

# بازآرایی چندمنظوره سیستم توزیع همراه با تبادل توان ریزشبکه‌ها با استفاده از روش پیشینه- کمینه فازی و الگوریتم تجمع ذرات

عباس فتاحی می‌آبادی و حسین سهرابیانی

بهره‌برداری مستقل از منابع تولید پراکنده و بارهای محلی از شبکه سراسری و به صورت جزیره، مفهوم ریزشبکه را به وجود می‌آورد. بر این اساس، سیستم قدرت بدون وقفه‌ای ایجاد می‌شود که قابلیت اطمینان بالایی دارد. ریزشبکه‌ها می‌توانند در کاهش ازدحام و تلفات توان در شبکه، کاهش هزینه‌های خطوط و افزایش راندمان انرژی، کمک شایانی به سیستم‌های توزیع نمایند. ریزشبکه‌ها باید قادر باشند که هم به صورت متصل به شبکه توزیع و هم به صورت مجزا از شبکه (جزیره‌ای) کارکردی ایمن و اقتصادی داشته باشند. کنترل یکپارچه تولیدات پراکنده در ریزشبکه‌ها با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت، تضمین بهره‌برداری اقتصادی، مطمئن و مؤثر آنها در هر دو حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه است [۲]. ریزشبکه‌ها می‌بایست جهت اطمینان از بهره‌برداری کلی سیستم و حفظ کیفیت توان به تبادل انرژی الکتریکی با شبکه توزیع بالادست خود بپردازند. از این رو حضور ریزشبکه‌ها می‌تواند در مسایل مختلف برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از شبکه توزیع از جمله بازآرایی سیستم‌های توزیع اثرگذار باشد.

در بازآرایی سیستم‌های توزیع قدرت، ادوات کلیدزنی موسوم به نقاط مانور وجود دارد که با تغییر وضعیت باز و بسته بودن آنها می‌توان به آرایش بهینه‌ای در ساختار شبکه توزیع با هدف بهبود شرایط بهره‌برداری دست یافت. در طی چند دهه اخیر، پژوهش‌های متعددی با روش‌های گوناگون در مورد بازآرایی مطرح شده که در اکثر این روش‌ها، تابع هدف به صورت تک‌منظوره در نظر گرفته شده [۳] تا [۷] اما از آنجایی که بازآرایی شبکه توزیع یک مسئله چندهدفه می‌باشد، لذا بهینه‌کردن دو یا چند تابع هدف به طور هم‌زمان می‌تواند نتیجه بهتری را برای شبکه توزیع به ارمغان بیاورد. مقاله [۸] از ترکیب الگوریتم‌های ژنتیکی و فازی استفاده کرده و در حقیقت این روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک بوده ولی ضمن استفاده از یک ساختار جدید برای کروموزوم، از روش فازی برای افزایش کارایی و سرعت الگوریتم بهره جسته است. مقاله [۹] تابع هدف را به صورت چندمنظوره با استفاده از روش منطق فازی بیان می‌کند. در این روش ابتدا برای هر یک از اهداف مورد نظر، یک تابع عضویت تعریف می‌شود. در ادامه، شبکه را به صورت حلقوی درآورده و سپس به ازای بازشدن یک کلید، هر یک از توابع عضویت ارزیابی می‌شوند. در مرحله بعد، درجه رضایت‌مندی برای این حالت با حداقل کردن مقادیر توابع عضویت به صورت یک‌جا (اشتراک توابع) به دست می‌آید. حال شرط طراحی بهینه، ماکسیمم مقدار درجه رضایت‌مندی کل خواهد بود که با یکی از روش‌های بهینه‌سازی فازی انجام می‌شود.

با این که از مدت‌ها پیش، شبکه‌های توزیع سنتی به صورت شعاعی بهره‌برداری می‌شوند در سیستم‌های توزیع مدرن با حضور ریزشبکه‌ها و به واسطه منابع تولید پراکنده موجود در آنها، ماهیت شعاعی بودن پخش توان بر مبنای مفاهیم قبلی معتبر نخواهد بود. بنابراین بدیهی است که بخش عمده‌ای از برنامه‌ها و تحقیقات مربوط به شبکه‌های توزیع باید مورد

چکیده: مجموعه‌هایی از تولیدات کوچک و ذخیره‌کننده‌های انرژی در سیستم‌های توزیع ولتاژ پایین یا متوسط در کنار مصرف‌کنندگان، نوع جدیدی از سیستم قدرت به نام ریزشبکه را شکل می‌دهد. طراحی اجزای ریزشبکه باید به نحوی باشد که هم به صورت متصل به شبکه و هم در حالت مجزا از شبکه، کارکردی ایمن و اقتصادی داشته و با شبکه بالادست خود به تبادل انرژی الکتریکی بپردازد. بدین ترتیب، حضور ریزشبکه‌ها می‌تواند در مسایل مختلف برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم‌های توزیع اثرگذار باشد. بازآرایی شبکه‌های توزیع در حضور ریزشبکه‌ها یکی از موضوعات مورد توجه در این زمینه است. در مطالعات انجام‌شده، ریزشبکه‌ها معمولاً به صورت تولیدات پراکنده در شبکه توزیع در نظر گرفته می‌شوند. در این مقاله، ریزشبکه به عنوان تبادل‌کننده انرژی با سیستم توزیع مدل‌سازی شده و تأثیر آن در بازآرایی شبکه توزیع بررسی می‌شود. برای این منظور، بازآرایی شبکه توزیع با استفاده از روش پیشینه- کمینه فازی در قالب یک مسئله بهینه‌سازی چندمنظوره فرمول‌بندی می‌شود که در آن کاهش تلفات و عدم تعادل بار در بین فیدهای شبکه به عنوان اهداف مسئله و پروفیل ولتاژ، گرفتگی خطوط، شعاعی بودن و پخش توان به عنوان قیود مسئله مطرح می‌گردد. الگوریتم تجمع ذرات جهت حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده و نتایج حاصل از بازآرایی روی دو شبکه نمونه ۳۳ و ۷۰ شینه IEEE ارائه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که تبدیل شبکه‌های توزیع از حالت سنتی به سیستم‌های مدرن با حضور ریزشبکه‌ها و تبادل توان آنها با شبکه، موجب افزایش قابلیت اعتماد شده و مقرون به صرفه‌تر خواهد بود.

