اولویت‌بندی راهکارهای بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی در مقابل حادثه طوفان

محمدحسن امیریون[۱] امین داداش‌زاده[۲] مسعود متقی‌زاده[۳] فرخ امینی‌فر[۴] حسن آبنیکی[۵]

۱-استادیار گروه مهندسی برق- مرکز آموزش عالی شهرضا- دانشگاه اصفهان- ایران
m.h.amirioun@shr.ui.ac.ir

۲- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشکده فنی- دانشگاه تهران- تهران- ایران
amindadashzade@ut.ac.ir

۳- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشکده فنی- دانشگاه تهران- تهران- ایران
m.mottaghizadeh@ut.ac.ir

۴- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشکده فنی- دانشگاه تهران- تهران- ایران
faminifar@ut.ac.ir

۵- معاون مدیر کل دفتر تحقیقات و توسعه فناوری شرکت توانیر- تهران- ایران
abniki@tavanir.org.ir

چکیده: در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی و افزایش نرخ وقوع رخدادهای طبیعی نادر و شدید نظیر طوفان، برقرسانی بی‌وقفه به مشترکین نهایی سیستم قدرت را با تردید مواجه نموده است. گستردگی شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی به عنوان آخرین حلقه از زنجیره تأمین انرژی در سیستم قدرت، موجب افزایش آسیب‌پذیری این شبکه‌ها در مقابل حوادث طبیعی می‌گردد. شرکت‌های توزیع برق ناگریز به اجرای اقداماتی جهت بهبود تاب‌آوری شبکه تحت مدیریت خود هستند. با توجه به محدودیت‌های بودجه، انتخاب و گزینش از بین راهکارهای مختلف یکی از چالش‌های اساسی شرکت‌های توزیع برق محسوب می‌شود. در این مقاله، یک روش جدید برای اولویت‌بندی راهکارهای بهبود تاب‌آوری در شبکه‌های توزیع پیشنهاد می‌گردد. در این زمینه، ابتدا مجموعه‌ای از راهکارهای کاندیدا جهت بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع در مقابل حادثه تعریف شده و سپس با توجه به میزان بهبود تاب‌آوری حاصل از اجرای راهکار و هزینه پیاده‌سازی مربوطه، ارزش هر راهکار با استفاده از شاخص سود به هزینه تعیین می‌گردد. در نهایت، راهکارها برحسب شاخص سود به هزینه اولویت‌بندی می‌شوند. روش پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و بر روی شبکه استاندارد ۳۳ باسه IEEE پیاده سازی گردید و نتایج نشان از کارایی مناسب روش مذکور دارد.

واژه‌های کلیدی: تاب‌آوری، شبکه توزیع، راهکارهای بهبود تاب‌آوری، طوفان، شاخص سود به هزینه

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.213

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۶
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۱/۱۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۴/۲۱
نام نویسنده‌ی مسئول: محمدحسن امیریون
نشانی نویسنده‌ی مسئول: شهرضا، کیلومتر ۳ جاده شهرضا- دهاقان، صندوق پستی: ۱۴۶-۸۶۱۴۵، تلفن: ۰۳۱-۵۳۲۳۸۳۷۹

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، با وقوع تغییرات اقلیمی و نگرانی از تأثیر مخرب حوادث طبیعی نادر و شدید، لزوم اجرای مطالعات تاب‌آوری بر روی سیستم قدرت بر همگان آشکار شده است. تاب‌آوری[1] به معنای ایستادگی در برابر پدیده‌های نادر و شدید[2] و بازگشت سریع از شرایط نامطلوب پس از حادثه است [۲]،[۱] . در مطالعات ارزیابی تاب‌آوری، رفتار سیستم قدرت در مقابل حوادث نادر و شدید تحلیل و میزان تاب‌آوری آن در مقابل حادثه با استفاده از معیارهای سنجش مناسب تعیین می‌گردد [۳] ،[۴] . سپس، راهکارها و روش‌های مختلف به منظور بهبود تاب‌آوری سیستم قدرت مورد بررسی قرار می‌گیرند–[۵] [۹]. گستردگی در نواحی مختلف شهری و روستایی، موجب آسیب-پذیری بالای شبکه‌های توزیع در مقابل حوادث طبیعی نادر و شدید می‌شود [۱۰] . در سال‌های اخیر، طوفان بیش از سایر حوادث طبیعی منجر به اختلال عملکرد شبکه‌های توزیع و بروز خاموشی‌های گسترده و طولانی‌مدت شده است. به عنوان یک نمونه برجسته از خسارت‌های طوفان به شبکه توزیع، می‌توان به حادثه طوفان سال ۱۳۹۳ در شهر تهران اشاره کرد که همچنان در اذهان عمومی نیز وجود دارد.

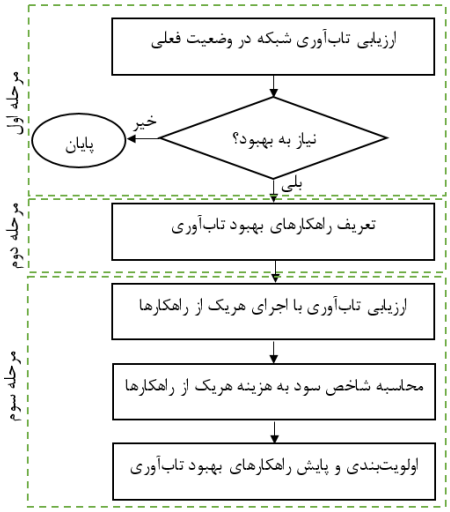
مراجع مختلفی به موضوع افزایش تاب‌آوری شبکه توزیع در مقابل حوادث طبیعی پرداخته‌اند. در مرجع [۸] مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی پایدار برای بهبود تاب-آوری مدل‌سازی شده است. مرجع [۱۱] مسئله جایابی بهینه تیم‌های تعمیراتی شبکه توزیع در مقابل حادثه طوفان را برای بهبود تاب‌آوری مطالعه کرده و الگوریتمی برای یافتن بهترین چینش ارائه کرده است. مرجع [۱۲] استفاده از ریزشبکه‌ها و بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده را به عنوان راه‌حلی برای افزایش تاب‌آوری شبکه توزیع پیشنهاد کرده و به بررسی این موضوع پرداخته است. در مرجع [۱۳]، استفاده از منابع ذخیره‌ساز انرژی به منظور افزایش تاب‌آوری پیشنهاد شده و مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۱۴]، مدلی به منظور بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع با تخصیص بهینه امکانات و تجهیزات ارائه شده است. مراجع موجود هر یک به بررسی امکان بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع با اتخاذ نوع خاصی از اقدامات پرداخته‌اند. در پیشینه تحقیق مطالعات بهبود تاب‌آوری، جای خالی مسئله اولویت‌بندی راهکارهای مختلف بهبود تاب‌آوری واضح است. شرکت‌های توزیع همواره به دنبال بهبود تاب‌آوری شبکه خود بوده و برای این منظور با راهکارهای مختلفی روبرو هستند. هر یک از راهکارها تا حدی موجب بهبود تاب-آوری می‌گردد و هزینه پیاده‌سازی مشخصی نیز دارد. باید توجه داشت که به دلیل وسعت شبکه‌های توزیع برق و تعدد تجهیزات آن، امکان اجرای کلیه اقدامات بهبود تاب‌آوری بر روی شبکه از لحاظ اقتصادی وجود ندارد. در این شرایط، اولویت‌بندی راهکارها با نگاه همزمان به میزان بهبود تاب‌آوری و همچنین هزینه راهکارها از اهمیت بالایی برای شرکت‌های توزیع برخوردار است.

