



بررسی مطالعات تاب‌آوری و نحوه ارزیابی آن در شبکه انتقال و فوق‌توزیع برق ایران در مواجهه با حوادث طبیعی

مدیر پروژه: جواد نظافت‌نمینی

واحد مجری: گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت

NRI-ER-952-PSYPN19 -00-F

DOI: 10.30503/nripress.2020.346

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بررسی مطالعات تاب‌آوری و نحوه ارزیابی آن در شبکه انتقال و فوق توزیع برق ایران در مواجهه با حوادث طبیعی

مدیر پروژه: جواد نظافت نمینی

گروه پژوهشی پشتیبان: برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت

همکاران پروژه: نیما تقی‌پور بازرگانی، عباس شهبازیان، فرهاد تیموری، سیدحکیم سجادی، آرمان
علیمردانی، رضا عمرانی، مصطفی قاسمی، محمدمبین گیلانی

واحد مجری: گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت

انتشارات پژوهشگاه نیرو

شهریورماه ۱۴۰۰

کد ثبت گزارش: NRI-ER-952-PSYPN19-00-F

DOI: 10.30503/nripress.2020.346

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت
بررسی مطالعات تاب‌آوری و نحوه‌ی ارزیابی آن در شبکه انتقال و فوق توزیع برق ایران در مواجهه با حوادث
طبیعی/ مدیر پروژه: نظافت نمینی، جواد. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۰.

..... ص: مصور، نمودار، جدول

۱. تقی‌پور بازرگانی، نیما، شهبازیان، عباس، تیموری، فرهاد، سجادی، سیدحکیم،
علیمردانی، آرمان، عمرانی، رضا، قاسمی، مصطفی، گیلانی، محمدامین، همکار پروژه.
۲. شیخی فینی، علیرضا، مدیر واحد مجری.



انتشارات پژوهشگاه نیرو

گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت

کلیه حقوق معنوی اثر متعلق به پدیدآورندگان، کلیه حقوق مادی متعلق به پژوهشگاه نیرو و نشر مطالب در
حدود متعارف، با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر (ویژه گزارش پایانی)

متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب جواد نظافت نمینی، مدیر پروژه بررسی مطالعات تاب‌آوری و نحوه‌ی ارزیابی آن در شبکه انتقال و فوق‌توزیع برق ایران در مواجهه با حوادث طبیعی و همکاران به شرح زیر است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات، مورد ارجاع قرار گرفته و در فهرست منابع ذکر گردیده است.

■ گزارش حاصل انجام همه مراحل پروژه است.

□ گزارش حاصل انجام مرحله از مرحله پروژه است.

همکاران :

۱. نیما تقی‌پور بازرگانی، ۲. عباس شهبازیان، ۳. فرهاد تیموری، ۴. سیدحکیم سجادی،
۵. آرمان علیمردانی، ۶. رضا عمرانی، ۷. مصطفی قاسمی، ۸. محمدمبین گیلانی.

پیشگفتار

با توجه به تغییرات جوی و افزایش احتمال رخداد حوادث طبیعی گوناگون نظیر طوفان، سیل، زلزله و... در اقصی نقاط جهان و همچنین در کشور عزیزمان ایران، زیرساخت‌های حیاتی جوامع به شدت تحت تاثیر این تغییرات جوی قرار گرفته است. یکی از مهمترین این زیرساخت‌ها، چرخه‌ی تامین انرژی الکتریکی است. کشور ما به واسطه موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی و وضعیت زمین‌شناختی از جمله کشورهای بلاخیز جهان محسوب می‌شود و به لحاظ ویژگی‌های طبیعی و زمین‌شناختی به عنوان یکی از کشورهای پرحادثه است. از تعداد ۴۴ نوع حادثه طبیعی شناخته شده توسط سازمان ملل تعداد ۳۰ نوع آن در کشورمان به وقوع می‌پیوندد و پس از کشورهای هند، بنگلادش و چین، چهارمین کشور بلاخیز به شمار می‌رود. حوادث و وقایع طبیعی رخ داده در ۱۰۰ سال اخیر، دال و گواهی بر عمق آن در کشور است. هرچند احتمال بروز چنین حوادثی قابل ملاحظه نیست، اما خسارت‌های مالی و جانی بروز آن‌ها بسیار تاثیرگذار و غیر قابل چشم‌پوشی است. از این رو این نوع حوادث با عنوان تاثیر زیاد- احتمال کم (*HILP*) شناخته می‌شوند. به عنوان نمونه، حوادث اخیر در مناطق جنوبی کشور (در شهر اهواز، مرکز استان خوزستان) که ناشی از رطوبت ۹۷ درصد، سرعت بالای باد به میزان ۶۰ کیلومتر بر ساعت، غلظت بالای آلودگی به میزان بیش از ۱۰۰۰۰ میکروگرم در متر مکعب و ذرات سنگین نمکی بود، موجب وارد شدن خسارت به تجهیزات و زیرساخت‌های انتقال، فوق‌توزیع و توزیع این ناحیه شد. در سال ۱۳۹۵ به دلیل قطع خطوط انتقال ۴۰۰ و ۲۳۰ کیلوولت شبکه برق استان خوزستان خاموشی گسترده‌ای حادث شد. وسعت حادثه به حدی بود که بالغ بر ۱۸۸ فیدر فشار متوسط در ایستگاه فوق‌توزیع از مدار خارج و بی برق گردید. لذا عملاً برقرار نمودن فیدر یا مانور در بخش توزیع تا برقرار شدن خطوط انتقال و ایستگاههای فوق‌توزیع امکان‌پذیر نبوده و لذا پس از رفع اشکال از پستهای انتقال ۲۳۰، ۴۰۰ و فوق‌توزیع بوسیله شرکت برق منطقه‌ای خوزستان به تدریج برقرار شدند (اولین پست فوق‌توزیع پس از حدود ۱۰ ساعت و آخرین پست پس از حدود ۱۵ ساعت). با توجه به خسارت‌های سنگین مالی، جانی و امنیتی ناشی از بروز این گونه حوادث، مدیران ارشد دولتی و شرکت‌های برق منطقه‌ای، متخصصین صنعت برق و سرمایه‌گذاران این حوزه، باید با آگاهی از میزان تاب‌آوری سیستم قدرت مورد مطالعه و با اتخاذ سیاست‌های درست، منطقی و هوشمندانه و با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی تا حد امکان بتوانند تاب‌آوری سیستم قدرت را بهبود ببخشند. از این رو دید درست و علمی از میزان تاب‌آوری سیستم قدرت و راهکارهای ارزیابی آن به نظر امری ضروری است. از این رو، بررسی و ارزیابی تاب‌آوری سیستم قدرت در سطوح مختلف (انتقال، فوق‌توزیع) امری ضروری و غیر قابل اجتناب است. با توجه به نوظهور بودن تعبیر تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت، انجام این پروژه به طور کلی شامل موارد زیر می‌شود: از آن‌جا که در حوزه‌ی ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های قدرت، تاکنون تعریف جامع،

کامل و مانعی که مورد پذیرش اکثریت جامعه‌ی برق باشد ارایه نشده است، یکی از اهداف تعریف این پروژه بررسی تعاریف ارایه شده در مراجع علمی مختلف است. مشخص نمودن ویژگی‌های مورد انتظار از سیستم قدرت تاب‌آور و پاسخ کلی به این سوال که اساساً چه نوع سیستم قدرتی تاب‌آور است؟ از آنجا که تحلیل تاب‌آوری سیستم قدرت نیازمند مدلسازی پارامترهای متنوع تاثیرگذار بر آن (مانند مدلسازی حوادث طبیعی، تاثیر این حوادث بر روی زیرساخت‌های شبکه در انتقال و فوق‌توزیع و...) می‌باشد، لذا باید با استفاده از روش‌های ریاضی و با ترکیب این مدلها، به ارزیابی صحیحی از میزان تاب‌آوری سیستم قدرت برسیم. پس از انجام مدلسازی‌ها در یک سیستم قدرت و برآورد میزان تاب‌آوری سیستم، با توجه به شرایط اقلیمی، می‌توان راهکارهای متنوعی را در جهت بهبود میزان تاب‌آوری سیستم قدرت در بخش انتقال و فوق‌توزیع ارایه نمود. لازم به توضیح است که در هریک از سطوح سیستم قدرت، راه‌حل‌های متنوعی با در نظر گرفتن ساختار سیستم و با توجه به انتظارات مدیران ارشد و بهره‌برداران شبکه قابل ارائه است. به عنوان مثال در بخش انتقال، به کارگیری خطوط موازی و افزونه (*Redundant*)، تعویض یا تعمیر خطوط فرسوده، تعویض یا تعمیر دکل‌های فرسوده، نصب و استفاده از *PMU* ها و سیستم‌های *WAMPAC* به منظور افزایش رویت‌پذیری و تحلیل هرچه بهتر وضعیت امنیت شبکه برق و... می‌تواند مثال‌هایی از این راهکارها باشد که پس از بررسی فنی و همچنین در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی بهترین گزینه انتخاب می‌شود. در ادامه و پس از انجام مطالعات فوق و بررسی روند ارزیابی تاب‌آوری سیستم قدرت، امکان سنجی توسعه‌ی نرم‌افزاری به منظور انجام مطالعات تاب‌آوری، هدف دیگری است که این پروژه دنبال می‌کند. بدین منظور گام اول در توسعه‌ی چنین نرم‌افزاری، ارایه‌ی الگوریتم و فلوچارتی برای ارزیابی مطالعات تاب‌آوری سیستم قدرت می‌باشد تا به بتوان از آن در نرم‌افزار مورد نظر استفاده نمود. گام دوم، مطابق آنچه پیش‌تر ذکر شد، بررسی اطلاعات مورد نیاز به منظور انجام مدلسازی‌های مربوط به حوادث طبیعی، و اطلاعات مورد نیاز جهت مدل نمودن تجهیزات سیستم قدرت و ... می‌باشد.

"این گزارش مربوط به خلاصه مدیریتی کل مراحل پروژه بررسی مطالعات تاب‌آوری و نحوه‌ی ارزیابی آن در شبکه انتقال و فوق‌توزیع برق ایران در مواجهه با حوادث طبیعی است که پشتیبانی آن، بر عهده گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت و نظارت بر آن، بر عهده جناب آقای دکتر فرخ امینی‌فر بوده است."

مقدمه

به‌منظور وارد شدن به بحث اصلی و دنبال کردن اهداف این پژوهش، نیاز است تا با مروری بر مطالعات انجام‌شده در حوزه‌ی تاب‌آوری سیستم‌های قدرت در بخش‌های مختلف، به شناخت دقیق‌تری در این حوزه دست‌یافت. در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های چشم‌گیری در ارائه راهکارها و روش‌هایی جهت تحلیل اثر حوادث طبیعی بر شبکه‌های قدرت صورت گرفته است. از سوی دیگر، به دلیل گستردگی، پیچیدگی و طبیعت بین‌رشته‌ای موضوع، مطالعات پراکنده‌ای در حوزه‌های مختلف صورت گرفته است. همین پراکندگی در دیدگاه‌های مختلف در خصوص مفهوم تاب‌آوری و انتظارات متفاوت از سیستم تاب‌آور، ارزیابی و تحلیل تاب‌آوری سیستم را پیچیده می‌کند. لذا در این مطالعه، سعی می‌شود تا با مرور مراجع در حوزه‌های مختلف مطالعات سیستم‌های قدرت، سیر تکاملی مطالعات تاب‌آوری را در این شبکه‌ها دنبال کرد. همچنین چارچوب‌های مختلفی در ارزیابی کمی و یا کیفی سیستم‌های قدرت معرفی شده است. در این پژوهش، به بررسی این روش‌ها و شاخص‌های معرفی‌شده به‌منظور ارزیابی تاب‌آوری سیستم پرداخته خواهد شد. اگرچه هریک از این شاخص‌ها بر اساس نوع مطالعات می‌توانند کارایی داشته باشند، ما در این پروژه به دنبال انتخاب شاخصی مناسب، کارآمد و قابل پیاده‌سازی و مطابق با اهداف پروژه هستیم.

گزارش حاضر خلاصه مدیریتی نه مرحله پروژه بوده و در قالب یک فصل تنظیم شده است. در بند اول خلاصه مطالعات پروژه برای پیشینه‌ی استفاده از مفهوم تاب‌آوری (*Resiliency*) در علوم مختلف ارائه می‌گردد. در بند دوم خلاصه مطالعات پروژه برای تعاریف، مفاهیم و شاخص‌های ارائه شده در حوزه‌ی تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های قدرت ارائه می‌گردد. در بند سوم خلاصه مطالعات پروژه برای ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های قدرت - انتقال و فوق توزیع ارائه می‌گردد. در بند چهارم خلاصه مطالعات پروژه برای اس بررسی روش‌های رایج برای مدل کردن حوادث طبیعی در مراجع ارائه می‌گردد. در بند پنجم خلاصه مطالعات پروژه برای است ارزیابی اثر آسیب‌پذیری فیزیکی شبکه و خسارات محتمل بر عملکرد کلی ارائه می‌گردد. در بند ششم خلاصه مطالعات پروژه برای روش‌های پیشنهادی برای بهبود تاب‌آوری سیستم قدرت ارائه می‌گردد. در بند هفتم خلاصه مطالعات پروژه برای ارزیابی امکان توسعه‌ی نرم‌افزار مرتبط با مطالعات تاب‌آوری ارائه می‌گردد. در بند هشتم خلاصه مطالعات پروژه برای بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع برق در برابر زلزله در ایران و برنامه‌ریزی مدیریت بحران ارائه می‌گردد. در بند نهم خلاصه مطالعات پروژه برای مقاوم‌سازی شبکه‌های توزیع در برابر حادثه زلزله به‌منظور بهبود تاب‌آوری ارائه می‌گردد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: خلاصه مطالعات انجام شده در خصوص بررسی مطالعات تاب‌آوری و نحوه‌ی ارزیابی آن در شبکه انتقال و فوق‌توزیع برق ایران در مواجهه با حوادث طبیعی.....	۱۲
۱-۱- پیشینه‌ی استفاده از مفهوم تاب‌آوری (RESILIENCY) در علوم مختلف.....	۱۳
۱-۲- تعاریف، مفاهیم و شاخص‌های آرایه شده در حوزه‌ی تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های قدرت.....	۱۹
۱-۳- ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های قدرت - انتقال و فوق‌توزیع.....	۲۴
۱-۴- بررسی روش‌های رایج برای مدل کردن حوادث طبیعی در مراجع.....	۲۶
۱-۵- ارزیابی اثر آسیب‌پذیری فیزیکی شبکه و خسارات محتمل بر عملکرد کلی.....	۳۱
۱-۶- روش‌های پیشنهادی برای بهبود تاب‌آوری سیستم قدرت.....	۳۳
۱-۷- ارزیابی امکان توسعه‌ی نرم‌افزار مرتبط با مطالعات تاب‌آوری.....	۳۵
۱-۸- بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع برق در برابر زلزله در ایران و برنامه‌ریزی مدیریت بحران.....	۳۹
۱-۹- مقاوم‌سازی شبکه‌های توزیع در برابر حادثه زلزله به منظور بهبود تاب‌آوری.....	۴۴

