

رویکردهای مدل سازی سیستم های زیرساخت دارای وابستگی متقابل از منظر تاب آوری

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

۱- استادیار و ۳- کارشناسی ارشد دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ۲- دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی شیراز

(دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷)

چکیده

دردنیای امروزی، استمرار زندگی در جوامع بشری بدون فعالیت مستمر زیرساخت های حیاتی امکان پذیر نیست. از این رو نحوه بهره برداری و حفاظت از زیرساخت های حیاتی مورد توجه مطالعات بسیاری قرار گرفته است. یکی از زمینه های اصلی در مطالعات زیرساخت ها چگونگی مدل سازی سیستم ها به خصوص با وجود وابستگی های بین آنهاست. در این مقاله، مروری بر مطالعات اخیر در مورد چگونگی مدل سازی سیستم های زیرساخت دارای وابستگی متقابل انجام شده است. هدف این مطالعه شناسایی راهکارهای حفاظت بیشتر از سیستم ها در برابر اختلالات پیش آمده در یک سیستم و جلوگیری از انتشار آن به سیستم های دیگر است. یکی از مفاهیم مؤثر در مطالعه اثرات اختلال و قطعی های آبخاری، مفهوم تاب آوری سیستم است. بهبود تاب آوری که نزدیک ترین مفهوم به پدافند غیرعامل در حوزه زیرساخت است، می تواند درک صحیحی از احتمال استمرار فعالیت زیرساخت های وابسته ارائه نماید. بنابراین، در این مقاله مروری، نحوه مدل سازی وابستگی در سیستم های زیرساخت با رویکرد تاب آوری سیستم در برابر تهدیدات بررسی شده است. در این راستا، انواع رویکردهای مدل سازی با دسته بندی به پنج گروه تجربی، عامل-محور، دینامیکی، اقتصادی و شبکه ای معرفی و بررسی شده اند. انتهای مقاله، چالش های پیش روی محققین برای انجام مطالعات بیشتر تصویر شده است. موارد ارائه شده می تواند راهگشای بسیاری از پیشرفت های آتی در زمینه مدل سازی زیرساخت های وابسته باشد.

کلیدواژه ها: سیستم های زیرساخت، وابستگی متقابل، مدل سازی، اختلال سلسله وار، تاب آوری

A Survey of Modeling Approaches of Interdependent Infrastructures form the Resilience Viewpoint

R. Ghaffarpour*, F. Moazzen, S. Zamanian

Imam Hossein University

(Received: 14/03/2021; Accepted: 08/08/2021)

Abstract

Nowadays, the human life in societies has become impossible without reliable operation of critical infrastructures. Therefore, many studies have focused on their operation and protection. One of the main fields in infrastructural studies is system modeling, especially with regard to interdependency. In this paper, recent studies on the modeling of interdependent infrastructures are reviewed. The purpose is to further protect the systems against disruptive events and to prevent cascading disturbances. One of the most effective and practical concepts in evaluating the impacts of perturbation and cascading interruptions is the concept of system resilience. Resilience, also known in the defense literature as passive defense, can provide a precise understanding of the probability of interdependent infrastructures' functionality. Therefore, in this review paper, interdependency modeling in infrastructure systems is investigated through the approach of system resilience against threats and disruptive events. To this end, various modeling approaches, are categorized into empirical, agent-based, system dynamics, economic, and network-based approaches and studied. Finally, the challenges that the researchers may face in the future studies are pointed out. The description of present challenges can pave the way for significant future developments in the field of interdependent infrastructure system modeling.

Keywords: Infrastructure Systems, Interdependency, Modeling, Cascading Outages, Resilience

۱- مقدمه

بخش اول مربوط به تحقیقاتی است که دسته‌بندی‌های مختلفی ارائه نموده و آن‌ها را از جوانبی مانند نوع زیرساخت، روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی، مدل‌های یکپارچه در مقابل مدل‌های متصل و یکپارچه، نیازمندی‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری و سطح تکامل بررسی نموده‌اند [۷].

در بخش دیگر، تکنیک‌های مدل‌سازی به چندین گروه تقسیم شده‌اند، که شامل مدل‌سازی عامل‌محور^۵، دینامیک‌های سیستم، مدل‌سازی سیستم‌های هیبرید، مدل ورودی-خروجی، مدل‌سازی سلسله‌مراتبی هولوگرافیک^۶، روش مسیر بحرانی، معماری سطح بالا، شبکه‌های موازی^۷ است. مراجع مختلف، دسته‌بندی‌های متنوعی ارائه داده‌اند.

هر کدام از این دسته‌بندی‌ها در [۸] بر اساس نه معیار ارزیابی شده‌اند که این معیارها شامل میزان تکامل، رویکرد، محدوده پایش، داده‌های مورد نیاز، سیر وقایع، نوع وقایع، نوع وابستگی متقابل، رویکردهای طراحی و تمرکز و هدف مدل‌سازی است. در دسته‌بندی دیگری که در [۹] ارائه شده است، مطالعات بر اساس معیارها و مشخصه‌هایی مانند روش ریاضی مورد استفاده، اهداف مدل‌سازی، ابعاد تحلیل، کیفیت و کمیت مقادیر ورودی و نوع کاربر نهایی^۸ تقسیم‌بندی شده‌اند. علاوه بر موارد فوق، تحقیقات زیادی به دسته‌بندی رویکردهای مدل‌سازی پرداخته‌اند [۱۰-۱۳].

تمامی مراجع اشاره شده، بیش از کاربرد و استفاده این روش‌ها بر دسته‌بندی و مقایسه آن‌ها تمرکز داشته‌اند. علاوه بر این، با اینکه که مفاهیمی چون تاب‌آوری زیرساخت از دغدغه‌های جاری مدیریت زیرساخت است، تحقیقاتی که به مرور رویکردهای وابستگی زیرساخت تاب‌آور پرداخته‌باشند، هنوز در مراحل ابتدایی خود قرار دارد. تاب‌آوری در واقع یک مفهوم ضروری در مهندسی زیرساخت بوده و به پیشگیری و مقاومت سیستم‌های زیرساخت در برابر رخدادهای شدید اطلاق شده که قابلیت بازگشت به حالت عملکرد عادی را ارزیابی می‌نماید [۱۴].

در این بخش، ابتدا به بررسی ایده‌های ارائه شده در مطالعات زیرساخت‌ها پرداخته می‌شود، که شامل ارائه تعریف زیرساخت‌های حیاتی و وابستگی آن‌ها، پیچیدگی مدل‌سازی، اهمیت در نظر گرفتن وابستگی‌های متقابل، و لزوم حفاظت بهتر از این زیرساخت‌ها می‌گردد. مثالی از زیرساخت‌های وابسته به صورت گرافیکی در شکل (۱) نشان داده شده‌است که در آن شبکه آب و برق دارای وابستگی هستند.

گزارشات دولتی معمولاً به مطالعات این ایده‌ها اختصاص دارد. برای مثال گزارش PCCIP مجموعه‌ای از سیاست‌ها و راهبردها را برای حفاظت زیرساخت‌های حیاتی پیشنهاد می‌دهد. این پیشنهادات شامل اشتراک‌گذاری اطلاعات در کنار همکاری

امروزه عملکرد مطمئن و مستمر زیرساخت‌های حیاتی نقش کلیدی در اقتصاد، امنیت و رفاه یک کشور دارند. بر اساس گزارش کمیته حفاظت زیرساخت حیاتی ریاست جمهوری آمریکا^۱ (PCCIP) که در سال ۱۹۹۶ به منظور بررسی زیرساخت‌های حیاتی کشور ایجاد گردید، زیرساخت به‌عنوان یک شبکه از سامانه‌ها و فرآیندهای مستقل و ساخته دست بشر تعریف می‌شود که با همکاری یکدیگر مجموعه‌ای از خدمات و وسایل ضروری را فراهم نموده، به این معنی که آن‌ها را تولید یا توزیع می‌کنند. در این بین، زیرساخت‌های حیاتی^۲ (CIP) به گونه‌ای از زیرساخت‌ها اطلاق می‌گردد که عدم عملکرد آن‌ها یا کمبود آن‌ها موجب ناتوانی در امنیت اقتصادی و دفاعی گردد [۱].

اگرچه در کشورهای مختلف، موارد متفاوتی به‌عنوان زیرساخت‌های حیاتی شناخته می‌شود، اما زیرساخت‌های مخابراتی، قدرت، حمل و نقل، سامانه‌های تأمین آب، نفت و گاز، خدمات دولتی و مالی و خدمات اضطراری تقریباً در تمام دنیا در این فهرست قرار گرفته‌اند [۲،۳]. این زیرساخت‌های حیاتی تا حد زیادی به یکدیگر متصل و در واقع وابسته هستند [۴].

به‌عنوان مثال سامانه‌های مخابراتی و آب به استمرار برق‌رسانی احتیاج داشته و عملکرد مناسب شبکه قدرت به تأمین منابع آب و خدمات ارتباطی وابسته است. اگرچه این وابستگی می‌تواند بازدهی مجموع سیستم را افزایش دهد، اما حوادثی مانند خاموشی آمریکای شمالی در سال ۲۰۰۳ و یا زمین‌لرزه‌های ژاپن در سال ۲۰۱۱ ثابت کرده است که وابستگی‌های متقابل سیستم‌ها می‌تواند آسیب‌پذیری آن‌ها را در برابر تهدیدات مختلف افزایش دهد. در واقع خرابی در یکی از زیرساخت‌های وابسته موجب بروز خروج‌های آبشاری در سیستم شده که می‌تواند در سطح وسیعی از نظر جغرافیایی گسترش یابد [۵].

علاوه بر این رشد بار و تقاضا برای یک زیرساخت مانند زیرساخت الکتریکی می‌تواند موجب برهم خوردن تعادل تولید و مصرف شده و در نتیجه آن خروج گسترده^۳ رخ دهد. این مسئله در اثر وابستگی تشدید می‌گردد. با این توضیحات باید گفت که مدل‌سازی زیرساخت‌های حیاتی‌ای که دارای وابستگی متقابل هستند یک مسئله جدی و مهم در سطح ملی خواهد بود. تاکنون، کشورهای مختلف در سطح جهان تلاش‌های زیادی در راستای بهبود CIS ها داشته‌اند. از این موارد می‌توان به برنامه اروپا^۴، استرالیا و کانادا اشاره داشت [۶]. علاوه بر این، این تلاش‌ها منجر به سرمایه‌گذاری‌های قابل توجهی در زمینه مدل‌سازی وابستگی متقابل زیرساخت‌های وابسته در دانشگاه‌ها شده است. مطالعات انجام شده در این زمینه قابل تفکیک به چند بخش خواهد بود.

^۵ Agent-based^۶ Holographic^۷ Petri nets^۸ End user^۱ U.S. President's Commission on Critical Infrastructure Protection^۲ Critical infrastructure systems^۳ Black-out^۴ European Program on Critical Infrastructure Protection (EPCIP)

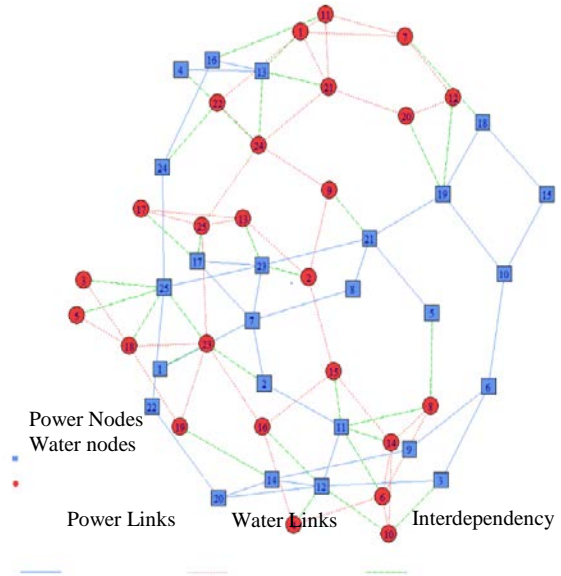
در مورد دوم، یعنی مدل‌سازی وابستگی‌های متقابل در زیرساخت‌های حساس، وجوه شش‌گانه زیر جهت توضیح و فراهم نمودن امکان مدل‌سازی آن‌ها در [۱۸] ارائه شده است. این وجوه شامل ۱- نوع وابستگی ۲- محیط زیرساخت ۳- نوع خرابی‌ها ۴- نوع اتصال و پاسخ ۵- مشخصات زیرساخت و ۶- شرایط عملکرد و بهره‌برداری است. این وجوه دلالت بر پیچیدگی مدل‌سازی وابستگی متقابل دارد که باید در آن پیچیدگی‌های مربوط به توپولوژی، تغییرات شبکه، تنوع نوع نقاط و اتصالات، و پیچیدگی‌های دینامیکی لحاظ شود.

