



Research Paper

Evaluation and Prioritization of Nodes in Urban Critical Infrastructures for Increasing Resilience Against Disasters Using the DEMATEL Approach



Azar Ehrambaf Shooshtar¹ , *Parvaneh Samouei² , Masumeh Messi Bidgoli²

1. Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2. Department of Industrial Engineering, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Golpayegan, Iran.



Citation Ehrambaf Shooshtar, A., Samouei, P., & Messi Bidgoli, M. (2025). [Evaluation and Prioritization of Nodes in Urban Critical Infrastructures for Increasing Resilience Against Disasters Using the DEMATEL Approach (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 15(1):30-49. <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.1.225.5>

<https://doi.org/10.32598/DMKP.15.1.225.5>

ABSTRACT

Background and objective Critical infrastructures, including water, electricity, and wastewater, are highly interdependent. Disruption in one of these systems can have a cascade effect on other systems and disrupt the entire system. In this research, to increase the resilience of these infrastructures against disasters, we aimed to model the interdependencies between them and prioritize critical nodes.

Method Based on the data for the urban network of Sioux Falls in South Dakota reported in a previous study, and taking into account its critical infrastructures, we used the DEMATEL method and Root Assessment Method (RAM) to identify the critical points of these networks for strengthening them. The study network had 21 nodes and there were five main criteria of node capacity, supply node, transmission node, connection with other networks (such as communication) and repair cost, and three sub-criteria of electricity, water and wastewater systems. To prioritize the nodes, we first obtained the weights of each criterion using the DEMATEL method. Then, using the RAM, we prioritized critical nodes that needed to be strengthened interdependent critical infrastructures in the pre-disaster phase.

Results Using the DEMATEL method, the results showed that the node capacity criterion was the most important criterion in decision-making. Also, in most cases, the electricity sub-criterion had the highest local weight. Using the RAM, the identified critical nodes were the nodes number 5, 6, 13, and 15. These nodes are usually transmission nodes or major facilities. Parameters such as capacity, repair time, and reinforcement cost play an important role in determining the importance of nodes.

Conclusion The node capacity, as the most influential factor, plays a key role in managing and improving urban critical infrastructures. The identified critical points require more attention. Reinforcement of these nodes can significantly increase the resilience and performance of urban critical infrastructures. Also, special attention should be paid to the interdependencies between critical infrastructures and necessary measures should be taken to reduce the interdependency.

Keywords Interdependent urban infrastructures, Crisis management, Network strengthening, Resilience, Prioritization, Critical nodes

Article Info:

Received: 14 Aug 2024

Accepted: 14 Oct 2024

Available Online: 01 Apr 2025

* Corresponding Author:

Parvaneh Samouei, Assistant Professor.

Address: Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Tel: +98 (81) 31400000

E-mail: p.samouei@basu.ac.ir



Copyright © 2025 The Author(s) by "authors retain the copyright and full publishing rights"

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

Extended Abstract

Introduction

Natural or human-made disasters lead to large-scale disruptions in critical infrastructures such as electricity networks, water networks, and telecommunication. Recovering these infrastructures is critical after a disaster so that relief efforts and activities can be facilitated. The operations of these infrastructures often depend on receiving services from one another, resulting in an interdependent network structure. A disruption in one of these infrastructures can have a cascade effect on others, disrupting the entire system. In this research, considering the existing limitations, the primary objective is to present an efficient, data-driven approach for prioritizing the components of critical infrastructures to implement reinforcement measures and enhance the resilience of the entire system. This study aims to propose a comprehensive method for identifying shortcomings and prioritizing reinforcement actions by modeling and analyzing complex networks. By focusing on critical nodes, this research provides a framework to support more efficient resource allocation during a disaster.

Methods

Based on data from a network of water, electricity, and wastewater infrastructure obtained from a previous case study (Sioux Falls in South Dakota), this study applies the DEMATEL and the Root Assessment Method (RAM). The DEMATEL method is one of the multi-criteria decision-making (MCDM) approaches used for identifying and weighting criteria in complex problems with multiple qualitative and quantitative criteria. The RAM is simple to comprehend, easy to apply, and comparable to other established MCDM approaches. RAM is inspired by the limitations of existing MCDM methods in achieving dependable outcomes in decision-making situations. Moreover, it emphasizes that decision-makers understand the entire decision-making process to prevent potential computational errors. The integration of RAM and DEMATEL ensures a comprehensive evaluation, capable of handling the intricacies of interdependent infrastructures and accounting for both qualitative and quantitative factors in decision-making. Using these methods, we can identify the more critical points of these networks to reinforce them.

