

## ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع فعال با استفاده از الگوریتم کلاس‌بندی نقاط بار شبکه

آرمان امینی بدر<sup>۱</sup>، نوید تقی‌زادگان کلاتری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

a.amini@azaruniv.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

taghizadegan@azaruni.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، مدلی برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع فعال ارائه شده است. با استفاده از الگوریتم کلاس‌بندی پیشنهادی و با در نظر گرفتن امکان بهره‌برداری جزیره‌ای شبکه توزیع در اثر وجود مولدهای محلی برق و ریزشبکه‌ها، قابلیت اطمینان سیستم مورد تحلیل قرار گرفته است. با ترکیب الگوریتم کلاس‌بندی شبکه و انجام بارزدایی بهینه با هدف حداقل کردن هزینه خاموشی مشترکان، ضمن یافتن ضریب وزنی هزینه نقاط بار موجود، شبکه توزیع توسط کلیدهای قدرت به نواحی مختلف تقسیم شده و با محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان، بهبود این شاخص‌ها نشان داده شده است. این روش برای تحلیل قابلیت اطمینان شبکه‌هایی با فیدرهای چندگانه مناسب بوده و توأم با افزایش سرعت محاسبات، امکان بررسی تأثیر ظرفیت و مکان مولدهای محلی را فراهم می‌سازد.

**واژه‌های کلیدی:** قابلیت اطمینان، واحدهای تولید پراکنده، شبکه توزیع فعال، بارزدایی بهینه.

## ۱. مقدمه

هدف اصلی در سیستم‌های قدرت مدرن، فراهم کردن توان الکتریکی برای مشترکین با کمترین هزینه ممکن و سطح مطلوبی از قابلیت اطمینان است. امروزه سیستم‌های تولید پراکنده و فناوری‌های ذخیره‌کننده انرژی، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد سیستم قدرت دارند. این واحدهای تولیدی با توجه به ظرفیتشان بیشتر در شبکه‌های فشار ضعیف و توزیع، نصب و بهره‌برداری می‌شوند. واحدهای تولید پراکنده موضوع اصلی برخی مراجع [۱-۵] است و به‌طور عمده به‌عنوان وسیله‌ای برای افزایش قابلیت اطمینان محلی در نظر گرفته می‌شوند. مرجع [۱] انتخاب بهینه ترکیب سیستم‌های تولید پراکنده را در شبکه قدرت با در نظر گرفتن عواملی همچون آلاینده‌های محیط زیست، هزینه قطع برق در صنایع مختلف، میزان قابلیت اطمینان لازم و هزینه اولیه بررسی می‌کند. ابتدا مقادیر پارامترهای مختلف انواع سیستم‌های تولید پراکنده بیان می‌شود. سپس تابع هدف با سه عنصر هزینه اصلی واحد، هزینه نگهداری و بهره‌برداری و هزینه قطع برق تشکیل می‌شود و با اعمال قیود، ترکیب بهینه واحدها برای رسیدن به قابلیت اطمینان مورد نظر به دست می‌آید. مکان‌یابی خازن در شبکه توزیع و در حضور منابع تولید پراکنده با هدف کمینه کردن مجموع هزینه‌های تلفات انرژی، هزینه نصب خازن و هزینه نصب مولد پراکنده برق در مرجع [۳] انجام شده است. با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری در یک فیدر از یک شهرک صنعتی، در مرجع [۴] مکان، زمان و ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم ژنتیک محاسبه شده است.

مرجع [۶] مسئله مکان‌یابی کلیدها را در سیستم‌های شعاعی دارای واحدهای تولید پراکنده به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان مطرح می‌کند. روش‌های مدل‌سازی واحدهای تولید پراکنده در نرم‌افزارهای محاسبه قابلیت اطمینان و مزایا و معایب آن‌ها در مرجع [۷] بیان می‌شود. در مرجع [۸] یک مدل مارکوف<sup>۱</sup> شش‌حالتی برای ارزیابی قابلیت اطمینان در شبکه‌های توزیع دارای واحدهای تولید پراکنده ارائه شده است. این مدل فقط برای یک واحد تولیدی طراحی شده است. روشی برای جستجوی کوتاه‌ترین مسیر بین دو گره از سیستم توزیع در مراجع [۹ و ۱۰] ارائه شده است. دسته‌بندی گره‌ها با در نظر گرفتن بخش‌های حاصل از تجهیزات حفاظتی ایجاد می‌شوند. با وجود این، مرجع [۱۰]، شبکه توزیع فعال شامل منابع تولید پراکنده را در نظر نگرفته است. بهینه‌سازی هم‌زمان مکان کلیدها و منابع با استفاده از الگوریتم ترکیبی کلونی مورچگان و تحلیل سلسله‌مراتبی در

مرجع [۱۱] انجام شده و تابع هدف به‌صورت ترکیبی از شاخص‌های قابلیت اطمینان، تلفات شبکه و پروفیل ولتاژ در نظر گرفته شده است. با این حال در مرجع [۱۱] تأثیر کلیدهای مانور در نظر گرفته نشده‌اند. شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع برای تخمین قابلیت اطمینان ریزشکده‌ها<sup>۲</sup> نیز به کار می‌روند [۱۲-۱۶]. مرجع [۱۷] شاخص‌های جدیدی را برای ارزیابی قابلیت اطمینان ریزشکده معرفی کرده است. در مرجع [۱۲] ماتریس ارتباط برای محاسبه قابلیت اطمینان مشترکین در ریزشکده و سیستم توزیع استفاده شده است و برای بررسی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع فعال در مرجع [۱۴] ریزشکده‌ها به‌صورت نیروگاه‌های مجازی مدل شده‌اند.

مراجع [۱۸-۲۲] حذف بار را در شبکه‌های توزیع فعال و ریزشکده‌ها بررسی می‌کنند. مرجع [۱۸] روشی را برای حذف بار دینامیک بهینه در یک ریزشکده جزیره‌ای با در نظر گرفتن محدودیت تولید معرفی می‌کند. هدف این روش، حداکثر کردن عملکرد اقتصادی ریزشکده است. در مرجع [۲۰] بهبود قابلیت اطمینان سیستم توزیع با استفاده از واحدهای ذخیره‌کننده انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این مقاله تعیین ترکیب بهینه واحدهای ذخیره‌کننده انرژی و میزان حذف بار است. بهینه‌سازی غیرخطی چندهدفی برای تعیین میزان حذف بار در ریزشکده در مرجع [۲۱] ارائه شده است. مرجع [۲۲] در یک شبکه هوشمند با ریزشکده‌های چندگانه، ارزیابی قابلیت اطمینان را توأم با معرفی روشی برای حذف بار و کاهش بار ارائه کرده است.

