

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۲۱

شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری با استفاده از روش تجزیه و تحلیل حالات خطا و اثرات آن

مجتبی فکری^۱، جواد نیکوکار^{۲*}، گئورگ قره‌پتیان^۳

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

fekri1349@gmail.com

^۲ استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه، ساوه، ایران

j_nikoukar@iau-saveh.ac.ir

^۳ استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

grptian@aut.ac.ir

چکیده: خطوط و ترانسفورماتورهای انتقال از مهم‌ترین تجهیزات شبکه قدرت اند که خروج آن‌ها می‌تواند منجر به خروج‌های بی‌درپی بعدی شود. در این مقاله تلاش شده است با در نظر گرفتن یک مدل شبیه‌سازی خروج آبخاری، خطوط یا ترانسفورماتورهایی که بهره‌برداران با عملیاتی مانند قطع بار و یا کاهش تولید نتوانند از اضافه‌بار شدن آن‌ها جلوگیری کنند، شناسایی شوند. همچنین از روش ارزیابی ریسک تجزیه و تحلیل حالات خطا و اثرات آن برای شناسایی خطوط و ترانسفورماتورهای بحرانی شبکه که به‌عنوان حادثه آغازگر خروج‌های آبخاری شناخته می‌شود، استفاده می‌شود. این روش با ارزیابی سه معیار شدت اثر خطر، احتمال وقوع خطر و احتمال کشف خطر، عدد اولویت ریسک ترکیبات پیشامدهای ممکن ($N-K (1 < K \leq 3)$ در شبکه را که منجر به اضافه‌بار شدن خطوط یا ترانسفورماتورهای انتقال می‌شود، محاسبه و طبقه‌بندی می‌کند. اطلاعات اولیه این روش بر مبنای محاسبه سه شاخص بارگذاری وزندهی شده خطوط، ترانسفورماتورها و همچنین پروفایل ولتاژ شینه‌ها به دست می‌آید. روش پیشنهادی در شبکه استاندارد ۳۹ شینه IEEE پیاده‌سازی و نتایج آن در مقایسه با سایر روش‌ها، صحت، کارایی و دقت آن را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: خطاهای آغازین، تجزیه و تحلیل حالات خطا، اولویت ریسک، آسیب‌پذیری، ارزیابی ریسک، خروج آبخاری.

۱. مقدمه

خطوط پربار شناخته می‌شود، تمرکز اصلی این مقاله روی این موضوع است. پیاده‌سازی مدل و روش پیشنهادی بر روی شبکه ۳۹ شینه IEEE نشان می‌دهد که مهم‌ترین موضوع در به‌کارگیری این روش، کارایی، دقت محاسبات و کاهش محدوده فضای جست‌وجو در شناسایی حادثه آغازگر زنجیره خروج آبخاری در شبکه در مقایسه با سایر روش‌هاست.

در ادامه این مقاله، در بخش دوم به مرور ادبیات موضوع و در بخش سوم به جنبه‌های نوآوری مقاله و در بخش چهارم به ارائه مدل پیشنهادی خروج آبخاری و روندنمای شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری با روش پیشنهادی پرداخته شده است. تابع هدف آسیب‌پذیری در بخش پنجم توضیح داده شده است. در بخش ششم، روش پیشنهادی رتبه‌بندی و ارزیابی ریسک سناریوهای خروج‌های آبخاری ارائه شده و شبیه‌سازی و مطالعه موردی در بخش هفتم صورت پذیرفته است. در بخش هشتم، به مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های موجود پرداخته شده و در نهایت در بخش نهم نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲. مرور ادبیات موضوع

تحقیقات بسیاری در کشورهای مختلف به منظور مدل‌سازی خروج‌های پی‌درپی و شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری در شبکه قدرت انجام شده است. در مرجع [۶] انواع مدل‌های تحلیل و شبیه‌سازی خروج‌های آبخاری در سیستم قدرت آمده است. در این مدل‌ها، روش‌ها و سازوکارهای مختلفی به کار رفته، اما در هیچ‌یک از آن‌ها شبکه به صورت دقیق مدل نشده است. مدل اپا^۳ و مدل خطای پنهان بر پایه پخش بار dc هستند و نمی‌توانند به‌طور دقیق گسترش خاموشی در سیستم‌های واقعی را توصیف کنند. مدل منچستر اگرچه بر پایه پخش بار ac است، نمی‌تواند رشد آهسته بار را در شبیه‌سازی خطاهای آبخاری در نظر بگیرد. محاسبات روش یکایک شماری^۴ بسیار وقت‌گیر و دشوار است. این روش برای استخراج تمام ترکیبات ممکن از پیشامدهای N-K در سیستم‌های قدرت استفاده می‌شود. در این روش هرچه مرتبه پیشامدها (K) بالاتر رود، زمان محاسبات افزایش می‌یابد [۷ و ۸]. در روش خوشه‌بندی^۵ با تجزیه و تحلیل خطوط و ترانسفورماتورها با جریان‌های بالا واقع بر روی کات‌ست‌ها، شروع رخداد آبخاری را به سرعت در محیط‌های برون‌خط^۶ و برخط^۷

سیستم‌های قدرت در جوامع امروز نقش مهمی دارند و اثرات نامطلوب رخداد وقایع آبخاری شامل خطا و حادثه در اجزای اصلی سیستم قدرت، باعث کاهش استحکام بخشی سیستم شده و احتمال افزایش خروج‌های بعدی و همچنین خاموشی در سطح گسترده را در پی خواهد داشت [۱ و ۲]. سیستم‌های قدرت معمولاً نسبت به اختلالات کوچک مقاوم‌اند، اما ترکیبی غیرمنتظره از خطاهای گاهی زنجیره طولانی از خروج‌های آبخاری را ایجاد می‌کنند که می‌تواند 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 قابلیت اطمینان شبکه می‌شود [۵]. از نتایج دیگر این اقدام در شناسایی بخش‌های آسیب‌پذیر، خطوط 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 به ما کمک کند. همچنین اگر بتوان رخداد وقوع خطاهای آغازین وقایع آبخاری را با صحت و دقت بیشتری شناسایی کرد، می‌توان با انجام سریع اقدامات اصلاحی^۱ همچون کاهش بار، قطع تولید، جزیره‌سازی و... گام مؤثری در جلوگیری از به وجود آمدن خروج‌های پی‌درپی برداشت. همین امر ضرورت پرداختن به موضوع شناسایی خطاهای آغازین را بیش از پیش آشکار می‌سازد. در این مقاله با معرفی و شبیه‌سازی مدل پیشنهادی خروج پی‌درپی بر مبنای محاسبه حد مجاز جریان هادی خط برای تمامی پیشامدهای محتمل $N-K (1 < K \leq 3)$ ، سناریوهای مناسب برای شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری تولید می‌شود. برای دستیابی به هدف مورد نظر، روش تجزیه و تحلیل حالات خطا و اثرات آن^۲ ارائه می‌شود. برای عملکرد مناسب این روش، یک تابع هدف چندمتغیره برای یافتن مؤثرترین سناریوهای آسیب‌پذیر استفاده می‌شود. از این‌رو خطوط و ترانسفورماتورهایی که در اثر وقوع پیشامد محتمل N-2 یا N-3 ناشی از شرایط جوی یا عوامل انسانی در وضعیت بحرانی قرار گرفته و خروجشان می‌تواند منجر به وقوع حوادث پی‌درپی و در نهایت ایجاد خاموشی گسترده در شبکه شود، به‌عنوان حادثه آغازگر در این روش شناسایی می‌شوند. از آنجا که عامل اصلی اغلب خروج‌های آبخاری

3. ORNL-PSerc-Alaska (OPA)

4. Enumeration Method

5. Clustering Method

6. Offline

7. Online

1. Remedial Action Scheme

2. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)

۳. جنبه‌های نوآوری مقاله

- جنبه‌های نوآوری این مقاله شامل گزینه‌های زیر است:
- ارائه یک مدل کارآمد و کاربردی مبتنی بر محاسبه حد جریان حرارتی مجاز هادی خطوط انتقال پربار در مدل‌سازی خروج آبخاری با هدف کاهش فضای جست‌وجو در شناسایی سناریوهای خطرناک وقایع آبخاری نسبت به روش یکایک شماری؛
- ارائه یک تابع هدف چندمعیاره برای یافتن مؤثرترین سناریوهای آسیب‌پذیر خروج آبخاری و تأثیرگذار در وضعیت بهره‌برداری شبکه؛
- ارزش‌گذاری کمی و کیفی معیارهای تابع هدف آسیب‌پذیری با استفاده از روش سلسله‌مراتبی^۶؛
- ارائه یک روش جدید برای ارزیابی و ارزش‌گذاری ریسک سناریوهای خروج آبخاری با هدف شناسایی دقیق حادثه‌های آغازگر در مقایسه با روش‌های موجود.

