

# چارچوب طراحی شبکه‌های توزیع تاب‌آور در برابر حوادث طبیعی

معصومه کریمی<sup>۱</sup> سجاد نجفی روادانق<sup>۲</sup> محمودرضا حقی فام<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری- آزمایشگاه تحقیقاتی شبکه‌های هوشمند تاب‌آور - گروه مهندسی برق- دانشگاه شهید مدنی آذربایجان- تبریز-

ایران

[m.karimi@azaruniv.ac.ir](mailto:m.karimi@azaruniv.ac.ir)

۲- دانشیار- آزمایشگاه تحقیقاتی شبکه‌های هوشمند تاب‌آور - گروه مهندسی برق- دانشگاه شهید مدنی آذربایجان- تبریز- ایران

[s.najafi@azaruniv.ac.ir](mailto:s.najafi@azaruniv.ac.ir)

۳- استاد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس- تهران- ایران

[haghifam@modares.ac.ir](mailto:haghifam@modares.ac.ir)

**چکیده:** سیستم قدرت به‌طور معمول بر مبنای اصول اساسی قابلیت اطمینان، امنیت و کفایت، طراحی و بهره‌برداری می‌شوند. این اصول می‌توانند به درستی با خطاهای شناخته‌شده در تجهیزات زیرساخت قدرت تعامل کنند. با این حال، اخیراً با رخداد تهدیدهایی با احتمال وقوع پایین و شدت تخریب بالا، نگرانی‌هایی در باب نگرش متداول قابلیت اطمینان گرا اوج گرفته است. از این رو تاب-آورساختن سیستم قدرت در برابر انواع تهدیدها و ارتقا امنیت انرژی در شرایط بحرانی، از نکات بسیار مهمی است که باید مورد توجه جدی قرار گیرد. شبکه توزیع به دلیل نقطه اتصال به مصرف کنندگان نهایی دارای جایگاه ویژه‌ای است از این روی، طراحی تاب‌آور بهینه شبکه توزیع فشار متوسط مرسوم، به منظور کاهش آسیب پذیری در برابر حوادث طبیعی چندگانه هدف گذاری شده است. اثر وقوع همزمان دو مخاطره طوفان و سیل در منطقه مورد مطالعه در طراحی بهینه شبکه مطالعه شده است. در این مقاله، استراتژی جدیدی برای بیان رابطه بین نمودارهای شکنندگی تجهیزات، مکان جغرافیایی تجهیزات و شاخص ریسک فضایی طوفان و سیل پیشنهاد شده است. به منظور نیل به این هدف، مفهوم تاب‌آوری و عوامل موثر در ارتقای آن، استخراج اطلس جامع آسیب پذیری شبکه‌های توزیع و هم‌چنین مدلسازی ریسک مبتنی بر حوادث طبیعی در این مقاله مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی رایانه‌ای روش پیشنهادی بر روی شبکه فشار متوسط مقیاس بزرگ انجام گردیده است. نتایج ارایه شده حاکی از صحت مدلسازی و اثربخشی روش پیشنهادی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** طراحی شبکه‌های توزیع الکتریکی، حوادث چندگانه، وقایع با احتمال وقوع پایین و شدت تخریب بالا، تاب-آوری، اطلس آسیب‌پذیری، حوادث طبیعی

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.18.2.119

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۱۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سجاد نجفی روادانق

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تبریز - ۳۵ کیلومتری جاده تبریز مراغه-آزمایشگاه تحقیقاتی شبکه‌های هوشمند تاب‌آور - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

## ۱- مقدمه

اهمیت صنعت برق امروز بر هیچ‌کس پوشیده نیست. زندگی امروزه بشر آن‌چنان با این صنعت پیوند دارد که نبود آن می‌تواند بر بخش‌های اجتماعی، سیاسی و اقتصادی جوامع اثرات سوء داشته باشد. به همین دلیل قطع برق علاوه بر خسارت بر بخش‌های خانگی، صنعتی، تجاری و کشاورزی می‌تواند به‌عنوان یک تهدید فرا روی امنیت ملی به حساب آید. از این رو، تاب آوری به عنوان یکی از مهمترین ملاحظات، از دیرباز در طراحی این سیستم‌ها مدنظر قرار گرفته است [۱]. هدف از تاب آوری مقاوم نمودن یک سیستم در شرایط وقوع خرابی یک یا چند تجهیز به دلیل حوادث طبیعی و غیر طبیعی است. به عبارت دیگر، حفظ امنیت یک سیستم زیرساختی و مقاوم ساختن عملکرد آن در برابر حوادث با اثر کم و احتمال زیاد که جنبه‌های اصلی قابلیت اطمینان را در بر می‌گیرد به عنوان یک ضرورت بهره‌برداری، از گذشته متداول بوده است [۲-۳].

در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای در زمینه ارتقا تاب‌آوری سیستم‌های قدرت صورت گرفته است [۴]. تغییرات آب و هوایی و گرم شدن کره زمین منجر به افزایش وقوع حوادث طبیعی شده است. تابستان‌های بسیار گرم و طولانی، زمستان‌های بسیار سرد همراه با یخبندان‌های شدید، سیلاب‌های ناگهانی و خسارت بار، طوفان‌های با سرعت بالا و مخرب، تندبادهای گسترده و فاجعه‌بار و ... همگی از رخدادهایی هستند که در اقصی نقاط کره زمین مرتباً در حال وقوع می‌باشند. بسته به موقعیت جغرافیایی یک منطقه، وقوع برخی از این حوادث محتمل‌تر و برخی دیگر بعید است؛ اما، افزایش وقوع آنها بر اساس مستندات موجود، واقعیتی انکارناپذیر است [۵]. حوادث طبیعی با توجه به گستردگی جغرافیایی خود تجهیزات فراوانی را به صورت همزمان تحت تأثیر قرار داده و می‌توانند با آسیب رساندن و خروج همزمان چندین تجهیز، عملکرد سیستم را با اختلال جدی مواجه کرده و حتی منجر به فروپاشی کلی سیستم شوند. از سویی دیگر با تقویت زیرساخت‌های اطلاعاتی شبکه‌های برق جهت پایش، حفاظت و کنترل بهتر این سیستم‌ها و در یک کلام هوشمندتر کردن آنها، نقاط نفوذ اطلاعاتی به این سامانه‌ها بیشتر شده است. حملات و خرابکاری‌های فیزیکی و سایبری نیز از جمله حوادث با اثر شدید و احتمال کم می‌باشند که در صورت وقوع می‌توانند خاموشی‌های گسترده‌ای را رقم بزنند [۶-۹].

نظر به گستردگی صنعت برق در سه سطح تولید، انتقال و توزیع، توجه مدیران صنعت برق همواره به توسعه تولید و احداث نیروگاه‌ها در مرحله اول و توسعه و بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های انتقال در مرحله دوم بوده است. این امر باعث شده که شبکه‌های توزیع در طول عمر صنعت برق کمتر مورد توجه قرار گیرند و اکنون تبدیل به یکی از معضلات اصلی در صنعت برق گردند.

شبکه‌های انتقال و همچنین نیروگاه‌ها به‌عنوان دارایی‌های حساس شمرده می‌شوند به طوری که با قطع و اختلال در آنها حجم وسیعی از

شبکه و حوزه‌های جغرافیایی در خاموشی برق فرو می‌رود. انجام تدابیری در شبکه‌های توزیع می‌تواند تأثیر بسزایی بر کاهش اثرات تهدیدات و یا سطح آسیب داشته باشد. اهداف امنیت انرژی در شبکه‌های انرژی برق را می‌توان به شرح زیر بیان داشت:

- حفاظت از سرمایه‌ها
- افزایش قابلیت اطمینان برق‌رسانی به‌ویژه برای مناطق حیاتی، حساس و مهم
- افزایش کیفیت توان به‌ویژه برای مصارف حیاتی، حساس و مهم

با توجه به اهداف و مطالب بیان‌شده، اهمیت شبکه‌های انرژی برق از نگاه امنیت انرژی به‌منظور حفظ تداوم تأمین این انرژی مهم در مواقع بحران و مورد توجه بودن این شبکه‌های زیرساختی برای کشور متخاصم و گروه‌های تروریست انکارناپذیر است. هرگونه تهدیدی که روند برق‌رسانی به جامعه را مختل کند باعث بروز مشکلات عدیده‌ای در جامعه گردیده و بر بخش‌های مختلف آن تأثیرات قابل توجهی می‌گذارد [۴].

