استراتژی بهینه مدیریت انرژی در شبکه‌های توزیع هوشمند با در نظر گرفتن اثر منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی

حسین لطفی[1]، دانشجوی دکترای برق-قدرت، رضا قاضی[2,*] ، استاد گروه برق دانشگاه فردوسی مشهد، محمد باقر نقیبی سیستانی[2]، دانشیار گروه برق دانشگاه فردوسی مشهد

[1]گروه مهندسی برق- واحد نیشابور- دانشگاه آزاد اسلامی- نیشابور- ایران
Hossein_lotfi95@yahoo.com
[2]گروه مهندسی برق- دانشگاه فردوسی مشهد-مشهد- ایران
[*]Rghazi@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده: نفوذ منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی در شبکه‌های توزیع در حال افزایش می‌باشد. از همین رو، بررسی اثر آنها بر روی قابلیت اطمینان شبکه بسیار ضروری است. در این مطالعه به منظور ارائه استراتژی بهینه مدیریت انرژی در شبکه توزیع هوشمند، مسئله بهینه‌سازی چندهدفه تجدید آرایش فیدرهای توزیع با حضور منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی در چارچوب پویا حل شده است. توابع هدف در این مطالعه شامل حداقل‌سازی تلفات انرژی، انرژی توزیع‌نشده و هزینه بهره‌برداری می‌باشد. به منظور بهینه‌سازی همزمان شاخص قابلیت اطمینان و توابع هدف دیگرطرح بهینه‌ای برای تولید واحدهای تولید پراکنده، شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره انرژی و همچنین توپولوژی فیدرهای شبکه توزیع ارائه شده است. به منظور حل مسئله بهینه‌سازی چند هدفه در این مطالعه از ترکیب الگوریتم‌های اجتماع ذرات و جهش قورباغه استفاده شده است. به منظور نشان دادن توانایی روش مورد نظر در ارائه طرح بهینه مدیریت انرژی در یک شبکه ۹۵ باسه تست شده است.

واژه‌های کلیدی: تجدید آرایش فیدرهای توزیع- منابع تولید پراکنده-سیستم‌های ذخیره انرژی-بهینگی پارتو-بهینه‌سازی چندهدفه-قابلیت اطمینان

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۰۳/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۸/۱۰/۱۷

نام نویسنده‌ی مسئول : رضا قاضی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشگاه فردوسی مشهد

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.4.9]

[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.22]

۱- مقدمه

استراتژی‌های بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع در دهه گذشته به علت نفوذ زیاد منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره انرژی در کنار سیستم‌های اتوماسیون به طور قابل توجهی تغییر کرده است [۱]. طبیعت تصادفی واحدهای ذخیره انرژی یک چالش جدی برای عرضه توان با قابلیت اطمینان بالا ایجاد کرده است. بر این اساس مطالعات زیادی به منظور ارائه مدلی برای مدیریت بهینه شارژ و دشارژ واحدهای ذخیره انرژی انجام شده است، زیرا این واحدها نقش تعیین کننده‌ای در مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های توزیع دارند. یکی از تکنیک‌های شایع مدیریت انرژی در شبکه‌های هوشمند توزیع، تجدید آرایش فیدرهای شبکه توزیع در حضور واحدهای ذخیره انرژی و منابع تولید پراکنده انجام می‌باشد. فرآیند تجدید آرایش فیدرهای توزیع به منظور تغییرات در توپولوژی فیدرهای توزیع بوسیله مدیریت سوئیچینگ و با توجه به محدودیت‌های عملیاتی در سیستم‌های توزیع انجام می‌شود.

مسئله تجدید آرایش فیدرهای توزیع را می‌توان به عنوان یک مسئله غیر خطی و محدب فرموله کرد. از همین رو روش‌های ریاضی به دلیل محدودیت‌های مربوط به توابع هدف و قیود این مسئله از قبیل ناپیوستگی و مشتق‌پذیری مناسب نیستند[۲]. بر این اساس محققین روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم‌های اکتشافی برای حل این مسئله بهینه سازی ارائه کرده‌اند که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته شده است:

در [۲]، الگوریتم بهبودیافته جستجوی گرانشی برای حل مسئله تجدید آرایش فیدرهای توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با هدف بهبود پایداری گذرا، کاهش تلفات و هزینه بهره‌برداری ارائه شده است. در [۳]، الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات و جهش قورباغه برای حل مسئله تجدید آرایش فیدرهای توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با هدف بهبود پایداری ولتاژ و کاهش تلفات ارائه شده است. الگوریتم بهبودیافته ژنتیک با جمعیت متغیر برای حل مسئله تجدید آرایش در شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات ارائه شده است [۴]. در [۵]، الگوریتم بهینه‌سازی کدگذاری اجتماع ذرات به منظور حل مسئله تجدید آرایش فیدرهای توزیع با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف منابع تولید پراکنده ارائه شده است. گسترش واحدهای ذخیره انرژی الکتریکی در کنار منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع موجب شده مطالعات بیشتری در مورد مدیریت بهینه این منابع صورت گیرد. بسیاری از مطالعات برای به دست آوردن یک طرح مدیریت بهینه انرژی برای ادغام واحدهای ذخیره انرژی الکتریکی با منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع با توپولوژی ثابت انجام شده است.