در این مقاله روش جدیدی برای اولویت‌بندی اقدامات کاندیدای بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع در برابر حادثه طوفان ارائه می‌گردد. هرچند تمرکز این پژوهش بر حادثه طوفان معطوف شده است، روش پیشنهادی برای کلیه حوادث طبیعی قابل استفاده خواهد بود. برای اولویت‌بندی راهکارها از شاخص نسبت سود به هزینه استفاده می‌شود که بهبود فنی تاب‌آوری و هزینه اجرای یک راهکار را توأمان در نظر می‌گیرد. نتایج این مقاله برای تعیین میزان تاب‌آوری شبکه، شناخت و اولویت‌بندی اقدامات کاندیدای بهبود تاب‌آوری و برنامه‌ریزی تخصیص بهینه بودجه بهبود تاب‌آوری در شبکه‌های توزیع قابل استفاده خواهد بود.

ساختار این مقاله در ادامه بدین صورت خواهد بود: در بخش دو، چارچوب روش پیشنهادی ارائه می‌گردد. در بخش سه، تعریف راهکارهای بهبود تاب‌آوری در برابر حادثه طوفان بحث شده است. در بخش چهار، نحوه ارزیابی تاب‌آوری و در بخش پنج، روش اولویت‌بندی راهکارها ارائه می‌گردند. در بخش ششم نتایج عددی تحلیل می‌شوند. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی نیز در بخش هفتم ارائه می‌گردد.

۲- چارچوب روش پیشنهادی

در این بخش سازوکار پیشنهادی برای اولویت‌بندی راهکارهای بهبود تاب‌آوری در مواجهه با حادثه طوفان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مرحله اول به ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع پرداخته می‌شود. در صورتی که میزان تاب‌آوری بر مبنای نظر کارشناسان و بهره‌برداران شبکه توزیع از مقدار قابل قبولی برخوردار باشد، نیازی به اجرای راهکارهای بهبود تاب‌آوری در شبکه وجود ندارد. در غیر اینصورت، در مرحله دومِ سازوکار پیشنهادی، راهکارهای مختلف بهبود تاب‌آوری در مقابل حادثه طوفان تعریف می‌شوند. در مرحله سوم، تاب‌آوری شبکه پس از اجرای هر راهکار ارزیابی شده و شاخص سنجش تاب‌آوری پس از اجرای هر راهکار استخراج می‌گردد. بدین طریق می‌توان میزان بهبود رخ داده در تاب‌آوری شبکه با اجرای هر راهکار را بدست آورد. باید توجه داشت که علاوه بر مزیت فنی در بهبود تاب‌آوری، هزینه اجرای هر راهکار نیز در انتخاب نهایی آن باید مورد توجه قرار بگیرد. در مدل پیشنهادی از شاخص نسبت سود به هزینه [3] (BCR) برای این منظور استفاده می‌شود. این شاخص بیانگر نسبت سود (میزان بهبود رخ داده در تاب‌آوری) به هزینه اجرای راهکار می‌باشد. با محاسبه شاخص BCR برای هریک از راهکارهای پیشنهادی، راهکارهای کاندیدا با توجه به هر دو عامل اثرگذاری فنی در بهبود تاب‌آوری و هزینه سرمایه‌گذاری مربوطه اولویت‌بندی می‌شوند. پس از اولویت‌بندی راهکارهای بهبود تاب‌آوری می‌توان با توجه به بودجه در دسترس یک یا تعدادی از راهکارها را انتخاب و به عنوان پاسخ نهایی مسئله معرفی نمود. شکل (۱) روندنمای روش پیشنهادی برای اولویت‌بندی راهکارهای بهبود تاب‌آوری را در سه مرحله کلی نمایش می‌دهد. در ادامه، جزئیات هر یک از مراحل تشریح می‌گردد.

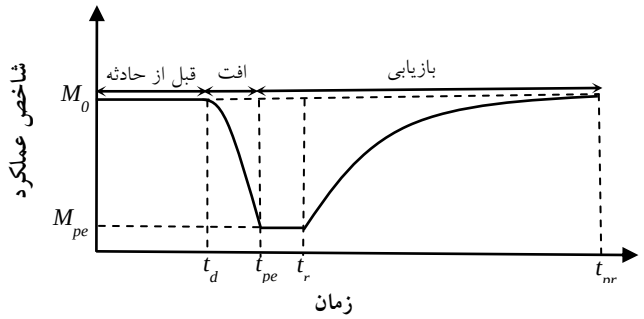


شکل (۱): روندنمای روش پیشنهادی

۳- ارزیابی تاب‌آوری

شکل (۲) منحنی تاب‌آوری سیستم قدرت را برای یک شاخص عملکرد دلخواه، $M(t)$، نمایش می‌دهد [۱۵]. قبل از وقوع حادثه، عملکرد سیستم در سطح اولیه M_0 می‌باشد. پس از وقوع حادثه در زمان t_d، عملکرد سیستم با شیب زیادی افت کرده و با پایان حادثه در زمان t_{pe} به مقدار حداقل M_{pe} می‌رسد. پس از آن لازم است ضمن بررسی و تخمین خسارت‌ها، هماهنگی لازم بین واحدهای بهره‌بردار و تیم‌های تعمیر جهت شروع فرآیند رفع عیب و اتخاذ اقدامات بازیابی صورت بگیرد. بنابراین، سیستم با یک تأخیر اجتناب‌ناپذیر در زمان t_r وارد فاز بازیابی شده و در نهایت در زمان t_{pr} به سطح عملکرد اولیه خود بازمی‌گردد. در مطالعات تاب‌آوری سیستم قدرت، مهمترین شاخص بار تامین شده در زمان وقوع حادثه است. بنابراین، در این مقاله از شاخص بار تامین‌شده به عنوان شاخص عملکرد شبکه توزیع استفاده می‌گردد.