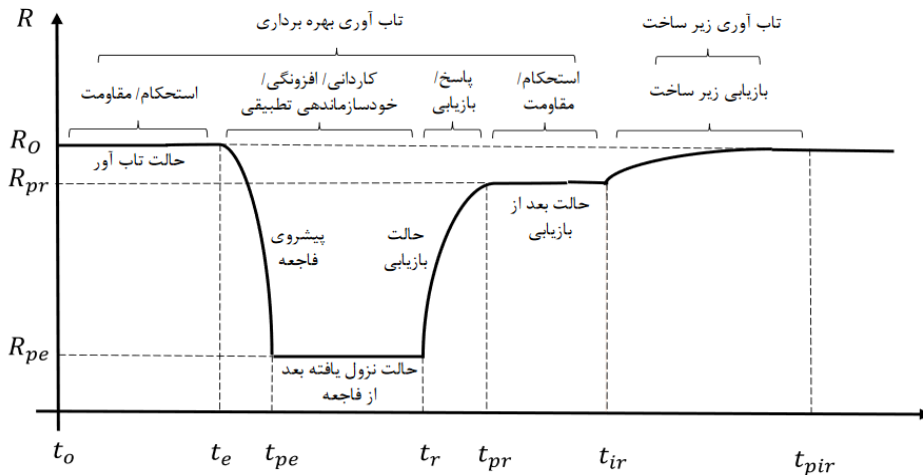
در این مقاله، طراحی تاب آور بهینه ی شبکه ی توزیع فشار متوسط مرسوم، به منظور کاهش آسیب پذیری در برابر حوادث طبیعی چندگانه بررسی و روش جدیدی برای بیان رابطه ی بین نمودارهای شکنندگی تجهیزات، مکان جغرافیایی تجهیزات و شاخص ریسک فضایی طوفان و سیل پیشنهاد شده است. صحت تحلیل روش پیشنهادی به کمک شبیه سازی و نتایج ارایه شده بررسی شده است. در ادامه، مفاهیم: تاب آوری سیستم های قدرت، وجود قابلیت اطمینان و چرایی نیاز به تاب آوری، مدلسازی تأثیرات آب و هوایی بر روی نرخ شکست تجهیزات سیستم قدرت، استخراج اطلس جامع آسیب پذیری شبکه های توزیع برق در مقابل رخدادهای طبیعی و هم چنین چارچوب مدلسازی حوادث با احتمال وقوع کم و تاثیر زیاد به منظور پشتیبانی تصمیم های ریسک پذیر، مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند.

## ۲- مفهوم تاب آوری سیستم های قدرت [۱۰]

CS Holling برای اولین بار در سال ۱۹۷۳ توانایی تاب آوری را به عنوان معیار "پایداری سیستم ها و توانایی آنها در جذب تغییر و اختلال و همچنین حفظ روابط میان جمعیت ها و متغیرها" تعریف کرد. از زمان این تعریف پایه، مفهوم تاب آوری به طرز قابل توجهی از جمله در چندین سیستم، مانند مدیریت ایمنی، سازمانی، اجتماعی-زیست محیطی و اقتصادی، تکامل یافته است. پس از Holling، تفسیر های متعدد از تاب آوری پدید آمده است، که به گسترش تعاریف مختلف و عدم وجود درک جهانی از معنای واقعی تاب آوری منجر شده است. در زمینه سیستم های قدرت به عنوان زیرساخت های حیاتی، تصویر حتی نامشخص تر است، زیرا مفهوم تاب آوری در دهه اخیر ظاهر شده است. چندین تلاش در سازمان های مختلف در جوامع انرژی و مهندسی انرژی مانند مرکز تحقیقات انرژی U.K. و مرکز

و علاوه بر این شامل مقاومت، افزونگی، پاسخ و بازیابی به عنوان ویژگی‌های کلیدی است.

تحقیقات مهندسی برق ایالات متحده برای تعیین تعریف تاب‌آوری و تشخیص آن از مفهوم قابلیت اطمینان انجام شده است. بر اساس گزارش دفتر کابینه انگلیس، تاب‌آوری، قابلیت اطمینان را در بر می‌گیرد



شکل (۱): منحنی تاب‌آوری مرتبط با یک رویداد

تاب‌آوری قبل از رویداد یعنی  $R_o$  نباشد ( $R_{pr} < R_o$ ). به طور خاص، در حالی که سیستم ممکن است از نظر بازگشت کامل، به حالت بهره‌برداری پیشین خود یعنی قبل از وقوع رویداد رسیده باشد (به این ترتیب میزان مشخصی از تاب‌آوری بهره‌برداری را نشان دهد)، ممکن است زمان بسیاری طول بکشد تا زیرساخت‌ها به طور کامل بازسازی گردند (تاب‌آوری زیرساخت‌ها)، یعنی با در نظر گیری  $t_{pr}$  به عنوان (پایان زمان بازسازی) و  $t_{pir}$  (به عنوان پایان زمان بازسازی زیرساخت‌ها) داریم:  $(t_{pr} - tr) < (t_{pir} - t_{pr})$ .

این امر به شدت رویداد و همچنین ویژگی‌های تاب‌آوری سیستم قدرت که قبل، در طول و پس از حادثه نشان می‌دهد، بستگی دارد. جالب است توجه شود که چگونه برخی از اقدامات می‌توانند سیستم را از لحاظ بهره‌برداری تاب‌آور تر کند، حال آنکه از منظر زیرساختی قابلیت افزایش بالای سطح تاب‌آوری سیستم را ندارند. به عنوان مثال، تغییر خطوط هوایی به زیر زمینی ممکن است توانایی سیستم را برای مقاومت در برابر وقایع افزایش دهد، اما اگر کابل آسیب دیده باشد، ممکن است برای تعمیر آن به زمان خیلی طولانی تری نسبت به یک خط هوایی، نیاز باشد.

برای درک کامل و ارزیابی تاب‌آوری سیستم، بایستی سطوح تاب‌آوری و زمان‌گذاری بین حالت‌های سیستم قدرت مرتبط با یک رویداد مورد توجه قرار گیرد. با توجه به شکل (۱) و با علم بر اینکه  $t_{pe}$  و  $t_{tr}$  به ترتیب نشان‌دهنده‌ی زمان پایان وقوع حادثه و زمان شروع بازسازی زیرساخت‌ها می‌باشد، تاب‌آوری سیستم نه تنها با سطوح تاب‌آوری مرتبط با حالت‌های مختلف یعنی  $R_o$ ،  $R_{pe}$  و  $R_{pr}$ ، بلکه به زمان‌گذر بین حالت‌ها یعنی  $(t_{pe} - t_e)$ ،  $(t_{tr} - t_{pr})$  و  $(t_{pir} - t_{tr})$  بستگی دارد. بطور ویژه، اقدامات برای افزایش تاب‌آوری بایستی در راستای اهداف زیر باشد:

(۱) کاهش سطح تاب‌آوری تخریب در طول رویداد ( $R_o - R_{pe}$ )

## ۲-۱- منحنی تاب‌آوری مرتبط با یک رویداد

منحنی تاب‌آوری شکل (۱) نشان‌دهنده سطح تاب‌آوری به عنوان تابعی از زمان با توجه به رویداد یک حادثه است. این شکل ویژگی‌های کلیدی تاب‌آوری که یک سیستم قدرت باید برای مقابله موثر با شرایط مرتبط با یک رویداد یا واقعه، مثلاً یک طوفان سنگین داشته باشد را نشان می‌دهد.

قبل از اینکه اتفاقی در  $t_e$  (زمان وقوع حادثه) رخ دهد، سیستم قدرت بایستی قوی و مقاوم بوده تا توانایی مقاومت در برابر تنش اولیه را داشته باشد. سیستمی با طراحی و عملکرد خوب باید تاب‌آوری برای رویایی با رویدادهای شدید داشته باشد (در اینجا تاب‌آوری با  $R_o$  نشان داده شده است که  $R$  کمیت مناسب مربوط به سطح مقاومت سیستم است). قابلیت تاب‌آوری عملیاتی پیشگیرانه امری بسیار حیاتی است، زیرا اسبابی در اختیار اپراتورها قرار می‌دهد تا سیستم را در حالت تاب‌آوری پیکربندی کنند. پس از وقوع حادثه، سیستم وارد حالت تخریب پس از واقعه می‌شود و در این مرحله تاب‌آوری سیستم ( $R_{pe}$ ) به طور قابل توجهی در معرض خطر قرار می‌گیرد. ویژگی‌های کلیدی تاب‌آوری در این مرحله از رویداد کاردانی<sup>۲</sup>، افزونگی<sup>۳</sup> و قابلیت انطباق<sup>۴</sup> است. زیرا عملیات اصلاحی لازم برای انطباق و مقابله با شرایط در حال تغییر (که احتمالاً پیش از این هرگز تجربه نشده است) را فراهم می‌آورند. این امر اثرات رویداد و کاهش تاب‌آوری سیستم یعنی ( $R_o - R_{pe}$ ) را قبل از  $t_r$  (شروع روند بازسازی) به حداقل می‌رساند. پس از آن سیستم وارد حالت بازیابی می‌شود، یعنی مرحله‌ای که سیستم بایستی ظرفیت بازیابی لازم برای پاسخ‌گویی سریع و بازگشت به حالت تاب‌آور در سریع‌ترین زمان ممکن را داشته باشد هنگامی که بازیابی کامل می‌شود، سیستم وارد حالت پس از بازیابی می‌شود.  $R_{pr}$  (سطح تاب‌آوری پس از بازسازی) ممکن است به اندازه‌ی سطح

۲) دستیابی به زمان تخریب نسبتاً "آهسته" و به اصطلاح تخریب کنترل شده (te - tpe)، به این ترتیب نیز کاهش سرعت آبخاری شدن وقایع

۳) کاهش زمان بازیابی (از هر دو دیدگاه، از نقطه نظر بهره برداری، (tpr - tr) و نقطه نظر زیرساختی (tpr - tpir)).