در این مقاله به‌منظور بهبود در جستجوی حالت‌های خرابی و بررسی تأثیر آن‌ها از الگوریتمی استفاده می‌شود که بر روش ارزیابی مُد خرابی و اثر آن<sup>۳</sup> (FMEA) مبتنی است. هنگام وقوع خرابی، بخشی از فیدر که تحت تأثیر این خرابی است، باید ایزوله شود، بنابراین بارهای الکتریکی موجود در این بخش باید خاموش شوند. فیدر با توجه به مکان کلیدهای جداکننده، کلیدهای وصل‌کننده و تولیدات پراکنده به بخش‌های مختلف تقسیم می‌شود. به این ترتیب بارها در بخش‌های مختلف قرار می‌گیرند. نواحی مختلف نقاط بار از لحاظ کلاس‌بندی با توجه به توپولوژی شبکه و با استفاده از نتایج حاصل از نقشه درختی شبکه حاصل می‌شوند و در بخش‌هایی که امکان تغذیه توسط مولدهای محلی و کلیدهای اتصال‌دهنده سایر فیدرها وجود دارد، با استفاده از روش بارزدایی بهینه، نقاط بار قابل تغذیه مشخص شده و در نهایت شاخص‌های قابلیت اطمینان محاسبه می‌شوند.

2. Microgrids

3. Failure Mode and Effect Analysis

1. Markov

## ۲. قابلیت اطمینان شبکه توزیع و واحدهای تولید پراکنده

## برق

بیش از ۷۰٪ عدم دسترسی به توان الکتریکی در مصرف‌کننده‌ها ناشی از شبکه توزیع است. با توجه به نوع مصرف‌کننده‌ها از لحاظ اقتصادی، این مصرف‌کننده‌ها به درجات مختلفی از قابلیت اطمینان نیاز دارند. برای مثال هزینه قطع برق برای صنایع مخابرات سلولی و صنایع هوایی به ترتیب برابر  $41000 \text{ \$/h}$  و  $90000 \text{ \$/h}$  است [۱]. با استفاده از واحدهای تولید پراکنده می‌توان قابلیت اطمینان را در ناحیه‌های مورد نظر افزایش داد. می‌توان گفت دلیل اصلی استفاده از این واحدها، نزدیک بودن تولیدات پراکنده برق به مصرف‌کننده است که باعث کاهش چشمگیری در هزینه‌های اولیه شبکه انتقال و توزیع می‌شود. با وجود این، هزینه این واحدها نسبت به نیروگاه‌های رایج بیشتر است [۲۳]. از طرفی، سهولت در نصب و راه‌اندازی این واحدها و رعایت بیشتر مسائل زیست‌محیطی از جمله مزایای این واحدها هستند. مسئله مورد توجه بعدی نحوه کاربرد منابع تولید پراکنده برق است. از دیدگاه کیفی، این واحدها به منظور بهبود قابلیت اطمینان و ولتاژ شبکه و از منظر کمی با هدف افزایش ظرفیت الکتریکی استفاده می‌شوند. از سویی، واحدهای تولید پراکنده را می‌توان به صورت موازی با شبکه یا پشتیبان‌کننده شبکه مورد بهره‌برداری قرار داد. در حالت پشتیبان، تولیدات پراکنده چه به صورت منبع اصلی و چه اضطراری، تنها باعث بهبود در شاخص‌های مربوط به مدت خاموشی می‌شود و هر خرابی در منبع اصلی ایجاد خاموشی خواهد کرد؛ هرچند مدت زمان خاموشی می‌تواند کمتر باشد. در حالت موازی، واحد تولید پراکنده چه به صورت منبع اصلی و چه اضطراری، هر دو دسته شاخص‌های مربوط به مدت خاموشی و تعداد خاموشی را بهبود خواهد داد. خاموشی زمانی رخ خواهد داد که هر دو منبع خراب شوند. با توجه به نوع واحدهای تولید پراکنده برق، وقفه ناشی از راه‌اندازی، ۷ ثانیه تا ۱۰ دقیقه طول می‌کشد. بدیهی است که هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری در حالت موازی بیشتر از حالت پشتیبان است. اگر در شبکه توزیع از منابع تولید پراکنده و منابع تغذیه بدون وقفه ( $UPS^1$ ) استفاده شود، حتی می‌توان نقاط بار حساس را بدون ایجاد هیچ‌گونه وقفه‌ای از لحاظ توان الکتریکی مورد بهره‌برداری قرار داد. در صورت بروز خرابی در سیستم ابتدا منبع تغذیه بدون وقفه تأمین بار را به عهده می‌گیرد و در صورت افزایش مدت‌زمان خرابی، واحدهای تولید پراکنده به‌عنوان پشتیبان عمل کرده و تغذیه بارهای الکتریکی را انجام می‌دهند.

## ۳. مدل‌سازی قابلیت اطمینان در شبکه توزیع

## ۱.۳. شاخص‌های قابلیت اطمینان

نتایج ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع در قالب شاخص‌های نقاط بار و کل سیستم ارائه می‌شود. سه شاخص قابلیت اطمینان نقاط بار، شاخص‌های اساسی قابلیت اطمینان در شبکه توزیع هستند: نرخ خرابی  $\lambda(f/yr)$ ، متوسط زمان خاموشی  $r(h)$  و متوسط زمان خرابی سالانه  $U(h/yr)$ . شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم که با استفاده از شاخص‌های نقاط بار محاسبه می‌شوند، عبارت‌اند از: (SAIFI) شاخص متوسط تعداد خاموشی‌های سیستم به‌ازای هر مشترک<sup>۱</sup>، (SAIDI) شاخص متوسط مدت خاموشی به‌ازای هر مشترک سیستم<sup>۲</sup>، (CAIDI) شاخص متوسط مدت خاموشی به‌ازای هر مشترک خاموش شده<sup>۳</sup>، (AENS) متوسط انرژی تأمین نشده مورد انتظار به‌ازای هر مشترک سیستم<sup>۴</sup>، (EENS) انرژی تأمین نشده و (ECOST) هزینه خاموشی‌ها.

## ۲.۳. فرض‌های اولیه مدل‌سازی و الگوریتم قابلیت اطمینان

این موارد را برای تحلیل شبکه در نظر می‌گیرند: ۱. استفاده از مدل دو حالتی (قطع/وصل) برای عناصر شبکه (مدل عادی/مدل تعمیر). ۲. تمام خرابی‌ها مستقل هستند. ۳. کلیدهای وصل‌کننده و منابع تولید پراکنده در شبکه وجود دارند. ظرفیت این کلیدها برابر  $0/66$  بارهای فیدر مربوط است. ۴. هر وسیله حفاظتی مانند کلید قدرت، فیوز و کلید جداکننده (دستی یا خودکار)، قابلیت جدا کردن خطا را دارند. ولی فقط دستگاه‌های حفاظتی اضافه جریان (فیوز و کلید قدرت) توانایی قطع جریان‌های ناشی از خرابی‌ها را دارند. ۵. خطا در سیستم شعاعی توسط نزدیک‌ترین دستگاه حفاظتی اضافه جریان در سمت منبع قطع می‌شود. ۶. خطا در سیستم شعاعی توسط نزدیک‌ترین دستگاه‌های حفاظتی موجود از بقیه نواحی جدا می‌شود.

