

# بازیابی چندمرحله‌ای شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی

ساسان قاسمی، امین خدابخشیان و رحمت‌الله هوشمند

این تحقیق تنها تابع هدف مورد استفاده کاهش مقدار بار بی‌برق شبکه می‌باشد و شرایطی را در نظر گرفته که تنها یک خطا در شبکه رخ داده باشد. در [۶] مسئله بازیابی شبکه توزیع که یک مسئله برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح مرکب است به یک مسئله برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دوم عدد صحیح مرکب تبدیل شده تا بتوان به راحتی از روش‌هایی همچون روش بهینه‌سازی شاخه و کران به حل آن پرداخت. توابع هدف در نظر گرفته شده شامل افزایش سطح رضایت‌مندی مشترکین و کاهش تعداد کلیدزنی با اولویت‌بندی در بازیابی بارهای حساس شبکه است. در [۷] یک روش ابتکاری بر مبنای تئوری گراف به منظور کاهش بارهای بی‌برق شبکه با کمترین کلیدزنی ارائه شده است. بازآرایی شبکه به منظور بازیابی بهینه شبکه توزیع پس از رخداد خطا در [۸] مورد بررسی قرار گرفته شده است.

هزینه‌های بازیابی ناشی از کلیدزنی و انرژی توزیع‌نشده در [۹] مورد بحث قرار گرفته است. در این تحقیق زمان تعمیر و جداسازی المان‌های مختلف شبکه و به همین ترتیب زمان عملکرد کلیدهای دستی شبکه نیز در نظر گرفته شده است. بر این اساس بارهای بالادست ناحیه خطا به دو دسته تقسیم می‌شوند، بارهایی که به سرعت پس از رخداد خطا و با عملکرد کلیدهای اتوماتیک شبکه و جداسازی ناحیه خطا برق‌دار می‌شوند و دسته دوم بارهایی هستند که پس از قطع یا وصل کردن کلیدهای دستی شبکه برق‌دار می‌شوند. پس این دو دسته از بارها زمان قطعی مختص به خود را دارند. در این مقاله با تعویض کلیدهای دستی شبکه با کلیدهای خودکار، سعی شده زمان قطعی بارها و در نهایت خسارت ناشی از آن کمینه گردد. از الگوریتم ژنتیک به منظور یافتن بهترین ترکیب جایگزینی کلیدهای دستی با کلیدهای خودکار شبکه استفاده شده است. در [۱۰] تا [۱۳] از سیستم چندعامله<sup>۲</sup> برای بازیابی حداکثر بار بی‌برق ممکن استفاده شده است. سیستم‌های چندعامله به زیرساخت‌های مخابراتی و کنترلی خاصی نیاز دارند که پیاده‌سازی آنها را نسبت به سایر روش‌های ذکر شده پیچیده‌تر و پرهزینه‌تر کرده است. به منظور کاهش بارهای بی‌برق شده در روند بازیابی، یک روش جدید با کمک روش پخش بار بهینه در [۱۴] ارائه شده است. از ترکیب یک الگوریتم تکاملی چندهدفه با روش گره-عمق<sup>۳</sup> جهت بازیابی شبکه توزیع در [۱۵] استفاده شده است. در [۱۶] یک مدل برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح آمیخته به منظور بازیابی بهینه شبکه‌های توزیع نامتعادل ارائه شده است. بازیابی شبکه‌های توزیع بزرگ با استفاده از یک الگوریتم تکاملی چندهدفه در [۱۷] انجام شده است.

در این مقاله بازیابی سه‌مرحله‌ای شبکه‌های توزیع پیشنهاد شده است. در مرحله اول، بازیابی اولیه شبکه توزیع با بستن کلیدهای در حالت عادی باز شبکه انجام می‌شود و چنانچه پس از اتمام این مرحله، قیود مسئله رعایت نشده باشند وارد مرحله بازآرایی شبکه می‌شود (مرحله دوم). در صورتی که پس از طی مراحل اول و دوم همچنان قیود مسئله در محدوده مجاز خود نباشند، با انجام قطع بار بهینه (مرحله سوم) شرایط مربوط به

چکیده: هدف از بازیابی شبکه‌های توزیع، انرژی‌رسانی مجدد به بارهای بی‌برق شده شبکه پس از رخداد خطا است که با تغییر در وضعیت کلیدهای شبکه و در نظر گرفتن قیود شبکه انجام می‌گیرد. در این مقاله، یک روش بازیابی چندمرحله‌ای با کمک روش درخت تصمیم‌گیری اصلاح‌شده جهت بازیابی شبکه‌های توزیع با هدف بازیابی حداکثر بار بی‌برق شبکه با کمترین تعداد کلیدزنی ارائه شده است. روش بازیابی چندمرحله‌ای پیشنهادشده در سه مرحله (۱) بازیابی اولیه شبکه با بستن کلیدهای در حالت عادی باز شبکه، (۲) بازآرایی و (۳) بهینه‌سازی عملیات قطع بار انجام می‌گیرد. به منظور کاهش فضای جستجو در روند بازیابی، کلیدهای شبکه در گروه‌های مختلفی دسته‌بندی شده‌اند که از حرکت به سمت فضاهای جواب نامناسب جلوگیری می‌کند. روش پیشنهادی بر روی شبکه‌های ۶۹ باسه و ۱۱۹ باسه استاندارد IEEE اجرا شده است. نتایج به دست آمده بیانگر کارایی و دقت بالای روش پیشنهادی در بازیابی شبکه‌های توزیع می‌باشد.

کلیدواژه: بازیابی شبکه توزیع، بازآرایی، بارزدایی بهینه.

## ۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت‌های چشم‌گیری که در صنعت برق رخ داده است انتظار می‌رود شرکت‌های توزیع در هر شرایطی، توان با کیفیت بالا را به دست مشتریان خود برسانند. یکی از شرایطی که می‌تواند این انرژی‌رسانی به مشترکین را دچار مشکل کند، رخداد خطا در شبکه و به خاموشی فرورفتن قسمتی از آن است. پس از وقوع خطا و عمل کردن کلیدهای حفاظتی، به دلیل شعاعی بودن ساختار شبکه توزیع، تا زمانی که المان خطادار تعمیر یا تعویض نشود، بارهای پایین‌دست نقطه خطا بی‌برق باقی می‌مانند. در مدت‌زمان بین جداسازی خطا و رفع عیب، می‌توان با تغییر در وضعیت کلیدهای شبکه، از مسیرهای دیگر قسمتی یا تمام بارهای بی‌برق را بازیابی کرد.

تا کنون روش‌های مختلفی جهت بازیابی شبکه‌های توزیع ارائه شده که از میان آنها می‌توان به روش‌های ابتکاری [۱] تا [۳]، سیستم خیره [۴] و برنامه‌ریزی ریاضی [۵] و [۶] اشاره کرد. در [۱] یک روش ابتکاری بر مبنای الگوریتم پرایم جهت یافتن مسیر بهینه برق‌رسانی به بارهای بی‌برق با هدف کاهش بارهای بی‌برق با کمترین کلیدزنی ارائه شده است. بازیابی شبکه توزیع با هدف بازیابی بیشترین بار ممکن با کمترین عملیات کلیدزنی در [۲] انجام شده است. روش برنامه‌ریزی مقید عدد صحیح مرکب مرتبه دوم<sup>۱</sup> برای حل مسئله بازیابی در [۵] استفاده شده است. در

این مقاله در تاریخ ۷ شهریور ماه ۱۳۹۷ دریافت و در تاریخ ۱۰ اردیبهشت ماه ۱۳۹۸ بازنگری شد.

ساسان قاسمی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، (email: ghasemi@eng.ui.ac.ir).

امین خدابخشیان (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، (email: aminkh@eng.ui.ac.ir).

رحمت‌الله هوشمند، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، (email: hooshmand\_r@eng.ui.ac.ir).