کلید واژه: بازآرایی، ریزشبکه، سیستم توزیع، الگوریتم تجمع ذرات.

## ۱- مقدمه

در سراسر جهان، سیستم‌های قدرت با مشکل کاهش تدریجی منابع فسیلی که با آلودگی زیست‌محیطی نیز همراه است، روبه‌رو می‌شوند. این معایب منجر به تمایل تولید توان در سطح ولتاژ توزیع، توسط منابع انرژی تجدیدپذیر مثل انرژی باد، سلول‌های فتوولتائیک خورشیدی و استفاده از مجموع آنها در یک شبکه توزیع واحد می‌گردد. هر نوع تکنولوژی تولید انرژی الکتریکی که قابلیت ادغام شدن در سیستم توزیع را دارد می‌تواند تحت عنوان تولید پراکنده قرار گیرد. این تکنولوژی‌ها از منبع انرژی موجود محلی به ویژه منابع انرژی تجدیدپذیر، برای تولید الکتریسته استفاده می‌نمایند. بدین ترتیب، مقدار انرژی تولیدی در مقایسه با ژنراتورها و نیروگاه‌های بزرگ مرکزی، بسیار ناچیز بوده و در محل نصب یا در نزدیکی آن مصرف می‌شود [۱].

این مقاله در تاریخ ۴ فروردین ماه ۱۳۹۳ دریافت و در تاریخ ۱۴ آبان ماه ۱۳۹۳ بازنگری شد.

عباس فتاحی می‌آبادی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، (email: fattahi@hut.ac.ir).

حسین سهرابیانی، مؤسسه آموزش عالی مازیار (تحصیلات تکمیلی)، نور، مازندران، (email: hosseinsohrabiani@yahoo.com).

سیستم توزیع ارسال کند. در این مقاله از شاخص  $TMG^1$  به معنی توان مبادله‌ای ریزشکها برای نشان دادن میزان توان ارسالی هر ریزشکها به شبکه اصلی و یا دریافتی از آن استفاده می‌شود.

برای انجام بازآرایی در سیستم توزیع، نیاز به استفاده از الگوریتم‌های مناسب جهت پخش بار می‌باشد. در شبکه‌های توزیع به دلیل این که عموماً ساختار شعاعی دارند و نسبت  $R/X$  در آنها در مقایسه با شبکه‌های انتقال بزرگ می‌باشد، لذا الگوریتم پخش بار نیوتن-رافسون برای بیشتر مسایل پخش بار شبکه توزیع مناسب نیست [۱۲] و بدین منظور، نویسندگان [۱۳] یک روش ماتریسی برای حل پخش بار شبکه‌های توزیع مطرح کردند که از سرعت همگرایی بالا، حجم کم محاسبه و میزان کم حافظه مورد نیاز برخوردار است. در این روش از دو ماتریس  $BIBC^2$  و  $BCBV^3$  استفاده می‌شود که با استفاده از آنها در (۲)، اختلاف ولتاژ دو سر هر شاخه بر حسب جریان‌های تزریقی به گره‌های شبکه به دست می‌آید

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] \quad (2)$$

آرایه‌های ماتریس  $BIBC$  بر مبنای مشارکت جریان تزریقی به گره‌ها در جریان یک شاخه با یک و صفر نشان داده می‌شوند. برای تشکیل ماتریس  $BCBV$  نیز مطابق (۳) از امپدانس شاخه‌ها استفاده می‌شود

$$[\Delta V] = [Z_b][I_b] \quad (3)$$

که در رابطه فوق،  $Z_b$  و  $I_b$ ، ماتریس امپدانس و بردار جریان شاخه‌ها می‌باشند. بدین ترتیب برای انجام پخش بار، ابتدا از (۴) جریان تزریقی به هر یک از گره‌های شبکه بر مبنای مقادیر اولیه ولتاژ گره‌ها محاسبه می‌شود

$$I_i^k = \left( \frac{P_i + jQ_i}{V_i^k} \right)^* \quad (4)$$

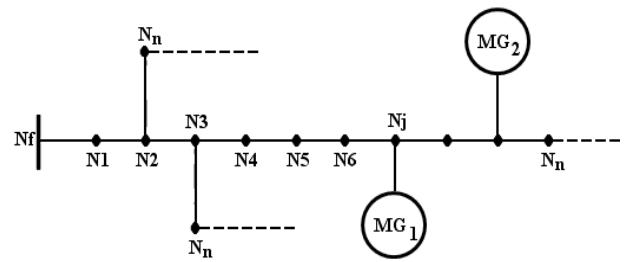
که در رابطه فوق،  $P_i$  و  $Q_i$  توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به گره  $i$ ام و  $I_i^k$  و  $V_i^k$  جریان تزریقی به گره  $i$ ام و ولتاژ گره  $k$ ام در تکرار  $D$ ام می‌باشد.

سپس با استفاده از (۲) و به کمک ماتریس‌های  $BIBC$  و  $BCBV$  که کلیه خواص شبکه را دارا هستند، اختلاف ولتاژ بین گره مرجع و گره‌های دیگر محاسبه می‌شوند. در ادامه با محاسبه مقادیر جدید ولتاژ گره‌ها، از (۴) جریان تزریقی به گره‌ها دوباره به دست آمده و این مراحل تا حصول شرط همگرایی تکرار می‌شوند.

در این مقاله ضمن به کارگیری روش پخش بار مذکور، تبادل توان ریزشکها در ماتریس  $BIBC$  و تغییر وضعیت کلیدهای شبکه در ماتریس  $BCBV$  لحاظ می‌شوند.

