



# Reconfiguration of Electricity Distribution Networks to Increase Resilience and Reliability Using Fuzzy Objective Functions and Game Theory

Mohamad Abedini\* , Hamed Moazami Godarzi 

\*Associate Professor, Faculty of Technology and Engineering, Ayatollah Boroujerdi University (RA), Boroujerd, Iran

(Received: 09/02/2024, Revised: 16/03/2024, Accepted: 29/06/2024, Published: 26/10/2024)

DOR: 20.1001.1.20086849.1403.15.3.3.4

## ABSTRACT

*Distribution networks, the final link in delivering electricity to consumers, often suffer from significant energy losses and voltage regulation issues, hindering overall system efficiency. Reconfiguring these networks offers a promising solution to address these challenges and accommodate the increasing integration of distributed generation sources. This article proposes a novel, multi-objective optimization method for distribution network reconfiguration. The method aims to achieve three primary objectives: minimizing energy losses, maximizing the utilization of distributed generation, and reducing unsupplied energy. By employing fuzzy logic and game theory, the method effectively navigates the complexities and potential conflicts among these objectives. A powerful particle swarm optimization algorithm is utilized to identify the optimal network configuration that simultaneously satisfies all objectives. The effectiveness of this method is demonstrated through its application to standard IEEE 33 and 69 bus networks. The results are highly encouraging, demonstrating reductions in energy losses, improved voltage stability, and minimized outages during disturbances.*

**Keywords:** Fuzzy, Resilience, Game Theory, Reliability, Rearrangement.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

**Publisher:** Imam Hussein University

 Authors



\* Corresponding Author Email: m.abedini@abru.ac.ir



پدافند غیرعامل

سال پانزدهم، شماره ۳، پیاپی ۱۴۰۳، (تابی ۵۹): صص ۲۷-۳۸

شاپای چاپی: ۶۹۴۹-۲۰۰۸ | شاپای الکترونیکی: ۸۰۳۰-۲۹۸۰

علمی - پژوهشی

## باز آرای شبکه‌های توزیع برق جهت افزایش تاب آوری و قابلیت

### اطمینان با استفاده از توابع هدف فازی و نظریه بازی

محمد عابدینی<sup>۱</sup>، حامد معظمی گودرزی<sup>۲</sup>

DOR: 20.1001.1.20086849.1403.15.3.3.4

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶

#### چکیده

شبکه‌های توزیع در سیستم قدرت بالاترین تلفات انرژی را به خود اختصاص می‌دهند و سبب کاهش بازده سیستم و نیز کاهش تنظیم ولتاژ مناسب می‌گردند، بنابراین یک روش مناسب برای کاهش تلفات شبکه و نیز افزایش تاب آوری در زمان وقوع حادثه در شبکه‌های توزیع باز آرای آن می‌باشد. به علاوه حضور انواع مختلف منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع سبب شده تا تجدید ساختاری با کمترین هزینه در شبکه‌های موجود مورد مطالعه قرار بگیرد. بنابراین در این مقاله یک روش بهینه‌سازی چند هدفه شامل کاهش تلفات شبکه توزیع، افزایش سطح نفوذ منابع تولید پراکنده و در نهایت کاهش میزان انرژی تأمین نشده با حفظ محدودیت‌های بهره‌برداری و فنی شبکه معرفی شده است. به علاوه با توجه به ماهیت مختلف توابع هدف از توابع فازی برای فازی سازی استفاده شده است و در نهایت ترکیب نظریه بازی‌ها و الگوریتم بهینه‌سازی حرکت پرندگان جهت پیدا کردن نقطه بهینه مسئله به عنوان نقطه نش ارائه شده است. نتایج بر روی دو شبکه ۳۳ و ۶۹ باس استاندارد IEEE پیاده‌سازی می‌گردد که نتایج حاکی از کاهش تلفات و افزایش سطح ولتاژ شبکه‌های مورد مطالعه و نیز کاهش میزان انرژی تأمین نشده در شبکه خواهد بود.

**کلیدواژه‌ها:** فازی، تاب آوری، نظریه بازی، قابلیت اطمینان، باز آرای

<sup>۱</sup> دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت ا... بروجردی (ره)، بروجرد، ایران (m.abedini@abru.ac.ir)-نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت ا... بروجردی (ره)، بروجرد، ایران



\* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

© نویسنده‌گان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

## ۱- مقدمه

شرکت‌های برق در حال به روز رسانی روش‌های برنامه‌ریزی برای ارائه توان الکتریکی بدون وقفه، بدون اعوجاج، پایدار و ارزان‌تر برای مصرف‌کنندگان هستند. پیکربندی شبکه توزیع بر روی تلفات توان، بهبود پروفایل ولتاژ و کاهش قطعی‌های سیستم تأثیر دارد [۱]؛ که در آن به جای گسترش شبکه توزیع موجود آن را دوباره بازآرایی می‌کنیم تا بهترین ساختار ممکن را با کمترین میزان تلفات و قطعی سیستم به دست آوریم [۲]. پیکربندی مجدد شبکه یک روش کم هزینه برای بهبود عملکرد سیستم توزیع است. اولین بار آقای مرلین و بک [۳] در سال ۱۹۷۵ در خصوص بازآرایی سیستم توزیع برای کاهش تلفات بحث کردند که در آن تمامی کلیدهای شبکه توزیع در ابتدا بسته بود در نتیجه در برخی قسمت‌ها شبکه به صورت مش در می‌آمد، سپس کلیدها به نحوی باز می‌گردید تا ساختار شعاعی شبکه با اهداف خواسته شده که عمدتاً کاهش تلفات سیستم بود تأمین گردد، بعدها از این روش به عنوان شاخه و مرز نام برده شد.

مقالات بسیاری در زمینه بازآرایی سیستم توزیع تا کنون ارائه شده است که برخی از این مقالات به صورت تک هدف و برخی از این مقالات به صورت چند هدفه بررسی شده‌اند. در مقالات تک‌هدفه، تابع هدف کاهش تلفات سیستم و بهبود ولتاژ می‌باشد که به صورت وزنی بهینه شده‌اند [۴ و ۵]. در برخی مقالات دیگر، توابع هدف به صورت چندهدفه بررسی گردیده است که در آن‌ها توابع هدف شامل تلفات سیستم، پایداری ولتاژ، کاهش انحراف ولتاژ، افزایش قابلیت اطمینان سیستم و کاهش نامتعادلی ولتاژ شبکه می‌باشد [۶ و ۷]. هم‌چنین روش‌های حل مختلفی نیز برای مسئله بازآرایی معرفی شده‌اند که برخی بر پایه روش‌های ریاضی و برخی دیگر بر پایه روش‌های فرا ابتکاری می‌باشند [۸-۱۶].

برخی از روش‌های که بر مفاهیم بهینه‌سازی ریاضی تکیه دارند عبارت‌اند از: روش‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح [۸] و اندازه‌گیری فاصله [۹] که به توجه به ماهیت غیرپیوسته و محدب مسئله بازآرایی، روش‌های ریاضی برای حل این مسئله چندان مناسب نیستند. از این روش‌های فرا ابتکاری جایگزین این روش‌ها شدند. برخی از تکنیک‌های فرا ابتکاری عبارت‌اند از الگوریتم ژنتیک [۱۰ و ۱۱]، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات باینری [۱۲ و ۱۳]، الگوریتم بهینه‌سازی بچه مورچه [۱۴]، روش بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی [۱۵]، بهینه‌سازی فاخته [۱۶] که برای حل مسئله بهینه‌سازی بازآرایی سیستم توزیع معرفی شده است.

در [۱۷] به کمک منابع تولید پراکنده و کلیدهای کنترل از راه دور تابع هدفی را جهت افزایش تاب آوری شبکه توزیع پیشنهاد می‌دهد که روش حل مسئله بهینه‌سازی معرفی شده بر

پایه برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح می‌باشد.

در [۱۸] سیستم مورد مطالعه را به ۸ ریز شبکه تقسیم‌بندی می‌کند و به هر کدام از این ریز شبکه‌ها منابع تولید پراکنده جهت افزایش تاب آوری تخصیص داده می‌شود و سپس به گونه‌ای با این ۸ ریز شبکه که می‌توانند به صورت پیوسته و نیز جزیره‌ای کار کنند رفتار می‌شود که در صورتی اتفاقی برای هر کدام از این شبکه‌ها در زمان حوادث رخ دهد و به هر دلیلی از شبکه اصلی قطع شوند این شبکه‌ها بتوانند به صورت جزیره‌ای کار کرده و پاسخگوی نیاز بارهای هر قسمت باشند. روش حل مسئله پیشنهادی نیز بر پایه بهینه‌سازی نهدگ می‌باشد.

در [۱۹] تأثیر متقابل حفاظت و بازآرایی شبکه توزیع را مورد مطالعه قرار داده است. محدودیت‌های هماهنگی رله‌های حفاظتی و فیوزها در این مطالعه فرمول‌بندی شده است و به مسئله بازآرایی اضافه می‌شود. علاوه بر این، معادلات غیرخطی مسئله بهینه‌سازی خطی شده است و در نهایت به کمک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط حل می‌شود.