۴. مدل پیشنهادی خروج‌های آبخاری

این مدل با معرفی شاخص‌های مناسب و بر اساس شبیه‌سازی صورت گرفته در تمامی حالات پیشامدهای محتمل ($3 < K < N$) شبکه که منجر به اضافه‌بار شدن خطوط می‌گردد، سناریوهای لازم را برای شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری تولید می‌کند. خطوط پربار می‌تواند به‌عنوان حادثه آغازگر اولیه، یکی از اصلی‌ترین علل خروج‌های پی‌درپی و ایجاد خاموشی در شبکه تلقی گردد. لذا در مدل پیشنهادی برای شبیه‌سازی رخداد آبخاری خطوط، شاخص حد جریان حرارتی مجاز تعریف می‌شود. جریان مجاز به بالاترین جریانی اطلاق می‌گردد که عبور مداوم آن از هادی فازهای خطوط تغییری در مشخصات فنی آن‌ها به وجود نیاورد [۱۵]. مقدار افزایش این جریان تابعی از میزان بارگذاری الکتریکی خطوط انتقال است. جریان عبوری بیش از حد مجاز در هادی‌ها به‌خصوص در روزهای گرم سال، باعث افزایش تلفات، کاهش فلش هادی‌ها شده و منجر به خروج اجباری خطوط در همان مرحله اول و ایجاد فرایند خرابی پی‌درپی می‌گردد. بر اساس استاندارد IEEE 738 جریان مجاز هادی ACSR خطوط انتقال به‌صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_{avg})}} \quad (1)$$

که q_c حرارت دفع شده در اثر جابه‌جایی برحسب وات بر متر است

6. Analytic Hierarchy Process (AHP)

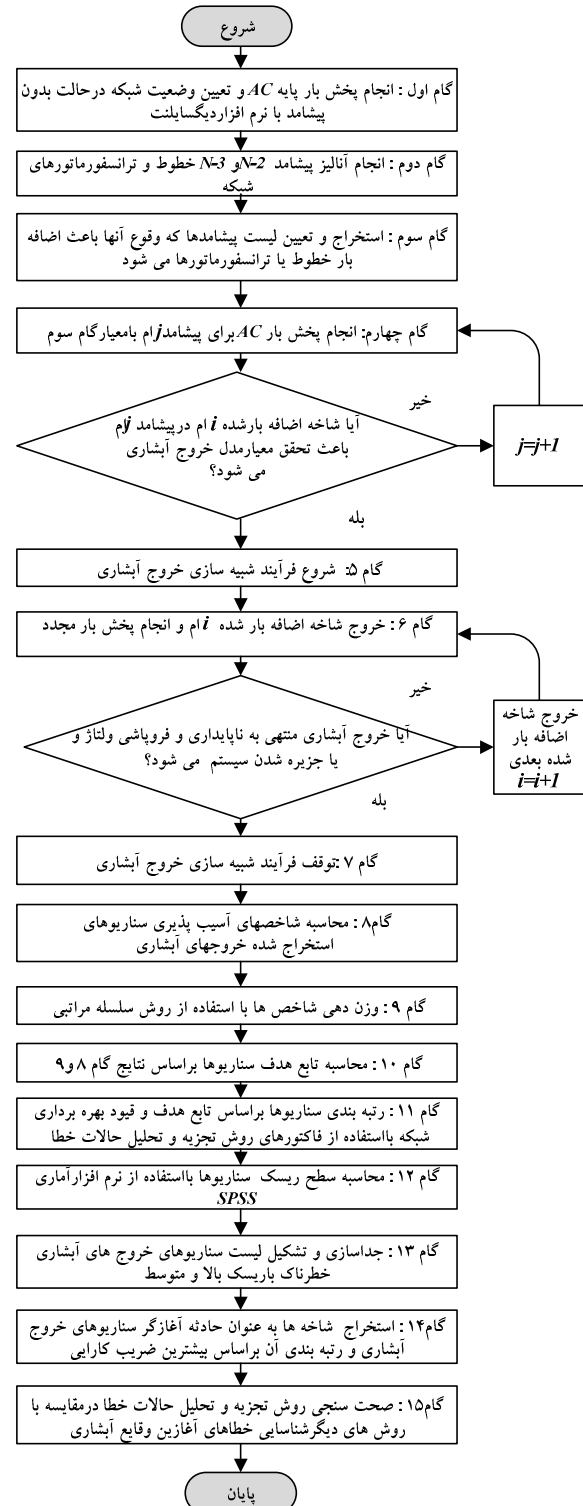
شبکه رتبه‌بندی و تجسم می‌کند [۹ و ۱۰]. الگوریتم مبتنی بر روش آنتروپی^۱ عمدتاً برای استخراج احتمال رخداد وقایع یا حوادث نادر استفاده می‌شود [۱۱]. روش ارزیابی شاخص چندمعیاره برای شناسایی خطوط مستعد برای وقایع آغازین خطاهای آبخاری استفاده می‌شود [۱۲]. در روش جست‌وجوی راهرو موازی^۲ تقسیم‌بندی توپولوژی آن بر مبنای تئوری گراف است و برای شناسایی سریع تجهیزات آسیب‌پذیر بعد از خروج هر خط استفاده می‌شود [۱۳]. روش گراف خطای آبخاری^۳ یک روش ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه انتقال^۴ است. این روش بر اساس گراف‌های وزن‌دهی شده حاصل از زنجیره خطا و به‌کارگیری مجموعه‌ای از شاخص‌های نظریه شبکه پیچیده^۵ نسبت به شناسایی شاخه‌های آسیب‌پذیر شبکه اقدام می‌کند [۱۴]. جدول (۱) مقایسه مزایا و معایب بخشی از مدل‌ها و روش‌های موجود شناسایی خروج آبخاری را نشان می‌دهد.

جدول (۱): مقایسه مزایا و معایب مدل‌ها و روش‌های شناسایی خروج

ردیف	مزایا	معایب	مدل‌ها و روش‌های شناسایی خروج آبخاری
۱	تمرکز این مدل بر مدیریت خاموشی در اثر برخورد خط با پوشش گیاهی است.	بر پایه پخش بار dc است و نمی‌تواند به‌طور دقیق گسترش خاموشی در سیستم‌های واقعی را توصیف کند.	مدل اپا
۲	بر پایه پخش بار ac است و از روش‌های مونت کارلو برای ارزیابی ریسک استفاده می‌کند.	نمی‌تواند رشد آهسته بار را در شبیه‌سازی خطاهای آبخاری در نظر بگیرد.	مدل منجستر
۳	دارای قابلیت اطمینان بالا، دقت بالاست و هیچ موردی نادیده گرفته نمی‌شود.	اجرای روش بسیار وقت‌گیر و دشوار است.	روش یکایک شماری
۴	فرایند گسترش خطای آبخاری را به‌صورت ساده و قابل فهم بیان می‌کند.	اجرای روش برای شبکه‌های قدرت بزرگ پیچیدگی‌های زیادی دارد.	روش گراف خطای آبخاری
۵	دارای سرعت محاسبات بالا در شناسایی خطای آبخاری	ویژگی‌های الکتریکی خط مانند راکتانس یا امپدانس خط را در نظر نمی‌گیرد.	روش جست‌وجوی راهرو موازی

1. Cross Entropy-Based Method
 2. Parallel Corridor Search Method
 3. Cascading Faults Graph (CFG)
 7. Transmission Network Vulnerability (TNV)
 5. Complex Network Theory (CNT)

شاخص‌های روش پیشنهادی تجزیه و تحلیل خطا و اثرات آن انجام و حادثه‌های آغازگر بر اساس بیشترین ضریب کارایی حاصل از محاسبه عدد اولویت ریسک سناریوها، شناسایی و رتبه‌بندی می‌شوند. در گام آخر، صحت‌سنجی و دقت روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های دیگر شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری سنجیده می‌شود.



شکل (۱): روندنمای شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری با

استفاده از روش تجزیه و تحلیل خطا و اثرات آن

که به عوامل مختلفی همچون فشار هوا، قطر هادی، تفاضل درجه حرارت هادی، محیط اطراف و سرعت وزش باد بستگی دارد. q_f میزان حرارتی است که از طریق تشعشعی از سطح هادی دفع می‌گردد و برحسب وات بر متر است. این مقدار تابعی از ضریب سطحی، درجه حرارت هادی، محیط اطراف و همچنین قطر هادی است. q_s حرارت تولیدی توسط تابش مستقیم خورشید برحسب وات بر متر است. این معیار یکی از عوامل مؤثری است که گرم شدن هادی‌ها را به دنبال دارد و به زاویه تابش خورشید بستگی دارد. $R(T_{avg})$ مقاومت متوسط هادی است.

