

# نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال سیزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، (پیاپی ۵۰): صص ۶۶-۴۹

علمی - پژوهشی

## مروری جامع بر کارهای صورت گرفته در زمینه تاب آوری شبکه قدرت در

### برابر حوادث با احتمال وقوع کم و خسارت تحمیلی شدید

رضا غفارپور<sup>۱\*</sup>، سجاد مددی<sup>۲</sup>، سعید زمانیان<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۶

#### چکیده

امروزه تأثیر حوادث با احتمال وقوع کم و خسارات تحمیلی شدید مانند بلایای طبیعی و اقدامات خرابکارانه بر شبکه برق در بسیاری از کارها مورد توجه قرار گرفته است. بر اساس نتایج گزارش شده، این حوادث بر شبکه برق تأثیراتی از قبیل خاموشی طولانی مدت قسمت بزرگی از شبکه، خروج تجهیزات اصلی (به عنوان مثال، پست‌ها، خطوط انتقال و نیروگاه‌ها) و تحمیل آسیب‌های شدید به تجهیزات دارند. این پیامدها باعث ایجاد روش‌های کنترل و بهره‌برداری و استراتژی‌های برنامه‌ریزی برای بهبود تاب‌آوری شبکه‌های برق در برابر چنین رویدادهایی شده‌اند. به طور کلی تاب‌آوری به توانایی شبکه به کاهش اثرات پیش آمده در نتیجه رخ دادن حوادث با احتمال وقوع کم و خسارات تحمیلی شدید تعریف می‌شود. هدف از تاب‌آوری، ایجاد پتانسیلی برای سرعت بخشیدن بهبود سامانه در برابر صدمات چنین حوادث و تطبیق عملکرد و ساختار آن به منظور کاهش و یا حذف تأثیرات این حوادث است. در این مقاله کارهای صورت گرفته در زمینه تاب‌آوری شبکه‌های قدرت در برابر حوادث با احتمال وقوع کم و خسارات تحمیلی شدید مرور می‌گردد. مقالات این حوزه در ابتدا به دو بخش تاب‌آوری در برابر حوادث طبیعی و حملات خرابکارانه تقسیم می‌شوند. کارهای صورت گرفته در هر بخش به صورت تفصیلی شرح داده شده و مقالات هر زیر بخش از دیدگاه‌های مختلف دسته‌بندی و ویژگی‌های هر دسته ذکر می‌شوند.

**کلید واژه‌ها:** تاب‌آوری شبکه قدرت، بلایای طبیعی، حوادث تروریستی، مقالات مروری

<sup>۱</sup> استادیار، دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>، تهران، ایران - (rghaffarpour@ihu.ac.ir) - نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۳</sup> پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>، تهران، ایران

## ۱- مقدمه

امروزه نقش حیاتی برق در توسعه صنعت، افزایش رفاه اجتماعی و امور روزمره مردم به خوبی شناخته شده است. با این حال عملکرد ایمن این شبکه‌ها با تهدیدات طبیعی و تروریستی همواره مورد تهدید قرار می‌گیرد. این حوادث دارای احتمال وقوع کم اما تأثیرگذاری زیاد در شبکه برق هستند. از جمله تأثیرگذاری حوادث طبیعی در شبکه برق را می‌توان به قطعی‌های برق رخ داده بر اثر وقوع زمین‌لرزه اشاره نمود. مرجع [۱] گزارشی از میزان خسارات ناشی از چندین زمین‌لرزه معروف جهان بر زیرساخت‌های انرژی ارائه داده است. بر اساس این گزارش، زمین‌لرزه نورث‌ریچ آمریکا با بزرگی ۶/۸ ریشتر سبب آسیب رساندن به پست‌های برق واقع در مناطق ایالت کالیفرنیا شده و قطعی برق وسیعی از چند ثانیه تا چند روز را به همراه داشته است. نمونه دیگر از گزارش‌های این مرجع به قطعی گسترده برق در تمامی قسمت‌های شمالی کشور تایوان و خسارت ۳۳۰ میلیون دلاری شبکه برق این کشور بر اثر وقوع زمین‌لرزه‌ای به شدت ۷/۶ ریشتر می‌پردازد. کشور ایران که کشوری زلزله‌خیز واقع در کمربند لرزشی آلپ هیمالیا است، بر اثر وقوع زمین‌لرزه‌های بم، اهر، هریس و کرمانشاه با خاموشی‌های طولانی مدت در بخش‌های روستایی و شهری قسمت‌های زلزله زده مواجه شد. بر اساس گزارش مرجع [۱] در جریان زمین‌لرزه بم علاوه بر قطعی گسترده در مناطق زلزله زده بهره‌برداران شبکه قدرت با شکسته شدن مقره‌ها و نشی روغن آن‌ها و آسیب‌های جدی در تجهیزات پست و خطوط برق مواجه شدند. بنا بر ارقام گزارش شده در مرجع [۲] میزان خسارت وارد شده به زیرساخت‌های برق بر اثر زمین‌لرزه‌های بوشهر (۲۰ فروردین ۱۳۹۲)، هرمزگان (۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۲) و اهر و ورزقان (۲۱ مرداد ۱۳۹۱) به ترتیب برابر با ۱۷۰، ۹۷ و ۱۲۰ میلیارد ریال تخمین زده شده است. مرجع [۳] میزان خاموشی ناشی از زمین‌لرزه سال ۲۰۱۱ توکیو ژاپن را در حدود ۴ میلیون مشترک و خسارات مالی زمین‌لرزه به صنعت برق این کشور را در حدود ۱۴/۵ تا ۳۴/۶ میلیارد دلار برآورد کرده است. از انواع دیگر بلایای طبیعی که موجب آسیب رساندن به عملکرد ایمن شبکه برق می‌شود، می‌توان به طوفان‌های آب و هوایی اشاره نمود. در سال ۲۰۰۸ میلادی بنا بر گزارش ارائه شده در مرجع [۴] وقوع طوفان برفی در کشور چین موجب آسیب رساندن به ۲۰۰۰ پست و ۸۵۰۰ دکل برق و در نتیجه قطعی برق در ۱۳ استان و ۱۷۰ شهر شد. نمونه دیگر از تأثیرات طوفان در قطعی برق، به خاموشی چند هفته‌ای ۲/۸ میلیون مشترک در آمریکا بر اثر طوفان در منطقه هوستون این کشور و خسارات مالی در حدود ۲۴/۹ میلیارد دلار اشاره نمود [۵]. از این دست حوادث می‌توان به طوفان توردو در چین اشاره داشت که منجر به قطع برق ۱۳۵ هزار خانواده چینی شد [۶].

از سوی دیگر زیرساخت‌های برق به هدفی جذاب برای عوامل تروریستی به منظور انجام اقدامات خرابکارانه تبدیل شده‌اند [۷]. معمولاً عوامل خرابکار با آسیب رساندن به بخشی از شبکه الکتریکی درصدد تحمیل خاموشی‌های گسترده به شبکه هستند. پس از حوادث ۱۱ سپتامبر سال ۲۰۰۱، حفظ امنیت زیرساخت‌های حیاتی به نگرانی دولت و صنعت بسیاری از کشورها تبدیل شده است. در مرجع [۸] انواع مختلف تهدیدات در سامانه برق مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع پروژه‌های انجام شده توسط دولت ایالات متحده آمریکا برای بررسی آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شبکه برق بیان شده و یک روش اندازه‌گیری آسیب‌پذیری شبکه بر اساس روش ارزیابی ریسک احتمالی ارائه شده است. از آنجا که پیش‌بینی آسیب‌پذیری دستگاه‌های قدرت به منظور مشخص‌سازی توانایی آن‌ها در ادامه ارائه خدمات در صورت بروز حوادث تروریستی از اهمیت بالایی برخوردار است. در مرجع [۹] دو شاخص آسیب‌پذیری دستگاه‌های قدرت هنگام قرار گرفتن در شرایط احتمالی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع روش پیش‌بینی آسیب‌پذیری بر اساس شبکه عصبی احتمالی و با اندازه‌گیری میزان بار احتمالی پاسخ داده نشده انجام شده است. مطالعه این مرجع بر روی شبکه ۸۷ باسه نشان دهنده این موضوع است که در صورت وقوع یک حادثه تروریستی در شبکه مورد مطالعه در بدترین شرایط احتمالاً شبکه با خاموشی در حدود ۵۰ درصد بار مواجه می‌شود. در مرجع [۱۰] یک استراتژی دفاعی به منظور کاهش آسیب‌پذیری شبکه در برابر حملات تروریستی ارائه شده است. روش پیشنهادی این مرجع بر روی دو شبکه آزمون ۲۴ و ۳۰۰ باسه IEEE پیاده‌سازی شده است. نتایج آسیب‌پذیری گزارش شده در این مرجع در حالتی که این شبکه‌ها از استراتژی دفاعی پیشنهادی استفاده نمی‌کنند حاکی از تحمیل خاموشی‌هایی به میزان ۱۸۵۹ MW و ۱۰۹۳۷/۸ به ترتیب برای شبکه‌های ۲۴ و ۳۰۰ باسه است. همچنین یک برنامه دفاعی از سامانه قدرت در برابر حوادث تروریستی توسط مرجع [۱۱] ارائه شده است. این مرجع از شبکه ۱۱۸ باسه IEEE برای ارزیابی طرح پیشنهادی خود استفاده کرده است. با توجه به نتایج گزارش شده این مرجع میزان خاموشی تحمیل شده به شبکه در صورت آسیب وارد شدن به ۲ خط انتقال توسط عامل تروریستی و عدم وجود سیاست دفاعی مناسب توسط بهره‌بردار شبکه، ۱۰۸ MW تخمین زده شده است. در حالی که انتظار می‌رود با افزایش آسیب‌های تروریستی میزان خاموشی تحمیل شده به‌صورت نمایی افزایش یابد. یک رویکرد دفاعی مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم برای کاهش آسیب‌پذیری یکریز شبکه در مرجع [۱۲] مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج ارائه شده در این مرجع می‌توان عنوان داشت که عدم وجود استراتژی مناسب دفاعی در یکریز شبکه برق می‌تواند منجر به خاموشی‌های گسترده در صورت رخ دادن حوادث تروریستی شود.

نشده در مرحله اول استفاده می‌کند. نویسندگان مرجع [۱۴] به نقش ریزش‌بکه‌های به هم پیوسته به‌عنوان دستگاه‌های توزیع شده برای تقویت تاب‌آوری سامانه انرژی در برابر حوادث شدید پرداخته است. این ایده که دستگاه‌های قدرت بزرگ می‌توانند از طریق استقرار ریزش‌بکه‌های به هم پیوسته به سطح انعطاف‌پذیری بالاتری دست پیدا کنند، به‌طور مفصل در این مرجع بررسی شده است. این مرجع به‌منظور روشن‌سازی نقش ریزش‌بکه‌های به هم پیوسته در مواجهه با حوادث شدید اقدام به برنامه‌ریزی این ریزش‌بکه‌ها کرده است. این مرجع نتیجه می‌گیرد که ریزش‌بکه‌های به هم پیوسته یک راه حل مناسب برای بهبود تاب‌آوری در برابر حوادث شدید در شهرهای هوشمند هستند.

با مرور منابع ارائه شده در زمینه تاب‌آوری دستگاه‌های قدرت می‌توان بیان داشت که این منابع نقش تشکیل ریزش‌بکه‌های به هم پیوسته و برنامه‌ریزی جزیره‌ای هر ریزش‌بکه در افزایش تاب‌آوری سامانه کلی را پذیرفته‌اند و این امر به‌عنوان نقطه مشترک این منابع می‌تواند بیان شود. با این حال منابع ارائه دهنده راهکارهای بهبود تاب‌آوری شبکه در برابر حوادث طبیعی را می‌توان با توجه به شاخص ارزیابی تاب‌آوری مورد استفاده، نحوه مدل‌سازی عدم قطعیت‌های مسئله و همچنین منابع انعطاف‌پذیر لحاظ شده در ریزش‌بکه‌ها تقسیم‌بندی نمود که در زیر بخش‌های ۱-۲، ۲-۲، ۳-۲ به تفصیل به هر یک از این موارد پرداخته خواهد شد.

