

برنامه‌ریزی بازیابی پیش از وقوع تند باد شبکه‌های توزیع فشار متوسط با هدف بهبود مدیریت بحران پیش اقدامانه

مسعود صادقی خمایی*: دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران،

sadeghi.m32@gmail.com

محمد صادق سپاسیان: دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۵/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۲۵

چکیده

برنامه‌ریزی بازیابی پیش‌اقدامانه قبل از بروز طوفان اقدامی مؤثر در کاهش زمان و هزینه‌ی خاموشی شبکه‌های هوایی توزیع است و در بهبود تاب‌آوری این بخش از شبکه‌های برق‌رسانی تأثیرگذار خواهد بود. این مقاله ارائه دهنده‌ی چارچوب جدیدی برای تعیین اولویت بازیابی پیش‌اقدامانه‌ی خطوط هوایی فشارمتوسط است. در این روش، تصمیم‌گیری پیش‌اقدامانه‌ی بازیابی و تعیین اولویت خطوط فشار متوسط برای بازیابی بر مبنای مقایسه مابین این خطوط با معیارهای مختلف فنی، اقتصادی، حیاتی بودن بارها و سهولت دسترسی انجام می‌شود. در این راستا از منحنی شکست پایه‌های فشار متوسط و شبیه‌سازی مونت کارلو برای پیش‌بینی و تخمین آسیب وارده به شبکه بهره‌گیری شده و با هدف رفع معضل کمبود اطلاعات دقیق و عدم قطعیت‌های ناشی از این معضل از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی به منظور تعیین برنامه‌ی پیش‌اقدامانه و اولویت‌گذاری بازیابی استفاده شده است. چنانکه در ادامه‌ی مقاله در پیاده‌سازی روش پیشنهادی در یک شبکه‌ی نمونه ملاحظه می‌شود، این روش از کارایی و قابلیت مناسبی برای تعیین پیش‌اقدامانه‌ی بازیابی شبکه‌های توزیع مواجه با کمبود اطلاعات، خصوصاً در کشورهای کمتر توسعه یافته که با معضل عدم دسترسی به اطلاعات کافی مواجه هستند برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: مدیریت بحران، بازیابی، منحنی‌های شکست‌پذیری، شبیه‌سازی مونت‌کارلو، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP)، تاب‌آوری

Pre-storm restoration planning of medium voltage distribution networks for proactive crisis management

Masoud Sadeghi Khomami^{1*}, Mohammad Sadegh Sepasian²

Abstract

Pre-storm proactive recovery planning is an effective tool for reducing the time and cost of electrical outage and resiliency enhancement of medium voltage (MV) distribution networks. This paper presents a new framework for setting proactive medium voltage feeders recovery priorities. In this method, the proactive recovery decision making and MV feeders priority setting are considered based on the comparison between different criteria including technical issue, criticality of loads, economic and accessibility conditions. In this regard, the MV poles fragility curve and Monte Carlo simulation have been employed to predict and estimate the damage of the network. To eliminate the problem of the lack of accurate data and the uncertainties, fuzzy analytical hierarchy process is used to determine proactive recovery prioritization. In the rest of the paper, the proposed approach is applied to a test network. The results demonstrate the suitable performance of this method for determining feeders recovery priorities especially in the less developed countries which have been facing with the lack of access to the adequate data.

Keywords: crisis management, recovery, fragility curves, monte carlo simulation, fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) resilience

1 Phd student of electrical engineering, faculty of electrical engineering, shahid beheshti university, Tehran, Iran; Email: sadeghi.m32@gmail.com

2 Associate professor, faculty of electrical engineering, shahid beheshti university, Tehran, Iran

۷۷

شماره پانزدهم

بهار و تابستان

۱۳۹۸

دوفصلنامه علمی و پژوهشی



مقدمه

شبکه‌های توزیع نیروی برق و مشترکان در معرض تهدیدات مختلف طبیعی، از جمله طوفان و تندباد قرار دارند. فاجعه‌های طبیعی که با دوره‌های تناوب متفاوت در محدوده‌های مختلف جغرافیایی به وقوع می‌پیوندند با ایجاد وقفه و خاموشی‌های گاه گسترده تبعات نامطلوب اجتماعی، فنی، اقتصادی و سازمانی را موجب می‌شوند.

به دلیل گرمایش جهانی و با توجه به تغییرات اقلیمی، بلایای طبیعی با شدت و گستره‌ی بیشتری در طول چند دهه‌ی گذشته رخ داده و انتظار می‌رود بر شدت و تعداد و بازه‌ی زمانی وقوع این رخدادها در آینده افزوده شود [۱].

با ملاحظه‌ی موارد یاد شده و با توجه به وابستگی شدید جوامع به زیرساخت‌های حیاتی (از جمله حمل و نقل، فعالیت‌های اقتصادی، نظام سلامت، تصفیه و تأمین آب شرب و خدمات اضطراری) تقویت زیرساخت‌های ملی انرژی و افزایش تاب‌آوری آن به منزله‌ی یک اولویت حائز اهمیت ضرورت یافته است [۲].

امروزه مدیریت بحران و تاب‌آوری مفاهیمی تنگاتنگ و به هم مرتبط تلقی می‌شوند. تاب‌آوری مفهومی نوین در مهندسی برق است و تاکنون تعریف این مفهوم، استانداردسازی نشده است. در مرجع [۳] مرکز تحقیقات انرژی انگلستان تعریف ذیل را از تاب‌آوری ارائه می‌دهد: «تاب‌آوری عبارت از ظرفیت یا قابلیت یک سیستم در تحمل اغتشاشات و توانایی تحویل مستمر انرژی به مشترکان است. یک سیستم انرژی تاب‌آور می‌تواند به سرعت از حالت شوک، بازیابی شده و برای رفع نیازهای تأمین انرژی که به دلیل بروز رخدادهای ناشی از پیشامد خارجی حادث می‌شود جایگزین ارائه نماید».

در مرجع [۴] انجمن مشورتی زیرساخت‌های ملی NIAC، استحکام، کفایت منابع، بازیابی سریع و سازگاری‌پذیری را از جمله ویژگی‌های اصلی تاب‌آوری معرفی می‌نماید. در تعاریف ذکر شده بازیابی سریع و به عبارت دیگر بازگرداندن مشترکان یا بار از دست‌رفته به منزله‌ی یکی از ویژگی‌های اصلی تاب‌آوری مطرح است. از این تعریف قابل استنباط است که برنامه‌ریزی بازیابی پیش‌اقدامانه در بهبود تاب‌آوری نقش آفرین است.

پس از وقوع فاجعه‌ی طبیعی و به تبع آن آسیب به زیرساخت‌های برق‌رسانی و ایجاد وقفه و خاموشی، مهم‌ترین وظیفه‌ی بهره‌برداران سیستم، بازیابی سیستم قدرت در حداقل زمان ممکن با هدف بازیابی بارهای حساس و کاهش خسارات اقتصادی وارد به مشترکان است [۵].

با ملاحظه‌ی سابقه‌ی مقالات مرتبط با موضوع بازیابی بار و سیستم ملاحظه می‌گردد که اغلب مقالات منتشر شده، بازیابی بار و سیستم را از منظر بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان مورد توجه قرار داده‌اند.

بازیابی سیستم‌های قدرت پس از بروز وقفه به طور مفصل در مرجع [۶] مورد بررسی قرار گرفته است. به طور کلی فرایند بازیابی به سه مرحله‌ی زمانی آمادگی، بازیابی سیستم و بازیابی بار قابل تفکیک است [۷، ۸]. در مرحله‌ی اول یا آمادگی، ارزیابی

سیستم و شناسایی اجزای مشکل‌ساز و بارهای حساس و همچنین فعالیت‌های پیش‌بینانه با هدف تأمین منابع تجهیزاتی و تعمیراتی جایگزین انجام می‌گردد. در مرحله‌ی دوم، بازگرداندن شبکه‌ی سراسری و منابع تولیدی که از سیستم خارج شده‌اند در دستور کار قرار دارد و در مرحله‌ی سوم بازیابی بارهای حساس و حداقل نمودن بارهای خارج شده از سرویس‌پذیری می‌شود. بدیهی است که اقدامات لازم در این مرحله پس از بازیابی شبکه‌ی انتقال و تولید و تثبیت پارامترهای الکتریکی از قبیل فرکانس و ولتاژ شروع می‌گردد و برای انجام بازیابی بار روش‌ها و تکنیک‌های مختلف تحلیلی توسعه داده شده‌اند. مراجع [۹، ۱۰] ارائه‌دهنده‌ی کاربرد سیستم خبره در بازیابی بار سیستم‌های توزیع هستند.