بر اساس جریان مجاز هادی، ثابت زمانی حرارتی هادی به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$\tau = \frac{(T_f - T_i) \cdot mC_p}{R(T_c) \cdot (I_f^2 - I_i^2)} \quad (2)$$

که در آن T_i دمای حالت پایدار قبل از افزایش پله‌ای جریان مجاز هادی و T_f دمای هادی بعد از افزایش پله‌ای جریان مجاز هادی برحسب سانتی‌گراد است. mC_p ظرفیت گرمایی آلیاژ هادی و $R(T_c)$ مقاومت هادی در میانگین دمای هادی برحسب اهم بر فوت است. ثابت زمانی هادی معمولاً یک مدت زمان کوتاه و در حدود چند دقیقه است.

در این مقاله مبنای عملکرد رله‌های حفاظتی خطوط و آغاز خروج‌های پی‌درپی، نقض حد جریان حرارتی مجاز هادی خط فرض می‌شود. لذا رله‌ها در مرحله رسیدن به این جریان از خود واکنش نشان داده و پس از زمان معینی خط را از مدار خارج می‌کنند و معمولاً زمان عملکرد رله‌ها آنی در نظر گرفته می‌شوند.

روندنمای مدل پیشنهادی شبیه‌سازی خروج آبخاری و نیز روش پیشنهادی برای تعیین خطاهای آغازین وقایع آبخاری در شکل (۱) مشاهده می‌شود. این شکل دارای پنج بخش اصلی و پانزده گام است. در بخش اول (گام اول تا چهارم)، سناریوهایی که با انجام تجزیه و تحلیل پیشامد N-2 و یا N-3 در پخش بار ac باعث اضافه‌بار شدن و خروج شاخه بعدی می‌شود، استخراج می‌گردد. در بخش دوم (گام پنجم تا هفتم)، با انجام فرآیند شبیه‌سازی، سناریوهایی که مدل پیشنهادی خروج آبخاری را محقق می‌بخشد، به صورت لیست سناریوهای خروج آبخاری استخراج می‌شود. در بخش سوم (گام هشتم تا دهم)، تابع هدف آسیب‌پذیری وزندهی شده سناریوهای خروج آبخاری با استفاده از روش سلسله‌مراتبی محاسبه و بر اساس قیود بهره‌برداری شبکه طبقه‌بندی می‌شود. در بخش چهارم (گام یازدهم تا چهاردهم)، با هدف شناسایی و استخراج خطاهای آغازین، ارزش‌گذاری ریسک سناریوهای خروج آبخاری با استفاده از

در شکل (۲) فرایند به وجود آمدن خاموشی در اثر حوادث پی در پی آمده است [۱۷]. مطابق شکل، عامل آغازگر حوادث معمولاً پیشامدهای محتمل N-2 یا N-3 است که شرایط جوی یا عوامل انسانی در گسترش و ایجاد این پیشامدها مؤثر است. بنابراین لازم است شرکت‌های برق منطقه‌ای تدارک خاصی را برای جلوگیری از وقوع آن‌ها حتی در وضعیت‌هایی که احتمال رخداد آن‌ها بسیار کم است در نظر بگیرند و تدارکات لازم برای حل این مشکل را پیش‌بینی کنند.

۵. تابع هدف آسیب‌پذیری

به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری سناریوهای خروج‌های آبشاری یا به عبارتی دیگر میزان شکنندگی شبکه در برابر خروج هر خط یا ترانسفورماتور، سه شاخص در قالب یک تابع هدف آسیب‌پذیری به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$F = \alpha(LLI) + \beta(TLI) + \delta(VI) \quad (3)$$

که بر مبنای سه شاخص: میزان بارگذاری خطوط، میزان بارگذاری ترانسفورماتورها^۲ و پروفایل ولتاژ^۳ شینه‌ها با ضرایب وزنی α ، β و δ محاسبه می‌شود. این تابع هدف به شرایط بهره‌برداری سیستم و ساختار شبکه وابسته است. در ضمن هرچه تابع هدف به یک نزدیک‌تر باشد، وضعیت بهره‌برداری شبکه خطرناک‌تر است. بر اساس این تابع می‌توان پتانسیل خروج خطوط یا ترانسفورماتورها را برای ایجاد حوادث پی‌درپی منجر به خاموشی ارزیابی کرد [۱۸]. شاخص‌های معرفی شده در رابطه (۳) به صورت روابط (۴) تا (۶) تعریف می‌شوند.

$$LLI = \frac{\sum_{i=1}^n L_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (4)$$

که در آن، n تعداد خطوط شبکه، S_i و L_i به ترتیب میزان بارگذاری خط برحسب درصد و طول خط برحسب کیلومترند. در این رابطه خطوط با بارگذاری و طول بیشتر مدنظر است. افزایش طول خط نرخ خروج اجباری را افزایش می‌دهد.

$$TLI = \frac{\sum_{i=1}^m MVA_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^m MVA_i} \quad (5)$$

که در آن، m تعداد ترانسفورماتورهای شبکه، MVA_i ظرفیت ترانسفورماتور برحسب مگاوات آمپر است.

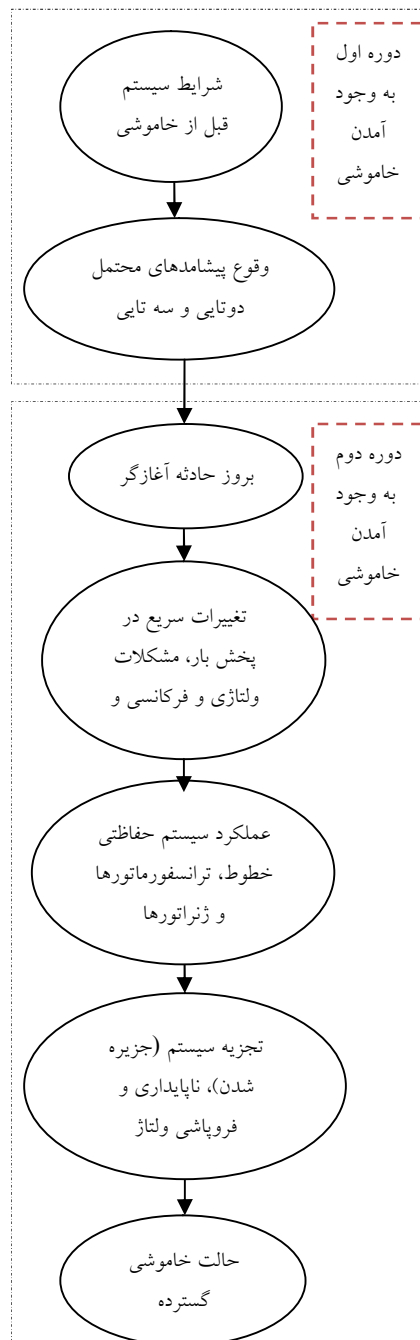
$$VI = \sum_i |V_i - V_{set}| \quad (6)$$

که در آن، V_i و V_{set} به ترتیب ولتاژ نقطه کار و ولتاژ تنظیمی شینه مورد نظر است. برای شینه‌های شبکه و به‌طور ویژه برای شینه‌های نیروگاهی که به صورت PV عمل می‌کنند، در شرایط مختلف V_{set} متفاوت است.

قیود در نظر گرفته شده برای تابع هدف آسیب‌پذیری عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned} 0 < \Delta LLI < \%70 \\ 0 < \Delta TLI < \%70 \\ 0 < \Delta VI < \%10 \end{aligned} \quad (7)$$

که به ترتیب، تغییرات درصد بارگذاری خطوط، ترانسفورماتورها و



شکل (۲): فرایند به وجود آمدن خاموشی در اثر خروج‌های آبشاری

1. Line Loading Index (LLI)
2. Transformer Loading Index (TLI)
3. Voltage Index (VI)

جدول (۳): ماتریس مقایسه‌ای معیارها

معیار	α	β	δ
α	۱	۳	۵
β	۱/۳	۱	۳
δ	۱/۵	۱/۳	۱

بعد از تشکیل این ماتریس، برای نمایش دقت ضرایب به دست آمده، از نرخ سازگاری^۱ استفاده می‌شود. این سازوکار نشان می‌دهد تا چه اندازه می‌توان به ضرایب به دست آمده اعتماد کرد. نرخ سازگاری کمتر از ۰/۱ قابل قبول و در غیر این صورت باید مقایسه‌ها دوباره انجام شود. نرخ سازگاری، از تقسیم شاخص سازگاری^۲ بر شاخص تصادفی سازگاری^۳ به صورت رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

مقدار شاخص سازگاری از معادله (۹) به دست می‌آید:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (9)$$

که در آن، λ_{max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس مقایسه‌ای معیارهاست که تقریب مناسبی از آن به صورت رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{k=1}^n a_{kj} \cdot w_j \right) \quad (10)$$

که در آن، n تعداد معیارها، w_j ضرایب وزنی معیارها و a_{kj} درایه ماتریس معیارهاست.

