

ارائه یک روش نوین جهت شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری با هدف تجزیه و تحلیل آسیب پذیری سیستم قدرت

مجتبی فکری^۱، جواد نیکوکار^{۲*} و گئورگ قره پتیان^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۱۹	
واژگان کلیدی: خطای آغازین، وقایع آبخاری، روش ارزیابی ریسک ویلیام فاین، آسیب پذیری، پیشامد محتمل، روش حداکثر جریان.	وقایع آبخاری، یکی از حالات مخرب در سیستم‌های قدرت است که در ابتدا ممکن است با یک خطای کوچک و جزئی شروع شود و سپس با اثر زنجیره‌ای مانند دومینو گسترش یابد و منجر به خاموشی در مقیاس بزرگ گردد. بنابراین جلوگیری از خروج‌های آبخاری امری ضروری است؛ زیرا زندگی روزمره ما به شدت به شبکه برق‌رسانی پایدار و قابل اعتماد بستگی دارد. تاکنون روش‌های زیادی در مراجع مختلف برای شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری شامل خطوط و ترانسفورماتورهای مستعد خرابی با هدف انجام اقدامات اصلاحی به منظور کاهش آثار نامطلوب خرابی آبخاری ارائه شده است. در این مقاله، ابتدا چند روش شناخته شده با پتانسیل شناسایی خطاهای آغازین که منجر به خطاهای آبخاری فاجعه آمیز می‌شود، بر یک شبکه استاندارد ۳۹ باسه IEEE پیاده‌سازی می‌شود، سپس مزایا و کمبودهای روش‌ها با هم مقایسه می‌گردد و در ادامه، یک روش جدید با دقت و سرعت تشخیص مناسب نسبت به سایر روش‌ها ارائه می‌شود. همچنین از روش یکایک‌شماری مبتنی بر تکنیک ارزیابی ریسک ویلیام فاین برای اعتبارسنجی نتایج روش‌های مختلف استفاده می‌گردد. روش یکایک‌شماری، یک روش دشوار و وقت‌گیر است؛ بنابراین برای کاهش ابعاد روش مذکور به منظور صحت‌سنجی مناسب‌تر و سریع‌تر روش‌ها از تکنیک ارزیابی ریسک ویلیام فاین استفاده می‌شود. این تکنیک با محاسبه نمره ارزیابی ریسک ترکیبات پیشامدهای محتمل $N-K(1 < K \leq 3)$ ، شناسایی و رتبه‌بندی خطرهای آغازین بالقوه و مؤثر در ایجاد زنجیره خطاهای پی‌درپی در شبکه قدرت را انجام می‌دهد.

۱- مقدمه

را در سیستم‌های قدرت ایجاد می‌کند که ممکن است منجر به خاموشی‌های گسترده و پرهزینه شود [۳]. امروزه شناسایی سریع خطاهای آغازین وقایع آبخاری از جمله شناسایی خطوط و ترانسفورماتورهای مستعد خرابی به‌عنوان یک وظیفه اصلی برای برنامه‌ریزان و بهره‌برداران سیستم قدرت تعریف می‌شود [۴]. نتیجه این اقدام در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری، باعث افزایش امنیت و بهبود قابلیت اطمینان

سیستم‌های قدرت در جوامع امروزی نقشی حیاتی دارند و رخداد وقایع آبخاری شامل خطا و حادثه در اجزای اصلی سیستم قدرت باعث ضعیف شدن سیستم شده، احتمال افزایش خروج‌های بعدی و همچنین خاموشی در سطح گسترده را در پی خواهد داشت [۱ و ۲]. ترکیبی غیرمنتظره از خطاها گاهی اوقات، زنجیره طولانی از خروج‌های آبخاری

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: j_nikoukar@iau-saveh.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه

۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه

۳. استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

به بخشی از خصوصیات الکتریکی مانند امیدانس یا راکتانس و ظرفیت خط دارد [۸-۱۱]. روش غربالگری^۸ یک مدل استاتیکی و پایدار است و با استفاده از شاخصهای آسیب پذیری^۹ و نادیده گرفتن جزئیات خروج آبخاری قادر است در مقایسه با مدل‌های دینامیکی، وقوع خروج آبخاری و خاموشی را با سرعت بیشتری پیش‌بینی کند [۱۲ و ۱۳]. در مرجع [۱۴]، تمرکز الگوریتم مبتنی بر روش آنتروپی^{۱۰} برای شناسایی رویدادهای نادری است که امکان به خطر انداختن کل سیستم قدرت را به دنبال دارد. نتایج پیاده سازی روش خوشه‌بندی^{۱۱} بر روی شبکه ۵۰۰۰۰ باسه شرق آمریکا نشان می‌دهد این روش با آنالیز خطوط و ترانسفورماتورهای با جریان‌های بالا واقع بر روی کات ست‌ها، شروع رخداد آبخاری را به سرعت در محیط‌های آفلاین و آنلاین شبکه رتبه‌بندی و تجسم می‌کند [۱۵ و ۱۶]. در روش یکایک‌شماری^{۱۲} برای استخراج تمام ترکیبات ممکن پیشامدهای N-K، از رابطه $\frac{n!}{k!(n-k)!}$ در سیستم‌های قدرت استفاده می‌شود و هرچه در این روش مرتبه پیشامدها بالاتر رود، زمان محاسبات افزایش می‌یابد [۱۷ و ۱۸]. در مرجع [۱۹]، از روش ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه بهره‌برداری انتقال^{۱۳} برای شناسایی موقعیت به‌کارگیری خط انتقال جدید برای تقویت شبکه با هدف کاهش گسترش خطاهای آبخاری و کاهش آسیب‌پذیری شبکه استفاده می‌شود. در مرجع [۲۰]، روش ارزیابی آسیب‌پذیری مبتنی بر حداقل برش^{۱۴}، برای شناسایی خرابی‌های آبخاری در شبکه‌های برق به کار می‌رود.

نکته حائز اهمیت در کاربرد روش‌های بیان‌شده به‌منظور شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری این است که در صورت بروز حوادث شدید و پی‌درپی، بهره‌برداری شبکه تحت تنش قرار می‌گیرد و به‌دلیل مکانیزم‌های سریع ناپایداری ولتاژ یا ناپایداری گذرا^{۱۵}، سرعت و دقت انجام مطالعات و ارزیابی امنیتی شبکه به‌منظور شناسایی حوادث آغازین اهمیت پیدا می‌کند. از این رو با تشخیص به‌موقع خطاهای بحرانی و انجام سریع اقدامات اصلاحی^{۱۶} همچون کاهش بار، قطع تولید، جزیره‌سازی و غیره می‌توان

شبکه می‌گردد [۵]. از نتایج دیگر این اقدامات، شناسایی بخش‌های آسیب‌پذیر سیستم، مانند خطوط و ترانسفورماتورهای دارای اضافه‌بار و شینه‌های دچار افت ولتاژ شدید است که می‌تواند در تصمیم‌گیری‌ها برای جلوگیری از ناپایداری سراسری شبکه قدرت و کاهش زمان بازیابی شبکه کمک کند. همچنین با شناسایی بخش آسیب‌پذیر، طرح توسعه شبکه را می‌توان به صورتی برنامه‌ریزی کرد که شبکه از لحاظ الکتریکی مستحکم‌تر شده، آثار رخداد خطاهای آبخاری کاهش یابد [۶]. در مرجع [۷] با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی استوار دومرحله‌ای^۱ و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی^۲ جهت غلبه بر عدم قطعیت تولید و بار و استفاده از منابع تولید تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های بادی در طرح توسعه به‌منظور بهبود کیفیت توان، افزایش قابلیت اطمینان و امنیت شبکه و کاهش هزینه بهره‌برداری در برابر وقوع بدترین رخدادها پرداخته است.

تحقیقات و روش‌های زیادی در کشورهای مختلف به‌منظور شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری در شبکه قدرت بومی آن کشور یا شبکه‌های استاندارد IEEE انجام شده است. در مرجع [۸] انواع مدل‌های تحلیل و شبیه‌سازی خروج‌های آبخاری در سیستم قدرت آمده است. مقایسه این مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های موجود نمی‌توانند تمام مکانیزم‌ها را هنگام خروج آبخاری در نظر بگیرند و هر مدل با توجه به مزایا و معایب آن، کاربرد خاص خود را دارد. مدل‌های اپا^۳ و منجستر^۴ از نوع مدل شبیه‌سازی دینامیکی هستند و نظر به اینکه در این مدل‌ها جزئیات زیادی در نظر گرفته می‌شود تا پیش‌بینی نسبتاً دقیقی درباره انواع خاموشی‌ها انجام شود، سرعت محاسبات و هزینه بالا در این مدل‌ها چالش‌برانگیز است. روش تئوری پیچیده^۵ یک مدل توپولوژیکی است و براساس ساختار فیزیکی و وضعیت قرار گرفتن تجهیزات شبکه، جهت محاسبه شاخص آسیب‌پذیری خطوط و ترانسفورماتورها در تئوری گراف^۶ از شاخص مرکزیت بینابینی لبه^۷ استفاده می‌کند. این روش برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر در تحلیل آسیب‌پذیری، نیاز

¹⁰ Cross Entropy-Based Method (CE)

¹¹ Clustering Method

¹² Enumeration Method

¹³ Operational Transmission Network Vulnerability Assessment (OTNVA)

¹⁴ Minimum Cut-Set (MCS)

¹⁵ Transient Instability

¹⁶ Remedial Action Scheme

¹ Two-Stage Robust Optimization Model

² Energy Storage Systems (ESSs)

³ ORNL-PSErc-Alaska (OPA)

⁴ anchester Models

⁵ Complex Network Theory (CNT)

⁶ Graph Theory

⁷ Edge Betweenness Centrality

⁸ Screening Method

⁹ Vulnerability Index (VI)

روش پیشنهادی در این مقاله، مبتنی بر روش حداکثر جریان^۷ است. قضیه حداکثر جریان دارای یک تئوری ساده و سریع برای محاسبه شاخص‌هاست [۲۴]. امروزه این روش در دریافت هرچه بیشتر اطلاعات از یک نقطه به نقطه دیگر در شبکه اینترنت اهمیت زیادی دارد. اولین الگوریتم مؤثر برای یافتن حداکثر جریان، توسط دو دانشمند مشهور در مهندسی کامپیوتر به نام فورد و فالکرسون در سال ۱۹۶۲ کشف شد.