In this study, the network had 21 nodes and the main criteria included node capacity, supply node, transmission node, connection with other networks (such as communi-

cation networks), and repair cost. There were also three sub-criteria: electricity, water, and wastewater networks. We obtained the weight of the criteria using the DEMATEL method. Then, using the RAM, we prioritized the critical nodes to reinforce interdependent infrastructure networks in the pre-disaster phase.

Results

By using the DEMATEL method in determining the relative weight of each criterion, the results showed that the node capacity had the highest importance in decision-making; as a result, increasing the capacity of nodes can have a significant impact on improving network performance. Among the sub-criteria of each main criterion, in most cases, electricity had the highest local weight, which confirms the importance of the electricity infrastructure in this field. By using the RAM, the results showed that nodes 5, 6, 12, 13, and 15 had the highest importance and were identified as critical points that require more attention and reinforcement. These nodes, if they fail, can have a widespread impact on the entire network. Therefore, their accurate prioritization for resource allocation and the implementation of improvement programs is essential. Parameters such as node capacity, repair time, and reinforcement cost also play an important role in determining the importance of nodes. Nodes with high capacity and short repair time are less important because disruptions can be quickly compensated. Moreover, the analysis highlights the need for dynamic resilience strategies that address both short-term recovery and long-term infrastructure stability. The findings suggest that these strategies must account for varying levels of interdependency, ensuring that reinforcement efforts are directed towards nodes with the greatest potential for mitigating cascading failures.

Conclusion

The findings show that the node capacity criterion, as the most influential factor, plays a key role in managing and improving critical infrastructures (water, wastewater, and electricity networks). Reinforcement of the identified nodes with the highest importance can significantly increase the resilience and performance of critical infrastructures. These nodes are usually transfer nodes or main facilities whose disruption can have a widespread impact on the entire network. Therefore, it is recommended that limited resources for reinforcing infrastructures be focused on the identified critical nodes. Also, special attention should be paid to the interdependencies between critical infrastructures, and the necessary measures should be taken to reduce these dependencies. The integration of the DEMATEL and RAM provides a robust framework for



reinforcing critical infrastructure, ultimately enhancing the system's resilience to future disasters. This research provides a significant contribution to the literature regarding disaster preparedness and infrastructure management. The results can help decision-makers in Iran in increasing the resilience of critical infrastructures by optimally allocating resources and making the community more resilient to disasters.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

There is not any ethical guidelines related to this paper.

Funding

This paper is originated from Ms Azar Ehrambaaf PhD disertation. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authors' contributions

Conceptualization and Methodology: Azar Ehrambaf Shooshtar, Parvaneh Samouei, Masumeh Messi Bidgoli; Investigation, Writing–Review & Editing and Supervision: Parvaneh Samouei and Masumeh Messi Bidgoli; Writing–Original Draft: Azar Ehrambaf Shooshtar.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.



مقاله پژوهشی

ارزیابی و اولویت‌بندی گره‌های حیاتی در شبکه‌های زیرساخت شهری باهدف افزایش تاب‌آوری در برابر بحران

آذر احرامباف شوشتر^۱، پروانه سموئی^۱، معصومه مسی بیدگلی^۲

۱. گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۲. گروه مهندسی صنایع دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

Use your device to scan
and read the article online



Citation Ehrambaf Shoohtar, A., Samouei, P., & Messi Bidgoli, M. (2025). [Evaluation and Prioritization of Nodes in Urban Critical Infrastructures for Increasing Resilience Against Disasters Using the DEMATEL Approach (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 15(1): 30-49. <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.1.225.5>

doi <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.1.225.5>

چکیده

زمینه و هدف: پیشینه و هدف زیرساخت‌های حیاتی، شامل آب، برق و فاضلاب، وابستگی زیادی به یکدیگر دارند. اختلال در یکی از این سیستم‌ها می‌تواند تأثیر آشناری بر سایر سیستم‌ها داشته باشد و کل سیستم را مختل کند. در این تحقیق، برای افزایش تاب‌آوری این زیرساخت‌ها در برابر بلایا، هدف ما مدل‌سازی وابستگی‌های متقابل بین آن و اولویت‌بندی گره‌های حیاتی بود.