در[۶]، استراتژی بهینه مدیریت انرژی با ادغام مقیاس بزرگی از منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع با هدف کاهش هزینه بهره برداری ارائه شده است. در [۱]، الگوریتم رقابت استعماری برای ارائه مدیریت بهینه انرژی در شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری ارائه شده است. الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات و گرگ خاکستری به منظور ارائه استراتژی مدیریت بهینه انرژی در شبکه توزیع با حضور منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی معرفی شده است [۷]. با توجه به بررسی کارهای گذشته در پاراگراف‌های قبلی مربوط به مسئله تجدید آرایش فیدرهای توزیع مشخص است که بار الکتریکی در بازه حل مسئله ثابت در نظر گرفته شده است. در نتیجه یک آرایش بهینه برای بازه مورد نظر مطالعاتی داریم، ولی در شبکه‌های توزیع واقعی با توجه به تغییر بار الکتریکی شبکه در هر ساعت حل مسئله بهینه‌سازی با در نظر گرفتن بار ثابت قابل قبول نمی‌باشد. در [۸]، الگوریتم ترکیبی بهبودیافته اجتماع ذرات و گرگ خاکستری برای حل مسئله تجدید آرایش پویا فیدرهای توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با هدف بهبود قابلیت اطمینان و کاهش تلفات انرژی ارائه شده است. الگوریتم ترکیبی بهبودیافته اجتماع ذرات و جهش قورباغه برای حل مسئله تجدید آرایش پویا فیدرهای توزیع و سوئیچینگ خازنی در حضور منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی ارائه شده است[۹]. در [۱۰]، الگوریتم کلونی مورچه‌ها برای حل مسئله تجدید آرایش پویا فیدرهای توزیع و سوئیچینگ بانک‌های خازنی در حضور منابع تولید پراکنده ارائه شده است. در یک سیستم توزیع با نفوذ بالا منابع تولید پراکنده به کارگیری برنامه تصادفی به منظور مدل‌سازی رفتار متناوب منابع دارای عدم قطعیت یک راه حل معمول و عملی برای عملیات بهره‌برداری شبکه توزیع است. علاوه بر این حل مسئله تجدید آرایش پویا فیدرهای توزیع با حضور یکپارچه منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع تولید پراکنده در مطالعات گذشته مربوط به مساله مدیریت انرژی مورد بررسی قرار نگرفته است. بر این اساس مدل ارائه شده در این مطالعه شامل این جنبه‌ها می‌شود:

تجدید آرایش پویا فیدرهای توزیع، ارائه طرح بهینه برای مدیریت انرژی در حضور یکپارچه منابع تولید پراکنده با واحدهای ذخیره انرژی، پاسخگویی به تقاضا در یک سطح مناسبی از قابلیت اطمینان شبکه با توجه به در نظر گرفتن عدم قطعیت در خروجی توان منابع تولید پراکنده و قیمت خرید انرژی.

حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه تجدید آرایش پویا فیدرهای توزیع در حضور منابع تولید پراکنده نیاز به یک روش حل دقیق و قدرتمند دارد. برای این منظور الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی اجتماع ذرات و جهش قورباغه برای مقابله با پیچیدگی مسئله بهینه‌سازی در این مطالعه ارائه شده است. الگوریتم‌های اجتماع ذرات [۱۱] و جهش قورباغه [۱۳] دارای اشکالات جزئی از قبیل همگرایی زودرس یا گیر افتادن در بهینه های محلی می‌باشند. به

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.4.9]

[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.22]

همین منظور از ترکیب دو الگوریتم در راستای استفاده از مزایای این روش‌ها جهت کاهش نقایص آنها استفاده شده است.
ویژگی‌های برجسته این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

- ارائه برنامه مدیریت بهینه انرژی بوسیله حل مسئله تجدید آرایش فیدرهای توزیع. نتایج بدست آمده شامل برنامه بهینه سوئیچینگ، طرح بهینه شارژ و دشارژ واحدهای ذخیره انرژی و همچنین توزیع بهینه توان میان منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع می‌باشد.
- در نظر گرفتن انرژی توزیع نشده به عنوان شاخص قابلیت اطمینان، بهبود این شاخص توسط حل مسئله تجدید آرایش فیدرهای توزیع از اهداف اصلی مطالعه است.
- ارائه الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات و جهش قورباغه به منظور حل مسئله بهینه‌سازی تجدید آرایش فیدرهای توزیع، دلیل استفاده از الگوریتم ترکیبی پیشنهادی بهبود مشکل همگرایی زودرس الگوریتم اجتماع ذرات در طول بهینه‌سازی می‌باشد.
- در نظر گرفتن اثر منابع عدم قطعیت شامل توان واحد-های خورشیدی و قیمت خرید برق در حل مسئله بهینه‌سازی.

این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است: در بخش دوم تعریف مسئله شامل توابع هدف، قیود مسئله، مدل‌سازی عدم قطعیت و استراتژی حل مسئله چندهدفه ارائه شده است. در بخش سوم و چهارم نتایج شبیه‌سازی و نتیجه گیری ارائه شده است.

۲-تعریف مسئله پیشنهادی و چارچوب ان

در این بخش فرض شده است یک شرکت صاحب تمام تجهیزات و امکانات شبکه توزیع باشد همچنین بهره‌برداری نیز از شبکه توزیع بر عهده این شرکت باشد. اپراتور این شرکت مسئله بهینه‌سازی تصادفی را با توجه به عدم قطعیت‌های مربوط به توان خروجی واحدهای خورشیدی و قیمت خرید برق از بازار حل می‌کند. در ادامه متغیرهای مسئله، توابع هدف، قیود مسئله و مدل‌سازی عدم قطعیت شرح داده شده است.

۲-۱- متغیرهای مسئله

متغیرهای مسئله بهینه‌سازی چند هدفه به شرح زیر می‌باشد:

$$X = [X_{SW}\ X_{Tie}\ \ X_{DG}\ X_{ES}\ \ ] \quad (۱)$$

$$X_{SW} = \left[SW_1^t, SW_2^t, \dots . SW_{N_{tie}}^t\right] \quad (۲)$$

$$X_{Tie} = \left[Tie_1^t, Tie_2^t, \dots . Tie_{N_{tie}}^t\right] \quad (۳)$$

$$X_{P_{DG}} = \left[P_{Dg1}^t, P_{Dg2}^t, \dots . P_{Dg_{N_{Dg}}}^t\right] \quad (۴)$$

$$X_{P_{ES}} = \left[P_{ES1}^t, P_{ES2}^t, \dots . P_{ES_{N_{ES}}}^t\right] \quad (۵)$$

X بردار متغیرهای کنترلی مسئله است. N_{dg} و N_{ES} به‌ترتیب تعداد منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی می‌باشند. Tie_{i} بیانگر وضعیت سوئیچ iام می‌باشد و مقدار ان صفر یا یک است. SW_{i} و N_{tie} بیانگر شماره سوئیچ‌های بسته و تعداد سوئیچ های بسته هستند. $P_{ES,j}^t$ و $P_{Dg,i}^t$ به ترتیب مقدار توان اکتیو واحد تولید پراکنده iام و واحد ذخیره انرژی jام در زمان tام می-باشند.