1. Mixed Integer Quadratic Constrained Programming

2. Multi-Agent System

3. Node-Depth

$$\max \sum_{d \in N_{res}} P_d \quad (۱)$$

$$\min n_{ops} \quad (۲)$$

که توابع هدف (۱) و (۲) به ترتیب بیانگر مقدار بار بازیابی شده ( $\sum P_d$ ) و تعداد کلیدزنی ( $n_{ops}$ ) می‌باشند که تحت قیود زیر باید بهینه گردند

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max}, \quad i \in N_b \quad (۳)$$

$$|I_j| \leq |I_j^{max}|, \quad j \in N_l \quad (۴)$$

$$P_k^r + Q_k^r \leq (S_k^{max T})^r, \quad k \in F \quad (۵)$$

قیود (۳) و (۴) به ترتیب بیانگر قیود مربوط به ولتاژ باس‌ها و جریان خطوط شبکه، قید (۵) مربوط به رعایت حداکثر ظرفیت فیدهای شبکه و قید دیگری که نیز باید در نظر گرفته شود، قید شعاعی بودن ساختار شبکه است.

### ۳- روند بازیابی چندمرحله‌ای شبکه توزیع

#### ۳-۱ بازیابی شبکه توزیع پس از رخداد خطا

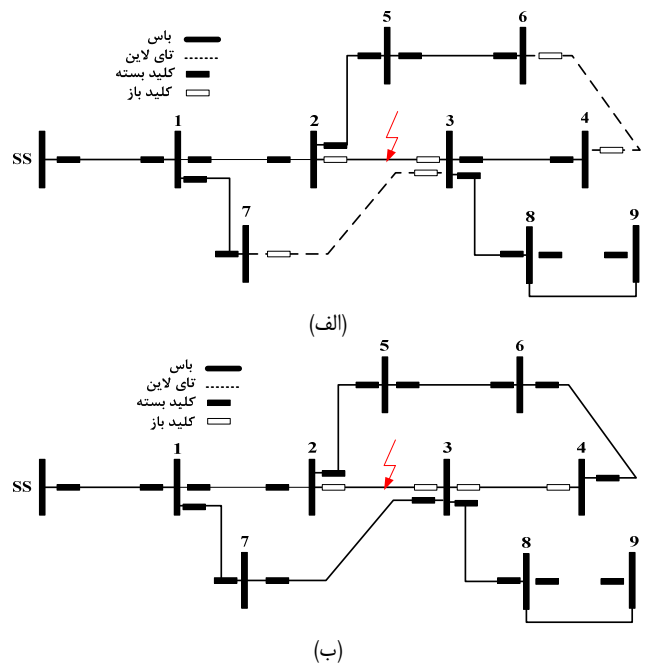
در شرایطی که در شبکه توزیع هیچ منبع تولید پراکنده‌ای وجود نداشته باشد، بارهای شبکه تنها از طریق فیدهای شبکه تغذیه می‌شوند و بازیابی نیز تنها از طریق انتقال بارهای بی‌برق به فیدهای برق‌دار همسایه امکان‌پذیر خواهد بود. در این حالت پس از وقوع خطا و پاکسازی آن، تمام ناحیه پایین‌دست خطا به خاموشی فرو می‌رود. به عنوان مثال یک شبکه توزیع ساده در شکل ۱- الف آمده است. پس از وقوع خطا در خط ۲-۳، کلیدهای دو سر این خط باز شده و متعاقب آن باس‌های ۳، ۴، ۸ و ۹ بی‌برق می‌شوند. در گام اول (بازیابی) با بسته‌شدن کلیدهای دوسر خط ۳-۷ باس‌های مذکور برق‌دار می‌شوند اما چنانچه پس از کلیدزنی قید ولتاژ شبکه رعایت نشود، روند بازیابی وارد گام بعدی (بازآرایی) می‌شود (در این مثال این گونه فرض شده که قید ولتاژ رعایت نشده است). در این مرحله با بسته‌شدن کلیدهای دوسر خط ۴-۶ و بازشدن کلیدهای دوسر خط ۳-۴ تمامی قیود مسئله رعایت شده و نتیجه نهایی به دست می‌آید که در شکل ۱- ب آمده است. چنانچه پس از طی شدن مرحله دوم (مرحله بازآرایی) همچنان قیود مسئله رعایت نمی‌گردید، روند بازیابی با انجام قطع بار بهینه شرایط قیود مسئله را مهیا می‌کرد.

#### ۳-۲ مشخص کردن بارهای پایین دست خطا

برای مشخص کردن باس‌های بی‌برق شبکه، الگوریتم در نظر گرفته شده در [۱۸] از خط خطا دار شروع به حرکت به سمت باس‌های پایین دست خود می‌کند و باس‌های مشاهده شده در طی این حرکت، باس‌های بی‌برق شبکه می‌باشند. زمان رسیدن به جواب این روش، مستقیماً به ابعاد شبکه وابسته است به طوری که با افزایش ابعاد، زمان رسیدن به جواب نیز افزایش می‌یابد. در این مقاله یک روش ساده و دقیق ارائه گردیده که علاوه بر مشخص کردن باس‌های بی‌برق، وضعیت شعاعی بودن ساختار شبکه را نیز مشخص می‌کند. جزئیات این روش در ادامه آمده است.

قبل از ارائه روش مورد نظر، ابتدا باید ماتریس‌های  $A$ ،  $B$ ،  $C$  و  $D$  را به صورت زیر محاسبه کرد (گراف یک شبکه توزیع با  $n$  گره را در نظر بگیرید):

- ماتریس  $A$ : یک ماتریس  $n \times 1$  است که درایه  $a_{i,1}$  این ماتریس، برابر تعداد شاخه‌هایی است که مستقیماً به گره  $i$  وصل شده‌اند



شکل ۱: بازیابی یک شبکه توزیع نمونه، (الف) یک خطای اتفاقی افتاده در خط ۲-۳ و (ب) ساختار نهایی شبکه پس از طی مراحل بازیابی.

قیود مسئله مهیا شده و مراحل بازیابی شبکه به پایان می‌رسد. در نظر گرفتن تمامی کلیدهای شبکه در روند بازیابی شبکه، سبب وسیع شدن فضای جستجوی حل مسئله و بالا رفتن زمان حل آن خواهد شد. از این رو در این مقاله به منظور کاهش زمان حل مسئله و همچنین در نظر گرفتن تمامی کلیدهای مجاز در روند بازیابی، کلیدهای شبکه به صورتی در گروه‌های مختلف دسته‌بندی شده‌اند که در هر مرحله از بازیابی، روش پیشنهادی به جستجو در میان تعداد محدودی از کلیدهای شبکه بپردازد.

مسیرهای بازیابی نهایی شبکه، ترکیبی از کلیدزنی‌های انجام شده در مراحل اول، دوم و سوم بازیابی می‌باشند. از این رو در این مقاله به منظور ذخیره و مشخص کردن ترتیب کلیدزنی‌های انجام شده از ابتدا تا انتهای مراحل بازیابی، از روش درخت تصمیم‌گیری استفاده شده است. به صورت کلی، مشخصه‌های اصلی این مقاله عبارتند از: (۱) ارائه یک روش بازیابی چندمرحله‌ای شبکه توزیع، (۲) مشخص کردن ترتیب کلیدزنی‌های لازم جهت بازیابی در جواب نهایی، (۳) ارائه یک روش ساده و دقیق جهت مشخص کردن وضعیت شعاعی بودن ساختار شبکه توزیع و بارهای بی‌برق شبکه و (۴) در نظر گرفتن درجه اهمیت بارهای مختلف شبکه در روند بازیابی شبکه‌های توزیع.

