



## بررسی تأثیر نفوذ مزارع بادی در شبکه انتقال توان الکتریکی متصل به نیروگاه هسته‌ای بر فرکانس رخداد حادثه از دست رفتن منبع برق خارجی

شهاب‌الدین کامیاب<sup>۱\*</sup>، مهسا پیرایش<sup>۱</sup>، محمدرضا نعمت‌اللهی<sup>۲</sup>

۱. مرکز تحقیقات ایمنی دانشگاه شیراز، صندوق پستی: ۷۱۹۳۶۱۶۵۴۸، شیراز - ایران  
۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، صندوق پستی: ۷۱۹۳۶۱۶۵۴۸، شیراز - ایران

\*Email: kamyab.shahab@gmail.com

### مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۶/۵ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

### چکیده

قابلیت اطمینان شبکه متصل به نیروگاه هسته‌ای بر فرکانس وقوع Loss of Offsite Power (LOOP)، به عنوان برجسته‌ترین رویداد آغازگر منجر به ذوب قلب در نیروگاه‌های هسته‌ای نیازمند توان الکتریکی، مؤثر است. همچنین، رشد میزان اتصال و بهره‌برداری مزارع بادی در شبکه‌های انتقال برق امروزی، با در نظر گرفتن توجیهات اقتصادی و محیط‌زیستی مربوطه، بر مسائل پایداری شبکه تأثیر می‌گذارد. بر این اساس، مطالعه اثر این مهم بر فرکانس وقوع Grid-Related LOOP (GR-LOOP) ضروری است. از این‌رو، این مطالعه تأثیر تغییر در شرایط شبکه انتقال متصل به نیروگاه (از جهت درصد مشارکت مزارع بادی) بر فرکانس وقوع GR-LOOP هسته‌ای را بررسی می‌نماید. بدین منظور، ابتدا، سناریوهای خطای اتصال کوتاه-سهم‌افز بر خطوط انتقال شبکه متصل به نیروگاه با استفاده از درختان رویداد تولید می‌شوند. سپس، براساس نتایج شبیه‌سازی سناریوهای پساخطا، وقوع یا عدم‌وقوع GR-LOOP و فرکانس وقوع هر یک ارزیابی می‌گردد. فرکانس وقوع GR-LOOP در شبکه‌هایی با ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ نفوذ تولیدات بادی، برای پرخطرترین موقعیت قرارگیری نیروگاه، به ترتیب  $3.23 \times 10^{-5}$ ،  $4.49 \times 10^{-5}$  و  $4.86 \times 10^{-5}$  و برای ایمن‌ترین موقعیت،  $8.58 \times 10^{-6}$ ،  $1.55 \times 10^{-5}$  و  $1.52 \times 10^{-5}$  بر سال‌کاری، محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد علاوه بر پیکربندی شبکه متصل به نیروگاه، تأثیر درصد نفوذ مزارع بادی در شبکه بر فرکانس وقوع GR-LOOP را نباید نادیده گرفت. به‌علاوه، تغییرات غیرخطی و غیرتناسبی فرکانس مربوطه با افزایش نفوذ تولید باد در شبکه، اهمیت در نظر گرفتن تأثیر سناریوهای محتمل اتصال و بهره‌برداری نیروگاه‌های بادی در مطالعات ایمنی هسته‌ای را برجسته می‌سازد.

**کلیدواژه‌ها:** از دست رفتن منبع برق به نیروگاه هسته‌ای، مزارع بادی، فرکانس وقوع، ایمنی هسته‌ای، پایداری شبکه

## Investigation of the effect of wind farm penetration in the transmission electrical grid on the occurrence frequency of grid-related loss of offsite power to the nuclear power plant

Sh. Kamyab<sup>\*1</sup>, M. Pirayesh<sup>1</sup>, M.R. Nematollahi<sup>1,2</sup>

1. Safety Research Center of Shiraz University, P.O.Box: 7193616548, Shiraz – Iran  
2. School of Mechanical Engineering, Shiraz University, P.O.Box: 7193616548, Shiraz – Iran

### Research Article

Received: 27.8.2023, Revised: 7.2.2024, Accepted: 5.3.2024

### Abstract

The reliability of the transmission grid significantly influences the occurrence frequency of Loss of Offsite Power (LOOP), the predominant core damage-inducing event in non-passive nuclear power plants (NPPs). With the increasing integration of wind farms into transmission grids for economic and environmental reasons, grid stability is affected. Therefore, it is imperative to investigate how these changes impact the frequency of Grid-Related LOOP (GR-LOOP). This study examines the effects of varying grid conditions, specifically wind farm penetration levels, on GR-LOOP occurrence frequency. A proposed methodology is applied to grids under different operational scenarios, considering varying percentages of wind farm penetration, different loading conditions, and power flow methods. The frequency of GR-LOOP scenarios is evaluated for grids with 0%, 10%, and 20% wind penetration before a 3-phase short circuit fault occurs on transmission lines. Results show that at the riskiest power plant location, the occurrence frequencies are  $3.23 \times 10^{-5}$ ,  $4.49 \times 10^{-5}$ , and  $4.86 \times 10^{-5}$  per reactor-year for the respective wind penetration levels. Conversely, at the safest location, frequencies are  $8.58 \times 10^{-6}$ ,  $1.55 \times 10^{-5}$ , and  $1.52 \times 10^{-5}$  per reactor-year. These findings underscore the significant impact of wind farm penetration on GR-LOOP frequency in mixed grids. The non-linear and non-proportional changes in frequency with increasing wind penetration highlight the necessity of integrating such considerations into safety assessments for nuclear power plants.

**Keywords:** Loss of offsite power, Wind farms, Occurrence frequency, Nuclear safety, Grid stability



## ۱. مقدمه

فراهم‌سازی زیرساخت‌ها و تمهیدات مربوط به تأمین پایدار، قابل اطمینان و به صرفه انرژی الکتریکی، یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های بشر امروزی است. نیاز به تأمین تقاضای رو به افزایش انرژی در جهان امروز، در کنار مشوق‌ها و الزامات محیط‌زیستی، طراحی، توسعه و به کارگیری سیستم‌های تبدیل انرژی از منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر در تولید انرژی الکتریکی مورد نیاز را غیرقابل صرف‌نظر می‌نماید [۱]. در این راستا، انرژی خورشیدی و بادی، به دلیل پیشرفت‌های حاصل شده در تکنولوژی مورد استفاده، به عنوان دو گزینه مطرح‌تر در میان منابع تأمین انرژی تجدیدپذیر مطرح می‌شوند. بر اساس آمار، توان الکتریکی تولید شده از انرژی بادی، سهم قابل ملاحظه‌ای در کشورهای مختلف داشته است. بر اساس آمار ارائه شده در گزارش [۲]، به جز آمریکا و چین که دارای بیشترین درصد به کارگیری برق تولیدی از منابع انرژی تجدیدپذیر بوده‌اند، ۱۵٪ از مصرف برق سالیانه در سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ اتحادیه اروپا، به طور میانگین، توسط مزارع بادی تأمین شده است [۲، ۳].

از سویی دیگر، مقابله با تغییرات اقلیمی، انگیزه اصلی برای حفظ و گسترش استفاده از انرژی هسته‌ای است [۴]. از نقطه‌نظر ایمنی هسته‌ای، اما، بهره‌برداری ایمن و اقتصادی یک نیروگاه هسته‌ای، نیازمند اتصال آن به سیستم شبکه الکتریکی با ظرفیت کافی است، به گونه‌ای که علاوه بر برداشت توان تولیدی نیروگاه، تأمین برق با قابلیت اطمینان بالا در راه‌اندازی، بهره‌برداری و خاموشی اضطراری آن را نیز میسر سازد [۵].

حادثه از دست رفتن شبکه برق خارجی در متون ایمنی هسته‌ای، به عنوان "از دست رفتن هم‌زمان توان الکتریکی به تمام شینه‌های ایمنی نیروگاه که باعث راه‌اندازی ژنراتورهای برق اضطراری و بارگیری آنها می‌شود" تعریف می‌شود [۶]. نتایج ارزیابی احتمالاتی ریسک (PSA) در نیروگاه‌های هسته‌ای مختلف، حاکی از سهم مشارکتی قابل ملاحظه حادثه LOOP در میزان نهایی فرکانس آسیب به قلب (CDF) نیروگاه است [۷].

رویدادهای با منشأ رخداد در شبکه انتقال متصل به نیروگاه هسته‌ای (GR-LOOP)، سهم چشم‌گیری در فرکانس کلی وقوع LOOP دارند [۸]. به علاوه، رفتار گذرای پس از وقوع خطا در شبکه متصل به نیروگاه هسته‌ای بر فرکانس وقوع GR-LOOP، مؤثر است [۹-۱۱]. از این‌رو، تأثیر حالت‌های بهره‌برداری پیش‌خطای شبکه انتقال بر فرکانس GR-LOOP و سناریوهای محتمل، قابل چشم‌پوشی نیست.