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: پایگاه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در بخش مدل‌سازی حوادث طبیعی و تاثیر آن بر تجهیزات سیستم قدرت.....	۲۷
شکل ۲-۱: منحنی شیپوری دستیابی به هدف اصلی پروژه.....	۲۹
شکل ۳-۱: داده‌های خرابی بر روی تجهیزات سیستم قدرت.....	۲۹
شکل ۴-۱: نقشه تحلیل تاب‌آوری در سیستم قدرت.....	۳۷

فصل اول: خلاصه مطالعات انجام شده در خصوص بررسی مطالعات تاب‌آوری و نحوه‌ی ارزیابی آن در شبکه انتقال و فوق‌توزیع برق ایران در مواجهه با حوادث طبیعی

۱-۱- پیشینه‌ی استفاده از مفهوم تاب‌آوری (Resiliency) در علوم مختلف

مقدمه:

با توجه به نوظهور بودن تعبیر تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت، در مرحله اول پروژه اهداف کلی زیر دنبال و به آنها پاسخ داده می‌شود:

- بررسی تعاریف ارائه‌شده در مراجع علمی مختلف به منظور رسیدن به تعریف جامع، کامل و مانعی از ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های قدرت، که موردپذیرش اکثریت جامعه‌ی مهندسی برق باشد؛
- مشخص نمودن ویژگی‌های مورد انتظار از سیستم قدرت تاب‌آور؛
- رسیدن به پاسخ کلی "اساساً چه نوع سیستم قدرتی تاب‌آور است؟"

در فصل اول ویژگی‌های مورد انتظار از سیستم‌های تاب‌آور در علوم مختلف موردبررسی قرار می‌گردد. لذا کاربرد مفهوم تاب‌آوری در سایر علوم و تاریخچه‌ی معرفی این مفهوم، به صورت کلی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در فصل دوم، مفهومی کلی از تاب‌آوری در سیستم‌های الکتریکی در زمینه‌های مختلف (مخابرات، کنترل و ...) بررسی می‌گردد. در فصل سوم، تاریخچه‌ی استفاده از مفهوم تاب‌آوری در حوزه‌ی سیستم‌های قدرت با مرور مراجع گوناگون و انتظاراتی که از یک سیستم قدرت تاب‌آور وجود دارد، به صورت کلی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. به منظور کاربرد صحیح از مفهوم تاب‌آوری در مطالعات سیستم‌های قدرت، شناخت مفاهیم مرتبط با تاب‌آوری نظیر پایایی، ریسک، آسیب‌پذیری و امنیت و کفایت به نظر امری ضروری است که در فصل چهارم به این موضوعات پرداخته می‌شود.

نتایج فصل اول

هدف از نگارش این بخش مطرح نمودن ویژگی‌های مورد انتظار از سیستم تاب‌آور در علوم مختلف است. پنج زیر بخش، برای این بخش تعریف شده است. در زیر بخش اول تعاریف تاب‌آوری از دیدگاه محققین و علوم مختلف ارائه شد. با توجه به تعاریف ارائه‌شده می‌توان تاب‌آوری را "توانایی سیستم برای ماندن در حالت عادی، بازگشت سیستم به حالت ماقبل از بحران و یا انتقال به حالت جدید پایدار" تعریف کرد. در زیر بخش دوم، کاربرد تاب‌آوری در علوم مختلف نظیر محیط‌زیست، اجتماعی، اقتصادی، روانشناسی، مهندسی و ... موردبررسی قرار گرفت. مطالعات حاکی از آن بود که کاربرد تاب‌آوری به دنبال یک رویداد خاص که منجر به بحران در یک سیستم می‌شود، است. این رویداد در سیستم قدرت می‌تواند طوفان، یخ‌زدگی خطوط، زمین‌لرزه و ... باشد. در زیر بخش سوم، رویکردهای مفهومی؛ ۱. پایداری، ۲. بازیابی،

۳. گذرا، برای تاب‌آوری ارائه شد. با توجه به این رویکردها، مطالعاتی که در حوزه‌ی تاب‌آوری انجام می‌شود می‌تواند دسته‌بندی شوند. هر پژوهش در حوزه‌ی تاب‌آوری می‌تواند یک یا چند رویکرد را هم‌زمان دنبال کند. در زیر بخش چهارم، انتظارات از سیستم‌های تاب‌آور در حوزه‌های مختلف بیان گردید. با توجه به مطالعات صورت گرفته ملاحظه می‌شود که هدف از تاب‌آوری، تاب‌آور کردن زیرساخت‌های سیستم‌ها با مشخص کردن مؤلفه‌هایی برای تاب‌آوری آن زیرساخت است. به‌عنوان مثال سیستم انتقال انرژی الکتریکی یکی از زیرساخت‌های حیاتی کشور است و از جمله مؤلفه‌های تاب‌آوری آن، انعطاف‌پذیری، زمان بازیابی و... است. در زیر بخش پنجم، روند ارائه مقالات در نشریات مختلف ارائه شد. بررسی صورت گرفته حاکی از آن بود که روند انتشار مقالات در حوزه‌ی مطالعات تاب‌آوری باگذشت زمان رو به افزایش بوده است. با توجه به مجموع مطالعاتی که در این بخش انجام شد، می‌توان به‌صراحت گفت که امروزه مطالعات تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی هر کشوری، از اهمیت بالایی برخوردار است و از طرفی چون که سیستم تأمین انرژی الکتریکی یکی از زیرساخت‌های حیاتی به شمار می‌آید مطالعات تاب‌آوری باید در بخش‌های مختلف آن انجام شود.

نتایج فصل دوم

سیستم‌های الکتریکی یکی از زیرساخت‌های حیاتی در مقابله با بحران است. از این رو سیستم‌های الکتریکی باید تاب‌آور در برابر فجایع عمدی و غیرعمدی باشند. یک سیستم الکتریکی، زیرساخت‌های مختلفی از جمله زیرساخت مخابراتی، زیرساخت کنترلی و ... دارد. برای تاب‌آوری سیستم الکتریکی نه تنها باید هر یک از این زیرساخت‌ها تاب‌آور باشند بلکه باید در کنار دیگر زیرساخت‌های سیستم، هماهنگی و تاب‌آوری لازم را ایجاد کنند. با توجه به اینکه تمرکز این پروژه بر مطالعات تاب‌آوری در شبکه‌های انتقال، فوق توزیع و توزیع است، لازم است که به‌عنوان یک سیستم الکتریکی به آن‌ها نگاه کرد که هر یک دارای زیرساخت‌های کنترلی، مخابراتی و قدرتی هستند. با توجه به این موضوع در این بخش از گزارش تاب‌آوری هر یک از این زیرساخت‌ها به‌صورت مختصر شرح داده شد.

مطالعات انجام‌شده در بخش تاب‌آوری زیرساخت‌های مخابراتی حاکی از آن بود که سیستم مخابراتی هنگامی که مجزا و در حوزه‌ی ارتباطات بیان می‌شود بدین معنی است که در مواقع بحران مسئولین امر بتوانند ارتباط با زیردستان خود و گاهی مردم را حفظ کنند تا بتوانند بحران را مدیریت کنند. اما اهمیت تاب‌آوری زیرساخت‌های مخابراتی به دلیل وجود ارتباطات بی‌سیم یا سیمی میان اجزاء سیستم قدرت نظیر تجهیزات اندازه‌گیری بهنگام کمیت‌های شبکه، کلیدهای

جداکننده، مدارشکن‌ها و ... مشخص می‌شود. پس سیستم مخابراتی خود می‌تواند به‌عنوان یک زیرساخت سیستم قدرت مطرح شود و تاب‌آوری آن باید موردبررسی قرار گیرد.

سیستم‌های کنترلی را می‌توان جزء جدایی‌ناپذیر اغلب سیستم‌ها عنوان کرد. ازاین‌رو مطالعات تاب‌آوری در این حوزه بسیار گسترده بوده و در سیستم‌های مختلفی مطرح می‌شود. شاید بتوان گفت یکی از زیرساخت‌های اساسی سیستم‌های قدرت، سیستم‌های کنترلی هستند که باید توانایی کنترل سیستم قدرت را در شرایط عملکرد عادی و غیرعادی داشته باشند. تاب‌آور بودن سیستم‌های کنترلی به‌کاررفته در سیستم قدرت، می‌تواند انعطاف‌پذیری و کنترل‌پذیری سیستم قدرت را در شرایط بحران مهیا کند. پس می‌توان نتیجه گرفت که تاب‌آوری سیستم‌های کنترلی بکار رفته در یک سیستم قدرت می‌تواند موردپژوهش و توجه قرار گیرد.

تاب‌آوری شبکه‌های قدرت به‌عنوان زیرمجموعه‌ای از سیستم‌های الکتریکی، متشکل از مجموعه‌ای گسترده و وسیع از زیرسیستم‌های الکتریکی است. علوم مخابرات، کنترل و ... در شبکه‌های قدرت کاربرد وسیعی دارند. با در نظر گرفتن وابستگی این علوم، واضح است که تاب‌آوری زیرساخت کلی شبکه‌ی برق یک کشور، می‌تواند به تاب‌آور بودن هریک از این زیرساخت‌ها وابسته باشد و ایجاد اختلال در هریک از این زیرسیستم‌ها می‌تواند موجب اختلال در دیگری گردد. هرکدام از این زیر سیستم‌ها نیز شامل بخش‌های مختلفی هستند (به‌عنوان مثال سیستم قدرت خود می‌تواند شامل بخش‌های: تولید، انتقال، توزیع، ریزشبکه و نانو گرید باشد). که درنهایت تاب‌آور شدن هر جزء، تاب‌آوری سیستم بالادست را ممکن می‌سازد. در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت که سیستم الکتریکی از زیرساخت‌های حیاتی هر کشوری است پس باید در مقابل فجایع عمدی و غیرعمدی تاب‌آور باشد و این میسر نمی‌شود مگر اینکه تمامی زیر بخش‌های سیستم الکتریکی تاب‌آور باشند.

نتایج فصل سوم

انجام یک پروژه تحقیقاتی مستلزم به مطالعه‌ی دقیق و مرور مراجع اصلی در حوزه‌ی مورد مطالعه است. با توجه به اهداف اصلی این پروژه، که ارزیابی و تحلیل تاب‌آوری شبکه‌ی برق ایران در بخش انتقال، فوق توزیع و توزیع است، در این بخش، تلاش‌های تحقیقاتی، آماری و پژوهشی که در حوزه‌ی مطالعات تاب‌آوری شبکه‌های قدرت در بخش‌های تولید، انتقال، فوق توزیع و توزیع انجام شده است، مورد مطالعه قرار گرفت.

با مرور پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه تولید مشخص شد که تولید تاب‌آور انرژی الکتریکی و انتخاب نوع نیروگاه مناسب، به مواردی نظیر نوع سوخت، شرایط اقلیمی و جغرافیایی و تکنولوژی‌های در دسترس وابسته است. با بررسی مقالات و پایان‌نامه‌هایی که در خصوص تغییرات شرایط جوی و تأثیرگذاری آن بر واحدهای تولیدی، حوادثی نظیر زلزله‌ی سال ۲۰۱۱ ژاپن و تأثیر آن بر میزان تولید و واحدهای تولیدی و تأثیر نیروگاه‌های تولید پراکنده و یا متمرکز در تاب‌آوری تولید اهمیت مطالعه تاب‌آوری در بخش تولید مشخص گردید.

شبکه انتقال انرژی الکتریکی که موظف به حمل انرژی الکتریکی از تولید تا مصرف است به دلیل ساختاری که دارد در برابر فجایع عمدی و غیرعمدی بسیار شکننده است و گاهی منجر به خطاهای آشنایی می‌شود. تاب‌آور بودن سیستم انتقال امری است ضروری و تاکنون مطالعات زیادی در این زمینه صورت گرفته است و راهکارهای متنوعی برای تاب‌آور کردن آن ارائه شده است. برخی از صاحب‌نظران شرکت‌های معتبر نیز با توجه به تجربه و تخصصی که دارند در ارتباط با تاب‌آوری بخش انتقال، دیدگاه‌ها و نظراتی دارند که می‌تواند حائز اهمیت باشد. با مطالعاتی که در این بخش بر پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه انتقال صورت گرفت می‌توان گفت که باید روش‌های تاب‌آور کردن شبکه انتقال نظیر هوشمندسازی شبکه‌های انتقال و... موردبررسی و ارزیابی قرار گیرند و در شبکه گسترش داده شوند.

شبکه‌های توزیع به دلیل گستردگی که دارند، در مواقع بحران با چالش‌های زیادی روبرو هستند. در مطالعاتی که در بحث تاب‌آور بودن شبکه توزیع انجام شد، مشخص شد که یک رویکرد برای تاب‌آور کردن این شبکه‌ها عنوان شده است. رویکردهای تاب‌آوری سیستم توزیع به‌طور عمده به سه دسته تقسیم‌بندی شده‌اند: برنامه‌های ساخت‌وساز، اقدامات تعمیر و نگهداری و تکنیک‌های شبکه هوشمند. روش‌های دیگری نیز که منجر به تاب‌آوری سیستم توزیع می‌شوند وجود دارند. برای مثال، پیش‌بینی دقیق شرایط آب‌وهوایی شدید می‌تواند به شرکت‌های برق برای آمادگی بهتر قبل از وقوع آن‌ها کمک کند. همچنین ممکن است به پیش‌بینی خاموشی بعدازآن نیز کمک کنند. سپس شرکت‌های برق می‌توانند نیروی کار و منابع خود را برای عملیات بازسازی آماده سازند. با توجه به مطالعات مشخص است که روش و راهکارهای مختلفی برای تاب‌آور کردن شبکه توزیع وجود دارد که باید با بررسی و ارزیابی مشخص، در شبکه پیاده‌سازی شوند و این انجام‌پذیر نیست مگر با پژوهش و تحقیق در زمینه‌ی تاب‌آوری شبکه‌های توزیع است.