### ۲- بیان مسئله پیشنهادی

روند بازیابی باید به گونه‌ای باشد که از یک طرف، رضایت مشترکین را برآورده سازد و از طرف دیگر، کاهش درآمدهای ناشی از قطعی برق شرکت‌های توزیع را بهبود بخشد. پس از رخداد خطا و پاکسازی آن باید یک برنامه‌ریزی دقیق و کارآمد در اختیار اپراتورهای شرکت‌های توزیع قرار گیرد که با کمترین هزینه، بیشترین بارهای بی‌برق شبکه را بازیابی کند. اصلی‌ترین هزینه‌های بازیابی شامل هزینه‌های کلیدزنی و انرژی توزیع نشده می‌باشد که اولی با کاهش تعداد کلیدزنی و دومی با افزایش مقدار بارهای بازیابی شده، کاهش می‌یابند. بنابراین مقدار بار بازیابی شده ( $\sum P_d$ ) و تعداد کلیدزنی ( $n_{ops}$ ) را می‌توان به عنوان توابع هدف مناسبی برای حل مسئله بازیابی شبکه توزیع در نظر گرفت. پس توابع هدف مسئله بازیابی شبکه توزیع به صورت زیر می‌باشند

- گروه سوم: کلیدهای بسته (کلیدهای که دو ناحیه یکسان را به هم وصل کرده‌اند و در حالت بسته قرار دارند)
  - گروه چهارم: کلیدهای بین دو گروه فعال (کلیدهای در حالت عادی باز بین دو گروه برق‌دار)
  - گروه پنجم: کلیدهای بین دو گروه غیر فعال (کلیدهای در حالت عادی باز بین دو گروه بی‌برق)
  - گروه ششم: کلیدهای بازیابی (کلیدهای در حالت عادی باز که بین یک گروه برق‌دار و یک گروه بی‌برق قرار دارند)
- طبق این دسته‌بندی، کلیدهای گروه اول و دوم را می‌توان در روند بازیابی در نظر نگرفت، کلیدهای گروه سوم، چهارم و پنجم برای انتقال بار از یک بخش به بخش دیگر به کار می‌روند (کلیدهای لازم جهت بازآرایی) و کلیدهای گروه ششم کلیدهای اساسی هستند که می‌توانند بارهای قابل بازیابی را به شبکه برق‌دار متصل کنند (کلیدهای لازم جهت بازیابی اولیه). پس با این نحوه دسته‌بندی کلیدها می‌توان فضای جستجوی الگوریتم را کاهش داد و به مراتب زمان رسیدن به جواب بهینه نیز کاهش می‌یابد.

#### ۴-۲ بازیابی چندمرحله‌ای پیشنهادی

بازیابی چندمرحله‌ای پیشنهادی در این مقاله در سه مرحله بازیابی اولیه، بازآرایی شبکه و بهینه‌سازی عملیات قطع بار با هدف بازیابی حداکثر بار ممکن شبکه با کمترین عملیات کلیدزنی انجام می‌شود. پس از وقوع خطا در شبکه و بی‌برق شدن ناحیه پایین دست خطا، ابتدا با بستن کلیدهای در حالت عادی باز و رعایت قیود بهره‌برداری شبکه، سعی در بازیابی حداکثر بار ممکن می‌شود (مرحله بازیابی اولیه شبکه). در صورتی که تمامی بارهای بی‌برق بازیابی نشده باشند، با بازآرایی شبکه تلاش می‌شود که انرژی‌رسانی مجدد به بارهای بی‌برق انجام شود و در نهایت چنانچه قیود شبکه هنوز رعایت نشده باشند، عملیات بهینه‌سازی قطع بار تا برقراری کامل قیود انجام می‌شود. هر مرحله از بازیابی چندمرحله‌ای شبکه توزیع پیشنهادی، گام‌های مختلفی دارد که به صورت زیر می‌باشد:

#### دریافت اطلاعات شبکه

گام اول) ورود اطلاعات مربوط به شبکه و خطا  
گام دوم) مشخصات بارهای پایین دست خطا مشخص شود.

#### مرحله اول: بازیابی اولیه

گام سوم) کلیدهای کاندید جهت بازیابی شبکه مشخص گردد (کلیدهای گروه ششم).  
گام چهارم) از بین کلیدهای کاندید در گام قبلی، با استفاده از انجام پخش بار، کلیدزنی‌هایی که قیود مسئله را رعایت می‌کنند ذخیره شوند و به لیست کلیدزنی‌های مجاز اضافه شود و به گام پنجم برو.  
گام پنجم) برای هر کلیدزنی در گام چهارم ساختار شبکه اصلاح و ذخیره شود و به گام سوم برگردد. این تکرار تا زمانی انجام شود که لیست کلیدهای مجاز موجود در گام چهارم تغییری نکند.  
گام ششم) از میان لیست کلیدزنی‌های مجاز، چنانچه دسته یا دسته‌های کلیدزنی وجود داشته باشد که تمام بارهای شبکه را برق‌دار کرده باشند، بازیابی به اتمام رسیده و به گام نهم برو، در غیر این صورت به گام هفتم برو.

#### مرحله دوم: بازآرایی

گام هفتم) برای تمامی ساختارهای به دست آمده در مرحله بازیابی اولیه، عملیات بازآرایی انجام شده و تمامی جواب‌ها ذخیره شود.

- (خطوط باز در نظر گرفته نمی‌شوند). فرض شود که جمع درایه‌های ماتریس  $A$  برابر  $a$  باشد.
- ماتریس  $B$ : یک ماتریس  $n \times n$  است که درایه  $b_{i,j}$  آن به صورت زیر تعریف می‌گردد:  
 $b_{i,j} = 1$ ، اگر باس  $i$  و  $j$  به صورت مستقیم به هم وصل شده باشند و در غیر این صورت  $b_{i,j} = 0$  می‌باشد.
- ماتریس  $C$ : یک ماتریس  $n \times n$  است که درایه  $c_{i,j}$  آن به صورت زیر تعریف می‌گردد:  
 $c_{i,j} = 1$  برای  $j = 1, 2, \dots, n$ ، اگر منبع تغذیه در باس  $i$  باشد و در غیر این صورت  $c_{i,j} = 0$  می‌باشد.
- ماتریس  $D$ : یک ماتریس  $n \times n$  است که برابر است با  
(۶)  $D = C \times B^n$

اثبات (۶) در پیوست ب آمده است. طبق تعاریف بالا، ساختار جدید شبکه، شعاعی خواهد بود و تمام باس‌های شبکه برق‌دار می‌باشند، اگر قوانین زیر رعایت شوند:

قانون ۱: هیچ درایه‌ای از ماتریس  $A$  برابر صفر نباشد.

قانون ۲:  $a = 2(n-1)$

قانون ۳: در ماتریس  $D$  هیچ ستونی وجود نداشته باشد که تمام درایه‌های آن صفر باشد.

قوانین ۱ و ۲ شعاعی بودن ساختار شبکه را مشخص می‌کنند. قانون ۱ مشخص می‌کند که به هر باس حداقل یک خط وصل باشد و قانون ۲ مربوط به رعایت کردن تعداد خطوط در یک شبکه شعاعی است (در یک گراف درختی با  $n$  گره، تعداد شاخه‌ها برابر است با  $(n-1)$  [۱۹]).  
قانون سوم نیز مشخص می‌کند که در شبکه حلقه یا باس‌های بی‌برق وجود نداشته باشد به گونه‌ای که اگر تمامی درایه‌های ستون  $k$  ام در ماتریس  $D$  برابر صفر باشند، بدین معنی است که باس  $k$  ام شبکه بی‌برق می‌باشد. اثبات این قوانین در پیوست ب آورده شده است. پس با استفاده از قوانین گفته شده در بالا به راحتی می‌توان باس‌های بی‌برق شبکه را مشخص کرد. از آنجا که روش گفته شده از عملیات‌های ساده ماتریسی استفاده می‌کند، بنابراین برنامه‌نویسی و پیاده‌سازی آن در محیط‌های برنامه‌نویسی آسان است.

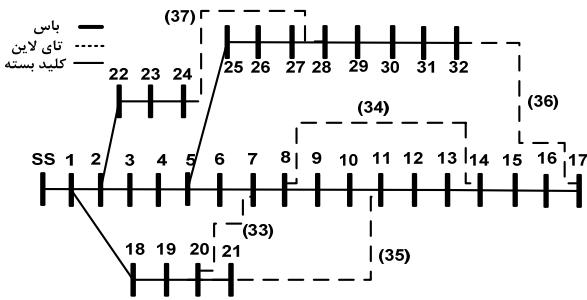
#### ۴-۳ روش کاهش فضای جستجو و مراحل بازیابی چندمرحله‌ای پیشنهادی

قبل از تشریح مراحل بازیابی چندمرحله‌ای پیشنهادی در این مقاله، ابتدا باید نحوه کاهش فضای جستجوی حل مسئله توضیح داده شود که در ادامه آمده است.

