



Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2023) 2(1):1-19

Applying Proactive Actions Before the Occurrence of Severe Natural Disasters to Increase the Resilience of Distribution Network

Omid Nazem¹, M.Sc., Hadi Saghafi¹, Assistant Professor¹ Department of Electrical Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

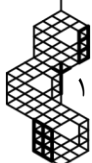
Abstract:

In recent years, the rate of occurrence of natural disasters has increased, which has led to extensive damage to the power system and extensive blackouts. preventive measures can be used in the distribution network to reduce the effects of severe natural disasters. preventive actions are opposite to reactive actions. preventive measures are taken before the incident and reactive measures are taken after the incident. In this paper, a mathematical model is presented to show the effects of preventive actions. In the proposed model, as soon as the accident is predicted, by predicting the exit of the damaged lines in the network using the Monte Carlo method, post-accident failure scenarios are generated. Then, in order to reduce the volume of calculations, scenario reduction is done using Gams. In the last stage, by implementing the proposed model, the optimal location for the installation of portable distributed generation sources and the repair team is determined. The simulation on different case studies shows that using proposed method results in considerable reduction of the energy not supplied (ENS) and the time of power outage for loads, which shows the good performance of the proposed method in facing to future disaster.

Keywords: Resilience, Preventive actions, Distribution network, Repair teams, Portable distributed generation resources.

Received: 08 August 2022**Revised:** 11 September 2022**Accepted:** 16 November 2022**Corresponding Author:** Dr. Hadi Saghafi, h.saghafi@khuisf.ac.ir

DOI: 10.30486/teeges.2022.1971121.1045





بکارگیری اقدامات پیشگیرانه قبل از وقوع حوادث طبیعی شدید با هدف افزایش تاب‌آوری شبکه توزیع

امید ناظم^۱، کارشناسی ارشد، هادی ثقفی^۱، استادیار

۱- دانشکده فنی مهندسی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

چکیده: در سال‌های اخیر نرخ وقوع حوادث طبیعی شدید افزایش پیدا کرده است که این امر منجر به خسارت‌های گسترده به سیستم قدرت و وقوع خاموشی‌های گسترده شده است. برای کم کردن اثرات نرخ وقوع حوادث طبیعی شدید می‌توان از اقدامات کنشگرانه در شبکه توزیع استفاده کرد. اقدامات کنشگرانه در مقابل اقدامات واکنشگرانه قرار دارند. اقدامات کنشگرانه قبل از حادثه و در مقابل اقدامات واکنشگرانه پس از حادثه انجام می‌شوند. در این مقاله یک مدل ریاضی برای نشان دادن تاثیرات اقدامات پیشگیرانه ارائه شده است. در مدل پیشنهادی به محض پیش‌بینی وقوع حادثه، با پیش‌بینی خروج خطوط آسیب‌دیده در شبکه با استفاده از روش مونت کارلو در نرم‌افزار متلب، سناریوهای خرابی پس از حادثه تولید می‌شوند. سپس به منظور کاهش حجم محاسبات از کاهش سناریو در نرم‌افزار GAMS استفاده می‌شود. در مرحله آخر با اجرای مدل پیشنهادی محل بهینه نصب منابع تولید پراکنده قابل حمل و تیم تعمیر تعیین می‌گردد. با تعریف مطالعات موردی مختلف و شبیه‌سازی بر روی شبکه نمونه مشاهده می‌شود که بر اساس نتایج بدست آمده، مقدار انرژی تامین نشده و مدت زمان خاموشی بارها به طور قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند که این امر نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی در مواجهه با حادثه پیش‌رو می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تاب‌آوری، اقدامات پیشگیرانه، شبکه توزیع، تیم‌های تعمیر، منابع تولید پراکنده قابل حمل.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۱۷

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۲۵

نویسنده‌ی مسئول: دکتر هادی ثقفی، h.saghafi@khuif.ac.ir

DOI: 10.30486/teeges.2022.1971121.1045



۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، تغییرات آب و هوایی و گرم شدن کره زمین منجر به افزایش وقوع حوادث طبیعی شده است [۱]. تابستان‌های بسیار گرم و طولانی، زمستان‌های بسیار سرد همراه با یخبندان‌های شدید، سیلاب‌های ناگهانی و خسارت بار، طوفان‌های با سرعت بالا و مخرب، تندبادهای گسترده و فاجعه‌بار و ... همگی از رخدادهایی هستند که برای همگان آشنا بوده و در اقصی نقاط کره زمین مرتباً در حال وقوع می‌باشند. بسته به موقعیت جغرافیایی یک منطقه، وقوع برخی از این حوادث محتمل‌تر و برخی دیگر بعید است؛ اما، افزایش وقوع آنها بر اساس مستندات موجود، واقعیتی انکارناپذیر است [۲]. به عنوان مثال، در گذشته وقوع طوفان در شهر تهران بسیار به ندرت مشاهده می‌گردید. اما، امروزه وقوع این پدیده در شهر تهران دور از انتظار نبوده و حداقل چندین مورد اخیر در اذهان شهروندان تهرانی موجود است. حوادث طبیعی با توجه به گستردگی جغرافیایی خود تجهیزات فراوانی را به صورت همزمان تحت تاثیر قرار داده و می‌توانند با خروج همزمان چندین تجهیز، عملکرد سیستم را با اختلال جدی مواجه کرده و حتی منجر به ناپایداری کلی سیستم شوند. بدیهی است شبکه‌های برق از دیرباز در معرض حوادث طبیعی آسیب‌پذیر بوده‌اند. اما، هم نرخ وقوع حوادث طبیعی در گذشته کمتر بوده است و هم وابستگی زندگی بشر به پایایی خدمات برق‌رسانی، به اندازه شرایط کنونی نبوده است.

امروزه زندگی شهری و حتی روستایی به نحوی به دسترسی به انرژی الکتریکی گره خورده است که وقوع خاموشی‌های گسترده هرچند کوتاه مدت نیز عواقب سنگین اقتصادی و انسانی به همراه دارد. از سوی دیگر به دلیل وابستگی عملکرد صحیح سیستم‌های زیر ساختی به یکدیگر، با وقوع یک خاموشی چندین ساعته در یک منطقه، عملکرد سایر سیستم‌های زیرساختی مانند شبکه‌های آبرسانی یا سیستم‌های مخابراتی نیاز مختل شده و عواقب وقوع خاموشی برق، گسترده‌تر و شدیدتر می‌شود. در این راستا، پژوهشگران به تازگی به مفهوم تاب‌آوری توجه نموده‌اند که به معنای ایستادگی در برابر پدیده‌های با تاثیر شدید و نادر (HR)^۱ و بازگشت سریع از شرایط نامطلوب پس از حادثه است. تاب‌آوری میزان استقامت، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری یک سیستم زیرساختی را در برابر یک حادثه شدید نشان می‌دهد [۲].

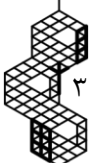
۱-۱- طبقه‌بندی حوادث

حوادث ممکن را می‌توان بر حسب شدت اثرگذاری و احتمال (یا امکان) وقوع به سه دسته زیر طبقه‌بندی نمود:

- دسته اول حوادثی هستند که احتمال وقوع مشخص دارند و اثرات آنها نیز محدود بوده و به راحتی قابل برآورد است. این دسته از حوادث را *حوادث شناخته شده* می‌نامند [۳].
- دسته دوم حوادثی را شامل می‌شوند که به ندرت رخ می‌دهند و به همین دلیل پایگاه داده غنی از این حوادث موجود نمی‌باشد که بتوان مقادیری برای تابع توزیع احتمال وقوع آنها استخراج نمود. این دسته از حوادث را با نام‌های *حوادث شناخته نشده* یا *قوی خاکستری* یاد می‌کنند [۳].
- دسته سوم حوادث تجربه نشده‌ای می‌باشند که طبیعتاً عواقب رخداد آنها نامشخص است. با توجه به اینکه در این موارد حتی یک نمونه مشابه در گذشته وجود نداشته است، صحبت از احتمال وقوع این حوادث عملاً بی‌معنی است. به این دسته از رخدادها، *حوادث غیرقابل شناسایی* یا *قوی سیاه* اطلاق می‌شود [۳].

۱-۲- تعریف تاب‌آوری

توانایی سیستم برای کاهش مدت و شدت اغتشاشات یا به عبارت دیگر توانایی سیستم در پیش‌بینی، تحمل و تطبیق با اغتشاشات مختلف و بازیابی سریع، تاب‌آوری نامیده می‌شود. در مورد سیستم‌های قدرت، اگرچه تعریف فوق برای تاب‌آوری صحیح و قابل استفاده است، باید تاکید گردد که منظور از اغتشاش، حوادث با اثر زیاد و احتمال کم (دسته دوم و سوم در طبقه‌بندی حوادث) می‌باشد. این حوادث که می‌توانند منشا طبیعی یا انسانی داشته باشند، یا به ندرت اتفاق می‌افتند و یا هرگز تجربه نشده‌اند. رخداد اینگونه از اغتشاشات محدوده جغرافیایی وسیعی را دربرگرفته و تجهیزات متعددی را به صورت همزمان از مدار خارج می‌سازند و فرآیند بازیابی را پیچیده و البته طولانی می‌نمایند. به عبارت دیگر این اغتشاشات آثار همبسته مکانی-زمانی برجای می‌گذارند. ویژگی منحصر به فرد دیگر این اغتشاشات این است که اگر منشا طبیعی داشته باشند، چندین سیستم زیرساختی مانند شبکه برق، سیستم مخابراتی، زیرساخت تامین





و توزیع گاز، شبکه آبرسانی و ... را به صورت همزمان تحت تاثیر قرار می‌دهند. این شرایط بحرانی از طرفی عمق فاجعه رخ داده را بیشتر می‌کند و از سوی دیگر فرآیند بازیابی را دشوارتر می‌سازد.

برخلاف مطالعات قابلیت اطمینان که مجموعه‌ای از حوادث را به صورت یکجا مد نظر قرار داده و رفتار سیستم را توسط شاخص‌هایی کلی ارائه می‌دهد، مطالعه تاب‌آوری به صورت اختصاصی برای یک حادثه انجام می‌گیرد. ممکن است طراحی سیستم به گونه‌ای باشد که تاب‌آوری سیستم در برابر یک حادثه بیشتر شود ولی همزمان تاب‌آوری آن در برابر یک حادثه دیگر کاهش یابد. برای مثال اگر طراح شبکه برای تاب‌آور ساختن آن در برابر طوفان و تندباد تصمیم بگیرد، فیدرهای توزیع برق را توسط کابل‌های زیرزمینی اجرا نماید، تاب‌آوری سیستم در مقابل سیل و آبگرفتگی (نسبت به حالتی که از فیدرهای هوایی استفاده شود) کمتر می‌شود [۲].

