰۰	۱۰۰	۲۵۰
	۴	۲۷۰	۲۳۰	۲۵۶	۲۰۰	۳۰۰	۱۶۰
	۵	۳۰۰	۲۸۰	۲۴۰	۲۶۰	۱۵۰	۲۵۰
	۶	۴۰۰	۳۲۰	۱۷۰	۲۳۰	۲۰۸	۳۰۰
	۷	۲۵۰	۱۹۲	۳۵۰	۳۰۰	۴۰۰	۲۰۰
	۸	۳۷۰	۲۵۰	۳۵۰	۴۰۶	۱۵۰	۲۵۰
	۹	۳۲۰	۴۰۰	۲۰۰	۳۵۰	۴۲۰	۲۳۴
	۱۰	۴۷۲	۳۰۰	۴۰۰	۳۵۰	۳۰۰	۲۵۰
	۱۱	۵۰۰	۴۹۰	۲۵۰	۲۴۰	۳۶۰	۳۰۶
	۱۲	۴۱۰	۴۲۰	۳۸۰	۳۵۰	۳۶۰	۳۰۰

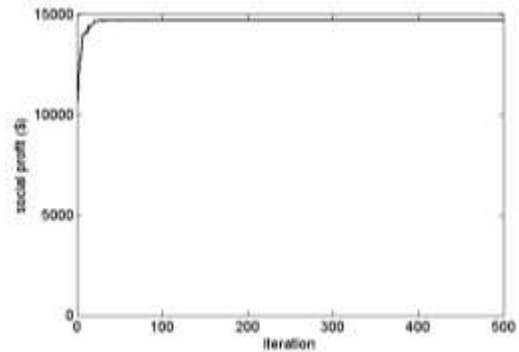
همانند سیستم تست ۱، برای نشان دادن برتری الگوریتم ترکیبی غذایی باکتری و تکامل تفاضلی، نتایج حاصل از این سیستم تست نیز با دیگر الگوریتم‌ها مقایسه شده است و نتایج حاصل در جدول (۱۲) درج شده است. درخور ذکر است، مقایسه الگوریتم‌ها تحت شرایط یکسان توقف، با تعداد تکرار ۵۰۰ و تعداد مشخص محاسبه تابع هدف (پانصد هزار)، انجام شده است.



شکل (۳): همگرایی الگوریتم ارائه شده در حالت پیشنهاد پرداختی کم خریداران



شکل (۴): همگرایی الگوریتم ارائه شده در حالت پیشنهاد پرداختی متوسط خریداران



شکل (۵): همگرایی الگوریتم ارائه شده در حالت پیشنهاد پرداختی زیاد خریداران

سیستم تست ۲: در این سیستم تست، الگوریتم ترکیبی پیشنهاد شده در حالت پیشنهاد پرداختی زیاد خریداران بر روی سیستمی با ۱۰ تولیدکننده و ۶ خریدار در ۱۲ بازه زمانی اعمال شده است. اطلاعات مربوط به تولیدکنندگان و خریداران این سیستم از مرجع [۳۰] اخذ شده است و به ترتیب در جداول (۹) و (۱۰) درج شده است. نتایج حاصل

جدول (۱۱): نتایج پخش بار در حالت پیشنهاد (مناقصه)

پرداختی زیاد خریداران در ۱۲ بازه زمانی

hour	Tot. Gen	Tot. cost	Tot. demand	Income
۱	۱۰۱۴/۶۱	۲۶۸۶۴/۷۱	۱۰۱۴/۶۰	۳۷۱۶۷/۳۱
۲	۱۱۰۳/۶۲	۲۸۶۷۵/۴۸	۱۱۰۳/۶۱	۳۸۷۰۶/۹۱
۳	۱۱۵۶/۹۸	۳۰۱۹۶/۳۹	۱۱۵۶/۰۹	۴۵۷۰۹/۷۹
۴	۱۴۰۶/۶۰	۳۶۰۲۰/۰۵	۱۴۰۶/۵۳	۵۶۶۷۹/۹۳
۵	۱۴۷۲/۲۶	۳۸۱۳۷/۳۹	۱۴۷۲/۲۴	۶۰۹۰۳/۶۲
۶	۱۳۹۵/۸۱	۳۶۴۵۵/۹۰	۱۳۹۵/۷۴	۶۴۶۳۳/۶۶
۷	۱۳۵۳/۷۵	۳۵۱۴۲/۵۹	۱۳۵۳/۷۱	۶۴۱۵۷/۴۲
۸	۱۳۸۳/۷۲	۳۵۲۹۵/۳۰	۱۳۸۳/۴۲	۷۱۸۸۷/۴۸
۹	۱۳۷۲/۴۳	۳۵۷۸۹/۵۳	۱۳۷۲/۲۰	۷۱۱۶۱/۱۸
۱۰	۱۳۸۳/۴۱	۳۵۹۱۸/۶۳	۱۳۸۳/۳۳	۷۴۹۱۱/۰۹
۱۱	۱۳۷۲/۷۳	۳۵۰۸۱/۹۱	۱۳۷۲/۳۷	۸۵۹۲۴/۱۴
۱۲	۱۴۱۹/۸۹	۳۶۶۷۶/۹۵	۱۴۱۹/۱۲	۷۷۸۱۷/۰۷
Social profit	۳۳۹۴۸۳/۴۹ \$			

