



Key Factors Affecting the Resilience of the Electricity Distribution Network Against Man-Made Threats

Gholamreza Jalali Farahani

Assistant Professor, Strategic Defense Sciences Department, National Defense School, Supreme National Defense University, Tehran, Iran.

Morteza Heshmati

Ph.D. Student in Strategic Passive Defense Management, Supreme National Defense University, Tehran, Iran (Corresponding Author).

Email: aryan.1388.h@gmail.com

Abstract

The electricity distribution network of a country, as a critical infrastructure for national administration, is highly sensitive and vital. Due to its vulnerability to man-made threats, it often becomes a primary target in enemy operations. Experiences from recent conflicts demonstrate that damage to electrical infrastructure can result in the disruption of essential factories, interruptions at sensitive military bases, prolonged power outages for civilians, decreased public morale, and indirect pressure on the nation's defense apparatus. The aim of this study is to identify factors influencing the resilience of the electricity distribution network, which constitutes a crucial step in formulating effective strategies—a topic that has not been systematically or scientifically addressed to date. This research is applied-developmental in nature and employs a mixed-methods approach, combining both quantitative and qualitative techniques. The sample size, determined using Cochran's formula, included 52 participants. Data were collected through a combination of library research and fieldwork, with a particular emphasis on expert opinions. Data analysis was conducted using questionnaires, expert interviews, and SPSS software. The results of the study categorized the factors influencing the resilience of the electricity distribution network into four groups: strengths, weaknesses, opportunities, and threats. In total, 10 strength factors, 8 opportunity factors, and 5 key driving factors were identified.

Keywords: Effective factors, Resilience, Electricity distribution network, Man-made threats.



عوامل مؤثر (قوت‌ها و فرصت‌ها) در تاب‌آوری شبکه توزیع برق در برابر تهدیدات انسان‌ساخت

غلامرضا جلالی فراهانی

استادیار گروه علوم دفاعی راهبردی دانشکده دفاع ملی، دانشگاه عالی دفاع ملی، تهران، ایران

مرتضی حشمتی

دانشجوی دکتری مدیریت راهبردی پدافند غیرعامل، دانشگاه عالی دفاع ملی، تهران، ایران (نویسنده مسئول)
Email: arian.1388.h@gmail.com

چکیده

شبکه توزیع برق کشور به‌عنوان یک زیرساخت حیاتی و حساس، در برابر تهدیدات انسان‌ساخت آسیب‌پذیر بوده و از اولویت‌های اصلی هدف دشمن است. این تهدیدات نیازمند تقویت زیرساخت‌های مدیریتی و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین هستند تا تاب‌آوری شبکه افزایش یابد. به همین منظور، ترکیبی از اقدامات پیشگیرانه، آموزش و همکاری‌های بین بخشی ضروری است تا از تخریب گسترده جلوگیری شده و مقابله مؤثرتری فراهم شود. این تهدیدات علاوه بر ایجاد چالش، فرصت‌هایی برای بهبود فناوری، امنیت و مدیریت زیرساخت‌ها فراهم می‌کنند. هدف تحقیق حاضر، شناسایی عوامل مؤثر بر تاب‌آوری شبکه توزیع برق است که گامی مهم در تدوین راهبردهای تاب‌آوری محسوب می‌شود و تاکنون به‌صورت جامع بررسی نشده است. نوع تحقیق کاربردی-توسعه‌ای و روش آن آمیخته (کمی و کیفی) است. جامعه آماری شامل ۱۱۲ نفر از خبرگان و فعالان حوزه است که نمونه‌ای ۵۲ نفره با فرمول کوکران انتخاب گردید. داده‌ها از طریق روش‌های کتابخانه‌ای و میدانی، به‌ویژه نظرات خبرگان جمع‌آوری شده است. تحلیل داده‌ها با استفاده از پرسش‌نامه، مصاحبه و نرم‌افزار SPSS انجام شد. نتیجه تحقیق، عوامل مؤثر بر تاب‌آوری را در چهار بخش قوت‌ها، ضعف‌ها، فرصت‌ها و تهدیدات دسته‌بندی کرده و در مجموع ۱۰ عامل قوت، ۸ عامل فرصت و ۵ پیشران اصلی شناسایی شده‌اند گردید.

کلیدواژه‌ها: عوامل مؤثر، تاب‌آوری، شبکه توزیع برق، تهدیدات انسان‌ساخت



مقدمه

صنعت برق از مهم‌ترین صنایع یک کشور محسوب می‌گردد که مانند شریان‌های بدن، انرژی لازم را برای حیات صنایع تأمین می‌کند. در این میان، شبکه توزیع برق به‌عنوان آخرین حلقه از زنجیره برق‌رسانی است که انرژی برق را به مشترکین تحویل می‌دهد. نتیجه تمام فعالیت‌های صورت گرفته در تولید نیروگاه‌ها و شبکه‌های انتقال برق، در شبکه‌های توزیع برق نمایان می‌گردد (حکیمی‌پور، ۱۳۹۸: ۹). شبکه‌های حیاتی مانند شبکه‌های توزیع برق، به‌عنوان بخشی اساسی از زیرساخت‌های شهری و صنعتی، نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ امنیت و رفاه جوامع ایفا می‌نمایند. انرژی برق دارای انواع مصارف بوده و نیازهای متعددی از جامعه را پاسخ می‌دهد. بسیاری از مصارف از حساسیت بالا برخوردارند و تأمین مطمئن آن‌ها در زمان بحران دارای اهمیت زیادی است. به‌طوری‌که با قطع برق بیمارستان‌ها، زندان‌ها و مراکز مهم و حساس دیگر، نظم اجتماعی از بین رفته و مقاومت گروه‌های مقاوم در برابر جبهه مهاجم تحت تأثیر قرار می‌گیرد (قاسمی، ۱۳۹۷: ۲). پیامدهای ناشی از عملی شدن تهدیدات در شبکه توزیع برق دارای پیامدهای اولیه، ثانویه و نهایی هستند که در پیامد اولیه باعث قطعی برق شده و در پیامد ثانویه باعث اختلال در عملکرد زیرساخت‌های وابسته به انرژی برق مانند مراکز حاکمیتی، امنیتی، ارتباطی، صداوسیما، مراکز درمانی صنعتی، تجاری و خدماتی شده و در پیامد آخر منجر به آسیب‌های جدی و وسیعی در سطح ملی می‌گردد و می‌تواند منجر به آسیب رسیدن به امنیت ملی گردد؛ در چنین شرایطی، مفهوم تاب‌آوری به‌عنوان توانایی شبکه در مقابله با این تهدیدات و بازگشت سریع به حالت عادی، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. با توجه به تهدیدات و پیامدهای ناشی از آن در خصوص شبکه‌های توزیع برق، تاب‌آوری آن از اهمیت زیادی برخوردار است. در زمینه سیستم‌های قدرت



الکتریکی، تاب‌آوری به معنی توانایی یک سیستم قدرت برای بازیابی سریع از حوادث مخرب نظیر رویدادهای با تأثیر بالا و احتمال رخداد کم و همچنین تحلیل این حوادث برای اتخاذ اقداماتی به‌منظور جلوگیری از تأثیرات مخرب رویدادهای مشابه در آینده است. حوزه‌های کاربردی تاب‌آوری به‌صورت سازمانی، اجتماعی، اقتصادی و مهندسی ارائه می‌شوند. شبکه برق یک سیستم اجتماعی-اکولوژیکی با پارامترهای مکانی، زمانی و سازمانی است که تأثیرپذیر از سیاست، اقتصاد و جامعه است (دشتی و همکاران، ۱۳۹۸:۳). 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 و این امر باعث شده که شبکه‌های توزیع برق در طول عمر صنعت برق کمتر مورد توجه قرار گیرند و اکنون تبدیل به یکی از معضلات اصلی در صنعت برق گردند؛ اگرچه شبکه‌های انتقال و همچنین نیروگاه‌ها به‌عنوان دارایی‌های حساس شمرده می‌شوند، به‌طوری‌که با قطع و اختلال در آن‌ها حجم زیادی از نظر شبکه و حتی حوزه‌های جغرافیایی در خاموشی برق فرو می‌رود؛ اما با انجام تدابیری در شبکه‌های توزیع می‌توان نسبت به کاهش اثرات تهدیدات و یا سطح آسیب اقدام نمود. در این تحقیق دارایی مورد بررسی مربوط به قسمت شبکه توزیع برق یعنی قسمت انتهایی مسیر تولید و انتقال که مرتبط با مصرف‌کننده‌های در شهرها یعنی شبکه توزیع برق است. این پژوهش با بررسی جنبه‌های مختلف محیطی به تبیین عوامل مؤثر می‌پردازد و اهمیت پرداختن به این موضوع را با رویکرد ایجابی مورد تأکید قرار می‌دهد. از منظر ضرورت پرداختن به این موضوع با رویکرد سلبی، عدم توجه به عوامل مؤثر بر تاب‌آوری شبکه توزیع برق مورد اشاره، باعث افزایش آسیب‌پذیری‌ها و تأثیر تهدیدات شده و از قوت‌ها و فرصت‌های موجود در مواجهه با ضعف‌ها و تهدیدات غفلت می‌گردد. از همین‌رو هدف اصلی این تحقیق، شناسایی و

تحلیل عوامل مؤثر بر تاب‌آوری شبکه توزیع برق در برابر تهدیدات انسان‌ساخت است. این تحقیق به دنبال بررسی و تبیین قوت‌ها و فرصت‌ها موجود در طراحی، فناوری، مدیریت و سایر ابعاد شبکه توزیع برق است که می‌توانند به تقویت تاب‌آوری این شبکه‌ها در برابر تهدیدات انسان‌ساخت کمک نمایند و گامی مؤثر در راستای ارتقای سطح تاب‌آوری شبکه‌های توزیع برق کشور برداشته و به تضمین امنیت و پایداری تأمین انرژی الکتریکی برای جامعه کمک نماید؛ بنابراین پژوهش حاضر، به دنبال پاسخ به این سؤال است که عوامل مؤثر در تاب‌آوری شبکه توزیع برق در برابر تهدیدات انسان‌ساخت مبتنی بر عناصر اصلی آن کدامند؟ که در این راستا پاسخ به این سؤال محور قرار گرفته و فرضیه‌ای تدوین نمی‌گردد.