رشد قابل ملاحظه سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه‌های مدرن، سبب بروز تغییرات در بهره‌برداری سیستم قدرت شده است، و لذا، می‌تواند اثر قابل ملاحظه‌ای بر فرکانس وقوع GR-LOOP داشته باشد. نتیجه بررسی هانو و همکاران [۶]، افزایش مقدار فرکانس وقوع GR-LOOP با افزایش سطح نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه را گزارش می‌کند. آنها با ارائه یک روش مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو در ساختار کلی PSA برای شبیه‌سازی سناریوهای پساخطا، نشان دادند که افزایش نفوذ باد به میزان ۱۰٪ در شبکه مورد مطالعه، نسبت به حالت پایه با ۰٪ نفوذ، سبب افزایش فرکانس وقوع GR-LOOP به میزان ۳۲٪ خواهد شد. محدودیت اصلی این تحقیق، مشابه همه روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو، زمان مورد نیاز آن به دلیل تعداد بسیار بالای شبیه‌سازی است.

علی‌رغم اهمیت تأثیر افزایش نفوذ تولیدات مزارع بادی در شبکه انتقال بر فرکانس وقوع GR-LOOP، ما موفق به یافتن تعداد کمی از مطالعات مرتبط شدیم که به آن پرداخته باشند. این موضوع از دو جهت قابل تأمل است، (۱) دست‌نخورده ماندن موضوع به جهت تفاوت دیدگاه و تخصص محققین دو حوزه مختلف شبکه برق و هسته‌ای، (۲) مغفول ماندن اهمیت موضوع فارغ از ماهیت میان رشته‌ای آن. به همین منظور، در این مقاله، تأثیر میزان نفوذ تولیدات مزارع بادی، بر فرکانس وقوع حادثه از دست رفتن منبع برق خارجی به نیروگاه هسته‌ای بررسی شده است.

مقاله، پس از ارائه مقدمه فوق (بخش ۱)، در ادامه شامل بخش‌های زیر است: ابتدا روش احتمالاتی - قطعی مورد اشاره در بخش روش‌شناسی (بخش ۲)، به تفصیل معرفی خواهد شد. سپس، در بخش ۳ روش مذکور بر روی شبکه ۳۹ شینه IEEE اعمال و نتایج اخذ خواهند شد. نتایج مذکور به همراه تحلیل و استنتاج‌های مقتضی در بخش نتایج و بحث (بخش ۴) ارائه می‌شوند. در انتها، در بخش نتیجه‌گیری (بخش ۵)، نتیجه بررسی فرضیه تحقیق و چکیده نتایج مربوطه، به همراه پیشنهادات مربوطه جهت مطالعات آتی، ارائه خواهد شد.

## ۲. روش انجام

شکل ۱، فرایند کلی انجام این تحقیق را نشان می‌دهد. این روش، در واقع، تعمیم روش مرکب احتمالاتی - دینامیکی برای محاسبه فرکانس GR-LOOP ناشی از وقوع خطای اتصال کوتاه سه فاز بر روی خطوط انتقال است. با استفاده از این روش، اثر تغییر توأمان محل اتصال نیروگاه‌های هسته‌ای به شبکه و وضعیت شبکه پیش‌خطا از لحاظ میزان نفوذ تولید برق از مزارع بادی را نیز بررسی می‌نماید. جزئیات روش دوگان مذکور در [۱۲] آورده شده است.



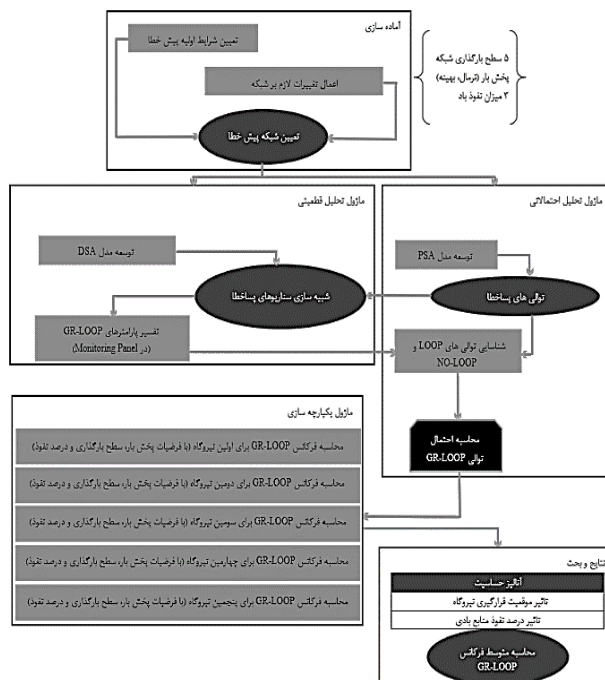
۲.۱ بلوک آماده‌سازی

با توجه به ماهیت دینامیکی ماژول تحلیل قطعی، وضعیت شبکه پیش‌خطا، نقش تعیین‌کننده در تعیین نتایج شبیه‌سازی نهایی پساخطا خواهد داشت. در این مرحله، شبکه‌های پیش‌خطا از نظر پیکربندی شبکه انتقال، تجهیزات شبکه، میزان نفوذ و محل اتصال مزارع بادی، سطوح تولید و بارگذاری، آماده‌سازی می‌شوند. مراحل آماده‌سازی شبکه‌های پیش‌خطا در شکل ۲ ارائه شده است. بر این اساس و با نظر به اهداف مورد نظر تحقیق، ابتدا موقعیت مزارع بادی در شبکه به گونه‌ای تعیین می‌شود که با محدودیت‌های بارگذاری خطوط انتقال در معیار  $n-1$  امنیت، مغایرت نداشته باشد. سپس، شبکه‌های پیش‌خطا، حاوی درصد‌های مختلف نفوذ تولیدات مزارع بادی و سطوح بارگذاری مختلف، و با دو پیش فرض پخش بار عادی (با فرض نرخ هزینه تولید برابر برای همه واحدها) و بهینه (با استفاده از پخش اقتصادی بار)، تولید می‌شوند.

همچنین، حفاظت‌های مورد نیاز نظیر رله‌های حفاظت دیستانس برای خطوط انتقال، رله‌های فرکانسی برای ژنراتورها و بارها، و همچنین حفاظت‌های ویژه ژنراتورهای بادی در شبکه مذکور تعبیه شده‌اند.

۲.۲ بلوک تحلیل احتمالاتی

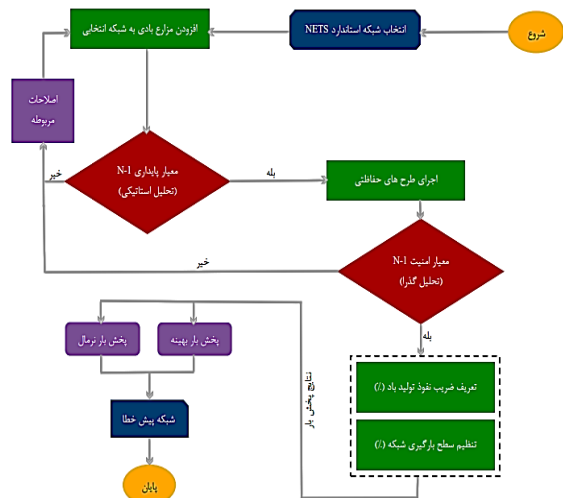
هدف ماژول احتمالاتی، توسعه توالی‌های پساخطا، شناسایی دنباله‌های منجر به LOOP از بین آنها و همچنین تخمین فرکانس توالی‌ها به صورت مجزا برای هر کدام از نیروگاه‌های مدنظر است. جهت نیل به این هدف، و با اشاره به روش PSA، درخت‌های رویداد و درخت‌های خطا، توسعه داده شده‌اند. در این تحقیق، کلیه دنباله‌های خطای تولید شده در مدل احتمالاتی، از این به بعد توالی خطا نامیده شده‌اند.



شکل ۱. چارچوب کلی عملیاتی روش مرکب جهت محاسبه فرکانس وقوع GR-LOOP

در مرحله نخست، شبکه پیش‌خطا از نظر پیکربندی، میزان بار، درصد نفوذ و محل قرارگیری مزارع بادی آماده می‌شود (جزئیات مربوطه در بخش ۲.۱ تشریح خواهد شد). در این تحقیق، شبکه پیش‌خطا به وضعیت پایدار شبکه با توجه به پیکربندی، سطح بارگذاری، وضعیت پخش بار و مدل بهره‌برداری، درست در لحظه پیش از وقوع خطا اطلاق می‌گردد. در مقابل، شبکه پساخطا، برای وضعیت شبکه درست پس از وقوع خطا در شبکه پیش‌خطا تعریف می‌شود.