در [۲۰] یک الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی بر پایه ژنتیک و فازی جهت بازآرایی سیستم توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و جبران‌کننده‌های توان راکتیو پیشنهاد شده است تا شرایط فنی و اقتصادی شبکه بهبود یابد.

در [۲۱] یک روش ساده برای محاسبه شاخص قابلیت اطمینان بر اساس حداقل کلیدهای مانور پیشنهاد شده است که تابع هدف ارائه شده شامل افزایش شاخص‌های قابلیت اطمینان و مینیمم سازی تلفات شبکه در حضور نیروگاه‌های بادی می‌باشد. مسئله بهینه‌سازی نیز بر اساس یک روش بهینه‌سازی فرا ابتکاری حل شده است.

در [۲۲]، بانک‌های خازنی شنت، تنظیم‌کننده‌های ولتاژ، تپ چنجر و نیز از منابع تولید پراکنده مبتنی بر سیستم‌های خورشیدی به عنوان وسایل کنترلی در بازآرایی شبکه برای به حداقل رساندن تلفات انرژی استفاده شده است، روش حل مسئله پیشنهاد شده نیز بر اساس الگوریتم گرگ خاکستری بهبود داده شده می‌باشد.

در [۲۳]، تجزیه و تحلیل و اعتبارسنجی اثرات ایستگاه‌های شارژ وسایل نقلیه الکتریکی بر روی بازآرایی شبکه توزیع مطالعه شده است. تابع هدف این مطالعات شامل هزینه سرمایه گذاری اولیه و همچنین فاکتورهای کیفیت توان می‌باشد.

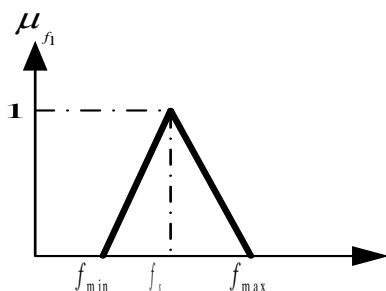
در [۲۴] روشی را برای به حداقل رساندن تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ شبکه‌های توزیع با بازآرایی شبکه و قراردادن بهینه خازن با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری فاخته و فرهنگی ارائه می‌کند. این مقاله با استفاده از روش باز و بسته کردن کلیدهای شبکه توزیع، ساختار شبکه توزیع را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که در ابتدا تمامی کلیدها بسته شوند. سپس یکی یکی باز می‌شوند و

مشخصات سیستم می‌گذارد از این رو در این مطالعه سطح توان تزریقی به عنوان یک تابع هدف فازی معرفی می‌گردد که در شکل (۱) نمایش داده شده است.

$$f_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i}}{\sum_{k=1}^{n_{Bus}} P_{load_k}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $P_{DG_i}$  بیان‌کننده میزان توان تزریقی واحد  $i$ ،  $P_{load_k}$  نشان‌دهنده بار در باس  $k$  می‌باشد.  $n_{DG}$  و  $n_{Bus}$  به ترتیب تعداد منابع تولید پراکنده و تعداد باس شبکه می‌باشند. به منظور فازی‌سازی معادله (۱) از رابطه (۲) استفاده شده است:

$$\mu_{f_1} = \begin{cases} 0 & f_1 < f_1^{\min} \\ \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_s - f_1^{\min}} & f_1^{\min} \leq f_1 \leq f_s \\ \frac{f_1^{\max} - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_s} & f_s \leq f_1 \leq f_1^{\max} \\ 0 & f_1 > f_1^{\max} \end{cases} \quad (2)$$



شکل (۱): تابع هدف فازی برای مدل‌سازی سطح نفوذ منابع تولید پراکنده

در رابطه (۲)  $\mu_{f_1}$  تابع عضویت فازی برای سطح نفوذ منابع تولید پراکنده سیستم می‌باشد.

## ۲-۲- تابع هدف تعیین تلفات شبکه توزیع

برای محاسبه تلفات سیستم از رابطه (۳) استفاده شده است:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{n_{Bus}} r_i \times \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (3)$$

عبارت‌اند از:  $P_i$  و  $Q_i$  که

$$P_i = |V_i| \left| \sum_{j=1}^{n_{Bus}} |V_j| (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) \right| \quad i=1, \dots, n_{Bus}$$

$$Q_i = |V_i| \left| \sum_{j=1}^{n_{Bus}} |V_j| (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) \right| \quad i=1, \dots, n_{Bus}$$

هر حالت کمترین تلفات را داشته باشد این حالت به‌عنوان بهترین توپولوژی انتخاب می‌شود.

در [۲۵]، تجزیه و تحلیل تقاضاهای پیک و بارگذاری مختلف بار شبکه را برای بهینه‌سازی بازآرایی، جابجایی خازن و منابع تولید پراکنده برای کاهش تلفات به‌طور هم‌زمان ارائه می‌کند.

در این مطالعه بازآرایی سیستم توزیع برای کاهش تلفات و نیز بهبود سطح نفوذ منابع تولید پراکنده به علاوه کاهش قطعی مشترکین هدف‌گیری شده است که با تغییر حالت باز و بستن سوئیچ‌ها و تعیین مکان و ظرفیت مناسب منابع تولید پراکنده به دست می‌آید. برای حل مسئله پیشنهاد شده نیز با توجه به اینکه تابع هدف پیشنهادی دارای سه ترم می‌باشد و روش‌های فرا ابتکاری موجود ممکن است در نقطه بهینه محلی قرار بگیرند بنابراین از روش ترکیبی نظریه بازی و الگوریتم حرکت پرندگان استفاده شده است، هم‌چنین توابع هدف به صورت فازی مدل‌سازی شده‌اند تا بتوانند نقطه تعادل نش را که در واقع بهترین جواب مسئله بهینه‌سازی می‌باشد را پیدا کند.

بخش‌های ادامه مقاله عبارت‌اند از: در قسمت دوم مدل‌سازی توابع هدف آورده شده است. معرفی روش حل مسئله پیشنهاد شده بر پایه نظریه بازی‌ها و روش بهینه‌سازی حرکت پرندگان در بخش سوم بیان می‌گردد و در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی بحث خواهد شد.

## ۲- مدل‌سازی توابع هدف

در این قسمت مدل ریاضی از توابع هدف مسئله ارائه می‌گردد که شامل مینیم‌سازی تلفات شبکه، مینیم‌سازی قطع برق مشترکین و مینیم‌سازی ظرفیت نفوذ منابع تولید پراکنده در شبکه می‌باشد به علاوه قیود تساوی و نامساوی حاکم بر مسئله بهینه‌سازی نیز آورده شده است.

متغیرهای حاکم بر مسئله بازآرایی سیستم نیز شامل مکان و ظرفیت نصب منابع تولید پراکنده، وضعیت باز و بسته بودن کلیدها و خطوط کمکی خواهد بود. در این مقاله توابع هدف به صورت فازی مدل‌سازی شده است تا بتوان بازه گسترده‌تری از متغیرها را مورد مطالعه قرار داد و نیز بتوان توابع هدف را که به صورت غیرخطی می‌باشند را بدین روش خطی نمود به علاوه با توجه به بعد مختلف توابع هدف، با به‌کارگیری توابع فازی آن‌ها را در واقع به صورت بی‌بعد مورد استفاده قرار می‌دهیم.

## ۲-۱- تابع هدف تعیین سطح نفوذ منابع تولید پراکنده

در برخی از مقالات نویسندگان سطح نفوذ منابع توان را به عنوان یکی از توابع هدف مورد مطالعه قرار داده‌اند [۲۶]، زیرا که سطح توان تزریقی از منابع تولید پراکنده تاثیر بسزایی در بهبود

خاموش شده از منبع اصلی یا دیگر منابع، محاسبه می‌شود. در نهایت، با جمع کردن این مقادیر، ENS کل سیستم به دست می‌آید [۲۷]. در دو حالت برای حضور کلیدها و DG ها و در غیاب این تجهیزات، ENS از رابطه (۶) استفاده می‌شود [۲۸]:

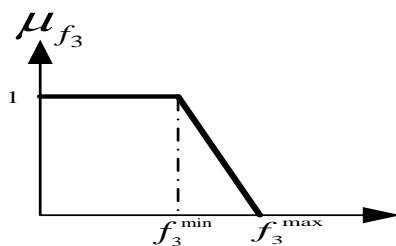
$$ENS_i = P_{load_i} \sum_{i,j \in n_{Bus}, i \neq j} (L_{i,j} \times B_{i,j} \times \Delta t_{i,j}) \quad (6)$$

$B_{i,j}$  نرخ خطا بین گره  $i$  و  $j$  برحسب (fail/year) است،  $\Delta t_{i,j}$  میانگین رفع خطا در شاخه بین گره  $i$  و  $j$  نشان می‌دهد (h/fail) و  $L_{i,j}$  طول خط بین گره  $i$  و  $j$  برحسب (km) است.  $P_{load_i}$  بار پیک سیستم در باس  $i$  می‌باشد. از فرمول زیر می‌توان برای محاسبه ENS کل شبکه توزیع استفاده کرد:

$$f_3 = \frac{\sum_{i=1}^{n_{Bus}} ENS_{optimized}}{\sum_{i=1}^{n_{Bus}} ENS_{base}} \quad (7)$$

