

Improving the resilience of electric microgrids under storm conditions to optimize the operating forces of the electricity distribution company to reduce the duration of blackouts

Mohammad Abedini
m.abedini@abru.ac.ir

Abstract:

Hurricanes have a devastating impact on electrical infrastructure, causing widespread damage and leading to significant economic and social losses. Distribution networks, the most vulnerable component of the power grid, experience the most outages during these disasters, causing considerable inconvenience to residents in affected areas. This article addresses this challenge by introducing a multi-objective optimization problem for post-storm conditions in the distribution system. The goal is to minimize power outages through dynamic network reorganization and expedite repairs by efficiently deploying repair crews to accident sites. This ensures the network's swift restoration to its pre-storm state. The proposed objective function incorporates three factors: minimizing network switching operations, reducing load interruption, and minimizing system recovery time. It is solved using an improved differential optimization algorithm. Distribution networks, the most vulnerable components, experience most of these outages and cause significant inconvenience to residents in disaster areas; therefore, increasing their resilience is crucial to protecting power systems from the growing threat of extreme weather events. The concept of resilience, first introduced by ecologist Holling, describes the capacity of a system to absorb disturbances and survive. In the case of power systems, resilience refers to the ability to withstand rare but severe events effectively (Farzin et al., 2016). This means minimizing power outages during such events and ensuring a rapid return to normal operation. According to a report by the US Electric Power Research Institute, the resilience of a distribution network depends on three factors. The main distinguishing feature between reliability and resilience is that the former refers to disturbances with high probability and low impact, and the latter refers to low probability and high impact (Mishra et al., 2024). To overcome the above-mentioned limitations, an integrated simulation framework is proposed to assess the resilience of multiple microgrids to storms, which includes optimizing human resources in power supply against severe storms to increase the speed of load recovery and also minimizing switching in microgrids with minimal load interruption to restore the system in the fastest possible time during the incident. In this paper, the following issues have been addressed:

The failure probabilities of beams and lines are dynamically evaluated based on real-time storm wind speeds and nonlinear physical fragility curves. The introduced repair time objective function uniquely combines the path severity based on local storm intensity and road condition with optimal traffic routing. This directly links the movement of repair teams to the physical severity of the disaster environment. Switching actions are implemented sequentially and dynamically. The network topology adapts in real time as workers progress from one fault to another and as distributed generation capacities change, ensuring that the radial constraint is strictly maintained during the multi-stage recovery process.

The differential algorithm has been used to solve the problem of improving microgrid resilience with

the aim of reducing uncertainty, reducing repair time, and increasing resilience. For this purpose, this optimization method has been rewritten to solve the multi-objective problem. The theory of the multi-objective problem is completely different from single-objective problems. In single-objective problems, an attempt is made to obtain the best solution that is better than other existing solutions, but in multi-objective problems, there is no specific solution. In these problems, there are non-dominant or Pareto solutions that are not easily comparable with each other. Considering the objective functions introduced in this article, which are minimizing the cost of load shedding, reducing the number of switching operations, and minimizing the repair time, which will conflict with each other, a multi-objective differential algorithm has been used to solve this conflict created in the objective functions, and by using the ranking of the solutions, an attempt has been made to calculate solutions based on the Pareto envelope. In the ranking method, there is a rank for the number of existing populations; the best rank is for the solution with the highest fitness function. Then, this solution is temporarily removed until the next Pareto is identified and assigned the second rank, and this process continues. Also, to ensure a proper and diverse distribution of the solution set along the Pareto front, the crowding distance criterion is used. During the selection stage, if two candidate solutions belong to the same non-domination rank, the solution that is located in the less crowded region is preferred. This effectively maintains the diversity of the population and prevents premature convergence.

The proposed method has effectively reduced the cost of load shedding with changes in switching and power generation management, and in the second scenario, where two teams were dispatched, the algorithm has shown better performance in reducing the duration of load shedding. Gradually, with increasing wind speed, the amount of damage to lines and towers has increased, and the algorithm has successfully managed to create nearly a 25.5% improvement in load shedding cost by dispatching two teams. When the wind speed reaches above 65 m/s, due to the high volume of damage in both scenarios, although it has improved compared to the baseline, it has decreased compared to lower speeds. The article investigates two scenarios, demonstrating an 18% and 24% reduction in network load interruption, respectively. These results suggest that the proposed model can be a valuable tool for Tawanir, the Iranian electricity distribution company, to improve network resilience during hurricane events.

Keywords — Resilience, storm, differential algorithm, dynamic reconfiguration, repairs.

Date of sending the article: 2025/11/03

Acceptance date of the article: 2026/06/18

Name of the Corresponding Author: Mohammad Abedini

Corresponding Author's Address: Ayatollah Boroujerdi University, Kilometer 3, Ahvaz Road, Boroujerd, Lorestan Province, Iran.

بهبود تاب‌آوری ریزشکده‌های برق تحت شرایط طوفان با هدف بهینه‌سازی نیروهای عملیاتی شرکت توزیع برق جهت کاهش مدت‌زمان خاموشی

نوع مطالعه: پژوهشی

محمد عابدینی

دانشیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آیت الله بروجردی

m.abedini@abru.ac.ir

چکیده:

طوفان‌ها تأثیر مخربی بر زیرساخت‌های الکتریکی دارند. این رویدادها خسارات گسترده‌ای را ایجاد می‌کند که منجر به خسارات اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی می‌شود. شبکه‌های توزیع به‌عنوان آسیب‌پذیرترین جزء شبکه برق، بیشترین قطعی‌ها را در هنگام وقوع چنین بلایایی تجربه می‌کنند. این قطعی‌ها باعث ناراحتی قابل توجهی برای ساکنان مناطق آسیب دیده خواهد شد. از این رو در این مقاله یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه جهت مقابله با شرایط بعد از طوفان در سیستم توزیع معرفی می‌گردد تا علاوه بر آنکه به کمک بازآرایی دینامیکی بتوان قطعی برق را کاهش داد با برنامه‌ریزی مناسب بتوان تیم‌های تعمیراتی لازم را به محل‌های حادثه اعزام کرد تا بتوانند در حداقل زمان ممکن شبکه را به حالت قبل از وقوع طوفان برگردانند. از این رو تابع هدف ارائه شده دارای سه ترم شامل مینیمم‌سازی تعداد کلیدزنی در شبکه، کاهش میزان قطعی بار و حداقل کردن برنامه بازیابی سیستم می‌باشد که توسط الگوریتم بهینه‌سازی بهبود داده شده تفاضلی حل شده است. دو سناریو در مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است که بعد از انجام آنالیز حساسیت نتایج نشان می‌دهد که به طور متوسط به ترتیب ۱۸٪ و ۲۴٪ کاهش در قطع بار شبکه روی خواهد داد از این رو مدل پیشنهادی می‌تواند در شبکه‌های توزیع برق توسط توانیر در زمان حادثه مورد استفاده قرار بگیرد.

کلیدواژه‌ها: تاب‌آوری، طوفان، الگوریتم تفاضلی، بازیابی دینامیکی، تعمیرات.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۲۸

نام نویسنده مسئول: محمد عابدینی

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله بروجردی

۱- مقدمه

رویدادهای شدید آبوهوایی، بهویژه طوفانها، آسیب قابل توجهی به زیرساختهای الکتریکی وارد می‌کند که منجر به قطعی گسترده و اختلالات اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی می‌شود (Arab, et al., 2015). شبکه‌های توزیع که آسیب‌پذیرترین مؤلفه هستند، عمده این قطعی‌ها را تجربه می‌کنند و باعث ناراحتی‌های بزرگی برای ساکنان مناطق حادثه‌ای می‌شوند؛ بنابراین افزایش انعطاف‌پذیری شبکه‌های توزیع برای محافظت از سیستم‌های قدرت در برابر تهدید فزاینده رویدادهای شدید آبوهوایی بسیار مهم است. مفهوم تاب‌آوری که برای اولین بار توسط بوم‌شناس Holling معرفی شد، ظرفیت یک سیستم برای جذب آشفتگی‌ها و بقا را توصیف می‌کند. در مورد سیستم‌های قدرت، انعطاف‌پذیری به توانایی مقاومت در برابر حوادث نادر اما شدید به طور مؤثر اشاره دارد (Farzin, et al., 2016). این به معنای به حداقل رساندن قطع برق در چنین رویدادهایی و تضمین بازگشت سریع به عملکرد عادی است. بر اساس گزارش (Alto, 2013) توسط مؤسسه تحقیقاتی برق ایالات متحده، تاب‌آوری شبکه توزیع بر سه مورد (به عنوان مثال، پیشگیری، بازیابی و بقا) استوار است. مشخصه اصلی تمایز بین قابلیت اطمینان و تاب‌آوری این است که اولی به اختلالات با احتمال زیاد و کم‌تأثیر اشاره دارد و دومی به احتمال کم و تأثیر زیاد اشاره دارد (Mishra, et al., 2024).

با تقویت تیر برق‌ها در خطوط بحرانی، سیستم کمتر در معرض آسیب در طول رویدادهای شدید آبوهوایی می‌شود این موضوع تحت رویکرد پیشگیرانه در چارچوب تاب‌آوری قرار می‌گیرد (Ma, et al., 2018) و (Chen, et al., 2018).