مراجع [۱۱، ۱۲] ارائه‌دهنده‌ی بازیابی بار سیستم‌های توزیع با به‌کارگیری منطق فازی هستند. کاربرد روش‌های ابتکاری در بازیابی بار شبکه‌های توزیع در مراجع [۱۳، ۱۴] مطرح شده و بهره‌گیری از روش برنامه‌ریزی دینامیکی و روش ورود و خروج واحدها در بازیابی سیستم‌های توزیع در مراجع [۱۵، ۱۶] ارائه گردیده است.

در بررسی مقالات ذکر شده ملاحظه می‌گردد که عمدتاً رویکرد بررسی بازیابی بار و سیستم، بر مبنای مطالعات قابلیت اطمینان و بر پایه‌ی بروز خطای موردی تجهیزات بنا شده است، در حالی که خاموشی‌های ناشی از رخدادهای طبیعی که از نوع حوادث با احتمال وقوع پایین و با شدت اثر تخریب بالا هستند، دارای ویژگی‌های متفاوتی از خاموشی‌های ناشی از بروز عیب در تجهیزات به صورت موردی است.

این نوع حوادث وابستگی زیادی به مشخصات فاجعه‌های طبیعی دارد؛ برای مثال وقوع یک طوفان ممکن است منجر به سقوط و شکستن پایه‌های شبکه‌ی توزیع در نقاط متعددی گردد و موقعیت این خرابی‌ها وابسته به مسیر وقوع طوفان است در حالی که در یک خاموشی عادی معمولاً فقط یک خرابی منجر به بروز وقفه در برق‌رسانی می‌گردد [۵].

برخلاف موضوع بازیابی بار با دیدگاه بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان، شمار مقالاتی که موضوع بازیابی شبکه‌های توزیع را با ایده‌ی بهبود تاب‌آوری این زیرساخت، در برابر تهدیدات طبیعی مورد توجه قرار دهند چندان قابل توجه نیستند. مراجع ذیل از جمله منابعی هستند که از وجوه مختلف به این موضوع پرداخته‌اند.

مرجع [۱۷] اثر متقابل محیط بیوفیزیکی و شبکه‌های زیرساختی برق، در تاب‌آوری شبکه‌های توزیع را مورد بررسی قرار می‌دهد و روش اولویت‌گذاری فعالیت‌های بازیابی و از جمله برنامه‌ریزی عملیات بازیابی، در این محیط را ارائه می‌نماید. مرجع [۱۸] موضوع تخصیص منابع در بازیابی سیستم‌های قدرت را مورد توجه قرار داده و ارائه‌دهنده‌ی مدل‌هایی برای استقرار واحدهای تعمیراتی و بازیابی خطوط انتقال و توزیع تحت یک الگوی اثربخش است. راهبری بهینه‌ی واحدهای تعمیراتی با ملاحظه‌ی پیش‌بینی شرایط جوی نامساعد و ارائه‌ی طرح‌های راهبردی کوتاه‌مدت و بلندمدت برای تخمین تعداد بهینه‌ی

گروه‌های تعمیراتی و جایابی آن‌ها تحت شرایط جوی نرمال و نامساعد از جمله خروجی‌های ارائه شده در مدل‌های مطرح در این مقاله است.

مرجع [۱۹] ارائه‌دهنده‌ی مدلی است که در طول عملیات بازبازی سیستم، محل و تعداد بهینه‌ی اکیپ‌های عملیاتی و انبارهای قطعات رزرو، با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های حمل و نقل تعیین می‌گردد. مرجع [۲۰] ارائه‌دهنده‌ی مدل پیش‌اقدامانه‌ی غیرقطعی و دو مرحله‌ای برای بازبازی و تخصیص منابع قبل از وقوع طوفان است.

در مرجع [۲۱] برای شبکه‌های قدرت در معرض تهدید طوفان، برنامه‌ی دینامیک غیرقطعی برای مدل‌سازی یک استراتژی پویای مدیریت دارایی‌ها ارائه شده است. مرجع [۲۲] ارائه‌دهنده‌ی مدلی چند مرحله‌ای در حوزه‌ی بازبازی سیستم و با هدف مدیریت بحران و به تبع آن ارتقای تاب‌آوری است. این مقاله شامل مدل‌های پیش‌بینی خاموشی شبکه‌های قدرت در معرض طوفان و تندباد، مدل غیرقطعی پیش‌اقدامانه بسیج و آماده‌سازی اکیپ‌های عملیاتی و تعمیراتی پیش از بروز طوفان و مدل قطعی بازبازی سیستم پس از بروز طوفان برای مدیریت منابع اعم از اکیپ‌های عملیاتی و منابع تجهیزاتی است.

مرجع [۲۳] ارائه‌دهنده‌ی روشی آماری بر پایه‌ی برآزش داده‌ها و بهره‌گیری از بانک اطلاعات بسیار بزرگ مربوط به طوفان‌های گذشته است که اقدام به پیش‌بینی زمان بازبازی شبکه‌های برق‌رسانی می‌نماید. مدل ارائه شده ابزار مناسبی برای بهبود اطلاع‌رسانی به مشترکان از زمان مورد نیاز برای بازبازی شبکه‌ی آسیب‌دیده بعد از وقوع طوفان است.

با بررسی و مرور روش‌های به‌کار گرفته شده در مقالات ذکر شده‌ی فوق ملاحظه می‌شود که بسیاری از این روش‌ها وابستگی زیادی به داده‌های دقیق و وسیع، توپولوژی و ساختار شبکه و بانک اطلاعاتی GIS، اطلاعات دقیق بیوفیزیکی و محیط پیرامونی زیرساخت‌ها، مدل‌های دقیق ارزیابی خسارات مرتبط با وقوع یک تهدید و مدل تأمین و تخصیص منابع تعمیراتی و تجهیزاتی دارد و اولویت‌گذاری فرایند بازبازی بار و سیستم در این مدل‌ها از بار محاسباتی بالایی برخوردار است.

گفتنی است که نیازمندی‌ها و امکانات گفته شده در بسیاری از کشورهای کمتر توسعه یافته که به شدت در معرض تهدیدات طبیعی قرار دارند وجود ندارد و اجرای این روش‌ها را با چالش‌های جدی مواجه می‌نماید.

بنابراین، مقاله‌ی حاضر برای رفع معضل فوق با ترکیب روش‌های مبتنی بر تحلیل فرایند سلسله‌مراتبی فازی FAHP و شبیه‌سازی مونت‌کارلو و منحنی‌های شکست‌پذیری، ارائه‌دهنده‌ی روشی جدید برای برنامه‌ریزی پیش‌اقدامانه قبل از وقوع طوفان برای بازبازی بار شبکه‌های توزیع با هدف مدیریت بحران پیش‌اقدامانه و به تبع آن بهبود تاب‌آوری است.

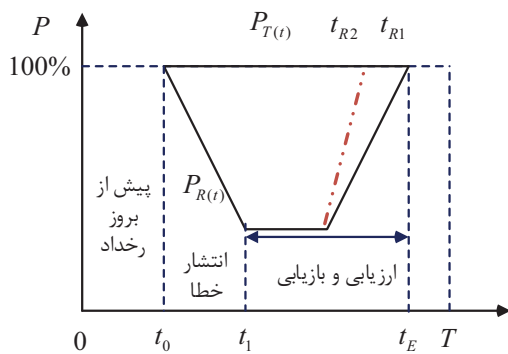
این مقاله در شش بخش سازماندهی شده و در بخش اول مقدمه و پیش‌درآمدی بر مطالعات انجام شده در حوزه‌ی بازبازی، مدیریت بحران و تاب‌آوری ارائه گردید. در بخش دوم نقش و

جایگاه عملیات بازبازی و مدیریت بحران پیش‌اقدامانه در بهبود تاب‌آوری مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در بخش سوم مدل مدیریتی و فنی بازبازی شبکه‌های توزیع ارائه شده و در بخش چهارم مقاله، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی تشریح و روش محاسبات، مقایسه‌ها و وزن‌گذاری ارائه می‌گردد. نمونه‌ی عملی و مطالعه‌ی موردی در بخش پنجم ارائه شده و در نهایت نتایج حاصل شده در بخش ششم مقاله جمع‌بندی شده‌اند.

بررسی نقش عملیات بازبازی و مدیریت بحران پیش‌اقدامانه در بهبود تاب‌آوری

در حوزه‌ی مدیریت بحران، بررسی تاب‌آوری شبکه‌های توزیع در مواجهه با رخداد‌های مخرب از جمله طوفان و تند باد در سه مرحله، مشابه تصویر ۱ صورت می‌پذیرد.