## ۲-۲- وجود قابلیت اطمینان و چرایی نیاز به تاب‌آوری

حوادث HILPs بر این نیازمندی تاکید دارند که بین خاموشی سراسری و فاجعه باید فرق قائل شد. یک فاجعه، که معمولاً شامل خاموشی نیز است، به شرایط شدید که به سرعت در حال تغییر است اشاره دارد که احتمالاً قبلاً تجربه نشده است. از این‌روی، زیرساخت قدرت که بتواند سطح بالایی از عملکرد را در هر شرایطی حفظ کند، نه تنها باید در برابر عمومی‌ترین خاموشی‌ها قابل اطمینان باشد، بلکه باید در برابر HILPs نیز بتواند حداقل امکان به عملکرد عادی خود ادامه دهد. ابتدایی‌ترین معیاری که به منظور مطالعه تداوم نیروسانی شبکه‌های برق استفاده می‌شد امنیت شبکه بود. تحلیل امنیت در شبکه‌های قدرت معمولاً شامل مطالعات پیشامد خروج یگانه می‌باشد. ویژگی امنیت عموماً با عنوان معیار N-1 در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت شناخته می‌شود که در آن N تعداد تجهیزات سیستم است؛ به این معنی که اگر معیار N-1 در یک سیستم قدرت رعایت گردد، این سیستم می‌تواند در شرایط پیشامد خروج یگانه هر یک از تجهیزات، با N-1 تجهیز باقیمانده بدون مشکل به عملکرد خود ادامه دهد. یا اگر بهره‌برداری یک سیستم با رعایت معیار N-2 انجام گیرد، پیشامد خروج همزمان دو تجهیز در عملکرد صحیح این سیستم نقضی ایجاد نمی‌کند. در صورتی که در یک شرایط بهره‌برداری با ساختار متناظر با آن لحظه، برخی از قیود بهره‌برداری یا الزامات تأمین بار شبکه نقض گردد، بهره‌بردار شبکه برحسب ریسک‌پذیری، ظرفیت موجود سیستم و قابلیت‌پذیرش افزایش هزینه بهره‌برداری، دو رویکرد متفاوت پیش‌رو دارد.

پر واضح است که تحلیل امنیت شبکه، تنها پیشامدهای یگانه (و احتمالاً برخی از پیشامدهای دوگانه محتمل یا خطرناک) را در نظر می‌گیرد. همچنین، ارزیابی قابلیت اطمینان نیز تنها پیشامدهایی را منظور می‌کند که مرتبه پایینی داشته و احتمال وقوع آنها معین و البته زیاد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حوادثی که در تحلیل امنیت و ارزیابی قابلیت اطمینان مطالعه می‌شوند، به حوادثی با احتمال وقوع مشخص، اثرات محدود و به راحتی قابل برآورد، محدود می‌شوند. نکته مهم دیگر آن است که در مطالعات امنیت و ارزیابی قابلیت اطمینان، معمولاً رفتار استاتیکی شبکه مد نظر قرار می‌گیرد و از رفتار دینامیکی آن در حین حادثه و پس از آن صرف‌نظر می‌شود. به عبارت دیگر، نقطه کار جدید سیستم پس از رخداد، مبنای ارزیابی عملکرد آن قرار می‌گیرد. بنابراین، عدم توانایی مفاهیم موجود در مقابله با HILPs

و درعین حال نیازمندی به مفهومی جدید برای مقابله با این رویدادها، تبدیل به موتور محرکی شده‌است که بسط و توسعه مبانی مربوط به تاب‌آوری سیستم‌های قدرت را تضمین می‌کند. یک مقایسه که ویژگی‌های کلیدی تاب‌آوری را از مفهوم قابلیت اطمینان متفاوت می‌کند، در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۱): تمایز تاب‌آوری از قابلیت اطمینان

تاب‌آوری	قابلیت اطمینان
احتمال کم، تاثیر زیاد	احتمال زیاد، تاثیر کم
سازگار، مداوم، کوتاه و طولانی مدت	ایستا
وضعیت‌های سیستم قدرت و زمان‌های گذار بین وضعیت‌ها را ارزیابی می‌کند	وضعیت‌های سیستم قدرت را ارزیابی می‌کند
مربوط به زمان قطع مشترکین و زمان بهبودی زیرساخت است	مربوط به زمان قطع مشترکین است
معمولاً همراه با آسیب فیزیکی است	معمولاً بدون آسیب فیزیکی است

همینطور، برخلاف مطالعات قابلیت اطمینان که مجموعه‌ای از حوادث را به صورت یکجا مد نظر قرار داده و رفتار سیستم را توسط شاخص‌هایی کلی ارائه می‌دهد، مطالعه تاب‌آوری به صورت اختصاصی برای یک حادثه انجام می‌گیرد. ممکن است طراحی سیستم به گونه‌ای باشد که تاب‌آوری سیستم در برابر یک حادثه بیشتر شود، ولی همزمان تاب‌آوری آن در برابر یک حادثه دیگر کاهش یابد. به طور کلی، قابلیت اطمینان عملیاتی یک تجهیز تحت تاثیر شرایط آب و هوایی و شرایط بارگیری است. در ارزیابی قابلیت اطمینان متعارف سیستم‌های قدرت، فرض شده است که نرخ خرابی تجهیزات ثابت و مستقل از بارگیری است. با این حال، در بهره‌برداری زمان واقعی، تجهیزات تنش بالاتری در شرایط بارگیری سنگین، که بر احتمال خرابی آنها تاثیر می‌گذارد، تجربه می‌کنند. بنابراین، وابستگی بین قابلیت اطمینان و بارگیری تجهیزات باید مورد توجه قرار گیرد. حلقه اتصال مباحث قابلیت اطمینان و تاب‌آوری در دسترس‌پذیری<sup>۵</sup> یک تجهیز و یا سیستم در مقابل هر نوع مخاطره است. کما اینکه این مخاطره در حوزه قابلیت اطمینان بیان گردد و یا در حوزه تاب‌آوری، دسترس‌پذیری بعنوان یک معیار کلی برای مطالعه هر دو مفهوم قابلیت اطمینان و تاب‌آوری مطرح می‌گردد. در این بین زمان تعمیر تا حدود زیادی می‌تواند مرز بین قابلیت اطمینان و تاب‌آوری را روشن تر نماید.

## ۲-۳- مدلسازی تاثیرات آب و هوایی بر روی نرخ شکست تجهیزات سیستم قدرت

محیطی که در آن تجهیزات انتقال و توزیع قرار دارد، تأثیر قابل توجهی بر قابلیت اطمینان و بویژه نرخ شکست آنها دارد. علاوه بر این ممکن است که در طول خط انتقال از چندین منطقه آب و هوایی عبور کند و شرایط آب و هوایی مختلف در هر منطقه را تجربه کند. تعیین نرخ شکست وابسته به تغییرات آب و هوایی تجهیزات در مطالعات

، تنوع آب و هوایی، وقوع حوادث و رخداد‌های طبیعی، همواره در معرض آسیب‌های بزرگ ناشی از این حوادث طبیعی قرار دارند. از آنجایی که سایر زیرساخت‌ها نیز به نوعی برای ادامه فعالیت‌های خود به انرژی مطمئن و پایدار برق نیازمندند، از این رو بررسی آسیب‌پذیری شبکه‌های توزیع برق در برابر حوادث طبیعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. با توجه به لزوم هماهنگی یکپارچه جهت آمادگی در مقابل رخدادها و مخاطرات طبیعی، تهیه اطلس جامع آسیب‌پذیری شبکه‌های برق بر پایه سیستم اطلاعات مکانی به لحاظ امکان تخمین میزان خسارات احتمالی و بحران‌های طبیعی پیش رو بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

می‌توان با شناسایی مخاطراتی که در هر منطقه وجود دارد و به عنوان تهدیدی برای منطقه بشمار می‌رود و شناسایی مناطقی که بیشترین احتمال بروز حوادث و مخاطرات در آنجا است می‌توان برای جلوگیری از بروز حوادثی که می‌تواند خسارتهای بیشماری را در بر گیرد، برنامه ریزی نمود و برنامه‌های واکنش در شرایط اضطراری را از قبل آماده نمود. تجربه نشان داده است که برنامه‌های از قبل پیش بینی شده و پروسه‌های آزمایش شده برای مقابله با چنین اتفاقاتی می‌تواند بطور قابل توجهی در جلوگیری از بحران‌های اجتماعی و کاهش خسارت به اموال و صنایع و محیط زیست موثر باشد.