روش: براساس داده‌های شبکه شهری سیوکس فالز در داکوتای جنوبی که در یک مطالعه قبلی گزارش شده است و با در نظر گرفتن زیرساخت‌های حیاتی آن، از روش DEMATEL و روش ارزیابی ریشه (RAM) برای شناسایی نقاط بحرانی این شبکه‌ها جهت تقویت آن‌ها استفاده شد. شبکه مورد مطالعه ۲۱ گره داشت و ۵ معیار اصلی ظرفیت گره، گره تأمین، گره انتقال، ارتباط با سایر شبکه‌ها (مانند ارتباطات) و هزینه تعمیر و ۳ زیرمعیار سیستم‌های برق، آب و فاضلاب وجود داشت. برای اولویت‌بندی گره‌ها، ابتدا وزن هر معیار با استفاده از روش DEMATEL به دست آورده شدند. سپس، با استفاده از RAM، گره‌های حیاتی را که نیاز به تقویت زیرساخت‌های حیاتی وابسته به هم در مرحله قبل از فاجعه داشتند، اولویت‌بندی شدند.

یافته‌ها: با استفاده از روش DEMATEL، نتایج نشان داد که معیار ظرفیت گره، مهم‌ترین معیار در تصمیم‌گیری است. همچنین در بیشتر موارد، زیرمعیار برق بیشترین وزن محلی را داشت. با استفاده از RAM، گره‌های بحرانی شناسایی شده، گره‌های شماره ۵، ۶، ۱۳ و ۱۵ بودند. این گره‌ها معمولاً گره‌های انتقال یا تأسیسات اصلی هستند. پارامترهایی مانند ظرفیت، زمان تعمیر و هزینه تقویت، نقش مهمی در تعیین اهمیت گره‌ها دارند.

نتیجه‌گیری: ظرفیت گره، به‌عنوان تأثیرگذارترین عامل، نقش کلیدی در مدیریت و بهبود زیرساخت‌های حیاتی شهری دارد. نقاط بحرانی شناسایی شده به توجه بیشتری نیاز دارند. تقویت این گره‌ها می‌تواند تاب‌آوری و عملکرد زیرساخت‌های حیاتی شهری را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. همچنین، باید به وابستگی‌های متقابل بین زیرساخت‌های حیاتی توجه ویژه‌ای شود و اقدامات لازم برای کاهش وابستگی متقابل انجام شود.

کلیدواژه‌ها: زیرساخت‌های شهری وابسته به یکدیگر، مدیریت بحران، تقویت شبکه، تاب‌آوری، اولویت‌بندی، گره‌های حیاتی

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۴ مرداد ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۲۳ مهر ۱۴۰۳

تاریخ انتشار: ۱۲ فروردین ۱۴۰۴

* نویسنده مسئول:

دکتر پروانه سموئی

نشانی: همدان، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی صنایع.

تلفن: +۹۸ (۸۱) ۳۱۴۰۰۰۰۰

پست الکترونیکی: p.samouei@basu.ac.ir



Copyright © 2025 The Author(s) by "authors retain the copyright and full publishing rights"

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

مقدمه

تسریع در ارائه خدمات حیاتی بعد از وقوع اختلال در آن‌ها شد. **ژانک و همکاران (۲۰۲۴)**، روشی را برای برنامه‌ریزی و تخصیص بهینه منابع تعمیر مانند گروه‌های تعمیر هنگام رویارویی با بلایای طبیعی و خرابی‌های غیرقابل کنترل برای زیرساخت‌های حمل‌ونقل و برق ارائه دادند. باتوجه‌به اینکه منابع تعمیرات بعد از وقوع اختلالات برای زیرساخت‌ها محدود است، **ژو و همکاران (۲۰۱۹)**، مدل تصادفی دومرحله‌ای در جهت مشخص کردن توالی ترتیب تعمیر سیستم‌های زیرساختی حیاتی تحت عدم قطعیت توسعه دادند.

شن و سقیان (۲۰۱۳)، هر زیرساخت را یک شبکه با گره‌های عرضه، انتقال و تقاضا در نظر گرفتند. آن‌ها دو مدل بهینه‌سازی تحت اختلالات تصادفی در هر کمان را مورد مطالعه قرار دادند. مدل اول بر یک شبکه واحد با خرابی‌های کوچک تمرکز دارد و به دنبال بازیابی سریع کمان‌های شبکه است. در مدل دوم، زیرساخت‌های وابسته به هم تحت اختلالات بزرگ مقیاس باهدف کاهش تلفات و بازگرداندن سریع خدمات با کمترین هزینه‌های طراحی زیرساخت‌ها و عملیات بازیابی در نظر گرفته شده است.