#### ۴-۱ کاهش فضای جستجو

از آنجا که با افزایش ابعاد شبکه، ترکیب کلیدزنی‌های ممکن برای بازیابی آن نیز افزایش می‌یابد، در این مقاله با تقسیم‌بندی کلیدها در شش گروه مختلف، فضای جستجو کاهش یافته و روند بازیابی سریع‌تر شده است. کلیدها در شش گروه مختلف بدین صورت دسته‌بندی می‌شوند:

- گروه اول: کلیدهای حفاظتی (کلیدهایی که ناحیه سالم شبکه را از ناحیه بی‌برق جدا کرده‌اند و در حالت باز هستند)
- گروه دوم: کلیدهای ایزوله‌سازی (کلیدهایی که ناحیه خط‌دار را به ناحیه بی‌برق متصل کرده‌اند و در حالت بسته قرار دارند و پس از خطا برای ایزوله کردن آن باز می‌شوند)



شکل ۳: نمودار تک خطی شبکه ۳۳ باسه.

**مرحله سوم: بازسازی بهینه**

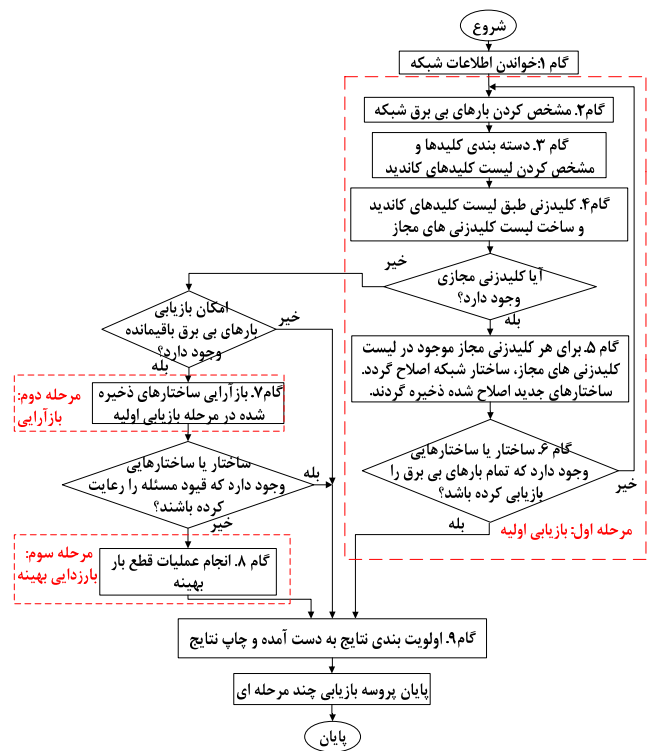
گام هشتم) اگر در مرحله بازآرایی شبکه، جواب قابل قبولی به دست نیامده باشد که تمامی قیود شبکه را رعایت کرده باشد، برای ساختارهای ذخیره شده مرحله بازآرایی عملیات قطع بار بهینه تا برقراری قیود مسئله انجام شود. در این مقاله از روش بازسازی بهینه ارائه شده در [۱۶] استفاده شده است.

گام نهم) جواب‌های به دست آمده بر اساس سه اولویت (اولویت اول: مقدار بار بازیابی شده، اولویت دوم: کمترین تعداد کلیدزنی و اولویت سوم: بیشترین دامنه حداقل ولتاژ) از بالا به پایین طبقه بندی شود. اگر در جدول مربوط به اولویت اول، تنها یک جواب در سطر اول جدول بود، آن جواب نهایی می باشد و اگر بیش از یک جواب در سطر اول وجود داشت، جوابی بهینه است که در جدول مربوط به اولویت دوم در ردیف بالاتری باشد و اگر چنانچه همچنان جواب نهایی مشخص نشد، از جدول مربوط به اولویت سوم جهت تعیین جواب نهایی کمک گرفته می شود. روندنمای روش پیشنهادی در شکل ۲ آمده است.

**۴-۳ کاربرد روش درخت تصمیم‌گیری اصلاح شده در بازیابی**

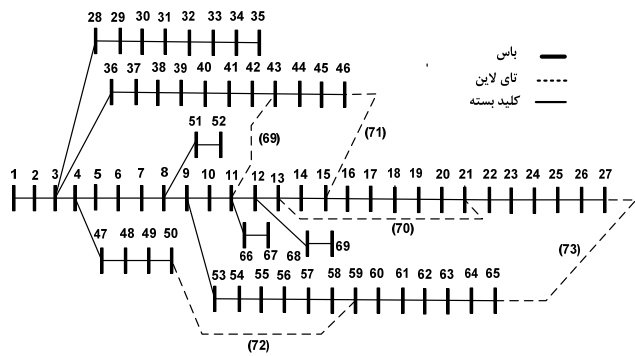
کلیدزنی‌های پیشنهادی در هر مرحله از روش بازیابی پیشنهادی در این مقاله، بر اساس ساختارهای ارائه شده در مرحله قبل آن می باشد. بنابراین مسیرهای بازیابی نهایی به دست آمده، ترکیبی از کلیدزنی‌های انجام شده در مراحل اول، دوم و سوم بازیابی می باشند. در این مقاله برای ذخیره و مشخص کردن ترتیب کلیدزنی‌های انجام شده در هر مسیر بازیابی از روش درخت تصمیم‌گیری اصلاح شده ارائه گردیده در [۲۰] استفاده شده است. در روش درخت تصمیم‌گیری اصلاح شده، هر شاخه معرف یک کلیدزنی می باشد و هر مسیری که از ریشه درخت شروع شده و به یک گره انتهایی رسیده است نیز معرف یک مسیر بازیابی شبکه است. بنابراین شاخه‌های تشکیل دهنده هر مسیر بازیابی، بیانگر دسته کلیدزنی‌های مربوط به مسیر مورد نظر می باشد.

برای وضوح بیشتر نحوه استفاده از درخت تصمیم‌گیری اصلاح شده در حل مسئله بازیابی شبکه‌های توزیع، از یک مثال ساده استفاده شده است. فرض کنید در شبکه ۳۳ باسه [۲۱] نشان داده شده در شکل ۳، در خطوط ۱۰ و ۱۵ خطا رخ داده و از مدار خارج شده‌اند. کلیدهای کاندید جهت بازیابی اولیه به ترتیب کلیدهای ۳۴، ۳۵ و ۳۶ می باشند. این کلیدها، ردیف اول شاخه‌های درخت تصمیم‌گیری را تشکیل می دهند. پس از هر کلیدزنی، کلیدهای کاندید بعدی (شاخه‌های بعدی درخت تصمیم‌گیری) جهت بازیابی سایر بارهای شبکه مشخص می شوند و این روند تا بازیابی تمام بارهای شبکه ادامه پیدا کرده و سایر شاخه‌های درخت تصمیم‌گیری را تکمیل می کنند. نمودار درخت تصمیم‌گیری مربوط در شکل ۴ آمده



شکل ۲: روندنمای روش پیشنهادی.