- مرحله‌ی پیش از بروز رخداد ($0 \leq t \leq t_0$)
 - مرحله‌ی انتشار و توسعه خطا ($t_0 \leq t \leq t_1$)
 - مرحله‌ی ارزیابی آسیب وارده و بازبازی ($t_1 \leq t \leq t_E$)
- گفتنی است که این مراحل سه‌گانه مشخصه‌های مقاومت، جذب و ظرفیت بازبازی را که از اجزای اصلی تاب‌آوری یک سیستم است تبیین می‌نمایند [۲۴].



تصویر ۱: بررسی اثر عملیات بازبازی و مدیریت بحران بهینه یک زیر ساخت در معرض تهدید در بهبود تاب‌آوری سیستم

چنانکه در تصویر ۱ ملاحظه می‌شود، نمودار عملکرد هدف با عنوان $P_{T(t)}$ معرفی شده است که در طول بازه‌ی زمانی T و علی‌رغم تغییر زمان به صورت ثابت و بدون تغییر باقی می‌ماند. دومین نمودار، عملکرد واقعی $P_{R(t)}$ نامیده می‌شود و این نمودار تغییرات عملکرد و کارایی سیستم در معرض تهدید از جمله تهدیدات طبیعی را در طول زمان ثبت می‌نماید. در این میان تلاش سیستم برای بازبازی و تاب‌آوری مطابق رابطه‌ی ۱ از طریق محاسبه‌ی نسبت بین نواحی $P_{R(t)}$ و $P_{T(t)}$ در طول بازه‌ی زمانی T به دست می‌آید [۲۴].

$$R(T) = \frac{\int_0^T P_R(t) dt}{\int_0^T P_T(t) dt} \quad \text{رابطه‌ی ۱}$$

با سنجش منحنی‌های $P_{R(t)}$ و $P_{T(t)}$ با معیارهای متفاوتی مثل مقدار جریان یا توان، درصد بارهای حیاتی در دسترس، درصد مشترکین تحت سرویس، درصد بارهای تجاری تحت سرویس به ترتیب ابعاد فنی، سازمانی، اجتماعی و اقتصادی، تاب‌آوری مورد توجه قرار گرفته و مطالعات قیاسی و تطبیقی بر پایه‌ی این معیارها قابل انجام است.

هدف از اولویت‌گذاری بهینه و برنامه‌ریزی پیش‌اقدامانه بازاریابی و مدیریت بحران پیش‌اقدامانه، تسریع و کاهش زمان عملیات بازاریابی و بازگشت سریع‌تر سیستم به سطح کارایی پیش از بروز رخداد مخرب است. چنانکه در تصویر ۱ ملاحظه می‌شود در شرایط اجرای عملیات بازاریابی مناسب، بازگشت کارایی عملکرد سیستم با سرعت مناسب‌تری انجام گرفته و زمان بازاریابی از مقدار t_{R1} به مقدار t_{R2} با سرعت و شیب تندتری انجام گرفته که در نتیجه منجر به کاهش سطح انتگرال زیر منحنی و بهبود تاب‌آوری سیستم می‌گردد. لذا ایده‌ی اصلی مقاله‌ی حاضر ارائه‌ی روشی برای تنظیم برنامه‌ی اولویت‌گذاری پیش‌اقدامانه با هدف بازاریابی و بازگشت سیستم به سطح عملکرد کارایی پیش از بروز بحران با سرعت بیشتر و به منزله‌ی یک نتیجه‌ی جانبی بهبود تاب‌آوری سیستم و کاهش خسارات ناشی از بروز خاموشی‌های گسترده است.

توسعه‌ی مدل مدیریتی و فنی بازاریابی شبکه‌ی توزیع

این مقاله بر پایه‌ی درس‌آموزی از رخدادهای مخرب و فاجعه‌های طبیعی سنوات گذشته در چند منطقه‌ی جغرافیایی مختلف و بررسی اثرات آن‌ها بر شبکه‌های توزیع اقدام به استخراج مدل مدیریتی و فنی جدیدی برای بازاریابی شبکه‌ی توزیع و مدیریت پیش‌اقدامانه‌ی بحران نموده است.

خطوط و زیرساخت‌های انتقال و توزیع نیروی برق تأمین‌کننده‌ی انرژی مورد نیاز بارهای حساس و حیاتی، صنعتی، تجاری و مسکونی بوده و اگر این زیرساخت‌ها در معرض طوفان و تندباد قرار گیرند و در صورت گستردگی ناحیه‌ی تحت تأثیر می‌توان انتظار تخریب و خاموشی قابل توجه در محدوده‌ی جغرافیایی وسیع را داشت.

با مروری بر مراجع [۲۵ تا ۲۹] ملاحظه می‌شود که آمادگی پیش‌اقدامانه برای بازاریابی سیستم توزیع و مدیریت بحران کارآمد در این شرایط، ارتباط معنی‌داری با نحوه‌ی برنامه‌ریزی پیش‌اقدامانه‌ی بازاریابی و کیفیت اولویت‌گذاری فعالیت‌های تعمیراتی در بخش توزیع دارد.

به طوری‌که در صورت وقوع یک فاجعه‌ی طبیعی و علی‌رغم بازاریابی سریع بخش‌های تولید و انتقال (به دلیل استانداردهای بالاتر) سیستم برق‌رسانی به دلیل وقوع آسیب گسترده به شبکه‌ی توزیع قادر به تأمین انرژی مشترکان نیست.

بازاریابی بار در شرایط نرمال و در وضعیت بروز فاجعه‌های طبیعی تفاوت قابل توجهی با هم دارند. در شرایط نرمال با توجه به گردش کار معمول شرکت‌های توزیع مدیریت اتفاقات و خاموشی‌ها به طور متمرکز انجام شده و اطلاعات مورد نیاز توسط تماس

مشترکان در اختیار واحد مدیریت خاموشی‌ها و دیسپاچینگ‌ها قرار می‌گیرد، اما در شرایط بروز فاجعه‌های طبیعی حجم خسارات بسیار گسترده‌تر از وضعیت نرمال است و به دلیل قطعی و وقفه در سایر زیرساخت‌ها از جمله زیرساخت‌های مخابراتی، ارتباط مشترکان با مرکز مدیریت اتفاقات قطع می‌شود و در این شرایط به دلیل عدم اشراف بر وضعیت و نبود دسترسی به اطلاعات خسارات وارده، مدیریت فاجعه به صورت متمرکز با چالش‌های قابل توجهی روبه‌رو خواهد شد، به طوری‌که در مدل متمرکز مدیریت فاجعه، ارزیابی وضعیت و تنظیم برنامه اقدام و واکنش اضطراری اثربخش، بسیار وقت‌گیر است و به این دلیل تأثیر نامطلوبی بر تاب‌آوری سیستم خواهد داشت [۲۹].

با ملاحظه‌ی اجمالی موارد فوق، آموزه‌های ذیل در مدیریت بحران فاجعه‌های طبیعی قابل استحصال است:

- مدیریت بحران و هدایت عملیات بازاریابی لازم است به صورت غیر متمرکز انجام شده تا بتواند پاسخ‌گوی حجم خسارات وارده در بحران و تعداد مشترکان تحت تأثیر باشد.
 - طرح عملیات بازاریابی لازم است به صورت پیش‌اقدامانه و مبتنی بر پیش‌بینی خسارات وارده پیش از بروز فاجعه باشد و ارزیابی وضعیت و اشراف بر موقعیت در صورتی‌که از حداقل اتکا به تماس‌های مشترکان برخوردار باشد اثر بخش تر است.
 - لازم است به صورت پیش‌دستانه، دستورالعمل و الگوی بسیار جامع و دقیقی برای اجرای عملیات بازاریابی تهیه شود، به طوری‌که متدولوژی عملیات بازاریابی بارهای حساس و معیارهای اولویت‌گذاری بازاریابی انواع بارهای مسکونی، تجاری و صنعتی مشخص باشد.
 - لازم است برنامه‌ی واکنش اضطراری پیش‌اقدامانه قبل از بروز فاجعه تهیه شود و برنامه‌ی اولویت‌های بازاریابی تدوین شود.
- در ساختار معمول مدیریتی شرکت‌های توزیع، فضای اجرایی و عملیاتی شرکت به چندین امور عملیاتی که زیر نظر حوزه‌ی ستادی فعالیت می‌کنند تقسیم می‌شود (مطابق تصویر ۲) و هر یک از امور عملیاتی به وسیله‌ی تعداد مشخصی از اکیپ‌های عملیاتی و تعمیراتی که از توانایی اجرای عملیات بازاریابی برخوردارند تجهیز شده‌اند.
- در این ساختار حوزه‌ی ستادی متولی برنامه‌ریزی کلان، تدوین الگوها و دستورالعمل‌ها و اجرای نظارت عالی بر عملکرد امور عملیاتی است و امور عملیاتی تحت نظارت حوزه‌ی ستادی مجری دستورالعمل‌ها و الگوهای آمادگی پیش از بروز بحران و تدوین برنامه‌ی اولویت‌گذاری پیش‌اقدامانه و واکنش اضطراری است.
- در تصویر ۳ طرح کلی شرح وظایف حوزه‌ی ستادی و امور عملیاتی برای تهیه‌ی برنامه‌ی اولویت‌گذاری پیش‌اقدامانه‌ی بازاریابی خطوط هوایی فشار متوسط ارائه شده است.