۱. پیشینه پژوهش

«تین نگوین»^۱ و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی با عنوان: «تاب‌آوری شبکه برق در برابر دشمنان سایبری»^۲ شرح مفصل و جامعی را از ارتباط بین حملات سایبری متخصص و قدرت تاب‌آوری شبکه ارائه می‌دهند، این بررسی بر اهمیت در نظر گرفتن حملات سایبری در برنامه‌ریزی برای تاب‌آوری شبکه‌های برق تأکید دارد؛ این بررسی با هدف جمع‌آوری طرح‌ها و اقداماتی که قبلاً بررسی یا اجرا شده است و راه‌حلهایی برای ارائه مبنایی برای تحقیقات و توسعه‌های آتی ارائه گردیده است. اجرای این روش‌های مختلف در بسترهای آزمایشی و محیط‌های دنیای واقعی به‌طورکلی امکان بهبود در نظارت، حفاظت و تاب‌آوری شبکه‌های برق هوشمند در برابر تهدیدات و دشمنان سایبری را فراهم می‌کند.

1. Tien Nguyen

2. Electric Power Grid Resilience to CyberAdversaries



سید جلال حسینی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی با عنوان: «ارزیابی کمی میزان خطرپذیری شبکه تأمین انرژی الکتریکی شهرها در برابر مخاطرات و تهدیدات گوناگون»، با ارائه روشی جدید به ارزیابی میزان خطرپذیری سیستم قدرت در برابر تهدیدات گوناگون پرداخته است که این تهدیدات ممکن است بلایای طبیعی یا حملات تروریستی بوده و شبکه تأمین انرژی را با مشکلات جدی مواجه سازد؛ در این راستا عوامل اصلی تعیین‌کننده اهمیت یک منطقه شناسایی و در قالب ۱۶ آیت کمی‌سازی گردیده است و مدلی در این خصوص ارائه گردیده است که در شناسایی دقیق و علمی نقاط آسیب‌پذیر و بحرانی یک منطقه و همچنین ارزیابی سطح آسیب‌پذیری از دیدگاه پدافند غیرعامل مورد استفاده قرار گرفته است.

محسن کیا و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی با عنوان: «ارائه رویکردی نوین در مکان‌یابی بهینه ساختمان مراکز دیسپاچینگ های برق به روش ترکیبی با در نظر گرفتن معیارهای پدافند غیرعامل»، مراکز کنترل و دیسپاچینگ برق را به عنوان یک حوزه راهبردی مورد تهدید دشمن و به منظور حفاظت این مراکز از تهاجم دشمن، اولین گام مکان‌یابی مناسب جهت تعیین محل احداث ساختمان مراکز کنترل و دیسپاچینگ عنوان نموده است. روش پیشنهادی در این مقاله جهت اولویت‌بندی گزینه محل‌های احداث ساختمان مراکز کنترل و دیسپاچینگ بر مبنای روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و ترکیب روش تحلیل سلسله مراتبی و روش آنتروپی است. روش ارائه شده به طور نمونه برای تعیین محل احداث ساختمان جدید مرکز کنترل و دیسپاچینگ برق منطقه‌ای تهران مورد استفاده قرار گرفته است؛ معیارهای پیشنهاد شده در این مقاله برای مکان‌یابی این مرکز کنترل معیارهای پدافند غیرعامل، مخاطرات، عمرانی، اقتصادی، عملکرد فنی و رفاهی بوده که برای هر معیار با استفاده از نظر خبرگان معیارهایی نیز معرفی شده است؛ با استفاده

از نظر خبرگان معیارها رتبه‌بندی و با استفاده از روش پیشنهادی (ترکیب روش سلسله‌مراتبی و روش آنتروپی) چهار گزینه مد نظر مطالعه قرار گرفته‌اند نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که از بین گزینه‌های پیشنهادی، گزینه محل تهران-ونک جهت احداث مرکز کنترل و دیسپاچینگ برق منطقه‌ای تهران^۱ در اولویت اول قرار دارد.

سعید عسکری و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی با عنوان: «تبیین نقش بازدارنده ذخیره‌سازهای الکتریکی و برنامه‌ریزی واحدهای تولیدی^۲ با و بدون حضور ذخیره‌سازها از منظر پدافند غیرعامل» با توجه به خصوصیت‌های ذاتی شبکه‌های برق و وجود آسیب‌پذیری‌های فراوان در آن‌ها، انواع رویدادهای انسان‌ساخت و طبیعی و تهدید متوجه آن‌ها، به همین دلیل در جهت مصون‌سازی مراکز حیاتی، حساس و راهبردی و مراکز نظامی و زیر زمینی کشور برای شرایط بحران و جهت حفظ اقتصاد و پایداری شبکه‌های برق در تمامی زمان‌ها به‌خصوص در شرایط پیک بار، استفاده از سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی در شبکه‌های برق را ضروری دانسته و به ابتدایی‌ترین الزامات پدافند غیرعامل که رعایت اصل پراکندگی بوده، اشاره نموده است بنابراین بخشی از ظرفیت تعیین‌شده برای ذخیره‌سازها در کنار مولدهای خورشیدی و باقی ظرفیت در کنار پست‌ها با اهمیت بالای کشور به‌صورت پراکنده قرار می‌گیرند.

۲. مفهوم‌شناسی

تاب‌آوری^۳: به توانایی مقاومت سیستم در مقابل یک تغییر ناخواسته یا رویداد اخلاص‌گر (قابلیت جذب)، تطبیق با شرایط جدید (قابلیت انطباق‌پذیری و

1. TAOC

2. UC

3. Resilience



سرعت بخشیدن به بازیابی پس از اختلال (قابلیت ترمیم) تاب‌آوری گفته می‌شود (کمیته دائمی پدافند غیرعامل، ۱۴۰۱: ۲).

ظرفیت جذب: توانایی یک دارایی برای جذب اثرات ناشی از اختلال و به حداقل رساندن پیامدهای آن با کمترین تلاش را ظرفیت جذب می‌گویند.

ظرفیت تطبیق‌پذیری: توانایی یک دارایی برای بهبود و حفظ سطح عملکرد خود (خودسازماندهی) در شرایط تهدید- حادثه را گویند.

ظرفیت برگشت‌پذیری- بازیابی: توانایی یک دارایی برای بازگشت به شرایط عملیاتی اولیه قبل از وقوع حادثه-تهدید و ارتقای توان تولید- ارائه خدمت، به‌نحوی که از پایداری تداوم کارکرد آن اطمینان حاصل گردد را ظرفیت برگشت‌پذیری- بازیابی گویند (کمیته دائمی پدافند غیرعامل، ۱۴۰۲: ۵).

تاب‌آوری شبکه توزیع برق به معنای توانایی جامع برای مقابله و انطباق مؤثر با طیف وسیعی از تهدیدات و چالش‌ها است. این تاب‌آوری نه تنها برپایه استحکام فیزیکی و فناوری تجهیزات استوار است؛ بلکه شامل فرایندهای مدیریتی، آموزشی و هماهنگی با نهادهای مختلف است و تاب‌آوری تضمینی برای ارائه خدمات پیوسته و مؤثر به جامعه و کاهش اثرات مخرب تهدیدات بر دارایی‌های اصلی، محافظ، کنترلی و ارتباطی شبکه توزیع برق است.

تاب‌آوری سایبری: توانایی پیش‌بینی، ایستادگی، بازیابی و انطباق با شرایط نامطلوب، تنش‌ها، حملات و مخاطرات سامانه‌ای که از امکانات سایبری استفاده می‌کنند یا به‌وسیله آن‌ها فعال می‌شوند (کمیته دائمی پدافند غیرعامل، ۱۴۰۲: ۳).

شبکه توزیع برق: شبکه‌های برق از سه بخش اصلی تولید، انتقال و توزیع تشکیل شده است که بخش تولید شامل نیروگاه‌ها و بخش انتقال شامل کلیه خطوط و پست‌های ۴۰۰، ۲۳۰، ۱۳۲ و ۶۳ کیلوولت است. آخرین بخش

شبکه انتقال پست‌های ۶۳/۲۰ کیلوولت هستند که پست‌های فوق توزیع به شمار می‌روند. شبکه‌های توزیع برق آخرین حلقه این زنجیره برق‌رسانی در سیستم قدرت هستند. علی‌رغم زنجیره مفصل صنعت برق جهت تأمین برق مصرف‌کننده‌ها، شبکه توزیع برق ویت‌ترین شبکه قدرت بوده و از شبکه توزیع استنباط کلی از صنعت برق خواهند داشت. چرا که شبکه‌های توزیع برق در ارتباط مستقیم با آن‌ها هستند (دستی و همکاران ۱۳۹۵: ۳۶).

