

ارائه یک رویکرد چند هدفه فازی برای بازآرایی دینامیکی شبکه توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره انرژی

حسین لطفی^۱، محمد ابراهیم حاجی آبادی^{۲*}، مهدی صمدی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰</p>	<p>نفوذ منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی در شبکه‌های توزیع در حال افزایش می‌باشد و اثر این واحدها می‌تواند کارایی شبکه را تحت تاثیر قرار دهد. در این مطالعه مسئله بازآرایی شبکه توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره انرژی در قالب پویا مدلسازی شده است. در مطالعات رایج بازآرایی شبکه توزیع معمولاً به توابع هدفی مانند تلفات توجه بیشتری می‌شود، اما اهمیت توابع هدف جدیدتری نظیری قابلیت اطمینان و امنیت شبکه کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، توابع هدف انرژی توزیع نشده بعنوان شاخص قابلیت اطمینان، شاخص پایداری ولتاژ بعنوان تابع امنیت شبکه در کنار هزینه بهره‌برداری برای مسئله بازآرایی پویا شبکه معرفی شده است. مسئله بهینه‌سازی بازآرایی شبکه توزیع، یک مسئله غیر خطی و غیر محدب است، در نظر گرفتن اثر واحدهای تولید پراکنده و ذخیره انرژی باعث پیچیدگی بیشتر مسئله بهینه‌سازی می‌شود. از این رو، الگوریتم بهینه‌سازی روانشناسی دانش آموزی مبتنی بر منطق فازی برای مسئله بهینه‌سازی تک و چند هدفه مسئله بازآرایی دینامیکی شبکه توزیع ارائه شده است. دقت روش پیشنهادی بر روی دو سیستم توزیع ۳۳ باسه و ۱۱۹ باسه ارزیابی می‌شود و برتری آن از طریق مقایسه با سایر روش‌های تکاملی نشان داده می‌شود.</p>
<p>واژگان کلیدی: بازآرایی شبکه توزیع، واحدهای تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره انرژی، انرژی توزیع نشده، شاخص پایداری ولتاژ، هزینه بهره‌برداری.</p>	

۱- مقدمه

به طور کلی بسیاری از عملیات کنترلی در سیستم‌های توزیع از جمله کنترل ولتاژ و حفاظت در شبکه‌های توزیع در ساختار شعاعی انجام می‌شود، اما در واقع این سیستم‌ها دارای توپولوژی حلقوی هستند. به همین دلیل تلفات خطوط و افت ولتاژ این شبکه‌ها بیشتر از شبکه‌های انتقال است. روش‌های مختلفی برای کاهش تلفات در سیستم توزیع وجود دارد، بسیاری از روش‌ها مستلزم نصب و راه اندازی تجهیزات اضافی نظیر ادوات FACTS در شبکه هستند. این تجهیزات اضافی، علاوه بر اینکه بار مالی برای شرکت‌ها دارد، ممکن است منجر به خطاهای جدیدی در

شبکه شود که می‌تواند خدمات مشتری را مختل کند [۱]. در سیستم‌های توزیع تعداد زیادی سوئیچ برای تغذیه باس‌های شبکه از مسیرهای مختلف وجود دارد، بازآرایی سیستم توزیع یک عملیات تعیین توپولوژی بهینه فیدرهای شبکه با مدیریت عملیات سوئیچینگ برای دستیابی به اهداف خاصی نظیر کاهش تلفات بدون تشکیل بخشی از شبکه به عنوان یک جزیره است [۱]. مسئله بازآرایی شبکه توزیع را می‌توان به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی عدد صحیح مختلط، غیر خطی و غیر محدب فرموله کرد. بنابراین، الگوریتم‌های بهینه‌سازی سنتی مبتنی بر گرادینت به دلیل محدودیت‌های مربوط به توابع هدف و قیود این

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Me.hajiabadi@hsu.ac.ir

۱. محقق پسا دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری

ریشه دهنده برای حل مسئله مکان‌یابی واحدهای تولید پراکنده و بازآرایی شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات ارائه شده است [۱۶]. در [۱۷]، بازآرایی چند هدفه شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ در حضور واحدهای تولید پراکنده با استفاده از روش جستجوی گروهی سه بعدی بهینه‌سازی شده است. مسئله بازآرایی شبکه توزیع و مکان‌یابی واحدهای تولید پراکنده با استفاده از دو الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی با هدف کاهش تلفات بهینه‌سازی شده است [۱۸-۱۹].

قابل توجه است که ادبیات فوق در مورد بازآرایی شبکه توزیع، تغییرات بار روزانه را نادیده گرفته و مسئله را در یک بازه زمانی از پیش تعیین شده حل کرده است. مدل بازآرایی شبکه در بار ثابت نمی‌تواند سناریوهای واقعی را نشان دهد و نمی‌تواند به راه حل بهینه برای برنامه‌ریزی زمانی ۲۴ ساعته برای شبکه‌های توزیع واقعی دست یابد. برای پر کردن این شکاف، بازآرایی شبکه توزیع در [۲۰] برای زمان‌های مختلف نظیر (سال، فصل، ماه و روز) به منظور یافتن بهینه‌ترین هزینه سوئیچینگ تعیین می‌شود. در [۲۱]، بازآرایی به یک شبکه توزیع نامتعادل در یک افق زمانی ۲۴ ساعته اعمال می‌شود. علاوه بر این، الگوریتم ژنتیک به عنوان یک ابزار بهینه‌سازی برای به حداقل رساندن تلفات انرژی شبکه پیاده‌سازی شده است. در [۲۲]، یک روش پیشنهادی مبتنی بر ترکیب دو الگوریتم تکاملی برای حل مسئله بازآرایی دینامیکی شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات انرژی و هزینه بهره‌برداری ارائه شده است. مسئله بازآرایی شبکه توزیع در قالب پویا به همراه سوئیچینگ خازنی در حضور واحدهای تولید پراکنده به کمک الگوریتم کلونی مورچه‌ها بهینه‌سازی شده است [۲۳]. بررسی مطالعات بالا نشان می‌دهد که بازآرایی دینامیکی شبکه توزیع در حضور یکپارچه واحدهای تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره انرژی در ادبیات فوق بررسی نشده است. همچنین اکثر مطالعات فوق‌الذکر از توابع هدف سنتی نظیر تلفات و هزینه بهره‌برداری استفاده کرده‌اند و توجه کمتری به توابع هدف جدیدتری نظیر قابلیت اطمینان و امنیت شبکه شده است. بر این اساس، یک مدل بهینه‌سازی بهبود یافته در این مطالعه شامل این دو جنبه می‌باشد: بازآرایی دینامیکی شبکه توزیع، طرح مدیریت بهینه برای سیستم‌های ذخیره ساز انرژی ادغام شده با واحدهای تولید پراکنده. مدل ذکر

مسئله از قبیل ناپیوستگی و مشتق‌پذیری مناسب نیستند [۲]. بر این اساس، بسیاری از محققان روش‌های بهینه‌سازی تکاملی هوشمند را برای حل مشکل بازآرایی شبکه توزیع ارائه داده‌اند. به عنوان مثال، در [۳]، یک الگوریتم جستجوی گرانشی پیشرفته برای حل مسئله بازآرایی شبکه به منظور بهبود پایداری گذرا و کاهش هزینه بهره برداری و تلفات توان پیاده‌سازی شده است. در [۴]، یک الگوریتم تکاملی ترکیبی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم جستجوی سیمپلکس نلد-مید برای به حداقل رساندن تلفات توان ارائه شده است. علاوه بر این، یک الگوریتم ژنتیک اصلاح شده برای مشکل بازآرایی شبکه در [۵] پیشنهاد شده که در آن اندازه جمعیت متغیر در نظر گرفته شده است. در [۶]، اندازه بهینه، مکان و توپولوژی شبکه به طور همزمان با استفاده از جریان توان بهینه برای به حداقل رساندن هزینه بهره‌برداری و تلفات توان به دست می‌آید. الگوریتم‌های تکاملی شب تاب فازی و بهبود یافته انتخابی اجتماع ذرات برای حل مسئله بازآرایی شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات ارائه شده‌اند [۷-۸]. در [۹]، یک روش پیشنهادی مبتنی بر ترکیب نظریه گراف و الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی برای مسئله بازآرایی شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات ارائه شده است. استقرار منابع تولید پراکنده با هدف بهبود وضعیت شبکه از لحاظ کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان مستلزم مطالعاتی در زمینه مدیریت بهینه این تأسیسات است [۱۰-۱۱]. مطالعات زیادی به منظور حل مسئله بازآرایی شبکه توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع انجام شده است. به عنوان مثال، در [۱۲]، الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی اجتماع ذرات و جهش قورباغه به منظور حل مسئله بازآرایی شبکه توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات و هزینه بهره‌برداری ارائه شده است. در [۱۳]، الگوریتم بهبود یافته جهش قورباغه برای حل مسئله مکان‌یابی واحدهای تولید پراکنده و بازآرایی شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات و تعداد سوئیچینگ ارائه شده است. در [۱۴]، به بهینه‌سازی مسئله بازآرایی شبکه توزیع و مکان‌یابی واحدهای تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان پرداخته شده است. در [۱۵]، الگوریتم رقابت استعماری برای مسئله بازآرایی شبکه توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات ارائه شده است. الگوریتم

شده باید به مسئول فنی شبکه یک استراتژی تصمیم‌گیری پیشنهاد دهد که در آن مناسب‌ترین توپولوژی شبکه با الگوی مناسب دیسپاچینگ واح‌های تولید پراکنده، طرح بهینه شارژ/دشارژ سیستم‌های ذخیره انرژی در یک سطح مناسبی از قابلیت اطمینان و امنیت شبکه توزیع بدست آید. مشارکت‌های اصلی این مقاله به شرح زیر است:

- مدلسازی بازآرایی دینامیکی شبکه توزیع در حضور همزمان واحدهای تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره انرژی.
- تعریف شاخص‌های انرژی توزیع نشده و پایداری ولتاژ به عنوان توابع هدف قابلیت اطمینان و امنیت شبکه.
- ارائه الگوریتم تکاملی روانشناسی دانش‌آموزی مبتنی بر منطق فازی به منظور حل مسئله بهینه‌سازی بازآرایی شبکه توزیع در قالب تک و چند هدفه.