مطالعات فوق‌الذکر انگیزه اصلی تحقیق در زمینه وابستگی زیرساخت‌های حیاتی ایجاد کرده است و علاوه بر این مسیر نیل به درک و تحلیل و مدل‌سازی بهتر اقدامات حفاظت زیرساخت را هموار نموده است. به همین منظور تحقیقات بسیاری در راستای تحلیل رفتار زیرساخت‌ها و وابستگی‌های متقابل آن‌ها انجام شده است. در این مقاله، دسته‌بندی این مطالعات و نحوه‌ی رویکرد آن‌ها به مدل‌سازی زیرساخت‌های وابسته جهت تحلیل و بررسی عملکرد آن‌ها با هدف افزایش تاب‌آوری انجام می‌گردد. روش‌های اصلی معرفی شده در این مقاله، در چند گروه اصلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که شامل روش‌های تجربی، روش‌های عامل-محور، روش‌های مبتنی بر دینامیک سیستم‌ها، روش‌های مبتنی بر تئوری اقتصادی و روش‌هایی با رویکردهای دیگر مانند رویکرد شبکه‌ای هستند. در هر کدام از رویکردها و روش‌ها، مطالعات مرتبط از لحاظ منطق مدل‌سازی و روش تحلیل معرفی شده‌اند. از آن‌جا که تمرکز اصلی این مقاله بر مدل‌سازی وابستگی زیرساخت است، مطالعات از جهت تحلیل تاب‌آوری بررسی شده‌اند تا درک صحیحی از اثرات اختلال در زیرساخت بر سایر زیرساخت‌ها فراهم گردد. در ادامه این مقاله، بخش دوم به معرفی انواع وابستگی‌ها می‌پردازد. در بخش سوم و چهارم، به ترتیب روش‌های مدل‌سازی وابستگی‌های متقابل و نحوه مدل‌سازی وابستگی در زیرساخت‌ها، معرفی و مقایسه می‌گردند. به منظور درک صحیح‌تر از اثرات وابستگی در بخش پنجم، مثال‌هایی از اثرات اختلالات در زیرساخت وابسته ارائه شده است. بخش ششم، اثر زمان در مدل‌سازی را مورد بحث قرار داده و در بخش انتهایی این مقاله، پس از ارائه چالش‌های موجود برای تحقیقات بیشتر، یک نتیجه‌گیری از موارد مطرح شده ارائه می‌شود.

۲- انواع وابستگی متقابل

زیرساخت‌های حیاتی به طرق مختلفی دارای وابستگی متقابل و یا وابستگی یکطرفه هستند. وابستگی متقابل در واقع حالتی از ارتباط است که در آن ارتباط دو طرفه بین اجزا برقرار است. از طرفی وابستگی یکطرفه نشان دهنده‌ی وابستگی یک جزء به جزء دیگر بوده، در حالی که جزء دوم به جزء اول وابسته نباشد [۱۸]. همچنین، در نگاه جامع به مفهوم زیرساخت، سیستم‌ها می‌توانند

ذینفعان زیرساخت‌ها، آموزش فرهنگی حفاظت از زیرساخت‌ها، تدوین قوانین و راه‌اندازی برنامه‌های تحقیق و توسعه جهت شناسایی فناوری و ابزار لازم در حفاظت از زیرساخت‌هاست [۱].



شکل ۱. مثالی از وابستگی متقابل در شبکه‌های زیرساخت (برق و آب) [۱۵].

علاوه بر این EPCIP تعدادی تمهیدات حفاظتی برای این زیرساخت‌ها ارائه کرده است. از این موارد می‌توان به ایجاد شبکه اطلاعاتی هشدار زیرساخت بحرانی با استفاده از متخصصین اروپا، اشتراک‌گذاری اطلاعات زیرساخت‌ها و تعریف و تحلیل وابستگی‌های این زیرساخت‌ها اشاره نمود. سیاست تاب‌آوری زیرساخت در استرالیا مشخص کرد که بهترین راه برای بهبود تاب‌آوری CIS ها، تسهیل همکاری با مالکان و بهره‌برداران به منظور اشتراک اطلاعات و افزایش آگاهی از تهدیدات و وابستگی‌هاست. از این گزارش‌ها می‌توان به مهمترین موارد در راستای حفظ زیرساخت‌های حیاتی پی برد. افزایش همکاری‌های ملی، تبادل و اشتراک اطلاعات، آگاهی موقعیتی^۱ و درک و تحلیل عمیق‌تر از وابستگی‌های متقابل، مواردی هستند که در راستای نیل به حفاظت مؤثر زیرساخت‌ها مورد اجماع بوده‌اند. با این حال، گزارشات رسمی، روش‌های مؤثر در راهبردهای حفاظت زیرساخت و تحلیل جامعی از وابستگی متقابل زیرساخت‌ها ارائه نکرده‌اند. در مورد اول، یعنی راهبردهای حفاظتی، محققین در [۱۶]، توصیه‌های متعددی جهت افزایش آگاهی موقعیتی، مثل آمادگی برای بدترین شرایط و شناسایی آسیب‌های رایج، ارائه نموده‌اند. در [۱۷]، پیشنهاد تأسیس یک مرکز تعامل به منظور تسهیل همکاری‌ها بین زیرساخت‌های مختلف بررسی شده است. این مرکز توانایی تعامل با عوامل شخصی و عمومی را به صورت یکپارچه داشته و در شرایط بحران می‌تواند به بازیابی آسان‌تر سیستم کمک نماید.

¹ Situational Awareness

این نوع وابستگی بر عملکرد نهایی سیستم‌ها اثرگذار است [۲۲، ۲۷، ۲۸].

وابستگی اقتصادی و مالی: در این نوع وابستگی، عملکرد سیستم وابسته به تأمین مالی و بودجه‌گذاری در سطوح بالاتر بوده که این سطوح معمولاً به صورت متمرکز عمل می‌کنند. این نوع وابستگی می‌تواند در قالب بازار و قانون‌گذاری‌های مرتبط با آن تعریف گردد. در مورد اخیر مصرف‌کننده‌های نهایی کالا یا خدمت، در سیستم‌ها مشترک بوده و نهاد بالادستی (دولت)، قوانین و ضوابط را تعیین می‌نماید. این نوع از وابستگی می‌تواند در چهارچوب زمانی بلند مدت و یا کوتاه مدت بررسی گردد [۲۲].

سایر وابستگی‌ها: در مطالعات مورد بررسی، وابستگی‌های دیگری مانند «وابستگی در سیاست‌گذاری» یا «وابستگی منطقی» مطرح شده است. به‌عنوان مثال، وابستگی منطقی به‌عنوان یک نوع وابستگی تعریف شده که در آن سیستم زیرساخت از طریق یک ساز و کار، به حالتی از سیستم دیگر وابسته بوده و این وابستگی، فیزیکی، سایبری و یا مکانی نیست.

لازم به ذکر است که گاهی سیستم‌ها در زمان شرایط کار عادی از خود وابستگی نشان نمی‌دهند، اما در زمان یک رویداد وابستگی آن‌ها و اثرات ناشی از آن مشخص می‌گردد. برای روشن شدن انواع وابستگی‌ها، در جدول (۱) دسته‌بندی‌های مختلف به همراه مثال‌هایی ارائه شده است. این مثال‌ها که از مراجع مختلفی استخراج شده‌اند [۲۹-۳۳]، شامل موارد زیر هستند:

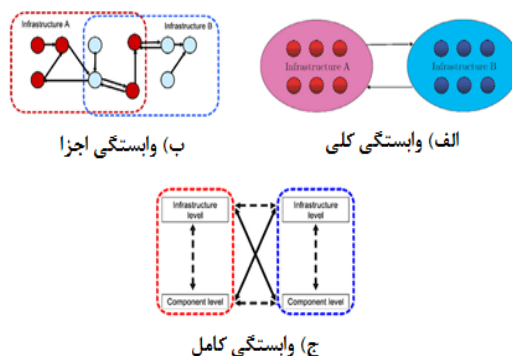
مثال ۱: قطعی در شبکه قدرت موجب اختلال در عملکرد سامانه مخابراتی، ایستگاه‌های پمپاژ آب و یا تعطیلی کسب و کارها گردد.

مثال ۲: عدم عملکرد سامانه‌های مخابراتی بر آگاهی موقعیتی^۱ و کنترل سیستم‌های الکتریکی اثرگذار خواهد بود. این موضوع باعث عدم رویت‌پذیری سیستم و در نتیجه اختلالات پراکنده می‌گردد.

مثال ۳: قطع عملکرد شبکه برق، منجر به اختلال در سرویس‌های ارتباطی می‌گردد و می‌تواند منجر به اشکال در ارتباطات اضطراری و در نتیجه هماهنگی جهت بازیابی شبکه قدرت گردد.

مثال ۴: به منظور بازیابی، معمولاً در شبکه قدرت و مخابرات یک اولویت جهت تعمیرات تعیین می‌شود که به سایر سیستم‌های زیرساخت مرتبط است و نیاز به دریافت سرمایه‌گذاری جهت اصلاح و بهبود خواهد داشت.

به صورت کلی به یکدیگر وابسته باشند، بدین معنی که خروجی کل یک سیستم به‌عنوان ورودی کل یکی دیگر از سیستم‌ها باشد (شکل ۲-الف). در حالت دیگر، برخی از اجزای یک سیستم به اجزای یک سیستم دیگر وابسته است (شکل ۲-ب). در کنار حالات ذکر شده، گاهی اوقات وابستگی به صورت ترکیبی اتفاق می‌افتد یعنی هم کلیت سیستم به سیستم دیگر وابسته بوده و هم برخی اجزای آن‌ها به یکدیگر متصل هستند (شکل ۲-ج).



شکل ۲. انواع وابستگی در سیستم‌های زیرساخت

در تحقیقات انجام شده، به‌طور کلی منظور از وابستگی، وابستگی متقابل بوده است. بر اساس این تحقیقات، کیفیت وابستگی می‌تواند به اشکال گوناگون باشد که شامل وابستگی‌های فیزیکی، سایبری، جغرافیایی و مکانی، اطلاعاتی، عملکردی و اقتصادی هستند [۱۹-۲۱].

وابستگی فیزیکی: حالتی از یک زیرساخت که در آن سیستم به محصولات خروجی یک زیرساخت دیگر وابسته است. به این معنی که سیستم زیرساخت توسط یک سری مشخصه‌های فیزیکی به سیستم‌های دیگری متصل است و منجر به محدودیت‌های ظرفیتی برای آن می‌گردد [۱۸، ۲۲].

وابستگی سایبری یا اطلاعاتی: حالتی از یک زیرساخت که در آن سیستم به اطلاعات منتقل شده از طریق یک زیرساخت دیگر وابسته است. به عبارت دیگر یک جریان اطلاعاتی بین سامانه‌های زیرساخت‌ها برقرار است [۱۸، ۲۳، ۲۴].

وابستگی جغرافیایی یا مکانی: هنگامی که محل جغرافیایی سیستم‌ها یکسان یا در نزدیکی یکدیگر است، این نوع از وابستگی به وجود خواهد داشت. در این حالت یک رخداد طبیعی یا زیست‌محیطی در منطقه منجر به تغییرات یا اختلالاتی در سیستم‌های وابسته می‌گردد [۱۸، ۲۳، ۲۵، ۲۶].

