

بهبود تاب آوری زیرساخت وابسته به شبکه الکتریکی با استفاده از مدل گراف هندسی در مواجهه با انواع حملات

رضا غفarpور^{۱*}، فرید مؤذن^۲، سعید زمانیان^۳

۱- استادیار، ۳- کارشناسی ارشد دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران ۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران
(دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۴)

چکیده

امروزه اهمیت فعالیت مستمر زیرساخت‌های شهری بر کسی پوشیده نیست. عملکرد سیستم‌های زیرساخت غالباً در پیوستگی با یکدیگر صورت می‌پذیرد. یکی از مفاهیم مهمی که به‌طور جدی از وابستگی سیستم‌ها تأثیرپذیر است، مفهوم تاب‌آوری در برابر رخداد‌های شدید است. این مقاله به ارائه یک مدل جامع برای تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی خصوصاً شبکه الکتریکی و زیرساخت‌های وابسته آن، در مواجهه با رخداد‌های شدید و به‌طور دقیق‌تر خرابی ناشی از حملات می‌پردازد. در مدل ارائه شده، زیرساخت‌ها در قالب سه حیطه فیزیکی، انسانی و سایبری در نظر گرفته شده‌اند، که هر کدام، بر اساس خدمات قابل ارائه‌ی آن‌ها تعریف می‌گردد. این مدل‌سازی بر اساس تعریف گراف هندسی انجام می‌گیرد. از آنجا که یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های وابسته به شبکه الکتریکی که یک بار حیاتی برای آن نیز محسوب می‌شود، شبکه ارتباطی یا مخابرات است، مدل ارائه شده با لحاظ سیستم مخابراتی مورد بحث قرار می‌گیرد. این مطالعه بر عملکرد چندزمانی (multi-time) و چندحوزه‌ای (multi-domain) زیرساخت تمرکز دارد، و حالت‌های دینامیکی سیستم قدرت را در نظر می‌گیرد. در انتها به‌منظور ارزیابی روش ارائه شده، یک مطالعه عددی ارائه شده که داده‌های شبکه نمونه با استفاده از نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است.

کلیدواژه‌ها: تاب‌آوری، زیرساخت حیاتی، شبکه الکتریکی، شبکه قدرت، گراف هندسی

Resilience Improvement of Power System Dependent Infrastructure Using Geometric Graphs Models Encountering Various Attacks

R. Ghaffarpour^{1*}, F. Moazzen², S. Zamanian³

Assistant Professor Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran
(Received: 25/06/2021; Accepted: 13/02/2022)

Abstract

Nowadays, the stable operation of urban infrastructure is of a lot of importance. The operation of infrastructure systems is often dependent to each other. One of the important concepts that is seriously affected by the dependence of such systems is resilience against extreme events. This paper proposes a comprehensive model for the resilience of critical infrastructures, especially the electrical grid and its associated infrastructure, faced with the damage caused by different attacks. In this model, three aspects of infrastructure are addressed: physical, human and cyber, each of which is defined based on the services they can provide. This modeling is developed based on the definition of a geometric graph. Since one of the most important infrastructures related to the electrical network, which is also a vital load for it, is the communication network, the proposed model is discussed in terms of the telecommunication system. This study focuses on the multi-time and multi-domain performance of the infrastructure, and considers the dynamics of the power system. Finally, in order to evaluate the proposed method, a numerical study is presented in which the case study is simulated using MATLAB software.

Keywords: Resilience, Critical Infrastructure, Electric Grid, Power System, Geometric Graph.

*Corresponding Author Email: rghaffarpour@ihu.ac.ir

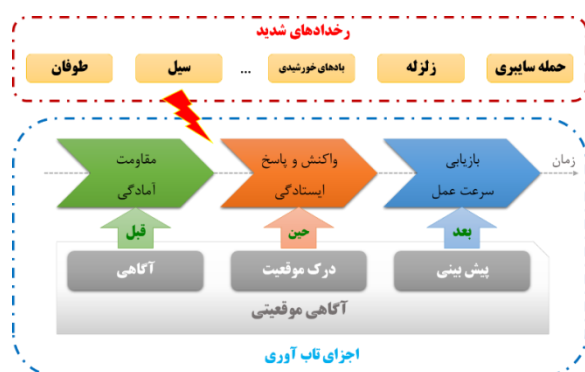
۱- مقدمه

شبکه‌های تأمین انرژی الکتریکی از زیرساخت‌های حیاتی به شمار می‌روند که تداوم فعالیت آن‌ها در شرایط بحران بسیار حائز اهمیت است. این شبکه‌ها به همراه سایر زیرساخت‌ها از جمله زیرساخت‌های مخابراتی، زیرساخت‌های حیاتی شهری را تشکیل می‌دهند و طبیعتاً به علت وجود تعاملات و وابستگی‌ها بر هم اثرگذار هستند. در سال‌های اخیر بروز رویدادهای مختلف و قطع عملکرد سیستم‌های زیرساخت، توجه زیادی را به خود جلب نموده است چرا که این زیرساخت‌ها از ضروریات تأمین نیازهای یک جامعه در هر شرایطی به شمار می‌روند. زیرساخت‌ها به‌طور کلی شامل ترکیبی از منابع و فرآیندهایی می‌گردد که از طریق سازه‌های فیزیکی و یا زیرسیستم‌های سایبری، خدمات لازم را برای جامعه فراهم می‌کنند.

بهره‌برداری از سیستم‌های زیرساخت تا حد زیادی به وضعیت محیط پیرامونی و فضای بهره‌برداری آن‌ها بستگی دارد. رخدادهای شدید مانند وقوع حملات نظامی و استفاده از سلاح‌های مخرب در سطح وسیع و حتی بلایای طبیعی، می‌توانند این فضا را دستخوش تغییر نمایند. وقوع این چنین رخدادهایی آسیب‌های اولیه در زیرساخت‌ها به بار می‌آورد. همچنین، این آسیب‌ها، با احتمال بالا با خرابی‌های ثانویه ناشی از وابستگی زیرساخت‌ها به یکدیگر، دنبال شده و تشدید می‌گردند. به‌عنوان مثال، خروج‌های آبخاری^۱ در شبکه الکتریکی می‌تواند در زمان کوتاهی رخ داده و منجر به قطعی سراسری شود. این موضوع در سال ۲۰۰۳ در شمال شرقی آمریکای شمالی رخ داده است که در آن ۱۴ ترانسفورماتور سطح انتقال در طول تنها ۵ دقیقه قطع شدند [۱، ۲]. مدل‌سازی‌های فراوانی بر اساس پخش بار AC و DC جهت پیش‌بینی و جلوگیری از این‌گونه رخدادها انجام شده است [۳، ۴].

به‌منظور کاهش تبعات ناشی از خاموشی و آسیب‌پذیری سیستم‌های قدرت در برابر این رویدادها، در چند سال گذشته مفاهیم و رویکردهای جدیدی در مطالعات سیستم قدرت ارائه شده است. یکی از این مفاهیم، مفهوم تاب‌آوری است که در صنعت برق مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است و مرز بین استحکام و قابلیت اطمینان شبکه محسوب می‌شود. لزوم توجه به بحث افزایش تاب‌آوری شبکه و تداوم تأمین برق با توجه به تبعات مختلف ناشی از خاموشی در سطوح اجتماعی، سیاسی و اقتصادی بیش از پیش احساس می‌شود. تعاریف زیادی از تاب‌آوری توسط منابع مختلف ارائه شده است [۵، ۶]. اما به‌طور کلی مفهوم تاب‌آوری این چنین تعریف شده است: ظرفیت بازگشتن از

دشواری پایدار و ادامه‌دار و توانایی ترمیم خود [۷]. این عبارت، تاب‌آوری را به اختصار مجموعه‌ای از ظرفیت‌هایی می‌داند که در شرایط دشوار به سیستم کمک می‌کند تا بتواند با حداقل خسارت و آسیب از موقعیت‌های غیرمنتظره عبور کند. حوادث از جنس تاب‌آوری سهمگین و پیش‌بینی زمان وقوع این حوادث در مدت زمان طولانی قبل از وقوع آن معمولاً مشکل است به همین دلیل مهم‌ترین نکته پس از برطرف شدن عامل ایجاد استرس این است که شبکه با سرعت به حالتی طبیعی و پایدار خود بازگردد. از این رو مفهوم تاب‌آوری به توانایی شبکه قدرت و سیستم‌های موجود برای پیش‌بینی، انطباق با یک حادثه و بازیابی سریع از آن رویداد نیز معرفی می‌شود [۸]. شکل (۱)، مفاهیم تاب‌آوری را به‌طور شماتیک نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، وقتی حوادث شدید به سیستم ضربه می‌زند، سه موضوع مقاومت و آمادگی، پاسخگویی و حفظ سیستم، و بازیابی سریع در طول زمان باید مدنظر باشد. این موارد که ناشی از مفاهیم آگاهی موقعیتی^۲ است، به ترتیب مربوط به شناخت سیستم قبل از بروز حادثه، درک وضعیت سیستم در زمان بروز حادثه، و پیش‌بینی شرایط بعد از رویداد است [۹].



شکل ۱. مفهوم تاب‌آوری در سیستم قدرت [۹]

جهت ارزیابی تاب‌آوری، می‌توان شاخص‌های عملکرد سیستم را با توجه به ویژگی‌های تحت مطالعه، تعریف نمود. شاخص‌های مختلفی مانند دسترس‌پذیری تسهیلات مهم، تعداد مشترک تأمین شده، مقدار توان یا سرویس‌های ارائه شده، و سطح فعالیت اقتصادی بیان می‌گردد. در واقع هر کدام از این شاخص‌ها، یک بعد از تاب‌آوری سیستم را نشان می‌دهند. بر اساس شکل (۲) محور افقی مراحل تاب‌آوری را نشان می‌دهد که شامل سه بخش جلوگیری^۳، دوام^۴ و بازیابی^۵ است. اگر در بازه زمانی طولانی‌تر نسبت به زمان وقوع رویداد بنگریم، بهبود و بازیابی زیرساخت نیز مراحل دیگری از تاب‌آوری محسوب می‌شوند [۱۰].

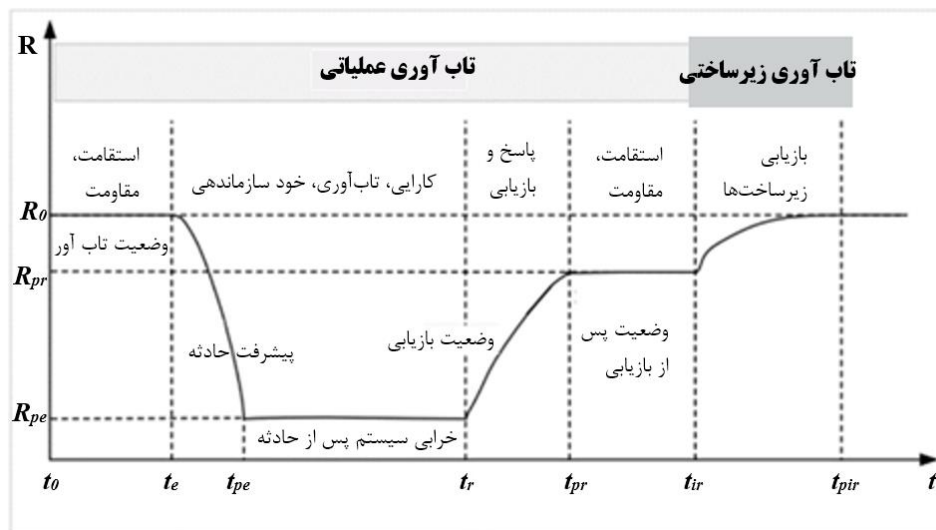
² Situational awareness

³ Avoidance

⁴ Survival

⁵ Recovery

¹ Cascading outages



شکل ۲. مفهوم تاب‌آوری در سیستم قدرت [۱۰]

۱-۱- مرور ادبیات

تاب‌آوری جنبه‌های مختلفی دارد که از آن جمله می‌توان به تاب‌آوری فیزیکی و سایبری اشاره نمود. لازم به ذکر است که تاب‌آوری سایبری با امنیت سایبری^۱ متفاوت است. در واقع امنیت سایبری تمایل به حفاظت، تشخیص و مقابله را نشان می‌دهد، در حالی که تاب‌آوری سایبری به یک مأموریت سازمانی در صورت وجود یک اختلال اشاره دارد. به طور دقیق‌تر باید گفت که در تعاریف سنتی، تهدیدات شناخته نشده و دارای عدم قطعیت در نظر گرفته نمی‌شوند [۱۱].