۱-۳- اجزای تاب‌آوری

تاب‌آوری شامل سه مرحله پیش از حادثه، حین حادثه و بعد از حادثه می‌باشد که این سه مرحله خود دارای قسمت‌های مختلفی هستند. مرحله پیش از حادثه شامل: هوشیاری وضعیت، آمادگی و استقامت، مرحله حین حادثه شامل: قابلیت انطباق و دوام، مرحله بعد از حادثه شامل: بازیابی و سرعت عمل می‌باشند [۴]-[۵].

مطالب ارائه شده در ادامه مقاله به این شرح می‌باشد: در بخش ۲، انواع روش‌های پیش‌بینی حوادث طبیعی و بهبود تاب‌آوری معرفی و پژوهش‌های مرتبط مرور می‌گردد. در بخش ۳ روش پیشنهادی جهت بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع معرفی و مراحل آن تشریح می‌شود. روابط ریاضی مربوط به روش پیشنهادی در بخش ۴ ارائه خواهد شد. نهایتاً در بخش ۵، کارائی روش پیشنهادی با انجام شبیه‌سازی روی شبکه نمونه ۳۳ شینه IEEE بررسی و تحلیل خواهد شد.

۲- روش‌های بهبود تاب‌آوری

از نظر مقیاس زمانی تحلیل تاب‌آوری، اقدامات بهبود دهنده را می‌توان در دو فاز بهره‌برداری کوتاه‌مدت و طراحی بلندمدت پیاده‌سازی کرد. اقدامات طراحی شامل: مقاوم‌سازی تجهیزات، آماده‌سازی بستر و امکانات لازم جهت پیاده‌سازی اقدامات بهره‌برداری، برنامه‌ریزی نگهداری تجهیزات و تخصیص منابع می‌باشند. از سوی دیگر، اقدامات بهره‌برداری به دنبال افزایش انطباق سیستم قدرت با شرایط بحرانی پیش‌رو و بازگشت به شرایط عادی هستند. اقدامات طراحی بلندمدت معمولاً پرهزینه‌تر و درعین حال مؤثرتر از اقدامات بهره‌برداری هستند. لذا در عمل باید توازنی بین هزینه و کارایی فنی این دو دسته از اقدامات برقرار گردد. اقدامات طراحی برای (۱) تقویت تجهیزات زیرساختی از طریق اقدامات تقویت کننده، (۲) تهیه امکانات مورد نیاز برای اجرای موثر اقدامات بهره‌برداری، (۳) برنامه‌ریزی نگهداری تجهیزات و تخصیص منابع در نظر گرفته می‌شوند. از سوی دیگر اقدامات بهره‌برداری به استراتژی‌های کنترل هوشمند و تطبیقی اشاره دارد که برای مقابله با حوادث HR استفاده می‌شوند. اقدامات بهره‌برداری همچنین فعالیت‌های انجام شده در هنگام بازیابی سیستم و زیرساخت‌ها را پوشش می‌دهد [۶].

از دیدگاهی دیگر، اقدامات بهبوددهنده تاب‌آوری برحسب نحوه تاثیرگذاری در سه گروه پیشگیرانه (قبل از حادثه)، اصلاحی (حین حادثه) و بازیابی (بعد از حادثه) تقسیم‌بندی می‌شوند. اقدامات پیشگیرانه به دنبال کاهش احتمال خروج تجهیزات، نرم‌افزارها و سرویس‌ها (در فاز پیشگیری) هستند. از طرف دیگر اقدامات اصلاحی به دنبال اصلاح عملکرد سیستم در حین وقوع اغتشاش (در فاز افت) و اقدامات بازیابی پس از وقوع اغتشاش (در فاز بازیابی) به دنبال بازگرداندن عملکرد سیستم به حالت قبل از اغتشاش هستند [۶].

۲-۱- روش‌های پیش‌بینی حوادث طبیعی

برای پیش‌بینی یا کاهش خطرات حوادث طبیعی می‌توان از فناوری هوش مصنوعی^۲ استفاده کرد. اگر بخواهیم تعریف ساده‌ای از هوش مصنوعی داشته باشیم، می‌توان هوش مصنوعی را در قالب شبیه‌سازی فرآیندهای هوش انسانی توسط ماشین‌ها، به ویژه سیستم‌های کامپیوتری تعریف کرد. این فرآیندها می‌تواند شامل: «یادگیری»^۳، «استدلال»^۴ و «خود اصلاحی»^۵ باشند. منظور از یادگیری، فرآیند تصاحب (یا تغییر) دانش، اطلاعات، قوانین، مقادیر یا ترجیحات جدید (یا موجود) در جهت بهبود تعامل با محیط عملیاتی است. استدلال، به استفاده از قوانین برای رسیدن به نتایج «تقریبی» یا «قطعی» اطلاق می‌شود. در بین الگوریتم‌های شناخته شده هوش مصنوعی،



بیشتر از یادگیری ماشین^۶ و شبکه‌های عصبی^۷ برای پیش‌بینی حوادث طبیعی استفاده می‌شود. در ادامه مفاهیم یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی بصورت کوتاه مرور خواهد شد.

یادگیری ماشین

یادگیری ماشین، مطالعه علمی الگوریتم‌ها و مدل‌های احتمالی است که کامپیوترها، برای انجام وظایف محول شده، از آن‌ها استفاده می‌کنند. در این روش کامپیوترها برای انجام وظایف محوله، دستورالعمل‌های صریح در اختیار ندارند و به جای آن، بر الگوهای داده‌ای و استنتاجات قابل انجام روی آن‌ها برای حل مسئله و انجام وظایف تکیه می‌کنند. یادگیری ماشین، یکی از مهم‌ترین زیرمجموعه‌های فناوری هوش مصنوعی محسوب می‌شود. روش‌های یادگیری ماشین، برای اینکه قادر باشند بدون داشتن دستورالعمل خاصی از جانب خبره انسانی، وظایف محوله را انجام دهند، یک مدل ریاضی مبتنی بر داده‌های نمونه (داده‌های آموزشی) تولید می‌کنند. یادگیری ماشین، ارتباط بسیار نزدیک و تنگاتنگی با حوزه «آمار محاسباتی» دارد و مانند این حوزه، سعی در پیش‌بینی آماری با استفاده از الگوریتم‌های کامپیوتری دارد. در دسته‌بندی کلی شکل (۱)، الگوریتم‌های یادگیری ماشین به سه دسته «یادگیری نظارت شده»، «یادگیری نظارت نشده» و «یادگیری تقویتی» تقسیم‌بندی می‌شوند [۷].

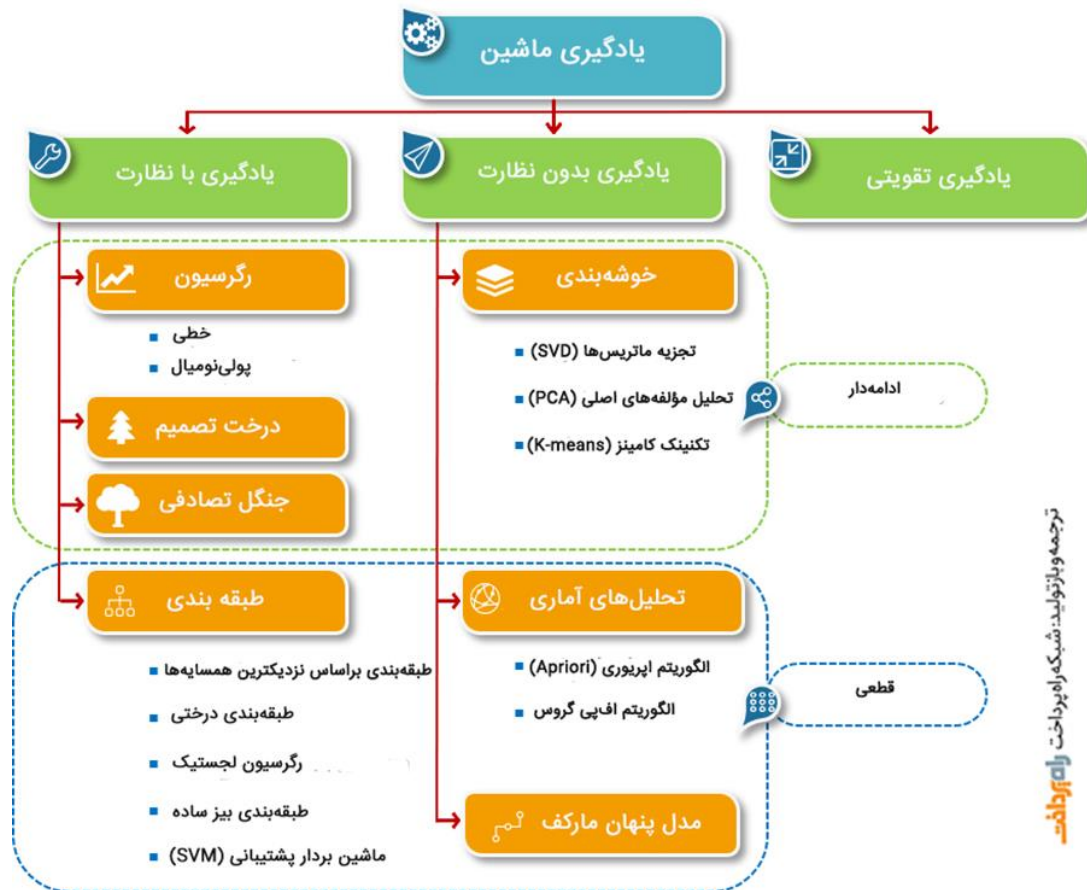
شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی یا شبکه‌های عصبی مصنوعی^۸، دسته‌ای از الگوریتم‌های یادگیری ماشین هستند که به طور کلی بر پایه ساختارهای عصبی مغز انسان و یا حیوانات مدل شده‌اند. این الگوریتم‌ها، این قابلیت را دارند که بدون دریافت دستورالعمل‌های صریح از جانب برنامه‌نویس و یا خبره، عملکرد خود را بهبود بخشند. شبکه‌های عصبی مصنوعی، از مجموعه‌ای از واحدهای به هم متصل به نام «نرون‌های مصنوعی» تشکیل شده‌اند. نرون‌های مصنوعی، مانند نرون‌های طبیعی به هم متصل هستند و می‌توانند سیگنال (مقدار حقیقی) برای یکدیگر ارسال کنند. خروجی هر کدام از نرون‌ها، از طریق یک واحد خاص به نام «تابع انتقال» یا «تابع فعال‌سازی» محاسبه می‌شود. هر کدام از نرون‌ها و لینک‌های ارتباطی میان آن‌ها، یک ضریب وزنی دارند که در طی فرایند یادگیری تنظیم می‌شود. ضریب وزنی، قدرت سیگنال‌های ارتباطی میان نرون‌ها را تقویت یا تضعیف می‌کند. نرون‌ها، معمولاً در لایه‌های مختلف تجمع می‌شوند. سیگنال‌ها، از لایه اول به سمت لایه‌های میانی نهان و در نهایت به سمت لایه خروجی منتشر می‌شوند. شبکه‌های عصبی نظیر شبکه‌های «یادگیری عمیق»^۹ و «شبکه‌های عصبی مولد مخاصم یا تخصیصی»^{۱۰}، از جمله مهم‌ترین شبکه‌های عصبی هستند [۷].