این روش از یک مفهوم به نام Preflow استفاده می‌کند. Preflow به‌عنوان یک جریان پیش‌فرض و با در نظر گرفتن اینکه مقدار جریان کل ورودی به رأس (گره) می‌تواند از مقدار جریان خروجی از رأس (گره) بیشتر باشد، به شبکه تزریق و باعث می‌شود جریان در مسیرهای گراف های باقیمانده تغییر یابد و مسیرهای به سمت مقصد (t) اشباع شده، مازاد جریان از طریق کوتاه‌ترین مسیرها به سمت منبع (s) عودت داده شود. الگوریتم زمانی خاتمه می‌یابد که Preflow یک جریان حداکثر شود و مقادیر حاصل، حداکثر جریان در گراف شبکه است [۲۵ و ۲۶]. هدف نخست این روش، ارسال حداکثر جریان ممکن از منبع (s) به مقصد (t) در گراف شبکه $G(V, E)$ با رعایت قیود زیر است:

$$G(V, E), s, t \in V$$

$$f^{uv} \leq c^{uv}, \forall (u, v) \in E \quad (1)$$

$$\sum_{u:(u,v) \in E} f^{uv} = \sum_{u:(v,u) \in E} f^{vu}, \forall v \in V \setminus \{s, t\}$$

که جریان عبوری f^{uv} بین منبع و مقصد باید کوچک‌تر یا مساوی ظرفیت لبه c^{uv} باشد و در قید دوم، برای هر رأس به جز منبع و مقصد، باید جریان ورودی به رأس حداقل معادل جریان خروجی از رأس باشد [۲۷].

ایده تجزیه و تحلیل آسیب‌پذیری سیستم‌های قدرت با استفاده از روش مذکور، نخستین بار در مرجع [۲۸] ارائه شد. با افزایش پیچیدگی ساختار شبکه‌های قدرت، نیاز به روشی کارآمد و مؤثر برای ارزیابی سریع آسیب‌پذیری سیستم قدرت احساس می‌گردد. برای مقابله با این چالش، روش پیشنهادی برای شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبشاری^۸ ارائه شده است.

پیکربندی شبکه و تجهیزات آن را به نوعی تجدید آرایش و بازآرایی کرد، به طوری که شبکه تجهیزات بحرانی کمتری داشته باشد و با بهبود امنیت و قابلیت اطمینان، ریسک شکست آبشاری شبکه کاهش یابد [۲۱]. موارد ذکر شده در بالا، ضرورت پرداختن به موضوع شناسایی خطاهای آغازین را بیش از پیش آشکار می‌سازد. در این مقاله، برای شناسایی حوادث آغازین در سیستم قدرت، یک روش جدید با سرعت بالا و دقت کافی پیشنهاد می‌شود. این روش بر مبنای محاسبه حداکثر جریان ممکن در تئوری گراف بین گراف‌های زوجی شبکه شامل ژنراتور و بار، خطوط و ترانسفورماتورهای حیاتی شبکه را براساس حداکثر جریان عبوری نرمالیزه شده رتبه‌بندی می‌کند. روش پیشنهادی روی سیستم قدرت ۳۹ باسه IEEE پیاده‌سازی می‌شود و سرعت، دقت و کارایی آن با سایر روش‌ها برای صحت و اعتبارسنجی مقایسه می‌گردد.

در این مقاله برای اعتبارسنجی و تأیید نتایج به‌دست آمده، از روش یکایک‌شماری مبتنی بر تکنیک ارزیابی ریسک ویلیام فاین استفاده می‌شود. به‌منظور کاهش ابعاد روش یکایک‌شماری و صحت‌سنجی مناسب‌تر و سریع‌تر روش‌ها از تکنیک ارزیابی ریسک^۱ ویلیام فاین^۲ استفاده می‌گردد [۲۲ و ۲۳]. این تکنیک با استفاده از ارزیابی سه معیار شدت خطر^۳، میزان مواجهه با خطر^۴ و احتمال وقوع خطر^۵، در گام اول، محاسبه و طبقه‌بندی نمره ارزیابی ریسک^۶ ترکیبات پیشامدهای محتمل $N-K (1 < K \leq 3)$ در شبکه و در گام دوم، شناسایی و رتبه‌بندی خطرهای آغازین بالقوه و مؤثر در ایجاد زنجیره خطاهای پی‌درپی در شبکه قدرت را انجام می‌دهد. در ادامه، الگوریتم روش پیشنهادی شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبشاری بررسی و تکنیک ارزیابی ریسک ویلیام فاین در بخش سوم توضیح داده می‌شود. در بخش چهارم، به شبیه‌سازی و پیاده‌سازی روش‌های شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبشاری روی یک شبکه آزمون جهت مطالعه پرداخته می‌شود. مقایسه کیفی و کمی روش‌ها براساس معیارهای تعریف شده در بخش پنجم انجام می‌گیرد و در بخش ششم نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- روش پیشنهادی

⁵ Occurring Probability

⁶ Risk Score

⁷ Maximum Flow Method

⁸ Initial Events of Cascading Failures

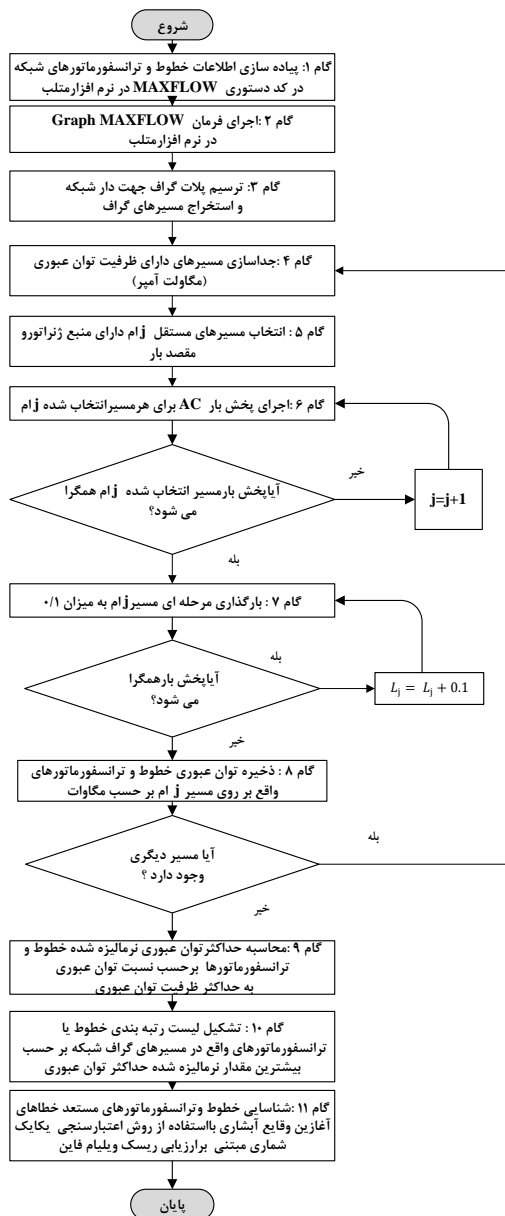
¹ Risk Assessment

² William Fine Method

³ Consequences Severity

⁴ Encountering Rate

یازدهم)، خطوط و ترانسفورماتورهای مستعد خطای آغازین وقایع آبخاری با استفاده از روش یکایک شماری مبتنی بر تکنیک ارزیابی ریسک ویلیام فاین که در بخش بعدی مقاله به آن پرداخته می‌شود، اعتبارسنجی و لیست حادثه‌های آغازگر تشکیل می‌گردد.



شکل ۱- روندنمای شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری با استفاده از روش حداکثر جریان

۳- روش ارزیابی ریسک ویلیام فاین

روش ویلیام فاین یک روش کمی است. مروری بر سابقه بهره‌گیری از تکنیک فوق نشان می‌دهد مطالعات زیادی در قالب ارزیابی خطرهای ایمنی و بهداشتی در واحدهای صنعتی با استفاده از روش مذکور به انجام رسیده است.

در این روش برای محاسبه حداکثر جریان نرمالیزه شده^۱، از یک شاخص مرکزی به صورت رابطه (۲) استفاده می‌شود:

$$C_{ij} = \sum_{u=1}^M \sum_{v=1}^N f_{ij}^{uv} \quad (2)$$

که f_{ij}^{uv} جریان عبوری بین گره‌های i و j در مسیر بین گره‌های منبع و مقصد u و v است. هر یک از مسیرهای بین گره‌های منبع و مقصد را می‌توان یک سناریو^۲ در نظر گرفت. بنابراین تعریف جدید شاخص مرکزی به صورت زیر است:

$$C_{ij}^* = \sum_{s=1}^n f_{ij}^{(s)} \quad (3)$$

که $f_{ij}^{(s)}$ جریان عبوری بین گره‌های i و j در هر سناریو است. بنابراین نرمالیزه شده شاخص مرکزی C_{ij}^* به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\overline{C_{ij}^*} = \sum_{s=1}^n \frac{f_{ij}^{(s)}}{f_{max}^{(s)}} \quad (4)$$

که $f_{max}^{(s)}$ حداکثر ظرفیت جریان عبوری در هر سناریو است. هرچه مقدار عددی شاخص مرکزی نرمالیزه شده $\overline{C_{ij}^*}$ بیشتر باشد، خطوط یا ترانسفورماتورها سهم بیشتری در حداکثر جریان عبوری دارند. اگر $\overline{C_{ij}^*}$ بیشتر از یک باشد، نشان این است که خط یا ترانسفورماتور در بیش از یک سناریو مشارکت داشته‌اند [۲۷].