راهبردهایی که باید جهت بهبود تاب‌آوری سیستم به کار گرفته شود، بر اساس چهارچوب زمانی قبل، هنگام و بعد از یک اختلال تعیین می‌شود. راهبردهای اصلی بهبود تاب‌آوری شامل کاهش^۲ آسیب (ظرفیت مقاومت شبکه)، انطباق^۳ با شرایط (ظرفیت جذب شبکه) و فایق آمدن^۴ بر آسیب (ظرفیت بازیابی) است [۱۲، ۱۳]. راهبردهای مربوط به کاهش یا ظرفیت مقاومتی، بر ملاحظات اولیه مانند مدیریت ریسک، پایش زمان - واقعی، به‌روزرسانی سیستم، بهبود ساختار سازمانی جهت تصمیم‌گیری بهتر، و همچنین ایجاد فضا جهت یادگیری از تجربیات گذشته تمرکز دارند. این اقدامات شامل مواردی از جمله تقویت اجزای سیستم و استفاده از فناوری‌های جدید و غیره است [۱۲، ۱۴ و ۱۵]. در گام دوم، تطابق یا جذب، شامل طرح‌های پایش مستمر، افزایش افزونگی^۵، ایجاد تنوع و توپولوژی مناسب زیرساخت است [۱۲ و ۱۶]. گام سوم که به عنوان بازیابی نیز شناخته می‌شود، در واقع شامل بهبود سیستم پس از وقوع رخداد است و می‌تواند در

قالب اقداماتی مانند ایجاد کانال‌های ارتباطی، ایجاد هماهنگی برای بازیابی سریع، و بهبود چهارچوب تصمیم‌سازی برای تعیین راهبردهای مناسب جهت بازیابی، صورت پذیرد. دو گام اول در زمانی که منابع به قدر کافی وجود دارد، در اولویت هستند اما برای بهبود تاب‌آوری سیستم‌های دارای محدودیت منابع، بازیابی از اولویت برخوردار خواهد بود [۱۲]. این مقاله، گام اول یا کاهش آسیب را به عنوان راهبردی برای بهبود تاب‌آوری مورد بررسی قرار می‌دهد. راهبردهای بهبود تاب‌آوری از طراحی تا مدیریت سیستم را در بر می‌گیرد و همان‌طور که بیان شد، علاوه بر نوع زیرساخت، چهارچوب زمانی نقش مهمی در پیاده‌سازی راهبردها در کاهش آسیب (قبل از رویداد)، و افزایش قابلیت بازیابی (در حین و پس از رویداد) خواهد داشت. راهبردهای مناسب برای زیرساخت‌های مختلف در بازه‌های زمانی کوتاه تا بلندمدت بیان شده است [۱۷]. از منظر طراحی و حفاظت، افزونگی شبکه رایج‌ترین راهبرد به‌منظور افزایش تاب‌آوری است. البته برای زیرساخت‌های سایبری، حفاظت لایه‌ای راهبرد مناسب‌تری خواهد بود. راهبردهای مدیریتی معمولاً بر هماهنگی و همکاری متقابل بین نهادهای مسئول عملکرد زیرساخت‌ها در شرایط بروز اختلال (قبل، حین و بعد)، تمرکز دارند [۱۷]. همچنین، در تمامی موارد اشاره شده، باید اثرات متقابل در یک زیرساخت چندسیستمی لحاظ گردد.

بسیاری از مطالعات، مفهوم تاب‌آوری و وابستگی را به‌طور مجزا بررسی نموده‌اند، اما تعداد محدودی از آن‌ها اثرات وابستگی زیرساخت را بر تاب‌آوری سیستم مدنظر داشته‌اند. به‌عنوان مثال می‌توان به مطالعه ارائه شده در [۱۸] اشاره نمود. رویکردهای مدل‌سازی وابستگی متقابل در زیرساخت‌های حیاتی، شامل رویکردهای تجربی، پویا، نظریه اقتصادی و شبکه محور هستند [۱۹]. از آنجاکه روش شبکه - محور دارای قابلیت‌های فراوانی جهت تحلیل اجزای سیستم و لحاظ ظرفیت‌های مقاومت، جذب و

¹ Cyber-security

² Mitigation

³ Adaption

⁴ Coping

⁵ Redundancy

جنبه‌های محیطی، برخی مراجع به بررسی نقش آن‌ها در آسیب‌ها و وابستگی زیرساخت پرداخته‌اند [۴۳، ۴۴]. بر خلاف تحقیقات قبلی، در تحقیق حاضر زیرساخت‌های چندگانه مورد نظر بوده‌اند و وابستگی‌های متقابل بین آنان در نظر گرفته شده است.

جهت بررسی تاب‌آوری یک زیرساخت در مواجهه با حملات، باید تعریف درستی از این تهدیدات ارائه گردد. حملات نظامی معمولاً به صورت متمرکز انجام می‌شوند، به این معنی که یک نقطه به خصوص از شبکه بیش از نقاط دیگر در معرض آسیب مستقیم قرار می‌گیرد. این حملات دارای ویژگی‌های خاص خود هستند و در یک نقطه و با شدت زیاد رخ می‌دهند، اما اثرات آن‌ها می‌تواند از طریق شبکه منتقل شود. خروج‌های آبشاری مفهومی است که برای حفظ تاب‌آوری سیستم بسیار مورد توجه است و توسط بسیاری از نویسندگان مطالعه و مدل‌سازی شده‌اند [۴۹-۴۵]. یکی از یافته‌های اصلی در این مطالعات این است که زیرساخت‌های حیاتی دارای وابستگی، بسیار بیشتر در معرض خروج‌های آبشاری هستند. علاوه بر این، از آنجاکه زیرساخت‌هایی مانند زیرساخت انرژی، اطلاعات و ارتباطات، خدمات ضروری و مختلفی را برای سایر زیرساخت‌ها فراهم می‌کنند، اثرات آبشاری غالباً بین بخشی خواهند بود.

۲-۱- نوآوری پژوهش

به‌طور خلاصه نوآوری‌های مقاله حاضر شامل موارد زیر است:

- استفاده از روش‌های تئوری گراف‌ها جهت جداسازی زیرساخت‌های به هم وابسته و تقسیم آن‌ها به سه حیطه زیرساخت.
- تحلیل و بررسی حفظ پایداری سیستم قدرت پس از مواجهه با رخداد‌های آبشاری ناشی از وقایع شدید و تغییر شرایط بهره‌برداری (با هدف تحلیل دقیق حالت مانا و گذرا، و خروج‌های آبشاری در شرایط بروز رخداد)
- در نظر گرفتن پیچیدگی محاسباتی اعمال شاخص‌های تاب‌آوری در سیستم‌های دارای چند زیرساخت
- ارائه مدل کمی شده تاب‌آوری شبکه الکتریکی با در نظر گرفتن هم‌زمان وابستگی زیرساخت‌های مرتبط

در ادامه مقاله در بخش دوم، چهارچوب مدل‌سازی مسئله ارائه شده است و در بخش سوم و چهارم به ترتیب به تعریف حوادث شدید و نادر، و محاسبه تاب‌آوری زیرساخت پرداخته شده است. پس از ارائه مدل‌سازی، یک مطالعه عددی جهت ارزیابی مدل ارائه شده است. در بخش انتهایی نتیجه‌گیری و جمع‌بندی بیان شده است.

۲- روش و چهارچوب مدل‌سازی زیرساخت وابسته

در این مقاله، از چهارچوب کلی مدل‌سازی گراف استفاده شده است، با این تفاوت که حیطه‌های متفاوت در خدمت‌رسانی

بازیابی است، از این رویکرد در این مقاله استفاده شده است. رویکرد شبکه - محور در ارزیابی توانایی شبکه در مواجهه با رویدادهایی منجر به پیامدهای قابل توجه، بهبود ظرفیت جذب و تحلیل شبکه جهت بازیابی بهتر، بسیار مؤثر عمل می‌کنند [۲۰]. بسیاری از رویکردهای شبکه‌ای بر ویژگی‌ها و پارامترهای شبکه تأکید دارند که از آن جمله می‌توان به [۲۱] اشاره نمود که به تحلیل پایداری اجزا پرداخته است. با این حال این‌گونه روش‌ها نیاز به حجم بسیار وسیعی از داده‌ها برای تولید گراف شبکه خواهند داشت و به همین دلیل مدل‌های ارائه شده معمولاً بر مدل‌سازی تعداد محدودی از سیستم‌ها تمرکز خواهند داشت [۲۲، ۲۳]. در این مقاله، روش ارائه شده به‌منظور مدل‌سازی سیستم‌های مختلف زیرساخت تعمیر داده شده است. لازم به ذکر است که ویژگی منحصر به فرد مدل‌سازی با استفاده از شبکه بی‌زین^۱ (BN)، قابلیت ورود اطلاعات جدید در هر نقطه و به‌روزرسانی سیستم است.

از طرفی ارزیابی رویکردهای مدل‌سازی در یک چهارچوب واحد توسط طراحان شهری، سیاست‌گذاران، مدیران زیرساخت‌های مختلف و سایر ذی‌نفعان بسیار ضروری به نظر می‌رسد. ارزیابی زیرساخت‌ها با استفاده از شاخص‌های مختلفی قابل انجام است که می‌تواند شامل شاخص‌های عملکردی، فنی و شبکه‌ای برای زیرساخت‌های مختلف باشد [۱۷].

مدل‌سازی BN یا استفاده از مدل گراف، پیش از این توسط محققین در [۲۴، ۲۵] استفاده شده است. در مدل‌های قبلی BN به‌منظور تحلیل سیستم‌های کوچک دارای ۵ تا ۱۰ جزء به کار رفته است [۲۶، ۲۷]. شبکه بی‌زین جهت استفاده در سیستم‌های بزرگ‌تر نیز به کار رفته است [۲۸]. در کاربردهای دیگر BN با هدف ارزیابی قابلیت اطمینان یک الگوریتم مدل‌سازی زنجیری برای مدل‌سازی زیرساخت توسعه داده شده است [۲۹]. در کاربردی دیگر، BN جهت ارزیابی قابلیت اطمینان بر اساس توالی قطعی‌های چندگانه و ارتباط بین محدودیت‌های اجزا به کار رفته است [۳۰]. نمونه‌های دیگری از مطالعه موردی کاربرد BN جهت بررسی تاب‌آوری زیرساخت نیز وجود دارد [۳۱]. در تمام این مطالعات این‌گونه مدل‌سازی برای یک زیرساخت به کار رفته است. رویکردهای استفاده شده در دیگر مقالات نیز به انواع خاصی از زیرساخت اختصاص دارد که از آن جمله می‌توان به [۳۵-۳۲] برای زیرساخت حمل‌ونقل، [۳۶، ۳۷] برای زیرساخت انرژی برق، و [۳۸-۴۱] برای تحلیل زیرساخت چندگانه اشاره نمود.

مدل‌های مختلف مدل‌سازی وابستگی بین سیستم‌های شبکه حمل‌ونقل، برق و ارتباطات ادبیات موضوع به همراه ویژگی‌ها و شماتیک هر کدام ارائه شده است [۴۲]. به علت تأثیر قابل توجه

¹ Bayesian Network

نقاط فوق، توسط یک یال به یکدیگر متصل می‌شوند که نشان‌دهنده ارائه خدمات بین آن‌ها است. لازم به ذکر است که در واقعیت، این نقاط ممکن است لزوماً به معنای یک اتصال فیزیکی، مانند خط انتقال، نباشند. اتصال دو رأس توسط این یال‌ها در واقع نشان‌دهنده ارائه یک سرویس توسط یک رأس به رأس دیگر است.

در شبکه‌های زیرساخت، هر سرویس در شبکه دارای یک منشأ است. به عنوان مثال، در شبکه‌های برق، منابع شامل ترانسفورماتورها و به‌طور کلی اجزای فیزیکی است. منشأ خدمات، همچنین شامل نیروی انسانی مورد استفاده برای کار با سیستم و فرایندهای توسعه‌یافته برای هماهنگی فعالیت‌های آنها است. دارایی‌های غیرانسانی نیز شامل منابع مالی است که برای مثال برای تهیه سوخت یا پرداخت حقوق کارمندان استفاده می‌شود. منشأ خدمات همچنین ممکن است مربوط به سرویس‌هایی باشد که خارج از سیستم اصلی هستند و توسط سیستم‌های دیگر ارائه می‌شوند. یک مثال برای این موضوع، برنامه‌های آموزشی و به‌طور کلی، آموزش پرسنل توسط سیستم آموزشی است که می‌تواند بر عملکرد کل سیستم اثرگذار باشد. همه حیطه‌های یک سیستم با محیط فیزیکی و اجتماعی تعامل دارند. به عنوان مثال، اجزای حوزه فیزیکی تحت تأثیر شرایط آب و هوایی قرار می‌گیرند و یا تصمیمات افراد در حوزه انسانی تحت تأثیر اطلاعات در دسترس آن‌ها خواهد بود.