قابلیت اطمینان سیستم توزیع با توجه به قابلیت دسترسی و کیفیت توان الکتریکی برای هر مصرف‌کننده ارزیابی می‌شود. روش ارزیابی قابلیت اطمینان باید توانایی مدل کردن مشخصه‌های خاص سیستم‌های توزیع را به‌طور دقیق دارا باشد. در دهه‌های گذشته، چندین روش برای تعیین قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع ارائه شده است. روش‌هایی که به‌طور کلی در دو دسته تحلیلی و شبیه‌سازی قرار می‌گیرند. روش تحلیلی به دو دسته مدل‌سازی شبکه و مدل‌سازی

2. System Average Interruption Frequency Index

3. System Average Interruption Duration Index

4. Customer Average Interruption Duration Index

5. Average Energy Not Supplied

1. Uninterruptible power supply

## ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع فعال با استفاده از الگوریتم کلاس‌بندی نقاط بار شبکه ۵

A قرار گرفته و گره‌ها و نقاط بار در پایین کلید قدرت در کلاس‌های B, C, D, E قرار می‌گیرند. بعد از بخش‌بندی سیستم به وسیله کلیدهای قدرت، باید بخش‌های مختلف ناشی از کلیدهای جداکننده را شناسایی کرد. با توجه به تعریف کلاس‌ها و زیربخش‌های ایجاد شده کلاس‌های B, C, D, E به‌طور مجزا شناسایی می‌شوند.

۱. برای مشخص کردن رابطه بین گره‌های شبکه، ماتریس بازتاب سیستم توزیع تشکیل می‌شود. این ماتریس رابطه بین تمام شاخه‌ها و گره‌های تشکیل‌دهنده شبکه را نشان می‌دهد. با استفاده از ماتریس بازتاب، نواحی پایین‌دست و بالادست هر گره شبکه مشخص می‌شود.  
۲. برای بخش‌بندی سیستم، ماتریس بازتاب در سه حالت، بدون شاخه‌های دارای کلید قدرت، بدون شاخه‌های دارای فیوزها و بدون شاخه‌های دارای کلیدهای جداکننده تشکیل می‌شود. با استفاده از این ماتریس‌ها مؤلفه‌های همبند که همان بخش‌های مجزا هستند به دست می‌آیند. مؤلفه‌های موجود در هر یک از این بخش‌ها در شرایط مختلف سیستم که ناشی از وقوع خرابی‌ها در سیستم است، پاسخ یکسانی دارند.

۳. با استفاده از تعاریف مبتنی بر روابط منطقی کلاس‌های A تا E، به‌طور مستقیم کلاس‌های A تا E تشکیل می‌شوند. نمودار جریانیه مربوط در شکل (۱) نشان داده شده است.

۴. به‌منظور بررسی نقاط بار و گره‌های موجود در کلاس‌های C و E و بررسی قیود الکتریکی شبکه، با حذف کردن نقاط بار موجود در کلاس D و با توجه به توپولوژی شبکه در سیستم معیوب، پخش بار با در نظر گرفتن روابط (۱) تا (۵) انجام می‌گیرد.

$$f(V) = 0 \quad (1)$$

$$V_k^{\min} < |V_k| < V_k^{\max} \quad (2)$$

$$P_{Gk}^{\min} \leq P_{Gk} \leq P_{Gk}^{\max} \quad (3)$$

$$Q_{Gk}^{\min} \leq Q_{Gk} \leq Q_{Gk}^{\max} \quad (4)$$

$$|I_k| \leq I_k^{\max} \quad (5)$$

$f(V)$ : معادلات پخش بار

$V_k, I_k$ : ولتاژ و جریان شین  $k$ ام

$P_{Gk}, Q_{Gk}$ : توان اکتیو و راکتیو تولیدی در شین  $k$ ام

اگر فقط یک ژنراتور در ناحیه جدا شده باشد، شین مرجع در نظر می‌گیرد. اگر بیش از یک واحد تولید برق وجود داشت، ژنراتور با بیشترین توان را شین مرجع گرفته و بقیه را به‌صورت شین‌های PQ قرار می‌دهند.

۵. در صورت عدم برقراری قیود باید با استفاده از بارزدایی

مارکوف تقسیم می‌شود [۲۴]. مدل‌سازی شبکه به‌علت سرعت بیشتر و نیاز کمتر به حافظه، بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. روش شبیه‌سازی تحلیلی به محاسبه سهم خطای هر مؤلفه شبکه بر خروج یا خاموشی نقاط بار مبتنی است [۲۵]. اگرچه تحلیل مد خرابی یا تحلیل کات‌ست [۲۶] در ساختارهای عمومی شبکه توزیع قابل اجراست و این روش قابلیت اطمینان نقاط بار را به‌صورت مستقیم تخمین می‌زند، ممکن است در سیستم‌های توزیع گسترده وقت‌گیر باشد.

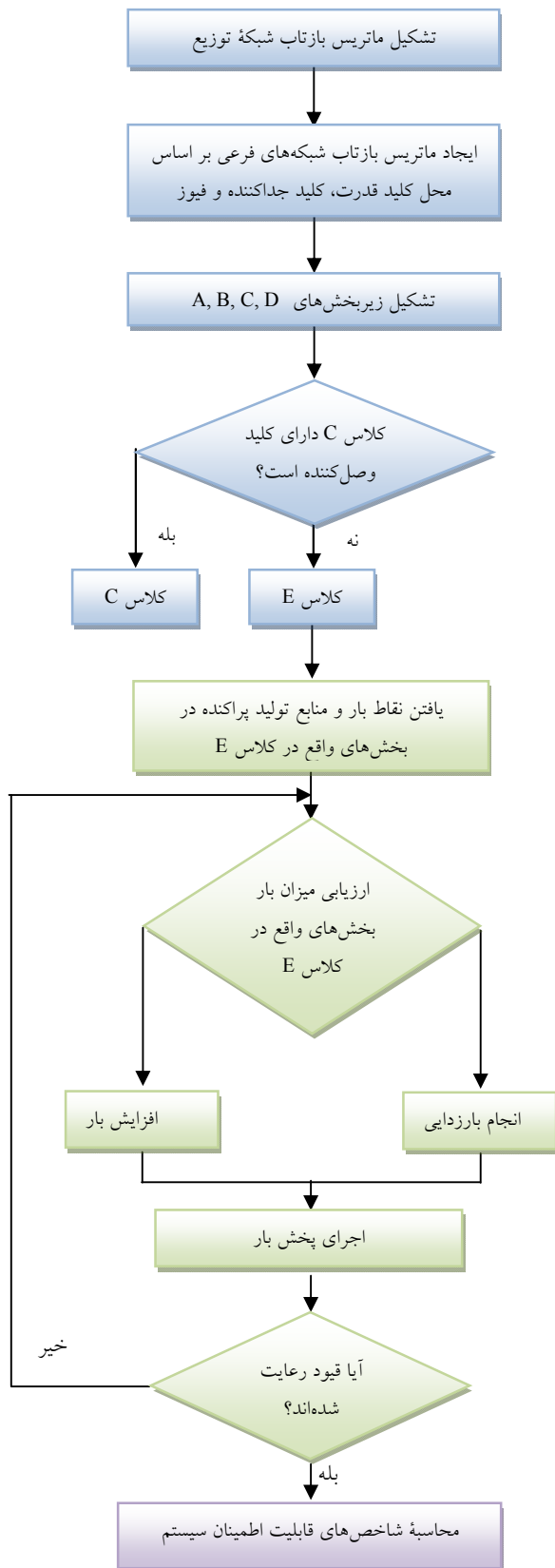
### ۳.۳. الگوریتم ارزیابی قابلیت اطمینان

