

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۲۰

## جایابی و تعیین ظرفیت منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع با استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب بهبود یافته II

فائق کرمانی<sup>۱</sup>، جواد علمائی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

faeghkermani@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

J\_olamaei@azad.ac.ir

چکیده: به‌کارگیری واحدهای تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع به‌علت مزایای بسیار آن، توجه مدیران شبکه قدرت را به خود جلب کرده است. در این تحقیق، جایابی و تعیین ظرفیت منابع تولید پراکنده با اهداف مختلف به‌صورت هم‌زمان بررسی شده است. اهداف برنامه‌ریزی در این تحقیق کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، بهبود پایداری ولتاژ و کاهش سطح اتصال کوتاه شبکه است. برای محاسبه مقادیر توابع هدف از پخش بار جاروب رفت و برگشت و محاسبات اتصال کوتاه استفاده شده است. برای حل مسئله از یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه موسوم به الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه نامغلوب بهبود یافته استفاده شده است. این الگوریتم منجر به ایجاد جواب‌های متنوعی می‌شود که کاربر می‌تواند برحسب نیاز، هر کدام از آن‌ها را انتخاب کند. برای انتخاب بهترین پاسخ از جواب‌های بهینه از روش فازی استفاده شده است. روش پیشنهادی بر روی شبکه استاندارد ۳۳ شینه IEEE بررسی شده است. برای این منظور سناریوهای مختلفی لحاظ شده و جواب بهینه در هر یک از این حالات تعیین گردیده است. نتایج حاصل از روش پیشنهادی، کارایی آن را نشان خواهند داد.

واژه‌های کلیدی: تولید پراکنده، شبکه توزیع، جایابی، الگوریتم ژنتیک چندهدفه نامغلوب II.

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، نگرانی‌های زیست‌محیطی و ملاحظات اقتصادی موجب افزایش چشمگیر سهم تکنولوژی‌های تولید پراکنده در تأمین توان مصرفی شده است. با توجه به ماهیت تولیدات پراکنده (DG)، شبکه‌های توزیع مناسب‌ترین بخش برای اتصال این منابع به سیستم قدرت محسوب می‌شوند.

واحدهای تولید پراکنده به واحدهای تولید توان با ظرفیت نسبتاً پایین گفته شده که در نزدیکی مصرف‌کنندگان نصب و آن‌ها را به صورت محلی تغذیه می‌کنند. این منابع در صورتی که با انجام محاسبات لازم به‌طور بهینه و در محل مناسب و با ظرفیت کافی مورد بهره‌برداری قرار گیرند، علاوه بر تأمین بار محلی، می‌توانند پارامترهای شبکه توزیع نظیر تلفات، پروفیل ولتاژ و... را بهبود بخشند.

برنامه‌ریزی بهینه DG یکی از مسائل مهم در نظر محققان و مهندسان سیستم قدرت است. بسیاری از مقالات از روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی این مسئله استفاده کرده‌اند. تخصیص واحدهای تولید پراکنده (DG) یک موضوع بهینه‌سازی چندمنظوره و پیچیده است. اهدافی شامل مصرف بهینه انرژی، کاهش هزینه خرید الکتریسیته و حداقل اتلاف توان بر اساس محدودیت‌های امنیتی شبکه قدرت و خروجی توان منبع تولید پراکنده به وسیله الگوریتم‌های چندهدفی پخش بار اقتصادی/انتشار در مراجع [۱ و ۲] بررسی شده‌اند. در میان تحقیقات درباره روش‌های بهینه‌سازی، در مراجع [۳ و ۴] مدل‌های چندهدفه از برنامه‌ریزی DG به وسیله روش‌های گوناگون مانند روش جست‌وجوی ممنوعه (Tabu) مختلط با الگوریتم ژنتیک (GA) بهینه‌سازی شده‌اند.

در مقالات مختلف، الگوریتم‌های گوناگون بهینه‌سازی هوشمند مانند GA [۵]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) [۶]، کلونی مصنوعی زنبور عسل (ABC) [۷]، خفاش (Bat) [۸] و جست‌وجوی فاخته (Cuckoo) [۹] برای حل مسئله بهینه‌سازی با در نظر گرفتن حداقل هزینه‌ها برای بهبود شبکه، عملکرد، پشتیبانی و تلفات برای بررسی رشد بار و سطح نفوذ بیشینه DG مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین در مراجع [۱۰ و ۱۱] چند روش تحلیل حساسیت تخصیص DG پیشنهاد شده است.

در مورد اهداف چندگانه متضاد، ممکن است یک پاسخ نهایی برای تمام اهداف وجود نداشته باشد، بنابراین یک راه‌حل متوازن به‌جای یک

راه‌حل واحد در بهینه‌سازی چندهدفی مورد نظر است.

در مرجع [۱۲]، بر اساس الگوریتم ژنتیک (GA)، یک روش بهینه‌سازی چندهدفی برای بهینه‌سازی سود از طریق کاهش هزینه اتلاف انرژی سالیانه و هزینه قطع، پیشنهاد شده است.

یک عملکرد چندهدفی بر اساس شاخص اندازه و محل شناسایی DG با مدل‌های بار متفاوت در مرجع [۱۳] ارائه شده است.

نکویی و همکاران [۱۴] روشی جدید با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی (HS) بهبودیافته را ارائه کرده‌اند.

در مرجع [۱۵] با استفاده از الگوریتم شیر مورچه یا مورچه‌خوار (ALOA) جایابی منابع تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات، اصلاح پروفایل ولتاژ و افزایش پایداری ولتاژ ارائه شده است.

در مرجع [۱۶] با استفاده از ترکیب الگوریتم کلونی مورچگان و تحلیل سلسله‌مراتبی جایابی و ظرفیت‌یابی همزمان منابع تولید پراکنده و ادوات حفاظتی ارائه شده است.

در الگوریتم‌های چندهدفه، هرچه تنوع و تعداد توابع هدف بیشتر باشد، جواب دقیق‌تر خواهد بود؛ به عبارت دیگر، اگر مسئله از جنبه‌های بیشتری ارزیابی شود، پاسخ به دست‌آمده قابل اتکاتر و دقیق‌تر خواهد بود. با توجه به اینکه عمدتاً در مقالاتی که از روش‌های چندهدفه برای حل مسئله جایابی منابع استفاده کرده‌اند، بیشتر از دو یا سه تابع هدف مورد بررسی قرار نگرفته است. برای بررسی جامع‌تر موضوع، در این تحقیق چهار تابع هدف مورد نظر قرار گرفته است که با استفاده از الگوریتم چندهدفه ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب II، اندازه و مکان منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع استاندارد ۳۳ شینه IEEE تعیین خواهد شد. یکی از مزایای مهم این الگوریتم چندهدفه استفاده از روش پارتو برای حل مسئله جایابی DGها می‌باشد. تابع هدف اول، کاهش تلفات خطوط سیستم بعد از تزریق DG در شبکه توزیع است. دومین هدف کمینه کردن انحراف ولتاژ بین ولتاژ گره و دامنه ولتاژ تعیین شده است. دامنه ولتاژ گره، شاخص مهم برای ارزیابی امنیت سیستم و کیفیت توان (PQ) است. کمینه ساختن انحراف ولتاژ می‌تواند به تضمین یک سطح ولتاژ بهتر در سیستم‌های توزیع قدرت کمک کند. تابع هدف سوم بیشینه ساختن حاشیه پایداری ولتاژ حالت ماناست؛ به عبارتی، حاشیه پایداری ولتاژ اندازه سطح امنیت سیستم توزیع است. حضور منابع تولید پراکنده در شبکه سبب می‌شود که در هنگام بروز خطا، جریان خطا علاوه بر شبکه سراسری از طریق این منابع نیز تأمین شده و در نتیجه با تزریق جریان توسط این منابع

5. Harmony Search

6. Ant Lion Optimization Algorithm

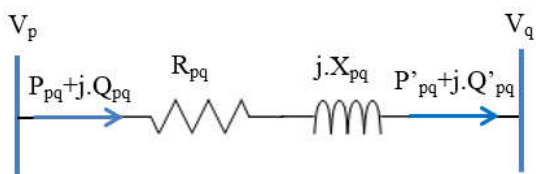
7. Power Qualit

1. Distributed Generation

2. Genetic Algorithm

3. Particle Swarm Optimization

4. Artificial Bee Colony



شکل (۱): مدل یک خط از شبکه توزیع

همان طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، توان اکتیو و راکتیو جاری شده بین دو شین p به شین q مطابق روابط (۱) تا (۴) است.

$$P'_{pq} = P_q^F + P_q^L - P_q^{DG} \quad (1)$$

$$Q'_{pq} = Q_q^F + Q_q^L - Q_q^{DG} - Q_q^C \quad (2)$$

$$P_{pq} = P'_{pq} + \frac{R_{pq}}{V_q} \cdot (P'_{pq} + Q'_{pq}) \quad (3)$$

$$Q_{pq} = Q'_{pq} + \frac{X_{pq}}{V_q} \cdot (P'_{pq} + Q'_{pq}) \quad (4)$$

در این روابط  $P_{pq}$  و  $Q_{pq}$  به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو جاری شده،  $P_q^{DG}$  و  $Q_q^{DG}$  به ترتیب توان‌های راکتیو جاری شده توسط منبع تولید پراکنده،  $Q_q^C$  توان راکتیو تزریق شده توسط خازن‌های موازی به کاررفته و  $P_q^L$  و  $Q_q^L$  نیز به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو درخواستی توسط بار هستند. همچنین  $P_q^F$  و  $Q_q^F$  به ترتیب مجموع توان‌های اکتیو و راکتیو جاری شده از طریق خطوط بالادست شین q هستند.