ایجاد خطوط اتصال اضافی به اپراتور سیستم توزیع اجازه می‌دهد تا برق را تغییر مسیر دهد و فیدرهای جدا شده را به دنبال خطاها بازیابی کند، در حالی که ساختار کلی شبکه شعاعی را حفظ می‌کند (Yuan, et al., 2017) و (Shi, et al., 2018). که از آن تحت بازآرایی سیستم توزیع نام‌برده می‌شود. هم چنین افزایش تعداد منابع بادی، خورشیدی و باتری‌ها در کنار منابع سنتی تولید انرژی در شبکه‌های توزیع به افزایش تاب‌آوری می‌انجامد (Ghafarpour, et al., 2023). در ادامه، مطالعات مختلف در مورد تاب‌آوری شبکه توزیع را بررسی می‌کنیم.

مرجع (Chen & Chen, 2019) مدلی را برای بهینه‌سازی پیکربندی یک شبکه توزیع برای بهبود مقاومت آن در برابر بلایا پیشنهاد می‌کند. این مدل تأثیر کلیدهای خودکار را در نظر

می‌گیرد و هدف آن دستیابی به تعادل بین مزایای اقتصادی و بهبود تاب‌آوری است.

مطالعاتی مانند (Wei, et al., 2015) و (Gholami, et al., 2016) یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای را برای بهینه‌سازی زمان‌بندی یک ریزشبکه طراحی شده برای تاب‌آوری ارائه می‌دهند. این رویکرد در عدم قطعیت‌های مرتبط با بلایای طبیعی، نوسانات انرژی باد، شارژ وسایل نقلیه الکتریکی و قیمت‌های بازار نقش دارد. منابع (Bie, et al., 2016) و (Wu, et al., 2022) یک نمای کلی از تاب‌آوری شبکه توزیع ارائه می‌دهند. آنها در مورد مدل‌های ارزیابی مختلف مانند مثلث تاب‌آوری و مدل‌های دوزنقه‌ای بحث می‌کنند. علاوه بر این، آنها روش‌هایی را برای تعریف شاخص‌های تاب‌آوری، از جمله تعریف منطقه، تعریف احتمال، تعریف هزینه و روش‌های تعریف وزنی بررسی می‌کنند. شایان ذکر است، روش ناحیه از دست دادن توان پرکاربردترین روش است. تحقیقات موجود در مورد ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع در درجه اول بر بلایای طوفان متمرکز است. به عنوان مثال، (Sun, et al., 2019) چارچوبی را با استفاده از الگوریتم جستجوی فراابتکاری برای تقسیم سیستم به بخش‌ها و محاسبه کاهش بار بالقوه برای هر یک پیشنهاد می‌کند. در مرجع (Liang, et al., 2024) یک روش تجزیه برای تجزیه مسئله به دو زیر مسئله جداگانه برای سرعت بخشیدن به محاسبات پیشنهاد شده است. اثربخشی استراتژی برنامه‌ریزی سیستم های توزیع پیشنهادی در برابر زلزله از طریق مطالعات موردی بر اساس فیدر آزمایشی ارزیابی می‌شود. مرجع (Chen, et al., 2017) فرآیند ترمیم پس از خطا و مزایای نوسازی شبکه در بازسازی شبکه توزیع را مورد بحث قرار داده است.

در مرجع (Hasani & Khorsandi, 2024) روش جامعی برای مقابله با حملات هماهنگ سایبری بیان شده است تا انعطاف پذیری سیستم قدرت در مقابل حملات هماهنگ سایبری به شبکه بهبود داده شود. در (Qiu, et al., 2015) یک روش تحلیل ریسک آنلاین را پیشنهاد می‌کند که می‌تواند خطر آسیب‌پذیری منطقه‌ای سیستم قدرت، متأثر از رویدادهای شدید را فراهم کند. در مرحله پس از بروز طوفان، یک استراتژی بازیابی سیستم توزیع را پیشنهاد می‌کند تا در یک عملیات سریع، چندین ریزشبکه با منبع توان توزیع شده در آن را برای بازیابی بار بحرانی تشکیل دهد (Trakas, et al., 2015).

برای غلبه بر محدودیت‌های ذکر شده در بالا، یک چارچوب شبیه‌سازی یکپارچه برای ارزیابی تاب‌آوری چند ریزشبکه در

استحکام لازم اجزا را برای مقاومت در برابر نیروهای باد تعیین می‌کند (Madhiarasan, 2021).

۲-۱- مدل آسیب‌پذیری خط شبکه توزیع

معادله (۱)، مدل آسیب‌پذیری خط ($f_{t,l}$) را در زمان t نمایش می‌دهد (Panteli, et al., 2017).

$$f_{t,l} = \begin{cases} 1 & v \geq v_{col} \\ 0.02333v & v_{cr} \leq v \leq v_{col} \\ f_l^{min} & v \leq v_{cr} \end{cases} \quad (1)$$

در معادله (۱)، v سرعت باد عبوری از دکل است، v_{cr} نشان‌دهنده سرعت باد زمانی است که احتمال خرابی دکل به سرعت افزایش می‌یابد، و v_{col} سرعت فروپاشی باد زمانی است که احتمال شکست دکل یک می‌باشد.

۲-۲- مدل آسیب‌پذیری دکل شبکه توزیع

مشابه خطوط توزیع، دکل‌های شبکه توزیع نیز در معرض تهدیدات مختلف هستند و آسیب‌پذیری آنها را می‌توان به صورت ریاضی مدل کرد. معادله (۲)، مدل آسیب‌پذیری خط ($f_{t,p}$) را در زمان t نمایش می‌دهد (Panteli, et al., 2017).

$$f_{t,p} = \begin{cases} 1 & v \geq v_{col} \\ 0.00952v & v_{cr} \leq v \leq v_{col} \\ 0 & v \leq v_{cr} \end{cases} \quad (2)$$

پس در زمان t با توجه به اینکه خط در دکل و خط مستقل از یکدیگر هستند، احتمال شکست یک شاخه از سیستم در اثر باد را می‌توان به صورت (۳) تعریف کرد.

$$P_f = 1 - \prod_{p \in \lambda} (1 - f_{t,p}) \prod_{l \in \tau} (1 - f_{t,l}) \quad (3)$$

که $f_{t,l}$ و $f_{t,p}$ به ترتیب احتمال شکست یک دکل یا خط در زمان t هستند که با نداشت منحنی آسیب‌پذیری دکل (خط) به موقعیت سرعت باد دکل (خط) به دست می‌آید. λ و τ مجموعه‌ای از دکل و خط در شاخه f را نشان می‌دهند.

منحنی شکنندگی عمومی نشان داده شده در شکل (۱)، احتمال شکست اجزای شبکه بسته به شدت سرعت باد را برای خط و گره‌های (دکل) سیستم نشان می‌دهد.

برابر طوفان پیشنهاد شده است که شامل بهینه‌سازی منابع انسانی در برق‌رسانی در برابر طوفان شدید می‌شود تا سرعت بازیابی بار را افزایش دهد و نیز حداقل کلیدزنی در ریزشکبه‌ها با کمترین قطع بار را داشته باشد تا در سریع‌ترین زمان ممکن در زمان حادثه بتواند سیستم را بازیابی کند. از این رو نوآوری‌های مقاله عبارت‌اند از:

- به‌جای فرض حالت‌های خرابی استاتیک، احتمال خرابی تیرها و خطوط به صورت پویا بر اساس سرعت باد طوفان در زمان واقعی و منحنی‌های شکنندگی فیزیکی غیرخطی ارزیابی می‌شوند.

- تابع هدف زمان تعمیر معرفی شده به طور منحصر به فرد سختی مسیر را بر اساس شدت طوفان محلی و وضعیت جاده را با مسیریابی بهینه ترافیک ترکیب می‌کند. این امر حرکت تیم‌های تعمیر را مستقیماً به شدت فیزیکی محیط فاجعه مرتبط می‌کند.

- اقدامات سوئیچینگ به صورت متوالی و پویا پیاده‌سازی می‌شوند. توپولوژی شبکه با پیشرفت کارکنان از یک خطا به خطای دیگر و با تغییر ظرفیت‌های تولید پراکنده (DG) به صورت آنی سازگار می‌شود و تضمین می‌کند که محدودیت شعاعی در طول فرایند بازیابی چند مرحله‌ای به شدت حفظ شود.

- با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی جبهه چند پارتو (MDE) بهبود داده شده، تضاد مستقیم بین به حداقل رساندن هزینه‌های محدودسازی بار، محدودکردن سوئیچینگ فیزیکی و کاهش زمان سفر کارکنان برق را حل می‌شود و به‌جای یک راه‌حل تک‌هدفه ساده، یک جبهه تصمیم‌گیری بهینه پارتو عملی برای اپراتورها فراهم می‌شود.

پخش‌های ادامه مقاله عبارت‌اند از: در قسمت دوم مدل‌سازی شکنندگی اجزای سیستم تحت مطالعه آورده شده است. معرفی توابع هدف مسئله تاب‌آوری در بخش سوم بیان می‌گردد و در بخش چهارم روش حل مسئله بهینه‌سازی بحث خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی در بخش پنجم بحث خواهد شد.