همان‌طور که بیان شد، تعامل بین شبکه برق و سیستم مخابراتی عمومی به عنوان یک بار اصلی برای شبکه برق، برای این مطالعه در نظر گرفته شده است. ارائه خدمات از برق به این نوع شبکه‌های ارتباطی مستقیماً برقرار است زیرا تجهیزات شبکه ارتباطی از بارهای مهم شبکه برق هستند. با این حال، هیچ سرویس مستقیمی از این شبکه‌های مخابراتی به شبکه برق ارائه نمی‌شود، زیرا در این چارچوب مدل‌سازی، این شبکه‌های مخابراتی به عنوان شبکه‌های مورد استفاده عموم تعریف شده و نه به عنوان شبکه مورد استفاده سیستم قدرت. دلیل این امر این است که اجزای خانگی زیرساخت، خود بخشی از شبکه برق هستند و به‌طور خاص به حیطه سایبری آن تعلق دارند. به‌طور دقیق‌تر، در مدل پیشنهادی، شبکه برق برای فعالیت خود به خدمات ارتباطی نیاز دارد اما از آنجا که این خدمات توسط دارایی‌های خود شبکه برق ارائه می‌شوند، (همان‌طور که تقریباً در همه شبکه‌های برق واقعی این‌گونه است)، شبکه‌های الکتریکی به خدمات ارائه شده توسط شبکه‌های مخابراتی عمومی (که توسط عموم مردم استفاده می‌شود) وابسته نخواهند بود. با این وجود، همان‌طور که بیان شد، اجزای کنترلی و ارتباطاتی متعلق به حوزه سایبری سیستم قدرت، به عنوان بخشی از چارچوب پیشنهادی در نظر گرفته می‌شوند، به عنوان مثال این کار در شبکه‌های هوشمند، با تغییر در گراف مربوط به خدمات ارائه‌شده توسط

زیرساخت را نیز لحاظ کرده است. علاوه بر این تعامل سیستم قدرت با محیط عملکرد، یا همان تغییرات زمانی، در مدل‌سازی مدنظر بوده است. در این بخش ایده اصلی مدل‌سازی حیطه‌ها با استفاده از معرفی رئوس، یال‌ها و مشخصه‌های مربوطه ارائه می‌گردد. این موارد یک گراف را تشکیل می‌دهند که در واقع چهارچوب اصلی مدل‌سازی خواهد بود.

۲-۱- مدل گراف هندسی

طبق تعریف، گراف مجموعه‌ای از رأس‌ها و یال‌هایی است که بین دو رأس قرار می‌گیرند. در چهارچوب حاضر، هر رأس می‌تواند سه حالت را اختیار نماید. این سه حالت شامل منبع^۱، گیرنده^۲، و انتقال^۳ هستند، که به صورت زیر تعریف می‌شوند.

رأس منبع: رئوس منبع نشان‌دهنده نقطه ارائه‌دهنده خدمات است و متعلق به گرافی است که نمایانگر ارائه آن سرویس است. از آنجاکه خروجی یک رأس منبع سرویسی است که نیاز به ارائه خدمات دیگر به آن رأس دارد، رئوس منبع، خدمات^۴ و منابع^۵ را به سرویس دیگری تبدیل می‌کند. به عنوان مثال، یک توربین با سوخت گاز طبیعی، گاز طبیعی را که توسط شبکه توزیع گاز فراهم می‌شود، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. رئوس منبع همچنین می‌توانند بافر سرویس در سمت ورودی خود داشته باشند که سرویس معینی را در مدت زمان مشخصی ارائه می‌دهد. به عنوان مثال، یک نیروگاه با سوخت گاز طبیعی ممکن است شامل یک مخزن محلی^۶ ذخیره گاز طبیعی (بافر) باشد که در صورت از بین رفتن سرویس شبکه توزیع گاز طبیعی، می‌تواند گاز مورد نیاز توربین را برای مدتی تأمین کند.

رئوس گیرنده: رئوس گیرنده نشان‌دهنده نقطه دریافت یک سرویس است که به گراف ارائه‌دهنده آن سرویس تعلق دارند. به عنوان مثال، یک بار الکتریکی در یک سیستم قدرت یک رأس sink است.

رئوس انتقال: رئوس انتقال بدون تغییر در سرویس ارائه شده، خدمات را منتقل می‌کنند. به این معنی که خدمات دریافتی و ارائه شده توسط این نقطه یکسان هستند. این نوع رأس ممکن است در صورت توزیع خدمات مانند پخش بار شبکه الکتریکی قابل رویت باشد. اگر این‌گونه رئوس دارای بافر نباشند، می‌توانند معادل دو رأس منبع و گیرنده که به هم متصل شده‌اند فرض گردند.

¹ Source

² Sink

³ Transfer

⁴ Services

⁵ Resources

⁶ Local

مشابه هر یال در مجموعه یال‌ها، دارای مجموعه‌ای از ویژگی‌ها به نام z_j است. بدیهی است که هر یال، المان‌های مجموعه N_k را به یکدیگر متصل می‌کند. محل یال توسط z_j^0, z_j^1 مشخص می‌شود که مربوط به محل جغرافیایی رأس‌های دو سر آن است. حیطه‌های هر رأس یا یال نیز جزیی از ویژگی‌های آنان در نظر گرفته می‌شود و بنابراین اطلاعات مربوط به حیطه مربوطه را نیز شامل می‌شود. مدل کلی زیرساخت، توسط اجتماعی از گراف‌های دامنه‌ها شکل می‌گیرد [۵۰]:

$$\Psi_S = \Psi_{D_p} \cup \Psi_{D_c} \cup \Psi_{D_h} \quad (1)$$

اگر فرض کنیم، هر D_k تعداد M_k خدمت را فراهم می‌کند آنگاه برای هر حیطه فیزیکی، سایبری و انسانی داریم:

$$\Psi_{D_k} = \bigcup_{j=1}^{M_k} \Psi_{D_{k,j}} \quad (2)$$

تا اینجا، هر حیطه D_k به عنوان M_k گراف منفصل مدل می‌شود. بنابراین گراف مربوط به زیرساخت با لحاظ زمان سیستم، می‌تواند از ترکیب گراف‌های منفصل به صورت زیر مدل‌سازی شود [۵۰]:

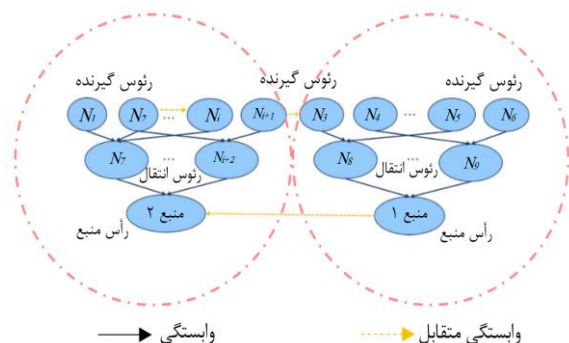
$$\Psi_S(t) = \{N_S(t), E_S(t)\} \quad (3)$$

مجموعه رئوس و یال‌ها $(N_S(t), E_S(t))$ ، در این مدل به صورت زیر تعریف می‌شوند [۵۰]:

$$N_S(t) = \bigcup_{k \in \{p,c,h\}} N_k(x_i(t), z_i(t), t) \quad (4)$$

$$E_S(t) = \bigcup_{k \in \{p,c,h\}} E_k(x_j(t), z_j^0(t), z_j^1(t), t)$$

لازم به یادآوری است که رئوس گیرنده یا sink جزئی از گراف تأمین‌کننده سرویس مربوطه هستند. شکل (۳) مدلی از گراف زیرساخت وابسته را نشان می‌دهد. نقاط گیرنده همگی دارای وابستگی مرتبه اول (مستقیم) یا مرتبه چندم (غیرمستقیم) به رئوس انتقال و منبع هستند. علاوه بر این، رئوس گیرنده می‌توانند به یک رأس گیرنده از همان زیرساخت یا زیرساخت دیگر نیز، مشابه شکل، وابستگی متقابل یا یک‌طرفه داشته باشند.



شکل ۳. گراف هندسی زیرساخت دارای وابستگی

۳- اثر حوادث شدید و نادر

حوادث طبیعی، سوانح و اقدامات خرابکارانه، حوادثی نادر و غیرقابل پیش‌بینی با احتمال وقوع کم هستند که تأثیرات شدیدی

حیطه سایبری شبکه برق، انجام می‌گیرد. با این توضیحات، ارتباط غیرمستقیم شبکه مخابراتی و شبکه قدرت همچنان در نظر گرفته خواهد شد.

در این پژوهش، وابستگی شبکه مخابراتی به شبکه برق، بر اساس سایت‌های مخابراتی نشان داده شده است. این سایت‌ها از طریق شبکه توزیع به سیستم قدرت وصل هستند و معمولاً جهت اطمینان بیشتر، خود دارای یک ذخیره‌ساز^۱ محدود مانند باتری یا دیزل ژنراتور، در نقش بافر، هستند. در مواقع خرابی در شبکه توزیع، اگر خرابی پیش از اتمام ذخایر سایت‌های مخابراتی اصلاح نگردد، ارتباط مخابراتی از دست خواهد رفت.

بنابراین، یک سیستم نیاز به فراهم شدن یک سرویس (برق) به‌منظور ارائه سرویس خود (مخابرات) را خواهد داشت. در چهارچوب ارائه شده، یک سامانه، وابسته به یک زیرساخت یا سامانه دیگر نخواهد بود، بلکه وابستگی به خدمات دریافت شده خواهد داشت. این موضوع یک وجه تمایز مهم از سایر چارچوب‌های ارائه شده است، زیرا، گرچه وابستگی سیستم به یک سرویس خاص وجود خواهد داشت، اما چنین خدماتی ممکن است توسط سیستم‌های مختلف دیگری نیز ارائه شود و یا حتی به صورت محلی (مثل تولیدات تجدیدپذیر) و بافر فراهم گردد. همان‌طور که بیان شد، بافر به عنوان یک دارایی تعریف می‌شود که سرویس مورد نیاز برای یک رأس را برای مدت محدود تأمین می‌کند. از این رو، وابستگی یک سیستم به خدمات ارائه شده از خارج می‌تواند با استفاده از بافر داخلی سرویس برقرار گردد.

در چهارچوب ارائه شده، از آنجا که یک رأس منبع، خدمات را به یکدیگر تبدیل می‌کند و رأس‌های منبع و گیرنده به‌طور هم‌زمان می‌توانند در حیطه‌های مختلف حضور داشته باشند، نیازی به نمایش چند گراف جداگانه برای ارتباطات زیرساخت‌ها نخواهد بود. این امر موجب کاهش پیچیدگی توپولوژی در نمایش گراف جغرافیایی خواهد شد. در زیربخش بعد، فرمول‌های ریاضی چهارچوب مورد بحث ارائه خواهد شد.

۲-۲- فرمول‌بندی مدل زیرساخت وابسته

در این زیربخش، فرمول‌بندی ریاضی چهارچوب مدل‌سازی زیرساخت‌های وابسته ارائه خواهد شد. حیطه‌های فیزیکی (p) ، سایبری (c) ، و انسانی (h) به صورت D_k تعریف می‌گردد که k عضوی از مجموعه $\{p,c,h\}$ است. گراف مربوطه به‌صورت ترتیب مجموعه رئوس و یال‌ها هستند. برای هر رأس i در مجموعه رئوس، x_i مجموعه مشخصات یا ویژگی‌های رأس i خواهد بود. این مشخصه‌ها می‌توانند شامل محل جغرافیایی (z_i) باشند. به‌طور

¹ Storage

اثر یک رخداد شدید یا واقعه (W) را بر اساس معادله به صورت یک نگاشت مدل نمود. W گراف‌های زیرساخت و محیط را مورد بازبینی قرار داده تا اثر رخداد را در آن‌ها اعمال نماید. این بازبینی شامل مشخصه‌های رئوس و یال‌ها، مانند کیفیت خدمت در رأس-ها، می‌شود. لازم به ذکر است که W در عمل به صورت احتمالاتی رخ می‌دهد و بنابراین به صورت احتمالاتی مدل شده است.

$$W: \mathcal{B}(\mathcal{H} \times G_{Si}) \rightarrow \mathcal{B}(\mathcal{H} \times G_{Si}) \quad (۶)$$

در معادله فوق \mathcal{B} شاخص احتمال رخداد در فضای حالت گراف - محیط است. در واقع رویداد به عنوان یک هسته‌ی^۶ قابل انتقال از شرایط بهره‌برداری عادی به شرایط وخیم، در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، می‌توان با تعریف اثرات مختلف یک حادثه شدید در شعاع مشخص، برای هر اثر یک ناحیه^۷ تعریف نمود، به این معنی که ناحیه اثر یک جنبه مشخص از رخداد را تعیین نمود. این ناحیه با تعریف شعاع اثر (r) مشخص می‌گردد. برای مثال، در یک انفجار هسته‌ای، ناحیه‌های مختلف به صورت، ناحیه فشار انفجار^۸، ناحیه تابش اشعه^۹، ناحیه حرارت^{۱۰} زیاد و غیره تعریف می‌گردد. زمان باقی‌ماندن اثر و دینامیک آن را نیز می‌توان با یک معادله به صورت زیر مدل نمود. مقادیر پارامترهای مربوط به هر حادثه در برخی مراجع تعریف شده است [۵۵، ۵۶].

$$p_z(t) = e^{-\alpha(t-tp)} \sin(qt) \quad (۷)$$

این روند مدل‌سازی محیط - جامعه یا همان فضا - حیطة که به صورت یکپارچه در نظر گرفته می‌شود، می‌تواند وابستگی مابین و درون زیرساخت‌ها را به‌طور دینامیکی در نظر بگیرد. دینامیکی در نظر گرفتن مجموعه از این حیث اهمیت دارد که محیط پیرامون، توپولوژی و مشخصه‌های اجزای گراف دارای تغییر در شرایط و زمان‌های مختلف است. علاوه بر این، حالت دینامیکی سیستم در طول زمان با اضافه کردن و یا حذف کردن یال‌ها و رئوس و یا جابه‌جایی آن‌ها در مکان، تغییر می‌کند.