با داشتن ولتاژ شین‌ها و توان‌های اکتیو و راکتیو جاری شده می‌توان مقدار جریان عبوری از خط را محاسبه کرد. در رابطه (۵) نحوه محاسبه جریان خط مورد نظر آورده شده است.

$$I_{pq} = \sqrt{\frac{(P'_{pq} + Q'_{pq})}{V_p}} \quad (5)$$

با محاسبه جریان خط و ضرب مجذور آن در مقدار امپدانس شبکه می‌توان تلفات هر خط<sup>۴</sup> را به دست آورد. همچنین با تعمیم این کار به تمامی خطوط شبکه به راحتی می‌توان تلفات توان شبکه را محاسبه کرد. در مرجع [۲۰] تابع هدف مسئله به منظور حداقل کردن تلفات توان اکتیو آن در رابطه (۶) آورده شده است.

$$OF1: \text{Min}(P_{Loss}), P_{Loss} = \sum_{k=1}^n R_{pq} I_{pq}^2 \quad (6)$$

که  $P_{Loss}$  تلفات اهمی شبکه برحسب وات،  $I_{pq}$  جریان عبوری از خط برحسب آمپر و  $n$  تعداد کل خطوط شبکه است. مقدار  $R_{pq}$  نیز بیانگر مقاومت اهمی خط است.

در محل خط، جریان اتصال کوتاه افزایش یابد. در واقع حضور این منابع سبب می‌شود که یک امپدانس با امپدانس معادل دیده‌شده از دید شبکه موازی گردد و در نتیجه، امپدانس دیده‌شده از دید محل خط کاهش و جریان خط افزایش می‌یابد. میزان افزایش جریان اتصال کوتاه و سهم تولید پراکنده در تزریق جریان خط به نوع تکنولوژی جریان پراکنده، مکان نصب آن، اندازه و ظرفیت آن، محل خط و امپدانس شبکه بستگی دارد. بنابراین در نظر گرفتن سطح اتصال کوتاه به عنوان تابع هدف چهارم و کمینه‌سازی آن با استفاده از روش بهینه‌سازی، به واقعی‌تر شدن پاسخ‌های این تحقیق کمک شایانی خواهد کرد.

بخش‌های مختلف این مقاله به این شرح هستند: در بخش ۲ و ۳ به ترتیب به مدل‌سازی و تشریح توابع هدف و قیود مسئله پرداخته خواهد شد. در بخش ۴، عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه نامغلوب بهبودیافته تشریح خواهد شد. در بخش ۵، به معرفی شبکه تحت مطالعه و در بخش ۶ به تحلیل نتایج حاصل از روش پیشنهادی به‌ازای سناریوهای مختلف پرداخته خواهد شد. در نهایت در بخش ۷، به نتیجه‌گیری حاصل از انجام این کار پرداخته خواهد شد.

## ۲. تشریح توابع هدف

با وجود اینکه اتصال منابع تولید پراکنده مزایایی همچون کاهش تلفات [۱۷]، بهبود پروفیل ولتاژ [۱۸]، پیک‌سایی<sup>۲</sup>، بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان<sup>۳</sup> [۱۹] و... را به همراه دارند، به کارگیری آن‌ها در محل نامناسب مانع از دستیابی به حداکثر سود حاصل می‌شود. لذا بایستی در یک مطالعات برنامه‌ریزی، مکان و ظرفیت بهینه این منابع مشخص شوند. در ادامه، به بررسی چهار تابع هدف مختلف برای جایابی و تعیین ظرفیت منابع تولید پراکنده پرداخته خواهد شد. در اینجا فرض بر این است که بودجه کافی برای نصب این منابع در شبکه وجود داشته و لذا هزینه‌های نصب و بهره‌برداری از این منابع لحاظ نشده است.

### ۱.۲. تلفات

در شکل (۱) یک خط از شبکه توزیع نشان داده شده است. این خط بین دو شین ابتدایی p و انتهایی q قرار داشته و امپدانس آن به صورت  $R_{pq} + jX_{pq}$  است.

1. Improving Voltage Profile
2. Peak Clipping
3. Improving Power System Reliability

## ۲.۲. بهبود شاخص انحراف پروفیل ولتاژ

هدف بسیاری از شرکت‌های برق این است که ولتاژ تمامی شین‌ها را نزدیک یک پریونیت نگه دارند. در مرجع [۲۱] تابع هدف دوم به صورت رابطه (۷) تعریف شده که به صورت بهبود شاخص انحراف پروفیل ولتاژ<sup>۱</sup> در اثر منبع تولید پراکنده است.

$$OF 2: \min(\Delta DVI), \Delta DVI = \sum_{i=1}^{N_{bus}} \left( \frac{V_{ref} - V_i}{V_{ref}} \right)^2 \quad i=2, \dots, N_{bus} \quad (7)$$

که  $\Delta DVI$  مجموع انحراف نسبی ولتاژ شین‌های شبکه و  $V_{ref}$  ولتاژ مرجع (یک پریونیت) است. به این ترتیب به کمک این تابع هدف، مقدار هریک از شین‌ها به یک پریونیت نزدیک می‌شوند.

## ۲.۳. بهبود شاخص پایداری ولتاژ

شاخص پایداری ولتاژ<sup>۲</sup> مطابق رابطه (۸) است که مقدار آن باید به‌ازای تمامی خطوط شبکه محاسبه و حداکثر شود.

$$VSI = \left\{ (V_p)^2 - r(V_p)^2 (P_q R_{pq} + Q_q X_{pq})^2 - r(P_q X_{pq} - Q_q R_{pq})^2 \right\} \quad (8)$$

که  $V_p$  ولتاژ شین ابتدایی،  $P_q$  و  $Q_q$  به ترتیب توان اکتیو و راکتیو بار متصل به فیدر انتهایی،  $R_{pq}$  مقاومت خط بین دو شین و  $X_{pq}$  نیز راکتانس بین آن‌هاست. در مرجع [۲۲] تابع هدف به صورت یک تابع کمینه به صورت رابطه (۹) بیان شده است. در این تحقیق نیز از همین تابع هدف استفاده شده است.

$$OF 3: \min \left\{ \frac{1}{\max(VSI)} \right\} \quad (9)$$

## ۲.۴. کنترل سطح اتصال کوتاه شبکه

یکی از پارامترهای مهم دیگر در اتصال منابع تولید پراکنده، سهم آن‌ها در ایجاد جریان خطاست؛ به خصوص در مواردی که منابع تولید پراکنده از نوع سنکرون هستند، سهم تولید جریان خطا توسط این منابع بالا خواهد بود. بنابراین با انتخاب صحیح مکان و ظرفیت نصب مناسب برای این منابع می‌توان در کنار سایر مزایا این چالش را نیز کمینه کرد. تابع هدف لحاظ‌شده برای این حالت در رابطه (۱۰) آورده شده است.

$$OF 4: \min(ISC), ISC = \max \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{I_{scabc}_i^{DG}}{I_{scabc}_i} \right\} \quad (10)$$

که  $I_{scabc}_i^{DG}$  بیانگر اندازه جریان خطای سه‌فاز در شبکه به‌ازای نصب منبع تولید پراکنده و  $I_{scabc}_i$  مقدار این جریان به‌ازای عدم

نصب آن (در حالت عادی) می‌باشد. برای محاسبه این شاخص پس از تعیین مکان و ظرفیت DG، روی هریک از شین‌های شبکه یک خطای سه فاز متقارن در میانه هر خط ایجاد شده و جریان خطای حاصل از آن تقسیم بر جریان خطای حاصل از حالت عادی شبکه بدون نصب DG می‌شود. در مرجع [۲۳]، تابع هدف کمینه‌سازی بیشترین مقدار حاصل از این تقسیم است تا اثر DG روی سطح اتصال کوتاه<sup>۳</sup> ( $ISC$ ) کمینه گردد.

نحوه محاسبه این جریان خطا به کمک ماتریس تونن شبکه در مرجع [۲۴] بیان شده و در رابطه (۱۱) آورده شده است.

$$I_{SC} = \frac{V_{k,pre}}{Z_{th,k} + Z_f} \quad (11)$$

در این رابطه،  $V_{k,pre}$  ولتاژ محل شین  $k$  قبل از وقوع خطاست که از طریق برنامه پخش بار قابل محاسبه است.  $Z_{th,k}$  ماتریس تونن شبکه از دید شینی است که خطا بر روی آن ایجاد شده است. همچنین  $Z_f$  نیز بیانگر امپدانس خطاست که در اینجا صفر لحاظ شده است. نکته مهم این است که با توجه به اینکه محل وقوع خطا در میانه خط در نظر گرفته شده، یک شین اضافه (شین  $k$ ) در میانه خطی که قرار است خطا در آنجا روی دهد، قرار داده شده است. برای این منظور، امپدانس این خط به دو قسمت، یعنی از ابتدای شین تا محل وقوع خطا (شین  $k$ ) و از محل وقوع خطا تا انتهای آن تقسیم شده است (امپدانس هریک از خطوط ایجادشده ۵۰٪ خواهد بود). سپس برای این شرایط پخش بار گرفته شده تا ولتاژ قبل از خطا محاسبه گردد. در نهایت، ماتریس تونن شبکه نیز تعیین گردیده و جریان خطای حاصل محاسبه شده است.