که در رابطه (۷) مقدار انرژی تأمین نشده برای تمامی گره‌های سیستم قبل و بعد از نصب و منابع تولید پراکنده و بازآرایی محاسبه می‌گردد.  $f_3$  نیز تابع هدف انرژی تأمین نشده سیستم می‌باشد. به منظور فازی سازی معادله (۷) از رابطه (۸) استفاده شده است که در شکل (۳) نمایش داده شده است:

$$\mu_{f_3} = \begin{cases} 1 & f_3 \leq f_3^{\min} \\ \frac{f_3^{\max} - f_3}{f_3^{\max} - f_3^{\min}} & f_3^{\min} \leq f_3 \leq f_3^{\max} \\ 0 & f_3 > f_3^{\max} \end{cases} \quad (8)$$



شکل (۳): تابع هدف فازی برای مدل سازی انرژی تأمین نشده در حضور منابع تولید پراکنده

در رابطه (۸)  $\mu_{f_3}$  تابع عضویت فازی برای انرژی تأمین نشده در حضور منابع تولید پراکنده می‌باشد.

## ۲-۴- قیود حاکم بر مسئله بهینه‌سازی

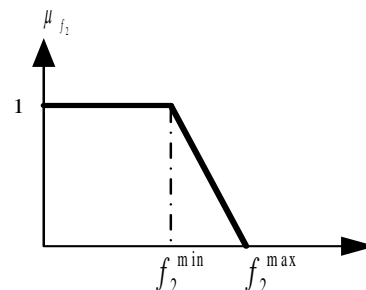
تجزیه و تحلیل پخش بار باید در بازآرایی مجدد شبکه توزیع مورد استفاده قرار بگیرد که برای تعیین ولتاژهای گرهی، تلفات توان و

در روابط (۳)،  $|V_j|$  و  $|V_i|$  به ترتیب ولتاژ باس فرستنده و گیرنده می‌باشد که در آن  $n_{Bus}$  تعداد باس‌ها است،  $P_i$  و  $Q_i$  به ترتیب توان حقیقی و راکتیو در باس فرستنده هستند،  $G_{ij}$  و  $B_{ij}$  به ترتیب قسمت‌های حقیقی و موهومی عنصر  $Y_{ij}$  در ماتریس ادمیتانس  $Y_{bus}$  هستند و  $\delta_i$  و  $\delta_j$  به ترتیب زاویه ولتاژ در باس‌های فرستنده و گیرنده هستند.  $r_i$  نیز بیان‌کننده مقاومت شاخه  $i$  می‌باشد.

$$f_2 = \frac{P_{optimized}^{loss}}{P_{base}^{loss}} \quad (4)$$

در معادله (۴)  $P_{optimized}^{loss}$  بیان‌کننده تلفات شبکه بعد از نصب منابع تولید پراکنده در فرآیند بازآرایی سیستم در هر تکرار است و  $P_{base}^{loss}$  تلفات شبکه در حالت پایه می‌باشد.  $f_2$  نیز تابع هدف تلفات سیستم می‌باشد. به منظور فازی سازی معادله (۴) از رابطه (۵) استفاده شده است که در شکل (۲) نمایش داده شده است:

$$\mu_{f_2} = \begin{cases} 1 & f_2 \leq f_2^{\min} \\ \frac{f_2^{\max} - f_2}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} & f_2^{\min} \leq f_2 \leq f_2^{\max} \\ 0 & f_2 > f_2^{\max} \end{cases} \quad (5)$$



شکل (۲): تابع هدف فازی برای مدل سازی تلفات سیستم در حضور منابع تولید پراکنده

در رابطه (۴)  $\mu_{f_2}$  تابع عضویت فازی برای تلفات سیستم در حضور منابع تولید پراکنده می‌باشد.

## ۲-۳- تابع هدف میزان انرژی تأمین نشده

انرژی تأمین نشده (ENS) معیاری است که برای اندازه‌گیری میزان انرژی از دست رفته در اثر خطا یا خرابی در شبکه استفاده می‌شود. ENS بر حسب مگاوات ساعت (MWh) اندازه‌گیری می‌شود. به منظور محاسبه مقدار ENS از روشی بر پایه مد خطا و تحلیل اثر آن استفاده می‌شود. در ابتدا هر یک از مدهای خطا که در اینجا تنها عیب خطوط است، به شکل جداگانه در نظر گرفته می‌شود. برای وقوع یک خطا در هر خطوط مقدار ENS با لحاظ تاثیر ساختار شبکه، وجود کلیدها، همچنین، امکان تغذیه بارهای

رویکردهای مبتنی بر پارتو اساساً برای بازی‌های مشارکتی استفاده می‌شوند که در آن بازیکنان برای حل یک بهینه‌سازی چند هدفه مشترک با یکدیگر همکاری می‌کنند. گاهی اوقات، بازی قابلیت همکاری را ندارد و هر بازیکن می‌خواهد هدف خود را بهینه کند. تعادل نش راه‌حل یک بازی غیرهمکاری برای مسائل بهینه‌سازی چند هدفه است.

نش اصطلاحی است که در نظریه بازی‌ها استفاده می‌شود که یک مفهوم راه‌حل در نظریه بازی است که وضعیتی را توصیف می‌کند که در آن هیچ بازیکنی نمی‌تواند با تغییر یک طرفه استراتژی خود، با توجه به استراتژی‌های سایر بازیکنان، سود خود را بهبود بخشد [۳۰].

از دید ریاضی، یک جفت استراتژی  $(X^*, Y^*) \in E \times F$  به شرطی تعادل نش خواهد بود که داشته باشیم:

$$f_E(X^*, Y^*) = \inf_{x \in E} f_E(x, Y^*) \quad (15)$$

$$f_F(X^*, Y^*) = \inf_{y \in F} f_F(X^*, y) \quad (16)$$

### ۳-۲- ترکیب الگوریتم حرکت پرنندگان و نظریه بازی‌ها

فرض کنید که  $S = (X, Y)$  نشان‌دهنده یک جواب بهینه برای یک مسئله بهینه‌سازی با دو تابع هدف  $f_1(x, y)$  و  $f_2(x, y)$  باشد. در این مقاله به کمک روش بهینه‌سازی الگوریتم پرنندگان [۳۱] دو دسته جمعیت برای بازیکنان تولید می‌شود.

وظیفه بهینه‌سازی بازیکن اول توسط جمعیت اول انجام می‌شود، در حالی که وظیفه بازیکن دوم توسط جمعیت دوم انجام می‌شود.  $X$  نشان‌دهنده زیرمجموعه متغیرهایی است که توسط بازیکن اول مدیریت می‌شود و در امتداد تابع هدف اول بهینه‌سازی می‌شود. به‌طور مشابه،  $Y$  نشان‌دهنده زیرمجموعه‌ای از متغیرهایی است که توسط بازیکن دوم مدیریت می‌شوند و بر اساس تابع هدف دوم بهینه می‌شوند. از این رو، بازیکن اول  $f_1$  را با توجه به تابع هدف اول از طریق بازسازی جمعیت اول به روش الگوریتم پرنندگان برای  $X$  بهینه می‌کند، در حالی که  $Y$  ثابت است.

به‌طور مشابه، بازیکن دوم  $f_2$  را با توجه به تابع هدف دوم با بازسازی جمعیت دوم به روش الگوریتم پرنندگان برای  $Y$  بهینه می‌کند، در حالی که  $X$  ثابت است. در هر نسل  $n$ ، بهترین مقدار یافت شده توسط بازیکن دیگر در نسل  $n-1$  به عنوان پارامترهای ثابت استفاده می‌شود؛ به عبارت دیگر،  $X_{n-1}$  بهترین مقدار یافت شده توسط بازیکن اول در نسل  $n-1$  و  $Y_{n-1}$  بهترین مقدار یافت شده توسط بازیکن دوم در نسل  $n-1$  است. در نسل  $n$ ، بازیکن اول  $X_n$  را در حین استفاده از  $Y_{n-1}$  به منظور ارزیابی  $f_1$  بهینه می‌کند.

جریان شاخه‌ها پیاده‌سازی خواهد شد. در اینجا محدودیت‌های تابع هدف موجود که باید در معادلات پخش بار لحاظ گردد آورده شده است:

### ۱) محدودیت ولتاژ باس‌ها

مطالعات نشان می‌دهد که بیشتر نوسانات و قطعی ولتاژ در سیستم به شبکه توزیع نسبت داده می‌شود. با این حال، می‌توان با طراحی صحیح شبکه توزیع بر این امر غلبه کرد؛ بنابراین، ولتاژ باید در محدوده عملیاتی حفظ شود.