## ۲-۱- شاخص‌های استفاده شده برای ارزیابی

### تاب‌آوری

عملکرد طرح‌های پیشنهادی برای افزایش تاب‌آوری شبکه در برابر حوادث طبیعی باید با استفاده از یک شاخص تاب‌آوری مناسب ارزیابی شود. با این وجود، هیچ معیار استاندارد در زمینه سنجش تاب‌آوری سامانه قدرت تا به امروز به‌صورت جامع ارائه نشده است. در نتیجه شاخص‌های متفاوتی جهت ارزیابی اثربخشی چارچوب‌های پیشنهادی افزایش تاب‌آوری سامانه قدرت در برابر حوادث طبیعی به‌کار برده شده‌اند. این شاخص‌ها را می‌توان به صورت موارد زیر دسته‌بندی نمود:

- شاخص کاهش انرژی مورد انتظار: این شاخص میزان کاهش انرژی مورد انتظار در طی اختلالی با طول زمانی  $H$  را اندازه‌گیری می‌کند. با استفاده از این شاخص تجزیه و تحلیل رویدادهای مختلف احتمالی با زمان شروع متفاوت امکان‌پذیر است. میانگین کل کاهش انرژی در سامانه چند ریزش‌بکه‌ای به‌عنوان شاخص تاب‌آوری ثبت می‌شود. مدل ریاضی این شاخص در رابطه (۱) نشان داده شده است [۱۳].

با توجه به پیامدهای عنوان شده در اثر وقوع حوادث با احتمال کم اما تأثیرات مخرب بالا، بسیاری از محققین و برنامه‌ریزان شبکه‌های انرژی روش‌هایی برای تاب‌آوری سازی دستگاه‌های خود در برابر رخ دادن این حوادث ارائه داده‌اند. بر اساس یافته‌های گزارش شده می‌توان عنوان داشت که در راستای افزایش تاب‌آوری شبکه‌های برق نیاز به افزایش انعطاف‌پذیری شبکه با نصب منابع انعطاف‌پذیر مانند نیروگاه‌های تولید پراکنده و دستگاه‌های ذخیره‌ساز در مکان‌های مناسب هست. از سوی دیگر مدل‌سازی مناسب این رویدادها می‌تواند به حصول نتایجی با بیشترین تأثیر در تاب‌آوری دستگاه‌های قدرت کمک کند. از این رو در این مقاله با مرور کارهای صورت گرفته در خصوص افزایش تاب‌آوری دستگاه‌های قدرت در برابر حوادث با احتمال کم و خسارات تحمیلی زیاد انواع منابع انعطاف‌پذیر به‌کار برده شده با هدف ذکر شده بیان می‌گردد. همچنین مدل‌های ارائه شده جهت آشکارسازی پیامدهای هر یک از این حوادث تشریح می‌شوند. در پایان پیشنهادهایی جهت بهبود مدل‌های ارائه شده به‌صورت اجمالی بیان می‌گردند.

## ۲- تاب‌آوری شبکه برق در برابر حوادث طبیعی

در زمینه تاب‌آوری شبکه برق در برابر حوادث طبیعی تمرکز اساسی بر تقسیم شبکه توزیع به چندین ریزش‌بکه به هم پیوسته است. به‌گونه‌ای که هر یک از این ریزش‌بکه‌ها در حالت عملکرد عادی با در نظر گرفتن امکان انتقال توان بین ریزش‌بکه‌های مختلف برنامه‌ریزی شده‌اند. در شرایط به وجود آمدن یک حادثه شدید، مانند طوفان هر یک از ریزش‌بکه‌ها به‌صورت جزیره‌ای سعی در تأمین بار خود خواهد کرد. در این شرایط هر ریزش‌بکه با توجه منابع قابل دسترس خود بارهای موجود را به دو دسته بارهای بحرانی و غیر بحرانی تقسیم کرده و پس از اطمینان از پاسخگویی به بارهای بحرانی سعی به پاسخ دادن بیشترین بارهای غیر بحرانی می‌کند. در این راستا مرجع [۱۳] یک برنامه مدیریت سلسله مراتبی قطع به‌منظور ارتقای تاب‌آوری سامانه توزیع هوشمند متشکل از چند ریزش‌بکه در برابر حوادث غیر منتظره ارائه کرده است. بدین منظور، پس از مشخص کردن ویژگی‌ها و الزامات اصلی یک طرح مدیریت خاموشی انعطاف‌پذیر، یک چارچوب مناسب تدوین شده و نقش‌ها و وظایف اشخاص مختلف مدیریتی در یک سامانه چند ریزش‌بکه‌ای معرفی شده است. بر اساس این چارچوب، ریزش‌بکه‌ها منابع اولیه خود را در مرحله اول با استفاده از یک الگوریتم مبتنی بر کنترل پیش‌بینی شده، برنامه‌ریزی می‌کنند. در مرحله دوم، اپراتور سامانه توزیع، انتقال توان احتمالی را در میان ریزش‌بکه‌ها هماهنگ کرده و از ظرفیت‌های بلااستفاده ریزش‌بکه‌ها برای تغذیه بارهای پاسخ داده

خسارت وارده به زیرساخت‌های مهم را برآورد کرده و منابع انسانی و مادی سازمانی را برای بازیابی کامل شبکه قدرت بسیج کرد. شاخص بازیابی شبکه با میانگین زمان سنتی برای تعمیر که در بیشتر موارد بستگی به وضعیت تجهیزات مربوط به شبکه برق دارد، متفاوت هست. این شاخص علاوه بر وضعیت تجهیزات، خرابی‌های شبکه حمل و نقل، سامانه ارتباطات و عوامل مختلف با توجه به نوع حادثه را مدل کرده و با حاصل جمع وزن‌دار هر یک از این عوامل محاسبه می‌شود. در رابطه (۴) مدل ریاضی این شاخص نشان داده شده است [۱۵].

$$G = \sum w_i \eta_i \quad (4)$$

در این رابطه عامل تأثیرگذار و وزن هر عامل با  $\eta$  و  $w_i$  نشان داده شده‌اند.

- شاخص توانایی ترمیم: در این شاخص، میزان توانایی ترمیم ریزش شبکه با توجه به میزان کل بار موجود و میزان بار بازگردانده شده توسط ریزش شبکه در شرایط خطا سنجیده می‌شود. مدل ریاضی این شاخص در رابطه (۵) نشان داده شده است [۱۶].

$$RI = \left( \sum_{n=1}^N \frac{P_{e, \rho_{n,r}}}{P_{e, \rho_n}} \cdot \rho_n \right) / N \quad (5)$$

در این رابطه مقدار بار بازگردانده شده و کل بار به ترتیب با  $P_{e, \rho_{n,r}}$  و  $P_{e, \rho_n}$  نشان داده شده‌اند. پارامتر  $\rho_n$  به منظور مشخص کردن اولویت بار لحاظ شده است.

- شاخص آمادگی: این شاخص برابر است با میزان انرژی ذخیره شده موجود در ذخیره‌سازها که جهت پاسخگویی به بارهای مهم استفاده می‌شود. معمولاً این مقدار انرژی به‌عنوان آمادگی ریزش شبکه در برابر حوادث طبیعی در شرایط عادی بهره‌برداری استفاده نمی‌شوند. میزان این انرژی در مسائل برنامه‌ریزی کوتاه مدت ریزش شبکه به میزان آمادگی تعبیر شده است [۱۶].

بسیاری از مقالات مرور شده از یک یا چند شاخص‌های ذکر شده به صورت مستقیم و یا با اعمال تغییرات حداقلی استفاده کرده‌اند. در جدول (۱) شاخص‌های استفاده شده توسط مراجع بیان شده است.

$$RI = \frac{1}{NT} \sum_{h=1}^{NT} \sum_{i=1}^N \sum_{t=h+1}^{h+H} \Delta t \cdot LS_{i,t}^D \quad (1)$$

در این رابطه تعداد ریزش شبکه‌ها با  $N$ ، تعداد دفعات وقوع حوادث و میزان بار از دست رفته در هر سری به ترتیب با  $NT$  و  $LS_{i,t}^D$  نشان داده شده‌اند.

- شاخص  $K$ : این شاخص تعداد خطوطی که پیش‌بینی می‌شود بر اثر وقوع یک حادثه شدید از مدار خارج شوند را اندازه‌گیری می‌کند. مدل ریاضی این شاخص در رابطه (۲) نشان داده شده است [۱۵].

$$k = \int_0^{\infty} kf(k)dk \quad (2)$$

در این رابطه تعداد خطوط قطع شده با  $K$  مشخص شده است. تابع توزیع شکنندگی که ویژگی خاموشی‌های مربوط به یک رویداد شدید را توصیف می‌کند با  $f$  نشان داده شده و به صورت رابطه (۳) محاسبه می‌گردد. این پارامتر تابعی از احتمال خروج خط ( $P_d$ ) بر اثر شرایط پیش آمده ( $V$ ) هست.

$$f = P_d(k | V) \quad (3)$$

- شاخص LOLP: احتمال اینکه بار پاسخ داده نشود را اندازه‌گیری می‌کند. این شاخص یکی از شاخص‌های مطرح سنجش قابلیت اطمینان سامانه است.

- شاخص EDNS: میزان متوسط بار پاسخ داده نشده را اندازه‌گیری می‌کند. این شاخص همانند شاخص LOLP از شاخص‌های ارائه شده در سنجش قابلیت اطمینان سامانه است. تفاوت میان این شاخص و شاخص کاهش انرژی مورد نیاز، توانایی شاخص کاهش انرژی مورد نیاز در مدل‌سازی تعداد حوادث و همچنین بازه‌های زمان‌های مختلف هست.

- شاخص G: این شاخص به منظور اندازه‌گیری پیچیدگی ترمیم شبکه پس از وقوع یک حادثه ارائه شده است. با توجه به شدت حوادث شدید و میزان خسارت وارده به زیرساخت‌های مهم شامل شبکه قدرت، حمل و نقل و زیرساخت‌های سایبری ممکن است. روند ترمیم شبکه قدرت در حوادث شدید چندین ساعت یا حتی چند روز طول بکشد. با پیش‌بینی وضعیت آب و هوا و آگاهی نسبی از وضعیت زیرساخت‌ها در شرایط وقوع حوادث شدید می‌توان شدت

جدول (۱): شاخص‌های ارزیابی تاب‌آوری سامانه استفاده شده توسط مراجع

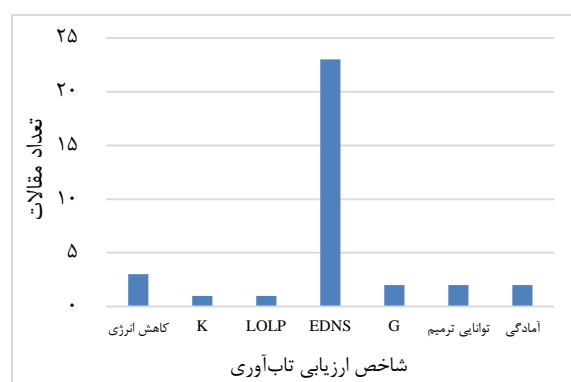
آمادگی	توانایی ترمیم	G	EDNS	LOLP	K	کاهش انرژی مورد انتظار	مرجع
						✓	[۱۳]
			✓				[۱۴]
		✓	✓	✓	✓		[۱۵]
✓			✓				[۱۷]
			✓				[۱۸]
	✓						[۱۹]
			✓				[۲۰]
						✓	[۲۱]
	✓						[۲۲]
			✓				[۲۳]
			✓				[۲۴]
			✓				[۲۵]
			✓				[۲۶]
						✓	[۲۷]
			✓				[۲۸]
			✓				[۲۹]
✓			✓				[۳۰]
			✓				[۳۱]
✓		✓	✓				[۳۲]
			✓				[۳۳]
			✓				[۳۴]
			✓				[۳۵]
			✓		✓		[۳۶]
			✓				[۳۷]
			✓				[۳۸]
			✓				[۳۹]
			✓				[۴۰]
			✓				[۴۱]

هزینه بهره‌برداری از ریزشکته‌های به هم پیوسته با دستگاه‌های مدیریت انرژی چند سطحی در مقایسه با استراتژی‌های مدیریت انرژی غیر متمرکز کمتر و دارای تاب‌آوری بیشتر است. به همین ترتیب، به دلیل درج داده‌ها (مازاد / کسری) از ریزشکته‌های سطح داخلی، حریم خصوصی مشتری نیز افزایش می‌یابد. در حالت جزیره‌ای، عملکرد انعطاف‌پذیر ریزشکته‌های جزیره‌ای شده به دلیل توانایی آن‌ها در تشکیل زیرگروه‌ها افزایش یافته است. در حالت اتصال به شبکه، انواع مختلف نیروگاه‌ها با هزینه‌های تولید متفاوت در هر ریزشکته به همراه سیگنال‌های قیمت خریداری شده از بازار مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت جزیره‌ای، تأثیر سامانه ذخیره‌ساز انرژی در هنگام قطع اتصال ریزشکته‌ها از شبکه به هم پیوسته ارزیابی شده است. در مرجع [۲۷] یک چارچوب مدیریت پیشگیرانه ریزشکته برای مقابله با اثرات منفی طوفان‌های شدید باد ارائه شده است. پس از دریافت هشدار برای طوفان، این چارچوب یک برنامه محافظه‌کارانه برای ریزشکته‌هایی با حداقل تعداد شاخه‌های آسیب‌پذیر در اثر شرایط طوفان به‌صورتی که بار بحرانی پاسخ داده شود، پیدا می‌کند. برنامه ارائه شده در این مرجع عملکرد طبیعی ریزشکته قبل از طوفان بادی و همچنین کاهش آسیب‌پذیری ریزشکته در شروع طوفان را تضمین می‌کند. روش ارائه شده از تغییر توپولوژی شبکه، تغییر توان نیروگاه‌های قابل برنامه‌ریزی و تنظیم ولتاژ جهت رسیدن به پاسخ بهینه استفاده می‌کند.