وابستگی عملکردی: این نوع از وابستگی در واقع ترکیبی از وابستگی فیزیکی و سایبری و یا سایر وابستگی‌هاست و در آن یک سیستم به یک نوع یا چند نوع ورودی، یا در واقع فعالیت عرضی یا طولی از سیستم دیگر وابسته است. به طور کلی می‌توان گفت

¹ Situational awareness

۳- رویکردهای مدل‌سازی وابستگی زیرساخت

در حوزه وابستگی زیرساخت‌ها، رویکردهای متفاوتی در مدل‌سازی وجود دارد. با توجه به دسته‌بندی‌های مختلفی که در ادبیات موضوع انجام شده است، در این مقاله مطابق شکل (۳) پنج رویکرد اصلی شامل رویکردهای تجربی (E: Empirical)، عامل محور (AB: Agent-based)، پویایی سیستم (SD: System Dynamics)، نظریه اقتصادی (ET: Economic Theory) و رویکرد شبکه محور (NB: Network-based)، در زیربخش‌های بعد معرفی و مقایسه می‌شوند. علاوه بر این با توجه به اینکه تاب‌آوری زیرساخت وابسته به زمان می‌باشد، جنبه‌های زمانی این وابستگی‌ها مورد تحلیل قرار گرفته است.



شکل ۳. رویکردهای مدل‌سازی وابستگی زیرساخت

۳-۱- رویکردهای تجربی (E)

در رویکردهای تجربی مدل‌سازی، یک پایگاه داده جهت مدل‌سازی ایجاد می‌شود که می‌توان قطعی‌ها و عدم عملکرد زیرساخت را به صورت کمی و کیفی در آن ذخیره نمود [۲۹،۳۵]. از آنجا که داده‌های ثبت شده بر اساس گزارش‌های دریافتی خواهد بود، برخی از جوانب وابستگی درونی اجزا و یا متقابل، در این رویکرد لحاظ نمی‌شود [۳۶،۳۷]. رویکرد تجربی معمولاً به منظور مدل‌سازی قطعی‌های سلسله‌وار^۱، و تعیین روش‌های جایگزین کاهش ریسک استفاده می‌شود [۳۸،۳۹]. معیارهای استفاده شده در این رویکرد، رفتار سیستم را به صورت کلی نشان می‌دهند [۳۶،۴۰]. اغلب روش‌هایی که از این رویکرد استفاده می‌کنند، به بررسی قطعی‌های سلسله‌وار در هنگام بروز بلایای طبیعی و در واقع اختلالات گسترده در سیستم‌های زیرساخت می‌پردازند [۴۱،۴۲]. بنابراین مدل‌هایی که در این ابعاد توسعه داده می‌شوند، معمولاً دارای دقت کمی بوده و جزئیات را به علت محدودیت داده‌ها و یا تخمین فرآیندها، در نظر نمی‌گیرند. در رویکرد تجربی، نوع رخداد و موقعیت آن، تا حد زیادی بر پایگاه‌های داده‌ی مورد

مثال ۵: خاموشی در شبکه برق موجب تغییرات قیمتی در سوخت و اقلام دیگر می‌گردد.

مثال ۶: آبرگفتگی در موقعیت‌های نزدیک به تأسیسات یا سیستم زیرساخت که منجر به خرابی ثانویه می‌گردد. به‌عنوان مثال در حادثه برج‌های تجارت جهانی، طغیان آب منجر به آبرگفتگی تونل‌هایی شد که نقاط مخابراتی بسیار بزرگی را در خود جای داده بودند.

جدول ۱. دسته‌بندی‌های مختلف برای وابستگی زیرساخت

شماره مثال	دسته‌بندی وابستگی	مرجع
۳ و ۱	فیزیکی	[۲۳]
۶	مکان جغرافیایی	
۷ و ۵ و ۴	سیاست‌گذاری	
۳ و ۲	اطلاعاتی	[۱۸]
۳ و ۱	فیزیکی	
۳ و ۲	سایبری	
۶	جغرافیایی	
۱۰ و ۹ و ۸ و ۷ و ۵ و ۴	منطقی	[۲۰، ۲۲]
۱ و ۲ و ۳ و ۱۰	عملکردی	
۶	فیزیکی	
۴	بودجه‌ای	[۲۶، ۲۷]
۵	بازار و اقتصاد	
۲ و ۱	ورودی	
۳	مشترک (اجزا به اجزا)	[۳۴]
۱۰ و ۷	مشترک به چند سیستم	
۸	اختصاصی	
۶	مکان مشترک	
۳ و ۲ و ۱	عملکردی	[۳۴]
۶	محیطی	

مثال ۷: واحدهای خدمات اضطراری به منظور بازیابی سیستم‌های آسیب‌دیده، منابع اضطراری را تأمین و توزیع می‌کنند.

مثال ۸: در شرایط اضطراری مانند حالتی که آوار در شهر وجود دارد، نیروهای امدادی و کارمندان حوزه تأمین مالی نمی‌توانند به طور همزمان از خیابان‌ها استفاده کنند و بنابراین بودجه‌رسانی با اختلال مواجه می‌گردد.

مثال ۹: برخی ایستگاه‌های گاز قادر به تأمین گاز وسایل نقلیه نیستند و این موضوع منجر به سردرگمی رانندگان می‌گردد. در این شرایط جستجوی رانندگان به دنبال یک ایستگاه گاز فعال، منجر به ترافیک در مسیرهای تردد خواهد شد.

مثال ۱۰: بسته شدن و یا عدم فعالیت قطارهای شهری و یا ایستگاه‌های مترو، منجر به افزایش تقاضا برای استفاده اتوبوس‌های شهری شده و صف‌های طولانی در ایستگاه‌های اتوبوس ایجاد می‌گردد.

بر اساس دسته‌بندی جدول (۱)، تمام دسته‌بندی‌ها قادر به تعریف حالات مختلف ممکن در دنیای واقعی نیستند. در واقع تنها دسته‌بندی ارائه شده توسط [۱۸]، قابلیت تفکیک تمام مثال‌های ارائه شده را فراهم نموده است.

¹Cascading failures

۳-۴- رویکرد نظریه اقتصادی (ET)

رویکردهای نظریه اقتصادی بر اساس مدل اقتصادی ورودی/خروجی توسعه پیدا کرده‌اند [۴۹،۵۰]. این گونه مدل‌ها که به‌عنوان مدل‌های عدم کارایی ورودی/خروجی^۲ (IIM) شناخته می‌شوند، به منظور بررسی اثر بلایای طبیعی و قطعی‌های سیستماتیک بر صنایع مختلف و اقتصاد کلان مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵۱]. مدل مبتنی بر IIM در واقع وابستگی‌ها و اثرات عدم عملکرد را بر زیرساخت‌های مختلف کمی‌سازی نموده تا بتوان ضررهای مالی ناشی از قطعی‌ها را محاسبه نمود. لازم به ذکر است که عدم عملکرد در شرایط یکسان ممکن است دارای اثرات مالی متفاوتی باشد چرا که این موضوع به پویایی بازارها بستگی دارد.

۳-۵- رویکرد شبکه-محور (NB)

یکی دیگر از رویکردهای مشهور در مدل‌سازی زیرساخت‌های وابسته رویکرد شبکه-محور است. این رویکرد توسط برخی محققین به دو زیربخش روش‌های مبتنی بر توپولوژی و روش‌های مبتنی بر شارش^۳ تقسیم‌بندی شده‌اند [۶]. روش‌های توپولوژیکی بر بررسی قابلیت اطمینان سیستم بر اساس اتصالات و ساختار پشتیبان استوار است. اما روش‌های مبتنی بر شارش، دینامیک‌های بین سیستم‌ها را نیز در نظر می‌گیرد. در رویکرد مدل‌سازی شبکه‌ای، زیرساخت به‌عنوان مجموعه‌ای از گره‌ها و اتصال بین آن‌ها مدل می‌شود. نقاط یا رئوس می‌توانند در قالب چهار نوع رأس دسته‌بندی شوند: نقاط منبع^۴، نقاط گیرنده^۵، انتقال^۶ و تبادل^۷. نقاط منبع، محلی در شبکه هستند که تولید کالا یا خدمت در آن‌جا اتفاق می‌افتد. این محصول در نقاط گیرنده مصرف می‌شود. نقاط انتقال در واقع انشعابی است که دارای تولید یا مصرف نیست، در حالی که نقاط تبادل، در واقع نوعی از رئوس گیرنده است که در آن مصرف فقط جهت تسهیل بهره‌برداری از یک زیرساخت دیگر رخ می‌دهد. اتصالات یا خطوط ارتباطی در مدل‌های شبکه‌محور در واقع مسیر شارش کالا یا خدمات بین دو نقطه را مشخص می‌سازد. این خطوط که در مفهوم گراف، با عنوان یال شناخته می‌شوند، می‌توانند یک خط لوله، خط انتقال یا خطوط توزیع باشد.

همانطور که بیان شد، یکی از زیربخش‌های ارائه شده برای روش‌های شبکه‌محور، روش‌های مبتنی بر شارش بوده که تا حد زیادی مورد توجه قرار گرفته‌اند. روش‌های شارش-محور با هدف بررسی دینامیک‌ها و قطعی‌های سلسله‌وار زیرساخت حیاتی مورد استفاده قرار گرفته‌است [۵۳، ۵۲]. رویکرد مشترک در این

استفاده اثرگذار است. با این حال چهارچوب استاندارد مشخصی برای انواع مشابهی از قطعی‌ها و اختلالات موجود نیست. همچنین برخی داده‌های مربوط به رویدادها، به علت سطح آستانه کم، قابل اندازه‌گیری نیستند که این امر باعث می‌شود اختلالات جزئی در این رویکرد قابل تعیین نباشند. با وجود این محدودیت‌ها، روش‌های مبتنی بر رویکرد تجربی به منظور ارزیابی سایر روش‌ها و همچنین محاسبه تاب‌آوری اجزای سیستم در قالب منحنی‌های شکست، قابل استفاده است [۴۳].

۳-۲- رویکردهای عامل‌محور (AB)

رویکردهای عامل-محور به طور گسترده‌ای در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده استفاده می‌شوند. در این رویکرد، هر جزء به‌عنوان یک عامل شناخته می‌شود که می‌تواند با سایر اجزا و محیط پیرامون تعامل داشته باشد [۴۴]. برای مثال NABLE به‌عنوان یک مدل عامل-محور که توسط آزمایشگاه ملی سندیا^۱ توسعه یافته، قابلیت مدل‌سازی وابستگی‌های متقابل بین زیرساخت‌ها و مؤسسات اقتصادی را داراست [۴۵]. مدل‌های دیگری نیز مانند FAST و CIMS از رویکرد عامل-محور جهت مدل‌سازی وابستگی زیرساخت استفاده نموده‌اند [۲۳، ۴۶]. به‌طور کلی، رویکردهای عامل-محور به منظور مدل‌سازی وابستگی‌های فیزیکی و منطقی به کار رفته‌اند. روش‌های مبتنی بر این رویکرد یک بستر منعطف جهت مدل‌سازی وابستگی اجزای مختلف سیستم فراهم می‌نمایند. این ویژگی یک قابلیت منحصر به فرد در روش‌های مبتنی بر رویکرد عامل است و برای سیستم‌هایی که حجم وسیعی از ارتباطات بین اجزا وجود دارد کاربرد خواهد داشت. با این حال، باید در نظر داشت که پیچیدگی اینگونه مدل‌ها در مواردی که تمام اجزای مهم در نظر گرفته شوند، بسیار بالا خواهد بود.