## ۳. قیود مسئله

در مسئله بهینه‌سازی جایابی و تعیین ظرفیت منابع تولید پراکنده، قیود متفاوتی وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

### ۳.۱. توان منابع تولید پراکنده

توان اکتیو خروجی تمامی منابع تولید پراکنده بایستی در یک محدوده مجاز حداقل  $P_{DG.min}$  و حداکثر  $P_{DG.max}$  توان تولید کنند. این قید به صورت رابطه (۱۲) است:

$$P_{DG.min} \leq P_{DG} \leq P_{DG.max} \quad (12)$$

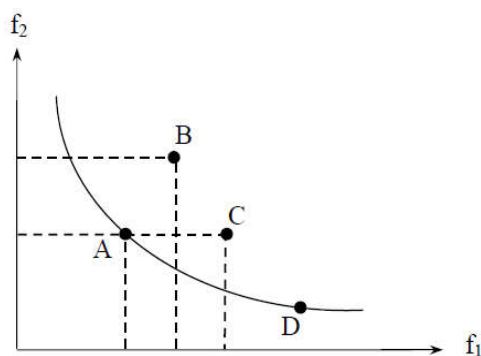
### ۳.۲. محدودیت ولتاژ شین‌ها

ولتاژ تمامی شین‌های شبکه بایستی در محدوده مجاز آن قرار گیرند.

1. Voltage Deviation  
2. Voltage Stability Margin

است. این مکان‌ها به صورت عدد صحیح بوده که به صورت تصادفی از طریق دستور randi در نرم‌افزار متلب ایجاد می‌شوند. همچنین توان ظاهری هر منبع تولید پراکنده با SDG نشان داده شده است. این اعداد به صورت پیوسته بوده که از طریق دستور unifrnd در نرم‌افزار متلب ایجاد شده است.

به طور کلی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی را می‌توان در دو دسته تک‌هدفه و چندهدفه طبقه‌بندی کرد. برخلاف مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه، در الگوریتم‌های چندهدفه صرف نظر از نوع آن‌ها، مجموعه‌ای از جواب‌ها وجود خواهد داشت. در واقع وظیفه اصلی یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه نیز یافتن پاسخ‌های بهینه به صورت یک مجموعه جواب (پارتو) مطابق شکل (۳) است. مطابق این شکل، بر اساس توابع هدف  $f_1$  و  $f_2$  چهار جواب بهینه توسط الگوریتم چندهدفه ایجاد شده که با حروف A تا D نشان داده شده است. بر مبنای این جواب‌ها می‌توان دریافت که جواب بهینه A نسبت به B دارای مقادیر کمتری از هر دو تابع هدف  $f_1$  و  $f_2$  است. علاوه بر این، جواب A نسبت به C نیز دارای یک مقدار از  $f_2$  است. با این حال جواب A در مقایسه با D دارای مقدار کمتری از  $f_1$  می‌باشد. این مقایسه را مغلوب‌سازی پاسخ‌ها گویند. در واقع، جواب A باعث مغلوب شدن جواب‌های B و C شده است. اما A غلبه‌ای بر D نداشته و یک جبهه جواب را تشکیل داده‌اند.



شکل (۳): نمایش یک مجموعه جواب (پارتو)  
 $f_1$  and  $f_2$  are to be minimized

در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، دو هدف کلی دنبال می‌شود: هدف اول یافتن پاسخ‌های نزدیک به جبهه بهینه پارتو و هدف دوم یافتن پاسخ‌ها با توزیع مناسب است. در مرجع [۲۶] الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه نامغلوب<sup>۱</sup> از هر دو عملگر نخبه‌گرایی و مقایسه فاصله جواب‌ها بدون نیاز به هیچ پارامتر اضافه‌ای برای یافتن بهترین پاسخ‌ها استفاده می‌کند.

اساس این روش در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق این

این قید در رابطه (۱۳) آورده شده است. در مرجع [۲۵] مقدار حداقل و حداکثر ولتاژ شبکه به ترتیب برابر  $0.93$  تا  $1.05$  پریونیت در نظر گرفته شده است.

$$0.93 \leq V_i \leq 1.05 \quad (13)$$

### ۳.۳. تعادل توان

توان تولیدی توسط پست اصلی ( $P_{substation}$ ) و تمامی منابع تولید پراکنده ( $\sum_{k=1}^{NDG} P_{DG,k}$ ) بایستی برابر با توان مصرفی تلفات شبکه ( $P_{Loss}$ ) و مقدار کل بار شبکه ( $\sum_{n=1}^{NL} P_{load,n}$ ) آن باشد. این قید مطابق رابطه (۱۴) است:

$$\sum_{k=1}^{NDG} P_{DG,k} + P_{substation} = \sum_{n=1}^{NL} P_{load,n} + P_{Loss} \quad (14)$$

### ۳.۴. ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده

یکی دیگر از قیود لازم برای تعیین ظرفیت بهینه DGها، قید حداکثر ظرفیت توان تولیدی این واحدهاست که در رابطه (۱۵) آورده شده است:

$$\sqrt{(P_q^{DG})^2 + (Q_q^{DG})^2} \leq \omega_{DG} \times \sqrt{(P_q^L)^2 + (Q_q^L)^2} \quad (15)$$

مطابق این رابطه، حداکثر توانی که DGها تولید می‌کنند، ضریبی ( $\omega_{DG}$ ) از بار کل شبکه است. به ضریب نفوذ DG نیز گفته می‌شود؛ برای مثال ممکن است شبکه توزیع به دلایل محدودیت‌های مختلف مایل باشد فقط ۲۵٪ از بار کل شبکه را توسط DGها تأمین کند. به این ترتیب مقدار  $\omega_{DG}$  را ۰/۲۵ در نظر می‌گیرد.

### ۴. الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه نامغلوب

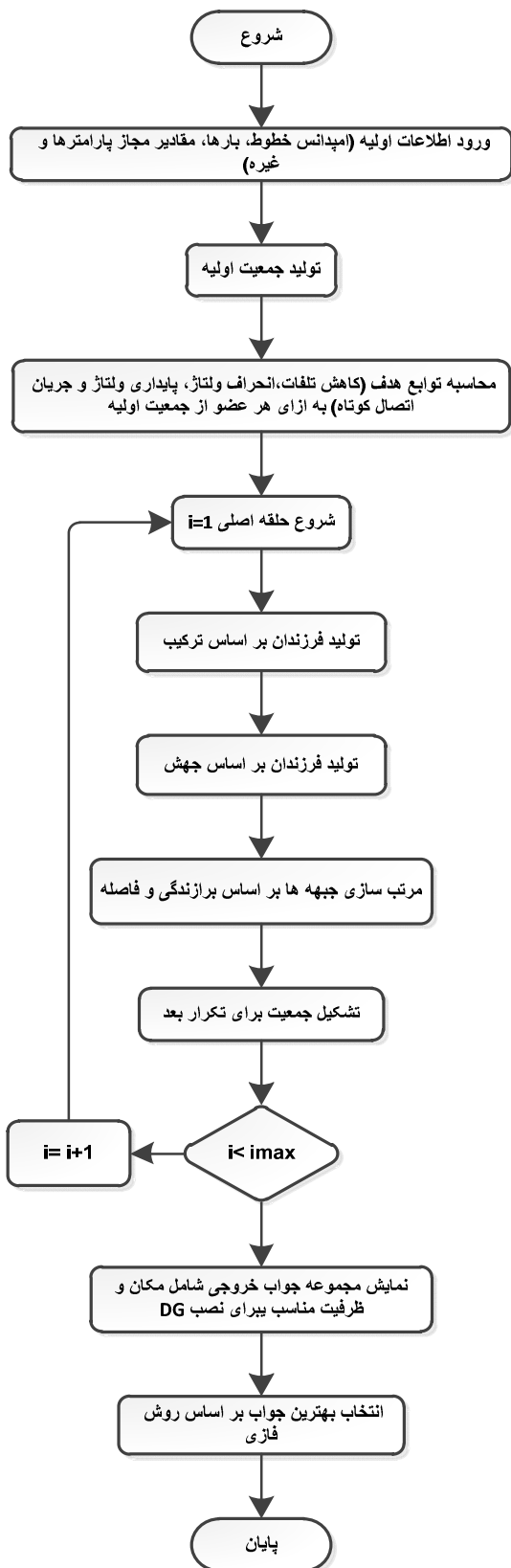
#### بهبودیافته (NSGA II)

الگوریتم ژنتیک یکی از مدل‌های محاسباتی الهام گرفته‌شده از روند تکاملی طبیعت است. این الگوریتم راه‌حل یک مسئله را به صورت کروموزوم‌های ساده‌ای کدگذاری کرده، سپس عملگرهای مختلفی را به آن اعمال می‌کنند. از آنجایی که هدف این تحقیق جایابی و تعیین ظرفیت منابع تولید پراکنده است، ساختار هر کروموزوم از الگوریتم که شامل دو متغیر مکان و ظرفیت تصادفی DGها می‌باشد، در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل (۲): ساختار هر کروموزوم

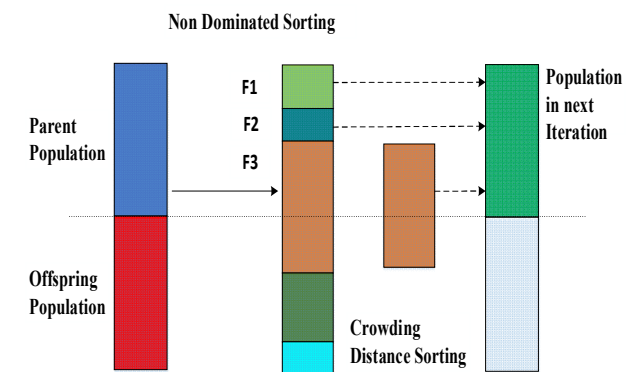
در این ساختار، متغیرهای مکان نصب DG با LDG نشان داده شده



شکل (۵): طرح‌واره روش NSGA II

مهم‌ترین عملگر در الگوریتم ژنتیک، ترکیب است. ترکیب فرایندی است که در آن، نسل قدیمی کروموزوم‌ها با یکدیگر مخلوط و ترکیب می‌شوند تا نسل تازه‌ای از کروموزوم‌ها به وجود بیاید. نحوه ترکیب

شکل، ابتدا به کمک جمعیت والد، جمعیتی از فرزندان بر اساس دو عملگر ترکیب و جهش که بعداً توضیح داده خواهند شد، ایجاد می‌شود. سپس والدین و فرزندان با هم ترکیب شده تا جمعیتی با اندازه  $2N$  ایجاد گردد. برای طبقه‌بندی جمعیت تشکیل شده، مرتب‌سازی نامغلوب صورت می‌گیرد. با انجام این مرتب‌سازی جمعیت جدیدی شکل گرفته که دارای جبهه‌های مختلفی در هر زمان است. جبهه‌بندی با توجه به روند مغلوب‌سازی جواب‌ها انجام شده و هر جوابی در این جبهه‌ها دارای مقدار مشخصی از برازندگی هستند. علاوه بر برازندگی، فاصله بین هر جواب از جواب‌های مجاور آن نیز تعیین می‌شوند تا توزیع مناسب جواب‌ها مشخص شود.