با این توضیح، پس از تعریف رویداد، زمان و محدوده اثرات مختلف آن، باید گراف زیرساخت به‌روزرسانی شود. بسته به محل رئوس در نواحی تحت تأثیر، باید مشخصه^{۱۱} مربوطه را به صورت احتمالاتی به‌روزرسانی نمود. از آنجاکه گذر زمان، و همچنین فاصله‌گرفتن از محل رویداد، به تدریج از اثرات آن کم می‌کند، احتمال آسیب در نقاط داخل و خارج از ناحیه یا زون مربوطه پس از یک واقعه به صورت زیر محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است که در اینجا اثرات اولیه رخداد در نظر گرفته شده است و از اثرات

به دنبال دارند و خسارات سنگینی را بر سیستم‌های قدرت تحمیل می‌نمایند. به‌طور کلی حوادث شدید و نادر دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی هستند که آن‌ها را از خرابی و حوادث معمول در سیستم قدرت متمایز می‌سازد، فهرستی از این ویژگی‌ها در ادامه بیان می‌گردد [۹، ۵۱ و ۵۲].

- ۱- زمان وقوع و همچنین مدت زمان این حوادث با عدم قطعیت‌های زیادی همراه است که این امر آن‌ها را تقریباً غیرقابل پیش‌بینی می‌کند.
- ۲- این حوادث اغلب دارای اثرات مکانی - زمانی^۱ همبسته بر عملکرد سیستم هستند.
- ۳- این نوع حوادث می‌تواند هر جز از سیستم را مختل سازد و سبب پیچیدگی و زمان‌بر شدن روند تعمیر و بازسازی گردد.
- ۴- این حوادث ممکن است سبب خرابی‌های گسترده در زمان کوتاه شود و تعداد زیادی مصرف‌کننده برای مدت طولانی از دریافت انرژی محروم گردند.
- ۵- این حوادث عمدتاً سبب آسیب جدی به زیرساخت‌های مهم مانند سیستم‌های گاز طبیعی، شبکه ارتباطات، سیستم حمل‌ونقل و تأمین آب می‌گردند.

بر همین اساس، حوادث نادر و شدید را می‌توان به انواع مختلفی تقسیم کرد. این دسته‌بندی شامل چهار گروه اصلی است: خرابی‌های فنی آبشاری^۲، اتفاقات طبیعی شدید^۳، حمله‌های سایبری - فیزیکی^۴ و هوافضا^۵. هر کدام از این نوع حوادث دارای تعریف مشخص و عوامل تأثیرگذار منحصربه‌فرد است [۵۳، ۵۴]. در این مقاله، حوادث ناشی از حمله‌های سایبری و فیزیکی مدنظر است، با این توضیح که مدل ارائه شده، قابلیت تعمیم جهت استفاده در موارد دیگر را نیز داراست.

در مدل حاضر، حوادث شدید و نادر در قالب اثری که بر محیط بهره‌برداری زیرساخت دارند، در نظر گرفته می‌شوند. در واقع عوامل مختلف موجود در فضای پیرامون هر حیطة از زیرساخت، عملکرد و حالت زیرساخت را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند. بنابراین، شرایط محیطی در نقطه z با بردار فضای \mathcal{H} مشخص می‌شود که در طول زمان برای هر نقطه در فضای z با معادله زیر تعیین می‌گردد:

$$H(z, t) = [H_i(z, t)] \in \mathcal{H} \times \mathbb{R}^+ \quad (۵)$$

بردار محیط، در واقع شرایط بهره‌برداری اجزای زیرساخت را در موقعیت داده شده اصلاح یا به‌روزرسانی می‌کند. حال می‌توان،

^۶ Kernel

^۷ Zone

^۸ Blast Pressure

^۹ Radiation

^{۱۰} High-temperature

^{۱۱} Attribute

^۱ Spatiotemporal effects

^۲ Technical Cascading Failures

^۳ Extreme natural event

^۴ Cyber/Physical Attack

^۵ Space Weather

جغرافیایی المان‌هاست. در رابطه‌ی کلی تاب‌آوری، T_e مدت زمان رخداد تحت مطالعه است. T_U برای یک یال، مدت زمان تحویل یک سرویس مشخص توسط یک یال به رأس سینک یا گیرنده است. این مدت زمان در شرایطی در نظر گرفته می‌شود که حداقل میزان کیفیت سرویس تأمین شود یعنی شرط x_i/QS_i برقرار باشد. به عبارت دیگر T_U حداقل زمانی است که سرویس مطلوب از طریق یال منتقل می‌گردد.

$$R = f(x, z, R_v, T_e, T_U, T_B, t) \quad (۹)$$

بر اساس شاخص‌های معرفی شده برای تاب‌آوری، تاب‌آوری یال از دیدگاه رأس دریافت‌کننده به صورت زیر تعریف شده است [۵۸]:

$$R_E = \frac{T_{U,E}}{T_e} \quad (۱۰)$$

تاب‌آوری برای رئوس به‌طور مشابه به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$R_{v,i} = \frac{T_{U,vi}}{T_e} \quad (۱۱)$$

که در آن $T_{U,vi}$ زمانی است که در خلال آن، رأس مورد نظر در سطح قابل قبولی از تأمین سرویس، بهره‌برداری می‌گردد. در این شرایط $R_{Sin}=I$ (تاب‌آوری سرویس ورودی) در نظر می‌گیریم. به‌طور دقیق‌تر، در شرایطی که رأس دارای بافر باشد، R_v به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۵۸،۵۹]:

$$R_v = R_{v,i} \cdot (1 - (1 - R_{Sin}) \cdot e^{-T_{B,v}/(T_e - T_{U,Sin})}) \quad (۱۲)$$

در این فرمول $T_{B,v}$ زمان جداشدن و استقلال بافر در یک رأس، R_{Sin} تاب‌آوری سرویس ورودی و $T_{U,Sin}$ زمانی است که این سرویس در بازه T_e فراهم می‌گردد. برای رئوس گیرنده و انتقال^۵ که تنها یک یال ورودی دارند و همچنین نیاز به تأمین سرویس ورودی خارجی ندارند، $R_{Sin}=R_E$ خواهد بود. علاوه بر این $T_{U,Sin}$ برابر با $T_{U,E}$ مربوط به یال ورودی به آن است.

در صورتی که بیش از چند یال به یک رأس می‌رسند اما یک یال برای تأمین سرویس مورد نظر کافی است، ساده‌سازی زیر قابل انجام خواهد بود و R_E بر اساس محاسبه دسترسی ساختار موازی محاسبه می‌گردد که به صورت زیر به دست می‌آید:

$$R_E = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - R_{E,j}) \quad (۱۳)$$

در این رابطه که با توجه به معیارهای معرفی‌شده در [۵۹] به دست آمده‌است، N تعداد یال‌های منتهی به یک رأس است و $R_{E,j}$ تاب‌آوری هر کدام از این یال‌هاست. برای محاسبه $R_{E,j}$ با استفاده از معادله (۱۰)، $T_{U,Sin}$ ، می‌تواند با $\min_j (T_{U,E_j})$ مربوط به یال‌های

ثانویه که معلول مستقیم رخداد شدید نیستند، صرف‌نظر می‌گردد [۵۶]:

$$P_v = \begin{cases} 1, & r_v < r_{blast} \\ \frac{1}{e^{\beta(r_v - r_{blast})}}, & r_v > r_{blast} \end{cases} \quad (۸)$$

در این رابطه r_{blast} شعاع انفجار است که در واقع تعیین‌کننده ناحیه اثر کامل است. در نواحی دورتر از این شعاع، رفته‌رفته اثرات مختلف انفجار کاهش می‌یابد. β ثابت گسترش خرابی^۱ است و r_v فاصله نقطه مورد نظر از مرکز انفجار است. روش‌های مختلفی برای محاسبه ثابت گسترش خرابی ارائه شده است که معمولاً بر اساس مدل‌سازی تخریب فیزیکی و داده‌های سیستم تحت تأثیر است. این پارامتر به همراه سایر پارامترهای مورد نیاز برای شرایط مختلف در گزارش مرجع [۵۶] ارائه شده است. علاوه بر آن، بررسی احتمالاتی وقایع مختلف، مثل طوفان و تغییرات محیط پیرامون، توسط محققین صورت گرفته‌است [۵۷]. یکی از شاخص‌های قابل بررسی در خرابی‌ها، می‌تواند کسری از مشترکین باشد که سرویس مورد نظر (در اینجا توان الکتریکی) را دریافت نمی‌کنند.

۴- محاسبه تاب‌آوری زیرساخت

همان‌طور که در بخش‌های پیشین بیان شد، معیارهای تاب‌آوری برای شرایط نادر و غیرمعمول کاربرد دارند. بر اساس مدل ارائه شده، تاب‌آوری به مشخصه‌های رئوس و یال‌ها وابسته است و زمان عملکرد و عدم عملکرد آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین، معیار تاب‌آوری یک روش کمی‌سازی برای بررسی وجود یک سرویس در شرایط قطعی و اختلال را ارزیابی نموده و تعیین می‌نماید که آیا بخشی از سیستم یا کل سیستم در برابر رخدادها ایستادگی داشته و بازبایی می‌شود یا خیر. معیار تاب‌آوری بر اساس کیفیت سرویس فراهم شده^۳ (QS) در طول زمان تعریف می‌گردد. با این توضیح، زمان عملکرد^۴ معادل زمانی است که حداقل میزانی از QS فراهم گردد. این مقدار با QS_v مشخص می‌گردد که اگر به عنوان مشخصه هر المان، یال یا رأس، تعریف گردد با x_v نشان داده می‌شود.

۴-۱- تاب‌آوری زیرساخت وابسته

بنابر آنچه گفته شد، تاب‌آوری بر اساس تابعی از کمیت‌های مختلف، مشابه معادله زیر تعریف می‌شود. این کمیت‌ها شامل، تاب‌آوری درونی یک المان (R_i)، تاب‌آوری یک المان ناشی از وابستگی به اجزای دیگر (R_e)، وابستگی بافرها، و موقعیت

^۱ Damage Spread Constant

^۲ Up and Down time

^۳ Quality of Service

^۴ Uptime

^۵ Sink and transfer nodes

معادله (۱۳) به دست می‌آید. بنابراین R_v بدترین شرایط تاب‌آوری سایت مخابراتی است که در آن، به عنوان مثال، بافرهای سایت مثل دیزل ژنراتورها خالی هستند.

۴-۳- تاب‌آوری زیرساخت با لحاظ پایداری شبکه قدرت

به‌منظور محاسبه تاب‌آوری خدماتی که توسط شبکه قدرت تأمین می‌گردد، در این بخش چگونگی تغییر و تعدیل گراف حیطة فیزیکی^۲ در مواجهه با قطعی‌های^۳ ناشی از یک رخداد مخرب، توضیح داده می‌شود. این بررسی با استفاده از پخش بار^۴ به همراه ابزارهای سنجش پایداری فرکانس و ولتاژ انجام می‌پذیرد. انحرافات ولتاژ و فرکانس به وسیله چهار ابزار زیر بررسی می‌شوند:

- چک‌کننده پایداری گذرا^۵ (TSC)
- چک‌کننده خروج فرکانسی^۶ (FOC)
- چک‌کننده خروج اضافه‌بار^۷ (OOC)
- چک‌کننده خروج ولتاژی^۸ (VOC)

به محض اینکه در هر کدام از چک‌کننده‌ها، سطح انحراف به سطح مشخصی برسد، خروج یا قطعی رخ می‌دهد. در مدل گراف، این قطعی با استفاده از حذف یال‌ها و رئوس از گراف حیطة فیزیکی سیستم قدرت، که در آن‌ها انحراف مشاهده شده، مشخص می‌گردد. با توجه به زمان عدم عملکرد^۹ هر کدام از این رئوس و یال‌ها، و همچنین زمان عملکرد (بر اساس مجموع مدت رخداد)، تاب‌آوری بر اساس معادله (۱۲) قابل محاسبه است.

بر اساس مدل ارائه شده، شبکه قدرت دارای دو بخش اصلی است. بخش انتقال که خود شامل رئوس منبع بوده و شبکه توزیع که دارای رئوس گیرنده یا همان بارها است. بخش انتقال معمولاً به صورت حلقوی و بخش توزیع غالباً به صورت شعاعی^{۱۰} و مانند درخت است. بدیهی است که اجزای بخش توزیع به مراتب بیشتر از بخش انتقال است و به همین دلیل اثرات قطعی و خروج آبشاری در بخش انتقال مورد بحث قرار می‌گیرد. در اینجا گراف حیطة فیزیکی، در واقع اجزای فیزیکی مورد استفاده جهت تأمین انرژی الکتریکی را نشان می‌دهد. این گراف متشکل از دو بخش انتقال (t) و توزیع (d) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$G_p = (V_p, E_p) = (V_{pt} \cup V_{pd}, E_{pt} \cup E_{pd}) \quad (16)$$

سینک و یا انتقال جایگزین شود. $T_{B,V}$ نشان‌دهنده ظرفیت بافر سرویس ورودی است.