تصویر ۲: تفکیک حوزه‌ی عملیاتی بهره برداری یک شرکت توزیع به چندین امور عملیاتی



تصویر ۳: شرح وظایف حوزه‌ی ستادی و امور عملیاتی برای تهیه‌ی برنامه‌ی اولویت‌گذاری پیش‌اقدامانه بازیابی خطوط هوایی فشارمتوسط



تصویر ۴: فرایند عمومی تصمیم‌گیری برای تهیه برنامه‌ی پیش اقدامانه‌ی بازیابی و مدیریت

بحران خطوط فشارمتوسط در معرض تهدید

سادگی فراهم می‌آورد و یکی از مشخصات با اهمیت این روش محاسبه‌ی میزان سازگاری تصمیمات است [۳۰]. علی‌رغم مزایای ذکر شده‌ی فوق به دلیل سروکار داشتن روش تحلیل سلسله‌مراتبی با اعداد دقیق در قضاوت‌های خبرگان این روش نمی‌تواند به درستی بیانگر نحوه‌ی تفکر انسانی باشد. با این حال، به دلیل وجود عدم قطعیت‌ها و نادقیق بودن مقایسه‌های زوجی با اعداد دقیق، به کارگیری اعداد فازی به‌منزله‌ی یک راهکار برای رفع چالش ذکر شده‌ی فوق مورد توجه قرار گرفته است [۳۱، ۳۲].

چانگ در سال ۱۹۹۲ روشی ساده را برای بسط فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی به فضای فازی ارائه نمود که بر پایه‌ی میانگین حسابی نظرات خبرگان و روش نرمالایزه کردن ساعتی و با به‌کارگیری اعداد مثلثی فازی توسعه داده شده است. در رویکرد منطق فازی، برای هر مقایسه‌ی زوجی، نقطه‌ی تقاطع پیدا شده و سپس مقدار عضویت نقطه با وزن آن برابر می‌شود [۳۲].

در این مقاله در رابطه با مقادیر کیفی و توصیفی از عبارت‌های کلامی به جای اعداد قطعی برای تعیین وزن شاخص‌ها و همچنین رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده شده است. در جدول ۱ متغیرهای زبانی برای بیان اولویت معیارها نسبت به یکدیگر ارائه گردیده است. در این مقاله برای پیشگیری از ابهام ناشی از عدم قطعیت در تصمیم‌گیری در همه‌ی مراحل از اعداد فازی مثلثی ارائه شده در جدول ۲ برای نشان دادن نتیجه‌ی مقایسات زوجی در AHP استفاده می‌شود.

یک عدد فازی مثلثی به صورت (l, m, u) μ نشان داده می‌شود که دارای تابع عضویت مطابق رابطه‌ی ۱ است. تابع

با ملاحظه‌ی شرح وظایف حوزه‌ی ستادی و امور عملیاتی مطابق تصویر ۴ فرایند عمومی تصمیم‌گیری برای تهیه‌ی برنامه‌ی پیش اقدامانه‌ی بازیابی خطوط هوایی فشارمتوسط در معرض تهدیدات مختلف طبیعی ارائه شده و در این مقاله طوفان و تند باد به‌منزله‌ی تهدید در نظر گرفته شده است. از ویژگی‌های این روش، قابلیت به‌کارگیری آن در شبکه‌های توزیعی است که فاقد سابقه‌ی ثبت اطلاعات دقیق و یا داده‌های کامل و جامع شبکه است. فرایند مدل ارائه شده شامل چهار مرحله برای تهیه‌ی فهرست اولویت‌گذاری بازیابی خطوط هوایی فشار متوسط است، این مراحل عبارت‌اند از: تهیه و گردآوری اطلاعات ورودی، برآورد آسیب وارده و واکنش سیستم، تعیین اهداف و معیارها و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی. در ادامه مدل پیشنهاد شده در یک شبکه تست نمونه پیاده‌سازی می‌شود.

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی

چنان‌که در تصویر ۴ ملاحظه می‌شود فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی جزء با اهمیتی در تهیه‌ی برنامه‌ی پیش اقدامانه‌ی بازیابی خطوط فشارمتوسط در معرض تهدیدات مختلف از جمله تهدید باد و طوفان محسوب می‌شود.

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی یکی از بهترین و کامل‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است، زیرا این تکنیک امکان فرموله کردن مسئله را به صورت سلسله‌مراتبی فراهم می‌کند و مقایسه‌ی زوجی یکی از ویژگی‌های با اهمیت آن است که امکان قضاوت خبرگان و محاسبات را به

عضویت انتخاب شده برای اعداد فازی در تصویر ۵ نشان داده شده است [۳۳، ۳۴].

جدول ۱: متغیرهای کلامی پایه برای انجام مقایسه‌های دو به دو و توصیف اهمیت معیارها

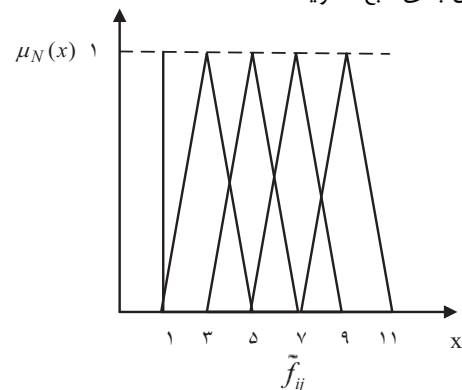
متغیرهای کلامی	امتیاز
ترجیح برابر	۱
ترجیح کم	۳
ترجیح زیاد	۵
ترجیح خیلی زیاد	۷
ترجیح کاملاً زیاد	۹
ترجیحات بینابینی	۲ و ۴ و ۶ و ۸

جدول ۲: طیف اعداد فازی و متغیرهای کلامی متناظر

مقیاس عدد فازی	متغیرزبانی	عدد فازی
(۱، ۱، ۱)	ترجیح برابر	۱
(۱، ۳، ۵)	ترجیح کم	۳
(۳، ۵، ۷)	ترجیح زیاد	۵
(۵، ۷، ۹)	ترجیح خیلی زیاد	۷
(۷، ۹، ۱۱)	ترجیح کاملاً زیاد	۹

$$\tilde{\mu}_{N(x)} = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l} \in l < x < m \\ \frac{u-x}{u-m} \in m < x < u \\ 0, otherwise \end{cases} \quad \text{رابطه ی ۲:}$$

رابطه ی ۲ بیانگر تابع عضویت است و در بازه ی اعداد ۰ تا ۱ قرار دارد و u, m, l به ترتیب متناظر دامنه ی پایین، دامنه ی میانه و دامنه ی بالای تابع عضویت هستند.



تصویر ۵: طیف اعداد فازی به کارگرفته شده در این مقاله

مراحل اجرای تحلیل سلسله مراتبی فازی

گام‌های اجرای تحلیل گسترش یافته ی چانگ در هشت گام به قرار ذیل است [۳۲]:

در گام اول پس از ترسیم درخت سلسله مراتبی، ساختار سلسله مراتبی تصمیم بر پایه ی لایه های هدف، معیار و گزینه ترسیم می شود.

در گام دوم ماتریس مقایسات زوجی با استفاده از اعداد فازی مثلثی $\tilde{f}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ و با بهره گیری از چندین تصمیم گیرنده تشکیل می شود.

در گام سوم میانگین حسابی نظرات قضاوت کنندگان به صورت ماتریس ارائه شده در جدول ۳ و با به کارگیری رابطه ی ۲ محاسبه می شود.

جدول ۳: ماتریس میانگین حسابی نظرات قضاوت کنندگان

	معیار ۱	معیار ۲	معیار ۳	معیار ۴
معیار ۱	1	\tilde{a}_{12}	\tilde{a}_{13}	\tilde{a}_{14}
معیار ۲	\tilde{a}_{21}	1	\tilde{a}_{23}	\tilde{a}_{24}
معیار ۳	\tilde{a}_{31}	\tilde{a}_{32}	1	\tilde{a}_{34}
معیار ۴	\tilde{a}_{41}	\tilde{a}_{42}	\tilde{a}_{43}	1

$$\tilde{a}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{p_{ij}} a_{ijk}}{p_{ij}} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه ی ۳:}$$

در رابطه ی ۳ بیانگر میانگین حسابی نظرات قضاوت کنندگان در دریا به سطر i و ستون j ، p_{ij} تعداد افراد نظر دهنده در مورد اولویت گزینه ی i نسبت به j و a_{ijk} عبارت از نظر قضاوت کننده k در مورد اولویت گزینه ی i نسبت به j است.