مراحل انجام عملیات بازآرایی در این مرحله به صورت زیر می باشد:  
 گام ۱-۷: بارهای بی برق شبکه مشخص شوند.  
 گام ۲-۷: کلیدهای گروه ششم که توانایی برق دار کردن ناحیه بی برق را دارند مشخص شوند و از میان آنها، کلیدی که دو سر آن بیشترین اختلاف ولتاژ را دارد، بسته شود.  
 گام ۳-۷: اگر تمام بارهای شبکه بدون در نظر گرفتن قیود مربوط به ولتاژ باس ها و جریان خطوط برق دار شده باشند به گام ۴-۷ برو و در غیر این صورت به گام ۶-۷ برگرد.  
 پس از اتمام مراحل بالا، تمامی بارهای شبکه برق دار بوده و تنها قیود مربوط به ولتاژ باس ها و جریان خطوط رعایت نشده که در ادامه به بهبود این قیود پرداخته می شود.  
 گام ۴-۷: کلیدهای گروه چهارم مشخص گردند و بر اساس اختلاف ولتاژ دو سر آنها، از بیشترین مقدار به کمترین مقدار مرتب شوند.  
 گام ۵-۷: از میان کلیدهای مرتب شده گام ۴-۷، کلید با بیشترین اختلاف ولتاژ بسته شده و کلید مجاور آن (کلید مجاور گروه سوم که بیشترین دامنه ولتاژ را دارد) باز شود.  
 گام ۶-۷: اگر ساختار شبکه شعاعی باشد به گام ۷-۷ برو و در غیر این صورت کلیدزنی مرحله ۵-۷ رد شده و از لیست کلیدهای مرتب شده گروه چهارم حذف شده و به گام ۵-۷ برو.  
 گام ۷-۷: چنانچه سطح ولتاژ شبکه افزایش یافته باشد، کلیدزنی انجام شده قبول شده و ساختار شبکه اصلاح گردد و در غیر این صورت کلیدزنی مورد نظر رد شده و از لیست کلیدهای مرتب شده گروه چهارم حذف شده و به گام ۴-۷ برگرد.  
 مراحل فوق تا زمانی ادامه می یابد که کلیدی در لیست کلیدهای مرتب شده گروه چهارم وجود نداشته باشد.  
 پس از اتمام مرحله بازآرایی شبکه، چنانچه قیود مربوط به ولتاژ باس ها و جریان خطوط شبکه در محدوده مجاز خود نباشند، به منظور رعایت این قیود، روند پیشنهادی وارد مرحله بازسازی بهینه می گردد.



شکل ۵: دیاگرام تک‌خطی شبکه ۶۹ بوسه.

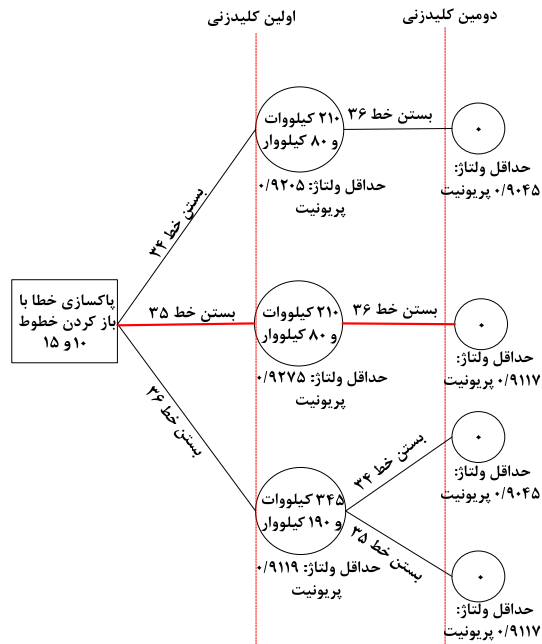
جدول ۱: اولویت‌بندی بارهای شبکه ۶۹ بوسه.

درجه اهمیت	شماره باس‌ها
رتبه اول	۶-۹، ۱۳-۱۵، ۲، ۲۲، ۳۱-۳۳، ۵۱-۵۳
رتبه دوم	۱۰-۱۲، ۱۶-۱۹، ۳۱، ۵۴-۵۷، ۶۰، ۶۷، ۳۶
رتبه سوم	۲۱، ۲۳-۳۰، ۳۲، ۴۷-۵۰، ۵۸، ۶۱، ۶۴-۶۸، ۶۹-۷۸، ۴۴-۴۶

مختلف دسته‌بندی شده‌اند که در جدول ۱ آمده است [۱۸]. جدول ۲ نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی در این مقاله و روش‌های ارائه شده در [۱۸]، [۲۴] و [۲۵] را نشان می‌دهد.

در سناریوی اول، خط در خط ۷ رخ داده که با بازکردن کلیدهای دو طرف این خط، خط پاکسازی شده است. برای این سناریو، روش پیشنهادی در این مقاله پس از طی مراحل بازیابی اولیه و بازآرایی، خطوط ۱۴، ۵۵ و ۶۱ را باز کرده و خطوط ۷۱، ۷۲، ۷۳ و ۶۹ را بسته است که پس از این کلیدزنی‌ها، حداقل ولتاژ ۰/۹۴۹۵ پر یونیت بوده و بیشترین توان جاری شده از خطوط شبکه نیز ۴۸۱۶/۹ کیلوولت‌آمپر می‌باشد. از آنجا که توان عبوری از خطوط بیشتر از حد مجاز است، روش پیشنهادی وارد مرحله سوم شده و بارزدایی بهینه را انجام می‌دهد. پس از انجام بارزدایی بهینه، در مجموع ۲۸۸/۲ کیلووات و ۲۰۴/۲ کیلووار از توان مصرفی بارهای شبکه (بار باس‌های ۴۳، ۲۶-۲۹، ۲۴، ۶۸، ۶۹، ۴۶ و ۴۸) که از اهمیت کمتری نسبت به بقیه بارهای شبکه برخوردارند قطع می‌شود. پس از این مرحله حداقل ولتاژ شبکه برابر ۰/۹۴۹۶ پر یونیت و بیشترین توان جاری شده در خطوط نیز ۴۴۵۱/۷ کیلوولت آمپر می‌باشد که در محدوده مجاز خود قرار می‌گیرد. در سناریوی دوم نیز کل بارهای شبکه تنها با بستن خط ۷۲ بازیابی شده‌اند.

همان گونه که در جدول ۲ نیز دیده می‌شود، سایر روش‌ها به جواب‌های متفاوتی رسیده‌اند. در سناریوی اول برای خطی رخ داده در خط ۷، روش ارائه شده در [۱۸] با بازکردن خطوط ۱۲، ۵۷ و ۶۴ و بستن خطوط ۶۹، ۷۱، ۷۲ و ۷۳ و قطع کردن ۴۳۶/۲ کیلووات و ۳۰۹/۳ کیلووار از بارهای شبکه، بازیابی را انجام داده که در نتیجه آن حداقل ولتاژ به ۰/۹۴۸۴ پر یونیت و بیشترین توان عبوری از خطوط شبکه نیز به ۴۲۵۱/۴ کیلوولت‌آمپر رسیده است. این در حالی است که روش پیشنهادی در این مقاله توانسته است ۱۴۸ کیلووات و ۱۰۵/۱ کیلووار از بار شبکه را بیشتر از روش ارائه شده در [۱۸] بازیابی کند و همچنین سطح ولتاژ شبکه را نیز بیشتر بهبود بخشیده است. در سناریوی دوم برای خطی رخ داده در خط ۵۴، روش پیشنهادی در این مقاله و روش ارائه شده در [۱۸] هر کدام با یک کلیدزنی و بستن خط ۷۲ تمام بارهای شبکه را بازیابی کرده‌اند اما روش‌های GA [۲۴] و GTA [۲۵] هر کدام با انجام ۷ کلیدزنی بارها را بازیابی کرده‌اند.



شکل ۴: نمودار درخت تصمیم‌گیری برای خطای رخ داده در خطوط ۱۰ و ۱۵ شبکه ۳۳ بوسه.

است. اعداد داخل دایره‌ها، بار بازیابی نشده پس از هر مرحله از کلیدزنی را نشان می‌دهند. همان گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، ۴ مسیر برای بازیابی شبکه وجود دارد که همگی با انجام دو کلیدزنی، تمام بارهای شبکه را بازیابی کرده‌اند. بنابراین از میان این ۴ مسیر، مسیری که حداقل ولتاژ شبکه آن بیشترین مقدار را داشته باشد، بهترین مسیر بازیابی است که در شکل ۴ با خطوط ممتد قرمز مشخص شده است. پس با کمک روش درخت تصمیم‌گیری، بهترین جواب مسئله ابتدا با بستن خط ۳۵ و سپس خط ۳۶ به دست می‌آید که در این حالت حداقل ولتاژ شبکه ۰/۹۱۱۷ پر یونیت است. همان گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، روش درخت تصمیم‌گیری به خوبی ترتیب کلیدزنی‌ها را نیز مشخص می‌کند.