از طرف دیگر، تاب‌آوری رأس سینک یا انتقالی که دارای فقط یک یال ورودی برای هر خدمت یا سرویس به خصوص است، بر اساس دسترسی مجموعه‌ای از خدمات محاسبه می‌شود. در واقع فرض بر این است که تمام این خدمات برای عملکرد رأس مربوطه ضروری است. برای رئوس منبع که سرویس ورودی و خروجی متفاوت است و این تفاوت باعث ایجاد وابستگی می‌گردد، می‌توان به‌طور مشابه تحلیل نمود، چرا که بر اساس چهارچوب مدل‌سازی، سرویس‌های مختلف با گراف‌های مربوط به خود مشخص می‌گردند. با این توضیح، در شرایطی که M سرویس برای تداوم عملکرد یک رأس لازم است، محاسبه تاب‌آوری به جای معادله (۱۲)، از طریق معادله زیر انجام می‌پذیرد [۵۹]:

$$R_v = R_{v,i} \cdot \prod_{j=1}^M (1 - (1 - R_{Sim,j}) \cdot e^{-T_{B,Sim,j}/(T_e - T_{U,Sim,j})}) \quad (14)$$

در این معادله، $R_{Sim,j}$ و $T_{U,Sim,j}$ به ترتیب برابر تاب‌آوری خدمت ورودی z ام، و زمان عملکرد آن سرویس در بازه زمانی T_e است. $T_{B,Sim,j}$ نیز زمان راه‌اندازی بافر و یا استقلال بافر از رأس اصلی است. در شیوه حاضر مدل‌سازی تاب‌آوری، نسبت مشخصی از QS با توجه به سطوح ارائه شده در برخی مطالعات، در نظر گرفته شده است [۳۶، ۶۰].

۴-۲- تأمین بار شبکه الکتریکی

در این مطالعه تاب‌آوری شبکه قدرت در هنگام تأمین یک بار وابسته، یعنی سایت مخابراتی مورد توجه بوده است. باید دقت نمود که خرابی یک عامل احتمالاتی است بدین معنی که زمان عملکرد^۱ باید به صورت یک متغیر تصادفی مدنظر قرار گیرد. به‌منظور ساده‌سازی محاسبه تاب‌آوری در سایت مخابراتی، روند زیر بر اساس مطالعه محققین در [۳۶، ۵۸] در این مقاله پیشنهاد می‌شود. L_v بار مربوط به نقطه v است و N^v مجموعه مشترکینی است که توسط نقطه v تأمین می‌شوند، و n_v میزان بار هر مشترک در این نقطه است. در سناریو n ، به میزان O_v^n بار ازدست‌رفته خواهیم داشت. با این توضیحات، احتمال ازدست‌رفتن شبکه برای سایت مخابراتی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_a = 1 - n_v \frac{L_v - Q_v^i}{|N^v|} \quad (15)$$

حال بر اساس معادله (۱۲)، تاب‌آوری این سایت قابل محاسبه است. در این فرمول به جای مقدار تاب‌آوری ورودی یا R_{Sim} ، مقدار $(I-p_a)$ را قرار می‌دهیم. اثر خرابی‌های شبکه توزیع بر اساس

² Physical Domain

³ Outages

⁴ Load Flow

⁵ Transient Stability Checker

⁶ Frequency Outage Checker

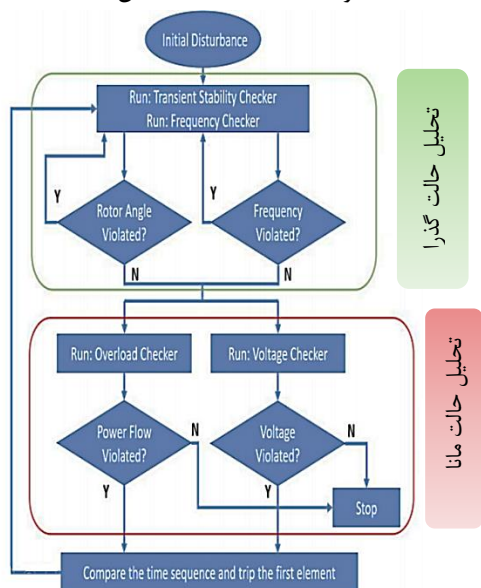
⁷ Overload Outage Checker

⁸ Voltage Outage Checker

⁹ Downtime

¹⁰ Radial

برای محاسبه تاب‌آوری و دخیل کردن مقیاس زمانی، نیاز به زمان عملکرد رله‌ها خواهیم داشت که در استانداردهایی مثل *Siemens SIPRO-TEC 5* و *IEEE C37.117* مشخص شده‌اند.



شکل ۴. روند نامی COA

۵- مطالعه عددی

در این پژوهش از نرم‌افزار متلب^۴ *2020b* به منظور شبیه‌سازی مدل ارائه شده و گراف جغرافیایی استفاده شده است. برای به‌دست‌آوردن گراف شبکه، مشخصات رئوس و یال‌ها شامل فواصل، مقادیر بار و سایر ویژگی‌های ذکر شده، به عنوان داده‌های ورودی لازم و ضروری است. با هدف اجرای تحلیل خروجی‌های آبخاری و انجام پخش بار از جعبه ابزار *PSAT*^۵ استفاده شده است. در کد اصلی فرض بر این است که یک حمله به صورت احتمالی اتفاق بیفتد. پس از آن باید حالات بعد از وقوع رخداد را بر اساس گراف شبکه تصویر نمود. در مرحله بعد، حالات گذرا و پایدار شبکه بررسی می‌گردد و بر اساس خروجی‌های آبخاری، تاب‌آوری شبکه قابل محاسبه خواهد بود.

داده‌های لازم در شبیه‌سازی، شامل مکان‌های مصارف و داده‌های شبکه قدرت و پست‌های برق به همراه سایر مشخصات مربوط به پخش بار است. بر اساس آنچه در بخش‌های پیشین نیز بیان شد، هدف بررسی تاب‌آوری رئوس سینک یا گیرنده بوده که در اینجا شبکه مخابراتی (دکل‌های مخابراتی) مدنظر است.

احتمال خرابی دکل‌ها بر اساس فاصله جغرافیایی از نزدیک‌ترین رأس انتقال مربوط به شبکه قدرت، در نظر گرفته می‌شود. از آنجاکه پست‌های برق بدون تبدیل انرژی، آن را منتقل می‌کنند، به عنوان رئوس انتقال شناخته می‌شوند و در واقع اتصال شبکه

در (16) ، V و E ، به ترتیب نشان‌دهنده گراف، رأس و یال است. دینامیک حیطه فیزیکی بین نقاط مختلف بر اساس معادلات بخش بار تعیین می‌گردد. ذکر این نکته ضروری است که تغییرات و انحرافات گذرا در نهایت می‌تواند موجب انحراف مانا نیز گردد و می‌توان گفت هر خروج آبخاری با منشأ یک رویداد گذرا اتفاق می‌افتد. این بدین معنی است که یک خطای گذرا می‌تواند منجر به قطعی‌های آبخاری شود. به منظور ارزیابی این پدیده، از ابزار ارزیابی خروجی‌های آبخاری^۱ (*COA*) مشابه شکل (۴) استفاده می‌شود که در مراجع [۶۱، ۶۲] معرفی و در مراجع [۶۵-۶۳] مدل بهبودیافته آن نیز ارائه شده است. این ابزار بر اساس اقدامات حفاظتی سیستم قدرت و بر اساس مقیاس چندزمانی توسعه داده شده است. بر این اساس، *COA* به صورت زیر انجام می‌پذیرد. بر اساس شکل (۴) پس از وقوع یک اختلال (به عنوان مثال یک خطا یا خروج)، ابتدا گذراها و انحراف فرکانس چک می‌شود. در این مطالعه اختلال در اثر یک حمله رخ می‌دهد و به معنی قطع ارتباط اجزای سیستم است. اگر انحرافی در فرکانس یا زاویه روتور مشاهده گردید، چک کردن تا زمان رفع اختلال برقرار می‌ماند، اما در صورتی که انحرافی مشاهده نشد و یا انحراف برطرف شد، ولتاژ و اضافه‌بار بررسی می‌شود و مشابه حالت قبل، اگر همچنان انحرافی وجود داشت، اولین المان تریپ خورده و مجدداً ارزیابی گذرا انجام می‌شود. این روال تا زمانی که هیچ تغییر توپولوژی در سیستم نیاز نباشد تکرار می‌گردد.

با توجه به ماهیت گذراها، مقیاس زمانی برای بررسی این پدیده محدود به چند ثانیه است. این مقیاس بسیار کوچک‌تر از پدیده‌های گذرا در سایر حیطه‌ها و خدمات تأمین شده توسط آن-ها برای شبکه قدرت است. تفاوت دیگر در این حیطه وجود بافرهای انرژی است. بنابراین می‌توان گفت در حین تحلیل گذرا در حیطه فیزیکی، سایر حیطه‌ها در شرایط مانا^۲ هستند و تغییری نمی‌کنند. پایداری گذرا و پایداری فرکانس از طریق ابزار تحلیل گذرا، و اضافه‌بار و ولتاژهای باس‌ها در مقیاس زمانی بزرگ‌تری ارزیابی می‌شوند. به طور دقیق‌تر، نتایج تحلیل گذرا، نقطه شروع تحلیل مانا است. *COA* در واقع بر اساس عملکرد *TSC*، *FOC* و *OOC* عمل می‌کند. خروجی *COA*، در صورتی که خروج عمومی^۳ رخ ندهد، مقدار مورد نیاز حذف بار و یا خروجی ژنراتور است. این حذف بار دلالت بر یک «عدم-عملکرد» برای نقاط سینک در مدل تاب‌آوری شبکه قدرت دارد. حذف بار و یا کاهش خروجی ژنراتورها، در شبکه گراف، به معنی حذف المان‌ها در گراف حیطه فیزیکی در زمان عدم عملکرد آنهاست که می‌تواند برای محاسبه تاب‌آوری استفاده شود.

^۴ MATLAB

^۵ Power System Analyzer Toolbox

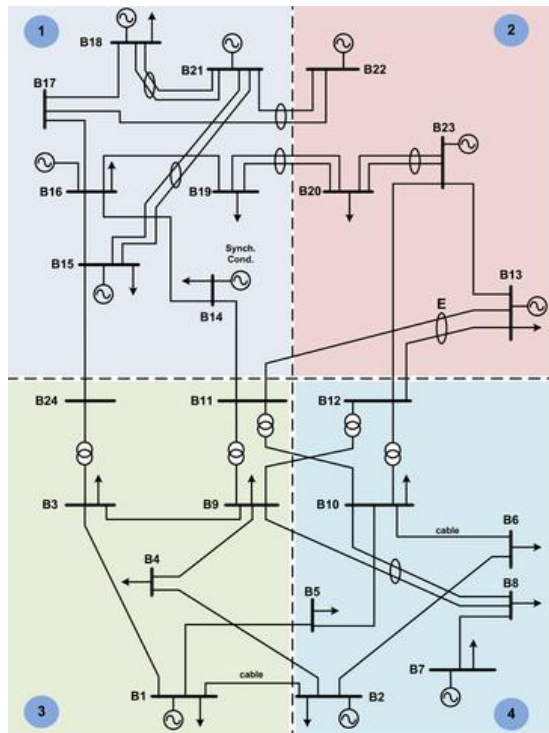
^۱ Cascading Outages Analysis

^۲ Steady State

^۳ Blackout

تحلیل جزئی شبکه قدرت لازم هستند و شامل داده‌های دقیقی از مگاوات بارها و تولیدات، مقادیر امیدانس بارها و تولیدات، و همچنین تنظیمات رله‌هاست.

ناحیه‌بندی مذکور در بخش قبل، می‌تواند به صورت شکل (۵) در نظر گرفته شود. هر کدام از این نواحی دچار خرابی‌های انسانی، سایبری، و فیزیکی می‌شوند. هدف از ارائه این شکل، بیان مفهوم نواحی تحت اثر هر رخداد در حیطة مربوطه است.



شکل ۵. ناحیه‌بندی قسمتی از شبکه

با توجه به توضیحات فوق، داده‌های فرضی و محدود برای تحلیل مدل ارائه شده در این مقاله در نظر گرفته شده است. این داده‌ها از مرجع [۶۶] اقتباس شده است. حمله موردنظر، از نوع هسته‌ای است چرا که این نوع حمله دارای نقطه صفر (GZ) است.^۴

۵-۲- احتمال خرابی زیرساخت

بنابر آنچه در مورد دوم الگوریتم فوق بیان شد، در مواجهه به یک رخداد شدید، باید احتمال خرابی در نظر گرفته شود. این احتمال به موارد مختلفی از جمله آسیب‌پذیری تجهیز و فاصله از نقطه صفر ارتباط دارد. با توجه به مورد مطالعاتی این پژوهش، منحنی شکنندگی مورد استفاده برای به‌دست‌آوردن احتمال شکست شبکه انتقال در شکل (۶) نشان داده شده است. منحنی شکنندگی بر اساس تجزیه و تحلیل آماری از خروجی‌های شبکه‌های برق انعطاف‌پذیر با توجه به دیتاست تصادفی ایجاد شده است.