ریز شبکه‌ها، به‌عنوان یک ساختار پایه از شبکه‌های هوشمند آینده، می‌توانند راه افزایش تاب‌آوری شبکه را هموار کنند. با مطالعه در زمینه‌ی نقش ریز شبکه‌ها در تاب‌آوری شبکه مشخص شد که ایده اصلی به‌کارگیری ریز شبکه‌ها در

مبحث تاب‌آوری، تمرکز بر شناسایی استراتژی‌هایی است که می‌توانند شبکه برق را به مقدار کافی برای مدیریت خطاهای ناگزیر قوی کند بدون اینکه عواقب فاجعه‌آمیزی داشته باشند. ریزش‌بکه‌ها اثرات عمیقی در مطالبات مختلف شبکه قدرت داشته‌اند از این‌رو تمرکز بر ریزش‌بکه‌ها برای دستیابی به شبکه‌ای تاب‌آور ضروری است و باید مطالعات پیرامون نقش ریزش‌بکه‌ها در تاب‌آوری گسترش یابد.

نانوشبکه یا همان خانه‌های هوشمند برگرفته از مفهوم ریزش‌بکه‌ها اما در مقیاس کوچک هستند. خانه‌های هوشمند می‌توانند در مواقع بحران نقشی محلی در تأمین انرژی ایجاد کنند از این‌رو این شبکه‌ها نیز می‌توانند موردتوجه قرار گیرند و در مطالعات تاب‌آوری مورد ارزیابی قرار گیرند. در یک جمع‌بندی کلی، مجموعه مطالعات انجام گرفته در این بخش می‌تواند چشم‌اندازی از نحوه‌ی مطالعات آتی در زمینه‌ی تاب‌آوری سیستم قدرت در اختیار متصدیان امر قرار دهد.

نتایج فصل چهارم

به‌منظور ارزیابی صحیح از عملکرد شبکه‌ی قدرت در مواجهه با حوادث مختلف، نیاز به دانش کافی در حوزه‌های امنیت، ریسک، آسیب‌پذیری، قابلیت اطمینان (پایایی) و تاب‌آوری وجود دارد. مفاهیم پایایی و تاب‌آوری در مطالعات سیستم‌های قدرت به‌صورت مکرر، و در بسیاری موارد به‌جای هم، مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما تفاوت این دو واژه در چیست؟ برای پاسخ به این سؤال و تبیین مرزهای احتمالی بین این مفاهیم نزدیک به هم، در این بخش، مفاهیم پایه، تعاریف و مبانی متناظر با این مطالعات، در مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا با توجه به تعریف IEEE و مقالات علمی مرتبط، مفاهیم و کارکرد واژه‌های امنیت و کفایت در شبکه‌های قدرت مورد مطالعه قرار گرفت. امنیت شبکه مرتبط به مقاوم بودن شبکه در مقابله با رخداد‌های قریب‌الوقوع است و در نتیجه بستگی به شرایط بهره‌برداری شبکه و احتمال وقوع رخداد دارد. اما کفایت در معنای عام، به معنی وجود تجهیزات کافی و مناسب در سیستم است، به‌گونه‌ای که بتواند نیاز مشترکین را برای تمام زمان‌ها تأمین نماید. پس از آن به مفهوم کلیدی ریسک و تعریف استاندارد ارائه‌شده توسط IEEE و روند ارزیابی امنیت مبتنی بر ریسک، پرداخته شد. بر اساس این دیدگاه احتمال وقوع رخداد و شدت حادثه به‌عنوان عواملی تأثیرگذار مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، مفهوم آسیب‌پذیری شبکه‌های قدرت بر اساس تعریف IPCC مورد مطالعه قرار گرفت و رویکردهای مختلفی که در مطالعات آسیب‌پذیری فیزیکی، سایبری و سایبر-فیزیکی شبکه‌های قدرت می‌تواند موردتوجه باشد، ذکر گردید. لذا آسیب‌پذیری یک سیستم می‌تواند به‌صورت حساسیت آن در مواجهه با تهدیدات و خطراتی تعریف شود که موجب کاهش توانایی سیستم در انجام اهداف و تأمین بارهای موردنظر خود شود. هرچند مفهوم پایایی مفهوم جدیدی در ارزیابی

عملکرد سیستم‌ها به حساب نمی‌آید، در این بخش به بررسی برخی تعریف‌های ارائه‌شده و موردپذیرش در حوزه‌ی مطالعات پایایی سیستم‌ها می‌پردازیم. به منظور کاربرد سنجیده و صحیح مفاهیم تاب‌آوری و پایایی در مطالعات سیستم‌های قدرت، بررسی دقیق این دو مفهوم از منظر شباهت‌ها و تفاوت‌های احتمالی، به نظر ضروری می‌رسد. بر این اساس، بارزترین تفاوت این دو مفهوم در مطالعات شبکه‌های قدرت، نوع حوادث و رخدادهایی است که ممکن است عملکرد نرمال شبکه را با تهدید مواجه کنند. همچنین بر اساس واژه‌نامه‌ی اصطلاحات NERC و تعریف ارائه‌ی شده آن، میزان مناسب پایایی سیستم و مشخصه‌های مورد انتظار از آن بررسی شد. در نهایت، واژه‌ی تاب‌آوری در شبکه‌های قدرت و خواستگاه این واژه در این بخش مورد مطالعه قرار گرفت. از آنجاکه یکی از اهداف اصلی در تحلیل و ارزیابی‌های تاب‌آوری در شبکه‌های قدرت، ارزیابی وضعیت شبکه در رویارویی با پدیده‌های نادر و مخرب است، به نمونه‌هایی از این پدیده‌ها در این بخش پرداخته شد. همچنین در این بخش به رویکردها و برخی تعاریف مرتبط با مفهوم تاب‌آوری در مقالات و مجلات علمی، اشاره شده است.

۲-۱- تعاریف، مفاهیم و شاخص‌های ارایه شده در حوزه‌ی تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های قدرت

روند مطالعات انجام شده:

به‌منظور وارد شدن به بحث اصلی و دنبال کردن اهداف این پژوهش، نیاز است تا با مروری بر مطالعات انجام‌شده در حوزه‌ی تاب‌آوری سیستم‌های قدرت در بخش‌های مختلف، به شناخت دقیق‌تری در این حوزه دست‌یافت. در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های چشم‌گیری در ارائه راهکارها و روش‌هایی جهت تحلیل اثر حوادث طبیعی بر شبکه‌های قدرت صورت گرفته است. از سوی دیگر، به دلیل گستردگی، پیچیدگی و طبیعت بین‌رشته‌ای موضوع، مطالعات پراکنده‌ای در حوزه‌های مختلف صورت گرفته است. همین پراکندگی در دیدگاه‌های مختلف در خصوص مفهوم تاب‌آوری و انتظارات متفاوت از سیستم تاب‌آور، ارزیابی و تحلیل تاب‌آوری سیستم را پیچیده می‌کند. لذا در این مطالعه، سعی می‌شود تا با مرور مراجع در حوزه‌های مختلف مطالعات سیستم‌های قدرت، سیر تکاملی مطالعات تاب‌آوری را در این شبکه‌ها دنبال کرد. همچنین چارچوب‌های مختلفی در ارزیابی کمی و یا کیفی سیستم‌های قدرت معرفی شده است. در این پژوهش، به بررسی این روش‌ها و شاخص‌های معرفی شده به‌منظور ارزیابی تاب‌آوری سیستم پرداخته خواهد شد. اگرچه هریک از این شاخص‌ها بر اساس نوع مطالعات می‌توانند کارایی داشته باشند، ما در این پروژه به دنبال انتخاب شاخصی مناسب، کارآمد و قابل پیاده‌سازی و مطابق با اهداف پروژه هستیم.

در فصل اول، با تمرکز بر تعاریف و مفاهیم موردانتظار از زیرساخت‌های حیاتی تاب‌آور (مانند سیستم‌های قدرت) به بررسی فعالیت‌های انجام‌شده در مراجع علمی پرداخته می‌شود. در فصل دوم، بر اساس مفاهیم توضیح داده‌شده در فصل اول، راهکارها و رویکردهای پیشنهادی (نظیر روش‌های مبتنی بر داده‌های آماری و پرسشنامه، مدل‌سازی‌های ریاضی، درخت رخداد و...) در ارزیابی‌های تاب‌آوری بررسی می‌شود. در فصل سوم، با جمع‌بندی مطالب ارائه‌شده در فصل‌های اول و دوم، ابتدا تعریف پیشنهادی در خصوص تاب‌آوری معرفی شده و در ادامه شاخص تاب‌آوری که در این پروژه و در تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار خواهد گرفت، بررسی می‌گردد.

نتایج فصل اول

تاب‌آوری به‌عنوان مفهومی عمومی در علوم مهندسی، در نظام‌های مختلف و در ارزیابی زیرساخت‌های حیاتی مختلف کاربرد وسیعی دارد. اگرچه به نظر می‌رسد تاب‌آوری یک سیستم در معنای عام به معنی توانایی سیستم در ادامه

سرویس‌دهی و کمینه کردن خسارت ناشی از تنش‌های خارجی شدید و پیش‌بینی نشده است، اما متخصصین این حوزه چارچوب و ویژگی‌های مشخصی در معرفی سیستم تاب‌آور پیشنهاد کرده‌اند. در این فصل به بررسی برخی از مفاهیم پرکاربرد در این حوزه پرداخته شد. در گام اول مفاهیم ارائه شده در حوزه تاب‌آوری زیرساخت‌های انرژی مورد مطالعه قرار گرفت و پس از آن مشخصه‌های مورد انتظار از سیستم قدرت از دیدگاه‌های مختلف بررسی شد. همچنین به منظور تبیین تفاوت میان تحلیل‌های سنتی قابلیت اطمینان و تاب‌آوری سیستم قدرت، مفاهیم مرتبط با این دو موضوع باهم مقایسه شد. شاید مهم‌ترین تفاوت در کاربرد این دو مفهوم، در نوع حوادثی است که در هریک از مطالعات مورد توجه است. قابلیت اطمینان عملکرد سیستم قدرت را در مقابل اتفاق‌های کم‌تأثیر یا بسیار محتمل (مثلاً احتمال‌های $N-1$ یا $N-2$) می‌سنجد، از سوی دیگر تاب‌آوری مربوط به اتفاق‌های شدیدی است که احتمال وقوع‌شان کم است اما تأثیر جدی بر جا می‌گذارند (احتمال‌های $N-k$). بنابراین تاب‌آوری بیشتر بر روی عواقب قطعی‌ها در مقایسه با احتمال‌های آن‌ها تمرکز دارد.

چارچوب‌های مختلفی که در این فصل ارائه گردید هر یک به نحوی مفهوم تاب‌آوری را بیان کردند. برخی از این چارچوب‌ها سه و یا چهار مرحله را به منحنی دوزنقه‌ای تاب‌آوری اختصاص داده‌اند، با توجه به مطالعاتی که نویسندگان انجام داده‌اند مفهومی که آقای اویانگ ارائه می‌کنند مفهومی جامع‌تر و کامل‌تر است که یک ارزیابی سه مرحله‌ای برای در نظر گرفتن ویژگی‌های سیستم مورد مطالعه شامل مقاومت (جلوگیری و استقامت) در برابر هر نوع حادثه، جذب خسارت‌های اولیه و بازیابی به سطح عملکرد عادی شبکه را معرفی کرده است.

نتایج فصل دوم

تاب‌آوری از جهات گوناگونی نظیر بهره‌برداری و یا برنامه‌ریزی و یا از دیدگاه سیاسی-اقتصادی می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. لذا در این بخش به توضیح مفاهیم و شاخص‌های ارائه شده در حوزه ارزیابی‌های کمی تاب‌آوری سیستم‌های قدرت پرداخته شد. اویانگ شاخص وابسته به زمان امید ریاضی تاب‌آوری سالیانه را به صورت نسبت مساحت بین منحنی عملکرد واقعی و منحنی عملکرد ایده‌آل در طول دوره مطالعه معرفی نموده است. وجه تمایز این شاخص نسبت به سایر شاخص‌های موجود، امکان ارزیابی تاب‌آوری شبکه در برابر حوادث نادر و مخرب چندگانه است. در مرجعی دیگر شاخص تاب‌آوری با استفاده از ماتریس همسایگی به منظور محاسبه شاخص مرکزیت بینابینی وزنی (C_B) برای هر گره به منظور

شناسایی نقاط حساس شبکه، اتصال جبری (λ_{alg}) یک شبکه به‌منظور نحوه اتصال شبکه در عملکرد عادی شبکه و زمانی که برخی از گره‌ها به دلیل وقوع حوادث تصادفی صدمه دیده‌اند، شاخص مربوط به آب‌وهوا به‌عنوان یک متغیر دلخواه تعریف شده است. تصمیم‌گیری‌های مرتبط با تاب‌آور کردن یک شبکه، بدون تردید از مسائل تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره به حساب می‌آید. به‌منظور تصمیم‌گیری در خصوص بااهمیت‌ترین عامل در تاب‌آوری یک سیستم، یک ماتریس 5×5 تصمیم‌گیری به صورت RR^T تعریف می‌شود. اهمیت نسبی این عوامل را در این ماتریس می‌توان با استفاده از فرآیند سلسه‌مراتبی تحلیلی (AHP) موردبررسی قرار داد. آزمایشگاه ملی آرگون، یک روش جامع شامل مجموعه‌ای از داده‌های ثابت و یکنواخت به‌منظور به دست آوردن شاخص تاب‌آوری معرفی نموده است. با استفاده از پرسشنامه‌هایی که دارای بیش از ۱۵۰۰ نقطه داده است، این بانک اطلاعاتی، اطلاعات موردنیاز در مورد دستگاه‌های CIKR شامل ساختمان‌های تجاری، پست‌های برق و پل‌ها را در اختیار قرار می‌دهد.