سیستم توزیع شعاعی از مؤلفه‌های سری تشکیل شده است. اگر هر مؤلفه‌ای در قسمتی از فیدر دچار خرابی شود، باعث قطع آن فیدر خواهد شد، بنابراین باید عمل جداسازی انجام شود. در نقاط خروجی فیدرها، تجهیزات حفاظتی نصب می‌شود. به‌هنگام وقوع خطا ابتدا دستگاه حفاظتی عمل می‌کند؛ اگر خطا از نوع گذرا بود با استفاده از مکانیسم باز-بست خودکار، فیدر به حالت عادی برمی‌گردد، در غیر این صورت بخشی که دارای خرابی است، جدا شده و بخش‌های دیگر بازیابی می‌شوند. به‌منظور بهبود در جستجوی حالت‌های خرابی و بررسی تأثیر آن‌ها از الگوریتمی استفاده می‌شود که بر روش ارزیابی مد خرابی و اثر آن مبتنی است. هنگام وقوع خرابی، بخشی از فیدر که تحت تأثیر این خرابی است، باید جدا شود، بنابراین بارهای موجود در این بخش باید خاموش یا قطع شوند. فیدر با استفاده از کلیدهای جداکننده به بخش‌های مختلف تقسیم می‌شود. به این ترتیب بارها در بخش‌های مختلف قرار می‌گیرند. بخش بعدی نحوه کلاس‌بندی نقاط بار را در خرابی‌های مختلف سیستم توصیف می‌کند.

### ۴.۳. کلاس‌بندی

یک سیستم را که دچار خرابی است می‌توان در ۵ دسته یا کلاس قرار داد. با توجه به بخش‌های مختلف شبکه، ۵ دسته عبارت‌اند از: A) نقاط باری که دچار هیچ وقفه‌ای نشده‌اند. B) نقاط باری که به‌مدت کلیدزنی دچار وقفه شده‌اند ولی سپس از طریق منبع اصلی تغذیه می‌شوند. C) نقاط باری که به مدت‌زمان کلیدزنی کلیدهای جداکننده وصل‌کننده انتهای فیدرها دچار وقفه شده‌اند و با ایجاد تغییر شکل در شبکه تغذیه می‌شوند. D) نقاط باری که به‌اندازه زمان تعمیر خرابی دچار وقفه شده و از منبع جدا می‌شوند. E) نقاط باری که به‌اندازه زمان کلیدزنی یا راه‌اندازی منبع پشتیبان - تولیدات پراکنده - دچار وقفه می‌شوند.

با وقوع خرابی در یک خط، اولین کلید قدرت یا فیوز در بالادست با استفاده از الگوریتم‌های جستجوی درخت تعیین می‌شود. گره‌ها و نقاط بار موجود در بالای کلید قدرت و نیز فیدرهای دیگر در کلاس



شکل (۱): نمودار جریانی کلاس‌بندی نقاط بار شبکه توزیع

۴-۵. اگر قید مربوط به اضافه جریان شاخه‌ای از شبکه شعاعی رعایت نشود، در این صورت حذف بار ابتدا در ناحیه‌ای انجام می‌شود که این ناحیه در پایین دست شاخه مذکور قرار گرفته باشد. همچنین

تعدادی از نقاط بار را در کلاس‌های C و E حذف کرده و در کلاس D قرار داد.

هدف از بارزدایی بهینه در این مقاله، حداقل کردن هزینه قطع نقاط بار است. هنگام وقوع خرابی در سیستم، اگر سیستم شامل  $M$  بخش باشد که نیاز به بارزدایی دارند، تعداد کل حالت‌ها  $2^{M-1}$  خواهد شد. به منظور اولویت دادن به بخش‌های مختلف، از ضریب وزنی تقدم استفاده می‌کنیم. این ضریب تابعی است از هزینه خاموشی نقاط بار در مدت زمان  $r$  و میزان بار مصرف‌کننده:

$$PWF_{ij} = \sum_{k=1}^N L_k c_k(r_i) \quad (6)$$

$k$  بیانگر نقطه بار  $k$  ام،  $N$  تعداد بارهای موجود در بخش  $j$  ام،  $L_k$  میزان بار نقطه بار  $k$  و  $C_k(r_i)$  هزینه وقفه مصرف‌کننده برای مدت زمان  $r_i$  است.

با داشتن نوع بارها (بار خانگی، بار صنعتی و...)، هزینه خاموشی هر کدام از بارها به دست می‌آید و با در نظر گرفتن کمترین هزینه تحمیلی به شبکه و مصرف‌کننده‌ها، نقاط بار مناسب برای قطع از شبکه مشخص می‌شوند [۲۷]. فرایند طی شده برای تعیین مجموعه بهینه‌ای از بخش‌ها برای بارزدایی چنین است:

۱-۵. با در نظر گرفتن خرابی یکی از مؤلفه‌های سیستم و تعیین ناحیه جداشده از شبکه توزیع، ابتدا تمام کلیدهای بسته موجود در این ناحیه مشخص شده و مقدار بار در ناحیه پایین دست هر کلید تعیین می‌شود.

۲-۵. با توجه به نوع بارها و زمان وقفه ناشی از خرابی عنصر تعیین شده در مرحله قبل، ضریب وزنی تقدم هر بخش با توجه به مدت زمان خاموشی ( $r$ ) برای یک پیشامد مشخص محاسبه می‌شود. کل بار و مجموع ضریب وزنی تقدم به‌ازای ترکیب‌های مختلف بخش‌های تشکیل‌دهنده ناحیه مورد نظر، در یک مجموعه قرار می‌گیرند.

۳-۵. با استفاده از روش یکایک شماری، ساختار شبکه به‌ازای حالت‌های مختلف کلیدهای قدرت، کلیدهای جداکننده و کلیدهای وصل‌کننده انتهای فیدرها تعیین می‌شود. قابل توجه اینکه بعضی از بخش‌ها در پایین دست بخش‌های دیگر قرار گرفته‌اند؛ بنابراین حالت‌هایی را که در آن‌ها چنین موردی رخ می‌دهد باید حذف کرد. ترکیب‌هایی که در آن‌ها کل بار، کوچک‌تر از میزان کمبود تولید توان الکتریکی باشد از لیست حذف می‌شوند. باقی اعضای مجموعه وارد مرحله ۴ می‌شوند.

## ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع فعال با استفاده از الگوریتم کلاس‌بندی نقاط بار شبکه ۷

کلاس‌ها مشخص شده است. با توجه به مقادیر موجود در ستون مربوط به کلاس C و E، مشاهده می‌شود که کمترین احتمال متعلق به نقطه بار هجدهم است و احتمال قرار گرفتن نقاط بار ۶، ۷، ۱۶، ۱۷، ۳۷ و ۳۸ در کلاس‌های C و E بیش از سایر نقاط بار است. قابل توجه اینکه این نقاط بار هرگز در کلاس B قرار نمی‌گیرند. در واقع این نقاط بار مکان‌های مناسبی برای نصب واحدهای تولید پراکنده برق هستند. همچنین پس از نقطه بارهای اشاره‌شده فوق، می‌توان نقاط بار شماره ۴، ۵، ۲۴ و ۲۵ را مد نظر قرار داد.

جدول (۱): کلاس‌بندی نقاط بار سیستم توزیع دارای ۳۸ نقطه بار

نقاط بار	A	B	C, E	D
۱	٪ ۹۰/۷۴	٪ ۳/۷۰	٪ ۲/۷۸	٪ ۲/۷۸
۲	٪ ۹۰/۷۴	٪ ۲/۷۸	٪ ۳/۷۰	٪ ۲/۷۸
۳	٪ ۹۰/۷۴	٪ ۱/۸۵	٪ ۴/۶۳	٪ ۲/۷۸
۴	٪ ۹۰/۷۴	٪ ۰/۹۲	٪ ۵/۵۵	٪ ۲/۷۸
۵	٪ ۹۰/۷۴	٪ ۰/۹۲	٪ ۵/۵۵	٪ ۲/۷۸
۶	٪ ۹۰/۷۴	۰	٪ ۶/۴۸	٪ ۲/۷۸
۷	٪ ۹۰/۷۴	۰	٪ ۶/۴۸	٪ ۲/۷۸
۸	٪ ۹۳/۵۲	٪ ۱/۸۵	٪ ۲/۷۸	٪ ۱/۸۵
۹	٪ ۹۳/۵۲	٪ ۰/۹۲	٪ ۳/۷۰	٪ ۱/۸۵
۱۰	٪ ۹۳/۵۲	۰	٪ ۴/۶۳	٪ ۱/۸۵
۱۱	٪ ۹۰/۷۴	٪ ۳/۷۰	٪ ۲/۷۸	٪ ۲/۷۸
۱۲	٪ ۹۰/۷۴	٪ ۲/۷۸	٪ ۳/۷۰	٪ ۲/۷۸
۱۳	٪ ۹۰/۷۴	٪ ۱/۸۵	٪ ۴/۶۳	٪ ۲/۷۸
۱۴	٪ ۹۰/۷۴	٪ ۱/۸۵	٪ ۴/۶۳	٪ ۲/۷۸
۱۵	٪ ۹۰/۷۴	٪ ۰/۹۲	٪ ۵/۵۵	٪ ۲/۷۸
۱۶	٪ ۹۰/۷۴	۰	٪ ۶/۴۸	٪ ۲/۷۸
۱۷	٪ ۹۰/۷۴	۰	٪ ۶/۴۸	٪ ۲/۷۸
۱۸	٪ ۹۱/۶۷	٪ ۳/۷۰	٪ ۱/۸۵	٪ ۲/۷۸
۱۹	٪ ۹۱/۶۷	٪ ۲/۷۸	٪ ۲/۷۸	٪ ۲/۷۸
۲۰	٪ ۹۱/۶۷	٪ ۲/۷۸	٪ ۲/۷۸	٪ ۲/۷۸
۲۱	٪ ۹۱/۶۷	٪ ۱/۸۵	٪ ۳/۷۰	٪ ۲/۷۸
۲۲	٪ ۹۱/۶۷	٪ ۱/۸۵	٪ ۳/۷۰	٪ ۲/۷۸
۲۳	٪ ۹۱/۶۷	٪ ۰/۹۲	٪ ۴/۶۳	٪ ۲/۷۸
۲۴	٪ ۹۱/۶۷	۰	٪ ۵/۵۵	٪ ۲/۷۸
۲۵	٪ ۹۱/۶۷	۰	٪ ۵/۵۵	٪ ۲/۷۸
۲۶	٪ ۹۴/۴۴	٪ ۱/۸۵	٪ ۱/۸۵	٪ ۱/۸۵
۲۷	٪ ۹۴/۴۴	٪ ۰/۹۲	٪ ۲/۷۸	٪ ۱/۸۵
۲۸	٪ ۹۴/۴۴	۰	٪ ۳/۷۰	٪ ۱/۸۵
۲۹	٪ ۹۳/۵۲	٪ ۱/۸۵	٪ ۲/۷۸	٪ ۱/۸۵
۳۰	٪ ۹۳/۵۲	٪ ۰/۹۲	٪ ۳/۷۰	٪ ۱/۸۵
۳۱	٪ ۹۳/۵۲	۰	٪ ۴/۶۳	٪ ۱/۸۵
۳۲	٪ ۹۰/۷۴	٪ ۳/۷۰	٪ ۲/۷۸	٪ ۲/۷۸
۳۳	٪ ۹۰/۷۴	٪ ۲/۷۸	٪ ۳/۷۰	٪ ۲/۷۸
۳۴	٪ ۹۰/۷۴	٪ ۱/۸۵	٪ ۴/۶۳	٪ ۲/۷۸
۳۵	٪ ۹۰/۷۴	٪ ۱/۸۵	٪ ۴/۶۳	٪ ۲/۷۸
۳۶	٪ ۹۰/۷۴	٪ ۰/۹۲	٪ ۵/۵۵	٪ ۲/۷۸
۳۷	٪ ۹۰/۷۴	۰	٪ ۶/۴۸	٪ ۲/۷۸
۳۸	٪ ۹۰/۷۴	۰	٪ ۶/۴۸	٪ ۲/۷۸