۲-۲- توابع هدف

در این مطالعه توابع هدف شامل حداقل‌سازی تلفات انرژی، انرژی توزیع نشده و هزینه بهره‌برداری شبکه می‌باشد.

- **تلفات انرژی**

تلفات انرژی از رابطه (۶) محاسبه می‌شود[۸]:

$$f_1(x) = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_{brch}} R_i \times |I_i^t|^2 \quad (۶)$$

R_i و I_i^t به ترتیب امپدانس و جریان حقیقی خط iام در زمان tام هستند. N_{brch} بیانگر تعداد خطوط شبکه می‌باشد.

- **انرژی توزیع‌نشده**

انرژی توزیع‌نشده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$ENS_i = P_i \sum_{i,j \in V,\, i \neq j} (U_{i,j} + U_{i,j}^{'}) \quad (۷)$$

در رابطه فوق V مجموعه باس‌هایی است که از یک فیدر تغذیه می‌شوند. $U_{i,j}$و $U_{i,j}^{'}$ به ترتیب بیانگر زمان تعمیر (ساعت در سال) و زمان مربوط به جبران خسارت (ساعت در سال) شاخه‌های مرتبط با باس i می‌باشند. $\lambda_{i,j}$ و $d_{i,j}$ به ترتیب نرخ خرابی و طول خط هستند. $t_{i,j}$ و $t_{i,j}^{'}$ به ترتیب میانگین مدت زمان تعمیر و میانگین مدت زمان بازیابی خط بین باس‌های i و jام می‌باشند[۹]. رابطه نهایی انرژی توزیع نشده کل شبکه با در نظر نگرفتن گره مرجع از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$f_2(x) = \sum_{i=2}^{N_{Bus}} ENS_i \quad (۸)$$

- **هزینه بهره‌برداری**

هزینه بهره‌برداری در این مطالعه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f_3(X) = \sum_{t=1}^{24} \Big(\sum_{j=1}^{N_{DG}} Price_{DG,j}^t P_{DG,j}^t + \sum_{s=1}^{N_{sub}} \mathrm{Price}_{\mathrm{Sub,s}}^{\mathrm{t}} \mathrm{P}_{\mathrm{Sub,s}}^{\mathrm{t}} + \sum_{k=1}^{N_{sw}} Price_{Sw,k}^t |S_k^t - S_k^{t0}| \Big) \quad (۹)$$

$P_{DG,j}^t$ و $P_{Sub,s}^t$ به‌ترتیب توان اکتیو تولید پراکنده jام و پست sام در زمان tام هستند. $Price_{DG,j}^t$ و $Price_{Sub,s}^t$ به‌ترتیب قیمت خرید برق از تولید پراکنده jام و پست sام در زمان tام می-

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.4.9]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.22]

باشند. $Price_{Sw,k}^{t}$ هزینه سوئیچینگ در زمان tام است. N_{sw} و N_{sub} به‌ترتیب بیانگر تعداد سوئیچ‌ها و پست‌ها هستند. S_k^{t0} و S_k^t به‌ترتیب بیانگر وضعیت اولیه و ثانویه سوئیچ k ام در زمان tام می‌باشند.

۳-۲- قیود مساله

- شرط شعاعی بودن

قید مربوط به شعاعی بودن شبکه از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$N_{branch}^{t} = N_{Bus} - N_{source} \quad (10)$$

$\mathrm{N_{bus}}$ و $\mathrm{N_{source}}$ به‌ترتیب بیانگر تعداد باس‌ها و پست‌های شبکه می‌باشند.

- معادلات پخش بار

قید معادلات پخش بار از روابط (۱۱-۱۲) محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{P_j}^{t} = \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathbf{N_{Bus}}} \mathrm{V_i}^{t}\,\mathrm{V_j}^{t}\mathrm{Y_{ij}}\cos\left(\Theta_{ij} - \delta_i{}^{t} + \delta_j{}^{t}\right) \quad (11)$$

$$\mathrm{Q_j}^{t} = \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathbf{N_{Bus}}} \mathrm{V_i}^{t}\,\mathrm{V_j}^{t}\mathrm{Y_{ij}}\sin(\Theta_{ij} - \delta_i{}^{t} + \delta_j{}^{t}) \quad (12)$$

$P_j{}^{t}$ و $Q_j{}^{t}$ به‌ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی شبکه به باس iام در زمان tام هستند. $V_i{}^{t}$ و $\delta_i{}^{t}$ به ترتیب دامنه و زاویه ولتاژ iام در زمان tام می‌باشند. Y_{ij} و Θ_{ij} به‌ترتیب بیانگر اندازه و زاویه ادمیتانس شاخه بین باس‌های i و j هستند.

- محدوده مربوط به ولتاژ باس ها

$$V_{min} \le V_i^t \le V_{max} \quad (13)$$

V_{min} و V_{max} بیانگر حداقل و حداکثر مقدار مجاز ولتاژ باس iام در زمان tام هستند.

$$\left|I_{f,i}^{t}\right| \le I_{f,i}^{Max} \quad i = 1,2,\dots,N_{feeder} \quad (14)$$

$I_{f,i}^{t}$ و $I_{f,i}^{Max}$ به‌ترتیب دامنه جریان در زمان tام و حداکثر جریان فیدر iام می‌باشند.