به منظور تحلیل شبکه در فاز افت، اثر حادثه طوفان بر روی شبکه با استفاده از روش تکرار مونت کارلوی ترتیبی[۴] مدل‌سازی می‌گردد [۱۸]–[۱۶] . منحنی شکنندگی[۵] تجهیزات احتمال شکست تجهیز به ازای شدت‌های مختلف حادثه را مشخص می‌نماید [۱۹]. با استفاده از روش مونت کارلو، در هر تکرار، نمودار زمانی حادثه بر منحنی شکنندگی پایه‌ها و هادی تطبیق و احتمال خروج هر تجهیز در هر لحظه محاسبه می‌شود. سپس، با مقایسه احتمال خروج تجهیز با عدد تصادفی مربوطه در تکرار مونت کارلو، سالم ماندن یا خروج تجهیز از سرویس تعیین می‌گردد. در ادامه با مشخص شدن وضعیت تجهیزات، یک تحلیل بار مبتنی بر گراف شبکه صورت می‌گیرد. در این تحلیل، با مقایسه تولید و بار در هر یک از جزیره‌های مستقل میزان بار تأمین‌شده در شبکه محاسبه می‌گردد. پس از حادثه نیز، با شروع فعالیت تیم‌های تعمیر و اقدامات بازیابی، رفتار شبکه در فاز بازیابی استخراج می‌گردد. این روش به خوبی قادر است پاسخ وابسته به زمان شبکه را در حین حادثه و پس از آن مدل‌سازی کند و منحنی تاب‌آوری شبکه در مقابل حادثه را استخراج نماید.



شکل (۲): منحنی تاب‌آوری سیستم قدرت در مقابل حادثه [۱۵]

با در دسترس بودن منحنی تاب‌آوری (شکل (۲))، به منظور کمی‌سازی رفتار شبکه در برابر حادثه، از شاخص RI، استفاده می‌گردد[۱۶]:

$$RI = \frac{\int_{t_d}^{t_{pr}} M(t)dt}{M_o(t_{pr}-t_d)} \qquad (۱)$$

مطابق این رابطه، مقدار ایده‌آل شاخص برای یک شبکه کاملاً تاب‌آور معادل ۱ و برای یک شبکه کاملاً آسیب‌پذیر برابر ۰ خواهد بود.

۴- تعریف راهکارهای بهبود تاب‌آوری

در تعریف راهکارها از دو دسته کلی اقدامات مقاوم‌سازی تجهیزات و اقدامات توسعه تجهیزات و تخصیص منابع تولید استفاده می‌شود. اقدامات مقاوم‌سازی به دنبال تقویت یا تعویض تجهیزات موجود در شبکه هستند. از جمله اقدامات مقاوم‌سازی مؤثر در برابر حادثه طوفان می‌توان به احداث سیم مهار برای پایه‌ها، تعویض پایه‌ها و تعویض هادی‌های شبکه اشاره کرد[۲] . این گونه اقدامات ایستادگی شبکه در مقابل حادثه را افزایش داده و شیب افت منحنی تاب‌آوری را کاهش می‌دهند. به علاوه، با کاهش تجهیزات آسیب‌دیده در حین حادثه، مدت زمان تعمیرات و بازیابی شبکه نیز کاهش می‌یابد.

اقدامات توسعه تجهیزات و تخصیص منابع تولید به دنبال اضافه‌کردن امکانات و تجهیزات پیشرفته یا منبع تولید اضطراری در شبکه هستند [۲۰] ,[۱۳]. با تجهیز تیم‌های تعمیراتی به امکاناتی نظیر خودروی پیشرفته مجهز به کابل پخش‌کن، می‌توان سرعت بازیابی شبکه را بهبود داد. همچنین، منابع تولید پراکنده اضطراری با تأمین بخشی از بار در زمان وقوع حادثه، میزان بار تأمین شده و سرعت بازیابی شبکه را افزایش می‌دهند.

علاوه بر دو دسته اقدامات فوق، هرس درختان نیز به عنوان یکی از راهکارهای مورد توجه در مواجهه با طوفان در شبکه‌های توزیع در این مقاله مورد نظر می‌باشد. مطابق سوابق موجود، سقوط شاخه‌های شکسته درختان یکی از مهم‌ترین عوامل خاموشی ناشی از طوفان در شبکه‌های توزیع در مناطق مشجر است.

۵- اولویت‌بندی راهکارهای بهبود تاب‌آوری

در این مرحله اولویت‌بندی راهکارهای بهبود تاب‌آوری بر مبنای شاخص سود به هزینه انجام می‌شود. ابتدا شاخص تاب‌آوری شبکه پس از اجرای هر یک از راهکارها مطابق روش ارزیابی ارائه‌شده در مرحله اول محاسبه می‌گردد. اگر RI_k تاب‌آوری شبکه پس از اجرای راهکار k و RI_0 تاب‌آوری شبکه در وضعیت فعلی آن باشد، میزان بهبود تاب‌آوری ناشی از اجرای راهکار را با ΔRI_k نشان می‌دهیم:

$$\Delta RI_k = RI_k - RI_0 \quad (۲)$$

بیشترین میزان بهبود تاب‌آوری در بین همه N راهکار را با ΔRI_{max} نشان می‌دهیم و داریم:

$$\Delta RI_{\max} = Max\{\Delta RI_1, \Delta RI_2, ..., \Delta RI_k, ..., \Delta RI_N\} \quad (۳)$$

اگر ارزش کنونی هزینه سرمایه‌گذاری راهکار k را با C_k^{PWC} نشان دهیم، هزینه یکنواخت سالیانه آن راهکار، C_k^{EUAC}، به صورت زیر محاسبه می‌گردد[۲۱] :

$$C_k^{EUAC} = \frac{C_k^{PWC}\left[i(i+1)^n\right]}{(i+1)^n - 1} \quad (۴)$$

که در آن n تعداد دوره مطالعه (سال) و i نرخ بهره پول در هر دوره است. در مورد راهکارهایی که هزینه اجرای آن‌ها به صورت منظم در هر دوره پرداخت می‌شود (مانند هرس درختان در مناطق مشجر)، ارزش کنونی سرمایه‌گذاری از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_k^{PWC} = C_k^0 + \sum_{j=1}^{n} \frac{C_{j,k}^F}{(1+i)^j} \quad (۵)$$

که در آن C_k^0 هزینه اولیه راهکار k و $C_{j,k}^F$ هزینه راهکار k در سال j ام است.

در صورتی که نرخ تورم غیرقابل صرفنظر باشد، از نرخ تعدیل‌شده بهره پول، i_f، به جای i در روابط (۴) و (۵) استفاده می‌شود:

$$i_f = i + f + if \quad (۶)$$

که در آن f نرخ تورم در هر دوره است.