پخش بار اقتصادی دینامیکی - زیست محیطی مبتنی بر حداکثر رفاه ارائه شد. در الگوریتم ارائه شده، به جای استفاده از گام‌های ثابت حرکت باکتری، از گام‌های متغیر استفاده شده است که در طول شبیه‌سازی کاهش می‌یابند. همچنین از الگوریتم‌های مبتنی بر تکامل تفاضلی برای تولید نسل جدید باکتری استفاده شده است. در مرحله حذف و پراکنندگی، باکتری انتخابی در مرحله حذف و پراکنندگی به صورت کاملاً تصادفی پراکنده نمی‌شود؛ بلکه با توجه به ابعاد مسئله، قسمتی از موقعیت آن به صورت تصادفی ایجاد می‌شود و بخشی دیگر را از موقعیت بهترین باکتری موجود در بین کل کاندیداهای جواب می‌گیرد و قسمتی از آن بدون تغییر باقی می‌ماند.

در نتیجه بهبودهای صورت گرفته، الگوریتم علاوه بر جست‌وجو در یک فضای گسترده (برای جلوگیری از توقف در پاسخ‌های بهینه محلی) سرعت همگرایی مناسبی دارد. برای نشان دادن کارایی آن، مطالعات عددی روی چندین سیستم تست صورت گرفته است و نتایج به دست آمده با دیگر الگوریتم‌های هوشمند مقایسه شده است. نتایج، بیانگر برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به دیگر الگوریتم‌ها در حل مسئله پخش بار اقتصادی دینامیکی - زیست محیطی با در نظر گرفتن پیشنهادات سمت مصرف است.

مراجع

- [1] X. Xia and A. Elaiw, "Optimal dynamic economic dispatch of generation: A review", *Electric Power Systems Research*, Vol. 80, No. 8, pp. 975-986, 2010.
- [2] M. Basu, "Teaching - learning - based optimization algorithm for multi-area economic dispatch", *Energy*, Vol. 68, pp. 21-28, 2014.
- [3] M. Basu and A. Chowdhury, "Cuckoo search algorithm for economic dispatch", *Energy*, Vol. 60, pp. 99-108, 2013.
- [4] S. Dhanalakshmi, S. Kannan, K. Mahadevan, and S. Baskar, "Application of modified NSGA-II algorithm to combined economic and emission dispatch problem", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 33, No. 4, pp. 992-1002, 2016.
- [5] M. Basu, "Fuel constrained economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-ii", *Energy*, Vol. 78, pp. 649-664, 2014.
- [6] X. Yuan, A. Su, Y. Yuan, H. Nie, and L. Wang, "An improved PSO for dynamic load dispatch of generators with valve-point effects", *Energy*,

جدول (۱۲): مقایسه نتایج روش‌های مختلف سیستم ۱

Algorithm	Min. social profit	Max. social profit	average
Harmony Search	۲۰۹۷۹۶	۲۴۶۴۹۹	۲۲۶۷۶۰
Cultural Algorithm	۱۸۰۷۴۹	۲۲۹۸۸۶	۲۰۸۷۶۰
Artificial Bee Colony	۳۰۷۵۴۲	۳۲۹۹۸۷	۳۲۰۳۹۰
Hybrid SA and GA	۲۵۰۶۰۴	۲۸۸۴۵۹	۲۷۰۸۲۰
BBO	۳۰۳۸۷۹	۳۳۷۲۸۳	۳۲۲۰۱۰
PSO	۲۸۵۸۳۲	۳۱۴۷۶۰	۲۹۹۰۷۰
DE	۳۰۰۱۹۷	۳۲۲۹۲۸	۳۱۵۳۶۰
Bacterial Foraging	۱۹۰۱۱۰	۲۹۸۶۹۰	۲۴۱۵۱۰
Hybrid BF and DE	۳۱۴۷۵۵	۳۳۹۴۸۳	۳۳۰۹۶۰