### ۳- بازآرایی شبکه توزیع

مهم‌ترین اهداف مد نظر در بازآرایی سیستم‌های توزیع، کاهش تلفات توان و عدم تعادل بار در بین فیدرهای شبکه می‌باشد. همچنین پروفیل ولتاژ، گرفتگی خطوط، شعاعی بودن و پخش توان به عنوان قیود اصلی این مسئله مطرح می‌گردد. بر این مبنای جهت مدل‌سازی بازآرایی چندمنظوره در این مقاله، توابع هدف و محدودیت‌های مسئله در محیط



شکل ۱: سیستم توزیع همراه با ریزشکها.

بازنگری مجدد قرار گیرد که یکی از مهم‌ترین آنها بازآرایی شبکه‌های توزیع می‌باشد [۱۰]. بر این اساس لازم است اصلاح توابع هدف و ارائه شاخص‌های مناسب جهت کنترل آنها با ارائه مدل‌های بهینه‌سازی کامل‌تر و به کارگیری روش‌های حل کارآمدتر، در بازآرایی شبکه‌های توزیع مشتمل بر ریزشکها مورد توجه قرار گیرد. در این راستا مدل‌سازی کامل‌تر و واقعی‌تر ریزشکها در سیستم توزیع که در تحقیقات فوق به صورت تولیدات پراکنده مد نظر قرار گرفته‌اند از جمله موضوعات قابل توجه می‌باشد. همچنین وجود الگوریتم‌های مناسب پخش بار شبکه‌های توزیع با حضور منابع تولید پراکنده یکی دیگر از ملاحظات مهم در مسئله فوق است.

بر این مبنای در مقاله حاضر هر ریزشکها به عنوان یک مبادله‌کننده انرژی با شبکه اصلی مدل شده و تأثیر آنها در بازآرایی سیستم توزیع نشان داده می‌شود. همچنین بازآرایی شبکه در قالب یک مسئله بهینه‌سازی چندمنظوره که در آن کاهش تلفات و عدم تعادل بار در بین فیدرهای شبکه به عنوان اهداف مسئله و پروفیل ولتاژ، گرفتگی خطوط، شعاعی بودن و پخش توان به عنوان قیود مسئله مطرح می‌گردد، به کمک روش بیشینه کمینه فازی فرمول‌بندی شده و با استفاده از یک الگوریتم جستجوی تصادفی مناسب حل می‌شود. برای این منظور در ادامه، ابتدا مدل شبکه توزیع معرفی می‌گردد. در بخش بعد، روابط مربوط به مسئله بهینه‌سازی بازآرایی شبکه با حضور ریزشکها، شامل توابع هدف و محدودیت‌ها به کمک توابع عضویت فازی تعریف می‌شوند. سپس با استفاده از الگوریتم تجمع ذرات، مسئله بازآرایی روی دو شبکه نمونه شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از آن ارائه می‌گردد. در پایان، نتیجه‌گیری و پیشنهادات بیان خواهد گردید.

### ۲- مدل شبکه توزیع

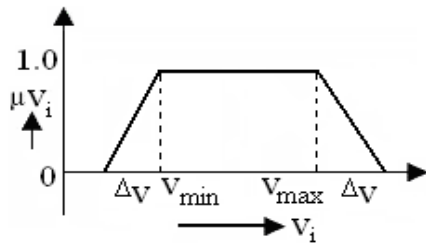
شکل ۱ سیستم توزیع با ریزشکهای موازی را نشان می‌دهد. در صورتی که خطایی در فیدرهای شبکه رخ دهد، بارها و منابع انرژی در یک ریزشکها می‌توانند با حداقل قطع از شبکه سراسری منفصل شده و مجدداً به آن وصل شوند و بدین ترتیب منجر به افزایش قابلیت اطمینان در تأمین بارهای ریزشکها گردند [۱۱].

مطابق شکل ۱ سیستم توزیع همراه با ریزشکها دارای  $N_f$  گره منبع و  $N$ ،  $BR$  و  $MG$  به ترتیب مجموعه‌ای از گره‌ها، شاخه‌ها و ریزشکها در سیستم می‌باشند

$$MG = \{MG_i(N_j)\}, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad N_j \in N \quad (1)$$

معادله (۱) نشان می‌دهد که ریزشکها  $i$ ام به گره  $N_j$  متصل شده و ریزشکها می‌تواند به عنوان بار یا منبع انرژی به کار گرفته شود. هنگامی که به عنوان بار عمل می‌کند، تنها از شبکه توزیع به صورت بار طبیعی توان می‌کشد و اگر به عنوان منبع انرژی عمل کند، می‌تواند توان به

1. Transfer of Micro Grid  
2. Bus Injection to Branch Current  
3. Branch Current to Bus Voltage



شکل ۴: تابع عضویت برای ولتاژ گره‌ها.

$$FL_b = \frac{I_b^{\max} - I_b}{I_b^{\max}}, \quad b = 1, 2, \dots, BR \quad (8)$$

که در این رابطه  $FL_b$  میزان بار شاخه  $b$  ام و  $I_b^{\max}$  بیشترین جریان مجاز شاخه  $b$  ام می‌باشد. با این تعریف، عدم تعادل بار شبکه می‌تواند با رابطه زیر نشان داده شود

$$U_i = \max FL_b, \quad b = 1, 2, \dots, BR \quad (9)$$

که در این رابطه،  $U_i$  عدم تعادل بار شبکه برای حالت  $i$  ام کلیدها است. با توجه به (۹) در صورتی که مقدار  $U_i$  پایین‌تر باشد، تعادل بار بهتری در شبکه خواهیم یافت. از این رو برای  $U_i$  پایین، یک درجه عضویت بالا و برای  $U_i$  بالا، یک درجه عضویت پایین در نظر گرفته خواهد شد. با توجه به شکل ۳ که بیانگر تابع عضویت برای  $U_i$  می‌باشد، می‌توان نوشت

$$\mu B_i = \begin{cases} \frac{U_{\max} - U_i}{U_{\max} - U_{\min}} & \text{for } U_{\min} < U_i < U_{\max} \\ 1 & \text{for } U_i \leq U_{\min} \\ 0 & \text{for } U_i \geq U_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

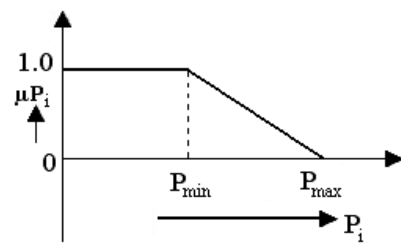
در این صورت اگر  $U_{\min}$  برابر ۰/۱ و  $U_{\max}$  برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده باشد،  $U_{\min}$  بیان می‌دارد که بیشترین انحراف جریان شاخه‌ها ۱۰٪ نسبت به بیشترین مقدار جریان مجاز شاخه مربوط خواهد بود. اگر این انحراف کمتر از (یا برابر) ۱۰٪ باشد، مقدار عضویت ۱ و با توجه به  $U_{\max}$  اگر این انحراف بیشتر از ۵۰٪ باشد، مقدار عضویت صفر در نظر گرفته می‌شود.