- محدودیت ترانسفورماتور

$$\left|I_{trns,i}^{t}\right| \le I_{trns,i}^{Max} \quad i = 1,2,\dots,\mathrm{N}_{transformer} \quad (15)$$

$I_{trns,i}^{t}$ و $I_{trns,i}^{Max}$ به‌ترتیب دامنه جریان در زمان tام و حداکثر جریان قابل قبول ترانسفورمر iام می‌باشند.

- مدل‌سازی مربوط به تولید پراکنده

در واقع منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع به دو صورت PV و PQ مدل می‌شوند. در مدل‌سازی به روش PV منابع تولید پراکنده برای حفظ ولتاژ در محدوده خود باید تولید توان راکتیو کنند. در این مطالعه از PQ برای مدل‌سازی واحدهای تولید پراکنده استفاده شده است[۲-۳]:

- محدودیت مربوط به واحدهای ذخیره انرژی

در کنار استفاده از منابع تولید پراکنده در این مطالعه، اثر واحد-های ذخیره انرژی نیز در حل مسئله تجدید آرایش پویا فیدرهای توزیع در نظر گرفته شده است. استفاده همزمان سیستم‌های ذخیره انرژی در کنار منابع تولید پراکنده باعث بهبود قابلیت اطمینان، بهبود پروفیل ولتاژ و ... در سیستم‌های توزیع می‌شود. یک مدیریت مناسب بهره‌برداری باعث می‌شود نه پایداری شبکه به خطر بیفتد و نه کارایی تجهیزات کاهش یابد[۷و۱]. در ادامه قیود مربوط به واحدهای ذخیره انرژی مطرح شده است.

$$E_x^h = E_x^{h-1} + \sigma_{ch,x}\,P_{ch,x}^h \times \Delta h - \frac{1}{\sigma_{dis,x}}\,P_{dis,x}^h \times \Delta h$$

$$\Delta h = 1\ hour,\ x = 1,2,\dots N_{ES} \quad (16)$$

$$E_x^{min} \le E_x^h \le E_x^{max} \quad (17)$$

$$P_{ch,x}^h \le P_{ch,x}^{max} \quad (18)$$

$$P_{dis,x}^h \le P_{dis,x}^{max} \quad (19)$$

E_x^h مقدار انرژی واحد xام در زمان hام می‌باشد. $P_{ch,M}^h$ و $P_{dis,M}^h$ به‌ترتیب میزان شاژ و دشارژ واحد xام در زمان hام هستند. E_x^{min} و $\mathrm{E_x^{max}}$ به ترتیب مقدار حداکثر و حداقل انرژی واحد xام در زمان hام می‌باشند. $P_{ch,x}^{max}$ و $P_{dis,x}^{max}$ به ترتیب بیانگر حداکثر میزان شارژ و دشارژ واحد xام در زمان hام هستند.

۴-۲- مدل‌سازی عدم قطعیت

در این بخش مدل‌سازی منابع عدم قطعیت شامل توان واحدهای خورشیدی و قیمت خرید برق بررسی شده است:

- مدل‌سازی توان واحدهای خورشیدی

از تابع توزیع بتا در رابطه (۲۰) برای مدل‌سازی تابش خورشید با توجه به داده‌های گذشته استفاده شده است.

$$f_b(s) = \begin{cases} \dfrac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\cdot\Gamma(\beta)} \cdot s^{\alpha-1}\cdot(1-s)^{\beta-1} & 0 \le s \le 1,\ \alpha,\beta \ge 0 \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad (20)$$

$f_b(s)$ تابع توزیع بتا است، α و β با توجه به داده‌های گذشته تابش خورشید تعیین می‌شوند.

- مدل‌سازی قیمت خرید برق

از تابع توزیع لوگ-نرمال در رابطه (۲۱) برای مدل‌سازی قیمت خرید برق با توجه به داده‌های گذشته استفاده شده است.

$$f_p(E^{pr},\mu,\sigma) = \frac{1}{E^{pr}\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{(lnE^{pr}-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (21)$$

E^{pr} پارامتر تابع توزیع احتمالی است، σ و μ به‌ترتیب انحراف معیار و میانگین هستند. برای مدل‌سازی عدم قطعیت مربوط به پارامترهای مورد نظر در این مطالعه از روش تولید سناریو [۱۳] استفاده شده است. در این روش همانند مونت‌کارلو به تعداد

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.4.9]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.22]

پارامترهای عدم قطعیت اعداد تصادفی تولید کرده سپس با استفاده از چرخ گردان رولت متناظر با هر یک از اعداد تصادفی تولید شده مقدار خطا و احتمال مربوط به هر یک از منابع عدم قطعیت را محاسبه می‌کنیم. پس از تولید سناریو، تعداد بالای سناریوها باعث کاهش سرعت حل مسئله و افزایش محاسبات می‌شود. به همین منظور ضروری است مجموعه سناریوهای اصلی را به گونه‌ای کاهش دهیم که مشخصات مسئله تغییر فاحشی نکند. در این مطالعه از الگوریتم کاهش عقب‌گرد [۱۳] به منظور حذف برخی از سناریوها با احتمال‌های نزدیک به هم استفاده شده است.