شکل (۴): طرح‌واره کلی NSGA II

جمعیت والد در تکرار بعدی با توجه به مقادیر برازندگی (همان مقادیر توابع هدف) و فاصله جواب‌ها تعیین می‌شوند. سپس این مراحل تکرار شده تا در نهایت جمعیتی شکل گیرد که توسط سایر جبهه‌ها و جواب‌ها مغلوب نشود.

طرح‌واره کلی الگوریتم NSGA II در شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق این شکل، در ابتدا اطلاعات اولیه شبکه شامل امپدانس خطوط، مقادیر بارهای اکتیو و راکتیو و... وارد الگوریتم بهینه‌سازی می‌شوند. متغیرهای در نظر گرفته شده در این مسئله شامل مکان و ظرفیت نصب منابع تولید پراکنده به‌ازای اهداف مختلفی است که ساختار یک کروموزوم از آن پیش‌تر در شکل (۲) نشان داده شد. جمعیت اولیه بر مبنای مقادیر تصادفی برای این متغیرها ایجاد می‌شود، سپس به‌ازای هر یک از این کروموزوم‌ها و با توجه به اهداف مورد نظر یک بار محاسبات پخش بار و اتصال کوتاه انجام می‌گیرد.

از طریق نتایج محاسبات پخش بار می‌توان شاخص‌های تلفات، انحراف ولتاژ و پایداری ولتاژ را محاسبه کرد. همچنین برای محاسبه شاخص اتصال کوتاه، یک خطای سه فاز در هر یک از خطوط ایجاد شده و مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

مرتب‌سازی جبهه‌ها بر مبنای برازندگی و فاصله مرحله بعدی است. مطابق آنچه گفته شد، روند مرتب‌سازی جبهه‌ها آغاز شده، جبهه‌ها با رتبه‌های مختلف مرتب می‌شوند. بدترین جبهه‌ها حذف می‌شوند. مابقی جبهه‌ها مرتب‌سازی شده تا جبهه‌ای از جواب‌ها که توسط دیگر جبهه‌ها مغلوب نشده است، تعیین شود و در نهایت، جمعیت والد جدید تشکیل می‌شود.

بعد از تولید جمعیت اولیه والدین به صورت تصادفی و ارزیابی آن‌ها، جمعیت فرزندان به اندازه والدین ایجاد می‌شود. از ترکیب این دو مجموعه، نسل بعدی ایجاد می‌شود. به این ترتیب یک تکرار از الگوریتم انجام می‌گیرد و به همین ترتیب این روند تکرار می‌شود تا زمانی که شرط پایان الگوریتم برقرار شود. در نهایت، جبهه اول نسل آخر که در واقع جواب‌های نامغلوب مجموعه هستند، به عنوان خروجی الگوریتم برگردانده می‌شود.

شرط توقف در الگوریتم خاتمه تعداد حداکثر تکرارهای الگوریتم است. پس از اینکه تکرارها به مقدار مشخصی رسید، الگوریتم متوقف و جواب‌ها نشان داده می‌شوند. این جواب‌ها شامل مجموعه جوابی است که هر یک دارای وضعیت مشخصی از مکان و ظرفیت نصب DG و همچنین مقدار توابع هدف لحاظ شده است. از بین این جواب‌ها بهترین پاسخ به روش فازی محاسبه می‌شود. در مرجع [۲۷] برای این منظور در ابتدا تابع عضویت  $\tau_i^k$  برای  $k$  امین پاسخ به ازای تابع هدف  $F_i^k$  مطابق رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$\tau_i^k = \frac{F_i^{\max} - F_i^k}{F_i^{\max} - F_i^{\min}} \quad (17)$$

در این رابطه،  $F_i^{\max}$  و  $F_i^{\min}$  به ترتیب بیانگر حداکثر و حداقل مقدار تابع هدف نام در میان تمامی پاسخ‌های نامغلوب است.

پس از تعیین مقدار  $\tau_i^k$  با استفاده از تصمیم فازی، بهترین جواب از بین جواب‌های نامغلوب موجود در جواب‌های پارتو (که تعداد آن برابر  $M$  است)، مطابق رابطه (۱۸) پیدا می‌شود:

$$x^{k*} = \max \frac{\sum_{i=1}^{Nobj} \tau_i^k}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{Nobj} \tau_i^j} \quad (18)$$

در این رابطه،  $Nobj$  تعداد توابع هدف لحاظ شده در مسئله است.

## ۵. ساختار شبکه

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی از شبکه ۳۳ شینه IEEE مرجع [۲۸] استفاده شده که در شکل (۷) نشان داده شده است.

متغیرها در شکل (۶) نشان داده شده است. مطابق این شکل، ابتدا دو عضو از جمعیت اولیه به صورت تصادفی انتخاب شده که با  $p_1$  و  $p_2$  نشان داده شده است. سپس دو عدد تصادفی  $r_1$  و  $r_2$  ایجاد شده که در اینجا به ترتیب برابر ۲ و ۱ هستند. سپس اطلاعات کروموزوم  $p_1$  و  $p_2$  با توجه به مقادیر تصادفی  $r_1$  و  $r_2$  تغییر پیدا کرده و در واقع کروموزوم‌ها، ژن‌های خود را به اشتراک می‌گذارند. به این ترتیب دو جمعیت جدید به صورت  $b_1$  و  $b_2$  ایجاد می‌شود.

|       |    |      |    |      |      |      |
|-------|----|------|----|------|------|------|
|       |    | r1=2 |    | r2=1 |      |      |
| $p_1$ | 3  | 7    | 10 | 95.5 | 33.1 | 70.7 |
| $p_2$ | 20 | 32   | 37 | 10.8 | 22.5 | 15.6 |
| $b_1$ | 3  | 7    | 37 | 95.5 | 22.5 | 15.6 |
| $b_2$ | 20 | 32   | 10 | 10.8 | 33.1 | 70.7 |

شکل (۶): نحوه ترکیب متغیرها

جهش نیز عملگر دیگری است که جواب‌های ممکن دیگری را متولد می‌کند. در جهش، ممکن است ژنی از مجموعه ژن‌های جمعیت حذف شود یا ژنی که تا به حال در جمعیت وجود نداشته است، به آن اضافه شود. به منظور انجام جهش، یکی از کروموزوم‌ها به طور تصادفی انتخاب می‌شود. سپس یکی از ژن‌های مربوط به محل نصب تولید پراکنده به طور تصادفی انتخاب و عدد متناظر با آن با یک مقدار تصادفی عدد صحیح جدید جایگزین می‌شود. همچنین یکی از ژن‌های مرتبط با بخش ظرفیت منابع تولید پراکنده برای تغییر انتخاب می‌شود و بر اساس رابطه (۱۶) مقدار آن تغییر می‌یابد.

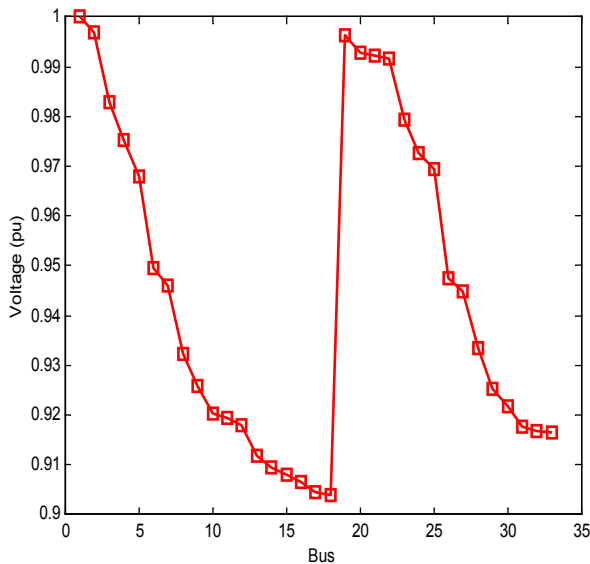
$$x'_i = x_{r_1} + F \times (x_{r_2} - x_{r_1}) \quad (16)$$

در این رابطه،  $x'_i$  بردار جهش یافته جدید،  $x_{r_1}$  تا  $x_{r_2}$  سه بردار تصادفی از بین جمعیت و  $F$  مقدار ثابت از پیش تعیین شده است. با استفاده از این نوع ترکیب و جهش می‌توان متغیرها را در محدوده مجاز آن‌ها حفظ کرد. با وجود این، اگر متغیری کمتر یا بیشتر از مقدار مجاز آن انتخاب شوند، به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار موجود در بازه آن انتخاب می‌شود؛ برای نمونه اگر پس از جهش ظرفیت متناظر با منبع تولید پراکنده ۱/۵۶ مگاوات انتخاب شود، در حالی که حداکثر مقدار مجاز آن ۱/۵ مگاوات بوده است، عدد متناظر با آن همان مقدار ۱/۵ مگاوات انتخاب می‌شود. به این ترتیب می‌توان تضمین کرد که از طریق ترکیب و جهش، مقادیر ژن‌های هر کروموزوم در بازه مجاز قرار می‌گیرند.