اگر بیشترین مقدار هزینه یکنواخت سالیانه در بین راهکارها را با C_{max}^{EUAC} نشان دهیم:

$$C_{max}^{EUAC} = Max\{C_1^{EUAC}, C_2^{EUAC}, ..., C_k^{EUAC}, ..., C_N^{EUAC}\} \quad (۷)$$

شاخص BCR هر راهکار را می‌توان به صورت نسبت سود (میزان بهبود تاب‌آوری) نرمالیزه به هزینه یکنواخت سالیانه نرمالیزه بیان نمود:

$$BCR_k = \frac{\Delta RI_k / \Delta RI_{max}}{C_k^{EUAC} / C_{max}^{EUAC}} \quad (۸)$$

شاخص BCR یک شاخص بدون بعد (دیمانسیون) است و در روش پیشنهادی از آن برای اولویت‌بندی راهکارها و تهیه جدول اولویت راهکارها استفاده می‌شود. شاخص BCR میزان اثرگذاری فنی هر راهکار در بهبود تاب‌آوری به ازای هزینه سرمایه‌گذاری آن را نشان می‌دهد. در واقع، شاخص BCR با توجه به هر دو عامل فنی و اقتصادی مشخص می‌نماید که اجرای کدام راهکار صرفه بیشتری دارد.

ممکن است دو یا چند راهکار دارای کارکرد مشابهی برای بهبود تاب‌آوری یک بخش از شبکه باشند که از آن‌ها به عنوان راهکارهای جایگزین یاد می‌کنیم. بدیهی است اجرای یکی از راهکارهای جایگزین برای یک بخش معین کافی است. برای نمونه راهکارهای هرس درختان و استفاده از کابل‌های خودنگهدار یا فاصله‌دار، راهکارهای جایگزین برای اصلاح شبکه هوائی سه سیمه در یک منطقه مشجر در مقابل طوفان محسوب می‌شوند. بنابراین، پس از تعیین اولویت کلیه راهکارها، راهکار جایگزینی که اولویت بالاتری دارد در لیست راهکارها باقی مانده و سایر راهکارهای جایگزین مربوط به آن بخش حذف خواهند شد.

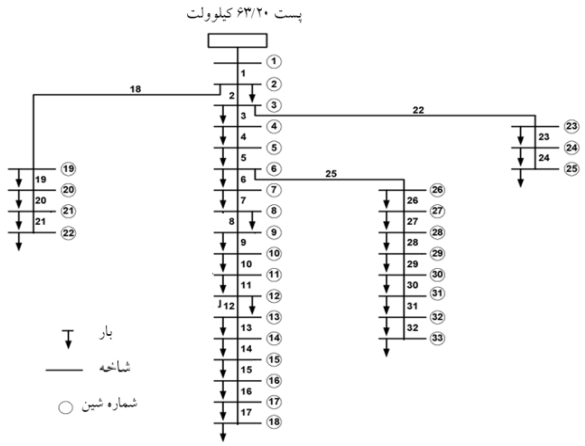
۶- مطالعات عددی

۶-۱- معرفی مطالعه موردی

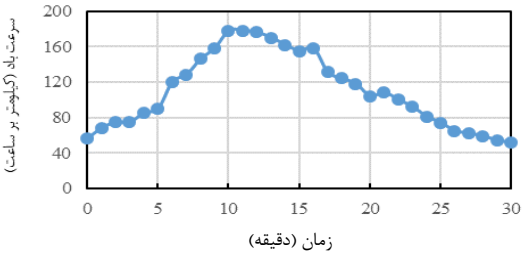
در این بخش شبکه ۲۰ کیلو ولت استاندارد ۳۳ شینه IEEE و سایر داده‌های ورودی مورد نیاز در مطالعات عددی معرفی می‌شوند. اطلاعات شبکه مورد مطالعه از مرجع [۲۲] استخراج شده است. شکل (۳) تصویر تک خطی شبکه استاندارد مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.

شکل (۴) منحنی مورد استفاده برای حادثه طوفان را نشان می‌دهد. مطابق نمونه‌های ثبت‌شده از طوفان‌های واقعی، سرعت باد در شکل (۴) با شیب زیادی افزایش پیدا کرده و به مقدار حداکثر ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت رسیده است.

با توجه به تنوع هادی‌ها و پایه‌های شبکه توزیع و تفاوت منحنی شکنندگی آن‌ها، این تجهیزات مطابق جدول (۱) کلاس‌بندی می‌شوند.



شکل(۳): شبکه ۲۰ کیلو ولت استاندارد ۳۳ باسه IEEE. [۲۲]



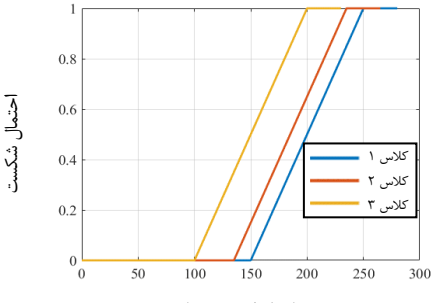
شکل (۴): منحنی حادثه طوفان

منحنی شکنندگی کلاس‌های مختلف تجهیزات در شکل‌های (۵) و (۶) نمایش داده شده است. کلاس یک در هر گروه تجهیزات، مقاوم‌ترین تجهیز را در برابر حادثه نمایش می‌دهد. در هر یک از منحنی‌های شکست، احتمال خروج تجهیز تا شدت معینی از حادثه صفر است. همچنین به ازای شدت معینی از حادثه، احتمال شکست برابر یک می‌باشد که به معنای خروج قطعی تجهیز است. در شدت‌های حادثه بین دو مقادیر، احتمال شکست تجهیز با تقریب خوبی به صورت خطی فرض می‌شود. برای رسم این منحنی‌ها، از داده‌های ثبت‌شده طوفان و گزارش‌های خسارت حادثه در سال‌های اخیر استفاده شده است.

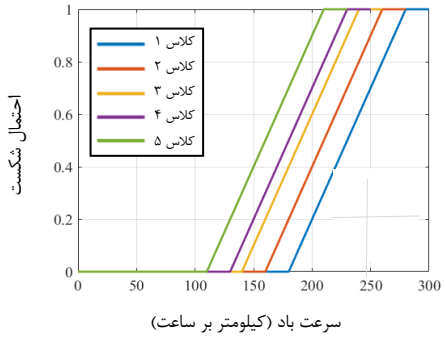
جدول (۲) راهکارهای کاندیدا و هزینه اجرای هریک را نشان می‌دهد. این راهکارها شامل اقدامات مقاوم‌سازی (راهکارهای ۱ تا ۹)، توسعه تجهیزات (راهکار ۱۱)، تخصیص منبع تولید اضطراری (راهکارهای ۱۲، ۱۳ و ۱۴) و هرس درختان در بخش مشجر شبکه (راهکار ۱۰) می‌باشد. در مورد راهکار دهم، هرس سالیانه درختان، هزینه سالیانه اجرای راهکار با توجه به هزینه اولیه و نرخ تورم افزایش می‌یابد.