۵-۲- استراتژی مسئله چندهدفه و الگوریتم پیشنهادی

در این بخش استراتژی مسئله چندهدفه و الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است. در یک مسئله چندهدفه که اهداف با هم در تناقض هستند، مسئله به شرح زیر فرموله می‌شود [۸و۳]:

$$Minf(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots . f_n(x)]^T, \mathrm{G_i(X)} \le 0 \quad , \quad \mathrm{H_i(x)} = 0 \qquad (۲۲)$$

$\mathbf{G_i(X)}$ و $\mathbf{H_j(x)}$ به‌ترتیب قیود مساوی و نامساوی هستند. n و x به‌ترتیب تعداد توابع هدف و بردار متغیرهای بهینه‌سازی می‌باشند. روش بهینگی پارتو برای مسایل چندهدفه بر مبنای تسلط کار می‌کند. بردار $\mathbf{X_1}$ بر $\mathbf{X_2}$ غلبه می‌کند زمانی که شرایط زیر برقرار باشد[۸و۳]:

$$\forall i \in \{1,2, \dots N_{obj}\}, \ f_i(X_1) \le f_i(X_2) \qquad (۲۳)$$

$$\exists j \in \{1,2, \dots N_{obj}\}, \ f_j(X_1) < f_j(X_2) \qquad (۲۴)$$

از آنجا که توابع هدف در محدوده یکسان نیستند مجموعه‌های فازی برای جایگزینی هر تابع هدف با مقدار بین ۰ و ۱ اجرا می‌شوند. در این رابطه تابع عضویت فازی μ_i برای هر تابع هدف به شرح زیر است:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & f_i(X) \le f_i^{min} \\ 0 & f_i(X) \ge f_i^{max} \\ \dfrac{f_i^{max} - f_i(X)}{f_i^{max} - f_i^{min}} & f_i^{min} \le f_i(X) \le f_i^{max} \end{cases} \qquad (۲۵)$$

$\boldsymbol{f_i^{min}}$ و $\boldsymbol{f_i^{max}}$ بیانگر حدود بالا و پایین تابع هدف می‌باشند. این مقادیر با استفاده از بهینه‌سازی هر تابع هدف به صورت جداگانه محاسبه می‌شوند. مقدار تابع عضویت نرمالیزه شده برای هر عضو در مجموعه جواب‌ها از رابطه (۲۷) بدست می‌آید[۹]:

$$\boldsymbol{N_{\mu j}} = \frac{\sum_{k=1}^{n} \boldsymbol{\beta_k} \times \boldsymbol{\mu_{jk}(x)}}{\sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{n} \boldsymbol{\beta_k} \times \boldsymbol{\mu_{jk}(x)}} \qquad (۲۶)$$

m و n به ترتیب اعداد راه حل‌های غیر غالب و توابع هدف می‌باشند. $\boldsymbol{\beta_k}$ بیانگر وزن kامین تابع هدف است و مقدار $\boldsymbol{\beta_k}$ بر اساس درجه اهمیت هر تابع هدف توسط اپراتور انتخاب می‌شود.

الگوریتم اجتماع ذرات به دلیل اجرای ساده و سرعت بالا در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌شود. مشکل اساسی این الگوریتم همگرایی زودرس می‌باشد و ممکن است در حل یک مسئله به سرعت به جواب برسد ولی جواب مسئله یک بهینه محلی باشد. یکی از مزایای الگوریتم جهش قورباغه نیز در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها سادگی و حداقل فضای ذخیره‌سازی این الگوریتم می‌باشد. دلیل استفاده از ترکیب الگوریتم های اجتماع ذرات و جهش قورباغه استفاده از مزایای هر دو الگوریتم به منظور کاهش معایب آنهاست. در ادامه گام به گام الگوریتم ترکیبی برای حل مسئله بهینه سازی چند هدفه ارائه شده است:

۱. تولید جمعیت اولیه به صورت زیر:

$$Initial_population = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} \qquad (۲۷)$$

X_i و N به ترتیب بردار متغیر کنترلی iام و جمعیت ذرات هستند.

۲. محاسبه توابع هدف برای تمام ذرات بر اساس روابط (۶و۸و۹).

۳. محاسبه تابع عضویت برای هر تابع هدف بر اساس رابطه (۲۵).

۴. مقدار نرمالیزه شده برای تمام ذرات از (۲۶) محاسبه می‌شود.

۵. استفاده از روش بهینگی پارتو به منظور بدست آوردن توابع هدف نرمالیزه شده از مرحله قبل و ذخیره جواب‌های غیرغالب در مجموعه جواب‌های در نظر گرفته شده .

۶. تقسیم ذرات در K مجموعه بر اساس کاهش برازندگی.

۷. مشخص کردن $\mathrm{X_{Pbes,}}_i$ و $\mathrm{X_{Gbest}}$ در مجموعه ذرات.

۸ . بروزرسانی ذره iام در مجموعه jام بر اساس روابط (۲۸-۲۹)، بروزرسانی برای کل ذرات در تمام مجموعه‌ها انجام می‌شود.

$$\mathrm{D_{i,j}^{iter+1}} = w \cdot \mathrm{D_{i,j}^{iter}} + c_1 \cdot r_1 \left(\mathrm{X_{Pbesti}} - \mathrm{X_{i,j}^{iter}} \right) + c_2 \cdot r_2 \left(\mathrm{X_{Gbest}} - \mathrm{X_{i,j}^{iter}} \right) \qquad (۲۸)$$

$$\mathrm{X_{i,j}^{iter+1}} = \mathrm{X_{i,j}^{iter}} + \frac{f_i^{max} - f_i(X)}{f_i^{max} - f_i^{min}} \mathrm{D_{i,j}^{iter+1}} \qquad (۲۹)$$

D و X بیانگر سرعت و مکان ذرات در الگوریتم پیشنهادی هستند. c_2 و c_1 ضرائب شتاب و r_1 و r_2 مقادیر تصادفی با توزیع نرمال در بازه (۱ و۰) هستند. w نیز پارامتر اینرسی است.

۹.در این مرحله اطلاعات میان تمام مجموعه‌ها رد و بدل می‌شود برای این کار تمام مجموعه‌ها ترکیب شده و دوباره دسته بندی می‌شوند، از ذرات موجود تمام راه حل‌های غیرغالب استخراج و در مجموعه جواب‌ها ذخیره می‌شوند.

۱۰. محاسبه توابع هدف برای ذرات بر اساس روابط (۶و۸و۹).