۲-۲- مروری بر پژوهش‌های حوزه پیش‌بینی حوادث طبیعی

در [۸]، نویسندگان مروری بر پیش‌بینی سیل با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین انجام داده‌اند. سیل یکی از مخرب‌ترین حوادث طبیعی است که برای مدل‌سازی بسیار پیچیده هستند. تحقیق در مورد توسعه مدل‌های پیش‌بینی به کاهش خطر، به حداقل رساندن از دست دادن جان انسان‌ها و کاهش خسارت مالی مرتبط با سیل کمک کرده است. برای تقلید از عبارات پیچیده ریاضی و فرآیندهای فیزیکی سیل، طی دو دهه گذشته، روش‌های یادگیری ماشین به شدت در پیشرفت سیستم‌های پیش‌بینی کمک می‌کند که عملکرد بهتر و راه‌حل مقرون به صرفه را ارائه می‌دهد. با توجه به مزایا و پتانسیل گسترده یادگیری ماشین، محبوبیت آن به طور چشمگیری در بین محققان افزایش یافته است. محققان با معرفی روش‌های جدید یادگیری ماشین و ترکیبی از روش‌های موجود، کشف مدل‌های پیش‌بینی دقیق و کارآمد را هدف قرار می‌دهند. در این مقاله مروری، وضعیت مدل‌های مختلف یادگیری ماشین در پیش‌بینی سیل نشان داده می‌شود. الگوریتم‌های اصلی یادگیری ماشین که برای پیش‌بینی سیل استفاده می‌شوند، شامل: (۱) شبکه‌های عصبی مصنوعی، (۲) فازی-عصبی، (۳) شبکه‌های عصبی موجک، (۴) پرسپترون چند لایه، (۵) ماشین‌های بردار پشتیبان، (۶) سیستم‌های استنتاج عصبی-فازی تطبیقی است. در مقاله، شرح مختصری از این الگوریتم‌های اساسی یادگیری ماشین برای پیش‌بینی سیل ارائه شده است.





شکل (۱): انواع یادگیری ماشین

در [۹]، نویسندگان بر پیش‌بینی خطر شکافت زمین با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین می‌پردازند. شکاف‌های زمین، ترک‌های سطح زمین هستند که عمدتاً در حوضه‌های خشک و نیمه خشک شکل گرفته‌اند. برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی و همچنین سایر منابع طبیعی زیر زمینی، به عنوان عامل مهم فرونشست و به طور بالقوه شکاف زمین معرفی شده‌اند. شکاف‌های زمین به سرعت در حال تبدیل شدن به فجایع بزرگ کشورها هستند که مسئول خسارات قابل توجه اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی با عواقب ویرانگر هستند. مدل‌سازی خطر شکاف زمین به ویژه برای شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آب‌های زیر زمینی مهم است و به طور موثر سیاست‌های تغذیه آب‌های زیر زمینی را به سمت طرح‌های حفاظت پایدار برای حفاظت از منابع آب‌های زیر زمینی موجود اعمال می‌کند.

مدل‌سازی شکل‌گیری شکاف‌های زمین و در نهایت مناطق خطرناک به دلیل پیچیدگی و چندرشته‌ای بودن^{۱۱}، پیش‌بینی شکاف‌های زمین را به شدت به چالش کشیده است. در مرجع [۹]، مدل‌های نوین یادگیری ماشین برای پیش‌بینی خطر شکافت زمین ارائه شده است. برای شناسایی ویژگی‌های اصلی، روش انتخاب بازپخت شبیه‌سازی شده (SAFS)^{۱۲} اعمال شده است. مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM)^{۱۳}، خطوط رگرسیون تطبیقی چندمتغیره (MARS)^{۱۴}، درخت طبقه‌بندی و رگرسیون (CART)^{۱۵}، جنگل تصادفی (RF)^{۱۶} و ماشین بردار پشتیبان (SVM)^{۱۷} برای ساخت مدل‌های پیش‌بینی استفاده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تمام مدل‌ها از دقت خوبی (بیشتر از ۰.۸۶) در پیش‌بینی خطر شکافت زمین برخوردار بودند. مدل GLM (به عنوان یک مدل خطی) کمترین عملکرد را داشت در حالی که مدل RF بهترین مدل در فرآیند مدل‌سازی بود.

در [۱۰]، نویسندگان بر مدل‌های ترکیبی هوش مصنوعی بر اساس سیستم عصبی-فازی^{۱۸} و الگوریتم‌های فراابتکاری برای پیش‌بینی مکان احتمال آتش‌سوزی تمرکز می‌کنند. در این مطالعه، یک تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای جدید از چهار مدل هوش مصنوعی برای پیش‌بینی صریح مکان احتمال آتش‌سوزی ارائه می‌دهد. هر مدل شامل: یک سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS)^{۱۹} همراه با یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری یعنی الگوریتم ژنتیک (GA)^{۲۰}، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)^{۲۱}، الگوریتم بهم‌ریخته جهش قورباغه (SFLA)^{۲۲} و الگوریتم رقابت امپریالیستی (ICA)^{۲۳} است. یک پایگاه داده مکانی براساس ۱۵۹ رویداد آتش‌سوزی از منطقه بومی

هیرکانی (در ایران) که مجموعه‌ای از متغیرهای پیش‌بینی برای آن بدست آمده، ساخته شده است. هر متغیر پیش‌بینی به کلاس تقسیم می‌شود. از روش تجزیه و تحلیل ارزیابی وزن گام به گام (SWARA)^{۲۴} برای تعیین وزن به هر کلاس از متغیرهای پیش‌بینی استفاده می‌شود. وزن‌ها، قدرت روابط مکانی بین هر کلاس را نشان می‌دهد و برای آموزش مدل‌های ترکیبی استفاده می‌شود. مدل‌های ترکیبی با استفاده از چندین معیار عملکردی تایید و با مدل تنه‌ای ANFIS مقایسه شده‌اند. اگرچه مدل تنه‌ای ANFIS نسبت به مدل‌های ترکیبی در مرحله آموزش عملکرد بهتری دارد اما دقت آن در مرحله اعتبارسنجی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. همه مدل‌های ترکیبی برای مجموعه داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی عملکرد خوبی دارند اما مدل ترکیبی ANFIS-ICA عملکرد پیش‌بینی بهتری را در پیش‌بینی صریح مکان آتش‌سوزی و نقشه‌برداری برای مجموعه داده‌ها نشان می‌دهد.

در [۱۱]، نویسندگان یک رویکرد هوشمند برای پیش‌بینی آتش‌سوزی در شرایط نامشخص با استفاده از یادگیری ماشین ارائه می‌دهند. یکی از شایع‌ترین علل جنگل‌زدایی و تخریب حیات‌وحش در سراسر جهان، آتش‌سوزی است. کنترل آتش و به موقع رسیدن به منطقه جنگل همیشه امکان‌پذیر نیست و در نتیجه سطح تخریب اغلب بالاست. بنابراین پیش‌بینی آتش‌سوزی و اتخاذ اقدامات فوری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است با این حال، روش‌های سنتی پیش‌بینی آتش‌سوزی اغلب در تشخیص به موقع آتش‌سوزی ناکام می‌مانند. بنابراین رویکرد قابل اطمینان‌تری مانند اینترنت اشیا (IoT)^{۲۵} باید اتخاذ شود. حسگرهای اینترنت اشیا، نه تنها می‌توانند شرایط بی‌درنگ^{۲۶} یک منطقه را مشاهده کنند بلکه می‌توانند آتش‌سوزی را در صورت ترکیب با یادگیری ماشین پیش‌بینی کنند. این مقاله بینشی را در مورد استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین نسبت به وقوع آتش‌سوزی در جنگل ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که مدل درخت تصمیم‌گیری تقویت‌شده بهترین گزینه برای مدل پیش‌بینی آتش‌سوزی است. براساس این نتایج، یک سیستم پیش‌بینی آتش‌سوزی هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا پیشنهاد شده است که هم داده‌های هواشناسی و هم تصاویر را برای پیش‌بینی آتش‌سوزی در نظر می‌گیرد.

۳-۲- مروری بر اقدامات بهره‌برداری پیشگیرانه

مرجع [۱] به افزایش سطح تاب‌آوری سیستم‌های توزیع با استفاده از اقدامات بهره‌برداری پیشگیرانه می‌پردازد. افزایش قطعی‌های گسترده در سیستم‌های قدرت ناشی از حوادث طبیعی، ضرورت اعمال رویکردهای دفاعی^{۲۷} با هدف بازسازی سریع سرویس را برجسته کرده است. در این زمینه، این مرجع یک مدل تصادفی با هدف استفاده بهینه از اقدامات بهره‌برداری پیشگیرانه قبل از برخورد حادثه در آینده ارائه می‌دهد. اقداماتی که در این مطالعه در نظر گرفته می‌شوند عبارتند از: (۱) پیکربندی مجدد شبکه، (۲) از پیش موضع‌گیری خدمه. برای انجام اقدامات موثر، مدل خسارات احتمالی ناشی از حوادث را از طریق یک مجموعه سناریوهای ایجاد شده توسط روش مونت‌کارلو، شبیه‌سازی می‌کنند. هدف مدل پیشنهادی، به حداقل رساندن کاهش بار مورد انتظار ناشی از حادثه هنگام سناریوها است. برای محاسبه مقدار کاهش بار، اقدامات بالقوه پس از حادثه نیز در مدل لحاظ می‌شود. این مدل با روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP)^{۲۸} به صورت ریاضی فرمول‌بندی شده است که می‌تواند به آسانی از طریق مجموعه‌های نرم‌افزاری موجود حل شود. برای تایید اثربخشی مدل پیشنهادی، یک سیستم توزیع استاندارد با یک مجموعه داده واقعی استفاده شده است.