سپس، در ماژول تحلیل احتمالاتی، برای هر شبکه پیش‌خطا و با استفاده از روش مرسوم Probabilistic Safety Analysis (PSA)، مدل احتمالاتی-دینامیکی تولید می‌گردد. مدل مذکور، همه توالی‌های پساخطا را، چه منجر به LOOP شده باشند و چه خیر (NO LOOP)، توسعه می‌دهد. در بخش ۲.۲، چگونگی اجرای این فرایند تبیین می‌گردد. جهت شناسایی وضعیت‌های منجر به LOOP، نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در مدل قطعی (مطابق با روش ارائه شده در بخش ۲.۳)، با در نظر گرفتن پارامترهای پایداری (Stability) شبکه، تفسیر می‌شوند. در انتها، در ماژول یکپارچه‌سازی، فرکانس وقوع LOOP، با ادغام نهایی نتایج به‌دست آمده از بلوک‌های احتمالاتی و قطعی، محاسبه می‌گردد.



شکل ۲. فرایند آماده‌سازی شبکه پیش‌خطا با توجه به پارامترهای مدنظر.



### ۲.۴ بلوک یکپارچه‌سازی و نتایج

در این بلوک، با یکپارچه‌سازی نتایج به‌دست آمده در مدل احتمالاتی و شبیه‌سازی قطعیتی، فرکانس وقوع GR-LOOP در همه توالی‌های منتج به LOOP در پی وقوع خطای اتصال کوتاه سه فاز در شبکه، محاسبه می‌شود. همچنین، جهت تعیین تأثیر پارامترهای مورد مطالعه، موارد حساسیت مربوطه با توجه به محل قرارگیری نیروگاه‌ها، درصد نفوذ مزارع بادی در تولید شبکه، و مدل توزیع بار و تولید، تعریف و نتیجه نهایی بر فرکانس وقوع LOOP محاسبه می‌شوند.

با در نظر گرفتن احتمالات شرطی در محاسبات، فرکانس وقوع GR-LOOP برای هر نیروگاه هسته‌ای در هر وضعیت پیش‌خطای شبکه، از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد، در این رابطه،  $P-Cond_{scen}$ : احتمال وقوع GR-LOOP در هر سناریوی پساخطا

$L_{Line}$ : طول خط انتقال بر حسب کیلومتر

$\lambda_{3ph-Shc}$ : فرکانس وقوع خطای ۳Ph-Shc بر واحد طول خطوط انتقال در سال (( $1/(Km.year)$ ))

$f_i$ : درصدی از طول خط که محاسبات پساخطا برای وقوع خطا بر روی آن انجام شده است (مقادیر احتمالات سطوح بار)  
 $f_j$ : احتمال وقوع هر یک از وضعیت‌های پیش‌خطای شبکه (شامل سطح بار و درصد نفوذ بادی مربوط به آن وضعیت)، می‌باشند.

$$P_{(GR-LOOP)NPP}^{STCase} = \sum_i f_i \times \sum_{Lines} \left( \lambda_{3ph-Shc} \times L_{Line} \times \sum_{Scenarios} (P-Cond_{scen}) \right) \quad (1)$$

### ۳. مطالعه موردی

مطالعه موردی بر روی شبکه New England Test System (NETS) انجام شده است که نسخه تحقیقاتی از مدل شبکه انتقال شمال شرق آمریکا و جنوب کانادا را ارائه می‌کند. شبکه مذکور شامل ۱۰ نقطه ژنراتور، ۱۹ نقطه بار و ۳۴ خط انتقال با ۳۸ باس‌بار مختلف است. در ادامه، ۴ مزرعه بادی که هر یک متشکل از تعدادی توربین بادی موازی از نوع DFIG می‌باشد، به شبکه اضافه شده است. تنظیم توان الکتریکی تولید شده توسط مزارع بادی برای تحقق ظرفیت مورد نظر، با تغییر تعداد توربین‌ها و ظرفیت اسمی آن‌ها قابل انجام است. شبکه مذکور به همراه نقطه اتصال پست‌های اصلی و کمکی ۵ نیروگاه هسته‌ای ( $G_{0.1}, G_{0.2}, G_{0.3}, G_{0.4}, G_{0.5}, G_{0.6}, G_{0.7}, G_{0.8}, G_{0.9}$ ) و چهار مزرعه بادی مربوطه

در مدل‌سازی درخت رویداد، خطای اتصال کوتاه ۳ فاز، در ۳ قسمت مختلف خطوط انتقال (۲۰ درصد ابتدایی و انتهای، ۶۰ درصد میانی هر خط) به عنوان رویداد آغازگر در نظر گرفته می‌شود. همچنین، عملکرد سیستم حفاظت پست‌های دو طرف خط در پاسخ به خطای اتصال کوتاه سه‌فاز به عنوان رویدادهای بالایی درخت رویداد، مدل‌سازی شده است، که برای هر یک با توجه به معیار موفقیت آن، درخت خطا توسعه داده می‌شود. در ادامه با تولید هر توالی پساخطا، رفتار گذرای شبکه در پاسخ به رویداد آغازگر مدل‌سازی می‌گردد.

### ۳.۳ بلوک شبیه‌سازی قطعیتی

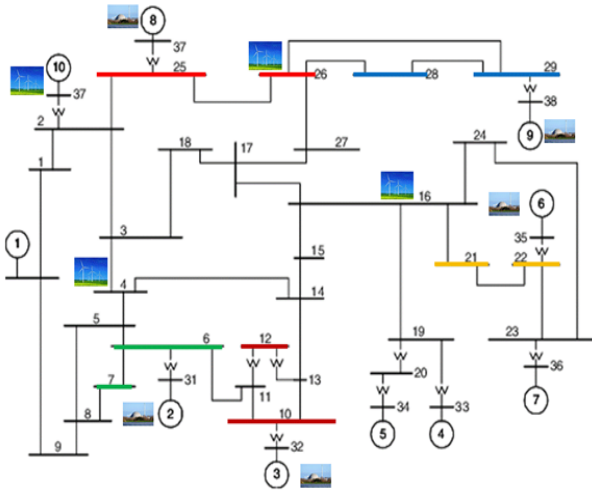
وظیفه این ماژول، تحلیل پاسخ قطعیتی شبکه با توجه به رفتار واقعی شبکه در ازای خطای رخ داده و جهت تعیین پیامد نهایی (LOOP یا NO LOOP) هر یک از توالی‌های تولید شده در مدل احتمالاتی است. بدین منظور، ابتدا کلیه توالی‌های خطایی که دارای رویداد آغازگر و در ادامه ترکیب مشابه از لحاظ پاسخ موفق یا عدم موفق سیستم‌های حفاظت مورد نیاز می‌باشند، دسته‌بندی شده‌اند. هر یک از دسته‌بندی‌های انجام شده که ممکن است شامل یک یا چند توالی خطا باشد، از این به بعد سناریوی خطا نامیده شده است. همچنین، سناریوهای خطا به گونه‌ای تعریف شده‌اند که به واسطه تفسیر نتایج حاصل از شبیه‌سازی آن‌ها، پیامد نهایی همه توالی‌های خطای پیشتر تشکیل شده، قابل تعیین و استنتاج باشد. برای هر سناریوی خطا شبیه‌سازی RMS به مدت ۲۰۰ ثانیه انجام شده است.

جهت تعیین پیامد نهایی سناریوهای شبیه‌سازی شده در بلوک قطعیتی، مبنی بر تأیید وقوع یا عدم وقوع LOOP در حالات پایانی توالی‌ها، نتایج شبیه‌سازی هر سناریو، پایش و تفسیر خواهد شد. به این منظور و با اشاره به معیارهای تعریف LOOP در مدارک ایمنی هسته‌ای و پارامترهای پایداری و امنیت شبکه در ضوابط بهره‌برداری خطوط انتقال (زاویه روتور (بار)، میزان بارگیری ژنراتور در نیروگاه مد نظر، ولتاژ و فرکانس پساخطا در هر دو پست اصلی و کمکی نیروگاه)، معیار تفسیر نتایج شبیه‌سازی هر سناریو، به صورت زیر بیان شده است [۱۳]:

"تجاوز توأمان هر یک از زوج پارامترهای ولتاژ یا فرکانس در هر دو پست اصلی و کمکی از محدوده مجاز عملکرد در شرایط اضطراری (انحراف خارج از محدوده  $\pm 5\%$  برای فرکانس و  $10\%$  و  $5\%$  برای ولتاژ کاری) در صورتی که با تریپ خود نیروگاه همراه باشد."