۲- مدل‌سازی شکنندگی اجزای سیستم تحت مطالعه

تابع شکنندگی برای باد، احتمال خرابی یک سازه یا جزء تحت سرعت‌های مختلف باد را توصیف می‌کند. اساساً رابطه بین شدت باد و احتمال شکست را به تصویر می‌کشد. سرعت باد یک عامل حیاتی در طراحی سیستم‌های قدرت است، زیرا

منطقه صنعتی است، مقدار آن ۲ است. هنگامی که گره در منطقه تجاری است، مقدار آن ۱/۲ است و هنگامی که گره در منطقه مسکونی است، مقدار آن ۰/۹ است.

۲-۳ حداقل کردن تعداد کلیدزنی‌ها در شبکه حادثه دیده

با توجه به اینکه هدف این است بعد وقوع حادثه با کمترین هزینه بارهای شبکه را بازیابی کرد؛ لذا تابع هدف به صورت زیر می‌باشد:

$$f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^{n_{Branch}} (line_{t,b} - line_{t-1,b}) \quad (5)$$

در رابطه (۵)، T زمان مورد مطالعه، b شماره شاخه‌های شبکه و n_{Branch} تعداد کل شاخه‌ها در شبکه حادثه‌دیده می‌باشد. $line_{t,b}$ متغیر باینری صفر یا یک که نشان‌دهنده وضعیت باز یا بسته‌بودن خط می‌باشد و f_2 تعداد فرآیند کلیدزنی است.

۳-۳ به حداقل رساندن زمان تعمیر مورد انتظار^۱ در استراتژی‌های تعمیر

به حداقل رساندن زمان تعمیر مورد انتظار (ERT) یک هدف حیاتی در بهینه‌سازی استراتژی‌های تعمیر برای سیستم‌های زیرساختی مختلف مانند شبکه‌های توزیع برق، شبکه‌های حمل‌ونقل و شبکه‌های ارتباطی است. زمان بازیابی موردانتظار به عنوان تابعی از متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله تاب‌آوری بررسی می‌شود که شامل عواملی مانند زمان سفر کارکنان، پیچیدگی تعمیر و در دسترس بودن منابع بر اساس کارکنان اختصاص داده شده است. تابع هدف ERT به صورت معادله (۶) فرموله شده است:

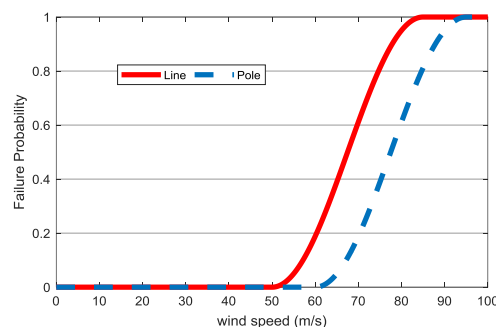
$$f_3 = \sum_{k=1}^{N_{staff}} \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^M \lambda_k^t \times dist_{i,t}(w(u,v)) \times time_{Rep,j}^k \quad (6)$$

$$w(u,v) = \frac{I_m^E}{e^{h(v)} (1 + \frac{1}{e^{h(v)}})} \quad (7)$$

$$h(v) = \begin{cases} 0 & v \leq v_{cr} \\ \varphi \left(\frac{\ln(v) - \mu}{\sigma} \right) & v_{ci} \leq v \leq v_{col} \\ 1 & v \geq v_{col} \end{cases} \quad (8)$$

$dist_{i,t}$ کوتاه‌ترین مسیر برحسب تابع وزنی $w(u,v)$ است که نشان‌دهنده برای طی کردن مسیر ترمیم i است. $time_{Rep,j}^k$ نشان‌دهنده زمان مورد نیاز کارکنان برای بازیابی مسیر j است.

¹ Minimizing Expected Repair Time (ERT)



شکل (۱): منحنی شکنندگی دکل‌ها و خطوط در سیستم مورد مطالعه

۳-۲ بهینه‌سازی فرآیندهای تعمیر اضطراری برای افزایش تاب‌آوری

بعد از وقوع بلایای طبیعی که باعث ایجاد خطاهای متنوع در شبکه می‌شود برای آنکه بتوان سیستم را به سرعت به شرایط اولیه برگردانیم باید سه مرحله شامل پیکربندی مجدد شبکه، بازیابی بار و استراتژی‌های تعمیر برای بهبود تاب‌آوری را پیاده‌سازی کرد.

۴-۲ الگوریتم Dijkstra برای شناسایی کمترین فاصله در شبکه تحت مطالعه بعد از طوفان

الگوریتم Dijkstra یک الگوریتم معروف است که برای یافتن کوتاه‌ترین مسیرها بین گره‌ها در یک نمودار وزنی استفاده می‌شود. این به‌ویژه برای پیمایش در شبکه‌های جاده‌ای، سیستم‌های حمل‌ونقل یا هر موقعیتی که باید کارآمدترین مسیر را بین دو نقطه با توجه به هزینه‌های سفر پیدا شود مفید است (Schulz, et al., 2017) از این رو در شکل (۳) نمودار مسیر ترافیکی ترسیم شده است که با کمک روش نام برده شده بهینه‌ترین مسیر شناسایی خواهد شد.

۳- مدل‌سازی توابع هدف مسئله تاب‌آوری

۳-۱- مینیمم کردن هزینه قطع بار

یکی از مهم‌ترین توابع هدف در مسئله افزایش تاب‌آوری بعد از وقوع حادثه کاهش میزان قطع بار شبکه از طریق نحوی کلیدزنی‌ها و تغییر در میزان ظرفیت منابع تولید پراکنده خواهد بود که به صورت زیر مدل شده است:

$$f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{bus}} C_{cost} X_{i,t} P_{i,t} \alpha_i \quad (4)$$

در معادله (۴)، C_{cost} هزینه قطع بار، $X_{i,t}$ متغیر باینری ۰ یا ۱ می‌باشد که نشان‌دهنده قطع بار در باس i در زمان t می‌باشد. $P_{i,t}$ تقاضای توان اکتیو در گره i در زمان t است. α_i وزن اهمیت گره در شبکه مورد مطالعه است، هنگامی که گره در

با طراحی صحیح شبکه توزیع بر این امر غلبه کرد؛ بنابراین، ولتاژ باید در محدوده عملیاتی حفظ شود.

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, n_{\text{Bus}} \quad (9)$$

- محدودیت جریان شاخه‌ها

جریان عبوری از هر شاخه نباید از حداکثر حد مجاز جریان انشعاب تجاوز کند.

$$I_i \leq I_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, n_{\text{branch}} \quad (10)$$

- محدودیت‌های واحد تولید پراکنده

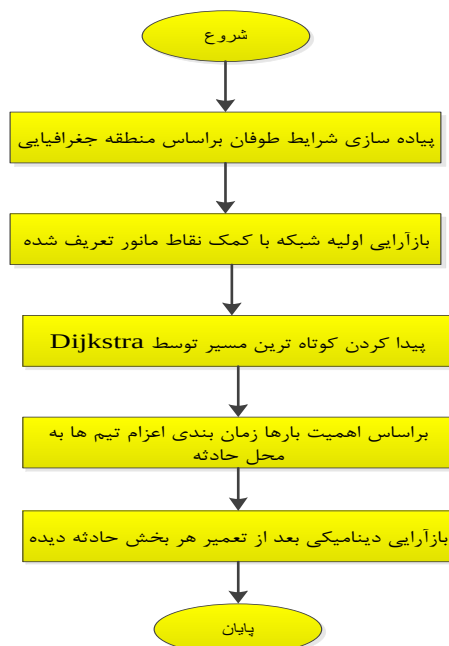
$$\sum_{k=1}^{n_{DG}} P_{DG,k} = P_{T,DG} \leq P_{\text{load}} \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^{n_{DG}} Q_{DG,k} = Q_{T,DG} \leq Q_{\text{load}} \quad (12)$$

توان اکتیو ($P_{T,DG}$) و راکتیو ($Q_{T,DG}$) کل توان تزریق‌شده توسط واحد تولید پراکنده باید از تقاضای کل بار اکتیو (P_{load}) و راکتیو (Q_{load}) کمتر باشد.

- محدودیت کلیدزنی

کلیدزنی که در زمان وقوع خطا صورت می‌پذیرد براساس این قانون خواهد بود که ساختار شعاعی شبکه در بازایی حفظ شود و زمان تعمیر محل خطا متناسب با زمان کلیدزنی می‌باشد. وضعیت کلید میان دو کار تعمیر نیز بدون تغییر است. در شکل (۲) مراحل پیاده‌سازی بازآرایی دینامیکی شبکه ترسیم شده است.