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, n_{Bus} \quad (9)$$

### ۲) محدودیت جریان شاخه‌ها

جریان عبوری از هر شاخه نباید از حداکثر حد مجاز جریان انشعاب تجاوز کند.

$$I_i \leq I_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, n_{branch} \quad (10)$$

### ۳) محدودیت‌های واحد تولید پراکنده

$$\sum_{k=1}^{n_{DG}} P_{DG,k} = P_{T,DG} \leq P_{load} \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^{n_{DG}} Q_{DG,k} = Q_{T,DG} \leq Q_{load} \quad (12)$$

توان اکتیو ( $P_{T,DG}$ ) و راکتیو ( $Q_{T,DG}$ ) کل توان تزریق شده توسط واحد تولید پراکنده باید از تقاضای کل بار اکتیو ( $P_{load}$ ) و راکتیو ( $Q_{load}$ ) کمتر باشد.

### ۴) محدودیت شعاعی بودن شبکه

برای داشتن شرایط مطلوب عملیاتی، سیستم توزیع باید در پیکربندی شعاعی عمل کند از این رو از پخش بار پس‌رو-پیش‌رو استفاده شده است که در آن باس‌های اصلی (مادر) که انشعابات شبکه را شامل می‌شود شناسایی و از روی آن باس‌های هر قسمت که متصل به باس مادر هستند ساخته می‌گردد تا بتوان از انتها به سمت ابتدای باس مادر محاسبات پخش بار را انجام داد. چنان چه در این میان کلیدهای بسته‌شده تشکیل یک حلقه را بدهند حذف می‌گردند تا شاخه‌های موجود در هر باس مادر فاقد حلقه بمانند.

### ۳- روش حل مسئله بهینه‌سازی

#### ۳-۱- نظریه بازی‌ها

نظریه بازی‌ها شاخه‌ای از ریاضیات است که به مطالعه رفتار افراد در موقعیت‌های استراتژیک می‌پردازد. جان فون نویمان و اسکار مورگنسترن [۲۹] را بنیان‌گذاران نظریه بازی‌ها می‌دانند.

- خواندن اطلاعات شبکه مورد مطالعه شامل مقاومت خطوط، اطلاعات بار وضعیت کلیدها
- مقاردهی مقادیر مینیمم و ماکزیمم بازیکنان معرفی شده.
- تولید سه گروه جمعیت اولیه به عنوان بازیکن برای مینیمم سازی تلفات سیستم، مینیمم سازی هزینه قطع مشترکین و درصد نفوذ منابع تولید پراکنده.
- $X_j^i = [X_{\min,j} + (X_{\max,j} - X_{\min,j}) \times \text{rand}] \quad i=1, \dots, 3 \quad j=1, \dots, N$
- که  $i$  نشان دهنده تعداد بازیکنان مسئله نظریه بازی و  $N$  تعداد متغیرهای مسئله است.
- اجرایی پخش بار به روش پیشرو - پسرو و بهینه سازی تابع هدف اول در حالی که دو بازیکن دوم ثابت می باشند.
- بهینه کردن بازیکن دوم با توجه به تابع هدف دوم با بازسازی جمعیت دوم به روش الگوریتم پرندگان در حالی که بازیکن اول و سوم ثابت است.
- بهینه کردن بازیکن سوم با توجه به تابع هدف سوم با بازسازی جمعیت سوم به روش الگوریتم پرندگان در حالی که بازیکن اول و دوم ثابت است.
- به روز رسانی بازیکنان با توجه به معادله (۱۷) و (۱۸) و مجدد بهینه سازی هر تابع هدف
- بررسی تعادل نش مطابق روابط (۱۵) و (۱۶)

#### ۴- شبیه سازی و نتایج

در این قسمت به منظور نمایش دادن عملکرد روش پیشنهادی دو شبکه تست ۳۳ باس و ۶۹ باس IEEE را استفاده می کنیم. سه واحد DG با مقادیر توان اکتیو اسمی در محدوده از ۰/۲ تا ۱ مگاوات و ضریب توان ۰/۹ پس فاز در نظر گرفته شده است. مدت زمان رفع خطا نیز (h/fail) ۶ در نظر گرفته شده است. نرخ خطا نیز (fail/year) ۰/۱۲ فرض شده است. سایر اطلاعات مربوط به محاسبه ENS در مرجع [۳۷] آورده شده است. سایر اطلاعات سیستم ۳۳ و ۶۹ باس مربوط به بارهای گره ها و اطلاعات خطوط این دو شبکه در مراجع [۳۴، ۳۵، ۳۶] داده شده اند. پارامترهای PSO نیز عبارتند از  $R_{1,2}$  به صورت اعداد تصادفی در بازه ۰ تا ۱ انتخاب می شوند. ثابت های  $C_1$  و  $C_2$  نیز به ترتیب ۲/۰۵ و ۱/۱۵ در نظر گرفته شده است. ثابت  $\omega$  نیز ۰/۹۸ مدل شده است. در نهایت تعداد جمعیت نیز ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. دو سناریو مدنظر قرار گرفته شده است.

#### ۴-۱- شبکه تست ۳۳ باس

##### ۴-۱-۱- سناریو اول: بدون نصب منابع تولید پراکنده

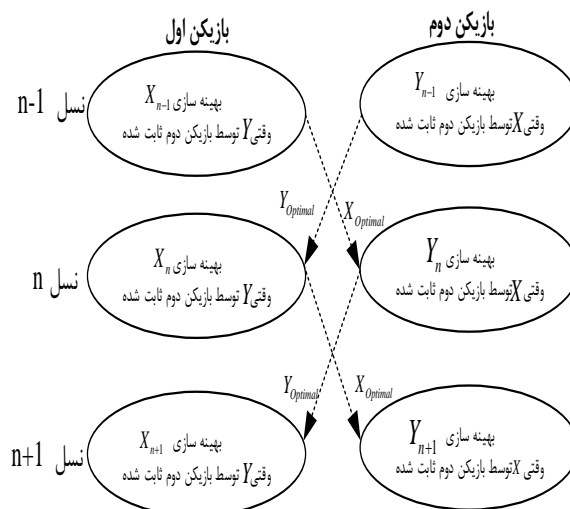
این شبکه دارای ۵ کلید مانور باز است که به ترتیب در شکل (۵) با شماره های ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷ و ۳۸ نمایش داده شده است. بار

در همان زمان، بازیکن دوم  $Y_n$  را در حین استفاده از  $X_{n-1}$  به منظور ارزیابی  $f_2$  بهینه می کند. پس از فرآیند بهینه سازی، بازیکن اول بهترین مقدار  $X_n$  را به بازیکن دوم که از آن در نسل  $n-1$  استفاده خواهد کرد، ارسال می کند. تعادل نش زمانی حاصل می شود که هیچ یک از بازیکنان نتوانند عملکرد تابع هدف خود را بیشتر بهبود بخشند. حال در این مقاله سه تابع هدف فازی معرفی شده است که توسط سه بازیکن متفاوت توسط الگوریتم حرکت پرندگان تولید شده و در هر مرحله توسط بردار سرعت داده شده در معادله (۱۷) به روز می گردد و در نهایت توسط معادله (۱۸) جمعیت جدید تولید می گردد.

$$V_{n+1}^i = \omega V_n^i + \alpha_1 R_{1t}^i (p_t^i - x_n^i) + \alpha_2 R_{2t}^i (g_n^i - x_n^i) \quad (17)$$

$$X_i(n+1) = X_i(n) + V_i(t+1) \quad (18)$$

بنابراین، ضرایب  $\omega$ ،  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  تأثیرات سرعت قبلی، تأثیر شناختی و تأثیر اجتماعی بر حرکت ذره را به ترتیب کنترل می کنند.  $R_{1t}^i$  و  $R_{2t}^i$  ماتریس های تصادفی هستند که برای هر ذره در هر تکرار تولید می شوند. ساختار کلی الگوریتم ترکیبی حرکت پرندگان و تعادل نش در شکل (۴) آورده شده است.



شکل (۴): الگوریتم ترکیبی پرندگان و تعادل نش

در این مقاله بازیکنان شامل مکان نصب منابع تولید پراکنده و باز و بسته کردن کلیدها در شبکه مورد مطالعه خواهد بود. راهبردها نیز توسط الگوریتم حرکت پرندگان برای ترکیب های مختلف این سه بازیکن تولید و به روز رسانی خواهد شد. مراحل روش پیشنهادی در ادامه آورده شده است.