## ۲-۲-۲- مدل‌های تصمیم‌گیری تصادفی

در دستگاه‌های انرژی در مقیاس بزرگ، وجود پارامترهای دارای عدم قطعیت مانند انرژی‌های تجدیدپذیر باعث ایجاد چالش برای حل مسئله بهینه‌سازی و یافتن راه حل بهینه می‌شوند. روش بهینه‌سازی تصادفی یکی از راه‌های مقابله با این چالش شناخته می‌شود. در یک برنامه‌ریزی تصادفی با استفاده از سناریوهای مختلف و احتمال رویداد آن سناریو مسئله بهینه‌سازی با هدف رسیدن به جواب بهینه برای میانگین سناریوها حل می‌شود. این روش دارای دو مرحله شامل تولید سناریو و کاهش سناریوها به تعداد دلخواه است. در مرحله تولید سناریو با استفاده از توزیع احتمالی به‌دست آمده بر اساس داده‌های تاریخی و شبیه‌سازی مونت کارلو سناریوهای مسئله به تعداد زیاد ساخته می‌شود [۴۱]. در گام بعدی بر اساس روش‌های ارائه شده برای کاهش سناریو مانند روش سندرد [۴۲] و یا روش‌های خوشه‌بندی [۴۳ و ۴۴] تعداد سناریوهای تولید شده به اندازه مناسب کاهش داده می‌شود. در راستای مدل‌سازی تصادفی تاب‌آوری دستگاه‌های قدرت در برابر حوادث طبیعی مرجع [۲۸] یک رویکرد برنامه‌نویسی تصادفی را برای افزایش تاب‌آوری یک سامانه توزیع در معرض آتش‌سوزی پیشنهاد می‌کند. ظرفیت دینامیکی خطوط

در شکل (۱) مقایسه آماری از میزان استفاده این شاخص‌های ارزیابی تاب‌آوری سامانه توزیع ارائه شده است. بر اساس این شکل و جدول (۱) می‌توان نتیجه گرفت که شاخص میزان بار پاسخ داده نشده برای نشان دادن میزان اثربخشی مدل‌های تاب‌آوری شبکه قدرت در برابر بلایای طبیعی بیشتر از سایر شاخص‌ها مورد توجه قرار گرفته است. سایر مراجع اشاره نشده در این بخش نیز از مدل‌های اندازه‌گیری میزان بار پاسخ داده نشده برای ارزیابی مدل پیشنهادی خود استفاده کرده‌اند. بنابراین پیشنهاد می‌شود به‌منظور مقایسه پذیری اثربخشی روش‌هایی که در آینده توسط محققین ارائه می‌گردند از این شاخص استفاده شود.



شکل (۱): میزان استفاده از شاخص‌های ارزیابی تاب‌آوری سامانه در مراجع

## ۲-۲-۲- نحوه مدل‌سازی عدم قطعیت در مدل‌های

### تاب‌آوری شبکه در برابر حوادث طبیعی

مقالات ارائه شده در زمینه تاب‌آوری شبکه قدرت در برابر حوادث طبیعی را با توجه به نحوه مدل‌سازی منابع عدم قطعیت در مسئله بهینه‌سازی می‌توان به سه دسته بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت، مدل‌های بهینه‌سازی تصادفی، مدل‌های بهینه‌سازی مقاوم تقسیم‌بندی نمود.

## ۲-۲-۱- مدل‌های تصمیم‌گیری بدون در نظر گرفتن عدم

### قطعیت

در این مدل‌ها پارامترهای دارای عدم قطعیت مانند تولید نیروگاه‌های بادی، تأثیر حوادث قابل پیش‌بینی بر شبکه قدرت به‌صورت مقدار پیش‌بینی شده در نظر گرفته می‌شود. به‌عنوان مثال نویسندگان مرجع [۲۲] یک استراتژی مدیریت انرژی برای برنامه‌ریزی روزانه ریزشکته‌های به هم پیوسته به‌عنوان سامانه مدیریت انرژی چند سطحی ارائه کرده‌اند. در استراتژی پیشنهادی مدیریت انرژی چند سطحی، توان مازاد موجود در ریزشکته‌ها به‌عنوان یک منبع و کسری توان هر ریزشکته به‌عنوان بار جهت تبادل توان به ریزشکته‌های بیرونی منعکس می‌شود.

پیش‌بینی بازه‌ای، با در نظر گرفتن بدترین سناریوهای ممکن برای مجموعه عدم قطعیت با توجه به بودجه مقاوم تعیین شده توسط کاربر (ساختار تنظیم کننده) تابع هدف بهینه می‌شود. با در نظر گرفتن بودجه‌های مقاوم می‌توان میزان انتخاب بدترین شرایط توسط الگوریتم تغییر داده شود. مرجع [۲۶] یک مدل برنامه‌ریزی بهینه بر اساس بهینه‌سازی مقاوم برای برنامه‌ریزی کوتاه مدت ریزشکته‌های قدرت با توجه به محدودیت‌های توانایی تاب‌آوری ریزشکته در صورت جزیره‌ای شدن، ارائه می‌دهد. تابع هدف این مرجع به حداقل رساندن هزینه کل بهره‌برداری، از جمله هزینه تولید و هزینه ذخیره چرخان منابع محلی و همچنین هزینه خرید انرژی از شبکه اصلی با در نظر گرفتن محدودیت‌های تاب‌آوری یکریز شبکه و بهبود پارامترهای قابلیت اطمینان در منبع برق جزیره است. ریزشکته موظف است به اندازه کافی ذخیره چرخان (از بالا و پایین) را برای تأمین تقاضای ریزشکته در هنگام بروز حوادث منجر شونده به جدایی از شبکه اصلی در اختیار داشته باشد. در مرجع [۳۰]، یک مدل برنامه‌ریزی دو سطحی محدود شده با تاب‌آوری به منظور حداقل سازی هزینه لازم برای افزایش تاب‌آوری در شبکه‌های به هم پیوسته برق گاز طبیعی ارائه شده است. این مرجع در گام اول یک مسئله بهینه‌سازی بر اساس معیار استحکام و حداقل پیشیمانی برای تقویت تاب‌آوری سامانه توزیع در برابر بدترین شرایط احتمالی  $N-k$  تدوین کرده است. مدل آب و هوایی برای به دست آوردن پویایی مکانی حوادث آب و هوایی شدید در نظر گرفته شده است. سپس، مدل مقاوم پیشنهادی با ریلکس کردن معادلات جریان عبوری و جریان گاز طبیعی به محدودیت‌های مخروطی مرتبه دوم به‌عنوان یک مدل برنامه‌نویسی محدب مخلوط عدد صحیح ارائه شده است. الگوریتم تولید ستون و محدودیت برای حل مسئله بهینه‌سازی دو سطحی پیشنهادی این مرجع استفاده شده است. در مرجع [۳۸]، یک مدل بهینه‌سازی سه سطحی مقاوم برای بهره‌برداری و افزایش تاب‌آوری سامانه انرژی شامل شبکه‌های به هم پیوسته برق و گاز طبیعی با هدف به حداقل رساندن محدودیت‌های بار ناشی حوادث، ارائه شده است. محدوده‌های غیر محدب به‌منظور تدوین مسئله دوگان بهینه انرژی خطی سازی شده است. پس از آن مسئله سه مرحله‌ای ارائه شده توسط این مرجع با استفاده از الگوریتم تجزیه بندرز حل شده است.

دسته‌بندی منابع بر اساس روش مدل‌سازی عدم قطعیت در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین مقایسه آماری از نحوه مدل‌سازی عدم قطعیت در مراجع در شکل (۲) آورده شده است. بر اساس این شکل می‌توان نتیجه گرفت که مدل بهینه‌سازی مقاوم در این راستا کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

هوایی به‌منظور مدل‌سازی تأثیر آتش‌سوزی بر دمای هادی و جریان هادی‌ها در نظر گرفته شده است. عدم قطعیت‌های مربوط به تابش خورشیدی، سرعت باد و جهت باد تأثیرگذار بر پیشرفت آتش‌سوزی و میزان توان تولیدی نیروگاه‌های تجدید پذیر به‌عنوان پارامترهای تصادفی در نظر گرفته شده‌اند. در مرجع [۳۱] یک استراتژی یکپارچه ترمیم برای به حداقل رساندن هزینه کل سامانه با برنامه‌ریزی دستگاه‌های ذخیره‌ساز سیار انرژی، منابع ریزشکته‌ها و تغییر توپولوژی شبکه توزیع پیشنهاد شده است. استراتژی یکپارچه باعث آسیب و اصلاح هر دو جاده در شبکه‌های حمل و نقل و ریزشکته‌های دستگاه‌های توزیع می‌شود. عدم قطعیت در مصرف بار و وضعیت جاده‌ها و ریزشکته‌ها به‌عنوان درخت سناریو با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو مدل‌سازی شده است. استراتژی عملیاتی پیشنهادی در این مرجع با یک روش تصادفی چند لایه شبکه زمان و مکان مدل‌سازی شده است. در مرجع [۴۵] یک ابزار تجزیه و تحلیل تأثیر طوفان مکانی و زمانی برای کمک به بهره‌برداران صنعت برق در تعیین میزان آسیب‌های طوفان به شبکه برق تهیه شده است. مدل ارائه شده در این مرجع سناریوهای طوفان تصادفی مبتنی بر داده‌های تاریخی طوفان را ایجاد کرده و سناریوهای قطع احتمالی اجزای شبکه توزیع را با استفاده از اطلاعات ساختاری محاسبه شده بر اساس منحنی‌های شکنندگی ارائه می‌کند. سناریوهای قطع تولید شده توسط مدل به بهره‌بردار امکان می‌دهد تا خطرات احتمالی شبکه برق را در ساعت‌ها یا روزهای منتهی به یک رویداد طوفان قریب‌الوقوع شناسایی کند. علاوه بر این، مدل ارائه شده در این مرجع می‌تواند به‌عنوان یک ابزار برنامه‌ریزی اضطراری به‌منظور شناسایی اقدامات مناسب در وضعیت طوفان استفاده شود.

## ۲-۲-۳- مدل‌های تصمیم‌گیری مقاوم

در برنامه‌ریزی تصادفی نیاز به تخمین توزیع تصادفی متغیرهای دارای عدم قطعیت وجود داشت. با این حال تخمین توزیع تصادفی برخی از منابع عدم قطعیت امکان‌پذیر نیست. بهینه‌سازی مقاوم قادر است مشکلات بهینه‌سازی با پارامترهای عدم قطعیت که قادر به تخمین توزیع احتمالی مجموعه دارای عدم قطعیت آن نیست، را برطرف کند. در این مدل بهینه‌سازی یک مجموعه عدم قطعیت برای توصیف نتایج احتمالی پارامترهای دارای عدم قطعیت استفاده شده و همان‌طور که از نام آن مشخص است، دارای یک ساختار تنظیم کننده به‌منظور یافتن مقادیری از عدم قطعیت‌ها برای تحقق بدترین حالت از این پارامترها و بهینه نمودن تابع هدف به ازای بدترین حالت‌های ممکن تنظیم شده است. در این روش بهینه‌سازی با استفاده از

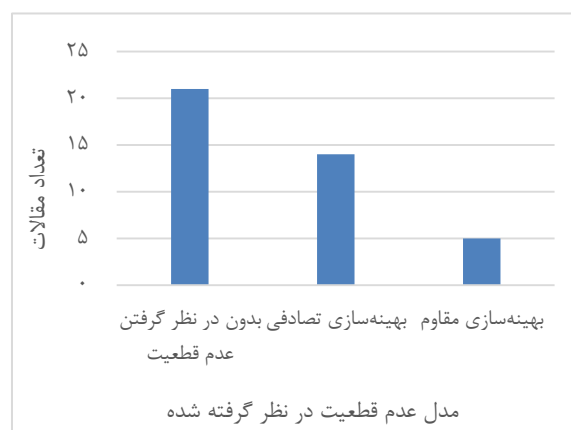
رسیده است. نیروگاه‌های تولید پراکنده می‌توانند از یک منبع فسیلی (گاز) و یا منابع تجدید پذیر جهت تولید توان برق استفاده کنند. نیروگاه‌های دیزلی، بادی، فتوولتائیک از جمله نیروگاه‌های مطرح در سطح جهانی می‌باشند. به عنوان مثال یک استراتژی افزایش تاب‌آوری ریزشک‌ها با در نظر گرفتن انرژی‌های تجدید پذیر در مرجع [۴۶] با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین برای تولید سناریو توان نیروگاه‌های تجدید پذیر ارائه شده است. مدل ارائه شده در این مرجع می‌تواند با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر توان لازم جهت پشتیبانی از عملکرد بدون مشکل سامانه برق در مواجهه با حوادث خطرناک شدید را تضمین کنند.