در [۱۲]، نویسندگان بر تخصیص تاب‌آور محور منابع به ویژه اتوبوس‌های برقی^{۲۹} در سیستم‌های توزیع پیش از طوفان تمرکز کرده‌اند. آمادگی پیشگیرانه برای مقابله با حوادث شدید آب‌وهوایی به میزان قابل توجهی در کاهش هزینه بازسازی و افزایش تاب‌آوری سیستم‌های قدرت مفید است. منابع تولید مانند باتری‌ها و گازوییل برای تخصیص در نظر گرفته می‌شوند که می‌توانند برای راه‌اندازی بار حیاتی قطع‌شده در بازایی پس از طوفان مورد استفاده قرار بگیرند. همچنین اتوبوس‌های برقی به عنوان یک نوع منبع در نظر گرفته می‌شوند. با در نظر گرفتن عدم قطعیت خطاهای سیستم، مسئله تخصیص در یک برنامه غیرخطی تصادفی عدد صحیح مختلط^{۳۰} فرمول‌بندی می‌شود سپس یک روش ابتکاری پیشنهاد می‌شود که با حل یک برنامه خطی عدد صحیح مختلط، برنامه تخصیص را به دست می‌آورد. شبیه‌سازی‌های عددی بر روی سیستم تغذیه ۱۲۳ شینه IEEE تحت چندین سناریو انجام می‌شود تا اثربخشی روش پیشنهادی را نشان دهد. همچنین اثرات هزینه حمل‌ونقل منابع، توزیع اولیه اتوبوس‌های برقی و شدت حادثه بر برنامه تخصیص مورد بحث قرار می‌گیرند. در [۱۳]، نویسندگان بر مسیریابی و برنامه‌ریزی منابع برق متحرک^{۳۱} برای افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع می‌پردازند. منابع برق متحرک از جمله: ناوگان وسایل نقلیه الکتریکی (EV)^{۳۲}، سیستم‌های ذخیره انرژی متحرک (MESSs)^{۳۳} و ژنراتورهای اضطراری متحرک





(MEGs)^{۳۲} که بر روی کامیون نصب شده‌اند، پتانسیل بالایی برای افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع در برابر حوادث شدید آب‌وهوایی دارند. در این مرجع، مسیریابی و برنامه‌ریزی تاب‌آور منابع برق متحرک از طریق یک چارچوب دو مرحله‌ای بررسی می‌شود. در مرحله اول یعنی قبل از حادثه، منابع برق متحرک در سیستم توزیع قرار داده می‌شوند تا امکان بازسازی سریع را به منظور افزایش قابلیت اطمینان تامین برق برای بارهای حیاتی فراهم کنند. سیستم توزیع نیز به صورت پیشگیرانه در وضعیت کمتر تحت تاثیر یا استرس، دوباره پیکربندی می‌شود. یک مدل بهینه‌سازی قوی دو مرحله‌ای ایجاد می‌شود و توسط الگوریتم تولید رکن و قید^{۳۵} برای بدست آوردن تصمیمات مرحله اول حل می‌شود. در مرحله دوم یعنی بعد از حادثه، منابع برق متحرک به صورت پویا در سیستم توزیع پخش می‌شوند تا با اقدامات مرسوم بازسازی هماهنگ شوند. یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح جدید که بازه‌های زمانی مختلف توزیع منابع برق متحرک و بهره‌برداری سیستم توزیع، اتصال مسیر و شبکه‌های برق و غیره را حل می‌کند، برای بهینه‌سازی توزیع پویای منابع برق متحرک فرمول‌بندی می‌شود. مطالعات موردی انجام شده بر روی سیستم آزمایشی ۳۳ و ۱۲۳ شینه IEEE، اثربخشی روش پیشنهادی را در مسیریابی و برنامه‌ریزی منابع برق متحرک برای تقویت تاب‌آوری سیستم توزیع نشان می‌دهند.

مرجع [۱۴] به مدیریت پیشگیرانه ریزشکها برای افزایش تاب‌آوری پرداخته است. گسترش ریزشکها با قابلیت جزیره‌ای شدن^{۳۶} و عملکرد خودگردان^{۳۷} می‌تواند به طور قابل توجهی تاب‌آوری سیستم قدرت را در مقابله با حوادث شدید آب‌وهوایی افزایش دهد. برای این منظور، روش‌های کاربردی به منظور موقعیت‌یابی بهره‌برداری و مدیریت ریزشکها برای کنترل بهینه منابع آن و به حداقل رساندن خطر در مواجهه با چنین حوادثی مورد نیاز می‌باشد. این مرجع یک چارچوب قوی و سازگار دو مرحله‌ای برای برنامه‌ریزی ریزشک قبل از وقوع حادثه برای به حداقل رساندن پیامدهای خسارت‌آور حوادث در شرایط جزیره‌ای پیشنهاد می‌دهد. این روش عدم قطعیت‌های مختلف را در نظر می‌گیرد و بهترین برنامه روز بعد را برای ریزشک به دست می‌آورد که در برابر تحقق پارامترهای نامعلوم استوار است. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که این چارچوب هزینه بالای افت بار را به اندازه هزینه کوچک آماده‌سازی قبل از حادثه کاهش می‌دهد. مزایای این مدل هنگامی قابل توجه هستند که یک حادثه آب‌وهوایی اتفاق بیفتد و سطح قابل توجهی از عدم قطعیت‌ها وجود داشته باشد.

در [۱۵]، موضوع مدیریت پیشگیرانه تاب‌آوری محور ریزشکها در برابر طوفان متمرکز بررسی شده است و یک چارچوب مدیریت پیشگیرانه برای مقابله با تاثیرات زیان‌آور طوفان‌های شدید ارائه می‌شود. با دریافت هشدارها برای طوفان پیش‌بینی شده، این چارچوب یک برنامه محافظه‌کارانه برای ریزشک را با حداقل تعداد شاخه‌های آسیب‌پذیر در سرویس درحالی که بار کل تامین می‌شود، پیدا می‌کند. این برنامه ضمن کاهش آسیب‌پذیری ریزشک در زمان شروع رویداد، عملکرد طبیعی ریزشک را قبل از طوفان تضمین می‌کند. روش پیشنهادی از پیکربندی مجدد شبکه^{۳۸}، برنامه‌ریزی مجدد تولید^{۳۹}، کاهش محافظه‌کارانه ولتاژ^{۴۰}، منابع سمت تقاضا^{۴۱}، ظرفیت تولید پشتیبان^{۴۲} و تنظیم بهینه پارامتر واحدهای تولید قابل کنترل با دروپ^{۴۳} بهره می‌برد. شاخص آسیب‌پذیری^{۴۴} برای ارزیابی اثربخشی مدیریت پیشگیرانه پیشنهادی در کاهش آسیب‌پذیری ریزشک در شروع رویداد تعریف می‌شود. مدل پیشنهادی خطی شده است که سادگی، استحکام و کارایی محاسباتی راه‌حل را تضمین می‌کند. کارایی این روش بر روی یک ریزشک واقعی در برابر طوفان آزمایش می‌شود.

مرجع [۱۶] به برنامه‌ریزی پیشگیرانه افزایش تاب‌آوری در برابر طوفان در ریزشک‌های حامل چندین منبع انرژی پرداخته است. آمادگی پیشگیرانه، ضرورت اصلی سیستم‌های قدرت برای مقابله موفقیت‌آمیز در برابر حوادث با تاثیر زیاد و نادر (HR) است. در این مقاله، یک روش کنشگرانه تاب‌آوری محور ارائه شده است که هدف آن، افزایش آمادگی ریزشک‌های حامل چندین منبع انرژی در برابر طوفان قریب الوقوع است. نخست، زنجیره احتمال ناشی از طوفان در ریزشک مشخص می‌شود که متفاوت از شبکه‌های توزیع حامل تک انرژی است. زنجیره احتمال شامل: قطع گاز طبیعی، رویداد جزیره‌ای شدن و شروع طوفان در ریزشک است. افق برنامه‌ریزی پیش از رویداد آغاز می‌شود و سپس از اولین اعلان هشدار طوفان تا بدترین حالت شروع طوفان در ریزشک تعریف می‌گردد. شاخص آمادگی به عنوان مجموع ذخیره انرژی الکتریکی و حرارتی در انتهای افق برنامه‌ریزی تعریف می‌شود. افزایش شاخص آمادگی پیشنهادی به هزینه کاهش بار اضافی در طول افق برنامه‌ریزی بستگی دارد. بنابراین، یک سازش بین دو هدف مغایر (شاخص آمادگی و تامین بار) از طریق یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه ایجاد می‌شود.



۳- روش پیشنهادی جهت بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع

با توجه به مطالب ذکر شده، مشخص گردید امروزه افزایش تاب‌آوری شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی بیش از پیش اهمیت پیدا کرده است. به منظور پاسخگویی به این نیاز اساسی، در این مقاله یک چارچوب چهار مرحله‌ای برای بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی پیشنهاد می‌شود. با دریافت پیش‌بینی وقوع حادثه، احتمال خروج خطوط شبکه توزیع با استفاده از روابط و منحنی‌های شکنندگی به دست می‌آید. سپس احتمال خروج خطوط به عنوان داده ورودی در مرحله دوم استفاده شده و با استفاده از آنها سناریوهای بعد از حادثه مشخص می‌شوند. با مشخص شدن سناریوهای بعد از حادثه، به منظور کاهش بار محاسباتی و افزایش سرعت حل مسئله در مرحله سوم، کاهش سناریو صورت می‌گیرد. سپس در مرحله آخر تخصیص پیشگیرانه تیم‌های تعمیر و منابع MEGs قبل از حادثه صورت می‌گیرد. خلاصه مراحل روش ارائه شده در این مقاله را می‌توان به صورت شکل (۲) بیان کرد.