## جایابی و تعیین ظرفیت منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع با استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی... ۴۹

در شرایط عادی شبکه، تلفات توان شبکه برابر  $210/8433$  کیلووات و حداقل ولتاژ شبکه نیز مربوط به شین ۱۸ با مقدار ولتاژ  $0/9039$  پریونیت است.

در شکل (۸) نیز پروفیل ولتاژ شبکه در شرایط عادی نشان داده شده است.



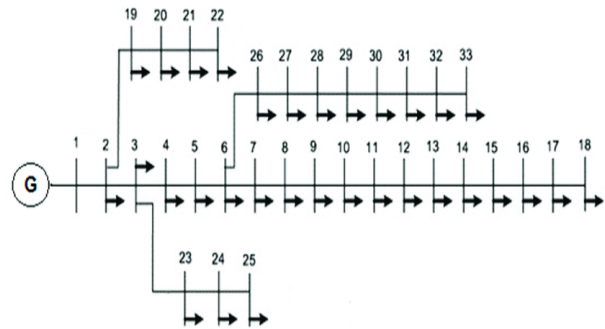
شکل (۸): پروفیل ولتاژ شبکه در حالت عادی آن

به منظور انجام شبیه‌سازی در تمامی حالت جمعیت اولیه الگوریتم برابر ۱۲۰ و حداکثر تعداد تکرار الگوریتم برابر ۲۰۰ تکرار لحاظ شده است. همچنین نرخ ترکیب و جهش به ترتیب برابر  $0/7$  و  $0/3$  لحاظ شده که بیانگر آن است که به ترتیب ۷۰ و ۳۰ درصد از جمعیت کل توسط این عملگرها تغییر می‌یابند.

### ۶. ارزیابی و تحلیل نتایج

از آنجا که هدف این تحقیق جایابی و تعیین ظرفیت منابع تولید پراکنده با اهداف مختلف است، پنج سناریوی برای آن بررسی می‌شود:

۱. کاهش تلفات و بهبود شاخص پایداری ولتاژ به طور همزمان؛
۲. کاهش تلفات و کاهش سطح اتصال کوتاه به طور همزمان؛
۳. کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش سطح اتصال کوتاه به طور همزمان؛
۴. کاهش تلفات، بهبود شاخص پایداری و کاهش سطح اتصال کوتاه به طور همزمان؛
۵. کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، بهبود شاخص پایداری ولتاژ و کاهش سطح اتصال کوتاه به طور همزمان.



شکل (۷): ساختار شبکه ۳۳ شینه IEEE

اطلاعات این شبکه در جدول (۱) درج شده است.

جدول (۱): اطلاعات شبکه ۳۳ شینه IEEE

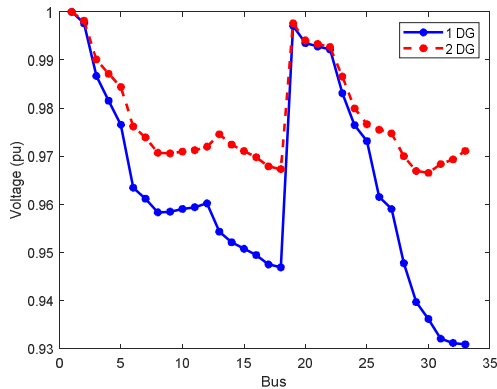
| شماره خط | شین ابتدایی | شین انتهایی | مقاومت | راکتانس | بار اکتیو (KW) | بار راکتیو (KVAR) |
|----------|-------------|-------------|--------|---------|----------------|-------------------|
| ۱        | ۱           | ۲           | ۰/۰۹۲۲ | ۰/۰۴۷۷  | ۱۰۰            | ۶۰                |
| ۲        | ۲           | ۳           | ۰/۴۹۳۰ | ۰/۲۵۱۱  | ۹۰             | ۴۰                |
| ۳        | ۳           | ۴           | ۰/۳۶۶۰ | ۰/۱۸۶۴  | ۱۲۰            | ۸۰                |
| ۴        | ۴           | ۵           | ۰/۳۸۱۱ | ۰/۱۹۴۱  | ۶۰             | ۳۰                |
| ۵        | ۵           | ۶           | ۰/۸۱۹۰ | ۰/۷۰۷۰  | ۶۰             | ۲۰                |
| ۶        | ۶           | ۷           | ۰/۱۸۷۲ | ۰/۶۱۸۸  | ۲۰۰            | ۱۰۰               |
| ۷        | ۷           | ۸           | ۱/۷۱۱۴ | ۱/۲۳۵۱  | ۲۰۰            | ۱۰۰               |
| ۸        | ۸           | ۹           | ۱/۰۳۰۰ | ۰/۷۴۰۰  | ۶۰             | ۲۰                |
| ۹        | ۹           | ۱۰          | ۱/۰۴۰۰ | ۰/۷۴۰۰  | ۶۰             | ۲۰                |
| ۱۰       | ۱۰          | ۱۱          | ۰/۱۹۶۶ | ۰/۰۶۵۰  | ۳۵             | ۳۰                |
| ۱۱       | ۱۱          | ۱۲          | ۰/۳۷۴۴ | ۰/۱۲۳۸  | ۶۰             | ۳۵                |
| ۱۲       | ۱۲          | ۱۳          | ۱/۴۶۸۰ | ۱/۱۵۵۰  | ۶۰             | ۳۵                |
| ۱۳       | ۱۳          | ۱۴          | ۰/۵۴۱۶ | ۰/۷۱۲۹  | ۱۲۰            | ۸۰                |
| ۱۴       | ۱۴          | ۱۵          | ۰/۵۹۱۰ | ۰/۵۲۶۰  | ۶۰             | ۱۰                |
| ۱۵       | ۱۵          | ۱۶          | ۰/۷۴۶۳ | ۰/۵۴۵۰  | ۶۰             | ۲۰                |
| ۱۶       | ۱۶          | ۱۷          | ۱/۲۸۹۰ | ۱/۷۲۱۰  | ۶۰             | ۲۰                |
| ۱۷       | ۱۷          | ۱۸          | ۰/۷۳۲۰ | ۰/۵۷۴۰  | ۹۰             | ۴۰                |
| ۱۸       | ۲           | ۱۹          | ۰/۱۶۴۰ | ۰/۱۵۶۵  | ۹۰             | ۴۰                |
| ۱۹       | ۱۹          | ۲۰          | ۱/۵۰۴۲ | ۱/۳۵۵۴  | ۹۰             | ۴۰                |
| ۲۰       | ۲۰          | ۲۱          | ۰/۴۰۹۵ | ۰/۴۷۷۴  | ۹۰             | ۴۰                |
| ۲۱       | ۲۱          | ۲۲          | ۰/۷۰۸۹ | ۰/۹۳۷۳  | ۹۰             | ۴۰                |
| ۲۲       | ۳           | ۲۳          | ۰/۴۵۱۲ | ۰/۳۰۸۳  | ۹۰             | ۵۰                |
| ۲۳       | ۲۳          | ۲۴          | ۰/۸۹۸۰ | ۰/۷۰۹۱  | ۴۲۰            | ۲۰۰               |
| ۲۴       | ۲۴          | ۲۵          | ۰/۸۹۶۰ | ۰/۷۰۱۱  | ۴۲۰            | ۲۰۰               |
| ۲۵       | ۶           | ۲۶          | ۰/۲۰۳۰ | ۰/۱۰۳۴  | ۶۰             | ۲۵                |
| ۲۶       | ۲۶          | ۲۷          | ۰/۲۸۴۲ | ۰/۱۴۴۷  | ۶۰             | ۲۵                |
| ۲۷       | ۲۷          | ۲۸          | ۱/۰۵۹۰ | ۰/۹۳۳۷  | ۶۰             | ۲۰                |
| ۲۸       | ۲۸          | ۲۹          | ۰/۸۰۴۲ | ۰/۷۰۰۶  | ۱۲۰            | ۷۰                |
| ۲۹       | ۲۹          | ۳۰          | ۰/۵۰۷۵ | ۰/۲۵۸۵  | ۲۰۰            | ۶۰۰               |
| ۳۰       | ۳۰          | ۳۱          | ۰/۹۷۴۴ | ۰/۹۶۳۰  | ۱۵۰            | ۷۰                |
| ۳۱       | ۳۱          | ۳۲          | ۰/۳۱۰۵ | ۰/۳۶۱۹  | ۲۱۰            | ۱۰۰               |
| ۳۲       | ۳۲          | ۳۳          | ۰/۳۴۱۰ | ۰/۵۳۰۲  | ۶۰             | ۴۰                |
| ۳۳       | ۲۱          | ۸           | ۲      | ۲       | ۰              | ۰                 |
| ۳۴       | ۹           | ۱۵          | ۲      | ۲       | ۰              | ۰                 |
| ۳۵       | ۲۲          | ۱۲          | ۲      | ۲       | ۰              | ۰                 |
| ۳۶       | ۲۵          | ۲۹          | ۰/۵    | ۰/۵     | ۰              | ۰                 |
| ۳۷       | ۲۵          | ۲۹          | ۰/۵    | ۰/۵     | ۰              | ۰                 |



### ۶.۱. سناریوی ۱: کاهش تلفات و بهبود شاخص پایداری ولتاژ به طور همزمان

با وجود این مجموعه جواب، انتخاب بهترین جواب از این مجموعه سخت می‌باشد. با اجرای بخش فازی بهترین مکان‌های نصب شین‌های ۱۳ و ۳۳، ظرفیت‌های بهینه به ترتیب ۸۹۱/۴ و ۹۲۵/۸۶ کیلووات است. تلفات و شاخص پایداری ولتاژ تعیین شده نیز به ترتیب ۹۲/۰۳ و ۱/۱۲۴۶ کیلووات است.