روند ارزیابی تاب‌آوری با استفاده از درخت خطا مرفی‌شده که در این روش از رابطه بین علت و معلول در فرآیند مطالعات تاب‌آوری استفاده می‌کند. در این مورد، علت، رخداد اولیه‌ای (زمین‌لرزه، سونامی، سیل، رانش زمین، آتش‌سوزی، انفجار، یا حمله تروریستی) است که ممکن است رخداد‌های بعدی و آسیب‌های مختلفی به واحد موردنظر (یک نیروگاه، شرکت، انجمن، اقتصاد منطقه‌ای یا ساختار اجتماعی) اعمال کند.

در مرجعی دیگر با استفاده از اصطلاحات MCEER (مرکز چند زمینه‌ای مهندسی زمین‌لرزه در اتفاق شدید)، عملکرد سیستم در برابر زلزله از طریق یک متغیر تصمیم منحصربه‌فرد (DV) اندازه‌گیری می‌شود که در ارزیابی تاب‌آوری مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن سایر متغیرها (تلفات اقتصادی، خسارات، زمان بازگشت و ...) نیز در نظر گرفته می‌شوند. در این مطالعه به ۴ مشخصه تاب‌آوری (شامل: استحکام، کفایت منابع، افزونگی و سرعت) اشاره شده است. در مرجعی تاب‌آوری سیستم در مورد یک حادثه نوعی به‌صورت معکوس از دست رفتن عملکرد سیستم معرفی شده است. تعریف از دست رفتن عملکرد با روش‌های مختلف به دست می‌آید که بر اساس منحنی تاب‌آوری معرفی شده که به سه مورد آن اشاره شد. همچنین اشاره می‌شود که حدود شاخص معرفی‌شده برای ارزیابی تاب‌آوری به‌صورت تئوری از صفر تا بی‌نهایت متغیر است. مشخصاً، بی‌نهایت در این مورد به تاب‌آوری کامل اشاره دارد (هیچ تنزل عملکردی سبب اتفاق شدید نخواهد) و صفر به معنی سیستم غیرتاب‌آور است (ناتوانی برای بقا یا حتی فروریزی فوری بعد از اتفاق شدید). در

پژوهشی یک روند کلی برای ارزیابی میزان تاب‌آوری سیستم قدرت معرفی شد. در این رویکرد پیشنهادی شاخص تاب‌آوری با استفاده از مفاهیمی نظیر فاکتور بازگشت سریع، سطح عادی (اصلی یا پایه) عملکرد پایدار سیستم، سطح عملکرد بعد از قطعی، سطح عملکرد در وضعیت تعادل پس از قطعی و سطح جدید عملکرد پایدار بعد از بازیابی محاسبه می‌شود. همچنین در خصوص مدل‌سازی حوادث و ماهیت تصادفی آن‌ها بحث شد و نحوه‌ی کاربرد شاخص پیشنهادی در شبکه فرضی میکروپولیس مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج فصل سوم

تاب‌آوری مفهومی نوظهور در مطالعات سیستم قدرت است. از همین رو تعریف و شاخص استاندارد به منظور ارزیابی میزان تاب‌آوری شبکه قدرت تاکنون معرفی نشده است. اما مطالعات گسترده‌ای در این حوزه انجام شده است و متخصصین این حوزه با دیدگاه‌های مختلف به بیان ویژگی‌ها و مشخصه‌های موردانتظار از سیستم‌های قدرت پرداخته‌اند. لذا در این فصل به جمع‌بندی این دیدگاه‌ها و مفاهیم بیان شده در فصل‌های ۱ و ۲، به منظور یافتن شاخصی مناسب با اهداف این پروژه پرداخته شده است. در ارزیابی‌های کیفی، ابعاد مختلف تاب‌آوری سیستم‌ها می‌تواند به صورت هم‌زمان مورد مطالعه قرارگیرد. ابعاد مختلفی که در این گونه ارزیابی‌ها می‌تواند در نظر گرفته شود شامل سیستم‌های قدرت و زیرساخت‌های مرتبط با آن نظیر زیرساخت‌های ارتباطی و فناوری اطلاعات، چرخه تأمین سوخت و ... است. توانایی‌های سیستم تاب‌آور نیز نظیر آمادگی، پاسخگویی و بازیابی می‌تواند مورد توجه باشد. این اقدامات می‌تواند شامل پیش‌بینی اقدامات اضطراری و مدیریت بحران، آموزش نیروی متخصص، در دسترس بودن گروه‌های تعمیرات و ... باشد. روش‌های ارزیابی کمی عموماً بر اساس کمی‌سازی شاخص‌های عملکرد سیستم قدرت بنا نهاده شده‌اند. شاخص‌های کمی می‌توانند در ارزیابی تأثیرگذار بودن یک اقدام و یا مقایسه تاب‌آوری سیستم‌های گوناگون مفید باشند. بر اساس مرور مراجع گوناگون، شاخص‌های کمی عموماً وابسته به میزان فاصله گرفتن یک سیستم از عملکرد عادی یا عملکرد ایده‌آل و مدت‌زمان این تغییر هستند. شاخص‌های کمی تاب‌آوری باید بازتاب‌دهنده عملکرد سیستم و مشخصات حوادث باشند، باید بتوانند عدم قطعیت‌ها و نایقینی‌ها را در نظر بگیرند و بتوانند در تصمیم‌گیری‌های آینده و پیشنهاد راهکارها به منظور بهبود تاب‌آوری به کار گرفته شوند هرچند گستردگی در دیدگاه‌های مختلف، استنباط درست از این مفهوم را پیچیده می‌کند، اما برای انجام هرگونه ارزیابی، اولین گام، انتخاب شاخصی مناسب است که بتواند انتظارات برنامه‌ریزان و مدیران شبکه را برآورده کند. همچنین

نحوه پیاده‌سازی و مدل‌سازی شبکه و روند ارزیابی تاب‌آوری نیز از نکات مهم در انتخاب شاخص موردنظر است. بر این اساس، در این فصل مفهوم موردانتظار از سیستم تاب‌آور در این پژوهش تبیین شد. بر این اساس تاب‌آوری در بخش‌های مختلف (تولید، انتقال و فوق‌توزیع و توزیع) به مفهوم توانایی سیستم در انطباق‌پذیری (در مواجهه با حادثه نوعی)، جذب (کاهش اثر تنش خارجی)، و بازیابی سریع شبکه (برمبنای اولویت) در مقابله با حوادث طبیعی و یا اقدامات مخرب انسانی است. بعلاوه، مفهوم منحنی تاب‌آوری و شاخص موردنیاز به‌منظور ارزیابی کمی تاب‌آوری سیستم قدرت نمونه معرفی گردید.

۳-۱- ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های قدرت - انتقال و فوق‌توزیع

روند مطالعات انجام شده:

در این مرحله از پروژه محوریت اصلی مطالعات، بررسی آسیب‌های ناشی از سوانح طبیعی بر سیستم‌های قدرت با تمرکز بر تأثیرات این سوانح بر سیستم‌های انتقال و فوق‌توزیع بوده است. در گام نخست با بررسی مراجع متنوع بلایای طبیعی که امکان اثرگذاری بر عملکرد سیستم قدرت را دارند مورد شناسایی قرار گرفتند. در میان مراجع و گزارش‌های موجود نمونه‌های متعددی از اثر گذاری سوانح طبیعی بر سیستم‌های قدرت مورد بررسی قرار گرفتند. بنابر بررسی‌های صورت پذیرفته وقوع سیل، زلزله، بادهای شدید، ریزگرد، برف و سرمای گسترده، موج خشکسالی و گرما و تداخلات ژئو مغناطیسی سوانح طبیعی هستند که وقوع آن‌ها تأثیرات گسترده‌ای بر عملکرد سیستم‌های قدرت دارند. در فصل اول این مرحله از پروژه از طریق گزارشات موجود، هر یک از سوانح طبیعی یاد شده به تفصیل مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه‌های متعددی از وقوع این سوانح در سراسر جهان گردآوری شده‌اند و گزارش‌های صدمات ناشی از آن‌ها بر عملکرد سیستم مورد تحلیل قرار گرفته و میزان و نحوه آسیب‌های ناشی از هریک مورد شناسایی قرار گرفته‌اند. در فصل دوم این مرحله از پروژه مدلسازی ریاضیاتی نحوه اثرگذاری این سوانح مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بنا بر موارد ارائه شده در فصل نخست و با توجه به ماهیت وقوع و نحوه اثر گذاری سوانح طبیعی، بیشتر مطالعات پیشین در این حوزه مربوط به مدلسازی اثر طوفان و زلزله بر سیستم‌های قدرت بوده است. در این پژوهش نیز تلاش شده است تا راهکارهای متنوعی که در پژوهش‌های پیشین استفاده شده‌اند گردآوری گردد. بر این مبنا ابتدا با رویکردی کلی به نحوه‌ی مدلسازی زیرساخت‌های حیاتی (و سیستم‌های قدرت به عنوان یک زیرساخت حیاتی) و ارزیابی اثرات حوادث و فرآیندهای تکثیر این حوادث، پرداخته شده است و پس از آن نحوه مدلسازی مواجهه تجهیزات سیستم قدرت با دو سانحه طبیعی زلزله و طوفان مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

نتایج بدست آمده:

در فصل اول به بررسی تأثیر سیستم انتقال بر تاب‌آوری سیستم قدرت در مواجهه با رخداد‌های مخرب مختلف پرداخته شد. از طرفی با ارائه گزارش‌های مختلف از بحران‌های واقعی به وجود آمده در نقاط مختلف جغرافیایی اهمیت تاب‌آور بودن شبکه انتقال به وضوح مشخص شد. سوانح طبیعی (شامل سیل، زلزله، بادهای شدید و طوفان، موج سرما، برف و

بخ)، تداخلات ژئومغناطیسی، ریزگردها، خشکسالی و موج فراگیر گرما به عنوان بحران‌های شناخته شده‌ای که می‌توانند شبکه انتقال را با تخریب عملکردی مواجه کنند در این بخش مورد بررسی قرار گرفتند. از طرفی تأثیر هر یک از این بحران‌ها بر تجهیزات مختلف شبکه انتقال نیز ارزیابی شد و در نهایت اهمیت تاب‌آور بودن شبکه انتقال برای تاب‌آور شدن سیستم قدرت مشخص گردید.

در فصل دوم با رویکردی کلی به نحوه‌ی مدل‌سازی زیرساخت‌های حیاتی (و سیستم‌های قدرت به عنوان یک زیرساخت حیاتی) و ارزیابی اثرات حوادث و فرآیندهای تکثیر این حوادث، پرداخته شده است. فرآیندهای تکثیر وابسته به ماهیت حادثه و ویژگی‌های فیزیکی، جغرافیایی، سائیری و منطقی است. در ادامه ۵ گام اساسی در آنالیز اثر آبشاری خطاها معرفی شده است و هر یک از این مراحل به تفصیل مورد بحث قرار گرفته‌اند. همچنین به مفهوم زیرساخت‌های حیاتی اکتیو و پسیو اشاره شده است. به منظور آشنایی و تبیین دیدی کلی در خصوص مدل‌سازی شبکه، مدل خرابی شبکه در رویارویی به حادثه‌های نوعی با استفاده از نظریه‌ی گراف مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت مدلی جهت برآورد خسارت شبکه معرفی شده است. هرچند مدل‌سازی طوفان و زلزله به تفصیل در مرحله‌های بعدی پروژه مورد بررسی قرار خواهد گرفت، در این فصل به دو نمونه از نحوه‌ی مدل‌سازی مواجهه تجهیزات سیستم‌های قدرت با طوفان و زلزله پرداخته شده است. ابتدا مدل‌سازی طوفان و تأثیر آن روی شبکه‌ی قدرت بررسی و مدل‌های خطی و تجمعی تعمیم‌یافته برای مدل‌سازی طوفان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین نحوه‌ی استفاده از نتایج این مدل‌سازی‌ها شرح داده شده است. مدل‌سازی زلزله و تأثیر آن روی شبکه‌ی قدرت نیز بررسی گردیده و نحوه‌ی مدل‌سازی مواجهه ترانسفورماتورها در برابر زلزله به عنوان تجهیز مهم و اساسی در زنجیره‌ی تامین انرژی الکتریکی بررسی شده است و به مرور مقالاتی در خصوص حفاظت ترانسفورماتورها در برابر زلزله پرداخته شده است.

۴-۱- بررسی روش‌های رایج برای مدل کردن حوادث طبیعی در مراجع

روند مطالعات انجام شده:

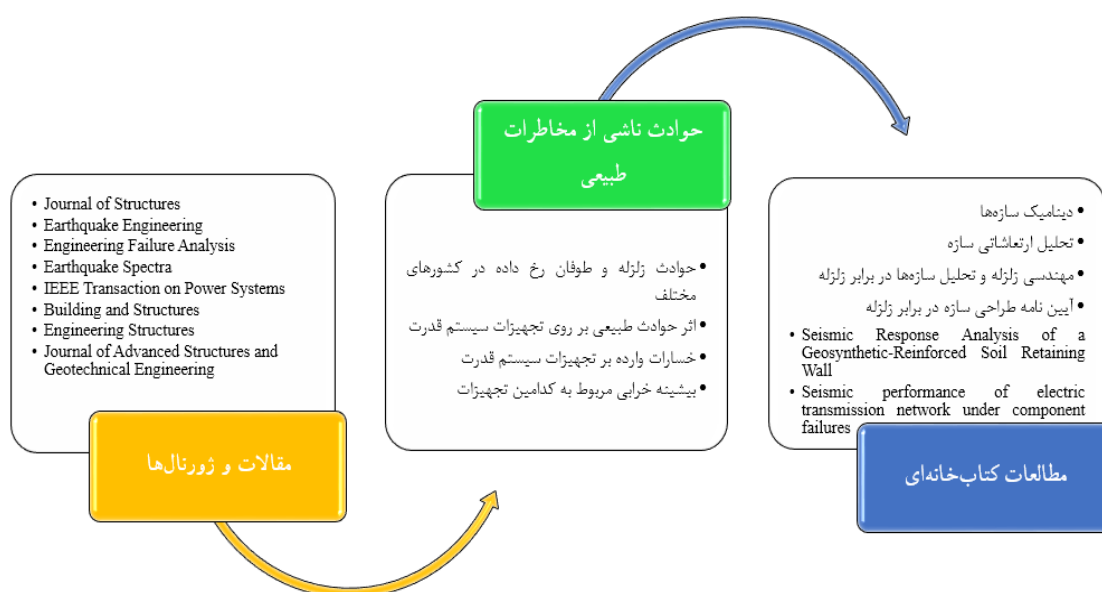
تاب‌آور سازی سیستم‌های قدرت در مواجهه با پیشامدهای با احتمال وقوع پایین و میزان خسارت گسترده نظیر سوانح طبیعی نیازمند آگاهی بیش از پیش بهره‌برداران شبکه برق از نحوه اثرگذاری سوانح طبیعی و نقاط آسیب‌پذیر شبکه در مواجهه با این دست سوانح است. از این رو ضروری است راهکارهایی به منظور مدلسازی نحوه اثرگذاری سوانح طبیعی بر سیستم‌های قدرت ارائه گردند تا بتوان به کمک آن‌ها به شناخت دقیقی از نقاط آسیب‌پذیر سیستم دست یافت. بر مبنای مطالعات صورت گرفته با مدل‌های ارائه شده در هر شبکه قدرت می‌توان اثر گذاری سوانح طبیعی متنوع از جمله طوفان و زلزله را مورد بررسی قرار داد و اقدامات پیش‌گیرانه پیش از وقوع سوانح و اقدامات کنترلی مورد نیاز حین آن‌ها را طرح‌ریزی کرد.