### ۳-۲ قیود مسئله

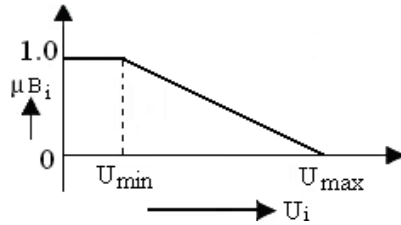
تغییر وضعیت کلیدها باید به نحوی باشد که در تمام مراحل بهینه‌سازی، قیود زیر مد نظر باشند:

(۱) قید محدودیت اندازه ولتاژ گره‌ها باید رعایت شود. شکل ۴ تابع عضویت برای ولتاژ گره‌ها را نمایش می‌دهد. اگر ولتاژ گره‌ها برای حالت  $i$  ام کلیدها بیشتر از  $V_{\min}$  و کمتر از  $V_{\max}$  باشد،  $\mu V_i$  برابر ۱ خواهد شد. در صورتی که  $\Delta V = 0.1$  در نظر گرفته شده باشد، بیشترین انحراف ولتاژ گره‌ها نسبت به بیشترین و کمترین مقدار ولتاژ مجاز گره ۱٪ خواهد بود. اگر این انحراف بیشتر از ۱٪ باشد، یک مقدار عضویت صفر در نظر گرفته می‌شود.

(۲) قید محدودیت حرارتی در شاخه‌ها نیز لحاظ می‌شود. شکل ۵ تابع عضویت برای جریان شاخه‌ها را نمایش می‌دهد. اگر جریان شاخه‌ها برای حالت  $i$  ام کلیدها از  $I_{\max}$  تجاوز نکند،  $\mu I_i$  برابر ۱ خواهد شد. در صورتی که  $\Delta I = 0.5$  در نظر گرفته شود، بیشترین انحراف جریان شاخه‌ها ۵٪ نسبت به بیشترین مقدار جریان مجاز شاخه‌ها خواهد بود. اگر این انحراف بیشتر از ۵٪ باشد، یک مقدار عضویت صفر در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲: تابع عضویت برای کاهش تلفات.



شکل ۳: تابع عضویت برای توزیع یکنواخت بار.

فازی نرمال‌سازی شده و به هر یک از آنها یک تابع عضویت نسبت داده می‌شود.

### ۳-۱ توابع هدف

اولین تابع هدف مربوط به تلفات توان می‌باشد. بیشترین تلفات سیستم قدرت در شبکه توزیع صورت می‌گیرد که به صورت زیر بیان می‌شود [۹]

$$P_{Loss} = \sum_{b=1}^{BR} R_b \times |I_b|^2 \quad (5)$$

که در رابطه فوق،  $BR$  تعداد شاخه‌های کل سیستم،  $R_b$  مقاومت شاخه  $b$  ام و  $I_b$  جریان مختلط شاخه  $b$  ام می‌باشد. میزان کاهش تلفات به صورت زیر تعریف می‌شود

$$P_i = \frac{P_{loss}^i}{P_{loss}^o} \quad (6)$$

که در رابطه فوق،  $P_{loss}^i$  مجموع تلفات کل شبکه برای حالت  $i$  ام کلیدها و  $P_{loss}^o$  مجموع تلفات کل شبکه قبل از عمل بازآرایی می‌باشد. با توجه به (۶) در صورتی که  $P_i$  مقدار بالایی داشته باشد، میزان کاهش تلفات به طور نسبی کم و اگر  $P_i$  مقدار پایینی داشته باشد، میزان کاهش تلفات به طور نسبی زیاد است.

شکل ۲ بیانگر تابع عضویت برای کاهش تلفات بوده و با توجه به شکل، تابع  $\mu P_i$  به صورت زیر به دست می‌آید [۹]

$$\mu P_i = \begin{cases} \frac{P_{\max} - P_i}{P_{\max} - P_{\min}} & \text{for } P_{\min} < P_i < P_{\max} \\ 1 & \text{for } P_i \leq P_{\min} \\ 0 & \text{for } P_i \geq P_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

بر این اساس اگر  $P_{\min}$  برابر ۰/۵ و  $P_{\max}$  برابر ۱ فرض شوند، آن گاه با کاهش ۵۰ درصدی (و یا کمتر) در تلفات توان، مقدار تابع عضویت واحد می‌شود.

تابع هدف بعدی مربوط به عدم تعادل بار است. در اثر تغییر بار سیستم توزیع، بار برخی از شاخه‌ها نسبت به بقیه بیشتر می‌شود که این امر باعث افزایش تلفات نیز می‌گردد. برای رفع این عدم تعادل می‌توان قسمتی از بار شاخه‌ها با بارگذاری بیشتر را به وسیله عملیات کلیدزنی به شاخه‌های کم‌بار منتقل کرد. بارگذاری یک شاخه به شکل زیر قابل تعریف است [۹]



شکل ۷: دیاگرام شبکه توزیع ۳۳‌شینه.