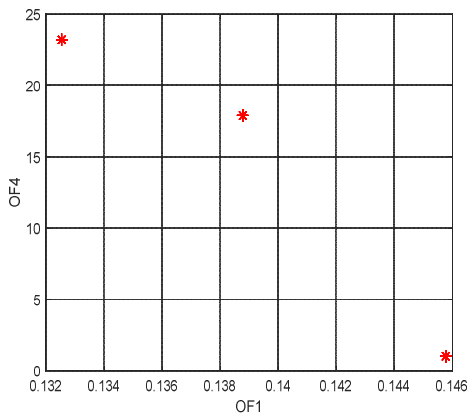
منحنی ولتاژ شبکه در این سناریو در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۱): منحنی ولتاژ شین‌های شبکه به‌ازای یک و دو منبع تولید پراکنده در سناریوی ۱

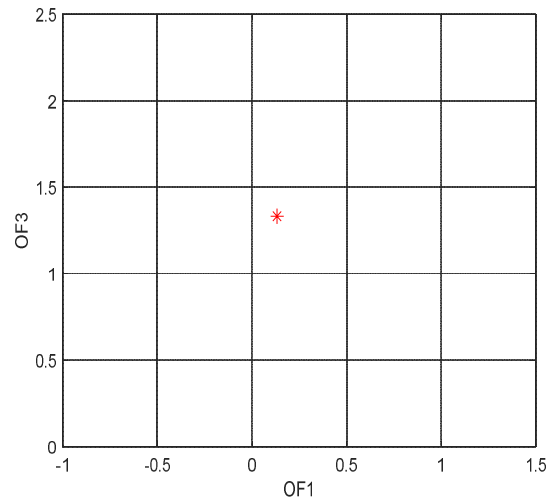
### ۶.۲. سناریوی ۲: کاهش تلفات و کاهش سطح اتصال کوتاه به طور همزمان

به‌کارگیری منابع تولید پراکنده در شبکه می‌تواند بر روی جریان‌های خط و سطح اتصال کوتاه شبکه اثر بگذارد. این سناریو مکان و ظرفیت بهینه یک و دو منابع تولید پراکنده را به‌منظور کاهش تلفات (OF1) و سطح اتصال کوتاه (OF4) بررسی کرده است. جهت‌های پارتوی حاصل در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. بهترین نتایج به‌دست آمده به‌کمک روش فازی در جدول (۲) آورده شده است.

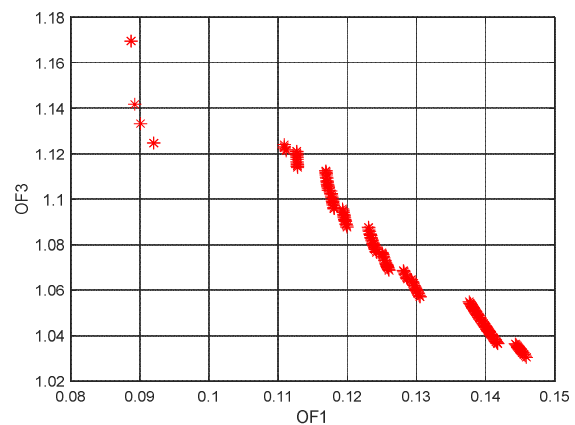


شکل (۱۲): مجموعه جواب به‌ازای سناریوی ۲ و جایابی و تعیین ظرفیت یک منبع تولید پراکنده

در این سناریو، هدف کمینه‌سازی تلفات (OF1) و بهبود شاخص پایداری ولتاژ (OF3) است. مقدار شاخص برای پایداری ولتاژ در حالت عادی شبکه برابر ۳/۰۴۸ است. جواب‌های حاصل از این حالات به‌ازای جایابی و تعیین ظرفیت یک و دو منبع تولید پراکنده در شکل‌های (۹) و (۱۰) آورده شده است. نکته جالب در اینجا این است که به‌ازای یک منبع تولید پراکنده، فقط یک جواب بهینه حاصل شده است. در واقع در این حالت، مجموعه جواب‌ها توسط همان نقطه مغلوب شده است. در این حالت منبع تولید پراکنده در شین ۱۲ با ظرفیت ۹۲۷/۳۹ کیلووات انتخاب شده و مقدار تلفات و شاخص پایداری ولتاژ نیز به ترتیب برابر ۱۳۲/۳ و ۱/۳۳۱۹ کیلووات است.



شکل (۹): مجموعه جواب به‌ازای سناریوی ۱ و جایابی و تعیین ظرفیت یک منبع تولید پراکنده

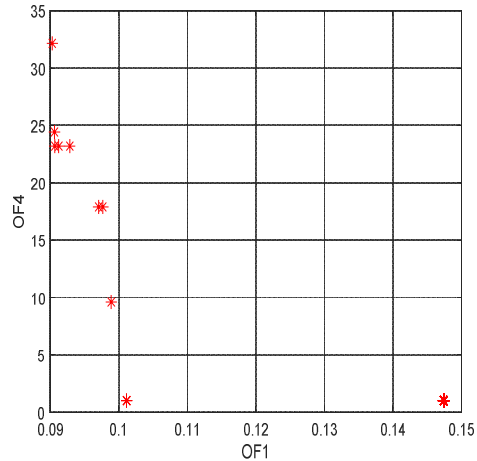


شکل (۱۰): مجموعه جواب به‌ازای سناریوی ۱ و جایابی و تعیین ظرفیت دو منبع تولید پراکنده

۳.۶. سناریوی ۳: کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و

کاهش سطح اتصال کوتاه به‌طور همزمان

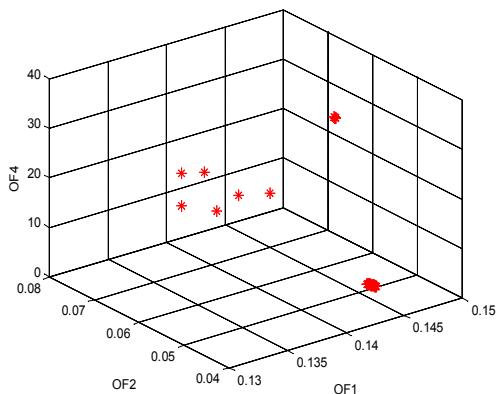
در سناریوهای قبلی، فقط دو هدف در مسئله مد نظر بود. این سناریو به جایابی و تعیین ظرفیت منابع تولید پراکنده به‌ازای سه تابع هدف کاهش تلفات (OF<sub>1</sub>)، بهبود پروفیل ولتاژ (OF<sub>2</sub>) و کاهش سطح اتصال کوتاه (OF<sub>4</sub>) می‌پردازد. مجموعه جواب حاصل در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده و بهترین جواب منتخب در جدول (۳) آورده شده است. اپراتور می‌تواند هر یک از جواب‌ها را به دلخواه برحسب نیاز انتخاب کند. مطابق این جدول بهترین مکان از دید سه هدف کاهش تلفات، پروفیل ولتاژ و کاهش سطح اتصال کوتاه به‌ازای یک و دو منبع تولید پراکنده به‌ترتیب شین ۱۸ و شین‌های ۱۸ و ۳۳ انتخاب شده است. به نظر می‌رسد شین ۱۸ برای نصب منابع تولید پراکنده از دید کاهش سطح اتصال کوتاه مؤثر است؛ زیرا در سناریوی قبلی نیز این مکان انتخاب شده بود، درحالی‌که در سایر شین‌ها، سطح اتصال کوتاه مقادیر بیشتری را نشان می‌دهند.



شکل (۱۳): مجموعه جواب به‌ازای سناریوی ۲ و جایابی و تعیین ظرفیت دو منبع تولید پراکنده

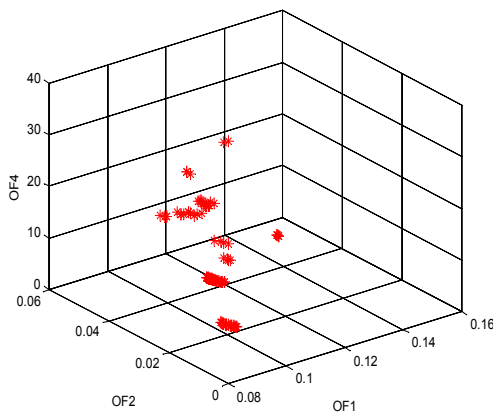
جدول (۲): انتخاب بهترین نتایج حاصل از مجموعه جواب سناریوی ۲

| تعداد | مکان  | ظرفیت         | OF <sub>1</sub> | OF <sub>4</sub> |
|-------|-------|---------------|-----------------|-----------------|
| ۱     | ۱۸    | ۸۸۷/۵۶        | ۱۴۵/۷۸          | ۱/۰۱۸۵          |
| ۲     | ۳۳-۱۸ | ۷۲۱/۳۷-۸۴۵/۹۲ | ۱۰۱/۱۳          | ۱/۰۱۸۷          |

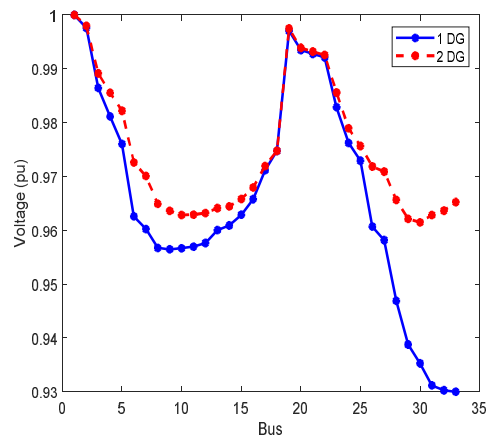


شکل (۱۵): مجموعه جواب به‌ازای سناریوی ۳ و جایابی و تعیین ظرفیت یک منبع تولید پراکنده

مطابق این جدول زمانی که یک منبع در شبکه جایابی و تعیین ظرفیت شده، بهترین مکان برای آن از دید دو شاخص تلفات و سطح اتصال کوتاه شبکه شین ۱۸ و ظرفیت بهینه آن ۸۸۷/۵۶ کیلووات انتخاب شده است. به‌ازای جایابی و تعیین ظرفیت دو منبع تولید پراکنده نیز بهترین مکان‌ها از دید شاخص‌های مذکور شین‌های ۱۸ و ۳۳ و ظرفیت‌های آن‌ها به‌ترتیب ۸۴۵/۹۲ و ۷۲۱/۳۷ کیلووات انتخاب شده است. همان‌طور که مشخص است، با وجود دو منبع تولید پراکنده شاخص اتصال کوتاه بیشتر می‌باشد. منحنی‌های پروفیل ولتاژ این حالات در شکل (۱۴) نشان داده شده است.