ذخیره‌ساز انرژی: با گسترش نیروگاه‌های تجدیدپذیر، دستگاه‌های ذخیره‌ساز جهت مقابله با ماهیت تولید غیر قابل برنامه‌ریزی این نیروگاه‌ها مورد توجه قرار گرفتند. با این حال امکان ذخیره انرژی در زمان‌های کم باری و تزریق آن در زمان پر باری می‌تواند موجب مسطح شدن پروفیل بار شود. این مزیت سبب گسترش استفاده از واحدهای ذخیره‌ساز انرژی شد. وجود ذخیره‌ساز در ریزشک‌ها موجب ارائه رویکردهایی جهت پاسخگویی به بارهای بحرانی در زمان وقوع حوادث غیر منتظره و افزایش تاب‌آوری ریزشک‌های یک سامانه قدرت می‌شود. در نتیجه در برخی از مراجع برنامه‌ریزی دستگاه‌های ذخیره‌ساز با در نظر گرفتن محدودیت‌های تاب‌آوری ارائه شده است. مرجع [۲۴] با هدف تقویت تاب‌آوری یکریز شبکه دارای نیروگاه‌های فتوولتائیک و باتری در برابر شرایط آب و هوایی شدید مانند طوفان، سونامی و حوادث مشابه مقادیر بهینه نصب باتری را مشخص کرده است. مزیت اصلی این مرجع در توانایی آن برای تعیین نقطه بهینه بین هزینه بهره‌برداری و تاب‌آوری شبکه است. به عبارت دیگر، این مرجع یک سامانه مدیریت بهینه باتری را به گونه‌ای پیشنهاد می‌کند تا ضمن حفظ هزینه بهره‌برداری ریزشک در کمترین مقدار، تاب‌آوری ریزشک پیشنهادی را نیز افزایش دهد. دستگاه‌های ذخیره‌ساز انرژی را می‌توان به دو دسته ذخیره‌سازهای شیمیایی (انواع مختلف باتری) و ذخیره‌سازهای طبیعی تقسیم‌بندی کرد. دستگاه‌های ذخیره‌ساز طبیعی به دلیل وابستگی به شرایط جغرافیایی در مسائل بهبود تاب‌آوری شبکه قدرت در برابر با حوادث طبیعی مورد توجه قرار نگرفته‌اند.

ظرفیت دینامیکی تجهیزات: محدودیت‌های حرارتی هر یک از تجهیزات (خطوط انتقال، ترانسفورماتورها) به کار برده شده در سامانه قدرت سبب تعریف ظرفیت نامی تجهیزات شده است. این ظرفیت نامی با توجه به بدترین شرایط آب و هوایی ثبت شده در محل نصب در دستگاه‌های رایج انرژی تعیین می‌شوند. با این حال افزایش دستگاه‌های اندازه‌گیری بر خط بهره‌بردارهای سامانه قدرت را قادر ساخته تا شرایط محیطی برخط تجهیزات را

جدول (۲): دسته‌بندی بر اساس روش مدل‌سازی عدم قطعیت

روش مدل‌سازی عدم قطعیت	مراجع
بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت	[۱۳]، [۱۵]، [۱۶]، [۱۷]، [۲۰]، [۲۲]، [۲۵]، [۲۷]، [۳۲]، [۳۳]، [۳۴]، [۳۵]، [۴۸]، [۴۹]، [۵۰]، [۵۲]، [۵۳]، [۵۵]، [۵۶]، [۵۷]، [۵۸]
بهینه‌سازی تصادفی	[۱۸]، [۲۴]، [۲۸]، [۳۱]، [۳۶]، [۳۷]، [۳۹]، [۴۰]، [۴۵]، [۴۶]، [۴۷]، [۵۱]، [۵۴]، [۵۹]
بهینه‌سازی مقاوم	[۱۹]، [۲۶]، [۲۹]، [۳۰]، [۳۸]



شکل (۲): دسته‌بندی نحوه مدل‌سازی عدم قطعیت در مقالات بررسی شده

## ۲-۳- منابع انعطاف‌پذیر به کار برده شده در مدل‌های تاب‌آوری شبکه در برابر حوادث طبیعی

منابع انعطاف‌پذیر به‌عنوان عنصر اصلی در تاب‌آوری شبکه در برابر حوادث طبیعی عنوان شده‌اند وجود منابع انعطاف‌پذیر سبب ایجاد ریزشک‌های به هم پیوسته مناسب که به‌عنوان یک راه حل عمومی جهت افزایش تاب‌آوری شبکه قدرت در برابر حوادث شناخته شده است، می‌شود. منابع انعطاف‌پذیر که در کارهای گزارش شده++ توسط مراجع در نظر گرفته شده‌اند را می‌توان به سه دسته نیروگاه‌های تولید پراکنده، ذخیره‌سازهای انرژی و ظرفیت دینامیکی تجهیزات تقسیم نمود.

نیروگاه‌های تولید پراکنده: در سال‌های اخیر توجه به نصب نیروگاه‌های کوچک در محل مصرف یا نزدیک به مصرف به‌منظور تأمین اهداف اولیه از جمله کاهش تلفات شبکه، بهبود پروفایل ولتاژ مورد توجه قرار گرفته شدند. با ارائه مفهوم ریزشک‌های به هم پیوسته جهت افزایش تاب‌آوری ریزشک‌ها، نقش این نیروگاه‌ها در تعیین ریزشک‌ها و افزایش تاب‌آوری به اثبات



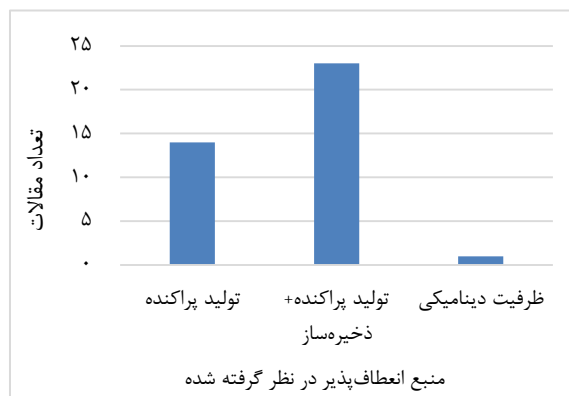
متعددی به ارائه راهکارهایی جهت بهبود تاب‌آوری شبکه قدرت در برابر حملات خرابکارانه پرداخته‌اند. اولین گام در این مقالات ارائه مدل مناسبی از رفتار عامل خرابکار جهت ضربه زدن به زیرساخت‌های برق است. مدل‌های مهاجم مدافع در ابتدا برای تجزیه و تحلیل آسیب‌پذیری دستگاه‌های قدرت در برابر چندین شرایط احتمالی از جمله حملات عوامل مخرب استفاده شده است. این مدل‌ها یک مسئله تصمیم‌گیری دو سطحی با در نظر گرفتن یک مهاجم و یک مدافع را تشکیل می‌دهند [۶۸-۶۰]. مهاجم یا همان عامل تروریستی مجموعه‌ای از تجهیزات شبکه برق را با هدف تحمیل بیشترین آسیب به شبکه را با در نظر گرفتن محدودیت‌های مالی عامل مخرب (بودجه خرابکاری) در سطح بالایی مدل انتخاب می‌کند. در سطح پایین مدل، مدافع یا همان بهره‌بردار شبکه به‌منظور حداقل سازی خسارات وارده توسط عامل مخرب با برنامه‌ریزی مجدد شبکه واکنش نشان می‌دهد. اگر چه مدل ارائه شده به‌منظور تشخیص تجهیزات ضروری برای تعیین استراتژی دفاعی و مصون نگه‌داری این تجهیزات از جمله عوامل مخرب به نظر مناسب هست، اما قادر به مدل‌سازی برنامه‌های توسعه شبکه به‌منظور افزایش تاب‌آوری شبکه نیست. در مورد شناسایی تجهیزاتی که نیاز به تقویت استراتژی دفاعی دارند، مراجع [۶۹-۷۱] نشان داده است، که خروجی‌های این مدل اگرما بهترین مجموعه از تجهیزات آسیب‌پذیر شبکه را مشخص نمی‌کند. بنابراین، به‌منظور پوشش نقاط ضعف مدل مهاجم مدافع، مدل سه سطحی مدافع-مهاجم-مدافع ارائه شد. بخش عمده‌ای از مراجع به‌منظور شناسایی رفتار عامل مخرب از این مدل استفاده کرده‌اند. این مدل که به مدل استحکام نیز معروف هست، شامل سه سطح بوده که در سطح نخست آن، برنامه‌ریز شبکه طرح‌های توسعه شبکه و یا تجهیزاتی که نیاز به مستحکم سازی دارند را به‌منظور حداقل سازی اثرات یک حمله خرابکارانه مشخص می‌کند. در سطح دوم این مدل مهاجم (عامل تروریستی) مجموعه‌ای از تجهیزات شبکه را به‌منظور بیشترین آسیب‌رسانی به زیرساخت‌های انرژی مشخص می‌کند. در سطح سوم، بهره‌بردار شبکه با در نظر گرفتن اقدامات برنامه‌ریز شبکه و عوامل تروریستی به کاهش صدمات وارده توسط یک عامل تروریستی می‌پردازد. در این مدل، هر عامل سعی در بهینه‌سازی تابع هدف خود با در نظر گرفتن رفتار سایر عوامل می‌کند. لازم به ذکر است که در مدل‌های ارائه شده محدودیت بودجه‌ای برای برنامه‌ریز شبکه و عامل تروریستی در نظر گرفته می‌شود. از معایب این روش وجود متغیر باینری در سطح دوم مدل که نشان دهنده تجهیزات انتخابی توسط عامل مخرب است، هست. وجود این بردار باینری مانع از تبدیل مسئله سه سطحی به یک مدل تک سطحی معادل با روش‌های معمول و

اندازه‌گیری کرده و ظرفیت تجهیزات را بر اساس داده‌های برخط تعیین کنند. به ظرفیت محاسبه شده بر اساس شرایط برخط ظرفیت دینامیکی گفته می‌شود. ظرفیت دینامیکی تجهیزات در بیشتر مواقع مقدار قابل توجهی بیشتر از ظرفیت نامی تعیین شده بر اساس بدترین شرایط آب و هوایی برآورد شده است. از سوی دیگر یک عنصر افزایش انعطاف‌پذیری سامانه قدرت، افزایش ظرفیت تجهیزات موجود است. نقش مؤثر ظرفیت دینامیکی در افزایش تاب‌آوری سامانه قدرت در برابر آتش‌سوزی در مرجع [۲۸] بررسی شده است.

در جدول (۳) منابع انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شده در مراجع مختلف جهت افزایش تاب‌آوری شبکه در برابر حوادث طبیعی مشخص شده است. مقایسه آماری این بخش نیز در شکل (۳) ارائه شده است.

جدول (۳): منابع انعطاف‌پذیر به‌کار گرفته شده در مراجع

منابع انعطاف‌پذیر	مراجع
تولید پراکنده	[۱۳]، [۱۷]، [۱۹]، [۲۶]، [۳۴]، [۳۶]، [۳۸]، [۳۹]، [۴۴]، [۴۷]، [۴۹]، [۵۵]، [۵۷]، [۵۸]
تولید پراکنده + ذخیره‌ساز	[۱۲]، [۱۵]، [۱۶]، [۱۸]، [۲۱]، [۲۳]، [۲۴]، [۲۵]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]، [۳۰]، [۳۱]، [۳۲]، [۳۵]، [۳۷]، [۴۶]، [۴۸]، [۵۰]، [۵۱]، [۵۲]، [۵۳]، [۵۶]
ظرفیت دینامیکی	[۲۷]



شکل (۳): دسته‌بندی منبع انعطاف‌پذیر به لحاظ شده در مقالات

### ۳- تاب‌آوری شبکه در برابر حوادث خرابکارانه

امروزه تأثیر انرژی بر زندگی مردم و رشد اقتصادی و سیاسی کشورها کاملاً مشخص شده است. از این رو زیرساخت‌های انرژی از جمله شبکه برق هدفی مناسب برای عوامل خرابکار به‌منظور ضربه زدن به رشد اقتصادی و سیاسی یک کشور است. مراجع

محدودیت بودجه دفاعی اصطلاحاً عنوان می‌شود که گره مذکور تبدیل به برگ شده است. پس از به برگ رسیدن تمامی گره‌ها، اجزای شاخه‌ای که کمترین خسارت احتمالی را دارا می‌باشند، به‌عنوان جواب بهینه مسئله انتخاب می‌شوند.