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی از دو شبکه ۶۹ بوسه و ۱۱۹ بوسه استاندارد IEEE استفاده شده است [۲۲] و [۲۳]. از سناریوهای مختلف جهت آزمایش روش ارائه شده در این مقاله استفاده گردیده است. مشخصات شبکه‌های ذکر شده و همچنین روش پیشنهادی در فضای Matlab R2009b کد شده‌اند.

### ۵-۱ نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه ۶۹ بوسه IEEE

#### ۵-۱-۱ اطلاعات اولیه شبکه ۶۹ بوسه

دیاگرام تک‌خطی شبکه ۶۹ بوسه IEEE در شکل ۵ آمده است. این شبکه شامل ۶۹ باس و ۷۳ خط است که ۵ خط آن در حالت عادی باز است. ولتاژ نامی شبکه ۱۲/۶۶ کیلوولت و بار مصرفی شبکه ۳/۸ مگاوات و ۲/۶۹ مگاوار است. محدوده مجاز انحراف ولتاژ شبکه بین ۰/۹ تا ۱/۰۵ پر یونیت می‌باشد.

#### ۵-۱-۲ نتایج شبیه‌سازی

در این بخش مسئله بازیابی شبکه ۶۹ بوسه در دو سناریوی مختلف و با در نظر گرفتن درجه اهمیت بارهای مختلف شبکه مورد تحقیق قرار گرفته است. حداکثر ظرفیت مجاز خطوط شبکه ۴۵۰۰ کیلوولت آمپر در نظر گرفته شده است. بارهای شبکه بر اساس درجه اهمیت آنها در سه رتبه

جدول ۲: بازیابی شبکه ۶۹ با در نظر گرفتن اولویت بندی بارهای شبکه.

سناریو	مکان خطا	روش	کلیدزنی	تعداد کلیدزنی	حداقل ولتاژ شبکه (pu)	باس بارهای قطع شده	مقدار بارهای بی برق	زمان اجرای روش (ثانیه)
۱	خط ۷	روش پیشنهادی	MSR* [۱۸]	۷	۰.۹۴۸۴	۲۶، ۲۴، ۲۱	۴۳۶.۲ کیلووات و ۳۰۹.۳ کیلووار	-
			روش پیشنهادی	۷	۰.۹۴۹۶	۲۸، ۲۷، ۲۶، ۴۳	۲۸۸.۲ کیلووات و ۲۰۴.۲ کیلووار	۱.۷
۲	خط ۵۴	روش پیشنهادی	MSR [۱۸]	۱	۰.۹۴۴۳	-	-	-
			GA [۲۴]	۷	۰.۹۴۸۸	-	-	-
			GTA [۲۵]	۷	۰.۹۴۸۸	-	-	-
			روش پیشنهادی	۱	۰.۹۴۴۳	-	-	-

Multi-Stage Restoration \*

جدول ۳: نتایج بازیابی شبکه ۱۱۹ با سه روش پیشنهادی بازیابی چندمرحله‌ای.

سناریو	مکان خطا	کلیدزنی	تعداد کلیدزنی	حداقل ولتاژ شبکه (پریونیت)	زمان اجرای روش (ثانیه)
۱	خط ۶۵-۸۹	بازکردن خط ۷۳-۷۴، بستن خطوط ۵۸-۹۶ و ۸۸-۷۵	۳	۰.۹۰۵	۱.۶
۲	خط ۶۹-۷۰	بازکردن خط ۷۳-۷۴، بستن خطوط ۷۳-۹۱ و ۸۸-۷۵	۳	۰.۹۰۵۱	۱.۳
۳	خطوط ۲۳-۲۴ و ۷۱-۷۲	بستن خطوط ۴۶-۲۷ و ۷۳-۹۱	۲	۰.۹۰۵۳	۳.۱
۴	خطوط ۵۵-۵۶ و ۴۲-۴۳ و ۷۶-۷۷	بازکردن خط ۷۴-۷۵، بستن خط ۹۹-۷۷، بازکردن خط ۷۲-۷۳ و سپس بستن خطوط ۸۸-۷۵، ۷۳-۹۱ و ۳۷-۶۲	۷	۰.۹۰۵	۱۳.۰۱

اولیه شبکه (شرایطی که هیچ خطایی در شبکه وجود ندارد) است. در شرایط عادی که هیچ خطایی رخ نداده باشد، حداقل ولتاژ شبکه ۰.۸۶۸ پریونیت می‌باشد. از این رو پس از وقوع خطا، روش پیشنهادی در این مقاله از میان مسیرهای ممکن جهت بازیابی شبکه، مسیری را که با کمترین تعداد کلیدزنی، حداقل ولتاژ را به بالاتر از مقدار حداقل ولتاژ مجاز شبکه (حداقل ولتاژ مجاز شبکه ۰.۹ پریونیت در نظر گرفته شده است) رسانده باشد و تمامی بارهای بی‌برق را نیز بازیابی کرده باشد به عنوان بهترین مسیر جهت بازیابی معرفی می‌کند.

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله روش بازیابی چندمرحله‌ای شبکه توزیع به منظور بازیابی حداکثر بار ممکن شبکه با کمترین عملیات کلیدزنی پیشنهاد شده است. به منظور حل مسئله بازیابی مورد نظر از روش درخت تصمیم‌گیری اصلاح‌شده استفاده گردیده که تمامی حالات ممکن بازیابی شبکه را در نظر می‌گیرد. از آنجا که ترکیب کلیدزنی‌های شبکه برای در نظر گرفتن تمامی حالات ممکن بازیابی بسیار زیاد است، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با دسته‌بندی کلیدهای شبکه در شش گروه مختلف، به صورت قابل توجهی فضای جستجو کاهش یافته و در نظر گرفتن تمامی حالات کلیدزنی را امکان‌پذیر کرده است. استفاده از روش درخت تصمیم‌گیری اصلاح‌شده سبب گردیده که در جواب نهایی مسئله، ترتیب کلیدزنی‌ها نیز مشخص باشد. روش پیشنهادی در این مقاله بر روی شبکه‌های استاندارد ۶۹ باسه و ۱۱۹ باسه IEEE آزمایش شده و مقایسه نتایج به دست آمده با روش‌های پیشین ارائه‌شده در این زمینه، برتری روش پیشنهادی بر آنها را نشان می‌دهد. در مقایسه با روش بازیابی چندمرحله‌ای (MSR)، روش

## ۵-۲ نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه ۱۱۹ باسه IEEE

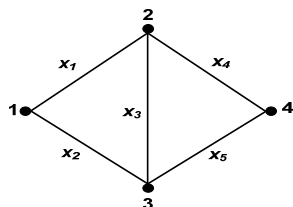
### ۵-۲-۱ اطلاعات اولیه شبکه ۱۱۹ باسه

دیگرام تک‌خطی شبکه ۱۱۹ باسه IEEE در شکل ۶ آمده است. این شبکه شامل ۱۱۹ باس و ۱۳۲ خط است که ۱۵ خط آن در حالت عادی باز است. ولتاژ نامی شبکه ۱۱ کیلوولت و بار مصرفی شبکه ۲۲۷۰۹/۷ کیلووات و ۱۷۰۴۱/۱ کیلووار است. محدوده مجاز انحراف ولتاژ شبکه نیز بین ۰.۹ تا ۱.۰۵ پریونیت می‌باشد.