در ادامه، در بخش دوم، فرمول‌بندی مسئله شرح داده شده است. استراتژی حل مسئله چند هدفه و نتایج شبیه‌سازی در بخش‌های سوم و چهارم ارائه شده است. نتیجه‌گیری در بخش پایانی بیان شده است.

• انرژی توزیع نشده

انرژی توزیع نشده^۲ باس i در زمان h ام از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$ENS_{i,h} = P_{i,h} \sum_{i,j \in V, i \neq j} (U_{i,j} + U'_{i,j}) \quad (2)$$

$$U_{i,j} = FOR_{i,j} \times t_{i,j} \quad (3)$$

$$U'_{i,j} = FOR'_{i,j} \times t'_{i,j} \quad (4)$$

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. $FOR_{i,j}$ نرخ خرابی خط بین باس‌های i ام و j ام می‌باشد. $t_{i,j}$ و $t'_{i,j}$ به ترتیب مدت زمان تعمیر و مدت زمان بازیابی خط بین باس-های i و j ام می‌باشند [۱۴]. رابطه نهایی انرژی توزیع نشده کل شبکه با در نظر نگرفتن گره مرجع از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$f_2(x) = \sum_{h=1}^{24} \sum_{i=2}^{N_{Bus}} ENS_{i,h} \quad (5)$$

• شاخص پایداری ولتاژ^۳

در شبکه‌های توزیع، دلایل مختلفی از جمله افزایش بار و عملکرد ضعیف ترانسفورماتور باعث فروپاشی ولتاژ در هر نقطه شبکه می‌شود [۲۴]. امتیاز عمده این مدل در مقایسه با سایر روش‌ها این است که می‌توان آن را در شبکه‌هایی با ساختارهای مشبک و شعاعی اعمال کرد. معادل تونن

شده باید به مسئول فنی شبکه یک استراتژی تصمیم‌گیری پیشنهاد دهد که در آن مناسب‌ترین توپولوژی شبکه با الگوی مناسب دیسپاچینگ واح‌های تولید پراکنده، طرح بهینه شارژ/دشارژ سیستم‌های ذخیره انرژی در یک سطح مناسبی از قابلیت اطمینان و امنیت شبکه توزیع بدست آید. مشارکت‌های اصلی این مقاله به شرح زیر است:

- مدلسازی بازآرایی دینامیکی شبکه توزیع در حضور همزمان واحدهای تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره انرژی.
 - تعریف شاخص‌های انرژی توزیع نشده و پایداری ولتاژ به عنوان توابع هدف قابلیت اطمینان و امنیت شبکه.
 - ارائه الگوریتم تکاملی روانشناسی دانش‌آموزی مبتنی بر منطق فازی به منظور حل مسئله بهینه‌سازی بازآرایی شبکه توزیع در قالب تک و چند هدفه.
- در ادامه، در بخش دوم، فرمول‌بندی مسئله شرح داده شده است. استراتژی حل مسئله چند هدفه و نتایج شبیه‌سازی در بخش‌های سوم و چهارم ارائه شده است. نتیجه‌گیری در بخش پایانی بیان شده است.

۲- فرمول‌بندی مسئله

فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی شامل توابع هدف، قیود مسئله در دو بخش ارائه شده است.

۱-۲- توابع هدف

در این مطالعه توابع هدف شامل مینیمم‌سازی هزینه بهره‌برداری، انرژی توزیع نشده و حداکثر سازی شاخص پایداری ولتاژ شبکه می‌باشد.

• هزینه بهره‌برداری

هزینه بهره‌برداری^۱ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f_1(X) = \sum_{h=1}^{24} \left(\sum_{j=1}^{N_{DG}} Price_{h,j}^{DG} P_{h,j}^{DG} + \sum_{\substack{s=1 \\ N_{ES}}}^{N_{Sub}} Price_{h,s}^{Sub} P_{h,s}^{Sub} + \sum_{\substack{r=1 \\ N_{SW}}}^{N_{ES}} Price_{h,r}^{ES} P_{h,r}^{ES} + \sum_{k=1} Price_{h,k}^{SW} |S_{h,k} - S_{h-1,k}| \right) \quad (1)$$

³ Voltage stability index (VSI)

¹ Operational cost

² Energy not supplied (ENS)

برای رسیدن به یک شرایط عملیاتی پایدار، شاخص پایداری ولتاژ برای همه گره‌ها باید بزرگتر از صفر باشد که در (۱۴) نشان داده شده است.

$$vsi_h = [vsi_{2,h}, vsi_{3,h}, \dots, vsi_{N_{bus},h}] \quad (13)$$

$$cvs_i_{k,h} = \begin{cases} 0 & vsi_{k,h} > 0 \\ 1 & vsi_{k,h} \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$Cvsi_h = [cvs_i_{2,h}, cvs_i_{3,h}, \dots, cvs_i_{N_{bus},h}] \quad (15)$$

$$penalty\ factor = N \times sum(Cvsi_h) \quad (16)$$

N_{bus} ، بیانگر تعداد باس‌های شبکه است، تابع هدف سوم به صورت رابطه (۱۷) تعریف می‌شود. عامل جریمه (PF) برای حذف متغیرهای تصمیم ناپایدار در طول فرآیند بهینه سازی انجام می‌شود. در این مطالعه N عدد بسیار بزرگی در نظر گرفته شده است (به عنوان مثال ۱۰۰۰۰۰).

$$f_3(x) = \frac{1}{24} \sum_{h=1}^{24} \frac{1}{min(vsi_h)} + PF \quad (17)$$

۲-۲- قیود مساله

- شرط شعاعی بودن

قید شعاعی بودن شبکه از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود:

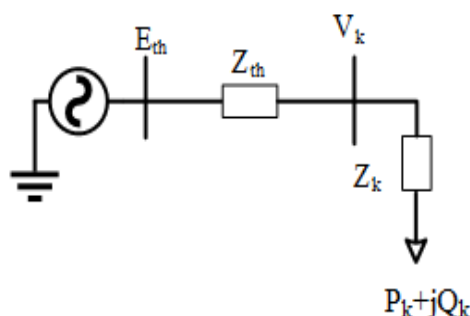
$$N_{Branch} = N_{Bus} - N_{source} \quad (18)$$

N_{source} و N_{bus} ، به ترتیب تعداد باس‌ها و پست‌های شبکه را معرفی می‌کنند. محدودیت فوق ممکن است نتواند ساختار شعاعی سیستم‌های توزیع را حفظ کند. بنابراین، ما یک ماتریس حلقه به منظور ایجاد متغیرهای تصمیمی که توپولوژی شعاعی سیستم توزیع را برآورده کند، تعریف می‌کنیم. هر سطر از این ماتریس شاخه‌های موجود در یک حلقه از شبکه توزیع را نشان می‌دهد و تعداد سطرهای ماتریس برابر با حلقه‌های اساسی یا تای سوئیچ‌ها است. برای تولید جمعیت اولیه در بهینه‌سازی، از هر ردیف ماتریس حلقه فقط یک شاخه را انتخاب می‌کنیم. بر این اساس، ساختار شعاعی شبکه توزیع قابل حفظ است. علاوه بر این، ماتریس تلاقی نیز در طول فرآیند بهینه‌سازی به منظور بررسی شرط شعاعی سیستم اعمال شده است. دترمینان ماتریس تلاقی طبق رابطه زیر باید برابر یک باشد

$$|det(A)| = 1 \quad (19)$$

در تشکیل ماتریس تلاقی، هر ستون به یک باس و هر

برای تمام گره‌های شبکه در شکل یک نشان داده شده است. با توجه به پخش بار، روابط (۷) - (۶) را می‌توان محاسبه کرد. رابطه (۸) از روابط قبلی محاسبه می‌شود.