در گام چهارم مجموع عناصر سطر مطابق رابطه ی ۴ محاسبه می شود:

$$\tilde{s}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه ی ۴:}$$

در رابطه ی ۴ \tilde{s}_i بیانگر مجموع عناصر سطر i است. در گام پنجم مجموع سطرها مطابق رابطه ی ۵ نرمالیزه می گردد.

$$\tilde{M}_i = \tilde{s}_i \otimes \left[\sum_{j=1}^n \tilde{s}_j \right]^{-1} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه ی ۵:}$$

در رابطه ی ۵ بیانگر مقدار نرمالیزه ی مجموع عناصر سطر i است.

در گام ششم درجه ی احتمال بزرگ تر بودن هر H_i نسبت به سایر H_i ها محاسبه و $d(A_i)$ نامیده می شود. درجه ی احتمال بزرگ تر بودن عدد مثلثی فازی $H_{M_2} = (l_2, m_2, u_2)$ نسبت به H_{M_1} که عدد مثلثی فازی دیگری است، به وسیله ی رابطه ی ۶ محاسبه می شود.

$$V(M_2 > M_1) = \mu_{M_2}(d_2) \quad \text{رابطه ی ۶:}$$

$$= \begin{cases} 1 & \text{if } m_2 \geq m_1 \\ 0 & \text{if } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

در رابطه ی ۶، d بیانگر مختصات بالاترین نقطه در منطقه ی اشتراک و برخورد دو تابع عضویت μ_{M_1} و μ_{M_2} است.

گام هفتم به دست آوردن وزن‌های نرمالیزه از طریق نرمالیزه کردن بردار وزن‌ها است که از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$w = \left[\frac{d'(A_1)}{\sum_{j=1}^n d'(A_j)}, \frac{d'(A_2)}{\sum_{j=1}^n d'(A_j)}, \dots, \frac{d'(A_n)}{\sum_{j=1}^n d'(A_j)} \right] \quad \text{رابطه‌ی ۷:}$$

وزن‌های به دست آمده‌ی فوق، وزن قطعی (غیر فازی) هستند و با تکرار این فرایند، اوزان تمامی ماتریس‌ها به دست می‌آید.

گام هشتم ترکیب اوزان است که از ترکیب وزن‌های گزینه و معیارها، وزن نهایی از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید.

$$U_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij} \quad \forall i \quad \text{رابطه‌ی ۸:}$$

در رابطه‌ی ۸، w_i وزن معیارها و r_{ij} وزن گزینه‌ها است.

روش بررسی سازگاری گوگوس و بوچر

در این روش از هر ماتریس فازی مشتق و سپس سازگاری هر ماتریس بر اساس روش ساعتی محاسبه می‌شود. مراحل محاسبه‌ی نرخ سازگاری ماتریس‌های فازی مقایسات زوجی به قرار زیر است:

در مرحله‌ی اول ماتریس مثلثی فازی به دو ماتریس تقسیم می‌شود. ماتریس اول مطابق رابطه‌ی ۹ از اعداد میانی قضاوت‌های مثلثی تشکیل می‌شود.

$$A^m = [a_{ij}^m] \quad \text{رابطه‌ی ۹:}$$

و ماتریس دوم مطابق رابطه‌ی ۱۰ شامل میانگین هندسی حدود بالا و پایین اعداد مثلثی می‌شود.

$$A^g = \sqrt{a_{ij}^m \cdot a_{ij}^l} \quad \text{رابطه‌ی ۱۰:}$$

در مرحله‌ی دوم بردار وزن هر ماتریس با استفاده از روش ساعتی محاسبه می‌شود. در مرحله‌ی سوم بزرگ‌ترین مقدار ویژه برای هر ماتریس محاسبه می‌شود. در مرحله‌ی چهارم شاخص سازگاری با استفاده از روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شود.

$$CI^m = \frac{(\lambda_{\max}^m - n)}{(n - 1)} \quad \text{رابطه‌ی ۱۱:}$$

$$CI^g = \frac{(\lambda_{\max}^g - n)}{(n - 1)} \quad \text{رابطه‌ی ۱۲:}$$

در مرحله‌ی پنجم لازم است برای محاسبه‌ی نرخ ناسازگاری CR ، شاخص CI بر مقدار شاخص تصادفی RI تقسیم شود. در صورتی که مقدار حاصل کمتر از ۰/۱ باشد، ماتریس سازگار است.

برای به دست آوردن مقادیر شاخص‌های تصادفی RI ، ۱۰۰ ماتریس را با اعداد تصادفی و با شرط متقابل بودن ماتریس‌ها تشکیل داده و مقادیر ناسازگاری و میانگین آن‌ها را محاسبه نمود. از آنجا که مقادیر عددی مقایسات فازی همواره عدد صحیح

نیستند لازم است شاخص‌های تصادفی RI برای ماتریس‌های مقایسات، زوجی فازی مطابق روابط ۱۳ و ۱۴ تولید شوند.

$$CR^m = \frac{CI^m}{RI^m} \quad \text{رابطه‌ی ۱۳:}$$

$$CR^g = \frac{CI^g}{RI^g} \quad \text{رابطه‌ی ۱۴:}$$

در صورتی که هر دوی این شاخص‌ها کمتر از ۰/۱ به دست آیند، ماتریس فازی سازگار است. در صورتی که هر دو شاخص بیشتر از ۰/۱ به دست آیند، از تصمیم‌گیرنده تقاضا می‌شود تا در اولویت‌های ارائه شده تجدید نظر نماید و در صورتی که تنها CR^m (یا CR^g) بیشتر از ۰/۱ بود، تصمیم‌گیرنده تجدید نظر در مقادیر میانی (حدود) قضاوت‌های فازی را انجام می‌دهد [۳۵].

بیان یک نمونه‌ی عملی

به منظور تبیین روش ارائه شده در این مقاله یک مثال عملی و مطالعه‌ی موردی بر پایه‌ی مدل ارائه شده در تصویر ۴ که در یک شبکه‌ی تست نمونه اجرا شده است در ادامه طرح می‌شود.

اطلاعات شبکه‌ی مورد مطالعه

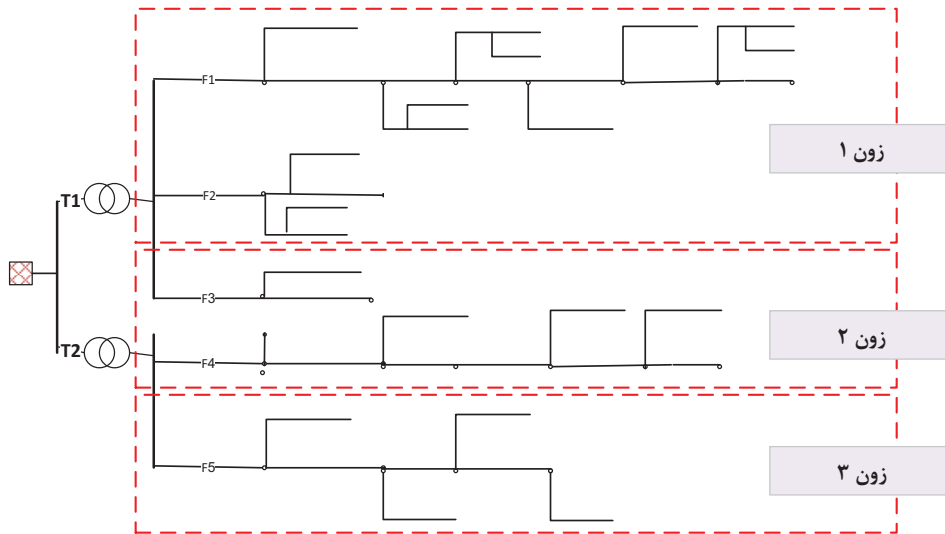
چنانکه در روش پیشنهاد شده در این مقاله ذکر شد مجموعه شبکه‌های توزیع یک شرکت توزیع به حوزه‌ی عملیاتی امور اجرایی مختلف تقسیم می‌شود و هر امور اجرایی متولی مدیریت و بازبایی بخش کوچکی از کل شبکه‌ی توزیع هر شرکت است که شامل حداکثر چند خط فشار متوسط است. شبکه‌ی تست تصویر ۶ مربوط به یکی از امور عملیاتی شرکت توزیع نیروی برق استان مازندران است.