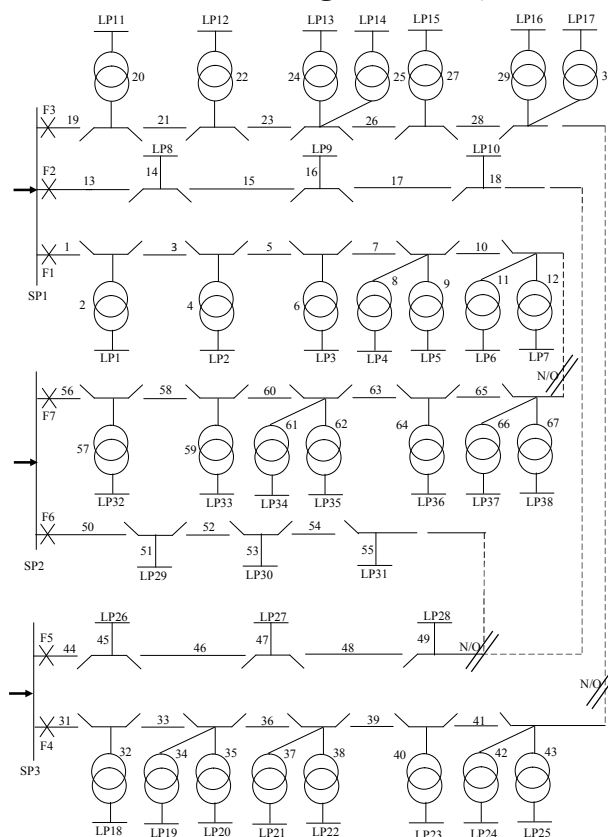
اضافه کردن بار در نواحی ای صورت می‌گیرد که شامل شاخه‌های دارای اضافه جریان و نواحی پایین دست آن‌ها نباشد.

۵.۵. به منظور بارزدایی از میان اعضای موجود در این مرحله، حالتی که کمترین ضریب وزنی تقدم یا به عبارتی کمترین هزینه خاموشی را داشته باشد، انتخاب می‌شود. در نتیجه با قطع بخشی از بارهای سیستم، ضمن رعایت قید مربوط به حدود بار مجاز سیستم، حداقل هزینه وقفه به سیستم تحمیل می‌شود.

۶. بعد از اتمام مرحله بارزدایی و تعیین نقاط باری که توسط مولد پراکنده برق تغذیه می‌شوند، اطلاعات به منظور محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان به بخش محاسبه قابلیت اطمینان ارسال می‌شوند.

### ۴. بررسی موردی

برای بررسی الگوریتم، شین چهارم سیستم نمونه RBTS انتخاب شده است [۲۸ و ۲۹]. سیستم نمونه شبکه توزیع که به شین ۴ وصل شده با اوج بار ۴۰ MW دارای ۳۸ نقطه بار و تعداد مشترکین برابر با ۴۷۷۹ است. این سیستم نمونه شبکه توزیع در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): شین ۴ سیستم توزیع مدل RBTS [۲۸ و ۲۹]

با استفاده از الگوریتم توصیف‌شده، سیستم مورد نظر کلاس‌بندی می‌شود. نتیجه این کلاس‌بندی در جدول (۱) ارائه شده است. کلاس‌بندی ۳۸ نقطه بار سیستم توزیع، به صورت درصدی از کل

در جدول (۲)، سه شاخص اصلی محاسبه شده برای نقاط بار در حالتی که واحدهای تولید پراکنده برق در سیستم وجود ندارند، نشان داده شده است.

جدول (۲): شاخص‌های قابلیت اطمینان نقاط بار برای سیستم توزیع متصل به شین ۴ سیستم RBTS

نقاط بار	$\lambda(f/yr)$	$r(h)$	$U(h/yr)$
۱	۰/۲۹۸۵	۱۱/۵۵	۳/۴۴
۲	۰/۳۰۸۲	۱۱/۳۲	۳/۴۹
۳	۰/۲۹۸۵	۱۱/۵۳	۳/۵
۴	۰/۳۱۱۵	۱۱/۲۵	۳/۴۹
۵	۰/۳۰۸۲	۱۱/۳۲	۳/۵۰
۶	۰/۳۱۱۵	۱۱/۲۵	۳/۵۰
۷	۰/۳۰۸۲	۱۱/۳۲	۳/۴۹
۸	۰/۱۸۶	۱/۸۴	۰/۳۴
۹	۰/۱۹۶	۱/۹۹	۰/۳۹
۱۰	۰/۱۹۹	۲/۰۵	۰/۴۱
۱۱	۰/۳۰۱۷	۱۱/۵۹	۳/۵۰
۱۲	۰/۲۹۸۵	۱۱/۶۶	۳/۴۸
۱۳	۰/۲۹۸۵	۱۱/۶۵	۳/۴۸
۱۴	۰/۲۸۸۷	۱۱/۸۸	۳/۴۳
۱۵	۰/۲۹۸۵	۱۱/۶۵	۳/۴۸
۱۶	۰/۲۹۸۵	۱۱/۶۵	۳/۴۸
۱۷	۰/۲۸۸۷	۱۱/۸۸	۳/۴۳
۱۸	۰/۳۱۴۷	۱۱/۱۰	۳/۵۰
۱۹	۰/۳۰۵	۱۱/۳	۳/۴۷
۲۰	۰/۳۱۴۷	۱۱/۱۱	۳/۴۹
۲۱	۰/۳۱۴۷	۱۱/۱۱	۳/۴۹
۲۲	۰/۳۰۵	۱۱/۳	۳/۴۵
۲۳	۰/۳۱۴۷	۱۱/۱۲	۳/۵۰
۲۴	۰/۳۱۴۷	۱۱/۱۲	۳/۵۰
۲۵	۰/۳۰۵	۱۱/۳	۳/۴۵
۲۶	۰/۱۹۲۵	۲/۰۲	۰/۳۹
۲۷	۰/۱۹۵۷	۲/۰۷	۰/۴۰
۲۸	۰/۱۸۲۷	۱/۸۵	۰/۳۹
۲۹	۰/۱۹۵۷	۱/۸	۰/۳۵
۳۰	۰/۲۰۵۵	۱/۹۵	۰/۴۰
۳۱	۰/۱۹۵۷	۱/۸	۰/۳۵
۳۲	۰/۳۰۵	۱۱/۴۷	۳/۵۰
۳۳	۰/۳۰۵	۱۱/۴۷	۳/۵۰
۳۴	۰/۲۹۲	۱۱/۷۶	۳/۴۳
۳۵	۰/۳۰۵	۱۱/۴۷	۳/۵۰
۳۶	۰/۲۹۲	۱۱/۷۶	۳/۴۳
۳۷	۰/۳۰۵	۱۱/۴۷	۳/۵۰
۳۸	۰/۲۹۲	۱۱/۷۶	۳/۴۳

در ادامه، الگوریتم مورد نظر برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم در حالت‌های مختلف به کاررفته و تغییرات شاخص‌های SAIFI، SAIDI، AENS و ASAI در جدول (۳) نشان داده شده‌اند. واضح است که اگر مولدهای تولید پراکنده تأثیری بر تعداد وقفه‌های سیستم نداشته باشند، شاخص SAIFI تغییر نخواهد کرد. حالت‌های مورد نظر برای سیستم توزیع متصل به شین ۴ سیستم RBTS عبارت‌اند از:

- سیستم بدون واحدهای تولید پراکنده برق؛
- پنج واحد تولید پراکنده با ظرفیت ۱۰۰۰ kW در ابتدای نقاط بار ۶، ۱۶، ۲۵، ۳۱ و ۳۷.
- پنج واحد تولید پراکنده با ظرفیت ۵۰۰۰ kW در ابتدای نقاط بار ۶، ۱۶، ۲۵، ۳۱ و ۳۷.
- همان حالت دوم با این فرض که واحد تولید پراکنده بدون وقفه قادر به تغذیه بار است.
- همان حالت سوم با این فرض که واحد تولید پراکنده بدون وقفه قادر به تغذیه بار است.