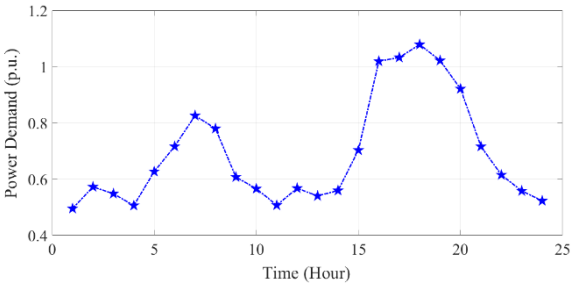
۱۱. محاسبه تابع عضویت برای هر تابع هدف بر اساس رابطه (۲۵)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.4.9]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.22]

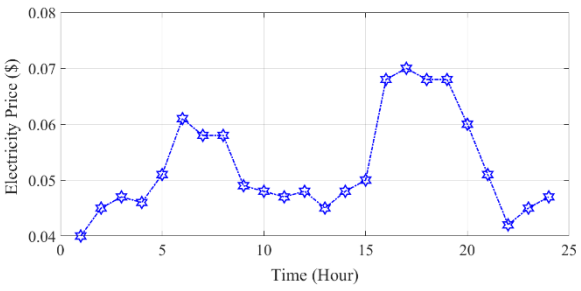
۱۲. محاسبه مقدار نرمالیزه شده برای تمام ذرات از رابطه (۲۶).
۱۳. بررسی شرط همگرایی، در این مطالعه از تعداد ماکزیمم تکرار استفاده شده است.

۳-نتایج شبیه‌سازی

برای حل مسئله بهینه‌سازی تجدید آرایش فیدرهای توزیع در چارچوب پویا از شبکه تست ۹۵ باسه [۹] استفاده شده است. بازه مطالعاتی برای حل مسئله پیشنهادی بیست و چهار ساعت می‌باشد. در این بخش از الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات و جهش قورباغه برای بهینه سازی تک و چندهدفه استفاده شده است و نتایج ان با الگوریتم‌های رقابت استعماری[۱۴] و پرتاب نارنجک [۱۵] مقایسه شده است. در سیستم تست ۹۵ باسه از ۴ واحد تولید پراکنده (دیزل ژنراتور) با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلووات در باس های۶،۱۰،۲۵،۳۴و۴۵ استفاده شده است. ۳ واحد خورشیدی با ظرفیت ۳۰۰۰ کیلووات همراه با واحدهای ذخیره انرژی ۳۰۰ کیلوواتی در باس های ۸۵،۴۱ و۸۸ نصب شده است. هزینه خرید برق از واحدهای تولید پراکنده و هزینه سوئیچینگ به‌ترتیب ۰/۰۴۲دلار بر کیلووات و ۰/۰۴۱ دلار بر ای هر سوئیچینگ می‌باشند. به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده ۳۰ سناریو به کار گرفته شده است. شکل های (۱) و (۲) پروفیل بار و قیمت برق را در بیست و چهار ساعت نشان می‌دهد. مقدار تلفات انرژی، هزینه بهره‌برداری و انرژی توزیع نشده قبل از تجدید آرایش به ترتیب ۳۱۸۶۹/۵۵ کیلووات،۱۴۰۶۵۱/۹۱ دلار و ۳۴۵/۵۶ کیلووات ساعت بر سال می‌باشد.



شکل ۱. پروفیل بار در بیست و چهار ساعت



شکل ۲. قیمت برق در بیست و چهار ساعت

۳-۱- حل مسئله بهینه‌سازی یک‌هدفه در عدم حضور تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی

هدف از حل این بخش تاکید بر توانایی الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله بهینه‌سازی یک‌هدفه می‌باشد. در جدول‌های (۱) و (۲) مقایسه‌ای بین نتایج الگوریتم‌های مختلف برای بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری و انرژی توزیع نشده صورت گرفته است. نتایج برای هر سه الگوریتم در ۳۰ آزمایش نشان داده شده است.

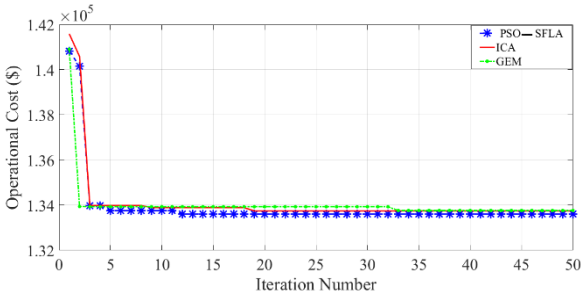
جدول ۱. بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری در عدم حضور تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی

الگوریتم‌ها	هزینه بهره‌برداری (دلار)			
	بهترین	میانگین	بدترین	انحراف معیار
پرتاب نارنجک	۱۳۳۶۸۳/۲۳	۱۳۳۷۳۸/۶۸	۱۳۳۸۰۱/۴۸	۴۵/۲۳
رقابت استعماری	۱۳۳۶۶۷/۱۵	۱۳۳۷۲۵/۷۲	۱۳۳۷۷۲/۲۳	۴۴/۳۴
روش پیشنهادی	۱۳۳۶۱۱/۱۵	۱۳۳۶۶۴/۳۵	۱۳۳۷۰۵/۱۵	۴۲/۶۵

جدول ۲. بهینه‌سازی انرژی توزیع نشده در عدم حضور تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی

الگوریتم‌ها	انرژی توزیع‌نشده (کیلووات‌ساعت بر سال)			
	بهترین	میانگین	بدترین	انحراف معیار
پرتاب نارنجک	۳۰۸/۵۶	۳۱۵/۸۴	۳۲۴/۸۵	۶/۹۵
رقابت استعماری	۲۹۹/۴۵	۳۰۵/۵۵	۳۱۴/۵۲	۵/۶۵
روش پیشنهادی	۲۹۴/۳۱	۲۹۵/۸۴	۲۹۸/۲۴	۴/۱۵

از مقایسه نتایج جدول‌های (۱) و (۲) واضح است که الگوریتم پیشنهادی به نتایج بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها رسیده است. با توجه به نتایج این جداول مشخص است که مقدار انرژی توزیع نشده و هزینه بهره‌برداری حاصل از الگوریتم پیشنهادی در حدود ۱۷٪ و ۶٪ نسبت به مقادیر اولیه کاهش یافته است. شکل (۳) منحنی همگرایی هزینه بهره‌برداری را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل واضح است که الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها زودتر به جواب بهینه همگرا شده است.