۱-۳- مرحله اول: محاسبه احتمال خروج خطوط شبکه توزیع

در شبکه‌های توزیع در خصوص سیم‌های هوایی و تیرهای توزیع، احتمال خروج هر تجهیز با تصویر حداکثر سرعت پیش‌بینی شده بر منحنی آسیب‌پذیری تجهیز محاسبه می‌شود. منحنی‌های آسیب‌پذیری مربوط به طوفان، احتمال خروج یک تجهیز به ازای مقادیر مختلف سرعت باد را نشان می‌دهند. این منحنی‌ها از طریق آزمایش‌های استاندارد یا مدل‌های ریاضی و تجربی مناسب استخراج می‌شوند و به‌عنوان ورودی مسئله در این تحقیق استفاده می‌شوند. لازم به توجه است که خط توزیع هوایی بین دو شین در صورت آسیب سیم هوایی یا هر یک از تیرهای توزیع بین دو شین مربوطه از مدار خارج می‌گردد.

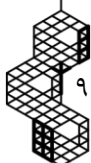
۲-۳- مرحله دوم: تولید سناریوهای بعد از وقوع حادثه با روش مونت کارلو

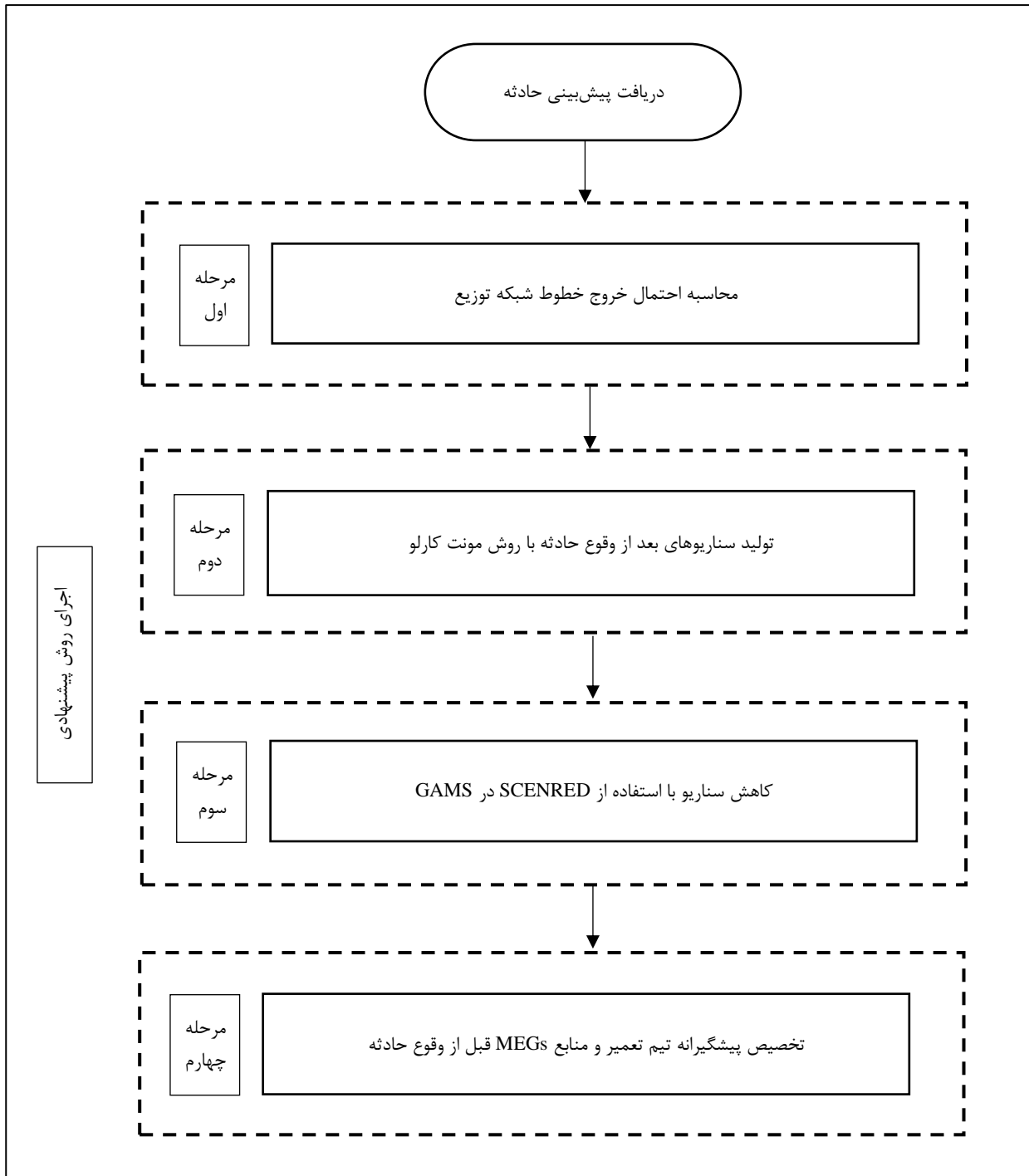
بعد از به دست آوردن احتمال خرابی خطوط شبکه توزیع انرژی الکتریکی از طریق منحنی‌های شکنندگی، باید سناریوهای مختلفی برای حالت خطوط شبکه در زمان‌های بعد از حادثه تولید شود تا بر اساس آن، برنامه‌ریزی پیش از وقوع طوفان صورت بگیرد. در این راستا، در این مقاله برای به دست آوردن سناریوهای مختلف از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. در این روش، برای هر شاخه شبکه توزیع یک عدد تصادفی بین صفر و یک تولید می‌شود.

اگر عدد تولید شده از احتمال خرابی آن خط بزرگتر باشد، بدین معنی است که خط بعد از مواجهه با طوفان سالم مانده است و اگر عدد بدست آمده کوچکتر از احتمال خرابی باشد، بدین معنی است که خط مذکور آسیب دیده است. حال با استفاده از این روش اگر سناریوهای زیادی تولید شود، در این صورت شرایط مختلفی پوشش داده خواهد شد. در روش شبیه‌سازی مونت کارلو احتمال وقوع تمام سناریوها یکسان می‌باشد.

۳-۳- مرحله سوم: کاهش سناریو با استفاده از SCENRED در نرم‌افزار GAMS

همانطور که اشاره شد هرچه تعداد سناریوهای تولید شده بیشتر باشد، حالت‌های زیادتری پوشش داده خواهند شد و بنابراین تصمیم‌گیری بر اساس سناریوهای تولید شده به یک تصمیم بهینه نزدیکتر خواهد بود. اما باید توجه داشت که هر چه تعداد سناریوها بیشتر باشد به دلیل افزایش تعداد حالات ممکن، زمان و پیچیدگی حل مسئله بیشتر می‌شود. به منظور رفع این مشکل در این مقاله برای کاهش تعداد سناریوها از جعبه‌ابزار SCENRED در نرم‌افزار GAMS استفاده شده است.





شکل (۲): مدل چهار مرحله‌ای روش پیشنهادی

۳-۴- فرمول‌بندی مسئله

در ادامه مدل‌سازی ریاضی مربوط به تخصیص پیشگیرانه تیم تعمیر و منابع تولید پراکنده قابل حمل قبل از وقوع حادثه آورده شده است: (۱) تابع هدف: تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود [۱]:

$$\text{Min} \sum_s \sum_t \sum_n \lambda_n \cdot \text{Pr}^s \cdot P_{s,t,n}^{\text{shed}} \quad (1)$$



که در آن λ_n ضریب اهمیت بارها، Pr^s احتمال وقوع هر سناریو، $P_{s,t,n}^{shed}$ مقدار توان اکتیو کاهش یافته هر سناریوی s در زمان t در شین n می‌باشد.
(۲) قیود پخش بار:

$$P_m^{Demand} - P_{s,t,m}^{DG} - P_{s,t,m}^{shed} - \sum_{MEG} P_{s,t,m}^{MEG} - \sum_{l,to=m} P_{s,t,l}^{flow} + \sum_{l,from=m} P_{s,t,l}^{flow} = 0, \forall s,t,m \quad (2)$$

$$Q_m^{Demand} - Q_{s,t,m}^{DG} - Q_{s,t,m}^{shed} - \sum_{MEG} Q_{s,t,m}^{MEG} - \sum_{l,to=m} Q_{s,t,l}^{flow} + \sum_{l,from=m} Q_{s,t,l}^{flow} = 0, \forall s,t,m \quad (3)$$

$$0 \leq P_{s,t,m}^{shed} \leq P_m^{Demand}, \forall s,t,m \quad (4)$$

$$Q_{s,t,m}^{shed} = P_{s,t,m}^{shed} \frac{Q_m^{Demand}}{P_m^{Demand}}, \forall s,t,m \quad (5)$$

که در آن P_m^{Demand} و Q_m^{Demand} به ترتیب مقدار بار اکتیو و راکتیو در شین m ، $P_{s,t,m}^{DG}$ و $Q_{s,t,m}^{DG}$ به ترتیب توان اکتیو و راکتیو منابع تولید پراکنده دائمی، $Q_{s,t,m}^{shed}$ توان راکتیو کاهش یافته هر سناریوی s در زمان t در شین m ، $P_{s,t,m}^{MEG}$ و $Q_{s,t,m}^{MEG}$ به ترتیب مقدار توان اکتیو و راکتیو تولیدی منابع تولید پراکنده قابل حمل، $P_{s,t,l}^{flow}$ و $Q_{s,t,l}^{flow}$ به ترتیب توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط l در زمان t در سناریوی s می‌باشند.

$$V_{s,t,n} - V_{s,t,m} + \frac{r_l \cdot P_{s,t,l}^{flow} + x_l \cdot Q_{s,t,l}^{flow}}{V_l} \geq (\alpha_{s,t,l} - 1) BM, \forall s,t,l \quad (6)$$

$$V_{s,t,n} - V_{s,t,m} + \frac{r_l \cdot P_{s,t,l}^f + x_l \cdot Q_{s,t,l}^f}{V_l} \leq (1 - \alpha_{s,t,l}) BM, \forall s,t,l \quad (7)$$

$$-\alpha_{s,t,l} cap_l \leq P_{s,t,l}^{flow} \leq \alpha_{s,t,l} cap_l \quad (8)$$

$$\underline{V}^2 \leq V_{s,t,m} \leq \bar{V}^2 \quad (9)$$

که در آن $V_{s,t,m}$ ولتاژ شین m در زمان t در سناریوی s ، r_l و x_l مقاومت و راکتانس خطوط، V_l ولتاژ مرجع، $\alpha_{s,t,l}$ متغیر باینری، BM یک عدد بسیار بزرگ، cap_l ظرفیت خطوط، \bar{V} و \underline{V} به ترتیب حداکثر و حداقل ولتاژ می‌باشند.