جدول (۳): شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم برای سیستم توزیع متصل به شین ۴ سیستم RBTS در حالت‌های ۱ تا ۵

حالت	SAIFI	SAIDI	AENS	EENS
۱	۰/۳۸۳۳	۳/۵۶۰۵	۱۱/۸۲۸۵	۵۶/۵۲۸
۲	۰/۳۸۳۳	۳/۵۴۹۸	۱۱/۸۰۱۷	۵۶/۴
۳	۰/۳۸۳۳	۳/۵۴۸۹	۱۱/۷۹۷۸	۵۶/۳۸
۴	۰/۳۸۰۹	۳/۵۴۷۴	۱۱/۷۷۰۷	۵۶/۲۵۲
۵	۰/۳۳۹۸	۳/۵۰۵۴	۱۱/۵۹۶۸	۵۵/۴۲۱

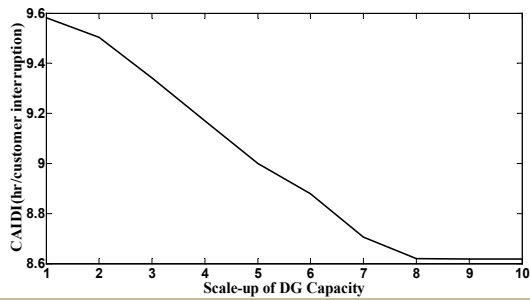
تغییرات شاخص‌های SAIDI، SAIFI، CAIDI و EENS در ECOST و ۱۰ مرحله، برای حالتی که هیچ مولدی وجود ندارد و همچنین تغییر ظرفیت مولدهای برق از ۱۰۰۰ kW تا ۵۰۰۰ kW در شکل‌های (۳) تا (۶) نشان داده شده‌اند. شکل‌ها بیانگر دو نکته هستند: اولاً با توجه به ساختار سیستم و مقدار بار موجود در آن، اگر ظرفیت مولدهای محلی بیش از ۴۰۰۰ kW باشد، شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم تغییر نمی‌کنند؛ ثانیاً شاخص‌های EENS و ECOST از گام اول تا دهم به ترتیب حدود ۱۳/۵٪ و ۱۲/۵٪ بهبود می‌یابند.

## ۵. نتیجه‌گیری

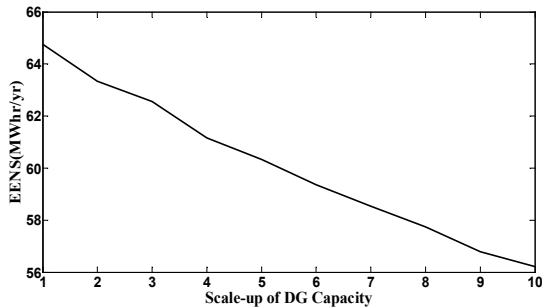
در این مقاله، آثار واحدهای تولید پراکنده بر قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که با افزایش تعداد این واحدها قابلیت اطمینان بهبود می‌یابد ولی بعد از مرحله‌ای، افزایش تعداد و ظرفیت واحدهای تولید پراکنده، تغییری در شاخص‌ها ایجاد نکرده و مقدار شاخص‌ها در یک حد ثابت باقی می‌ماند؛ که این امر به تعیین



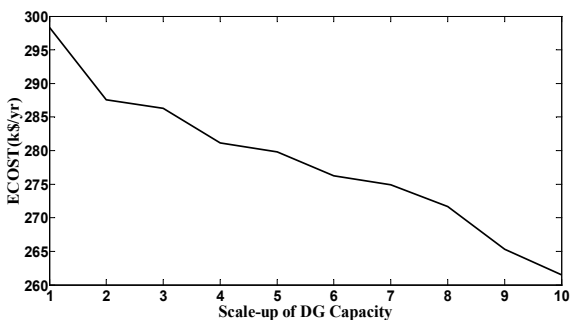
## ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع فعال با استفاده از الگوریتم کلاس‌بندی نقاط بار شبکه ۹



شکل (۴): تغییرات شاخص CAIDI برحسب ظرفیت واحدهای تولید پراکنده برق

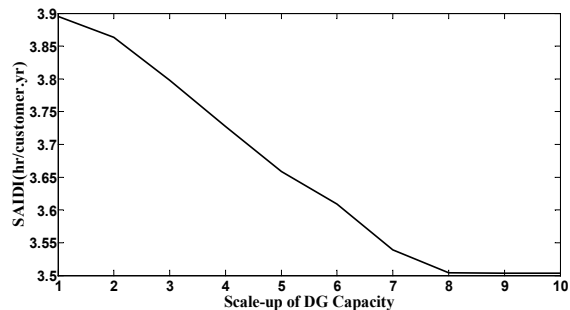


شکل (۵): تغییرات شاخص EENS برحسب ظرفیت واحدهای تولید پراکنده برق



شکل (۶): تغییرات شاخص ECOST برحسب ظرفیت واحدهای تولید پراکنده برق

ظرفیت بهینه این مولدها از دیدگاه قابلیت اطمینان کمک می‌کند. الگوریتم استفاده‌شده بر تئوری گراف و مشخصه‌های ساختاری شبکه توزیع مبتنی است. کلاس‌بندی گره‌ها که بر شناسایی بخش‌های کنترل‌شده توسط کلیدهای قدرت، کلیدهای جداکننده و وصل‌کننده مبتنی است باعث افزایش سرعت محاسبات می‌شود. همچنین با توجه به کلاس‌بندی شبکه توزیع می‌توان محدوده مطلوب برای نصب مولدهای پراکنده برق را مشخص کرد و نیز با بارزدایی بهینه، حداقل کردن هزینه قطع نقاط بار را تضمین کرد. کارایی این روش در سیستم آزمایش قابلیت اطمینان نشان داده شده است. با این الگوریتم می‌توان نقش ادوات مختلف سیستم را بررسی کرد. با شناسایی نقاط بار دارای اولویت و تغذیه این بارها توسط واحدهای تولید پراکنده، می‌توان قابلیت اطمینان را در ناحیه‌های مورد نظر افزایش داد.