شکل ۳. منحنی همگرایی برای بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری

۳-۲- حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه در حضور تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی

در این بخش از الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله بهینه‌سازی یک و چندهدفه تجدید آرایش پویا فیدرهای توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی استفاده شده است. در جدول (۳) نتایج بهینه‌سازی یک‌هدفه برای انرژی توزیع نشده

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.4.9]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.22]

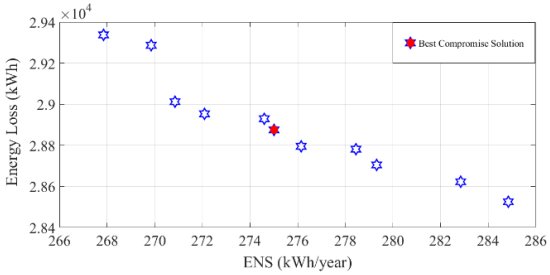
با هر سه الگوریتم مورد نظر نشان داده شده است. مقدار بهینه انرژی توزیع نشده حاصل از الگوریتم ترکیبی در حدود ۲۵٪ نسبت به مقدار اولیه قبل از تجدید آرایش کاهش یافته است.

جدول ۳. بهینه‌سازی انرژی توزیع نشده در حضور تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی

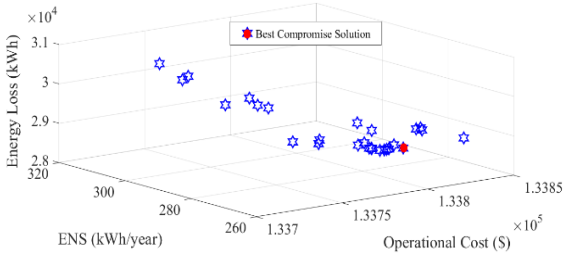
الگوریتم‌ها	انرژی توزیع‌نشده (کیلووات‌ساعت بر سال)			
	بهترین	بهترین	بهترین	بهترین
پرتاب نارنجک	۲۸۱/۶۴	۲۸۶/۱۵	۲۹۰/۳۵	۳/۸۵
رقابت استعماری	۲۷۸/۶۴	۲۸۲/۸۶	۲۸۶/۵۴	۳/۳۵
روش پیشنهادی	۲۷۶/۵۱	۲۷۹/۶۸	۲۸۲/۱۵	۲/۸۴

همچنین مقدار بهینه تلفات انرژی و هزینه بهره‌برداری حاصل از الگوریتم ترکیبی به ترتیب ۲۸۵۶۳/۲۱ کیلووات و ۱۳۳۶۶۴/۱۴ دلار می‌باشد. از مقایسه نتایج شبیه‌سازی در این قسمت با نتایج اولیه قبل از تجدید آرایش و نتایج بخش قبل واضح است که اثر منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی باعث کاهش انرژی توزیع نشده و تلفات انرژی شده است.

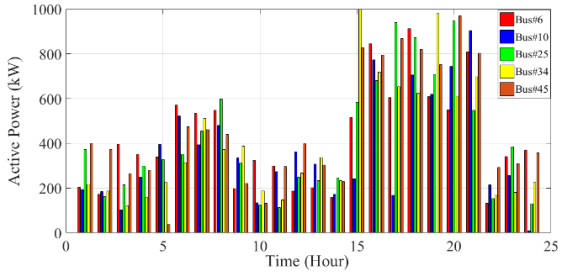
به منظور حل مسئله بهینه‌سازی دو و سه‌هدفه، جبهه‌های بهینه پارتو حاصل از الگوریتم ترکیبی در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. آرایش بهینه سوئیچ‌ها، توان خروجی واحدهای تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی حاصل از الگوریتم پیشنهادی برای بهینه‌سازی سه‌هدفه به ترتیب در جدول (۴)، شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۷)، دشارژ و شارژ شدن واحدهای ذخیره انرژی با مقدار منفی و مثبت نشان داده شده است.



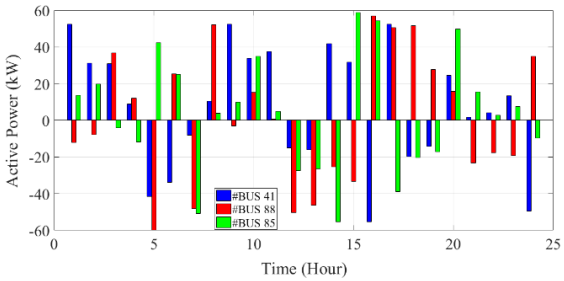
شکل ۴. جبهه بهینه پارتو برای مساله بهینه‌سازی دوهدفه



شکل ۵. جبهه بهینه پارتو برای مساله بهینه‌سازی سه‌هدفه



شکل ۶. توان تولیدی واحدهای تولید پراکنده در بیست و چهار ساعت



شکل ۷. توان تولیدی واحدهای ذخیره انرژی در بیست و چهار ساعت

با توجه به شکل‌های (۶) و (۷) واضح است که بهترین مقدار به دست آمده برای هر تابع هدف در جواب مصالحه (که با رنگ قرمز مشخص شده است) بسیار نزدیک به مقدار بهینه آن تابع در جبهه پارتو مربوط می‌باشد که نشان دهنده توانایی الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله چندهدفه است. با توجه به شکل (۴) مقدار بهینه انرژی توزیع نشده و تلفات انرژی به ترتیب برابر ۲۶۷/۸۵ کیلووات و ۲۸۵۸۶/۳۵۶ کیلووات ساعت بر سال است. مقدار دو شاخص ذکر شده در جواب مصالحه به ترتیب ۲۷۴/۳۵ کیلووات و ۲۸۸۶۸/۶۵ کیلووات ساعت بر سال می‌باشد، اختلاف بین مقدار بهینه این شاخص‌ها در جواب مصالحه با مقادیر بهینه آنها در جبهه پارتو کمتر از ۲ درصد است.