روندنمای روش پیشنهادی برای تعیین خطاهای آغازین وقایع آبخاری در شکل (۱) نشان داده شده است. این شکل دارای پنج بخش اصلی و یازده گام است. در بخش اول (گام اول تا سوم)، گراف شبکه با استفاده از یک فرمان در محیط نرم‌افزار MATLAB به نام graphmaxflow مدل شده، مسیرهای گراف شبکه استخراج می‌شود [۲۹]. در بخش دوم (گام چهارم و پنجم)، گراف‌های زوجی شامل ژنراتور و بار از گراف‌های چندگانه دارای ظرفیت انتخاب و استخراج می‌شود تا بار محاسباتی روش پیشنهادی کاهش یابد. در بخش سوم (گام ششم تا هشتم)، با اجرای پخش بار برای هر مسیر انتخاب شده در بخش قبل و افزایش مرحله‌ای بار، حداکثر جریان ممکن از منبع به مقصد با رعایت محدودیت ظرفیت هر مسیر محاسبه و ذخیره می‌شود. در بخش چهارم (گام نهم و دهم)، خطوط و ترانسفورماتورهای واقع بر این مسیرها براساس محاسبه حداکثر جریان عبوری نرمالیزه شده رتبه‌بندی می‌شوند. در بخش آخر (گام

² Scenario

¹ Normalized by the Maximum Flow

مرحله اول از خروج متوالی) در هر سناریو تعریف می‌شود. در این شاخص‌ها میزان اضافه‌بار، ۱۰۰ درصد و بیشتر منظور است.

برای این چهار شاخص مهم به ترتیب ضرایب وزنی W_{dz} ، W_{cz} ، W_{bz} ، W_{az} تعریف می‌شود. این ضرایب را می‌توان با روش فرایند سلسله‌مراتبی^۱ و براساس درجه اهمیت شاخص‌ها محاسبه کرد. خصوصیت اصلی این روش برپایه مقایسه زوجی است و باعث می‌شود مقایسه به شکل مطلوب انجام گردد. در مقایسه دو به دو از اعداد یک تا نه مطابق جدول ۱ استفاده می‌شود. در ماتریس مقایسه‌ای زوجی معیارها در جدول ۲، هر یک از درایه‌های ماتریس با استفاده از مقایسه زوجی جدول ۱ تعیین می‌گردد. درایه‌های روی قطر اصلی این ماتریس برابر یک است؛ زیرا هر معیار در مقایسه با خودش دارای ارزش یکسان می‌باشد. ماتریس مقایسه‌ای معیارها، یک ماتریس مثبت و معکوس است و در آن درایه a_{ij} معکوس a_{ji} می‌باشد [۳۱].

جدول ۱- امتیازدهی مقایسه زوجی روش فرایند سلسله‌مراتبی

معیار	AZ_{sj}	BZ_{sj}	CZ_{sj}	DZ_{sj}
AZ_{sj}	۱	۳	۲	۵
BZ_{sj}	۱/۳	۱	۱	۳
CZ_{sj}	۱/۲	۱	۱	۳
DZ_{sj}	۱/۵	۱/۳	۱/۳	۱

جدول ۲- ماتریس مقایسه‌ای معیارها

درجه اهمیت در مقایسه زوجی	امتیاز	درجه اهمیت در مقایسه زوجی	امتیاز
ارزش برتری زیاد تا خیلی زیاد	۶	اهمیت یکسان	۱
ارزش برتری خیلی زیاد	۷	ارزش برتری یکسان تا متوسط	۲
ارزش برتری خیلی زیاد تا حداکثر	۸	ارزش برتری متوسط	۳
ارزش برتری حداکثر	۹	ارزش برتری متوسط تا زیاد	۴
		ارزش برتری زیاد	۵

بعد از تشکیل ماتریس، برای نمایش دقت ضرایب به دست آمده، از نرخ سازگاری^۲ استفاده می‌شود. این مکانیزم نشان می‌دهد تا چه اندازه می‌توان به ضرایب به دست آمده در ماتریس اعتماد کرد. نرخ سازگاری کمتر از ۱۰ درصد قابل قبول است و در غیر این صورت باید مقایسه‌ها دوباره انجام

وارنر و گروه مطالعاتی دانشگاه مون پولیه فرانسه در ارزیابی خطرهای ایمنی و بهداشتی کارخانه تولید لوله‌های شبکه انتقال آب در سال ۲۰۰۷ از روش ویلیام فاین استفاده کرده‌اند [۳۰]. در همه مطالعات از روش ویلیام فاین به عنوان یک روش سازمان‌یافته و نظام‌مند در شناسایی خطرها و برآورد خطرها برای رتبه‌بندی تصمیمات، برای کاهش خطر به حد قابل قبول استفاده شده است. با توجه به اینکه انرژی الکتریکی یکی از عوامل مهم توسعه اقتصادی و رفاه کشورها به شمار می‌رود، با افزایش مصرف انرژی، همچنین توسعه و پیچیدگی شبکه‌های برق، پیش‌بینی خطرهای وقوع خروج‌های آبخاری ناشی از وقوع پیشامدهای محتمل N - $(1 < K \leq 3)$ سخت می‌شود. همچنین با بزرگ شدن K ، تجزیه و تحلیل هر پیشامد به منظور شناسایی پیشامدهای خطرناک در روش یکایک‌شماری وقت‌گیر و دشوار خواهد شد. از این رو با هدف کاهش محاسبات و ساده‌سازی روش مذکور، تکنیک ارزیابی ریسک ویلیام فاین به منظور شناسایی حادثه‌های آغازگر خروج آبخاری استفاده می‌شود. در ابتدا این روش شرایط توپولوژی و بهره‌برداری شبکه بعد از وقوع پیشامدهای محتمل را به شکل شاخص‌هایی به صورت رابطه (۵) تعریف می‌کند:

$$R_{sj} = C_{sj} E_{sj} P_{sj} \quad (5)$$

که R_{sj} نمره ارزیابی ریسک هر سناریوی خروج آبخاری است که از حاصل ضرب سه شاخص C_{sj} (شدت پیشامد)، E_{sj} (میزان مواجهه با پیشامد) و P_{sj} (احتمال وقوع پیشامد) به دست می‌آید [۲۲ و ۲۳]. برای استفاده از این تکنیک در روش یکایک‌شماری، C_{sj} از حاصل جمع امتیاز چهار شاخص مهم و تأثیرگذار در سناریوهای خروج آبخاری به صورت رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$C_{sj} = w_{az}AZ_{sj} + w_{bz}BZ_{sj} + w_{cz}CZ_{sj} + w_{dz}DZ_{sj} \quad (6)$$

AZ_{sj} (تعداد مراحل خروج پی‌درپی خط یا ترانسفورماتور اضافه‌بار شده)، BZ_{sj} (تعداد تکرار در همگرا شدن پخش بار شبکه در مرحله اول از خروج متوالی خط یا ترانسفورماتور اضافه‌بار شده)، CZ_{sj} (تعداد خطوط یا ترانسفورماتور اضافه‌بار شده در مرحله اول از خروج متوالی) و DZ_{sj} (مقدار بیشترین درصد اضافه‌بار خط یا ترانسفورماتور در

² Consistency Ratio (CR)

¹ Analytic Hierarchy Process (AHP)

بندی شده که در جداول ۵ و ۶ آمده است. براساس امتیازبندی شدت پیشامد، میزان مواجهه با پیشامد و احتمال وقوع پیشامد در جداول مذکور، می‌توان نمره‌دهی ریسک سناریوهای خروج آبخاری را با استفاده از رابطه (۵) به دست آورد.

به‌طور کلی در روش ارزیابی ریسک ویلیام فاین هیچ R_{sj} مبنایی وجود ندارد که بتوان داده‌ها را با آن مقایسه و سطوح ریسک سناریوهای خروج آبخاری را تعیین کرد. بنابراین حد پایین و حد بالای ریسک سناریوها براساس مقدار نمره ارزیابی ریسک به‌صورت روابط زیر و با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS محاسبه می‌شود [۳۲].

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (9)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

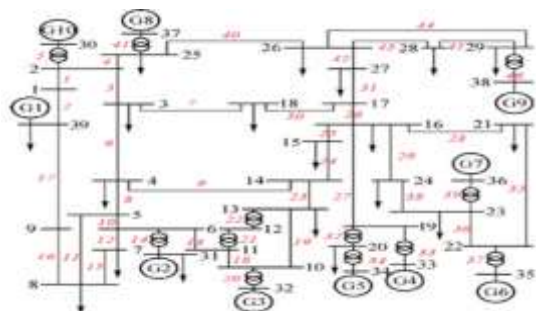
$$\delta + \bar{x} = \text{حد بالای ریسک} \quad (11)$$

$$\delta - \bar{x} = \text{حد پایین ریسک} \quad (12)$$

که \bar{x} ، δ و X_i به ترتیب میانگین حسابی، انحراف معیار و مقدار نمره ارزیابی ریسک هر سناریو و N تعداد سناریوهای خروج آبخاری است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

به‌منظور شبیه‌سازی روش پیشنهادی، از شبکه ۳۹ باسه IEEE مطابق شکل (۲) استفاده شده است.



شکل ۲- شبکه ۳۹ باسه مورد استفاده

این سیستم دارای ۳۴ خط انتقال، ۱۲ ترانسفورماتور، ۱۰ واحد نیروگاهی و ۱۹ باس مصرفی است. ظرفیت نصب‌شده نیروگاه‌ها و توان مصرفی شبکه به ترتیب ۶۱۳۸ مگاوات و ۶۰۹۷ مگاوات و تلفات سیستم برابر ۴۱/۲۳ مگاوات است [۱۱ و ۳۳].