- مقاردهی اولیه پارامترهای روش بهینه سازی شامل  $\omega$ ،  $\alpha_1$  و

$$\alpha_2 \text{ و } R_{1t}^i \text{ و } R_{2t}^i$$

جدول (۱): مقایسه‌ای میان روش‌های مختلف بازآرایی سیستم ۳۳ باس بر حسب مینیمم سازی تلفات

روش	شاخص	SSA [۳۶]	[۳۷]	[۳۸]	روش پیشنهادی [۳۹]	حالت پایه [۴۰]
مینیمم ولتاژ (p.u.)		۰/۹۱۳۱	۰/۹۱۳۱	۰/۹۱۳۱	۰/۹۱۳۱	۰/۹۱۳۱
تلفات (Kw)		۱۳۸	۱۳۹/۵۵	۱۳۹/۵۵	۱۳۹/۵۵	۲۱۱
کلیدهای باز		۷	۷	۷	۷	۳۳
		۹	۹	۹	۹	۳۴
		۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۳۵
		۳۲	۲۸	۳۲	۳۲	۳۶
		۳۷	۳۲	۳۷	۳۷	۳۷

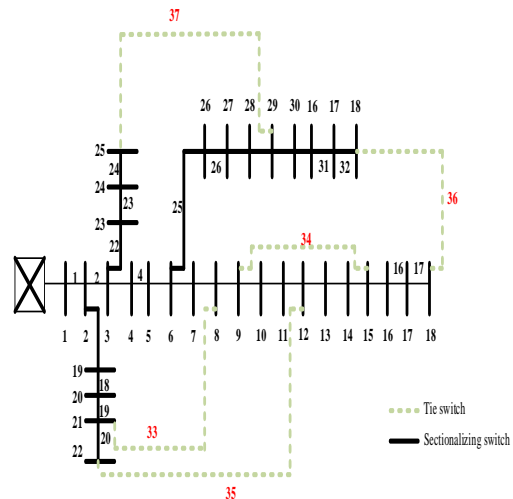
۴-۱-۲- سناریو دوم: نصب منابع تولید پراکنده

در این حالت دو متغیر مکان و ظرفیت منابع تولید پراکنده نیز به مسئله بازآرایی سیستم توزیع استفاده شده است و به عبارت دیگر تعداد متغیرهای مسئله از ۵ به ۱۱ تغییر پیدا کرده است.

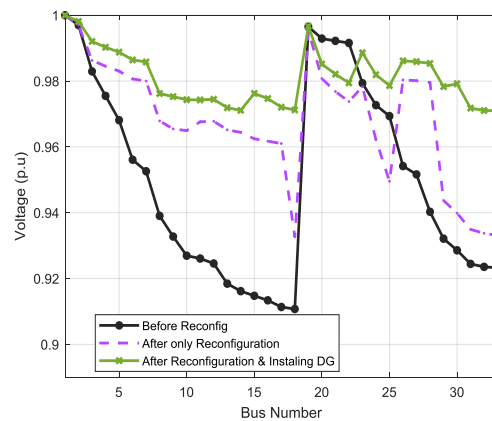
جدول (۲): مقایسه‌ای میان روش‌های مختلف بازآرایی و جایابی منابع تولید پراکنده در سیستم ۳۳ باس بر حسب مینیمم سازی تلفات

روش	شاخص	SSA [۳۶]	FWA [۳۷]	CSA [۳۸]	روش پیشنهادی [۳۹]	حالت پایه [۴۰]
مینیمم ولتاژ (p.u.)		۰/۹۷۶۲	۰/۹۷۱۳	۰/۹۷۰۰	۰/۹۷۰۲	۰/۹۱۳۱
تلفات (Kw)		۵۵/۲۸	۶۷/۱۱	۷۳/۰۵	۵۲/۰۵	۲۱۱

اکتیو شبکه ۳،۷۲ مگاوات و بار راکتیو شبکه ۲،۳ مگاوار می‌باشد. تلفات سیستم نیز ۲۱۱ کیلووات می‌باشد. در این مرحله در جدول (۱) نتایج ناشی از بازآرایی شبکه بدون نصب منابع تولید پراکنده تنها برای کاهش تلفات نمایش داده شده است، همچنین مینیمم ولتاژ شبکه و تلفات سیستم جهت مقایسه با روش‌های دیگر آورده شده است. در جدول (۱) نیز مقایسه‌ای میان روش پیشنهادی و روش‌های ارائه شده در مراجع دیگر آورده شده است که همگی برای شبکه ۳۳ باس زمانی که هدف تنها بازآرایی سیستم با کاهش تلفات باشد کلیدهای باز شده را ۷، ۹، ۱۴، ۳۲ و ۳۷ به دست آورده‌اند. لازم به ذکر است که علت تغییرات ناچیز در تلفات ولتاژ در هر چهار روش به علت روش پخش بار استفاده شده می‌باشد. در شکل (۶) نیز پروفایل ولتاژ سیستم برای حالت قبل و بعد از بازآرایی آورده شده است که نشان می‌دهد ولتاژ باس ۱۸ که دارای مقدار مینیمم ۰/۹۱ پریونیت می‌باشد به مقدار ۰/۹۵ پریونیت تغییر پیدا کرده است، ولتاژ سایر باس‌های شبکه نیز بهبود داده شده است.



شکل (۵): شبکه تست ۳۳ باس

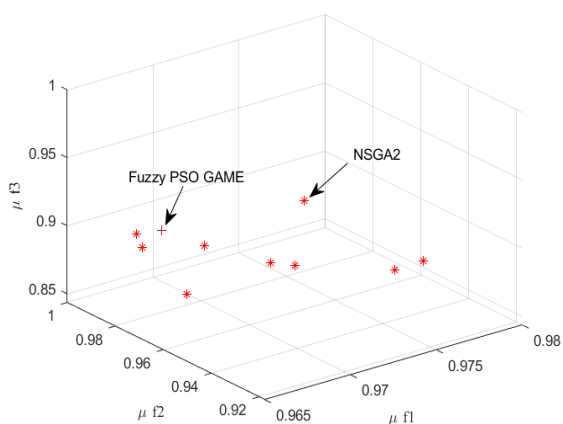


شکل (۶): پروفایل ولتاژ سیستم ۳۳ باس قبل و بعد از بازآرایی



جدول (۳): مقایسه‌ای میان روش‌های مختلف بازاریابی و جایابی منابع تولید پراکنده در سیستم ۳۳ باس بر پایه بهینه‌سازی چند هدفه

روش شاخص	روش	حالت پایه	روش پیشنهادی	NSGA2 [۳۷]	FWA [۳۴]	CSA [۳۳]
تلفات (KW)	۱۶/۶۵	۱۷/۶۷	۱۹/۶۴	۲۱/۶۵	۲۸/۶۵	۲۸/۶۴
تلفات (KW)	۳۴/۴۵	۴۰/۴۵	۵۵/۰۹۹۳	۲۱	۲۹/۲۷۵۵	۲۹
تولید منابع تولید پراکنده	۱/۸۹۸	۱/۶۶۵	۲/۰۱۹	۰	۱/۹۶۴	۱/۹۶۴
مینیمم ولتاژ (p.u.)	۰/۹۷۸۱	۰/۹۷۴۱۲	۰/۹۷۶۲	۰/۹۱۳۱	۰/۹۸۳۲	۰/۹۸۳۲
کلیه‌های باز	۷	۷	۸	۳۳	۷	۳۳
کلیه‌های باز	۱۴	۸	۱۲	۳۴	۱۱	۳۴
کلیه‌های باز	۱۷	۱۴	۲۰	۳۵	۱۲	۳۵
کلیه‌های باز	۲۵	۲۸	۳۲	۳۶	۲۷	۳۶
کلیه‌های باز	۳۵	۳۲	۳۷	۳۷	۳۲	۳۷
مکان منابع تولید پراکنده	۱۱	۱۱	۱۲	—	۱۴	۱۴
مکان منابع تولید پراکنده	۲۹	۱۵	۱۳	—	۳۰	۳۰
مکان منابع تولید پراکنده	۳۰	۳۰	۳۲	—	۳۱	۳۱
ظرفیت منابع تولید پراکنده	۰/۵۴۷	۰/۴۱۵	۱/۰۱۲	—	۰/۹۳۸	۰/۹۳۸
ظرفیت منابع تولید پراکنده	۰/۶۳۶	۰/۲۲۵	۰/۴۰۵	—	۰/۵۳۴	۰/۵۳۴
ظرفیت منابع تولید پراکنده	۰/۷۱۵	۱/۰۲۵	۰/۶۰۲	—	۰/۴۹۲	۰/۴۹۲



شکل (۷): مقایسه‌ای میان جواب‌های روش پیشنهادی و NSGA2

روش	SSA [۳۶]	FWA [۳۴]	CSA [۳۳]	روش پیشنهادی	حالت پایه	شاخص
کلیه‌های باز	۷	۲۸	۲۲	۷	۳۳	۳۳
	۹	۱۷	۲۸	۸	۳۴	۳۴
	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۳۵	۳۵
	۲۸	۱۱	۱۰	۲۸	۳۶	۳۶
	۸	۸	۷	۳۴	۳۷	۳۷
مکان منابع تولید پراکنده	۸	۳۲	۳۲	۳۰	—	—
	۲۴	۲۹	۳۱	۳۱	—	—
ظرفیت منابع تولید پراکنده	۳۰	۱۸	۳۰	۱۵	—	—
	۰/۱۰۲۷	۰/۵۳۷۶	۰/۵۲۵۸	۰/۶۴۲	—	—
ظرفیت منابع تولید پراکنده	۰/۱۱۸۰	۰/۶۱۵۸	۰/۵۵۸۶	۰/۳۰۱	—	—
	۰/۸۳۷۰	۰/۵۳۱۵	۰/۵۸۴۰	۰/۳۶۱	—	—