RI یک شاخص تصادفی است که مقادیر آن بر پایه امتیاز

تصادفی به صورت جدول (۴) ارائه می‌شود [۱۸].

جدول (۴): 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 تعریف شده پس از نرمالیزه کردن نسبت به مجموع هر ستون ماتریس جدول (۳)، به کمک روش فرایند سلسله‌مراتبی به صورت جدول (۵) به دست می‌آیند. بر اساس جدول (۵)، λ_{max} معادل ۳/۰۳۷۸ محاسبه می‌شود. با n برابر ۳، شاخص سازگاری برابر ۰/۱۸۹ به دست می‌آید. بر اساس تعداد معیارها، مقدار شاخص تصادفی برابر ۰/۵۸ تعیین می‌شود. در نتیجه نرخ سازگاری برابر ۰/۳۲۶ و از ۰/۱ کمتر است. بنابراین ضرایب به دست آمده در ماتریس معیارها قابل اعتمادند. بنابراین

درصد تغییرات ولتاژ شینه‌ها به پیرونت هستند.

شدت تأثیر آسیب‌پذیری سناریوهای خروج آبخاری بر شرایط بهره‌برداری شبکه با در نظر گرفتن قیود رابطه (۷) در سه وضعیت هشدار، بحرانی و فوق بحرانی به صورت زیر تعریف و طبقه‌بندی می‌شوند:

- حالت هشدار: بعضی از قیود به مرز رسیده اما هنوز همه بارها تأمین شده‌اند.
- حالت بحرانی: بعضی از قیود از مرز خارج شده و نقض شده‌اند، سیستم در حالت غیرقابل تحمل است.
- حالت فوق بحرانی: بار قطع و همه قیود نقض شده‌اند که ممکن است سیستم به خاموشی سراسری منجر شود.

از این رو معیار وخامت زنجیره خطای آبخاری یا به عبارتی دیگر تابع هدف آسیب‌پذیری سناریوهای خروج آبخاری بر اساس حالت‌های بهره‌برداری شبکه تجزیه و تحلیل و محاسبه می‌شوند.

ضرایب وزنی شاخص‌های آسیب‌پذیری رابطه (۳) با استفاده از روش سلسله‌مراتبی محاسبه می‌شوند. این روش ابزاری قدرتمند برای بررسی کمی و کیفی مسائل چندپارامتری است. خصوصیت اصلی این روش بر پایه مقایسه زوجی است و باعث می‌شود مقایسه به گونه مطلوب انجام شود. در مقایسه دوبه‌دو از مقیاس استاندارد امتیازدهی اعداد یک تا نه مطابق جدول (۲) استفاده می‌شود [۱۸] و [۱۹].

جدول (۲): مقیاس مقایسه دوبه‌دو در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی

درجه اهمیت در مقایسه	امتیاز	درجه اهمیت در مقایسه	امتیاز
دوبه‌دو		دوبه‌دو	
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

در ماتریس مقایسه‌ای زوجی معیارها در جدول (۳)، هریک از درایه‌های ماتریس با استفاده از مقایسه زوجی جدول (۲) تعیین می‌شود. درایه‌های روی قطر اصلی این ماتریس برابر یک است؛ زیرا هر معیار در مقایسه با خودش دارای ارزش یکسان است. ماتریس مقایسه‌ای معیارها، یک ماتریس مثبت و معکوس است و در آن درایه a_{ij} معکوس درایه a_{ji} است.

1. Consistency Ratio (CR)
2. Consistency Index (CI)
3. Random Consistency Index (RI)

تعداد دفعات رخ دادن حالت خرابی و خطر را نشان می‌دهد. D احتمال کشف خطر است و بدین معناست که یک خطا قبل از اینکه اتفاق بیفتد قابل تشخیص باشد. RPN عدد اولویت ریسک است و حاصل محاسبات نهایی آن عددی بین ۱ تا ۱۰۰۰ می‌شود. هرچه عدد اولویت ریسک بزرگ‌تر باشد، ریسک وقوع خطر در سیستم بیشتر است.

جدول (۶) امتیازبندی شاخص‌های ارزیابی ریسک در مقیاس ۱۰ رتبه‌ای را نشان می‌دهد. هرچه مقدار شاخص‌های S و O افزایش یابد، شدت و احتمال وقوع خطر افزایش می‌یابد درحالی‌که برعکس هرچه مقدار شاخص D افزایش یابد، احتمال کشف و کنترل خطر کاهش می‌یابد. یک RPN بالا، لزوم حل حالت خطا را با حداکثر اولویت نشان می‌دهد.

نام شاخص	امتیازبندی
شدت اثر خطر (S)	۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹ ۱۰ Low Max
احتمال وقوع خطر (O)	۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹ ۱۰ Low Max
احتمال کشف خطر (D)	۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹ ۱۰ Max Low

هدف از کاربرد روش تجزیه و تحلیل حالات خطا و اثرات آن در این مقاله، در مرحله اول رتبه‌بندی سطح اولویت ریسک سناریوهای خروج آبخاری با در نظر گرفتن وضعیت بهره‌برداری شبکه و در مرحله دوم کاهش محدوده فضای جست‌وجو و افزایش دقت در شناسایی حادثه آغازگر خروج آبخاری است. در جدول (۷)، (۸) و (۹)، رتبه‌بندی شاخص‌های روش فوق برای محاسبه عدد اولویت ریسک سناریوهای خروج آبخاری بر طبق نتایج تابع هدف آسیب‌پذیری وزندهی شده، قیود و وضعیت بهره‌برداری شبکه و نرخ احتمال وقوع پیشامدهای محتمل $N-K (1 < K \leq 3)$ مشاهده می‌شود.

رتبه	شدت اثر خطر	تابع هدف آسیب‌پذیری وزندهی شده
۱۰	خطرناک بدون هشدار	$F > 1$
۹	خطرناک با هشدار	$0.9 < F \leq 1$
۸	خیلی زیاد	$0.8 < F \leq 0.9$
۷	زیاد	$0.7 < F \leq 0.8$
۶	متوسط	$0.6 < F \leq 0.7$
۵	کم	$0.5 < F \leq 0.6$
۴	خیلی کم	$0.4 < F \leq 0.5$
۳	جزئی	$0.3 < F \leq 0.4$

ضرایب وزنی شاخص‌های بارگذاری خط، بارگذاری ترانسفورماتور و پروفایل ولتاژ شینه‌های شبکه (α ، β و δ) به ترتیب ۰/۶۳۳، ۰/۲۶ و ۰/۱۰۶ به دست می‌آیند.

میانگین	δ	β	α	معیارها
۰/۶۳۳	۰/۵۵۵	۰/۶۹۳	۰/۶۵۲	α
۰/۲۶	۰/۳۳۳	۰/۲۳۱	۰/۲۱۷	β
۰/۱۰۶	۰/۱۱۱	۰/۰۷۷	۰/۱۳	δ
۱	۱	۱	۱	مجموع

۶. روش پیشنهادی

امروزه به دلیل وجود روش‌های مختلف شناسایی خطرات و ارزیابی ریسک، در سیستم‌های قدرت می‌توان نقاط ضعف و آسیب‌پذیر شبکه را قبل از وقوع حادثه مشخص و با انجام امور مؤثر اصلاحی نسبت به پیشگیری از وقوع حوادث و کنترل آن‌ها اقدام نمود [۲۰]. روش پیشنهادی تجزیه و تحلیل حالات خطا و اثرات آن یکی از روش‌های ارزیابی ریسک است. این روش، ارزش‌گذاری ریسک سناریوهای خروج آبخاری را با هدف شناسایی حادثه‌های آغازگر انجام می‌دهد. امروزه در زمینه شبکه‌های هوشمند، که ترکیبی از اجزای مختلف و عملکردهای مختلف است، این روش می‌تواند به شناسایی حالت‌های خطایی که منجر به خرابی‌های مهم سیستم می‌شود، بپردازد [۲۱]. برای دستیابی به اهداف مختلف برنامه قابلیت اطمینان در شبکه قدرت از این روش استفاده شده است [۲۲]. در مرجع [۲۳] برای شناسایی و ارزیابی ریسک خطرات ناشی از شدت میدان مغناطیسی خطوط انتقال برق ولتاژ بالا در مناطق مسکونی و در مرجع [۲۴] برای تجزیه و تحلیل حالت‌های خطا و اثرات آن برای توربین‌های بادی ساحلی و دریایی و مقایسه نرخ خرابی آن‌ها از این روش استفاده شده است.