شکل ۱. معادل تونن از دید باس k ام

$$I_{k,h} = \frac{E_{th,k,h} - V_{k,h}}{R_{th,k,h} + jX_{th,k,h}} \quad (6)$$

$$P_{k,h} - jQ_{k,h} = V_{k,h} \times I_{k,h} \quad (7)$$

$$P_{k,h} - jQ_{k,h} = V_{k,h} \times \frac{E_{th,k,h} - V_{k,h}}{R_{th,k,h} + jX_{th,k,h}} \quad (8)$$

$R_{th,k,h}$ و $X_{th,k,h}$ ، به ترتیب مقاومت و راکتانس تونن از دید باس k ام در ساعت h ام هستند. $P_{k,h}$ و $Q_{k,h}$ ، به ترتیب توان اکتیو و راکتیو باس k ام را در زمان h ام نشان می‌دهند. $V_{k,h}$ و $I_{k,h}$ ، ولتاژ و جریان باس k ام را در زمان h ام معرفی می‌کنند. بیانگر ولتاژ تونن از دید باس k ام در زمان h ام است. معادله (۹) را می‌توان از (۸) بدست آورد، ضرایب B و C به ترتیب در (۱۰) و (۱۱) تعریف شده اند.

$$|V_{k,h}|^4 - |E_{th,k,h}|^2 - 2P_{k,h}R_{th,k,h} - 2Q_{k,h}X_{th,k,h} \cdot |V_{k,h}|^2 + (P_{k,h}^2 + Q_{k,h}^2) \cdot (R_{th,k,h}^2 + X_{th,k,h}^2) = 0 \quad (9)$$

$$B = |E_{th,k,h}|^2 - 2P_{k,h}R_{th,k,h} - 2Q_{k,h}X_{th,k,h} \quad (10)$$

$$C = (P_{k,h}^2 + Q_{k,h}^2) \cdot (R_{th,k,h}^2 + X_{th,k,h}^2) \quad (11)$$

با برقراری شرط $B_{k,h}^2 - 4C_{k,h} \geq 0$ رابطه شاخص پایداری ولتاژ بصورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

$$vsi_{k,h} = \left(|E_{th,k,h}|^2 - 2P_{k,h}R_{th,k,h} - 2Q_{k,h}X_{th,k,h} \right)^2 - 4 \cdot (P_{k,h}^2 + Q_{k,h}^2) \cdot (R_{th,k,h}^2 + X_{th,k,h}^2) \quad (12)$$

$, k = 2, 3, \dots, N_{bus}$

شبکه به خطر بیفتد و نه کارایی تجهیزات کاهش یابد [۲۵-۲۶]. قیود واحدهای ذخیره انرژی به شرح زیر است.

$$E_{h,r}^{Es} = E_{h-1,r}^{Es} + \sigma_{ch,r} P_{ch,h,r}^{Es} \times \Delta h - \frac{1}{\sigma_{dis,r}} P_{dis,h,r}^{Es} \times \Delta h \quad (26)$$

$$\Delta h = 1 \text{ hour}, r = 1, 2, \dots, N_{ES}$$

$$E_r^{Es, \min} \leq E_{h,r}^{Es} \leq E_r^{Es, \max} \quad (27)$$

$$P_{ch,h,r}^{Es} \leq P_{ch,r}^{Es, \max} \quad (28)$$

$$P_{dis,h,r}^{Es} \leq P_{dis,r}^{Es, \max} \quad (29)$$

$$P_{h,r}^{ES} = P_{ch,h,r}^{Es} - P_{dis,h,r}^{Es} \quad (30)$$

$E_{h,r}^{Es}$ مقدار انرژی ذخیره شده سیستم r ام در زمان h ام می باشد. $P_{ch,h,r}^{Es}$ و $P_{dis,h,r}^{Es}$ بیانگر میزان شارژ و دشارژ واحد r ام در زمان h ام هستند. $E_r^{Es, \max}$ و $E_r^{Es, \min}$ حداکثر و حداقل انرژی سیستم r ام را در زمان h ام نشان می دهند. $P_{ch,r}^{Es, \max}$ و $P_{dis,r}^{Es, \max}$ حداکثر میزان شارژ و دشارژ واحد r ام در زمان h ام هستند.

توان خریداری شده از سیستم r ام در زمان h ام طبق رابطه (۳۰)، برابر با توان شارژ منهای توان دشارژ می باشد.

۳- استراتژی بهینه سازی چند هدفه مبتنی بر فازی

در این بخش، الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی و استراتژی فازی برای بهینه سازی چند هدفه ارائه شده است.

۳-۱- بهینه سازی چند هدفه

در یک مسئله بهینه سازی که اهداف با هم یکسان نیستند، مسئله به صورت زیر فرموله می شود [۱۴]:

$$\begin{aligned} \text{Minf}(x) &= [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T, G_i(X) \leq 0 \\ H_i(x) &= 0 \end{aligned} \quad (31)$$

$G_i(X)$ و $H_j(X)$ ، قیود مساوی و نامساوی هستند. n و x به ترتیب، بیانگر توابع هدف و بردار متغیرهای بهینه سازی هستند. بردار X_1 بر X_2 غلبه می کند زمانی که شرایط زیر برقرار باشد [۱۴]:

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, N_{obj}\}, f_i(X_1) \leq f_i(X_2) \quad (32)$$

$$\exists j \in \{1, 2, \dots, N_{obj}\}, f_j(X_1) < f_j(X_2) \quad (33)$$

سطر به یک شاخه اختصاص داده می شود. در نهایت، درایه های مربوط به ستون اول حذف می شود تا ماتریس تلافی مربعی شود و دترمینان آن تعریف شده باشد.

• معادلات پخش بار

قیود معادلات پخش بار از روابط زیر محاسبه می شود:

$$P_{j,h} = \sum_{i=1}^{N_{Bus}} V_{i,h} V_{j,h} Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_{i,h} + \delta_{j,h}) \quad (20)$$

$$Q_{j,h} = \sum_{i=1}^{N_{Bus}} V_{i,h} V_{j,h} Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_{i,h} + \delta_{j,h}) \quad (21)$$

$P_{j,h}$ و $Q_{j,h}$ توان های اکتیو و راکتیو تزریقی شبکه به باس j ام در زمان h ام هستند. $V_{i,h}$ و $\delta_{i,h}$ ، به ترتیب دامنه و زاویه ولتاژ i ام در زمان h ام را نشان می دهند. Y_{ij} و θ_{ij} اندازه و زاویه ادمیتانس شاخه بین باس های i و j هستند.

• محدوده مربوط به ولتاژ باس ها

$$V_{j,h}^{\min} \leq V_{j,h} \leq V_{j,h}^{\max} \quad (22)$$

$$j = 1, 2, \dots, N_{Bus}$$

$V_{j,h}^{\max}$ و $V_{j,h}^{\min}$ ، بیانگر حداقل و حداکثر مقدار مجاز ولتاژ باس j ام در زمان h ام هستند.

$$|I_{j,h}^{fdr}| \leq I_{j,h}^{fdr, \max} \quad (23)$$

$$j = 1, 2, \dots, N_{feeder}$$

$I_{j,h}^{fdr, \max}$ و $I_{j,h}^{fdr}$ ، به ترتیب دامنه جریان و حداکثر جریان فیدر j ام را در زمان h ام معرفی می کنند.

• محدودیت ترانسفورماتور

$$|I_{j,h}^{trns}| \leq I_{j,h}^{trns, \max} \quad (24)$$

$$j = 1, 2, \dots, N_{transformer}$$

$I_{j,h}^{trns, \max}$ و $I_{j,h}^{trns}$ ، به ترتیب بیانگر دامنه جریان و حداکثر جریان ترانسفورمر j ام در زمان h ام هستند.

• محدودیت واحدهای تولید پراکنده

$$P_{j,h}^{DG, \min} \leq P_{j,h}^{DG} \leq P_{j,h}^{DG, \max} \quad (25)$$

$$j = 1, 2, \dots, N_{DG}$$

$P_{j,h}^{DG, \max}$ و $P_{j,h}^{DG, \min}$ ، به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار توان واحد j ام در زمان h ام هستند.

• محدودیت سیستم های ذخیره انرژی

استفاده همزمان از منابع تولید پراکنده در کنار واحدهای ذخیره انرژی، نیاز به یک مدیریت مناسب دارد تا نه پایداری

۲- تولید جمعیت اولیه تصادفی به صورت زیر:

$$Initial_population = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_N \end{bmatrix} \quad (36)$$

S_i و N ، بترتیب بیانگر بردار متغیر کنترلی نام و جمعیت دانش‌آموزان هستند.

۳- محاسبه توابع هدف طبق روابط (۱)، (۵) و (۱۷)

۴- محاسبه تابع عضویت برای هر تابع هدف بر اساس رابطه (۳۴).

۵- محاسبه مقدار نرمالیزه شده تابع هدف با استفاد از (۳۵).

۶- استفاده از بهینگی پارتو به منظور ذخیره جواب‌های غیرغالب در مجموعه جواب‌های ایجاد شده.

۷- بررسی دسته‌بندی جمعیت دانش‌آموزی:

اگر جمعیت به دسته بهترین دانش‌آموز تعلق دارد، به وسیله معادله زیر اصلاح شود.

$$S_{new}^{best} = S^{best} + (-1)^j \times rand \times (S^{best} - S^i) \quad (37)$$

در اینجا، S^{best} نشان‌دهنده بهترین دانش‌آموز است، S^i نشان‌دهنده انتخاب تصادفی دانش‌آموز در یک موضوع خاص است.