لذا نحوه‌ی تهیه گزارش مرحله چهارم این پروژه را می‌توان به طور کلی به بخش‌های مکانیزم دسترسی به اطلاعات، دسته‌بندی اطلاعات، مشخص شدن معیارها و شاخص‌های گزارش و تهیه گزارش و تحلیل اطلاعات تقسیم‌بندی نمود. نحوه‌ی دسترسی به اطلاعات:

از آنجا که در بند چهارم پروژه "بررسی مطالعات تاب‌آوری و نحوه‌ی ارزیابی آن در شبکه انتقال و فوق توزیع برق ایران در مواجهه با حوادث طبیعی" هدف دستیابی و بررسی روش‌های رایج برای مدل کردن حوادث طبیعی در مراجع مختلف می‌باشد. لذا پایگاه‌های مختلف داده باید مورد بررسی قرار گیرد. پایگاه اصلی اطلاعات مربوط به مقالات و ژورنال‌های ثبت شده می‌باشد. از آنجا که موضوع فوق موضوعی میان‌رشته‌ای است در شکل ۱ مشاهده می‌شود که برخی از این ژورنال‌ها مربوط به مهندسی زلزله و سازه می‌باشند. براساس مقالات اطلاعات مربوط به نحوه‌ی مدل‌سازی مدرن و نتایج تحلیلی تاب‌آوری مورد بررسی قرار گرفت.

دیگر پایگاه اطلاعاتی حوادث طبیعی رخ داده در کشورهای مختلف در سال‌های قبل می‌باشد. این اطلاعات در روند اجرای پروژه برای بررسی اثر حوادث طبیعی بر روی تجهیزات سیستم قدرت و بیشینه تنش وارده بر آن‌ها برای یافتن منحنی شکست ضروری است.

پایگاه اطلاعات کتابخانه‌ای نیز در این بخش از پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. زیرا ماهیت مدل‌سازی نیروی وارده بر تجهیزات، مهندسی زلزله و سازه است. لذا برای بدست آوردن مدل ریاضی و منطق مورد استفاده در روش‌های نرم‌افزاری همچون اجزا محدود در تحلیل ارتعاشاتی سازه، بررسی کتاب‌های مربوط به دینامیک سازه‌ها بسیار مهم و ضروری است.



شکل ۱-۱: پایگاه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در بخش مدل‌سازی حوادث طبیعی و تاثیر آن بر تجهیزات سیستم قدرت

دسته‌بندی اطلاعات :

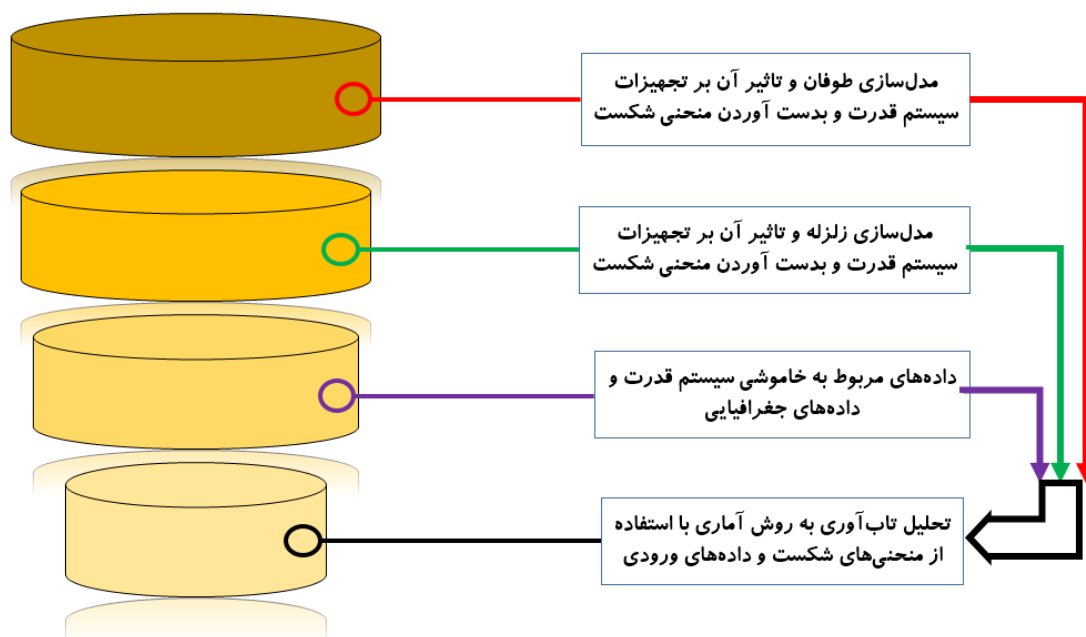
براساس پایگاه‌های اطلاعاتی مختلفی که در این زمینه ارائه شده است، ابتدا اطلاعات مربوط به حادثه طوفان و نحوه‌ی مدل‌سازی اثر طوفان بر روی تجهیزات سیستم قدرت، عوامل موثر بر نیروی ناشی از طوفان مورد بررسی قرار گرفته است. همین تحلیل را برای رخداد زلزله نیز انجام شده است. به عبارتی برای نیروی زلزله نیز ابتدا براساس حوادث رخ داده در گذشته بیشینه خرابی ایجاد شده در سیستم قدرت مشخص خواهد شد. به طور مثال رخداد زلزله در بسیاری از ترانسفورماتورهای نیروگاهی باعث شکسته شدن بوشینگ آن‌ها یا تاییده شدن ترانس بر اثر وزن بسیار زیاد آن می‌باشد. سپس بر این اساس روش‌های مدل‌سازی نیروی وارده بر تجهیز مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت نحوه‌ی دستیابی به منحنی شکست جهت تحلیل تاب‌آوری بیان شده است. شکل ۱-۲ منحنی شیپوری مربوط به روند دستیابی به هدف این

قسمت از پروژه را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با مشخص نمودن مدل طوفان و زلزله و همچنین بدست آوردن داده‌های مربوط به خاموشی سیستم قدرت و داده‌های جغرافیایی می‌توان به روش آماری تحلیل تاب‌آوری انجام داد. که پس از ارائه انواع روش‌های آماری جهت تحلیل تاب‌آوری به بررسی یک نمونه و مقایسه انواع روش‌های آماری در تحلیل تاب‌آوری جهت انتخاب بهترین روش پرداخته شده است.

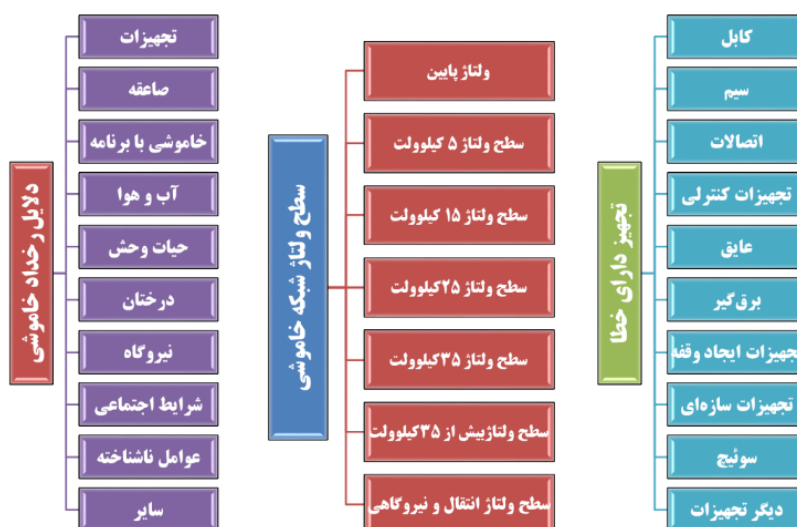
تهیه گزارش و تحلیل اطلاعات:

پس از دستیابی به تمامی اطلاعات موردنیاز برای بررسی روش‌های رایج مدل‌کردن حوادث طبیعی در مراجع مختلف لازم است این اطلاعات دسته‌بندی گردد. بنابراین فصل‌بندی این بخش از گزارش در ابتدا با یک مقدمه از ضرورت مدل‌سازی حوادث طبیعی و تاثیر آن بر تجهیزات سیستم قدرت آغاز می‌گردد. سپس دو نوع حادثه بسیار پرخطر یعنی طوفان و زلزله بر طبق مراجع و مشخص شدن معیارها و شاخص‌های گزارشات بدست آمده انتخاب گشته و در فصل اول و دوم به روش‌های مدل‌سازی طوفان و در فصل سوم روش‌های مدل‌سازی زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای بدست آوردن یک مدل ریاضی از تاثیر طوفان و زلزله بر تجهیزات سیستم قدرت نیازمند داده‌های تاریخی و آماری از حوادث گذشته هستیم.

لذا در فصل اول ابتدا داده‌های موردنیاز برای مدل‌سازی بیان می‌گردد. این داده‌ها را می‌توان در شکل ۱-۳ مشاهده نمود. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود داده‌های خرابی ناشی از حوادث طبیعی شامل دلایل رخداد خاموشی، سطح ولتاژی که خرابی رخ داده است و چه تجهیزاتی بر اثر وقوع حادثه طبیعی دچار خرابی و خاموشی شده است و همچنین داده‌های جغرافیایی همچون محل رخداد حادثه نیز برای مدل‌سازی این حوادث طبیعی لازم و ضروری است.



شکل ۱-۲: منحنی شیپوری دستیابی به هدف اصلی پروژه



شکل ۱-۳: داده‌های خرابی بر روی تجهیزات سیستم قدرت

حال برای مدل‌سازی حوادث طبیعی داده‌های اولیه آن مشخص شده است. براساس این داده‌ها مطابق مراجع روش‌های توزیع آماری همچون مدل خطی تعمیم یافته، روش رگرسیون خطی، روش‌های داده‌کاوی بر اساس درخت تصمیم برای تحلیل تاب‌آوری در شبکه قدرت استفاده شده است.

همچنین در این گزارش روش‌های فوق با هم مقایسه گردیده و بهترین روش براساس مقایسه با روش‌های دیگر در یک مثال مشخص شده است.

نکته مهمی که در ادامه فصل اول مورد بررسی قرار گرفته است منحنی شکست و نحوه بدست آوردن آن می‌باشد. منحنی شکست نحوه‌ی ارتباط شدت رخداد حادثه طبیعی را با احتمال شکست و خرابی بدست می‌آورد. نحوه‌ی بدست آوردن این منحنی چالش اصلی فصل دوم و سوم این بخش از پروژه می‌باشد. لذا براساس داده‌های تحلیل سازه‌ای در فصل دوم یک مدل ریاضی برای نیروی وارده بر تجهیز ناشی از طوفان بدست آمده است. و همچنین چگونه می‌توان با استفاده از نیروی طوفان وارده بر سازه به منحنی شکست دست یافت مورد بررسی قرار گرفته و در پایان این فصل روند بدست آوردن منحنی شکست برای تحلیل تاب‌آوری ارائه شده است.

در فصل سوم نیز مدل ریاضی برای نیروی ناشی از زلزله بر روی تجهیزات سیستم قدرت بر طبق مراجع ارائه شده است. در این بخش پس از ارائه روش‌های مدل‌سازی نیروی زلزله همچون روش دینامیکی، روش طیفی و آیین‌نامه‌ای، به نحوه‌ی دستیابی به منحنی شکست پرداخته شده و با ارائه الگوریتمی روند بدست آوردن منحنی شکست مورد بررسی قرار گرفته است. لذا همانطور که در منحنی شیپوری شکل ۲ مشاهده شد هدف اصلی از این بخش، دستیابی به چگونگی مدل‌سازی حوادث طبیعی جهت بدست آوردن منحنی شکست و تحلیل تاب‌آوری به روش آماری می‌باشد.

۵-۱- ارزیابی اثر آسیب‌پذیری فیزیکی شبکه و خسارات محتمل بر عملکرد کلی

روند مطالعات انجام شده:

در فصل اول مرحله پنجم پروژه، با بررسی نمونه‌های متعددی از مواجهه سیستم‌های قدرت با سوانح طبیعی چگونگی اثرپذیری توپولوژی شبکه و آسیب‌های ممکن بر هریک از بخش‌های شبکه در مواجهه با سوانح مختلف مورد شناسایی قرار گرفته‌اند. همچنین در ادامه گزارش‌های موجود در رابطه با خسارات اقتصادی ناشی از آسیب‌های فیزیکی وارد بر سیستم قدرت و قطع روند انتقال انرژی الکتریکی، در مواجهه با سوانح طبیعی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

در فصل دوم این مرحله از پروژه، هدف بررسی و ارزیابی تاب‌آوری یک شبکه قدرت نمونه در مواجهه با یک سانحه طبیعی بوده است. تلاش شده است که در یک مورد بررسی روند کلی ارزیابی شبکه‌های قدرت ارائه گردد. برای موارد متنوع می‌توان اطلاعات مربوط به شبکه دلخواه در مواجهه با سانحه طبیعی مورد نظر را در روند مشابه روند ارائه شده در این بخش، مرود ارزیابی از منظر سطح تاب‌آوری قرار داد.