شناسایی مناطق با سه سطح تهدید خیلی شدید و شدید، متوسط، کم و خیلی کم و ارزیابی میزان آسیب‌پذیری و درجه تاب‌آوری مولفه‌های مختلف شبکه توزیع برق در مقابل تهدیدات و رخداد‌های طبیعی آسیب‌رسان و به تبع آن تقویت قدرت تصمیم‌گیری، برنامه ریزی و پیش‌بینی راهکارهای مقابله‌ای، پیش‌گیرانه و مقاوم‌سازی را برای شرکتهای توزیع امکان‌پذیر می‌کند. هدف از تهیه اطلس جامع آسیب‌پذیری، شناسایی مخاطرات طبیعی آسیب‌رسان در شبکه‌های توزیع و تهدیدهایی که تاسیسات برق (مولفه‌های مختلف شبکه توزیع) ممکن است با آنها مواجه شوند می‌باشد.

### ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌های توزیع برق

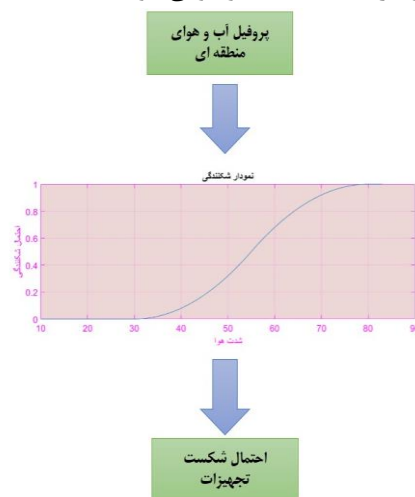
پس از تهیه نقشه‌های خطر مربوط به مخاطرات این نقشه‌ها همراه با اطلاعات مکانی و توصیفی شبکه‌های توزیع استانها (به تفکیک شهرستانها) با استفاده از مدل‌های تلفیقی مناسب طبق مراحل زیر تلفیق می‌گردد

- تلفیق اطلاعات مکانی و توصیفی شبکه‌های توزیع
- معیارهای آسیب‌پذیری شبکه توزیع
- ✓ تعیین اهمیت نسبی موافه‌های مختلف توزیع و شناسایی مشترکین خاص شبکه
- ✓ تعیین مسیر تغذیه (فیدرهای) مشترکین شبکه
- ✓ تخمین عمر تجهیزات منصوبه
- ✓ ارزیابی شاخصهای بهره‌برداری
- ✓ مطالعه تمرکز جمعیتی

قابلیت اطمینان و تاب‌آوری برای مدل‌سازی تأثیرات آب و هوایی بر روی زیرساخت‌های قدرت، امری بسیار مهم است.

در مرجع [۱۱]، خط به‌بخش‌هایی تقسیم می‌شود که به صورت سری اتصال دارند. نرخ شکست برای هر بخش خط، بر اساس درصدی از خط در هر منطقه آب و هوایی و عامل شکست برای بخش‌ها در آب و هوای نامطلوب اعمال می‌شود. نرخ شکست کلی خط پس از آن به وسیله جمع شدن نرخ‌های شکست در بخش‌های مختلف خط که بصورت سری به یکدیگر وصل هستند بدست می‌آید. در مرجع [۱۲] از روش میانگین وزنی برای تعیین نرخ شکست هر بخش خط که در یک منطقه آب و هوایی قرار دارد استفاده شده است.

یک رویکرد تخمین نرخ شکست هر بخش در هر منطقه آب و هوایی و سپس انتخاب بدترین (بالترین) نرخ شکست برای خط است. همچنین مفهوم منحنی‌های شکنندگی [۱۷-۱۳] را می‌توان مورد استفاده قرار داد که بیانگر رابطه احتمال شکست هر جز سیستم، مانند خطوط انتقال و دکل‌ها و تیرهای برق، نسبت به پارامترهای آب و هوایی، مانند سرعت باد و تراکم رعد و برق است. شکل منحنی به‌تأثیر پارامتر آب و هوا بر روی احتمال شکست یک تجهیز بستگی دارد. این منحنی‌های شکنندگی می‌توانند برای هر یک از پارامترهای آب و هوایی صادق بوده و با تمام مناطق آب و هوایی مطابقت داشته باشند. سپس پروفیل آب و هوایی منطقه برای به‌دست آوردن احتمال شکست وابسته به تغییرات آب و هوایی تجهیزات به این منحنی‌ها وارد میشوند (شکل (۲)). این منحنی‌ها را می‌توان از طریق مدل‌سازی با توجه به جنبه‌های مختلف آب و هوایی مانند: سرعت باد، ارتفاع و جهت و یا استفاده از داده‌های تجربی برای تعیین نرخ شکست اجزا در شرایط مختلف آب و هوایی، توسعه داد.

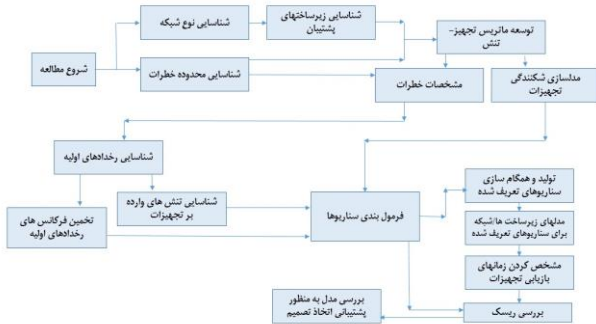


شکل (۲): تعیین احتمال شکست تجهیزات با استفاده از منحنی‌های شکنندگی

### ۲-۴- تهیه اطلس جامع آسیب‌پذیری شبکه‌های توزیع برق در مقابل رخداد‌های طبیعی

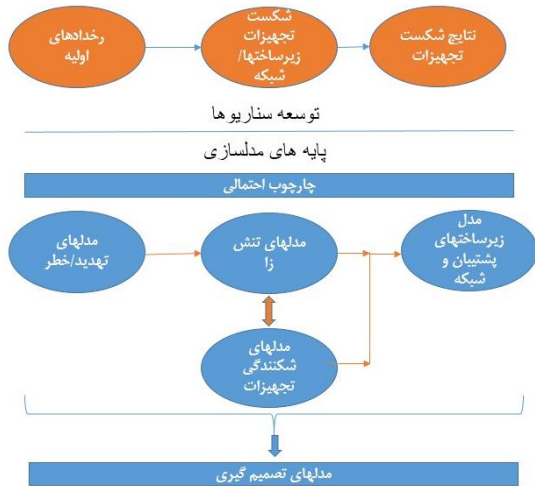
شبکه‌های توزیع برق بعنوان یکی از زیرساخت‌های حیاتی و امنیتی کشورمان محسوب می‌گردد. این شبکه‌ها بدلیل گستردگی جغرافیایی

خطر مشخصه ای از بزرگی رخدادهای اولیه برحسب فرکانس وقوع آن-ها ارایه می‌دهند.



شکل (۴): اجزای چارچوب وقایع HILP

در مدل‌های تنش زا، تخمین تنش‌های وارده بر تجهیزات را از طریق بزرگی و دامنه رخداد اولیه و مکان‌های مرتبط آن‌ها و تجهیزات صورت می‌گیرد. مدل‌های شکنندگی تجهیزات، احتمال شکست تجهیزاتی را که در معرض تنش ناشی از یک خطر است، بیان می‌کنند. مدل‌های چگونگی رفتار شبکه ترکیبی از شبیه سازی، مدل‌های احتمالی و یا برپایه ی فیزیکی می‌باشند که تحلیل خطاهای آشناری بدلیل بارگیری زیاد، انحراف ولتاژ، تلفات سیستم‌های حفاظتی و عملکرد اپراتورها با توجه به مجموعه ای از شرایط اولیه تخریب شده، را انجام می‌دهند. سرانجام مدل‌های تصمیم گیری و ریسک، اطلاعات تحلیل‌های مدل تجهیزات را که برای تصمیم گیرندگان بسیار با اهمیت است در اختیار آنها قرار می‌دهد.



شکل (۵): مدل‌های تشکیل دهنده اجرای چارچوب ریسک

#### ۲-۵-۴- فرمول‌های ریاضی مدلسازی ریسک وقایع HILP

ساختار ریاضی مشخص شده برای مدلسازی ریسک وقایع HILP بصورت زیر می‌باشد:

✓ شناسایی موقعیت و مشخصات ابنیه و ساختمانهای مجاور مولفه های شبکه

✓ شناخت شاخص های تاب آوری اجتماعی

✓ ارزیابی اندرکنش و اثر متقابل زیرساختها از جمله برق، آب، مخابرات

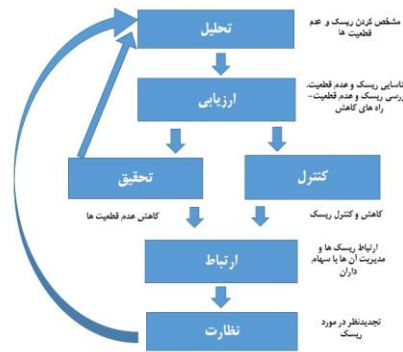
- ارزیابی سطح خطر یعنی برآورد نسبی سطح ریسک بر اساس آمار تحلیلی آسیب های وارده متناسب با شدت و بزرگی هریک از حوادث طبیعی گذشته می باشد. این سطوح خطر جهت برآورد میزان خسارات احتمالی وارد بر شبکه توزیع ناشی از سناریوهای مخاطرات طبیعی و همچنین شناسایی مناطق در معرض آسیب مورد استفاده قرار می گیرد.

