

شاخصی جدید برای ارزیابی کمی تاب‌آوری شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده

رضا صابری^۱، حمید فلقی^{۲*}، مصطفی اسماعیلی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

saberi@birjand.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

falaghi@birjand.ac.ir

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی کامپیوتر و صنایع، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

esmaeli@birjandut.ac.ir

چکیده: تاب‌آوری به‌صورت توانایی سیستم برای حفظ یک سطح قابل قبول از عملکرد در برابر یک اغتشاش شدید و بازگشت در یک دوره زمانی مناسب تعریف می‌شود. بروز شرایط نامساعد آب‌وهوایی و حوادث طبیعی همواره منجر به تحمیل خسارات و خاموشی‌های گسترده در سطح شبکه‌های توزیع شده است؛ که تعداد و شدت این رخدادها در سال‌های اخیر اغلب رو به فزونی بوده است. لذا ارزیابی تاب‌آوری شبکه و توانایی بازگشت‌پذیری آن در مقابله با شرایط نامساعد جوی، کاهش میزان تأثیرپذیری شبکه توزیع برق در مقابل رخداد حوادث قهری می‌بایستی جزو اولویت‌های برنامه‌ریزی برای طراحی و بهره‌برداری از شبکه قرار گیرد. در این مقاله، در ابتدا مفهوم تاب‌آوری و مشخصه‌های آن تعیین و در ادامه با مدل‌سازی حوادث طبیعی متداول مانند سیل و طوفان، به معرفی شاخص جدید برای ارزیابی تاب‌آوری در شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده پرداخته شده است. مدل پیشنهادی ارائه‌شده برای ارزیابی کمی تاب‌آوری بر روی یک شبکه نمونه واقعی اعمال شده و در نهایت تأثیر منابع تولید پراکنده بر روی تاب‌آوری شبکه توزیع با استفاده از این شاخص مورد مطالعه قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: توزیع برق، شاخص تاب‌آوری، سیل، طوفان، منابع انرژی پراکنده.

۱. مقدمه

بروز شرایط نامساعد آب‌وهوایی و حوادث طبیعی همواره منجر به تحمیل خسارت عظیم مالی به صنایع و اقتصاد و خاموشی‌های گسترده در سطح شبکه‌های توزیع شده است. برای مثال، طوفان سندی در سال ۲۰۱۲ پس از برخورد با سواحل شرقی ایالت متحده باعث قطع برق ۷/۵ میلیون مشترک در ۱۵ ایالت از جمله واشنگتن‌دی‌سی شد [۱]. در تابستان بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱، در استرالیا آب‌گرفتگی و سیلاب وسیعی رخ داد که باعث آسیب‌دیدگی چندین تیر برق، ترانسفورماتور و سیم‌های هوایی شد. این آب‌گرفتگی باعث قطع برق حدود ۱۵۰۰۰۰ مشترک گردید [۲]. در سال ۲۰۰۸، کولاک شدیدی در چین رخ داد که باعث خرابی ۲۰۰۰ پست توزیع و ۸۵۰۰ برج انتقال شد. این حادثه منجر به قطع برق ۱۳ استان و ۱۷۰ شهر گردید [۳]. همچنین انتظار می‌رود تعداد قطعی‌های ناشی از شرایط آب‌وهوایی به دلیل تغییرات اقلیمی و در نتیجه افزایش تعداد و شدت حوادث غیرمترقبه از جمله طوفان و سیل افزایش یافته و تاب‌آوری شبکه قدرت بیش از پیش اهمیت پیدا کند [۴].

با توجه با اینکه هدف اصلی شرکت‌های برق تأمین انرژی مطمئن و پایدار برای مشتریان است، معرفی معیارهایی برای ارزیابی شبکه‌های توزیع در تأمین انرژی مستمر مشتریان از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. ارزیابی شبکه‌های توزیع به روش سنتی، به کمک معیارهای قابلیت اطمینان انجام می‌شود. با استفاده از این معیارها، سیستم‌های قدرت توانایی مواجهه با تهدیدها از پیش تعریف‌شده و همچنین تأمین توان با کیفیت بالا برای مصرف‌کنندگان را دارند. اما با توجه به اینکه حوادث رخ داده با احتمال وقوع پایین و تأثیر بالا، که سالانه خسارات بالایی وارد می‌کنند، سلامت شبکه توزیع را به صورت جدی تهدید می‌کنند و منجر به خاموشی‌های گسترده‌ای در چند دهه اخیر شده‌اند، ارزیابی تاب‌آوری شبکه و ارائه راهکارهایی برای بهبود آن در مقابله با شرایط نامساعد جوی و کاهش میزان تأثیرپذیری شبکه توزیع برق در مقابل رخداد حوادث قهری می‌بایستی جزء اولویت‌های مطالعات شبکه توزیع قرار گیرد [۱].

تاب‌آوری در سیستم قدرت به معنی توانایی سیستم در تحمل رویدادهای مختل‌کننده با تأثیر زیاد و احتمال وقوع کم، مانند حوادث شدید آب‌وهوایی می‌باشد که ممکن است شبکه تا به حال تجربه نکرده باشد و بازگشت سریع از این رویدادها و کسب دانش‌هایی به منظور تغییر در طراحی و بهره‌برداری شبکه، برای بازداشتن یا کم کردن تأثیر رویدادهای مشابه در آینده است [۵].

در شرایط عادی، هنگام وقوع خطا در شبکه‌های توزیع، معمولاً با جداسازی محل خطا به کمک کلیدهای دستی یا اتوماتیک و تغییر آرایش شبکه توزیع از طریق خطوط مانور، حداکثر بار ممکن بازیابی می‌شود.

ولی هنگامی که یک حادثه غیرمترقبه رخ می‌دهد، ممکن است پست‌های توزیع و شبکه تغذیه اصلی بدون برق شده و امکان تأمین بار از طریق شبکه اصلی امکان‌پذیر نباشد و یا اینکه به دلیل خسارات وارده به تجهیزات شبکه توزیع، نواحی ایزوله‌شده و بدون برق در شبکه توزیع ایجاد شود. بنابراین در این موارد روش‌های بازیابی سستی شبکه‌های توزیع نمی‌توانند تأمین انرژی مشترکین را بعد از وقوع حادثه تضمین کنند [۵].

با توجه به تجدید ساختار صنعت برق و گسترش و نفوذ منابع تولید پراکنده در سطح شبکه‌های توزیع، تولید انرژی در نزدیکی محل مصرف که به‌عنوان تولید پراکنده انرژی شناخته می‌شود، مزایای فراوانی برای مصرف‌کنندگان ایجاد می‌کند [۸۶]. در شبکه‌های توزیع مدرن با توجه به حضور روزافزون منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، یک روش جایگزین برای تأمین بار هنگام خرابی در سمت شبکه اصلی، استفاده از منابع تولید پراکنده است. به این ترتیب که هنگام وقوع خطای ناشی از حوادث غیرمترقبه در شبکه توزیع، با ایزوله کردن محل‌های خطا و با تأمین برق مشترکین با استفاد از منابع تولید پراکنده، می‌توان هزینه‌های مربوط به قطعی را به‌طور چشمگیری کاهش داد و تاب‌آوری شبکه را بهبود بخشید [۹].

مسئله اساسی این است که چگونه می‌توان میزان تأثیر منابع تولید پراکنده بر روی تاب‌آوری شبکه توزیع را با استفاده از شاخصی مناسب به صورت کمی مورد ارزیابی قرار داد تا در نهایت بتوان با استفاده از منابع مالی محدود و استفاده بهینه از ظرفیت منابع تولید پراکنده، در جهت داشتن یک شبکه توزیع تاب‌آور گام برداشت و تاب‌آوری شبکه توزیع را بهبود بخشید.

با توجه به اینکه تاب‌آوری یک مفهوم جدید در حوزه مطالعات سیستم‌های قدرت است، تاکنون مطالعات متعددی در این حوزه، به ارائه مفهوم تاب‌آوری و ارائه شاخص‌های کمی برای ارزیابی تاب‌آوری پرداخته‌اند.

در مرجع [۱۰] مبانی ارزیابی تاب‌آوری به همراه اجزای آن معرفی شده و تفاوت‌های آن با حوزه قابلیت اطمینان تشریح می‌گردد. در مرجع [۱۱] برای افزایش نرخ پایداری توزیع انرژی برق از یک سو و از سوی دیگر برای افزایش آسایش مردم سعی شده عوامل مؤثر بر تاب‌آوری شبکه‌های توزیع برق مورد بحث و تحلیل قرار گیرد. در مرجع [۱۲] به بررسی تاب‌آوری شبکه توزیع برق تهران بزرگ در مقابل زلزله و با استفاده از مقاوم‌سازی پست‌های زمینی پرداخته شده است.

در مراجع [۱۳-۱۴] برای روشن‌تر شدن مفهوم تاب‌آوری شبکه قدرت با تمرکز بر تأثیر حوادث غیرمترقبه، شاخص‌های کمی برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه فرمول‌بندی شده است. در مرجع [۱۵] با استفاده از

شاخص‌های قابلیت اطمینان (LOLP) و (ENS) و اصلاح و بازبینی این شاخص‌ها، برای مطالعات تاب‌آوری استفاده گردیده و در جهت بهبود تاب‌آوری شبکه تلاش می‌شود. در مرجع [۱۶] با مدل‌سازی ریاضی رویدادهای شدید آب‌وهوایی و مشخص کردن خطوط آسیب‌پذیر در شبکه قدرت به معرفی سناریوهای شکست با احتمال وقوع بالا پرداخته شده و با استفاده از شاخص شدت ریسک (SRI) به ارزیابی تاب‌آوری پرداخته شده است. و با راهکار تبدیل شبکه قدرت به جزایر پایدار در جهت بهبود تاب‌آوری شبکه تلاش می‌گردد. کفایت منابع به‌عنوان یکی دیگر از عوامل مهم تاب‌آوری شبکه در مراجع [۱۷-۱۸] مورد بحث قرار گرفته است، که در آن‌ها یک رویکرد قطعی بر اساس میزان کفایت منابع برای بررسی قابلیت انعطاف‌پذیری سیستم در برابر یک رویداد شدید اتخاذ می‌شود.