۳-۳- پویایی سیستم (SD)

رویکرد پویایی سیستم وابستگی‌ها را بر اساس یک رابطه علت و معلولی مدل می‌کند. مدل‌های CIP/DSS که برای مطالعه قطعی‌های سلسله‌وار در زیرساخت‌ها ناشی از اختلال در شبکه برق و اثرات بلایای طبیعی بر زیرساخت‌های حیاتی [۲۳، ۴۷] استفاده می‌شود، نمونه‌ای از مدل SD است. ویژگی اصلی این رویکرد قابلیت مدل‌سازی دینامیکی سیستم‌های غیرخطی است که دارای تغییرات زمانی هستند. از آنجا که کیفیت وابستگی در سیستم‌ها بر اساس نظر خبرگان و داده‌های موجود تعیین می‌گردد [۴۸]، روش‌های مبتنی بر این رویکرد نیاز به تنظیم و همگام‌سازی دقیق جهت مدل‌سازی وابستگی فیزیکی در دنیای واقعی دارند. تعیین اجزای آسیب‌پذیر سیستم یک بخش مهم در این رویکرد است که مطالعات در حال بررسی آن بوده و در حال حاضر روش‌های SD قابلیت ایجاد یک بستر مناسب برای این موضوع را ندارند.

^۲ Input-output inoperability models

^۳ Flow-based methods

^۴ Source nodes

^۵ Sink nodes

^۶ Transmission nodes

^۷ Exchange nodes

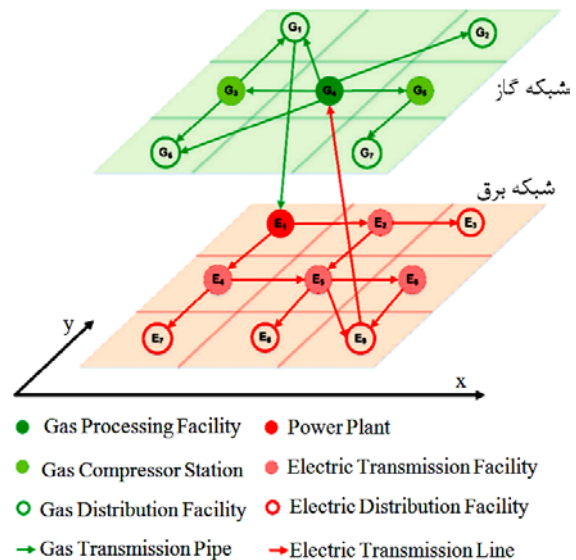
جدول ۲. نقاط قوت و ضعف رویکردهای مدل‌سازی وابستگی زیرساخت

رویکرد	قابلیت‌ها	نقاط ضعف
تجربی	- کاربرد در مدل‌سازی منحنی شکست اجزا و ارزیابی سایر روش‌ها	- پایگاه داده اختصاصی - عدم قابلیت تعیین آثار اختلال
عامل-محور	- تعیین نقشه اجزا - مدل‌سازی رفتارهای پیچیده و تصمیم‌گیری ادراکی	- مدل‌سازی پیچیده با حجم داده بسیار بالا (بر خلاف رویکرد شبکه‌ای) - به‌روزرسانی سخت مدل در صورت تغییر شبکه
دینامیک‌های سیستم	- مدل‌سازی رفتار دینامیکی غیرخطی	- عدم توانایی مدل‌سازی در سطح اجزا - نیاز به تنظیم با توجه به شبکه واقعی و داده‌های زیاد
نظریه اقتصادی	- کمی‌سازی اثر عدم فعالیت بخش‌های مختلف در سطح کلان	- فقط برای مدل سیستمی به طور کلی - معیارهای اقتصادی، قابلیت نشان دادن وابستگی فیزیکی را ندارند.
توپولوژیک	- استخراج مدل جامع برای بررسی قابلیت اتکای ساختار سیستم	- مدل‌سازی وابستگی‌های فیزیکی تنها برای اختلالات ساختاری
شارش-محور	- مدل‌سازی سیستم بر مبنای فیزیک آن و لحاظ محدودیت‌های اجزا - مدل‌سازی دینامیکی دقیق	- نیاز به داده‌های عملکرد زیرساخت برای ارزیابی مدل - حجم بالای محاسبات

۴- نحوه مدل‌سازی وابستگی زیرساخت

زیرساخت‌های وابسته که به‌عنوان یک سیستم از مجموع سیستم‌ها^۱ نیز شناخته می‌شوند، در مطالعات با استفاده از یک توپولوژی که نشان‌دهنده اجزای سیستم و ارتباط بین آن‌هاست مشخص می‌گردد. بنابراین، شبکه زیرساخت دارای اجزای متنوع می‌تواند با استفاده از شبکه‌ای متشکل از چندین شبکه و یا یک شبکه دارای چندین لایه تعریف شود. روش‌های متأخر در مدل‌سازی زیرساخت‌های دارای وابستگی مبنی بر مدل‌سازی چندلایه است که در آن، حیطه‌های مختلفی از شبکه، هر کدام به‌عنوان یک لایه تعریف شده و ارتباط بین اجزای لایه‌ها نشان‌دهنده وابستگی خواهد بود [۶۲، ۶۳]. چگونگی تعریف این شبکه‌ها و ارتباط بین آن‌ها می‌تواند محل تفاوت در مدل‌سازی‌ها و پیاده‌سازی رویکردهای مختلف باشد. به‌عنوان مثال در یک مدل، ارتباطات بر مبنای اتصال فیزیکی تعریف شده و در یک مدل لینک بین اجزا بر مبنای خدمات قابل ارائه به یک جزء خاص مدل می‌گردد. لایه‌های مدل‌سازی نیز می‌توانند بسته به هدف مدل‌سازی، بر اساس حیطه خدمات قابل ارائه (ارتباطی، نیروی انسانی و محصول یا خدمات) و یا مبتنی بر تأسیسات فیزیکی

روش‌ها، تعیین نقاط تبادل بین زیرساخت‌هاست. این روش در چندین مرجع مورد استفاده قرار گرفته‌است. در [۵۴] اثرات وابستگی متقابل زمان‌واقعی بین دو شبکه متصل گاز و برق مورد بررسی قرار گرفته‌است. به‌طور مشابه در [۵۵]، نوسانات تقاضای برق و تأثیر آن بر ژنراتورهای گازی با پله‌های یک‌ساعته در نظر گرفته شده‌است. با این حال، بخش‌های غیرخطی در معادلات پایه، مدل‌سازی شبکه گاز را به امری سخت بدل کرده‌است. لازم به ذکر است که روش‌های شارش-محور غالباً قطعی‌های ناشی از وابستگی‌های فیزیکی را کمی می‌کنند، اما اطلاعات توپولوژیکی به همراه شرایط مرزی زیرساخت برای مدل‌سازی آن‌ها کافی خواهد بود. شکل (۴) یک شبکه ساده از زیرساخت را بر اساس مدل‌سازی شبکه‌ای نشان می‌دهد.



شکل ۴. یک شبکه ساده جهت مدل‌سازی زیرساخت برق و گاز [۵۶]

هر کدام از رویکردهای مورد بحث، دارای نقاط ضعف و قوت هستند. مقایسه این رویکردها در جدول (۲) به‌طور خلاصه ارائه شده است.

به منظور بررسی قطعی‌های سلسله‌وار، روش‌های تحلیلی نیز در زیرساخت‌های حیاتی وابسته استفاده می‌شوند. این روش‌ها نیاز به اطلاعات گسترده‌ای دارند که می‌توان بخشی از آن را از خبرگان دریافت نمود [۵۷]. کاربرد دیگر روش تحلیلی، مدل‌سازی توزیع مجدد بار در شبکه قدرت به منظور شناسایی و کمی‌سازی نقاط آسیب‌پذیر شبکه است. روش‌های تحلیلی که غالباً مورد استفاده قرار گرفته‌اند، تفاوت و تنوع نقاط شبکه را منظور نکرده و نقاط را یکسان فرض کرده‌اند. علاوه بر این، این روش‌ها برای هر شبکه‌ی مشخص نیاز به تنظیم و محاسبه مجدد، مطابق با شبکه واقعی دارد [۵۸، ۵۹]. در کنار روش‌های تحلیلی، روش‌های شبیه‌سازی نیز وجود دارند که به علت لحاظ ویژگی‌های منحصر به فرد هر نقطه از شبکه، از دقت بیشتری برخوردار هستند و می‌توانند با در نظر گرفتن تنوع نقاط، پاسخ‌های شبکه را کمی‌سازی کنند [۶۰، ۶۱].

¹ A system of systems

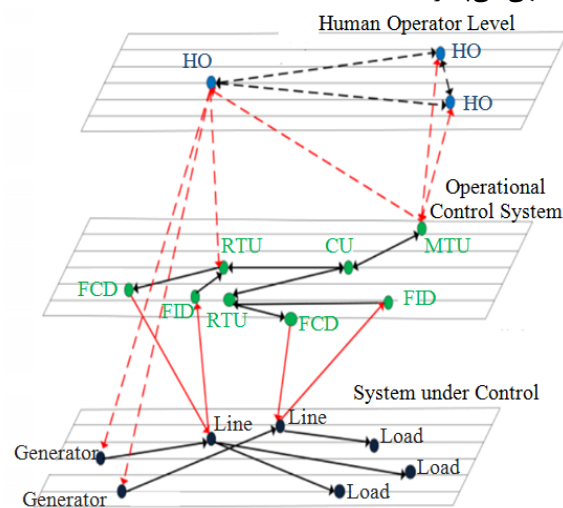
حصول خواهد بود. این ویژگی‌ها^۱ در برگیرنده‌ی اطلاعات جغرافیایی مثل مختصات، سطح مقاومت، حداقل سطح کیفیت قابل قبول برای خدمت یا محصول، وجود سیستم ذخیره‌ساز و پشتیبان و غیره می‌باشد. در اینجا نیز هر چه جزئیات بیشتری تعریف گردد، مدل دارای دقت بالاتری خواهد بود.

به منظور بیان ریاضی در مدل‌سازی زیرساخت‌های دارای وابستگی به طور کلی از مدل گراف و در واقع نظریه گراف استفاده می‌شود. بر اساس آنچه در بخش‌های قبلی بیان شد، مدل‌سازی با استفاده از گراف، در واقع مبتنی بر رویکرد شبکه‌ای است. با اینحال، با توجه به هدف مدل‌سازی می‌توان با استفاده از رویکردهای دیگری مانند SD و ET دقت مدل‌سازی را افزایش داده و خروجی‌های مطلوب را از آن دریافت نمود.

در مدل‌سازی با استفاده از گراف، می‌توان به دو شیوه عمل نمود. در حالت اول، برای هر لایه که بیانگر یک زیرساخت یا یک حیطه است، یک گراف تشکیل داده و بر اساس وابستگی اجزا، ارتباط برخی نقاط گراف‌های متفاوت را به یکدیگر مدل نمود. در شیوه دوم که می‌تواند درک جامع‌تری از گراف زیرساخت فراهم نماید، کل زیرساخت با استفاده از یک گراف مدل می‌شود و در آن ارتباطات یا یال‌های گراف بر اساس خدمات ارائه شده از هر رأس در یک سیستم به هر رأس در سیستم دیگر تعریف می‌شود. این یال‌ها می‌توانند بیانگر ارتباط فیزیکی مانند خط انتقال، یا مجاورت جغرافیایی باشند یا نباشند. در واقع مفهوم اصلی تعریف وابستگی بر اساس خدمات دریافتی و ارسالی است. با توسعه این مدل، می‌توان حتی وابستگی‌های درجه دوم یا سوم را نیز مدل نمود. به منظور مدل‌سازی گرافیکی بهتر، می‌توان عرض یال‌ها را بر حسب میزان و کیفیت وابستگی، متغیر در نظر گرفت [۵۶].

در مدل‌سازی زیرساخت وابسته با استفاده از گراف، لایه‌ها یا حیطه‌های مختلف به صورت D_k تعریف می‌گردد که k عضوی از مجموعه سیستم‌ها است. گراف مربوطه به صورت $\mathcal{V}_{D_k} = \{N_k, E_k\}$ مشخص خواهد شد که در آن N_k و E_k به ترتیب مجموعه رئوس و یال‌ها هستند. برای هر رأس i در مجموعه رئوس، x_i مجموعه مشخصات یا ویژگی‌های رأس i خواهد بود. همان‌طور که گفته شد، این مشخصه‌ها می‌توانند شامل محل جغرافیایی (z_i) یا سایر اطلاعات باشند. به طور مشابه هر یال در مجموعه یال‌ها، دارای مجموعه‌ای از ویژگی‌ها به نام y_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 جزئی از ویژگی‌های آنان در نظر گرفته می‌شود و بنابراین اطلاعات مربوط به حیطه مربوطه را نیز شامل می‌شود. مدل کلی زیرساخت، توسط اجتماعی از این گراف‌ها شکل می‌گیرد [۵۷].