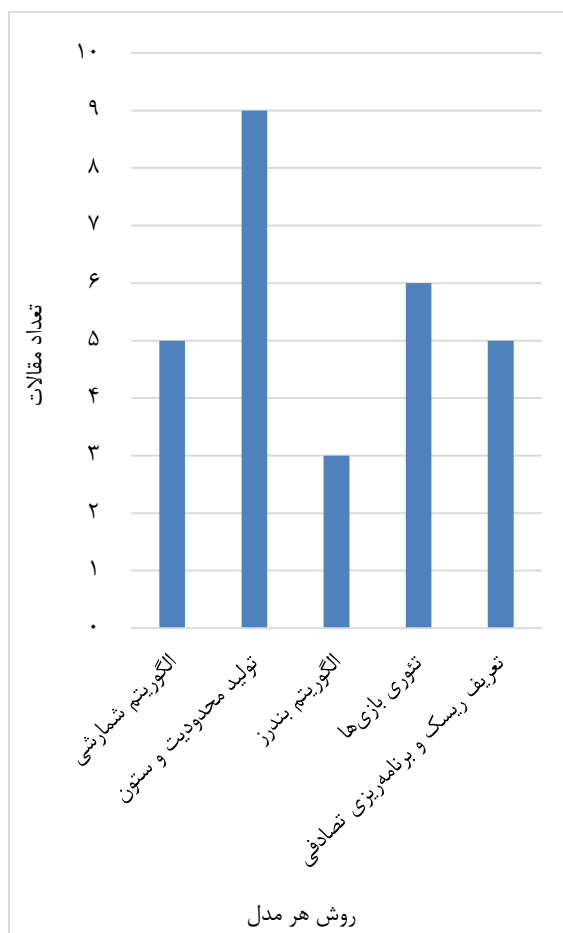
- حل مسئله دو سطحی بر اساس روش تولید محدودیت و ستون: این روش نیز بر اساس تبدیل مسئله‌های سطوح میانی و پایین به یک مسئله معادل با استفاده از تئوری دوگان انجام می‌شود. پس از انجام این مرحله مدل مدافع مهاجم- مدافع به یک مسئله دو سطحی معادل تبدیل می‌شود. به‌منظور حل مسئله به‌دست آمده با استفاده از روش تولید محدودیت و ستون، مسئله سطح پایین به‌عنوان یک زیرمسئله به‌منظور شناسایی مخرب‌ترین استراتژی‌های حمله استفاده می‌شود. پس از تشکیل زیرمسئله، یک مسئله اصلی مطابق با روش ذکر شده در مرجع [۷۲] تشکیل می‌شود. این مسئله شامل متغیرهای هر دو سطح بالا و همچنین مسئله سطح پایین است. متغیرهای مسئله سطح پایین با یک زیرنویس  $k$  شاخص تکرار مشخص می‌شوند. بنابراین در این روش متغیرهای مسئله سطح پایین به‌صورت مقادیر ثابتی به‌دست آمده از حل زیر مسئله در نظر گرفته می‌شوند. همچنین یک متغیر کمکی به‌عنوان صفحه برش برای اجتناب از در نظر گرفتن شرایط تکراری و تضمین همگرایی روش در تابع هدف لحاظ می‌شود. پس از تشکیل مسئله اصلی و زیرمسئله الگوریتم تولید ستون و محدودیت اجرا می‌گردد. در گام نخست این الگوریتم حد بالا و پایین جواب به ترتیب برابر با مثبت و منفی بی‌نهایت مقداردهی اولیه می‌شوند. همچنین در این گام مقدار اولیه تولید نیروگاه‌ها در شرایط عادی با استفاده از اجرای پخش بار به‌دست می‌آید. در گام دوم زیرمسئله تعریف شده با استفاده از مقادیر تولید نیروگاه‌ها حل می‌شود. همچنین با حل زیرمسئله در این گام، مقدار تابع هدف عامل مخرب جهت به‌روزرسانی حد بالایی جواب استفاده می‌شود. بردار برنامه بهینه عامل مخرب به‌دست آمده با استفاده از حل زیرمسئله به مسئله اصلی منتقل می‌شود. در گام سوم مسئله اصلی با توجه به مقادیر ارسال شده از زیرمسئله حل می‌شود. در گام بعدی در صورتی که اختلاف حد بالایی و پایینی از مقدار تعیین شده توسط کاربر بزرگ‌تر بوده باشد. مسئله پخش بار در نظر گرفتن تجهیزات خارج شده با اقدام تروریستی به‌دست آمده از حل تکرار اول اجرا می‌شود و مقادیر توان تولیدی نیروگاه‌ها به‌روز می‌شوند. مقادیر به‌روز شده به گام دوم انتقال یافته و الگوریتم تا زمان رسیدن به شرایط توقف (کمتر بودن اختلاف حد بالا و پایین جواب از مقدار تنظیمی کاربر) ادامه می‌یابد.

تئوری دوگان می‌شود. از این رو مراجع مختلف روش‌های حل مختلفی برای این مدل ارائه داده‌اند. از این رو می‌توان این مراجع را با توجه به مدل ارائه شده جهت حل مسئله سه سطحی تقسیم‌بندی نمود. در دسته‌بندی دوم این مراجع می‌توان همانند مقالات ارائه شده به‌منظور تاب‌آوری شبکه در برابر حوادث طبیعی، استفاده از منابع انعطاف‌پذیر هر یک از مراجع اشاره نمود. هر یک از این دسته‌بندی‌ها به تشریح در ادامه بررسی خواهد شد.

### ۳-۱- دسته‌بندی مراجع بر اساس روش حل مدل مدافع - مهاجم - مدافع

با توجه به وجود متغیر باینری در سطح میانی مدل مدافع- مهاجم- مدافع امکان تبدیل این مدل به یک مسئله تک سطحی با استفاده از روش‌های معمول و تئوری دوگان وجود ندارد. بنابراین محققین این زمینه روش‌های مختلفی برای حل مدل ارائه داده‌اند. در اکثر این روش‌ها با استفاده از تئوری دوگان مسئله دو سطح میانی و پایینی را به یک مسئله تبدیل کرده در نتیجه مسئله کلی به یک مسئله دو سطحی معادل تبدیل می‌شود. برای حل این مسئله دو سطحی معادل از روش‌های زیر استفاده می‌شود:

- حل مسئله دو سطحی معادل بر اساس الگوریتم شمارشی: در این الگوریتم، یک درخت جستجو با در نظر گرفتن یک فرض که مربوط به انتخاب مؤلفه‌های دفاعی است، تشکیل می‌شود. در فرض مطرح شده عنوان می‌گردد که یک مجموعه دفاعی بهینه باید حداقل یک عضو از مجموعه بحرانی داشته باشد. همچنین، یک مجموعه بحرانی مجموعه‌ای از تجهیزاتی است که توسط یک عامل مخرب زمانی که هیچ استراتژی دفاعی تعیین نشده انتخاب می‌شود. یک الگوریتم شمارشی با تعیین مجموعه بحرانی شروع می‌شود. در این گام مسئله سطح پایین بدون در نظر گرفتن مجموعه دفاعی حل می‌شود. برنامه بهینه عامل مخرب مجموعه بحرانی را ساخته و هر عضو آن به‌عنوان یک گره ریشه در الگوریتم شمارشی شناخته می‌شوند. هر یک از گره‌های ریشه در طی فرآیندی که به شاخه‌سازی تعبیر می‌شود، گسترش می‌یابد. به‌منظور گسترش هر گره در فرآیند شاخه‌سازی از تجهیزات مشخص شده در آن گره به‌عنوان اعضای دفاعی شده در مسئله سطح بالا لحاظ شده و مسئله سطح پایین حل می‌گردد، جواب‌های بهینه به‌دست آمده توسط عامل مخرب به‌عنوان گره‌های جدید وصل شونده به گره لحاظ می‌گردند. فرآیند شاخه‌سازی برای هر گره تا زمانی که محدودیت بودجه دفاعی برنامه‌ریز نقض نشود، ادامه پیدا می‌کند. در صورت رسیدن به



شکل (۴): تقسیم‌بندی مراجع تاب‌آوری در برابر حملات تروریستی بر اساس روش حل انتخابی

### ۲-۳- منابع انعطاف‌پذیر به‌کار برده شده در مدل‌های تاب‌آوری شبکه در برابر حملات تروریستی

مطالعات مربوط به افزایش تاب‌آوری در برابر حوادث طبیعی را از لحاظ استفاده از منابع انعطاف‌پذیر می‌توان به دو گروه تقسیم نمود. در گروه اول، محققین با حل مدل مدافع - مهاجم - مدافع به شناسایی تجهیزات آسیب‌پذیر و استفاده از ابزارهای حفاظتی و مقاوم‌سازی تجهیزات شناسایی شده تاب‌آوری شبکه را در برابر حوادث تروریستی افزایش می‌دهند. در این دسته از مراجع منابع انعطاف‌پذیر به نوعی روش‌های مقاوم‌سازی تجهیزات خطرپذیر با استفاده از روش‌های پدافند غیرعامل می‌باشند. در گروه دوم همانند مدل‌های ارائه شده در مورد تاب‌آوری شبکه قدرت در برابر حوادث طبیعی، محققین با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف توسعه خطوط و کلید زنی، ذخیره‌سازهای انرژی به‌عنوان منابع انعطاف‌پذیر سعی در افزایش تاب‌آوری در برابر حملات می‌کنند. در مرجع [۷۵] با توجه به منابع انعطاف‌پذیر رایج برای افزایش تاب‌آوری شبکه‌های قدرت در برابر حوادث تروریستی نوع جدیدی از منابع انعطاف‌پذیر تحت مفهوم فریب معرفی شده

- حل مسئله دو سطحی بر اساس الگوریتم تجزیه بندرز: این الگوریتم مشابه با روش تولید ستون و محدودیت است. با ایجاد زیرمسئله و مسئله اصلی و انجام روشی مانند الگوریتم تولید ستون و محدودیت به جواب بهینه می‌رسد. مرجع [۱۱] بیان داشته است که حل مسئله دو سطحی بر اساس الگوریتم بندرز در واقع همان الگوریتم تولید محدودیت و ستون است.
- حل مسئله بر اساس تئوری بازی‌ها: با توجه به این امر که مهاجم و مدافع اطلاعات کاملی در مورد انتخاب استراتژی‌های یکدیگر یا عواقب حملات مختلف ندارند، بازی‌های پیشنهادی برای حل این مدل شامل بازی‌های با اطلاعات ناقص است. اولین گام در این بازی‌های معرفی بازیکن هاست. برنامه‌ریز شبکه، عامل مخرب و بهره‌بردار شبکه سه بازیکنی هستند که در این بازی‌ها در نظر گرفته می‌شوند. در گام دوم تابع بازپرداخت هر یک از بازیکنان و تابع احتمالی که هر یک برای اقدامات طرف مقابل در نظر می‌گیرند، مطابق اهداف هر یک از بازیکنان تعریف می‌شود. در گام آخر بر اساس تعادل بی‌بی‌بی نش استراتژی دفاعی مناسب توسط برنامه‌ریز اتخاذ می‌گردد.
- حل مسئله بر اساس تعریف ریسک و برنامه‌ریزی تصادفی: برخی مراجع با توجه به ویژگی‌های برنامه‌ریزی تصادفی، رفتار مهاجم را به‌عنوان یک متغیر تصادفی لحاظ نموده و مسئله را با این فرض تبدیل به یک مسئله تک سطحی می‌کنند. این روش مدل مناسبی برای ارزیابی میزان آسیب‌پذیری شبکه در برابر حوادث تروریستی نیست.