این شبکه شامل پنج خط فشار متوسط هوایی بوده و به لحاظ محیط پیرامونی، نوع بار و شرایط اقتصادی بارهای متصل، به سه زون به شرح ذیل تقسیم می‌شود:

- زون ۱: عبارت از خطوط ۱ و ۲ داخل محدوده‌ی شهری و خط ۲ به لحاظ اقتصادی حائز اهمیت است.
- زون ۲: عبارت از خطوط ۳ و ۴ حومه‌ی شهر که در منطقه‌ی جنگلی و با مسیر دسترسی دشوار قرار گرفته‌اند.
- زون ۳: عبارت از خط ۵ که بارهای بحرانی و مراکز حیاتی مثل بیمارستان و تصفیه‌خانه‌ی آب روی آن قرار دارند. با توجه به عدم دسترسی به اطلاعات و وضعیت دقیق بارها و مشترکان و تعداد پایه‌ها، تعداد ترانسفورماتورهای منصوبه روی هر یک از خطوط و طول خطوط، مطابق جدول ۴ به منزله‌ی حداقل اطلاعات مورد نیاز برای حل مسئله در نظر گرفته شده است.

جدول ۴: اطلاعات و مشخصات فنی خطوط فشار متوسط

شماره فیدر	تعداد ترانسفورماتور	طول خط (کیلومتر)
F1	۱۰۰	۲۸
F2	۴۳	۲۳/۵
F3	۶۸	۸/۵
F4	۵۷	۷
F5	۳۲	۵/۲۵



تصویر ۶: ساختار شبکه‌ی نمونه‌ی مورد مطالعه

با ملاحظه‌ی اطلاعات یاد شده و با هدف در نظر گرفتن شرایط سخت و با احتمال پایین، ضریب افزایشده معادل ۵۰٪ بیش از آنچه تاکنون اتفاق افتاده است به سرعت ۴۰ متر بر ثانیه اعمال شده و پایداری و مقاومت سیستم توزیع در برابر تهدید تندباد معادل ۶۰ متر بر ثانیه بررسی و تخمین زده می‌شود.

مدل آسیب‌پذیری اجزای شبکه (پایه‌های فشار متوسط)

استخراج منحنی‌های شکست و آسیب‌پذیری در این مقاله از طریق روش برازش داده‌های تجربی و اطلاعات تاریخی انجام گرفته است. برازش به مفهوم پیش‌بینی و بیان تغییرات یک متغیر بر اساس تغییرات متغیر دیگر است.

رابطه‌ی ۱۵ بیانگر رابطه‌ی شکست‌پذیری پایه‌های شبکه‌ی فشار متوسط در معرض تهدید طوفان بر اساس تحقیقات قبلی موجود و دانسته فرض می‌شود.

رابطه‌ی ۱۵:

$$P_{pole} = \min(1.2 * 10^{-3} * e^{0.047 * v_i}, 1)$$

که در آن P_{pole} احتمال تجمعی شکست پایه خط فشار متوسط در شبکه‌های هوایی و v_i سرعت وزش تند باد است و از رابطه‌ی ۱۵ با به‌کارگیری شبیه‌سازی مونت‌کارلو در برآورد آسیب وارده و واکنش سیستم بهره‌گیری می‌شود [۳۷].

برآورد آسیب وارده و واکنش سیستم

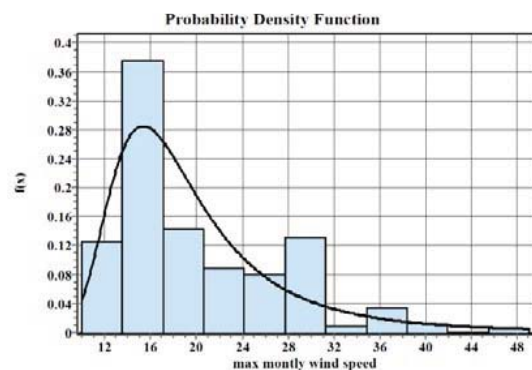
ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌ی فشار متوسط با بهره‌گیری از تابع شکست‌پذیری رابطه‌ی ۱۵ و شبیه‌سازی مونت کارلو و با فرض محدود بودن محدوده‌ی جغرافیایی مورد مطالعه (که با توجه به این فرض شرایط جوی و شدت تهدید ذکر شده در بخش‌های قبل در کل فضای بررسی یکسان در نظر گرفته می‌شود) انجام شده است. در نتیجه، تخمینی از آسیب وارده به شبکه‌ی توزیع و پایه‌های فشار متوسط و زمان تقریبی (اکپ/ساعت) مورد نیاز برای رفع عیب و تعمیر کامل هر خط فشار متوسط با فرض زمان

برای تخمین تعداد پایه‌های موجود با احتساب طول هر اسپن به میزان ۵۰ متر، تخمینی دقیق از تعداد پایه‌های واقع روی هر یک از خطوط حاصل می‌شود. برای ساده‌سازی فضای حل مسئله، قدرت ترانسفورماتورها و میزان بار منصوبه روی آن‌ها مشابه فرض شده است.

مشخصات تهدید

با ملاحظه‌ی نشریه‌ی شماره‌ی ۴۵۶ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی که گستره‌ی توزیع سرعت‌های باد را در مناطق مختلف کشور به سه دسته تفکیک نموده است، ملاحظه می‌گردد که اقلیم مازندران در طبقه‌بندی مناطق بادخیز که حداکثر سرعت باد بیش از ۴۰ متر بر ثانیه در آن می‌وزد قرار دارد که بیانگر شرایط بادخیزی و مواجهه‌ی شبکه‌های برق با تهدید تندباد و طوفان است [۳۶].

برای ارزیابی دقیق‌تر تهدید تندباد در این مقاله حداکثر سرعت باد (بادهای با زمان وزش بیش از سه ثانیه) به‌طور ساعت به ساعت استخراج و حداکثر سرعت باد ماهیانه‌ی ایستگاه‌های هواشناسی استان مازندران در طول چند دهه جمع‌آوری شده [۳۷] و مطابق تصویر ۷ منحنی توزیع چگالی احتمال به دست آمد.



تصویر ۷: منحنی توزیع چگالی احتمال حداکثر سرعت باد ماهیانه در بازه‌ی حدود چهار دهه (ایستگاه قراخیل - قائمشهر)

تعمیر متوسط هر پایه به میزان سه ساعت، مطابق جدول ۵ به دست آمده است.

جدول ۵: اطلاعات و مشخصات فنی خطوط فشارمتوسط

شماره خط	پیش بینی تعداد پایه‌های معیوب	پیش بینی زمان مورد نیاز برای تعمیر کامل خط
F1	۱۱/۲۸	۳۳/۸۴
F2	۹/۴۶	۲۸/۳۸
F3	۳/۴۶	۱۰/۳۸
F4	۲/۸۱	۸/۴۳
F5	۲/۱	۶/۳

هدف‌گذاری و شناسایی معیارها

تعیین اولویت بازاریابی خطوط فشارمتوسط خارج از سرویس با هدف بهبود تاب‌آوری در برنامه‌ریزی پیش‌اقدامانه‌ی بازاریابی شبکه‌های هوایی توزیع نیروی برق، مورد پیگیری قرار می‌گیرد. در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی که در این مقاله تعیین و تنظیم اولویت بازاریابی خطوط فشارمتوسط را به عهده دارد، معیارهای مختلف کمی و کیفی برای وزن‌گذاری و محاسبه‌ی وزن هر یک از گزینه‌ها به منظور تعیین اولویت به‌کار می‌رود.

برخی از معیارها به دلیل محاسبه‌پذیر بودن از نوع معیارهای کمی و برخی دیگر به دلیل توصیفی و کیفی بودن به عنوان معیارهای کیفی مطرح هستند. در این مقاله معیار فنی، حیاتی بودن زیرساخت‌ها، معیار اقتصادی، دشواری دسترسی به بخش‌های آسیب‌دیده و مشجر بودن به منزله‌ی معیارهای انتخاب اولویت‌های بازاریابی به کار گرفته شده‌اند که هر یک از معیارهای ذکر شده به شرح ذیل توصیف می‌گردند:

- معیار ۱ (فنی): بازاریابی حداکثر تعداد تجهیزات از دست رفته در کمترین زمان ممکن در بهبود تاب‌آوری یک شاخص با اهمیت فنی است. در این مقاله رابطه‌ی ۱۶ با عنوان شاخص بازاریابی برای اولویت‌گذاری فنی بازاریابی خطوط پیشنهاد شده و ترانسفورماتورها به منزله‌ی تجهیز با اهمیت برای تصمیم‌گیری در اولویت‌گذاری بازاریابی در نظر گرفته شده است.