#### ۲-۵-۵- چارچوب مدلسازی حوادث با احتمال وقوع کم

و تاثیر زیاد به منظور پشتیبانی تصمیم های ریسک پذیر

#### ۲-۵-۱- الگوی مدیریت ریسک

اصول ریسک حوادث HILP با در نظر گیری مدل‌های ریسک در چارچوب الگوی مدیریت ریسک مرسوم، برای تصمیم گیرندگان بسیار با اهمیت است. شکل (۳) بیانگر مفهوم نوعی از این قضیه است. مدیریت ریسک در شبکه های قدرت الکتریکی در برابر حوادث HILP امری ضروری و اجتناب ناپذیر تلقی می‌گردد.



شکل (۳): الگوی المانهای مدیریت ریسک

#### ۲-۵-۲- چارچوب ریسک وقایع HILP

#### المانهای اصلی چارچوب HILP

المانهای ضروری اصول وقایع HILP در شکل (۴) نشان داده شده است. شکل زیر نشان دهنده روند تحلیل و انتقال اطلاعات مربوطه به یک مدل ریسک مطابق با چارچوب توسعه یافته است. همچنین در ادامه اصول تشریح شده زیر بصورت معادلات ریاضی بیان خواهد شد.

#### ۲-۵-۳- اجزای

#### مدل‌های تشکیل دهنده

بر اساس چارچوب نشان داده شده در شکل (۴)، اجزای نیازمند ترکیب انواعی از مدل‌ها می‌باشد که در شکل (۵) مشخص شده اند. مدل‌های

جدول (۲): چارچوب ریسک وقایع HILP

تعریف	علامت
n-امین تجهیز مرتبط با محدوده جغرافیایی	$T_n$
m-امین دسته ی خطر	$H_m$
K-امین رخداد اولیه در دسته ی خطر $H_m$	$E_{k(m)}$
نرخ سالیانه وقوع رخداد اولیه $E_{k(m)}$	$F_{k(m)}$
r-امین نوع تنش مرتبط با دسته ی خطر $H_m$ ، بطوریکه تجهیز نوع $T_n$ در معرض آسیب باشد.	$S_{r(m,n)}$
احتمال شکست تجهیز $T_n$ با توجه به وقوع رخداد اولیه $E_{k(m)}$	$P_{nk(m)}$
احتمال اینکه تنش تجهیز $T_n$ مرتبط با تنش نوع $S_{r(m,n)}$ با توجه به وقوع رخداد اولیه $E_{k(m)}$ دارای بزرگی $L_r$ باشد	$Q_{nk(m)r(m,n)}(L_r)$
احتمال اینکه ظرفیت آستانه شکست تجهیز $T_n$ مرتبط با تنش نوع $S_{r(m,n)}$ ، $L_r$ باشد	$C_{nr(n,m)}(L_r)$
بردار مشخص کننده سناریو، مانند: در صورت شکست تجهیز $T_n$ ، $W = 1$ و در غیر اینصورت $W = 0$	$W$
نتیجه مرتبط با سناریو $W$ برای K-امین رخداد اولیه از دسته ی خطر $H_m$	$D_{k(m)}(W)$

با در نظر گرفتن تنش مرتبط با دسته ی خطر  $m$  و تجهیز نوع  $n$  که بصورت  $r(m, n)$  شمارش می‌شوند، در صورتی که تنها یک تنش وجود داشته باشد ترکیب تنش-دسته ی خطر بصورت  $r(m, n) = 1$  خواهد شد، سپس احتمال شکست تجهیز  $T_n$  با مشخص بودن رخداد اولیه  $E_{k(m)}$  از معادله زیر بدست می‌آید:

$$P_{nk(m)} = \int_0^{\infty} C_{nr(n,m)}(L_r) dL_r \int_{L_r}^{\infty} Q_{nk(m)}(L_r') dL_r' \quad (1)$$

در صورت وجود چندین تنش که تجهیز را به دسته ی خطری مرتبط می‌سازد، داریم:

$$P_{nk(m)} = \sum_{r(n,m)} \int_0^{\infty} C_{nr(n,m)}(L_r) dL_r \int_{L_r}^{\infty} Q_{nk(m)}(L_r') dL_r' + \text{Cross Terms} \quad (2)$$

در ادامه، با تعریف سناریوهایی شامل چندین شکست تجهیزات و با در نظرگیری رخداد اولیه  $E_{k(m)}$  و  $W$  به عنوان نمایشگری، داریم:

$$W_n = 1, T_n \text{ شکست تجهیز}$$

$$W_n = 0, T_n \text{ عدم شکست تجهیز}$$

سپس، بردار  $W$  بیانگر سناریوی شکست / عدم شکست یک تجهیز است.

در صورت وقوع شرطی رخداد اولیه  $E_{k(m)}$ ، احتمال شکست  $N$  تجهیز و عدم شکست  $M$  تجهیز مشخص از فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$Z_{k(m)}(B) = \prod_{n=1}^N P_{nk(m)} \times \prod_{i=N+1}^{N+M} (1 - P_{nk(m)}) \quad (3)$$

بنابراین، فرکانس وقوع رخداد اولیه  $E_{k(m)}$  بصورت زیر می‌باشد:

$$F(W)_{k(m)} = F_{k(m)} \times Z_{k(m)}(W) \quad (4)$$

با فرض نتیجه این سناریو بصورت  $D_{k(m)}(W)$ ، ریسک این سناریو مطابق فرمول زیر بدست می‌آید:

$$R_{k(m)}(W) = F(W)_{k(m)} \times D_{k(m)}(W) \quad (5)$$

و ریسک کلی از رخداد اولیه  $E_{k(m)}$  از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$R_{k(m)} = \sum_W R_{k(m)}(W) \quad (6)$$

با در نظر گرفتن تمامی ترکیب‌های شکست تجهیزات، ریسک کلی مرتبط با دسته ی خطر  $H_m$  مطابق معادله زیر قابل محاسبه است:

$$R_m = \sum_{K(m)} R_{k(m)} \quad (7)$$

و ریسک کلی شامل تمام دسته های خطر بصورت زیر می‌باشد:

$$R = \sum_m R_m \quad (8)$$

و در آخر داریم:

$$R = \sum_m \sum_{K(m)} F_{k(m)} \cdot \sum_B T_{k(m)}(B) \cdot D_{k(m)}(B) \quad (9)$$

### ۳- شبیه سازی

#### ۳-۱- مدلسازی تاب آوری

هدف اصلی این مقاله، ارائه ی مدلی برای طراحی تاب آور شبکه های توزیع فشار متوسط مرسوم در برابر حوادث طبیعی چندگانه است. مدل پیشنهادی، طراحی تاب آور شبکه های توزیع مرسوم را با در نظر گیری نمودارهای شکنندگی تیربرق در برابر طوفان و سیل پوشش داده است. چهارچوب طراحی شبکه توزیع تاب آور در برابر حوادث طبیعی بر اساس میزان خسارات وارده بر تجهیزات سیستم قدرت است زیرا که آسیب وارده بر تجهیزات می‌تواند باعث قطعی طولانی مدت برق شود. در این راستا، به منظور مدلسازی آسیب پذیری خطوط هوایی توزیع ، نرخ شکست تیر برق در مقابل طوفان و سیل بصورت زیر مدل میشود:

$$\lambda_{Pole,wind} = 10^{-4} \times e^{0.0421w} \quad (10)$$

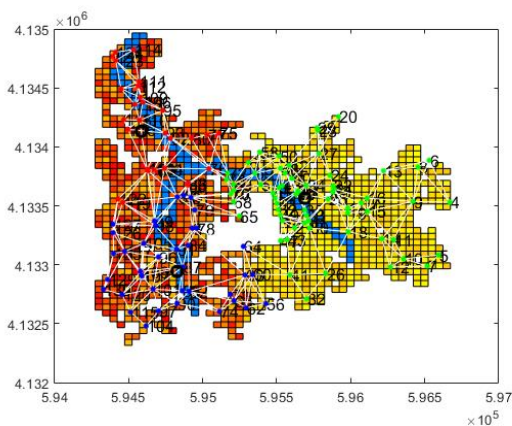
$$\lambda_{Pole,flood} = 54 \times 10^{-3} \times q^{1.915} \quad (11)$$