شکل (۲): ساختار پیاده‌سازی بازآرایی دینامیکی در شبکه حادثه دیده

مسیرهایی با وزن بالاتر به دلیل ویژگی‌های مطلوبشان مانند زمان تعمیر سریع‌تر احتمال انتخاب بیشتری خواهند داشت. ضریب $W_i(u, v)$ با در نظر گرفتن سرعت باد، طول مسیر میان دو گره u و v و سختی مسیر تا رسیدن به محل خطا محاسبه می‌شود. λ_k^t متغیر باینری مربوط به تیم عملیاتی جهت رفع خطا در نزدیک محل خطا است که مقدار آن ۱ یا ۰ خواهد بود. M و N_r به ترتیب بیانگر تعداد قسمت‌های خطا دیده شده و مسیرها تا محل خطا می‌باشد. در معادله (۷)، l_m^E طول فیزیکی واقعی مسیر m در شبکه ترافیک است. تابع $h(v_{uv}^{\max})$ نیز برحسب شدت طوفان در محل و وضعیت جاده‌ای تا محل خطا مطابق (۸) محاسبه می‌گردد (Chen, et al., 2017). که σ و μ انحراف معیار و میانگین ظرفیت مقاومت باد اجزا که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری تجهیز است. بدین ترتیب متغیرهای مسئله بهینه‌سازی شامل موارد زیر می‌باشند:

- متغیر باینری جهت قطع بار در شبکه مورد مطالعه
- متغیر باینری مربوط به وضعیت کلیدزنی
- زمان بازبایی مسیر توسط تیم عملیاتی شرکت برق

۳-۴- قیود حاکم بر مسئله بهینه‌سازی

تجزیه و تحلیل پخش بار باید در بهبود تاب‌آوری ریزشکده‌ها در سیستم توزیع مورد استفاده قرار بگیرد که برای تعیین ولتاژهای گره، تلفات توان و جریان شاخه‌ها پیاده‌سازی خواهد شد.

- قیود توان اکتیو و راکتیو

$$P_{i,t}^s + P_{i,t}^{DG} - \sum_{j \in N} A_{i,j} P_{i,j,t}^{\text{Line}} = P_{i,t}^D - P_{i,t}^{NS} \quad (7)$$

$$Q_{i,t}^s + Q_{i,t}^{DG} - \sum_{j \in N} A_{i,j} Q_{i,j,t}^{\text{Line}} = Q_{i,t}^D - Q_{i,t}^{NS} \quad (8)$$

در روابط (۷) و (۸)، $P_{i,t}^s$ و $Q_{i,t}^s$ به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تولیدی پست می‌باشد. $P_{i,t}^{DG}$ و $Q_{i,t}^{DG}$ توان اکتیو و راکتیو تولیدی منابع تولید پراکنده است. $P_{i,j,t}^{\text{Line}}$ و $Q_{i,j,t}^{\text{Line}}$ توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط است اگر خط در مدار باشد که پارامتر $A_{i,j}$ دارای مقدار باینری ۰ یا ۱ می‌باشد. $P_{i,t}^D$ و $Q_{i,t}^D$ نیز توان اکتیو و راکتیو تقاضا در باس i در زمان t می‌باشد. در نهایت، $P_{i,t}^{NS}$ و $Q_{i,t}^{NS}$ توان اکتیو و راکتیو بار تأمین نشده در باس i خواهد بود.

- محدودیت ولتاژ باس‌ها

مطالعات نشان می‌دهد که بیشتر نوسانات و قطعی ولتاژ در سیستم به شبکه توزیع نسبت داده می‌شود. با این حال، می‌توان

۴- روش حل مسئله بهینه‌سازی

الگوریتم تکامل تفاضلی جبهه پارتو^۲ (MDE) یک تکنیک بهینه‌سازی است که برای یافتن مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها برای مسائل با اهداف چندگانه استفاده می‌شود.

۴-۱- الگوریتم تفاضلی پایه

تکامل تفاضلی^۳ (DE) یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت است (Price & Storn, 1997). با تکامل مکرر جمعیتی از راه‌حل‌های کاندید کار می‌کند. در اینجا یک نمای ساده از آن نمایش داده شده است:

- مرحله اول (دهی اولیه): جمعیتی از راه‌حل‌ها با مقادیر پارامترهای انتخابی تصادفی ایجاد می‌شود.

$$x_{j,0} = [x_{j,1}(0), x_{j,2}(0), \dots, x_{j,n}(0)] \quad (13)$$

- مرحله دوم (جهش): با اضافه کردن تفاوت وزنی دو جواب به طور تصادفی انتخاب شده از جمعیت به جواب سوم، راه‌حل جدیدی ایجاد می‌شود (نرخ جهش F).

$$y_i(t) = x_{j,r1}(t) + F(x_{j,r2}(t) - x_{j,r3}(t)) \quad (14)$$

- مرحله سوم (انتخاب): جواب جهش‌یافته را با جواب اصلی مقایسه می‌شود. اگر راه‌حل جهش‌یافته تابع هدف بهتری برای حداقل یک هدف داشته باشد، جایگزین راه‌حل اصلی در جمعیت می‌شود.
- مرحله چهارم (تقاطع): به صورت اختیاری، عناصر جهش‌یافته و راه‌حل اصلی را برای ایجاد یک راه‌حل جدید ترکیب می‌شود. (نرخ تقاطع CR)

$$x_{j,i}(t) = \begin{cases} y_i(t) & \text{if } \text{rand}(0,1) \leq CR \\ x_{j,i}(t) & \text{if } \text{rand}(0,1) > CR \end{cases} \quad (15)$$

- مرحله پنجم (تکرار): مراحل ۲-۴ را برای تعداد از پیش تعیین شده تکرار کنید.

۴-۲- الگوریتم تفاضلی برپایه جبهه پارتو

الگوریتم تفاضلی برای حل مسئله بهبود تاب‌آوری ریزش‌بکه باهدف کاهش قطعی، کاهش مدت‌زمان تعمیرات و افزایش تاب‌آوری به کار رفته شده است. برای این منظور این روش بهینه‌سازی برای حل مسئله چندهدفه بازنویسی شده است. نظریه مسئله چندهدفه با مسائل تک‌هدفه کاملاً متفاوت می‌باشد. در تک‌هدفه، سعی می‌شود تا بهترین جواب به دست آید که نسبت به جواب‌های دیگر موجود بهتر باشد؛ اما در مسائل چندهدفه یک جواب مشخص وجود ندارد. در این مسائل جواب‌های غیرمسلط یا پارتو وجود دارد که به‌سادگی قابل‌مقایسه شدن با یکدیگر نیستند. با توجه به توابع هدف معرفی شده در این مقاله که مینیمم کردن هزینه قطع بار، کاهش تعداد کلیدزنی و نیز به حداقل رساندن زمان تعمیر می‌باشد که در تضاد با یکدیگر خواهند بود برای حل این تضاد ایجاد شده در توابع هدف از الگوریتم تفاضلی چندهدفه استفاده شده است و با استفاده از رتبه‌بندی جواب‌ها سعی شده تا جواب‌های مبتنی بر جبهه پارتو محاسبه شوند. در روش رتبه‌بندی به تعداد جمعیت‌های موجود رتبه وجود دارد که بهترین رتبه برای جواب با تابع برازندگی بالاست سپس این جواب به‌طور موقت حذف می‌گردد تا پارتو بعدی شناسایی شده و رتبه دو را به خود اختصاص دهد و این فرایند ادامه می‌یابد. هم‌چنین برای اطمینان از توزیع مناسب و متنوع مجموعه راه‌حل‌ها در امتداد جبهه پارتو، از معیار فاصله ازدحام استفاده می‌شود. در طول مرحله انتخاب اگر دو راه‌حل کاندید به رتبه عدم تسلط یکسانی تعلق داشته باشند، راه‌حلی که در منطقه‌ای با ازدحام کمتر براساس معادله (۱۷) قرار دارد، ترجیح داده می‌شود. این امر به طور مؤثر تنوع جمعیت را حفظ کرده و از همگرایی زودرس جلوگیری می‌کند.

این الگوریتم در ادامه نمایش داده شده است:

گام ۱: (جمعیت اولیه) $t = 0$ قرار داده و m جمعیت اولیه را به‌صورت گوسی، تصادفی تولید می‌کنیم. $x_{j,r}(0)$ در فضای جستجوی $[x_r^{\min}, x_r^{\max}]$ به‌صورت تصادفی تولید می‌شود که،
 $x_{j,0}(0) = [x_{j,1}(0), x_{j,2}(0), \dots, x_{j,n}(0)]$ می‌باشد.

²Multi-Pareto Front Differential Evolution (MDE)

³ Differential Evolution (DE)

- گام‌های فوق به تعداد اعضای موردنیاز در نسل جدید تکرار می‌شود.
- گام ۸ (توقف): معیار توقف الگوریتم براساس رسیدن به حداکثر نسل از پیش تعیین شده می‌باشد.