در مرجع [۱۹] با در نظر گرفتن اولویت برای بارها، خطوط بحرانی در شبکه توزیع شناسایی شده و در جهت مقاوم‌سازی این خطوط با استفاده از مدل سه‌سطحی و در نتیجه بهبود تاب‌آوری شبکه در مقابل رویدادهای شدید آب‌وهوایی گام برمی‌دارد.

در مرجع [۲۰] پس از شناسایی اجزای بحرانی شبکه توزیع با معیار N-K با استفاده از مدل مهاجم-مدافع به مقاوم‌سازی اجزای شبکه برای بهبود تاب‌آوری پرداخته شده است.

در مراجع [۲۱-۲۲] روش بهره‌برداری و برنامه‌ریزی برای تشکیل چندین ریزشبکه در شبکه توزیع موجود به منظور بازیابی بارهای بحرانی بعد از وقوع خطا با استفاده از منابع تولید پراکنده موجود پیشنهاد شده است. اما شاخصی برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع ارائه نشده و به جای آن از شاخص‌های قابلیت اطمینان برای ارزیابی شبکه توزیع استفاده شده است.

مهم‌ترین نقطه ضعف مطالعات فوق این است که شاخص‌های ارائه شده برای ارزیابی تاب‌آوری تنها به موضوع تاب‌آوری شبکه در قبال تأمین بار پرداخته و تاب‌آوری منابع تولید پراکنده نادیده گرفته شده است. بنابراین در تکمیل مطالعات قبلی، مهم‌ترین دستاوردهای این مقاله شامل موارد زیر می‌گردد:

❖ ارائه شاخصی جدید برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع بر اساس تجمیع شاخص‌های تاب‌آوری شبکه در قبال تأمین بار و تاب‌آوری منابع تولید پراکنده؛

❖ مقایسه تاب‌آوری یک شبکه توزیع واقعی در دو حالت بدون در نظر گرفتن اولویت بار و با در نظر گرفتن اولویت بار با استفاده

شاخص ارائه شده؛

❖ تأثیر منابع تولید پراکنده و نحوه اثرگذاری ظرفیت و مکان نصب این منابع بر روی تاب‌آوری شبکه توزیع با استفاده از شاخص ارائه شده. ادامه مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است. در بخش دوم این مقاله به ارائه مفهوم تاب‌آوری و مشخصه‌های آن و تفاوت‌های آن با حوزه قابلیت اطمینان پرداخته شده است. در بخش سوم، نحوه مدل‌سازی حوادث طبیعی متداول مانند سیل و طوفان و ارزیابی تأثیر این رویدادها بر روی تاب‌آوری شبکه‌های توزیع ارائه شده است. در بخش چهارم، با معرفی شاخص‌های تاب‌آوری شبکه در قبال تأمین بار و تاب‌آوری منابع تولید پراکنده، شاخصی جدید برای محاسبه کمی تاب‌آوری شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده معرفی شده است. در بخش پنجم، به ارزیابی تاب‌آوری یک شبکه توزیع واقعی در دو حالت بدون در نظر گرفتن اولویت بار و با در نظر گرفتن اولویت بار پرداخته و تأثیر منابع تولید پراکنده و نحوه اثرگذاری ظرفیت و مکان نصب این منابع بر روی تاب‌آوری شبکه توزیع با استفاده از این شاخص مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در پایان، جمع‌بندی از مطالعات انجام شده ارائه می‌شود.

۲. تاب‌آوری سیستم قدرت و تفاوت آن با قابلیت اطمینان

تاب‌آوری را می‌توان به صورت توانایی سیستم برای حفظ یک سطح قابل قبول از عملکرد در برابر یک اغتشاش شدید و بازگشت در یک دوره زمانی مناسب تعریف کرد. این مفهوم کاملاً مجزا از مفهوم قابلیت اطمینان است. قابلیت اطمینان یک سنجه احتمالاتی برای توانایی سیستم در انجام عملکرد مورد انتظار تحت شرایط و دوره‌های زمانی مشخص است [۲۳].

در جدول (۱) سایر تفاوت‌های حوزه قابلیت اطمینان با حوزه تاب‌آوری به صورت خلاصه ارائه شده است [۲۴-۲۷].

جدول (۱): تفاوت‌های مطالعات تاب‌آوری با قابلیت اطمینان

حوزه تاب‌آوری	حوزه قابلیت اطمینان
بررسی وقفه‌های فاجعه‌بار	بررسی وقفه‌های معمول در شبکه
آسیب‌دیدگی اجزای متعددی از شبکه	مطالعه وقوع یک خطای مشخص در شبکه
عدم لزوم بازیابی تمام بارها	تلاش برای بازیابی تمام بارها
تعداد زیادی از مشتریان تحت تأثیر قرار می‌گیرند.	تعداد کمی از مشتریان تحت تأثیر قرار می‌گیرند.
منابع قدرت ممکن است در دسترس یا قابل دسترس نباشند.	منابع قدرت در دسترس و یا قابلیت دسترسی به آن‌ها وجود دارد.
امکانات سیستم انتقال و توزیع ممکن است آسیب‌دیده باشد.	امکانات سیستم انتقال و توزیع در دسترس هستند.
پیچیده بودن تعمیرات و ترمیم	ساده بودن تعمیر و ترمیم

1. Loss Of Load Probability
2. Energy Not Supplied
3. Severity Risk Index

۳. مدل‌سازی حوادث طبیعی

بلایای طبیعی معمولاً رویدادهای بسیار نامطمئن هستند. بنابراین تخمین، مدل‌سازی و پیش‌بینی آن‌ها دشوار است. بسیاری از تلاش‌ها برای افزایش آگاهی ما از بلایای طبیعی بر اساس داده‌های تاریخی و آموزش‌هایی که یاد گرفته‌ایم پایه‌گذاری شده است. پیش‌بینی یک فاجعه طبیعی اغلب بر اساس مدل‌های آماری یا مدل‌های شبیه‌سازی شده بررسی می‌شود [۲۰].

برای ارزیابی خسارت ناشی از رویدادهای آب‌وهوایی بر روی شبکه توزیع، باید تأثیر این رویدادها بر روی تجهیزات شبکه توزیع زده شود. برای نشان دادن احتمال شکست تجهیزات شبکه توزیع در مقابل رویدادهای آب‌وهوایی، می‌توان از منحنی توزیع لگاریتمی نرمال استفاده کرد. با استفاده از این منحنی‌ها که به منحنی شکنندگی معروف است [۱۶]، احتمال شکست تجهیز در قبال یک سطح مشخصی از رویداد (سرعت باد یا سیلاب) به دست می‌آید. منحنی شکنندگی عمومی نشان داده شده در شکل (۲)، احتمال شکست اجزای شبکه بسته به شدت رویداد آب‌وهوایی را نشان می‌دهد.



شکل (۲): منحنی شکنندگی تجهیز [۱۶]

منحنی‌های شکنندگی در مطالعاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند که هدف ارزیابی تأثیر یک رویداد آب‌وهوایی یا یک خطر طبیعی بر روی تاب‌آوری شبکه‌های انتقال یا توزیع [۱۶] است.

با داشتن مشخصات آب‌وهوایی منطقه مورد مطالعه (برای مثال سرعت باد و شدت سیلاب) و همچنین وابستگی احتمال شکست تجهیزات شبکه با شدت رویداد آب‌وهوایی که می‌توان از روی سوابق آماری استخراج کرد، منحنی‌های شکنندگی برای اجزای شبکه به دست می‌آیند. این منحنی‌ها به ما کمک می‌کنند که اجزای از شبکه که در معرض خطرات بالایی ناشی از رویدادهای آب‌وهوایی هستند، شناسایی شده و در ارزیابی تاب‌آوری مورد توجه قرار گیرند. با پیروی از این رویکرد، می‌توان تأثیر رویداد آب‌وهوایی در وضعیت عملیاتی هر یک از اجزای شبکه را مدل‌سازی کرد.

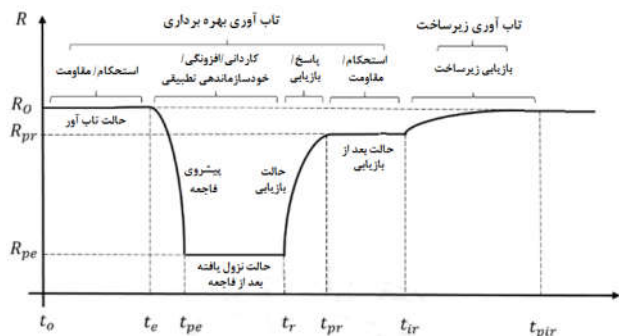
در این مقاله، حوادث طبیعی متداول بر روی شبکه‌های توزیع، یعنی طوفان و سیلاب مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌طور خلاصه مراحل مدل‌سازی تأثیرات طوفان و سیلاب بر روی تجهیزات شبکه

به‌منظور نمایش سطح تاب‌آوری شبکه قدرت در مواجهه با یک حادثه غیرمترقبه، منحنی تاب‌آوری وضعیت سیستم در طی یک رویداد به‌صورت تابعی از زمان وقوع رویداد در شکل (۱) رسم شده است [۱۶]. در این شکل، R سنج‌های مناسب به‌منظور نشان دادن سطح تاب‌آوری سیستم قدرت است. این منحنی شامل مشخصه‌های اصلی تاب‌آوری است که سیستم قدرت به‌منظور فائق آمدن بر یک حادثه غیرمترقبه باید داشته باشد.

پیش از وقوع رویداد در زمان t_0 سیستم قدرت باید استحکام و نیرومندی کافی برای ایستادن در برابر شوک اولیه را داشته باشد. به‌عبارت دیگر یک سیستم قدرت با طراحی مناسب باید تاب‌آوری کافی به‌منظور فائق آمدن بر حادثه را داشته باشد. که در شکل (۱) با R_0 نشان داده شده است.

هنگام وقوع حادثه غیرمترقبه سیستم وارد حالت نزول یافته بعد از حادثه می‌شود. تاب‌آوری سیستم در این مرحله به‌شدت به خطر می‌افتد (R_{pe}). کاردانی، افزونگی و خودسازمان‌دهی تطبیقی مشخصه‌های کلیدی تاب‌آوری در این مرحله از حادثه می‌باشند؛ زیرا این مشخصه‌ها انعطاف‌پذیری را که برای تطبیق پیدا کردن سیستم با شرایط پیش‌آمده ضروری است، فراهم می‌کنند. این مشخصه‌ها به حداقل کردن تأثیر حادثه یا نزول سطح تاب‌آوری سیستم قبل از شروع فرایند بازیابی در زمان t_r کمک می‌کنند [۱۶].

در ادامه، سیستم وارد حالت بازیابی می‌شود که در آن باید ظرفیت ضروری برای شروع یک پاسخ و بازیابی سریع تا رسیدن به حالتی تاب‌آور با حداکثر سرعت ممکن، موجود باشد. سطح تاب‌آوری بعد از بازیابی اولیه می‌تواند کمتر یا مساوی سطح تاب‌آوری قبل از حادثه باشد. پس از بازیابی اولیه، سیستم وارد مرحله بازیابی کامل برای رسیدن به حالت قبل از وقوع حادثه می‌شود. زمان مورد نیاز برای بازیابی کامل سیستم، وابسته به شدت حادثه و مشخصه‌های تاب‌آوری سیستم، قبل و در طول وقوع حادثه است [۱۶].



شکل (۱): منحنی تاب‌آوری سیستم قدرت در مواجهه با یک حادثه غیرمترقبه [۱۶]

توزیع را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- ❖ استفاده از اطلاعات آماری برای پیش‌بینی مسیر طوفان و سیلاب، زیرا این رویدادها اغلب دنبال مسیری هستند که از آن تشکیل شده‌اند.
- ❖ تقسیم‌بندی شبکه توزیع به چند منطقه آب‌وهوایی بر اساس مسیر طوفان و سیلاب و با توجه به مشخص بودن سرعت باد و سیلاب در هر ناحیه.
- ❖ استفاده از منحنی‌های شکنندگی برای محاسبه احتمال شکست تجهیزات در نواحی مختلف آب‌وهوایی فوق.

۴. مدل پیشنهادی ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع

هدف ارزیابی تاب‌آوری این است که تصمیمات و اقدامات آگاهانه برای کاهش خطر اتخاذ شود. در این مقاله، این خطر توسط رویدادهای شدید آب‌وهوایی از جمله طوفان و سیلاب معرفی شده است که به شبکه توزیع مورد مطالعه اعمال خواهند شد.

در این مقاله، شاخص جدید (DRI) برای ارزیابی تاب‌آوری در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. مقدار این شاخص که از دو قسمت تشکیل شده، با رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد. ضرورت استفاده از این معیار در نظر گرفتن شاخص‌های تاب‌آوری شبکه در قبال تأمین بار و شاخص تاب‌آوری منابع تولید پراکنده در کنار یکدیگر برای به‌دست‌آوردن تاب‌آوری کل شبکه است.

$$DRI = DRI_{load} - GRI_{DG} \quad (1)$$

در رابطه فوق، DRI_{load} نشان‌دهنده تاب‌آوری شبکه در قبال تأمین بار است که بیان‌کننده مقدار بار از دست رفته در شبکه توزیع در هنگام وقوع حوادث غیرمترقبه می‌باشد. در واقع هرچه مقدار این شاخص کمتر باشد، تاب‌آوری شبکه در قبال تأمین بار بیشتر خواهد بود.

با توجه به حضور منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع و با توجه به اینکه این منابع به‌عنوان جایگزین منبع تغذیه اصلی در هنگام وقوع حوادث غیرمترقبه می‌باشند، در دسترس بودن خود این منابع در هنگام وقوع حوادث از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و بر روی تاب‌آوری شبکه تأثیرگذار خواهد بود. در بسیاری از موارد، در هنگام وقوع حادثه غیرمترقبه ممکن است بخشی از شبکه سالم مانده باشد و بتوان بارهایی را تغذیه کرد اما به دلیل عدم در دسترس بودن تولید منابع تولید پراکنده امکان تغذیه بار فراهم نمی‌شود. شاخص GRI_{DG} که نشان‌دهنده مقدار تولید در دسترس منابع تولید پراکنده است، به‌عنوان شاخص تاب‌آوری منابع تولید پراکنده در هنگام وقوع حوادث

غیرمترقبه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع هرچه مقدار این شاخص بزرگ‌تر باشد، تاب‌آوری شبکه بیشتر است. بنابراین به‌منظور بررسی تأثیر منابع تولید پراکنده بر روی تاب‌آوری شبکه توزیع، باید تاب‌آوری شبکه در قبال تأمین بار و تاب‌آوری منابع تولید پراکنده به صورت مستقل از هم محاسبه و در نهایت شاخص تاب‌آوری کل شبکه در حضور این منابع به دست آید. با توجه به اینکه شاخص GRI_{DG} متناسب با مقدار بار از دست رفته و شاخص DRI_{load} متناسب با مقدار تولید در دسترس در هنگام وقوع حوادث می‌باشند و هرچه مقدار شاخص تاب‌آوری تولید بیشتر و شاخص ریسک شبکه در قبال تأمین بار کمتر باشد، تاب‌آوری کل شبکه بهبود می‌یابد، این دو شاخص در جهت عکس یکدیگر عمل کرده و برای محاسبه تاب‌آوری شبکه باید این دو شاخص را از یکدیگر تفریق نمود. در رابطه (۱) هرچه مقدار شاخص DRI کمتر باشد، تاب‌آوری شبکه بیشتر خواهد بود. در ادامه به نحوه محاسبه این شاخص‌ها پرداخته شده است.

۱.۴. شاخص تاب‌آوری شبکه در قبال تأمین بار

برای محاسبه شاخص DRI_{load} از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$DRI_{load} = \sum_{sec=1}^k P_{sec}(W, F) \times LS_{sec} \times S_{sec} \quad (2)$$

در این رابطه، $P_{sec}(W, F)$ احتمال شکست سکشن (نقاطی از شبکه توزیع هستند که هادی در آن محل برش خورده باشد)، در اثر وقوع طوفان یا سیلاب می‌باشد و LS_{sec} مقدار بار از دست داده شده در صورت شکست سکشن و S_{sec} ضریب حساسیت که بر اساس ارزش یا اولویت بار به سکشن مربوطه داده می‌شود و k تعداد کل سکشن‌های شبکه توزیع مورد مطالعه می‌باشد.

احتمال شکست یک سکشن در اثر وقوع طوفان یا سیلاب از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$P_{sec}(W, F) = P_{sec}(W) + P_{sec}(F) - P_{sec}(W)P_{sec}(F) \quad (3)$$

که در آن $P_{sec}(F)$ احتمال شکست سکشن بر اثر وقوع سیلاب و $P_{sec}(W)$ احتمال شکست سکشن ناشی از وقوع طوفان است.

تأثیر عمده خطر سیلاب مربوط به پایه‌های شبکه توزیع است. در واقع برخورد سیلاب به پایه‌های شبکه توزیع می‌تواند منجر به شکست پایه‌ها و در نتیجه شکست سکشن مربوطه شود. برای پایه‌هایی از شبکه توزیع که در مجاورت نواحی ساحلی یا در مسیر رودخانه‌ها قرار دارند، یکی از مهم‌ترین عوامل شکست سکشن خطر وقوع سیلاب است. بنابراین برای پایه‌های قرارگرفته در این نواحی برای ارزیابی تاب‌آوری باید از مدل مناسبی برای وقوع سیلاب استفاده کرد. برای این کار ابتدا با استفاده از اطلاعات آماری از سوابق گذشته منحنی شکنندگی مربوط به

منحنی شکنندگی مربوط به پایه و مقدار $P_{sec}(W)$ از روی منحنی شکنندگی مربوط به هادی شبکه توزیع به دست می‌آید.

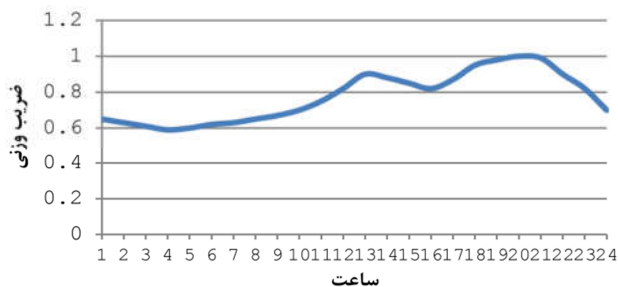
مقدار LS_{sec} بر این اساس به دست می‌آید که با از دست دادن هر سکشن مقداری بار دچار خاموشی می‌شود. در واقع مجموع همه بارهایی که در اثر از دست دادن سکشن مشخص دچار خاموشی شده‌اند، بیانگر LS_{sec} می‌باشد. مقدار LS_{sec} با رابطه (۷) و (۸) به دست می‌آید.

$$LS_{sec} = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^n Load(t)_{l,sec}}{T} \quad (7)$$

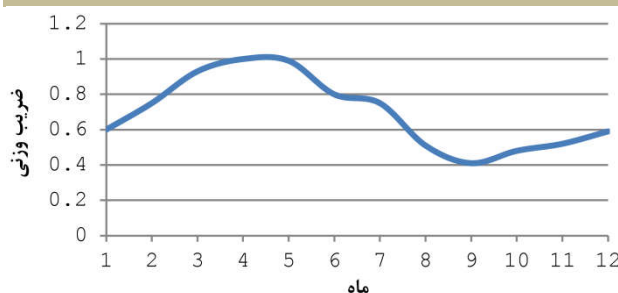
$$Load(t)_{l,sec} = w(h) \times w(m) \times Load(p)_{l,sec} \quad (8)$$

که در آن، $Load(t)_{l,sec}$ مقدار بار l ام در سکشن در زمان t ، n تعداد بارهایی که در اثر از دست دادن سکشن دچار خاموشی شده‌اند و T دوره مورد مطالعه پس از وقوع حادثه است.

شرایط آب‌وهوایی و حوادث فصلی، الگوی مصرف بار سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهند. خوشبختانه، بسیاری از این وقایع به صورت تکراری برای یک سال اتفاق می‌افتند، بنابراین رفتار بارهای سیستم قدرت داری یک الگوی مکرر است. در این مطالعه، برای ساخت یک مدل بار، اطلاعات به صورت عامل وزن ماهانه و ساعتی مدل شده‌اند و برای محاسبه میزان بار در زمان مورد نظر می‌توان از رابطه (۸) استفاده کرد. در این رابطه، ضریب وزنی ساعتی و $w(m)$ ضریب وزنی ماهانه و $Load(p)_{l,sec}$ بار پیک l ام در سکشن است. شکل‌های (۳) تا (۵) به ترتیب منحنی ساعتی، منحنی ماهانه و بار پیک باس‌های شبکه را نشان می‌دهند.



شکل (۳): منحنی ضریب ساعتی بار



شکل (۴): منحنی ضریب ماهانه بار

سیلاب، که بیانگر احتمال شکست پایه برحسب سرعت سیلاب است، برای منطقه مورد مطالعه استخراج گردیده و سپس برای پایه‌هایی که در معرض خطر سیلاب قرار دارند، از روی منحنی شکنندگی مربوطه احتمال شکست پایه در اثر وقوع سیلاب به دست می‌آید. و در نهایت با استفاده از رابطه (۴) می‌توان احتمال شکست سکشن بر اثر وقوع سیلاب را به صورت تابعی از سرعت سیلاب محاسبه کرد.

$$P_{sec}(F) = 1 - (1 - P_{Tsingle}(F))^{NTF} \quad (4)$$

که در آن، $P_{Tsingle}(F)$ احتمال شکست هر پایه در اثر وقوع سیلاب به صورت تابعی از سرعت سیلاب و NTF تعداد پایه‌هایی از سکشن مورد نظر است که در معرض خطر سیلاب قرار دارند. در صورتی که شبکه مورد مطالعه در معرض وقوع سیلاب نباشد بر اساس رابطه (۳) احتمال شکست سکشن تنها به حوادث ناشی از بادهای شدید و طوفان وابسته خواهد بود.

بر اساس [۱] حدود ۹۰ درصد خروج تجهیزات در شبکه مربوط به حوادث ناشی از بادهای شدید و طوفان می‌باشد. تأثیرات ناشی از بادهای شدید و طوفان بر روی دو قسمت عمده یعنی هادی‌ها و پایه‌های شبکه توزیع تمرکز دارد. و شکست هر سکشن در اثر وقوع حوادث مربوط به باد و طوفان به دو عامل شکست پایه و شکست هادی در اثر وقوع این حوادث بستگی دارد.

از آنجایی که در هر سکشن از شبکه توزیع چندین پایه می‌تواند حضور داشته باشد که به صورت سری به هم وصل می‌باشند، بنابراین شکست هر پایه به تنهایی منجر به شکست سکشن مربوطه خواهد شد. با توجه به مستقل بودن شکست پایه‌ها از یکدیگر و با فرض یکسان بودن احتمال شکست پایه‌ها در یک سکشن، از رابطه (۵) می‌توان برای محاسبه احتمال شکست سکشن ناشی از شکست پایه استفاده کرد:

$$P_{secT}(W) = 1 - (1 - P_{Tsingle}(W))^{NT} \quad (5)$$

که در آن، $P_{secT}(W)$ احتمال شکست سکشن در اثر وقوع طوفان، ناشی از شکست پایه به صورت تابعی از سرعت باد و $P_{Tsingle}(W)$ احتمال شکست هر پایه به تنهایی به صورت تابعی از سرعت باد و NT تعداد پایه‌های موجود در سکشن است. با توجه به اینکه شکست پایه یا شکست هادی منجر به از دست دادن سکشن می‌شود، احتمال شکست یک سکشن ناشی از وقوع طوفان را می‌توان با رابطه (۶) بیان کرد.

$$P_{sec}(W) = P_{secC}(W) + P_{secT}(W) - P_{secC}(W)P_{secT}(W) \quad (6)$$

که در آن، $P_{secC}(W)$ احتمال شکست سکشن ناشی از شکست هادی به صورت تابعی از سرعت باد می‌باشد. مقدار $P_{Tsingle}(W)$ از روی

استفاده کرد.

$$GRI_{DG} = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{k \in bus} P_{DG}^k A_{DG}^k(t) \sum_{n \in bus} R_{k-n}}{T} \quad (9)$$

$$R_{k-n} = 1 - P_{k-n}(W, F) \quad (10)$$

$$P_{k-n}(W, F) = \sum_{sec \in (k-n)} P_{sec}(W, F) \quad (11)$$

در رابطه (۹)، مقدار نامی توان تولیدی منبع تولید پراکنده و مقدار $A_{DG}^k(t)$ ضریب در دسترس بودن توان تولیدی منبع تولید پراکنده در باس k ام در زمان t مورد مطالعه می‌باشند، که وابسته به نوع منبع و شرایط محیطی در زمان وقوع حادثه است و T دوره مورد مطالعه پس از وقوع حادثه می‌باشد.

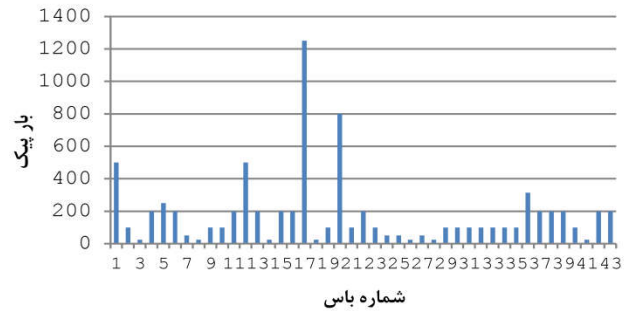
در رابطه (۱۰)، مقدار R_{k-n} میزان در دسترس پذیر بودن شبکه بین باس k و n و $P_{k-n}(W, F)$ احتمال شکست شبکه بین باس k و n می‌باشد، که از مجموع احتمال شکست همه سکشن‌های بین این دو باس طبق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

۵. مطالعات عددی

۵.۱. شبکه مورد مطالعه

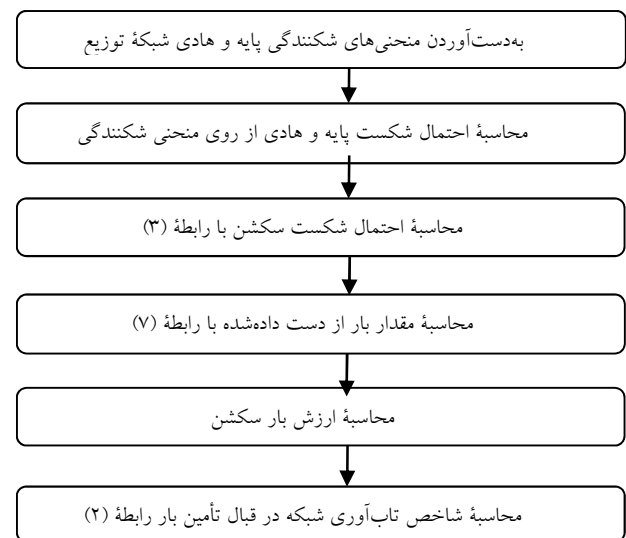
برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی ارائه شده در ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع، مدل پیشنهادی فوق بر روی یک شبکه توزیع واقعی اعمال شده است. این شبکه همان طور که در شکل (۷) نشان داده شده، یک شبکه توزیع KV ۲۰ و ۴۴ با سه مربوط به فیدر مرمر مربوط به شبکه توزیع برق خراسان جنوبی است. این فیدر از پست فوق توزیع KV ۱۳۲ شروع شده و دارای ۴۳ نقطه بار در طول مسیر و در مجموع دارای بار کلی ۷۷۹۰ KVA می‌باشد. نقطه A0 به‌عنوان باس مرجع و شروع فیدر که در محل پست فوق توزیع قرار دارد و نقاط A1 تا A24 محل‌های انشعاب‌گیری از فیدر اصلی هستند. اطلاعات مربوط به نقاط بار و سکشن‌های شبکه در جدول (۲) آورده شده است.

برای مدل‌سازی اثرات طوفان و سیلاب، شبکه توزیع مورد مطالعه بر اساس مسیر طوفان که از روی پروفیل‌های باد در منطقه مورد مطالعه قابل استخراج و محل‌های با احتمال وقوع سیلاب با توجه به مکان‌های جغرافیایی پایه‌های خطوط برق، به ۵ ناحیه مطابق شکل (۸) تقسیم‌بندی شده است.



شکل (۵): مقدار بار پیک باس‌ها

هنگامی که شبکه در معرض یک رویداد شدید مانند سیل و طوفان قرار می‌گیرد، باید بارهایی که دارای حساسیت بالایی در مقابل خاموشی هستند در اولویت برق‌دار ماندن قرار گیرند. بر این اساس بارها با توجه به حساسیت آن‌ها نسبت به خاموشی به دسته‌های مختلف تقسیم‌بندی شده، که ضریب حساسیت آن‌ها k_{sec} با یکدیگر متفاوت است. مراحل روش پیشنهادی برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع در قبال تأمین بار را می‌توان به صورت شکل (۶) خلاصه کرد.



شکل (۶): مراحل ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع در قبال تأمین بار

۲.۴. شاخص تاب‌آوری منابع تولید پراکنده

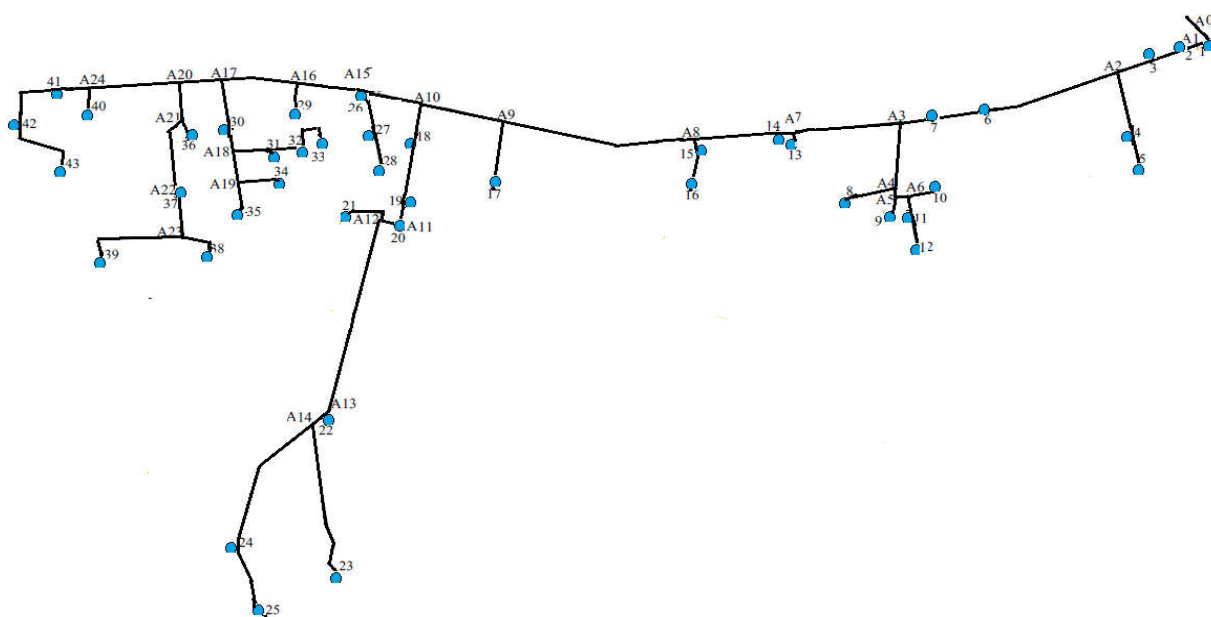
از آنجایی که منابع تولید پراکنده یک روش جایگزین برای تأمین مصرف‌کنندگان هنگام خرابی در سمت شبکه اصلی هستند، این منابع در هنگام وقوع حوادث باید در دسترس و ایمن بوده تا توانایی آماده کردن شبکه برای پاسخ سریع به حوادث غیرمترقبه و در نتیجه بهبود تاب‌آوری شبکه را داشته باشند. بنابراین تاب‌آوری منابع تولید پراکنده که بیان‌کننده در دسترس بودن تولید این منابع است، باید در تاب‌آوری شبکه لحاظ شود [۱۷].

برای محاسبه تاب‌آوری این منابع می‌توان از روابط (۹) تا (۱۱)

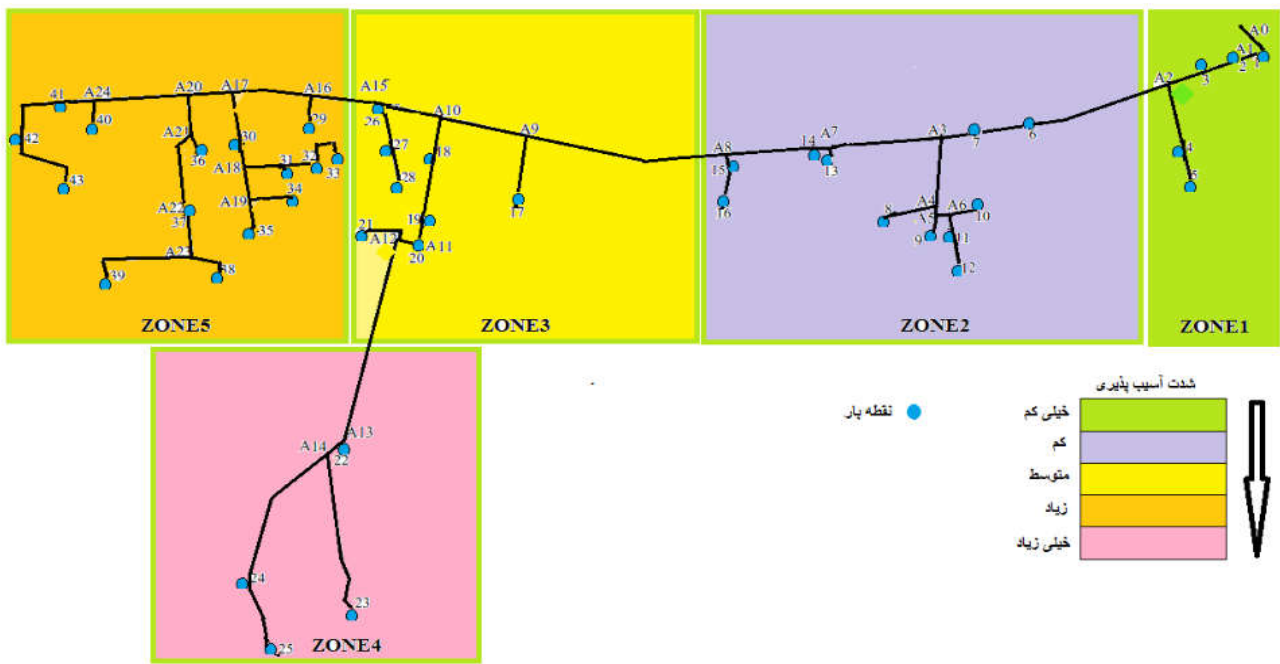
جدول (۲): اطلاعات سکشن‌ها و نقاط بار

اطلاعات سکشن‌ها											
سکشن	طول (m)	تعداد تیر	سکشن	طول (m)	تعداد تیر	سکشن	طول (m)	تعداد تیر	سکشن	طول (m)	تعداد تیر
A0-A1	۱۵۵	۳	A13-23	۶۸	۵	A12-13	۲۹۸	۱۲	A18-A19	۲۴۰	۴
A1-2	۲۹	۱	A13-A14	۱۴۵	۱۳	A3-A7	۷۵۶	۱۳	A19-35	۲۸۲	۵
A1-3	۶۰	۱	A14-24	۱۱۴۰	۲	A7-14	۱۲۱	۲	A19-36	۲۲۴	۴
3-4	۵۶۴	۱۰	A14-25	۱۱۰۶	۲	A7-15	۷۸	۲	A17-A20	۳۲۰	۶
4-A2	۲۶۸	۵	25-26	۵۶۸	۱۲	15-A8	۶۹۲	۱۲	A20-A21	۳۰۲	۵
A2-5	۵۰۲	۹	A10-27	۳۷۰	۲	A8-16	۶۷	۲	A21-37	۵۹	۱
5-6	۲۰۲	۴	27-A15	۲۰	۶	16-17	۳۱۲	۶	A21-A22	۵۷۴	۱۰
A2-7	۹۶۱	۱۶	A15-28	۳۱۶	۲۲	A8-A9	۱۳۷۵	۲۲	A22-38	۳۱	۱
7-8	۳۷۵	۷	28-29	۲۳۹	۹	A9-18	۵۰۰	۹	A22-A23	۳۷۴	۷
8-A3	۲۳۶	۴	A15-A16	۴۹۶	۱۰	A9-A10	۵۹۰	۱۰	A23-39	۲۴۴	۴
A3-A4	۵۰۴	۵	A16-30	۱۷۴	۵	A10-19	۲۸۰	۵	A23-40	۷۴۷	۱۳
A4-9	۳۲۳	۶	A16-A17	۵۲۷	۹	19-20	۴۹۹	۹	A20-A24	۴۶۴	۸
A4-A5	۵۷	۱	A17-31	۳۷۲	۳	20-A11	۱۵۳	۳	A24-41	۱۵۸	۳
A5-10	۸۶	۲	31-A18	۸۱	۱	A11-21	۳۰	۱	A24-42	۲۶۰	۵
A5-A6	۸۷	۲	A18-32	۲۵۵	۳	A11-A12	۱۴۱	۳	42-43	۴۶۲	۸
A6-11	۱۹۴	۴	32-33	۲۴۷	۷	A12-22	۳۹۰	۷	43-44	۵۱۸	۹
A6-12	۱۰۱	۲	33-34	۴۶۹	۲۵	A12-A13	۱۴۴۶	۲۵			

اطلاعات نقاط بار							
شماره گره	بار (KVA)	شماره گره	بار (KVA)	شماره گره	بار (KVA)	شماره گره	بار (KVA)
۱	۵۰۰	۱۲	۵۰۰	۲۳	۱۰۰	۳۴	۱۰۰
۲	۱۰۰	۱۳	۲۰۰	۲۴	۵۰	۳۵	۱۰۰
۳	۲۵	۱۴	۲۵	۲۵	۵۰	۳۶	۳۱۵
۴	۲۰۰	۱۵	۲۰۰	۲۶	۲۵	۳۷	۲۰۰
۵	۲۵۰	۱۶	۲۰۰	۲۷	۵۰	۳۸	۲۰۰
۶	۲۰۰	۱۷	۱۲۵۰	۲۸	۲۵	۳۹	۲۰۰
۷	۵۰	۱۸	۲۵	۲۹	۱۰۰	۴۰	۱۰۰
۸	۲۵	۱۹	۱۰۰	۳۰	۱۰۰	۴۱	۲۵
۹	۱۰۰	۲۰	۸۰۰	۳۱	۱۰۰	۴۲	۲۰۰
۱۰	۱۰۰	۲۱	۱۰۰	۳۲	۱۰۰	۴۳	۲۰۰
۱۱	۲۰۰	۲۲	۲۰۰	۳۳	۱۰۰		



شکل (۷): شبکه توزیع ۴۴ باسه مورد مطالعه



شکل (۸): تقسیم‌بندی شبکه توزیع به چند ناحیه آب‌وهوایی

جدول (۳): مشخصات نواحی مورد مطالعه

شماره ناحیه	حداکثر سرعت باد (m/sec)	سرعت سیلاب (m/sec)
۱	۲۶	-
۲	۲۸	-
۳	۳۰	-
۴	۲۸	۲۰
۵	۳۶	-

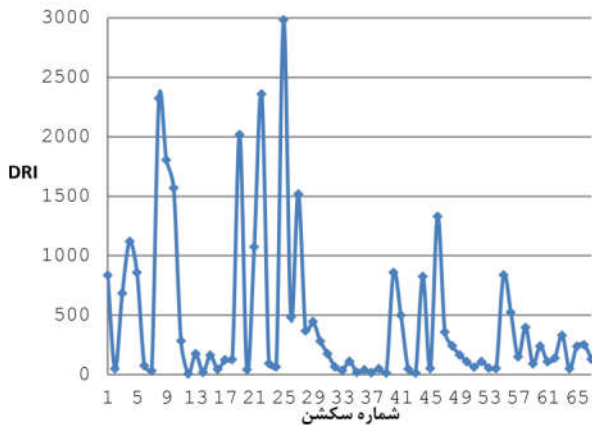
چهارچوب مدل پیشنهادی بر روی تأثیرات شدید طوفان و سیلاب بر روی پایه‌ها و هادی‌های شبکه توزیع تمرکز دارد. با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده از شرایط آب‌وهوایی نواحی مورد مطالعه و وابستگی احتمال شکست تجهیزات شبکه با شدت رویداد آب‌وهوایی، که می‌توان از روی سوابق و بررسی یک مطالعه آماری مربوط به احتمال شکست تجهیزات با سرعت باد و سیلاب در منطقه مورد مطالعه استخراج کرد، منحنی‌های شکنندگی را می‌توان به دست آورد. شکل (۹) منحنی‌های شکنندگی پایه در مقابل باد، هادی در مقابل باد و پایه در مقابل سیلاب را برای منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

در اینجا فرض بر این است که پایه‌های شبکه توزیع از نوع بتنی چهارگوش بوده و به‌ازای هر ۶۰ متر یک پایه وجود دارد، که در طول یک سکشن آن‌ها به‌صورت سری متصل می‌شوند، بنابراین فروریختن یک پایه به‌تنهایی منجر به شکست کل سکشن خواهد شد.

با فرض یکسان بودن شرایط آب‌وهوایی در یک ناحیه مشخص کلیه اجزای شبکه توزیع درون هر ناحیه در معرض شرایط مشابه آب‌وهوایی قرار دارند و این به این معنی است که شکنندگی اجزای شبکه توزیع از جمله پایه‌ها و هادی‌ها در هر ناحیه یکسان است.

بر اساس این تقسیم‌بندی ناحیه ۱ بخشی از شبکه توزیع را پوشش می‌دهد که در داخل شهر قرار داشته و بدلیل محصور بودن و وجود بافت شهری و ساخت و سازهای اطراف شبکه، باد و طوفان به‌طور کلی تأثیر کمی بر روی هادی‌ها و پایه‌های شبکه توزیع می‌گذارد. ناحیه ۲ مربوط به بخشی از شبکه که از یک طرف محصور بوده و تأثیر باد و طوفان نسبت به حالت قبل بیشتر می‌باشد. در ناحیه ۳ شبکه از هیچ سمتی محصور نبوده و کاملاً در فضای باز قرار دارد. بنابراین در این ناحیه تأثیر باد و طوفان زیاد می‌باشد. ناحیه ۴ مربوط به قسمتی از شبکه توزیع است که پایه‌های شبکه در رودخانه واقع گردیده است و برای این ناحیه تأثیر باد و طوفان ناچیز بوده اما وقوع سیلاب می‌تواند به‌طور جدی بر روی پایه‌های شبکه تأثیر گذار باشد.

در ناحیه ۵ پایه‌های شبکه در نواحی کوهستانی قرار گرفته بنابراین خطوط برق در این ناحیه به‌طور جدی از تأثیرات طوفان در طول دوره رنج خواهند برد. اطلاعات مربوط به حداکثر سرعت باد و سیلاب در نواحی مورد مطالعه در جدول (۳) آورده شده است.

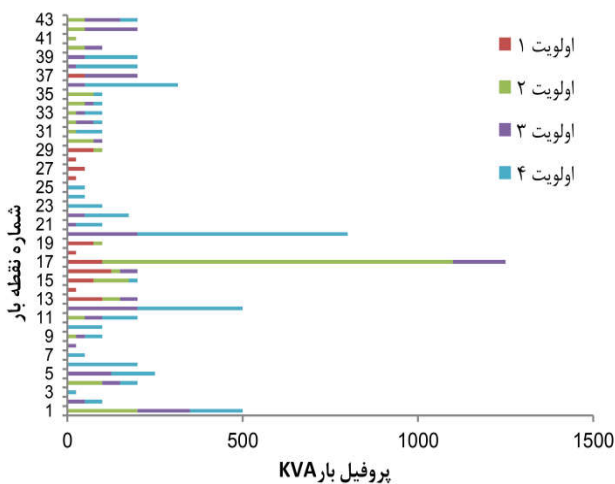


شکل (۱۰): محاسبه شاخص DRI به تفکیک هر سگشن

ب. با در نظر گرفتن اولویت بارها

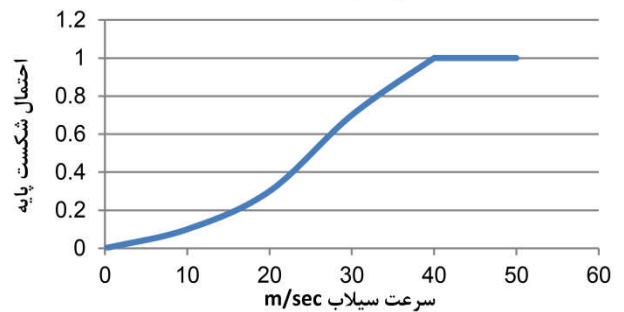
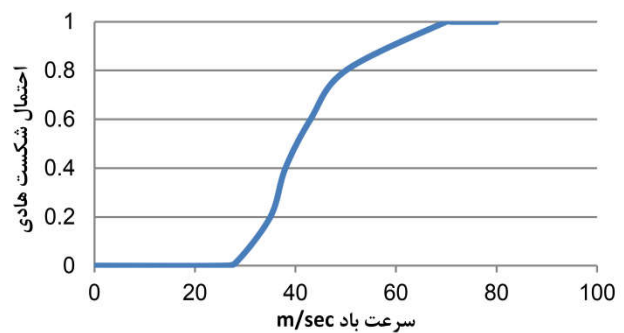
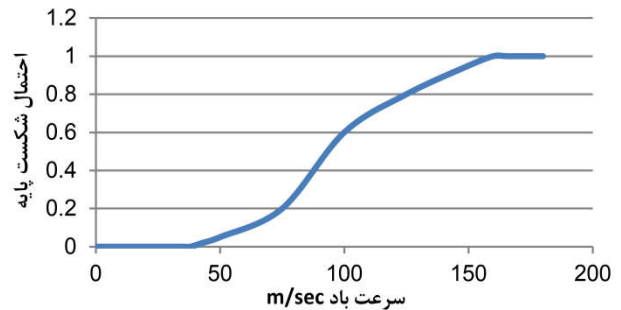
از آنجا که در هنگام وقوع حوادث غیرمترقبه تأمین بارهای حساس در اولویت هستند، خاموشی یک بار حساس، تاب‌آوری شبکه را به شدت کاهش خواهد داد. برای این منظور، از ضریب حساسیت بار در محاسبه شاخص تاب‌آوری استفاده شده است تا بارهای با حساسیت بالا تأثیر بیشتری بر روی تاب‌آوری شبکه داشته باشند.

در این مطالعه، بارها با توجه به حساسیت آن‌ها به ۴ دسته مراکز حساس، صنعتی، تجاری و خانگی اولویت‌بندی شده است که حساسیت آن‌ها نسبت به خاموشی از یکدیگر متفاوت می‌باشد. بر اساس این دسته‌بندی، بارهای با اولویت شماره ۱ یعنی مراکز حساس که دارای حساسیت بیشتری نسبت به خاموشی و بارهای با اولویت شماره ۴ (خانگی) دارای حساسیت کمتری نسبت به خاموشی می‌باشند. شکل (۱۱) اولویت‌بندی بارهای شبکه توزیع مورد مطالعه به تفکیک هر باس را نشان می‌دهد. در شکل (۱۲) مقدار شاخص DRI به تفکیک هر سگشن برای این حالت نشان داده شده است. مقدار میانگین شاخص DRI در این حالت ۹۷۵ است.



شکل (۱۱): اولویت‌بندی بار به تفکیک باس‌ها

با استفاده از منحنی‌های فوق می‌توان با در دست داشتن سرعت باد و سیلاب در نواحی مختلف مورد مطالعه، احتمال شکست هادی‌ها و پایه‌های شبکه توزیع را به دست آورد و به محاسبه احتمال شکست هر سگشن شبکه توزیع در اثر وقوع طوفان یا سیلاب پرداخت.



شکل (۹): منحنی‌های شکنندگی

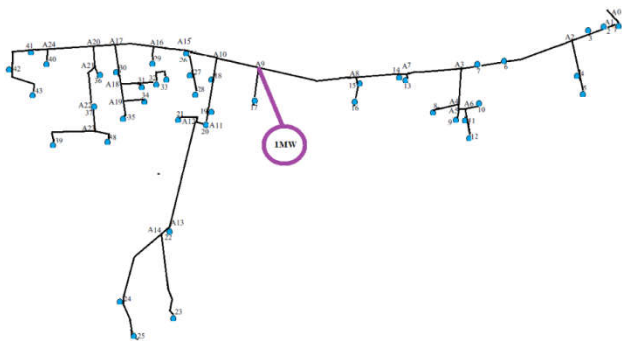
۲.۵. ارزیابی تاب‌آوری

مدل پیشنهادی ارائه شده برای محاسبه شاخص ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع (DRI) بر روی شبکه مورد مطالعه در دو حالت زیر اعمال شده است.

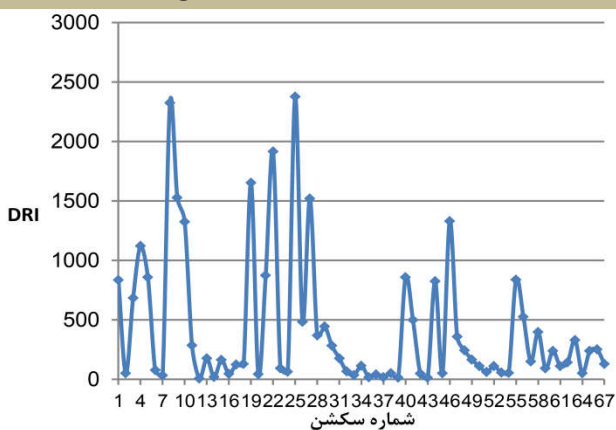
الف. بدون در نظر گرفتن اولویت بار

در این حالت فرض بر این است که همه بارها دارای اولویت یکسان هستند. در واقع در این حالت، حساسیت همه بارها در قبال خاموشی رخ داده شده مشابه یکدیگر است. و هدف ارزیابی تاب‌آوری در این حالت تمرکز بر روی مقدار بار قطع شده می‌باشد. در شکل (۱۰) مقدار شاخص DRI به تفکیک هر سگشن برای این حالت نشان داده شده است. مقدار میانگین شاخص DRI در این حالت ۸۶۸ است.

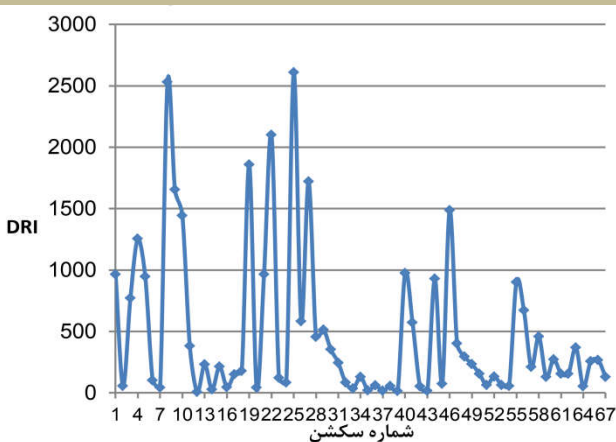
پیشنهادی برای یک دوره ۲۴ ساعته پس از وقوع حادثه مورد مطالعه قرار گرفته است. دلیل انتخاب این سکشن برای این است که در مطالعه قبلی، دارای بیشترین مقدار DRI بوده و در واقع سکشنی است که در تاب‌آوری کل شبکه تأثیر زیادی دارد. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب مقدار شاخص DRI به تفکیک هر سکشن را برای دو حالت، با در نظر گرفتن اولویت بار و بدون در نظر گرفتن اولویت بار را بر روی شبکه مورد مطالعه در حضور منبع تولید پراکنده نشان می‌دهند. در شکل (۱۶)، مقادیر میانگین شاخص DRI برای حالت‌های مختلف مورد مطالعه نشان شده است.



شکل (۱۳): شبکه مورد مطالعه در حضور منبع تولید پراکنده

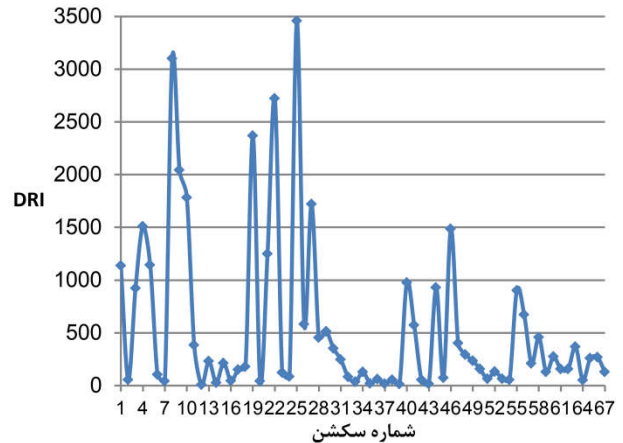


شکل (۱۴): محاسبه شاخص DRI در حضور منبع تولید پراکنده



شکل (۱۵): محاسبه شاخص DRI در حضور منبع تولید پراکنده و با

در نظر گرفتن اولویت بارها



شکل (۱۶): محاسبه شاخص DRI به تفکیک هر سکشن با اولویت بار

مطالعه اثر اولویت بارها در ارزیابی تاب‌آوری باعث می‌شود که با از دست دادن یک بار حساس به شدت تاب‌آوری سیستم کاهش یابد. و نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که میزان شاخص DRI با در نظر گرفتن اولویت بار نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن اولویت بار، افزایش و در نتیجه تاب‌آوری شبکه کاهش می‌یابد. همان طور که مشاهده می‌شود شاخص DRI معیار کمی مناسبی برای مقایسه شبکه‌ها از نظر تاب‌آوری ارائه می‌دهد. به طوری که در اولویت‌های برنامه‌ریزی برای طراحی و بهره‌برداری از شبکه‌ها می‌توان از آن استفاده کرد و با وارد کردن آن در معادلات طراحی شبکه، می‌توان برای دستیابی به یک شبکه توزیع تاب‌آور گام برداشت.

۳.۵. مطالعه تأثیر DG بر روی تاب‌آوری شبکه توزیع

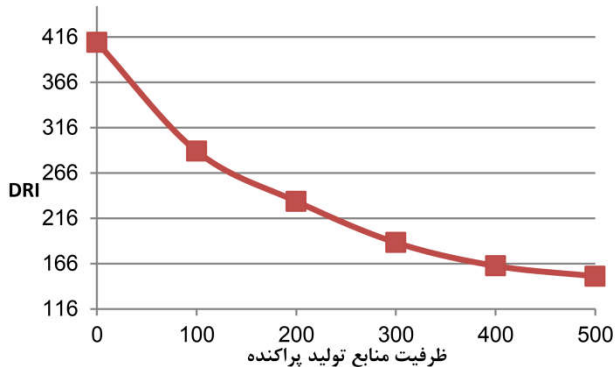
منابع تولید پراکنده (DG) با تأمین مصرف‌کنندگان از طریق یک منبع در دسترس و ایمن، توانایی آماده کردن شبکه برای پاسخ سریع به حوادث غیرمترقبه را دارند و یک منبع جایگزین برای تأمین بارها در زمان وقوع خطا یا حوادث غیرمترقبه هستند.

ورود منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع که بین بار و شبکه توزیع قرار دارند، به طور قطع اثرات متنوعی بر روی شاخص تاب‌آوری در شبکه‌های توزیع به دنبال دارد که در پی آن بسیاری از مطالعات مرسوم تحلیل، طراحی و برنامه‌ریزی در این شبکه‌ها کارایی خود را از دست داده و می‌بایست به جهت مدل نمودن تأثیرات متقابل سیستم‌های تولید پراکنده و شبکه، به همراه نحوه اثرگذاری آن بر روی تاب‌آوری شبکه اصلاح و بازبینی شوند.

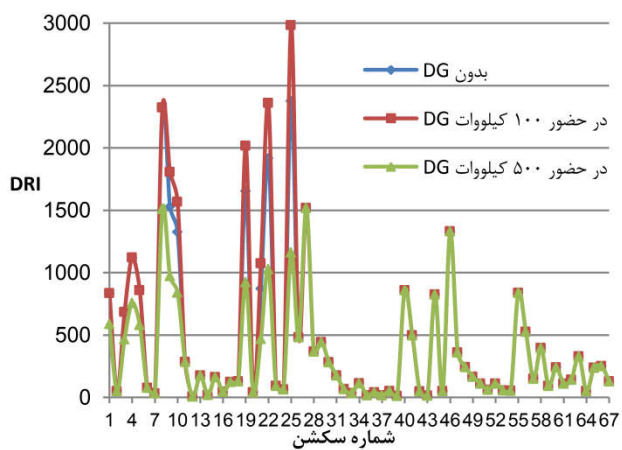
در این قسمت، ارزیابی تاب‌آوری با فرض وجود یک منبع تولید پراکنده با ظرفیت ۱۰۰ کیلووات در محل انتهای سکشن شماره ۲۵ (A9) بر روی شبکه نمونه، مطابق شکل (۱۳)، با استفاده از مدل

شاخصی جدید برای ارزیابی کمی تاب‌آوری شبکه توزیع در حضور تولید منابع پراکنده ۴۱

در شکل (۱۹)، تأثیر مکان نصب تولیدات پراکنده بر تاب‌آوری شبکه توزیع نشان داده شده است. در این مورد، منابع تولید پراکنده با ظرفیت ۱۰۰ کیلووات، در ۵ مکان مختلف قرار داده شده است.

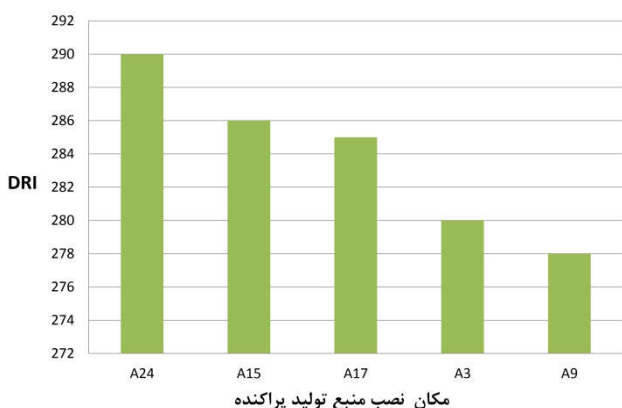


شکل (۱۷): تأثیر ظرفیت منابع تولید پراکنده بر تاب‌آوری شبکه توزیع



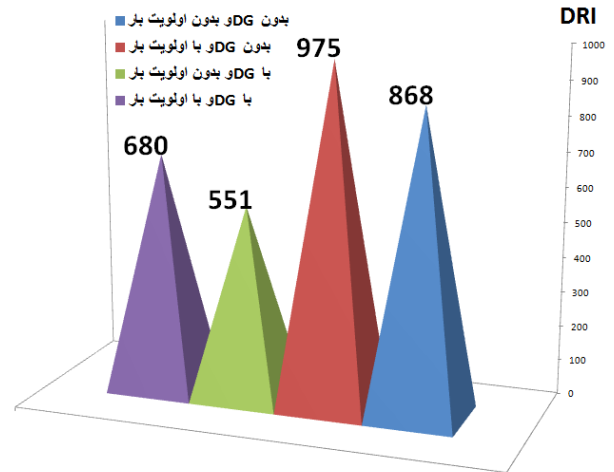
شکل (۱۸): مقایسه شاخص DRI به تفکیک هر سکشن در سه حالت

مورد مطالعه



شکل (۱۹): تأثیر مکان نصب منابع تولید پراکنده بر تاب‌آوری شبکه توزیع

همان طور که مشاهده می‌شود، مقدار شاخص و در نتیجه تاب‌آوری شبکه وابسته به ظرفیت و مکان نصب منابع تولید پراکنده می‌باشد و با تغییر ظرفیت و مکان نصب منابع تولید پراکنده، میزان تاب‌آوری شبکه متفاوت خواهد بود. علاوه بر این با افزایش ظرفیت



شکل (۱۶): محاسبه شاخص DRI برای حالات مختلف مورد مطالعه

نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که حضور منبع تولید پراکنده تأثیر بسزایی در کاهش شاخص DRI و در نتیجه افزایش تاب‌آوری شبکه دارد. در واقع منابع تولید پراکنده در هنگام از دست رفتن شبکه اصلی ناشی از وقوع حوادث غیرمترقبه در شبکه توزیع، با ایزوله کردن محل‌های خطا و تأمین مشترکین با استفاده از منابع تولید پراکنده، هزینه‌های مربوط به قطعی را به طور چشمگیری کاهش داده و تاب‌آوری شبکه را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این در نظر گرفتن تاب‌آوری منابع تولید پراکنده در کنار شاخص تاب‌آوری بار برای به دست آوردن تاب‌آوری کل شبکه منجر به استفاده بهینه از ظرفیت این منابع و صرفه‌جویی در هزینه‌های احداث آن‌ها در هنگام وقوع حوادث می‌شود. در این حالت برای افزایش تاب‌آوری علاوه بر اینکه باید بخشی از شبکه برای تغذیه بار مربوطه سالم باشد، توان منابع تولید پراکنده نیز باید برای تأمین بار در دسترس باشد.

۴.۵ مطالعه تأثیر ظرفیت و مکان نصب منابع تولید پراکنده

بر روی تاب‌آوری شبکه توزیع

در این بخش، اثر افزایش ظرفیت منابع تولید پراکنده و تغییر مکان نصب این منابع بر روی شاخص تاب‌آوری شبکه توزیع، مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

شکل (۱۷) تأثیر افزایش ظرفیت منابع تولید پراکنده با اضافه شدن پله‌های ۱۰۰ کیلوواتی از صفر تا ۵۰۰ کیلووات و با فرض نصب منابع در مکان کاندید A9 را نشان می‌دهد. در شکل (۱۸) مقدار شاخص DRI به تفکیک هر سکشن در سه حالت (الف. بدون تولید پراکنده، ب. در حضور منبع تولید پراکنده با ظرفیت نامی ۱۰۰ کیلووات، ج. در حضور منبع تولید پراکنده با ظرفیت نامی ۵۰۰ کیلووات) مورد مقایسه قرار گرفته است.

پراکنده، تأثیر حضور این منابع و نحوه اثرگذاری ظرفیت و مکان نصب این منابع بر روی تاب‌آوری شبکه توزیع با استفاده از این شاخص مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از اجرای مدل پیشنهادی بر روی یک شبکه نمونه واقعی نشان می‌دهد که شاخص جدید معیار مناسبی برای مقایسه شبکه‌ها از نظر تاب‌آوری ارائه می‌دهد؛ به طوری که در اولویت‌های برنامه‌ریزی برای طراحی و بهره‌برداری از شبکه‌ها می‌توان از آن استفاده کرد. همچنین حضور منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع علاوه بر اینکه می‌تواند تاب‌آوری شبکه را تا حد مطلوبی بهبود ببخشد، در نظر گرفتن تاب‌آوری منابع تولید پراکنده به‌عنوان شاخص در کنار تاب‌آوری شبکه در قبال تأمین بار، منجر به استفاده بهینه از ظرفیت این منابع با توجه به بالا بودن هزینه‌های احداث آن‌ها در هنگام وقوع حوادث می‌شود. در نتیجه تاب‌آوری شبکه وابسته به ظرفیت و مکان نصب این منابع است و با تغییر ظرفیت و مکان نصب منابع تولید پراکنده میزان تاب‌آوری شبکه متفاوت خواهد بود.

منابع تولید پراکنده تا حد معینی، مقدار شاخص DRI کاهش و در نتیجه تاب‌آوری شبکه افزایش می‌یابد. اما نرخ افزایش تاب‌آوری در ابتدا (ظرفیت‌های کم) بسیار زیاد بوده و با افزایش ظرفیت منابع، این نرخ کاهش می‌یابد؛ به طوری که اگر میزان ظرفیت منابع از حد معینی افزایش یابد تأثیر آن بر روی تاب‌آوری شبکه بسیار ناچیز خواهد بود.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شد با ارائه مفهوم تاب‌آوری و مشخصه‌های آن، نحوه مدل‌سازی حوادث طبیعی متداول مانند سیل و طوفان و ارزیابی تأثیر این رویدادها بر روی تاب‌آوری شبکه‌های توزیع مورد مطالعه قرار گیرد. در ادامه با معرفی شاخص‌های تاب‌آوری شبکه در قبال تأمین بار و تاب‌آوری منابع تولید پراکنده، شاخصی جدید برای محاسبه کمی تاب‌آوری شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده ارائه شد. سپس با استفاده از این شاخص به ارزیابی تاب‌آوری یک شبکه توزیع واقعی در دو حالت بدون در نظر گرفتن اولویت بار و با در نظر گرفتن اولویت بار پرداخته شد. در ادامه با وارد کردن منابع تولید

مراجع

- محمد، «مکان‌یابی هم‌زمان منابع تولید پراکنده و خازن در شبکه‌های توزیع و تعیین آرایش بهینه آن»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، جلد ۱، شماره ۱، صفحه ۱۱-۱۸، ۱۳۹۰.
- [1] Campbell, R. J., "Weather-Related Power Outages and Electric System Resiliency", Congressional Research Service, Library of Congress, 2012.
- [2] Khodaei, A., "Resiliency-Oriented Microgrid Optimal Scheduling", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, No. 4, pp. 1584-1591, 2014.
- [3] Panteli, M. and Mancarella, P., "Influence of Extreme Weather and Climate Change on the Resilience of Power Systems: Impacts and Possible Mitigation Strategies", Electric Power Systems Research, Vol. 127, pp. 259-270, 2015.
- [4] Lorca, J. A. and Sun, X. A., "Adaptive Robust Optimization with Dynamic Uncertainty Sets for Multi-Period Economic Dispatch under Significant Wind", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, No. 4, pp. 1702-1713, Jul. 2015.
- [5] Wang, Y., Chen, C., Wang, J. and Baldacci, R., "Research on Resilience of Power Systems under Natural Disasters-a Review", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 2, pp. 1604-1613, 2016.
- [۶] صادقی، محمود، کلاتر، محسن، «کاهش هزینه‌های سالیانه سیستم توزیع به کمک واحدهای تولید پراکنده پاک»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، جلد ۶، شماره ۴، صفحه ۱۴-۲۵، ۱۳۹۵.
- [۷] رحیمی، توحید، زارع، کاظم، «تخصیص هزینه‌های ثابت به روش ترکیبی و جدید در شبکه‌های توزیع شعاعی در حضور منابع تولید پراکنده»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، جلد ۵، شماره ۳، صفحه ۲-۱۳، ۱۳۹۴.
- [۸] شریعت‌خواه، محمدحسین، حق‌فام، محمودرضا، افکوسی پاقعه، محمد، «مکان‌یابی هم‌زمان منابع تولید پراکنده و خازن در شبکه‌های توزیع و تعیین آرایش بهینه آن»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، جلد ۱، شماره ۱، صفحه ۱۱-۱۸، ۱۳۹۰.
- [9] Panteli, M. and Mancarella, P., "Operational Resilience Assessment of Power Systems under Extreme Weather and Loading Conditions", in Proc. IEEE PES General Meeting, pp. 1-5, 2015.
- [۱۰] امینی‌فر، فرخ، فرهمندی، متین، «مفاهیم و مبانی ارزیابی تاب‌آوری در شبکه‌های برق»، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۵، شماره ۳، صفحه ۸۳-۹۱، ۱۳۹۷.
- [۱۱] سلمانیان شفا، علیرضا، مشکینی، محمدحسین، پورباقری، محمود، «بررسی میزان تاب‌آوری شبکه‌های توزیع نیروی برق در شرایط بحران»، نوزدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و پنجمین کنفرانس مهندسی فوتونیک ایران، زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۳۹۱.
- [۱۲] نوبهاری، ژاله، رامشخواه، فیروزه، «بررسی تاب‌آوری شبکه توزیع تهران بزرگ در حادثه زلزله و شبیه‌سازی مودهای اصلی خرابی ساختمان پست با ETABS»، سی‌وسومین کنفرانس بین‌المللی برق، ایران، تهران، ۱۳۹۷.
- [13] Zhang, B., Dehghanian, P. and Keszunovic, M., "Optimal Allocation of PV Generation and Battery Storage for Enhanced Resilience", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 10, No. 1, pp. 535-545, 2019.
- [14] Attoh-Okine, N.O., Cooper, A.T. and Mensah, S.A., "Formulation of Resilience Index of Urban Infrastructure

- using *Belief Functions*", in IEEE Systems Journal, Vol. 3, No. 2, pp. 147-153, 2009.
- [15] Chanda, S., "Measuring and Enabling of Resiliency using Multiple Microgrids", Microgrid Symposiums, Master's Thesis, Washington State University, 2015.
- [16] Panteli, M., Trakas, D. N., Mancarella, P. and Hatziargyriou, N. D., "Boosting the Power Grid Resilience to Extreme Weather Events Using Defensive Islanding", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 6, pp. 2013-2922, 2016.
- [17] Katiraei, F., Iravani, M. R. and Lehn, P. W., "Micro-grid Autonomous Operation during and Subsequent to Islanding Process", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, pp. 248-257, 2005.
- [18] Liu, W., Sun, L., Lin, Z., Wen, F. and Xue, Y., "Multi-Objective Restoration Optimisation of Power Systems with Battery Energy Storage Systems", in IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 10, No. 7, pp. 1749-1757, 2016.
- [19] Ma, S., Chen, B. and Wang, Z., "Resilience Enhancement Strategy for Distribution Systems under Extreme Weather Events", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 2, pp. 1442-1451, 2018.
- [20] Yuan, W., Wang, J., Qiu, F., Chen, C., Kang, C. and Zeng, B., "Robust Optimization-Based Resilient Distribution Network Planning Against Natural Disasters", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 6, pp. 2817-2826, 2016.
- [21] Li, J., Ma, X., Liu, C. and Schneider, K. P., "Distribution System Restoration with Microgrids using Spanning Tree Search", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 29, No. 6, pp. 3021-3029, 2014.
- [22] Manshadi, S. D. and Khodayar, M. E., "Resilient Operation of Multiple Energy Carrier Microgrids", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 5, pp. 2283-2292, 2015.
- [23] Xu, Y., Liu, C.C., Schneider, K. and Ton, D., "Toward a Resilient Distribution System", in Proc. IEEE PES General Meeting, pp. 1-5, 2015.
- [24] Gao, H., Chen, Y., Xu, Y. and Liu, C., "Resilience-Oriented Critical Load Restoration using Microgrids in Distribution Systems", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 6, pp. 2837-2848, 2016.
- [25] Wang, S., Li, Z., Wu, L., Shahidehpour, M. and Li, Z., "New Metrics for Assessing the Reliability and Economics of Microgrids in Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No. 3, pp. 2852-2861, 2013.
- [26] Chen, C., Wang, J., Qiu, F. and Zhao, D., "Resilient Distribution System by Microgrids Formation after Natural Disasters", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 2, pp. 958-966, Mar. 2016.
- [27] Hatziargyriou, N., Asano, H., Iravani, R. and Marnay, C., "Microgrids", IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 5, No. 4, pp. 78-94, 2007.