در رابطه ی بالا،  $\lambda_{Pole,wind}$  و  $\lambda_{Pole,flood}$  به ترتیب، نرخ شکست تیربرق در مقابل طوفان و سیل است. همچنین  $w$  بیانگر سرعت باد و  $q$  نشان دهنده ی دبی آب میباشد. به منظور طراحی شبکه ی توزیع تاب آور، منطقه مورد مطالعه به تعدادی بلوک تقسیم شده است. بر اساس بانک اطلاعات اقلیم شناسی ، تابع توزیع احتمال سرعت باد و دبی آب در منطقه مورد مطالعه مشخص میباشد که در نتیجه ی آن، حداکثر سرعت باد و دبی آب برای هر بلوک بدست می آید. با توجه به مسیر خطوط هوایی توزیع در منطقه جغرافیایی ، تیر های برق در داخل بلوک های مشخص قرار گرفته اند. مکانیابی پست های فوق توزیع (HV) در مرکز ثقل بارهای موجود ( پست های MV) صورت گرفته است. بنابراین شبکه ی مورد مطالعه به سه زیرشبکه که هر زیر شبکه توسط یک پست فوق توزیع تغذیه میگردد تقسیم شده و مسیر

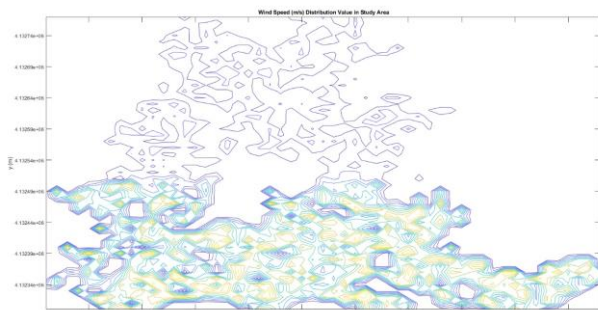
### ۲-۳- نتایج عددی

#### ۲-۳-۱- شبکه‌ی مورد مطالعه

مدل پیشنهادی بر روی شبکه‌ی مورد مطالعه با داده‌های جغرافیایی بدست آمده از بانک اطلاعات اقلیم‌شناسی، همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است، اعمال گردیده است. منطقه مورد مطالعه به بلوک‌های یکسان ۵۰\*۵۰ تقسیم شده و متشکل از ۱۳۰ پست MV یا نقاط بار است. چگالی سرعت باد و دبی آب و هم‌چنین مسیر فیدرهای کاندید اصلی بر روی شکل مشخص شده است. نمایش سرعت باد در منطقه مورد مطالعه در شکل (۷) نشان داده شده است. هم‌چنین، در منطقه‌ی آبی رنگ نشان داده شده در شکل زیر، دبی سیل بالا می‌تواند آسیب رسان باشد.



شکل(۶): منطقه مورد مطالعه تحت سرعت باد و دبی آب مشخص



شکل(۷): نمایش سرعت باد در منطقه مورد مطالعه

#### ۲-۳-۲- سناریو اول: طراحی تاب‌آوری در مقابله با سیل

در این سناریو، ساختار شبکه بهینه تاب‌آور بدست آمده توسط الگوریتم (MST) در مقابله با سیل برای هر پست HV، در شکل‌های (۸) تا (۱۰) نشان داده شده است. این الگوریتم شبکه‌ی شعاعی با کوتاهترین طول فیدر را انتخاب می‌کند. هم‌چنین، پخش بار به منظور برقراری قیود افت ولتاژ و محدودیت توان فیدرها انجام شده است. همانطور که در شکل‌های زیر نشان داده شده است، هر فیدر فشار متوسط به یک پست MV متصل شده است. در شبکه‌ی شعاعی تعداد فیدرهای فشار متوسط از طریق تعداد پست‌های MV منهای یک بدست می‌آیند. طبق هدف اصلی این مقاله، شاخص تاب‌آوری فیدرها به عنوان تابع هدف در الگوریتم MST لحاظ شده است. برای بدست

فیدرهای فشار متوسط در هر زیر شبکه با استفاده از الگوریتم درخت پوشای کمینه<sup>۶</sup> تعیین می‌گردد. در بیشتر مسایل طراحی، فاصله‌ی بین پست‌های MV و پست‌های MV تا HV به دلیل اینکه دلالت بر مقاومت الکتریکی دارند به عنوان ضریب وزنی در الگوریتم (MST) اعمال می‌گردند. در مسایل طراحی شبکه‌ی تاب‌آور، فاصله می‌تواند با نرخ شکست تجهیزات و در نتیجه میزان آسیب وارده جایگزین گردد. در این صورت هدف الگوریتم (MST) مسیریابی فیدرهای فشار متوسط به گونه‌ای است که کمترین میزان آسیب ناشی از طوفان و سیل بر آنها وارد شود. در ادامه، شاخص تاب‌آوری فیدر فشار متوسط و در نتیجه شاخص تاب‌آوری کل شبکه مدلسازی شده است. شاخص تاب‌آوری یک فیدر از طریق رابطه‌ی (۱۲) بدست می‌آید:

$$RI_{Feeder}(f) = \omega_{Poles} RI_{Poles} \quad (12)$$

در این رابطه،  $RI_{Feeder}$  به تربیت شاخص تاب‌آوری تیربرق و فیدر f-م می‌باشد. شاخص تاب‌آوری تیرهای برق، بر اساس آنچه که در روابط (۱۰) و (۱۱) بیان شد، از طریق رابطه‌ی (۱۳) قابل محاسبه است:

$$RI_{Poles}(i) = \lambda_{Pole,wind} + \lambda_{Pole,flood} - (\lambda_{Pole,wind} \times \lambda_{Pole,flood}) \quad (13)$$

به دلیل آنکه تعداد تیرهای برق هر فیدر فشار متوسط بستگی به طول فیدر دارد، طول فیدر از طریق رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\forall S \in HV \quad (14)$$

$$\forall F \in Feeder$$

$$F_{Dist}(s_i, s_j) = \sqrt{(x_{s_i} - x_{s_j})^2 + (y_{s_i} - y_{s_j})^2}$$

در رابطه‌ی بالا،  $F_{Dist}(s_i, s_j)$  فاصله‌ی بین پست‌های i-ام و j-ام و  $x_{s_i}, y_{s_i}$  مختصات X و Y پست i-ام و  $x_{s_j}, y_{s_j}$  مختصات X و Y پست j-ام می‌باشند.

تعداد تیرهای برق در امتداد هر فیدر فشار متوسط از طریق تقسیم طول فیدر بر اسپین استاندارد طبق رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

(طول دو تیر برق مجاور ۳۰ متر فرض شده است)

$$Poles_{Num} = \text{round}\left(\frac{F_{Dist}(s_i, s_j)}{30}\right) \quad (15)$$

با جایگذاری معادلات (۱۴) و (۱۵) در معادله‌ی (۱۲) داریم:

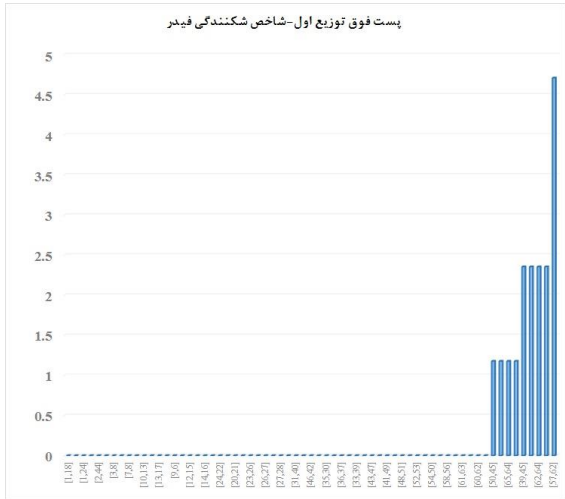
$$RI_{Feeder} = \omega_{Poles} \sum_{p=1}^{N_{pole}} RI_{Poles}(p) \quad (16)$$

در نهایت، با در نظر گرفتن  $N_{Feeder}$  و  $N_{HV}$  به ترتیب به عنوان تعداد پست‌های فوق توزیع و تعداد فیدرهای فشار متوسط هر پست فوق توزیع، شاخص تاب‌آوری کل شبکه از رابطه‌ی (۱۷) بدست می‌آید:

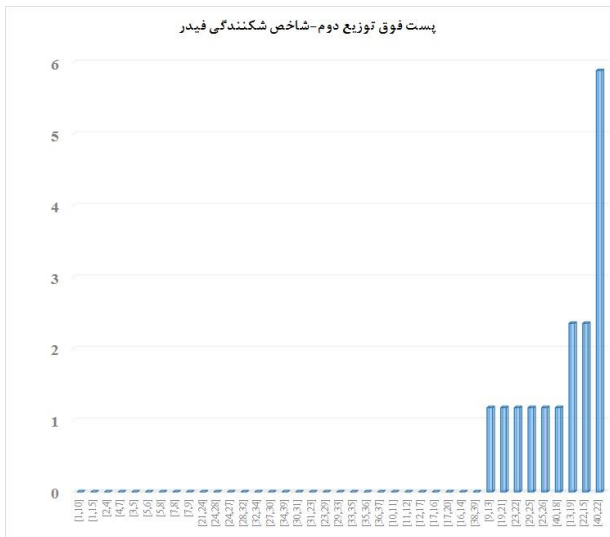
$$RI_{Network} = \sum_{h=1}^{N_{HV}} \sum_{f=1}^{N_{Feeder}} RI_{Feeder}(h, f) \quad (17)$$