(گاز، آب و برق) تعریف گردند. شکل (۵) یک نمونه از مدل‌سازی چندلایه را نشان می‌دهد که در آن به منظور افزایش دقت در مدل‌سازی، ارتباطات فنی و حتی اجتماعی ترسیم شده‌است. در این شکل لایه‌های نیروی انسانی، سیستم کنترل و شبکه اصلی تحت مطالعه در نظر گرفته شده‌است. هرچه گستره‌ی تعریف ارتباطات و لایه‌ها وسیع‌تر شود، مدل‌سازی دقیق‌تر انجام می‌گردد. در شکل (۵) رنگ قرمز نشان‌دهنده ارتباطات بین لایه‌ها یا وابستگی اجزای سیستم‌های مختلف به یکدیگر و رنگ سیاه بیان‌کننده ارتباطات یا وابستگی‌های درون یک سیستم است. جهت فلش نیز وابستگی دو جزء به یکدیگر را تعیین می‌کنند. در خطوطی که دو طرف لینک ارتباطی دارای فلش است، وابستگی متقابل و در غیر اینصورت وابستگی یک جانبه خواهد بود [۶۴]. اجزایی که در یک لایه قرار گرفته‌اند مربوط به یک زیرساخت یا یک حیطه بوده که در واقع در شرایط بروز اختلال، تأثیر نسبتاً مشابهی می‌پذیرند.



MTU: Master Terminal Unit
RTU: Remote Terminal Unit
CU: Communication Unit
FID: Field Instrumentation Device
FCD: Field Control Device
HO: Human Operator

_____ Technical Interaction
- - - - - Social Interaction

شکل ۵. مدل‌سازی چندلایه از یک شبکه قدرت

در مدل‌سازی چندلایه، نقاط، نشان‌دهنده منابع و تأسیسات ارسال یا دریافت خدمات یا کالا هستند. در شبکه برق این نقاط می‌توانند شامل نیروگاه‌ها، پست‌های برق، در شبکه آب شامل ایستگاه‌های پمپ و تصفیه‌خانه و در شبکه گاز شامل ایستگاه‌های فشار و ذخیره‌سازی باشند. در سوی دیگر، لینک‌ها یا خطوط می‌توانند نشان‌دهنده خطوط انتقال در شبکه برق و لوله‌های انتقال آب و گاز باشند. همان‌طور که بیان شد، تعریف نقاط و خطوط بر اساس رویکرد مدل‌سازی انجام خواهد شد. پس از تعریف این موارد، می‌توان جزئیات و ویژگی‌های اختصاصی هر نقطه یا یال را در قالب چند پارامتر برای آن‌ها منظور نمود. تعریف جزئیات از آن حیث دارای اهمیت است که پیش‌بینی دقیق‌تری از شرایط حین یا پس از اختلال از سیستم‌های زیرساخت، قابل

¹ Attribute/Coordinate

اثرات متقابل اختلال در سامانه کنترلی و ارتباطی بین زیرساخت‌ها یا SCADA^۱ مد نظر خواهد بود.

جدول ۳. پیامدهای اختلال عملکرد شبکه قدرت در سایر سیستم‌ها

پیامدهای احتمالی در سایر سیستم‌ها			اجزای شبکه قدرت
سامانه‌های کنترلی	شبکه گاز	شبکه آبرسانی	
عدم تأمین توان برای کلیدها و تجهیزات ارتباطی	عدم تأمین توان برای سامانه‌های کنترلی، ذخیره‌سازها، فشرده‌سازها، و موارد مشابه	عدم تأمین توان برای سامانه‌های کنترلی، پمپ‌ها، و موارد مشابه	ترانس ژنراتور
اختلال در عملکرد خطوط انتقال و سیستم کنترل، اثر مستقیم (مرتبه اول) بر سایر شبکه‌ها ندارد.			خط انتقال سیستم کنترل

۵-۱- اثرات قطعی توان الکتریکی

از دست رفتن توان الکتریکی موجب اختلال در عملکرد سایر زیرساخت‌ها خواهد شد. در شبکه آبرسانی، کاهش یا قطع توان الکتریکی موجب عدم فعالیت مناسب پمپ‌ها شده که بر حسب نوع مصرف‌کننده، به‌عنوان مثال در یک بیمارستان، می‌تواند تبعات شدیدی داشته باشد. در تأسیسات گاز، علاوه بر نیاز به برق در برخی ایستگاه‌های فشار، شبکه‌ی پیچیده‌ای از سیستم‌های کنترل و پایش وجود دارد که معمولاً توسط SCADA کنترل می‌شوند و نیاز به تأمین مستمر انرژی الکتریکی دارند [۶۶]. به‌طور کلی، اولین نشانه‌های قطع آشاری انرژی الکتریکی در سیستم‌های کنترلی و پایش بروز خواهد کرد. در واقع این سیستم‌ها به واسطه تجهیزات مخابراتی و کلیدزنی که برای اتوماسیون، شرایط اضطراری و ارتباط کارکنان استفاده می‌شود، کاملاً متکی به تأمین انرژی الکتریکی هستند. این نیاز به برق در ایستگاه‌هایی که دارای باتری ذخیره و پشتیبان هستند نیز قابل توجه است چرا که امکان خطا و اختلال در سیستم‌های ذخیره‌ساز وجود دارند [۶۷]. در جدول (۳) پیامدهای اختلال در عملکرد اجزای شبکه قدرت در هر یک از شبکه‌های آب، گاز و سامانه‌های کنترلی مشخص شده است. این پیامدها مربوط به اثرات مرتبه اول هستند، به این معنی که از اثرات ثانویه صرف‌نظر شده است.

۵-۲- اثرات خرابی در شبکه توزیع آب

تأسیسات زیادی به تأمین آب وابسته هستند. به‌عنوان مثال برخی نیروگاه‌های برق برای سیستم‌های خنک‌سازی و برخی فرآیندهای شبکه گاز به آب نیاز دارند. با این حال، اهمیت اصلی تأمین آب، مربوط به آب آشامیدنی است که پس از خروج از تصفیه‌خانه‌ها جهت تأمین آب شرب مصرف‌کنندگان توزیع می‌شود. سیستم‌های پایش و کنترل نیز به منظور جلوگیری از افزایش حرارت و در نتیجه عملکرد صحیح دستگاه‌ها، به آب نیاز خواهد داشت. وابستگی مابین زیرساخت‌ها در این سیستم‌ها به خوبی مشهود

$$\Psi_S = \Psi_{D_1} \cup \Psi_{D_2} \cup \Psi_{D_3} \cup \dots \quad (1)$$

اگر فرض کنیم، هر D_k تعداد M_k خدمت یا محصول را فراهم می‌کند آنگاه برای هر حیطه یا سیستم زیرساخت داریم:

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

تا اینجا، هر حیطه یا سیستم D_k به‌عنوان M_k گراف منفصل مدل می‌شود. با توجه به اینکه مفهوم وابستگی غالباً به منظور مطالعه اثرات اختلال عملکرد یک سیستم بر سیستم دیگر انجام می‌شود، مفهوم زمان می‌تواند نقش مهمی داشته باشد. در بخش بعدی جنبه‌های زمانی وابستگی زیرساخت و به‌طور دقیق‌تر اثرات وابستگی بر تاب‌آوری سیستم‌ها معرفی می‌گردد.

با این توضیح، گراف مربوط به زیرساخت با لحاظ زمان سیستم، می‌تواند از ترکیب گراف‌های منفصل به‌صورت زیر مدل‌سازی شود:

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

مجموعه رئوس و یال‌ها یا $N_S(t), E_S(t)$ در این مدل نیز به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$N_S(t) = \bigcup_k N_k(x_i(t), z_i(t), t) \quad (4)$$

$$E_S(t) = \bigcup_k E_k(x_j(t), z_j^0(t), z_j^1(t), t)$$

لازم به یادآوری است که در یک گراف، رئوس نشان‌دهنده اجزای زیرساخت از انواع مختلفی هستند. در برخی مدل‌سازی‌ها از سه نوع رأس منبع، گیرنده و انتقال استفاده شده و در برخی دیگر، مشابه آنچه در بخش قبل تعریف شد، از رأس تبادل نیز استفاده می‌شود.

لازم به ذکر است که پس از مدل‌سازی یک زیرساخت، اثر رویدادها و پیامدهای احتمالی اختلالات را می‌توان با استفاده از کاهش سطح عملکرد یک تجهیز و یا حذف آن در مدل گراف شبکه با استفاده از نظریه تراوش بررسی نمود. تراوش در واقع فرآیندی است که در آن کسری از اجزای مدل یک شبکه به منظور بررسی عملکرد سیستم، حذف می‌گردند [۶۵].

۵-۳- اثرات وابستگی در زیرساخت‌های حیاتی

برای مدل‌سازی زیرساخت‌های وابسته، اطلاع از اثراتی که ممکن است اختلال در هر سیستم بر سایر سیستم‌ها بگذارد، ضروری است. این موضوع به درک صحیح جهت مدل‌سازی و تعریف دقیق نقاط کمک زیادی خواهد کرد. در بسیاری از مراجع، زیرساخت‌های برق، گاز و آب (PWG) به‌عنوان مهم‌ترین زیرساخت‌های حیاتی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این بخش از مقاله، اثراتی که وابستگی بین این زیرساخت‌ها در شرایط اختلال عملکرد بر آن‌ها ایجاد می‌کند، بررسی می‌گردد. علاوه بر این،

¹ Supervisory control and data acquisition

سوخت نیروگاه‌ها مورد توجه است، خرابی در شبکه توزیع گاز که دارای فشار کمتری است نیز باید به‌عنوان یک اختلال مد نظر باشد. شبکه توزیع گاز مسئول تأمین گاز مصرف‌کنندگان با اهداف گرمایشی و پخت است.

۵-۴- اثرات اختلال در سیستم پایش و کنترل

سیستم‌های پایش و کنترل یا SCADA، سنگ بنای فعالیت پایدار زیرساخت‌های وابسته هستند و به همین دلیل خرابی آن‌ها منجر به خرابی احتمالی در شبکه زیرساخت خواهد شد. در واقع از آنجا که این سیستم‌ها توسط افراد، به منظور واکنش به تغییرات عملکردی سیستم‌ها، راهبری می‌شوند، اگر ارتباطات و انتقال داده‌ها توسط آن‌ها با اختلال مواجه شود، عملکرد زمان‌واقعی زیرساخت‌ها مختل خواهد شد [۶۷]. علاوه بر این، بسیاری از سیستم‌های شبکه آب، گاز و برق به داده‌های سیستم پایش و کنترل متکی هستند. به‌عنوان مثال فشار پمپ‌های آب در شبکه آبرسانی، دما و فشار گاز در شبکه گاز و ولتاژ و جریان توان در شبکه برق، توسط داده‌های سیستم کنترلی تنظیم می‌شوند. در صورت بروز اختلال در انتقال اطلاعات و داده‌ها، در عملکرد سیستم‌ها اختلال ایجاد شده و یا داده‌ها مورد اطمینان نخواهند بود. این موضوع در امنیت سایبری بسیار اهمیت دارد [۷۲]. بنابراین، اختلال در عملکرد توزیع (آب، برق، گاز)، اتوماسیون، سامانه مدیریت انرژی، امنیت سایبری و ارتباط کارکنان، از پیامدهای احتمالی ناشی از اختلال در سیستم‌های پایش و کنترل است [۶۷، ۷۳].