دارایی: اجزای فیزیکی و غیرفیزیکی با ارزش مراکز زیرساختی که هرگونه اختلال در عملکرد آن‌ها متناسب با درجه اهمیت آن‌ها بر تولید محصول و ارائه خدمت آن مرکز اثر می‌گذارد.

نقاط قوت: در زمره فعالیت‌های قابل کنترل سازمان قرار می‌گیرند که سازمان آن‌ها را به شیوه‌ای بسیار عالی انجام می‌دهد؛ آن‌ها در سایه فعالیت‌های مدیریتی، بازاریابی، امور مالی (حسابداری)، تولید (عملیات)، تحقیق و توسعه و سیستم‌های اطلاعات رایانه‌ای به وجود می‌آیند (دیوید و همکاران، ۲۰۲۰).

فرصت‌ها: مقصود از فرصت‌ها، رویدادها و روندهای اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی، بوم‌شناسی، محیطی، سیاسی، قانونی، دولتی، فناوری و رقابتی است که می‌توانند به میزان زیادی در آینده به سازمان منفعت برسانند. فرصت‌ها به میزان زیادی خارج از کنترل یک سازمان است.

تهدید: در معنای عام، یعنی ترساندن طرف مقابل جهت جلوگیری از حمله وی و یا حصول به یک هدف از قبل پیش‌بینی شده است. هر چیزی که در مقابل امنیت انسان قرار گرفته و امنیت و ثبات انسان را به خطر می‌اندازد به‌عنوان «تهدید» مطرح می‌گردد (جلالی، ۱۳۹۱: ۵۱).

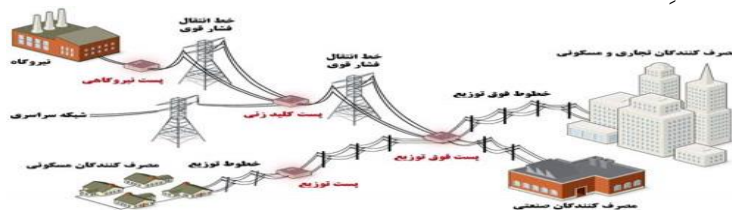


۳. مبانی نظری

۳-۱. ساختار شبکه برق

شبکه برق از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است؛ این قسمت‌ها به صورت زیر دسته‌بندی می‌شود؛ بخش تولید: این بخش شامل نیروگاه‌ها و منابع تولید انرژی است که خود به انواع زیر دسته‌بندی می‌شود ۱. نیروگاه‌های سوخت فسیلی شامل زغال نفت و گاز طبیعی؛ ۲. نیروگاه هسته‌ای؛ ۳. نیروگاه‌های هیدروالکتریک؛ ۴. انرژی‌های تجدیدپذیر. بخش انتقال: شامل مراکز کنترل و خطوط انتقال است. بخش توزیع: شبکه توزیع نیز از مراکز کنترل و خطوط توزیع تشکیل شده است، بازار مصرف: در نهایت برق تولیدی در نیروگاه‌ها در بخش‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد قسمت‌های مختلف شبکه برق در شکل (۱)، نمایش داده شده است (شاهین زرگرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷: ۳۶).

در هر یک از بخش‌های مختلف این شبکه، از تجهیزات پیشرفته کنترلی و صنعتی استفاده می‌شود. این تجهیزات دارای آسیب‌پذیری‌های امنیتی مختلفی هستند که می‌تواند توسط مهاجم مورد سوءاستفاده قرار گیرد. علاوه بر این، شبکه برق به زیرساخت‌های مخابراتی وابسته است؛ مهاجم می‌تواند با مورد هدف قراردادن مثلث «دسترس‌پذیری»^۱، «محرمانگی»^۲ و «یکپارچگی»^۳ در سرویس‌دهی این شبکه اختلال ایجاد کند.



شکل ۱: قسمت‌های مختلف شبکه برق

1. Availability
2. Confidentiality
3. Integrity

شبکه‌های فشار متوسط عمومی در ایران با ولتاژ، ۱۱، ۲۰ و ۳۳ کیلوولتی کار می‌کنند که در این بین، ولتاژ ۲۰ کیلوولت رایج‌ترین آن‌ها است و امروزه نیز ایجاد و توسعه شبکه‌های فشار متوسط به‌طور اساسی با ولتاژ ۲۰ کیلوولت صورت می‌گیرد؛ در برخی از شهرها نیز که از قدیم ولتاژ ۱۱ کیلوولتی معمول بوده است و به‌مرور جای خود را به ۲۰ کیلوولت داده است. ولتاژ ۳۳ کیلوولتی فقط رایج است و در ابتدا به‌عنوان ولتاژ فوق توزیع به کار می‌رفت به این معنی که از طریق خطوط ۳۳ کیلوولتی و ایستگاه‌های تبدیل ۳۳/۱۱ کیلوولتی ولتاژ توزیع ۱۱ کیلوولتی تأمین گردیده و برق به مراکز مصرف رسانده می‌شد و سپس با تبدیل ۱۱ کیلوولت به ۴۰۰ ولت مصرف می‌گردید؛ اما امروزه گرایش به تبدیل مستقیم ولتاژ از ۳۳ کیلوولت به ۴۰۰ ولت بیشتر است و ایستگاه‌های مبدل ۳۳۰۰۰/۴۰۰ ولتی به‌یک‌باره کار توزیع انرژی در سطح فشار متوسط را انجام می‌دهند. در حال حاضر هر دو حالت یاد شده در شبکه خوزستان وجود دارد. شبکه‌های فشار ضعیف و به دنبال آن شبکه روشنایی معابر بزرگراه‌ها معابر اصلی و فرعی و در نهایت اتصالات مربوط به سرویس مصرف‌کننده آخرین بخش از شبکه‌های توزیع را تشکیل می‌دهند در واقع شبکه توزیع به‌طور مستقیم با مصرف‌کنندگان رابطه دارد؛ شبکه فشار ضعیف به‌طور کلی به همراه ترانسفورماتورهای توزیع در یک حوزه قرار می‌گیرند که میان آن‌ها ارتباط تنگاتنگی برقرار است (حکیمی‌پور، ۱۴۰۱:۱۳۹۸).

۲-۳. جایگاه و ویژگی‌های شبکه توزیع برق

شبکه‌های توزیع برق آخرین حلقه از زنجیره برق‌رسانی در سیستم قدرت هستند. علی‌رغم زنجیره مفصل صنعت برق جهت تأمین برق مصرف‌کننده‌ها از دید مصرف‌کننده‌ها شبکه توزیع برق ویتترین شبکه قدرت بوده و از شبکه توزیع، استنباط کلی از صنعت برق خواهند داشت چرا که شبکه‌های توزیع



برق در ارتباط مستقیم با آن‌ها هستند. مصرف‌کننده‌های انرژی الکتریکی در یک نقطه متمرکز نبوده و در گستره جغرافیایی پخش می‌شوند. بدین دلیل شبکه‌های توزیع باید در کلیه خیابان‌ها، کوچه‌ها مناطق، کشاورزی، صنعتی و بیابان‌ها گسترده شوند تا انرژی را به دست مصرف‌کننده برسانند؛ از همین رو شبکه‌های توزیع برق شبکه‌های گسترده پراکنده هستند که دارایی‌های آن‌ها در حوزه جغرافیایی تحت پوشش پخش می‌شود. بدین ترتیب تأسیسات و دارایی‌های توزیع به صورت غیرمتمرکز و پراکنده در کلیه منطقه جغرافیایی تحت سرویس هستند؛ به طوری که به ازای هر آبادی و یا هر زیرساخت عمرانی دارایی‌های متعددی از شبکه توزیع وجود دارد. این ویژگی شبکه‌های توزیع مزایا و معایب متنوعی دارد (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۵: ۳۶).

۳-۳. دارایی‌های شبکه توزیع برق

شبکه‌های توزیع برق دارای چهار دسته دارایی است که عبارتند از:

❖ دارایی‌های اصلی

شبکه این دارایی‌ها شامل خطوط فشار متوسط (پایه و هادی)، پست‌ها (ترانسفورماتور)، تابلوها و خطوط فشار ضعیف (پایه و هادی) هستند. ارزش و قیمت و همچنین حوزه تغذیه و میزان اثرگذاری هر یک از این دارایی‌ها بسیار کمتر از دارایی‌های انتقال است. این دارایی‌ها آخرین دارایی‌های حامل انرژی به مراکز (حیاتی، حساس و مهم)^۱ هستند و می‌توانند مورد هدف گروه‌های تروریستی جهت ایجاد اختلال در عملکرد، قرار گیرند.