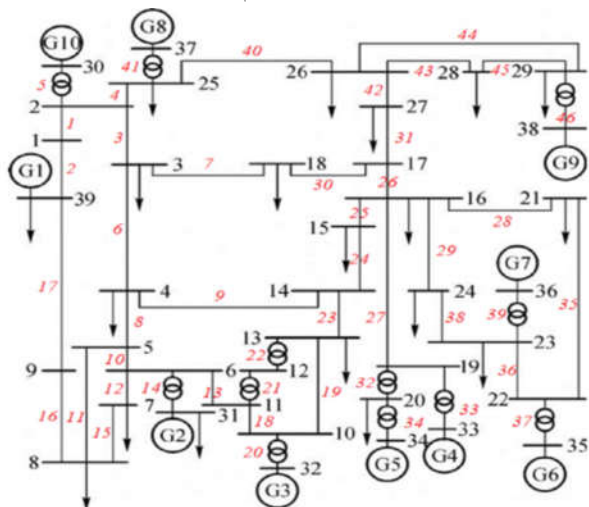
در این روش، ارزش‌گذاری ریسک سناریوهای خروج آبخاری با اندازه‌گیری سه شاخص شدت اثر خطر^۱، احتمال وقوع خطر^۲ و احتمال کشف خطر^۳ و محاسبه عدد اولویت ریسک^۴ به صورت رابطه (۱۱) به دست می‌آید:

$$RPN = S \times O \times D \quad (11)$$

که در آن، S شدت اثر خطر است و اهمیت اثر خطر و خرابی را در عملکرد سیستم ارزیابی می‌کند. O احتمال وقوع خطر است که

1. Severity (S)
2. Occurrence (O)
3. Detection (D)
4. Risk Priority Number (RPN)

شبکه ۳۹ شینه IEEE که در شکل (۳) آمده، استفاده می‌شود. سناریوهایی که در فرایند به وجود آمدن خروج‌های آبخاری دخیل‌اند، در محیط نرم‌افزار دیگسایلنت^۱ مدل‌سازی می‌شود [۲۵]. عناصر شبکه به‌گونه‌ای تنظیم شده‌اند که در مقابل اختلالات تک‌حادثه‌ای دارای امنیت کافی باشند. به‌اصطلاح گفته می‌شود شبکه دارای امنیت N-1 است. این سیستم دارای ۳۴ خط، ۱۲ ترانسفورماتور، ۱۰ واحد نیروگاهی و ۱۹ شینه مصرفی است. ظرفیت نصب‌شده نیروگاه‌ها و توان مصرفی شبکه به‌ترتیب ۶۱۳۸ مگاوات و ۶۰۹۷ مگاوات و تلفات سیستم ۴۱/۲۳ مگاوات است.



شکل (۳): نمودار تک‌خطی شبکه قدرت ۳۹ شینه IEEE

۱.۷. مدل شبیه‌سازی خروج آبخاری

مطابق با روندنمای شکل (۱)، مدل پیشنهادی شبیه‌سازی خروج آبخاری توانایی مناسبی در انتخاب زنجیره خطاهایی دارد که مطابق با شکل (۲) ممکن است به یک خاموشی گسترده منجر شود. در این مدل، حد جریان مجاز حرارتی هادی به‌عنوان مبنای خروج خط اضافه‌بار شده در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از مراجع [۱۵] و [۲۵]، مقاومت DC هادی از نوع ACSR با مغز فولادی در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد معادل ۰/۰۳۲۱۶ اهم بر کیلومتر و قطر هادی ۴۰/۶۸ میلی‌متر در شرایط متعارف دمای محیط ۴۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از رابطه (۱)، حد جریان مجاز حرارتی خط برابر ۱۳۷۰ آمپر محاسبه می‌شود [۱۶]. این جریان با محاسبه رابطه (۲) در یک مدت‌زمان کوتاه حدود ۴ دقیقه برای خط قابل تحمل است. با توجه به جریان نامی عبوری خطوط معادل ۱۰۰۰ آمپر، ضریب اضافه‌بار ۱/۳۷ برای خروج خطوط در زمان وقوع پیشامدهای محتمل N-2 و یا N-3 به‌عنوان مبنای انتخاب

جدول (۸): رتبه‌بندی احتمال وقوع خطر

رتبه	احتمال وقوع خطر	نرخ احتمال وقوع سناریوها در پیشامدهای ممکن (N-K(1<K≤3)
۱۰	به‌شدت زیاد	≥ ۲ ادر
۹	خیلی زیاد	۳ ادر
۸	بی‌درپی	۸ ادر
۷	بالا	۲۰ ادر
۶	نسبتاً زیاد	۸۰ ادر
۵	در حد متوسط	۴۰۰ ادر
۴	نسبتاً کم	۲۰۰۰ ادر
۳	کم	۱۵۰۰۰ ادر
۲	جزئی	۱۵۰۰۰۰ ادر
۱	تقریباً غیرممکن	≤ ۱۵۰۰۰۰ ادر

جدول (۹): رتبه‌بندی احتمال کشف خطر

رتبه	کشف خطر	معیار	وضعیت بهره‌برداری شبکه
۱۰	کاملاً غیرممکن	بدون کنترل	فوق بحرانی
۹	خیلی بعید	کنترل خطا خیلی بعید است.	بحرانی
۵	متوسط	شانس متوسطی وجود دارد که بتوان خطای بعدی را کنترل کرد.	هشدار

به‌طور کلی در روش پیشنهادی هیچ RPN مبنایی وجود ندارد که بتوان داده‌ها را با آن مقایسه و سطوح ریسک سناریوهای خروج آبخاری را تعیین کرد. لذا حد پایین و حد بالای ریسک سناریوها بر اساس مقدار عدد اولویت ریسک به‌صورت روابط (۱۲) تا (۱۵) و با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS محاسبه می‌شود [۲۳].

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (12)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

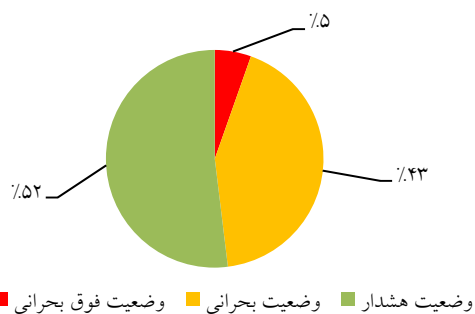
$$\delta + \bar{x} = \text{حد بالای ریسک} \quad (14)$$

$$\delta - \bar{x} = \text{حد پایین ریسک} \quad (15)$$

که \bar{x} ، δ و x_i به‌ترتیب میانگین حسابی، انحراف معیار و مقدار عدد اولویت ریسک هر سناریو است و N تعداد سناریوهای خروج آبخاری است.

۷. نتایج شبیه‌سازی

به‌منظور شبیه‌سازی و پیاده‌سازی مدل پیشنهادی خروج آبخاری و نیز روش پیشنهادی شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری، از



شکل (۴): شرایط بهره‌برداری شبکه در وقوع سناریوهای خروج آبشاری

۳.۷ کاربرد روش پیشنهادی

در این مرحله با هدف شناسایی و استخراج خطاهای آغازین، ارزش‌گذاری ریسک سناریوهای خروج آبشاری با استفاده از رتبه‌بندی شاخص‌های روش تجزیه و تحلیل حالات خطا و اثرات آن در جدول‌های (۷) تا (۹) و محاسبه عدد اولویت ریسک بر طبق رابطه (۱۱) انجام می‌شود. در ادامه با استفاده از روابط (۱۲) تا (۱۵) و به کمک نرم‌افزار آماری SPSS، ابتدا یک حد اطمینان ریسک تعیین و سپس بر اساس آن سطوح ریسک سناریوها مشخص می‌شود. جدول (۱۱) حد پایین و حد بالای ریسک سناریوها بر اساس محاسبه میانگین و انحراف معیار عدد اولویت ریسک را نشان می‌دهد.