### ۵-۲-۲ نتایج شبیه‌سازی

نتایج حاصل از بازیابی شبکه ۱۱۹ باسه توسط روش پیشنهادی در این مقاله برای ۴ سناریوی مختلف در جدول ۳ آمده است. در تمامی سناریوها، پس از رخداد خطا با بازکردن خط یا خطوط خطادار، خطای شبکه پاکسازی شده است. در سناریوی اول برای خطای رخ داده در خط ۸۹-۶۵، بازیابی کل شبکه با سه کلیدزنی و از طریق بازکردن خط ۷۳-۷۴ و بستن خطوط ۵۸-۹۶ و ۸۸-۷۵ به انجام رسیده که در نتیجه این کلیدزنی‌ها حداقل ولتاژ شبکه به ۰.۹۰۵ پریونیت رسیده است. در سناریوی دوم بازیابی با سه کلیدزنی انجام شده است. در سناریوی سوم، دو خط در شبکه رخ داده است که روش بازیابی چندمرحله‌ای پیشنهادی در این مقاله تنها با انجام مرحله بازیابی اولیه و با دو کلیدزنی، تمامی بارهای بی‌برق را بازیابی کرده است. در سناریوی چهارم این گونه در نظر گرفته شده که هم‌زمان در سه خط اتفاق افتاده که روش پیشنهادی در این مقاله با ۷ کلیدزنی توانسته است بارهای بی‌برق را بازیابی کند.

با توجه به جدول ۳ دیده می‌شود که در تمامی سناریوها حداقل ولتاژ نزدیک به ۰.۹ پریونیت می‌باشند که علت آن نیز پایین بودن سطح ولتاژ



شکل پ-۱: یک گراف ساده.

اگر  $m_{ij} = 1$ ،  $i = j$  باشد.

اگر ارتباط مستقیمی بین باس  $i$  و  $j$  وجود نداشته باشد.

(پ-۱)

اگر باس  $i$  به صورت مستقیم به باس  $j$  توسط خط  $x_{ij}$  وصل شده باشد.

به عنوان مثال، ماتریس ارتباط  $M$  برای گراف نشان داده شده در شکل پ-۱ به صورت زیر است

$$M = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_2 & 0 \\ x_1 & 1 & x_3 & x_4 \\ x_2 & x_3 & 1 & x_5 \\ 0 & x_4 & x_5 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{پ-۲})$$

با محاسبه ماتریس  $M^n$  که  $n$  تعداد گره‌های گراف است، می‌توان تمامی مسیرهای بین هر دو گره در گراف را پیدا کرد [۲۶]. پس با محاسبه  $M^2$  می‌توان تمامی مسیرهای بین هر دو گره از گراف نشان داده شده در شکل پ-۱ را محاسبه کرد که به عنوان مثال، مسیرهای بین گره ۱ و گره ۴ برابر  $x_1x_2x_3x_4$ ،  $x_1x_3x_4$ ،  $x_1x_2x_5x_4$  می‌باشد. در ساختار شعاعی یک شبکه توزیع، تمام باس‌ها باید برق‌دار باشند و هیچ حلقه‌ای در شبکه وجود نداشته باشد. این گونه ساختارهای شعاعی از شبکه توزیع به عنوان درخت‌های شبکه توزیع شناخته می‌شوند [۲۷].

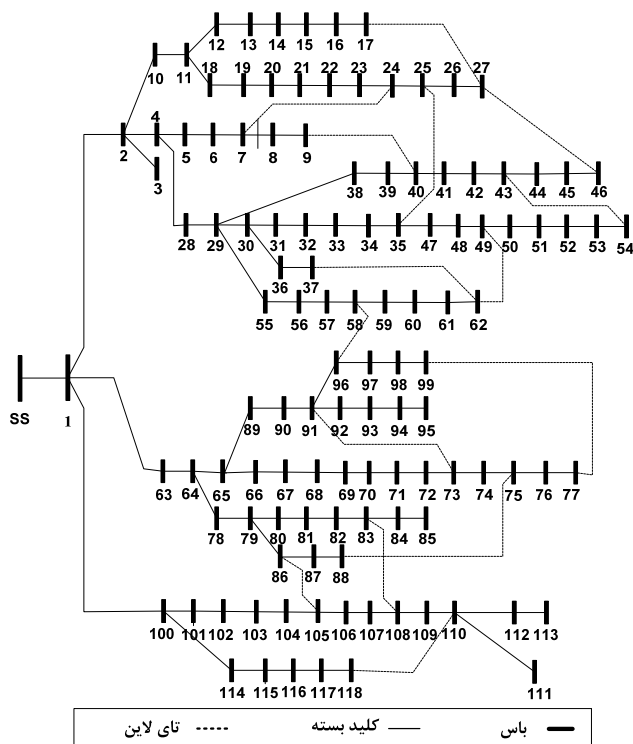
برای یک درخت با  $n$  گره و  $m$  شاخه، معادله زیر برقرار است [۲۷]

$$m = n - 1 \quad (\text{پ-۳})$$

برای قانون ۲ ارائه شده در بخش ۳-۲، ماتریس  $A$  معرف تعداد خطوطی است که به هر باس از ساختار جدید شبکه وصل شده است. هر خط نیز به دو باس وصل است، پس مجموع درایه‌های ماتریس  $A$ ، دو برابر تعداد خطوط شبکه است. بنابراین با در نظر گرفتن (پ-۳)، معادله زیر باید برقرار باشد

$$a = 2(n - 1) \quad (\text{پ-۴})$$

که  $a$  برابر مجموع درایه‌های ماتریس  $A$  است. برای قانون ۳ ارائه شده در بخش ۳-۳، ماتریس  $B$  شبیه ماتریس  $M$  در (پ-۲) است. بنابراین درایه  $b_{ij}$  در ماتریس  $B^n$  معرف ارتباط بین باس  $i$  و  $j$  است. اگر  $b_{ij} = 0$  باشد، پس مسیر مستقیمی بین باس  $i$  و  $j$  وجود ندارد و در غیر این صورت، بین باس  $i$  و  $j$  مسیری وجود دارد. از آنجا که ماتریس  $C$  معرف باس‌های تولیدی شبکه است، پس ماتریس  $D$  که برابر است با  $D = B^n \times C$ ، بیانگر ارتباط بین باس‌های تولیدی و سایر باس‌های شبکه است. بنابراین اگر تمام درایه‌های ستون  $i$  از ماتریس  $D$  صفر باشد، بدین معنی است که بین باس  $i$  ام و باس‌های تولیدی شبکه ارتباطی وجود ندارد و باس  $i$  ام شبکه بی‌برق است. از این رو در ساختار جدید شبکه توزیع، تمام باس‌ها برق‌دار خواهند بود و در شبکه هیچ حلقه‌ای وجود نخواهد داشت، اگر هیچ ستونی از ماتریس  $D$  صفر نباشد.



شکل ۶: دیاگرام تک‌خطی شبکه ۱۱۹ باسه.

پیشنهادی توانسته بار بیشتری را بازیابی کند و همچنین بهبود بیشتری در پروفیل ولتاژ شبکه داده است. در مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های GA و GTA نیز دیده می‌شود که روش پیشنهادی با شش کلیدزنی کمتر به جواب نهایی رسیده که این بیانگر قدرت و دقت بالای روش پیشنهادی در بازیابی شبکه‌های توزیع می‌باشد.