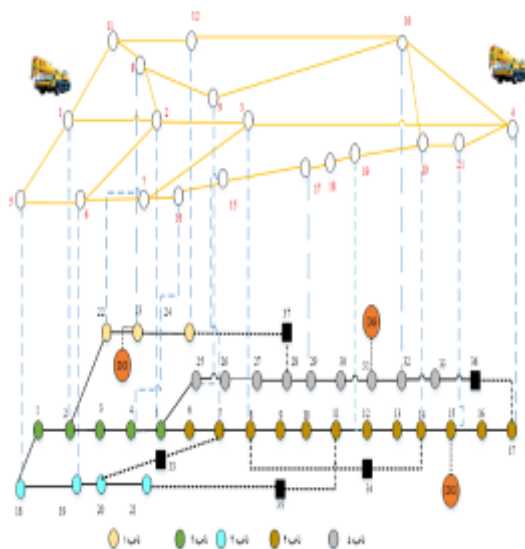
۵- شبیه‌سازی و نتایج

در این قسمت به منظور نمایش دادن عملکرد روش پیشنهادی شبکه تست ۳۳ باس IEEE که در شکل (۳) آمده است استفاده می‌کنیم (Huang, et al., 2017) که دارای بار ۳/۷ مگاوات و ۲/۳ مگاوار می‌باشد. بارهای شبکه به سه گروه خانگی، صنعتی و تجاری تقسیم شده است و مدت‌زمان لازم برای ارزیابی خاموشی در جدول (۱) نمایش داده شده است. تعمیرات نیز در گره‌های ترافیکی ۱، ۲، ۳ و ۴ قرار گرفته است.

جدول (۱): اطلاعات بار و زمان تعمیر شبکه

نوع بار	شماره گره	زمان تعمیر
خانگی	۳۳ و ۳۱ و ۳۰ و ۲۵ و ۲۳ و ۲۰ و ۱۸ و ۱۴ و ۱۳ و ۵	۲
تجاری	۳۹ و ۲۸ و ۹۱ و ۵ و ۲۷ و ۸ و ۷ و ۱۷ و ۱۶ و ۱۰ و ۳ و ۴ و ۱۰	۳
صنعتی	۲۷ و ۲۱ و ۱۲ و ۱۱ و ۵ و ۴ و ۳ و ۲ و ۱	۴

در شکل (۳) شماره‌های ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶ و ۳۷ کلیدهای قابل قطع و وصل جهت افزایش تاب‌آوری سیستم در زمان بروز خطا در شبکه می‌باشند. پارامترهای دو سناریو در جدول ۲ نشان داده شده است. عملیات برنامه‌ریزی کارکنان جهت تعمیر در ساعتی شروع می‌شود که طوفان از سیستم توزیع خارج می‌شود.



شکل (۳): سیستم ۳۳ باس مورد مطالعه به همراه مسیر ترافیکی

- گام ۲ (ارزیابی جمعیت): اجرای برنامه بهینه‌سازی برای هر ذره و محاسبه توابع هدف معرفی شده.
- گام ۳: به صورت تصادفی نرخ جهش (F) و تقاطع (CR) را تعریف می‌کنیم.
- گام ۴: بروزکردن زمان $t = t + 1$

گام ۵: (تولید جمعیت جدید) با تکرار مراحل زیر جمعیت جدیدی را تولید می‌کنیم:

- جهش: سه ذره از $X_{j,r}(0)$ انتخاب می‌شود به گونه‌ای که: $X_{j,r1}(t) \neq X_{j,r2}(t) \neq X_{j,r3}(t)$ حال یک بردار را با استفاده از رابطه زیر تولید می‌کنیم:

$$y_i(t) = X_{j,r1}(t) + F(X_{j,r2}(t) - X_{j,r3}(t)) \quad (16)$$

- تقاطع: بردار $X_j(t), j=1, \dots, n_x$ از طریق عملگر تقاطع کاندید می‌شود با استفاده از معادله (۱۵).

گام ۶ (ارزیابی تراکم): تمام جواب‌های جمعیت مبتنی بر مفهوم نامغلوبی در سطوح مختلف رتبه‌بندی می‌شوند و یک مقدار به آن‌ها اختصاص داده می‌شود.

$$Sh(d_{1r2}) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d_{1r2}}{\partial_{share}} \right)^2 & \text{if } d_{1r2} < \partial_{share} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

d_{1r} فاصله اقلیدسی میان دو جواب پیداشده در فضای توابع هدف می‌باشد. σ_{share} شعاع حداکثر بررسی جواب $sh(d_{1r})$ نیز مقداری بین صفر و یک دارد.

گام ۷ (انتخاب): عملگر انتخاب پیشنهادی مبتنی بر روش مسابقه‌ای است و در قالب مراحل زیر انجام می‌شود:

- انتخاب دو عضو از جمعیت موجود به صورت تصادفی.
- مقایسه دو عضو انتخابی با توجه به سطح نامغلوبی و شاخص تراکم به نحوی که اگر سطح نامغلوبی دو عضو با هم متفاوت باشد عضوی که دارای سطح نامغلوبی کمتری باشد برتر خواهد بود و اگر هر دو عضو در یک سطح قرار داشتند عضوی برتر است که شاخص تراکم آن کمتر باشد به عبارت دیگر می‌توان گفت،

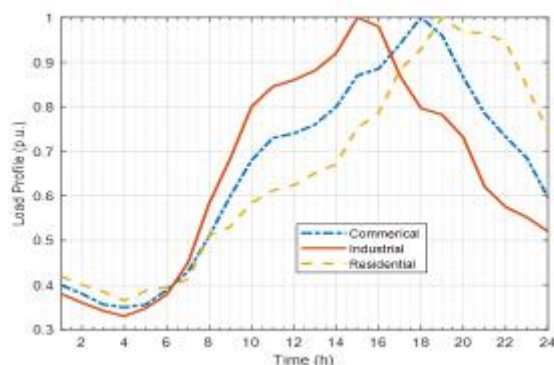
- عضو برتر از میان دو عضو انتخابی در لیست اعضای نسل جدید ذخیره می‌شود.

در جدول (۲) محل خطا به همراه مدت زمان رفع خطا برای دو سناریو نمایش داده شده است. ضریب $w_i(u, v)$ با در نظر گرفتن سرعت باد، طول مسیر میان دو گره u و v و سختی مسیر تا رسیدن به محل خطا با روش Dijkstra محاسبه شده است. سه واحد DG با مقادیر توان اکتیو اسمی در محدوده از ۰/۲ تا ۱ مگاوات و ضریب توان ۰/۹ پس فاز در نظر گرفته شده است که در باس‌های ۲۲، ۱۵ و ۳۱ نصب شده‌اند.

جدول (۲): اطلاعات بار و زمان تعمیر شبکه

حالت	زمان شروع تعمیرات	محل خطا (زمان رفع خطا)
۱	۰۶:۰۰	$L(2,22)(\varphi h)$, $L(9,10)(\varphi h)$, $L(32,33)(\delta h)$ $B(2)(\varphi h)$, $B(10)(\varphi h)$, $B(32)(\varphi h)$
۲	۰۵:۰۰	$L(3,4)(\varphi h)$, $L(18,19)(\varphi h)$, $L(29,30)(\varphi h)$, $L(15,16)(\varphi h)$, $L(21,11)(\varphi h)$, $B(22)(\varphi h)$, $B(29)(\varphi h)$, $B(4)(\varphi h)$ $B(7)(\varphi h)$, $B(12)(\varphi h)$, $B(14)(\varphi h)$ $B(19)(\varphi h)$

در شکل (۴) پروفایل بار در شبکه ۳۳ باس برای بارهای صنعتی، تجاری و خانگی نمایش داده شده است.



شکل (۴): پروفایل بار ۲۴ ساعت برای شبکه ۳۳-باس

جدول (۴): پارامترهای روش MDE

تعداد نسل	F	CR	اندازه جمعیت
۱۰۰	۰/۹	۰/۸۵	۱۲

۵-۱- سناریو اول

در سناریو اول مینیمم‌سازی زمان مورد نیاز جهت برنامه‌ریزی تعمیرات کارکنان در کنار دو هدف دیگر یعنی کاهش هزینه قطع بار و نیز برنامه‌ریزی تولید منابع تولید پراکنده پیاده‌سازی شده است. در این سناریو دو حالت مدل‌سازی می‌گردد، ابتدا فرض شده است که تنها یک تیم قابلیت اعزام جهت رفع خطاهای رخ داده در شبکه را خواهد داشت و خطا در خط‌های ۲-۲۲، ۱۰-۹ و ۳۲-۳۳ روی داده است.

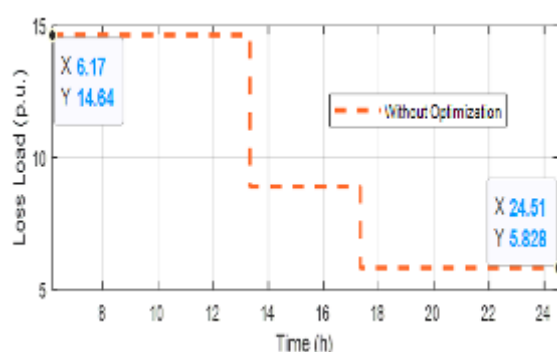
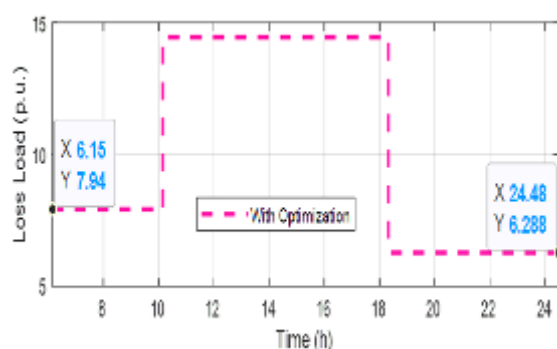
مدل آسیب‌پذیری و نیز سرعت طوفان برای استخراج سناریوهای قطعی خطا در جدول (۲) استفاده شده است، برای انجام آن ابتدا سرعت طوفان در نواحی مختلف مطابق جدول (۳) به منحنی‌های شکنندگی اجزا که در معادلات (۱) و (۲) معرفی گردید نگاشت شده است و احتمال شکست هر باس و شاخه (P_f) طبق رابطه (۳) محاسبه شده است. در نهایت، با در نظر گرفتن یک حد آستانه بحرانی برای بدترین حالت طوفان که ۴۰ درصد لحاظ شده است، شاخه‌هایی که احتمال شکست بالایی داشتند به عنوان خطاهای قطعی ورودی به الگوریتم بهینه‌سازی برای سناریو مدنظر اعمال شده‌اند. هم چنین محل‌های خطا نیز در هر دو سناریو بر این اساس و میزان بار خارج شده انتخاب شده‌اند.