مطابق جدول (۱۲) مشاهده می‌شود الگوریتم ترکیبی مطرح شده، عملکرد بهتری نسبت به بقیه الگوریتم‌ها در حل مسئله پخش بار اقتصادی دینامیکی مبتنی بر حداکثر هزینه دارد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، الگوریتم ترکیبی جدیدی مبتنی بر الگوریتم غذایابی باکتری و تکامل تفاضلی برای حل مسئله

- [19] FERC, "Security constrained economic dispatch: Definition, practices, issues and recommendations", 2006.
- [20] X. He, Y. Rao, and J. Huang, "A novel algorithm for economic load dispatch of power systems", *Neurocomputing*, Vol. 171, pp. 1454–1461, 2016.
- [21] U. Krishnasamy, and D. Nanjundappan, "Hybrid weighted probabilistic neural network and biogeography based optimization for dynamic economic dispatch of integrated multiple-fuel and wind power plants", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 77, pp. 385–394, 2016.
- [22] R. Arul, S. Velusami, and G. Ravi, "A new algorithm for combined dynamic economic emission dispatch with security constraints", *Energy*, Vol. 79, pp. 496–511, 2015.
- [23] P.K. Singhal, R. Naresh, and V. Sharma, "Binary fish swarm algorithm for profit-based unit commitment problem in competitive electricity market with ramp rate constraints", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 9, No. 13, pp. 1697–1707, 2015.
- [24] A. Shukla, V.N. Lal, and S.N. Singh, "Profit-based unit commitment problem using PSO with modified dynamic programming", 18th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), pp. 1-6, 2016.
- [25] T. Venkatesan, and M.Y. Sanavullah, "SFLA approach to solve PBUC problem with emission limitation", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 46, pp. 1–9, 2013.
- [26] W.-M. Lin, and S.-J. Chen, "Bid-based dynamic economic dispatch with an efficient interior point algorithm", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 24, No. 1, pp. 51–57, 2002.
- [27] G.-C. Liao, and J.-C. Lee, "Application novel immune genetic algorithm for solving bid-based dynamic economic power load dispatch", IEEE International Conference In Power System Technology (POWERCON), pp 1-7, 2010.
- [28] G.-C. Liao, "Bid-based economic electrical load dispatch using improved genetic algorithm", 8th Asian Control Conference (ASCC), pp. 1387-1392, 2011.
- [29] B. Rampriya, K. Mahadevan, and S. Kannan, "Application of differential evolution to dynamic economic dispatch problem with transmission losses under various bidding strategies in electricity markets." *Journal of Electrical Engineering and Technology*, Vol. 7, No. 5, pp. 681-688, 2012.
- [30] S. Orike, and D. Corne, "An evolutionary algorithm for bid-based dynamic economic load dispatch in a deregulated electricity market", 13th UK Workshop on Computational Intelligence (UKCI), pp. 313-320, 2013.
- [31] K.M. Passino, "Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control", *IEEE Control Systems*, Vol. 22, No. 3, Vol. 34, No. 1, pp. 67–74, 2009.
- [7] T. Niknam, and F. Golestaneh, "Enhanced adaptive particle swarm optimization algorithm for dynamic economic dispatch of units considering valve-point effects and ramp rates", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 6, No. 5, pp. 424–435, 2012.
- [8] M. Basu, "Hybridization of bee colony optimization and sequential quadratic programming for dynamic economic dispatch", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 44, No. 1, pp. 591–596, 2013.
- [9] Q. Niu, H. Zhang, K. Li, and G.W. Irwin, "An efficient harmony search with new pitch adjustment for dynamic economic dispatch", *Energy*, Vol. 65, pp. 25–43, 2014.
- [10] R. Arul, G. Ravi, and S. Velusami, "Non-convex economic dispatch with heuristic load patterns, valve point loading effect, prohibited operating zones, ramp-rate limits and spinning reserve constraints using harmony search algorithm", *Electrical Engineering*, Vol. 95, No. 1, pp. 53–61, 2012.
- [11] B. Mohammadi-ivatloo, A. Rabiee, A. Soroudi, and M. Ehsan, "Imperialist competitive algorithm for solving non-convex dynamic economic power dispatch", *Energy*, Vol. 44, No. 1, pp. 228–240, 2012.
- [12] M. Basu, "Economic environmental dispatch using multi-objective differential evolution", *Applied Soft Computing*, Vol. 11, No. 2, pp. 2845–2853, 2016.
- [13] A.M. Elaiw, X. Xia, and A.M. Shehata, "Application of model predictive control to optimal dynamic dispatch of generation with emission limitations", *Electric Power Systems Research*, Vol. 84, No. 1, pp. 31–44, 2012.
- [14] X. Xia, J. Zhang, and A. Elaiw, "An application of model predictive control to the dynamic economic dispatch of power generation", *Control Engineering Practice*, Vol. 19, No. 6, pp. 638–648, 2011.
- [15] K. Chaïmarit and S. Nuchprayoon, "Economic dispatch solution considering demand and wind speed uncertainties based on Newton's method," 2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Kowloon, pp. 1-6, 2013
- [16] M. Younes, F. Khodja, and R.L. Kherfane, "Multi-objective economic emission dispatch solution using hybrid FFA (firefly algorithm) and considering wind power penetration", *Energy*, Vol. 67, pp. 595–606, 2014.
- [17] M. Abdoli, and A.R. Hatami, "Dynamic economic emission dispatch incorporating wind farms using modified co-evolutionary particle swarm optimization meta-heuristic algorithm", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 5, No. 4, pp. 31-43, 2015, (in Persian).
- [18] C. Harris, "Electricity markets: Pricing, structures and economics", Wiley-Finance, 2006.