در جدول (۲) نتایج برای حالتی که تنها تابع هدف مینیمم سازی تلفات شبکه ۳۳ باس باشد آورده شده است و نتایج با سه مرجع دیگر که عبارت‌اند از: الگوریتم بهینه‌سازی فاخته [33] (CSA)، الگوریتم آتش‌بازی [34] (FWA) و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام سالپ (SSA) مقایسه شده است. همان‌گونه که از جدول دیده می‌شود روش پیشنهادی دارای تلفات کمتری در مقایسه با سه روش دیگر می‌باشد. پروفایل ولتاژ نیز در شکل (۶) رسم شده است. در جدول (۳) نتایج توابع هدف ارائه‌شده در این مقاله آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، روش ترکیبی فازی ارائه‌شده به خوبی توانسته است مسئله داده شده را حل نماید؛ زیرا که مینیمم سطح ولتاژ سیستم به ۰/۹۸۳۲ پریونیت رسیده است که ۷/۷ درصد افزایش را بیان می‌کند. تلفات سیستم نیز به ۲۹/۲۷ کیلووات کاهش داشته است که در واقع ۸۶/۱۲ درصد را تجربه کرده است و در نهایت مقدار انرژی تأمین نشده سیستم نیز از مقدار پایه ۱۲۵/۱۲ کیلووات به ۱۱/۲۴ کیلووات کاهش یافته است. به علاوه در مقایسه با روش‌های بهینه‌سازی جدیدی هم چون بهینه‌سازی فاخته (CSA) [۳۳]، بهینه‌سازی آتش‌بازی (FWA) [۳۴] و روش NSGA2 [۳۷] نتایج به دست آمده مقدار مطلوب‌تری را دارند.

<sup>1</sup> Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA2)

جدول (۴) دیده می‌شود که بعد از بازآرایی سیستم تلفات در هر چهار روش ۵۵ درصد کاهش پیدا کرده است.

جدول (۴): مقایسه‌ای میان روش‌های مختلف بازآرایی سیستم ۶۹ باس بر حسب مینیمم سازی تلفات

شاخص	روش	حالت پایه	روش پیشنهادی	SFS [۳۸]	(SSOE) [۳۹]	[۴۰]
مینیمم ولتاژ (p.u.)	۰/۹۰۹۳	۰/۹۴۹۱	۰/۹۴۷۸	۰/۹۴۷۸	۰/۹۴۷۸	۰/۹۴۷۸
تلفات (KW)	۲۲۵	۱۲۶/۷۶	۶۹/۶۶	۶۹/۶۶	۶۹/۶۶	۶۹/۶۶
کلیدهای باز	۶۹ ۷۰ ۷۱ ۷۲ ۷۳	۱۲ ۵۶ ۶۱ ۶۹ ۷۰	۱۴ ۵۵ ۶۱ ۶۹ ۷۰	۱۳ ۵۷ ۶۱ ۶۹ ۷۰	۱۳ ۵۷ ۶۱ ۶۹ ۷۰	۱۳ ۵۷ ۶۱ ۶۹ ۷۰

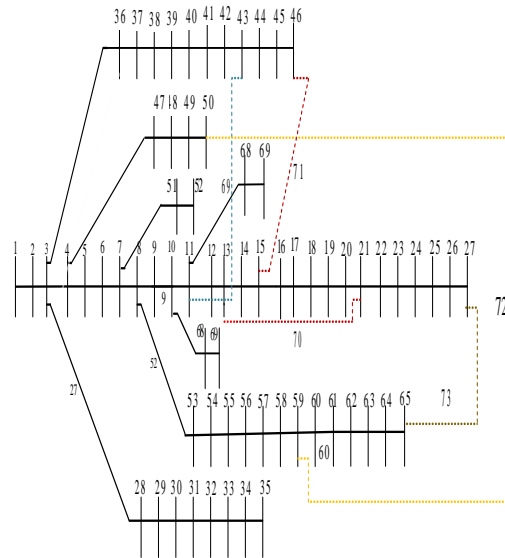
#### ۴-۲-۲- سناریو دوم: با نصب منابع تولید پراکنده

در این سناریو سه منبع تولید پراکنده با ضریب قدرت ۰/۹ پس فاز در شبکه ۶۹ باس مشابه ۳۳ باس جایابی می‌گردد و نتایج آن با مراجع داده شده در جدول (۵) مقایسه شده است. لازم به ذکر است در جدول (۵) تابع هدف مینیمم کردن تلفات می‌باشد تا عملکرد روش بهینه‌سازی فازی قابل مقایسه کردن باشد. در شکل (۹) نیز مقایسه‌ای میان پروفایل ولتاژ بعد از جایابی منابع تولید پراکنده و بازآرایی شبکه نمایش داده شده است که در این حالت مینیمم ولتاژ شبکه به ۰/۹۷۸۱ پریونیت رسیده است که نسبت به حالت پایه رشد ۷/۶ درصدی را دارد. در جدول (۶) نیز نتایج ناشی از بهینه‌سازی چند هدفه برای شبکه ۶۹ باس آورده شده است. مقایسه میان جواب‌های به دست آمده برای باز و بسته بودن کلیدها در جداول (۴) تا (۶) بیان می‌کند که تاثیر توابع هدف بسیار عامل مهمی در شناسایی کلیدها خواهد بود. همچنین افزایش ظرفیت حضور منابع تولید پراکنده تا درصدی از بار شبکه می‌تواند تاثیر مثبت داشته باشد و افزایش بیش از اندازه آن تأثیرات منفی همچون افزایش تلفات سیستم و نیز برعکس شدن شارش توان به سمت پست را خواهد داشت.

شکل (۷) نیز مقایسه‌ای از جواب به دست آمده فازی پیشنهادی بر پایه ترکیب نظریه بازی و الگوریتم حرکت پرندگان را با روش بهینه‌سازی چندهدفه NSGA2 [۳۷] نمایش می‌دهد.

#### ۴-۲- شبکه تست ۶۹ باس

توان ولتاژ مبنای شبکه ۶۹ باس ۱۰۰ مگاوات و ۱۲/۶۶ کیلوولت است. توان اکتیو ۳۰۸۲/۱۹ کیلووات و توان راکتیو شبکه ۲۷۹۶/۷۷ کیلووار می‌باشد. مجموع تلفات توان حقیقی در سیستم ۲۲۵ کیلووات است و حداقل سطح ولتاژ ۰/۹۰۹۰۲ پریونیت می‌باشد. پیکربندی اولیه سوئیچ‌های باز شده ۶۹-۷۰-۷۱-۷۲-۷۳ است که در شکل (۸) نمایش داده شده است.



شکل (۶): شبکه تست ۶۹ باس

مشابه حالت قبل، دو سناریو مدنظر قرار گرفته شده است.

#### ۴-۲-۱- سناریو اول: بدون نصب منابع تولید پراکنده

در این حالت برای نمایش عملکرد روش پیشنهادی تنها بازآرایی سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است تا عملکرد روش پیشنهادی بر پایه بهینه‌سازی الگوریتم پرندگان و نظریه بازی قابل سنجش باشد.

در جدول (۴)، مقایسه‌ای میان روش پیشنهادی و مراجع دیگر هم‌چون: الگوریتم جستجوی فراکتال تصادفی (SFS) [۳۸]<sup>۱</sup>، روش باز و بست متوالی<sup>۲</sup> (SSOE) [۳۹] و روش بهبود داده شده باز و بست متوالی<sup>۳</sup> [۴۰] نمایش داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود ولتاژ سیستم و تلفات تقریباً مشابه با روش‌های دیگر است، زمانی که تنها بازآرایی شبکه ۶۹ باس مدنظر باشد. هم‌چنین از

<sup>1</sup> Stochastic fractal search algorithm (SFS)

<sup>2</sup> Sequential switch opening and exchange (SSOE)

<sup>3</sup> Modified sequential switch opening and exchange (MSSOE)

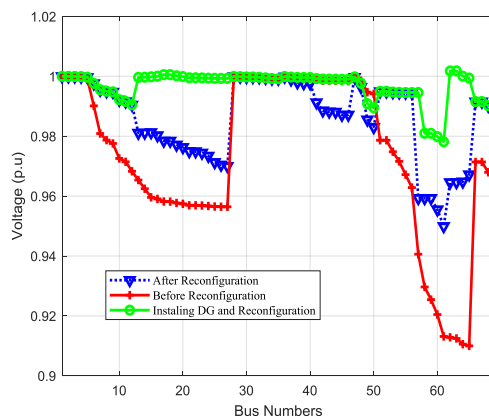
جدول (۵): مقایسه‌ای میان روش‌های مختلف بازآرایی و جابجایی منابع تولید پراکنده در سیستم ۳۳ باس بر حسب مینیمم سازی تلفات

روش شاخص	حالت پایه	روش پیشنهادی	CSA [۳۳]	FWA [۳۴]	SSA [۳۶]
مینیمم ولتاژ (p.u.)	۰/۹۰۹۲	۰/۹۷۸۱	۰/۹۷۳۶	۰/۹۷۹۶	۰/۹۸۱۰
تلفات (Kw)	۲۲۵	۲۵/۴۷	۴۰/۳۰	۲۹/۲۵	۴۲/۸۴
کلیدهای باز	۶ ۷ ۱۸ ۲۸ ۲۸	۶ ۶ ۷ ۸ ۱۱	۶ ۶ ۷ ۱۱ ۲۱	۷ ۶ ۶ ۵ ۳	۷ ۶ ۵ ۶ ۱۲
مکان منابع تولید پراکنده	—	۱۷ ۶ ۶	۶ ۶ ۶	۶ ۶ ۵	۵ ۶ ۶
انداز منابع تولید	—	۰/۴۸۴ ۰/۹۰۴ ۰/۳۰۲	۱/۰۶۶ ۰/۳۵۲ ۰/۴۲۵۷	۱/۱۲۷۲ ۰/۲۷۵۰ ۰/۴۱۵۹	۰/۳۸۰۲ ۱/۱۸۱۱ ۰/۳۸۰۲

انرژی تأمین نشده سیستم در مقایسه با روش‌های دیگر کاهش بیشتری را بیان می‌کند.