جدول(۱): کلاس‌بندی تجهیزات شبکه

تجهیز	کلاس	شرح کلاس
هادی	۱	هادی سه سیمه هوایی در مسیر غیر مشجر
	۲	کابل فاصله‌دار در مسیر مشجر
	۳	هادی سه سیمه هوایی در مسیر مشجر
تیر	۱	تیر بتنی H از نوع کششی یا انتهایی
	۲	تیر بتنی H از نوع عبوری با دو سیم مهار
	۳	تیر بتنی H از نوع عبوری با یک سیم مهار
	۴	تیر بتنی H از نوع عبوری بدون سیم مهار
	۵	تیر لانه زنبوری



شکل (۵): منحنی شکنندگی هادی‌ها



شکل(۶): منحنی شکنندگی پایه‌ها

جدول (۲): شرح و هزینه راهکارهای بهبود تاب‌آوری

ردیف	شرح راهکار	هزینه اولیه (میلیون ریال)
۱	احداث سیم مهار یک‌طرفه برای ۱۲ تیر عبوری H و تبدیل مهار یک‌طرفه به مهار دوطرفه برای ۴ تیر عبوری H در شاخه ۱۸	۲۵۰
۲	احداث سیم مهار یک‌طرفه برای ۱۲ تیر عبوری H و تبدیل مهار یک‌طرفه به مهار دوطرفه برای ۴ تیر عبوری H در شاخه ۱۹	۲۵۰
۳	احداث سیم مهار یک‌طرفه برای ۱۲ تیر عبوری H و تبدیل مهار یک‌طرفه به مهار دوطرفه برای ۴ تیر عبوری H در شاخه ۲۰	۲۵۰
۴	احداث سیم مهار یک‌طرفه برای ۱۲ تیر عبوری H و تبدیل مهار یک‌طرفه به مهار دوطرفه برای ۴ تیر عبوری H در شاخه ۲۱	۲۵۰
۵	احداث سیم مهار یک‌طرفه برای ۱۲ تیر عبوری H و تبدیل مهار یک‌طرفه به مهار دوطرفه برای ۴ تیر عبوری H در شاخه ۳۰	۲۵۰
۶	تعویض ۱۰ تیر لانه زنبوری با تیرهای عبوری H در شاخه ۲۵	۶۰۰
۷	تعویض ۱۰ تیر لانه زنبوری با تیرهای عبوری H در شاخه ۲۶	۶۰۰
۸	تعویض ۱۰ تیر لانه زنبوری با تیرهای عبوری H در شاخه ۲۷	۶۰۰
۹	تعویض هادی در شاخه مشجر ۳۰ به کابل فاصله‌دار هوایی	۱۲۵۰
۱۰	هرس سالیانه درختانِ در حریم شبکه در شاخه مشجر ۳۰	۵۰
۱۱	تخصیص یک دستگاه خودروی شاسی‌بلند پیشرفته و مجهز به کابل‌پخش‌کن جهت تردد در بخش‌های آسیب‌دیده	۱۰۰۰۰
۱۲	نصب دیزل ژنراتور اضطراری به ظرفیت ۵۰۰ kVA در شین ۶	۱۵۰۰۰
۱۳	نصب دیزل ژنراتور اضطراری به ظرفیت ۵۰۰ kVA در شین ۱۵	۱۵۰۰۰
۱۴	نصب دیزل ژنراتور اضطراری به ظرفیت ۵۰۰ kVA در شین ۳۰	۱۵۰۰۰

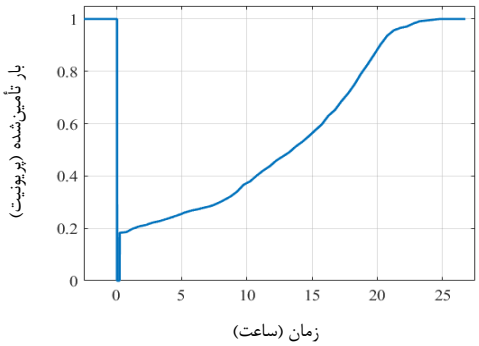
تعیین عمر پروژه با توجه به نوع پروژه، انتظار سرمایه‌گذار یا مالک پروژه از بازگشت سرمایه و عمر تجهیزات اصلی پروژه صورت می‌گیرد. عمر پروژه در این مقاله ۲۰ سال فرض می‌شود (n=20). برای تعیین پارامترهای اقتصادی، دو حالت را در نظر می‌گیریم. حالت اول استفاده از نرخ‌های میانگین مبتنی بر آمار اقتصادی کشور در چندین سال اخیر است؛ یعنی نرخ بهره پول ۱۴ درصد و نرخ تورم ۲۵ درصد (i=0.14, f=0.25). حالت دوم استفاده از نرخ‌های به‌روز براساس واقعیت اقتصادی حال حاضر کشور است؛ یعنی یعنی نرخ بهره پول ۱۸ درصد و نرخ تورم ۳۵ درصد (i=0.18, f=0.35) [۲۳].

۶-۲- نتایج و بحث

۶-۲-۱- ارزیابی تاب‌آوری شبکه در وضعیت فعلی

منحنی تاب‌آوری شبکه در حالت پایه (بدون اتخاذ راهکارهای بهبود تاب‌آوری) در شکل (۷) قابل مشاهده است. پس از شروع حادثه،

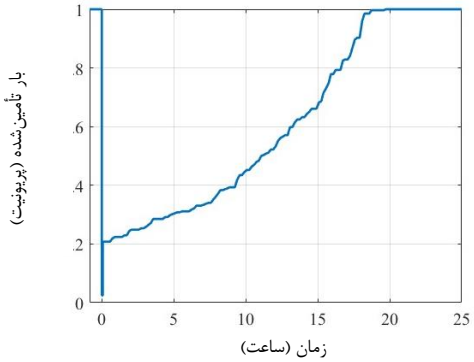
با توجه به شدت حادثه، شاهد افت قابل توجهی در منحنی تاب‌آوری هستیم؛ به گونه‌ای که بار تأمین‌شده به صفر می‌رسد. پس از اتمام حادثه، فرآیند تعمیر آغاز شده و بارها براساس اولویت تغذیه بازیابی می‌شوند. بازیابی کل شبکه تا ۲۵ ساعت پس از زمان حادثه به طول می‌انجامد. شاخص سنجش تاب‌آوری در این حالت برابر ۰/۵۳ است. اگر از دریچه ایستا به شاخص سنجش تاب‌آوری نگاه شود، می‌توان این‌گونه تفسیر نمود که از لحظه وقوع طوفان تا بازیابی کامل شبکه، به طور میانگین ۵۳٪ انرژی مورد نیاز بارها تأمین شده است. با استخراج منحنی تاب‌آوری و شاخص سنجش تاب‌آوری در حالت پایه، مدیران شبکه توزیع می‌توانند با آگاهی فنی کافی در خصوص سرمایه‌گذاری برای بهبود تاب‌آوری شبکه تصمیم‌گیری کنند.