۶- اثر زمان در مدل‌سازی وابستگی متقابل

یکی از اهداف اصلی در مطالعه زیرساخت‌ها و وابستگی بین اجزای آن‌ها محاسبه تاب‌آوری زیرساخت در برابر اختلالات احتمالی در زیرساخت‌های دیگر است [۷۴]. از آن‌جا که اثرگذاری یک اختلال منحصر به یک زمان ثابت نمی‌شود و در طول زمان رخ می‌دهد، یکی از چالش‌های موجود در زمینه مدل‌سازی وابستگی متقابل زمان واقعی عملکرد شبکه‌های زیرساخت است. در این بخش با نگاهی به مفهوم تاب‌آوری زیرساخت، اهمیت زمان در مدل‌سازی بیش از پیش مشخص خواهد شد. در این زمینه تلاش‌های بسیاری توسط محققین انجام شده است. در همین راستا، در مراجع [۷۵، ۷۶] یک مدل از شبکه آب با هدف اندازه‌گیری فشار و دبی در بازه‌های پانزده و ده دقیقه‌ای ارائه شده است. نویسندگان در [۷۷] تعاملات مابین شرکت برق و مصرف‌کنندگان مختلف و متنوع را به منظور پایش توان مصرفی هر مصرف‌کننده در بازه‌های یکساعته مدل‌سازی نموده‌اند. یک روش بهینه برای پخش بار توزیع شده و زمان‌واقعی جهت حفظ فرکانس و سطح تولید بهینه در شرایط بروز اختلال در [۷۸] ارائه شده‌است. با این وجود، تحقیقات بسیار محدودی جهت بررسی جنبه‌های زمانی در شبکه‌های زیرساخت انجام شده است. بدین منظور باید دو جنبه مد نظر قرار گیرد: (۱)

است. در صورت عدم خنک‌سازی سیستم SCADA، پدیده نویز گرمایی^۱ اتفاق می‌افتد. این پدیده که در تمام تجهیزات ارتباطی و انتقال داده رخ می‌دهد، موجب کاهش بازدهی فرآیند انتقال خواهد شد [۶۸]. اثرات خرابی اجزای شبکه آب بر سایر سیستم‌ها در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴. پیامدهای اختلال عملکرد شبکه آبرسانی در سایر سیستم‌ها

اجزای شبکه آب	پیامدهای احتمالی در سایر سیستم‌ها	
	شبکه قدرت	شبکه گاز
ایستگاه پمپاژ	عدم تأمین آب برای خنک‌سازی تجهیزات تولید توان	عدم تأمین آب برای تجهیزات
منابع ذخیره	تولید توان	تولید توان
شیرها	بدون تأثیر مرتبه اول	بدون تأثیر مرتبه اول
تصفیه خانه	بدون تأثیر مرتبه اول	بدون تأثیر مرتبه اول
شبکه انتقال	بدون تأثیر مرتبه اول	بدون تأثیر مرتبه اول

جدول ۵. پیامدهای اختلال عملکرد شبکه گاز در سایر سیستم‌ها

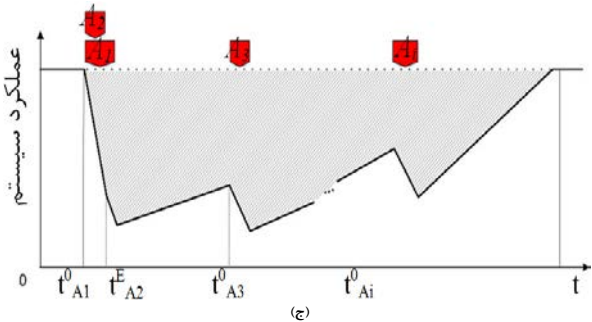
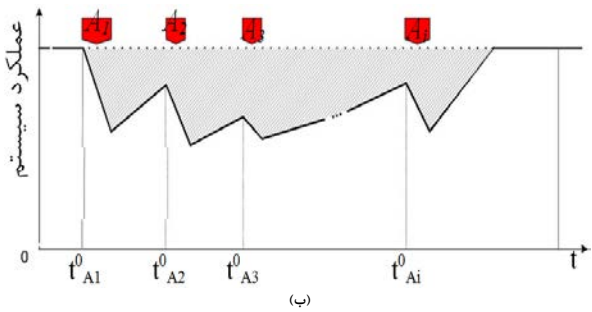
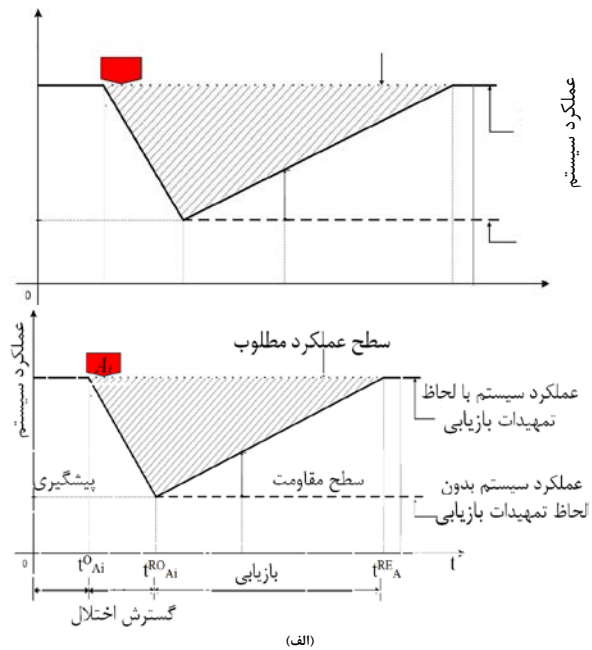
اجزای شبکه گاز	پیامدهای احتمالی در سایر سیستم‌ها	
	شبکه قدرت	شبکه آب
منابع ذخیره	عدم تأمین سوخت برای تولید توان و حرارت	عدم تأمین سوخت برای تولید توان و حرارت تأسیسات
خطوط انتقال	تولید توان	تولید توان
کمپرسورها	بدون تأثیر مرتبه اول	بدون تأثیر مرتبه اول
تنظیم فشار	بدون تأثیر مرتبه اول	بدون تأثیر مرتبه اول
خطوط توزیع	بدون تأثیر مرتبه اول	بدون تأثیر مرتبه اول

۵-۳- اثرات خرابی در شبکه گاز

شبکه گاز شامل دو بخش اصلی ایستگاه افزایش فشار یا خطوط انتقال گاز و همچنین خطوط توزیع و تنظیم فشار است. به طور کلی گاز انرژی قابل توجهی را برای نیروگاه‌های برق فراهم می‌نماید و وقفه در تأمین گاز موجب بروز اختلال در شبکه قدرت خواهد شد [۶۹]. در جدول (۵) اثرات اختلال در عملکرد شبکه گاز بر سایر سیستم‌ها خلاصه شده است. به‌عنوان یک مثال حدود ۶۳٪ از نیروگاه‌های برنامه‌ریزی شده آمریکا از طریق گاز طبیعی به تولید برق خواهند پرداخت. در ایران نیز درصد بسیار بالایی از انرژی الکتریکی توسط نیروگاه‌های مبتنی بر این سوخت فعالیت می‌کنند. بر هم خوردن تعادل تولید ناشی از کاهش گاز و فعالیت ژنراتورها می‌تواند از طریق اغتشاشات ایجاد شده، به تأسیسات الکتریکی و به‌عنوان مثال سیستم‌های کنترلی و پمپ‌های شبکه آبرسانی صدمه وارد کند [۷۰، ۷۱]. البته با توجه به اینکه سیستم‌های SCADA مبتنی بر گاز بسیار نادر هستند، وابستگی مستقیم میان شبکه گاز و اینگونه سیستم‌ها پایین است. اما در صورتی که سیستم‌های کنترلی توسط ژنراتورهای گازی تأمین انرژی شوند، گاز نقش مهمی را در استمرار فعالیت آن‌ها خواهد داشت [۷۰]. علاوه بر شبکه انتقال گاز که اغلب برای تأمین

¹ Thermal noise

دقیقه‌ای جهت مدل‌سازی آن‌ها استفاده نمود. بدیهی است هرچه این بازه‌های زمانی کوچکتر باشد، دقت بالاتری در بررسی وضعیت سیستم به دست خواهد آمد [۵۹، ۷۶، ۸۰، ۸۱].



شکل ۶. اثر زمان رخداد در تاب‌آوری سیستم در برابر بروز رویدادهای تکی و متوالی

علاوه بر مواردی که بیان شد، روش‌های بهینه‌سازی مورد استفاده جهت کنترل هزینه، قابلیت اطمینان و غیره باید در حالت زمان‌واقعی انجام شود. به منظور دستیابی به یک مدل دقیق، باید عدم قطعیت‌های موجود در زیرساخت وابسته نیز مد نظر قرار گیرند. این عدم قطعیت‌ها می‌توانند بر اساس داده‌های به دست آمده از پایش زمان‌واقعی در شبکه و با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی، تخمین زده شوند [۸۴-۸۲، ۵۰].

پارامترهای عملکردی شامل توان مصرفی در شبکه قدرت، فشار و دبی در شبکه آب و دما و فشار در شبکه گاز باید با هدف بررسی نوسانات منجر به اختلال در زیرساخت دیگر مشخص گردد. مسئله مهم در این موضوع زمان انتقال این نوسان به زیرساخت دیگر است. به‌عنوان مثال اثر کاهش فشار آب تا یک ساعت دیرتر در کاهش ولتاژ ژنراتورها مشخص خواهد شد. ۲) پارامترهای فیزیکی و مجاورت فیزیکی اجزای شبکه باید مورد توجه قرار گیرند. اگرچه پارامترهای متعددی در مراجع [۷۵، ۷۹، ۸۰] بیان شده‌اند، اما به منظور دستیابی به یک مدل دقیق از وابستگی زمان‌واقعی باید پارامترهای جدیدی را معین نمود. لازم به ذکر است که این موضوع حجم و بار محاسبات را تا حد زیادی افزایش خواهد داد.

پس از تعیین پارامترها و تعامل‌های عملکردی و فیزیکی که می‌توانند از قطعی‌های سلسله‌وار اثر بپذیرند، بازه‌های زمانی برای پایش این تعاملات در زمان‌واقعی باید در نظر گرفته شود. یک مدل زمان‌واقعی ایده‌آل باید زمان فرآیند پایش در نقطه B را در هنگام بروز یک رخداد در A از ساعت یا دقیقه به ثانیه کاهش دهد. به منظور رفع این چالش، باید زیرساخت‌هایی مانند برق، آب و گاز را به طور یکپارچه و همزمان^۱ مدل‌سازی نمود.

با بررسی مفهوم تاب‌آوری، اهمیت لحاظ زمان در مدل‌سازی تاب‌آوری زیرساخت، بیش از پیش مشخص می‌گردد. هنگام وقوع یک رخداد یا اختلال، پارامترهای عملکرد سیستم تا حد مشخصی کاهش پیدا می‌کنند، این کاهش در سطح عملکرد ممکن است در محدوده قابل قبول باقی مانده یا از آن خارج شود. معمولاً وقتی سطح عملکرد یک سیستم در محدوده قابل قبول باقی بماند، رخدادهای سلسله‌وار رخ نداده و اختلال به زیرساخت وابسته منتقل نمی‌گردد. بر اساس شکل (الف-۶) معمولاً هر سیستم یک سطحی از مقاومت را در برابر رخدادهای غیرقابل پیش‌بینی دارد. با این حال، اگر در طول یک بازه زمانی عملکرد از سطح قابل قبول تنزل یابد، به احتمال قوی، زیرساخت وابسته تحت تأثیر قرار می‌گیرد، مگر اینکه از پیش، تمهیداتی برای حفظ سطح عملکرد در نظر گرفته شود.