جدول (۶): مقایسه‌ای میان روش‌های مختلف بازآرایی و جابجایی منابع تولید پراکنده در سیستم ۶۹ باس بر پایه بهینه‌سازی چندهدفه

روش شاخص	حالت پایه	روش پیشنهادی	CSA [۳۳]	[۳۴]	SSA [۳۶]
تلفات (Kw)	۲۲۵	۲۱/۴۰۴	۳۲/۶۴۲	۲۸/۳۵۰	۲۴/۱۷۶
تلفات منابع تولید پراکنده	—	۱/۹۳۰۴	۱/۸۷۳۰	۱/۵۶۷۲	۱/۵۵۲۳
مینیمم ولتاژ (p.u.)	۰/۹۰۹۲	۰/۹۸۰۱	۰/۹۷۰۷	۰/۹۷۵۸۶	۰/۹۷۷۳
کلیدهای باز	۶ ۷ ۱۸ ۲۸ ۲۸	۱۳ ۵۵ ۷۰ ۶ ۶	۱۵ ۵۴ ۶ ۶ ۱۷	۱۲ ۶ ۶ ۵ ۷	۱۲ ۴ ۵ ۶ ۶
مکان منابع تولید پراکنده	—	۱۲ ۶ ۳	۱۷ ۵ ۳	۵۵ ۶ ۴	۲۱ ۶ ۳
طرفیت منابع تولید پراکنده	—	۰/۵۰۸۱ ۱/۰۲۰۲ ۰/۴۰۲۵	۰/۶۱۴۱ ۰/۹۱۲۰ ۰/۳۴۶۹	۰/۷۰۷۱ ۰/۶۰۳۹ ۰/۶۵۶۲	۰/۶۲۶۷ ۰/۹۱۰۴ ۰/۳۱۵۱



شکل (۹): پروفایل ولتاژ سیستم ۶۹ باس قبل و بعد از بازآرایی

در شکل (۹) نیز پروفایل ولتاژ سیستم ۶۹ باس آورده شده است که سطح ولتاژ شبکه بعد از بازآرایی و جابجایی منابع تولید پراکنده افزایش چشم گیری پیدا کرده است و در جدول (۶) نیز دیده می‌شود حداقل ولتاژ به ۰/۹۸۰۱ پریونیت در مقایسه با حالت پایه که ۰/۹۰۹۲ پریونیت می‌باشد رسیده است. میزان انرژی تأمین نشده نیز در حالت پایه ۱۵۶/۱۴ کیلووات ولی بعد از اجرای روش

در بازآرایی و جابجایی منابع تولید پراکنده در سیستم ۶۹ باس بر پایه بهینه‌سازی چندهدفه فازی پیشنهادی که در جدول (۶) نتایج آن دیده می‌شود سطح ولتاژ سیستم و نیز تلفات شبکه به همراه

- [9] M. Kashem, V. Ganapathy, G. Jasmon, "Network reconfiguration for load balancing in distribution networks", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 146, no. 6, pp. 563–567, Nov.1999, doi: 10.1049/ip-gtd:19990694
- [10] J.Z. Zhu, "Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm", *Electr. Power Syst. Res.* vol.62, no. 1, pp. 37–42, Apr. 2002, DOI:10.1016/S0378-7796(02)00041-X.
- [11] I. A. Quadri, S. Bhowmick and D. Joshi, "Multi-objective approach to maximise loadability of distribution networks by simultaneous reconfiguration and allocation of distributed energy resources", *IET Gener. Transmiss. Distrib.*, vol. 12, no. 21, pp. 5700-5712, Oct. 2018, DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.5618,
- [12] B. Amanulla, S. Chakrabarti and S. N. Singh, "Reconfiguration of Power Distribution Systems Considering Reliability and Power Loss," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 2, pp. 918-926, Apr. 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2011.2179950.
- [13] M.P. Lalitha, V.V. Reddy and V. Usha, "Optimal DG placement for minimum real power loss in radial distribution systems using PSO", *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol.13, no.8, pp.107–116, July. 2010, DOI:10.1016/j.egypro.2013.06.759.
- [14] E. Ali, SA. Elazim, A. Abdelaziz, "Ant lion optimization algorithm for optimal location and sizing of renewable distributed generations" *Renew Energy*, vol. 101, no.14, pp.1311–1324, Dec.2018, DOI:10.1016/j.jesit.2017.06.001.
- [15] S. Ravindran, TAA. Victoire, "A bio-geography-based algorithm for optimal siting and sizing of distributed generators with an effective power factor model", *Comput Electr Eng*, vol.72, no.9, pp. 482–501, Oct.2018, DOI:10.1016/j.compeleceng.2018.10.010.
- [16] A. Abbasi, "Investigation of simultaneous effect of demand response and load uncertainty on distribution feeder reconfiguration", *IET Gener. Transmiss. Distrib.*, vol. 14, no. 8, pp. 1438-1449, Apr. 2020, DOI:10.1049/iet-gtd.2019.0854.
- [17] R. Ghafarpour, S. Saadi, S. Zamaniyan and M. Mahmoudian, "Improving the resilience of electrical distribution systems through optimal performance and adaptability in the presence of mobile generation sources", *Passive defense*, vol. 14, no. 3, pp.105-114. 1402, doi: 20.1001.1.20086849.1402.14.3.9.3. (In Persian)
- [18] Z. Bagheri, M. Abbasi, A.R. Kayani and M.J. Kiani, "Finding the optimal location and size of scattered production sources and capacitors in electric energy distribution networks with microgrid division with passive defense approach", *Non-active Defense*, vol.14, no.2, pp. 1-14,2023, doi:20.1001.1.20086849.1402.14.2.1.3. (In Persian)
- [19] S. Khoshtakht, E. Namdari, M. Doostizadeh, "Reconfiguring Distribution Networks by Means of Minimizing Power Loss and Considering Overcurrent Protection", *IECO*, vol. 4, no. 3, pp.321-331, Dec 2022, doi: 10.22111/ieco.2021.36302.1316. (In Persian)
- [20] H. Bagheri Toulabi and A. Lashkarara, "Simultaneous rearrangement with optimal allocation of D-STATCOM units and distributed generation in distribution networks in order to reduce losses, improve reliability, voltage stability and operating costs by combining horse herd optimization algorithm and genetics", *ISEE*, vol.5, no.7, 1-9, 2023, doi: 10.22108/isee.2023.136749.1614. (In Persian).
- [17] F. Sayadi, S. Esmaili, and F. Keynia, "Feeder reconfiguration and capacitor allocation in the presence of non-linear loads using new P-PSO algorithm," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, pp. 2316-2326, 2016, DOI: 10.1049/iet-gtd.2015.0936.
- [18] F. V. Gomes, S. Carneiro, J. L. R. Pereira, M. P. Vinagre, P. A. N. Garcia and L. R. Araujo, "A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1373-1378, Aug. 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2005.851937.
- [19] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing," in *IEEE Power Engineering Review*, vol. 9, no. 4, pp. 101-102, April 1989, doi: 10.1109/MPER.1989.4310642.
- [20] J. E. Mendoza, M.E. Lopez, C.A. Coello and E.A. Lopez, "Microgenetic Multiobjective Reconfiguration Algorithm Considering Power Losses and Reliability Indices for Medium

پیشنهادی به ۱۶/۴۷ کیلووات کاهش پیدا کرده است که بیان‌کننده عملکرد مناسب روش پیشنهادی است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش بهینه‌سازی چند هدفه شامل مینیمم سازی تلفات سیستم، کاهش میزان انرژی تأمین نشده و افزایش سطح نفوذ منابع تولید پراکنده مدل‌سازی شد. برای حل مسئله پیشنهادی نیز از ترکیب نظریه بازی‌ها که بازیکنان آن وضعیت باز و بست کلیدها، ظرفیت و مکان منابع تولید پراکنده و استراتژی‌های آن نیز اهداف معرفی شده بود استفاده گردید. از الگوریتم حرکت پرندگان نیز برای سرعت همگرایی بالایی آن جهت مینیمم‌سازی توابع هدف استفاده شد. نتایج با سه روش بهینه‌سازی جدید فاخته، آتش‌بازی و روش بهینه‌سازی بر پایه جبهه پرتو به نام NSGA2 در سناریوهای مختلف در دو شبکه مورد مطالعه مقایسه شد که همگی نشان‌دهنده کارایی و سرعت بالایی روش پیشنهادی در یافتن نقطه بهینه مسئله می‌باشد. به عنوان نمونه، در شبکه ۳۳ باس تابع تلفات، انرژی تأمین نشده و سطح ولتاژ شبکه به ترتیب در مقایسه با حالت پایه ۸۶/۱۲ درصد کاهش، ۹۱ درصد کاهش و ۷/۷ درصد افزایش را نمایش داد.