به این منظور شبکه استاندارد ۳۹ شینه IEEE در نظر گرفته شده است. سانحه طبیعی نمونه نیز، عبور تندباد یا طوفان از بخش مشخصی از شبکه در نظر گرفته شده است. در ادامه ابتدا اطلاعات مربوط به شبکه قدرت و داده‌های ورودی روند ارزیابی تاب‌آوری ارائه شده و مورد طبقه‌بندی قرار گرفته است. پس از آن سناریوهای متفاوت مواجهه شبکه مورد نظر با طوفان ارائه شده‌اند و در نهایت ارزیابی شبکه در مواجهه با سوانح طبیعی مفروض، صورت پذیرفته است.

نتایج بدست آمده:

در فصل اول از مرحله پنجم پروژه نمونه‌های متعددی از سوانح طبیعی با رویکرد تحلیل خسارات وارده بر شبکه هم از دیدگاه تغییرات توپولوژیک شبکه و هم از نظر خسارات اقتصادی همچون هزینه‌های ناشی از عدم تامین بار بر اثر وقوع سوانح طبیعی مورد تحلیل ارزیابی قرار گرفته است.

در فصل دوم از مرحله پنجم پروژه نمونه‌ای از روند کلی ارزیابی تاب‌آوری سیستم قدرت در مواجهه با سوانح طبیعی ارائه شده است. در این فصل به کمک شبیه‌سازی مواجهه یک شبکه نمونه با سانحه طبیعی فرضی، روند نمایی عمومی و مستقل از شبکه و سانحه طبیعی برای ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های قدرت در مواجهه با سوانح طبیعی ارائه شده است.

در این فصل ارزیابی تاب‌آوری در یک نمونه شبیه‌سازی و بر پایه شاخص‌هایی مثل تعداد خطوط از مدار خارج شده و یا میزان کل بار از دست رفته حین وقوع سانحه تا اتمام روند بازیابی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین از طریق تحلیل حساسیت، سنجشی از نحوه اثرگذاری المان‌های مختلف شبکه نظیر زمان لازم برای تعمیر و تعویض تجهیزات آسیب‌دیده و نیز المان‌های مربوط به سانحه طبیعی نظیر سرعت وقوع طوفان، ارائه شده است.

۱-۶- روش‌های پیشنهادی برای بهبود تاب‌آوری سیستم قدرت

روند مطالعات انجام شده:

چهارچوب تاب‌آوری شبکه که در مراجع ارائه شده است شامل دو ساختار معمول ارزیابی و بهبود می‌شود. در فرآیند ارزیابی، اطلاعات شبکه و اطلاعات پدیده‌ی نادر و مخربی که شبکه را تهدید می‌کند، ضروری هستند. هر اقدامی در راستای بهبود ارزیابی تاب‌آوری سیستم قدرت اعم از بهبود وضعیت پیش‌بینی‌های پدیده‌های طبیعی، مدل‌سازی دقیق‌تر آسیب‌پذیری تجهیزات شبکه در برابر پدیده‌های نادر و مخرب، بهبود شبیه‌سازی سیستم قدرت یکپارچه در مواجهه با پدیده نادر و مخرب و غیره، به صورت غیر مستقیم منجر به بهبود تاب‌آوری خواهد شد. هدف اجرای مرحله ششم مطابق عنوان آن، ارائه روش‌های مستقیم بهبود تاب‌آوری شبکه بود که می‌توانند با توجه به شاخص‌های تاب‌آوری و همراه با تحلیل اقتصادی و مشارکت ذینفعان، در بخش‌های فیزیکی یا بهره‌برداری شبکه پیاده‌سازی شوند.

تعریف واحد انتخاب شده برای تاب‌آوری که در گزارش مرحله دوم این پروژه مطرح شد به این صورت بود که تاب‌آوری، توانایی سیستم در انطباق‌پذیری (در مواجهه با حادثه نوعی)، جذب (کاهش اثر خارجی) و بازیابی سریع شبکه (بر مبنای اولویت) در مقابله با حوادث طبیعی و یا اقدامات مخرب انسانی است. بنا به این تعریف، در این گزارش روش‌های بهبود تاب‌آوری در بخش انتقال و فوق توزیع به همین ترتیب در سه مشخصه انطباق‌پذیری (پیشگیری بلندمدت)، جذب (پیشگیری کوتاه‌مدت و اقدامات لازم حین وقوع پدیده با هدف تخریب کمتر) و بازیابی سریع (پس از وقوع پدیده) ارائه و مورد بحث و بررسی قرار گرفتند. همچنین بهبود اشراف بر وضعیت یا هوشیاری وضعیتی نیروی انسانی که به مجموعه‌ای از اقدامات قبل، حین و بعد از وقوع پدیده اشاره می‌کند و تاثیر بسزایی در بهبود تاب‌آوری سیستم‌های قدرت دارد، به عنوان بخش پایانی این مرحله از پروژه بررسی شد.

نتایج به دست آمده:

- پیاده‌سازی استراتژی‌های بلندمدت بهبود تاب‌آوری از جمله افزونگی، زمینی کردن خطوط، تغییر مکان پست‌ها و مدیریت پوشش گیاهی و غیره قابلیت شبکه را بالا می‌برند اما نیازمند سرمایه‌گذاری‌های گسترده هستند. از طرف دیگر، شبکه‌ای که آسیب‌پذیر است ممکن است به سبب خرابی‌های رخ داده خسارت‌های فاجعه‌بار اقتصادی متحمل شود.

بنابراین انتخاب بهینه استراتژی‌ها نیازمند تحلیل‌های هزینه/فایده است. علاوه بر تحلیل هزینه/فایده، فیدرهای شبکه باید بر مبنای تأثیرگذاری در تاب‌آوری اولویت‌بندی شوند که نیازمند دستورالعمل‌های جدید است.

• در حوزه مشخصه جذب اقدامات مختلفی از جمله بهره‌برداری بر مبنای اولویت، برنامه‌ریزی‌های پیش‌اقدامانه مرتبط با ریزش‌بکه‌ها و طرح‌هایی از جمله جزیره سازی عمدی یا کنترل‌شده بررسی شدند. بهترین عملکرد در این حوزه این است که پس از تعیین علت اصلی اختلال، برنامه اقدامات بهره‌برداری از جمله حذف بار، توزیع مجدد بار و بازآرایی یا تغییر توپولوژی شبکه مطابق آن به‌روز شود. اگر آسیب‌ها از طریق ذخیره سیستم قابل تحمل بود اقدامات فوری شامل حذف بار، کلیدزنی و بازآرایی و افزایش توان اکتیو تولیدی ژنراتورها (توزیع مجدد بار) به کار گرفته می‌شوند که البته اگر این اقدامات به صورت ترکیبی و بهینه انجام گیرند تأثیرگذاری بیشتر و نتیجه بهتری را در پی دارند. در غیر این صورت وجود برنامه‌های دیگری نظیر برنامه‌های کنترلی و حفاظتی وسیع به منظور جزیره سازی‌های دفاعی و کنترل‌شده ضروری است.

• سومین حوزه مربوط به عملیات بازیابی بود. نقش ژنراتورهای بلک استارت در تاب‌آوری تشریح گردید و مشخص شد ریزش‌بکه‌ها نیز می‌توانند به عنوان منابع بلک استارت عمل کنند. اینکه ریزش‌بکه‌ها به حالت جزیره‌ای تبدیل گردند تا بارهای بحرانی تغذیه شوند و یا اکیپ‌ها به صورت علمی جانمایی گردند و به صورت بهینه خطاها را رفع کنند و همچنین ژنراتورهای اضطراری و پست‌های قابل‌حمل و متحرک چه میزان می‌توانند کمک‌کننده باشند در بخش سوم گزارش مرحله ششم بررسی شد. تمامی این موارد می‌توانند منجر به بازیابی سریع‌تر سیستم گردند منتها باید برنامه‌ریزی درستی برای آن‌ها از قبل صورت گرفته باشد.

به عنوان آخرین بخش از این گزارش حوزه اشراف بر وضعیت یا هوشیاری وضعیتی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در این بخش اهمیت اشراف نیروهای انسانی به کارهای لازم به منظور بهبود تاب‌آوری توضیح داده شده و با توجه به چالش‌های پیش روی این حوزه، راهکارهای مختلف جهت بهبود آن از جمله رابط کاربری مناسب، حصول اطمینان از عملکرد صحیح نرم‌افزارها و سخت‌افزارها و غیره معرفی شدند که هر کدام می‌توانند موضوع پروژه‌ای کاربردی برای صنعت برق ایران باشند.

۷-۱- ارزیابی امکان توسعه‌ی نرم‌افزار مرتبط با مطالعات تاب‌آوری

روند مطالعات انجام شده:

عنوان این بخش از گزارش ارزیابی امکان توسعه‌ی نرم‌افزار مرتبط با مطالعات تاب‌آوری سیستم قدرت است. بر طبق این عنوان جهت ارزیابی امکان توسعه‌ی نرم‌افزار این بخش از گزارش در دو فصل با عناوین زیر ارائه می‌گردد.

- بررسی اطلاعات و پایگاه‌های داده موردنیاز جهت به‌کارگیری در مدل‌سازی و محاسبات

- بررسی روند انجام محاسبات موردنیاز و ارائه الگوریتم برای به‌کارگیری در نرم‌افزار

در فصل اول این گزارش به بررسی پایگاه‌های داده موردنیاز جهت تحلیل تاب‌آوری پرداخته شده است. صنعت برق باید داده‌های مربوط به نرخ خرابی تجهیزات، مدت زمان بازیابی شبکه و تأثیر خاموشی بر روی مشترکین را جمع‌آوری می‌نماید. هدف اصلی از جمع‌آوری این اطلاعات مدیریت خاموشی در سیستم قدرت می‌باشد. به عنوان نمونه‌ای از داده‌های مربوط به نرخ خرابی و بازیابی شبکه می‌توان به نوع خطا، محل وقوع خطا، محل جغرافیایی شبکه‌ای که در آن خطا رخ داده است، مدت زمان بازیابی، نوع تجهیزات حفاظتی، تعداد مشترکین دچار خاموشی اشاره نمود.

در فصل دوم روند مدل‌سازی و تحلیل تاب‌آوری بر طبق تحقیقات پیشین مورد بررسی قرار گرفته است. منظور از ارائه یک مدل این است که بتوان پارامترها و متغیرهای مختلف وابسته به تاب‌آوری را به هم مرتبط نمود. مدل‌های مختلفی ارائه شده است که توانسته‌اند برخی از این پارامترها را پوشش دهد.

برای ارائه یک مدل مناسب سه چالش اصلی وجود دارد. مدل‌سازی، آنالیز داده و اندازه‌گیری تاب‌آوری. در بخش مدل‌سازی به بررسی چگونگی ارائه یک مدل مناسب ریاضی در مقیاس بزرگی از رخدادهای آب و هوایی می‌پردازد. که در این بخش از گزارش به بررسی و جمع‌بندی انواع روش‌های مدل‌سازی پرداخته شده است.

سپس برای اندازه‌گیری تاب‌آوری ابتدا باید آنالیز داده‌ای انجام داد. لذا در این بخش در مورد اینکه چه داده‌های اندازه‌گیری شده‌ای در تاب‌آوری سیستم قدرت موثر است و چه پارامترهایی براساس این داده‌های اندازه‌گیری باید پیش‌بینی و تخمین زده شود، بحث خواهد شد.

در بخش اندازه‌گیری تاب‌آوری نیز معیار و شاخص اندازه‌گیری ارائه می‌شود که بتواند مدل‌های ارائه شده و داده‌های ورودی را دربرگیرد.

سرفصل‌های به کار گرفته شده در این گزارش به شرح زیر است:

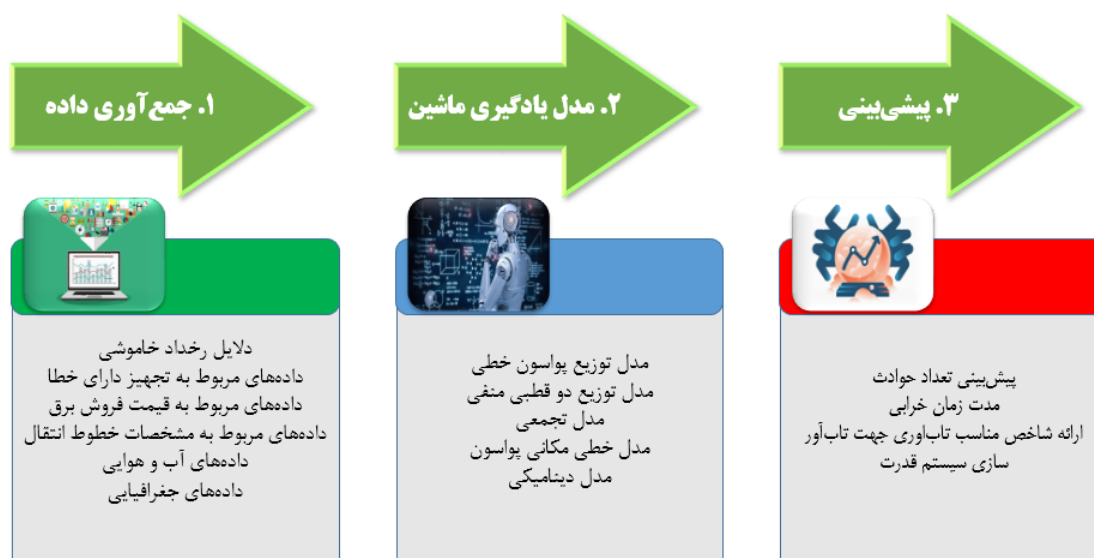
فصل اول: بررسی اطلاعات و پایگاه‌های داده موردنیاز جهت به‌کارگیری در مدل‌سازی و محاسبات

فصل دوم: بررسی روند انجام محاسبات موردنیاز و ارائه الگوریتم برای به‌کارگیری در نرم‌افزار

نتایج مورد انتظار:

نقشه‌ی تحلیل تاب‌آوری به صورت شکل ۱-۴ قابل ارائه است. بدین صورت که ابتدا باید پایگاه داده‌ای مناسب، انتخاب و در دسترس قرار گیرد. سپس براساس یک مدل مناسب داده‌های ورودی منجر به پیش‌بینی تعداد حوادث و مدت زمان خرابی می‌شوند که بر طبق مطالعات یکی از روش‌های مناسب در این مرحله مکانیزم یادگیری ماشین است. در نهایت با ارائه یک شاخص مناسب تاب‌آوری میزان تاب‌آور بودن شبکه در مقابل حوادث محاسبه می‌گردد و به بهره‌بردار سیستم و گروه برنامه‌ریزی و توسعه شرایط تاب‌آور نمودن سیستم را در سال‌های آینده گوشزد می‌نماید.