می‌شود که مراحل آن در روندنمای شکل ۶ نشان داده شده است و طبق شکل، الگوریتم پیشنهادی دارای ۳ مرحله به شرح زیر است:

**مرحله اول:** پس از ورود اطلاعات اولیه سیستم نظیر ساختار شبکه توزیع، مشخصات اهمی شاخه‌ها، توان حقیقی و موهومی بارها، تبادل توان ریزشکده‌ها و کلیه پارامترهای لازم توابع عضویت فازی، جمعیت اولیه‌ای از آرایش متفاوت کلیدها توسط الگوریتم PSO تولید می‌شود. سپس متناظر با هر حالت  $i$  ام کلیدها در جمعیت اولیه، یک پخش بار روی شبکه انجام شده و با استفاده از نتایج آن مقادیر  $\mu R_i$ ،  $\mu B_i$ ،  $\mu V_i$ ،  $\mu I_i$  و  $\mu R_i$  محاسبه می‌شود.

**مرحله دوم:** بعد از محاسبه درجه عضویت برای هر حالت  $i$  ام کلیدها، کمترین مقدار آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$D_i = \min \{ \mu P_i, \mu B_i, \mu V_i, \mu I_i, \mu R_i \} \quad (12)$$

که در رابطه فوق،  $D_i$  درجه عضویت تابع تصمیم‌گیری برای حالت  $i$  ام کلیدها می‌باشد. سپس، حالتی از کلیدها در میان جمعیت موجود که دارای بیشترین مقدار درجه عضویت تابع تصمیم‌گیری می‌باشد، مطابق رابطه زیر انتخاب می‌شود

$$OS_k = \max D_i \quad (13)$$

که در رابطه فوق،  $OS_k$  بیشترین مقدار درجه عضویت برای تابع تصمیم‌گیری در تکرار  $k$  ام است.

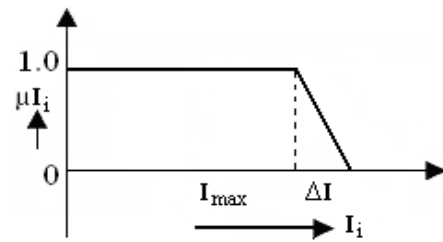
**مرحله سوم:** اگر مقدار  $OS_k$  به ۱ نزدیک باشد، بهینه‌سازی متوقف می‌شود و در غیر این صورت، الگوریتم PSO با اصلاح آرایش کلیدها در جمعیت موجود به تکرار بعدی رفته و مراحل اول و دوم با حالت‌های جدید کلیدها، دوباره انجام می‌شوند.

#### ۴- نتایج عددی

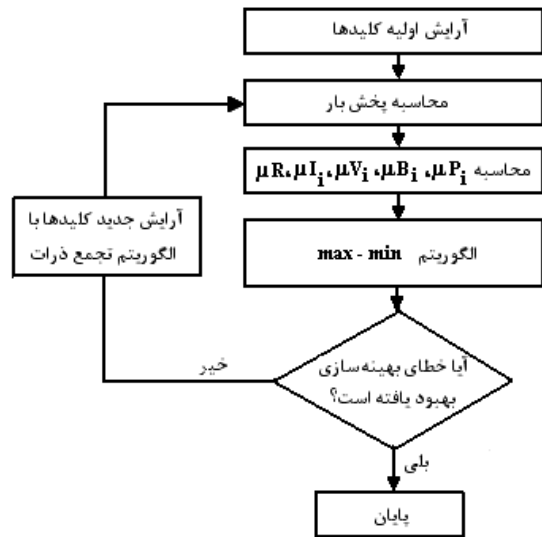
برای بررسی عملکرد روش ارائه‌شده در بازآرایی سیستم توزیع از دو شبکه ۳۳ و ۷۰‌شینه IEEE استفاده شده است.

##### ۴-۱ بازآرایی شبکه ۳۳‌شینه

شبکه مورد نظر در شکل ۷ نشان داده شده است. این شبکه از یک سو تغذیه شده و شامل ۳۳ گره و ۵ کلید در حالت عادی باز می‌باشد. ولتاژ نامی سیستم ۱۲/۶۶ کیلوولت است و همچنین، مسیر شاخه‌های ارتباطی



شکل ۵: تابع عضویت برای جریان شاخه‌ها.



شکل ۶: دیاگرام بلوکی الگوریتم پیشنهادشده.

(۳) به طور معمول شبکه توزیع به صورت شعاعی بهره‌برداری می‌شود و بنابراین به منظور شعاعی باقی ماندن شبکه در حالت  $i$  ام کلیدها، تابع عضویت شعاعی باقی ماندن شبکه  $\mu R_i$ ، به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\mu R_i = \begin{cases} 1 & \text{if } BR_i = N + NF - 1 \\ 0 & \text{O.W} \end{cases} \quad (11)$$

#### ۳-۳ حل مسئله بهینه‌سازی چندمنظوره فازی

یکی از روش‌های حل مسایل بهینه‌سازی چندمنظوره در چارچوب فازی، استفاده از عملگر بیشینه-کمینه فازی<sup>۱</sup> می‌باشد. در این روش، یک تابع تصمیم‌گیری فازی از حاصل ضرب توابع عضویت نسبت داده شده به هر یک از توابع هدف و محدودیت‌ها تشکیل می‌شود. بر این مبنای اگر درجه عضویت تابع تصمیم‌گیری به مقدار ۱ نزدیک شود، درجه عضویت هر یک از توابع هدف و محدودیت‌ها نیز به مقدار ۱ نزدیک شده و در نهایت به کمینه‌شدن توأم توابع هدف و برآورده‌شدن کلیه محدودیت‌ها خواهد انجامید. برای رسیدن به این مقصود با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی مناسب، متغیرهای مسئله در هر تکرار به گونه‌ای اصلاح می‌شوند که کمترین درجه عضویت آنها در توابع هدف و محدودیت‌ها برای تکرار بعد افزایش یابد. بدین ترتیب با بیشینه‌شدن تابع عضویت کمینه، درجه عضویت متغیرها در تابع تصمیم‌گیری به مقدار ۱ نزدیک شده و پاسخ بهینه مسئله به دست می‌آید. در ادامه برای حل مسئله بهینه‌سازی بازآرایی شبکه‌های توزیع از روش بهینه‌سازی چندمنظوره بیشینه-کمینه فازی به همراه الگوریتم تجمع ذرات<sup>۲</sup> (PSO) استفاده

1. Fuzzy Max - Min
2. Particle Swarm Optimization Algorithm

جدول ۱: بازآرایی شبکه ۳۳ شینه بدون حضور ریزشبه.