مخابراتی به شبکه برق را فراهم می‌نمایند. لازم به یادآوری است که ژنراتورهای الکتریکی (گازی، بادی، و هسته‌ای) به عنوان رئوس منبع شناخته می‌شوند. معمولاً تعداد زیادی سایت مخابراتی^۱ توسط رئوس تأمین می‌گردد. به‌منظور حصول خروجی‌های قابل‌اتکا، تمام فواصل جغرافیایی مربوط به این سایت‌ها و نقطه توان مربوطه باید مشخص گردند. این فاصله در واقع فاصله زمینی است که در آن پدیده‌های طبیعی مثل رشته‌کوه‌ها و رودها باید لحاظ شوند. همچنین، به واسطه همین فواصل زیاد و گسترده‌گی، گاهی بیش از یک رأس انتقال برای اتصال به نقاط شبکه مخابراتی وجود خواهد داشت. این به این معنی است که فرمول محاسبه تاب‌آوری به‌طور غیرمستقیم تابعی از فاصله خواهد بود. بر اساس مدل ارائه شده، در مجموعه داده‌های مورد نیاز، تعداد رئوس سینک یا گیرنده به مراتب بیش از تعداد رئوس انتقال یا منبع است. بنابراین، رئوس منبع و انتقال بسیار مهم بوده چرا که خرابی در آن‌ها منجر به خروج^۲ گسترده می‌شود. از طرفی گسترده‌گی شبکه، باعث می‌شود تعداد اجزایی از سیستم که جهت عملکرد صحیح مورد نیاز هستند، افزایش پیدا کند.

بر اساس توضیحات ارائه شده، به‌طورکلی تحلیل دینامیکی بعد از رخداد^۳ بر اساس الگوریتم زیر انجام می‌شود. لازم به ذکر است که در این مرحله مدل گراف شبکه به دست آمده است.

(۱) انتخاب بازده تخریب (سلاح مورد استفاده)، و نقطه صفر آن با هدف به‌دست‌آوردن شرایط اولیه شبکه قدرت

(۲) محاسبه احتمال تخریب‌ها برای هر نقطه در گراف حیطة فیزیکی شبکه قدرت

(۳) تولید N عدد باینری تصادفی برای هر نقطه بر اساس احتمال خرابی، با هدف ایجاد N حالت از شبکه.

(۴) اجرای COA برای هر حالت شبکه، با توجه به این نکته که اگر یک باس تخریب شده، باید کل خطوط متصل را باز نمود.

(۵) تعیین و ثبت تولیدات از دست‌رفته، بار از دست‌رفته، و انحراف فرکانسی بعد از خروج آبشاری.

پس از تحلیل دینامیکی، محاسبه احتمال از دست‌رفتن توان در نقطه تحت مطالعه (بار سایت مخابراتی) با استفاده از فرمول (۱۵) و محاسبه تاب‌آوری با استفاده از (۱۲) و (۱۳)، قابل انجام است.

۵-۱- مدل زیرساخت و محیط عملکرد

به‌منظور پیاده‌سازی مدل ارائه شده، داده‌های بسیار بیشتری از ساختار توپولوژیکی نیز مورد نیاز خواهد بود. این داده‌ها جهت

¹ Cell Site

² Outages

³ Post-event

⁴ Ground Zero

جدول ۲. نرخ خرابی و سناریوهای تشکیل شده برای خرابی رتوس

نرخ خرابی نواحی				سناریو
۴	۳	۲	۱	
0.47	0.83	0.32	0.07	>0 & <10
0.69	1.21	0.34	0.52	≥ 10 & <100
1.71	2.84	1.47	0.73	≥ 100 & $<1,000$
3.62	6.52	2.93	2.03	$\geq 1,000$ & $<10,000$
3.99	4.55	1.83	3.71	$\geq 10,000$ & $<100,000$
7.67	8.46	4.38	3.44	$\geq 100,000$ & $<1,000,000$
7.49	8.02	4.44	5.94	$\geq 1,000,000$

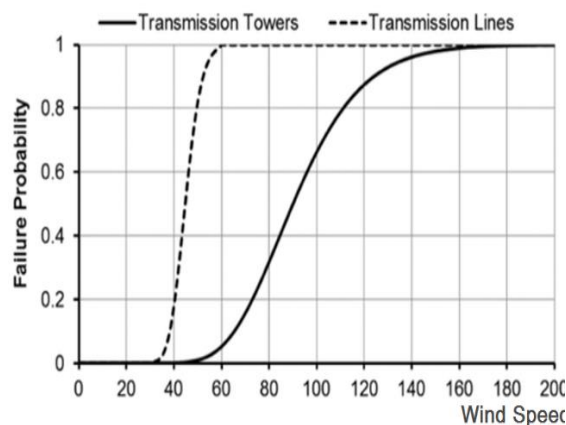
جدول ۳. نقاط شاخص بر حسب فاصله از GZ

فاصله از GZ	مختصات جغرافیایی	نقطه مورد نظر
2.1807 km	(-97.7286, 30.2697)	نقطه با حداکثر بار از دست رفته
513.0522 km	(-102.298, 31.0496)	نقطه با حداکثر تولید از دست رفته
31.366 km	(-97.4882, 30.1567)	نقطه با حداکثر انحراف فرکانس
513.0522 km	(-102.298, 31.0496)	نقطه با حداکثر عدم قطعیت در از دست رفتن تولید
31.366 km	(-97.4882, 30.1567)	نقطه با حداکثر عدم قطعیت در انحراف فرکانس

۵-۳- تحلیل نتایج

در پژوهش حاضر، تاب‌آوری شبکه بر اساس آسیب‌های وارده ناشی از رخداد شدید ارزیابی می‌شود. علاوه بر این شبکه مخابراتی به عنوان بار وابسته به شبکه قدرت مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین، در این زیربخش، بررسی وضعیت بارها، تولیدات و فرکانس شبکه در راستای مطالعات گذرا و مانا ارائه شده و در نهایت تاب‌آوری مذکور محاسبه می‌گردد.

در همین راستا، شکل (۷) نمودار بار در مقابل تولید را در هر نقطه از شبکه نشان می‌دهد. در این شکل هر نقطه نشان‌دهنده مقدار بار و یا تولید است. همچنین برخی نقاط بار دارای تولید هم‌زمان نیز هستند. بر اساس شکل (۷) داده‌هایی که در راستای محور عمودی و افقی هستند، نشان می‌دهند که نقاط محدودی دارای تولید و مصرف هم‌زمان هستند. بر همین اساس در تحلیل پیشامدها در شرایط غیرشدید، که در آن‌ها باس‌ها به‌طور تصادفی انتخاب می‌شوند، مشاهده اثرات مصرف و تولید هم‌زمان بسیار غیرمحتمل بوده است. شکل‌هایی که در ادامه می‌آیند، شاخص‌های فوق‌الذکر را بر اساس فاصله از GZ نشان می‌دهند. این نمودارها نقاط بعد از حمله را در گراف نشان می‌دهند.



شکل ۶. منحنی شکنندگی نمونه برای شبکه انتقال (خطوط و برج‌ها)

جدول ۱. داده‌های فضایی گراف جغرافیایی پس از رخداد شدید

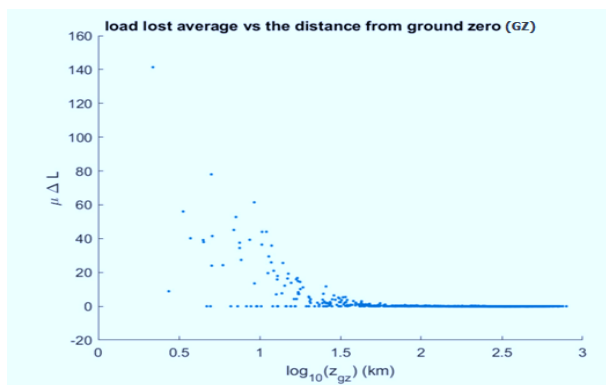
متغیر	فاصله
فاصله متوسط نقطه مورد نظر از GZ	289.0866 km
فاصله حداکثر نقطه مورد نظر از GZ	793.108 km
انحراف استاندارد نقطه مورد نظر از GZ	122.0607 km
شعاع انفجار (معادل ۰/۰۸ درجه طول جغرافیایی)	12.2840 km

داده‌های مورد استفاده در ادامه مربوط به منطقه‌ای در آمریکا (Texas) می‌باشد. از آنجاکه هدف محاسبه گراف تصادفی بعد از واقعه^۱ است، برخی داده‌های فضایی گراف جغرافیایی پس از حمله هسته‌ای به صورت جدول (۱) است. همچنین سناریوهای تشکیل شده برای خرابی رتوس گیرنده در نواحی مختلف به صورت جدول (۲) تشکیل شده است.

بر همین اساس، خروجی تحلیل COA، با فرض خروجی‌های شامل حداکثر بار از دست‌رفته در نقطه موردنظر، تولید از دست‌رفته در نقطه موردنظر و حداکثر انحراف فرکانسی، به صورت جدول (۳) خلاصه می‌گردد. لازم به ذکر است که بار از دست‌رفته به‌منظور محاسبه تاب‌آوری بر اساس روابط ارائه شده در بخش ۴ استفاده می‌شود. علاوه بر این لازم است تا میانگین و انحراف معیار مربوط به بار و همچنین تولید و انحراف فرکانس محاسبه شود. در اینجا انحراف معیار به عنوان شاخصی جهت لحاظ عدم قطعیت^۲ در نظر گرفته می‌شود. داده‌های فضایی که از چهارچوب ارائه شده به دست می‌آید، به‌منظور سازماندهی خدمات بازیابی شبکه ضروری و بسیار مفید است.

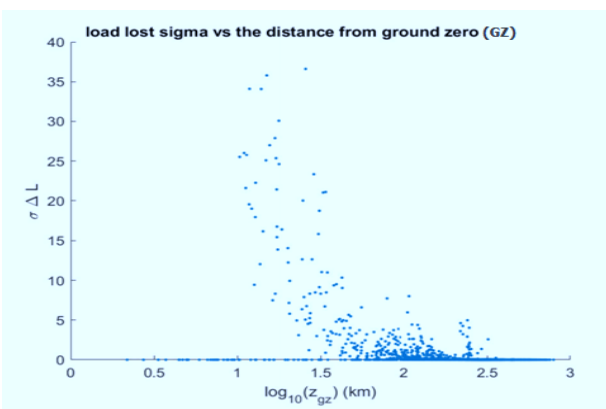
¹ Post-event

² Uncertainty



شکل ۹. متوسط تغییرات بار در هر نقطه نسبت به فاصله از نقطه صفر (GZ)

شکل (۱۰) انحراف استاندارد تغییر بار در برابر فاصله از GZ را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل عدم قطعیت‌های بسیاری در ناحیه تحت مطالعه وجود دارد. این بدین معنی است که تغییرات زیادی در خروجی‌های نهایی سناریوها در اثر خروج بار و تحلیل آبخاری به وجود می‌آید.

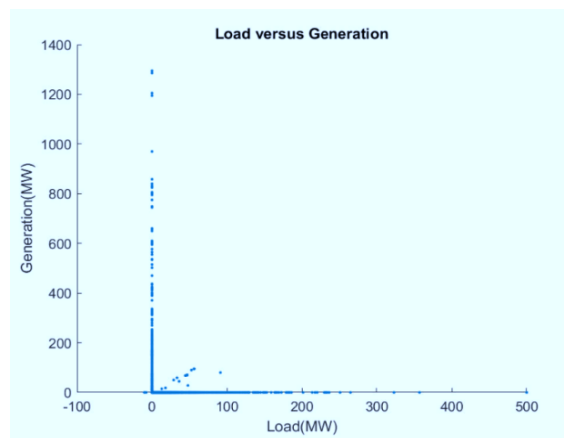


شکل ۱۰. انحراف استاندارد تغییرات بار در هر نقطه نسبت به فاصله از نقطه صفر (GZ)

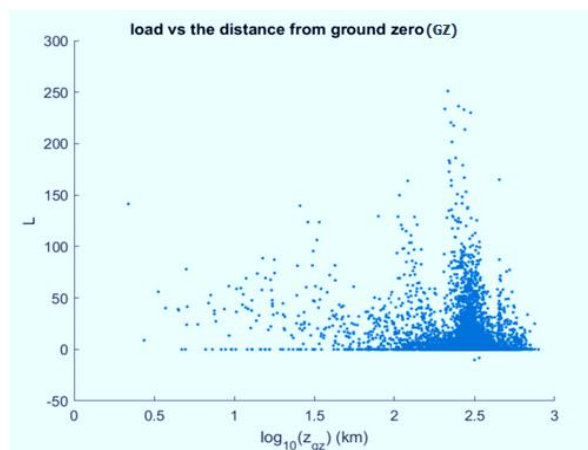
در شکل (۱۱) متوسط انحراف فرکانس بر اساس فاصله از GZ مشخص شده است. این انحراف فرکانس تا حد زیادی به تنظیمات سیستم حفاظتی حساس بوده و از آن تأثیر می‌پذیرد. تحقیقات بیشتری جهت بررسی اثرات حذف بار زیر فرکانس^۱ (UFLS) بر بار ازدست‌رفته و انحراف فرکانس مورد نیاز است. شکل (۱۲)، انحراف استاندارد تغییر فرکانس را در مقابل فاصله از GZ نشان می‌دهد. عدم قطعیت موجود در فرکانس نسبت به متوسط نوسانات، بسیار بیشتر از عدم قطعیت مشاهده شده در بار است. در شکل (۱۳) متوسط تولید ازدست‌رفته نسبت به فاصله از GZ برای هر نقطه از شبکه نشان داده شده است. بر خلاف بار و فرکانس، تولید ازدست‌رفته بسیار دورتر از محل وقوع رخداد است. این به این دلیل است که نقاط بسیار کمتری نسبت به بارها، مربوط به تولیدات هستند.