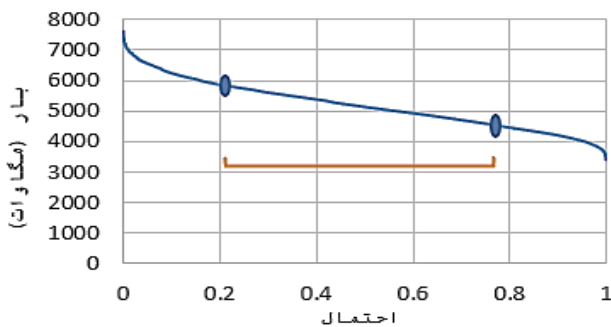


بر این اساس، ۳۰ شبکه پیش‌خطای نهایی با توجه به سطوح بارگذاری ۵ گانه، درصد نفوذهای ۳ گانه تولید بادی، و در انتها برای ۲ فرضیه پخش بار عادی و بهینه، آماده‌سازی شده، و برای محاسبات LOOP برای موقعیت قرارگیری ۵ نیروگاه هسته‌ای مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۳. شماتیک شبکه NETS، به همراه نیروگاه‌ها و مزارع بادی نصب شده.

### LDC



شکل ۴. منحنی مدت بار و متوسط احتمال وقوع بارهای مربوطه [۱۴].

(WF۶، WF۱۰، WF۱۶، WF۲۶) به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است. برای شبکه مورد نظر با ظرفیت تولید کلی ۱۱۲۰۰ مگاوات، ۵ سطوح بارگذاری نمونه به صورت ۳۴۱۷ مگاوات، ۴۵۵۷ مگاوات، ۵۶۹۶ مگاوات، ۶۸۳۵ مگاوات و ۷۵۹۵ مگاوات (با احتساب مقادیر کمینه، بیشینه و ۳ بار میانی) انتخاب شده است.

برای محاسبه احتمال وقوع هر یک از سطوح بار، مدت زمان وقوع بازه وجود هر سطح در طول سال از نمودار (شکل ۴) Load Duration Curve (LDC) مرتبط استخراج می‌شود. بدین ترتیب برای هر یک از ۵ سطح بار متوسط موجود احتمال وقوع مربوطه در شکل ۴ داده شده است. سپس، به منظور انجام آنالیز حساسیت نسبت به درصد نفوذ منابع بادی (مدنظر تحقیق)، ۳ حالت نسبی ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ برای درصد نفوذ تولیدات بادی در شبکه NETS در نظر گرفته شده است که منجر به تولید یک شبکه پیش‌خطا با هر یک از درصدهای نفوذ ۳ گانه باد در کلیه سطوح بار در نظر گرفته شده می‌گردد. در انتها، با توجه به رقابتی بودن قیمت تولید برق و قابلیت اطمینان در شبکه‌ها، مدل‌های پیش‌خطای شبکه برای ۲ حالت پخش بار بهینه و پخش بار عادی تولید شده‌اند. در پخش بار عادی، هزینه تولید واحدها، صرف‌نظر از نوعشان، یکسان در نظر گرفته شده است. در مقابل، در وضعیت بهینه پخش بار، تولید ژنراتورها با هدف به حداقل رساندن هزینه کلی بهینه می‌گردد. بدین منظور، تابع هزینه هر ژنراتور به صورت خطی در نظر گرفته شده و حل معادلات مربوط به پخش بار بهینه در نرم‌افزار GAMS صورت گرفته است. درصد بارگذاری ۵ نیروگاه هسته‌ای برای ۵ سطوح بار مختلف شبکه و در دو حالت پخش بار عادی و بهینه، در ۳ حالت نفوذ ۱۰٪، ۲۰٪ مشارکت مزارع بادی به ترتیب در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ ارائه شده است.

جدول ۱. درصد بارگذاری واحدهای هسته‌ای در حالات عملیاتی مختلف با فرض مشارکت مزارع بادی ٪

(O/N: Optimal/Normal Power Flow)

نیروگاه هسته‌ای	سطح بار		۷۵۹۵		۶۸۳۵		۵۶۹۶		۴۵۵۷		۳۴۱۷	
	پخش بار		O	N	O	N	O	N	O	N	O	N
G۲			۱۰۰	۹۴٫۳۲	۱۰۰	۸۴٫۸۹	۱۰۰	۴۴٫۷	۱۰۰	۵۵٫۹	۱۰۰	۴۴٫۴
G۳			۸۵٫۸۱	۸۹٫۳۸	۸۵٫۷	۸۵٫۷۳	۵۳٫۸	۴۴٫۷	۷۳٫۸	۶۱٫۵	۵۱٫۳	۸۷٫۴
G۶			۱۰۰	۹۵٫۲۶	۱۰۰	۸۵٫۷۳	۱۰۰	۴۴٫۷	۴۶٫۷	۶۱٫۵	۵۱٫۳	۸۷٫۴
G۸			۱۸٫۷۵	۹۶٫۵۸	۴۹٫۴۴	۷۵٫۶۸	۷۶٫۹۷	۶۱	۹۷٫۸	۵۴٫۵	۵۷٫۱	۸۴٫۳
G۹			۹۵٫۲۳	۸۸٫۱۱	۹۰٫۵۷	۸۷٫۷۹	۷۸٫۳۶	۷۳٫۱۶	۷۳٫۳	۲۵٫۵	۷۱٫۳	۸۹٫۴



جدول ۲. درصد بارگذاری واحدهای هسته‌ای در حالات عملیاتی مختلف با فرض مشارکت مزارع بادی ۱۰٪

(O/N: Optimal/Normal Power Flow)

۷۵۹۵		۶۸۳۵		۵۶۹۶		۴۵۵۷		۳۴۱۷		سطح بار	نیروگاه هسته‌ای
O	N	O	N	O	N	O	N	O	N	پخش بار	
۱۰۰	۹۲٫۵۶	۱۰۰	۸۲٫۵۱	۱۰۰	۶۷٫۴۴	۱۰۰	۵۲٫۳۶	۱۰۰	۳۷٫۲۹		G۲
۸۵٫۸۱	۹۱٫۴۷	۸۵٫۷	۸۱٫۵۴	۸۵٫۵۳	۶۶٫۶۴	۸۵٫۳۷	۵۱٫۷۵	۸۵٫۲	۳۶٫۸۵		G۳
۱۰۰	۹۹٫۰۹	۱۰۰	۸۸٫۳۴	۱۰۰	۷۲٫۲	۲۳٫۵۳	۵۶٫۰۶	۲۳٫۵۳	۳۹٫۹۲		G۶
۱۰۰	۷۶٫۱۳	۱۰۰	۶۷٫۸۷	۱۰۰	۵۵٫۴۷	۱۰۰	۴۳٫۰۷	۱۸٫۷۵	۳۰٫۶۷		G۸
۸۱٫۳۲	۹۵٫۳۶	۷۱٫۳	۸۵	۵۶٫۲۷	۶۹٫۴۷	۴۱٫۲۴	۵۳٫۹۴	۲۳٫۵۸	۳۸٫۴۱		G۹

جدول ۳. درصد بارگذاری واحدهای هسته‌ای در حالات عملیاتی مختلف با فرض مشارکت مزارع بادی ۲۰٪

(O/N: Optimal/Normal Power Flow)

۷۵۹۵		۶۸۳۵		۵۶۹۶		۴۵۵۷		۳۴۱۷		سطح بار	نیروگاه هسته‌ای
O	N	O	N	O	N	O	N	O	N	پخش بار	
۱۰۰	۷۱٫۶۹	۱۰۰	۶۳٫۱۷	۱۰۰	۵۰٫۴	۱۰۰	۳۷٫۶۳	۸۹٫۶۹	۲۴٫۸۶		G۲
۸۵٫۸۱	۸۱٫۱۸	۸۵٫۷	۷۱٫۵۳	۸۵٫۵۳	۵۷٫۰۷	۸۵٫۳۷	۴۲٫۶۱	۲۳٫۵۳	۲۸٫۱۵		G۳
۱۰۰	۹۵٫۹۴	۱۰۰	۸۴٫۵۳	۸۷٫۴۲	۶۷٫۴۵	۲۳٫۵۳	۵۰٫۳۶	۲۳٫۵۳	۳۳٫۲۷		G۶
۱۰۰	۶۲٫۷۳	۱۰۰	۵۵٫۲۷	۱۰۰	۴۴٫۱	۷۰٫۸۸	۳۲٫۹۳	۱۸٫۷۵	۲۱٫۷۵		G۸
۶۷٫۱۷	۸۶٫۴	۵۷٫۱۵	۷۶٫۱۳	۴۲٫۱۲	۶۰٫۷۴	۲۳٫۵۸	۴۵٫۳۵	۲۳٫۵۸	۲۹٫۹۶		G۹

هر نیروگاه هسته‌ای در هر حالت پیش‌خطای شبکه، ۴۰۸ سناریو به کمک ابزار RMS در نرم‌افزار DigSILENT-PowerFactory [۱۵] شبیه‌سازی شد.