شکل (۳): تغییرات شاخص SAIDI برحسب ظرفیت واحدهای تولید پراکنده برق

## مراجع

- [1] Pipattanasomporn, M., Willingham, M. and Rahman, S., "Implications of on-Site Distributed Generation for Commercial/Industrial Facilities", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 20, No. 1, pp. 206-212, 2005.
- [2] Carpinelli, G., Celli, G., Pilo, F. and Russo, A., "Distributed Generation Siting and Sizing under Uncertainty", in Proc. IEEE Porto Power Tech. Conf., Vol. 4, 2001.
- [3] شریعت‌خواه، محمدحسین، حقی‌فام، محمودرضا، افکوسی پاقلعه، محمد، «مکان‌یابی هم‌زمان منابع تولید پراکنده و خازن در شبکه‌های توزیع و تعیین آرایش بهینه آن»، مجله مهندسی و مدیریت انرژی، جلد ۱، شماره ۱، صفحه ۱۸-۱۱، ۱۳۹۰.
- [4] انصاری، میثم، ستایش‌نظر، مهرداد، «جایابی و تعیین بهینه ظرفیت واحدهای تولید هم‌زمان گازسوز جهت تأمین برق و حرارت در یک شهرک صنعتی»، مجله مهندسی و مدیریت انرژی، جلد ۱، شماره ۲، صفحه ۱۱-۲، ۱۳۹۱.
- [5] Dugan, R. C. and Price, S. K., "Issues for Distributed



- Generation in the U.S.*", in Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 1, pp. 121-126, 2002.
- [6] Mao, Y. and Miu, K. N., "Switch Placement to Improve System Reliability for Radial Distribution Systems with Distributed Generation", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 18, No. 4, pp. 1346-1352, Nov. 2003.
- [7] Brown, R. E. and Freeman, L. A. A., "Analyzing the Reliability Impact of Distributed Generation", IEEE Power Eng. Society Summer Meeting, Vol. 2, pp. 1013-1018, 2001.
- [8] Bae, I. S., Kim, J. O., Kim, J. C. and Singh, C., "Optimal Operating Strategy for Distributed Generation Considering Hourly Reliability Worth", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 19, No.1, pp. 287-292, Feb. 2004.
- [9] Xie, K., Zhou, J. and Billinton, R., "Reliability Evaluation Algorithm for Complex Medium Voltage Electrical Distribution Networks Based on the Shortest Path", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 150, No. 6, pp. 686-690, Nov. 2003.
- [10] Xie, K., Zhou, J., Billinton, R., "Fast Algorithm for The Reliability Evaluation of Large-scale Electrical Distribution Networks Using The Section Technique", IET Gen. Transm. Distrib., Vol. 2, No. 5, pp. 701-707, Sep. 2008.
- [۱۱] 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، جلد ۱، شماره ۱، صفحه ۲۸-۳۷، ۱۳۹۰.
- [12] Bae, I. S. and Kim, J. O., "Reliability Evaluation of Customers in a Microgrid", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 23, No. 3, pp. 1416-1422, Aug. 2008.
- [13] Khodayar, M. E. and Barati, M., "Integration of High Reliability Distribution System in Microgrid Operation", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 3, No. 4, pp. 1997-2006, Dec. 2012.
- [14] Bie, Z., Zhang, P., Li, G., Hua, B., Meehan, M. and Wang, X., "Reliability Evaluation of Active Distribution Systems Including Microgrids", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 27, No. 4, pp. 2342-2350, Nov. 2012.
- [15] Costa, P. M. and Matos, M. A., "Assessing the Contribution of Microgrids to the Reliability of Distribution Networks", Elect. Power Syst. Res., Vol. 79, No. 2, pp. 382-389, 2009.
- [16] Borges, C.L.T. and Cantarino, E., "Microgrids Reliability Evaluation with Renewable Distributed Generation and Storage Systems", 18th IFAC World Congress (IFAC'11), Milano (Italy) Aug. 28 – Sep. 2, 2011.
- [17] Wang, S., Li, Z., Wu, L., Shahidehpour, M. and Li, Z., "New Metrics for Assessing the Reliability and Economics of Microgrids in Distribution System", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 28, No. 3, pp. 2852-2861, Aug. 2013.
- [18] Gao, H., Chen, Y., Xu, Y. and Liu, C., "Dynamic Load Shedding for an Islanded Microgrid with Limited Generation Resources", IET Gen. Transm. Distrib., Vol. 10, No. 12, pp. 2953-2961, Aug. 2016.
- [19] Safdarian, A., Degefa, M. Z., Lehtonen, M. and Fotuhi-Firuzabad, M., "Distribution Network Reliability Improvements in Presence of Demand Response", IET Gen. Transm. Distrib., Vol. 8, No. 12, pp. 2027-2035, May 2014.
- [20] Awad, A.S.A., El-Fouly, T.H.M. and Salama, M.M.A., "Optimal ESS Allocation and Load Shedding for Improving Distribution System Reliability", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 5, No. 5, pp. 2339-2349, Sept. 2014.
- [21] Hong, Y., Hsiao, M., Chang, Y., Lee, Y. and Huang, H., "Multi-scenario Under Frequency Load Shedding in a Microgrid Consisting of Intermittent Renewables", IEEE Trans. Power Del., Vol. 28, No. 3, pp. 1610-1617, July 2013.
- [22] Conti, S., Nicolosi, R. and Rizzo, S. A., "Generalized Systematic Approach to Assess Distribution System Reliability with Renewable Distributed Generators and Microgrids", IEEE Trans. Power Del., Vol. 27, No. 1, pp. 261-270, Jan. 2012.
- [23] Willis, H. L. and Scott, W. G., *Distributed Power Generation: Planning and Evaluation*, 1<sup>st</sup> Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2000.
- [24] Brown, R. E., Gupta, S., Christie, R. D., Venkata, S. S. and Fletcher, R., "Distribution System Reliability Assessment Using Hierarchical Markov modeling", IEEE Trans. Power Del., Vol. 11, No. 4, pp. 1929-1934, Oct. 1996.
- [25] Kjolle, G. and Sand, K., "RELRAD-An Analytical Approach for Distribution System Reliability Assessment", IEEE Trans. Power Del., Vol. 7, No. 2, pp. 809-814, Apr. 1992.
- [26] Allan, R. N., Billinton, R. and De Oliveira, M. F., "An

- Efficient Algorithm for Deducing the Minimal Cuts and Reliability Indexes of a General Network Configuration*", IEEE Trans. Rel., Vol. R-5, No. 4, pp. 226-233, Oct. 1976.
- [27] Wang, P. and Billinton, R., "*Optimum Load-shedding Technique to Reduce the Total Customer Interruption Cost in a Distribution System*", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 147, No. 1, pp. 51-56, 2000.
- [28] Allan, R. N., Billinton, R., Sjarief, I., Goel, L. and So, K. S., "*A reliability test system for education purposes, basic distribution system data and results*", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 6, No. 2, pp. 813-820, May. 1991.
- [29] Billinton, R. and Jonnavithula, S., "*A test System for Teaching Overall Power System reliability Assessment*", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 11, No. 4, pp. 1670-1676, Nov. 1996.