حالت آزمایش	شماره کلیدهای باز	تلفات توان (kW)	میانگین درصد شاخص انحراف ولتاژ
آرایش اولیه	۳۳،۳۴،۳۵،۳۶،۳۷	۲۰۲،۶۸	۳،۵۴
بازآرایی با هدف کاهش تلفات	۷،۹،۱۴،۳۲،۳۷	۱۳۹،۵۳	۲،۶۳
بازآرایی چند منظوره	۷،۹،۱۴،۳۲،۳۷	۱۳۸،۰۶	۱،۵۳

جدول ۲: بازآرایی شبکه ۳۳ شینه همراه با تبادل توان ریزشبه.

حالت آزمایش	کلیدهای باز	تلفات توان (kW)	گره کمترین ولتاژ	کمترین ولتاژ (p.u.)
آرایش اولیه	۳۳،۳۴،۳۵،۳۶،۳۷	۲۰۲،۶۸	۱۷	۰،۹۱۳۱
آرایش بهینه بدون ریز شبکه	۷،۹،۱۴،۳۲،۳۷	۱۳۹،۵۳	۳۱	۰،۹۳۸۰
-۶۵	۷،۹،۱۶،۱۵،۲۸	۱۹۲،۷۹	۱۶	۰،۹۱۴۵
-۵۰	۷،۹،۱۲،۱۵،۲۸	۱۴۶،۷۹	۱۵	۰،۹۲۰۹
۱۰۰	۷،۹،۱۵،۱۷،۲۸	۱۳۰،۰۴	۱۷	۰،۹۳۴۹
۲۰۰	۶،۸،۱۲،۱۶،۳۷	۱۲۱،۷۶	۱۶	۰،۹۳۸۵
۳۰۰	۶،۸،۱۲،۱۷،۳۷	۱۱۲،۳۳	۱۷	۰،۹۳۹۹
۴۰۰	۶،۸،۱۲،۳۶،۳۷	۱۰۷،۹۷	۳۲	۰،۹۴۲۱
۵۰۰	۶،۸،۱۰،۱۲،۳۷	۱۰۰،۰۱	۳۲	۰،۹۴۳۲
۶۰۰	۶،۸،۳۱،۳۵،۳۷	۹۴،۰۸	۳۰	۰،۹۴۶۸
۷۰۰	۶،۸،۹،۳۱،۳۷	۸۵،۴۶	۳۰	۰،۹۵۰۵
۸۰۰	۶،۸،۳۰،۳۵،۳۷	۷۷،۴۳	۲۹	۰،۹۵۴۳
۹۰۰	۶،۸،۳۱،۳۵،۳۷	۶۹،۲۴	۳۰	۰،۹۵۸۱
۱۰۰۰	۶،۸،۳۱،۳۵،۳۷	۶۴،۴۹	۳۰	۰،۹۶۰۱
۱۱۰۰	۶،۸،۳۰،۳۵،۳۷	۶۱،۶۲	۲۹	۰،۹۶۲۱
۱۲۰۰	۶،۸،۲۹،۳۵،۳۷	۶۰،۵۸	۲۹	۰،۹۶۲۵
۱۳۰۰	۶،۸،۲۸،۳۵،۳۷	۶۱،۳۶	۲۸	۰،۹۶۲۲
۱۴۰۰	۶،۸،۲۷،۳۵،۳۷	۶۶،۷۴	۲۶	۰،۹۵۹۵

جدول ۳: بازآرایی شبکه ۷۰ شینه بدون حضور ریزشبه.

حالت آزمایش	شماره کلیدهای باز	تلفات توان (kW)	میانگین درصد شاخص انحراف ولتاژ
آرایش اولیه	۷۵،۷۶،۷۷،۷۸،۷۹،۶۹،۷۰،۷۱،۷۲،۷۳،۷۴	۲۲۷،۵۳	۲،۱۳
بازآرایی با هدف کاهش تلفات	۷۳،۷۵،۷۶،۷۸،۷۹،۱۴،۲۸،۴۶،۵۱،۶۷،۷۰	۲۰۴،۱۱	۱،۹۰۶
بازآرایی چندمنظوره	۷۵،۷۶،۷۸،۷۹،۱۴،۲۸،۴۶،۵۱،۶۷،۷۰،۷۳	۲۰۳،۸۹	۱،۸۶۴

نظر گرفته شده‌اند.

نتایج بازآرایی شبکه با تغییر توان مبادله‌ای ریزشبه در مقایسه با آرایش اولیه کلیدها و آرایش بهینه آنها بدون وجود ریزشبه در جدول ۲ نشان داده شده است. بر مبنای جدول ۲ ملاحظه می‌شود که دریافت توان بیشتر از ۶۵ کیلووات از شبکه اصلی باعث افزایش تلفات توان و افت ولتاژ در شبکه توزیع می‌شود. بنابراین ریزشبه نمی‌تواند بیش از اندازه از شبکه اصلی دریافت توان داشته باشد. نتایج نشان می‌دهد که بهترین میزان تبادل توان از ریزشبه به شبکه اصلی که در آن تلفات و افت ولتاژ کمترین مقدار بوده‌اند ۱۲۰۰ کیلووات است.

#### ۴-۲ بازآرایی شبکه ۷۰ شینه

شبکه ۷۰ شینه در شکل ۸ نشان داده شده است. ولتاژ نامی سیستم ۱۱ کیلوولت و تلفات شبکه برای حالت اولیه ۲۲۷،۵۳ کیلووات می‌باشد و سایر اطلاعات مربوط به سیستم در [۹] آمده است.

#### ۴-۲-۱ بازآرایی بدون حضور منابع تولید

جدول ۳ نتایج بازآرایی شبکه ۷۰ شینه بدون حضور ریزشبه را برای دو

(کلیدهای در حالت عادی باز) توسط خطوط نقطه چین نشان داده شده است. سایر اطلاعات مربوط به سیستم در [۱۴] آمده است.