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۴.۱ نتایج تحقیق پایه

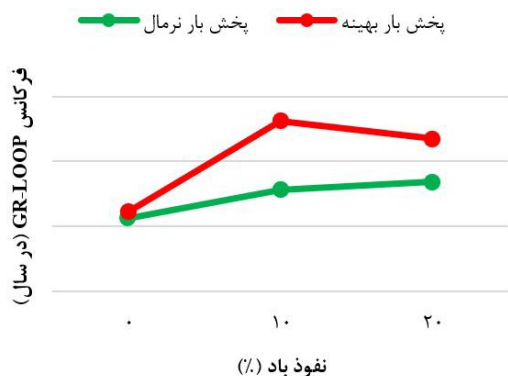
در این مطالعه، تأثیر پیکربندی و تغییرات در درصد نفوذ مزارع بادی در تولید برق، بر وقوع GR-LOOP در شبکه انتقال متصل به نیروگاه هسته‌ای، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، برای ۳۰ وضعیت بهره‌برداری اولیه در شبکه پیش‌خطا، دنباله‌های GR-LOOP ناشی از پاسخ سیستم حفاظت دیستانس به رخداد خطای اتصال کوتاه ۳ فاز بر خطوط انتقال، شناسایی شده‌اند. محاسبات برای ۵ موقعیت اتصال نیروگاه هسته‌ای به شبکه انجام و منجر به تولید ۱۵۰ فرکانس GR-LOOP شده است. به این هدف، با در نظر گرفتن ۳ محدوده وقوع خطا بر هر خط انتقال (۲۰٪ ابتدایی، ۲۰٪ انتهایی و ۶۰٪ میانی)، ۴۵۰ و ۱۵۳۰۰ وضعیت خطا، به ترتیب برای هر خط و مجموع ۳۴ خط انتقال موجود در شبکه، مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین، پاسخ شبکه پساخطا با توسعه ۳۸۲۵۰۰ توالی احتمالاتی پساخطا و متناظر با آن، ۶۱۲۰۰ سناریوی پساخطا شبیه‌سازی و تحلیل شده است.

سناریوهای پساخطا، ترکیبات معتبر پاسخ موفقیت‌آمیز یا ناموفق عملکرد تجهیزات اعمال حفاظت دیستانس از سمت هر دو پست دو انتهای خط، در پاسخ به یک خطای اتصال کوتاه ۳ فاز، در ۳ محدوده ابتدا، انتها و میانه هر خط انتقال می‌باشد. مدل احتمالاتی دنباله‌های خطا توسط درختان رویداد و خطای مربوطه تولید شده است. به عنوان نمونه، درخت رویداد مربوط به پاسخ پساخطای شبکه به خطای اتصال کوتاه ۳ فاز رخ داده در ۶۰ درصد میانی خط انتقال ۱-۲، و درخت خطای مربوط به سرشاخه عملکرد رله BFR از سمت پست دورتر، به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به لزوم مدل‌سازی جداگانه درخت رویداد برای وقوع خطا در ۳ موقعیت مختلف روی هر خط انتقال، تعداد ۷۵ سناریوی احتمالی پساخطا در هر خط، توسعه داده شد. با تکرار روند مذکور برای تمامی خطوط انتقال (۳۴ خط انتقال) موجود در شبکه، ۲۵۵۰ توالی احتمالاتی برای هر یک از ۵ نیروگاه هسته‌ای در هر شبکه پیش‌خطا ایجاد گردید. در نهایت فرکانس وقوع هر سناریو و مجموعه برشی کمینه آن، توسط نرم‌افزار RISKSPECTRUM محاسبه شد. همچنین، به تبعیت از مدل احتمالاتی مذکور، ۱۲ سناریوی پساخطا برای وقوع خطای ۳Ph-Shc بر روی هر خط شناسایی شده است. بر این اساس و با احتساب ۳۴ خط انتقال موجود در شبکه NETS، جهت محاسبه فرکانس LOOP برای



محاسبه شده برای فرکانس وقوع GR-LOOP محاسبه شده برای هر یک از نیروگاه‌های هسته‌ای G<sub>2</sub>، G<sub>3</sub>، G<sub>6</sub> و G<sub>8</sub> بیشتر، و در همان حال از مقدار فرکانس GR-LOOP محاسبه شده برای نیروگاه G<sub>9</sub> کمتر است. استفاده از مقدار متوسط برای نقاط اتصال پریسک‌تر و ایمن‌تر بر عدم قطعیت ناشی از استفاده از مقادیر متوسط فرکانس وقوع دلالت دارد. از سویی دیگر، اثر قابل ملاحظه تغییر در محل اتصال نیروگاه هسته‌ای به شبکه برق و حالات پیش‌خطای شبکه برق خارجی بر پیامدهای نهایی و فرکانس وقوع سناریوهای منجر به GR-LOOP، صحه می‌گذارد. تغییرات در شرایط اولیه و نقطه اتصال نیروگاه به شبکه، به ترتیب معادل تغییر در درصد نفوذ نیروگاه‌های بادی، مدل پخش بار و سطح بارگذاری و تغییر در آرایش شبکه برق خارجی متصل به نیروگاه است.

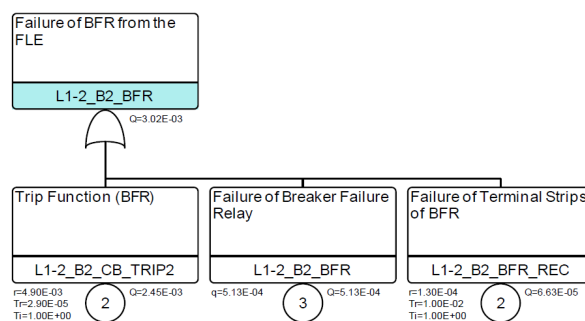
در شکل ۷ روند تغییرات فرکانس متوسط GR-LOOP برای شبکه‌هایی با ۳ درصد مختلف نفوذ مزارع بادی ارائه شده است. جهت مقایسه تأثیر مدل پخش بار، فرکانس‌های مربوطه برای پخش بار عادی (غیراقتصادی) و بهینه (اقتصادی) به طور مجزا نمایش داده شده است. هر مقدار فرکانسی، متوسط فرکانس‌های شرطی GR-LOOP برای ۵ موقعیت قرارگیری نیروگاه در ۵ سطح بارگذاری عملیاتی مختلف است. در محاسبه فرکانس‌های شرطی، احتمال رخداد شرایط پیش‌خطای شبکه (با توجه به احتمال رخداد سطح بارگذاری مشخص) نیز در احتمال یا فرکانس نهایی وقوع GR-LOOP در هر یک از شرایط مذکور لحاظ می‌گردد. با مقایسه نتایج، تأثیر افزایشی نفوذ مزارع بادی بر فرکانس وقوع GR-LOOP در شبکه‌های اولیه با پخش بار اقتصادی، قابل ملاحظه‌تر است. این مهم، تأییدی بر لزوم مصالحه میان معیارهای امنیت محور مبتنی بر قابلیت اطمینان شبکه خارجی نیروگاه هسته‌ای با مشوق‌ها و سنج‌های اقتصاد محور در شبکه‌های با اختلاط انرژی‌های نو و هسته‌ای است.



شکل ۷. فرکانس‌های متوسط GR-LOOP در ۳ درصد نفوذ باد با ۲ پخش بار بهینه و عادی.