۱. مراکز حیاتی، حساس و مهم به آن دسته از مراکزی اطلاق می‌شود که بر اساس تعریف سازمان پدافند غیرعامل کشور در دستورالعمل «تأمین برق اضطراری مراکز حیاتی، حساس و قابل حفاظت» از قبیل مراکز حیاتی: مراکزی که چنانچه تمام و یا قسمتی از آن مورد تعرض یا تخریب واقع شود و یا به کنترل دشمن درآیند خسارات جبران ناپذیری به کشور وارد می‌شود و یا زندگی عادی مردم مختل می‌گردد. مراکز حساس: مراکزی که چنانچه تمام و یا قسمتی از آن مورد تعرض یا تخریب واقع شود و یا به کنترل دشمن درآیند زیان کلی به کشور وارد می‌شود و یا زندگی عادی مردم تا حدود زیادی مختل می‌گردد. مراکز مهم: مراکزی که چنانچه تمام و یا قسمتی از آن مورد تعرض یا تخریب واقع شود و یا به کنترل دشمن

♦ دارایی‌های محافظ

این دارایی‌ها شامل رله‌ها، فیوزها، برق‌گیرها و ... هستند که جهت محافظت از دارایی‌های سیستم توزیع در برابر تغییرات جریان و ولتاژ مورد استفاده قرار می‌گیرند. دارایی‌های محافظ از دو دیدگاه مورد ارزیابی قرار می‌گیرند: اول اینکه در زمان ایجاد تغییرات نامطلوب ولتاژ و جریان از جمله اضافه ولتاژ یا اضافه جریان شبکه را قطع کنند که این را «اعتماد عملکرد» گوئیم و دوم اینکه در مواقع عادی شبکه را قطع نکند که آن را «اتکاپذیری» گوئیم این دارایی‌ها می‌توانند هدف دشمن قرار گرفته و در حالت عادی آن‌ها را وادار به عملکرد نابه‌جا مانند دستور قطع شبکه کنند.

♦ دارایی‌های کنترلی

این دارایی‌ها شامل کلیدها، «سکسیونرها»^۱، «دژنگتورها»^۲، «سکشنالایزرها»^۳ و ... هستند که جهت کنترل بارگذاری بر روی دارایی‌ها و تغییر مسیر تغذیه به‌کار می‌روند؛ این دارایی‌ها می‌توانند فرمان‌پذیر از مرکز کنترل باشند و یا به‌طور دستی و در محل، عمل کنترل را انجام دهند. در شرایط فرمان‌پذیری دارایی‌های کنترلی از راه دور دشمن می‌تواند با حمله سایبری این ادوات را تحت اختیار خود قرار دهد. در صورت عدم پایش دارایی‌های کنترلی و عدم امکان فرمان از راه دور می‌توانند هدف حرکت‌های تروریستی قرار گیرند.

درآیند مشکلاتی برای کشور ایجاد می‌گردد و یا زندگی بخشی از مردم مختل می‌گردد. برخی از موارد مذکور از قبیل بیمارستان‌ها و مراکز درمانی، ایستگاه‌های پمپاژ آب و تصفیه خانه‌ها، مراکز داده‌ها و مخابراتی، مراکز دولتی و امنیتی، مراکز انرژی، خطوط حمل و نقل و سامانه راه آهن، مراکز ذخیره سازی مواد غذایی و دارویی، سامانه‌های دفاعی و نظامی، صدا و سیما و ... هستند.

1. Sectionalizer
2. Circuit Breaker
3. Sectionalizer



❖ دارایی‌های ارتباطی

این دارایی‌ها همان دارایی‌های شبکه مخابراتی هستند که وظیفه انتقال اطلاعات اعم از اطلاعات شبکه‌ای و اداری بین مراکز کنترلی - مدیریتی و نقاط اندازه‌گیری و تهیه اطلاعات و همچنین مراکز کنترلی - مدیریتی و نقاط اعمال تصمیم و دستور و کنترل را بر عهده دارند. تهدیدات فراوری دارایی‌های اصلی را می‌توان به تهدیدات تخریبی تروریستی، بمب‌های الکترومغناطیسی (جهت ایجاد اضافه ولتاژ)، بمب‌های گرافیتی (جهت ایجاد اتصال کوتاه) و بمب‌های لیزری به‌منظور ایجاد حرارت تقسیم‌بندی نمود.

هر یک از تهدیدات در صورت مکان‌یابی صحیح می‌توانند شبکه را به‌طور کلی از کار بیندازد که در غیراینصورت صدمات بسیار زیادی وارد نموده و بخش زیادی از شبکه را در خاموشی فرو ببرند از تهدیدات پیش‌روی دارایی‌های محافظ، می‌توان به دستکاری‌های تروریستی جهت عملکرد در مواقع غیر ضرور و یا برعکس بمب‌های الکترومغناطیسی جهت از کار افتادن دارایی‌های حفاظتی اشاره نمود (دشتی، ۱۳۹۵: ۸۸).

۳-۴. مفاهیم مرتبط با تاب‌آوری

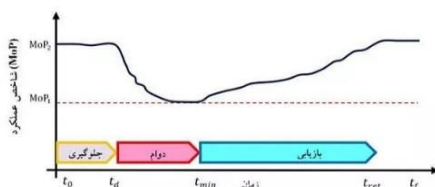
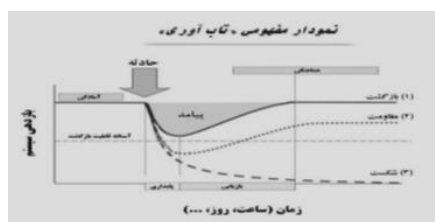
قبل از تعریف تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت دیگر مفاهیم مرتبط با آن، «ریسک»^۱، «استقامت»^۲، «قابلیت اطمینان»^۳، «امنیت»^۴، «پایداری»^۵، «آسیب‌پذیری»^۶ و «ظرفیت» باید تعریف شوند؛ این عبارات رایج‌ترین اصطلاحات در ادبیات مربوط به تاب‌آوری هستند.

-
1. Risk
 2. Endurance
 3. Reliability
 4. Security
 5. Sustainability
 6. Vulnerability

- ریسک: ریسک احتمال یک حادثه نامطلوب و تلفات ناشی از آن است و به عبارتی شدت و احتمال آماری خطرات بر اساس داده‌های تاریخی است؛
 - استقامت: مقاوم بودن توانایی سیستم برای مقابله با مجموعه اختلالات وارده و حفظ عملکرد آن است؛
 - قابلیت اطمینان: قابلیت اطمینان در سیستم‌های قدرت توانایی اجزاء شبکه در پاسخ‌گویی به تقاضای مشترکین برای تأمین برق با کیفیت توان قابل قبول است.
 - امنیت: اگر محدودیت‌های بهره‌برداری، به‌طور معمول محدودیت‌های ولتاژ در گره‌ها و محدودیت‌های پخش توان در خطوط انتقال از سیستم قدرت به دلیل خرابی‌های یک تجهیز معیوب نقض نشده باشد، می‌توان گفت سیستم امن است؛
 - پایداری: پایداری توانایی یک سیستم در سالم ماندن است پس از آن که در معرض اختلالات کوچک قرار می‌گیرد؛
 - آسیب‌پذیری: آسیب‌پذیری را به‌صورت یک نقص یا ضعف ویژگی‌های ذاتی شامل ظرفیت تاب‌آوری در طراحی، پیاده‌سازی، بهره‌برداری و یا مدیریت یک زیرساخت حیاتی یا اجزای آن که آن را حساس به تخریب یا ناتوانی معرفی می‌کند زمانی که در معرض یک خطر یا تهدید قرار می‌گیرد یا ظرفیت خود را کاهش می‌دهد تا شرایط پایدار را دوباره از سر گیرد تعریف می‌کند.
 - ظرفیت: ظرفیت توانایی یک سیستم برای تطبیق یافتن با تغییرات اعمال شده و تعدیل کردن آسیب‌های احتمالی است.
- مفهوم تاب‌آوری بر روی تمامیت زیرساخت‌ها به‌عنوان یک سیستم یکپارچه متمرکز است. در شکل (۲)، نمودار شماتیک تاب‌آوری یک سیستم



نمایش داده شده است. وقتی یک زیرساخت کلیدی همچون هریک از شبکه‌های برق، سوخت حمل‌ونقل یا مخابرات و ... با یک حادثه خطرناک مواجه می‌شود، برخی از عناصر آن آسیبی دیده و خروجی سیستم کاهش می‌یابد. سپس عملیات تعمیرات و بازیابی آغاز شده و در صورت تعمیر و راه‌اندازی مجدد عناصر ظرفیت فعالیت سیستم دوباره به وضعیت اولیه باز می‌گردد. «بازدهی سیستم»^۱ شاخصی برای نمایش کیفیت و کمیت خروجی یا (خروجی‌های) یک سیستم است. محاسبه خروجی سیستم به معنی بررسی و برآورد پدیده‌های درهم‌تنیده (دارای ارتباطات و واکنش‌های متقابل) زیرسیستم‌ها و عناصر آن است و به همین دلیل است که این محاسبات به مدل‌های ریاضی (پیچیده یا ساده) نیاز دارد (حسینی یگانه، ۱۳۹۹: ۱۲).