اگر جمعیت متعلق به دانش‌آموز خوب است. بررسی کنید، اگر دانش‌آموز برای بهتر شدن تلاش مشابهی با بهترین دانش‌آموز را انجام می‌دهد طبق رابطه زیر اصلاح شود:

$$S_{new}^M = S^{best} + [rand \times (S^{best} - S^i)] \quad (38)$$

اگر دانش‌آموز تلاش مشابهی با بهترین دانش‌آموز را انجام نمی‌دهد، مشابه رابطه زیر اصلاح گردد:

$$S_{new}^M = S^M + [rand \times (S^{best} - S^i)] + [rand \times (S^M - S^{mean})] \quad (39)$$

اگر جمعیت متعلق به دانش‌آموز متوسط است، جمعیت بر اساس رابطه زیر اصلاح شود:

$$S_{new}^M = S^M + [rand \times (S^{mean} - S^M)] \quad (40)$$

اگر دانش‌آموز متوسط نیست، جمعیت بر اساس رابطه زیر اصلاح گردد:

$$S_{new}^M = S^{min} + [rand \times (S^{max} - S^{min})] \quad (41)$$

۸- ارزیابی عملکرد جمعیت جدید با محاسبه توابع هدف، در صورت بهتر بودن نسبت به قدیم، جمعیت جدید جایگزین شود در غیر این صورت جمعیت قدیمی حفظ شود.

پس از محاسبه توابع هدف، از منطق فازی برای جایگزینی هر تابع هدف با مقدار بین ۰ و ۱ استفاده می‌شود. تابع عضویت فازی μ_i برای هر تابع هدف به شرح زیر می‌باشد:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & f_i(X) \leq f_i^{min} \\ 0 & f_i(X) \geq f_i^{max} \\ \frac{f_i^{max} - f_i(X)}{f_i^{max} - f_i^{min}} & f_i^{min} \leq f_i(X) \leq f_i^{max} \end{cases} \quad (34)$$

f_i^{min} و f_i^{max} ، بیانگر حدود بالا و پایین تابع هدف هستند. این مقادیر از بهینه‌سازی هر تابع هدف به صورت مجزا بدست می‌آید. مقدار نرمالیزه شده هر تابع برای هر عضو در جبهه پارتو از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۳]:

$$N_{\mu_j} = \frac{\sum_{k=1}^n \beta_k \times \mu_{jk}(x)}{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \beta_k \times \mu_{jk}(x)} \quad (35)$$

m و n ، به ترتیب جواب‌های غیر غالب و توابع هدف می‌باشند. β_k بیانگر وزن k امین تابع هدف است.

۲-۳- الگوریتم بهینه‌سازی روانشناسی دانش‌آموزی

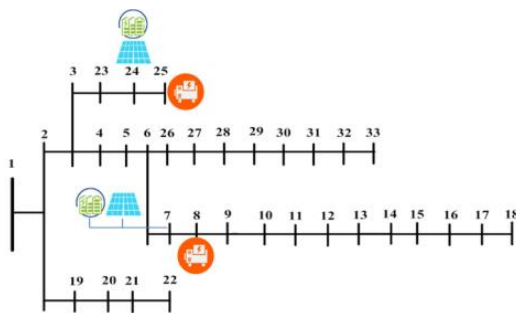
الگوریتم بهینه‌سازی روانشناسی دانش‌آموزی یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری است که از روانشناسی دانش‌آموزان الهام گرفته شده است [۲۷]. در این الگوریتم، سه نوع دانش‌آموز شامل بهترین، خوب و متوسط در نظر گرفته شده است. دانش‌آموزان سعی می‌کنند به طور تصادفی ارتقاء پیدا کنند. دانش‌آموزان در این روش بر اساس نمرات در آزمون دسته‌بندی می‌شوند. در یک کلاس، دانش‌آموزی که در امتحان نمرات بالایی کسب کند، دانش‌آموز برتر نامیده می‌شود. دانش‌آموزانی که به هر موضوعی علاقه دارند، سعی می‌کنند تلاش خوبی برای بهبود عملکرد کلی ارائه دهند که به عنوان دانش‌آموزان خوب نامیده می‌شوند. برای تعداد کمی از موضوعات دیگر، آخرین گروه از دانش‌آموزان به طور متوسط تلاش می‌کنند تا پیشرفت کنند. این گروه از دانش‌آموزان را دانش‌آموز متوسط از نظر موضوعی می‌نامند. در این الگوریتم، همه دانش‌آموزان سعی می‌کنند به طور تصادفی برای همه موضوعات تلاش کنند و در نتیجه پیشرفت کنند. روش گام به گام الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله چند هدفه در زیر نشان داده شده است.

۱- تعریف داده‌های مورد نیاز مسئله شامل دیتاهای شبکه و پارامترهای الگوریتم.

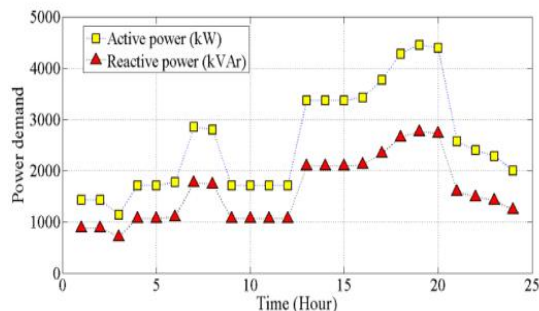
جدول ۲، نتایج بهینه‌سازی برای توابع هدف به صورت مجزا و شرایط اولیه را ارائه می‌دهد. در سطر اول جدول ۲، نتایج شرایط اولیه مربوط به پخش بار شبکه تست ۳۳ با سه بدون بازآرایی شبکه و همچنین عدم حضور واحدهای تولید پراکنده، پنل‌های فتو ولتائیک و سیستم‌های ذخیره انرژی می‌باشد. در ابتدا، شایان ذکر است که مقادیر کلیه توابع هدف در پروسه بهینه‌سازی به دلیل تأثیر مثبت واحدهای تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره انرژی و همچنین بازآرایی شبکه بهبود یافته است.

جدول ۲. نتایج بهینه‌سازی توابع هدف بصورت مجزا حاصل از روش پیشنهادی

توابع	هزینه بهره- برداری (دلار)	انرژی توزیع نشده (کیلووات ساعت بر سال)	پایداری ولتاژ (پروینت)
شرایط اولیه	۳۸۹۹/۲۳	۵۴۸۹۸/۵۳	۱/۶۵۰
بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری	۳۴۱۹/۴۳	۳۴۵۶۷/۵۳	۱/۵۶۱
بهینه‌سازی انرژی توزیع نشده	۳۴۸۹/۴۳	۲۹۸۴۴/۲۳	۱/۵۳۹
بهینه‌سازی پایداری ولتاژ	۳۵۳۶/۵۴	۳۸۹۸۹/۵۲	۱/۵۰۵



شکل ۲. دیاگرام تک خطی شبکه ۳۳ با سه



شکل ۳. پروفیل بار در بیست و چهار ساعت

۹- محاسبه تابع عضویت برای هر تابع هدف بر اساس رابطه (۳۴).

۱۰- محاسبه مقدار نرمالیزه شده تابع هدف با استفاده از رابطه (۳۵).

۱۱- استفاده از بهینگی پارتو به منظور ذخیره جواب‌های غیرغالب در مجموعه جواب‌های ایجاد شده.

۱۲- بررسی شرط همگرایی، در این مطالعه از تعداد ماکزیمم تکرار استفاده شده است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

برای حل مسئله بهینه‌سازی بازآرایی دینامیکی شبکه توزیع از دو شبکه تست ۳۳ و ۱۱۹ با سه استفاده شده است. بازه مطالعاتی برای حل مسئله بهینه‌سازی بیست و چهار ساعت می‌باشد. در این بخش، مسئله پیشنهادی در دو قالب تک هدفه و چند هدفه در عدم حضور و حضور واحدهای تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره انرژی حل شده است. روش پیشنهادی در نرم‌افزار متلب کدنویسی شده است. سیستم مورد استفاده برای اجرای برنامه یک رایانه ۵ هسته‌ای با حافظه ۸ گیگا بایت می‌باشد. در جدول ۱، پارامترهای الگوریتم‌های مورد استفاده در این مطالعه ارائه شده است.

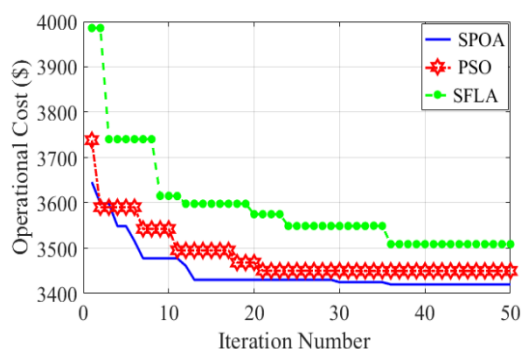
جدول ۱. پارامترهای الگوریتم‌های بهینه‌سازی

۴-۱- شبکه ۳۳ با سه

دیاگرام تک خطی سیستم آزمون و همچنین پروفیل بار پیش‌بینی شده برای روز آینده در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است. برای اطلاعات مربوط به خطوط شبکه و توان باس‌ها از مرجع [۲۸] استفاده شده است. هزینه خرید توان از شبکه در فواصل زمانی پیک و غیر پیک به ترتیب ۰/۰۴۷۶۵ و ۰/۰۲۶۷۲ دلار بر کیلووات ساعت می‌باشد. دو واحد تولید پراکنده با ظرفیت‌های ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلووات در باس‌های # ۷ و # ۲۴ نصب شده است. همچنین دو واحد فتوولتائیک همراه با سیستم‌های ذخیره انرژی با ظرفیت ۲۰۰ کیلووات ساعت در باس‌های # ۸ و # ۲۵ نصب شده‌اند. توان خروجی نامی هر واحد فتوولتائیک ۲۰۰ کیلووات است [۲۹-۳۰]. هزینه خرید توان از واحدهای تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره انرژی به ترتیب ۰/۰۴۲ دلار بر کیلووات ساعت برای ساعات پیک و ۰/۰۲۶ دلار بر کیلووات ساعت برای ساعات غیر پیک می‌باشد [۲۹-۳۰]. هزینه سوئیچینگ ۰/۰۴۱ دلار بر ای هر سوئیچینگ می‌باشد [۲۵].