GR-LOOP Cause	GR-LOOP Cause	GR-LOOP Cause	GR-LOOP Cause	GR-LOOP Cause	GR-LOOP Cause	GR-LOOP Cause	GR-LOOP Cause	GR-LOOP Cause	GR-LOOP Cause	No.	Freq.	Conseq.
GR-LOOP Cause 1	GR-LOOP Cause 2	GR-LOOP Cause 3	GR-LOOP Cause 4	GR-LOOP Cause 5	GR-LOOP Cause 6	GR-LOOP Cause 7	GR-LOOP Cause 8	GR-LOOP Cause 9	GR-LOOP Cause 10	1	2.73E-01	NO-LOOP, MF
GR-LOOP Cause 11	GR-LOOP Cause 12	GR-LOOP Cause 13	GR-LOOP Cause 14	GR-LOOP Cause 15	GR-LOOP Cause 16	GR-LOOP Cause 17	GR-LOOP Cause 18	GR-LOOP Cause 19	GR-LOOP Cause 20	2	6.00E-03	NO-LOOP, MF
GR-LOOP Cause 21	GR-LOOP Cause 22	GR-LOOP Cause 23	GR-LOOP Cause 24	GR-LOOP Cause 25	GR-LOOP Cause 26	GR-LOOP Cause 27	GR-LOOP Cause 28	GR-LOOP Cause 29	GR-LOOP Cause 30	3	6.68E-04	NO-LOOP, MF
GR-LOOP Cause 31	GR-LOOP Cause 32	GR-LOOP Cause 33	GR-LOOP Cause 34	GR-LOOP Cause 35	GR-LOOP Cause 36	GR-LOOP Cause 37	GR-LOOP Cause 38	GR-LOOP Cause 39	GR-LOOP Cause 40	4	2.02E-06	LOOP, M(FNOT)
GR-LOOP Cause 41	GR-LOOP Cause 42	GR-LOOP Cause 43	GR-LOOP Cause 44	GR-LOOP Cause 45	GR-LOOP Cause 46	GR-LOOP Cause 47	GR-LOOP Cause 48	GR-LOOP Cause 49	GR-LOOP Cause 50	5	6.68E-04	NO-LOOP, MF
GR-LOOP Cause 51	GR-LOOP Cause 52	GR-LOOP Cause 53	GR-LOOP Cause 54	GR-LOOP Cause 55	GR-LOOP Cause 56	GR-LOOP Cause 57	GR-LOOP Cause 58	GR-LOOP Cause 59	GR-LOOP Cause 60	6	1.63E-06	NO-LOOP, MF
GR-LOOP Cause 61	GR-LOOP Cause 62	GR-LOOP Cause 63	GR-LOOP Cause 64	GR-LOOP Cause 65	GR-LOOP Cause 66	GR-LOOP Cause 67	GR-LOOP Cause 68	GR-LOOP Cause 69	GR-LOOP Cause 70	7	4.91E-09	LOOP, M(FNOT)
GR-LOOP Cause 71	GR-LOOP Cause 72	GR-LOOP Cause 73	GR-LOOP Cause 74	GR-LOOP Cause 75	GR-LOOP Cause 76	GR-LOOP Cause 77	GR-LOOP Cause 78	GR-LOOP Cause 79	GR-LOOP Cause 80	8	2.02E-06	NO-LOOP, M(FNOT)
GR-LOOP Cause 81	GR-LOOP Cause 82	GR-LOOP Cause 83	GR-LOOP Cause 84	GR-LOOP Cause 85	GR-LOOP Cause 86	GR-LOOP Cause 87	GR-LOOP Cause 88	GR-LOOP Cause 89	GR-LOOP Cause 90	9	4.91E-09	NO-LOOP, M(FNOT)
GR-LOOP Cause 91	GR-LOOP Cause 92	GR-LOOP Cause 93	GR-LOOP Cause 94	GR-LOOP Cause 95	GR-LOOP Cause 96	GR-LOOP Cause 97	GR-LOOP Cause 98	GR-LOOP Cause 99	GR-LOOP Cause 100	10	1.48E-11	LOOP, M(MOT)(FNOT)
GR-LOOP Cause 101	GR-LOOP Cause 102	GR-LOOP Cause 103	GR-LOOP Cause 104	GR-LOOP Cause 105	GR-LOOP Cause 106	GR-LOOP Cause 107	GR-LOOP Cause 108	GR-LOOP Cause 109	GR-LOOP Cause 110	11	2.46E-06	LOOP, M(FNOT)
GR-LOOP Cause 111	GR-LOOP Cause 112	GR-LOOP Cause 113	GR-LOOP Cause 114	GR-LOOP Cause 115	GR-LOOP Cause 116	GR-LOOP Cause 117	GR-LOOP Cause 118	GR-LOOP Cause 119	GR-LOOP Cause 120	12	6.03E-09	LOOP, M(FNOT)
GR-LOOP Cause 121	GR-LOOP Cause 122	GR-LOOP Cause 123	GR-LOOP Cause 124	GR-LOOP Cause 125	GR-LOOP Cause 126	GR-LOOP Cause 127	GR-LOOP Cause 128	GR-LOOP Cause 129	GR-LOOP Cause 130	13	1.62E-11	LOOP, M(MOT)(FNOT)
GR-LOOP Cause 131	GR-LOOP Cause 132	GR-LOOP Cause 133	GR-LOOP Cause 134	GR-LOOP Cause 135	GR-LOOP Cause 136	GR-LOOP Cause 137	GR-LOOP Cause 138	GR-LOOP Cause 139	GR-LOOP Cause 140	14	2.46E-06	NO-LOOP, M(FNOT)
GR-LOOP Cause 141	GR-LOOP Cause 142	GR-LOOP Cause 143	GR-LOOP Cause 144	GR-LOOP Cause 145	GR-LOOP Cause 146	GR-LOOP Cause 147	GR-LOOP Cause 148	GR-LOOP Cause 149	GR-LOOP Cause 150	15	6.03E-09	NO-LOOP, M(FNOT)
GR-LOOP Cause 151	GR-LOOP Cause 152	GR-LOOP Cause 153	GR-LOOP Cause 154	GR-LOOP Cause 155	GR-LOOP Cause 156	GR-LOOP Cause 157	GR-LOOP Cause 158	GR-LOOP Cause 159	GR-LOOP Cause 160	16	1.62E-11	LOOP, M(MOT)(FNOT)
GR-LOOP Cause 161	GR-LOOP Cause 162	GR-LOOP Cause 163	GR-LOOP Cause 164	GR-LOOP Cause 165	GR-LOOP Cause 166	GR-LOOP Cause 167	GR-LOOP Cause 168	GR-LOOP Cause 169	GR-LOOP Cause 170	17	2.22E-11	LOOP, M(MOT)(FNOT)

شکل ۵. درخت رویداد پاسخ شبکه به خطای ۳Ph-Shc در ۶۰٪ میانجی خط انتقال بین پست‌های ۱ و ۲.



شکل ۶. درخت خطای عملکرد رله پشتیبان از سمت پست دور، برای خطای ۳Ph-Shc بر خط انتقال ۱-۲.

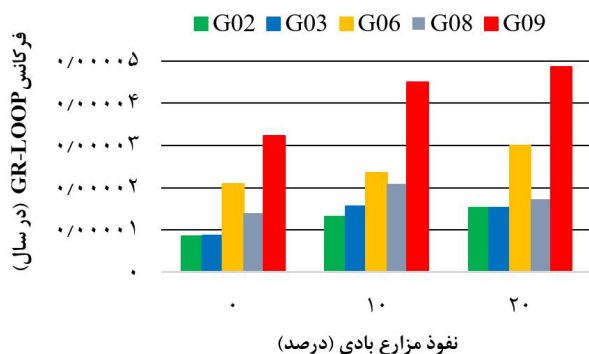
مقادیر فرکانس وقوع GR-LOOP برای تمام موارد حساسیت در جدول ۴ ارائه شده است. این مقادیر متوسط مقادیر متناظر فرکانس وقوع GR-LOOP در تمامی ۵ سطح بارگذاری مورد مطالعه است. ردیف نهایی در جدول مربوطه، مقدار میانگین فرکانس وقوع GR-LOOP برای ۵ نیروگاه هسته‌ای را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، و با در نظر گرفتن معیارهای ایمنی هسته‌ای مربوط به GR-LOOP، G<sub>2</sub> و G<sub>3</sub> با کمترین و G<sub>9</sub> با بیشترین فرکانس وقوع، به ترتیب ایمن‌ترین و پریسک‌ترین نقاط برای اتصال نیروگاه‌های هسته‌ای در شبکه NETS در حالات با/ بدون نفوذ مزارع بادی می‌باشند.

برای شبکه مورد بررسی، میانگین فرکانس وقوع GR-LOOP برای ۵ وضعیت قرارگیری نیروگاه هسته‌ای، و در ۳ درصد نفوذ ۰٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ مزارع بادی، به ترتیب  $1.68 \times 10^{-5}$ ،  $2.35 \times 10^{-5}$ ،  $2.52 \times 10^{-5}$  در سال کاری نیروگاه محاسبه شده است. مقادیر متوسط فوق‌الذکر از مقادیر متوسط



جدول ۴. فرکانس وقوع GR-LOOP برای نیروگاه‌ها با فرضیات پخش بار، برای ظرفیت‌های نسبی بادی مختلف ( $\times 10^7$ )

ظرفیت نسبی باد (معادل ضریب نفوذ بادی = %)						نیروگاه هسته‌ای
%۲۰		%۱۰		%۰		
پخش بار						
بهبینه	نرمال	بهبینه	نرمال	بهبینه	نرمال	
۲۷۰	۱۵۲	۳۱۰	۱۳۱	۷۲٫۴	۸۸٫۴	G۲
۲۷۰	۱۵۲	۳۱۰	۱۵۵	۶۸٫۸	۸۵٫۸	G۳
۳۵۶	۲۹۹	۳۸۷	۲۳۴	۲۱۷	۲۰۸	G۶
۳۶۴	۱۷۲	۴۰۸	۲۰۹	۱۶۰	۱۴۰	G۸
۵۰۰	۴۸۶	۵۵۶	۴۴۹	۳۹۷	۳۲۳	G۹
۳۵۲	۲۵۲	۳۹۳	۲۳۵	۱۸۳	۱۶۸	متوسط



شکل ۸. فرکانس متوسط وقوع GR-LOOP برای هر نیروگاه هسته‌ای در ۳ درصد مشارکت مزارع باد.