گفتنی است که انتخاب ترانسفورماتور به منزله‌ی تجهیز با اهمیت به طور غیر مستقیم تخمینی از مشترکان تحت تأثیر نیز ارائه می‌دهد که این موضوع در شرایط عدم دسترسی به اطلاعات دقیق شبکه و تعداد مشترکان متصل، بسیار کارآمد خواهد بود. همچنین رابطه‌ی ۱۶ وظیفه‌ی تخمین در قضاوت ارجحیت هر یک از گزینه‌ها در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی را به عهده دارد.

رابطه‌ی ۱۶:

$$fr_{index} = \frac{t_n}{r_t}$$

که در آن fr_{index} بیانگر شاخص بازاریابی خط، t_n بیانگر تعداد ترانسفورماتورهای از دست رفته در هر خط و r_t زمان بازاریابی (اکیپ/ساعت) در هر خط است.

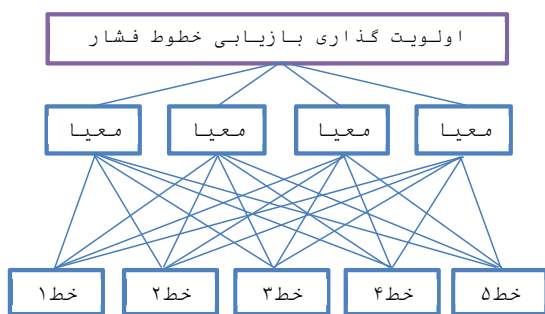
- معیار ۲ (حیاتی بودن زیرساخت‌ها): تأسیسات زیر ساختی و حیاتی برای ایمنی جامعه و سلامتی و رفاه (بیمارستان‌ها، کارخانجات آب شرب، سرویس‌های تسهیلات عمومی و ...) به منزله‌ی اولویت‌های بازاریابی برای دریافت انرژی در نظر گرفته می‌شوند، به این دلیل خطوطی که این گونه بارها روی آن قرار دارد از اولویت بالاتری برخوردارند و در قضاوت خبرگان مربوطه به فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، درجه‌ی ارجحیت بالاتری به آن تخصیص می‌یابد.

- معیار ۳ (اقتصادی): با فرض عدم دسترسی به اطلاعات دقیق و عدم امکان محاسبه‌ی کمی ارجحیت بازاریابی خطوط، با عنایت به این معیار، تعیین اولویت به صورت کیفی و بر پایه‌ی قضاوت خبرگان انجام می‌گیرد.

- معیار ۴ (حمل و نقل و دسترسی): یکی از عوامل تأثیرگذار عملیاتی در فرایند بازاریابی دشواری دسترسی به بخش‌های آسیب‌دیده در شرایط پس از بروز فاجعه‌ی طبیعی به دلیل ضعف و آسیب در مسیرهای دسترسی و سقوط اشجار و انسداد راه‌ها است، به طوری که این موضوع می‌تواند منجر به افزایش غیر منتظره‌ی زمان تعمیر و در نتیجه کاهش تاب‌آوری سیستم شود. با در نظر گرفتن این معیار در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و با تخصیص وزن مناسب برای این معیار از طریق قضاوت خبرگان، موضوع حمل و نقل در زمان بحران در اولویت‌گذاری بازاریابی خطوط در نظر گرفته می‌شود.

پیاده‌سازی تحلیل سلسله‌مراتبی فازی

در این قسمت در اولین گام و مطابق تصویر ۸ نمودار سلسله‌مراتبی بر مبنای هدف، معیارها و گزینه‌ها رسم شده و مطابق روش ارائه شده در بخش ۴ فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی پیاده‌سازی می‌شود.



تصویر ۸: نمودار فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی اجرا شده

نتایج مقایسه‌ی دو به دو معیارها و وزن نهایی آن‌ها در جدول شماره‌ی ۶ و اوزان نرمالایز شده‌ی هر یک از گزینه‌ها در مقایسه با معیارهای مختلف و رتبه‌ی نهایی گزینه‌ها در جدول شماره‌ی ۷ و تصویر شماره‌ی ۹ ارائه شده است.

جدول ۶: میانگین مقایسات زوجی معیارها نسبت به هدف

وزن نرمال شده نهایی	Si	معیار ۴	معیار ۳	معیار ۲	معیار ۱	هدف
۳۲/۰	(۸۴/۲۷۹,۰/۰۸۸,۰/۰)	(۳۳/۳۳,۵/۳۳,۳/۱)	(۳۳/۳۳,۴/۱,۲)	(۳۳۳,۱/۲,۰/۰)	(۱,۱,۱)	معیار ۱
۴۲/۰	(۳۲/۴۹۲,۱/۱۵۹,۰/۰)	(۶۶/۶۶,۶/۶۶,۴/۲)	(۶۶/۶۶,۵/۶۶,۳/۱)	(۱,۱,۱)	(۱,۳,۵)	معیار ۲
۲۰۱/۰	(۴۷۶/۱۴۷,۰/۰۶,۰/۰)	(۱,۲,۴)	(۱,۱,۱)	(۶/۲۷,۰/۱۷۶,۰/۰)	(۴۲۸۵,۱/۲۳۰۷,۰/۰)	معیار ۳
۰۵۸/۰	(۲۲/۰۸,۰/۰۳۹,۰/۰)	(۱,۱,۱)	(۵,۱/۲۵,۰/۰)	(۳۷/۲۱,۰/۱۵,۰/۰)	(۷۵/۳,۰/۱۸۷۵,۰/۰)	معیار ۴
۱	(۶۴/۱۷۱,۳۹/۹۲,۳۴/۲۸)	مجموع				
	CRg = ۰.۹۲/۰	CRm = ۰.۴۶/۰				

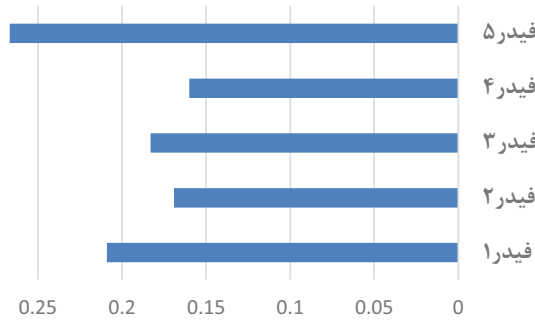
جدول ۷: اوزان نرمالایز شدهی هر یک از گزینه‌ها در مقایسه با معیارهای مختلف

رتبهی نهایی	وزن قطعی نهایی گزینه‌ها	معیار ۴	معیار ۳	معیار ۲	معیار ۱	هدف
۲	۲۰۹/۰	۳۱۴/۰	۴۵۳/۰	۲۱۵/۰	۲۰۹/۰	خط ۱
۴	۱۶۹/۰	۲۷۵/۰	۱۲۶/۰	۳۰۴/۰	۰	خط ۲
۳	۱۸۳/۰	۰۹۷/۰	۲۸۸/۰	۰۲۴/۰	۳۴۴/۰	خط ۳
۵	۱۶/۰	۰۹۷/۰	۱۲۶/۰	۰۲۴/۰	۳۷۵/۰	خط ۴
۱	۲۷۷/۰	۲۱۷/۰	۰۰۸/۰	۴۳۴/۰	۲۵۲/۰	خط ۵

زیرساخت شبکه‌های فشارمتوسط توزیع در مواجهه با تهدید طوفان و تندباد برخوردار است. این مقاله با هدف رفع مشکل عدم دسترسی به اطلاعات دقیق و با نیت چیره شدن بر عدم قطعیت‌های موجود در مسئلهی قضاوت‌های خبرگان، ارائه‌دهندهی مدلی است که بر پایهی فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و شبیه‌سازی مونت کارلو است و به دلیل سادگی و عمومیت بیشتر از اعداد فازی با تابع عضویت مثلثی برای ثبت قضاوت‌ها استفاده می‌نماید.

گفتنی است که روش ارائه شده در این مقاله فارغ از نوع تهدید از قابلیت اجرا و پیاده‌سازی در تهیهی برنامه‌ی پیش اقدامانه اولویت‌گذاری بازبایی در مواجهه‌ی شبکه‌های توزیع با سایر تهدیدات برخوردار است و خصوصاً در شرایط بحران و کمبود منابع انسانی و تجهیزاتی روش ارائه شده امکان تخصیص بهینه‌ی منابع برای بازبایی شبکه‌های آسیب‌دیده را فراهم می‌آورد، همچنین به فراخور شرایط، توسعهی اهداف یا تغییر در معیارها امکان‌پذیر و عملی است.