بر طبق نتایج جدول (۱۱)، سناریوهای خروج آبشاری در سه سطح ریسک پایین، ریسک متوسط و ریسک بالا طبقه‌بندی می‌شوند. کمترین و بیشترین مقدار عدد اولویت ریسک سناریوها با وقوع پیشامد N-2 به ترتیب برابر ۷۵ و ۳۱۵ و برای سناریوهای با وقوع پیشامد N-3 به ترتیب برابر ۶۰ و ۳۰۰ است.

جدول (۱۱): سطح ریسک سناریوها بر اساس عدد اولویت ریسک

تعداد سناریوهای خروج آبشاری	با وقوع پیشامد N-2		با وقوع پیشامد N-3	
	میانگین حسابی عدد اولویت ریسک (\bar{x})	انحراف معیار عدد اولویت ریسک (δ)	حد بالای عدد اولویت ریسک	حد پایین عدد اولویت ریسک
۴۰	۱۷۵/۱	۹۹/۵	۲۵۱/۲۲	۱۰۹/۶۸
۸۹	۱۸۰/۴۵	۷۰/۷۷	۲۷۴/۶۳	۷۵/۶۳

درصد سطوح ریسک سناریوهای خروج آبشاری با پیشامدهای N-2 و N-3 در شکل (۵) مشاهده می‌شود. مطابق شکل (۵) حدود ۲۷٪ از سناریوهای خروج آبشاری در سطح ریسک پایین قرار

1. Low Risk (L)
2. Middle Risk (M)
3. High Risk (H)

سناریوهای خروج آبشاری خطرناک در نظر گرفته می‌شود. مدل پیشنهادی در مقایسه با روش یکایک شماری که دارای ۱۶۲۱۵ حالت پیشامد دوتایی و سه‌تایی است، به‌طور قابل توجهی فضای جست‌وجوی شناسایی سناریوهای خطرناک را کاهش می‌دهد و ۱۲۹ سناریو مستعد خرابی آبشاری را به‌منظور شناسایی و رتبه‌بندی حادثه‌های آغازگر انتخاب می‌کند.

۲.۷ محاسبه تابع هدف آسیب‌پذیری

با محاسبه روابط (۳) تا (۷)، تابع هدف آسیب‌پذیری برای ۱۲۹ سناریوی خروج آبشاری طبق جدول (۱۰) به دست می‌آید. در این جدول، طبقه‌بندی سناریوها بر مبنای پله تغییرات ۰/۱ برای تابع هدف آسیب‌پذیری و وضعیت سه‌گانه بهره‌برداری شبکه انجام می‌شود.

طبق جدول (۱۰) و شکل (۴)، حدود ۴۸٪ سناریوهای مورد مطالعه، شرایط بهره‌برداری شبکه را در وضعیت بحرانی و فوق بحرانی قرار می‌دهد. در این شرایط می‌توان انتظار داشت سیستم به سمت واگرا شدن، جزیره شدن، فروپاشی و لتناژ و در نهایت به خاموشی گسترده منتهی شود. همچنین درحالی‌که سیستم وارد مرحله هشدار می‌شود، بهره‌برداران سیستم می‌توانند با تغییر الگوی تولید و انتقال باعث توقف خطا شوند. در این شرایط آموزش مناسب بهره‌بردارهای سیستم در تشخیص بموقع خطاها و تصمیمات سریع در زمان وقوع رخدادها، در کنترل ناپایداری‌ها و تداوم انتقال توان مؤثر خواهد بود. در برخی از موارد هم سیستم به سرعت از مرحله هشدار وارد مرحله بحرانی می‌شود. در این وضعیت بهره‌برداران نمی‌توانند واکنشی مناسب نشان دهند.

جدول (۱۰): طبقه‌بندی سناریوهای خروج آبشاری بر مبنای تابع

تابع هدف آسیب‌پذیری وزن‌دهی شده	هدف آسیب‌پذیری وزن‌دهی شده و شرایط بهره‌برداری شبکه							
	$F > 1$	$0.9 \leq F < 1$	$0.8 \leq F < 0.9$	$0.7 \leq F < 0.8$	$0.6 \leq F < 0.7$	$0.5 \leq F < 0.6$	$0.4 \leq F < 0.5$	$0.3 \leq F < 0.4$
تعداد سناریوها با پیشامد N-2	۰	۰	۰	۹	۶	۴	۱۲	۴۰
تعداد سناریوها با پیشامد N-3	۳	۵	۷	۲۴	۲۴	۲۲	۴	۸۹
مجموع	۳	۵	۷	۳۳	۳۳	۲۸	۸	۱۲۹
وضعیت فوق بحرانی	۳	۳	۱	۰	۰	۰	۰	۷
وضعیت بحرانی	۰	۲	۵	۳۰	۱۵	۳	۰	۵۵
وضعیت هشدار	۰	۰	۱	۳	۱۸	۲۵	۸	۶۷

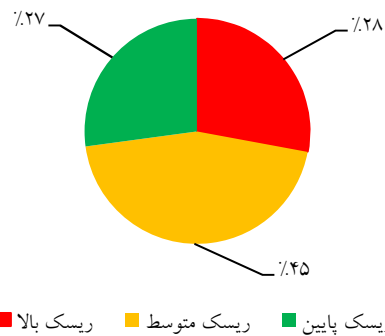
شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری با استفاده از روش تجزیه و تحلیل حالات خطا و اثرات آن ۱۰۱

اضافه بار شدن خط بعدی و خروج آن با عملکرد رله‌های حفاظتی و با نقض قیود بهره‌برداری رابطه (۷)، در نهایت منجر به واگرا شدن سیستم، فروپاشی ولتاژ و خاموشی گسترده شده و سناریوی خروج پی‌درپی را تشکیل می‌دهند. برای مثال، سناریوی شماره ۲ که با حادثه آغازگر خروج خط پربار ۴-۵ شروع شده و در مرحله چهارم با ایجاد افت شدید ولتاژ در شینه ۴ به میزان ۰/۸۱ پرینیت و نقض قیود ولتاژی، باعث فروپاشی سیستم و تکمیل سناریوی خروج آبخاری می‌شود.

گرفته است. این سناریوها معمولاً شبکه را در وضعیت هشدار قرار می‌دهند. نظر به اینکه در این وضعیت احتمال توقف خطای آبخاری است، این سناریوها از ادامه فرایند شناسایی خطاهای آغازین حذف می‌شوند. همچنین آسیب‌پذیرترین حادثه‌های آغازگر که می‌تواند شروعی بر خروج‌های پی‌درپی خطوط یا ترانسفورماتورها باشد و با ایجاد شرایط بحرانی و یا فوق بحرانی در بهره‌برداری شبکه در نهایت منجر به جزیره شدن، فروپاشی ولتاژ و خاموشی گسترده شود، معمولاً در ریسک‌های متوسط و بالا پدیدار می‌شوند.

جدول (۱۲): رتبه‌بندی ریسک سناریوهای خروج آبخاری خطرناک

ریسک	تابع هدف آسیب‌پذیری	پیشامد	S	O	D	RPN	تعداد سناریو	ریسک
ریسک متوسط	0.9 < F ≤ 1	N-3	۹	۳	۹	۲۴۳	۲	۵۸
			۸	۳	۱۰	۲۴۰	۱	
			۸	۳	۹	۲۱۶	۵	
	0.8 < F ≤ 0.9	N-3	۸	۳	۹	۲۱۶	۱	
			۷	۴	۵	۱۴۰	۳	
			۶	۴	۹	۲۱۶	۱۲	
	0.6 < F ≤ 0.7	N-3	۶	۴	۹	۲۱۶	۱۲	
			۶	۴	۵	۱۲۰	۱۲	
			۶	۵	۹	۲۷۰	۶	
			۶	۵	۵	۱۵۰	۵	
0.5 < F ≤ 0.6	N-2	۵	۵	۵	۱۲۵	۴		
		۵	۴	۹	۱۸۰	۳		
		۴	۵	۵	۱۰۰	۴		
ریسک بالا	F > 1	N-3	۱۰	۳	۱۰	۳۰۰	۳	
			۹	۳	۱۰	۲۷۰	۳	
			۷	۵	۹	۳۱۵	۹	
			۷	۴	۹	۲۵۲	۲۱	



شکل (۵): درصد سطوح ریسک سناریوهای خروج آبخاری

جدول (۱۲)، رتبه‌بندی ریسک سناریوهای خروج آبخاری خطرناک را بر مبنای روش پیشنهادی نشان می‌دهد. در این جدول در مجموع ۹۴ سناریو با ریسک متوسط و بالا به منظور شناسایی خطاهای آغازین استخراج می‌شود. این سناریوها فهرستی از زنجیره‌های خطا هستند که از دیدگاه مهندسی باعث ایجاد شرایط خطرناک در سیستم شده و قیود بهره‌برداری شبکه را نقض می‌کنند. چهار نمونه از مراحل وقوع سناریوهای خروج آبخاری را با ریسک بالا در جدول (۱۳) مشاهده می‌کنید. این سناریوها با وقوع پیشامدهای محتمل N-2 و N-3 باعث بروز حادثه آغازگر شده و با