بر طبق بررسی پژوهش‌های انجام شده در حوزه مدل‌سازی، روش فرمولاسیون مسئله از طریق فرایندهای تصادفی مکانی - زمانی می‌تواند بر هم کنش‌های فرایندهای خرابی و بازیابی را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین از آنجا که چهارچوب مدل‌سازی باید مشترکین را به عنوان بخشی از جامعه در نظر بگیرد برطبق مطالعات انجام شده نقش ارائه دهندگان خدمات و سیاست‌گذاران به طور کافی مطالعه نشده است. علاوه بر این روابط بین پارامترهای آب و هوایی و خرابی‌ها در این بخش از گزارش به طور جداگانه بررسی شده است اما به طور کلی هنوز مدل‌های ارائه شده در مراجع مختلف ترکیب همه عوامل مرتبط در تحلیل تاب‌آوری را در بر نگرفته‌اند.



شکل ۱-۴: نقشه تحلیل تاب‌آوری در سیستم قدرت

بحث آنالیز داده یک فرایند بسیار مهم جهت یادگیری مدل تاب‌آوری می‌باشد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که برای شناسایی آسیب‌پذیری‌های عمومی زیرساخت‌ها و خدمات، آنالیز داده یک فرایند بسیار مهم در تحلیل تاب‌آوری است. علاوه بر این، در مسئله تاب‌آوری حجم زیادی از داده‌ها باید در اختیار قرار گیرد و از آنجا که نظریه کلان داده (Big Data) در بسیاری از زمینه‌های مهندسی در حال رونق است، مسئله تاب‌آوری می‌تواند کاربرد جدیدی از کلان داده را مطرح نماید.

ارائه شاخص تاب‌آوری و علیرغم پیشرفت‌هایی که تا به امروز انجام شده است. هنوز اقدامات عملکردی مناسبی وجود ندارد که بتواند هر سه ویژگی ذاتی تاب‌آوری را در سطح شبکه در نظر گیرد. وابستگی زمانی و مکانی نوع خرابی و بازیابی شبکه، متغیرهای آب و هوایی و اثر مشترکین، اجتماع و شرکت‌های خدمات رسانی سه ویژگی ذاتی یک فرایند تاب‌آوری در سطح شبکه قدرت هستند. براساس مطالعات پیشین از میان شاخص‌های ارائه شده جهت تاب‌آوری در سطح یک سیستم قدرت، دو شاخص استاندارد IEEE یعنی STAIFI و STAIIDI متوسط مدت زمان و تعداد خرابی‌ها را توصیف می‌کنند ولی اثر جغرافیایی یا به عبارتی اثر مکانی رخداد خرابی را در نظر نمی‌گیرد. معیارهای دینامیکی که اخیراً توسعه یافته‌اند، فرایندهای بازیابی - خرابی و تأثیر خرابی بر مشترکین را شامل می‌شود اما باز هم پارامترهای آب و هوا به خوبی مدل نشده است. لذا در زمینه ارائه یک معیار مناسب تاب‌آوری لازم است تا به سوالات زیر پاسخ داده شود.

الف) چه شاخص تاب‌آوری‌ای می‌تواند سه ویژگی ذاتی آن را شامل پارامترهای آب و هوایی، اثر غیر ثابت مکانی و زمانی خرابی و فرایند بازیابی و تأثیر آن بر مشترکین را شامل شود؟

ب) چه روش‌هایی می‌تواند منجر به ارائه چنین معیارهای تاب‌آوری در سطح سیستم شود و بتواند آب و هوا را با فرآیندهای تأثیر خرابی- بازیابی ترکیب کند؟

پ) برای ارزیابی تاب‌آوری زیرساختی به چه خدمات و داده‌های اضافی نیاز است؟

۸-۱- بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع برق در برابر زلزله در ایران و برنامه‌ریزی مدیریت بحران

مقدمه:

زیرساخت صنعت برق یکی از اساسی‌ترین زیرساخت‌ها برای داشتن عملکرد مناسب جوامع بشری است. علی‌رغم اهمیت بالای زیرساخت صنعت برق، قطعی در سرویس‌دهی به مشترکین نهایی به طور مکرر اتفاق می‌افتد. گستره این قطعی‌ها از خطاهای کوچک که طی آن فقط یک مشترک تحت تأثیر قرار می‌گیرد تا خطاهای بزرگ که میلیون‌ها مشترک را تحت تأثیر قرار می‌دهد، متغیر است. حوادث شدید نظیر پدیده‌های طبیعی یا حملات انسان‌ساخت عواملی هستند که طیف وسیعی از مشترکین را تحت تأثیر قرار می‌دهند. ایالات متحده آمریکا ۶۵ میلیارد دلار به منظور تعمیر خسارات ناشی از طوفان سندی در نیویورک صرف کرده است. در زلزله ژاپن در سال ۲۰۱۱، برق بیش از ۴ میلیون مشترک به مدت ۷ تا ۹ روز قطع گردید. گردباد سال ۲۰۱۶ در چین، دو خط انتقال ۵۰۰ کیلوولت، چهار خط ۲۲۰ کیلوولت، ۸ خط انتقال ۱۱۰ کیلوولت را از مدار خارج کرد که منجر به قطع برق ۱۳۵ هزار مشترک گردید. حمله به پست‌های انتقال کالیفرنیا در سال ۲۰۱۳ نیز منجر به خسارتی بیش از ۱۵ میلیون دلار گردید. همچنین، انتظار می‌رود شمار این حوادث شدید روز به روز افزایش یابد.

در همین راستا، محققان به‌تازگی به مفهوم تاب‌آوری توجه نموده‌اند که به معنای ایستادگی در برابر پدیده‌های طبیعی شدید و بازگشت سریع از شرایط نامطلوب پس از حادثه است. بیشتر قطعی‌های مشترکین در بخش توزیع اتفاق می‌افتد. بنابراین، باید اقداماتی در نظر گرفته شود تا با بالا بردن تاب‌آوری شبکه توزیع برق از خسارت‌های چنین حوادثی در آینده پیشگیری شود. در این حالت، تاب‌آوری سیستم‌های توزیع برق به دلیل آنکه مشترکین به صورت مستقیم با سیستم توزیع در ارتباط هستند و خرابی آن تأثیرات اجتماعی به همراه دارد، یکی از نگرانی‌های شرکت‌های توزیع برق است.

یکی از مخاطرات طبیعی با احتمال وقوع کم و تأثیر زیاد در ایران، زلزله است. فلات ایران جز لرزه‌خیزترین مناطق جهان است و در کمربند کوه‌زایی آلپ-همالیا واقع شده است. این فلات از یک سمت تحت تأثیر حرکات کوه‌زایی آلپ و از سمت دیگر تحت تنش‌های دائمی صفحه عربستان قرار دارد. این شرایط موجب به هم خوردن تعادل پوسته ایران می‌گردد و اثر آن به صورت جابجایی در طول گسل‌ها و بروز زمین‌لرزه نمایان می‌شود. بنابراین، با توجه به اثرگذاری

بالای حوادث غیرمترقبه مانند زلزله، ضرورت انجام مطالعات تاب‌آوری شبکه توزیع برق روز به روز بیشتر می‌شود. بنابراین، هدف از انجام این طرح انجام مطالعاتی در راستای بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع برق در برابر زلزله است.

اهداف مطالعات:

با توجه به مطالب ذکر شده، اهداف انجام این طرح در زیر آمده است:

- شناسایی آسیب‌پذیری شبکه توزیع برق به هنگام وقوع زلزله
- تعیین روند مقاوم‌سازی شبکه توزیع برق در برابر زلزله
- شناسایی الزامات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری برای بررسی تاب‌آوری شبکه توزیع برق در برابر زلزله
- دسته‌بندی اقدامات بهبوددهنده تاب‌آوری شبکه توزیع برق در برابر زلزله
- برنامه‌ریزی مدیریت بحران: تدوین رویه بازیابی بارهای حساس نظیر مراکز نظامی و بیمارستان‌ها پس از وقوع زلزله

- بررسی تأثیر قطع شبکه گاز بر روی بازیابی سیستم توزیع برق پس از وقوع زلزله
- شبیه‌سازی تأثیر برنامه‌ریزی مدیریت بحران بر تاب‌آوری شبکه توزیع برق در یک شبکه تست نمونه

روند مطالعات:

با توجه به اینکه در بحث تاب‌آوری با حوادثی با احتمال وقوع کم ولی تأثیر زیاد مواجه هستیم، در این طرح وقوع حادثه زلزله و تأثیر آن بر شبکه توزیع برق مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش انجام کار در هر مرحله از پروژه به صورت زیر است:

- شناخت و بررسی مشخصه‌های تأثیرگذار زلزله بر شبکه‌های توزیع
- در این بخش به شناخت و بررسی مشخصه‌های تأثیرگذار زلزله بر شبکه‌های توزیع برق در کشورهای مختلف (ژاپن، چین، نیوزیلند، هائیتی و شیلی) پرداخته می‌شود. هدف این بخش علاوه بر شناسایی مشخصات مهم زلزله، بررسی خسارت‌های وارد شده به شبکه توزیع و اقدامات صورت گرفته برای بازیابی شبکه توزیع در کشورهای مختلف است.

- بررسی مشخصه‌های زلزله‌های رخ داده در ایران

در این مرحله، به شناخت و بررسی مشخصه‌های تأثیرگذار زلزله بر شبکه‌های توزیع برق در ایران (کرمان، بوشهر و کرمانشاه) پرداخته می‌شود. هدف این بخش نیز علاوه بر شناسایی مشخصات زلزله، بررسی خسارت‌های وارد شده به شبکه توزیع برق شهرهای مختلف و اقدامات صورت گرفته برای بازیابی شبکه توزیع است.

- شناسایی نحوه بررسی آسیب‌پذیری شبکه توزیع برق در برابر زلزله و تعیین روند مقاوم‌سازی شبکه توزیع

در گام اول این بخش، انواع آسیب‌پذیری شبکه برق، مدل‌های ارائه شده برای تحلیل آسیب‌پذیری شبکه برق و درنهایت چالش‌های این مدل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس، در گام دوم روش‌های کسب منحنی‌های شکنندگی تجهیزات توزیع برق به عنوان راهی برای ارزیابی آسیب‌پذیری و ریسک معرفی می‌شوند و منحنی‌های شکنندگی استخراج شده پست‌ها و خطوط توزیع در برابر زلزله شناسایی می‌شوند. درنهایت، روند مقاوم‌سازی شبکه توزیع برق برای انجام مطالعات تاب‌آوری مورد بررسی قرار می‌گیرد و مدل‌های ارائه شده در این زمینه معرفی می‌شوند.

- تعیین چارچوب ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های توزیع برق در برابر زلزله

در این گزارش، چارچوب هفت مرحله‌ای برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه برق مورد بررسی قرار گیرد که روشی جامع برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه برق در مقابل حوادث شدید است. تعیین شاخص تاب‌آوری، مشخصات تهدید، تعیین و اعمال سناریوهای خرابی، اجرا مدیریت کنشگرانه، یافتن میزان افت عملکرد سیستم، بازیابی سیستم آسیب دیده و ارزیابی سطح تاب‌آوری هفت مرحله این روش هستند. بر همین اساس، برای حادثه زلزله نیز مدلی برای ارزیابی تاب‌آوری سیستم توزیع برق معرفی می‌شود.

- بررسی روش در نظر گرفتن تأثیر قطع شبکه گاز در مطالعات تاب‌آوری شبکه‌های توزیع برق

در این بخش به تأثیر حادثه زلزله بر وابستگی بین سیستم‌های توزیع برق و گاز طبیعی پرداخته می‌شود. به همین منظور، ارتباط تجهیزات در دو سیستم برق و گاز طبیعی مشخص می‌شود و بعلاوه استراتژی‌های یکپارچه‌سازی این دو سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. درنهایت، ریزش شبکه‌های چند حامل انرژی به عنوان راه‌حلی برای بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع برق و گاز مورد بررسی قرار می‌گیرند.

- شناسایی الزامات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری به منظور ارزیابی تاب‌آوری سیستم توزیع برق

در این مرحله، به نقش آگاهی وضعیتی در حوادث شدید پرداخته می‌شود و الزامات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری برای بررسی و بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع برق مشخص می‌گردد. به علاوه، مدل سه سطحی هوشیاری وضعیتی معرفی و نقش آن در بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع بررسی می‌شود. در نهایت اقدامات بهبوددهنده هوشیاری وضعیتی در شبکه‌های توزیع برق مورد بررسی قرار می‌گیرند.

- دسته‌بندی اقدامات بهبوددهنده تاب‌آوری سیستم‌های توزیع برق در برابر زلزله

در این مرحله، به بررسی اقدامات بهبوددهنده تاب‌آوری شبکه توزیع برق در برابر حوادث شدید پرداخته می‌شود. این اقدامات از نظر زمانی به دو بخش برنامه‌ریزی بلندمدت و بهره‌برداری تقسیم می‌شوند. به علاوه، اقدامات بهبوددهنده تاب‌آوری بر حسب نحوه تأثیرگذاری در سه گروه قبل، حین و بعد از حادثه نیز می‌توانند تقسیم شوند. در نهایت، مراجع مختلف برای شناخت بیشتر اقدامات مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

- برنامه‌ریزی مدیریت بحران به منظور بازیابی سریع بارهای حساس پس از زلزله

در این مرحله، مدلی جهت بازیابی سریع بارهای حساس پس از وقوع زلزله پیشنهاد می‌شود. در این بخش از چارچوب مشخص شده در مرحله چهارم استفاده می‌شود. با توجه به فصل‌های یک و دو که در آن‌ها مشخصات مهم زلزله شناسایی شده است آسیب وارد شده به شبکه توزیع برق مدل می‌شود. در نهایت، با توجه به اقدامات شناسایی شده در مرحله هفت، برنامه‌ریزی مدیریت بحران با استفاده از منابع انرژی پراکنده و ژنراتورهای اضطراری انجام می‌شود.