از سویی دیگر، نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که روند متوسط فرکانس وقوع GR-LOOP برای افزایش میزان نفوذ از ۱۰٪ به ۲۰٪ کاهش یافته است. برای توجیه، لازم است عوامل مؤثر در ایجاد چنین اثر کاهشی از حداقل دو جنبه متضاد مورد توجه قرار گیرد: (۱) اثر تخریبی افزایش درصد مشارکت برق بادی، که ناشی از رفتار دینامیکی مزارع بادی و تأثیر آن بر پایداری و امنیت شبکه پس از وقوع خطاست، و (۲) اثر بهبوددهنده افزایش میزان مشارکت تولید بادی در تأمین بخش بیشتری از مصرف شبکه توسط مزارع بادی در نقاط میانی شبکه. در راستای ارزیابی برآیند اثر دو عامل عنوان شده باید توجه داشت که (اولاً) گره‌های اتصال مزارع بادی موجود به شبکه در این تحقیق عمدتاً در نقاط میانی شبکه انتخاب شده است، و (ثانیاً) بهای نسبی برق تحویلی توسط مزارع بادی در این تحقیق بسیار ناچیز (صفر) فرض شده است. به عنوان اثر بهبوددهنده، ترجیح تأمین توان توسط مزارع بادی ارزان‌تر متصل به گره‌های میانی (و نزدیک‌تر به نقاط بار) و در نتیجه آن، کاهش بارگذاری خطوط انتقال میانی شبکه، سبب بهبود پایداری و امنیت آن می‌شود. در مقابل، افزایش درصد مشارکت برق بادی در شبکه، با نظر به اثر تخریبی رفتار دینامیکی مزارع

همچنین به جهت ارزیابی تأثیر میزان نفوذ نیروگاه‌های بادی در تولید بر قابلیت اطمینان شبکه در نقاط اتصال نیروگاه‌های هسته‌ای، مقادیر فرکانس وقوع GR-LOOP برای ۵ موقعیت اتصال، و در ۳ درصد نفوذ تولیدات بادی، به صورت متوسط‌گیری شده روی سطوح بار، در شکل ۸ ارائه شده است. اگرچه اثر افزایشی نفوذ مشارکت مزارع بادی در تولید بر فرکانس شرطی وقوع GR-LOOP در این نمودار نیز قابل مشاهده است، اما نکته حائز اهمیت تفاوت در نسبت افزایش برای نقاط اتصال مختلف است. به عنوان مثال، افزایش نفوذ مزارع بادی در شبکه از ۱۰٪ به ۱۴٪ موجب ۱٫۴ و ۱٫۸ برابر شدن در فرکانس وقوع GR-LOOP به ترتیب برای نقاط اتصال نیروگاهی G۹ (پریسک‌ترین موقعیت اتصال) و G۳ (کم‌ریسک‌ترین موقعیت اتصال) می‌شود. این افزایش قابل ملاحظه، نشان از تأثیر بالای نفوذ مزارع بادی، بر امنیت شبکه متصل به نیروگاه هسته‌ای دارد. از این‌رو لازم است در صورت تغییر در ظرفیت نسبی منابع برق بادی، مطالعات ایمنی هسته‌ای نیز در کنار سایر مطالعات شبکه به عنوان یکی از پارامترها و معیارهای اساسی در ارزیابی ریسک نیروگاه مطرح گردد.

۱۰۴ نتایج آنالیز حساسیت برای درصد نفوذ ۲۰٪ مزارع بادی اثر کلی بهره‌برداری از مزارع بادی در شبکه انتقال، در هر دو حالت مشارکت ۱۰٪ و ۲۰٪ ای میزان نفوذ تولید برق بادی نسبت به حالت بدون آن، بر فرکانس وقوع GR-LOOP افزایشی است. برای تفسیر این تأثیر، لازم است تأثیر دینامیک مزارع بادی به دنبال وقوع خطا در شبکه، که موجب کاهش پایداری شبکه می‌گردد، مدنظر قرار گیرد. اگرچه تعیین دقیق آن، نیازمند انجام مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌های مشابه تحقیق جاری است.





## ۵. نتیجه‌گیری

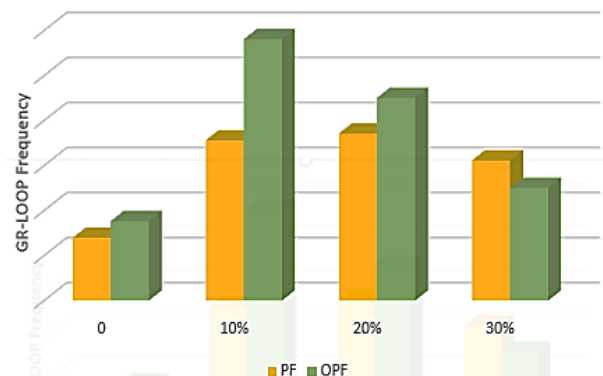
این مطالعه به صورت عام به هدف بررسی فرضیه عدم قطعیت و عدم عمومیت استفاده از داده‌های عام در محاسبه فرکانس GR-LOOP، به دلیل تغییر در شرایط شبکه پیش‌خطا، انجام شده است. در همین راستا، ابتدا، روشی تحلیلی جهت ارزیابی تأثیر عوامل مختلف در شرایط پیش‌خطای شبکه برق خارجی متصل به نیروگاه هسته‌ای بر فرکانس وقوع GR-LOOP ارائه شده است. سپس، با استفاده از روش مذکور، فرکانس وقوع رخداد GR-LOOP، ناشی از وقوع خطای اتصال کوتاه ۳ فاز بر خطوط انتقال، برای ۳۰ وضعیت اولیه بهره‌برداری و در ۵ موقعیت اتصال نیروگاه هسته‌ای در شبکه NETS انجام شد.

فرکانس شرطی رخداد GR-LOOP برای خطرناک‌ترین نقطه اتصال به شبکه و در ۳ میزان مشارکت ۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪ مزارع بادی در تولید برق شبکه، به ترتیب  $3.23 \times 10^{-5}$ ،  $4.49 \times 10^{-5}$ ،  $4.86 \times 10^{-5}$  بر سال کاری، ارزیابی شده است. مقادیر محاسبه‌شده متناظر برای امن‌ترین موقعیت اتصال نیروگاهی  $8.58 \times 10^{-6}$ ،  $1.55 \times 10^{-5}$ ،  $1.52 \times 10^{-5}$  در سال کاری نیروگاه متغیر است. بر این اساس، در شبکه‌های مختلط از لحاظ وجود هم‌زمان تولید برق از نیروگاه‌های هسته‌ای و مزارع بادی (انرژی‌های تجدیدپذیر)، ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای، به میزان قابل ملاحظه‌ای متأثر از میزان نفوذ تولیدات مزارع بادی و شرایط بهره‌برداری شبکه است. با توجه به مخاطرات ناشی از وقوع حادثه LOOP در نیروگاه‌های هسته‌ای و تأثیرپذیری مورد اشاره، لزوم در نظر گرفتن تأثیرات نصب و بهره‌برداری منابع تجدیدپذیر (و به طور مشخص مزارع بادی) در شبکه‌های تولید برق بر مسائل ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای از دیدگاه بهره‌بردار نیروگاه هسته‌ای مطرح می‌شود. همچنین، نیاز به لحاظ کردن معیارها و ضوابط ایمنی هسته‌ای در مطالعات برنامه‌ریزی انرژی‌های تجدیدپذیر در کنار مسائل اقتصادی را، به خصوص در شبکه‌های مختلط انرژی، خاطر نشان می‌سازد.

در تکمیل باید افزود که از سویی تأثیر مجزا و توأمان عوامل فوق‌الذکر بر فرکانس وقوع GR-LOOP برای نقاط اتصال مختلف نیروگاه هسته‌ای به شبکه، یکسان نیست. از سویی دیگر، تأثیر مذکور از رابطه‌ای تناسبی و قابل برازش نیز تبعیت نمی‌کند. به همین دلیل، نیاز به تدوین روش‌های تحلیلی افزون بر بهره‌گیری از روش‌های آماری مبتنی بر جمع‌آوری داده برجسته‌تر می‌شود.