شکل (۸) فاصله نقاط بار را از GZ نشان می‌دهد. نقاطی که با احتمال یک دچار خرابی شده‌اند از مجموعه داده‌ها حذف شده و این شکل فقط نقاط مربوط به بعد از رخداد را نشان می‌دهد. این به این معنی است که نقاط نزدیک به محل رخداد به‌طور کلی از بین می‌روند و در شکل نشان داده نمی‌شوند. با این حال، در تحلیل خروجی‌ها در شبکه قدرت، حالت مانای پیش از رخداد و دینامیک‌های حین رخداد و تغییرات معادل آن‌ها مدل می‌شود. همان‌طور که پیش از این بیان شد، تغییرات ایجاد شده مثل حذف بارها برای مدل COA ارسال شده تا تحلیل گردند و اثرات آن بر شبکه ارزیابی شوند. در واقع مدل COA اختلالات اولیه را به عنوان ورودی دریافت می‌کند. خروجی این مدل در واقع میزان بار مورد نیاز برای خروج در اثر خروج‌های آبخاری در سیستم خواهد بود.

در شرایطی که نقاط آسیب‌دیده از نوع نقاط باشند، انتظار می‌رود که به دلیل اضافه تولید در شبکه، فرکانس در شبکه افزایش یابد. شکل (۹) دامنه تغییرات بار متوسط را پس از رخداد و تحلیل آبخاری بر اساس فاصله از GZ نشان می‌دهد.

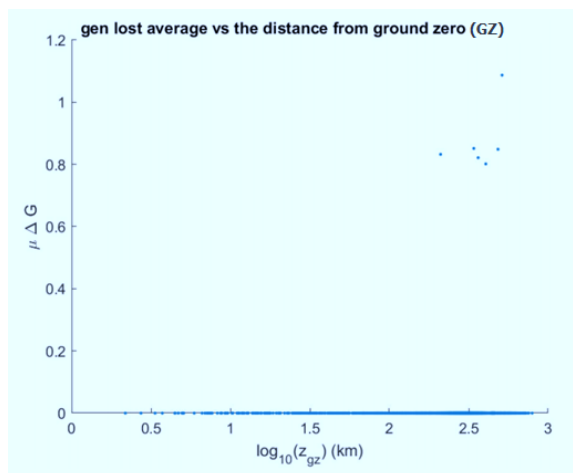


شکل ۱۱. نمودار بار-تولید در هر نقطه

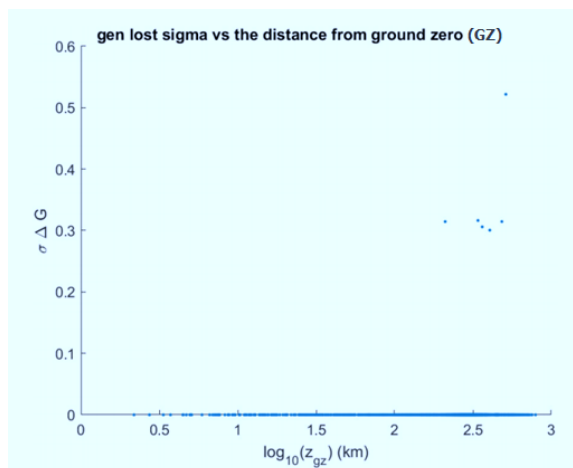


شکل ۱۲. نمودار فواصل بار از نقطه صفر (GZ)

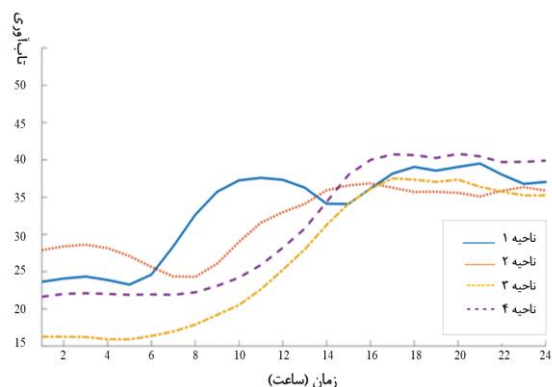
^۱ Under Frequency Load Shedding



شکل ۱۳. متوسط تولید از دست‌رفته در هر نقطه نسبت به فاصله از GZ



شکل ۱۴. انحراف استاندارد تغییرات تولید در هر نقطه نسبت به فاصله از نقطه صفر (GZ)



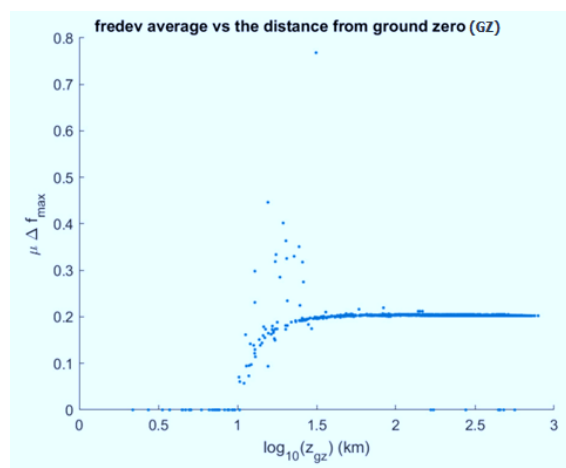
شکل ۱۵. نمودار تاب‌آوری نواحی مختلف

۶- نتیجه‌گیری

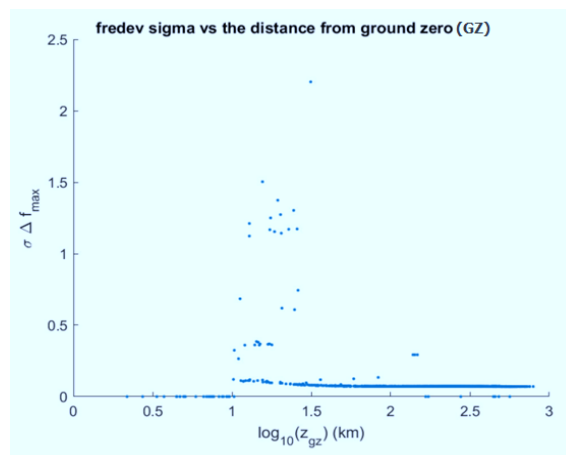
در این مقاله یک چهارچوب کلی و حیطة - محور جهت مدل‌سازی سامانه‌های زیرساخت که دارای وابستگی هستند، ارائه شده است. این حیطة‌ها شامل حیطة‌های فیزیکی، سایبری، و انسانی هستند که در قالب تأمین‌کننده خدمات مربوطه مدل می‌شوند. اگر چه چهارچوب ارائه شده، توانایی مدل‌سازی وابستگی

در واقع یک نگاه کلی بر حیطة فیزیکی و سایبری برای مشاهده اثرات رخداد شدید انجام می‌گیرد. این تغییرات در توپولوژی، و رفتار گذرا و مانا، در نهایت بر بارهای وابسته اثرگذار خواهد بود، چرا که بار سایت مخابراتی (به عنوان مثال)، به عنوان یک زیرساخت وابسته در نظر گرفته شده است. همانگونه که در شکل (۱۴) دیده می‌شود انحراف استاندارد تغییرات تولید بر اساس فاصله از GZ مشخص شده است. لازم به ذکر است که عدم قطعیت‌های موجود در تولید خارج از بحث این مقاله است.

نمودار تاب‌آوری پس از این رخداد برای شبکه نمونه در نواحی مختلف به صورت شکل (۱۵) به دست آمده است. تفاوت بازگشت به حالت عملکرد عادی یا نزدیک به آن، به علت ویژگی‌های رأس در مدل گراف و به خصوص به علت وجود یا عدم وجود بافرها است. به عنوان مثال در این شکل، در ناحیه ۱ بافر وارد عمل شده اما پس از اتمام، دوباره سطح عملکرد کاهش یافته است.



شکل ۱۱. متوسط تغییرات فرکانس در هر نقطه نسبت به فاصله از نقطه صفر (GZ)



شکل ۱۲. انحراف استاندارد تغییرات فرکانس در هر نقطه نسبت به فاصله از نقطه صفر (GZ)

- [3] Wang, L.; Qi, J.; Hu, B.; Xie, K. "A Coupled Interaction Model for Simulation and Mitigation of Interdependent Cascading Outages"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2021, 36, 4331-4342.
- [4] Khazeinasab, S. R.; Qi, J. "Resilience Analysis and Cascading Failure Modeling of Power Systems Under Extreme Temperatures"; *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 2020, 9, 1446-1457.
- [5] Panteli, M.; Mancarella, P. "Influence of Extreme Weather and Climate Change on the Resilience of Power Systems: Impacts and Possible Mitigation Strategies"; *Electr. Power Syst. Res.* 2015, 127, 259-270.
- [6] Panteli, M.; Mancarella, P.; Trakas, D. N.; Kyriakides, E.; Hatzigiorgiou, N. D. "Metrics and Quantification of Operational and Infrastructure Resilience in Power Systems"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2017, 32, 4732-4742.
- [7] Gholami, A.; Aminifar, F.; Shahidehpour, M. "Front Lines Against the Darkness: Enhancing the Resilience of the Electricity Grid Through Microgrid Facilities"; *IEEE Electr. Mag.* 2016, 4, 18-24.
- [8] Beatley, T.; Newman, P. "Biophilic Cities Are Sustainable, Resilient Cities"; *Sustainability* 2013, 5, 3328-3345.
- [9] Li, Z.; Shahidehpour, M.; Aminifar, F.; Alabdulwahab, A.; Al-Turki, Y. "Networked Microgrids for Enhancing The Power System Resilience"; *Proc. IEEE* 2017, 105, 1289-1310.
- [10] Panteli, M.; Mancarella, P. "The Grid: Stronger, Bigger, Smarter?: Presenting A Conceptual Framework of Power System Resilience"; *IEEE Power Energy Mag.* 2015, 13, 58-66.
- [11] Ganin, A. A.; Massaro, E.; Gutfraind, A.; Steen, N.; Keisler, J. M.; Kott, A.; Mangoubi, R.; Linkov, I. "Operational Resilience: Concepts, Design and Analysis"; *Sci. Rep.* 2016, 6, 1-12.
- [12] Ouyang, M.; Dueñas-Osorio, L.; Min, X. "A Three-Stage Resilience Analysis Framework for Urban Infrastructure Systems"; *Struct. Saf.* 2012, 36, 23-31.
- [13] Butler, D.; Farmani, R.; Fu, G.; Ward, S.; Diao, K.; Astarai-Imani, M. "A New Approach to Urban Water Management: Safe and Sure"; *Procedia Eng.* 2014, 89, 347-354.
- [14] Linkov, I.; Trump, B. D.; "The Science and Practice of Resilience"; Springer 2019.
- [15] Linkov, I.; Fox- Lent, C.; Read, L.; Allen, C.R.; Arnott, J.C.; Bellini, E.; Coaffee, J.; Florin, M.V.; Hatfield, K.; Hyde, I.; Hynes, W. "Tiered Approach to Resilience Assessment"; *Risk Anal.* 2018, 38, 1772-1780.
- [16] Smith, H.; Ugarelli, R.; Van Der Zouwen, M.; Allen, R.; Gormley, A. M.; Segrave, A. "Risk, Vulnerability, Resilience and Adaptive Management in the Water Sector"; *Transitions to the Urban Water Services of tomorrow*, 2013.
- [17] Mohebbi, S.; Zhang, Q.; Wells, E.C.; Zhao, T.; Nguyen, H.; Li, M.; Abdel-Mottaleb, N.; Uddin, S.; Lu, Q.; Wakhungu, M.; Wu, Z. "Cyber-Physical-Social Interdependencies And Organizational Resilience: A Review of Water, Transportation, and Cyber Infrastructure Systems and Processes"; *Sustain. Cities Soc.* 2020, 102327.
- [18] Ouyang, M.; Wang, Z. "Resilience Assessment of Interdependent Infrastructure Systems: With a Focus on Joint Restoration Modeling and Analysis"; *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2015, 141, 74-82.
- [19] Johansen, C.; Tien, I. "Probabilistic Multi-Scale Modeling of Interdependencies Between Critical Infrastructure Systems for Resilience"; *Sustain. Resilient Infrastruct.* 2018, 3, 1-15.