شود. نرخ سازگاری، از تقسیم شاخص سازگاری^۱ بر شاخص تصادفی سازگاری^۲ به‌صورت رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

مقدار CI از معادله (۸) به دست می‌آید:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

λ_{max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه است که از محاسبه ماتریس به دست می‌آید. n تعداد معیارها و RI شاخص تصادفی است که مقادیر آن در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- شاخص تصادفی RI برای امتیازهای تصادفی

تعداد معیارها	۱	۲	۳	۴	۵
RI	۰	۰	۰/۵۸	۰/۹	۱/۱۲
تعداد معیارها	۶	۷	۸	۹	۱۰
RI	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۹

ضرایب وزنی معیارهای تعریف‌شده پس از نرمالیزه شدن نسبت به مجموع هر ستون ماتریس جدول ۲، به کمک روش فرایند سلسله‌مراتبی به‌صورت جدول ۴ به دست می‌آیند.

جدول ۴- نتیجه مقایسه معیارها توسط روش سلسله‌مراتبی

معیار	AZ_{sj}	BZ_{sj}	CZ_{sj}	DZ_{sj}	میانگین
AZ_{sj}	۰/۴۹۳	۰/۵۶۳	۰/۴۶۲	۰/۴۱۷	۰/۴۸۳
BZ_{sj}	۰/۱۶۳	۰/۱۸۸	۰/۲۳۱	۰/۲۵	۰/۲۰۸
CZ_{sj}	۰/۲۴۶	۰/۱۸۸	۰/۲۳۱	۰/۲۵	۰/۲۲۹
DZ_{sj}	۰/۰۹۸	۰/۰۶۲۵	۰/۰۷۶۲	۰/۰۸۳	۰/۰۸
مجموع	۱	۱	۱	۱	۱

براساس جدول ۴، λ_{max} معادل ۴/۰۰۶۹ محاسبه می‌شود و با n معادل ۴، شاخص سازگاری برابر ۰/۰۲۳ به دست می‌آید. برپایه تعداد معیارها، مقدار شاخص تصادفی برابر ۰/۹ تعیین می‌شود و در نتیجه نرخ سازگاری برابر ۰/۰۲۵ و از ۰/۱ کمتر است. بنابراین ضرایب به‌دست‌آمده در ماتریس قابل اعتماد هستند و ضرایب وزنی معیارهای شدت پیشامد در رابطه (۶) به ترتیب ۰/۴۸۳، ۰/۲۰۸، ۰/۲۲۹ و ۰/۰۸ محاسبه می‌شوند. با هدف محاسبه و تعیین نمره ارزیابی ریسک سناریوهای خروج آبخاری در شبکه آزمون، شاخص‌های مهم تعریف‌شده در روابط (۵) و (۶) که می‌تواند در وقوع این سناریوها تأثیرگذار باشد، طبق روش ارزیابی ریسک ویلیام فاین در مراجع [۲۲ و ۲۳] امتیاز

² Random Consistency Index (RI)

¹ Consistency Index (CI)

جدول ۵ - امتیازبندی شاخص‌های تعریف‌شده شدت پیشامد

امتیاز	DZ _{sj}	امتیاز	CZ _{sj}	امتیاز	BZ _{sj}	امتیاز	AZ _{sj}
۱۰۰	۱۰۰ درصد و بیشتر	۱۰۰	تعداد ۱۳ و بیشتر	۱۰۰	۱۰ تکرار و بیشتر	۱۰۰	۱
۹۰	۸۰ تا ۱۰۰ درصد	۹۰	۱۲	۹۰	۹	۹۰	۲
۷۰	۷۰ تا ۸۰ درصد	۸۰	۱۱	۸۰	۸	۸۰	۳
۶۰	۶۰ تا ۷۰ درصد	۷۰	۱۰	۷۰	۷	۷۰	۴
۵۰	۵۰ تا ۶۰ درصد	۶۰	۹	۶۰	۶	۶۰	۵
۲۵	کمتر از ۵۰ درصد	۵۰	۸	۵۰	۵	۵۰	۶
		۴۰	۷	۲۵	۴		
		۳۰	۶	۱۵	۳		
		۲۰	۵	۵	۲		
		۱۰	۴	۱	۱		
		۵	۳				
		۲	۲				
		۱	۱				

جدول ۶ - امتیازبندی شاخص‌های میزان مواجهه با پیشامد و احتمال وقوع پیشامد

امتیاز	احتمال وقوع پیشامد (P_{sj})		میزان مواجهه با پیشامد (E_{sj})		رتبه
	طبقه بندی	احتمال وقوع پیشامد	طبقه بندی	میزان مواجهه با پیشامد	
۵	قطعی	احتمال وقوع پیشامد (۱۰۰٪)	۱۰	به‌طور مداوم (چند بار در روز)	۱
۴	بالا	احتمال وقوع پیشامد (۷۵ تا ۹۹٪)	۶	به‌طور مکرر (حدود یک بار در روز)	۲
۳	متوسط	احتمال وقوع پیشامد (۵۰ تا ۷۴٪)	۳	گاه به گاه (یک بار در هفته یا ماه)	۳
۲	پایین	احتمال وقوع پیشامد (۲۵ تا ۴۹٪)	۲	به‌طور غیرمعمول (یک بار در ماه یا یک سال)	۴
۱	خیلی کم	احتمال وقوع پیشامد (۱ تا ۲۴٪)	۱	به‌ندرت (ممکن است در طول عمر تجهیز رخ دهد)	۵
۰/۱	غیرممکن	احتمال وقوع پیشامد وجود ندارد (اتفاق نمی‌افتد)	۰/۱	جزئی (احتمال وقوع آن فوق‌العاده اندک است)	۶

تکرار می‌شود. این روش تا زمانی که پخش بار واگرا شود ادامه می‌یابد و پیشامد خاص N-2 یا N-3 را به‌عنوان رویداد آغازینی برای سناریوهای خروج آبخاری در نظر می‌گیرد. در این روش فروپاشی سیستم معادل واگرا شدن و مبهم شدن نتایج پخش بار تلقی می‌گردد.

در مرحله بعد با هدف شناسایی و استخراج خطاهای آغازین، ارزش‌گذاری ریسک سناریوهای خروج آبخاری با استفاده از امتیازبندی فاکتورهای روش ارزیابی ریسک ویلیام فاین در جداول ۵ و ۶ و محاسبه نمره ارزیابی ریسک سناریوها، طبق رابطه ۵ انجام می‌گیرد. با استفاده از نتایج خروجی ارزش‌گذاری ریسک سناریوها و روابط ۹ تا ۱۲، حد پایین و حد بالای نمره ارزیابی ریسک سناریوها براساس محاسبه میانگین و انحراف معیار به کمک نرم‌افزار آماری SPSS طبق جدول ۷ محاسبه می‌شود. مطابق این جدول، حد پایین و بالای نمره ارزیابی ریسک برای تعداد ۲۴۲ پیشامد آغازین N-2 و N-3 به ترتیب برابر ۱۵/۷۱ و ۱۲۵/۰۹ به دست می‌آید. بنابراین می‌توان سناریوهای خروج

سناریوهای خروج‌های آبخاری از جعبه ابزار MATPOWER مدل‌سازی شده و کلیه مطالعات شبیه‌سازی شبکه در محیط MATLAB انجام شده است [۳۳]. عناصر شبکه به گونه‌ای تنظیم شده‌اند که سیستم دارای امنیت با معیار N-1 است.

۴-۱- روش یکایک‌شماری مبتنی بر روش ارزیابی

ریسک ویلیام فاین

روش ارزیابی ریسک ویلیام فاین به‌طور قابل توجهی فضای جست‌وجوی سناریوهای خطرناک خروج آبخاری با پیشامدهای آغازین N-2 و N-3 را کاهش داده، ۲۴۲ مورد سناریوی مستعد خرابی آبخاری را جهت شناسایی و رتبه‌بندی حادثه‌های آغازگر انتخاب می‌کند، در حالی که در روش یکایک‌شماری تعداد سناریوها برابر با ۱۶۲۱۵ مورد است. در این سناریوها با وقوع پیشامدهای مختلف، خط یا ترانسفورماتور اضافه‌بار می‌شود. اگر خط یا ترانسفورماتور اضافه‌بار شده مشخص باشد، آن را خارج کرده، پخش بار برای پیدا کردن خط یا ترانسفورماتور اضافه‌بار شده بعدی دوباره

به جزیره شدن، فروپاشی ولتاژ و خاموشی گسترده شبکه می‌گردند. در این شرایط، اصلاحات فوری برای کنترل ریسک مورد نیاز است. جدول ۸، رتبه‌بندی ریسک سناریوهای خروج آبخاری با ریسک بالا و با پیشامد آغازین N-2 را نشان می‌دهد. در این جدول با استفاده از روش ارزیابی ریسک ویلیام فاین، در مجموع ۵۶ سناریو با ریسک بالا استخراج می‌شود. این سناریوها فهرستی از زنجیره‌های خطا هستند که از دیدگاه مهندسی باعث ایجاد شرایط خطرناک در سیستم شده، قیود بهره‌برداری شبکه را نقض می‌کنند. طبق جدول ۸، ۶ سناریو با کسب نمره ۱۴۸، بیشترین نمره ارزیابی ریسک را به خود اختصاص داده است که شامل پیشامدهای دوتایی خروج خط ۵-۶ به ترتیب با ترانسفورماتورهای ۱۹-۳۳، ۲۲-۳۵، ۳۴-۳۷، ۲۰-۲۵ و خروج خط ۱۴-۱۳ به ترتیب با ترانسفورماتورهای ۱۹-۳۳ و ۲۲-۳۵ است.