در خاتمه، نتایج تحقیق حاضر، نیاز به طراحی و استفاده از ابزارهای تحلیلی در کنار روش‌های آماری جهت سنجش فرکانس GR-LOOP را بیش از پیش برجسته می‌سازد. نیاز مذکور به خصوص برای شبکه‌های با فقدان یا عدم کفایت

بادی بر پایداری و امنیت شبکه پس از وقوع خطا، سبب افزایش فرکانس وقوع GR-LOOP خواهد شد. غلبه هر یک از اثرات تخریبی یا بهبوددهنده فوق‌الذکر- مادامی که ظرفیت خطوط و تجهیزات شبکه برای انتقال توان بهره‌برداری شده از مزارع بادی کفایت کند- وابسته به شرایط شبکه پیش‌خطا و رفتارگذاری ساختمانی آن است. جهت بررسی این موضوع، تحلیل حساسیت برای میزان مشارکت ۳۰٪ مزارع بادی در تولید برق شبکه در بارگذاری‌های مختلف انجام شد. روند فرکانس متوسط وقوع GR-LOOP در ۴ حالت میزان مشارکت مزارع بادی در تولید شبکه، در شکل ۹، قابل مشاهده است. نتایج حاصل از انجام محاسبات<sup>۱</sup> برای میزان نفوذ ۳۰٪ مزارع بادی، در حالت پخش بار اقتصادی<sup>۲</sup>، حاکی از افزایش فرکانس وقوع نسبت به حالت بدون مزارع بادی است (مشابه با هر دو ضریب نفوذ ۱۰٪ و ۲۰٪). اگرچه میزان این افزایش، نسبت به ضریب نفوذ ۲۰٪ و ۱۰٪ کمتر است. بنابراین، نویسندگان این مقاله همچنان بر نیاز به تحلیل دقیق نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی حالات مربوطه به جای هر گونه تعمیم قیاسی و استدلالی در این مورد تأکید دارند: ارزیابی تأثیر افزایش میزان نفوذ مشارکت برق بادی در شبکه بر فرکانس وقوع GR-LOOP و ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای، نیازمند انجام تحلیل‌هایی مشابه این تحقیق، با در نظر گرفتن جزئیات شبکه پیش‌خطا نظیر آرایش، سطوح بارگذاری، نوع و نقطه اتصال نیروگاه‌های بادی است که می‌تواند موضوع تحقیقات بعدی در این زمینه باشد.



شکل ۹. فرکانس‌های متوسط GR-LOOP در ۴ درصد نفوذ باد با دو پخش بار بهینه و عادی.

۱. جهت تسریع در محاسبات و استنتاج اولیه، شبیه‌سازی در حالت مشارکت ۳۰٪ مزارع بادی در تولید برق برای ۳ وضعیت بهره‌برداری انتخابی کم‌باری (=۳۴۱۷ مگاوات)، متوسط‌باری (۴۵۵۷ مگاوات)، و پرباری (۷۵۹۵ مگاوات)، در هر ۲ حالت بهینه و غیربهینه انجام شد. بدین ترتیب، ارزیابی رفتار فرکانس وقوع GR-LOOP در درصد نفوذهای قبلی نیز برای همین ۳ سطح بارگذاری شبکه انجام شده است.

۲. اگرچه در حالت پخش‌بار عادی با فرض بهای یکسان تولید برای همه نیروگاه‌ها نیز، روندی مشابه قابل مشاهده است، اما متوسط فرکانس وقوع GR-LOOP برای حالت حضور مزارع بادی در شبکه به هم نزدیک‌ترند.



3. IEA. [Internal Energy Agency](#). 2021.
4. IAEA, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, 40th ed. [Vienna: IAEA](#). 2020.
5. IAEA-TECDOC-719. Defining Initiating Events for Purpose of Probabilistic Safety Assessment. [Vienna: IAEA](#). 1993.
6. Henneaux P, Labeau P.-E, Obama J.M. Reliability of offsite power of nuclear power plants in evolving power systems in: Proceedings of the 20e congrès de Maîtrise des risques et de Sûreté de Fonctionnement (Lambda Mu 20). [France](#). 2016.
7. IAEA-TECDOC-1770. Design Provisions for Withstanding Station Blackout at Nuclear Power Plants. [Vienna: IAEA](#). 2015.
8. Volkanovski A, Ballesteros Avila A, Peinador Veira M. Statistical Analysis of Loss of Offsite Power Events. [Science and Technology of Nuclear Installations](#). 2016.
9. Eide S. NUREG/CR-6890, Vol. 1: Reevaluation of Station Blackout Risk at Nuclear Power Plants: Analysis of Loss of Offsite Power Events:1986-2004. [U.S. Nuclear Regulatory Commission](#). 2005.
10. Kamyab S, Nematollahi M, Henneaux P, Labeau P.E. Development of a hybrid method to assess grid-related LOOP scenarios for an NPP. [Reliability Engineering & System Safety](#). 2021;206:107298.
11. Kamyab S, Nematollahi M, Henneaux P, Labeau P-E. Investigating the influence of the variation of the load characteristic on the occurrence frequency of Grid-related Loss of Offsite Power using a probabilistic-deterministic methodology. [Progress in Nuclear Energy](#). 2021;139:103870.
12. Kamyab S, Yousefpour F, Nematollahi M. Estimation of the frequency of occurrence for grid-related loss of offsite power (GR-LOOP) to a nuclear power plant. [Journal of Nuclear Science and Technology](#). 2020;43:76 [In Persian].
13. NG-T-3.8, Nuclear Energy Series, NG-T-3.8: Electric Grid Reliability and Interface with Nuclear Power Plants. [Vienna: IAEA](#). 2012.
14. Elia [Group](#), <https://www.elia.be/en/grid-data>.
15. DIgSILENT GmbH, PowerFactory Tutorial; DIgSILENT PowerFactory Version 14.0. [Germany: Gomarigen](#). 2008.

داده‌های به‌دست‌آمده از تجربیات بهره‌برداری نیروگاهی هسته‌ای شبیه ایران، واضح‌تر است. با این حال صرف‌نظر از کلیت روش ارائه شده و فلسفه آن، تعدد سناریوهای محتمل پیش‌خطای شبکه، تنوع دنباله‌های پساخطا، و حجم مدل‌های احتمالاتی و قطعی مورد مطالعه، افزایش غیرقابل قبول زمان محاسبات جهت دستیابی به دقت مورد نظر در برخی موارد را موجب می‌گردد. تأیید میزان کارایی روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین به عنوان جایگزین شبیه‌سازی به عنوان راهکاری جهت کاهش زمان محاسبات، می‌تواند موضوعی برای تحقیقات بعدی باشد.

### تشکر و قدردانی

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۹۹۰۳۱۵۵۳ انجام شده است.

بدین‌وسیله، همچنین، بر خود لازم می‌دانیم از نقطه نظرات داورهای محترم که موجبات ارتقای کیفیت مقاله حاضر را فراهم آوردند، اگرچه برای نویسندگان ناشناس ماندند، کمال قدردانی و سپاسگزاری را داشته باشیم.

### اختصارات

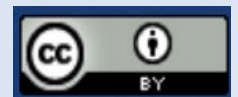
3Ph-Shc	3 phase short Circuit Fault
CDF	Core Damage Frequency
DFIG	Doubly-Fed Induction Generators
GR-LOOP	Grid Related Loss of Offsite Power
NETS	New England Test System
PSA RIDM	Probabilistic Safety Assessment Risk Informed Decision Making

### مراجع

1. Sawin J.L, Sverrisson F, Seyboth K, Adib R, Murdock H.E, Lins Ch, Brown A, Di Domenico S.E, Kielmanowicz D, Williamson L.E, Jawahar R, Appavou F, Musolino E, Petrichenko K, Farrell T.C, Thorsch K. Th, Skeen J, Epp B, Leidreiter A, Tsakiris A, Sovacool B, Saraph A, Mastny L, Martinot E. Renewables 2021-Global status report. 2021;52.
2. U.S. Energy Information Administration. International Energy Outlook 2019 with projections to 2050, 2019 ed. [Washington, DC: U.S. EIA](#). 2019.

### COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

کامیاب، شهاب‌الدین، پیرایش، مهسا، نعمت‌اللهی، محمدرضا. (۱۴۰۳)، بررسی تأثیر نفوذ مزارع بادی در شبکه انتقال توان الکتریکی متصل به نیروگاه هسته‌ای بر فرکانس رخداد حادثه از دست رفتن منبع برق خارجی. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*، ۱۱۰(۴)، ۹۶-۱۰۵. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1638>

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1638.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1638.html)