جدول ۴. بهینه‌سازی پایداری ولتاژ در حضور تولید پراکنده و

الگوریتم‌ها	شاخص پایداری ولتاژ (پریونیت)			انحراف بدترین	زمان اجرا (ثانیه)
	بهترین	میانگین	بدترین		
جهش قورباغه	۱/۵۴۵	۱/۵۵۹	۱/۵۸۰	۰/۰۰۹۵	۱۷۵
اجتماع ذرات	۱/۵۳۹	۱/۵۵۳	۱/۵۶۸	۰/۰۰۸۵	۱۶۹
روانشناسی دانش آموزی	۱/۵۰۵	۱/۵۱۳	۱/۵۲۴	۰/۰۰۷۱	۱۶۳



شکل ۴. منحنی همگرایی هزینه بهره‌برداری

با توجه به این نکته، می‌توان دریافت که برای بهینه‌سازی چند هدفه نمی‌توان از مفهوم بهینه‌سازی تک هدفه استفاده کرد. از این رو، نتایج بهینه‌سازی دو و سه هدفه حاصل از روش پیشنهادی بهینه‌سازی در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. با توجه به رابطه (۳۳)، به منظور بدست آوردن جواب مصالحه^۱ در بهینه‌سازی سه هدفه، مقدار وزن هر یک از توابع هدف ۰/۳۳ در نظر گرفته شده است. همچنین، جواب مصالحه در هر یک از جنبه‌های پارتو با رنگ قرمز نشان داده شده است. آرایش بهینه سوئیچ‌ها، توان خروجی واحدهای تولید پراکنده و توان شارژ/دشارژ واحدهای ذخیره انرژی حاصل از الگوریتم پیشنهادی برای بهینه‌سازی سه‌هدفه به ترتیب در جدول ۵، شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. مقادیر مثبت و منفی در شکل (۸) روند شارژ و دشارژ را نشان می‌دهد.

برای نشان دادن عملکرد الگوریتم پیشنهادی در بهینه‌سازی تک‌هدفه، نتایج به دست آمده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات، جهش قورباغه و روانشناسی دانش آموزی برای ۲۰ آزمایش در جداول ۳ تا ۴ ارائه شده است. نتایج به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های دیگر از نظر بازده محاسباتی و کارایی مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی بهتر از نتایج به دست آمده از روش‌های دیگر است. همچنین، با توجه به این نتایج واضح است که الگوریتم پیشنهادی می‌تواند به هزینه بهره‌برداری و شاخص پایداری ولتاژ بهینه‌تری همگرا شود. با توجه نتایج جداول ۳ و ۴ مشخص است که مقدار شاخص پایداری ولتاژ و هزینه بهره‌برداری حاصل از الگوریتم پیشنهادی در حدود ۰/۲۰٪ و ۰/۱۴٪ نسبت به شرایط اولیه کاهش یافته است. شکل (۴)، منحنی همگرایی تابع هزینه بهره‌برداری حاصل از سه الگوریتم را در ۵۰ تکرار ارائه می‌دهد. با توجه به شکل (۴) واضح است که الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها به جواب بهینه‌تری همگرا شده است.

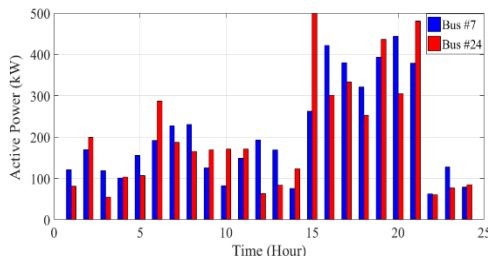
بررسی نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که توابع هدف با هم در تناقض هستند. به عبارت دیگر، هر سه تابع با هم بهبود پیدا نمی‌کنند. به عنوان مثال، مقدار شاخص پایداری ولتاژ در بهینه‌سازی مجزای هزینه بهره‌برداری، انرژی توزیع نشده و پایداری ولتاژ به ترتیب ۱/۵۶۱، ۱/۵۳۹ و ۱/۵۰۵ پریونیت می‌باشد.

جدول ۳. بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری در حضور تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی

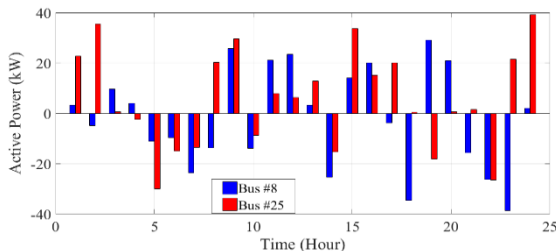
الگوریتم‌ها	هزینه بهره‌برداری (دلار)			انحراف بدترین	زمان اجرا (ثانیه)
	بهترین	میانگین	بدترین		
جهش قورباغه	۳۵۱۹/۲۵	۳۵۴۵/۶۸	۳۵۸۴/۴۸	۳۳/۲۳	۱۵۹
اجتماع ذرات	۳۴۵۹/۱۵	۳۴۷۶/۷۲	۳۴۹۸/۲۳	۲۶/۳۴	۱۴۵
روانشناسی دانش آموزی	۳۴۱۹/۴۳	۳۴۳۷/۳۵	۳۴۵۵/۱۵	۱۸/۶۵	۱۴۱

^۱. Best compromise solution

با توجه به شکل های (۷) و (۸)، هر دو واحد تولید پراکنده نزدیک به حداکثر ظرفیت تولید خود برای ساعات اوج مصرف کار می کنند. همچنین حداکثر میزان شارژ هر دو واحد ذخیره انرژی از ساعت ۱۱ صبح تا ۳ بعد از ظهر و همچنین حداکثر میزان دشارژ برای هر دو واحد ذخیره انرژی از ساعت ۹ شب تا ۱۲ شب می باشد. بر اساس جدول ۵، مشخص است که سوئیچ های ۲ و ۳ به ترتیب ۱۱ و ۱۹ بار در طول دوره زمان بندی تغییر کرده اند. سوئیچ های ۲ و ۳ به ترتیب کمترین و بیشترین تغییرات را در بازه زمانی ۲۴ ساعته دارند. در شکل های (۹) و (۱۰)، مقایسه ای بین مقادیر توابع هدف هزینه بهره برداری و شاخص پایداری ولتاژ در بهینه سازی تک هدفه و دو هدفه ارائه شده است.



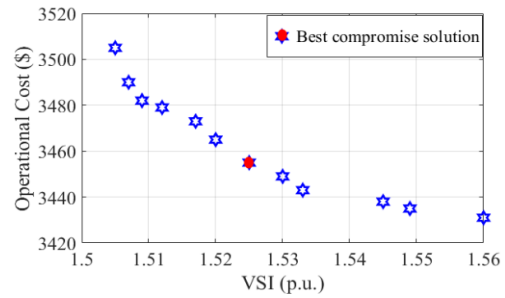
شکل ۷. توان اکتیو تولیدی واحدهای تولید پراکنده در بیست و چهار ساعت



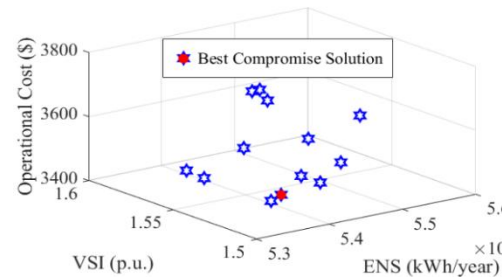
شکل ۸. توان اکتیو واحدهای ذخیره انرژی در هنگام شارژ و دشارژ در بیست و چهار ساعت

۲-۴- شبکه ۱۱۹ باسه

سیستم تست دوم، یک شبکه توزیع ۱۱۹ باسه شامل سه فیدر، ۱۵ سوئیچ مانور و پست ۱۱ کیلو ولت است [۳۱]. پروفیل بار پیش بینی شده ساعتی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. چهار پنل ۵۰۰ کیلوواتی فتوولتائیک به همراه واحدهای ذخیره انرژی در باس های #۳۱، #۴۲، #۹۶ و #۱۰۹ نصب شده اند. پنج دیزل ژنراتور ۵۰۰ کیلو واتی در باس های #۲۰، #۲۸، #۷۱، #۷۴ و #۱۱۱ قرار دارند [۳۰]. نتایج بهینه سازی تک هدفه هزینه بهره برداری و انرژی توزیع نشده حاصل از الگوریتم های مختلف در ۲۰ آزمایش مختلف در جداول ۶ و ۷ نشان داده شده است. مقدار هزینه بهره برداری، شاخص پایداری ولتاژ و انرژی توزیع نشده در



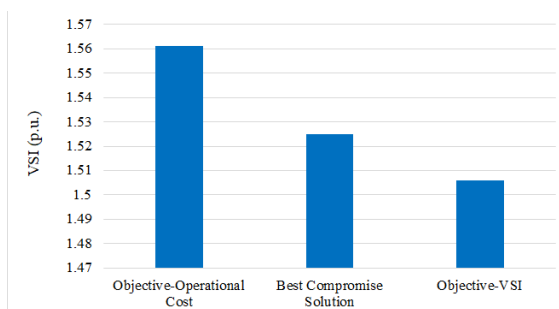
شکل ۵. جبهه بهینه پارتو برای مسأله بهینه سازی دو هدفه