ضریب $w_i(u, v)$ با در نظر گرفتن سرعت باد، طول مسیر میان دو گره u و v و سختی مسیر تا رسیدن به محل خطا با روش Dijkstra محاسبه شده است. سه واحد DG با مقادیر توان اکتیو اسمی در محدوده از ۰/۲ تا ۱ مگاوات و ضریب توان ۰/۹ پس فاز در نظر گرفته شده است که در باس‌های ۲۲، ۱۵ و ۳۱ نصب شده‌اند.

پارامترهای MDE در جدول (۴) آورده شده است. دو سناریو مدنظر قرار گرفته شده است. در سناریو اول مینیمم‌سازی زمان مورد نیاز جهت برنامه‌ریزی تعمیرات کارکنان در کنار دو هدف دیگر یعنی کاهش هزینه قطع بار و نیز برنامه‌ریزی تولید منابع تولید پراکنده پیاده‌سازی شده است؛ اما در روش دوم برنامه‌ریزی تعمیرات به صورت تجربی پیاده می‌گردد.

بارهای باس ۳۲، باس ۱۰ و در نهایت باس ۲ را بازیابی می‌کنند. در حالت بهینه‌سازی جهت بازیابی حداکثر توان و کاهش مدت‌زمان قطعی همان‌گونه که در شکل (۶) دیده می‌شود ابتدا تیم تعمیرات به سراغ بارهای بیشتر قطعی رفته؛ یعنی باس ۱۰ را براساس مسیر انتخابی جهت حداقل کردن زمان سفر انتخاب می‌کند سپس باس ۲ را انتخاب می‌کند و در نهایت باس ۳۲ را بر می‌گزیند. لازم به ذکر است در جدول (۵) مقایسه‌ای میان حالت بازآرایی دینامیکی و حالت بازآرایی استاتیکی صورت گرفته است که دیده می‌شود در حالت بازیابی دینامیکی در حدود ۵ دقیقه سریع‌تر بازیابی صورت گرفته است. هم چنین در حالت دینامیکی نسبت به استاتیکی یک کلید کمتر فعال شده است و در نهایت در حالت دینامیکی نزدیک به ۱۹ درصد هزینه بازیابی کاهش داشته است.

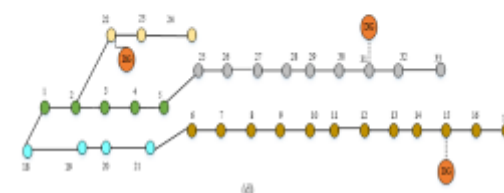
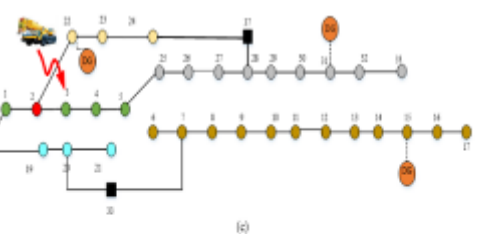
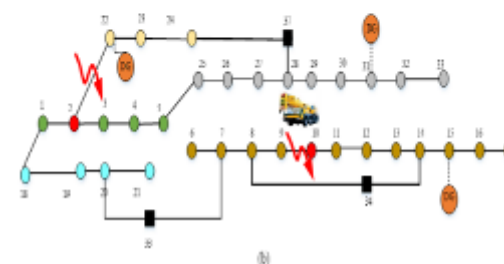
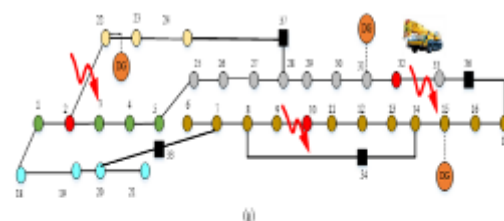
در شکل (۷) نیز خروجی الگوریتم تفاضلی نمایش داده شده است.



شکل (۶): مقایسه فرآیند بازیابی سیستم بعد وقوع خطا در سناریو اول

جدول (۵): مقایسه میان حالت‌های مختلف در سناریو ۱

روش	هزینه قطع بار	تعداد کلیدزنی	زمان بازیابی
دینامیکی	۱۳۳/۷۵ \$	۵	۱۹/۴۸
استاتیکی (Emayehu, 2024)	۱۶۳/۶۶	۶	۱۹/۵۳
کلاسیک (Popovic, 2004)	۱۷۵/۱۲	۷	۲۰/۴۶
برنامه‌ریزی (Wang, 2016)	۱۸۱/۴۸	۰	۲۱/۴۳



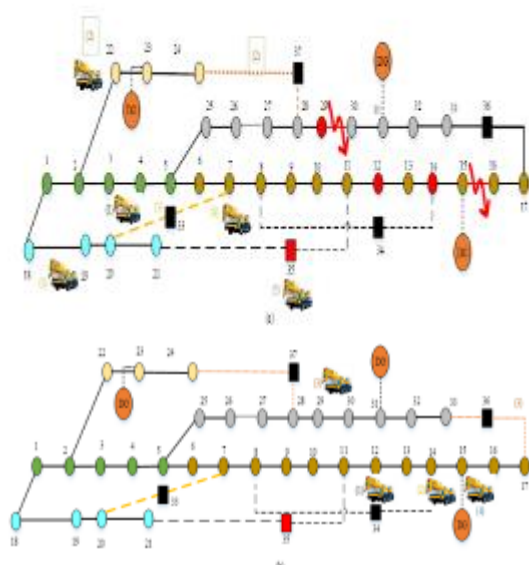
شکل (۵): نمایش از بازآرایی شبکه بعد از وقوع حادثه بدون بهینه‌سازی زمان تعمیرات

بازآرایی دینامیکی شبکه تا رفع خطا در شکل (۵) نمایش داده شده است. در شکل (۵- a) دیده می‌شود که سه خطا در شبکه روی داده است و نیز به واسطه آن بارهای باس‌های ۳۲، ۱۰ و ۲ نیز قطع شده است و تنها یک تیم جهت رفع خطا اعزام شده است در این حالت بدون مینیمم‌سازی زمان تعمیرات تیم اعزامی به مدت‌زمان ۴ ساعت مشغول رفع خطای در خط $L(2,22)$ می‌باشد سپس به خط $L(9,10)$ مراجعه کرده و یک ساعت نیز در آن جا مشغول خواهد بود و در نهایت به خط $L(32-33)$ رفته و ۵ ساعت در آنجا کار خواهد کرد.

هم چنین مسیر بهینه نیز جهت عبور تیم تعمیراتی گره‌های $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ در گراف ترافیکی مسیر خواهد بود. در شکل (۶) نمودار میزان توان بازیابی را برای دو حالت با بهینه‌کردن مسیرها و نیز بدون بهینه زمانی مسیرها با هدف کاهش مدت‌زمان قطعی نمایش می‌دهد که دیده می‌شود در حالت بدون بهینه‌سازی تیم اعزامی جهت تعمیر به ترتیب

خواهند رفت در اینجا برای جلوگیری از بروز حلقه در شبکه خط ۳۳ باز می‌گردد، سپس به باس ۷ می‌رود و بعد از آن خط $L(3,4)$ به همراه بار باس ۴ بازیابی می‌گردد لازم به ذکر است که زمان تعمیر در باس ۴ شامل ترانسفورماتور و کلید می‌باشد، در نهایت خط ۳۵ را بازیابی خواهند کرد.

هم زمان تیم تعمیراتی دوم در شکل (b-۹) برای بازیابی شبکه به باس‌های ۱۲ و ۱۴ رفته است و بعد از آن به سراغ خط $L(29,30)$ و باس ۲۹ خواهد رفت و در نهایت خط $L(15,16)$ را بازیابی خواهند کرد.