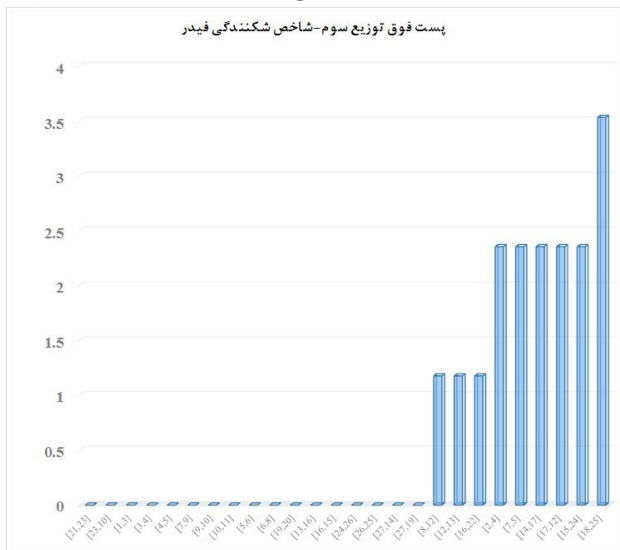
آوردن شاخص تاب آوری فیدرهای شبکه، قدم اول محاسبه ی مقدار شکنندگی تیرهای برق طبق نمودار های شکنندگی مربوطه میباشد. قدم بعدی تعیین تیرهای برق آسیب دیده با توجه به دبی آب مشخص هر بلوک و در نهایت تعیین شاخص تاب آوری فیدرها و کل شبکه است. برای هر فیدر فشار متوسط شاخص شکنندگی، از مجموع شاخص های شکنندگی تیرهای برق هر فیدر بدست می آید. شاخص شکنندگی فیدرهای هر پست فوق توزیع در شکل های (۱۱) تا (۱۳) نشان داده شده است. بسته به موقعیت جغرافیایی فیدرها و پست های مربوطه شان، شاخص شکنندگی فیدرها متفاوت است. فیدرهایی با شاخص شکنندگی بالا، مقاومت کمتر و فیدرهایی با شاخص کمتر، تاب آوری بیشتری در برابر حوادث طبیعی دارند. در حقیقت این شاخص خطی منعکس کننده ی میزان تاب آوری فیدر در مواجهه با حوادث طبیعی است.



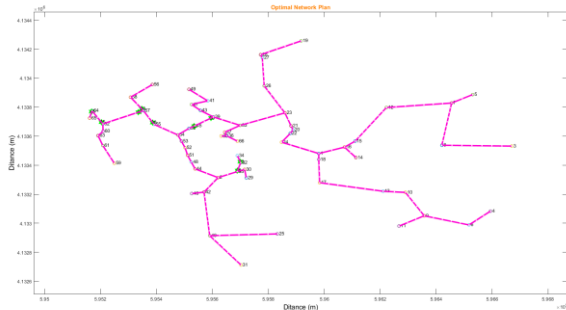
شکل(۱۱): شاخص شکنندگی فیدرها برای پست فوق توزیع اول



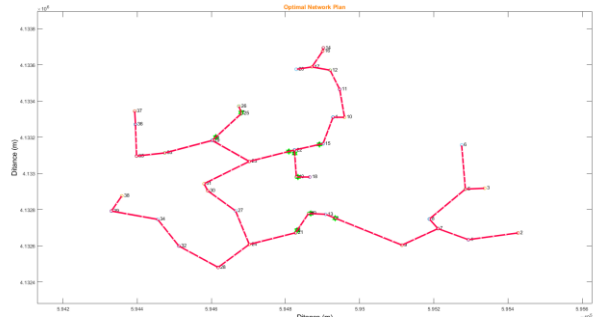
شکل(۱۲): شاخص شکنندگی فیدرها برای پست فوق توزیع دوم



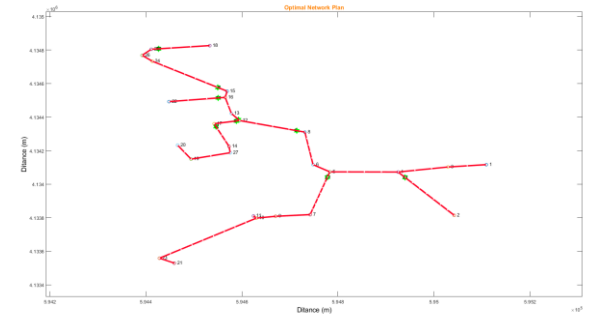
شکل(۱۳): شاخص شکنندگی فیدرها برای پست فوق توزیع سوم



شکل(۸): ساختار شبکه ی بهینه ی تاب آور برای پست فوق توزیع اول



شکل(۹): ساختار شبکه ی بهینه ی تاب آور برای پست فوق توزیع دوم

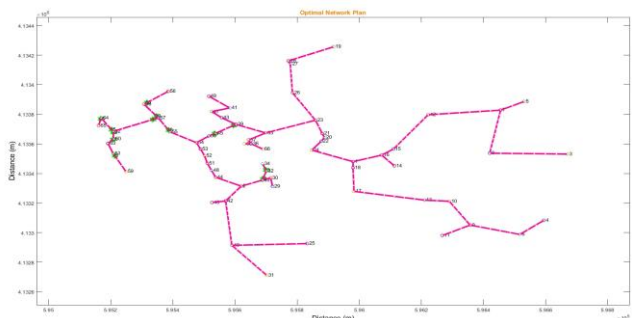


شکل(۱۰): ساختار شبکه ی بهینه ی تاب آور برای پست فوق توزیع سوم

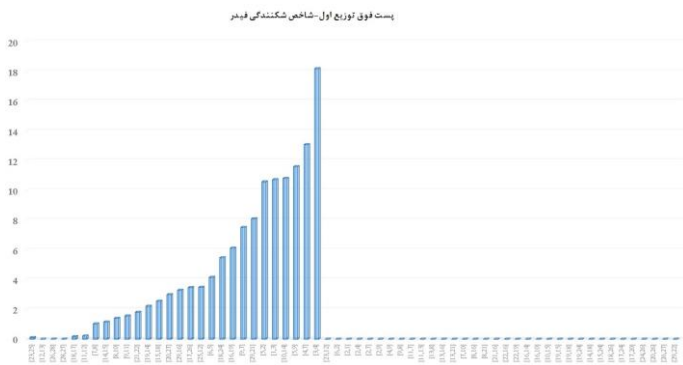
### ۳-۲-۳- سناریو دوم: طراحی تاب‌آوری در مقابله با سیل و طوفان

همانند سناریو قبل، ساختار شبکه بهینه تاب‌آور در مقابل طوفان و سیل برای هر پست HV، در شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) نشان داده شده است. همچنین، شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) بیانگر مقدار شاخص شکنندگی فیدرهای هر پست فوق‌توزیع با توجه به سرعت باد و دبی آب مشخص است. نهایتاً، در جدول (۳)، شاخص شکنندگی هر پست فوق‌توزیع و نتیجتاً کل شبکه در برابر سیل و نیز حوادث طبیعی طوفان و سیل آورده شده است.

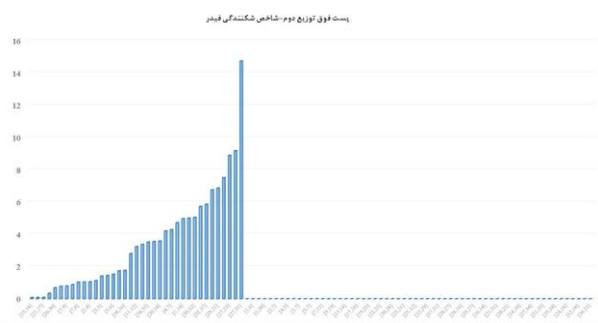
مقایسه‌ی شکل‌های (۸) تا (۹) با شکل‌های (۱۴) تا (۱۶)، نشان‌دهنده ساختار متفاوت شبکه بهینه تاب‌آور برای هر پست فوق‌توزیع در مواجهه با سیل و حوادث طبیعی سیل و طوفان است. همچنین، همانطور که در شکل‌های (۱۱-۱۳) و (۱۷-۱۹) نشان داده شده است مقادیر شاخص شکنندگی فیدرها برای هر پست فوق‌توزیع در برابر سیل با حوادث طبیعی سیل و طوفان متفاوت است. علاوه بر این، نتایج آرایه شده در جدول (۳) بیانگر شاخص شکنندگی بالای شبکه‌ی توزیع در برابر حوادث طبیعی چندگانه است. بر اساس توضیحات بالا، مقایسه‌ی نتایج بدست آمده حاکی از آن است که ارتقای تاب‌آوری رویداد محور می‌باشد. از این روی، به منظور ارتقای تاب‌آوری باید شناختی جامع از تهدیدهای پیش روی شبکه توزیع در منطقه میزبان شبکه حاصل گردد.