(۳) محدود کردن توان اکتیو و راکتیو منابع تولید پراکنده:

$$\chi_{s,t,m} \cdot \underline{P}_m^{DG} \leq P_{s,t,m}^{DG} \leq \chi_{s,t,m} \cdot \overline{P}_m^{DG}, \forall s,t,m \quad (10)$$

$$\chi_{s,t,m} \cdot \underline{Q}_m^{DG} \leq Q_{s,t,m}^{DG} \leq \chi_{s,t,m} \cdot \overline{Q}_m^{DG}, \forall s,t,m \quad (11)$$

که در آن $\chi_{s,t,m}$ متغیر باینری، \underline{P}_m^{DG} و \overline{P}_m^{DG} حداکثر و حداقل توان اکتیو تولیدی DG در شین m ، \underline{Q}_m^{DG} و \overline{Q}_m^{DG} حداکثر و حداقل توان راکتیو تولیدی DG در شین m می‌باشند.

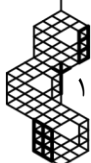
(۴) روابط تولید پراکنده قابل حمل:

$$P_{s,t,m}^{MEG} \leq K_{s,m,MEG} * \overline{P_{MEG}^{MEG}} * L(m), \forall s,t,m,MEG \quad (12)$$

$$P_{s,t,m}^{MEG} \geq K_{s,m,MEG} * \underline{P_{MEG}^{MEG}} * L(m), \forall s,t,m,MEG \quad (13)$$

$$Q_{s,t,m}^{MEG} \leq K_{s,t,MEG} * \overline{Q_{MEG}^{MEG}} * L(m), \forall s,t,m,MEG \quad (14)$$

$$Q_{s,t,m}^{MEG} \geq K_{s,m,MEG} * \underline{Q_{MEG}^{MEG}} * L(m), \forall s,t,m,MEG \quad (15)$$





$$\sum_m K_{s,m,MEG} = 1, \forall s, MEG \quad (16)$$

که در آن \overline{PMEG}_{MEG} و \underline{PMEG}_{MEG} به ترتیب حداکثر و حداقل توان اکتیو تولیدی منابع تولید پراکنده قابل حمل، \overline{QMEG}_{MEG} و \underline{QMEG}_{MEG} به ترتیب حداکثر و حداقل توان راکتیو تولیدی منابع تولید پراکنده قابل حمل، $L(m)$ پارامتر باینری و $K_{s,m,MEG}$ متغیر باینری هستند.

(۵) روابط تشخیص تغییر حالت کلیدهای خطوط شبکه توزیع:

$$-\xi_{s,t,l} \leq \psi_{s,t,l} - \psi_{s,t-1,l} \leq \xi_{s,t,l}, \forall s,t,l \quad (17)$$

$$\xi_{s,t,l} \leq \psi_{s,t,l} + \psi_{s,t-1,l} \leq 2 - \xi_{s,t,l}, \forall s,t,l \quad (18)$$

$$\sum_t \xi_{s,t,l} \leq 1, \forall s,l \quad (19)$$

که در آن $\xi_{s,t,l}$ و $\psi_{s,t,l}$ متغیرهای باینری هستند.

(۶) شبیه‌سازی حرکت تیم تعمیر برای بازیابی خطوط آسیب‌دیده: روابط (۲۰) تا (۳۰) برای شبیه‌سازی حرکت تیم در دسترس شرکت توزیع انرژی الکتریکی برای بازیابی خطوط در نظر گرفته شده‌اند:

$$time_{s,j}^{cr} \geq time_{s,i}^{cr} + TT_{i,j} + ST_j - (1 - Disp_{s,i,j}^{cr}) * BM, \forall s,i,j,cr \quad (20)$$

$$time_{s,j}^{cr} \leq time_{s,i}^{cr} + TT_{i,j} + ST_j + (1 - Disp_{s,i,j}^{cr}) * BM, \forall s,i,j,cr \quad (21)$$

$$\sum_{cr} \sum_i Disp_{s,i,j}^{cr} = \sum_t \xi_{s,t,l}, \forall s,l \in x_l^{MS} \quad (22)$$

$$\sum_i Disp_{s,i,j}^{cr} = 1, \forall s,i \in x_i^{st}, j, cr \quad (23)$$

$$Disp_{s,i,j}^{cr} = 0, \forall s,i,j \in x_j^{st}, cr \quad (24)$$

$$\sum_i Disp_{s,i,l}^{cr} - \sum_j Disp_{s,l,j}^{cr} = 0, \forall s, cr, l \in x_l^{MS} \quad (25)$$

$$\sum_{cr} \sum_i Disp_{s,i,l}^{cr} \leq 1, \forall s,l \in x_l^{MS} \quad (26)$$

$$\sum_t t \cdot \xi_{s,t,l} \geq \sum_{cr} (time_{s,l}^{cr} + ST_l \sum_i Disp_{s,i,l}^{cr}), \forall s,l \in x_l^{MS} \quad (27)$$

$$\sum_t t \cdot \xi_{s,t,l} \leq \sum_{cr} (time_{s,l}^{cr} + ST_l \sum_i Disp_{s,i,l}^{cr}) + 1 - \varepsilon, \forall s,l \in x_l^{MS} \quad (28)$$

$$0 \leq time_{s,j}^{cr} \leq BM \sum_i Disp_{s,i,j}^{cr}, \forall s, cr, j \quad (29)$$

$$\sum_i Disp_{s,i,j}^{cr} - \sum_i Disp_{s,j,i}^{cr} \geq 0, \forall s, cr, j \quad (30)$$

که در آن $time_{s,j}^{cr}$ مدت زمان لازم برای اتمام عملیات توسط تیم تعمیر، $TT_{i,j}$ مدت زمان حرکت بین شین‌ها، ST_j مدت زمان تعمیر، $Disp_{s,i,j}^{cr}$ متغیر باینری می‌باشند.

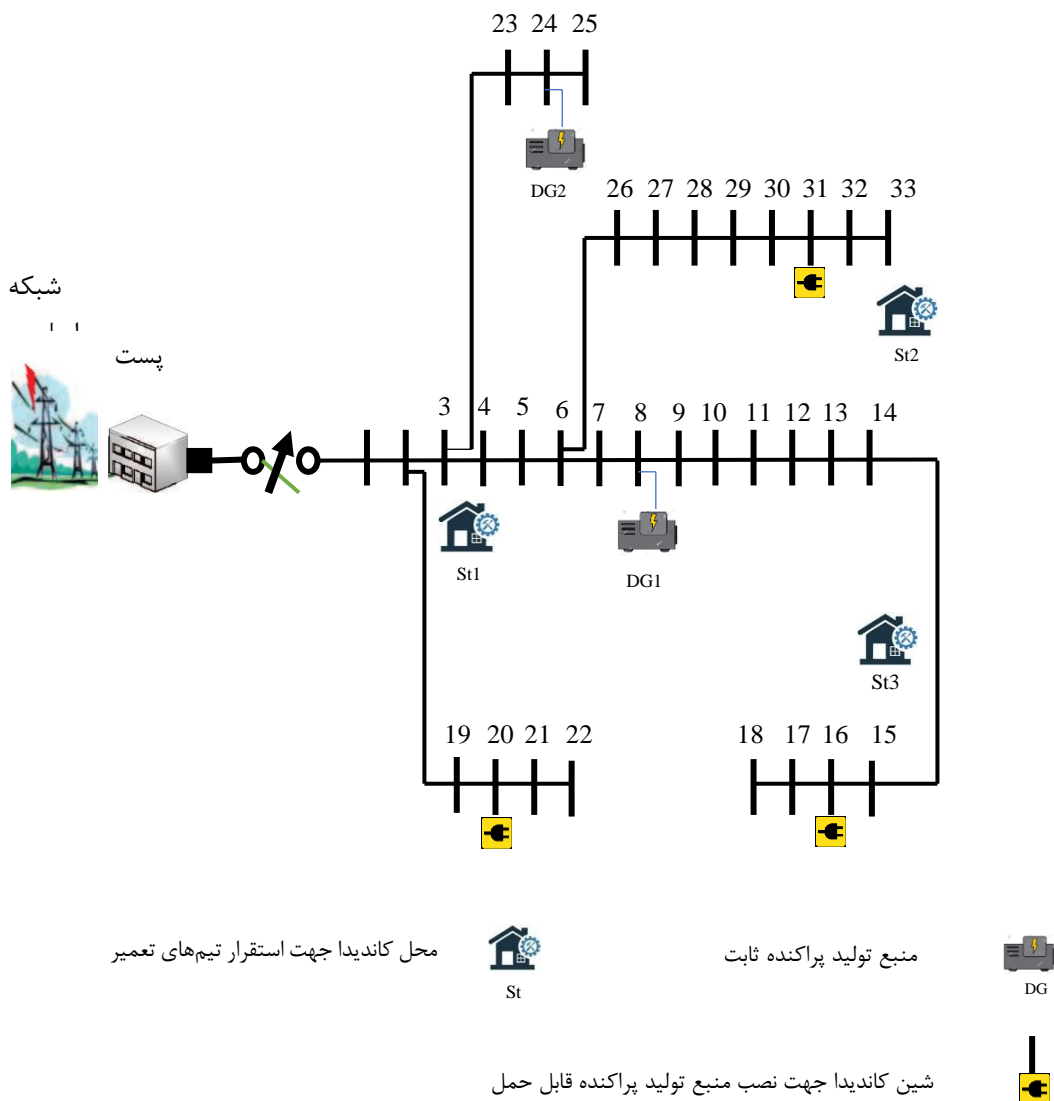
۴- شبیه‌سازی روش پیشنهادی

در این بخش ابتدا مشخصات شبکه استاندارد ۳۳-شین IEEE به عوان شبکه نمونه ارائه می‌گردد. سپس کارائی روش پیشنهادی روی آن شبیه‌سازی و بررسی خواهد شد.