جدول ۸- رتبه‌بندی ریسک سناریوهای خروج آبخاری خطرناک در وقوع پیشامد N-2

سطح ریسک	تعداد سناریوها	R_{sj}	P_{sj}	E_{sj}	C_{sj}	\hat{Q}_i
	۳	۱۲۸	۲	۱	۶۴	۱
	۳	۱۳۲	۲	۱	۶۶	۲
	۶	۱۴۸	۳	۱	۴۹/۳	۳
	۵	۱۴۴	۳	۱	۴۸/۲	۴
	۲۳	۱۴۲	۳	۱	۴۷/۲	۵
بالا	۱	۱۳۳	۳	۱	۴۴/۴	۶
	۱	۱۴۶	۳	۱	۴۸/۵	۷
	۴	۱۳۰	۳	۱	۴۳/۳	۸
	۵	۱۲۸	۳	۱	۴۲/۶	۹
	۱	۱۴۳	۳	۱	۴۷/۶	۱۰
	۴	۱۲۷	۳	۱	۴۲/۴	۱۱
	۵۶				مجموع	

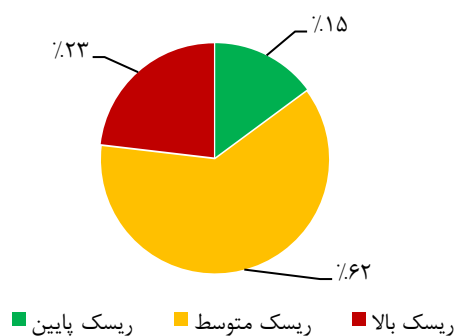
رتبه‌بندی شاخه‌ها به‌عنوان حادثه آغازگر سناریوهای خروج آبخاری براساس تعداد دفعات مشارکت و ضریب کارایی در جدول ۹ آمده است. در این جدول، ضریب کارایی شاخه‌ها براساس نمره ارزیابی ریسک سناریوها در جدول ۸ محاسبه می‌شود. هرچه ضریب کارایی یک شاخه بزرگ‌تر باشد، میزان بحرانی بودن آن شاخه در انتشار خروج‌های پی‌درپی بیشتر است. به‌عنوان مثال، ضریب کارایی برای

آبخاری را در سه سطح ریسک پایین^۱، ریسک متوسط^۲ و ریسک بالا^۳ طبقه‌بندی کرد. در این مقاله سناریوهای خروج آبخاری با نمره ارزیابی ریسک بیشتر از ۱۲۵/۰۹ به‌عنوان ریسک بالا انتخاب می‌شوند. در این روش، کمترین و بیشترین مقدار نمره ارزیابی ریسک محاسبه‌شده سناریوها با وقوع پیشامد آغازین N-2 و N-3 به ترتیب برابر ۴/۲۴ و ۱۴۸ است. نکته حائز اهمیت این است که احتمال وقوع سناریوهای خروج آبخاری با پیشامد آغازین N-3 فوق‌العاده اندک است. از این رو با در نظر گرفتن امتیاز شاخص میزان مواجهه با خطر (E_{sj}) برابر ۰/۱ طبق جدول ۶، نمره ارزیابی ریسک این سناریوها در سطوح ریسک پایین و متوسط قرار گرفته، از به‌کارگیری آن‌ها در شناسایی و رتبه‌بندی خطاهای آغازین وقایع آبخاری کنار گذاشته می‌شود.

جدول ۷- سطح ریسک سناریوهای خروج آبخاری براساس نتایج استخراج شده از نرم افزار SPSS

تعداد سناریوهای خروج آبخاری (N)	با وقوع پیشامد آغازین N-2 و N-3
۲۴۲	
میانگین حسابی (\bar{X})	۷۰/۴
انحراف معیار (δ)	۵۴/۶۹
حد بالای ریسک	۱۲۵/۰۹
حد پایین ریسک	۱۵/۷۱

درصد سطوح ریسک سناریوهای خروج آبخاری با پیشامدهای آغازین N-2 و N-3 در شکل (۳) آمده است.



شکل ۳- درصد سطوح ریسک سناریوهای خروج آبخاری

مطابق شکل (۳) حدود ۲۳ درصد از سناریوهای خروج آبخاری در سطح ریسک بالا قرار گرفته است. در این وضعیت، حادثه‌های آغازگر آسیب‌پذیر که می‌تواند شروعی بر خروج‌های پی‌درپی خطوط یا ترانسفورماتورها باشد پدیدار می‌شوند و با ایجاد وضعیت بحرانی، در نهایت منجر

³ High Risk (H)

¹ Low Risk (L)

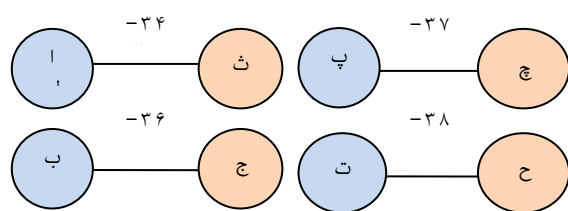
² Middle Risk (M)

ترانسفورماتور به‌عنوان خوشهٔ اتصالات، دو خوشهٔ دیگر را به هم متصل می‌کند. معمولاً در شبکه‌های انتقال، خطوط یا ترانسفورماتورهایی که در کاتست‌ها قرار می‌گیرند، دارای جریان زیادی هستند و خروج آن‌ها باعث اضافه‌بار در خطوط دیگر شده، شرایط خروج آبخاری را برای شبکه ایجاد می‌کنند. این خطوط یا ترانسفورماتورها که به‌عنوان اتصالات مهم تلقی می‌شوند، در چارچوب آنالیز و رتبه‌بندی این روش برای شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری مورد توجه قرار گرفته‌اند. در شبکهٔ مورد مطالعه، خوشهٔ ژنراتور به چهار گروه و خوشهٔ بار مصرفی نیز به چهار گروه تقسیم شده است. نام گروه‌ها در جدول ۱۰ آمده است.

جدول ۱۰- باس‌های گروه‌های تولید و بار

نام گروه	نوع گروه	شمارهٔ باس	نام گروه	نوع گروه	شمارهٔ باس
الف	تولید	۳۴	ث	بار	۲۰
ب	تولید	۳۶	ج	بار	۲۴ و ۲۳
پ	تولید	۳۷	چ	بار	۲۶ و ۲۵
ت	تولید	۳۸	ح	بار	۲۹ و ۲۶، ۲۸

خطوط یا ترانسفورماتورهای مهمی که گروه‌های مختلف ژنراتور و بار را در شبکهٔ مورد مطالعه به یکدیگر متصل می‌کند، در شکل (۴) آمده است. خروج هر یک از این خطوط یا ترانسفورماتورها می‌تواند به‌عنوان حادثهٔ آغازین برای خروج آبخاری تلقی شود. این روش قادر است ۲ حادثه از ۴ حادثهٔ آغازگر را که به‌عنوان آسیب‌پذیرترین حادثهٔ آغازگر خروج آبخاری توسط روش ارزیابی ریسک ویلیام فاین در جدول ۹ به‌دست آمده، شناسایی کند.



شکل ۴- دیاگرام روش خوشه‌بندی به کار برده شده در شبکه

۴-۳- روش تئوری شبکه

در روش تئوری پیچیده با بررسی وضعیت توپولوژی و ساختاری سیستم قدرت، ارزیابی آسیب‌پذیری تجهیزات شبکه انجام می‌شود. در این روش، شبکهٔ مورد مطالعه به‌صورت یک گراف جهت‌دار وزنی ساخته می‌شود تا تحمل شبکه در برابر اختلالات را آنالیز کند. کوتاه‌ترین مسیر بین دو گره، مسیری است که دارای کمترین راکتانس باشد.

ترانسفورماتور ۳۲-۱۰ که در پنج سناریو با نمرهٔ ارزیابی ریسک ۱۲۷، ۱۲۸، ۱۳۳، ۱۴۲ و ۱۴۴ مشارکت دارد، برابر است با: $(127+128+142+144+133)/148$ که $4/55$ محاسبه می‌شود. در ضمن با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS، ترانسفورماتورهای ۳۸-۲۹، ۳۳-۱۹، ۳۵-۲۲ و ۳۴-۲۰ به ترتیب با ضریب کارایی $11/82$ ، $10/33$ ، $8/28$ و $7/63$ به‌عنوان آسیب‌پذیرترین حادثه‌های آغازگر شناسایی می‌شوند.

جدول ۹- شناسایی و رتبه‌بندی خطاهای آغازین وقایع آبخاری به روش ارزیابی ریسک ویلیام فاین

رتبه	نام شاخه	نوع شاخه	مشارکت در سناریوها	تعداد ضریب کارایی
۱	۲۹-۳۸	ترانسفورماتور انتقال	۱۳	۱۱/۸۲
۲	۱۹-۳۳	ترانسفورماتور انتقال	۱۱	۱۰/۳۳
۳	۲۲-۳۵	ترانسفورماتور انتقال	۹	۸/۲۸
۴	۲۰-۳۴	ترانسفورماتور انتقال	۸	۷/۶۳
۵	۵-۶	خط انتقال	۶	۵/۹۲
۶	۲۱-۲۲	خط انتقال	۶	۵/۸۲
۷	۲۵-۳۷	ترانسفورماتور انتقال	۶	۵/۶۶
۸	۱۶-۲۱	خط انتقال	۵	۴/۸
۹	۲۳-۲۴	خط انتقال	۵	۴/۸
۱۰	۲۳-۳۶	ترانسفورماتور انتقال	۵	۴/۶۲
۱۱	۱۰-۳۲	ترانسفورماتور انتقال	۵	۴/۵۵
۱۲	۲-۳۰	ترانسفورماتور انتقال	۴	۳/۸۵
۱۳	۲۶-۲۷	خط انتقال	۴	۳/۸۴
۱۴	۱۰-۱۳	خط انتقال	۴	۳/۶۴
۱۵	۶-۱۱	خط انتقال	۴	۳/۵۵
۱۶	۱۹-۲۰	خط انتقال	۴	۳/۵۱
۱۷	۱۳-۱۴	خط انتقال	۳	۲/۸۶
۱۸	۴-۵	خط انتقال	۳	۲/۷۷
۱۹	۱۰-۱۱	خط انتقال	۲	۱/۸۲
۲۰	۱۶-۱۷	خط انتقال	۱	۰/۹۹
۲۱	۳-۴	خط انتقال	۱	۰/۹۷
۲۲	۶-۳۱	خط انتقال	۱	۰/۸۶
۲۳	۸-۹	خط انتقال	۱	۰/۸۶
۲۴	۹-۳۹	خط انتقال	۱	۰/۸۶

۴-۲- روش خوشه‌بندی

طبق مرجع [۱۶]، در این روش، شبکهٔ آزمون به سه نوع خوشه ژنراتور، بار و اتصالات تقسیم می‌شود. خط یا

شاخص‌های توان اکتیو و راکتیو خطوط و ترانسفورماتورها و زاویه خطوط است. روابط شاخص‌های آسیب‌پذیری ذکر شده در مراجع [۱۱-۱۳] آمده است. این روش دارای N-1 حالت است. شاخص‌های آسیب‌پذیری سیستم برای خروج هر خط یا ترانسفورماتور به صورت جداگانه با استفاده از نتایج پخش بار AC محاسبه می‌گردد. شاخص آسیب‌پذیری کل سیستم VI به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$VI = VI_{gen} + VI_{bus} + VI_{line} \quad (15)$$

که VI_{gen} ، VI_{bus} و VI_{line} به ترتیب شاخص آسیب‌پذیری ژنراتورها، باس‌ها و شاخه‌ها (خطوط و ترانسفورماتورها) هستند.