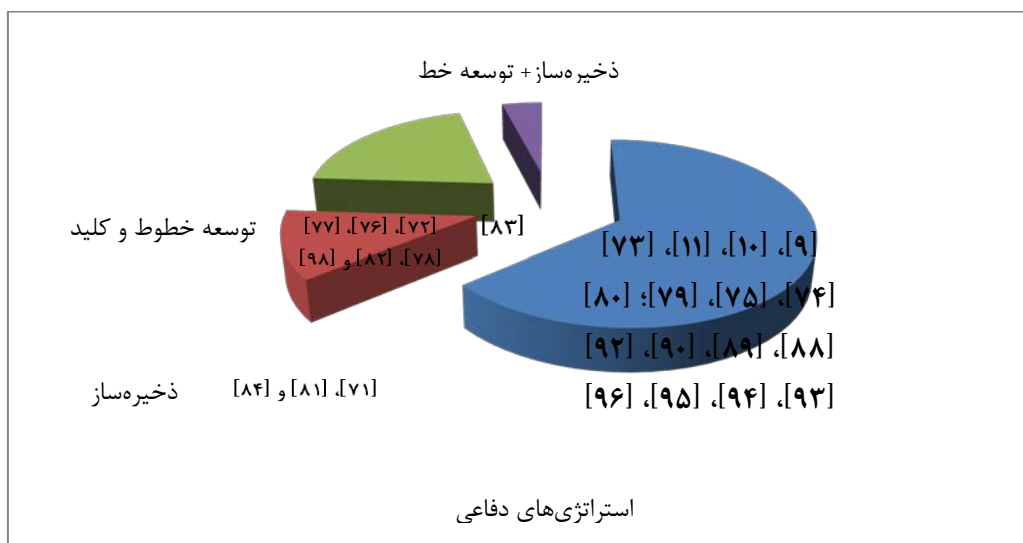
بر اساس روش‌های بیان شده جهت حل مدل مدافع - مهاجم - مدافع در جدول (۴) مراجع مختلف بر اساس روش حل انتخابی تقسیم‌بندی شده‌اند. همچنین جهت مشخص‌سازی محبوب‌ترین روش حل در شکل (۴) تعداد استفاده از هر روش در مراجع مشخص گردیده است. بر اساس این شکل می‌توان بیان داشت که روش تولید محدودیت و ستون بیشتر توسط مراجع برای حل مدل سه سطحی مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول (۴): تقسیم‌بندی مراجع تاب‌آوری در برابر حملات تروریستی بر اساس روش حل انتخابی

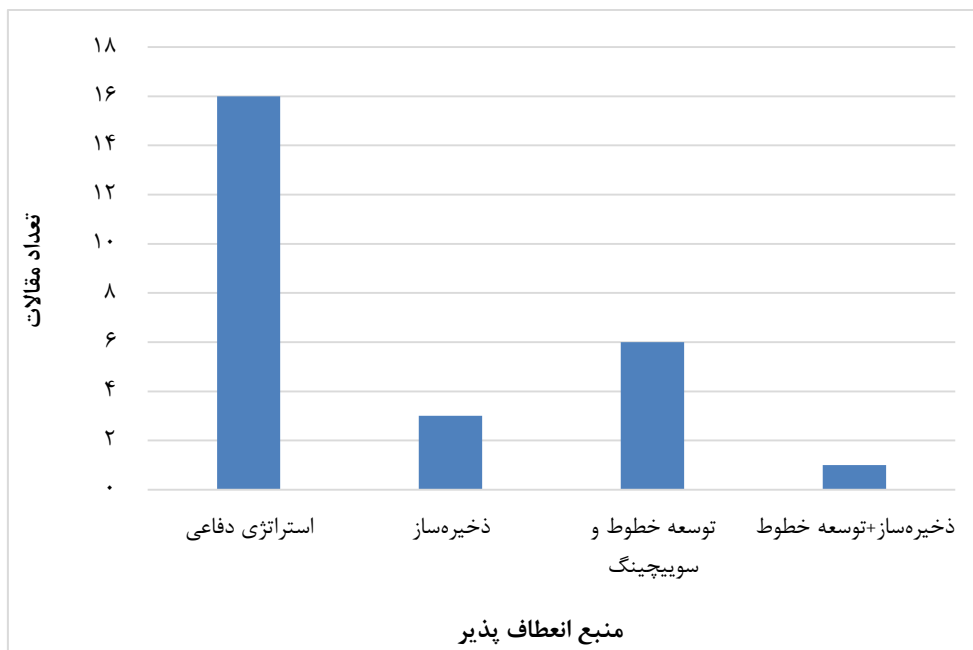
روش حل	مراجع
الگوریتم شمارشی	[۷۴]، [۷۹]، [۸۱]، [۸۲]، [۸۶]
تولید محدودیت و ستون	[۷۲]، [۷۵]، [۸۰]، [۸۵]، [۸۷]، [۸۹]، [۹۳]، [۹۴]، [۹۵]
الگوریتم بندرز	[۱۱]، [۷۷]، [۹۲]
تئوری بازی‌ها	[۷۶]، [۸۳]، [۹۰]، [۹۱]، [۹۶]، [۹۷]
تعریف ریسک و برنامه‌ریزی تصادفی	[۷۳]، [۷۸]، [۸۴]، [۸۸]، [۹۹]

به‌عنوان فریب می‌تواند باعث صرفه‌جویی مقدار قابل توجهی از هزینه‌های حفاظت شبکه شده و رویکرد پیشنهادی یک پیشرفت امیدوار کننده برای اطمینان از عملکرد مطمئن شبکه‌های برق است. استفاده از ذخیره‌سازهای حرارتی جهت بهبود تاب‌آوری شبکه به هم پیوسته برق و گاز نیز در مرجع [۸۰] ارائه شده است. خلاصه‌ای از تمرکز مراجع مختلف جهت بهره‌گیری از منابع انعطاف‌پذیر در شکل (۵) نشان داده شده است. از دیدگاه آماری نیز مقایسه محبوبیت هر روش در شکل (۶) مشخص گردیده شده است.

است. نشانه و فریب به‌عنوان ابزاری مؤثر برای گمراه کردن مهاجم در برنامه‌ریزی‌های استراتژیک شناخته شده است. برای این منظور، فریب مدافع با انتشار اطلاعات غلط در مورد برنامه شبکه قدرت در مدل مبتنی بر شناخت مشترک، از لحاظ ریاضی شکل می‌گیرد. برای کاهش خطر خسارت در صورت غیر کارآمد بودن فریب، از تابع هدف برنامه پیشگیرانه‌ای برای اولویت‌بندی استراتژی‌های محافظت از اجزای حیاتی استفاده شده است. علاوه بر این مفهومی به‌عنوان ارزش استقرار معرفی شده که مزایای منبع انعطاف‌پذیر جدید که با عنوان فریب را اندازه‌گیری می‌کند. مطالعات جامع انجام شده بر روی دستگاه‌های WSCC 9-bus و



شکل (۵): دسته‌بندی مراجع تاب‌آوری در برابر حوادث تروریستی از لحاظ منابع انعطاف‌پذیر



شکل (۶): تقسیم‌بندی مراجع تاب‌آوری در برابر حملات تروریستی بر اساس منابع انعطاف‌پذیر

با توجه به عدم نیاز به پیش‌بینی بازه پارامتر و یا تابع چگالی احتمالی پارامتر دارای عدم قطعیت، می‌تواند راه حل مناسبی برای رفع مشکلات عنوان شده در بخش ۲-۲ باشد.

۴. منابع انعطاف‌پذیر زیادی به‌منظور افزایش تاب‌آوری شبکه قدرت در برابر حوادث طبیعی توسط مراجع مختلف مورد توجه قرار گرفته است. با این حال استفاده از ذخیره‌سازهای طبیعی مانند ذخیره‌ساز هوای فشرده و یا تلمبه ذخیره‌ای در مقالات بررسی نشده است. از آنجا که این ذخیره‌سازها قابلیت تزریق ظرفیت بیشتری به شبکه داشته اما به دلیل غیر قابل برنامه‌ریزی بودن محل نصب آن‌ها در این زمینه ارزیابی‌های کافی صورت نگرفته است. نویسندگان این مقاله در نظر گرفتن ترکیب ذخیره‌سازهای طبیعی و باتری‌ها را جهت افزایش تاب‌آوری شبکه‌های قدرت به‌منظور بهبود مدل‌های ارائه شده پیشنهاد می‌دهند.

#### ۲-۴ - پیشنهادها جهت بهبود مدل‌های تاب‌آوری شبکه قدرت در برابر حملات

۱. با بررسی مراجع این بخش می‌توان بیان نمود استفاده از مدل سه سطحی مدافع - مهاجم - مدافع می‌تواند بدترین شرایط ممکن را ارائه دهد. در نتیجه در انتخاب مدل پیشنهاد می‌گردد که از این مدل استفاده شده و برای حل آن از یکی از روش‌های ارائه شده در بخش ۳-۱ استفاده شود.

۲. تأثیر استفاده از منبع انعطاف‌پذیر فریب بر کاهش سرمایه‌گذاری جهت تاب‌آوری شبکه در برابر حملات در مرجع [۷۵] مورد بررسی قرار گرفته و سودمندی آن اثبات شده است. با این حال، تأثیر فریب به‌عنوان منبعی که در اختیار عامل تروریستی است، جهت شناسایی آسیب‌پذیری شبکه و کاهش هزینه سرمایه‌گذاری عامل تروریستی ارزیابی نشده است. به نظر جهت بهبود مدل‌های افزایش تاب‌آوری شبکه برق در برابر حوادث تروریستی نیاز به در نظر گرفتن احتمال فریب بهره‌بردار شبکه توسط عامل تروریستی ضروری هست.

۳. توسعه خطوط شبکه قدرت یکی از راهکارهای افزایش تاب‌آوری شبکه قدرت در برابر حوادث طبیعی توسط محققین انجام شده است. با این حال در سال‌های اخیر استفاده از ظرفیت دینامیکی تجهیزات همانند ظرفیت دینامیکی خطوط باعث کاهش هزینه توسعه خطوط شبکه انتقال شده است. از این رو پیشنهاد می‌شود که نقش ظرفیت دینامیکی در افزایش تاب‌آوری شبکه قدرت در برابر حوادث خرابکارانه مورد ارزیابی قرار گیرد.

#### ۴- پیشنهادها جهت بهبود مدل‌های تاب‌آوری شبکه قدرت

بر اساس مطالب ارائه شده در بخش‌های قبلی، پیشنهادها نویسندگان این مقاله جهت بهبود مدل‌های تاب‌آوری شبکه قدرت در برابر حوادث طبیعی و یا حملات تروریستی به تفکیک در این بخش ارائه می‌گردند.

#### ۴-۱- پیشنهادها جهت بهبود مدل‌های تاب‌آوری شبکه قدرت در برابر حوادث طبیعی

۱. بر اساس دسته‌بندی صورت گرفته در بخش ۱-۲، می‌توان بیان نمود که شاخص ارزیابی تاب‌آوری شبکه بر اساس اندازه‌گیری میزان بار از دست رفته از مقبولیت بیشتری برخوردار بوده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود که این شاخص به‌عنوان یک شاخص مرجع در ارزیابی اثربخشی مدل‌های پیشنهادی لحاظ گردد.

۲. در زمینه مدل‌سازی حوادث طبیعی، در برخی از مقالات اثرات این مدل‌ها به‌عنوان یک پارامتر دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شده و با استفاده از روش‌های حل مسائل دارای عدم قطعیت بررسی شده در بخش ۲-۲ جواب بهینه مسئله تاب‌آوری شبکه در برابر حوادث طبیعی به‌دست آمده است. همانگونه که در توضیحات روش‌های در نظر گرفتن عدم قطعیت بیان شد، به‌منظور رسیدن به جواب بهینه و مناسب نیاز به در اختیار داشتن تابع توزیع چگالی احتمالی این حوادث و یا پیش‌بینی بازه‌ای شدت آن برای مدل‌سازی توسط روش تصادفی و یا مقاوم هست. بنابراین این روش‌ها برای حوادث پرتکرار در یک منطقه خاص مانند طوفان مناسب می‌باشند. در حالی که به‌منظور مدل‌سازی توسعه شبکه به‌منظور تاب‌آوری در برابر زمین لرزه و حوادث طبیعی مشابه، نیاز به مدل‌سازی ریاضی این پدیده‌ها بوده که در مراجع بررسی شده این مدل‌سازی‌ها برای یک شبکه قدرت ارائه نشده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود به‌عنوان مثال برای زمین لرزه با مدل‌سازی اثرات زمین لرزه به‌صورت تابعی از شدت و کانون زمین لرزه با توجه به گسل‌های نزدیک بازده روش‌های توسعه شبکه افزایش یابد.