۴-۱- معرفی شبکه نمونه

شبکه مورد مطالعه در این مقاله، شبکه ۱۲.۶۶ کیلو ولت استاندارد ۳۳-شینه IEEE است که به طور وسیعی در تحقیقات معتبر استفاده شده است. شکل (۳) تصویر تک خطی شبکه استاندارد مورد مطالعه را نمایش می‌دهد و مشخصات آن در جدول (۱) آورده شده است. شبکه مورد نظر دارای دو منبع تولید پراکنده ثابت (DGs)، سه محل کاندیدا جهت استقرار تیم‌های تعمیر (St1-St3)، و سه شین کاندیدا برای نصب منابع تولید پراکنده قابل حمل (MEGs) می‌باشد. در این مطالعه دو منبع تولید پراکنده قابل حمل و یک تیم تعمیر برای بازیابی بارها در نظر گرفته شده است.



شکل (۳): نمای تک خطی شبکه مورد مطالعه [۱۷]

جدول (۱): اطلاعات منابع تولید پراکنده (kW, kVAr) [۱۷]

نام منبع	نوع منبع	شین محل استقرار	\bar{P} (kW)	\bar{Q} (kVAr)	\underline{P} (kW)	\underline{Q} (kVAr)
DG1	ثابت	۸	۱۰۰۰	۸۰۰	۱۰۰	-۸۰۰
DG2	ثابت	۲۴	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰	-۱۰۰۰
MEG1	قابل حمل	-	۸۰۰	۵۰۰	۸۰	-۵۰۰
MEG2	قابل حمل	-	۵۰۰	۳۰۰	۵۰	-۳۰۰



۲-۴- محاسبه احتمال خروج خطوط

براساس مرجع [۱]، احتمال خروج خطوط به صورت جدول (۲) در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۲): احتمال خروج خطوط در شبکه نمونه

خط	از شین	به شین	احتمال خروج خط
۱	۱	۲	۰
۲	۲	۳	۰
۳	۳	۴	۰
۴	۴	۵	۰
۵	۵	۶	۰
۶	۶	۷	۰
۷	۷	۸	۰
۸	۸	۹	۰
۹	۹	۱۰	۰
۱۰	۱۰	۱۱	۰
۱۱	۱۱	۱۲	۰
۱۲	۱۲	۱۳	۰
۱۳	۱۳	۱۴	۰
۱۴	۱۴	۱۵	۰/۲۳۱۰
۱۵	۱۵	۱۶	۰/۲۳۸۷
۱۶	۱۶	۱۷	۰/۲۵۰۱
۱۷	۱۷	۱۸	۰/۲۴۲۵
۱۸	۲	۱۹	۰/۲۳۱۰
۱۹	۱۹	۲۰	۰/۲۶۸۶
۲۰	۲۰	۲۱	۰/۲۲۷۲
۲۱	۲۱	۲۲	۰/۲۵۳۸
۲۲	۳	۲۳	۰
۲۳	۲۳	۲۴	۰
۲۴	۲۴	۲۵	۰
۲۵	۶	۲۶	۰
۲۶	۲۶	۲۷	۰
۲۷	۲۷	۲۸	۰
۲۸	۲۸	۲۹	۰
۲۹	۲۹	۳۰	۰/۲۳۷۱
۳۰	۳۰	۳۱	۰/۲۵۲۲
۳۱	۳۱	۳۲	۰/۲۴۰۱
۳۲	۳۲	۳۳	۰/۲۳۴۰



۴-۳- تولید سناریو

به منظور تولید سناریوهای پس از حادثه با استفاده از احتمال خروج خطوط به عنوان ورودی در روش مونت کارلو، ۲۰۰۰ سناریو تولید می‌شود که احتمال وقوع هر یک از سناریوها برابر ۰/۰۰۰۵ می‌باشد. به منظور کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت عمل، باید کاهش سناریو صورت بگیرد.

۴-۴- کاهش سناریو

در این مقاله به منظور کاهش سناریو از جعبه ابزار SCENRED نرم‌افزار GAMS استفاده شده است. با این اقدام، تعداد سناریوها به ۵ عدد کاهش می‌یابد که احتمال وقوع هریک از آن‌ها در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳): سناریوهای کاهش یافته برای آسیب دیدن خطوط بعد از حادثه

سناریو	خطوط آسیب دیده	احتمال سناریو
۱	خطوط ۱۸، ۲۳	۰/۳۷۸
۲	خطوط ۶، ۱۵، ۲۹	۰/۲۳۴
۳	خطوط ۱۲، ۲۶، ۲۱	۰/۲۲۵
۴	خطوط ۲۴، ۱۹، ۹، ۳۱	۰/۱۰۳
۵	خطوط ۲۰، ۱۵، ۱۱، ۲۸، ۲۴	۰/۰۶

۴-۵- مطالعات موردی

- به منظور نشان دادن اثربخشی روش پیشنهادی، دو مطالعه موردی در نظر گرفته می‌شود:
- مطالعه موردی ۱: در این مطالعه، قبل از حادثه هیچ اقدامی برای افزایش آمادگی شبکه در مقابل حادثه آتی انجام نمی‌گیرد. و منابع تولید پراکنده قابل حمل و تیم تعمیر از انبار شروع به حرکت می‌کنند. در این مطالعه موردی، تاخیر در نظر گرفته شده برای اعزام تیم تعمیر و منابع تولید پراکنده قابل حمل ۴ ساعت می‌باشد. این مطالعه موردی نمایانگر یک رویکرد کاملاً منفعل یا واکنشگرانه است
 - مطالعه موردی ۲: در این مطالعه، علاوه بر دو منبع تولید پراکنده دائمی، دو منبع تولید پراکنده قابل حمل را قبل از حادثه به همراه یک تیم تعمیر لحاظ می‌کنیم. این مطالعه موردی، معرف یک نگاه پیشگیرانه در مقابل حادثه است.

۴-۶- نتایج عددی

به منظور بررسی مطالعات موردی، سناریوی ۵ که در آن خطوط بیشتری نسبت به سناریوهای دیگر آسیب دیده است همچنین سناریوی ۱ که احتمال وقوع آن از سناریوهای دیگر بیشتر می‌باشد، مورد بررسی قرار می‌گیرند و عملکرد تیم تعمیر و منابع MEGs مورد بحث قرار می‌گیرد.

سناریوی ۵

جدول (۴) مقدار انرژی تأمین نشده (ENS)^{۴۵} در طول مدت برنامه‌ریزی در مطالعات موردی مختلف را نشان می‌دهد. همان طور که در این جدول مشخص است، مقدار بار تأمین نشده در مطالعه موردی ۱ بیش از مطالعه موردی ۲ است. این نتیجه مطابق انتظار است؛ چرا که در مطالعه موردی ۱ هیچ اقدامی قبل از حادثه برای بهبود آمادگی شبکه اتخاذ نمی‌شود و رویکرد حاکم یک رویکرد منفعل یا واکنشگرانه است. میزان انرژی تأمین نشده در مطالعه موردی ۲ به حداقل خود رسیده است، زیرا این مطالعه موردی پیشگیرانه بوده است.

جدول (۴): مقدار بار تأمین نشده (ENS) در مدت زمان برنامه‌ریزی (kWh) در سناریوی ۵

مطالعه موردی	۱	۲
انرژی تأمین نشده (ENS)	۸۱۰	۳۱۰





همانطور که مشاهده می‌شود با اجرای روش پیشنهادی، مقدار انرژی تامین نشده (ENS) به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. محل‌های بهینه قرارگیری دو منبع تولید پراکنده قابل حمل در مطالعه موردی ۲، در جدول (۵) گزارش شده است. لازم به یادآوری است که این منابع قبل از وقوع حادثه در محل‌های بهینه تعیین شده نصب شده و آماده بهره‌برداری هستند. مسیر حرکت تیم‌های تعمیر برای بازیابی خطوط آسیب‌دیده در اثر وقوع حادثه در جدول (۶) گزارش شده است.

جدول (۵): محل بهینه نصب منابع تولید قابل حمل در مطالعه موردی ۲ و سناریوی ۵

محل بهینه	MEGs
۳۱	MEG1
۱۶	MEG2

جدول (۶): مسیر حرکت تیم تعمیر در سناریوی ۵

مسیر حرکت	محل شروع
۲۸ ← ۱۵ ← ۱۱ ← ۲۰ ← ۲۴	St1

با توجه به فاصله بین محل کاندیدا شده برای استقرار تیم‌های تعمیر و خطوط آسیب‌دیده و همچنین ضریب اهمیت بارها، ابتدا تیم تعمیر از St1 شروع به حرکت می‌کند و سپس به ترتیب به سمت خطوط آسیب‌دیده ۲۴، ۲۰، ۱۱، ۱۵ و ۲۸ حرکت می‌کند و پس از انجام فرآیند تعمیر، خطوط آسیب‌دیده را وصل و در مدار قرار می‌دهد. زمان وصل شدن خطوط آسیب‌دیده در اثر وقوع سناریوی ۵ در جدول (۷) نشان داده شده است:

جدول (۷): زمان وصل خطوط آسیب‌دیده در اثر وقوع حادثه در سناریوی ۵

خط آسیب‌دیده	زمان وصل (دقیقه)
۲۴	۸۵
۲۰	۱۸۵
۱۱	۳۱۰
۱۵	۳۹۵
۲۸	۷۳۵

سناریوی ۱

روند مشابهی برای سناریوی ۱ نیز می‌توان در نظر گرفت. جدول (۸) مقدار انرژی تامین نشده (ENS) در طول مدت برنامه‌ریزی در مطالعات موردی مختلف را نشان می‌دهد. همان طور که در این جدول مشخص است، مقدار بار تامین نشده در مطالعه موردی ۱ بیش از مطالعه موردی ۲ است. این نتیجه مطابق انتظار است، چرا که در مطالعه موردی ۱ هیچ اقدامی قبل از حادثه برای بهبود آمادگی شبکه اتخاذ نمی‌شود و رویکرد حاکم یک رویکرد منفعل یا واکنشگرانه است. میزان انرژی تامین نشده در مطالعه موردی ۲ به حداقل خود رسیده است؛ چرا که این مطالعه موردی کنشگرانه بوده است.