شکل (۹): بازیابی دینامیکی سیستم ۳۳ باس مورد مطالعه

مسیرهای بهینه ترافیکی برای تیم یک در شکل (a-۹) در زیر بر اساس گره‌های ترافیکی شکل (۲) نمایش داده شده است:

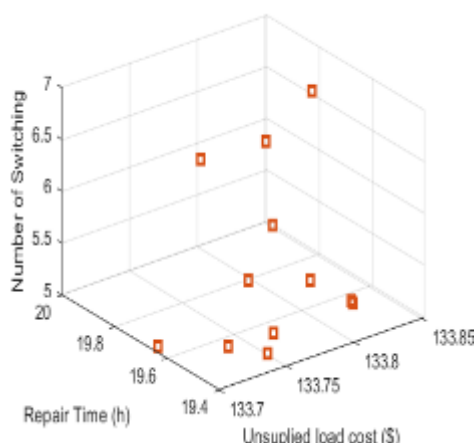
$$۱۵ \rightarrow ۶ \rightarrow ۷ \rightarrow ۱۶ \rightarrow ۳$$

به روش مشابه، مسیرهای بهینه ترافیکی برای تیم دوم در شکل (b-۹) در زیر بر اساس گره‌های ترافیکی شکل (۳) نمایش داده شده است:

$$۲۱ \rightarrow ۱۷ \rightarrow ۲۰ \rightarrow ۱۹ \rightarrow ۴$$

لازم به ذکر است در مسیرهای ذکر شده تیم‌های اعزامی برخی از مسیرها میان گره‌های نام برده شده را چند بار رفت و برگشتی مطابق شکل (۳) طی خواهند کرد.

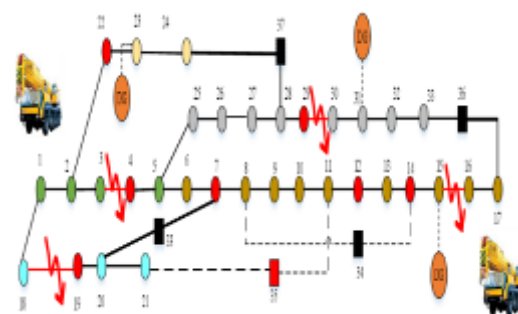
در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نیز میزان بارهای قطع شده در ساعات مختلف را تا زمان رفع کامل خطا با اعزام دو تیم به محل در حالت که بهینه شده و حالت تجربی نمایش می‌دهد. در جدول (۶) نیز خلاصه نتایج بهینه‌سازی آورده شده است.



شکل (۷): خروجی روش بهینه‌سازی الگوریتم تفاضلی چندهدفه

۵-۲- سناریو دوم

در این سناریو فرض شده است که تعداد خطاها در اثر شدت حادثه افزایش پیدا کرده باشد و نیز پراکندگی خطا نیز بالا باشد از این رو دو تیم جهت رفع خطا به محل‌ها متناسب با ساختار بیان شده در سناریو اول اعزام می‌گردد. محل خطاها در شکل (۸) نمایش داده شده است.



شکل (۸): سیستم ۳۳ باس مورد مطالعه به همراه محل خطاها در سناریو دوم

همان‌گونه که در شکل (۸) دیده می‌شود در خطوط $L(3,4)$ ، $L(15,16)$ ، $L(18,19)$ ، خطا رخ داده است به علاوه در باس‌های ۲۱، ۴، ۱۴، ۲۷، ۲۲، ۷ و ۱۲ نیز خطا روی داده است در این سناریو یکی از کلیدها یعنی ۳۵ نیز دچار حادثه شده است.

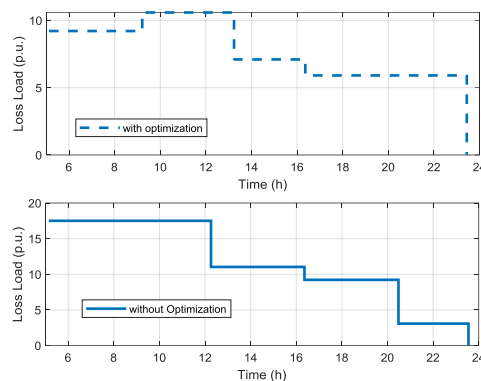
شکل (۹) ساختار بازیابی شبکه بعد از وقوع حادثه نمایش می‌دهد. در شکل (a-۹) ترتیب بازیابی تیم اعزامی (۱) نمایش داده شده است که براساس سختی مسیر و نیز بازیابی حداکثر بار با حداقل زمان خاموشی ترسیم شده است.

همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود ابتدا سراغ باس شماره ۲۲ می‌روند و سپس از آنجا به باس ۱۹ و تعمیر خط $L(18,19)$

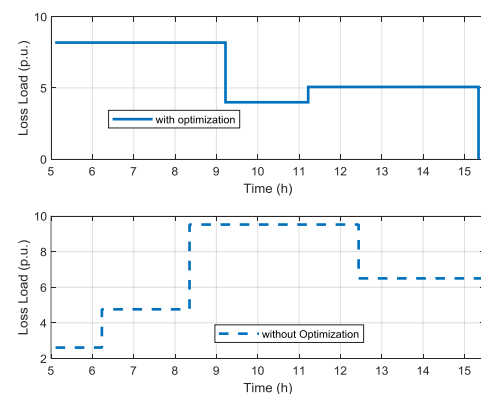
(Popovic, 2004) که در آن بازآرایی شبکه و برنامه‌ریزی تیم عملیاتی به‌صورت مستقل انجام می‌شود، روش مبتنی بر برنامه‌ریزی (Wang, 2016) که در آن ساختار شبکه بعد حادثه بدون تغییر است و بازیابی بار به سرعت عمل تیم عملیاتی در مراجعه به محل و رفع خطا وابسته خواهد بود و در نهایت با روش مبتنی بر فقط بازآرایی استاتیکی (Emayehu, 2024) شبکه به واسطه تغییر موقعیت کلیدها مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش دینامیکی پیشنهادی برای بازآرایی شبکه نسبت به روش‌های دیگر عملکرد بهتری نمایش داده است و دارای سرعت بازآرایی بالاتری در مقایسه با سه روش دیگر می‌باشد. با نگاهی به جدول (۵) میزان کاهش قطع بار در مقایسه با روش‌های استاتیکی، کلاسیک و برنامه‌ریزی به ترتیب ۱۸/۲۷ درصد، ۲۸/۵۷ و ۲۶/۳۰ درصد می‌باشد. میزان کاهش زمان بازآرایی نیز در مقایسه با روش‌های استاتیکی، کلاسیک و برنامه‌ریزی به ترتیب ۰/۲۶ درصد، ۳/۸۵ و ۹/۱۱ درصد است. هم‌چنین برای سناریو دوم نیز که دو تیم عملیاتی اعزام شده است با نگاهی به جدول (۶) دیده می‌شود که روش پیشنهادی میزان بهبود در کاهش هزینه قطع بار آن در مقایسه با روش‌های استاتیکی، کلاسیک و برنامه‌ریزی به ترتیب ۱۲/۵ درصد، ۱۶/۱۷۱ درصد و ۲۴/۸۷ درصد می‌باشد و نیز برای زمان بازآرایی نیز به ترتیب ۲/۱ درصد، ۸/۴۵ درصد و ۱۸/۵ درصد می‌باشد.

آنالیز حساسیت برای دو پارامتر نرخ جهش و نیز تغییر سرعت باد انجام شده و تأثیرات آن بر روی کاهش هزینه قطع بار در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود با تغییر مقدار جهش هم‌چنان در هر دو سناریو هزینه قطع بار کاهش داده شده است و نوسانات زیادی نسبت به مقدار جهش ۰/۹ در این نتایج دیده نمی‌شود که نشان از پایداری روش MDE دارد.

در شکل (۱۳) نیز آنالیز حساسیت بر روی سرعت باد پیاده‌سازی شده است که به طور هم‌زمان سرعت باد داده شده در جدول (۳) را برای هر ۵ ناحیه تغییر داده شده است و تأثیر بازآرایی دینامیکی پیشنهادی را بر روی درصد کاهش هزینه قطع بار نمایش داده شده است همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود برای سرعت‌های پایین باد براساس شکل (۱)، هنوز خطوط و دکل‌ها دچار آسیب جدی نشده‌اند و روش پیشنهادی با تغییرات کلیدزنی و مدیریت تولید توان به‌خوبی سبب کاهش هزینه قطع بار شده است و در سناریو دوم که دو تیم اعزام شده است الگوریتم عملکرد بهتری را در کاهش مدت‌زمان قطع بار نمایش داده است. به تدریج با افزایش سرعت باد میزان تخریب خطوط و دکل‌ها افزایش داشته و الگوریتم با اعزام دو تیم



شکل (۱۰): مقایسه فرآیند بازیابی سیستم بعد وقوع خطا در سناریو دوم برای تیم اعزامی اول



شکل (۱۱): مقایسه فرآیند بازیابی سیستم بعد وقوع خطا در سناریو دوم برای تیم اعزامی دوم

جدول (۶): مقایسه میان حالت‌های مختلف در سناریو ۱

روش	هزینه قطع بار \$	تعداد کلیدزنی	زمان بازیابی بار (تیم اول + تیم دوم برحسب ساعت)
دینامیکی	۵۸.۷۳۴	۳	۱۱.۴۴+ ۱۹.۵۶
استاتیکی (Emayehu, 2024)	۶۷.۱۰۵	۵	۱۱.۵۶+ ۲۰.۱۰
کلاسیک (Popovic, 2004)	۷۰/۵۲۷	۴	۲۱/۷۵+ ۱۲/۱۱
برنامه‌ریزی (Wang, 2016)	۷۸/۱۸۲	۰	۲۳/۴۸+ ۱۴/۵۵

همان‌گونه که در جدول (۶) دیده می‌شود به کمک روش پیشنهادی مدت‌زمان قطع در حدود ۲۶ دقیقه کاهش پیدا می‌کند به علاوه تعداد کلیدها نیز در مقایسه با روش استاتیکی یک عدد کمتر خواهد بود و در نهایت هزینه قطع بار نیز در حدود ۱۲/۵ درصد کاهش را در مدت‌زمان ۲۴ ساعت در مقایسه با حالت ۲ خواهد داشت.