بر پایه‌ی نتایج حاصل از اجرای مدل پیشنهادی قابل استنباط است که در صورت عدم وجود و دسترسی اندک به اطلاعات پایه بر اساس قضاوت خبرگان می‌توان به برنامه‌ریزی پیش اقدامانه و اولویت‌گذاری بازبایی خطوط اقدام نمود و بر اساس توضیحات ارائه شده این برنامه‌ریزی به‌طور مستقیم منجر به بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع منجر خواهد شد، هر چند که با عنایت به محدودیت داده‌ها امکان ارزیابی دقیق شاخص‌های مرتبط به صورت محاسباتی فراهم نیست ولی معیارهای مورد استفاده در ساختار سلسله‌مراتبی بر پایه‌ی قضاوت خبرگان هدف بهبود تاب‌آوری را در اولویت‌گذاری و برنامه‌ریزی پیش اقدامانه‌ی بازبایی محقق می‌نمایند.



تصویر ۹: نمودار رتبه‌ی نهایی گزینه‌ها نسبت به هدف

بر اساس نتایج حاصل، قابل مشاهده است که خط ۵ با توجه به حضور بارهای بحرانی از بالاترین اولویت در برنامه‌ی پیش اقدامانه برای بازبایی برخوردار است که این نتیجه از ابتدا قابل پیش‌بینی بود، اما پیش‌بینی و حدس اولویت‌های بعدی به سادگی قابل تشخیص نیست، خصوصاً با افزایش پیچیدگی شبکه، شناسایی اولویت‌ها با دشواری بیشتری مواجه می‌شود. با ملاحظه‌ی روش ارائه شده در این مقاله شناسایی اولویت‌ها با یک متد علمی و قابل اتکا بر مبنای قضاوت‌های دو به دو و با ملاحظه‌ی تأثیر وزن معیارهای مختلف انجام شده است و این روش در حل مسئله‌ی اولویت‌گذاری بازبایی پیش اقدامانه فیدرهای فشار متوسط از عمومیت برخوردار است.

نتیجه‌گیری

برنامه‌ریزی و اولویت‌گذاری پیش اقدامانه‌ی بازبایی خطوط هوایی فشارمتوسط از نقش حائز اهمیتیتی در بهبود تاب‌آوری

heuristic algorithms to service restoration in distribution systems. *IEEE Trans. Power Del.* 17(1), 173–181.

15. Perez-Guerrero, R. E. Heydt, G. T. Jack, N. J. Keel, B. K. Castelhan, A.R. (2008). Optimal restoration of distribution systems using dynamic programming. *IEEE Trans. Power Del.* 23(3), 1589–1596.
16. Perez-Guerrero, R. E. Heydt, (2008). Viewing the distribution restoration problem as the dual of the unit commitment problem. *IEEE Trans. Power Syst.* 23(2), 807–808.
17. Maliszewski, P. J. Perrings, C. (2012). Factors in the resilience of electrical power distribution infrastructures. *Appl. Geogr.* 32(2), 668–679.
18. Yao, M. J. Min, K. J. (1998). Repair-unit location models for power failures. *IEEE Trans. Eng. Manage.* 45(1), 57–65.
19. Wang, S. Sarker, B. R. Mann, L. Triantaphyllou, E. (2004). Resource planning and a depot location model for electric power restoration. *Eur. J. Oper. Res.*, 155(1), 22–43.
20. 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 Trans. Smart Grid*, 6(2), 1046–1054.
21. Arab, A. Tekin, E. Khodaei, A. Khator, S. K. Han, Z. (2014). Dynamic maintenance scheduling for power systems incorporating hurricane effects. *In Proc. IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, 85–90.
22. Arab, A. Khodaei, A. Han, Z. Khator, S. (2015). Proactive Recovery of Electric Power Assets for Resilience Enhancement. *IEEE Access*, 3, 99–109.
23. Liu, H. Davidson, R.A. Apanasoich, T.v. (2007). Statistical Forecasting of Electric Power Restoration Times in Hurricanes and Ice Storms. *IEEE Trans. Power Systems*, 22(4), 2270–2279.
24. Akwasi, F. Duenas-Osorio, L. (2015). Efficient Resilience Assessment Framework for Electric Power Systems Affected by Hurricane Events. *Journal of structural Engineering*, pp.1–10.
25. Moore, H. E. Bate, F. L. Layman, M. V. Parenton, V. J. (1963) *Before the Wind. A Study to the Response to Hurricane arla.* Washington, DC, USA: National Academy of Science-National Research Council.
26. Winkler, J. Duenas-Osorio, L. Stein, R. Subramanian, D. (2010). Performance assessment of topologically diverse power systems subjected to hurricane events. *Rel. Eng. Syst. Safety*, 95(4), 323–336.
27. Berg, R. (2009). *Tropical Cyclone Rep. AL092008* Nat. Miami, FL, USA, Hurricane Center, Ocean. Atmos. Admin. Nat. Weather Service.
28. Etkin, D. (1999). Risk transference and related trends: Driving forces towards more mega-disasters. *Global Environ. Change B, Environ. Hazards*, 1(2), 69–75.
29. Rudnick, H. Mocarquer, S. Andrade, E. Vuchetich, E. Miquel, P. (2011). Disaster management, restoring

1. Fuzzy analytical hierarchy process

منابع

1. Pachauri, R.K. Meyer, L.A. (2014). Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva.
2. Panteli, M. Mancarella, P. (2015). Modeling and Evaluating the Resilience of Critical Electrical Power Infrastructure to Extreme Weather Events. *IEEE SYSTEMS JOURNAL*, 99, 1–10.
3. Chaudry, M. (2011). Building a Resilient UK Energy System. *UK Energy Research Center (UKERC)*, London, U.K.
4. Berkely, A. (2010). *A Framework for Establishing Critical Infrastructure Resilience Goals*, Washington, DC, USA National Infrastructure Advisory Council (NIAC).
5. Wang, Yezho. Chen, Chen. Wng, Jianhuai. Baldick, Ross (2016). Research on Resilience of Power Systems Under Natural Disasters—A Review. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, 2(31), 1604–1613.
6. Lindemeyer, D. Dommel, H. W. Adibi, M. M. (2001). Power system restoration—A bibliographical survey. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 23 (3), 227–219.
7. Fink, L. H. Liou, K. L. Liu, C. C. (1995). From generic restoration actions to specific restoration strategies. *IEEE Trans. Power Syst.* 10 (2), 745–751.
8. Adibi, M. M. Fink, L. H. (2006). Overcoming restoration challenges associated with major power system disturbances. *IEEE Power Energy Mag.* 4(5), 68–77.
9. Liu, C. C. Lee, S. J. Venkata, S. S. (1988). An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems. *IEEE Trans. Power Syst.* 3(2), 619–626.
10. Chen, C. S. Lin C. H. Tsai, H. Y. (2002). A rule-based expert system with colored Petri net models for distribution system service restoration. *IEEE Trans. Power Syst.* 17(4), 1073–1080.
11. Lim, S. I. Lee, S. J. Choi, M. S. Lim, D. J. Ha, B. N. (2006). Service restoration methodology for multiple fault case in distribution systems. *IEEE Trans. Power Syst.* 21(4), 1638–1644.
12. Lee, S. J. Lim, S. I. Ahn, B. S. (1998). Service restoration of primary distribution systems based on fuzzy evaluation of multi-criteria. *IEEE Trans. Power Syst.* 13(3), 1156–1163.
13. Morelato, A. L. Monticelli, A. (1989). Heuristic search approach to distribution system restoration. *IEEE Trans. Power Del.* 4(4), 2235–2241.
14. Toune, S. Fudo, H. Genji, T. Fukuyama, Y. And Nakanishi, Y. (2002). Comparative study of modern



electricity supply after the 2010 Chilean earthquake. *IEEE Power and Energy Magazine*, 9(2), 37 – 45.

30. Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.
 31. Kubler, S. Robert, J. Derigent, W. Voisin, A. Traon, Y. (2016). A state-of-the-art survey & testbed of fuzzy AHP (FAHP) applications. *Elsevier Expert Systems with Applications journal*, 65, 398–422.
 32. Chang, D.-Y. (1992). Extent Analysis and Synthetic Decision, *Optimization Techniques and Applications*, 1, 352.
 33. Mechefske, C. K. Wang, Z. (2001). Using fuzzy linguistics to select optimum maintenance and condition monitoring strategies. *Mechanic. Syst. Signal Process*, 15(6), 1129–1140.
 1. Zimmermann, H. J. (1987). *Fuzzy Sets, Decision Making and Expert Systems*. Norwell, MA: Kluwer.
 34. Kahraman C. (2008). *Fuzzy Multi-Criteria Decision Making: Theory and Applications with Recent Developments*, Springer.
۳۵. مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست‌ها، خطوط توزیع و انتقال طبقه‌بندی شرایط اقلیمی و محیطی، (۱۳۸۷). معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، نشریه‌ی شماره ۴۶۵.
36. <http://www.chbmet.ir/iranarchive.asp>