۴-نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه ارائه استراتژی بهینه مدیریت انرژی در شبکه توزیع می‌باشد. به همین منظور مسئله تجدید آرایش پویا فیدر-های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات و جهش قورباغه برای حل مسئله بهینه‌سازی ارائه شده است.توابع هدف شامل حداقل‌سازی انرژی توزیع نشده، تلفات انرژی و هزینه بهره‌برداری می‌باشد. نتایج مهم این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

- الگوریتم پیشنهادی قادر به حل مسئله یک و چندهدفه بدون در نظر گرفتن پیچیدگی‌های آنها است.
- اثر منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی در حل مسئله بهینه‌سازی منجر به کاهش تلفات، انرژی توزیع نشده و هزینه‌های بهره‌برداری شده است.
- در نظر گرفتن انرژی توزیع نشده به عنوان شاخص قابلیت اطمینان یک وضعیت ایمن و قابل قبول را برای بهره‌برداری از شبکه ایجاد می‌کند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.4.9]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.22]

مراجع

[1] Azizivahed, A., et al. *New energy management approach in distribution systems considering energy storages*. in *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2017. IEEE.
[2] Narimani, M.R., et al., *Enhanced gravitational search algorithm for multi-objective distribution feeder reconfiguration considering reliability, loss and operational cost.* IET Generation, Transmission & Distribution, 2014. **8**(1): p. 55-69.
[3] Azizivahed, A., et al., *A hybrid evolutionary algorithm for secure multi-objective distribution feeder reconfiguration.* Energy, 2017. **138**: p. 355-373.
[4] Abdelaziz, M. *Distribution network reconfiguration using a genetic algorithm with varying population size*. Elec Power Syst Res, 2017. **142**: p.9-11.
[5] Guan, W., Tan, Y., Zhang, H., Song, J. *Distribution system feeder reconfguration considering different model of DG sources*. Int J Electr Power Energy Syst, 2015. **68**: p.210–221.
[6] T. Lv and Q. Ai, *Interactive energy management of networked microgrids-based active distribution system considering large-scale integration of renewable energy resources*. Applied Energy, 2016.**163**: p.408-422.
[7] Azizivahed, A., et al., *A new bi-objective approach to energy management in distribution networks with energy storage systems.* IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018. **9**(1): p. 56-64.
[8] Azizivahed, A., et al., *Multi-objective dynamic distribution feeder reconfiguration in automated distribution systems.* Energy, 2018. **147**: p. 896-914.
[9] Lotfi, H., R. Ghazi, and M. B. Naghibi-Sistani, *Multi-objective dynamic distribution feeder reconfiguration along with capacitor allocation using a new hybrid evolutionary algorithm.* Energy Systems, 2019: p. 1-31.
[10] Ameli, A., et al., *A dynamic method for feeder reconfiguration and capacitor switching in smart distribution systems.* International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017. **85**: p. 200-211.
[11] Eberhart, R. and J. Kennedy. *A new optimizer using particle swarm theory*. in *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*. 1995. Ieee.
[12] Eusuff, M., K. Lansey, and F. Pasha, *Shuffled frog-leaping algorithm: a memetic meta-heuristic for discrete optimization.* Engineering optimization, 2006. **38**(2): p. 129-154.
[13] *Niknam, T., et al., Improved particle swarm optimisation for multi-objective optimal power flow considering the cost, loss, emission and voltage stability index. IET generation, transmission & distribution, 2012. 6(6): p. 515-527.*
[14] Enayatifar, R., et al., *MOICA: A novel multi-objective approach based on imperialist competitive algorithm.* Applied Mathematics and Computation, 2013. **219**(17): p. 8829-8841.
[15] Ahrari, A., M. Shariat-Panahi, and A.A. Atai, *GEM: a novel evolutionary optimization method with improved neighborhood search.* Applied Mathematics and Computation, 2009. **210**(2): p. 376-386.

جدول ۴. سوئیچینگ بهینه بدست امده از الگوریتم پیشنهادی در بیست و چهار ساعت به منظور بهینه‌سازی سه‌هدفه

سطوح بار	سوئیچ‌های باز شده										
	Sw1	Sw2	Sw3	Sw4	Sw5	Sw6	Sw7	Sw8	Sw9	Sw10	Sw11
1	70	43	15	39	26	35	80	86	85	32	30
2	4	43	15	22	82	84	18	86	85	31	30
3	4	40	15	22	49	35	66	86	85	71	30
4	77	43	79	22	82	35	80	86	85	32	30
5	68	43	15	81	82	52	19	86	54	87	30
6	4	43	15	81	82	84	80	65	55	32	30
7	4	78	13	81	49	84	80	57	55	32	30
8	4	78	15	39	26	52	67	86	85	32	30
9	70	78	79	81	82	84	19	86	85	32	83
10	70	7	15	81	26	84	19	86	55	71	30
11	4	43	15	22	26	35	19	86	85	32	27
12	4	78	79	81	26	35	19	86	72	87	30
13	77	78	79	81	26	84	19	86	55	71	30
14	68	7	15	22	49	84	19	86	72	32	30
15	70	43	15	39	26	33	19	86	85	87	29
16	77	7	79	39	49	84	19	86	85	32	83
17	77	43	15	39	82	35	80	86	55	71	30
18	77	43	15	81	82	35	19	65	55	87	30
19	77	43	15	39	26	35	19	86	85	32	83
20	77	43	79	39	82	84	19	86	74	87	30
21	4	7	15	21	49	52	67	60	85	87	30
22	77	43	15	22	82	84	19	86	72	32	83
23	4	43	79	39	82	35	80	60	85	32	29
24	77	78	15	22	26	84	19	86	85	32	29

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.4.9]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.22]