### پیوست

#### پیوست الف - فهرست علائم

- $I_j$ : جریان عبوری از خط  $z$  ام شبکه
- $I_j^{\max}$ : حداکثر جریان مجاز عبوری از خط  $z$  ام
- $V_i$ : ولتاژ باس  $i$  ام
- $V_{\min}$ : حداقل ولتاژ مجاز
- $V_{\max}$ : حداکثر ولتاژ مجاز
- $P_k$ : توان اکتیو تزریقی توسط فیدر  $k$  ام
- $Q_k$ : توان راکتیو تزریقی توسط فیدر  $k$  ام
- $P_d$ : توان بارهای شبکه
- $S_k^{\max T}$ : حداکثر ظرفیت فیدر  $k$  ام یا حداکثر ظرفیت ترانس فیدر  $k$  ام
- $N_b$ : دسته باس‌های برق‌دار شبکه
- $N_l$ : دسته خطوط شبکه
- $N_{res}$ : دسته باس‌های بازیابی شده
- $n_{ops}$ : تعداد کلیدزنی

#### پیوست ب

گراف  $G = \{V, E\}$  را در نظر بگیرید.  $V = \{v_i\}, i = 1, 2, \dots, n$  و  $E = \{e_j\}, j = 1, 2, \dots, m$  به ترتیب بیانگر یال‌ها و گره‌های گراف هستند. در گراف یک شبکه توزیع نیز یال‌ها و گره‌ها به ترتیب معرف خطوط و باس‌های شبکه می‌باشند. درایه‌های ماتریس ارتباط شبکه توزیع ( $M$ ) که یک ماتریس  $n \times n$  است به صورت زیر تعریف می‌گردد

## مراجع

- [18] F. Wang, et al., "A multi-stage restoration method for medium-voltage distribution system with DGs," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2627-2636, Nov. 2017.
- [19] Bondy, J.A. and Murty, *Graph Theory with Applications*, London, Macmillan, U.S.R., 1976.
- [20] B. Leo, J. Friedman, C. J. Stone, and R. A. Olshen, *Classification and Regression Trees*, CRC Press, 1984.
- [21] J. S. Savier and D. Das, "Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 22, no. 4, pp. 2473-2480, Oct. 2007.
- [22] H. B. Tolabi, M. H. Ali, and M. Rizwan, "Simultaneous reconfiguration, optimal placement of DSTATCOM, and photovoltaic array in a distribution system based on fuzzy-ACO approach," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 210-218, Jan. 2015.
- [23] S. Ghasemi and J. Moshtagh, "Radial distribution systems reconfiguration considering power losses cost and damage cost due to power supply interruption of consumers," *International J. on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 5, no. 3, pp. 297-315, Sept. 2013.
- [24] A. Carcamo-Gallardo, L. Garcia-Santander, and J. E. Pezoa, "Greedy reconfiguration algorithms for medium-voltage distribution networks," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 328-337, Jan. 2009.
- [25] Y. T. Hsiao and C. Y. Chien, "Enhancement of restoration service in distribution systems using a combination fuzzy-GA method," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 15, no. 4, pp. 1394-1400, Nov. 2000.
- [26] H. Liang, "Subsystem partitioning for power system black-start considering restoration reliability," *Tehnički Vjesnik*, vol. 22, no. 3, pp. 637-642, Jun. 2015.
- [27] R. Vargas, W. P. Mathias-Neto, L. G. W. da Silva, and J. R. S. Mantovani, "Automatic restoration of active distribution networks based on tabu search specialized algorithm," in *Proc. IEEE Innovative Smart Grid Technologies Latin America, ISGT LATAM'15*, pp. 411-416, Montevideo, Uruguay, 5-7 Oct. 2015..
- ساسان قاسمی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۲ از دانشگاه شهید مدنی تبریز و دانشگاه کردستان و دکتری مهندسی برق گرایش سیستم‌های قدرت در سال ۱۳۹۸ از دانشگاه اصفهان به پایان رسانده است و هم‌اکنون در حال گذراندن دوره پسادکتری در طرح مشترک دانشگاه‌های UOK و UHD می‌باشد. نام‌برده از سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷ مدیر پروژه توسعه شبکه توزیع نیروی برق استان کرمانشاه و طراح ارشد شبکه‌های توزیع آن شرکت بوده است و همچنین از سال ۱۳۹۶ تا کنون نیز داور منطقه‌ای پروژه‌های تحقیقاتی شرکت توانیر می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: بازیابی و بازیابی شبکه های توزیع برق، ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت، ریزشکها و برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع.
- امین خدابخشیان تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۶۷ از دانشگاه تهران و در مقطع دکتری مهندسی برق - قدرت در سال ۱۹۹۴ از دانشگاه ولنگ استرالیا به پایان رسانده است و هم‌اکنون استاد گروه مهندسی برق دانشکده فنی مهندسی دانشگاه اصفهان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: کنترل و دینامیک سیستم‌های قدرت، شبکه‌های توزیع انرژی و ریزشکها.
- رحمت‌الله هوشمند تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۸ و ۱۳۷۰ از دانشگاه فردوسی مشهد و دانشگاه تهران و در مقطع دکتری مهندسی برق - قدرت در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه تربیت مدرس تهران به پایان رسانده است و هم‌اکنون استاد گروه مهندسی برق دانشکده فنی مهندسی دانشگاه اصفهان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: بهره برداری از سیستم‌های قدرت و شبکه های توزیع انرژی، کاربرد سیستم‌های هوشمند در مسائل بهینه‌سازی، و سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته.
- [1] S. Dimitrijevic and N. Rajakovic, "Load reallocation in the service restoration application for distribution networks," in *Proc. IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conf., ISGT'14*, 5 pp., Washington, DC, USA, 19-22 Feb. 2014.
- [2] S. Wang and H. D. Chiang, "Multi-objective service restoration of distribution systems using user-centered methodology," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 80, pp. 140-149, Sept. 2016.
- [3] M. S. Tsai, "Development of an object-oriented service restoration expert system with load variations," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 219-225, Feb. 2008.
- [4] M. R. Kleinberg, K. Miu, and H. D. Chiang, "Improving service restoration of power distribution systems through load curtailment of in-service customers," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 1110-1117, Aug. 2011.
- [5] K. Chen, "Security evaluation for distribution power system using improved MIQCP based restoration strategy," in *Proc. IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conf., ISGT'14*, 6 pp., Washington, DC, USA, 19-22 Feb. 2014.
- [6] R. Romero, J. F. Franco, F. B. Leao, M. J. Rider, and E. S. de Souza, "A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 31, no. 2, pp. 1259-1268, Mar. 2015.
- [7] S. Dimitrijevic and N. Rajakovic, "An innovative approach for solving the restoration problem in distribution networks," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 10, pp. 1961-1972, Oct. 2011.
- [8] A. Botea, J. Rintanen, and D. Banerjee, "Optimal reconfiguration for supply restoration with informed A\* search," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 583-593, Jun. 2012.
- [9] J. C. Cebrian, S. Rahman, and N. Kagan, "Restoration in distribution systems to reduce financial losses related to process trips," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 219-227, Jan. 2017.
- [10] D. P. Bernardon, et al., "Smart grid concepts applied to self-healing in distribution system," in *Proc. 49th Int. Universities, Power Engineering Conf. UPEC'14*, 6 pp., Cluj-Napoca, Romania, 2-5 Sept. 2014.
- [11] M. Elkhatib, M. Ahmed, R. Elshatshat, M. Salama, and K. B. Shaban, "Distribution system restoration based on cooperative multi-agent approach," in *Proc. Int. Symp. on Smart Electric Distribution Systems and Technologies, EDST'15*, pp. 42-46, Vienna, Austria, 8-11 Sept. 2015.
- [12] T. Nagata and K. Okamoto, "A decentralized distribution power system restoration by using multi-agent approach," in *Proc. Int. Electrical Engineering Congress, IEECON'14*, 4 pp., Chonburi, Thailand, 19-21 Mar. 2014.
- [13] A. Zidan and E. F. El-Saadany, "A cooperative multiagent framework for self-healing mechanisms in distribution systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1525-1539, Sept. 2012.
- [14] T. T. Borges, S. Carneiro, P. A. N. Garcia, and J. L. R. Pereira, "A new OPF based distribution system restoration method," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 80, pp. 297-305, , Sept. 2016.
- [15] M. H. Camillo, R. Z. Fanucchi, M. E. Romero, T. W. de Lima, A. da Silva Soares, A. C. B. Delbem, L. T. Marques, C. D. Maciel, and J. B. A. London, "Combining exhaustive search and multi-objective evolutionary algorithm for service restoration in large-scale distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 134, pp. 1-8, May. 2016.
- [16] J. C. Lopez, J. F. Franco, M. J. Rider, and R. Romero, "Optimal restoration/maintenance switching sequence of unbalanced three-phase distribution systems," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6058-6068, Nov. 2018.
- [17] L. T. Marques, A. C. Delbem, and J. B. London, "Service restoration with prioritization of customers and switches and determination of switching sequence," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2359 - 2370, May 2018.