#### ۴-۱-۱ بازآرایی بدون حضور منابع تولید

با فرض عدم حضور ریزشبه، بازآرایی در دو حالت روی شبکه ۳۳ شینه انجام شده که نتایج آن شامل آرایش بهینه کلیدها، تلفات شبکه و شاخص درصد متوسط انحراف ولتاژ در جدول ۱ نشان داده شده است. در حالت اول، بازآرایی تنها با هدف کاهش تلفات انجام شده و در حالت دوم، علاوه بر تلفات، عدم تعادل بار بین فیدرهای شبکه نیز به عنوان توابع هدف مد نظر قرار گرفته است. مطابق جدول ۱ در حالت تابع هدف چندمنظوره، میزان تلفات توان نسبت به حالت تک‌منظوره مقدار کمتری دارد و همچنین انحراف معیار ولتاژ گره‌ها بهتر شده است.

#### ۴-۱-۲ بازآرایی همراه با تبادل توان ریزشبه

برای مطالعه اثر تبادل توان ریزشبه‌ها در بازآرایی سیستم توزیع، یک ریزشبه در گره ۱۵ شبکه ۳۳ شینه متصل شده که می‌تواند تا ۶۵ کیلووات توان از شبکه دریافت کرده و تا ۱۴۰۰ کیلووات توان به شبکه تزریق کند. در این مطالعه نیز تلفات توان و عدم تعادل بار به عنوان توابع هدف در

جدول ۴: بازآرایی شبکه ۷۰ شینه همراه با تبادل توان ریزشکه.

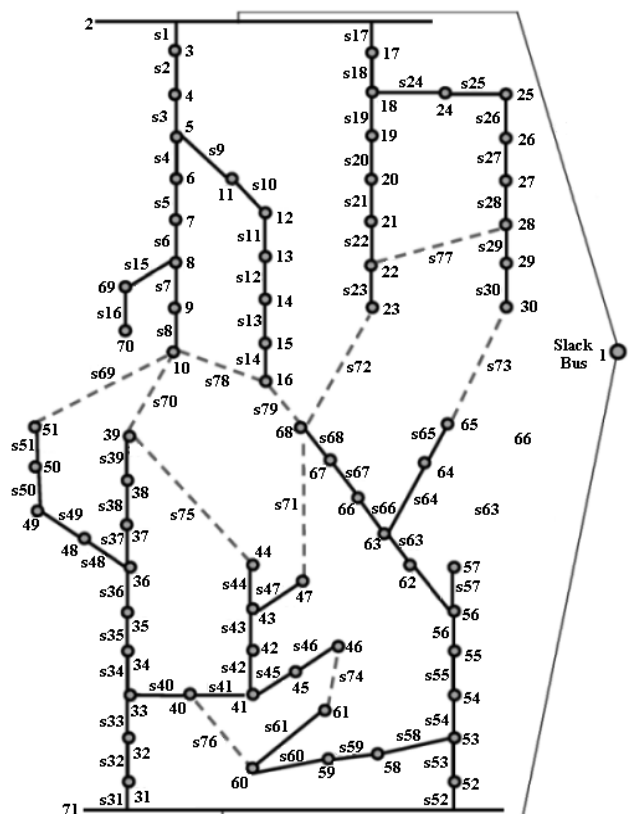
حالت آزمایش	کلیدهای باز	تلفات توان (kW)	گره کمترین ولتاژ	کمترین ولتاژ (p.u.)
آرایش اولیه	۷۵،۷۶،۷۷،۷۸،۷۹،۶۹،۷۰،۷۱،۷۲،۷۳،۷۴	۲۲۷،۵۳	۶۷	۰،۹۰۵۱
آرایش بهینه بدون ریزشکه	۱۴،۶۷،۷۳،۴۶،۷۵،۷۶،۲۸،۷۸،۷۹،۵۱،۷۰	۲۰۴،۰۱	۲۹	۰،۹۲۶۸
-۳۰۰	۳۹،۷۶،۲۸،۱۴،۷۹،۵۱،۷۰،۷۱،۶۷،۷۳،۴۶	۲۲۴،۵۶	۲۹	۰،۹۱۱۴
-۲۰۰	۷۵،۷۶،۲۸،۷۸،۷۹،۵۱،۷۰،۱۴،۶۷،۷۳،۴۶	۲۱۰،۷۸	۲۹	۰،۹۱۵۴
۱۰۰	۷۵،۷۶،۲۸،۷۸،۷۹،۵۱،۷۰،۱۴،۶۶،۷۳،۴۶	۱۷۴،۷۳	۲۹	۰،۹۳۴۸
۲۰۰	۷۵،۷۶،۲۸،۷۸،۷۹،۵۱،۷۰،۱۳،۶۶،۷۳،۴۶	۱۶۸،۶۱	۲۹	۰،۹۳۷۱
۳۰۰	۷۵،۷۶،۲۸،۷۸،۷۹،۵۱،۷۰،۱۴،۶۷،۷۳،۴۶	۱۶۵،۱۲	۲۹	۰،۹۳۸۱
۴۰۰	۷۵،۷۶،۲۸،۷۸،۷۹،۵۱،۷۰،۱۴،۶۷،۷۳،۴۶	۱۶۱،۰۸	۲۹	۰،۹۳۹۵
۵۰۰	۷۵،۷۶،۲۸،۷۸،۷۹،۵۱،۷۰،۱۴،۶۷،۷۳،۴۶	۱۶۲،۱۹	۲۹	۰،۹۳۹۱
۶۰۰	۷۵،۷۶،۲۸،۷۸،۷۹،۵۱،۷۰،۱۴،۶۷،۷۳،۴۶	۱۶۳،۷۳	۲۹	۰،۹۳۸۵