جدول ۸: مقدار بار تامین نشده (ENS) در مدت زمان برنامه‌ریزی (kWh) در سناریوی ۱

مطالعه موردی	۱	۲
انرژی تامین نشده (ENS)	۴۴۵۰	۱۳۲۰

همانطور که مشاهده می‌شود با اجرای روش پیشنهادی مقدار انرژی تامین نشده (ENS) به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. محل‌های بهینه قرارگیری دو منبع تولید پراکنده قابل حمل در مطالعه موردی ۲، در جدول (۹) گزارش شده است. لازم به یادآوری است



که این منابع قبل از وقوع حادثه در محل‌های بهینه تعیین شده نصب و آماده بهره‌برداری هستند. مسیر حرکت تیم‌های تعمیر برای بازیابی خطوط آسیب‌دیده در اثر وقوع حادثه در جدول (۱۰) گزارش شده است.

جدول (۹): محل بهینه نصب منابع تولید قابل حمل در مطالعه موردی ۲ و سناریوی ۱

محل بهینه	MEGs
۱۶	MEG1
۲۰	MEG2

جدول (۱۰): مسیر حرکت تیم تعمیر در سناریوی ۱

مسیر حرکت	محل شروع
۲۳ ← ۱۸	St1

با توجه به فاصله بین محل کاندیدا شده برای استقرار تیم‌های تعمیر و خطوط آسیب‌دیده و همچنین ضریب اهمیت بارها، ابتدا تیم تعمیر از St1 شروع به حرکت می‌کند و سپس به ترتیب به سمت خطوط آسیب‌دیده ۱۸ و ۲۳ حرکت می‌کند و پس از انجام فرآیند تعمیر، خطوط آسیب‌دیده را وصل و در مدار قرار می‌دهد. زمان وصل شدن خطوط آسیب‌دیده در اثر وقوع سناریوی ۱ در جدول (۱۱) نشان داده شده است.

جدول (۱۱): زمان وصل خطوط آسیب‌دیده در اثر وقوع حادثه در سناریوی ۱

خط آسیب‌دیده	زمان وصل (دقیقه)
۲۳	۷۵
۱۸	۱۵۵

۵- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر تغییرات آب و هوایی منجر به وقوع حوادث طبیعی شدید شده است که مانند این حوادث را نمی‌توان در گذشته پیدا کرد. این حوادث طبیعی سبب خسارت‌های فیزیکی گسترده‌ای به شبکه برق می‌شوند که خاموشی‌های گسترده و چندین ساعته و حتی در بعضی از موارد باعث خاموشی‌های چند روزه می‌شوند. با توجه به همبستگی سیستم‌های زیرساختی به انرژی الکتریکی، قطعی برق باعث خاموشی سیستم‌های زیرساختی دیگر نیز می‌شود. شبکه توزیع به طور مستقیم در ارتباط با مشترکین می‌باشد و هرگونه آسیب احتمالی به آن باعث خاموشی گسترده مشترکین می‌گردد. در این راستا، در این مقاله به افزایش تاب‌آوری شبکه توزیع پرداخته شد است و یک روش پیشنهادی چهار مرحله‌ای ارائه گردید.

در مرحله اول روش پیشنهادی با استفاده از روابط و منحنی‌های شکنندگی موجود برای تجهیزات مختلف از قبیل هادی و تیرهای شبکه، احتمال خروج خطوط شبکه توزیع مورد مطالعه بدست می‌آید. سپس در مرحله دوم با استفاده از این احتمال شکست‌ها و روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای خرابی خطوط بعد از وقوع طوفان، سناریوهای خرابی خطوط تولید می‌شود. هدف از تولید این سناریوها، شبیه‌سازی عملیات مورد نیاز برای بازیابی بارهای قطع شده بعد از وقوع حادثه می‌باشد.

در مرحله سوم به منظور کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت حل مسئله از جعبه ابزار SCENRED در GAMS جهت کاهش سناریوها استفاده می‌شود و سناریوهای تولید شده در مرحله قبل به عنوان ورودی و سناریوهای اولیه در SCENRED استفاده می‌شوند.

در مرحله چهارم با اجرای مدل پیشنهادی، محل بهینه منابع تولید پراکنده قابل حمل و تیم تعمیر قبل از حادثه مشخص می‌گردد. روش پیشنهادی بر روی شبکه توزیع نمونه ۳۳ شینه IEEE شبیه‌سازی شد. به منظور ارزیابی کامل روش پیشنهادی، دو مطالعه موردی در نظر گرفته شد. مطالعه اول نمایانگر رویکرد منفعلانه و مطالعه دوم نمایانگر رویکرد کنشگرانه می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از کاهش میزان انرژی تامین نشده (ENS) با اجرای روش پیشنهادی می‌باشد.





پیشنهاداتی که برای ادامه کار وجود دارد عبارت است از:

- ۱- بررسی جامع‌تر احتمال خرابی خطوط شبکه چرا که احتمال خرابی خطوط علاوه بر شدت حادثه به پارامترهای مختلفی نظیر ساختمان‌ها و پوشش گیاهی اطراف آن نیز بستگی دارد.
- ۲- امکان استفاده از ظرفیت خطوط پشتیبان در بحث جایگزینی خطوط آسیب‌دیده.
- ۳- بررسی استفاده از ظرفیت باتری‌ها و خودروهای برقی جهت بهبود تاب‌آوری.

مراجع

- [1] B. Taheri, A. Safdarian, M. Moeini-Aghtaie, and M. Lehtonen, "Enhancing resilience level of power distribution systems using proactive operational actions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 137378–137389, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2941593.
- [2] M. H. Amirioun, F. Aminifar, H. Lesani, and M. Shahidehpour, "Metrics and quantitative framework for assessing microgrid resilience against windstorms," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 104, pp. 716–723, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.07.025.
- [3] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 3–28, 1978, doi: 10.1016/0165-0114(78)90029-5.
- [4] A. M. Madni and S. Jackson, "Towards a conceptual framework for resilience engineering," *IEEE Syst. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 181–191, 2009, doi: 10.1109/JSYST.2009.2017397.
- [5] C. Perrings, "Resilience and sustainable development," *Environment and Development Economics*, vol. 11, no. 4, pp. 417–427, 2006, doi: 10.1017/S1355770X06003020.
- [6] A. Gholami, T. Shekari, M. H. Amirioun, F. Aminifar, M. H. Amini, and A. Sargolzaei, "Toward a consensus on the definition and taxonomy of power system resilience," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 32035–32053, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2845378.
- [7] H. Luan and C. C. Tsai, "A Review of Using Machine Learning Approaches for Precision Education," *Educ. Technol. Soc.*, vol. 24, no. 1, pp. 250–266, 2021.
- [8] A. Mosavi, P. Ozturk, and K. W. Chau, "Flood prediction using machine learning models: Literature review," *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 11, p. 1536, 2018, doi: 10.3390/w10111536.
- [9] B. Choubin *et al.*, "Earth fissure hazard prediction using machine learning models," *Environ. Res.*, vol. 179, p. 108770, 2019, doi: 10.1016/j.envres.2019.108770.
- [10] A. Jaafari, E. K. Zenner, M. Panahi, and H. Shahabi, "Hybrid artificial intelligence models based on a neuro-fuzzy system and metaheuristic optimization algorithms for spatial prediction of wildfire probability," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 266–267, pp. 198–207, 2019, doi: 10.1016/j.agrformet.2018.12.015.
- [11] R. Sharma, S. Rani, and I. Memon, "A smart approach for fire prediction under uncertain conditions using machine learning," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 79, no. 37–38, pp. 28155–28168, 2020, doi: 10.1007/s11042-020-09347-x.
- [12] H. Gao, Y. Chen, S. Mei, S. Huang, and Y. Xu, "Resilience-Oriented Pre-Hurricane Resource Allocation in Distribution Systems Considering Electric Buses," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1214–1233, 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2666548.
- [13] S. Lei, C. Chen, H. Zhou, and Y. Hou, "Routing and Scheduling of Mobile Power Sources for Distribution System Resilience Enhancement," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 5, pp. 5650–5662, 2018, doi: 10.1109/TSG.2018.2889347.
- [14] A. Gholami, T. Shekari, and S. Grijalva, "Proactive Management of Microgrids for Resiliency Enhancement: An Adaptive Robust Approach," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 470–480, 2019, doi: 10.1109/TSTE.2017.2740433.
- [15] M. H. Amirioun, F. Aminifar, and H. Lesani, "Resilience-Oriented Proactive Management of Microgrids Against Windstorms," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 4, pp. 4275–4284, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2765600.
- [16] M. H. Amirioun, F. Aminifar, and M. Shahidehpour, "Resilience-promoting proactive scheduling against hurricanes in multiple energy carrier microgrids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 3, pp. 2160–2168, 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2881954.
- [17] J. Zhao, S. Kucuksari, E. Mazhari, and Y. J. Son, "Integrated analysis of high-penetration PV and PHEV with energy storage and demand response," *Appl. Energy*, vol. 112, pp. 35–51, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.05.070.



- 1 high impact rare events
- 2 artificial intelligence (AI)
- 3 learning
- 4 reasoning
- 5 self-correction
- 6 machine learning
- 7 neural networks
- 8 artificial neural networks (ANNs)
- 9 deep learning
- 10 generative adversarial networks
- 11 multidisciplinary
- 12 simulated annealing feature selection
- 13 generalized linear model
- 14 multivariate adaptive regression splines
- 15 classification and regression tree
- 16 random forest
- 17 support vector machine
- 18 neuro-fuzzy system
- 19 adaptive neuro-fuzzy inference system
- 20 genetic algorithm
- 21 particle swarm optimization
- 22 shuffled frog leaping algorithm
- 23 imperialist competitive algorithm
- 24 step-wise weight assessment ratio analysis
- 25 internet of things
- 26 Realtime
- 27 defensive approaches
- 28 mixed integer linear programming
- 29 electric buses
- 30 mixed-integer stochastic nonlinear program
- 31 mobile power sources
- 32 electric vehicle
- 33 mobile energy storage systems
- 34 mobile emergency generators
- 35 column and constraint generation algorithm
- 36 islanding
- 37 autonomous
- 38 network reconfiguration
- 39 generation reschedule
- 40 conservation voltage regulation
- 41 demand-side resources
- 42 backup generation
- 43 droop-controlled units
- 44 vulnerability index
- 45 energy not supplied