- bacterial foraging algorithm to model tyrosine production in mus musculus (Mouse)", Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Springer Berlin Heidelberg, pp. 179-190, 2013.
- [39] A. Biswas, S. Dasgupta, S. Das, and A. Abraham, "A Synergy of differential evolution and bacterial foraging algorithm for global optimization", *Neural New World*, Vol. 17, No. 6, pp. 607-626, 2007.
- [40] M.M.M. Fuad, "A hybrid of bacterial foraging and differential evolution -based distance of sequences", *Procedia Computer Science*, Vol. 35, pp. 101-110, 2014.
- [41] V.R. Pandi, A. Biswas, S. Dasgupta, and B.K. Panigrahi, "A hybrid bacterial foraging and differential evolution algorithm for congestion management", *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 20, PP. 862-871, 2010.
- [42] K. Vaisakh, P. Praveena, R.M.S. Rao, and K. Meah, "Solving dynamic economic dispatch problem with security constraints using bacterial foraging PSO-DE algorithm", *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 39, No. 1, pp. 56-67, 2012.
- [43] S. Mishra, "A hybrid least square-fuzzy bacterial foraging strategy for harmonic estimation", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 9, No. 1, pp. 61-73, , 2005.
- [44] D. Zhang, Y. Wang, and P.B. Luh, "Optimization based bidding strategies in the deregulated market", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No. 3, pp. 981-986, 2000.
- [45] M.A. Abido, "A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective environmental/economic dispatch", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 25, No. 2, pp. 97-105, 2003.
- pp. 52-67, 2002.
- [32] S. Dasgupta, S. Das, A. Abraham, and A. Biswas, "Adaptive computational Chemotaxis in bacterial foraging optimization: An analysis", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 13, No. 4, pp. 919-941, 2009.
- [33] S. Das, S. Dasgupta, A. Biswas, A. Abraham, and A. Konar, "On stability of the Chemotactic dynamics in bacterial-foraging optimization algorithm", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, Vol. 39, No. 3, pp. 670-679, 2009.
- [34] Y. Liu, and K.M. Passino, "Biomimicry of social foraging bacteria for distributed optimization: models, principles, and emergent behaviors" *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 115, No. 3, pp. 603-628, 2002.
- [35] D.H. Kim, A. Abraham, and J.H. Cho, "A hybrid genetic algorithm and bacterial foraging approach for global optimization", *Information Sciences*, Vol. 177, No. 18, pp. 3918-3937, 2007.
- [36] A. Biswas, S. Dasgupta, S. Das, and A. Abraham, "Synergy of PSO and bacterial foraging optimization—a comparative study on numerical benchmarks." *Innovations in Hybrid Intelligent Systems*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 255-263, 2007.
- [37] U. Meyyappan, and K.D.R. Pandu, "Wavelet neural network-based wind-power forecasting in economic dispatch: A differential evolution, bacterial foraging technology, and primal dual-interior point approach", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 43, No. 13, pp. 1467-1477, 2015.
- [38] J. X. Yeoh, C. K. Chong, Y. W. Choon, L. E. Chai, S. Deris, R. M. Illias, , and M. S. Mohamad, "Parameter estimation using improved differential evolution (ide) and