در این روش، شاخص آسیب‌پذیری کل سیستم VI برای ۴۶ خط و ترانسفورماتور شبکه مورد مطالعه محاسبه و لیست رتبه‌بندی تشکیل می‌گردد. در این روش هرچه میزان VI محاسبه شده بزرگ‌تر باشد، شرایط آسیب‌پذیری سیستم قدرت نیز بیشتر می‌شود. این روش با شناسایی بخش‌های آسیب‌پذیر شبکه و یافتن مشکلات مرتبط با بارگیری بیش از حد خطوط یا ترانسفورماتورها و افت ولتاژ باس‌ها، احتمال وقوع خطاهای آبخاری را پیش‌بینی می‌کند. در شبکه مورد مطالعه از شاخص آسیب‌پذیری ژنراتور VI_{gen} به دلیل صفر شدن ضریب وزن دهی در روابط آن صرف نظر می‌شود. خط ۱۶-۱۵ به ترتیب با شاخص آسیب‌پذیری باس VI_{bus} برابر ۰/۳۲ و شاخص آسیب‌پذیری خط VI_{line} برابر ۰/۳۶۵ در مجموع با شاخص آسیب‌پذیری کل VI معادل ۰/۳۹۷۲، به عنوان آسیب‌پذیرترین خط در رتبه اول این روش شناسایی می‌شود. این روش قادر است آسیب‌پذیرترین حادثه‌های آغازگر خروج آبخاری را که توسط روش ارزیابی ریسک ویلیام فاین در جدول ۹ به دست آمده، در رتبه‌های ۲۳، ۲۴، ۲۵ و ۳۷ به ترتیب با LVI برابر ۱۲، ۱۲، ۱۱ و ۳/۵ شناسایی کند.

۴-۵- روش مبتنی بر آنتروپی

الگوریتم مبتنی بر این روش، عمدتاً برای استخراج احتمال رخداد وقایع یا حوادث نادر که ممکن است کل یک شبکه را به خطر بیندازد، استفاده می‌شود. در این روش با در نظر گرفتن آنالیز پیشامد محتمل $N-K$ ($1 < K \leq 3$) و افزایش K، شناسایی مجموعه‌ای از حوادث بالقوه خطرناک به سرعت

بنابراین وزن خط یا ترانسفورماتور i واقع بر مسیر گراف با راکتانس آن تعریف می‌شود. سپس با محاسبه فاصله وزن دهی شده i ، شاخص آسیب‌پذیری خط یا ترانسفورماتور (LVI_i) به صورت زیر تعریف می‌شود [۹]:

$$LVI_i = B_{Li} \quad (13)$$

که B_{Li} کوتاه‌ترین مسیر بین ژنراتورها و بارهای شبکه تعریف می‌شود. معادل این شاخص در مرجع [۱۱]، به عنوان شاخص مرکزیت بینابینی لبه^۱ به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$BC(e) = \sum_{u,w \in V} \frac{Q_{uw}(e)}{Q_{uw}} \quad u \neq w \quad (14)$$

که $Q_{uw}(e)$ کوتاه‌ترین مسیر بین رئوس u و w است که از طریق لبه e (خط یا ترانسفورماتور) عبور می‌کند. Q_{uw} مجموع کل تعداد کوتاه‌ترین مسیرها بین u و w است. برای ۲۵۸ مسیر گراف شبکه مورد مطالعه، شاخص مرکزیت بینابینی لبه با استفاده از رابطه ۱۴ محاسبه شده که معادل شاخص آسیب‌پذیری خط یا ترانسفورماتور i (LVI_i) است. در این روش، شاخص آسیب‌پذیری LVI برای ۴۶ خط و ترانسفورماتور شبکه محاسبه و لیست رتبه‌بندی تشکیل می‌شود. خط ۱۶-۱۵ با مشارکت در ۱۲۱ مسیر گراف و با LVI برابر ۱۲۱ به عنوان آسیب‌پذیرترین خط در رتبه اول این روش شناسایی می‌گردد. این روش قادر است آسیب‌پذیرترین حادثه‌های آغازگر خروج آبخاری را که توسط روش ارزیابی ریسک ویلیام فاین در جدول ۹ به دست آمده، در رتبه‌های ۲۳، ۲۴، ۲۵ و ۳۷ به ترتیب با LVI برابر ۱۲، ۱۲، ۱۱ و ۳/۵ شناسایی کند.

۴-۴- روش غربالگری

این روش، رویکردی مناسب برای شناسایی رویداد آغازگر خطاهای آبخاری است. این روش این امکان را به اپراتور سیستم می‌دهد که خطاهای آغازین را در وضعیت آبخار آهسته شناسایی کند و اقدامات لازم را برای جلوگیری از این حوادث انجام دهد. این روش با استفاده از شاخص‌های آسیب‌پذیری و پردازش توپولوژی شبکه، نقاط آسیب‌پذیر سیستم قدرت را شناسایی می‌کند. شاخص‌های مهم آسیب‌پذیری سیستم در سطح ژنراتور شامل شاخص‌های توان اکتیو و راکتیو ژنراتورها، در سطح باس‌ها شامل شاخص‌های ولتاژ باس‌ها و بارپذیری باس‌ها و در سطح شاخه‌ها شامل

¹ Edge Betweenness Centrality

نرم‌افزار MATLAB پخش بار اجرا شده، جهت محاسبه حداکثر جریان با رعایت محدودیت ظرفیت مسیر، بارگذاری مرحله‌ای به میزان ۰/۱ تا زمان فروپاشی و واگراشدن سیستم انجام می‌شود. این مسیرها کوتاه‌ترین مسیرها بین ژنراتور و بار است و هر مسیر دارای کمترین امپدانس می‌باشد. براساس تعیین بیشترین جریان عبوری هر مسیر، حداکثر جریان نرمالیزه خطوط و ترانسفورماتورهای واقع بر این مسیرها مطابق رابطه‌های ۲ تا ۴ محاسبه می‌شود.

جدول ۱۱- شناسایی حوادث آغازگر خروج آبشاری با استفاده از روش حداکثر جریان

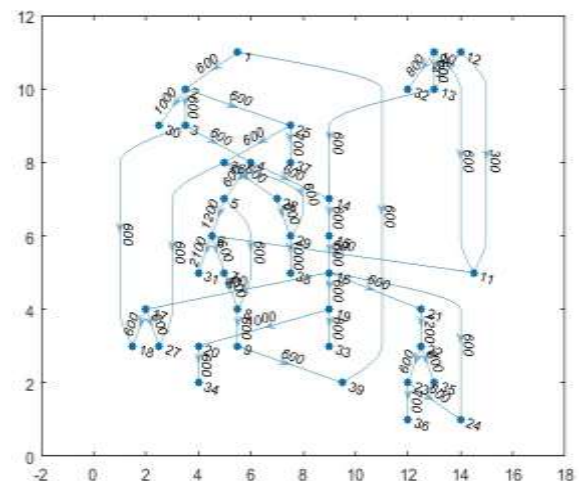
رتبه	نام شاخه	نوع شاخه	ظرفیت نامی (مگاوات آمپر)	حداکثر جریان نرمالیزه
۱	۱۵-۱۶	خط	۶۰۰	۹/۳۳
۲	۱۴-۱۵	خط	۶۰۰	۶/۲۸
۳	۴-۱۴	خط	۶۰۰	۶/۲۴
۴	۱۶-۱۹	خط	۶۰۰	۶/۱۴
۵	۱۶-۲۱	خط	۶۰۰	۶/۰۵
۶	۲۱-۲۲	خط	۱۲۰۰	۵/۷۲
۷	۲۳-۳۶	ترانسفورماتور	۷۰۰	۴/۷۳
۸	۲۲-۳۵	ترانسفورماتور	۸۰۰	۴/۵۴
۹	۳-۴	خط	۶۰۰	۴/۳۶
۱۰	۲۲-۲۳	خط	۶۰۰	۴/۱۸
۱۱	۱۹-۳۳	ترانسفورماتور	۸۰۰	۳/۵۵
۱۲	۲۰-۳۴	ترانسفورماتور	۶۰۰	۳/۴۱
۱۳	۴-۵	خط	۶۰۰	۳/۳۷
۱۴	۱۹-۲۰	ترانسفورماتور	۱۰۰۰	۳/۲۴
۱۵	۲۹-۳۸	ترانسفورماتور	۱۰۰۰	۳/۱۶
۱۶	۹-۳۹	خط	۶۰۰	۳/۱
۱۷	۸-۹	خط	۶۰۰	۳/۰۵
۱۸	۶-۳۱	ترانسفورماتور	۲۱۰۰	۱/۹
۱۹	۵-۶	خط	۱۲۰۰	۱/۹
۲۰	۵-۸	خط	۶۰۰	۱/۴۹
۲۱	۲۶-۲۹	خط	۶۰۰	۱/۲۱
۲۲	۲۸-۲۹	خط	۶۰۰	۰/۹۶
۲۳	۲۵-۳۷	ترانسفورماتور	۷۰۰	۰/۹۳
۲۴	۷-۸	خط	۶۰۰	۰/۷۸
۲۵	۲۵-۲۶	خط	۶۰۰	۰/۶۷
۲۶	۱۳-۱۴	خط	۶۰۰	۰/۲۶
۲۷	۱۲-۱۳	ترانسفورماتور	۳۰۰	۰/۲۵