- شبیه‌سازی تأثیر برنامه‌ریزی مدیریت بحران بر تاب‌آوری شبکه توزیع در یک شبکه آزمون

در این فصل، مدل پیشنهاد شده در مرحله قبلی بر روی یک شبکه تست نمونه شبیه‌سازی می‌گردد. البته، در این مدل وابستگی بین زیرساخت‌های برق و گاز طبیعی دیده نخواهد شد.

نتایج مورد انتظار:

با اجرای این طرح، تاب‌آوری سیستم‌های توزیع برق در برابر زلزله مورد مطالعه قرار می‌گیرد و با توجه به رویه‌هایی که در این پروژه تدوین می‌گردد، آسیب‌پذیری سیستم توزیع برق در برابر زلزله شناسایی شده و با استفاده از مطالعاتی که

بر روی مراحل ارزیابی تاب‌آوری سیستم توزیع برق صورت می‌گیرد، الزامات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری بررسی تاب‌آوری شبکه توزیع مشخص می‌شود. همچنین، در این پروژه مدلی تدوین می‌گردد تا بازیابی سریع بارهای حیاتی پس از وقوع حادثه زلزله صورت گیرد و به نوعی برنامه‌ریزی مدیریت بحران انجام می‌شود. درنهایت، تأثیر برنامه‌ریزی مدیریت بحران بر تاب‌آوری شبکه توزیع برق در یک شبکه تست نمونه شبیه‌سازی می‌گردد. درمجموع، دستاوردهای طرح شامل موارد زیر خواهد بود:

- بازیابی سریع بارهای حیاتی نظیر بیمارستان‌ها به منظور خدمات‌رسانی سریع به مجروحین حادثه زلزله
- تسریع عملیات نجات حادثه دیدگان زلزله با برق‌دار کردن سریع شبکه توزیع
- شناسایی الزامات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری به منظور بررسی تاب‌آوری شبکه توزیع برق
- تدوین رویه مقاوم‌سازی شبکه توزیع برق پس از شناسایی آسیب‌پذیری شبکه در برابر زلزله
- شبیه‌سازی برنامه‌ریزی مدیریت بحران بر تاب‌آوری شبکه توزیع برق در یک شبکه آزمون

۹-۱- مقاوم‌سازی شبکه‌های توزیع در برابر حادثه زلزله به منظور بهبود تاب‌آوری

نگاهی به معضلات گذشته نشان می‌دهد همواره رقابت‌های بزرگی بر سر تصاحب انرژی وجود داشته است چرا که آرامش، توسعه‌ی اقتصادی و استقلال جامعه تا حد زیادی در گرو دسترسی به منابع انرژی بوده است. یکی از مهم‌ترین انرژی‌ها، انرژی الکتریکی است. وابستگی گسترده تجهیزات رفاهی، امنیتی، اقتصادی، ارتباطی به الکتریسیته تأمین مناسب این کالا را بسیار مهم و حیاتی کرده است. شبکه‌های توزیع به عنوان آخرین حلقه‌ی اتصال صنعت برق با مصرف‌کنندگان سهم قابل توجهی در خطاها و خروج‌های رخ داده در سیستم قدرت و همچنین کیفیت توان تحویلی به مصرف‌کنندگان را برعهده دارد. گستردگی جغرافیایی و عدم وجود سیستم‌های پیشرفته پایش و کنترل در سطح شبکه‌های توزیع از عوامل اصلی طولانی شدن زمان تعمیر تجهیزات و بازیابی مشترکین در زمان وقوع خطاست.

در سال‌های اخیر حسگرهای پیشرفته، شبکه‌های مخابراتی و فناوری اطلاعات برای عملکرد بهتر و مؤثرتر شبکه‌های قدرت به کار گرفته شده‌اند. راه‌حل‌های امنیت سایبری برای زیرساخت‌های حیاتی انرژی بسیار حائز اهمیت است، در جهان امروز برای تحویل انرژی قابل اطمینان با ارتباطات بالا و با تهدیدات سایبری پیچیده‌ی رو به افزایش، اگر حدس بزنیم انرژی تحویلی به سیستم ایمن و بی‌خطر است امری غیر واقع‌بینانه است. در این میان بلایای طبیعی و اقدامات خراب کارانه انسان‌ها منجر به تهدید شبکه‌ی یکپارچه‌ی قدرت می‌شود، با توجه به وابستگی زیرساخت‌های شهری و مراکز مهم به انرژی برق، آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها نسبت به از دسترس خارج شدن شبکه‌ی برق به یکی از نگرانی‌های جهانی تبدیل شده است.

برای به حداقل رساندن هزینه‌های اقتصادی، اجتماعی و سیاسی از دسترس خارج شدن گسترده شبکه‌ی قدرت، این شبکه علاوه بر استقامت و قابلیت اطمینان، باید تاب‌آور و برگشت‌پذیر نیز باشد. از این جا است که مفهوم تاب‌آوری و برگشت‌پذیری در شبکه‌های قدرت اهمیت زیادی پیدا کرده است. مفهوم کیفیت و در دسترس‌پذیری سیستم موضوع جدیدی نیست اما تعدد بررسی‌ها به الزام وجود تاب‌آوری در سرویس‌های مهم پشتیبانی برای بارهای حساس را نشان می‌دهد.

از سوی دیگر به دلیل اینکه شبکه‌های توزیع کاملاً آسیب‌پذیر بوده و بیشتر قطعی‌های مشترکین مربوط به خرابی‌های سمت شبکه‌ی توزیع است، صنعت برق باید به جای حفاظت کامل در برابر طوفان‌ها یا حوادث غیر قابل پیش‌بینی مانند اقدامات خرابکارانه بر روی روش‌های بازیابی سریع شبکه توزیع بعد از این حوادث به منظور رسیدن به شبکه قدرت تاب‌آور تمرکز کند. تاب‌آوری می‌تواند تحت عنوان توانایی تحمل رویدادهای ناسازگار تعریف شود. طبق تعریفی که دولت بریتانیا گفته تاب‌آوری عبارت است از توانایی دارایی‌ها، شبکه‌ها و سیستم‌ها برای پیش‌بینی، جذب، تطبیق، پیدا کردن و یا بازیابی سریع از رویداد مختل‌کننده. در چارچوب تعریف تاب‌آوری هم انتقال و هم توزیع با هم در نظر گرفته می‌شوند. به علت اتصال تعداد زیادی از منابع توزیع و ریزشبکه‌ها در آینده، سیستم توزیع نیاز بیشتری به توجه به این مورد دارد. این که شبکه‌ی قدرت بتواند بعد از هر قطعی عمدی یا غیر عمدی با حداقل آسیب، بازیابی شود امری حیاتی است. در راستای رسیدن به این مهم در سال‌های اخیر تحقیقات و ایده پردازی‌هایی برای افزایش تاب‌آوری و برگشت‌پذیری صورت گرفته است. این گزارش قصد دارد نه تنها قدمی رو به جلو در روشن کردن مفهوم تاب‌آوری بردارد، بلکه به دنبال ارائه روشی جدید فکری در بهره‌برداری شبکه خصوصاً شبکه‌های توزیع هنگام اختلالات غیرمنتظره است. موارد زیر مشارکت این گزارش در مبحث تاب‌آوری است:

(۱) تعاریف تاب‌آوری شبکه برق در نشریات همیشه به هم نزدیک نیست. این گزارش رویکردی جمع‌بندی شده برای تعریف تاب‌آوری سیستم قدرت را ارائه می‌دهد. این گزارش مروری از تعاریف تاب‌آوری و مفاهیمی از رشته‌های مرتبط را ارائه کرده است تا تعریفی کامل و اساسی از تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت، به دست آورد.

(۲) قطع سرویس در سیستم‌های انتقال به خوبی مطالعه شده‌اند اما در سیستم‌های توزیع این گونه نیست. قطعی سرویس در سیستم‌های توزیع در سال‌های اخیر افزایش داشته است این افزایش به خاطر فرسودگی شبکه و حوادث طبیعی پی در پی است. رشد اندازه منابع انرژی پراکنده، شبکه را دینامیکی‌تر و پیچیده‌تر کرده است؛ بنابراین ارتباط میان اصطلاحات تاب‌آوری، قابلیت اطمینان و پایداری سیستم‌های قدرت نیازمند اتصالات دقیق‌تری است. این گزارش چارچوبی زمان محور برای تعریف تاب‌آوری در حوادث شدید ارائه می‌کند که آن را کاملاً از مفاهیمی مانند قابلیت اطمینان که با میانگین اختلالات پی در پی، سرو کار دارد، متمایز می‌کند.

۳) اصطلاحات استقامت و تاب‌آوری گاهی به جای یکدیگر استفاده می‌شوند. مسلم است که این دو متفاوت و گاهی ناسازگار با یکدیگر هستند. تاب‌آوری، انعطاف‌پذیری و بقا در مواجهه با حوادث غیرمنتظره شدید را به هم وابسته می‌کند در حالیکه استقامت، بر ایستادگی در برابر تغییر دلالت دارد. این تحقیق تفاوت میان این دو مفهوم در سیستم‌های قدرت را تبیین می‌کند.

۴) این گزارش تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت را تعریف و مروری بر مفاهیم مرتبط کلیدی شامل استقامت، خطرات، آسیب‌پذیری، ریسک‌ها، ظرفیت و شدت با تمرکز بر سیستم‌های توزیع قدرت را فراهم کرده است. یکی از هدف‌های گزارش روشن کردن شباهت‌ها و تفاوت‌ها میان این مفاهیم است. به‌ویژه استقامت، کلمه‌ای که مکرراً اشتباه استفاده شده در صورتی که معنای مهم و مشخصی در زمینه حالات بهره‌برداری سیستم قدرت دارد. این ملاحظات تعریفی، مبنایی برای بحث در مورد تهدیدات فیزیکی و سایبری در سیستم‌های قدرت و اقدامات ممکن برای کاهش این تهدیدات با یک زیرساخت تاب‌آور را فراهم می‌آورد.

۵) در این گزارش روش‌های ارزیابی تاب‌آوری، آسیب‌پذیری‌های شبکه قدرت و همچنین راهکارهای افزایش تاب‌آوری شبکه قدرت نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

جمع‌بندی:

طراحی زیرساخت‌های برقی که در برابر تهدیدات شناخته شده و قابل پیش‌بینی قابل اعتماد باشد و در مقابل حوادثی با تأثیر بالا و احتمال کم تاب‌آور باشد بسیار چالش‌برانگیز است. برای رسیدن به این هدف، ما اول نیاز به درک عمیق اینکه تاب‌آوری چه هست داریم. در دهه گذشته، اهمیت مفهوم تاب‌آوری در بین محققان و متخصصان به خوبی شناخته شده است. تلاش‌ها برای اندازه‌گیری تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی اختصاص یافته است، اما چالش‌ها هنوز هم وجود دارند.

- در این تحقیق چارچوب مفهومی از تاب‌آوری، نه تنها در سیستم قدرت بلکه در حوزه‌های دیگر تاب‌آوری بررسی گردید. سپس، چندین تعریف از تاب‌آوری در سیستم قدرت ارائه شد که نبود یک تعریف واحد مورد قبول از تاب‌آوری را ثابت کرد.

- سیستم‌های قابل اعتماد نمی‌توانند از حوادث با احتمال کم و تأثیرگذاری بالا محافظت کنند و در هنگام وقوع حوادثی با مقیاس بزرگ ممکن است منجر به خاموشی‌های آبخاری و متعاقباً خاموشی گسترده در سیستم گردد. تفاوت‌های مفهومی شاخص‌های شناخته شده نظیر قابلیت اطمینان، ریسک و امنیت بررسی شدند و روش‌های ارزیابی تاب‌آوری به طور کامل ارائه شد.
- این تحقیق مروری بر آخرین پیشرفت‌ها در زمینه تأثیر حوادث طبیعی بر سیستم‌های قدرت داشته است، اینکه چطور فناوری‌های پیشرفته شبکه هوشمند می‌توانند برای بهبود تاب‌آوری شبکه مورد استفاده قرار گیرد. به سبب پیچیده بودن، این مسئله فناوری‌های بین رشته‌ای مانند آمار، هواشناسی، مهندسی برق، بهینه‌سازی، مخابرات و کنترل و همچنین سیاست‌ها و مقررات را شامل می‌شود.
- در این تحقیق روش‌هایی برای برنامه‌ریزی یک سیستم توزیع تاب‌آور با مقاوم‌سازی و تولید پراکنده برای به حداقل رساندن کل تعدیل بار در حوادث طبیعی ارائه شد.
- در این تحقیق اقدامات تقویتی تاب‌آوری مورد بحث قرار گرفتند. این اقدامات را می‌توان به دو دسته کوتاه مدت، برای مثال قبل، حین و بعد از شرایط آب و هوای اضطراری و بلند مدت برای مقاوم‌سازی و سازگاری با شرایط آب و هوای آینده، تقسیم کرد. اقدامات کنترلی پیشگیرانه و روش‌های عملیاتی مناسب به آمادگی در برابر حوادث آب و هوایی در پیش رو کمک می‌کنند در حالیکه اقدامات اصلاحی به مدیریت مؤثر فاجعه در حال وقوع کمک می‌کند.
- در این پژوهش بحث شده است که تاب‌آوری ساختار حیاتی قدرت باید با مفهوم سیستمی از سیستم‌ها مدل‌سازی و ارزیابی شود که شامل پاسخ انسانی به عنوان بعد کلیدی آن نیز می‌شود. بر اساس این بررسی و ملاحظات پدیدار شده مرتبط، یک چارچوب تحقیق مدل‌سازی کلی بررسی شده است که کمک می‌کند تا تأثیر بلایای طبیعی بر هر سیستم قدرتی را مدل‌سازی کرد. این چارچوب عمدتاً از سه مدل تشکیل می‌شود، یعنی مدل‌های سیستم، آب و هوا و تجهیز که با یکدیگر برای به دست آوردن شاخص‌های تاب‌آوری سیستم مؤثر از آب و هوا، در ارتباط هستند.

- در این تحقیق روشی احتمالاتی برای ارزیابی و تعیین اقدامات مناسب برای افزایش تاب‌آوری سیستم‌های قدرت در مقابل حوادث مخرب بررسی شد. بخش جدایی‌ناپذیر این روش، در نظر گرفتن شکنندگی چند زمانه و چند منطقه‌ای تجهیزات سیستم قدرت در مقابل شرایط آب و هوایی شدید و با تمرکز بر مقاومت شبکه انتقال در برابر حوادث بادی شدید می‌باشد.