نمودار ۱: نمودار شماتیک مفهوم تاب‌آوری

نمودار شماتیک مفهوم تاب‌آوری برای نمایش سه وضعیت نهایی محتمل بازگشت، مقاومت و شکست. اگر پس از حادثه بازدهی سیستم (خروجی

سیستم) از آستانه قابلیت بازگشت عبور کند اصطلاحاً به حالت شکست می‌رسد در غیر این صورت می‌تواند به وضعیتی ضعیف‌تر از حالت عادی برسد (مقاومت) یا اینکه مجدداً به شرایط عادی خود بازگردد (بازگشت) در نهایت نیز توانایی سیستم در تأمین منابع مورد نیاز و انجام عملیات تعمیراتی بر سرعت بازیابی سیستم و بازگشت به شرایط عادی مؤثر است. به‌طور کلی پس از وقوع یک حادثه توانایی جامعه در بهره‌گیری از زیرساخت‌های کلیدی امری حیاتی محسوب می‌شود. در نتیجه در یک دوره زمانی مشخص از حادثه برای زیرساخت‌های کلیدی سه وضعیت مختلف قابل تصور است: ۱. بازگشت: به معنی بازگشت به شرایط عادی بازدهی سیستم در شرایط طبیعی از وقوع حادثه؛ ۲. مقاومت: به معنی کاهش خروجی سیستم و بازگشت بخشی از بازدهی سیستم و ۳. شکست: به معنی توقف کامل فعالیت‌ها و عدم توانایی در بازگشت سیستم.

۳-۵. تاب‌آوری در شبکه توزیع برق

یکی از چالش‌های پیش‌رو در زمینه تاب‌آوری تعیین یک سری شاخص در زمان بعد از ضربه است به این معنی که شاخص تاب‌آوری می‌تواند بر اساس یکی از موارد زیر در نظر گرفته شود: ۱. انرژی تأمین نشده؛ ۲. بار قطع شده؛ ۳. تعداد مشترکین تأمین نشده؛ ۴. تعداد دارایی‌های آسیب‌دیده. باید توجه داشت که همه موارد ذکر شده از جنس قابلیت اطمینان هستند. برای ارائه شاخص باید ذی‌نفعان شبکه را به تفکیک مورد ارزیابی قرار داد؛ در مواردی سعی شده است ذی‌نفعان شبکه توزیع را از هم تفکیک کرد عمده‌ترین ذی‌نفعان بعد از ضربه مصرف‌کنندگان هستند که در این بین مصرف‌کنندگان مراکز (حیاتی، حساس و مهم) در معرض بیشترین آسیب خواهند بود. سازندگان و پیمانکاران دیگر ذی‌نفعانی هستند که می‌بایست دارایی‌های



آسیب‌دیده را به‌موقع تأمین و نصب کنند از این جهت تعداد دارایی‌های آسیب‌دیده از دید این ذی‌نفعان بسیار مهم است. دیگر ذی‌نفعان کارکنان شبکه توزیع هستند که ایمنی آن‌ها حائز اهمیت است؛ پس تعداد حوادث منجر به فوت یا شناسایی میزان آسیب‌دیدگی کارکنان در بعد از ضربه شاخص مهمی است. تولیدات پراکنده یا محلی شاخص مهمی است و تولیداتی که از مدار خارج می‌شوند یا میزان تولیدات محلی پس از ضربه یا امکان تولیدات مجازی و پاسخ‌گویی بارها باید مورد توجه قرار گیرد باید دانست که پاسخ‌گویی بار تنها تا حدود قطعی ۲۰ درصدی شبکه قابل قبول است و بیش از این خود این بارها مشمول قطع بار خواهند بود و باید از مدار خارج شوند. دیگر شاخصی که در زمان بعد از ضربه باید در نظر گرفت میزان آمادگی، کارکنان ابزار آلات و ماشین‌آلات است. علاوه بر این میزان دسترس‌پذیری اطلاعات و نرم‌افزارها و صحت اطلاعات یک شاخص کلیدی خواهد بود به یقین حوادثی هستند که بعد از وقوع، عمدتاً به علت پارگی سیم خطرات ایمنی ایجاد می‌کنند پس برای ایمنی شاخص تعداد سیم هستند که بعد از وقوع عمدتاً به علت پارگی‌ها می‌تواند نقش اساسی ایفا کند (مک جنکینگ، ۲۰۱۷)^۱. تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی انرژی شامل ویژگی‌های زیر است که در جدول (۱)، اشاره شده است:

جدول ۱: ویژگی‌های زیرساخت‌های حیاتی انرژی (PCEI, 2017: 37)

تحمیل سطح معینی از استرس بدون تخریب، از دست دادن عملکرد	نیرومندی
توانایی عملکرد در حالت عملیاتی مستقل	خودمختاری
حفظ الزامات عملکردی در هنگام اختلال، تخریب، از دست دادن عملکرد	افزونگی
آمادگی برای دستیابی سریع به اهداف به‌موقع برای جلوگیری از اختلال در آینده	پاسخگویی
ارزیابی PCEI برای پیش‌بینی و آمادگی در برابر تهدیدات احتمالی	آمادگی
شناسایی مشکلات، اولویت‌ها و منابعی که در معرض مختل شدن هستند	مدبر بودن

۳-۶. تهدیدات عمده و مؤثر در حوزه صنعت برق

تهدیدات عمده و مؤثر در حوزه صنعت برق که ناشی از عوامل انسانی و گروه‌های متخاصم هستند را می‌توان به‌صورت زیر برشمرد:

- ❖ تهدیدات سلاح الکترومغناطیسی؛
- ❖ تهدیدات سلاح گرافیتی؛
- ❖ تهدیدات سلاح لیزری؛
- ❖ تهدیدات تروریستی؛
- ❖ تهدیدات سایبری؛
- ❖ تهدیدات اقتصادی (قاسمی و همکاران ۱۳۹۷: ۳۵).

تهدیدات انسان‌ساخت علیه شبکه توزیع برق در ۸ محور دفاعی، امنیتی، سیاسی، اقتصادی، علمی و فناوریانه، اجتماعی و فرهنگی، محیط زیستی و حقوقی و قانونی به شرح زیر هستند:

محور دفاعی: بر عملکرد و قابلیت بازیابی شبکه برق تأثیر زیادی گذاشته و شامل حملات سایبری، حملات فیزیکی و تهدیدات ناشی از طراحی و اجرا هستند (کانداپرومال، ۲۰۱۹).^۱

محور امنیتی: شامل حملات فیزیکی، حملات سایبری و تهدیدات ناشی از طراحی و بهره‌برداری شبکه است؛ این تهدیدات می‌توانند تأثیرات مخربی روی امنیت و کارایی شبکه داشته باشند.^۲

محور سیاسی: چالش‌ها و عواملی هستند که به‌واسطه بی‌ثباتی سیاسی، سیاست‌های دولتی یا تنش‌های اجتماعی به وجود می‌آید و از این قبیل تهدیدات می‌توان به ناآرامی‌های اجتماعی، تغییرات سیاست‌گذاری و بی‌ثباتی

1. Kandaperumal

2. A report on the electric grid security and human-driven physical threat to energy infrastructure, 2023



دولت^۱ و سیاست‌های توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر اشاره نمود (استود، ۲۰۱۹).

محور اقتصادی: می‌تواند از قبیل ایجاد اختلالات گسترده‌ای در تأمین برق و هزینه‌های فراوانی برای زیرساخت‌ها، مصرف‌کنندگان و اقتصاد کلان منجر شود و ازجمله این تهدیدات می‌توان به مواردی از قبیل هزینه‌های مستقیم بازسازی، اثرات نامتناسب بر جوامع کم‌درآمد و خسارات ناشی از اختلالات و حملات فیزیکی و سایبری اشاره کرد (مک میلان، ۲۰۲۳).

محور علمی و فناورانه: تهدیدات انسان‌ساخت در محور علمی و فناورانه شامل خطاها و اقدامات انسانی، ضعف در فناوری‌های موجود و نیاز به سیستم‌های جدید نظارتی و امنیتی است (رهاکا، ۲۰۲۰).

محور اجتماعی و فرهنگی: بر اساس عوامل نابرابری اجتماعی، ضعف در آمادگی گروه‌های مختلف و چالش‌های فرهنگی تأثیرات عمیقی بر تاب‌آوری شبکه توزیع برق می‌گذارند (دوگان، ۲۰۲۳).

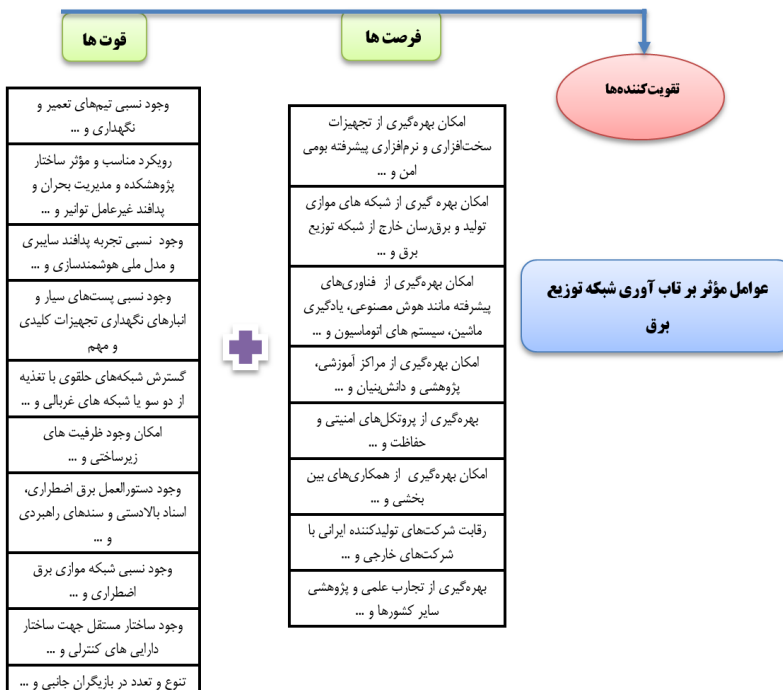
محور محیط زیستی: در نتیجه فعالیت‌های مخرب انسان از قبیل مصرف سوخت‌های فسیلی، حملات سایبری و تخریب زیست‌بوم‌ها بروز کرده‌اند (موهانتیا، ۲۰۲۴).