شکل(۷): منحنی تاب‌آوری شبکه مورد مطالعه در حالت پایه.

۶-۲-۲- اولویت‌بندی راهکارهای بهبود تاب‌آوری

در این بخش، منحنی تاب‌آوری شبکه پس از اجرای هر راهکار استخراج‌شده و سپس شاخص سنجش تاب‌آوری و شاخص BCR کلیه راهکارها محاسبه می‌شوند. با توجه به تعداد زیاد راهکارها، صرفاً منحنی تاب‌آوری شبکه پس از اجرای راهکار یازده به عنوان نمونه در شکل (۸) ارائه می‌گردد. در این راهکار، یک دستگاه خودروی پیشرفته مجهز به کابل پخش‌کن جهت تردد در مناطق آسیب‌دیده و تسریع فرآیند تعمیر در نظر گرفته می‌شود. با مقایسه منحنی تاب‌آوری شکل (۸) با منحنی شکل (۷)، واضح است که مدت زمان بازیابی کامل شبکه با اجرای راهکار یازده حدود ۵ ساعت کاهش یافته است. به علاوه، با توجه به تسریع فرآیند تعمیر و بازگشت خطوط آسیب‌دیده به مدار، شیب منحنی تأمین بار در طول فرآیند بازیابی نیز با اتخاذ راهکار یازده نسبت به حالت پایه افزایش می‌یابد. شاخص سنجش تاب‌آوری نیز برای راهکار یازده برابر ۰/۵۸ است که نسبت به مقدار متناظر آن در حالت پایه، ۰/۵۳، تا حدی بهبود یافته است.



شکل(۸): منحنی تاب‌آوری شبکه پس از اجرای راهکار یازده.

جدول (۳) شاخص سنجش تاب‌آوری و شاخص نرمالیزه BCR برای نرخ‌های میانگین و به‌روز را برای حالت پایه و کلیه راهکارها نشان می‌دهد. برای محاسبه شاخص سنجش تاب‌آوری هر راهکار از منحنی تاب‌آوری به دست‌آمده پس از اجرای راهکار مربوطه استفاده شده است؛ همانطور که در جدول مشاهده می‌شود، اجرای هر یک از راهکارها تا حدی موجب بهبود تاب‌آوری شبکه در مقابل حادثه می‌گردد. بیشترین میزان بهبود تاب‌آوری مربوط به راهکارهای ۱۲ و ۱۳ (نصب دیزل ژنراتور ۵۰۰ kVA در شین‌های ۶ و ۱۵) و کمترین میزان مربوط به راهکار ۹ (تعویض هادی به کابل فاصله‌دار در شاخه مشجر ۳۰) است. از طرفی، شاخص نرمالیزه BCR به ازای نرخ‌های میانگین و به‌روز برای کلیه راهکارها به جز راهکار ده (هرس سالیانه درختان) یکسان است. برابری شاخص‌های نرمالیزه BCR به این دلیل است که مطابق رابطه (۴)، ارزش هزینه یکنواخت سالیانه راهکارها با افزایش نرخ بهره پول و تورم به یک اندازه افزایش می‌یابد؛ بنابراین مقدار نرمالیزه BCR مطابق رابطه (۸) بدون تغییر خواهد ماند. در حالی که مطابق رابطه (۵)، ارزش کنونی هزینه راهکار ده با افزایش نرخ‌ها کاهش می‌یابد. در نتیجه، ارزش هزینه یکنواخت سالیانه این راهکار مطابق رابطه (۴) کمتر از سایر راهکارها افزایش می‌یابد و به تبع آن شاخص نرمالیزه BCR این راهکار افزایش می‌یابد.

جدول (۳): شاخص سنجش تاب‌آوری و شاخص BCR

ردیف	نام راهکار	RI	BCR نرمالیزه	
			نرخ‌های میانگین	نرخ‌های به‌روز
۱	حالت پایه	۰/۵۳	-	-
۲	راهکار یک	۰/۵۹	۱	۱
۳	راهکار دو	۰/۵۵	۰/۹۹۵	۰/۹۹۵
۴	راهکار سه	۰/۵۶	۰/۹۱۲	۰/۹۱۲
۵	راهکار چهار	۰/۵۵	۰/۸۵۰	۰/۸۵۰
۶	راهکار پنج	۰/۵۶	۰/۹۰۶	۰/۹۰۶
۷	راهکار شش	۰/۵۹	۰/۹۳۶	۰/۹۳۶
۸	راهکار هفت	۰/۵۸	۰/۹۱۶	۰/۹۱۶
۹	راهکار هشت	۰/۵۵	۰/۸۸۱	۰/۸۸۱
۱۰	راهکار نه	۰/۵۴	۰/۸۷۲	۰/۸۷۲
۱۱	راهکار ده	۰/۵۶	۰/۸۹۴	۰/۹۱۴
۱۲	راهکار یازده	۰/۵۸	۰/۸۸۴	۰/۸۸۴
۱۳	راهکار دوازده	۰/۶	۰/۸۸۳	۰/۸۸۳
۱۴	راهکار سیزده	۰/۶	۰/۸۸۳	۰/۸۸۳
۱۵	راهکار چهارده	۰/۵۹	۰/۸۸۲	۰/۸۸۲

جدول (۴) لیست اولویت‌بندی راهکارهای بهبود تاب‌آوری براساس شاخص BCR مبتنی بر نرخ‌های میانگین را ارائه می‌دهد. در اولویت-بندی صورت گرفته، از اطلاعات شاخص BCR در جدول (۳) استفاده شده است؛ با این ملاحظه که از بین راهکارهای جایگزین ۹ و ۱۰، راهکار ۹ به دلیل اولویت پایین‌تر نسبت به راهکار ۱۰ حذف می‌گردد. در ستون آخر جدول (۴) هزینه تجمعی راهکارها نیز نمایش داده شده است. هزینه تجمعی راهکارها در هر یک از ردیف‌های جدول، به معنای مجموع هزینه اجرای راهکارها از ردیف ۱ (راهکار با بیشترین اولویت) تا راهکار مربوط به همان ردیف می‌باشد.

جدول (۴): جدول اولویت‌بندی و هزینه سرمایه‌گذاری تجمعی راهکارها

ردیف	نام راهکار	BCR نرمالیزه	هزینه تجمعی راهکارها (میلیون ریال)
۱	راهکار یک	۱	۲۵۰
۲	راهکار دو	۰/۹۹۵	۵۰۰
۳	راهکار شش	۰/۹۳۶	۱۱۰۰
۴	راهکار هفت	۰/۹۱۶	۱۷۰۰
۵	راهکار سه	۰/۹۱۲	۱۹۵۰
۶	راهکار پنج	۰/۹۰۶	۲۲۰۰
۷	راهکار ده	۰/۸۹۴	۲۲۵۰
۸	راهکار یازده	۰/۸۸۴	۱۲۲۵۰
۹	راهکار دوازده	۰/۸۸۳	۲۷۲۵۰
۱۰	راهکار سیزده	۰/۸۸۳	۴۲۲۵۰
۱۱	راهکار چهارده	۰/۸۸۲	۵۷۲۵۰
۱۲	راهکار هشت	۰/۸۸۱	۵۷۸۵۰
۱۳	راهکار چهار	۰/۸۵	۵۸۱۰۰

پرواضح است که اجرای هر یک از راهکارها به تنهایی، تاب‌آوری شبکه را به میزان اندکی افزایش می‌دهد. به منظور بررسی تأثیر پیاده-سازی همزمان تعدادی از راهکارها بر تاب‌آوری شبکه، دو مطالعه موردی زیر را در نظر می‌گیریم:

مطالعه موردی ۱: در این مطالعه، هفت راهکار با بالاترین اولویت در جدول (۴) پیاده‌سازی می‌شوند. مطابق جدول (۲)، این راهکارها شامل احداث سیم مهار در شاخه‌های ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۳۰، تعویض تیرهای لانه‌زنبوری در شاخه‌های ۲۵ و ۲۶ و هرس درختان در حریم شبکه در بخش مشجر شاخه ۳۰ می‌شوند.

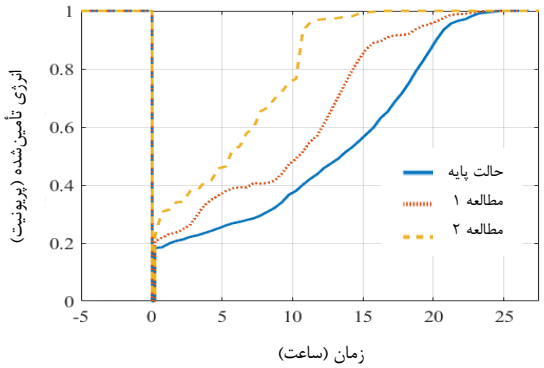
مطالعه موردی ۲: در این مطالعه، علاوه بر هفت راهکار مطالعه موردی ۱، دو راهکار بعدی در جدول (۴) نیز پیاده‌سازی می‌شوند. این راهکارها شامل تخصیص خودروی پیشرفته تعمیر و نصب دیزل ژنراتور اضطراری با ظرفیت ۵۰۰ kVA در شین ۶ می‌باشند.

شکل (۹) منحنی تاب‌آوری شبکه را در حالت پایه، مطالعه موردی ۱ و مطالعه موردی ۲ مقایسه می‌کند. همانطور که در این شکل قابل مشاهده است، با اجرای تعدادی از راهکارها به صورت همزمان، شیب منحنی در فاز بازیابی و سرعت بازگشت به نقطه کار اولیه در مطالعات ۱ و ۲ نسبت به حالت پایه به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است.

در حالت پایه، مدت‌زمان بازیابی کامل بار ۲۵ ساعت می‌باشد، در حالی که در مطالعات موردی ۱ و ۲ این مدت‌زمان به ترتیب به ۲۲ و ۱۵ ساعت کاهش می‌یابد. همچنین مطابق جدول (۵)، شاخص سنجش تاب‌آوری شبکه از مقدار ۰/۵۳ در حالت پایه به ۰/۶۷ و ۰/۸۱ به ترتیب برای مطالعه موردی ۱ و ۲ افزایش یافته است. لازم به ذکر است که هزینه پیاده‌سازی مطالعه موردی ۲، علاوه بر هزینه سرمایه‌گذاری اولیه مطابق جدول (۵)، هزینه سالیانه مربوط به هرس درختان را نیز شامل می‌شود. بدیهی است هر قدر میزان بودجه در دسترس برای اجرای راهکارهای بیشتر در دسترس باشد، تاب‌آوری شبکه نیز بیشتر ارتقاء می‌یابد.

جدول (۵): شاخص تاب‌آوری و هزینه در حالت پایه و مطالعات موردی ۱ و ۲

ردیف	حالت	RI	هزینه سرمایه‌گذاری (میلیون ریال)
۱	حالت پایه	۰/۵۳	-
۲	مطالعه موردی ۱	۰//۶۷	۲۲۵۰
۳	مطالعه موردی ۲	۰/۸۱	۲۷۲۵۰



شکل (۹): منحنی تاب‌آوری شبکه در حالت پایه و مطالعات موردی ۱ و ۲

پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی شبکه توزیع واقعی با چالش-های جدی در گردآوری داده و محدودیت انتشار نتایج مواجه است که در ادامه به اختصار به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. دسترسی به داده-های شبکه واقعی مشروط به اخذ مجوز قانونی و طی تشریفات اداری به منظور بررسی ملاحظات امنیتی از سوی شرکت‌های توزیع است. از سوی دیگر، برخی از داده‌های مورد نیاز در مطالعات تاب‌آوری نظیر منحنی‌های شکنندگی تجهیزات در بانک اطلاعاتی شرکت‌های توزیع موجود نیست. برای دریافت برخی از اطلاعات کاربردی نظیر گزارش خسارت حوادث طبیعی قبلی در شبکه و عمر برخی از تجهیزات، بانک اطلاعاتی دقیق و مستندی وجود ندارد. در این گونه موارد داده‌های لازم را باید لزوماً از کارشناسان باتجربه شرکت‌های توزیع و از طریق مصاحبه دریافت نمود. بدیهی است به دلیل گذر زمان از یک سو و تفاوت دیدگاه کارشناسان از سوی دیگر، اطلاعات حاصله با درصدی