جدول (۱۳): چند نمونه از مراحل وقوع سناریوهای خروج آبخاری با ریسک بالا

شماره سناریو	پیشامد احتمالی N-2 یا N-3	حادثه آغازگر اول	حادثه دوم	حادثه سوم	حادثه چهارم	RPN
۱	خروج ترانسفورماتورهای ۲۹-۳۸ و ۱۹-۳۳	خروج خط ۴-۵ با اضافه بار ۱۵۵٪	خروج خط ۱۳-۱۴ با اضافه بار ۲۶۴٪	واگرا شدن شبکه		۳۱۵
۲	خروج ترانسفورماتور ۳۷-۲۵ و خط ۱۳-۱۴	خروج خط ۴-۵ با اضافه بار ۱۳۲٪	خروج خط ۸-۹ با اضافه بار ۱۷۹٪	خروج خط ۱-۲ با اضافه بار ۱۴۴٪	افت ولتاژ شدید شینه ۴ به میزان ۰/۸۱ پرینیت (ΔV > 10%)	۳۱۵
۳	خروج ترانسفورماتور ۳۴-۲۰ و خطوط ۱۴-۱۳ و ۴-۵	خروج خط ۲-۳ با اضافه بار ۱۷۹٪	واگرا شدن شبکه			۲۷۰
۴	خروج ترانسفورماتور ۳۵-۲۲ و خطوط ۲۶-۲۷ و ۲-۳	خروج خط ۴-۵ با اضافه بار ۱۶۶٪	افت ولتاژ شدید شینه ۴ به میزان ۰/۷۶ پرینیت (ΔV > 10%)			۳۰۰

جدول (۱۴)، رتبه‌بندی خطوط را به‌عنوان حادثه آغازگر سناریوهای خروج آبشاری، بر اساس تعداد دفعات مشارکت و ضریب کارایی نشان می‌دهد. در این جدول، ضریب کارایی خطوط بر طبق عدد اولویت ریسک سناریوها در جدول (۱۲) محاسبه می‌شود. هرچه ضریب کارایی یک خط بزرگ‌تر باشد، میزان بحرانی بودن آن خط در انتشار خروج‌های پی‌درپی بیشتر است. به‌عنوان مثال ضریب کارایی برای خط انتقال ۱۱-۶ که در سه سناریو با عدد اولویت ریسک، ۱۲۰، ۱۲۰ و ۱۴۰ مشارکت دارد، برابر است با: $(120+120+140)/3=133$ که $1/21$ محاسبه می‌شود. بر طبق اعتبار سنجی انجام شده توسط روش یکایک شماری، حدود ۶۲ درصد خطوط ارزیابی شده توسط روش پیشنهادی با پتانسیل انتشار خروج‌های پی‌درپی به‌عنوان حادثه آغازگر خروج آبشاری شناسایی می‌شوند. این حادثه‌های آغازگر در رتبه‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۶، ۷، ۱۱ و ۱۲ جدول (۱۴) قرار دارند. در این جدول خط انتقال ۵-۴ با بیشترین ضریب کارایی به‌میزان $20/78$ به‌عنوان آسیب‌پذیرترین حادثه آغازگر شناسایی می‌شود.

جدول (۱۴): شناسایی و رتبه‌بندی خطاهای آغازین وقایع آبشاری با روش پیشنهادی

رتبه	نام خط انتقال	تعداد مشارکت در سناریوها	ضریب کارایی
۱	۴-۵	۲۷	۲۰/۷۸
۲	۱۳-۱۴	۲۰	۱۳/۲۵
۳	۲-۳	۱۶	۱۰/۰۸
۴	۶-۷	۹	۶/۶۴
۵	۲۳-۲۴	۷	۴/۳۷
۶	۸-۹	۶	۳/۵۶
۷	۶-۱۱	۳	۱/۲۱
۸	۱۱-۱۲	۱	۰/۸
۹	۲-۲۵	۱	۰/۷۷
۱۰	۳-۴	۱	۰/۳۹۷
۱۱	۱۶-۱۷	۱	۰/۳۸۱
۱۲	۵-۸	۱	۰/۳۱۷
۱۳	۱۷-۲۷	۱	۰/۳۱۷

جدول (۱۵): مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های دیگر شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبشاری

ردیف	نام روش	شناسایی خطاهای آغازین	تعداد کل خطای آغازین شناسایی شده توسط روش‌ها	درصد صحت سنجی خطاهای شناسایی شده توسط روش یکایک شماری
۱	روش تجزیه و تحلیل حالات خطا	شناسایی ۶ خطا در ۱۰ رتبه اول	۸	۴۷
۲	روش گراف خطای آبشاری	شناسایی ۳ خطا در ۱۰ رتبه اول	۳	۱۸
۳	روش جست‌وجوی کریدور موازی	شناسایی ۵ خطا در ۱۰ رتبه اول	۵	۲۹
۴	روش آنتروپی	شناسایی ۴ خطا در ۱۰ رتبه اول	۶	۳۵
۵	روش ارزیابی شاخص چند معیاره	شناسایی ۵ خطا در ۱۰ رتبه اول	۵	۲۹
۶	روش خوشه بندی	شناسایی ۱ خطا در ۱۰ رتبه اول	۱	۶

۸ مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌های

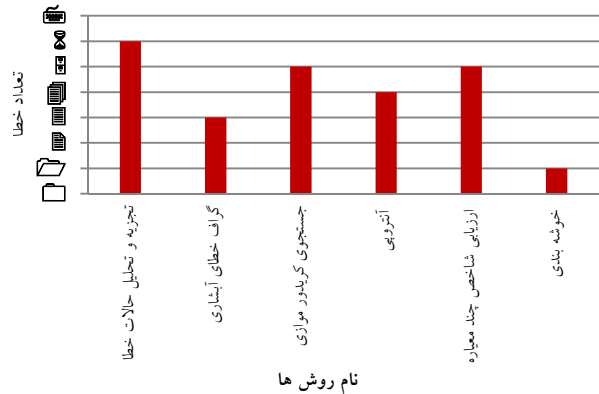
شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبشاری

همان گونه که در مرجع [۶] بیان شد، خروج‌های آبشاری دارای سازوکارهای پیچیده‌ای هستند و خرابی‌ها می‌توانند به دلایل مختلفی همچون شرایط آب‌وهوایی و عوامل انسانی آغاز شوند. لذا یکی از راهبردهای پیشگیری از خروج آبشاری قبل از شروع حوادث ناگهانی و پی‌درپی، پیش‌بینی دقیق آبشار است. از این رو با اقدامات

خروج آبخاری تولیدشده با هدف شناسایی حادثه‌های آغازگر، یک روش جدید به نام روش تجزیه و تحلیل حالات خطا و اثرات آن ارائه شد. این روش با ارزیابی کیفی شاخص‌های خطا و تجزیه و تحلیل آماری عدد اولویت ریسک سناریوهای خروج آبخاری، توانست حادثه‌های آغازگر را در حالت برون‌خط بودن شبکه شناسایی و رتبه‌بندی کند و با استفاده از آن در هنگام بهره‌برداری واقعی شبکه، قبل از وقوع خروج‌های آبخاری و ایجاد خاموشی از بروز آن‌ها جلوگیری نماید. مدل و روش پیشنهادی بر روی شبکه ۳۹ شینه IEEE مورد آزمایش قرار گرفت تا خطوط مستعد خرابی آبخاری در آن شناسایی شوند. نتایج عددی نشان دادند که با به‌کارگیری مدل پیشنهادی خروج آبخاری و محاسبه شاخص‌های آسیب‌پذیری، روش پیشنهادی توانسته است با تحلیل یک فهرست کوتاه از سناریوهای خروج آبخاری، حدود ۴۷٪ از آسیب‌پذیرترین حادثه‌های آغازگر را با پتانسیل بالای ایجاد خاموشی گسترده شناسایی کند. همچنین توانسته است در شناسایی ۶ رویداد آغازین در رتبه اول لیست رتبه‌بندی موفق عمل نماید؛ در صورتی که طبق جدول (۱۵)، روش‌های آنالوژی و خوشه‌بندی به‌ترتیب در شناسایی ۴ و ۱ رویداد آغازین موفق عمل نموده است. در نهایت نیز آسیب‌پذیرترین حادثه آغازگر خروج آبخاری (خط ۵-۴) در رتبه اول لیست رتبه‌بندی شناسایی شد، در صورتی که توسط روش‌های دیگر، خط ۵-۴ در رتبه‌های دوم تا پنجم شناسایی گردید که این نشان از دقت قابل قبول روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها در شناسایی حادثه‌های آغازگر آسیب‌پذیر است.