شکل ۶. جبهه بهینه پارتو برای مسأله بهینه سازی سه هدفه

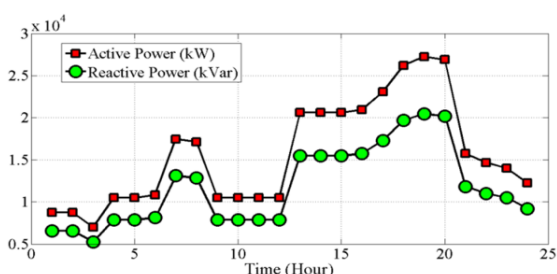
جدول ۵. سوئیچینگ بهینه بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی در بیست و چهار ساعت به منظور بهینه سازی سه هدفه

سطوح بار	سوئیچ های باز شده				
	Sw1	Sw2	Sw3	Sw4	Sw5
۱	۷	۱۴	۳۵	۳۶	۲۸
۲	۳۳	۱۴	۱۱	۳۶	۲۸
۳	۳۳	۱۴	۱۱	۱۷	۲۸
۴	۶	۱۴	۳۵	۱۷	۳۷
۵	۶	۱۴	۱۰	۳۶	۳۷
۶	۶	۳۴	۱۱	۳۶	۳۷
۷	۳۳	۱۴	۳۵	۳۶	۲۸
۸	۳۳	۱۴	۸	۱۷	۳۷
۹	۳۳	۱۴	۸	۱۵	۵
۱۰	۶	۳۴	۳۵	۳۶	۲۸
۱۱	۳۳	۳۴	۸	۱۷	۳۷
۱۲	۳۳	۱۴	۸	۱۷	۵
۱۳	۳۳	۱۴	۱۱	۳۶	۲۸
۱۴	۶	۱۴	۱۱	۱۷	۲۸
۱۵	۶	۱۴	۳۵	۳۲	۲۸
۱۶	۷	۳۴	۱۰	۳۶	۵
۱۷	۷	۱۲	۹	۳۶	۵
۱۸	۲۰	۱۲	۱۱	۳۶	۵
۱۹	۷	۱۴	۸	۱۵	۳۷
۲۰	۶	۱۲	۱۱	۳۶	۵
۲۱	۷	۳۴	۳۵	۳۶	۳۷
۲۲	۷	۳۴	۸	۱۷	۵
۲۳	۳۳	۱۲	۳۵	۳۶	۲۸
۲۴	۷	۱۴	۱۰	۱۷	۲۸



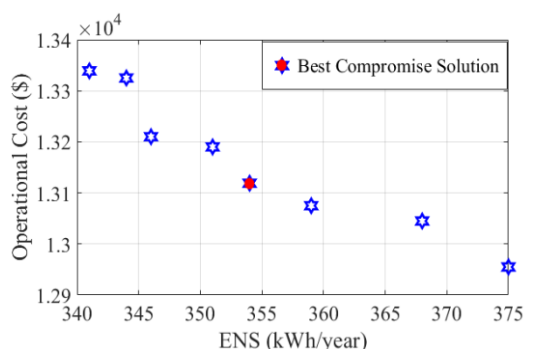
شکل ۱۰. مقایسه مقدار بهینه شاخص پایداری ولتاژ در بهینه سازی تک هدفه و دو هدفه

سه نتایج جداول ۶ و ۷ با مقادیر توابع هدف در شرایط اولیه نشان می دهد که مقدار انرژی توزیع نشده و هزینه بهره برداری حاصل از روش پیشنهادی به ترتیب در حدود ۵۷٪ و ۲۱٪ نسبت به شرایط اولیه کاهش پیدا کرده اند.



شکل ۱۱. پروفیل بار روزانه

به منظور حل مسئله بهینه سازی در قالب چند هدفه، شکل های (۱۲) و (۱۳)، جبهه های بهینه پارتو مربوط به بهینه سازی دو و سه هدفه حاصل از الگوریتم پیشنهادی بهینه سازی را نشان می دهد. همچنین، آرایش بهینه سوئیچ ها، توان خروجی واحدهای تولید پراکنده و توان شارژ/دشارژ واحدهای ذخیره انرژی برای بهینه سازی سه هدفه به ترتیب در جدول ۸، شکل های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است.



شکل ۱۲. جبهه بهینه پارتو برای مساله بهینه سازی دو هدفه

با توجه به شکل (۱۲)، مقدار هزینه بهره برداری و انرژی توزیع نشده در جواب مصالحه (که با رنگ قرمز مشخص شده

شرایط اولیه در عدم حضور تولید پراکنده و ذخیره انرژی و قبل از بازآرایی شبکه به ترتیب ۱۵۶۳۷/۸۷ دلار، ۴/۰۵ پروبونت و ۵۴۴/۷۷ کیلووات ساعت بر سال می باشد.

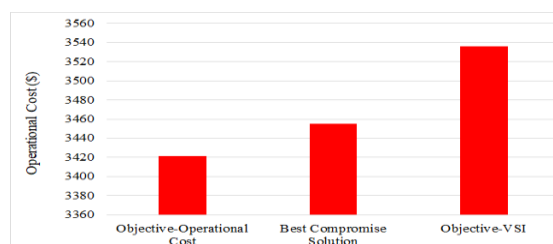
جدول ۶. بهینه سازی هزینه بهره برداری در حضور تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی

الگوریتم ها	هزینه بهره برداری (دلار)			انحراف اجرا معیار (ثانیه)	زمان اجرا
	بهترین	میانگین	بدترین		
جهش قورباغه	۱۳۱۱۰/۲۱	۱۳۱۷۹/۶۱	۱۳۲۷۵/۴۳	۴۸/۲۳	۲۴۹
اجتماع ذرات	۱۲۸۶۹/۴۶	۱۲۹۱۱/۱۲	۱۲۹۶۶/۲۱	۳۵/۱۴	۲۲۴
روانشناسی دانش آموزی	۱۲۸۳۰/۵۳	۱۲۸۶۵/۳۱	۱۲۹۱۰/۱۵	۲۹/۳۵	۲۱۹

جدول ۷. بهینه سازی انرژی توزیع نشده در حضور تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی

الگوریتم ها	انرژی توزیع نشده (کیلووات ساعت بر سال)			انحراف اجرا معیار (ثانیه)	زمان اجرا
	بهترین	میانگین	بدترین		
جهش قورباغه	۳۵۶/۶۳	۳۶۴/۱۳	۳۸۰/۴۵	۴/۶۹	۲۷۶
اجتماع ذرات	۳۴۹/۵۵	۳۵۳/۱۳	۳۶۶/۵۶	۳/۴۵	۲۵۸
روانشناسی دانش آموزی	۳۴۴/۷۱	۳۴۶/۱۲	۳۵۶/۲۳	۲/۹۵	۲۴۲

با توجه به جداول ۶ و ۷، واضح است که الگوریتم پیشنهادی روانشناسی دانش آموزی به انرژی توزیع نشده و هزینه بهره برداری بهینه تری نسبت به سایر الگوریتم های تکاملی نظیر جهش قورباغه و اجتماع ذرات همگرا شده است.



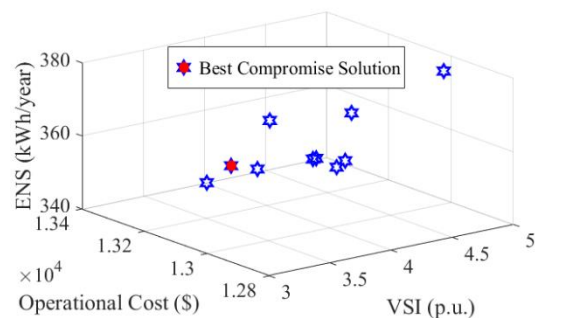
شکل ۹. مقایسه مقدار بهینه هزینه بهره برداری در بهینه سازی تک هدفه و دو هدفه

صبح با ۶۲ مگاوات می باشد.

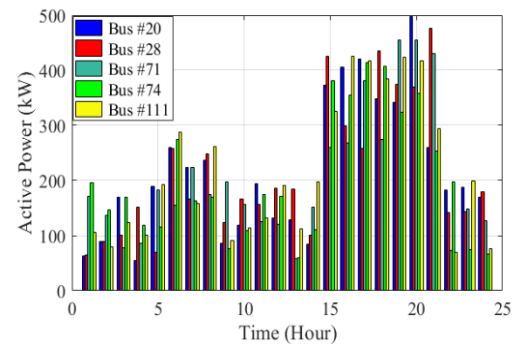
جدول ۸. سوئیچینگ بهینه بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی در بیست و چهار ساعت به منظور بهینه سازی سه هدف