جدول ۱۱ رده‌بندی خطوط و ترانسفورماتورهای مهم شبکه مورد مطالعه را براساس بیشترین جریان عبوری نرمالیزه \bar{C}_{11}^* نشان می‌دهد. طبق اعتبارسنجی روش ارزیابی

افزایش می‌یابد. در این حالت، تجزیه و تحلیل هر حادثه و پیدا کردن آن به صورت محاسباتی ممکن نیست. بنابراین یک تابع هدف تعریف شده، هر رویدادی که دارای ارزشی بیش از تابع هدف باشد، به عنوان رویداد نادر در نظر گرفته می‌شود [۱۴]. در این روش تابع هدف، تعداد تکرار پخش بار است. رویدادهای نادر در اثر وقوع پیشامدهای محتمل، باعث واگرا شدن و فروپاشی سیستم می‌شوند. با رجوع به نتایج پخش بار شبکه مورد مطالعه، تابع هدف برابر ۱۲ تکرار در نظر گرفته می‌شود. در لیست رتبه‌بندی این روش، ۱۵ رویداد با پتانسیل ایجاد خطای آبشاری شناسایی شده‌اند. در این روش، وقوع پیشامد دوتایی (خروج خط ۵-۸ و ۷-۶) می‌تواند به عنوان آسیب‌پذیرترین رویداد با ۱۳ تکرار پخش بار، باعث واگرا شدن و فروپاشی سیستم شود. این روش قادر است آسیب‌پذیرترین حادثه‌های آغازگر خروج آبشاری را که توسط روش ارزیابی ریسک و پلیام فاین در جدول ۹ به دست آمده، در رتبه‌های ۳، ۶، ۱۱ و ۱۲ شناسایی کند.

۴-۶- روش پیشنهادی حداکثر جریان

طبق توضیحات بخش (۲)، روش پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB با اجرای فرمان graphmaxflow مدل شده، گراف شبکه آزمون به صورت شکل (۵) ترسیم می‌شود. در گراف شکل (۵) تعداد ۲۵۸ مسیر نشان داده شده است.



شکل ۵- دیاگرام گراف شبکه ۳۹ باسه

در این روش، هدف، ارسال حداکثر جریان ممکن از منبع به مقصد با رعایت قیود اشاره شده در بخش ۲ است. بنابراین با اجرای الگوریتم، از ۲۵۸ مسیر گراف، ۳۵ مسیر با منبع ژنراتور و مقصد بار انتخاب می‌شود. این مسیرها بین ۸ باس تولید و ۱۴ باس مصرفی قرار دارند. برای هر یک از این مسیرها در

جدول ۱۲- مقایسه کمی و کیفی روش‌ها در رتبه‌بندی و شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری

ردیف	نام روش	مزایا	معایب	شناسایی خطاهای آغازین	زمان محاسبه (ثانیه)
۱	روش یکایک‌شماری	دارای قابلیت اطمینان و دقت بالاست و هیچ موردی نادیده گرفته نمی‌شود	بسیار وقت‌گیر و دشوار است	همه رویدادهای آغازین را شناسایی می‌کند	*
۲	روش غربالگری	به سبب نادیده گرفتن جزئیات آبخار، دارای سرعت مناسبی در پیش‌بینی خروج آبخاری است	به دلیل فرمول‌بندی روش، زمان انجام محاسبات آن نسبت به روش حداکثر جریان بیشتر است	شناسایی ۹ خطا در ۱۵ رتبه اول	۷/۹۳
۳	روش تئوری شبکه پیچیده	دقت آن نسبت به روش غربالگری بیشتر است	به دلیل در نظر گرفتن تمام مسیرهای گراف شبکه، زمان محاسبات آن نسبت به روش حداکثر جریان طولانی است	شناسایی ۱۰ خطا در ۱۵ رتبه اول	۲۰/۵۲
۴	روش مبتنی بر آنتروپی	دارای دقت مناسبی در رتبه‌بندی رخدادها آبخاری نسبت به سایر روش‌هاست	سرعت محاسبات آن خیلی کم است	شناسایی ۱۱ خطا در ۱۵ رتبه اول	۵۹/۹۵
۵	روش خوشه‌بندی	تجسم ساده از وضعیت شبکه در رتبه‌بندی سریع رخدادها آبخاری	دقت آن کم است و قابلیت شناسایی تعداد محدودی از خطاهای آغازین وقایع آبخاری را دارد	شناسایی ۴ خطا در ۱۵ رتبه اول	۱۳/۸۳
۶	روش حداکثر جریان	تئوری ساده و دارای سرعت محاسبات خیلی سریع	دقت آن نسبت به روش آنتروپی کمتر است	شناسایی ۱۰ خطا در ۱۵ رتبه اول	۳/۵۱

* نسبت به سایر روش‌ها زمان محاسبات آن بسیار زیاد است.

روش‌ها در پیشگیری از خروج آبخاری، مقایسه توانمندی‌ها و کمبودهای روش‌های مختلف شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری برای شبکه آزمون در جدول ۱۲ و شکل‌های (۶) و (۷) بر مبنای این شاخص‌ها آمده است.

بر اساس مقایسه انجام شده، به کارگیری روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های دیگر مناسب‌تر است؛ زیرا اولاً این روش در شناسایی ۱۰ رویداد آغازین در ۱۵ رتبه اول در لیست رتبه‌بندی موفقیت‌آمیز بوده است. از این رو این روش از دقت قابل قبولی برخوردار است. به عبارت دیگر، به جای جست‌وجوی ۱۰۳۵ حالت برای پیدا کردن پیشامد $N-2$ به عنوان رویداد آغازین، می‌توان آن را در ۱۵ تکرار اول یافت. ثانیاً این روش در کاهش محدوده فضای جست‌وجو در شناسایی آسیب‌پذیرترین حادثه‌های آغازگر (۴ رویداد برتر جدول ۹) موفق بوده است؛ زیرا توانسته است صد درصد این رویدادها را در ۱۵ تکرار اول لیست رتبه‌بندی شناسایی کند، در صورتی که در روش‌های خوشه‌بندی و غربالگری، میزان شناسایی این رویدادها در ۱۵ تکرار اول لیست رتبه‌بندی به ترتیب به ۵۰ و ۲۵ درصد کاهش یافته و در

ریسک ویلیام فاین، حدود ۶۶ درصد خطوط و ترانسفورماتورها در این جدول به‌عنوان حادثه آغازگر خروج آبخاری شناسایی شده‌اند. همچنین آسیب‌پذیرترین حادثه‌های آغازگر در رتبه‌های ۸، ۱۱، ۱۲ و ۱۵ به ترتیب با حداکثر جریان نرمالیزه شده ۴/۵۴، ۳/۵۵، ۳/۴۱ و ۳/۱۶ شناسایی شده‌اند.

۵- مقایسه روش‌های شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری

همان‌گونه که در مرجع [۸] بیان شد، خروج‌های آبخاری دارای مکانیزم‌های پیچیده‌ای هستند و خرابی‌ها می‌توانند به دلایل مختلفی همچون شرایط آب‌وهوایی و عوامل انسانی آغاز شوند. بنابراین استراتژی‌های پیشگیری از خروج آبخاری قبل از شروع حوادث ناگهانی و پی‌درپی به سرعت محاسبات و همچنین پیش‌بینی دقیق آبخار نیاز دارد. از این رو با اقدامات اصلاحی سریع تا حدود زیادی می‌توان شدت و هزینه خاموشی ناشی از خروج‌های آبخاری را کاهش داد. در این مقاله با توجه اهمیت موضوع سرعت محاسبات، کاهش محدوده فضای جست‌وجو و دقت نتایج

گسترده‌ای از خطرها و حوادث در شبکه قدرت، نیاز به افزایش سرمایه‌گذاری در توسعه شبکه انتقال به‌منظور کاهش نرخ خرابی تجهیزات و تجزیه و تحلیل آسیب‌پذیری سیستم قدرت از جمله شناسایی سریع خطاهای آغازین وقایع آبخاری، امری اجتناب‌ناپذیر است.

در این مقاله با پیشنهاد یک روش جدید، حوادث آغازین وقایع آبخاری در سیستم قدرت با سرعت بیشتر و دقت قابل قبول، قابل شناسایی هستند. روش پیشنهادی با شناسایی سریع خطاهای آغازین وقایع آبخاری در حالت آفلاین و استفاده آن در هنگام بهره‌برداری در حالت وضعیت عادی شبکه، قادر است قبل از وقوع خروج‌های آبخاری و ایجاد خاموشی، از بروز آن‌ها جلوگیری کند. این روش روی یک شبکه ۳۹ باسه IEEE پیاده‌سازی و نتایج آن از نظر دقت، کاهش فضای جست‌وجو و سرعت محاسبات با سایر روش‌ها مقایسه شد. نتایج عددی نشان می‌دهد صرفاً دقت نتایج در روش‌های مختلف کافی نیست، بلکه ترکیبی از دقت و سرعت محاسبات روش‌ها می‌تواند گام مهم و مؤثری در شناسایی سریع خطاهای آغازین با هدف پیشگیری از حوادث ناگهانی و پی‌درپی و کاهش ریسک آسیب‌پذیری شبکه داشته باشد.