علاوه بر این باید دقت کرد، که اختلال می‌تواند در طول زمان با بروز رخدادهای بیشتر تقویت شود. این رخدادهای می‌توانند با فاصله‌های کوتاه زمانی بوده و از حداقل سطح عملکرد عدول ننموده (شکل ب-۶) و یا از نظر زمانی همپوشانی داشته و یکدیگر را تقویت کنند (شکل ج-۶). در حالت دوم این احتمال وجود دارد که سطح مقاومت سیستم شکسته شده و خروجی‌های سلسله‌وار اتفاق بیفتند، که در این حالت سیستم‌های وابسته در فاصله‌های زمانی با لحظه بروز رخداد، دچار اختلال در عملکرد خواهند شد. بنابراین در نظر گرفتن اثرات زمان در وابستگی سیستم‌ها دارای اهمیت فراوان است و می‌توان از بازه‌های زمانی ۱۵/۵ و یا ۳۰

^۱ Time-Synchronized

۷- ترسیم مسیر پژوهش‌های آتی

سایر سیستم‌های وابسته نیز تحمیل گردد. به همین علت مدل‌سازی صحیح زیرساخت‌های وابسته و بررسی آن‌ها در شرایط عادی و اضطراری، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله، رویکردها و روش‌های مدل‌سازی وابستگی در مطالعات مربوطه مرور شده است. رویکردهای مختلف بررسی شده جهت مدل‌سازی این زیرساخت‌ها شامل تجربی، عامل‌محور، دینامیکی، اقتصادی، و شبکه‌محور است. هر کدام از این روش‌ها دارای نقاط قوت و ضعفی هستند و باید با توجه به هدف و شرایط مدل‌سازی انتخاب گردند. علاوه بر این، یک روش جامع و دقیق، روشی ترکیبی است که نقاط ضعف مدل‌سازی را به حداقل برساند. در بخشی از این مقاله، اثرات احتمالی زیرساخت‌های آب، برق، گاز و سیستم‌های کنترلی و ارتباطی بر یکدیگر در دنیای واقعی معرفی شده است. از آنجا که تغییرات زمانی در مدل‌سازی زیرساخت‌ها اثرگذار است، تأثیر و اهمیت مدل‌سازی زمان-واقعی با استفاده از مفهوم تاب‌آوری سیستم تحلیل شده است. به منظور انجام تحقیقات آتی و معرفی زمینه‌های تحقیقاتی در این زمینه، بخش آخر به معرفی چالش‌های موجود در مدل‌سازی زیرساخت‌ها پرداخته است. بررسی این چالش‌ها می‌تواند مسیر را برای پیشرفت‌های آتی در مطالعه زیرساخت‌ها هموار سازد.

۹- مرجع‌ها

- [1] Foundations, C. "Protecting America's Infrastructures: The Report of the President's Commission on Critical Infrastructure Protection"; Washington, DC: The President's Commission on Critical Infrastructure Protection 1997.
- [2] Comfort, L. K. "Managing Critical Infrastructures in Crisis"; Oxford Research Encyclopedia of Politics 2020.
- [3] Rass, S.; Schauer, S.; König, S.; Zhu, Q. "Cyber-Security in Critical Infrastructures"; Springer 2020.
- [4] Amini, M. H.; Borojeni, K. G.; Iyengar, S. S.; Blaabjerg, F.; Pardalos, P. M.; Madni, A. M.; "A Panorama of Future Interdependent Networks: From Intelligent Infrastructures to Smart Cities"; Sustainable Interdependent Networks, Springer 2018, 1-10.
- [5] Nakarmi, U. "Reliability Analysis of Power Grids and Its Interdependent Infrastructures: An Interaction Graph-based Approach"; 2020.
- [6] Ouyang, M. "Review on Modeling and Simulation of Interdependent Critical Infrastructure Systems"; Reliab. Eng. Syst. Saf. 2014, 121, 43-60.
- [7] Pederson, P.; Dudenhoefter, D.; Hartley, S.; Permann, M. "Critical Infrastructure Interdependency Modeling: a Survey of US and International Research"; Idaho Natl. Lab. 2006, 25, 27.
- [8] Eusgeld, I.; Henzi, D.; Kröger, W. "Comparative Evaluation of Modeling and Simulation Techniques for Interdependent Critical Infrastructures"; Sci. Report, Lab. Saf. Anal. ETH Zurich 2008, 6-8.
- [9] Satumtira, G.; Dueñas-Osorio, L. "Synthesis of Modeling and Simulation Methods on Critical Infrastructure Interdependencies Research"; Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems, Springer 2010, 1-51.
- [10] Pye, G.; Warren, M. "Conceptual Modelling: Choosing a Critical Infrastructure Modelling Methodology"; Proc. 7th Australian Information Warfare and Security Conference 2006, 103-113.

بر اساس مطالب گفته‌شده در بخش‌های قبلی، برخی چالش‌های موجود در این زمینه تحقیقاتی یعنی مدل‌سازی زیرساخت وابسته، که نیاز به توجه محققین دارند، در این قسمت مطرح می‌شود. یکی از بزرگترین چالش‌ها در این زمینه حجم بالای اطلاعات مورد نیاز است. این اطلاعات شامل اطلاعات جغرافیایی، عملکردی، نحوه وابستگی، و فرآیندهایی است که در زمان عملکرد عادی و بحرانی توسط اپراتور زیرساخت مورد استفاده قرار می‌گیرد، هستند. دستیابی به این اطلاعات به دلایل مختلفی از جمله محرمانگی بسیار دشوار است، اما برای ارزیابی روش‌های مدل‌سازی ضروری است. در حال حاضر هیچ روش استاندارد جهت جمع‌آوری داده‌های لازم برای مدل‌سازی زیرساخت وابسته ارائه نشده است که می‌تواند زمینه تحقیقات آینده باشد. علاوه بر این، از آنجا که سیستم‌های زیرساخت به‌طور مداوم در حال تغییر و به روز رسانی هستند، نیاز به تعریف یک چهارچوب باز وجود دارد. هدف از این چهارچوب افزایش انعطاف مدل جهت لحاظ تغییرات تکنولوژی، افزایش تقاضا و غیره است. به‌عنوان مثال تبدیل شبکه برق سنتی به شبکه هوشمند و افزایش تقاضای انرژی الکتریکی از مواردی هستند که باید در نظر گرفته شوند. همچنین، چهارچوب ارائه شده توسط بسیاری از مقالات بر تعداد محدودی از زیرساخت‌ها تمرکز داشته و معمولاً قسمتی از آن‌ها را مدل می‌کند. علاوه بر این موضوع، مدل‌سازی زیرساخت با استفاده رویکردهای مختلف، هر کدام دارای مزایای مربوط به خود است و جنبه‌های متفاوتی از زیرساخت را پررنگ می‌کند. بنابر این توضیحات، تلاش برای دستیابی به یک مدل جامع از زیرساخت‌های حساس با لحاظ سایر زیرساخت‌ها مانند مالی و دولتی در کنار زیرساخت‌های فنی بسیار مفید خواهد بود. در صورتی که این مدل‌سازی با استفاده از یک روش تجمعی از رویکردهای مختلف انجام شود، حاصل کار دقیق‌تر و قابل‌اتکاتر خواهد بود. یکی دیگر از مراحل مهم در مدل‌سازی زیرساخت‌های وابسته، ارزیابی و صحت‌سنجی مدل است. این کار در واقع از طریق داده‌های تاریخی قابل انجام است، اما باید دقت نمود که زیرساخت‌ها به مرور زمان در حال تغییر هستند. بنابراین به منظور ارزیابی کارایی مدل، باید معیارها و استانداردهایی تعریف گردد. این معیارها می‌توانند به تصمیم‌گیران کمک کنند تا بهترین عملکرد را در کاهش اثر اختلالات زیرساخت و بهبود راهبردهای بازیابی فراهم نمایند.

۸- نتیجه‌گیری

زیرساخت‌های حیاتی به واسطه اهمیت بسیار زیاد در استمرار فعالیت‌های یک جامعه، همواره مد نظر هستند. یکی از دغدغه‌های مهم در زمینه مطالعه و تحلیل زیرساخت‌ها، وابستگی یا وابستگی متقابل است. چرا که در صورت بروز یک اختلال در یک سیستم دارای وابستگی متقابل، ممکن است هزینه‌های بسیار زیادی به

- [30] Klotzbach, P. J.; Schreck, C. J.; Collins, J. M.; Bell, M., Blake, E. S.; Roache, D. "The Extremely Active 2017 North Atlantic Hurricane Season"; *Mon. Weather Rev.* 2018, 146, 3425-3443.
- [31] O'rourke, T. D.; Lembo, A. J.; Nozick, L. K. "Lessons learned from the World Trade Center disaster about critical utility systems"; *Beyond Sept. 11th an Acc. Post-Disaster Res. Nat. Hazards Res. Appl. Inf. Center, Public Entity Risk Institute, Inst. Civ. Infrastruct. Syst. Univ. Color. Boulder* 2003, 275.
- [32] Haes-Alhelou, H.; Hamedani-Golshan, M. E.; Njenda, T. C.; Siano P. "A Survey on Power System Blackout and Cascading Events: Research Motivations and Challenges"; *Energies* 2019, 12, 682.
- [33] Wen, R. Z.; Sun, B. T.; Zhou, B. F.; "Field Survey of Mw8. 8 Feb. 27, 2010 Chile Earthquake and Tsunami"; *Adv. Mater. Res.* 2011, 250, 2102-2106.
- [34] Zio, E.; Sansavini, G. "Modeling Interdependent Network Systems for Identifying Cascade-Safe Operating Margins"; *IEEE Trans. Reliab.* 2011, 60, 94-101.
- [35] Luijff, E.; Nieuwenhuijs, A.; Klaver, M.; van-Eeten, M.; Cruz, E. "Empirical Findings on Critical Infrastructure Dependencies in Europe"; *International Workshop on Critical Information Infrastructures Security* 2008, 302-310.
- [36] Bigger, J. E.; Willingham, M. G.; Krimgold, F.; Mili, L. "Consequences of Critical Infrastructure Interdependencies: Lessons From the 2004 Hurricane Season in Florida"; *Int. J. Crit. Infrastructures* 2009, 199-219.
- [37] Chang, S. E.; McDaniels, T. L.; Mikawoz, J.; Peterson, K. "Infrastructure Failure Interdependencies in Extreme Events: Power Outage Consequences in the 1998 Ice Storm"; *Nat. Hazards* 2007, 41, 337-358.
- [38] Kjølle, G. H.; Utne, I. B.; Gjerde, O. "Risk Analysis of Critical Infrastructures Emphasizing Electricity Supply and Interdependencies"; *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2012, 105, 80-89.
- [39] Utne, I. B.; Hokstad, P.; Vatn, J. "A Method for Risk Modeling of Interdependencies in Critical Infrastructures"; *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2011, 96, 671-678.
- [40] Rong, M.; Han, C.; Liu, L. "Critical Infrastructure Failure Interdependencies in the 2008 Chinese Winter Storms"; *Int. Conf. on Management and Service Science* 2010, 1-4.
- [41] Kajitani, Y.; Sagai, S. "Modelling the Interdependencies of Critical Infrastructures during Natural Disasters: A Case of Supply, Communication and Transportation Infrastructures"; *Int. J. Crit. infrastructures* 2009, 5, 38-50.
- [42] Chang, S. E.; McDaniels, T.; Beaubien, C. "Societal Impacts of Infrastructure Failure Interdependencies: Building an Empirical Knowledge Base"; *TCLÉE: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment* 2009, 1-10.
- [43] Dunn, S.; Wilkinson, S.; Alderson, D.; Fowler, H.; Galasso, C. "Fragility Curves for Assessing the Resilience of Electricity Networks Constructed from an Extensive Fault Database"; *Nat. Hazards Rev.* 2018, 19, 4017019.
- [44] Holland, J. H.; "Complex Adaptive Systems and Spontaneous Emergence"; *Complexity and Industrial Clusters*, Springer 2002, 25-34.
- [45] Schoenwald, D. A.; Barton, D. C.; Ehlen, M. A. "An Agent-based Simulation Laboratory for Economics and Infrastructure Interdependency"; *Proc. American Control Conference* 2004, 2, 1295-1300.
- [46] North, M. J. "Toward Strength and Stability: Agent-Based Modeling of Infrastructure Markets"; *Soc. Sci. Comput. Rev.* 2001, 19, 307-323.
- [47] Nipa, T. J.; Kermanshachi, S.; Ramaji, I. "Comparative Analysis of Strengths and Limitations of Infrastructure Resilience Measurement Methods"; *7th International Construction Specialty Conference* 2019, 12-15.
- [11] De-Porcellinis, S.; Panzieri, S.; Setola, R. "Modelling Critical Infrastructure *Via* a Mixed Holistic Reductionistic Approach"; *Int. J. Crit. Infrastructures* 2009, 5, 86-99.
- [12] Griot, C. "Modelling and Simulation for Critical Infrastructure Interdependency Assessment: a Meta-Review for Model Characterisation"; *Int. J. Crit. Infrastructures* 2010, 6, 363-379.
- [13] Bloomfield, R.; Chozos, N.; Nobles, P. "Infrastructure Interdependency Analysis: Requirements, Capabilities and Strategy"; *Adelard Doc. Ref. d418/12101/3*, 1, 2009.
- [14] Ghaffarpour, R.; Alizadeh, M. I. "Resiliency Concept Explanation In Electricity Network and Its Relationship With Passive Defense"; *Shahr-e-Tabavar* 2020, 2, 1, 51-64 (In Persian).
- [15] Almoghathawi, Y.; Barker, K.; Albert, L. A. "Resilience-Driven Restoration Model for Interdependent Infrastructure Networks"; *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2019, 185, 12-23.
- [16] Bologna, S.; Setola, R. "The Need To Improve Local Self-Awareness In CIP/CIIP"; *First IEEE International Workshop on Critical Infrastructure Protection (IWCIP'05)* 2005, 6.
- [17] Briere, J. "Rapid Restoration of Critical Infrastructures: An All-Hazards Paradigm for Fusion Centres"; *Int. J. Crit. Infrastructures* 2011, 7, 21-36.
- [18] Rinaldi, S. M.; Peerenboom, J. P.; Kelly, T. K. "Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies"; *IEEE Control Syst. Mag.* 2001, 21, 11-25.
- [19] Banerjee, J.; Das, A.; Sen, A. "A Survey of Interdependency Models for Critical Infrastructure Networks"; *arXiv Prepr. arXiv1702.05407*, 2017.
- [20] Cardoni, A.; Cimellaro G. P.; Domaneschi M.; Sordo S.; Mazza A. "Modeling the Interdependency Between Buildings and the Electrical Distribution System for Seismic Resilience Assessment"; *Int. J. Disaster Risk Reduct* 2020, 42, 101315.
- [21] Shengyu, W.; Peng W.; Jie Y.; Zhuonan L.; Min O. "Review On Interdependency Modeling of Integrated Energy System"; *IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration*, 2017, 1-6.
- [22] Saidi, S.; Kattan, L.; Jayasinghe, P.; Hettiaratchi, P.; Taron, J.; "Integrated Infrastructure Systems, A Review"; *Sustainable Cities and Society* 2018, 36, 1-11.
- [23] Wang, J.; Zuo, W.; Rhode-Barbarigos, L.; Lu, X.; Wang, J.; Lin, Y. "Literature Review on Modeling and Simulation of Energy Infrastructures From a Resilience Perspective"; *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2019, 183, 360-373.
- [24] Ebrahimi R.; Pourmirza Z. "Cyber-Interdependency in Smart Energy Systems"; *ICISSP* 2017, 529-537.
- [25] Zimmerman, R.; "Social Implications of Infrastructure Network Interactions"; *J. Urban Technol.* 2001, 8, 97-119.
- [26] Lee, E. E.; Mitchell, J. E.; Wallace, W. A. "Restoration of Services in Interdependent Infrastructure Systems: A Network Flows Approach"; *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part C Applications Rev.* 2007, 37, 1303-1317.
- [27] Wallace, W. A.; Mendonça, D.; Lee, E.; Mitchell, J.; Chow, J.; "Managing Disruptions to Critical Interdependent Infrastructures in The Context of the 2001 World Trade Center Attack"; *Impacts Hum. Response to Sept. 11, 2001 Disasters What Res.* 2001.
- [28] 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.
- [29] Mendonça, D.; Wallace, W. A. "Impacts of the 2001 World Trade Center Attack on New York City Critical Infrastructures"; *J. Infrastruct. Syst.* 2006, 12, 260-270.