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی چندمنظوره جهت مطالعه بازآرایی سیستم توزیع با حضور ریزشکه‌ها ارائه گردید. در روش پیشنهادی از ترکیب الگوریتم بیشینه-کمینه فازی و الگوریتم تجمع ذرات برای مدل‌سازی و حل مسئله استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی روی دو شبکه ۳۳ و ۷۰ شینه نشان داد که آرایش بهینه کلیدهای شبکه با تغییر توان ارسالی به و دریافتی از شبکه اصلی توسط ریزشکه تغییر می‌کند. علاوه بر این وضعیت بهینه برای شبکه شامل کمترین تلفات، کمترین عدم تعادل بار و کمترین افت ولتاژ در توان مبادله‌ای خاصی اتفاق می‌افتد. بر این اساس، دریافت توان توسط ریزشکه‌ها از سیستم توزیع و ارسال توان کمتر و یا بیشتر از وضعیت افت ولتاژ می‌شود. بنابراین در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم‌های توزیع در حضور ریزشکه‌ها از یک سو می‌بایست آرایش مناسب کلیدها برای شرایط مختلف تبادل توان ریزشکه‌ها با شبکه اصلی اتخاذ شده تا قیمت انرژی الکتریکی و هزینه سرویس‌های جانبی مورد نیاز در سیستم توزیع کاهش یابد. از سوی دیگر می‌بایست با محاسبه تأثیر توان مبادله‌ای هر ریزشکه بر شاخص‌های کیفی تلفات، پروفیل ولتاژ، پخش‌دهی توان عبوری از شاخه‌ها و تعادل بار در شبکه اصلی توزیع، تشویقات و تنبیهات اقتصادی لازم محاسبه و در بازارهای انرژی الکتریکی و سرویس‌های جانبی بر پا شده در سیستم توزیع به ریزشکه‌ها اختصاص یابد.

### مراجع

- [1] H. Karimi, H. Nikkhajoei, and R. Irvani, "Control of an electronically-coupled distributed resource unit subsequent to an islanding event," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 1, pp. 493-501, Jan. 2008.
- [2] A. Singh and B. S. Surjan, "Microgrids: a review," *Int. J. of Research in Engineering & Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 185-198, Feb. 2014.
- [3] S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Yin, and S. S. H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 3, no. 3, pp. 1217-1223, Jul. 1988.
- [4] D. Shirmohammadi and H. W. Hong, "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line loss reduction," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 4, no. 1, pp. 1492-1498, Apr. 1989.
- [5] A. Merlin and H. Back, "Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system," in *Proc. 5th Power System Computation Conf.*, pp. 1-18, Cambridge, UK, 1975.
- [6] W. M. Lin, F. S. Cheng, and M. T. Tsay, "Distribution feeder reconfiguration with refined genetic algorithm," *IEE Proceedings*



شکل ۸: دیاگرام شبکه توزیع ۷۰ شینه.

حالت تک‌منظوره و چندمنظوره نشان می‌دهد. طبق جدول ملاحظه می‌شود که استفاده از تابع هدف چندمنظوره باعث کاهش تلفات توان و بهبود پروفیل ولتاژ شده است.

### ۴-۲-۲ بازآرایی همراه با تبادل توان ریزشکه

در این مطالعه نیز یک ریزشکه به گره ۶۱ شبکه نمونه ۷ شینه متصل می‌شود که می‌تواند تا ۳۰۰ کیلووات توان از شبکه اصلی دریافت کرده و تا ۶۰۰ کیلووات توان به شبکه اصلی ارسال کند. نتایج بازآرایی شبکه ۷۰ شینه با تغییر توان مبادله‌ای ریزشکه در مقایسه با عدم حضور ریزشکه در جدول ۴ نشان داده شده است.

مطابق جدول ۴ دریافت انرژی تا ۳۰۰ کیلووات از شبکه اصلی باعث افزایش تلفات توان و افت ولتاژ می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که کمترین تلفات و افت ولتاژ در تبادل توان ۴۰۰ کیلووات از ریزشکه به شبکه اصلی رخ می‌دهد.

- [13] J. H. Teng, "A direct approach for distribution system load flow solutions," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 882-887, Jul. 2003.
- [14] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, Apr. 1989.
- عباس فتاحی می‌آبادی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی برق، گرایش الکترونیک و کارشناسی ارشد و دکتری برق، گرایش قدرت به ترتیب در سال ۱۳۷۵ از دانشگاه رازی و در سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۸۶ از دانشگاه صنعتی شریف به پایان رسانده است و هم‌اکنون عضو هیأت علمی گروه مهندسی برق دانشگاه صنعتی همدان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: بهره‌برداری و کنترل سیستم‌های قدرت، بهینه‌سازی و مدیریت انرژی، منابع تولید برق تجدید پذیر.
- حسین سهرابیانی** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی ارشد برق، گرایش قدرت در سال ۱۳۹۲ از موسسه آموزش عالی غیر دولتی و غیرانتفاعی مازیار به پایان رسانده است.
- Generation, Transmission and Distribution*, vol. 147, no. 6, pp. 349-354, Nov. 2000.
- [7] T. Niknam, "A new hybrid algorithm for multiobjective distribution feeder reconfiguration," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 8, pp. 2074-2082, Aug. 2009.
- [8] K. Prasad and R. Ranjan, "Optimal reconfiguration of radial distribution system using a fuzzy mutated genetic algorithm," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1211-1213, Apr. 2005.
- [9] D. Das, "A fuzzy multiobjective approach for network reconfiguration of distribution systems," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, pp. 202-209, Jan. 2006.
- [10] Y. Xiaodan and J. Hongjie, "Network reconfiguration for distribution system with micro-grids," in *Proc. Int. Conf. on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN'09*, 4 pp., 6-7 Apr. 2009.
- [11] R. Syahputra, I. Robandi, and M. Ashari, "Reconfiguration of distribution network with DG using fuzzy multi-objective method," in *Proc. Int. Conf. on Innovation, Management, and Technology Research*, pp. 316-321, Malacca, Malaysia, 21-22 May 2012.
- [12] G. W. Chang, S. Y. Chu, and H. L. Wang, "A simplified forward and backward sweep approach for distribution system load flow analysis," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Power Systems Technology*, 5 pp., 22-26 Oct. 2006.