سطوح بار	سوئیچ های باز شده
۱	۳۲-۱۳۱-۸۵-۸۲-۹۸-۷۳-۷۲-۵۶-۳۸-۶۱-۴۷-۵۱-۲۵-۱۱-۴۳
۲	-۱۱۵-۱۰۱-۱۰۵-۱۲۸-۷۳-۶۶-۵۷-۳۹-۳۶-۱۲۲-۵۳-۱۷-۱۲-۴۵ ۳۳
۳	-۲۴-۲۰-۵۳-۴۶-۳۶-۲۷-۵۴-۷۱-۱۲۷-۹۸-۱۰۵-۱۰۲-۱۱۶-۳۳ ۴۳
۴	-۱۰۲-۸۱-۹۶-۱۲۷-۱۲۶-۵۶-۲۷-۱۲۳-۴۸-۵۲-۱۲۰-۱۲-۴۳ ۳۳-۱۱۵
۵	-۱۳۱-۱۰۱-۱۰۶-۷۶-۱۲۷-۷۰-۵۵-۱۲۴-۶۱-۴۸-۵۰-۷-۱۶-۱۱۸ ۳۴
۶	-۱۰۳-۱۰۵-۱۲۸-۸۷-۷۱-۵۵-۳۸-۱۲۳-۴۸-۵۱-۱۲۰-۲۵-۴۲ ۳۴-۱۱۳
۷	-۱۱۵-۱۰۳-۱۰۵-۱۲۸-۱۲۷-۸۹-۵۷-۳۷-۴۶-۴۹-۲۳-۱۴-۱۱۸ ۳۲
۸	-۱۰۸-۸۵-۸۲-۷۶-۱۲۷-۶۶-۵۶-۳۷-۶۱-۴۸-۱۲۱-۱۲۰-۱۲-۴۴ ۱۳۲
۹	-۱۰۹-۱۰۳-۱۰۵-۷۵-۷۳-۶۸-۵۷-۳۹-۶۱-۱۲۲-۵۳-۲۳-۱۴-۱۱۸ ۳۳
۱۰	۱۳۱-۱۳۰-۱۲۹-۹۶-۷۴-۷۲-۵۶-۳۷-۵۸-۴۷-۵۳-۲۱-۲۴-۴۴
۱۱	-۱۱۳-۱۰۲-۸۲-۹۶-۸۷-۷۰-۱۲۵-۳۸-۵۹-۱۲۲-۵۳-۲۳-۱۳-۴۱ ۳۰
۱۲	۳۴-۱۰۸-۸۵-۱۲۹-۹۷-۸۷-۸۹-۵۷-۱۲۴-۵۸-۴۸-۵۲-۱۹-۱۵-۴۵
۱۳	۳۱-۱۱۵-۸۵-۱۰۵-۷۶-۸۷-۷۰-۵۷-۱۲۴-۳۶-۴۷-۵۰-۲۳-۱۲-۴۱
۱۴	-۱۱۶-۸۵-۸۱-۱۲۸-۸۷-۱۲۶-۵۷-۳۹-۵۸-۴۸-۱۲۱-۱۷-۱۶-۴۱ ۳۴
۱۵	-۱۰۲-۱۰۵-۱۲۸-۷۴-۸۸-۵۶-۳۸-۵۸-۴۶-۵۰-۱۲۰-۱۴-۱۱۸ ۳۴-۱۱۶
۱۶	-۱۰۳-۱۰۵-۹۷-۱۲۷-۷۲-۵۵-۱۲۴-۱۲۳-۱۲۲-۵۲-۲۰-۱۴-۴۲ ۳۳-۱۱۷
۱۷	۳۴-۱۱۶-۱۰۰-۸۰-۷۶-۷۴-۷۱-۵۶-۳۹-۶۱-۴۸-۴۹-۲۳-۱۲-۴۲
۱۸	-۱۱۶-۱۰۲-۸۱-۱۲۸-۷۳-۷۱-۵۷-۱۲۴-۵۸-۴۸-۱۲۱-۱۸-۱۵-۴۵ ۳۴
۱۹	-۱۰۹-۸۵-۱۰۵-۱۲۸-۸۷-۷۲-۵۷-۱۲۴-۳۶-۴۸-۵۱-۲۰-۱۵-۴۵ ۳۰
۲۰	۳۰-۱۰۹-۱۰۳-۸۲-۹۷-۸۶-۷۱-۵۴-۲۷-۵۸-۱۲۲-۵۰-۷-۱۶-۴۵
۲۱	-۱۰۱-۱۰۶-۹۶-۱۲۷-۹۰-۵۷-۳۸-۵۸-۱۲۲-۱۲۱-۱۸-۱۰-۴۱ ۳۳-۱۰۸
۲۲	۳۴-۱۱۵-۸۵-۸۱-۹۷-۱۲۷-۷۲-۵۷-۳۸-۶۰-۴۶-۵۱-۲۱-۱۴-۴۳
۲۳	۳۴-۱۱۴-۱۰۰-۸۲-۷۵-۸۶-۶۹-۵۴-۳۹-۵۸-۴۷-۱۲۱-۲۲-۲۵-۴۳
۲۴	-۱۳۰-۱۰۶-۷۶-۸۷-۶۸-۵۴-۱۲۴-۵۸-۴۸-۵۳-۱۲۰-۱۴-۱۱۸ ۳۳-۱۰۹

است) به ترتیب برابر ۱۳۱۱۰۹/۱۹ دلار و ۳۴۹/۵ کیلووات ساعت بر سال می باشد. مقدار بهینه همین توابع در جبهه پارتو به ترتیب ۱۲۹۴۵۴/۵۰ دلار و ۳۴۱/۲۳ کیلو وات بر ساعت به دست آمده است. اختلاف بین مقدار بهینه این شاخص ها در جواب مصالحه با مقادیر بهینه آنها در جبهه پارتو کمتر از ۳ درصد است، که نشان از کارآمدی روش پیشنهادی در حل مسئله بهینه سازی چند هدفه دارد.



شکل ۱۳. جبهه بهینه پارتو برای مساله بهینه سازی سه هدفه



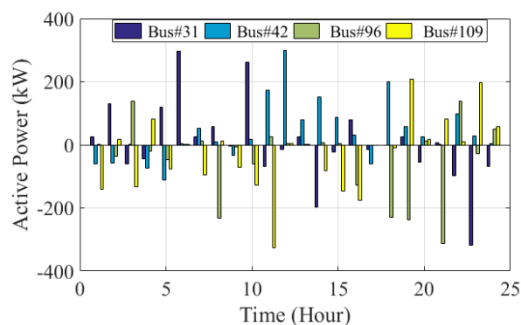
شکل ۱۴. توان تولیدی واحدهای تولید پراکنده در بیست و چهار ساعت

مقایسه مقادیر انرژی توزیع نشده و هزینه عملیاتی مربوط به بهینه سازی تک هدفه و بهترین راه حل سازش به دست آمده توسط روش پیشنهادی در شکل های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۸، واضح است که قید شعاعی بودن در کل شبکه در ۲۴ ساعت برقرار است و هیچ **جزیره ای** در شبکه در ۲۴ ساعت رخ نداده است. با توجه به شکل ۱۴ می توان گفت مجموع حداکثر تولید واحدهای دیزل ژنراتور مربوط به بازه زمانی ۴ بعد از ظهر تا ۸ شب می باشد و مجموع حداقل تولید واحدهای دیزل ژنراتور مربوط به بازه زمانی ۱۲ تا ۵ صبح می باشد. بیشترین کمترین توان تولیدی در بازه ۲۴ ساعته به ترتیب مربوط به واحد ۲۰ در ساعت ۸ شب با ۴۹۷ مگاوات و ساعت ۱۲

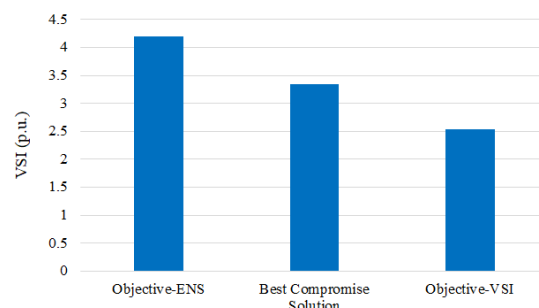
با توجه به شکل‌های (۱۶) و (۱۷)، مقدار شاخص پایداری ولتاژ برای بهترین راه‌حل مصالحه ۳/۳۰ پریونیت می‌باشد که بین مقادیر ۴/۲ پریونیت و ۲/۵ پریونیت مربوط به بهینه‌سازی انرژی توزیع نشده و شاخص پایداری ولتاژ است. همچنین، مقدار انرژی توزیع نشده برای بهترین راه‌حل سازش ۳۵۳/۵ کیلو وات ساعت بر سال است که بین مقادیر ۳۴۰ کیلو وات ساعت بر سال و ۳۷۵/۴۵ کیلو وات ساعت بر سال مربوط به بهینه‌سازی انرژی توزیع نشده و شاخص پایداری ولتاژ است. این نتایج کارایی روش پیشنهادی را در حل مسئله بهینه‌سازی چند هدفه اثبات می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

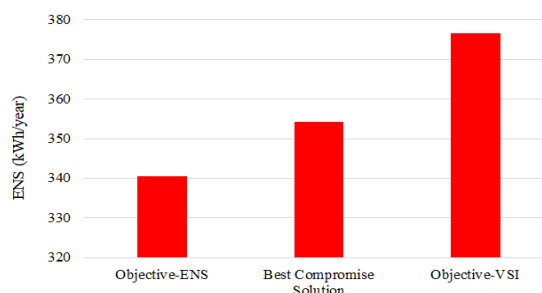
در این مطالعه، مسئله بازآرایی دینامیکی شبکه در حضور واحدهای تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره انرژی حل شده است. توابع پیشنهادی در این مطالعه شامل کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری و انرژی توزیع نشده و حداکثرسازی شاخص پایداری ولتاژ می‌باشد. به منظور حل مسئله بهینه‌سازی مورد نظر در این مطالعه، الگوریتم پیشنهادی روانشناسی آموزشی ارائه شده است. همچنین از تصمیم‌گیری فازی برای حل مسئله بهینه‌سازی در قالب چند هدفه استفاده شده است. روش بهینه‌سازی پیشنهادی بر روی دو شبکه ۳۳ و ۱۱۹ باسه تست شده است و نتایج آن با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی نظیر اجتماع ذرات و جهش قورباغه مقایسه شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، واضح است که الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر مانند اجتماع ذرات و جهش قورباغه به راه‌حل بهینه دست می‌یابد. نتایج حاصل از مقایسه روش پیشنهادی در این مقاله با سایر روش‌های بهینه‌سازی حاکی از دقت و کارایی بالای روش ارائه شده در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش قابلیت اطمینان نسبت به سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری است.