محور قانونی و حقوقی: مرتبط با عدم وجود یا ضعف در چهارچوب قانونی و نظارتی است که می‌تواند توانایی‌های شبکه‌های توزیع برق را برای مقابله با بحران‌های انسان‌ساخت محدود کند؛ این تهدیدات از قبیل ضعف در چهارچوب‌های نظارتی، ناکارآمدی در سیاست‌گذاری و نبود مکانیسم‌های مالی مناسب رخ می‌دهد (فیلیپس، ۲۰۱۶).

1. (A report on the identify threats-guidebook, 2019)

۳-۷. مدل مفهومی پژوهش

در این تحقیق چهارچوب نظری که محدود و معین‌کننده موضوع در تبیین عوامل مؤثر در تاب‌آوری شبکه توزیع برق در برابر تهدیدات انسان‌ساخت است شامل کتب، اسناد، مقالات و سایت‌های علمی و مطالعات محیطی (قوت‌ها و فرصت‌ها) و نظرات خبرگان و صاحب‌نظران است. چهارچوب مذکور در شکل (۳)، به‌عنوان چهارچوب نظری این تحقیق انتخاب شده و در قالب مدل مفهومی تحقیق نمایش داده شده است. عوامل مختلفی در تاب‌آوری شبکه توزیع برق در برابر تهدیدات انسان‌ساخت وجود دارد. در این مقاله با بررسی مدارک منتشر شده علمی و همچنین مصاحبه عمیق با خبرگان این حوزه، تلاش شد این عوامل شناسایی شوند.



شکل ۳: مدل مفهومی پژوهش



۴. روش‌شناسی تحقیق

این پژوهش از نوع کاربردی و توسعه‌ای محسوب است و با استفاده از روش توصیفی-تحلیلی و استفاده از نظر خبرگان، عوامل مؤثر در تاب‌آوری شبکه توزیع برق در برابر تهدیدات انسان‌ساخت تبیین شده‌اند. جامعه آماری این پژوهش ۱۱۲ نفر از خبرگان و کارشناسان در حوزه‌های مرتبط با صنعت برق، تاب‌آوری و پدافند غیرعامل مرتبط با دارایی‌های شبکه توزیع برق هستند. حجم جامعه نمونه با استفاده از فرمول کوکران ۵۲ نفر با توجه به مشاورت با اساتید راهنما و مشاور تعیین گردیده است. به این منظور ضمن جست‌وجو در ادبیات و احصای عوامل مؤثر جهت تولید ادبیات تکمیلی با ۱۳ نفر از صاحب‌نظران حوزه تحقیق که با اهداف و کارکردهای این حوزه نیز آشنایی و تسلط دارند، مصاحبه عمیق صورت گرفت. برای گردآوری داده‌ها از دو روش میدانی و کتابخانه‌ای استفاده گردیده است؛ سپس جهت تثبیت عوامل احصا شده و همچنین تعیین عوامل داخلی (قوت و ضعف) و عوامل خارجی (فرصت و تهدید) بودن این عوامل با استفاده از پرسش‌نامه محقق‌ساخته با استفاده از طیف ۵ گزینه‌ای لیکرت برای تعیین میزان موافقت با عامل‌ها و دسته‌بندی عوامل به داخلی و خارجی و نوع و اولویت‌بندی آن‌ها، از ۵۲ نفر از نخبگان آگاه به موضوع (جامعه نمونه) برای اعتبار تحقیق نظرخواهی شد که نتایج آن پس از استفاده از نرم‌افزار SPSS در جداول شماره (۲) تا (۶) آورده شده است. روایی پرسش‌نامه از طریق مراجعه به خبرگان تأیید شده و پایایی آن با استفاده از ضریب آلفای کرونباخ به میزان ۰/۸۶ محاسبه گردید. از ویژگی‌های جامعه آماری می‌توان به اشراف کامل با مباحث راهبردی حوزه تاب‌آوری شبکه توزیع برق و حداقل ۲۰ سال سابقه کار در این حوزه‌ها، سطح تحصیلات کارشناسی ارشد به بالا و از بین مدیران وزارت نیرو و

اساتید دانشگاه‌های کشوری و لشکری و سازمان پدافند غیرعامل کشور اشاره نمود.

۵. تجزیه و تحلیل داده‌ها و یافته‌های تحقیق

۵-۱. تجزیه و تحلیل کیفی داده‌ها

با توجه به سؤال و هدف تحقیق که تبیین عوامل مؤثر (قوت‌ها و فرصت‌ها) در تاب‌آوری شبکه توزیع برق در برابر تهدیدات انسان‌ساخت است، با مطالعه و بررسی اسناد، کتب، نشریات و مدارک علمی این عوامل احصا شدند و به‌منظور تکمیل ادبیات تحقیق با تعداد ۱۳ نفر از مدیران ارشد توانیر، برق منطقه‌ای و شرکت توزیع برق استان تهران و صاحب‌نظران حوزه تاب‌آوری شبکه توزیع برق مصاحبه عمیق انجام شد. این عوامل با توجه به اجزای اصلی، دسته‌بندی گردیدند که از طریق مطالعه سوابق علمی انجام‌شده، اسناد و کتب علمی مرتبط با موضوع و بهره‌گیری از نظرات جامعه خبرگی، ۸۶ عامل مؤثر بر تاب‌آوری احصا گردید. این عوامل از طریق تجزیه و تحلیل سه مرحله‌ای (دسته‌بندی، پردازش و قضاوت داده‌ها) انجام گردید و با نظر صاحب‌نظران عوامل مؤثر بر تاب‌آوری شبکه توزیع برق در برابر تهدیدات انسان‌ساخت مورد تأیید قرار گرفته است.

در نهایت ۵۹ عامل مؤثر بر تاب‌آوری شبکه توزیع برق مشخص گردید و جهت تثبیت و تعیین نوع و جنس آن‌ها نظرات جامعه نمونه آماری اخذ گردید؛ همچنین بر اساس نظر ایشان، این عوامل با توجه به محورهای تهدید، در دو دسته عوامل شامل (قوت‌ها و فرصت‌ها) تقسیم و اولویت‌بندی گردیدند و در نهایت با ادغام عوامل مؤثر (قوت‌ها و فرصت‌ها) پنج مورد تقویت‌کننده احصا گردیده است.



۲-۵. تجزیه و تحلیل کمی داده‌ها

در جداول (۴) و (۵) با توجه به نظرات افراد جامعه نمونه در خصوص وضعیت موجود هرکدام از عوامل، ابتدا میانگین وضعیت موجود عامل محاسبه گردیده است و به منظور اولویت‌بندی این عوامل واریانس و در ادامه ضریب پراکندگی محاسبه شده است و با توجه به ضریب پراکندگی کمتر اولویت‌بندی صورت پذیرفته است. برای محاسبه میانگین، واریانس و ضریب پراکندگی از فرمول‌های زیر استفاده شده است:

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n} \quad \text{میانگین}$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad \text{واریانس}$$

$$\text{Coefficient of Variation} = \frac{\sqrt{S^2}}{\bar{X}} \quad \text{ضریب پراکندگی}$$

جدول ۴: وضعیت موجود در نقاط قوت

اولویت	ضریب پراکندگی	واریانس	میانگین	وضعیت موجود عامل					نقاط قوت
				جمع	تعداد	میانگین	تعداد	میانگین	
۱	۰.۲۲۴۸	۰.۸۷۱	۴۱.۰۶	۵	۰	۲	۱۵	۲	وجود نسبی تیم‌های تعمیر و نگهداری دارایی‌های اصلی، محافظ، کنترلی و ارتباطی با قابلیت ساختاری منسجم، مجهز به تجهیزات به‌روز، دارای توانمندی‌های مهارتی و آمادگی در شبکه توزیع برق برای مواجهه مطلوب به تهدیدات و حوادث پیش‌رو