۳. به‌طور کلی چهار روش برای مدل‌سازی عدم قطعیت در مسائل بهره‌برداری و توسعه شبکه قدرت استفاده شده است. در مقالات مرور شده در بخش تاب‌آوری شبکه قدرت در برابر حوادث طبیعی، روش مدل‌سازی بر اساس تئوری شکاف اطلاعات مورد توجه قرار گرفته نشده است. استفاده از این رو

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله مروری جامع بر روی تحقیقات صورت گرفته در حوزه تاب‌آوری دستگاه‌های قدرت در برابر حوادث با احتمال وقوع کم و خسارات تحمیلی شدید ارائه شده است. این حوادث بر اساس مدل‌های ارائه شده به دو بخش کلی حوادث طبیعی و حملات خرابکارانه به سامانه قدرت تقسیم شده است. در بررسی مراجع مربوط به تاب‌آوری در برابر حوادث طبیعی نبود یک شاخص مرجع در مورد ارزیابی میزان تاب‌آوری شبکه در برابر این حوادث سبب شد که شاخص‌های استفاده شده در مورد ارزیابی تاب‌آوری بیان گردید. مقالات این حوزه بر اساس شاخص استفاده شده تقسیم‌بندی شد و نتیجه گرفته شد که شاخص میزان بار از دست رفته به‌عنوان یک شاخص ارزیابی تاب‌آوری سامانه در برابر حوادث طبیعی تقریباً به‌عنوان یک شاخص مناسب در صد قابل توجهی از مقالات مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین روش‌های در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در شبکه‌های قدرت و منابع انعطاف‌پذیر استفاده شده در مراجع به‌منظور ایجاد یک دیدگاه جامع به خوانندگان معرفی و ویژگی‌های هر یک بیان شده است. در بخش بررسی مراجع در حوزه تاب‌آوری دستگاه‌های قدرت در برابر حملات خرابکارانه بیان شد که استفاده از مدل سه سطحی مدافع - مهاجم از سایر روش‌های مدل‌سازی رفتار عامل خرابکارانه مناسب‌تر هست. با توجه به ماهیت این مدل عدم توانایی حل آن با روش‌های مرسوم حل مدل‌های سه سطحی به‌عنوان یک چالش استفاده از این مدل بیان شد. راهکارهای ارائه شده جهت حل این مدل در این مقاله به‌منظور تسهیل فرآیند مدل‌سازی هر یک توسط خوانندگان تشریح شد. همچنین منابع انعطاف‌پذیر لحاظ شده در این حوزه بیان شده و مفهوم استراتژی دفاعی و فریب به‌عنوان دو منبع انعطاف‌پذیر خاص مسائل تاب‌آوری در برابر حوادث خرابکارانه معرفی شدند. در آخر پیشنهادهای نویسندگان جهت بهبود مدل‌های تاب‌آوری شبکه در برابر حوادث با احتمال وقوع کم و خسارات تحمیلی شدید به‌منظور شناسایی ضعف‌های موجود در این حوزه مطرح گردید.

## ۶- مراجع

- [3] R. Ishihara, "Formation and Development of Disaster Resilience Theory," *Depopulation, Deindustrialisation and Disasters*, Japan, pp. 253273, 2019.
- [4] A. Hu, W. Xie, N. Li, X. Xu, Z. Ji, and J. Wu, "Analyzing Regional Economic Impact and Resilience: A Case Study on Electricity Outages Caused by the Snowstorms in Southern China," *Natural Hazards*, vol. 70, no. 2, pp. 1019-1030, 2014.
- [5] R. Berg, "Tropical Cyclone Report: Hurricane Ike (AL092008)," 1-14 September 2008, Nat. Hurricane Center, Miami, FL, USA, Tech. Rep. AL092008, 2009.
- [6] H. Jia and D. Pan, "Tornado Disaster Impacts and Management: Learning from the 2016 Tornado Catastrophe in Jiangsu Province, China," *Natural Hazards*, vol. 89, no. 1, pp. 457471, 2017.
- [7] M. Palizvan and R. Dashti, "Reinforcing Power Network Infrastructures by Employing Passive Defense Applications," *Scientific J. of Passive Defense*, No. 36, Vo. 36, pp. 57-67, 2019 (In Persian).
- [8] K. Lin and K. E. Holbert, "PRA for Vulnerability Assessment of Power System Infrastructure Security," *Proc. of the 37th Annual North American Power Symp.*, Ames, IA, USA, 2005, pp. 43-51, 2005.
- [9] A. M. A. Haidar, Z. Khalidin, and I. A. Ahmed, "Probabilistic Neural Network for Vulnerability Prediction on a Practical Power System," *Int. Conf. on Elect. and Information Eng.*, Kyoto, 2010, pp. V1-146-V1-150, 2010.
- [10] N. Alguacil, A. Delgado, and J. M. Arroyo, "A Trilevel Programming Approach for Electric Grid Defense Planning," *Comput. Oper. Res.* no.41, pp. 282-290, 2014.
- [11] X. Wu and A. J. Conejo, "An Efficient Tri-Level Optimization Model for Electric Grid Defense Planning," *In IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 4, pp. 2984-2994, July 2017.
- [12] L. Hongtao, et al. "Robust Optimization for Microgrid Defense Resource Planning and Allocation against Multi-Period Attacks," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol.5, no.10, pp. 5841-5850, 2019.
- [13] H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Moeini-Aghaie, "Enhancing Power System Resilience Through Hierarchical Outage Management in Multi-Microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 2869-2879, Nov. 2016.
- [14] Z. Li, M. Shahidepour, F. Aminifar, A. Alabdulwahab and Y. Al-Turki, "Networked Microgrids for Enhancing the Power System Resilience," *In Proc. IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1289-1310, July 2017.
- [1] M. Eskandari, M. Modiri, and B. Omidvar, "Seismic Damage Analysis Model of Critical Infrastructure Based on Spatial Information System," *SEPEHR (Data Geographical of Quarterly Research)* vol. 98, no. 25, 2016 (In Persian).
- [2] M. Hosseini, M. Sadeghi, and N. Hasani, "Seismic Evaluation and Analysis of Power Distribution Substations," *HSE conf. Iran*, 2014 (In Persian).

- [27] M. H. Amirioun, F. Aminifar, and H. Lesani, "Resilience-Oriented Proactive Management of Microgrids Against Windstorms," In *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 4, pp. 4275-4284, July 2018.
- [28] D. N. Trakas, and N. D. Hatziargyriou, "Optimal Distribution System Operation for Enhancing Resilience against Wildfires," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 2, pp. 2260-2271, 2017.
- [29] A. Hussain, V. Bui, and H. Kim, "A Proactive and Survivability-Constrained Operation Strategy for Enhancing Resilience of Microgrids Using Energy Storage System," In *IEEE Access*, vol. 6, pp. 75495-75507, 2018.
- [30] Y. Li, Z. Li, F. Wen, and M. Shahidehpour, "Minimax-Regret Robust Co-Optimization for Enhancing the Resilience of Integrated Power Distribution and Natural Gas Systems," In *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 11, no. 1, pp. 61-71, Jan. 2020.
- [31] S. Yao, P. Wang, X. Liu, H. Zhang, and T. Zhao, "Rolling Optimization of Mobile Energy Storage Fleets for Resilient Service Restoration," In *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no. 2, pp. 1030-1043, March 2020.
- [32] M. M. Arsoon and S. M. M. Tafreshi, "Zero Energy Trading Strategy for Enhancing Resilience of Networked Microgrids," 2019 7th ICSG, Istanbul, Turkey, pp. 86-90, 2019.
- [33] F. N. Shimim, M. Bahramipanah, and H. Nehrir, "Resilient and Extreme-Event-Aware Microgrid Using Energy Storage and Load Curtailment," *NAPS. Conf.*, Wichita, KS, USA, pp. 1-6, 2019.
- [34] G. Wang, Z. Liu, L. Wang, B. Hu, K. Xie, and J. Yan, "Integrated Response to Boost Distribution System Resilience Against Windstorms," 2019 ISPEC. Conf., Beijing, China, pp. 2060-2065, 2019.
- [35] L. Xiaonan, et al. "A Resilience Assessment Approach for Power System from Perspectives of System and Component Levels," *IJEPS*, vol. 118, 2020.
- [36] S. Mousavizadeh, M.-R. Haghifam, and M.-H. Shariatkah, "A Linear Two-Stage Method for Resiliency Analysis in Distribution Systems Considering Renewable Energy and Demand Response Resources," *Appl. Energy*, vol. 211, pp. 443-460, 2018.
- [37] R. Eskandarpour, H. Lotfi, and A. Khodaei, "Optimal Microgrid Placement for Enhancing Power System Resilience in Response to Weather Events," *NAPS. Conf.*, Denver, CO, pp. 1-6, 2016.
- [38] C. O. N. G. Hao, et al. "Robust Optimization for Improving Resilience of Integrated Energy Systems with Electricity and Natural Gas Infrastructures," *MPSE*, vol. 6, no. 5, pp. 1066-1078, 2018.
- [15] X. Liu, M. Shahidehpour, Z. Li, X. Liu, Y. Cao and Z. Bie, "Microgrids for Enhancing the Power Grid Resilience in Extreme Conditions," In *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 2, pp. 589-597, March 2017.
- [16] H. Akhtar, V.-H. Bui, and H.-M. Kim, "Optimal Operation of Hybrid Microgrids for Enhancing Resiliency Considering Feasible Islanding and Survivability," *IET Renewable Power Gener.*, vol. 6, no.11, pp. 846-857, 2017.
- [17] M. H. Amirioun, F. Aminifar, and M. Shahidehpour, "Resilience-Promoting Proactive Scheduling Against Hurricanes in Multiple Energy Carrier Microgrids," In *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 3, pp. 2160-2168, May 2019.
- [18] S. Mousavizadeh, et al. "Resiliency analysis of Electric Distribution Networks: A New Approach Based on Modularity Concept," *IJEPS*, no. 117, p. 105669, 2020.
- [19] A. Hussain, A. Oulis Rousis, I. Konstantelos, G. Strbac, J. Jeon, and H. Kim, "Impact of Uncertainties on Resilient Operation of Microgrids: A Data-Driven Approach," In *IEEE Access*, vol. 7, pp. 14924-14937, 2019.
- [20] S. Cano-Andrade, et al. "Multi-objective Optimization for the Sustainable-Resilient Synthesis/Design/Operation of a Power Network Coupled to Distributed Power Producers via Microgrids," In *ASME Int. Mechanical Eng. Congress and Exposition*, American Soc. of Mech. Eng., pp. 1393-1408, 2012.
- [21] M. Panteli, D. N. Trakas, P. Mancarella, and N. D. Hatziargyriou, "Power Systems Resilience Assessment: Hardening and Smart Operational Enhancement Strategies," In *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1202-1213, July 2017.
- [22] A. Hussain, V. Bui, and H. Kim, "A Resilient and Privacy-Preserving Energy Management Strategy for Networked Microgrids," In *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2127-2139, May 2018.
- [23] S. Chanda and A. K. Srivastava, "Defining and Enabling Resiliency of Electric Distribution Systems With Multiple Microgrids," In *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 2859-2868, Nov. 2016.
- [24] M. Tavakoli, et al. "CVaR-Based Energy Management Scheme for Optimal Resilience and Operational Cost in Commercial Building Microgrids," *IJEPS*, vol. 100, pp. 1-9, 2018.
- [25] K. Balasubramaniam, et al. "Energy Management System for Enhanced Resiliency of Microgrids During Islanded Operation," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 137, pp. 133-141, 2016.
- [26] G. Liu, et al. "Robust Optimisation-Based Microgrid Scheduling with Islanding Constraints," *IET Gener. Transm. Distrib.* vol. 11, no. 7, pp. 1820-1828