## ۶- مراجع

- [1] D. Duan, X. Ling, X. Wu, and B. Zhong "Reconfiguration of distribution network for loss reduction and reliability improvement based on an enhanced genetic algorithm", *IJEPES*, vol. 64, no. 88, pp. 88-95, July. 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.07.036.
- [2] H. Wu, P. Dong, and M. Liu, "Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction and Voltage Stability with Random Fuzzy Uncertainties of Renewable Energy Generation and Load," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 9, pp. 5655-5666, Sept. 2020, doi: 10.1109/TII.2018.2871551.
- [3] H. Tang, J. Zhu, C. Chen, Z. Zhang and D. Zhang, "Distribution Network Reconfiguration Based on Back Propagation neural networks," 2019 *IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Changsha, China, 2019, pp. 2578-2582, doi: 10.1109/EI247390.2019.9062258.
- [4] J. Singh and R. Tiwari, "Real power loss minimisation of smart grid with electric vehicles using distribution feeder reconfiguration," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 13, no. 18, pp. 4249–4261, Sept. 2019, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6330.
- [5] V. Fathi, H. Seyedi and B. M. Ivatloo, "Reconfiguration of distribution systems in the presence of distributed generation considering protective constraints and uncertainties", *Int. Trans. Electric. Energy Syst.*, vol. 30, no. 5, pp.12346, Feb. 2020, DOI: 10.1002/2050-7038.12346.
- [6] M. Esmaili, M. Sedighizadeh 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, no.8, pp. 86–99, Mar. 2016, DOI:10.1016/j.energy.2016.02.152.
- [7] M. R. Kaveh, R. A. Hooshmand and S. M. Madani, "Simultaneous optimization of re-phasing, reconfiguration and DG placement in distribution networks using BF-SD algorithm", *Appl. Soft Comput.*, vol. 62, no.14, pp.1044–1055, Dec. 2018, DOI:10.1016/j.asoc.2017.09.041.
- [8] D. F. Teshome and K. L. Lian, "Comprehensive mixed-integer linear programming model for distribution system reconfiguration considering DGs", *IET Gener. Transmiss. Distrib.*, vol. 12, no. 20, pp. 4515-4523, Nov. 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5242,

- 10.1109/PTC.2009.5282068.
- [31] M. R. Bonyadi and Z. Michalewicz, "Particle Swarm Optimization for Single Objective Continuous Space Problems: A Review," in *Evolutionary Computation*, vol. 25, no. 1, pp. 1-54, March 2017, doi: 10.1162/EVCO\_r\_00180.
- [32] A. S. Bouhouras, K. I. Sgouras, P. A. Gkaidatzis, and D. P. Labridis, "Optimal active and reactive nodal power requirements towards loss minimization under reverse power flow constraint defining DG type," *Ijepes*, vol. 78, no.8, pp. 445-454, Dec.2016. DOI:10.1016/j.ijepes.2015.12.014.
- [33] Z. ravej and A. Akhlaghi, "A novel approach based on cuckoo search for DG allocation in distribution network", *Ijepes*, vol. 44, no.1, pp.672-679, Jan. 2013.doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.08.009.
- [34] Khatod, J.S.D.K., Pant, V.: Evolutionary programming based optimal placement of renewable distributed generators. *IEEE Trans. Power Syst.* 28(2), 683-695, 2013.
- [35] B. Pornazaryan, P. Karimyan, G. B. Gharehpetian, M. and Abedi, "Optimal allocation and sizing of DG units considering voltage stability, losses and load variations", *Ijepes*, vol.79, no.21, pp.42-52, July. 2016, DOI:10.1016/j.ijepes.2015.12.034.
- [36] A. Mohamed-Imran, M. Kowsalya, D.P. Kothari, "A novel integration technique for optimal network reconfiguration and distributed generation placement in power distribution networks", *Ijepes*, vol. 63, no.24, pp. 461-472, Dec. 2014, DOI:10.1016/j.ijepes.2014.06.011.
- [37] A. Noori, Y. Zhang, N. Nouri, and M. Hajivand, "Multi-Objective Optimal Placement and Sizing of Distribution Static Compensator in Radial Distribution Networks with Variable Residential, Commercial and Industrial Demands Considering Reliability," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 46911-46926, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3065883.
- [38] T. T. Tran, K. H. Truong, D. N. Vo, "Stochastic fractal search algorithm for reconfiguration of distribution networks with distributed generations", *Ain Shams Eng*, vol.11, no.4, pp. 389-407, June. 2020, DOI:10.1016/j.asej.2019.08.015
- [39] J. Zhan, W. Liu, C. Y. Chung and J. Yang, "Switch Opening and Exchange Method for Stochastic Distribution Network Reconfiguration," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 4, pp. 2995-3007, July 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.2974922.
- [40] V. Vai, S. Suk and R. Lorm, "Optimal Reconfiguration in Distribution Systems with Distributed Generations Based on Modified Sequential Switch Opening and Exchange", *Appl. Sci*, vol.11, no.5, pp.17-23, Dec. 2021, DOI:10.3390/app11052146.
- Voltage Distribution Network", *IET Gener. Transm. Distrib.* vol. 3, no. 9, pp. 825-84, Sept. 2019, DOI: 10.1049/iet-gtd.2009.0009.
- [21] M. H. Hematpour, M. H. Rezaian Kochi, "Multi-objective rearrangement in line with the reliability and energy consumption of distribution systems in the presence of wind turbines using the MOHSA algorithm", *ISEE*, vol.12, no. 4, pp. 13-30,2021, doi: 10.22108/isee.2021.123505.1390
- [22] V. B. Pamshetti, S. Singh and S. P. Singh, "Combined Impact of Network Reconfiguration and Volt-VAR Control Devices on Energy Savings in the Presence of Distributed Generation," in *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 995-1006, March 2020, doi: 10.1109/JSYST.2019.2928139.
- [23] L. Chen, C. Xu and H. Song, "Optimal sizing and sitting of EVCS in the distribution system using metaheuristics", a case study. *Energy Rep*, vol.12, no. 6, pp.208-217, Dec.2021. DOI:10.1016/j.egy.2020.12.032.
- [24] M. Najjarpour and B. Tousi, "Loss Reduction of Distribution Network by Optimal Reconfiguration and Capacitor Placement Using Cuckoo and Cultural Algorithms," *ICTEM*, Mazandaran, Babol, Iran, Islamic Republic of, pp. 1-5, 2023.
- [25] S. Ahmadi, S. Abdi, and M. Kakavand, "Maximum power point tracking of a proton exchange membrane fuel cell system using PSO-PID controller," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no.5, pp. 20430-20443, Dec. 2017, DOI:10.1016/j.ijhydene.2017.06.208.
- [26] M. Zarei and A. Zangeneh, "Multi-objective optimization model for distribution network reconfiguration in the presence of distributed generations", *Int Trans Electr Energy Syst*, vol. 27, no. 12, pp.1-18, Oct.2017, DOI:10.1002/etep.2425
- [27] R. Billinton and Peng Wang, "A generalized method for distribution system reliability evaluation," *IEEE WESCANEX 95. Communications, Power, and Computing. Conference Proceedings*, Winnipeg, MB, Canada, 1995, pp. 349-354 vol.2, doi: 10.1109/WESCAN.1995.494054.
- [28] M. Gitizadeh, A.A. Vahed and J. Aghaei, Multistage "distribution system expansion planning considering distributed generation using hybrid evolutionary algorithms", *Appl. Energy*, vol. 101, no.9, pp. 655-666, Aug. 2013, DOI:10.1016/j.apenergy.2012.07.010.
- [27] A. G. Al-Gizi, A. Craciunescu, and S. Al-Chlaihawi, "The use of ANN to supervise the PV MPPT based on FLC", *ATEE*, Bucharest, Romania, pp. 703-708, 2017, DOI:10.1109/ATEE.2017.7905128.
- [30] S. M. R. Rafiei, M. H. Kordi, G. Griva and A. Tenconi, "Nash Genetic Algorithm based optimal design of hysteresis inverters for active power filtering applications," 2009 *IEEE Bucharest PowerTech*, Bucharest, Romania, 2009, pp. 1-6, doi: