

تبیین مفهوم تاب آوری در شبکه برق و ارتباط آن با پدافند غیرعامل

رضا غفارپور^{۱*}، محمد ایمان علیزاده^۲

۱- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ۲- دانشجوی پسا دکتري، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت: ۹۸/۰۳/۱۵، پذیرش: ۹۸/۰۷/۲۰)

چکیده

شبکه‌های برق به‌عنوان زیرساخت‌های اصلی اقتصادی، امنیتی و حیات طبیعی یک کشور همیشه در معرض تهدیدات خرابکارانه قرار داشته‌اند. اجزاء زیاد، وابستگی و پراکندگی آن‌ها، بهره‌برداری در زمان بروز مداخلات، کاهش دادن آسیب‌های احتمالی و مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها در برابر اتفاقات مشابه با رویکرد پدافند غیرعامل را امری مهم و پیچیده نموده‌اند. به‌طور سنتی، پدافند غیرعامل در قالب یک ساختار سه وجهی پیشگیری، محافظت و پاسخ تعریف می‌شده است. لیکن، با بروز تهدیدات امنیتی خرابکارانه نوین در کنار حوادث طبیعی که با احتمال رویداد کم اما خسارت زیاد همراه هستند، در نظر گرفتن مسئله تاب‌آوری در جهت کاهش حداکثری اثرات مخرب به‌عنوان رکنی جدید در پدافند غیرعامل ضروری به نظر می‌رسد. از این‌رو، ساختار سه وجهی سنتی به ارکان پنج‌گانه پیشگیری، محافظت، کاهش اثرات، پاسخ و بازیابی ارتقاء می‌یابد. در این مقاله سعی شده است مفاهیم نوین در حوزه سیستم‌های قدرت تبیین شوند. از دیگر سو، در تحقیقات موجود شاخص‌های ارزیابی مناسبی جهت سنجش دقیق وضعیت تاب‌آوری سیستم در شرایط مختلف (از جمله، قبل، حین و بعد از بروز حوادث)، ارائه نشده است. از این‌رو، در مقاله حاضر ابتدا تعاریف موجود تاب‌آوری در سیستم‌های سازمانی، اجتماعی، اقتصادی، مهندسی، و شبکه‌های برق گردآوری و مقایسه شده‌اند. سپس به تفکیک مفاهیم مرتبط و درعین حال مستقل در حوزه پدافند غیرعامل شبکه‌های برق از جمله خطر پذیری، مقاومت، بقاء، قابلیت اطمینان، آسیب‌پذیری و تاب‌آوری پرداخته شده است. به‌علاوه، در بخش آخر، با بررسی شاخص‌های تاب‌آوری در حوزه‌های اجتماعی، امنیت ملی و بلایای طبیعی، به تسهیل طراحی شاخص‌های کمی سازی این مفهوم در شبکه برق به‌عنوان مبحثی نوین در ارتباط با پدافند غیرعامل در این حوزه پرداخته شده است. در نهایت، تبیین ادبیات به‌وجود آمده در حوزه نوین تاب‌آوری، محققان را کمک خواهد نمود تا بهتر به تحلیل تمهیدات مورد نیاز پدافند غیرعامل در سیستم قدرت به جهت ارتقاء تاب‌آوری سیستم بپردازند.

کلیدواژه‌ها: تاب‌آوری در شبکه برق، آسیب‌پذیری، تحلیل خطر پذیری، قابلیت اطمینان

۱. مقدمه

تدوین کرد. به‌بیان‌دیگر آسیب‌پذیری می‌تواند در تعریف جدیدی از بازتوانی و درک آن به‌عنوان فرایند بهبود شرایط پیش از وقوع تهدید، دستیابی به توسعه بلندمدت و تخفیف خطر تهدید مورد استفاده قرار گیرد. مفاهیم آسیب‌پذیری، تاب‌آوری با یکدیگر بسیار مرتبط می‌باشند، اما با یکدیگر متفاوت هستند.

به‌طور سنتی، پدافند غیرعامل در قالب یک ساختار سه وجهی پیشگیری، محافظت و پاسخ تعریف می‌شده است. لیکن، با بروز تهدیدات امنیتی خرابکارانه نوین در کنار حوادث طبیعی که با احتمال رویداد کم اما خسارت زیاد همراه هستند، در نظر گرفتن مسئله تاب‌آوری در جهت کاهش حداکثری اثرات مخرب به‌عنوان رکنی جدید در پدافند غیرعامل ضروری به نظر می‌رسد. از این‌رو، ساختار سه وجهی سنتی به ارکان پنج‌گانه پیشگیری، محافظت، کاهش اثرات^۲، پاسخ و بازیابی ارتقاء می‌یابد.

در تعریف، پدافند غیرعامل، به مجموعه اقدامات غیرمسلحانه‌ای که موجب افزایش بازدارندگی، کاهش آسیب‌پذیری، تداوم فعالیت‌های ضروری، ارتقاء پایداری ملی و تسهیل مدیریت بحران در مقابل تهدیدها و اقدامات نظامی دشمن می‌شود گفته می‌شود. لذا پدافند غیرعامل، در واقع کاهش آسیب‌پذیری تهدیدات یا ایجاد امنیت در برابر تهدید است [۱]. آسیب‌پذیری می‌تواند به‌عنوان ویژگی‌ها و شرایط یک جامعه یا یک سیستم باشد که آن را در برابر اثرات مخرب یک تهدید حساس می‌سازد. از طریق تحلیل و ارزیابی اجزاء اصلی مفاهیم مختلف آسیب‌پذیری، می‌توان راهبردها و سیاست‌های موردنیاز جهت کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری در مواجهه با تهدیدات آتی را

²Mitigation

* رایانامه نویسنده مسئول: rghaffarpour@ihu.ac.ir

می‌گیرند. به‌علاوه، تعاریفی چون قابلیت اطمینان، خطر پذیری، بقا، مقاومت‌سازی با تاب‌آوری مقایسه خواهند شد. در شکل (۱) ساختار تاب‌آوری در شبکه قدرت نشان داده شده است.

۲. تعریف تاب‌آوری

کلمه تاب‌آوری (Resiliency (Resilience) از ریشه لاتین کلمه "Resilio" به معنای بازگشت چیزی به حالت اولش پس از قرار گرفتن در معرض استرس (فشار، خم‌شدگی و یا کشیدگی) گفته می‌شود [۳]. تاب‌آوری در چهار حوزه زیر بررسی می‌شود:

- سازمانی
- اجتماعی
- اقتصادی
- مهندسی

۱-۲. سازمانی

تاب‌آوری در یک سازمان را توانایی ذاتی آن برای نگهداری یا بازیابی حالت پایدار تعریف می‌کنند که سازمان را قادر می‌سازد پس از رویداد مخرب یا استرس مداوم، به عملکرد عادی خود ادامه دهد [۴]. یا در تعریف دیگری توانایی یک سازمان برای مقابله با تنش‌ها و بهبود عملکرد آن باوجود رویداد مخرب را تاب‌آوری تعریف می‌کند [۵]. در مرجع [۶]، ارزیابی مشارکتی متقابل^۲ که در آن حداقل دو گروه با اهداف متضاد به بررسی ابعاد مواجه‌شدن با رویداد مخرب می‌پردازند به‌عنوان راه‌کاری برای تشخیص مقاومت یک شرکت در برابر رویداد مخرب عنوان شده است.

۲-۲. اجتماعی

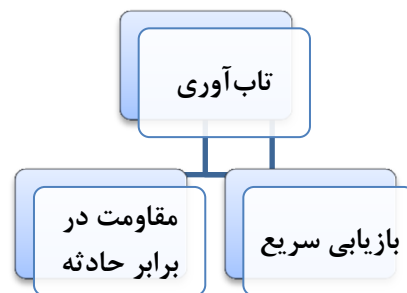
در حوزه اجتماعی موضوع، تاب‌آوری اشخاص، گروه‌ها، جامعه و محیط‌اند. تاب‌آوری اجتماعی را می‌توان توانایی گروه‌ها یا جوامع در مواجهه با اختلالات و تنش‌های خارجی حاصل از تغییرات اجتماعی سیاسی و محیطی بیان کرد [۷]. یا در تعریفی دیگر، تاب‌آوری اجتماعی، قابلیت برای پیش‌بینی میزان خطرپذیری، محدود کردن تبعات نامطلوب و بازگشت هر چه سریع‌تر از طریق بقا، سازگاری و رشد در مواجهه با تغییرات محل معرفی شده است [۸].

۳-۲. اقتصادی

در حوزه اقتصاد، پویا، به سرعتی که یک سیستم از یک شوک شدید برای رسیدن به حالت پایدار باز می‌گردد تاب‌آوری گفته می‌شود [۹]. به تعریفی دیگر، تاب‌آوری ظرفیت پیکربندی مجدد

ساختار کاهش اثرات، توانایی‌های لازم جهت کاهش ضررهای جانی و مالی را در زمان بروز فجایع شناسایی می‌نماید. این توانایی‌ها شامل پروژه‌های کاهش خطر پذیری در سطح جامعه، افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی به‌عنوان منابع کلیدی، کاهش خطر پذیری آسیب‌پذیری از فجایع و عملیات تروریستی و اقداماتی جهت کاهش خطر پذیری پس از بروز فجایع هستند [۲]. از این‌رو، تاب‌آوری نه به‌عنوان جایگزین امنیت، که به‌عنوان ارتقاءدهنده مفهوم پدافند غیرعامل در نظر گرفته می‌شود.

تاب‌آوری به‌عنوان توانایی مقاومت در برابر اثرات تهدید و همچنین مواجهه با اثرات آن و بازتوانی سریع تعریف می‌شود [۱]. آسیب‌پذیری و تاب‌آوری هر دو در چگونگی تأثیرگذاری تهدید بر جامعه و دارایی‌های آن و نحوه بازتوانی در برابر تهدید نقش خواهند داشت. تاب‌آوری از جمله مفاهیمی است که در زمینه‌های مختلف به‌ویژه روان‌شناسی و اقتصاد کاربردهای بسیاری داشته است. لیکن در شبکه‌های از مفاهیم نوپا محسوب می‌شود. پس از بروز توفان‌های مخرب در ایالات‌متحده، شبکه برق به‌عنوان یک ماشین بسیار آسیب‌پذیر شناخته شد و مهندسان دریافتند که مفاهیم قابلیت اطمینان، خطر پذیری، امنیت، بقا و آسیب‌پذیری نمی‌توانند تضمین‌کننده عملکرد صحیح در همه شرایط به‌خصوص شرایط با احتمال وقوع کم و خرابی گسترده^۱ باشند. به‌طوری‌که حتی سیستم‌هایی که از قابلیت اطمینان بالایی برخوردارند و از نظر خطر پذیری و آسیب‌پذیری تجهیزات در وضع خوبی هستند و همچنین از نظر امنیت در سطح امنی قرار دارند، دچار مشکلات جدی و حتی فروپاشی سیستم خواهند شد.



شکل (۱): ساختار تاب‌آوری در شبکه برق

تاب‌آوری در شبکه برق عبارت است از توانایی سیستم در برابر حوادث (HILP) و بازیابی سریع پس از حادثه. از این‌رو، تاب‌آوری شامل دو زیرشاخه مانند است در این مقاله به‌تفصیل بحث شده‌اند.

در این مقاله، به تعاریف و مفاهیم تاب‌آوری شبکه برق و ارتباط آن با مفاهیم پدافند غیر عامل خواهیم پرداخت. سپس روش‌های ارزیابی کیفی و کمی تاب‌آوری موردبررسی قرار

² Collaborative Cross Checking

¹ High Impact/ Low Probability (HILP)

- افزونگی^۴: به مقدار موجود بودن اجزاء و سیستم‌های مورد مطالعه که قابلیت تاب‌آوری داشته باشند. به عبارت دیگر، مقدار تجهیزاتی که در زمان اختلال و یا خرابی، عملکرد کلی سیستم را حفظ کنند.

در مرجع [۱۳] تاب‌آوری یک زیرساخت بحرانی به صورت زیر تعریف می‌شود:

- ✓ پایداری^۵: پیش‌گیری از تخریب یا وقفه در آن با استحکام‌بخشی و ارتقاء حفاظت در برابر حادثه یا فشار اولیه آن.

- ✓ قابلیت اطمینان: حصول اطمینان از این‌که اجزا و قطعات برای عملکرد تحت دامنه وسیعی از وضعیت‌های مختلف طراحی شده‌اند.

- ✓ پاسخ و بازیابی: پاسخ سریع و اثربخش و بازیابی پس از فروپاشی

افزونگی: دسترسی به قطعات رزرو یا قطعات یدکی جهت انتقال وضعیت عملکردی به مسیرهای جایگزین.

۳. قابلیت اطمینان و تاب‌آوری در شبکه‌های

برق

قابلیت اطمینان مفهومی بلندمدت است که رفتار احتمالاتی یک سیستم را مدل می‌کند و به معنای احتمال عملکرد صحیح یک سیستم طی بازه زمانی کاری مشخص و نوع کار معین است. به‌طورکلی، در شبکه‌های برق، قابلیت اطمینان به توانایی تأمین برق مصرف‌کننده نهایی در زمان خرابی پیش‌بینی نشده تجهیزات یا شرایط دیگری که توان قابل تحویل را کم نماید گفته می‌شود [۱۴]. جدول (۱) تفاوت‌های بین مفاهیم قابلیت اطمینان و تاب‌آوری را نشان می‌دهد [۳]:

جدول (۱): مقایسه قابلیت اطمینان و تاب‌آوری

تاب‌آوری	قابلیت اطمینان
احتمال کم و تأثیر زیاد	احتمال زیاد و تأثیر کم
سازگارپذیر، بلندمدت و کوتاه‌مدت	ایستا
حالات سیستم و زمان گذرا بین حالات را ارزیابی می‌کند	حالات شبکه برق را ارزیابی می‌کند
با مدت‌زمان خاموشی مشترکین و زمان بازیابی زیرساخت‌ها مرتبط است.	با مدت‌زمان خاموشی مشترکین مرتبط است

تحلیل قابلیت اطمینان اگرچه رفتار احتمالاتی یک سیستم را

ساختار (شرکت‌ها، صنایع، فناوری‌ها، مؤسسات) به‌منظور حفظ روند رشد قابل قبول در محصول، کارکنان و سرمایه در طول زمان نسبت داده شده است [۱۰].

۲-۴. مهندسی

در این حوزه، تاب‌آوری را می‌توان توانایی سیستم برای تحمل اختلالات خارجی و داخلی بدون قطع عملکرد سیستم یا در صورت قطع عملکرد، بازیابی کامل و سریع آن تعریف کرد [۱۱]. شش عامل بهبوددهنده تاب‌آوری در سیستم‌های مهندسی عبارت‌اند از:

- به حداقل رساندن خرابی‌ها
- محدود کردن اثرات
- روش‌های اجرایی
- انعطاف‌پذیری
- کنترل‌پذیری
- تشخیص زودهنگام

در تعریف دیگری، تاب‌آوری به صورت "4R" ذکر شده است [۱۲]:

- مقاومت^۱: توانمندی سیستم برای حفاظت از گسترش آسیب در سیستم آسیب‌دیده.

○ حفظ عملکرد و ایستایی در برابر رخداد مخرب

○ مقاومت و پایداری در برابر حوادث با احتمال کم و خرابی زیاد

- سرعت^۲: کوتاه‌ترین زمانی که سیستم می‌تواند به عملکرد قبلی خود یا حداقل به عملکردی قابل قبول دست پیدا کند.

○ درس‌آموزی از حادثه

○ معرفی و شناسایی ابزارها و فن‌آوری‌های

جدید برای ارتقاء استحکام، کیفیت منابع و بازیابی پیش از بروز یک حادثه جدید

- کارآمدی^۳: قابلیت سیستم در استفاده از منابع اطلاعاتی، فنی، فیزیکی و منابع انسانی (کارگران) در واکنش به حادثه.

○ بازگشت امور به شرایط عادی در حداقل

زمان ممکن پس از بروز بحران

○ وجود برنامه‌های پیشامد و عملیات اضطراری

¹ Robustness

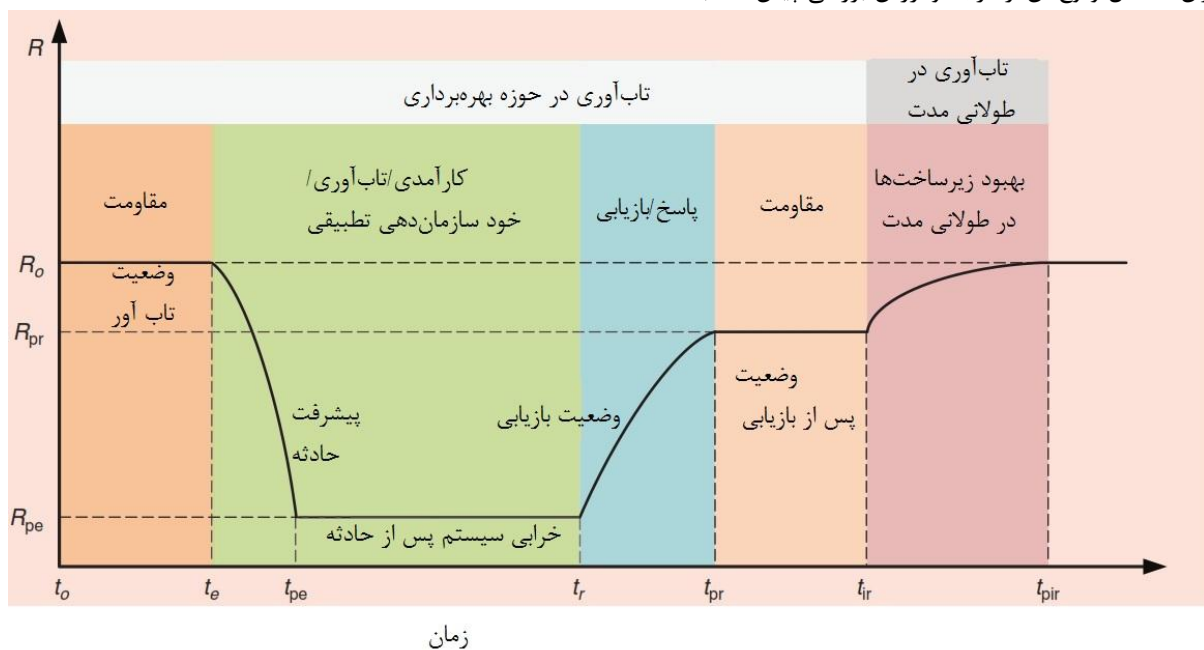
² Rapidity

³ Resourcefulness

⁴ Redundancy

⁵ Resistancy

[۳]. در ارزیابی آسیب‌پذیری هدف یافتن میزان حساس بودن سیستم برق‌رسانی در برابر رخدادهای فاجعه‌بار و تعیین نقاط بحرانی و یافتن میزان مشارکت آن‌ها در بروز فروپاشی‌های آبشاری است و در این ارزیابی عناصر بحرانی مشارکت کننده در بروز فروپاشی شناسایی می‌گردد ولی در ارزیابی قابلیت اطمینان رخدادهای شدید و مخرب به دلیل احتمال پایین در نظر گرفته نمی‌شوند به این دلیل دو رهیافت مکمل هم‌اند. شکل (۲) سیستم تاب‌آور را در بازه‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد:



شکل (۲): سیستم تاب‌آور در بازه‌های زمانی مختل

پس‌ازاین مرحله، بازیابی آغاز شده که قصد دارد با سرعت تمام و با استفاده از تمام ظرفیت‌های خود، وضعیت سیستم را به حالت قبل برگرداند. در مرحله پس‌احادثه سیستم لزوماً به سطح اول تاب‌آوری خود برنمی‌گردد $R_0 > R_{pr}$ و این متناسب با شدت خرابی‌ها به زمان طولانی‌تری نیاز دارد. لازم به ذکر است که، طراحی نوین شبکه برق در طولانی‌مدت بعضاً با بازیابی سیستم در بهره‌برداری کوتاه‌مدت مغایرت دارد. به‌طور مثال، از نظر مقاوم و تاب‌آور نمودن شبکه، کابل‌کشی زیرزمینی به‌جای خطوط هوایی در اولویت‌اند اما با خرابی ناشی از اختلال، در کوتاه‌مدت شناسایی و تعمیرات خطوط زیرزمینی بسیار کندتر و با هزینه بالاتری انجام خواهد شد.

ذکر این نکته ضروریست که حالات مختلف سیستم از مقاومت اول تا مقاومت دوم به‌صورت تفکیک‌شده در مسائل پدافند غیرعامل مطرح نشده است و صرفاً در ذیل عنوان کلی کاهش آسیب‌پذیری مطرح شده‌اند.

به‌طور مناسب ترسیم می‌کند اما در خصوص حوادث با احتمال پایین و با تبعات بسیار شدید تحلیل مناسبی ارائه نمی‌دهد. ارزیابی آسیب‌پذیری به‌عنوان نوعی مطالعه تکمیلی بر قابلیت اطمینان به‌کار می‌رود. در ارزیابی آسیب‌پذیری احتمالات خرابی‌ها و پیش‌آمدهای پرخطر کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد، به‌طوری‌که در این نوع مطالعات، ملاحظه اصلی تخمین این احتمالات نیست بلکه توجه اصلی روی اثرات ناشی از خرابی‌ها و رخدادهای به‌منظور شناسایی نقاط ضعف سیستم هست بدون آن‌که میزان احتمال وقوع آن از درجه و ارزش بررسی پیش‌آمد بکاهد

همان‌طور که از شکل (۲) مشخص است، شبکه برق باید توانایی تحمل شوک اولیه ناشی از حادثه را داشته باشد. اگر R نشان‌دهنده سطح تاب‌آوری باشد، یک سیستم قابل‌قبول چه در سطح طراحی بلندمدت و چه در بهره‌برداری می‌بایست در مواجهه با حادثه در وضعیت R_0 قرار گیرد. در این مرحله، توانایی انعطاف‌پذیری بهره‌برداری پیشگیرانه اهمیت فراوان دارد چراکه به بهره‌بردار سیستم این امکان را می‌دهد تا با بسیج امکانات موجود سیستم را در برابر حادثه یا اختلال پیش‌آمده تاب‌آور کند.

پس از رخداد حادثه، سطح تاب‌آوری به پایین‌ترین میزان خود رسیده R_{pe} و در این مرحله کارآمدی، افزونگی و خودسازمان‌دهی تطبیقی^۱ کلیدی‌ترین ابزارهای مقابله خواهند بود. این عوامل، باید میزان فاصله بین حالت عادی و حالت حادثه‌دیده را $(R_0 - R_{pe})$ به حداقل برسانند.

^۱ Adaptive Self-organization

تجهیزات کم‌اهمیت در بهره‌برداری^۱ سریع‌تر انجام می‌شود.

به‌علاوه مقاوم بودن^۲ و تاب‌آوری^۳ دو مفهوم کاملاً مجزا بوده که بعضاً به‌اشتباه به‌جای یکدیگر استفاده می‌شوند. به‌طوری‌که، تاب‌آوری به انعطاف‌پذیری^۴ و بقا^۵ در مواجهه‌شدن با رویدادهای غیر پیش‌بینی‌شده برمی‌گردد درحالی‌که مقاوم بودن به تحمل تغییرات مربوط می‌شود. تاب‌آوری همچنین به مجموعه‌ای از فعالیت‌های بازه‌ای، چابک و اطلاعات تاریخی گفته می‌شود که حساسیت شبکه برق را در برابر خاموشی‌ها به حداقل برساند و درعین‌حال در کمترین زمان بازیابی را انجام دهد [۱۶]. در ادامه به مفاهیمی خواهیم پرداخت که در ارتباط مستقیم با تعریف تاب‌آوری هستند:

- خطر پذیری
- خطر^۶
- ظرفیت
- آسیب‌پذیری^۷
- مقاومت
- قابلیت اطمینان

خطر پذیری: احتمال رویدادی غیرمنتظره و عواقب ناشی از آن است. در مرجع [۱۷]، خطر پذیری به‌صورت زیر تعریف شده است:

خطر پذیری = در معرض خطر بودن X^A آسیب‌پذیری X هزینه

در معرض خطر بودن مقداری است که یک سیستم خاص در معرض خطرات بالقوه قرار دارد. به بیان احتمالاتی، به احتمال در معرض خطر بودن یک سیستم. آسیب‌پذیری احتمال خطای تجهیزات در مواجهه با خطر است. معمولاً این دو مفهوم باهم ترکیب‌شده و احتمال خطای تجهیز را می‌سازند. هزینه، نه‌تنها هزینه تأثیر لحظه‌ای خطا بر تجهیز، که هزینه خطاهای پی‌درپی بالقوه ناشی از خطای تجهیز را شامل می‌شود.

خطر: رویداد یا مجموعه‌ای از رویدادها هستند که پتانسیل بروز خسارت دارند. در این زمینه، مرجع [۱۸] با استفاده از مدل احتمالاتی بیزین^۹ فرمولی برای محاسبه خطر پذیری ناشی از

به‌طورکلی، بررسی تاب‌آوری یک موضوع چندبعدی است. همان‌طور که وضعیت‌های هر مرحله به‌طور مجزا اهمیت دارند، گذار بین این حالت‌ها در زمان موضوع دیگر تاب‌آوری است. به‌طوری‌که می‌توان گفت علاوه بر نیاز به سیستمی با سطوح جداگانه تاب‌آوری، طولانی کردن زمان بین رخداد تا از دست رفتن عملکرد عادی سیستم و همچنین سریع کردن زمان بازیابی و پس‌بازیابی موضوعات مهم و متفاوت از بحث قابلیت اطمینان‌اند. به‌طور خلاصه توانایی شبکه برق در بازگشت سریع به حالت عادی پس از مواجهه‌شدن با یک فاجعه را تاب‌آوری می‌نامند. به‌طور دقیق‌تر، توانایی‌های زیر میزان تاب‌آور بودن یک سیستم را مشخص می‌کنند:

◀ پیش‌بینی وقوع اتفاقی با درصد خرابی بالا و احتمال وقوع کم مثلاً خروج هم‌زمان چند خط متصل به یک پست.

◀ بهبود سریع سیستم پس از رخداد حادثه

◀ کسب تجربه از رخداد جهت استفاده در برنامه‌ریزی بلندمدت و همچنین بهره‌برداری کوتاه‌مدت شبکه برق به‌نحوی‌که در صورت وقوع رخدادهای مشابه خسارات سیستم به حداقل برسد.

به‌منظور کمینه کردن اثرات اقتصادی، فرهنگی و سیاسی، شبکه‌های برق می‌بایست در برابر خاموشی‌ها تاب‌آور باشند. از این‌رو، مفهوم تاب‌آوری فیزیکی و سایبری به حفظ حالات شبکه برق در یک وضع پایدار در برابر بروز مداخلات گفته می‌شود [۱۵]. جنبه‌های مختلف تاب‌آوری پس از وقوع اختلال را می‌توان در موارد زیر گنجانده:

- زمان موردنیاز برای بازیابی یک تجهیز: که به زیرساخت تاب‌آور مرتبط بوده و به عوامل زیر بستگی دارد: این قابلیت اطمینان است با در نظر گرفتن تعمیرات.
 - در دسترس بودن تجهیزات پشتیبان
 - دسترسی به منطقه آسیب‌دیده.
 - تعداد کارکنان تعمیر موجود در محل
- اهمیت یک تجهیز در بازیابی تاب‌آور: که این به مشارکت هر تجهیز در بازیابی تاب‌آور بهره‌برداری بازمی‌گردد.

دو جنبه ذکرشده با توجه به مجزا بودن، مستقل از هم نیستند. به‌طور مثال، اگر تجهیز از درجه اول اهمیت برای بازیابی قرار داشته باشد اما به هر دلیل بازیابی بسیار طولانی و سخت باشد از اولویت بالا خارج می‌شود. در این صورت بازیابی

¹ Less Operationally Critical

² Robustness

³ Resilience

⁴ Flexibility

⁵ Survivability

⁶ Hazard

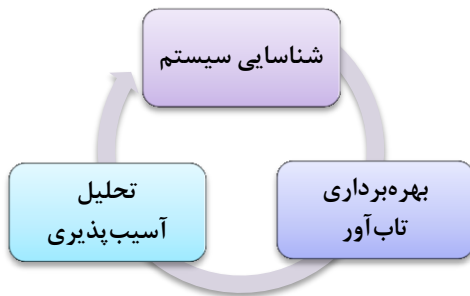
⁷ Vulnerability

⁸ Exposure

⁹ Bayesian

توانایی تحویل مداوم برق به مصرف‌کنندگان بر اساس اولویت‌بندی بار از قبل طراحی شده است. شبکه برق تاب آور در برابر مداخلات فیزیکی و سایبری به‌طور آئی^۱ و نیمه آئی^۲ بدون قطع سرویس عمل می‌کند. به‌علاوه یک شبکه برق تاب آور، ساختار، منابع و بارهای خود را به‌سرعت تغییر می‌دهد.

به‌طور کلی می‌توان ارزیابی تاب‌آوری را در یک شبکه برق به‌صورت نمودار زیر بیان کرد [۱۵]:



شکل (۳): ارتباط آسیب‌پذیری، شناسایی سیستم و تاب‌آوری

اولین قدم در ارزیابی تاب‌آوری یک سیستم شناسایی و تحلیل رفتار سیستم است که شامل این موارد می‌شود: توپولوژی شبکه، خصوصیات فیزیکی، قیود بهره‌برداری و رفتارهای دینامیکی سیستم. تشخیص توپولوژی^۳ و تخمین حالت^۴ از اجزای اصلی شناسایی سیستم‌اند.

قدم بعدی در ارزیابی تاب‌آوری تحلیل آسیب‌پذیری است که با توجه به ماهیت احتمالاتی و وابسته به زمان بروز اختلالات، می‌بایست تحلیل زمانی دینامیکی^۵ بر روی پروسه تصادفی بروز اختلالات انجام شود. علاوه بر تحلیل عواقب ناشی از اختلالات، قابلیت انطباق سیستم^۶ و همچنین سرعت بازیابی^۷ سیستم از جمله روندهای زمان‌دار در تحلیل آسیب‌پذیری‌اند. با توجه به مداوم بودن تحلیل آسیب‌پذیری، پاسخ‌گویی سیستم در قبل، حین و بعد از بروز اختلالات امری ضروری خواهد بود.

ایده‌آل‌ترین سیستم آن است که عملکرد معمول خود را پس از اختلالات حفظ کند و از این‌رو، آخرین حلقه از زنجیره تاب‌آوری، بهره‌برداری تاب‌آور خواهد بود. بهره‌برداری تاب‌آور حول دو محور مهم زیر خواهد بود:

حمله به تجهیزات قدرت پیشنهاد شده که توسط آن امکان تخصیص رتبه بر اساس میزان خطر پذیری وجود دارد. این مدل‌سازی به تصمیم‌گیران در سنجش امنیت و یافتن راه‌کارهای مناسب جهت کاهش خسارات احتمالی کمک خواهد نمود.

ظرفیت: توانایی یک سیستم در انطباق با تغییرات احتمالی و متعادل کردن خسارات احتمالی است.

آسیب‌پذیری: احتمال شرطی از وقوع خطر، پتانسیل خطر و ظرفیت سیستم را آسیب‌پذیری می‌نامند. در تحلیل آسیب‌پذیری و در یافتن شاخص‌های موردقبول به سؤالات جدول (۲) باید پاسخ داد [۱۹]:

جدول (۲): معیارهای سنجش کیفی شاخص‌های آسیب‌پذیری

معیارهای سنجش کیفی شاخص‌های آسیب‌پذیری
آیا شاخص طرح‌شده مربوط به پایش آسیب‌پذیری هست؟
آیا شاخص یک مشخصه معین را پایش می‌کند؟
آیا شاخص طرح‌شده به‌سادگی منظور را می‌رساند؟
آیا محدودیت‌ها و فرض‌های غیر آشکار به‌خوبی شناسایی شده‌اند؟
آیا شاخص‌ها قابل اندازه‌گیری و کمی هستند؟
آیا اطلاعات لازم برای محاسبه شاخص‌ها قابل دسترسی است؟
آیا شاخص‌ها از دقت لازم برخوردار هستند؟
آیا روش محاسبه شاخص به‌خوبی تبیین شده است؟
آیا شاخص توسط ذینفعان تأیید شده است؟

به‌طور خاص، آسیب‌پذیری در حوزه شبکه‌های برق به شرح زیر خواهند بود [۲۰]:

- ✓ نداشتن آگاهی کامل از وضعیت سیستم
- ✓ طرح‌های کنترل جزیره‌ای نامناسب
- ✓ درک ناکافی از شبکه برق
- ✓ ضعف در فرآیندهای بهره‌برداری
- ✓ واکنش اضطراری
- ✓ مخابرات
- ✓ طراحی و توسعه نامناسب

مقاومت: توانایی مواجهه با مجموعه‌ای از اختلالات و درعین حال حفظ کارآمدی سیستم را مقاومت گویند.

قابلیت اطمینان: به توانایی شبکه برق در تحویل برق به مصرف‌کنندگان با کیفیتی مشخص حتی در زمان خرابی تجهیزات را قابلیت اطمینان گویند.

بر اساس آنچه گفته شد تاب‌آوری را می‌توان به‌صورت زیر تعریف کرد:

¹ Real-time

² Semi Real-time

³ Topology Detection

⁴ State Estimation

⁵ Temporal Dynamics

⁶ System adaptability

⁷ Recovery Speed

◀ بازیابی سیستم: استفاده از ابزارها و فن‌هایی که روند

بازیابی را تسریع کند مانند:

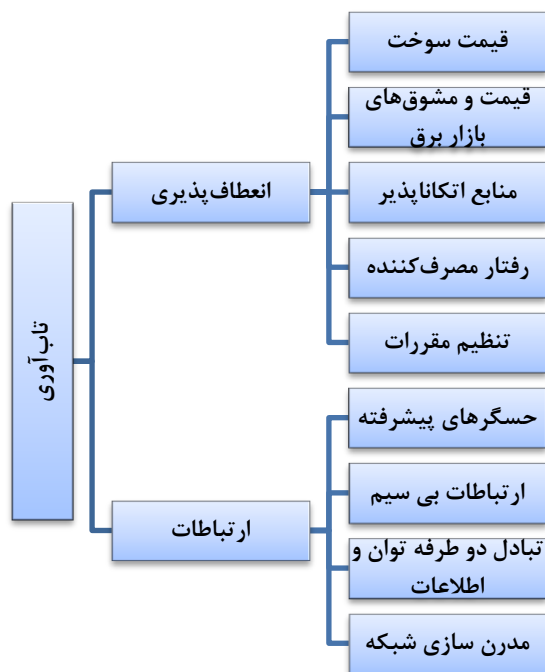
- ارزیابی خسارت
- مدیریت خاموشی‌ها
- مدیریت دارائی
- مدیریت منابع انسانی
- استراتژی‌های جایگزین مانند تعویض ترانسفورماتور

◀ بقا: استفاده از فن‌آوری‌هایی که به مصرف‌کنندگان

اجازه دهد تا بدون اتکا به شبکه اصلی عملکرد خود را

حفظ کنند مانند:

- حفظ ارتباط مخابراتی با مصرف‌کننده.
- به‌طور مثال ارتباط مستمر با صدا سیما جهت اعلان عمومی.
- بررسی دقیق منابع تولید پراکنده در تأمین برق مراکز حساس (ارتباط بی‌سیم، چراغ راهنمایی، بیمارستان‌ها و زندان‌ها)



شکل (۴): بخش‌های مختلف تاب‌آوری

۴. سنجش تاب‌آوری

سنجش تاب‌آوری به‌گونه‌ای متفاوت با قابلیت اطمینان، دارای سنجشی چندوجهی و پیچیده است. چراکه معیار سنجش باید توانایی محاسبه مدت‌زمان خاموشی، تعداد خاموشی و تعداد مصرف‌کنندگان با قطعی برق را در زمان رخدادهای شدید داشته باشد. به‌علاوه، سنجه‌هایی موردنیازند تا بتوانند تاب‌آوری کلی

• پتانسیل بازیابی^۱

• پتانسیل جذب^۲

از اجزای پتانسیل بازیابی می‌توان به تغییر سیستم با استفاده از شناسایی اختلال و شناسایی خود سیستم در برگشتن به عملکرد معمول اشاره کرد. در تعریف پتانسیل جذب می‌توان به توانایی سیستم در جذب پیامدهای ناشی از بروز اختلالات اشاره کرد [۲۱].

مرجع [۲۲]، تاب‌آوری را در بخش‌های شکل (۴) دسته‌بندی

می‌کند:

انعطاف‌پذیری: به توانایی شبکه برق در سازگارشان با تغییر شرایط به صورتی که تأمین برق به‌صورت ایمن^۳، قابل اطمینان^۴، مقرون‌به‌صرفه^۵ و مسئولانه نسبت به محیط‌زیست^۶ انجام شود. با توجه به عوامل ذکرشده در نمودار، انعطاف‌پذیری برای صاحبان و بهره‌برداران شبکه، خطوط انتقال و توزیع، مصرف‌کنندگان، سیاست‌گذاران و بازیگران بازارهای برق اهمیت دارد.

از سوی دیگر، ارتباطات به مجموعه‌ای از سیستم‌های ارتباطی، نظارت و مانیتورینگ، دسترسی به جریان‌های اطلاعات، و عملکرد اجزاء مختلف زنجیره ارزش از تولیدکننده تا مصرف‌کننده را شامل می‌شود. ارتباطات، به شبکه‌های برق کمک می‌کند تا انعطاف‌پذیرتر و تاب‌آورتر بوده و همچنین جذب سرمایه‌گذاری بیشتر در این بخش را در عین ارزش‌آفرینی برای مصرف‌کنندگان به همراه داشته باشد.

بر این اساس، تاب‌آوری سه بخش اساسی خواهد داشت:

◀ پیشگیری از خسارت: استفاده از طراحی‌های مهندسی

و فن‌آوری‌های جدید به‌منظور مستحکم‌تر کردن شبکه برق در مقابله با خسارت. موارد زیر از اهم اقدامات در این حوزه‌اند:

- طراحی استانداردها
- ساخت‌وساز
- نگهداشت
- بازرسی
- عملیات بهره‌برداری
- امنیت فیزیکی و سایبری

¹ Recovery Potential

² Absorbing Potential

³ Safe

⁴ Reliably

⁵ Affordably

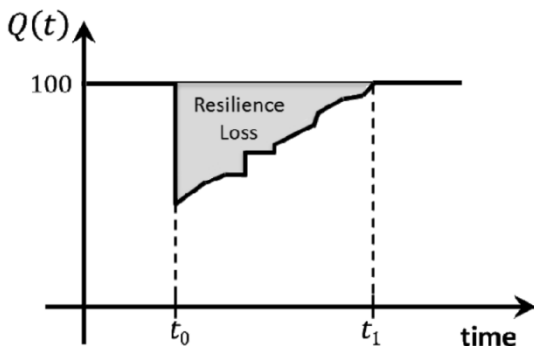
⁶ Environmentally Responsibly

برحسب کاربرد، شاخص‌ها می‌توانند نشان‌دهنده وضعیت ایستا یا پویای سیستم باشند. از طرف دیگر شاخص‌های کمی یا به صورت قطعی یا تصادفی بررسی می‌شوند:

- ◀ قطعی در مقابل احتمالاتی: در روش قطعی، معیار شامل عدم قطعیت (مانند احتمال وقوع) نیست، درحالی‌که در روش تصادفی رفتار احتمالاتی سیستم با وجود عدم قطعیت مورد توجه قرار می‌گیرد.
- ◀ پویا در مقابل ایستا: رفتار متغیر با زمان در مدل پویا و مستقل از زمان در حالت ایستا بررسی می‌شود.
- یک مدل ایستای قطعی برای اندازه‌گیری تلفات در زلزله معادله زیر است [۱۲]:

$$RL = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt \quad (1)$$

در این معادله، t_0 لحظه ایست که حادثه رخ می‌دهد، و t_1 زمانی است که جامعه به حالت خود بازمی‌گردد. با در نظر گرفتن اینکه کیفیت زیرساخت جامعه ۱۰۰ درصد فرض شده باشد، معیار تلفات تاب‌آوری (RL) به صورت ناحیه سایه‌دار در شکل (۵) مشخص می‌شود [۱۲].



شکل (۵): معیار تلفات تاب‌آوری

در شکل بالا، مقادیر زیاد RL نشان‌دهنده تاب‌آوری پایین و مقادیر کم آن نشان‌دهنده توان بالای تاب‌آوری سیستم است. اگرچه از این روش عمومی در هر نوع سیستمی می‌توان استفاده کرد، لیکن، این معیار فرض می‌کند که کیفیت زیرساخت یک سیستم ۱۰۰ درصد باشد که دور از واقعیت می‌نماید. از این‌رو، مثلث تاب‌آوری، طبق تعریف مراجع [۲۷-۲۸]، می‌تواند نشان‌دهنده میزان خسارت بالقوه باشد. به نحوی که با فرض:

$$R(X, T) = \frac{T^* - XT/2}{T^*} = 1 - \frac{XT}{2T^*} \quad (2)$$

X به‌عنوان درصدی از عملکرد از دست‌رفته پس از حادثه و T

سیستم، ناحیه‌ای و حتی تاب‌آوری تجهیزات را بررسی کنند. همچنین، سنجش‌ها باید بعد از زمان را برای بیشینه کردن زمان اثرگذاری اختلال و کمینه کردن زمان بازیابی در مطالعات اضافه کنند. برای روشن شدن موضوع، در ادامه به بررسی شاخص‌های ارزیابی کیفی، نیمه کمی و کمی خواهیم پرداخت.

۱-۴- شاخص‌های کیفی:

مرجع [۲۳] چارچوب کیفی کلی برای ارزیابی سیستم‌های اجتماعی و زیست‌محیطی را این‌گونه معرفی می‌نماید:

- ◀ تعریف و شناخت سیستم مورد مطالعه
- ◀ شناسایی مقیاس مناسب برای تاب‌آوری
- ◀ شناسایی محرک‌های سیستم و اختلالات خارجی و داخلی
- ◀ شناسایی بازیگران اصلی سیستم
- ◀ توسعه مدل‌های مفهومی به‌منظور شناسایی فعالیت‌های ضروری بازیابی
- ◀ ارائه نتایج به قانون‌گذار
- تاب‌آوری در سیستم امنیت ملی هشت اصل راهبردی به صورت زیر مطرح شده است [۲۴]:

- ◀ ارزیابی تهدید و خطر
- ◀ نیرومندی
- ◀ کاهش پیامدها
- ◀ سازگاری
- ◀ برنامه‌ریزی آگاهانه خطر پذیری
- ◀ سرمایه‌گذاری آگاهانه خطر پذیری
- ◀ هماهنگ‌سازی اهداف
- ◀ دیدگاه جامع به کلیه موضوعات

۲-۴- شاخص‌های نیمه کمی

شاخص نیمه کمی معمولاً از مجموعه‌ای از پرسشنامه‌هایی طراحی شده که به‌منظور ارزیابی مشخصات مختلف سیستم مبتنی بر تاب‌آوری (مانند افزونگی^۱، کارآمدی^۲) در مقیاس لیکرت^۳ (۰ تا ۱۰) و یا مقیاس درصدی طراحی می‌شود. برای دستیابی به شاخص نیمه کمی، نظر کارشناسان با متغیرهای زیادی جمع‌آوری می‌شود. سپس با تخصیص امتیاز به هر متغیر، می‌توان میانگین غیر وزنی آن را محاسبه کرد و امتیاز نهایی هر متغیر را به دست آورد [۲۵-۲۶].

شاخص‌های کمی

¹ Redundancy

² Resourcefulness

³ Likert

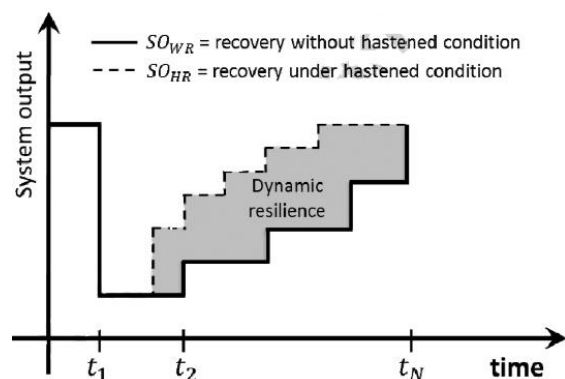
پویا در [۳۰]، جنبه‌های متغیر با زمان بازیابی در نظر گرفته شده است. تاب‌آوری پویا با شتاب‌دهی تعمیر و بازسازی حجم سرمایه به دست می‌آید به طوری که در فرمول تاب‌آوری پویا در معادله زیر، سرمایه‌گذاری یک فاکتور مهم حساب می‌شود.

$$DR = \sum_{i=1}^N SO_{HR}(t_i) - SO_{WR}(t_i) \quad (4)$$

مقدار DR تابعی از خروجی سیستم تحت بازیابی سریع، SO_{HR} و خروجی سیستم بدون بازیابی سریع، SO_{WR} است که در آن t_i ، i امین مرحله زمانی در طول زمان بازیابی، و N تعداد مراحل زمانی در نظر گرفته شده است. DR به صورت گرافیکی در شکل (۸) ترسیم شده است.

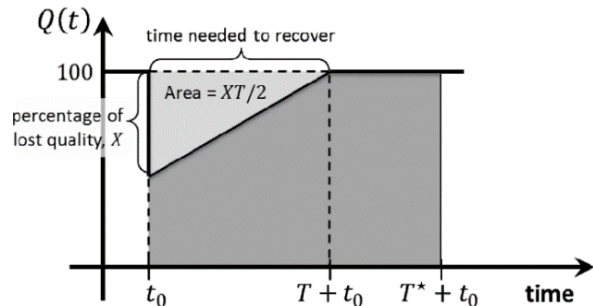
علی‌رغم سادگی مدل در این معیار، از آنجایی که تعریف صفر و یکی برای تبیین تاب‌آوری ارائه نمی‌دهد می‌توان مقادیر متوسط تاب‌آوری را نیز لحاظ نمود. در مرجع [۳۱]، یک معیار متغیر با زمان ارائه شده که تاب‌آوری را با نرخ بازیابی خسارات مقداردهی می‌کند. با فرض این‌که، عملکرد سیستم در یک نقطه از زمان توسط تابع عملکرد اندازه‌گیری می‌شود، چهار مورد از حالات سیستم که در تعیین مقدار تاب‌آوری اهمیت دارند، (مانند شکل ۹) عبارت‌اند از:

- ◀ حالت اصلی پایدار: که عملکرد عادی سیستم را پیش از وقوع حادثه نشان می‌دهد که از زمان t_0 شروع شده و در زمان t_e پایان می‌یابد.
- ◀ حالت تخریب‌شده: که توسط حادثه مخرب t_e در زمان t_e ایجاد می‌شود و اثرگذاری آن در زمان t_d آغاز می‌شود و عملکرد سیستم را در بازه زمانی t_d تا t_s توصیف می‌کند.
- ◀ زمان بازیابی: که سرعت و زمان بازیابی را نشان می‌دهد که از t_f شروع و تا t_f ادامه خواهد داشت.
- ◀ حالت بازیابی شده پایدار: که به سطح عملکرد حالت پایدار جدید اشاره می‌کند.



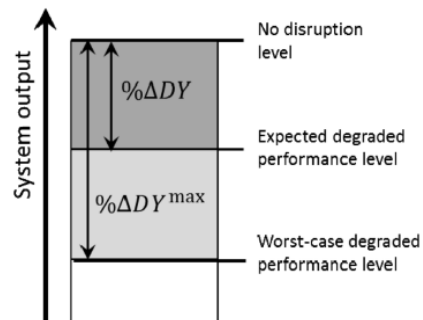
شکل (۸): تاب‌آوری اقتصادی پویا

زمان موردنیاز برای بازیابی کامل و T^* زمان موردنیاز برای تشخیص عملکرد از دست‌رفته، مجموع خسارت عملکرد از دست‌رفته به صورت شکل (۶) خواهد بود:



شکل (۶): مثلث تاب‌آوری

در مرجع [۹]، تاب‌آوری یک سیستم اقتصادی را توانایی یک نهاد یا سیستم برای حفظ عملکرد خود هنگام وقوع حادثه معرفی کرده است. این معیار، نرخ افت ایجادشده در خروجی سیستم و افت بالقوه بیشینه در خروجی سیستم مانند شکل (۷) اندازه‌گیری می‌کند.



شکل (۷): تعیین مقدار تاب‌آوری اقتصادی ایستا

معیار پیشنهادی در معادله زیر قابل ارزیابی است به طوری که در آن، $\% \Delta DY$ بیانگر عملکرد سیستم مختل نشده و عملکرد مورد انتظار سیستم مختل شده بوده و $\% \Delta DY^{\max}$ نیز بیانگر تفاوت عملکرد سیستم مختل نشده و بدترین عملکرد سیستم مختل شده است.

$$R = \frac{\% \Delta DY^{\max} - \% \Delta DY}{\% \Delta DY^{\max}} \quad (3)$$

در این مدل ممکن است نتوان سطح مورد انتظار کاهش عملکرد را به خصوص برای حوادث مخرب ناشناخته به سادگی تخمین زد. زیرا، عمق، پهنا و شدت حوادث ناشناخته را نمی‌توان با دقت بالا تخمین زد. در مرجع [۲۹]، برای محاسبه تاب‌آوری سیستم حمل‌ونقل لندن، از معیار مشابهی استفاده کرده است که در آن برای مدل حمل‌ونقل تخریب‌شده، بدترین اختلال، حداکثر کاهش سفر مسافران در نظر گرفته شده است. تعریف تاب‌آوری

مرجع [۳۳] پیشنهاد شده است. در این مرجع، از معیار بینابینی مرکزیت^۱ که عبارت است از میزان دسترسی یک گره با کوتاه‌ترین مسیرها به دیگر نقاط شبکه، به‌عنوان معیار تاب‌آوری استفاده شده است. لذا، شبکه‌های با میانگین بینابینی^۲ بالاتر تاب‌آوری کمتری خواهند داشت چراکه یک گره به میزان زیادتری مسیر وابسته است. به‌علاوه، معیار نزدیکی مرکزیت^۳ که شرایط دسترسی یک گره را به بقیه شبکه مشخص می‌کند با عنصر زمان در هنگام بازیابی ترکیب شده و بیانگر زمان دسترسی به گره در زمان بازیابی خواهد بود. از این‌رو معیار کمی تاب‌آوری، مانند معادله زیر نسبت نزدیکی مرکزیت شبکه قبل از رخداد حادثه به این مقدار پس از حادثه تعریف می‌شود که مقداری متغیر بین صفر و یک است.

$$R_{cc} = \frac{C_c(v)_{before_shock}}{C_c(v)_{after_shock}} \quad (7)$$

به‌نحوی که مقدار نزدیکی مرکزیت $C_c(v)$ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_c = \frac{\sum_{s \in V, s \neq v} d_G(v, s)^* t}{n-1} \quad (8)$$

که در آن، d_G کوتاه‌ترین فاصله بین گره i و j ، v گره‌ها در شبکه، t زمانی که طول می‌کشد اطلاعات از گره i به j برسد و n تعداد گره‌ها در شبکه است.

ذکر این نکته ضروری است که با میل t_{after_shock} به بی‌نهایت، مقدار تاب‌آوری R_{cc} به صفر می‌رسد.

در حوزه حمل‌ونقل، مرجع [۳۴]، معیار تاب‌آوری را میزان تأمین شدن تقاضای مصرف‌کننده پس از وقوع حادثه تعریف می‌کند. در معادله زیر، مقدار تقاضای بیشینه‌ای را که برای مقصد اصلی^۴ w پس از تخریب قابل تأمین می‌باشد را نشان می‌دهد. همچنین، مقدار D_w تقاضایی است که در زمان قبل از تخریب قابل تأمین بوده است:

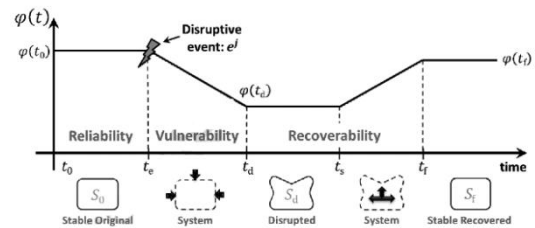
$$R = E \left(\frac{\sum_w d_w}{\sum_w D_w} \right) = \frac{1}{\sum_w D_w} E \left(\sum_w d_w \right) \quad (9)$$

ذکر این نکته ضروری است که زمان بازیابی برای این مدل

ابعاد اصلی تاب‌آوری که در شکل (۹) نشان داده شده‌اند عبارت‌اند از قابلیت اطمینان یا توانایی سیستم در حفظ عملکرد عادی سیستم پیش از اختلال، آسیب‌پذیری یا توانایی سیستم در دفع اثرات اولیه پس از وقوع حادثه e^j . مقدار متغیر با زمان تاب‌آوری در معادله زیر تعریف شده است که در آن رفتار تاب‌آور تابعی از e^j می‌باشد. نماد $R(t/e^j)$ در مرجع [۳۲] ابداع شده چراکه از R معمولاً برای نشان دادن قابلیت اطمینان استفاده می‌شود.

$$R_\varphi(t|e^j) = \frac{\varphi(t|e^j) - \varphi(t_a|e^j)}{\varphi(t_0) - \varphi(t_a|e^j)} \quad (5)$$

همان‌طور که اشاره شد، صورت این معیار نشانگر بازیابی تا زمان t بوده و مخرج آن، مجموع خسارات وارده از وقوع حادثه e^j را نشان می‌دهد. همچنین، نویسندگان، هزینه کل سیستم بازیابی شده از حادثه مخرب را مجموع هزینه‌های اجرای فعالیت‌های تاب‌آوری و خسارات وارده به سیستم ناشی از آن حادثه محاسبه کرده‌اند.



شکل (۹): عملکرد سیستم در توصیف حالات مختلف تاب‌آوری در مرجع [۳۱]

در مرجع، معیاری برای اندازه‌گیری تاب‌آوری سیستم‌های اطلاعاتی سازمان‌یافته توسط معادله زیر ارائه شده است:

$$R = \max \sum_{i=1}^m z_i \frac{d_i}{c_i} \quad (6)$$

در معادله بالا، m تعداد عملیات در سیستم اطلاعاتی سازمان‌یافته، d_i زمان مورد نیاز برای بازیابی عملیات i و c_i زمان اتمام عملیات i و z_i وزن داده شده به عملیات i می‌باشد. زمانی که همه عملیات‌ها در زمان موردنیاز بازیابی شوند، این معیار تاب‌آوری مقداری بزرگتر از یک خواهد گرفت و مقادیر بزرگتر این معیار نشان‌دهنده سیستم تاب‌آورتر می‌باشد. محدودیت اصلی این معیار این است که تعداد فعالیت‌های بازیابی و تعداد عملیات موردنیاز، معلوم فرض شده است درحالی‌که در واقعیت، سیستم‌ها با شرایط نامعلومی مواجه‌اند.

یک معیار تاب‌آوری برای شبکه‌های زیرساختی کامپیوتری در

¹ Betweenness Centrality

² Average Betweenness

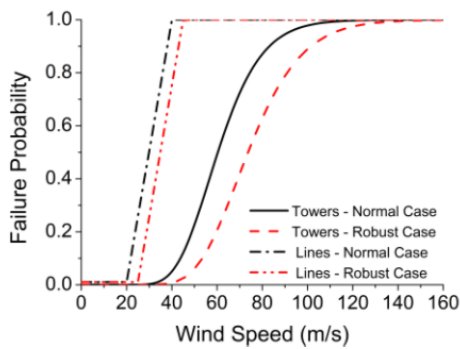
³ Closeness Centrality

⁴ Origin Destination

می‌دهد:

$$P_T(w) = \begin{cases} 0, & \text{if } w \leq w_{critical} \\ P_{T_hw} & \text{if } w_{critical} \leq w \leq w_{collapse} \\ 1, & \text{if } w \geq w_{collapse} \end{cases} \quad (10)$$

که در آن، P_{T_hw} احتمال خرابی دکل وابسته به سرعت باد w ، hw در زمان باد شدید، $w_{critical}$ سرعت بادی است که احتمال خراب شدن بالا می‌رود و $w_{collapse}$ سرعت بادی است که دکل با احتمال بالا خراب خواهد شد. معادله بالا منحنی شکنندگی طبق شکل (۱۰) را می‌سازد.



شکل (۱۰): منحنی شکنندگی دکل انتقال

ذکر این نکته ضروری است که خرابی یک دکل به خرابی کل کریدور انتقال می‌انجامد. پس از حصول منحنی شکنندگی، با شبیه‌سازی مونت کارلو، به صورت تکرارشونده i نرخ خرابی تجهیز (در اینجا دکل انتقال) به صورت زیر حاصل می‌رود. به طوری که با تولید یک عدد تصادفی r متعلق به تابع توزیع یکنواخت مناسب، و مقایسه زیر، مقدار نرخ خرابی در هر بار تکرار مونت کارلو به ازای شرایط وخیم آب و هوایی حاصل می‌رود:

$$F_T(w_i) = \begin{cases} 0, & \text{if } P(w_i) < r \\ 1, & \text{if } P(w_i) > r \end{cases} \quad (11)$$

پس از حصول نرخ خرابی، می‌توان با الگوریتم زیر تاب‌آوری لحظه‌ای را محاسبه نمود:

- ۱- در هر بار تکرار شرایط آب و هوایی به روز شوند.
- ۲- در صورت گستردگی جغرافیایی وسیع شبکه، می‌توان شبکه را ناحیه‌بندی نمود تا شرایط آب و هوایی در هر ناحیه همگن باشد.
- ۳- نرخ خرابی وابسته به آب‌وهوا به مسئله پخش بار بهینه AC وارد شده به طوری که با شبیه‌سازی مونت کارلو بتوان اثرات زمانی و مکانی را در بهره‌برداری سیستم لحاظ کرد.

در نظر گرفته نشده و برای دو سیستم با زمان‌های متفاوت بازیابی مقدار تاب‌آوری یکسانی را نشان می‌دهد.

در شبکه‌های برق، تلاش‌هایی برای کمی‌سازی معیارهای تاب‌آوری و قابلیت اطمینان در زمان مواجه شدن با شرایط فاجعه‌بار آب و هوایی انجام شده است [۳۵-۳۸]. در مطالعات اولیه تاب‌آوری، اثرات مخرب شرایط فاجعه‌بار آب و هوایی در نرخ خرابی تجهیزات و همچنین نرخ بازیابی آن‌ها مدل‌سازی شده که بیشتر بر روی شاخص‌های قابلیت اطمینان تأثیر می‌گذارند. در این میان مدل مارکوف^۱ [۳۷ و ۳۹] و شبیه‌سازی مونت کارلو ترتیبی^۲ [۳۵ و ۳۸] دو راه‌کار عمده برای ورود تاب‌آوری به مباحث قابلیت اطمینان هستند. به علاوه، مطالعه خطر پذیری و چالش‌های خاموشی‌های پشت سر هم در مرجع [۴۰] به عنوان اولین تلاش‌ها برای مدل‌سازی تاب‌آوری انجام شده است. لیکن، از آنجایی که در هیچ‌یک از مطالعات بالا، تاب‌آوری سیستم قدرت به طور مجزا از قابلیت اطمینان و کمی، شاخص بندی نشده است مراجع [۴۱-۴۲] به طور خاص به این موارد پرداخته‌اند. در این مراجع، با استفاده از سری‌های زمانی در شبیه‌سازی مونت کارلو به تبیین معیارهای مناسب تاب‌آوری پرداخته شده است. در این راستا، از مفهوم منحنی شکنندگی^۳ تجهیز در شرایط آب و هوایی فاجعه‌بار به منظور بررسی نرخ خرابی^۴ خطوط انتقال و دکل‌های برق در شرایط خاص آب و هوایی استفاده شده است. منحنی شکنندگی از روش‌های زیر قابل محاسبه است:

- ◀ به طور تجربی از تحلیل آماری خرابی‌های تاریخی: از این روش در شبکه‌های توزیع، به دلیل وجود تاریخچه خرابی‌های بیشتر نسبت به خطوط انتقال استفاده می‌شود.
 - ◀ به طور آزمایشگاهی از طریق تخریب عمدی تجهیز: از آنجایی که تجهیزات انتقال بسیار گران‌قیمت هستند این روش بسیار پرهزینه خواهد بود.
 - ◀ به طور تحلیلی با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی ساختاری: به دلیل کمبود اطلاعات در دست رفتن عملکرد خطوط انتقال به واسطه طوفان‌های شدید، این روش بهترین گزینه است.
 - ◀ نظر خبرگان
 - ◀ ترکیبی از روش‌های بالا
- معادله زیر منحنی شکنندگی را برای یک دکل انتقال نشان

¹ Markov

² Sequential Monte Carlo

³ Fragility Curve

⁴ Failure Rate

منتقل کرد. در این صورت، باوجود اتصالات و طراحی‌های بهینه خطوط انتقال و دکل‌ها نرخ خروج در بحران‌ها کاسته می‌رود.

◀ شبکه پاسخگو^۵ بسیج امکانات و نیروی انسانی به‌گونه‌ای اختصاص یابد که در زمان اضطرار زمان بازیابی برای یک خط با چند خط تفاوت نکند. یعنی نرخ تعمیر در شرایط وخیم به حداقل برسد.

۵. نتیجه‌گیری

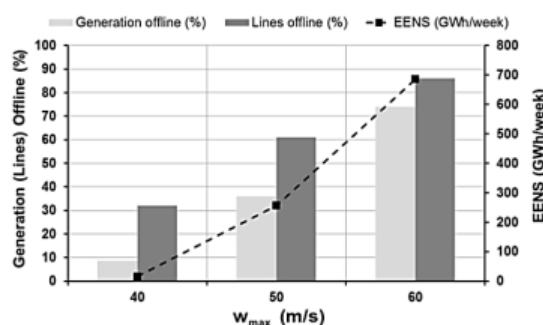
در این مقاله به تفکیک مفاهیم، بررسی تعاریف و سنجش مسئله تاب‌آوری به‌عنوان مهم‌ترین حوزه در پدافند غیرعامل شبکه‌های برق پرداخته شد. مفاهیم مرتبط از جمله، قابلیت اطمینان، بقاء، مقاومت، خطر پذیری و آسیب‌پذیری بررسی و مقایسه شدند. سپس، تعاریف متنوع مطرح‌شده در باب تاب‌آوری شبکه برق گردآوری و به‌طور خلاصه بیان شد. نهایتاً مبحث سنجش تاب‌آوری به‌عنوان ابزاری برای رسد عملکرد شبکه برق در این حوزه از جنبه‌های مختلف بررسی شد. در پایان نکات زیر قابل‌طرح‌اند:

- ✓ تاب‌آوری مستقل از مباحث قابلیت اطمینان ولی در ارتباط با آن و همچنین در ارتباط با مبحث کلان آسیب‌پذیری قابل‌رسد و تحلیل است.
- ✓ تاب‌آوری در ذیل رخدادهای با احتمال وقوع کم ولی اثرات تخریبی بسیار بالا جای می‌گیرد.
- ✓ زمان، عنصر کلیدی در بررسی تاب‌آوری چه در حوزه بهره‌برداری و چه در حوزه توسعه شبکه نقش‌آفرین است، به‌طوری‌که تاب‌آوری برخلاف قابلیت اطمینان غیر ایستا و زمان محور است.
- ✓ در بررسی تاب‌آوری یک شبکه، علاوه بر تمهیدات فنی، نیروی انسانی در پیش‌گیری و بازیابی سریع سیستم و تجهیز نقش تعیین‌کننده دارند. به‌نحوی‌که عملکرد سریع گروه بازیابی می‌تواند از خاموشی‌های پست سر هم و گسترده جلوگیری کرده و اثرات رخداد مخرب را به حداقل برساند [۴۱].

۶. منابع

[۱] ورکی، س.ا، مشهدی، ح، مبانی نظری مدیریت آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها، ۱۳۸۶.

با داشتن شرایط بهره‌برداری در هر تکرار، می‌توان شاخص‌های تاب‌آوری را مشخص نمود. در مرجع [۴۲]، استفاده توأمان از شاخص‌های قابلیت اطمینان و زیرساختی را به شاخص‌های تاب‌آوری تعبیر کرده است. شاخص‌های قابلیت اطمینان مورد استفاده، میزان انرژی تأمین نشده^۱ و تعداد دفعات تأمین نشدن بار^۲ بوده و شاخص‌های زیرساختی، درصد تولید یا خطوط انتقال به کل ظرفیت که به واسطه توفان از دسترس خارج شده‌اند می‌باشد.



شکل (۱۱): مقایسه شاخص‌های بهره‌برداری و زیرساختی

همان‌طور که در مثال شکل (۱۱) آمده است، شاخص‌های بهره‌برداری (قابلیت اطمینان) رفتار متفاوتی با شاخص‌های زیرساختی نشان می‌دهند. به‌طوری‌که در سرعت باد تا ۴۰ متر بر ثانیه، از دست رفتن خطوط و ظرفیت تولید (میله‌های خاکستری) هیچ‌گونه تأثیری بر انرژی تأمین نشده نداشته به‌طوری‌که این مقدار در سرعت باد ۴۰ متر بر ثانیه صفر است. این مسئله به دلیل حضور خطوط افزونه در شبکه برق رخ داده است. به‌تدریج با افزایش سرعت باد و از دست رس خارج شدن خطوط و ظرفیت تولید انرژی تأمین نشده افزایش می‌یابد. پس می‌توان گفت که تحلیل همزمان شاخص‌های ظرفیت و بهره‌برداری سنجش مناسبی برای برآورد تاب‌آوری خواهد بود.

ذکر این نکته ضروری است که بر اساس معیار گفته‌شده ارتقاء تاب‌آوری شبکه برق با سه روش ممکن می‌رود:

◀ شبکه افزونه^۳: شبکه ایست که برای خطوط انتقال حیاتی خود خطوطی موازی و مشابه در نظر گرفته باشد.

◀ شبکه مقاوم^۴: با استفاده از مواد و تجهیزات باکیفیت‌تر بتوان منحنی شکنندگی را به سمت راست

^۱ Expected Energy not Supplied

^۲ Loss of Load Frequency

^۳ Redundant Network

^۴ Robust Network

^۵ Responsive Network

- International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security, 2007, pp. 54–67.
- [17] L. A. T. Cox Jr, "Evaluating and Improving Risk Formulas for Allocating Limited Budgets to Expensive Risk- Reduction Opportunities," *Risk Anal.*, vol. 32, no. 7, pp. 1244–1252, 2012.
- [18] R. Gaffarpour and A. Pourmoosa, "Risk Assessment, Modeling, and Ranking for Power Network Facilities Regarding to Sabotage," *J. Passiv. Def. Sci. Tech.*, vol. 6, pp. 128–144, 2015.
- [19] M. Hofmann, G. Kjølle, and O. Gjerde, "Development of indicators to monitor vulnerabilities in power systems," Pap. Accept. PSAM11/ESREL2012, Helsinki, 2012.
- [20] M. Schläpfer, T. Kessler, and W. Kröger, "Reliability analysis of electric power systems using an object-oriented hybrid modeling approach," *arXiv Prepr. arXiv1201.0552*, 2012.
- [21] E. D. Vugrin, D. E. Warren, and M. A. Ehlen, "A resilience assessment framework for infrastructure and economic systems: Quantitative and qualitative resilience analysis of petrochemical supply chains to a hurricane," *Process Saf. Prog.*, vol. 30, no. 3, pp. 280–290, 2011.
- [22] EPRI, "Electric Power System Resiliency Challenges and Opportunities," 2016.
- [23] R. Alliance, "Assessing resilience in social-ecological systems: Workbook for practitioners," 2010.
- [24] J. H. Kahan, A. C. Allen, and J. K. George, "An operational framework for resilience," *J. Homel. Secur. Emerg. Manag.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–48, 2009.
- [25] T. J. Pettit, J. Fiksel, and K. L. Croxton, "Ensuring supply chain resilience: development of a conceptual framework," *J. Bus. Logist.*, vol. 31, no. 1, pp. 1–21, 2010.
- [26] S. L. Cutter, L. Barnes, M. Berry, C. Burton, E. Evans, E. Tate, and J. Webb, "A place-based model for understanding community resilience to natural disasters," *Glob. Environ. Chang.*, vol. 18, no. 4, pp. 598–606, 2008.
- [27] C. W. Zobel and L. Khansa, "Characterizing multi-event disaster resilience," *Comput. Oper. Res.*, vol. 42, pp. 83–94, 2014.
- [28] C. W. Zobel, "Representing perceived tradeoffs in defining disaster resilience," *Decis. Support Syst.*, vol. 50, no. 2, pp. 394–403, 2011.
- [29] A. Cox, F. Prager, and A. Rose, "Transportation security and the role of resilience: A foundation for operational metrics," *Transp. policy*, vol. 18, no. 2, pp. 307–317, 2011.
- [30] A. Rose, "Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions," *Environ. Hazards*, vol. 7, no. 4, pp. 383–398, 2007.
- [31] D. Henry and J. E. Ramirez-Marquez, "Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 99, pp. 114–122, 2012.
- [2] J. T. Brown, "Presidential Policy Directive 8 and the National Preparedness System: Background and Issues for Congress," 2011.
- [3] M. Panteli and P. Mancarella, "The Grid: Stronger, Bigger, Smarter?: Presenting a Conceptual Framework of Power System Resilience," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 58–66, 2015.
- [4] Y. Sheffi, "The resilient enterprise: overcoming vulnerability for competitive advantage," MIT Press Books, vol. 1, 2005.
- [5] T. J. Vogus and K. M. Sutcliffe, "Organizational resilience: towards a theory and research agenda," in *Systems, Man and Cybernetics, 2007. ISIC. IEEE International Conference on*, pp. 3418–3422, 2007.
- [6] E. S. Patterson, D. D. Woods, R. I. Cook, and M. L. Render, "Collaborative cross-checking to enhance resilience," *Cogn. Technol. Work*, vol. 9, no. 3, pp. 155–162, 2007.
- [7] W. N. Adger, "Social and ecological resilience: are they related?," *Prog. Hum. Geogr.*, vol. 24, no. 3, pp. 347–364, 2000.
- [8] A. Rose, "Economic resilience to disasters: Community and Regional Resilience Institute (CARRI) research report 8," Oakridge, TN CARRI Inst., p. 2009, 2009.
- [9] A. Rose and S. Liao, "Modeling regional economic resilience to disasters: A computable general equilibrium analysis of water service disruptions," *J. Reg. Sci.*, vol. 45, no. 1, pp. 75–112, 2005.
- [10] R. Martin, "Regional economic resilience, hysteresis and recessionary shocks," *J. Econ. Geogr.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–32, 2012.
- [11] L. T. T. Dinh, H. Pasman, X. Gao, and M. S. Mannan, "Resilience engineering of industrial processes: principles and contributing factors," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 25, no. 2, pp. 233–241, 2012.
- [12] M. Bruneau, S. E. Chang, R. T. Eguchi, G. C. Lee, T. D. O'Rourke, A. M. Reinhorn, M. Shinozuka, K. Tierney, W. A. Wallace, and D. von Winterfeldt, "A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities," *Earthq. spectra*, vol. 19, no. 4, pp. 733–752, 2003.
- [13] M. Chaudry, P. Ekins, K. Ramachandran, A. Shakoor, J. Skea, G. Strbac, X. Wang, and J. Whitaker, "Building a resilient UK energy system," 2011.
- [14] R. Billinton, *Power system reliability evaluation*. Taylor & Francis, 1970.
- [15] R. Arghandeh, A. von Meier, L. Mehrmanesh, and L. Mili, "On the definition of cyber-physical resilience in power systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1060–1069, 2016.
- [16] J.-C. Laprie, K. Kanoun, and M. Kaâniche, "Modelling interdependencies between the electricity and information infrastructures," in

- weather effects in composite system reliability evaluation using sequential simulation," IEE Proceedings-Generation, Transm. Distrib., vol. 141, no. 6, pp. 575–584, 1994.
- [39] D. Liu, F.-Y. Zhao, and G.-F. Tang, "Active low-grade energy recovery potential for building energy conservation," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 9, pp. 2736–2747, 2010.
- [40] M. Vaiman, K. Bell, Y. Chen, B. Chowdhury, I. Dobson, P. Hines, M. Papic, S. Miller, and P. Zhang, "Risk assessment of cascading outages: Methodologies and challenges," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, p. 631, 2012.
- [41] M. Panteli and P. Mancarella, "Modeling and Evaluating the Resilience of Critical Electrical Power Infrastructure to Extreme Weather Events," *IEEE Systems Journal*, vol. PP, no. 99, pp. 1–10, 2015.
- [42] M. Panteli, C. Pickering, S. Wilkinson, R. Dawson, and P. Mancarella, "Power System Resilience to Extreme Weather: Fragility Modelling, Probabilistic Impact Assessment, and Adaptation Measures," *IEEE Trans. Power Syst.*, 2016.
- [32] Å. J. Holmgren, "A framework for vulnerability assessment of electric power systems," in *Critical Infrastructure*, Springer, 2007, pp. 31–55.
- [33] M. Omer, A. Mostashari, and U. Lindemann, "Resilience analysis of soft infrastructure systems," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 28, pp. 565–574, 2014.
- [34] L. Chen and E. Miller-Hooks, "Resilience: an indicator of recovery capability in intermodal freight transport," *Transp. Sci.*, vol. 46, no. 1, pp. 109–123, 2012.
- [35] K. Alvehag and L. Soder, "A reliability model for distribution systems incorporating seasonal variations in severe weather," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 2, pp. 910–919, 2011.
- [36] Y. Liu and C. Singh, "Reliability evaluation of composite power systems using Markov cut-set method," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 777–785, 2010.
- [37] R. Billinton and K. E. Bollinger, "Transmission system reliability evaluation using Markov processes," *IEEE Trans. power Appar. Syst.*, no. 2, pp. 538–547, 1968.
- [38] M. R. Bhuiyan and R. N. Allan, "Inclusion of