- [51] M. Mansour-lakouraj and M. Shahabi, "Comprehensive Analysis of Risk-Based Energy Management for Dependent Micro-Grid under Normal and Emergency Operations," *Energy*, vol. 171, pp. 928-943, 2019.
- [52] E. T. Lau, et al. "Efficient Economic and Resilience-Based Optimization for Disaster Recovery Management of Critical Infrastructures," *Energies*, vol. 11, no. 12, pp. 3418, 2018.
- [53] J. Confrey, A. H. Etemadi, S. M. F. Stuban, and T. J. Eveleigh, "Energy Storage Systems Architecture Optimization for Grid Resilience with High Penetration of Distributed Photovoltaic Generation," In *IEEE Syst. J.*, vol. 14, no. 1, pp. 1135-1146, March 2020.
- [54] J. Najafi, et al. "An Efficient Interactive Framework for Improving Resilience of Power-Water Distribution Systems with Multiple Privately-Owned Microgrids," *IJEPS*, vol. 116, p. 105550, 2020.
- [55] M. Sadeghi Khomami, et al. "Bi-Level Network Reconfiguration Model to Improve the Resilience of Distribution Systems against Extreme Weather Events," *IET Gener. Transm. Distrib.* vol. 13, no. 15, pp. 3302-3310, 2019.
- [56] Q. Zhou, M. Shahidehpour, A. Alabdulwahab, and A. Abusorrah, "Flexible Division and Unification Control Strategies for Resilience Enhancement in Networked Microgrids," In *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, no. 1, pp. 474-486, Jan. 2020.
- [57] C. Gouveia, J. Moreira, C. L. Moreira, and J. A. Peças Lopes, "Coordinating Storage and Demand Response for Microgrid Emergency Operation," *IEEE Trans. Smart Grid*, 2013.
- [58] I. F. Abdin, Y. P. Fang, and E. Zio, "A Modeling and Optimization Framework for Power Systems Design with Operational \_Exibility and Resilience against Extreme Heat Waves and Drought Events," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 112, pp. 706-719, Sep. 2019.
- [59] C. Ren and Y. Xu, "A Fully Data-Driven Method Based on Generative Adversarial Networks for Power System Dynamic Security Assessment with Missing Data," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 6, pp. 5044-5052, Nov. 2019.
- [60] J. M. Arroyo and F. D. Galiana. "On the Solution of the Bilevel Programming Formulation of the Terrorist Threat Problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 789-797, 2005.
- [61] A. L. Motto, J. M. Arroyo, and F. D. Galiana, "A Mixed-Integer LP Procedure for the Analysis of Electric Grid Security under Disruptive Threat," *IEEE Trans. Power Syst.* vol. 20, no. 3, pp. 1357-1365, 2005.
- [39] R. Eskandarpour, G. Edwards, and A. Khodaei, "Resilience-Constrained Unit Commitment Considering the Impact of Microgrids," *NAPS. Conf.*, Denver, CO, 2016, pp. 1-5, 2016.
- [40] S. Nikkhah, et al. "Optimal Wind Turbine Allocation and Network Reconfiguration for Enhancing Resiliency of System after Major Faults Caused by Natural Disaster Considering Uncertainty," *IET Renewable Power Gener.* vol. 12, no. 12, pp. 1413-1423, 2018.
- [41] M. Jadidbonab, S. Madadi, and B. Mohammadi-ivatloo, "Hybrid Strategy for Optimal Scheduling of Renewable Integrated Energy Hub Based on Stochastic/Robust Approach," *JEMAT*, vol.2, no.4, pp. 29-38, 2018.
- [42] H. Heitsch and W. Römisch, "Scenario Tree Reduction for Multistage Stochastic Programs," *Computational Management Sci.*, vol. 6, pp. 117-133, 2009.
- [43] S. Madadi, B. Mohammadi-Ivatloo, and S. Tohidi. "A Data Clustering Based Probabilistic Power Flow Method for AC/VSC-MTDC," *IEEE Syst. J.*, vol. 13, no.4, pp. 4324-4334, 2019.
- [44] S. Madadi, B. Mohammadi-Ivatloo, and S. Tohidi, "Integrated Transmission Expansion and PMU Planning Considering Dynamic Thermal Rating in Uncertain Environment," *IET Gener. Transm. Distrib.* vol. 14, no. 10, pp. 1973-1984, 2020.
- [45] J. W. Muhs and M. Parvania, "Stochastic Spatio-Temporal Hurricane Impact Analysis for Power Grid Resilience Studies," *ISGT. Conf.*, Washington, DC, USA, pp. 1-5, 2019.
- [46] Y. Chen, Y. Wang, D. S. Kirschen, and B. Zhang, "Model-Free Renewable Scenario Generation Using Generative Adversarial Networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 3, pp. 3265\_3275, May 2018.
- [47] A. Gholami, T. Shekari, F. Aminifar, and M. Shahidehpour, "Microgrid Scheduling With Uncertainty: The Quest for Resilience," In *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 2849-2858, Nov. 2016.
- [48] A. Gholami and F. Aminifar, "A Hierarchical Response-Based Approach to the Load Restoration Problem," In *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 4, pp. 1700-1709, July 2017.
- [49] A. Hussain, V.-H. Bui, and H.-M. Kim, "Microgrids as a Resilience Resource and Strategies Used by Microgrids for Enhancing Resilience," *Appl. Energy*, vol. 240, pp. 56-72, 2019.
- [50] C. Ju, S. Yao, and P. Wang, "Resilient Post-Disaster System Reconfiguration for Multiple Energy Service Restoration," 2017 *IEEE Conf. on Energy Internet and Energy Syst. Integration*, Beijing, pp. 1-6, 2017.



- [75] H. Davarikia, al. "A Novel Approach in Strategic Planning of Power Networks against Physical Attacks," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 180, pp. 106140, 2020.
- [76] A. J. Holmgren, E. Jenelius, and J. Westin, "Evaluating Strategies for Defending Electric Power Networks against Antagonistic Attacks," In *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 76-84, Feb. 2007.
- [77] A. Delgadillo, J. M. Arroyo, and N. Alguacil, "Analysis of Electric Grid Interdiction with Line Switching," In *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 633-641, May 2010.
- [78] M. Carrion, J. M. Arroyo, and N. Alguacil, "Vulnerability-Constrained Transmission Expansion Planning: A Stochastic Programming Approach," In *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 1436-1445, Nov. 2007.
- [79] Y. Fang, and G. Sansavini, "Optimizing Power System Investments and Resilience against Attacks," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 159, pp. 161-173, 2017.
- [80] C. Wang, et al., "Robust Defense Strategy for Gas-Electric Systems Against Malicious Attacks," In *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 4, pp. 2953-2965, July 2017.
- [81] J. Fang, C. Su, Z. Chen, H. Sun, and P. Lund, "Power System Structural Vulnerability Assessment Based on an Improved Maximum Flow Approach," In *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 777-785, March 2018.
- [82] K. Lai, Y. Wang, D. Shi, M. S. Illindala, Y. Jin, and Z. Wang, "Sizing Battery Storage for Islanded Microgrid Systems to Enhance Robustness against Attacks on Energy Sources," In *MPSE*, vol. 7, no. 5, pp. 1177-1
- [83] H. Nemati, M. A. Latify, and Gh. R. Yousefi, "Tri-Level Transmission Expansion Planning under Intentional Attacks: Virtual Attacker Approach-Part I: Formulation," *IET Gener. Transm. Distrib.* vol. 13, no. 3, pp. 390-398, 2018.
- [84] H. Nemati, M. A. Latify, and G. R. Yousefi, "Optimal Coordinated Expansion Planning of Transmission and Electrical Energy Storage Systems Under Physical Intentional Attacks," In *IEEE Syst. J.*, vol. 14, no. 1, pp. 793-802, March 2020.
- [85] K. Lai, et al., "A Robust Energy Storage System Siting Strategy Considering Physical Attacks to Transmission Lines," *NAPS. Conf.* Fargo, ND, 2018, pp. 1-6, 2018.
- [86] [H. Sarhadi, M. Tulett, and M. Verma. "An Analytical Approach to the Protection Planning of a Rail Intermodal Terminal Network," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 257, no. 2, pp. 511-525, 2017.
- [62] V. M. Bier, et al. "Methodology for Identifying Near-Optimal Interdiction Strategies for a Power Transmission System," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 92, no. 9, pp. 1155-1161, 2007.
- [63] J. Salmeron, K. Wood, and R. Baldick, "Worst-Case Interdiction Analysis of Large-Scale Electric Power Grids," *IEEE Trans. Power Syst.* vol. 24, no. 1, pp. 96-104, 2009.
- [64] A. Delgadillo, J. M. Arroyo, and N. Alguacil, "Analysis of Electric Grid Interdiction with Line Switching," *IEEE Trans. Power Syst.* vol. 25, no. 2, pp. 633-641, 2009.
- [65] D. Bienstock and A. Verma, "The nk Problem in Power Grids: New Models, Formulations, and Numerical Experiments," *SIAM J. on Optimization*, vol. 20, no. 5, pp. 2352-2380, 2010.
- [66] V., Donde, et al. "Severe Multiple Contingency Screening in Electric Power Systems," *IEEE Trans. Power Syst.* vol. 23, no. 2, pp. 406-417, 2008.
- [67] J. M. Arroyo, "Bilevel Programming Applied to Power System Vulnerability Analysis under Multiple Contingencies," *IET Gener. Transm. Distrib.* vol. 4, no. 2, pp. 178-190, 2010.
- [68] A. Pinar, et al. "Optimization Strategies for the Vulnerability Analysis of the Electric Power Grid," *SIAM J. on Optimization*, vol. 20, no. 4 pp. 1786-1810, 2010.
- [69] V. M. Bier, et al. "Methodology for Identifying Near-Optimal Interdiction Strategies for a Power Transmission System," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 92, no.9, pp. 1155-1161, 2007.
- [70] Y. Yao, et al. "Tri-Level Optimization in Power Network Defense," *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybernetics, Part C App. and Reviews*, vol. 37, no. 4, pp. 712-718, 2007.
- [71] R. W. Rose, "Defending Electrical Power Grids," *Naval Postgraduate School Monterey CA*, 2007.
- [72] K. Lai, Y. Wang, D. Shi, M. S. Illindala, X. Zhang, and Z. Wang, "A Resilient Power System Operation Strategy Considering Transmission Line Attacks," In *IEEE Access*, vol. 6, pp. 70633-70643, 2018.
- [73] N. Nezamoddini, S. Mousavian, and M. Erol-Kantarci, "A Risk Optimization Model for Enhanced Power Grid Resilience against Physical Attacks," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 143, pp. 329-338, 2017.
- [74] A. M. Fathollahi Fard and M. Hajiaghahi-Keshтели. "A Bi-Objective Partial Interdiction Problem Considering Different Defensive Systems with Capacity Expansion of Facilities under Imminent Attacks," *Appl. Soft Comput.* vol. 68, pp. 343-359, 2018.

- [93] T. Ding, L. Yao, and F. Li, "A Multi-Uncertainty-Set Based Two-Stage Robust Optimization to Defender-Attacker-Defender Model for Power System Protection," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 169, pp. 179-186, 2018.
- [94] P. Jiang, S. Huang, and T. Zhang, "Optimal Deception Strategies in Power System Fortification against Deliberate Attacks," *Energies*, vol. 12, no. 3, p. 342, 2019.
- [95] [95] Uncertainty-Set Based Two-Stage Robust Optimization to Defender-Attacker-Defender Model for Power System Protection," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 169, pp. 179-186, 2018.
- [96] B. GAO and L. Shi, "Modeling an Attack-Mitigation Dynamic Game-Theoretic Scheme for Security Vulnerability Analysis in a Cyber-Physical Power System," In *IEEE Access*, vol. 8, pp. 30322-30331, 2020.
- [97] G. Chen, Z. Y. Dong, D. J. Hill, and Y. S. Xue, "Exploring Reliable Strategies for Defending Power Systems against Targeted Attacks," In *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1000-1009, Aug. 2011.
- [98] N. Alguacil, J. M. Arroyo, and M. Carrión, "Transmission Network Expansion Planning under Deliberate Outages," In *Handbook of Power Systems I*. Springer, p. 365-389, 2010.
- [99] J. M. Arroyo, N. Alguacil, and M. Carrión, "A Risk-Based Approach for Transmission Network Expansion Planning under Deliberate Outages," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 1759-1766, 2010.
- [87] H. Davarikia, and M. Barati. "A Tri-Level Programming Model for Attack-Resilient Control of Power Grids," *MPSE*, vol. 6, no. 5, pp. 918-929, 2018.
- [88] S. Sayyadipour, G. R. Yousefi, and M. A. Latify. "Mid-Term Vulnerability Analysis of Power Systems under Intentional Attacks," *IET Gener. Transm. Distrib.* vol. 10, no. 15, pp. 3745-3755, 2016.
- [89] Y. Xiang and L. Wang, "An Improved Defender-Attacker-Defender Model for Transmission Line Defense Considering Offensive Resource Uncertainties," In *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2534-2546, May 2019.
- [90] J. Jiang, and X. Liu, "Multi-Objective Stackelberg Game Model for Water Supply Networks against Interdictions with Incomplete Information," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 266, no. 3, pp. 920-933, 2018.
- [91] J. Jiang, and X. Liu, "Bayesian Stackelberg Game Model for Water Supply Networks against Interdictions with Mixed Strategies," *Int. J. Prod. Res.*, pp. 1-21, 2020.
- [92] S. Jalali, M. Seifbarghy, and S. Takhavan Niaki, "A Risk-Averse Location-Protection Problem under Intentional Facility Disruptions: A Modified Hybrid Decomposition Algorithm," *Trans. Res.*, vol. 114, pp. 196-219, 2018.

# A Comprehensive Review of Power System Resilience Against High-Impact Low-Probability Events

R. Ghaffarpour\*, S. Madadi, S. Zamanian

## Abstract

Nowadays, the impact of accidents with a low probability of occurrence and severe damage such as natural disasters and terrorist attacks on the power grid has been considered in many research works. According to the reported results, it is highlighted that such events can influence power systems in the form of long-term blackouts in large parts of the power system, the elimination of main equipment (ex. posts, transmission lines, and power plants), and the infliction of severe damage on the equipment. Therefore, the power system resilience concept is defined as the power system capability to reduce the effects that occur as a result of the occurrence of high-impact low-probability events. In other words, the goal of power system resilience is to create a potential capability for accelerating the recovery of the system from the impacts of such events and to adapt its functions and structure to reduce or eliminate the effects of these events. In this paper, a comprehensive review of power system resilience against high-impact low-probability events is provided. The related published works are classified in two parts including resilience against natural disasters and resilience against terrorist attacks. The published work related to each part is described in detail, and the papers of each sub-section are classified from different perspectives and the characteristics of all categories are presented.

**Key Words:** *Power System Resilience, Natural Disasters, Terrorist Attacks, Review Papers*

---

\*Assistant Professor, Imam Hossein University, Tehran, Iran. (rghaffarpour@ihu.ac.ir)- Writer-in-Charge