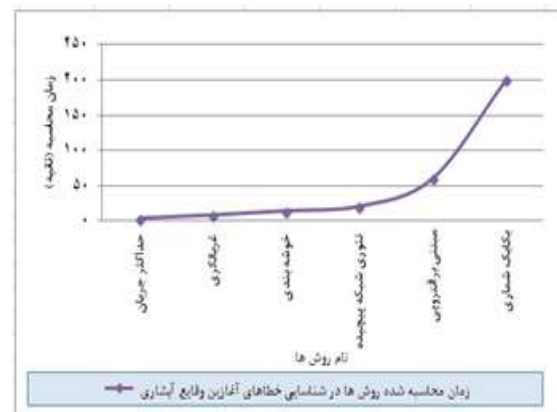
به‌منظور اعتبارسنجی نتایج به‌عنوان مبنایی برای بررسی دقت روش‌های شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری، از روش یکایک‌شماری مبتنی بر تکنیک ارزیابی ریسک ویلیام فاین استفاده شده است. این تکنیک با کاهش ابعاد و بار محاسباتی روش یکایک‌شماری قادر است خطوط و ترانسفورماتورهای حیاتی را که می‌تواند به‌عنوان حادثه آغازگر تلقی شود، براساس مقیاس نمره ارزیابی ریسک شناسایی کند و براساس میزان مشارکت آن‌ها در وقوع پیشامدهای محتمل $N-K(1 < K \leq 3)$ رتبه‌بندی نماید.

در کارهای آتی از نتایج روش پیشنهادی می‌توان در انجام عملیات اصلاحی مناسب و توسعه شبکه در بخش‌های آسیب‌پذیر با هدف کاهش شدت و هزینه خاموشی‌های سراسری استفاده کرد.

روش تئوری پیچیده هیچ رویدادی شناسایی نشده است. ثالثاً این روش یکی از سریع‌ترین روش‌ها برای شناسایی رویدادهای آغازین است؛ زیرا ۳/۵۱ ثانیه طول می‌کشد تا لیست رتبه‌بندی خطاهای آغازین را استخراج کند، در صورتی که روش یکایک‌شماری دقیق‌ترین روش است و هیچ رویداد آغازینی را حذف نمی‌کند؛ اما زمان محاسبات آن طولانی و شبیه‌سازی آن غیر قابل اجرا است. برای محاسبه زمان لازم جهت استخراج نتایج هر یک از روش‌های شناسایی خطاهای آغازین، از کامپیوتری با پردازنده Intel Core i7, 2.3 GHZ, 8 GB RAM در محیط نرم‌افزار



شکل ۶- مقایسه دقت روش‌ها در شناسایی خطاهای آغازین



شکل ۷- مقایسه سرعت روش‌ها در شناسایی خطاهای آغازین

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به رشد روزافزون بار و همچنین مواجهه با طیف

مراجع

[1] D.P. Nedic, I. Dobson, D.S. Kirschen, B.A. Carreras and V.E. Lynch, "Criticality in a cascading failure blackout model", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 28, No. 9, November 2006, pp. 627-633.

[2] G. Doorman, K. Uhlen, G. Kjolle and E.S. Huse, "Vulnerability Analysis of the Nordic Power System", IEEE General Meeting Power & Energy Society, Montreal, Que., Canada, June 2006.

[3] P. Hines, I. Dobson and P. Rezaei, "Cascading Power Outages Propagate Locally in an Influence Graph that is not the Actual Grid Topology", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 32, No. 2, March 2017, pp. 958 – 967.

[4] M. Wei, Z. Lu and W. Wang, "Dominoes with communications: On characterizing the progress of cascading failures in Smart Grid", IEEE International Conference on Communications (ICC) for the Smart Grid, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016.

[5] J. Yan, H. He and Y. Sun, "Integrated security analysis on cascading failure in complex networks," IEEE Transactions on Information Forensics and Security, Vol. 9, No. 3, 2014, pp. 451-463.

[۶] علی حسامی نقشبندی، صابر ارمغانی و سید محمد شهرتاش، «حل مسئله طرح توسعه شبکه انتقال به منظور کاهش اثرات نامطلوب خرابی آبخاری با رویکرد تحلیل و ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌های انتقال»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۵۸، پاییز ۱۳۹۸، صفحه ۱۴۳-۱۵۷.

[۷] جمشید آقایی، امین رحیمی رضایی و محمدرضا کریمی، «هماهنگی نیروگاه‌های بادی و دستگاه‌های ذخیره‌ساز سیستم قدرت در مسئله برنامه‌ریزی امنیت-مقیّد مشارکت واحدها با استفاده از بهینه‌سازی استوار»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۲۰۷-۲۲۰.

[8] H. Guo, C. Zheng, H. Ching and T. Fernando, "A critical review of cascading failure analysis and modeling of power system", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 80, 2017, pp. 9-22.

[9] Z. Guohua, W. Ce, Z. Jianhua, Y. Jingyan, Z. Yin and D. Manyin, "Vulnerability Assessment of Bulk Power Grid Based on Complex Network Theory", 3th International Conference on Deregulation, Restructuring, and Power Technologies, Nanjing, China, April 2008, pp. 2443-2451.

[10] W. Kröger and E. Zio, "Vulnerable Systems", Springer-Verlag London Limited 2011.

[11] C. Pang, "Fast Detection and Mitigation of Cascading Outages in The Power System", Ph.D. Thesis, Dept. Electrical and Computer Engineering, University of Texas A&M, December 2011.

[12] C. Matthew Davis and T. J. Overbye, "Multiple Element Contingency Screening", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 3, August 2011, pp. 1294-1301.

[13] H. Song and M. Kezunovic, "A new analysis method for early detection and prevention of cascading events", Electric Power System Research, Vol. 77, No. 8, June 2007, pp. 1132-1142.

[14] F. Fonteneau-Belmudes, D. Ernst and L. Wehenkel, "Cross-entropy based rare-event simulation for the identification of dangerous events in power systems", 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS-08), Rincon, Puerto Rico, 2008.

[15] G. Kron, Diakoptics: The Piecewise Solution of Large-Scale Systems, MacDonal & Co Publishing, New York, NY, USA, 1963.

[16] N. Bhatt and et al, "Assessing Vulnerability to Cascading Outages", IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Seattle, WA, USA, March 2009, pp.1-9.

[17] Andrea M. Rei, Marcus Th. Schilling and Albert C. G. Melo, "Monte Carlo Simulation and Contingency Enumeration in Bulk Power Systems Reliability Assessment", 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH, Stockholm, Sweden, June 2006.

[18] H. Suh and C.K. Chang, "Algorithms for the Minimal Cutsets Enumeration of Networks by Graph Search and Branch Addition", 25th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN), Florida, USA, 2000, pp. 100-107.

[19] S. Armaghani, A. Hesami Naghshbandy and S.M. Shahrtash, "A novel multi-stage adaptive transmission network expansion planning to countermeasure cascading failure occurrence", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 115, February 2020.

[20] C. Caro-Ruiz, J. Ma, D.J. Hill, A. Pavas and E. Mojica-Nava, "A minimum cut-set vulnerability analysis of power networks", Sustainable Energy, Grids and Networks (SEGAN), Vol. 21, March 2020.

[۲۱] مهدی درفشیان مرام و نیما امجدی، «جلوگیری از رخداد ناپایداری‌های گذرا و ولتاژ با استفاده از یک طرح اقدامات اصلاحی مبتنی بر قطع تولید و حذف بار»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۶، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۱۳۷-۱۵۰.

[22] E. Sekhavati, M. Mohammadzadeh, I. Mohammadfam and A. Faghihi Zarandi, "Noise Pollution Risk Assessment in Cement Factory of Larestan Using William Fine Method", Journal of Applied Environmental and Biological Sciences, Vol. 5, No. 8, 2015, pp. 208-213.

[۲۳] سید علی جوزی، نعمت‌الله جعفرزاده حقیقی فرد و نگار افضلی بهبهانی، «کاربرد روش ویلیام فاین در شناسایی و طبقه‌بندی ریسک‌های ایجادشده از دکل‌های ولتاژ بالا در مناطق شهری»، اولین کنفرانس ملی بهداشت، ایمنی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر، آبان ۱۳۹۱.

[24] A. Abedi, L. Gaudard and F. Romerio, "Review of major approaches to analyze vulnerability in power system", Journal of Reliability Engineering & System Safety, Vol. 183, March 2019, pp. 153-172.

[25] A.V. Goldberg and R.E. Tarjan, "A New Approach to the Maximum-Flow Problem", Journal of the Association for Computing Machinery, Vol. 35, No. 4, October 1988, pp. 921-940.

[26] M. Josefsson and M. Mützell, "Max Flow Algorithms Ford-Fulkerson, Edmond-Karp, Goldberg-Tarjan Comparison in regards to practical running time on different types of randomized flow networks", Degree Project in Computer Science, DD143X, Sweden, Stockholm, 2015.

[27] J. Fang, C. Su, Z. Chen, H. Sun and P. Lund, "Power System Structural Vulnerability Assessment based on an Improved Maximum Flow Approach", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 2, March 2018, pp. 777-785.

[28] A. Dwivedi, X. Yu and P. Sokolowski, "Analyzing power network vulnerability with maximum flow based centrality approach", 8th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Osaka, Japan, Jul. 2010, pp. 336-341.

[29] Mathworks, "graphmaxflow," Bioinformatics Toolbox. [Online] Available: <http://www.mathworks.com/help/bioinfo/ref/graphmaxflow.html>.

[30] J.V. Varnere, Occupational risk analysis of Samandile pipe manufacturing in constructional phase: of Strasburg University. 1(9): 109-21, 2007.

[31] H.H.Goh, and B.C.Kok, "Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) in Load Shedding Scheme for Electrical Power System", 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Prague, Czech Republic, May 2010.

[۳۲] سید علی جوزی، نعمت‌الله جعفرزاده حقیقی فرد و نگار افضلی بهبهانی، «شناسایی و ارزیابی ریسک مخاطرات ناشی از خطوط انتقال برق ولتاژ بالا در مناطق مسکونی با استفاده از روش تجزیه و تحلیل حالات شکست و اثرات آن (FMEA)»، فصل‌نامه انجمن علمی بهداشت محیط ایران، دوره ۷، شماره ۱، بهار ۱۳۹۳، صفحه ۵۵-۶۴.

[33] Matpower Home Page, Online: "www.Pserc.cornell.edu/matpower".