اولویت	ضریب پراکندگی	واریانس	میانگین	جمع	وضعیت موجود عامل				قوت‌ها	
					خیلی کم	کم	متوسط	زیاد		
۲	۰/۳۲۸۹	۰/۸۶	۴/۰۴	۵۰	۰	۶	۱۱	۱۷	۱۹	رویکرد مناسب و مؤثر ساختار پژوهشکده و مدیریت بحران و پدافند غیرعامل توانیر در راستای تاب‌آوری دارایی‌های اصلی، محافظ، کنترلی و ارتباطی شبکه توزیع برق
۳	۰/۳۳۸۳	۰/۹۲	۴/۰۲	۵۰	۱	۶	۷	۲۲	۱۷	وجود نسبی تجربه پدافند سایبری و مدل ملی هوشمندسازی در شبکه توزیع برق در حوزه برق
۴	۰/۳۶۰۳	۱/۰۳	۳/۹	۵۰	۱	۴	۱۰	۱۹	۱۹	وجود نسبی پست‌های سیار و انبارهای نگهداری تجهیزات کلیدی و مهم مرتبط با دارایی‌های اصلی، محافظ، کنترلی و ارتباطی شبکه توزیع برق در راستای افزایش ضریب اطمینان و تاب‌آوری شبکه‌های توزیع برق در زمان اضطراری
۵	۰/۳۹۶۰	۱/۳۷	۳/۸	۵۰	۲	۶	۱۶	۱۱	۱۸	گسترش شبکه‌های حلقوی با تغذیه از دو سو یا شبکه‌های غربالی یا به‌هم‌پیوسته در سیستم توزیع برق جهت پایداری بالا
۶	۰/۳۱۴۵	۱/۴۳	۳/۸	۵۰	۱	۸	۱۱	۱۰	۲۰	امکان وجود ظرفیت‌های زیرساختی دارایی‌های اصلی و محافظتی انتقال برق به‌صورت زمینی و زیر زمینی و تجربه و فناوری پست‌های GIS زیر زمینی
۷	۰/۳۶۸۸	۱/۰۳	۳/۷۸	۵۰	۱	۴	۱۴	۱۷	۱۴	وجود دستورالعمل برق اضطراری، اسناد بالادستی و سندهای راهبردی درخصوص پدافند غیرعامل، سایبری، کالبدی در حوزه انرژی
۸	۰/۳۷۹۲	۱/۱۱	۳/۷۸	۵۰	۲	۶	۱۴	۱۸	۱۴	وجود نسبی شبکه موازی برق اضطراری جهت استفاده در زمان بحران در جایگزینی برق‌رسانی به نقاط آسیب‌دیده در دارایی‌های اصلی، محافظ، کنترلی و ارتباطی



اولویت	ضریب پراکندگی	واریانس	میانگین	وضعیت موجود عامل					قوت‌ها
				جمع	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	
۹	۰/۳۲۱۵	۱/۴۳	۳/۷۲	۵۰	۲	۵	۱۱	۱۵	وجود ساختار مستقل جهت ساختار دارایی‌های کنترلی از قبیل دیسپاچینگ در فرایند عملکردی در زمان بحران و حوادث
۱۰	۰/۳۲۸۹	۱/۳۶	۳/۵۴	۵۰	۲	۹	۱۱	۱۹	تنوع و تعدد در بازیگران جانبی همچون سازندگان پیمانکاران، مشاوران و ... در ارائه کیفیت کالا و خدمات در خصوص دارایی‌های اصلی، محافظ، کنترلی و ارتباطی

جدول ۵: وضعیت موجود در فرصت‌ها

اولویت	ضریب پراکندگی	واریانس	میانگین	جمع	وضعیت موجود عامل					فرصت‌ها
					خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	
۱	۰/۴۰۴۵	۴/۰	۴/۹۷	۵۰	۵	۹	۱۲	۱۰	۱۴	امکان بهره‌گیری از تجهیزات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری پیشرفته بومی امن در راستای تقویت امنیت سایبری دارایی‌های اصلی، محافظ، کنترلی و ارتباطی شبکه توزیع برق
۲	۰/۳۹۵	۳/۹	۴/۹۷	۵۰	۵	۷	۱۲	۱۴	۱۱	امکان بهره‌گیری از شبکه‌های موازی تولید و برق‌رسان خارج از شبکه توزیع برق از قبیل نیروگاه‌های داخلی سایر سازمان‌ها در شهرها و انرژی‌های تجدید پذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی و ذخیره‌سازهای انرژی

اولویت	ضرب پراکندگی	واریانس	میانگین	جمع	وضعیت موجود					فرصت‌ها
					عامل				خیلی زیاد	
					خیلی کم	کم	متوسط	زیاد		
۲	۰/۳۹۱۷	۳/۹	۵/۰۲	۵۰	۴	۷	۱۹	۱۰	۱۲	امکان بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته مانند هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و سیستم‌های اتوماسیون در دارایی‌های اصلی، محافظ، کنترلی و ارتباطی شبکه توزیع برق
۴	۰/۳۸۳۹	۳/۹	۵/۱۲	۵۰	۲	۸	۱۲	۱۴	۱۲	امکان بهره‌گیری از مراکز آموزشی، پژوهشی و دانش‌بنیان در خصوص کنترل و حفاظت از زیرساخت‌های صنعتی در داخل و خارج از کشور
۵	۰/۳۷۲۱	۴/۴	۵/۴۵	۵۰	۲	۹	۱۰	۱۲	۲۰	بهره‌گیری از پروتکل‌های امنیتی و حفاظت از دارایی‌های اصلی، محافظ، کنترلی و ارتباطی شبکه توزیع برق سایر کشورها پیشرفته با قابلیت بومی‌سازی
۶	۰/۳۷۱۶	۴/۴	۵/۶۲	۵۰	۲	۹	۱۰	۱۲	۱۹	امکان بهره‌گیری از همکاری‌های بین بخشی از قبیل همکاری با نهادهای دولتی و نظامی در تشکیل شبکه‌های همکار با نهادهای مذکور
۷	۰/۳۶۷۷	۳/۹	۵/۳۸	۵۰	۲	۵	۱۴	۱۹	۱۲	رقابت شرکت‌های تولیدکننده ایرانی با شرکت‌های خارجی در تولید تجهیزات برقی مرتبط با دارایی‌های اصلی، محافظ، کنترلی و ارتباطی شبکه توزیع برق در حوزه تاب‌آوری صنعت برق
۸	۰/۳۶۶۳	۴/۵	۵/۷۹	۵۰	۲	۵	۸	۱۴	۲۱	بهره‌گیری از تجارب علمی و پژوهشی سایر کشورها در زمینه حفاظت از دارایی‌های اصلی، محافظ، کنترلی و ارتباطی شبکه توزیع برق



جدول ۶: تقویت‌کننده‌ها

ردیف	تقویت‌کننده‌ها
۱	رقابت شرکت‌های تولیدکننده ایرانی با شرکت‌های خارجی در تولید تجهیزات برقی مرتبط با دارایی‌های اصلی، کنترلی، محافظ و ارتباطی و تنوع و تعدد در بازیگران جانبی همچون سازندگان پیمانکاران، مشاوران و ... در ارائه کیفیت کالا و خدمات وجود مراکز علمی، پژوهشی و دانش‌بنیان در حوزه تاب‌آوری صنعت برق در کشور در راستای رسیدن به خودکفایی نسبی در صنعت برق
۲	افزایش درجه اهمیت استقلال‌پذیری و پایداری دارایی‌های اصلی، کنترلی، محافظ و ارتباطی شبکه توزیع برق به کمک تولیدات پراکنده و افزایش درجه اهمیت احداث دیسپاچینگ‌های پشتیبان و یا محلی برای بالا بردن قابلیت اطمینان در زمان وقوع ضربه و پس از آن در راستای توسعه و تقویت کوچک‌سازی و استقلال جزیره‌ای سیستم توزیع برق در عین عملکرد هماهنگ و مرتبط آن‌ها
۳	هماهنگی حفاظت الکترونیکی بالادست و پایین دست در فرایند عملکردی دیسپاچینگ در راستای تقویت ساختار مستقل جهت ساختار دیسپاچینگ در فرایند عملکردی در زمان بحران و حوادث
۴	بهره‌گیری از مراکز علمی، پژوهشی و دانش‌بنیان در حوزه صنعت برق در کشور و استفاده از تجارب علمی و پژوهشی سایر کشورها در زمینه محافظت از زیرساخت‌های برق در راستای تقویت و گسترش شبکه‌های حلقوی با تغذیه از دو سو یا شبکه‌های غربالی یا به‌هم‌پیوسته و انبارداری سیار هوشمند اضطراری به‌منظور پایداری و تاب‌آوری بالای شبکه توزیع برق کشور
۵	وجود اسناد بالادستی و سندهای راهبردی در باب پدافند غیرعامل، سایبری، کالبدی در حوزه انرژی در راستای تقویت و توسعه ساختار مدیریت بحران و پدافند غیرعامل و توسعه مدل ملی هوشمندسازی دارایی‌های اصلی، کنترلی، محافظ و ارتباطی شبکه توزیع برق کشور جهت کنترل و تاب‌آوری شبکه توزیع برق کشور

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

تاب‌آوری شبکه توزیع برق در برابر تهدیدات انسان‌ساخت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین موضوعات در مدیریت و توسعه زیرساخت‌های حیاتی، نیازمند بررسی و تحلیل جامع و چندوجهی است. در این تحقیق، عوامل مؤثر در تاب‌آوری شبکه توزیع برق با تمرکز بر دو بُعد اصلی یعنی قوت‌ها و فرصت‌ها، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتیجه این تحلیل نشان می‌دهد که

با شناسایی، بهره‌برداری و تقویت این عوامل می‌توان احتمال اختلالات ناشی از تهدیدات انسان‌ساخت را کاهش داده و زمینه را برای یک سامانه پایدار و ایمن‌تر فراهم نمود. قوت‌ها، به توانایی‌های ذاتی و ویژگی‌های ساختاری و عملیاتی شبکه‌های توزیع برق اشاره داشته که به‌طور مستقیم توانایی سامانه را برای پیشگیری، مقاومت و بازیابی از بحران‌ها را افزایش می‌دهد. فرصت‌ها به امکانات و شرایط ایجاد شده در محیط پیرامون اشاره داشته که امکان ارتقای تاب‌آوری شبکه‌های برق را فراهم آورند شناسایی و اولویت‌بندی این عوامل می‌تواند در بررسی و شناسایی پیشران‌های مؤثر در به دست آوردن راهبردهای کاهش آسیب‌پذیری دارایی‌های اصلی، محافظ، کنترلی و ارتباطی شبکه توزیع برق و افزایش تاب‌آوری شبکه توزیع برق در برابر تهدیدات انسان‌ساخت نقش بسزایی ایفا نمایند بر اساس نتایج به‌دست‌آمده تعداد ۱۰ مورد قوت و ۸ مورد فرصت و در نهایت ۵ مورد پیشران عمده شناسایی و احصا گردید که بر تاب‌آوری مورد نظر تحقیق مؤثرند.