شکل ۱۵. توان اکتیو واحدهای ذخیره انرژی در هنگام شارژ و دشارژ در بیست و چهار ساعت



شکل ۱۶. مقایسه مقدار بهینه شاخص پایداری ولتاژ در بهینه‌سازی تک هدفه و دو هدفه



شکل ۱۷. مقایسه مقدار بهینه انرژی توزیع نشده در بهینه‌سازی تک هدفه و دو هدفه

با توجه به شکل (۱۵)، حداکثر میزان دشارژ و شارژ واحدهای ذخیره انرژی در بازه زمانی بیست و چهار ساعته به ترتیب مربوط به واحد ۴۲ و ۳۱ می‌باشد.

مراجع

- [1] P. Zhang, W. Li, and S. Wang, "Reliability oriented distribution network reconfiguration considering uncertainties of data by interval analysis," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 34, No. 1, pp. 138-144, 2012.
- [2] Azizivahed, A., Narimani, H., Fathi, M., Naderi, E., Safarpour HR, and Narimani, M.R., "Multi-objective dynamic distribution feeder reconfiguration in automated distribution systems," *Energy*, Vol. 147, pp.896-914, 2018.
- [3] Mahboubi-Moghaddam, E., Narimani, M.R., Khoban, M.H., Azizivahed, A., and Sharif, M., "Multi-objective distribution feeder reconfiguration to improve transient stability, and minimize power loss and operation cost

- using an enhanced evolutionary algorithm at the presence of distributed generations, " *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol.76, 2016, pp. 35-43.
- [4] T. Niknam, E. Azadfarsani, and M. Jabbari, "A new hybrid evolutionary algorithm based on new fuzzy adaptive PSO and NM algorithms for distribution feeder reconfiguration," *Energy Conversion and Management*, Vol. 54, No. 1, 2012, pp. 7-16.
- [5] M. Abdelaziz, "Distribution network reconfiguration using a genetic algorithm with varying population size," *Electric Power Systems Research*, Vol. 142, 2017, pp. 9-11.
- [6] M. Nick, R. Cherkaoui, and M. Paolone, "Optimal Planning of Distributed Energy Storage Systems in Active Distribution Networks Embedding Grid Reconfiguration," *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017.
- [7] M. Kaur and S. Ghosh, "Network reconfiguration of unbalanced distribution networks using fuzzy-firefly algorithm," *Applied Soft Computing*, Vol. 49, 2016, pp. 868-886.
- [8] R. Pegado, Z. Nãupari, Y. Molina, and C. Castillo, "Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective BPSO," *Electric Power Systems Research*, Vol. 169, 2019, pp. 206-213.
- [9] Alonso, F., D. Oliveira, and A.Z. de Souza, "Artificial immune systems optimization approach for multi-objective distribution system reconfiguration," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.30, No.2, 2015, pp. 840-847.
- [۱۰] قاسم میر بابایی، مسعود رادمهر و علیرضا ذکریازاده، "مدلسازی مدیریت منابع انرژی پراکنده در ریزشبکه با استفاده از روش توزیع شده" *مجله مدل سازی در مهندسی، سال هفدهم، شماره ۵۷، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۲۴۱-۲۵۲.*
- [۱۱] جمشید آقایی، امین رحیمی و محمد رضا کریمی، "هماهنگی نیروگاههای بادی و دستگاههای ذخیره ساز سیستم قدرت در مسئله ی برنامه ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها با استفاده از بهینه سازی استوار" *مجله مدل سازی در مهندسی، سال شانزدهم، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۲۰۷-۲۲۰.*
- [12] Azizivahed, A., Narimani, H., Naderi, E., Dathi, M., and Narimani, M.R., "A hybrid evolutionary algorithm for secure multi-objective distribution feeder reconfiguration," *Energy*, Vol.138, 2017, pp.355-373.
- [13] Siahbalaee, J., N. Rezanejad, and G.B. Gharehpetian, "Reconfiguration and DG Sizing and Placement Using Improved Shuffled Frog Leaping Algorithm, " *Electric Power Components and Systems*, Vol.47, 2020, pp. 1475-88.
- [14] H. Lotfi, A. Azizivahed, A. A. Shojaei, S. Seyedi, and M. F. B. Othman, "Multi-objective Distribution Feeder Reconfiguration Along with Optimal Sizing of Capacitors and Distributed Generators Regarding Network Voltage Security," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 49, 2021, pp. 652-68.
- [15] M. Sedighzadeh, M. Esmaili, and M. Mahmoodi, "Reconfiguration of distribution systems to improve reliability and reduce power losses using Imperialist Competitive Algorithm," *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 13, No. 3, 2017, pp. 287-302.
- [16] A. Viet Truong, T. Ngoc Ton, T. Thanh Nguyen, and T. Duong, "Two states for optimal position and capacity of distributed generators considering network reconfiguration for power loss minimization based on runner root algorithm," *Energies*, Vol. 12, No. 1, 2019, pp. 106.
- [17] H. Teimourzadeh and B. Mohammadi-Ivatloo, "A three-dimensional group search optimization approach for simultaneous planning of distributed generation units and distribution network reconfiguration," *Applied Soft Computing*, Vol. 88, 2020, pp. 106012.
- [18] Esmaeili, M., M. Sedighzadeh, and M. Esmaili, "Multi-objective optimal reconfiguration and DG (Distributed Generation) power allocation in distribution networks using Big Bang-Big Crunch algorithm considering load uncertainty, " *Energy*, Vol.103, 2016, pp. 86-99.
- [19] Bayat, A., A. Bagheri, and R. Noroozian, " Optimal siting and sizing of distributed generation accompanied by reconfiguration of distribution networks for maximum loss reduction by using a new UVDA-based heuristic method, " *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol.77, 2016, pp. 360-371.
- [20] Z. Li, S. Jazebi, and F. De León, "Determination of the optimal switching frequency for distribution system reconfiguration," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 32, No. 4, 2017, pp. 2060-2069.
- [21] F. Ding and K. A. Loparo, "Feeder reconfiguration for unbalanced distribution systems with distributed generation: a hierarchical decentralized approach," *IEEE Trans. Power Syst*, Vol. 31, No. 2, 2016, pp. 1633-1642.

- [22] Rahmani-Andebili, M., "Dynamic and adaptive reconfiguration of electrical distribution system including renewables applying stochastic model predictive control, " *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 11, No.16, 2017, pp. 3912-3921.
- [23] Ameli, A., Ahmadifar, A., Shriatkhah, Vakilian, M., M.H., and Haghifam, M.R., "A dynamic method for feeder reconfiguration and capacitor switching in smart distribution systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol.85, 2017, pp. 200-211.
- [24] M. Chakravorty and D. Das, "Voltage stability analysis of radial distribution networks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 23, No. 2, 2001, pp. 129-135.
- [25] H. Lotfi, "Multi-Objective Network Reconfiguration and Allocation of Capacitor Units in Radial Distribution System Using an Enhanced Artificial Bee Colony Optimization," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 49, No. 13-14, 2022, pp. 1130-42.
- [۲۶] علیرضا رحیمی، عباس دیده بان و رضا کی پور، "استراتژی کنترلی نوین در سیستمهای انرژی ترکیبی بادی-خورشیدی بر مبنای تعیین محدوددهای بهینه شارژ و دشارژ باتریها در بازههای زمانی مختلف" *مجله مدل سازی در مهندسی، سال شانزدهم، شماره ۵۵، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۱۶۳-۱۷۳.*
- [27] Das B, Mukherjee V, and Das D. " A new population-based optimization algorithm for solving optimization problems," *Advances in Engineering Software*, Vol.146, 2020, pp.102804.
- [28] Narimani MR, Azizivahed A, Azizpanah-Abarghoee R, and Javidsharifi M. "Enhanced gravitational search algorithm for multi-objective distribution feeder reconfiguration considering reliability, loss and operational cost". *IE Gen Transm Distrib*, Vol. 8, 2014, pp. 8:55e69.
- [29] A. Azizivahed, S. Ghavidel, M. J. Ghadi, L. Li, and J. Zhang, "New energy management approach in distribution systems considering energy storages," in 2017 20th international conference on electrical machines and systems (ICEMS), IEEE, 2017, pp. 1-6.
- [30] A. Azizivahed, M. Barani, S.-E. Razavi, S. Ghavidel, L. Li, and J. Zhang, "Energy storage management strategy in distribution networks utilised by photovoltaic resources," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 12, No. 21, 2018, pp. 5627-5638.
- [31] D. Zhang, Z. Fu, and L. Zhang, "An improved TS algorithm for loss minimum reconfiguration in large-scale distribution systems," *Electric Power Systems Research*, Vol. 77, No. 5-6, 2007, pp. 685-694.