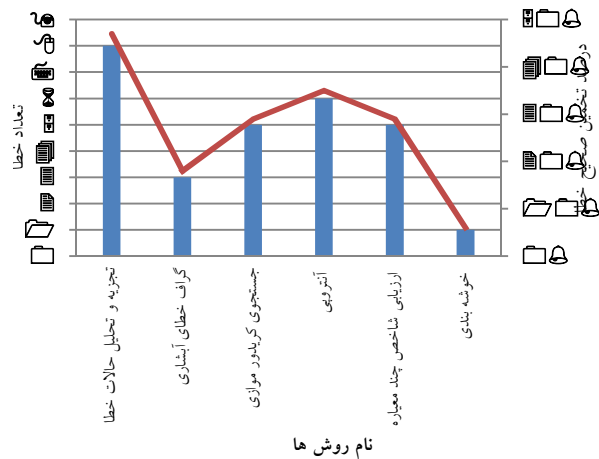
در کارهای آتی با هدف کاهش رخداد خروج‌های آبخاری می‌توان با استفاده از نتایج محاسبات روش پیشنهادی و انجام اقدامات زیر، میزان کاهش ریسک سناریوهای خروج آبخاری را با ارزیابی مجدد عدد اولویت ریسک بررسی کرد:

- انجام اقدامات مناسب توسعه شبکه در بخش‌های آسیب‌پذیر مانند افزایش تعداد مدارهای خطوط انتقال، افزایش تعداد هادی در هر فاز و افزایش خطوط باندا چندمداره.
- انجام اقدامات پیشگیرانه شامل اقدامات اصلاحی، اضطراری و یا بازبانی برای هرچه سریع‌تر خارج شدن شبکه از حالت بهره‌برداری غیرعادی و بحرانی به حالت بهره‌برداری عادی شبکه.
- تهیه یک راهبرد سرویس و نگهداری مقرون‌به‌صرفه برای تجهیزات آسیب‌پذیر با در نظر گرفتن محدودیت‌های اقتصادی.
- رعایت کمیت‌های بهره‌برداری شبکه در محدوده مجاز باهدف بارگذاری مناسب تجهیزات در حد کمتر از مقادیر نامی.



خطاهای آغازین وقایع آبخاری شناسایی شده در ۱۰ رتبه اول لیست رتبه بندی روش‌ها

شکل (۶): مقایسه دقت روش‌ها در شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری



تعداد کل خطاهای آغازین شناسایی شده توسط روش‌ها
درصد صحت سنجی خطاهای شناسایی شده توسط روش یکایک شماری

شکل (۷): مقایسه درصد صحت سنجی روش‌ها در شناسایی خطاهای آغازین وقایع آبخاری

۹. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله باهدف کاهش محدوده فضای جست‌وجوی حالات سناریوهای خروج آبخاری با پیشامدهای آغازین دوتایی و سه‌تایی نسبت به روش یکایک شماری، یک مدل شبیه‌سازی خروج آبخاری ارائه شد که در طی آن خطوط مستعد خرابی آبخاری (معمولاً خطوط با بارگذاری غیرمجاز) بر اساس مدل‌سازی حد جریان مجاز حرارتی هادی خط شناسایی شدند. در این راستا تابع هدف آسیب‌پذیری سناریوهای خروج آبخاری شامل شاخص‌های میزان بارگذاری خطوط و ترانسفورماتورهای انتقال و نیز پروفایل ولتاژ شینه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت تا بتوان سناریوهای خطرناک منجر به ایجاد شرایط بحرانی و فوق بحرانی در بهره‌برداری شبکه را جداسازی و تفکیک کرد. در ادامه برای ارزیابی ریسک سناریوهای

- [1] Nedic, Dusko P., Dobson, I., Kirschen, Daniel S., Carreras, Benjamin A. and Lynch, Vickie E. "Criticality in a cascading failure blackout model", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 28, No. 9, pp. 627-633, November 2006.
- [2] Doorman, G., Uhlen, K., Kjolle, G. and Huse, E.S., "Vulnerability analysis of the nordic power system", IEEE General Meeting Power & Energy Society, Montreal, Que., Canada, June 2006.
- [3] Hines, P., Dobson, I. and Rezaei, P., "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, pp. 958 – 967, March 2017.
- [4] Wei, M., Lu, Z. and Wang, W., "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] Yan, J., He, H. and Sun, Y., "Integrated security analysis on cascading failure in complex networks", IEEE Transactions on Information Forensics and Security, Vol. 9, No. 3, pp. 451-463, 2014.
- [6] Guo, H., Zheng, C., Ching, H. and Fernando, T., "A critical review of cascading failure analysis and modeling of power system", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 80, pp. 9-22, 2017.
- [7] Yan, L., Taha, Hamdy A. and Landers, Thomas L., "A recursive approach for enumerating minimal cutsets in a network", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 43, No. 3, Sep. 1994.
- [8] Suh, H. and Chang, Carl K., "Algorithms for the minimal cutsets enumeration of networks by graph search and branch addition", 25th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN), pp. 100-107, Florida, USA, 2000.
- [9] Kron, G., *Diakoptics: the piecewise solution of large-scale systems*, MacDonald & Co Publishing, 1963.
- [10] Bhatt, N., et al., "Assessing vulnerability to cascading outages", IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Seattle, WA, USA, pp. 1-9, Mar. 2009.
- [11] Belmudes, F., Ernst, D. and Wehenkel, L., "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.
- [12] Hesami Naqshbandi, A., Armaghani, S. and Shahrtash, S.M., "Multi-criteria analytical evaluation of vulnerability of lines against cascading failure in transmission networks", 33th International Power System Conference, Tehran, Iran, 2018.
- [13] Pang, C., *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.
- [14] Wei, X., Gao, S., Huang, T., Bompard, E., Pi, R. and Wang, T., "Complex network-based cascading faults graph for the analysis of transmission network vulnerability", IEEE Transactions on Industrial Informations, Vol. 15, No. 3, pp. 1265-1276, March 2019.
- [15] Heidari, G., *Electrical Design of Overhead Power Transmission Lines*, Eshagh Publishing, Tehran, Iran, 2015.
- [16] IEEE Std. 738, *IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors*, 2012.
- [17] Aghamohammadi, M.R., Zare, M. and Maghami, A., "Investigating the effect of distance protection hidden failure on the spread of blackouts in power systems and presenting a method to reduce blackout risk", The Second Power Systems Protection and Control (PSPC-02) Conference, Tehran, Iran, December 2007.
- [18] Karimi, E., Madani, S. M., Ebrahimi, A., "Vulnerability assessment of transmission network in power systems using genetic algorithm", Scientific Journal of Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 1-10, Isfahan, Iran, 2011.
- [19] Goh, H.H. and Kok, B.C., "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.
- [20] Neves Silvestre Baleia, A., *Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for Smart Electrical Distribution Systems*, M.Sc. Thesis, Dept. Electrical and Computer Engineering, University of Lisboa (ULisboa), November 2018.
- [21] Zúñiga, A., Baleia, A., Fernandes, J. and Branco, P., "Classical failure modes and effects analysis in the context of smart grid cyber-physical systems", Energies, Vol. 13, No. 5, pp. 1–25, March 2020.
- [22] Akbari, M., Khazaei, P., Sabetghadam, I. and Karimifard, P., "Failure modes and effects analysis (fmea) for power transformers", 28th International Power System Conference, pp. 1-7, Tehran, Iran, November 2013.
- [23] Jozi, S. A., Jafarzadeh Haghighifard, N. and Afzali Behbahani, N., "Identification and risk assessment of hazards caused by high voltage power transmission lines in residential areas using Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) method", Journal of Iranian Association of Environmental Health (IAEH), Vol. 7, No. 1, pp. 55-64, Tehran, Iran, 2013.

- [24] Catelani, M., Ciani, L., Galar, D. and Patrizi, G., "Risk assessment of a wind turbine: a new fmeca-based tool with RPN threshold estimation", IEEE Access, Vol. 08, pp. 20181–20190, January 2020.
- [25] *DIgSILENT PowerFactory Manual Version 2017*, DIgSILENT GmbH, Gomaringen, Germany, June 2017.