بین تمام زیرساخت‌ها را دارا می‌باشد، اما مدل حاضر در این مقاله با هدف اصلی وابستگی زیرساخت قدرت و شبکه مخابراتی توسعه یافته است. چهارچوب مذکور در واقع یک گراف جغرافیایی است که اساس ریاضی نمایش زیرساخت و وابستگی را بر اساس خدمات قابل ارائه آن‌ها تشکیل می‌دهد. گراف‌های مربوط به حیطه‌های مختلف، در واقع نشان‌دهنده سرویس و خدمت تحویلی از رأس منبع یا فرستنده به رأس سینک یا گیرنده است. علاوه بر این، رئوس انتقال که در واقع همان واسط‌ها هستند و به خودی خود سرویس مشخصی را ارائه نمی‌دهند، در نظر گرفته شده‌اند. از سوی دیگر، یال‌های گراف مورد بحث مشخص‌کننده‌ی فراهم کردن یک سرویس به خصوص توسط یک رأس برای رأس دیگر هستند. به بیان دیگر، نیاز به یک سرویس جهت استمرار فعالیت یک نقطه یا رأس، نشان‌دهنده‌ی وابستگی رأس مربوطه است. به‌منظور مدل‌سازی سیستم توسط گراف، باید مشخصات مربوط به هر نقطه و یال شامل مکان جغرافیایی، شاخص‌های کیفیت خدمات ارائه شده جهت برآورد زمان فعالیت و عدم فعالیت، و سایر ویژگی‌های فنی تعیین گردد. در واقع شاخص تاب‌آوری توسط همین شاخص کیفیت سرویس تعیین می‌گردد. این امر پیچیدگی محاسباتی تاب‌آوری زیرساخت‌های وابسته را تا حد قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. با این حال نیاز به داده‌های فراوان و ایجاد فهم مشترک بین بهره‌برداران زیرساخت‌های مختلف به‌منظور توسعه یک مدل منسجم و اعمال نتایج حاصل از تحلیل در بخش فنی، از چالش‌های جدی در پیاده‌سازی رویکرد حاضر می‌باشد. در این مقاله، سیستم قدرت به عنوان زیرساخت اصلی تحت مطالعه، توسط تحلیل‌های گذرا و مانا ارزیابی شده تا سطح مطلوبی از تاب‌آوری در هنگام بروز رویداد فراهم گردد. در تحقیقات آینده محققین می‌توانند عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌سازی تاب‌آوری زیرساخت وابسته را به‌طور دقیق تعیین و مدل‌سازی نمایند. همچنین با توجه به اثرات تنظیمات رله‌های حفاظتی بر تاب‌آوری سیستم قدرت، می‌توان در تحقیقات آینده نحوه تنظیم رله‌ها را با هدف بهبود تاب‌آوری مورد بررسی قرار داد. در مدل ارائه شده در این مقاله، تاب‌آوری بر مبنای سطح عملکرد مورد قبول ارزیابی شده است. این سطوح قابل‌قبول عملکرد برای زیرساخت‌ها و سیستم‌های مختلف می‌توانند به صورت بهینه تعیین گردند.

۷. مراجع‌ها

- [1] Chen, H.; Bresler, F. S.; Bryson, M. E.; Seiler, K.; Monken, J. "Toward Bulk Power System Resilience: Approaches for Regional Transmission Operators"; *IEEE Power Energy Mag.* 2020, 18, 20-30.
- [2] Panteli, M.; Trakas, D. N.; Mancarella, P.; Hatzigiorgiou, N. D. "Power Systems Resilience Assessment: Hardening and Smart Operational Enhancement Strategies"; *Proc. IEEE* 2017, 105, 1202-1213.

- Electricity Load in the United States”; *Environ. Res. Lett.* 2016, 11, 114008.
- [38] Bristow, D. N.; Bristow, M. “Recovery Planning for Resilience in Integrated Disaster Risk Management”; *IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) 2017*, 2643–2648.
- [39] Bristow, D. N.; Hay, A. H. “Graph Model for Probabilistic Resilience and Recovery Planning of Multi-Infrastructure Systems”; *J. Infrastruct. Syst.* 2017, 23, 4016039.
- [40] Seppänen, H.; Luukkala, P.; Zhang, Z.; Torkki, P.; Virrantaus, K. “Critical Infrastructure Vulnerability—A Method for Identifying the Infrastructure Service Failure Interdependencies”; *Int. J. Crit. Infrastruct. Prot.* 2018, 22, 25–38.
- [41] Oh, E. H.; Deshmukh, A.; Hastak, M. “Criticality Assessment of Lifeline Infrastructure for Enhancing Disaster Response”; *Nat. Hazards Rev.* 2013, 14, 98–107.
- [42] Banerjee, J.; Das, A.; Sen, A. “A Survey of Interdependency Models for Critical Infrastructure Networks”; *Arxiv Prepr. Arxiv1702.05407* 2017.
- [43] Berezin, Y.; Bashan, A.; Danziger, M. M.; Li, D.; Havlin, S. “Localized Attacks on Spatially Embedded Networks With Dependencies”; *Sci. Rep.* 2015, 5, 1–5.
- [44] Zhao, J.; Li, D.; Sanhedrai, H.; Cohen, R.; Havlin, S. “Spatio-Temporal Propagation of Cascading Overload Failures in Spatially Embedded Networks”; *Nat. Commun.* 2016, 7, 1–6.
- [45] Zio, E.; Sansavini, G. “Modeling Interdependent Network Systems for Identifying Cascade-Safe Operating Margins”; *IEEE Trans. Reliab.* 2011, 60, 94–101.
- [46] Panzieri, S.; Setola, R. “Failures Propagation in Critical Interdependent Infrastructures”; *Int. J. Model. Identif. Control* 2008, 3, 69–78.
- [47] Duenas-Osorio, L.; Vemuru, S. M. “Cascading Failures in Complex Infrastructure Systems”; *Struct. Saf.* 2009, 31, 157–167.
- [48] Vespignani, A. “The Fragility of Interdependency”; *Nature* 2010, 464, 984–985.
- [49] Havlin, S.; Araújo, N. A. M.; Buldyrev, S. V.; Dias, C. S.; Parshani, R.; Paul, G.; Stanley, H. E. “Catastrophic Cascade of Failures in Interdependent Networks”; In *Complex Materials in Physics and Biology 2012*, IOS Press, 311–324.
- [50] Ghaffarpour, R.; Moazzen, F.; Zamaniyan, S. “A Survey of Modeling Approaches of Interdependent Infrastructures Form Resilience Viewpoint”; *Adv. Defence Sci. & Technol* 2019, 3, 325–334 (In Persian).
- [51] Liu, C. C. “Distribution Systems: Reliable but not Resilient? [In My View]”; *IEEE Power Energy Mag.* 2015, 13, 93–96.
- [52] Wang, Y.; Chen, C.; Wang, J.; Baldick, R. “Research on Resilience of Power Systems Under Natural Disasters—A Review”; *IEEE Trans. Power Syst.* 2015, 31, 1604–1613.
- [53] Gholami, A.; Shekari, T.; Aminifar, F.; Shahidehpour, M. “Microgrid Scheduling With Uncertainty: The Quest for Resilience”; *IEEE Trans. Smart Grid* 2016, 7, 2849–2858.
- [54] Gholami, A.; Shekari, T.; Amirioun, M. H.; Aminifar, F.; Amini, M. H.; Sargolzaei, A. “Toward a Consensus on the Definition and Taxonomy of Power System Resilience”; *IEEE Access* 2018, 6, 32035–32053.
- [55] Glasstone S.; Dolan, P. J. “The Effects of Nuclear Weapons”; *US Department of Defense* 1977, 50, 3.
- [56] Fletcher, E. R.; Albright, R. W.; Perret, R. F.; Franklin, M. E.; Bowen, I.G. “Nuclear Bomb Effects Computer
- [20] Ouyang, M.; “Review on Modeling and Simulation of Interdependent Critical Infrastructure Systems”; *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2014, 121, 43–60.
- [21] Kitsak, M.; Ganin, A.A.; Eisenberg, D.A.; Krapivsky, P.L.; Krioukov, D.; Alderson, D.L.; Linkov, I. “Stability of a Giant Connected Component in a Complex Network”; *Phys. Rev. E* 2018, 97, 12309.
- [22] Dueñas-Osorio, L.; Craig, J. I.; Goodno, B. J. “Seismic Response of Critical Interdependent Networks”; *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 2007, 36, 285–306.
- [23] Korkali, M.; Veneman, J. G.; Tivnan, B. F.; Bagrow, J. P.; Hines, P. D. H. “Reducing Cascading Failure Risk by Increasing Infrastructure Network Interdependence”; *Sci. Rep.* 2017, 7, 1–13.
- [24] Tien, I.; Der Kiureghian, A. “Compression And Inference Algorithms for Bayesian Network Modeling of Infrastructure Systems”; *Proc. 12th Int. Conf. on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering* 2015.
- [25] Tien, I.; Der Kiureghian, A. “Algorithms for Bayesian Network Modeling and Reliability Assessment of Infrastructure Systems”; *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2016, 156, 134–147.
- [26] Bobbio, A.; Portinale, L.; Minichino, M.; Ciancamerla, E. “Improving the Analysis of Dependable Systems by Mapping Fault Trees Into Bayesian Networks”; *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2001, 71, 249–260.
- [27] Kim, M. C. “Reliability Block Diagram With General Gates and Its Application to System Reliability Analysis”; *Ann. Nucl. Energy* 2011, 38, 2456–2461.
- [28] Tien, I.; Der Kiureghian, A. “Compression Algorithm for Bayesian Network Modeling of Binary Systems”; *Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures. CRC Press New York* 2013, 3075–3081.
- [29] Bensi, M.; Der Kiureghian, A.; Straub, D. “Efficient Bayesian Network Modeling of Systems”; *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2013, 112, 200–213.
- [30] Mahadevan, S.; Zhang, R.; Smith, N. “Bayesian Networks for System Reliability Reassessment”; *Struct. Saf.* 2001, 23, 231–251.
- [31] Hosseini, S.; Barker, K. “Modeling Infrastructure Resilience Using Bayesian Networks: A Case Study of Inland Waterway Ports”; *Comput. Ind. Eng.* 2016, 93, 252–266.
- [32] Ganin, A. A.; Kitsak, M.; Marchese, D.; Keisler, J. M.; Seager, T.; Linkov, I.; “Resilience and Efficiency in Transportation Networks”; *Sci. Adv.* 2017, 3, E1701079.
- [33] Henry, D.; Ramirez-Marquez, J. E. “Generic Metrics and Quantitative Approaches for System Resilience as a Function of Time”; *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2012, 99, 114–122.
- [34] Vugrin, E. D.; Turnquist, M. A.; Brown, N. J. K. “Optimal Recovery Sequencing for Enhanced Resilience and Service Restoration in Transportation Networks”; *Int. J. Crit. Infrastructures* 2014, 10, 218–246.
- [35] Darayi, M.; Barker, K.; Santos, J. R. “Component Importance Measures for Multi-Industry Vulnerability of a Freight Transportation Network”; *Networks Spat. Econ.* 2017, 17, 1111–1136.
- [36] Reed, D. A.; Kapur, K. C.; Christie, R. D. “Methodology for Assessing the Resilience of Networked Infrastructure”; *IEEE Syst. J.* 2009, 3, 174–180.
- [37] Bartos, M.; Chester, M.; Johnson, N.; Gorman, B.; Eisenberg, D.; Linkov, I.; Bates, M. “Impacts of Rising Air Temperatures on Electric Transmission Ampacity and Peak

- [62] Wang, Y.; Baldick, R. "Case Study of an Improved Cascading Outage Analysis Model Using Outage Checkers"; IEEE Power & Energy Society General Meeting 2013, 1–5.
- [63] Huang, B.; Majidi, M.; Baldick, R. "Case Study of Power System Cyber Attack Using Cascading Outage Analysis Model"; IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM) 2018, 1–5.
- [64] Kundur, P.; Paserba, J.; Ajarapu, V.; Andersson, G.; Bose, A.; Canizares, C.; Hatziairgiyriou, N.; Hill, D.; Stankovic, A.; Taylor, C.; Van Cutsem, T. "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions"; IEEE Trans. Power Syst. 2004, 19, 1387–1401.
- [65] Siemens, A. G. "SIPROTEC 5 Distance Protection and Line Differential Protection and Overcurrent Protection for 3-Pole Tripping 7SA84, 7SD84, 7SA86, 7SD86, 7SL86, 7SJ86 Technical Data"; 2012.
- [66] Krishnamurthy, V.; Kwasinski, A. "Modeling of Communication Systems Dependency on Electric Power During Nuclear Attacks"; IEEE Int. Telecom. Energy Conf. (INTELEC) 2016, 1–8.
- (Including Slide-Rule Design and Curve Fits for Weapons Effects)"; Civil Effects Test Operations (Acc) Washington Dc 1963.
- [57] Krishnamurthy, V.; Kwasinski, A. "Characterization of Power System Outages Caused by Hurricanes Through Localized Intensity Indices"; IEEE Power & Energy Society General Meeting 2013, 1–5.
- [58] Liu, X.; Chen, B.; Chen, C.; Jin, D. "Electric Power Grid Resilience with Interdependencies between Power and Communication Networks—A Review"; IET Smart Grid 2020, 3, 182-193.
- [59] Kwasinski, A. "Quantitative Model and Metrics of Electrical Grids' Resilience Evaluated at a Power Distribution Level"; Energies 2016, 9, 93.
- [60] Yodo, N.; Wang, P.; Rafi, M. "Enabling Resilience of Complex Engineered Systems Using Control Theory"; IEEE Trans. Reliab. 2017, 67, 53–65.
- [61] Hur, J., Joung, M. H.; Baldick, R. "Sequential Outage Checkers for Analyzing Cascading Outages and Preventing Large Blackouts"; Electr. Eng. Technol. J. 2011, 6, 585–594.