- [67] Kurz, R.; Lubomirsky, M.; Brun, K. "Gas Compressor Station Economic Optimization"; *Int. J. Rotating Mach.* 2012, 715017.
- [68] Mukherjee, I.; Gadoura, I. A. "Low-Thermal Noise Input-Filter Design for DC/DC Power Regulators"; *IFAC Proc.* 2011, 44, 12201-12206.
- [69] Erdener, B. C.; Pambour, K. A.; Lavin, R. B.; Dengiz, B. "An Integrated Simulation Model for Analysing Electricity and Gas Systems"; *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2014, 61, 410-420.
- [70] Lee, S.; Bi, X. "Can Embedded Knowledge in Pollution Prevention Techniques Reduce Greenhouse Gas Emissions? A Case Of The Power Generating Industry in the United States"; *Environ. Res. Lett.* 2020, 15, 124033.
- [71] Doyle, M.; Fell, H. "Fuel Prices, Restructuring, and Natural Gas Plant Operations"; *Resour. Energy Econ.* 2018, 52, 153-172.
- [72] Heracleous, C.; Kolios, P.; Panayiotou, C. G.; Ellinas, G.; Polycarpou, M. "Hybrid Systems Modeling for Critical Infrastructures Interdependency Analysis"; *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2017, 165, 89-101.
- [73] Vida, R.; Galeano, J.; Cuenda, S. "Vulnerability of State-Interdependent Networks Under Malware Spreading"; *Phys. A Stat. Mech. its Appl.* 2015, 421, 134-140.
- [74] Kong, J.; Zhang, C.; Simonovic, S. P. "Optimizing the Resilience of Interdependent Infrastructures to Regional Natural Hazards With Combined Improvement Measures"; *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2021, 107538.
- [75] Quevedo, J. "Validation and Reconstruction of Flow Meter Data in the Barcelona Water Distribution Network"; *Control Eng. Pract.* 2010, 18, 640-651.
- [76] Boulos, P. F.; Jacobsen, L. B.; Heath, J. E.; Kamojjala, S. "Real-Time Modeling of Water Distribution Systems: A Case Study"; *J. Am. Water Work. Assoc.* 2014, 106, 9, 391-401.
- [77] Hu, M.; Xiao, J. W.; Cui, S. C.; Wang, Y. "Distributed Real-Time Demand Response for Energy Management Scheduling in Smart Grid"; *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2018, 99, 233-245.
- [78] Liu, Y.; Qu, Z.; Xin, H.; Gan, D. "Distributed Real-Time Optimal Power Flow Control in Smart Grid"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2016, 32, 3403-3414.
- [79] Shamir U.; Salomons, E. "Optimal Real-Time Operation of Urban Water Distribution Systems Using Reduced Models"; *J. Water Resour. Plan. Manag.* 2008, 134, 181-185.
- [80] Fontana, N.; Giugni, M.; Glielmo, L.; Marini, G.; Verrilli, F. "Real-Time Control of a PRV in Water Distribution Networks For Pressure Regulation: Theoretical Framework and Laboratory Experiments"; *J. Water Resour. Plan. Manag.* 2018, 144, 4017075.
- [81] Cheng, W. P.; Yu, T. C.; Xu, G. "Real-Time Model of a Large-Scale Water Distribution System"; *Procedia Eng.* 2014, 89, 457-466.
- [82] Vassiljev, A.; Koor, M.; Koppel, T. "Real-Time Demands and Calibration of Water Distribution Systems"; *Adv. Eng. Softw.* 2015, 89, 108-113.
- [83] Tootaghaj, D. Z.; Bartolini, N.; Khamfroush, H.; He, T.; Chaudhuri, N. R.; La-Porta, T. "Mitigation and Recovery from Cascading Failures in Interdependent Networks Under Uncertainty"; *IEEE Trans. Control Netw. Syst.* 2018, 6, 501-514.
- [84] Nosratabadi, S.; Mosavi, A.; Keivani, R.; Ardabili, S.; Aram, F. "State of the Art Survey of Deep Learning and Machine Learning Models for Smart Cities and Urban Sustainability"; *Int. Conf. Global Research and Education* 2019, 228-238.
- [48] Canzani, E. "Modeling Dynamics of Disruptive Events for Impact Analysis in Networked Critical Infrastructures"; *ISCRAM* 2016.
- [49] Duchin, F.; "Input-Output Economics and Material Flows"; *Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology*, Springer 2009, 23-41.
- [50] Lin, J.; Tai, K.; Tiong, R. L. K.; Sim, M. S. "Analyzing Impact on Critical Infrastructure Using Input-Output Interdependency Model: Case Studies"; *J. Risk Uncertain. Eng. Syst. Part A Civ. Eng.* 2017, 3, 4017016.
- [51] Crowther, K. G.; Haimes, Y. Y.; Taub, G. "Systemic Valuation of Strategic Preparedness Through Application of the Inoperability Input- Output Model With Lessons Learned From Hurricane Katrina"; *Int. J. Risk Anal.* 2007, 27, 5, 1345-1364.
- [52] Nozick, L. K.; Turnquist, M. A.; Jones, D. A.; Davis, J. R.; Lawton, C. R. "Assessing the Performance of Interdependent Infrastructures and Optimising Investments"; *Int. J. Crit. infrastructures* 2005, 1, 144-154.
- [53] Delamare, S.; Diallo, A.; Chaudet, C. "High-Level Modelling of Critical Infrastructures' Interdependencies"; *Int. J. Crit. Infrastructures* 2009, 5, 100-119.
- [54] Zlotnik, A.; Roald, L.; Backhaus, S.; Chertkov M.; Andersson G. "Coordinated Scheduling for Interdependent Electric Power and Natural Gas Infrastructures"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2016, 32, 1, 600-610.
- [55] Gomand, O.; Antenucci, A.; Li, B.; Sansavini, G. "Modelling Interdependent Electric Power and Gas Networks in The Context Of Cascading Failures"; *Saf. Reliab. Complex Eng. Syst.* 2015, 4413-4421.
- [56] Kong, J.; Simonovic, S. P. "Probabilistic Multiple Hazard Resilience Model of an Interdependent Infrastructure System"; *Risk Anal.* 2019, 39, 1843-1863.
- [57] Balakrishnan, S.; Zhang, Z. "Modeling Interdependent Effects of Infrastructure Failures Using Imprecise Dependency Information"; *Sustain. Resilient Infrastruct.* 2020, 1-17.
- [58] Zhang, Y.; Yang, N.; Lall, U. "Modeling And Simulation of The Vulnerability of Interdependent Power-Water Infrastructure Networks to Cascading Failures"; *J. Syst. Sci. Syst. Eng.* 2016, 25, 102-118.
- [59] Agathokleous, A.; Xanthos, S.; Christodoulou, S. E. "Real-Time Monitoring of Water Distribution Networks"; *Water Util. J.* 2015, 10, 15-24.
- [60] Dueñas- Osorio, L.; Craig, J. I.; Goodno, B. J. "Seismic Response of Critical Interdependent Networks"; *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 2007, 36, 285-306.
- [61] Hernandez-Fajardo, I.; Dueñas-Osorio, L. "Probabilistic Study of Cascading Failures in Complex Interdependent Lifeline Systems"; *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2013, 111, 260-272.
- [62] Zhang, J.; Song, B.; Zhang, Z.; Liu, H. "An Approach for Modeling Vulnerability of the Network of Networks"; *Phys. A Stat. Mech. its Appl.* 2014, 412, 27-136.
- [63] Kurant, M.; Thiran, P.; Hagmann, P. "Error and Attack Tolerance of Layered Complex Networks"; *Phys. Rev. E* 2007, 76, 26103.
- [64] Nan, C.; Sansavini, G. "A Quantitative Method for Assessing Resilience of Interdependent Infrastructures"; *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2017, 157, 35-53.
- [65] Ghaffarpour, R.; Jalali, G. "Assessment of Interconnected Power System and Communication Network Using The Percolation Theory"; *Adv. Defence Sci. & Technol* 2019, 3, 325-334 (In Persian).
- [66] Folga, S. M. "Natural Gas Pipeline Technology Overview"; *Rep.* 2007.