شکل (۱۶): مجموعه جواب به‌ازای سناریوی ۳ و جایابی و تعیین ظرفیت دو منبع تولید پراکنده

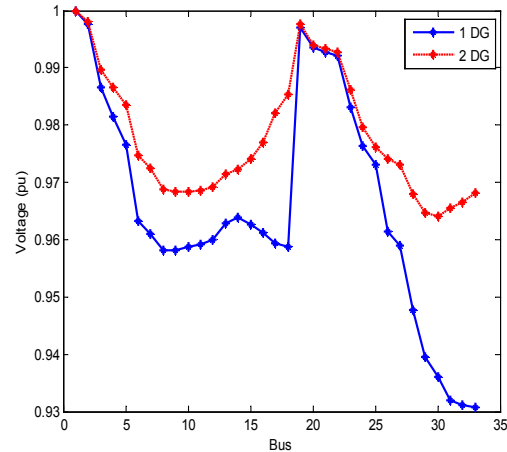


شکل (۱۴): منحنی ولتاژ شین‌های شبکه به‌ازای یک و دو منبع تولید پراکنده در سناریوی ۲

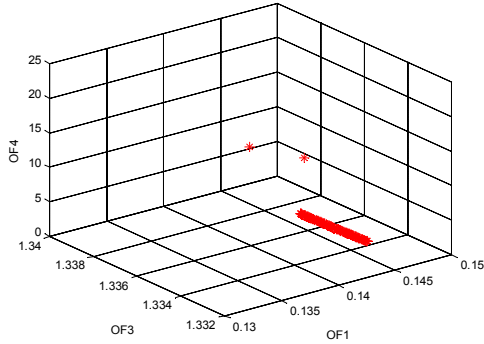
جدول (۳): انتخاب بهترین نتایج حاصل از مجموعه جواب سناریوی ۳

| تعداد | مکان  | ظرفیت         | OF <sub>۱</sub> | OF <sub>۲</sub> | OF <sub>۳</sub> |
|-------|-------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ۱     | ۱۸    | ۹۱۰/۳۲        | ۱۴۵/۹           | ۰/۰۴۹۶          | ۱/۰۱۸۵          |
| ۲     | ۳۳-۱۸ | ۸۶۴/۵۳-۸۶۸/۴۷ | ۱۰۳/۱           | ۰/۰۱۹۸          | ۱/۰۱۸۷          |

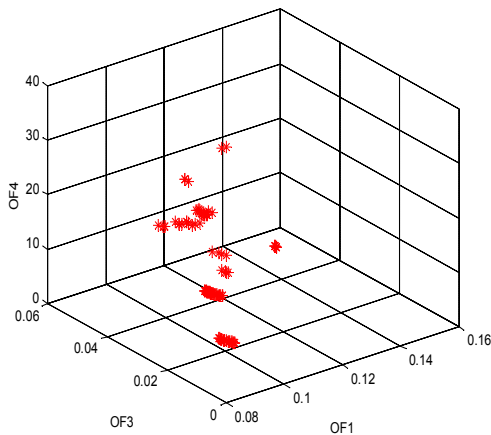
در این وضعیت نیز ولتاژ تمامی شین‌ها در محدوده مجاز آن قرار گرفته‌اند و منحنی پروفیل ولتاژ آن در این حالات در شکل (۱۷) نشان داده شده است.



شکل (۱۷): منحنی ولتاژ شین‌های شبکه به‌ازای یک و دو منبع تولید پراکنده در سناریوی ۳



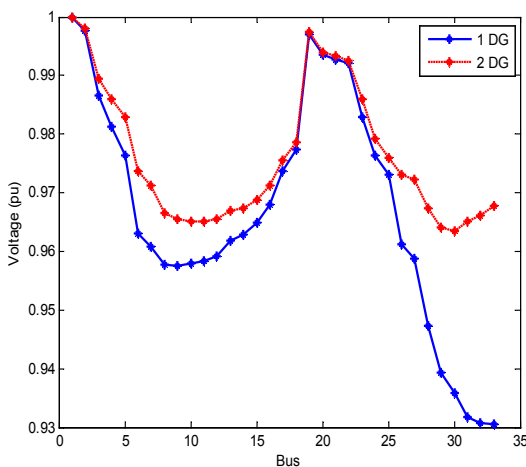
شکل (۱۸): مجموعه جواب به‌ازای سناریوی ۴ و جایابی و تعیین ظرفیت یک منبع تولید پراکنده



شکل (۱۹): مجموعه جواب به‌ازای سناریوی ۴ و جایابی و تعیین ظرفیت دو منبع تولید پراکنده

جدول (۴): انتخاب بهترین نتایج حاصل از مجموعه جواب سناریوی ۴

| تعداد | مکان  | ظرفیت         | OF <sub>۱</sub> | OF <sub>۲</sub> | OF <sub>۴</sub> |
|-------|-------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ۱     | ۱۸    | ۹۲۵/۱۶        | ۱۴۶/۱           | ۱/۳۳۳۹          | ۱/۰۱۸۵          |
| ۲     | ۳۳-۱۸ | ۸۹۲/۷۲-۷۴۶/۱۶ | ۱۰۱             | ۱/۱۴۰۱          | ۱/۰۱۸۷          |



شکل (۲۰): منحنی ولتاژ شین‌های شبکه به‌ازای یک و دو منبع تولید پراکنده در سناریوی ۴

#### ۴.۶. سناریوی ۴: کاهش تلفات، بهبود شاخص پایداری و کاهش سطح اتصال کوتاه به‌طور همزمان

در این سناریو نیز با در نظر گرفتن سه تابع هدف مختلف، یک فضای سه‌بعدی از جواب‌ها به وجود آمده که در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نشان داده شده است. پاسخ منتخب در این سناریو نیز در جدول (۴) آورده شده است. همچنین منحنی ولتاژهای حاصل، در شکل (۲۰) آورده شده است.

با بررسی این نتایج باز هم مشخص شد که بهترین نتایج از دید کاهش سطح اتصال کوتاه و سایر اهداف لحاظ‌شده برای یک منبع تولید پراکنده مکان ۱۸ و برای دو منبع نیز شین ۱۸ و ۳۳ می‌باشد. این مکان‌ها حداقل جریان خط را در شبکه ایجاد می‌کنند، به‌طوری که مطابق تابع هدف OF<sub>۴</sub>، حداکثر نسبت جریان خطای ایجادشده با جریان خطای حالت عادی شبکه به‌ازای یک منبع، فقط ۱/۰۱۸۵ و به‌ازای دو منبع تولید پراکنده ۱/۰۱۸۷ می‌باشد.

به دست آمده به ازای هر چهار تابع هدف برای مکان‌یابی و تعیین ظرفیت دو منبع تولید پراکنده (سناریوی ۵) و مقایسه آن با تحقیق دیگری [۲۶] با موضوع مکان‌یابی و تعیین ظرفیت DGها با سه تابع از توابع هدف این مقاله (غیر از کاهش سطح اتصال کوتاه) و با روش NSGA II مشاهده می‌شود که در آن، مرجع شین‌های ۱۷ و ۳۲ به عنوان مکان‌های بهینه و شاخص‌های میزان تلفات (برحسب کیلووات)، انحراف ولتاژ و پایداری ولتاژ به ترتیب برابر با ۱۰۴/۲، ۰/۵۵۴ و ۳/۷۲۸ محاسبه شده‌اند، در حالی که در این تحقیق با اضافه شدن کاهش سطح اتصال کوتاه به عنوان تابع هدف چهارم، بهترین شین‌ها برای نصب منابع تولید پراکنده ۱۸ و ۳۳ و سه شاخص اشاره شده در بالا نیز به مقادیر ۱۰۳/۵ و ۰/۱۸۴ و ۱/۱۳۲ تغییر پیدا کردند؛ به عبارتی، با مکان‌های مشخص شده در این مقاله، علاوه بر ایجاد حداقل جریان خطا در شبکه، مقادیر سه تابع هدف دیگر نیز بهبود یافت.

### ۷. نتیجه‌گیری

نصب منابع تولید پراکنده چالش‌هایی نظیر افزایش سطح اتصال کوتاه را هم به دنبال دارند که بایستی به آن نیز توجه کرد.

در این تحقیق، به جایابی و تعیین ظرفیت منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع با اهداف چندگانه پرداخته شد. توابع هدف شامل کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، بهبود شاخص پایداری ولتاژ و کاهش سطح اتصال کوتاه شبکه بود. برای حل این مسئله از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه نامغلوب بهبود یافته II استفاده شد. خروجی این الگوریتم شامل مجموعه‌ای از جواب‌های مناسب برای نصب منابع تولید پراکنده است که هر یک از آن‌ها دارای مقادیر مشخصی از هر یک از توابع هدف لحاظ شده هستند. اپراتور می‌تواند برحسب نیاز خود، یکی از این پاسخ‌ها را انتخاب کند. با وجود این، برای انتخاب بهترین جواب محتمل از بین این جواب‌ها، یک روش فازی در الگوریتم بهینه‌سازی مذکور قرار داده شد.

ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی نشان داد که الگوریتم بهینه‌سازی مذکور به خوبی قادر به حل مسئله بوده و جواب بهینه مسئله به ازای هر یک از این حالات محاسبه شد.

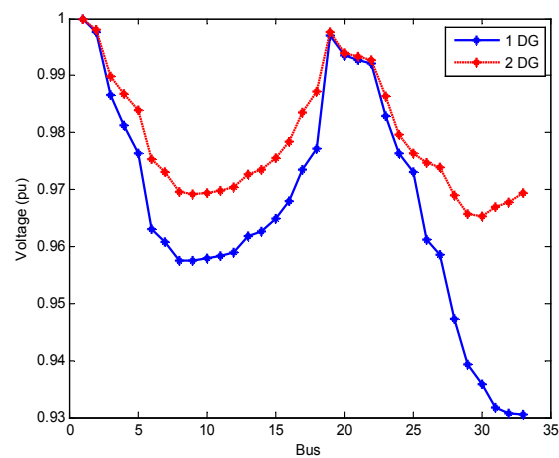
### ۵. سناریوی ۵: کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، بهبود شاخص پایداری و کاهش سطح اتصال کوتاه به طور همزمان

هدف این سناریو بررسی بهترین مکان و ظرفیت به ازای هر چهار تابع هدف مورد نظر است. از آنجایی که امکان رسم مجموعه جواب حاصل در چهار بُعد وجود ندارد، فقط بهترین جواب منتخب در جدول (۵) آورده شده است.

جدول (۵): انتخاب بهترین نتایج حاصل از مجموعه جواب سناریوی ۵

| تعداد | مکان  | ظرفیت      | OF <sub>۱</sub> | OF <sub>۲</sub> | OF <sub>۳</sub> | OF <sub>۴</sub> |
|-------|-------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ۱     | ۱۸    | ۹۲۲/۳۴     | ۱۴۶/۱           | ۰/۰۴۹۰          | ۱/۳۳۴۱          | ۱/۰۱۸۵          |
| ۲     | ۳۳-۱۸ | ۸۹۶/۹۸۲۲/۷ | ۱۰۳/۵           | ۰/۰۱۸۴          | ۱/۱۳۲۰          | ۱/۰۱۸۷          |

با در نظر گرفتن این اهداف، به طور همزمان بهترین شین‌ها برای نصب منابع تولید پراکنده ۱۸ و ۳۳ هستند. منحنی‌های ولتاژ حاصل در این سناریو نیز در شکل (۲۱) نشان داده شده است. مطابق این شکل، تمامی شین‌ها در محدوده مجاز خود قرار گرفته‌اند.



شکل (۲۱): منحنی ولتاژ شین‌های شبکه به ازای یک و دو منبع تولید پراکنده در سناریوی ۵

در الگوریتم‌های چندهدفه، هرچه تنوع و تعداد توابع هدف بیشتر باشد جواب دقیق‌تر است؛ برای نمونه با در نظر گرفتن پاسخ

### مراجع

- [1] Bhattacharya, A. and Chattopadhyay P. K., "Hybrid Differential Evolution with Biogeography-based Optimization for Solution of Economic Load Dispatch", IEEE Transaction on Power System, Vol. 25, No. 4, pp. 1955–1964, 2010.
- [2] Niknam, T. and Doagou-Mojarrad, H., "Multi-objective Economic/emission Dispatch by Multi-objective Particle Swarm Optimization", IET Generation, Transmission, and

- Distribution., Vol. 6, No. 5, pp. 363–377, 2012.
- [3] Gandomkar, M., Vakilian, M. and Ehsan, M., "A Genetic-based Tabu Search Algorithm for Optimal DG Allocation in Distribution Networks", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 33, No. 12, pp. 1351–1363, 2005.
- [4] Benvindo, R., Pereira, Jr., Geraldo, R., Martina ds Costa, Javier Contreras and Sanches Mantovani Jose R., "Optimal Distributed Generation and Reactive Power Allocation in Electrical Distribution Systems", *IEEE Transaction on Sustainable Energy*, Vol. 7, No. 3, PP. 975-984, 2016.
- [5] Naderi, E., Seifi, H. and Sepasian, M. S., "A Dynamic Approach for Distribution System Planning Considering Distributed Generation", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 27, No. 3, pp. 1313–1322, 2012.
- [6] Pandi, R., Zeineldin, H. and Xiao, W., "Determining Optimal Location and Size of Distributed Generation Resources Considering Harmonic and Protection Coordination Limits", *IEEE Transaction on Power System*, Vol. 28, No. 2, pp. 1245–1254, 2013.
- [7] Abu-Mouti, F. S. and El-Hawary, M. E., "Optimal Distributed Generation Allocation and Sizing in Distribution Systems via Artificial Bee Colony Algorithm", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 26, No. 4, pp. 2090–2101, 2011.
- [8] Suresh Kumar, S. and Kowsalya, M., "Optimal Allocation of Solar Based Distributed Generators in Distribution System Using Bat Algorithm", *Elsevier: Perspective in Science*, Vol. 8, pp. 270-272, 2016.
- [9] Sureshkumar, Sudabattula and Kowsalya, "Optimal Allocation of Wind Based Distributed Generators in Distribution System Using Cuckoo Search Algorithm", *Elsevier: Procedia Computer Science (2nd International Conference on Intelligent Computing, Communication & Convergence)*, Vol. 92, pp. 298-304, 2016.
- [10] Abri, R. S., Al, El-Saadany, E. F. and Atwa, Y. M., "Optimal Placement and Sizing Method to Improve the Voltage Stability Margin in A Distribution System Using Distributed Generation", *IEEE Transaction on Power System*, Vol. 28, No. 1, pp. 326–334, 2013.
- [11] Injeti, S. K. and Kumar, N. P., "A Novel Approach to Identify Optimal Access Point and Capacity of Multiple DGs in a Small, Medium and Large-scale Radial Distribution Systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 45, No. 1, pp. 142–151, 2013.
- [12] Farouk, M., Atwa, Y. and El-Saadany, E. F., "DG Allocation for Benefit Maximization in Distribution Networks", *IEEE Transaction on Power System*, Vol. 28, No. 2, pp. 639–649, 2013.
- [13] Singh, D. and Verma, K. S., "Multiobjective Optimization for DG Planning with Load Models", *IEEE Transaction on Power System*, Vol. 24, No. 1, pp. 427–436, 2009.
- [14] Nekooei, K., Farsangi, M., Nezamabadi-Pour, H. and Lee, K. Y., "An Improved Multi-objective Harmony Search for Optimal Placement of DGs in Distribution Systems", *IEEE Transaction on Smart Grid*, Vol. 4, No. 1, pp. 557–567, 2013.
- [15] Ali, E. S., Abd Elazim, S. M. and Abdelaziz, A. Y., "Optimal Allocation and Sizing of Renewable Distributed Generation Using Ant Lion Optimization Algorithm", *Springer: Electrical Engineering*, Vol. 100, No. 1, pp. 99-109, 2016.
- [۱۶] جعفری، مسعود، منصف، حسن، «جایابی و ظرفیت‌یابی همزمان منابع تولید پراکنده و ادوات حفاظتی با استفاده از ترکیب الگوریتم کلونی مورچگان و تحلیل سلسله‌مراتبی»، *نشریه مهندسی و مدیریت انرژی*، شماره اول، سال اول، صفحه ۲۸-۳۷، پاییز ۱۳۹۰.
- [17] Rao, R., Ravindra, K., Satish, K. and Narasimham, S., "Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.28, No.1, pp. 317-325. 2013
- [18] Borges, C.L. and Falcao, D.M., "Optimal Distributed Generation Allocation for Reliability, Losses, and Voltage Improvement", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol.28, No.6, pp. 413-420, 2006
- [19] Ghosh, S., Ghoshal, S.P. and Ghosh, S., "Optimal Sizing and Placement of Distributed Generation in A Network System", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 32, No. 8, pp. 849-856, 2010
- [20] Naik, S.G., Khatod, D, and Sharma, M., "Optimal Allocation of Combined DG and Capacitor for Real Power Loss Minimization in Distribution Networks", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, , Vol. 53, pp. 967-973, 2013
- [21] Moravej, Z. and Akhlaghi, A., "A Novel Approach Based on Cuckoo Search for DG Allocation in Distribution Network", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 44, No.1, pp. 672-679, 2013
- [22] Poornazaryan, B., Karimyan, P., Gharehpetian, G. and Abedi, M., "Optimal Allocation and Sizing of DG Units Considering Voltage Stability, Losses and Load Variations", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 79, pp. 42-52, 2016
- [23] Maciel Renan, S., Moura, R., Vladimiro, M. and Antonio

P., "Multi objective Evolutionary Particle Swarm Optimization in the Assessment of the Impact of Distributed Generation", International Journal of Electrical Power System, Vol. 89, pp. 100-108, 2012.

- [24] Gonen, T., 'Electric Power Distribution Engineering Book' CRC press, 2015.
- [25] Nguyen Thuan, T. and Anh Viet Truong, "Distribution Network Reconfiguration for Power Loss Minimization and Voltage Profile Improvement Using Cuckoo Search Algorithm", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 68, pp. 233-242, 2015.
- [26] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T., "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II", IEEE Transaction on Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 2, pp. 182-197, 2002.
- [27] Sheng, W., Liu, K.-Y., Liu, Y., Meng, X. and Li, Y., "Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation via an Improved Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 30, No.2, pp. 569-578, 2015.
- [28] Aman, M., Jasmon, G., Bakar, A. and Mokhlis, H., "A New Approach for Optimum Simultaneous Multi-DG Distributed Generation Units Placement and Sizing Based on Maximization of System Load Ability Using HPSO (Hybrid Particle Swarm Optimization) Algorithm", Energy, Vol. 66, pp. 202-215, 2014.