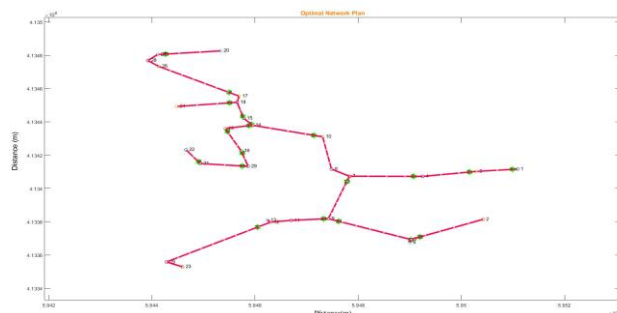
شکل (۱۶): ساختار شبکه‌ی بهینه تاب‌آور برای پست فوق‌توزیع سوم



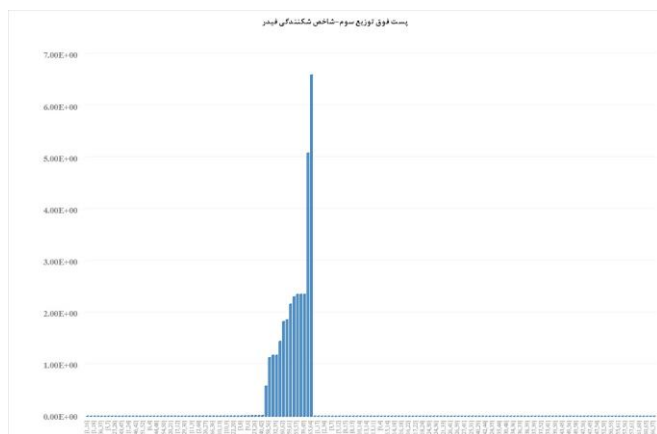
شکل (۱۷): شاخص شکنندگی فیدرها برای پست فوق‌توزیع اول



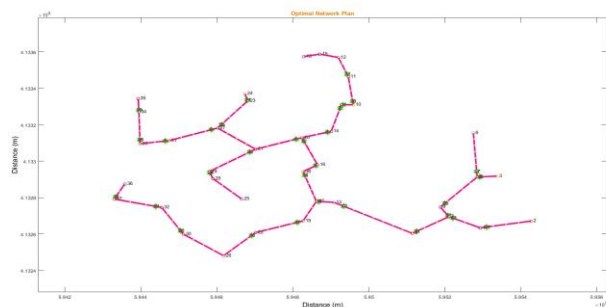
شکل (۱۸): شاخص شکنندگی فیدرها برای پست فوق‌توزیع دوم



شکل (۱۴): ساختار شبکه‌ی بهینه تاب‌آور برای پست فوق‌توزیع اول



شکل (۱۹): شاخص شکنندگی فیدرها برای پست فوق‌توزیع سوم



شکل (۱۵): ساختار شبکه‌ی بهینه تاب‌آور برای پست فوق‌توزیع دوم

M., 'Distribution automation strategies challenges and opportunities in a changing landscape'. IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 4, pp. 2157-2165, 2015.

- [7] Campbell, Richard, 'Weather-related power outages and electric system resiliency'. Washington, DC: Congressional Research Service, Library of Congress, 2012.
- [8] Executive Office of the President. Council of Economic Advisers. Economic Benefits of Increasing Electric Grid Resiliency to Weather Outages. The Council, 2013.
- [9] Alizadeh, M Iman., Ghaffarpour, Reza., Ranjbar, A Mohammad., 'Tri-Level Robust Resiliency-Driven SCUC in Power Systems With High Penetration Rate of Renewables', Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineer, Vol. 17, No. 2, pp. 3-2020, 2018.
- [10] Ayyub, Bilal M., 'Systems resilience for multi-hazard environments: Definition, metrics, and valuation for decision making'. Risk Analysis, Vol. 34, No. 2, pp. 340-355, 2014.
- [11] Bhuiyan, M. R., and Allan R. N., 'Inclusion of weather effects in composite system reliability evaluation using sequential simulation'. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 141, No. 6, pp. 575-584, 1994.
- [12] Liu, Y., Singh, Ch., 'A methodology for evaluation of hurricane impact on composite power system reliability'. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 1, pp. 145-152, 2011
- [13] Panteli, M., and Mancarella, P., 'Modeling and evaluating the resilience of critical electrical power infrastructure to extreme weather events'. IEEE Systems Journal, Vol. 11, No. 3, pp. 1733-1742, 2017
- [14] Marano, G. C., Greco, R., and Mezzina, M., 'Stochastic approach for analytical fragility curves'. KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 12, No. 5, pp. 305-312, 2008
- [15] Resilient Electricity Networks for Great Britain (RESNET). Available from: <http://www.ncl.ac.uk/ceser/researchprogramme/systemsm odelling/ resnetresilientelectricitynetworks> (accessed October 2013).
- [16] Shinozuka, M., Feng, Dong, X., Chang, S. E., Cheng, T., Jin, X., and Saadeghvaziri, M. A., 'Advances in seismic performance evaluation of power systems'. Research Progress and Accomplishments 2001-2003 (2003): 1-16.
- [17] Winkler, J., Duenas-Osorio, L., Stein, R., and Subramanian, D., 'Performance assessment of topologically diverse power systems subjected to hurricane events'. Reliability Engineering & System Safety, Vol. 95, No. 4, pp. 323-336, 2010.

#### زیر نویس‌ها

- <sup>1</sup> Low Probability High Impact (HILP)  
<sup>2</sup> Resourcefulness  
<sup>3</sup> Redundancy  
<sup>4</sup> Adaptability  
<sup>5</sup> Accessibility  
<sup>6</sup> Minimum Spanning Tree (MST)

جدول (۳): شاخص شکنندگی برای هر پست فوق توزیع و کل شبکه

شماره ی پست فوق توزیع	شاخص شکنندگی	
	سیل	طوفان و سیل
اول	۱۸/۸۴	۱۳۱/۸۵
دوم	۱۸/۸۴	۱۲۹/۴۳
سوم	۱۷/۶۶	۳۲/۵۴
کل شبکه فشار متوسط	۵۵/۳۴	۲۹۳/۸۲

#### ۴- نتیجه گیری

رخداد تهدیدهایی با احتمال وقوع پایین و شدت تخریب بالا (HILP)، نگرانی‌هایی را در باب نگرش معمول قابلیت اطمینان گرا پدید آورده است؛ بنابراین، ایستادگی در برابر موقعیت‌های دشوار ناخواسته و نادر، به‌عنوان چالشی اساسی شناخته شده است؛ بنابراین، ارگان‌های مختلف، تلاش‌هایی را در جهت ارتقا تاب‌آوری و برگشت‌پذیری سیستم قدرت انجام داده‌اند تا در مواجهه با رویدادهای HILP حداقل ممکن قطعی برق اتفاق افتاده و پیرو آن سیستم قدرت به‌سرعت به حالت بهره‌برداری عادی بازبایی گردد. هم‌چنین در این مقاله، طراحی تاب‌آور بهینه‌ی شبکه‌ی توزیع فشار متوسط مرسوم، به منظور کاهش آسیب‌پذیری در برابر حوادث طبیعی، یکبار در مقابله با سیل و بار دیگر در برابر طوفان و سیل بر روی شبکه فشار متوسط مقیاس بزرگ انجام گردیده است. این مقاله می‌تواند به‌نوبه خود دید و نگرش قابل‌قبولی از مبحث به‌روز و رو به رشد تاب‌آوری در اختیار خوانندگان قرار دهد و می‌تواند به‌عنوان مرجع اولیه برای مشتاقان به این مبحث باشد.

#### ۵- منابع:

- [1] Billinton, Roy, Allan, R. N., 'Reliability evaluation of engineering systems'. New York: Plenum press, 1992.
- [2] Shahidehpour, M., Tinney, William F., and Fu, Y., 'Impact of security on power systems operation'. Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 11, pp. 2013 - 2025, 2005.
- [3] Aminifar Farrokh, Farhoumandi, M., 'Concepts and Fundamentals of Resilience Assessment in Electric Power Grids', Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineer, Vol. 15, No. 3, pp. 83-91, 2018.
- [4] Tabatabaei, N. M. Najafi Ravadanegh S. and Bizun N., Power System Resilience: Modeling, Analysis and Practice, Switzerland, Springer, 2019.
- [5] Wang, Y., Chen Ch., Wang, J., and Baldick, R., 'Research on resilience of power systems under natural disasters—A review'. IEEE Trans. Power Syst, Vol. 31, No. 2, pp. 1604-1613, 2016.
- [6] Madani, V., Das, R., Aminifar, F., McDonald, J., Venkata, S. S., Novosel, D., Bose, A., and Shahidehpour,