پیشنهاها

- ❖ وزارت نیرو با همکاری سازمان پدافند غیرعامل به‌منظور افزایش تاب‌آوری شبکه توزیع برق نسبت به استفاده از نتایج این پژوهش از طریق درج مستخرجه نتایج این پژوهش در برآوردهای راهبردی تاب‌آوری شبکه توزیع برق برنامه‌ریزی و اقدام نمایند؛
- ❖ دستگاه‌های اجرایی متولی راهبری زیرساخت‌های برق کشور ازجمله توانیر، برق منطقه‌ای و شرکت توزیع برق، از نتایج این تحقیق برای به‌روزرسانی دستورالعمل‌ها و نظامات عملیاتی پدافند غیرعامل خود در حوزه تاب‌آوری شبکه توزیع برق از طریق بهینه‌سازی و تدوین دستورالعمل‌های جدید استفاده نمایند؛



❖ مطالعات آتی می‌توانند بر تحلیل ترکیب تهدیدات انسان‌ساخت و بلایای طبیعی متمرکز شوند؛

❖ انجام شبیه‌سازی دقیق‌تر و استفاده از مدل‌های کمی جهت ارزیابی تأثیرات هر عامل بر تاب‌آوری شبکه؛

❖ مطالعات آینده می‌توانند علاوه بر قوت‌ها و فرصت‌ها، به بررسی چالش‌ها و تهدیدات مستقیم و غیرمستقیم برای شبکه‌های توزیع برق پردازند؛

❖ انجام شبیه‌سازی‌های دقیق برای پیش‌بینی رفتار شبکه در برابر سناریوهای مختلف تهدیدات در راستای طراحی و توسعه راهکارهای کاربردی.

➤ محدودیت‌های تحقیق

تحقیق حاضر عمدتاً بر قوت‌ها و فرصت‌های مؤثر بر شبکه توزیع برق تمرکز داشته و کمتر به تهدیدات خارجی، ضعف‌ها و چالش‌های موجود پرداخته است؛ بررسی جامع‌تر نیازمند تحلیل تهدیدات و موانع خارجی است.

فهرست منابع

- جلالی فراهانی، غلامرضا (۱۳۹۰)، *پدافند غیرعامل در سازه‌های زیرزمینی*، تهران: سازمان پدافند غیرعامل کشور
- جلالی فراهانی، غلامرضا (۱۳۹۱)، *مقدمه‌ای بر روش و مدل برآورد تهدیدات در پدافند غیرعامل*، تهران: مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه جامع امام حسین (ع).
- جلالی فراهانی، غلامرضا (۱۳۹۱)، *چهار گفتار در باب پدافند غیرعامل*، تهران: انتشارات محدث
- حسینی یگانه، سید محمد (۱۳۹۹)، *مقدمه‌ای بر تاب‌آوری در زیرساخت‌های حیاتی*، تهران: انتشارات رسانه تخصصی
- حسینی، سید جلال؛ صمدی، مهدی (۱۳۹۸)، *ارزیابی کمی میزان خطرپذیری شبکه تأمین انرژی الکتریکی شهرها در برابر مخاطرات و تهدیدات گوناگون*، نشریه علمی علوم و فناوری‌های پدافند نوین، سال ۱۰، شماره ۳
- حکیمی پور، سعید (۱۳۹۸)، *آشنایی با ساختار و تجهیزات شبکه توزیع برق*، چاپ اول (۱۳۹۸)، تهران: فن برتر رؤیایی
- دشتی، رضا؛ قاسمی، مصطفی؛ شریفی مقدم، حمیدرضا (۱۳۹۸)، *تاب‌آوری زیرساخت‌های و زیرساخت‌های تاب‌آوری در صنعت توزیع برق*، چاپ اول بجنورد: دانش اترک
- زرگرنژاد، شاهین؛ دشتی، رضا (۱۳۹۷)، *امنیت سایبری در سیستم‌های توزیع انرژی*، بجنورد: دانش اترک
- شریفی مقدم، حمیدرضا؛ نجفی روادانق، سجاد؛ دشتی، رضا (۱۴۰۰)، *ارزش‌گذاری خطوط سامانه‌های توزیع برق جهت تسریع روند بازیابی و بهبود شاخص تاب‌آوری با در نظر گرفتن تولیدات پراکنده*، نشریه علمی علوم و فناوری‌های پدافند نوین، سال ۱۱، شماره ۴.



- عسکری، سعید؛ سهامی، حبیب‌الله؛ علی‌آبادی، عباس (۱۳۹۹)، تبیین نقش بازدارنده ذخیره‌سازهای الکتریکی و برنامه‌ریزی واحدهای تولیدی UC با و بدون حضور ذخیره‌سازها از منظر پدافند غیرعامل، نشریه علمی علوم و فناوری‌های پدافند غیرعامل، سال ۱۱، شماره ۴
- قاسمی، مصطفی؛ دشتی، رضا (۱۳۹۷)، آشنایی با پدافند غیرعامل در صنعت برق، چاپ اول، بجنورد: دانش اترک
- کلهر، رضا؛ زارعی، غلامرضا (۱۳۹۹)، شاخص‌های آمایش و مکان‌یابی اماکن و زیرساخت‌های حیاتی و حساس با رویکرد پدافند غیرعامل، تهران: دانشگاه جامع امام حسین^(ع)
- کمیته دائمی پدافند غیرعامل (۱۴۰۲)، دستورالعمل عملیاتی پدافند سایبری زیرساخت‌های صنعتی کشور، صفحه ۳
- کمیته دائمی پدافند غیرعامل (۱۴۰۲)، راهنمای تهیه برنامه عملیاتی تداوم کارکرد و بازیابی زیرساخت‌ها، صفحه ۳
- کمیته دائمی پدافند غیرعامل (۱۴۰۲)، نظام فنی و تخصصی حفاظت از زیرساخت‌های کشور، صفحه ۳
- کیا، محسن؛ اعلمی، حبیب‌الله (۱۳۹۹)، ارائه رویکردی نوین در مکان‌یابی بهینه ساختمان مراکز دیسپاچینگ های برق به روش ترکیبی EAHP با در نظر گرفتن معیارهای پدافند غیرعامل، نشریه علمی علوم و فناوری‌های پدافند غیرعامل، سال ۱۱، شماره ۴
- مرادیان، محسن (۱۳۸۸)، تهدید و امنیت، تهران: انتشارات مرکز آموزشی و پژوهشی شهید صیاد شیرازی
- یوسفی، شقایق؛ دشتی، رضا (۱۳۹۵)، ملاحظات پدافند غیرعامل در شبکه‌های توزیع برق، تهران: مؤسسه انتشارات نبوی

References

- Asit Mohantya,, A.K. Ramasamya, Renuga Verayiaha, Satabdi stiab,Sarthak Swaroop Dash, Erdem Cuce, T.M. Yunus Khan, Manzoore ElahiM. Soudagar, (2024),Power system resilience and strategies for a sustainable approach, Alexandria Engineering Journal,
- David Rehaka,, Martin Hromadab, Tomas Lovecek, (2020), Personnel threats in the electric power critical infrastructure,
- European Defence Agency (CIEIP Expert Group), (2017), Critical Energy Infrastructure Protection, Brussels,
- Gowtham Kandaperumal1, Anurag K. (2019) Srivastava1 Resilience of the electric distribution_concepts, classification, assessment, challenges, and research needs system
- human-driven physical threat to energy infrastructure(2023)
- J.philips, M. Finster, J. Pillon, Petit, and J. Trail, (2016),State Energy Resilience Framework, Global Security Sciences Division. Argonne National Laboratory,
- Jesse Dugan a, Dahlia Byles b, Salman Mohagheghi, (2023),Social vulnerability to long-duration power outages, International Journal of Disaster Risk Reduction,
- Madeline Macmillan,Kyle Wilson , Sunhee Baik , Juan,Pablo Carvallo , A namika Dubey , Christine A. Holland, (2023), Shedding light on the economic costs of long-duration power outages: A review of resilience assessment methods and strategiesAuthor links open overlay,
- Protection of Critical Energy Infrastructur(PCEI)(2017)
- S Ma, B Chen, Z Wang - IEEE Transactions on Smart Grid, (2016) - Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather eventsieeexplore.ieee.org)
- Sherry Stout, Nathan Lee, Sadie Cox, and James Elsworth U.S. (2019) Department of Energy's National Renewable Energy Laboratory Jennifer Leisch United States Agency for International Developmentpower sector resilience planning guidebook
- Stout, (2019),A report on the identify threats-guidebook
- T. R. McJunkin and C. G. Rieger, "Electricity distribution system resilient control system metrics," in Resilience Week (RWS), 2017, 2017, pp. 103-112
- Tien Nguyen1, Shiyuan Wang, Mohammad Alhazmi, Mostafa Nazemi, Abouzar Estebarsari, And Payman Dehghanian(2020), Electric Power Grid Resilience to CyberAdversaries