خطا همراه خواهد بود. شایان ذکر است حتی در صورت دسترسی به داده‌های واقعی با دقت کافی، نتایج مطالعات تاب‌آوری بر روی شبکه-های واقعی به دلیل ملاحظات امنیتی و پدافند غیرعامل در شرکت‌های توزیع قابل انتشار نیست.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش جدیدی برای اولویت‌بندی راهکارهای بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع در برابر حوادث طبیعی ارائه گردید. روش پیشنهادی ابتدا تصویر دقیقی از وضعیت تاب‌آوری شبکه را به مدیران و بهره‌بردارن شبکه ارائه می‌کند. سپس، در صورت نیاز به بهبود تاب-آوری، راهکارهای کاندیدای بهبود تاب‌آوری با استفاده از شاخص نسبت سود به هزینه (BCR) اولویت‌بندی می‌شوند. ویژگی برجسته شاخص BCR توجه همزمان به میزان بهبود تاب‌آوری حاصل از اجرای راهکار و هزینه پیاده‌سازی مربوطه است. روش پیشنهادی بر روی شبکه توزیع استاندارد ۳۳ شینه IEEE با موفقیت اعتبارسنجی گردید. هر چند مطالعات عددی برای حادثه طوفان انجام شد، روش پیشنهادیِ اولویت‌بندی راهکارها قابل استفاده برای کلیه حوادث طبیعی می‌باشد. نتایج عددی به خوبی نشان داد که توجه همزمان به هر دو عامل فنی و اقتصادی می‌تواند راهکارهای مؤثر بهبود تاب‌آوری را به درستی شناسائی و از اتلاف سرمایه جلوگیری نماید. با اولویت‌بندی راهکارها، مدیران شبکه توزیع قادرند با توجه به محدودیت بودجه در دسترس، یک یا تعدادی از راهکارهای دارای اولویت بالاتر را اتخاذ نمایند. با توجه به تأثیر اندک اجرای یک راهکار در بهبود تاب‌آوری، میزان بهبود تاب‌آوری به ازای اجرای چندین راهکار در دو مطالعه موردی ۱ و ۲ با محدودیت‌های بودجه‌ای متفاوت بررسی گردید. براساس نتایج شبیه-سازی، در مطالعات موردی ۱ و ۲، تاب‌آوری شبکه به ترتیب ۲۷٪ و ۵۳٪ نسبت به حالت پایه بهبود یافت.

یکی از موانع اصلی اجرای اقدامات بهبود تاب‌آوری در شبکه‌های توزیع ایران عدم تأمین اعتبار لازم از سوی شرکت‌های توزیع به دلیل محدودیت‌های بودجه‌ای است. مانع دیگر پیش روی اجرای راهکارهای بهبود تاب‌آوری، عدم شناخت دقیق مفهوم تاب‌آوری در شرکت‌های توزیع است. از این رو، توسعه دانش فنی تاب‌آوری در سطح شرکت‌های توزیع و استفاده از تجربه کارشناسان و متخصصان این شرکت‌ها می-تواند در نهایت منجر به بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع گردد. در تحقیقات آینده نویسندگان، اولویت‌بندی راهکارهای بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع در مقابل دو یا چند حادثه طبیعی به صورت همزمان مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

مراجع

[۱] امینی‌فر. فرخ و فرهومندی. متین،"مفاهیم و مبانی ارزیابی تاب‌آوری در شبکه‌های برق "، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران ، دوره ۱۵، شماره ۳، صفحات:۹۱-۸۳، ۱۳۹۷.

[2] 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.

[3] A. N. Tari, M. S. Sepasian, and M. T. Kenari, "Resilience assessment and improvement of distribution networks against extreme weather events," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 125, pp. 1-10, 2021.

[4] D. K. Mishra, M. J. Ghadi, A. Azizivahed, L. Li, and J. Zhang, "A review on resilience studies in active distribution systems," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 135, pp. 1-20, 2021.

[5] 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, 2018.

[6] 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, 2017.

[7] A. Y. Ali, A. Hussain, J.-W. Baek, and H.-M. Kim, "Optimal operation of networked microgrids for enhancing resilience using mobile electric vehicles," Energies, vol. 14, no. 1, pp. 1-20, 2021.

[8] W. Yuan, J. Wang, F. Qiu, C. Chen, C. Kang, and B. Zeng, "Robust optimization-based resilient distribution network planning against natural disasters," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 7, no. 6, pp. 2817–2826, 2016.

[9] M. Borghei and M. Ghassemi, "Optimal planning of microgrids for resilient distribution networks," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 128, pp. 1-13, 2021.

[۱۰] دشتی. رحمن و صالحی‌زاده. سید مهدی،" مکان یابی خطا در شبکه های توزیع فشار متوسط دو مداره به روش امپدانسی"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران ,دوره ۱۴، شماره ۱، صفحات:۱۷-۱۱، ۱۳۹۶.

[11] M. S. Khomami and M. S. Sepasian, "Pre-hurricane optimal placement model of repair teams to improve distribution network resilience," Electr. Power Syst. Res., vol. 165, pp. 1–8, 2018.

[12] M. A. Gilani, A. Kazemi, and M. Ghasemi, "Distribution system resilience enhancement by microgrid formation considering distributed energy resources," Energy, vol. 191, pp. 1-27, 2020.

[13] J. Kim and Y. Dvorkin, "Enhancing distribution resilience with mobile energy storage: A progressive hedging approach," in 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Portland, OR, USA, 5-10 Aug., 2018.

[14] 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.

[15] M. H. Amirioun, F. Aminifar, and H. Lesani, "Towards proactive scheduling of microgrids against extreme floods," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 4, pp. 3900–3902, 2017.

[16] 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.

[۱۷] شیخی فینی. علیرضا، پارسا مقدم. محسن، شیخ الاسلامی. محمد کاظم.، "برنامه‌ریزی توسعه منابع انرژی گسترده با بهره‌گیری از شبیه-سازی مونت کارلو در فضای نظریه بازی‌ها با اطلاعات ناقص"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۲، شماره ۱، صفحات:۸۰-۶۹، ۱۳۹۴.

[۱۸] شریعتی‌نسب. رضا، تدین رودی. پویا، "تخمین عملکرد خطوط و ریسک عایقی ناشی از ضربات مستقیم صاعقه با استفاده از روش ترکیبی جدید مبتنی بر روش مونت کارلو"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۳، شماره ۱، صفحات:۹۴-۸۵، ۱۳۹۵.

[۱۹] کریمی. معصومه، نجفی روادانق. سجاد، حقی‌فام. محمودرضا، "چارچوب طراحی شبکه‌های توزیع تاب‌آور در برابر حوادث طبیعی"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۸، شماره ۲، ۱۴۰۰.

[20] B. Taheri, A. Safdarian, M. Moeini-Aghtaie, and M. Lehtonen, "Distribution system resilience enhancement via mobile emergency generators," IEEE Trans. Power Deliv., to be published.

[۲۱] محمدمهدی اسکونژاد، "اقتصاد مهندسی یا ارزیابی اقتصادی پروژه‌های صنعتی"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۶.

[22] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," IEEE Power Eng. Rev., vol. 9, no. 4, pp. 101–102, 1989.

[۲۳] "۸۲ سال نرخ تورم در یک نگاه/تغییرات سرعت افزایش قیمت‌ها"، تیر. ۱۳۹۷، http://www.ibena.ir/news/88075/82.

زیرنویس‌ها

[1] Resilience

[2] High-impact rare events

[3] Benefit to cost ratio

[4] Sequential Monte Carlo

[5] Fragility curves