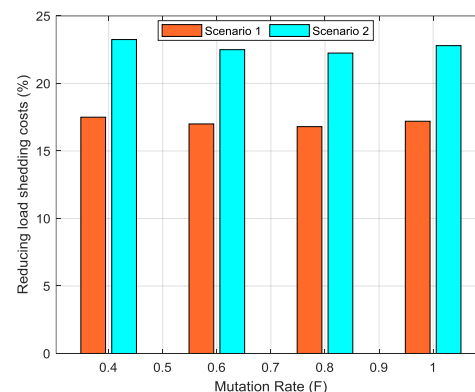
در ادامه برای سناریو اول و دوم در جداول (۴) و (۵)، نتایج روش بازآرایی دینامیکی با سه روش بازآرایی کلاسیک

برقراری توان در شبکه معرفی گردید و به کمک یک الگوریتم بهینه‌سازی توسعه داده شده حل گردید. نتایج نشان داد که زمانی تیم‌ها در دو سناریو با روش پیشنهادی اعزام می‌گردند بعد از انجام آنالیز حساسیت، در سناریو اول به طور متوسط ۱۸٪ و در سناریو دوم به طور متوسط ۲۴٪ کاهش در هزینه قطع بار نسبت به روش تجربی خواهند داشت به‌علاوه زمان تعمیرات نیز در دو سناریو به ترتیب ۵ و ۲۶ دقیقه کاهش پیدا کرد.

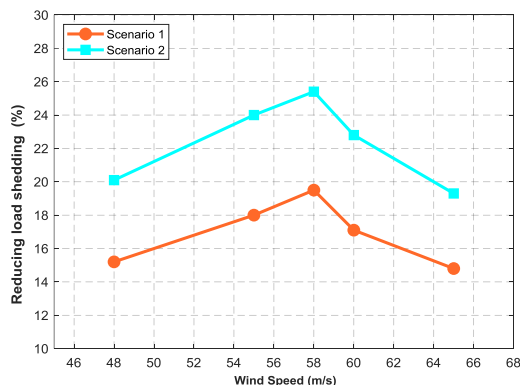
منابع

- Arab, A., Khodaei, A., Khator, S. K., Ding, K., Emesih, V. A., & Han, Z. (2015). Stochastic pre-hurricane restoration planning for electric power systems infrastructure. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(2), 1046–1054.
- Farzin, H., Fotuhi-Firuzabad, M., & Moeini-Aghaie, M. (2016). Enhancing power system resilience through hierarchical outage management in multi-microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(6), 2869–2879.
- Electric Power Research Institute. (2013). Enhancing distribution resiliency: Opportunities for applying innovative technologies (Report No. 1026889). Palo Alto, CA, USA.
- Mishra, D. K., Ghadi, M. J., Azizivahed, A., Li, L., & Zhang, J. (2024). A review on resilience studies in active distribution systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 1–20.
- Ma, S., Su, L., Wang, Z., Qiu, F., & Guo, G. (2018). Resilience enhancement of distribution grids against extreme weather events. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(5), 4842–4853.
- Ma, S., Chen, B., & Wang, Z. (2018). Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(2), 1442–1451.
- Yuan, C., Illindala, M. S., & Khalsa, A. S. (2017). Modified Viterbi algorithm based distribution system restoration strategy for grid resiliency. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(1), 310–319.
- Shi, Q., Li, F., Olama, M., Dong, J., Xue, Y., Starke, M., & et al. (2021). Network reconfiguration and distributed energy resource scheduling for improved distribution system resilience. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 131, 107073.
- Ghafarpour, R., Saadi, S., Zamaniyan, S., & Mahmoudian, M. (2023). Improving the resilience of electrical distribution systems through optimal performance and adaptability in the presence of mobile generation sources [in Persian]. *Passive Defense*, 14(3), 105–114.
- Chen, L. B., & Chen, H. (2019). Optimal planning of automatic switches in a resilient distribution network against extreme disasters. *Electric Power Automation Equipment*, 11.
- Wei, C., Shen, Z., Xiao, D., Wang, L., Bai, X., & Chen, H. (2023). An optimal scheduling strategy for peer-to-peer trading in interconnected microgrids based on RO and Nash bargaining. *Applied Energy*, 275.

به‌خوبی توانسته نزدیک به ۲۵/۵ درصد بهبود را در هزینه قطع بار ایجاد نماید و زمانی که سرعت باد به بالای ۶۵ متر بر ثانیه رسیده به علت حجم بالای آسیب در هر دو سناریو اگرچه نسبت به حالت پایه بهبود داشته اما در مقایسه با سرعت‌های پایین‌تر با کاهش مواجه شده است.



شکل (۱۲): آنالیز حساسیت بر روی پارامتر جهش در الگوریتم MDE



شکل (۱۳): آنالیز حساسیت بر روی سرعت باد

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش بهینه‌سازی در برابر شرایط بعد از طوفان ارائه شده است تا تیم‌های اعزامی به محل‌های حادثه دیده به‌نحو توزیع شوند که کمترین قطعی بار را در شبکه برق داشته باشیم. از این رو یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه شامل مینیمم کردن زمان تعمیرات متناسب با زمان مورد نیاز برای تعمیر تجهیزات شبکه همچون خط، باس، ترانسفورماتور، مینیمم کردن هزینه قطع بار حسب حساسیت بارهای شبکه همچون بارهای صنعتی، تجاری و خانگی و در نهایت حداقل تعداد کلیدزنی در شبکه جهت ایجاد مسیرهای جدید برای

- resilience during extreme events. *Risk Analysis*, 39(1), 195–211.
- Madhiarasan, M. (2020). Accurate prediction of different forecast horizons wind speed using a recursive radial basis function neural network. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 5(1), 1–9.
- Panteli, M., Pickering, C., Wilkinson, S., Dawson, R., & Mancarella, P. (2017). Power system resilience to extreme weather: Fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(5), 3747–3757.
- Schulz, F., Wagner, D., & Weihe, K. (2000). Dijkstra's algorithm online: An empirical case study from public railroad transport. *Journal of Experimental Algorithmics*, 5, Article 12.
- Chen, B., Shi, Y., & Chen, Y. (2021). A resilience enhancement model for complex distribution network coupling with human resources and traffic network. *Complexity*, 2021, Article 6634431.
- Popovic, D. S., & Popovic, J. A. (2004). A new semi-supervised learning approach to power distribution system restoration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(4), 1710–1717.
- Emayehu, B. (2024). Network reconfiguration and DG based compensation of Wolaita Sodo distribution system by using particle swarm optimisation. *Scientific Reports*, 14, Article 12574893.
- Wang, Y., Chen, C., Wang, J., & Baldick, R. (2016). Research on resilience of power systems: Market, scheduling, and planning perspectives. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(5), 2490–2499.
- Storn R and Price K (1997). Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *J of Global Optim* 11: 341 - 359.
- Gholami, A., Shekari, T., Aminifar, F., & et al. (2016). Microgrid scheduling with uncertainty: The quest for resilience. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1).
- Bie, Z., Lin, Y., & Li, G. (2015). Concept and research prospects of power system resilience. *Automation of Electric Power Systems*, 39(22), 1–9.
- Wang, Y., Huang, T., Li, X., Tang, J., Wu, Z., Mo, Y., Xue, L., Zhou, Y., Niu, T., & Sun, S. (2022). A resilience evaluation framework for distribution systems under typhoon disasters. *IEEE Access*, 9, 155224–155233.
- Sun, S., Lyu, Q., Li, G., Lin, Y., Bie, Z., & Wen, W. (2019). Resilience modeling and evaluation for power distribution systems under typhoon disasters. *Proceedings of the 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (ISPEC)*, 2413–2418.
- Shi, W., Liang, H., & Bittner, M. (2024). Stochastic planning for power distribution system resilience enhancement against earthquakes considering mobile energy resources. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 15(1), 414–428.
- Chen, C., Wang, J., & Ton, D. (2017). Modernizing distribution system restoration to achieve grid resiliency against extreme weather events: An integrated solution. *Proceedings of the IEEE*, 105(7), 1267–1288.
- Hasani M M, Khorsandi A. (2024). Optimizing the Topology of a Power Grid to Enhance its Resilience Against Cyber-Physical Attacks. *ieijqp*, 13 (4) :11-18.
- Chen, C., Wang, J., Qiu, F., et al. (2015). Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(2), 958–966.
- Trakas, D. N., Panteli, M., Hatziaargyriou, N. D., & et al. (2019). Spatial risk analysis of power systems