فن و همکاران (۲۰۲۳)، یک مدل یادگیری تقویتی عمیق برای بهینه‌سازی توالی بازسازی شبکه جاده‌ای بعد از وقوع زلزله یا سیل برای بهبود تاب‌آوری آن‌ها ارائه کردند. بعد از وقوع بحران که به اختلالات در زیرساخت‌ها منجر می‌شود، برخی فعالیت‌های بازسازی ممکن است قبل از بازسازی اجزای مهم‌تر در این زیرساخت‌ها انجام شود؛ بنابراین اولویت‌بندی انجام فعالیت‌های بازسازی به‌شدت بر زمان بازگرداندن خدمات آن‌ها تأثیرگذار است.

شاهوردی و همکاران (۲۰۲۳)، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای با عدم قطعیت برای برنامه‌های بازرسی و بازسازی زیرساخت‌های جاده و برق بعد از وقوع بحران توسعه دادند که با مشخص کردن ترتیب عملیات بازیابی به افزایش کارایی و تسریع عملیات بازیابی منجر شدند. **بالاکریشن و همکاران (۲۰۲۰)**، از دو شاخص بحرانی و آسیب‌پذیری برای رتبه‌بندی و اولویت‌بندی گره‌های شبکه زیرساختی وابسته به هم استفاده کردند. نمره‌ای به هر گره اختصاص دادند که نشان‌دهنده اهمیت و آسیب‌پذیری آن‌ها در شبکه بود. گره‌هایی که نمره بالاتری داشتند حیاتی‌تر بودند و در اولویت بازسازی قرار گرفتند.

اولیو و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از روش شاخص‌های اهمیت فازی معیارهای فازی را برای ارزیابی اهمیت صنایع سیستم‌های زیرساختی وابسته ارائه کردند. آن‌ها با استفاده از شاخص‌های اهمیت فازی به اولویت‌بندی صنایع حیاتی در یک سیستم اقتصادی پرداختند که با اولویت‌بندی تخصیص منابع، تاب‌آوری کل سیستم اقتصادی را در برابر وقوع اختلالات احتمالی افزایش دادند. **ژائو و همکاران (۲۰۱۸)**، با استفاده از

امروزه جوامع به‌شدت به شبکه‌ای پیچیده از زیرساخت‌های حیاتی به‌هم‌پیوسته شامل سیستم‌های انرژی، حمل‌ونقل، آب و فاضلاب و ارتباطات وابسته‌اند، به‌گونه‌ای که اختلال در یک زیرساخت در اثر وقوع بحران یا ایجاد هرگونه اختلالی در آن‌ها، می‌تواند به اثرات آشناری در سایر بخش‌های وابسته منجر شود. این پدیده که به‌عنوان بحران زیرساخت‌های حیاتی وابسته به هم شناخته می‌شود، می‌تواند به اختلال گسترده در عملکرد روزمره جوامع منجر شود. به‌عنوان مثال، از یک سو، نیروگاهی که از فاضلاب، برق تولید می‌کند، برای عملکرد خود به شبکه فاضلاب نیاز دارد؛ از سوی دیگر، فاضلاب برای تأمین برق خود به شبکه برق نیاز دارد. مثالی دیگر از وابستگی بین زیرساخت‌های وابسته به هم این است که زیرساخت فاضلاب به‌منظور تخلیه سیل در زیرساخت‌های بزرگراهی سیل‌زده به نیروی الکتریکی نیاز دارد (**سوتیچن و همکاران؛ ۲۰۲۳**).

باتوجه‌به نقش مهم زیرساخت‌های حیاتی در تأمین رفاه جوامع، افزایش تاب‌آوری سیستم به مفهوم بهبود توانایی سیستم در برابر اختلالات و تسریع در برابر عملیات بازیابی پس از وقوع یک رویداد مخرب در زیرساخت‌های حیاتی از اهمیت بسزایی برخوردار است. **بالاکریشن و همکاران (۲۰۲۰)**، با انجام اقدامات تقویتی در این زیرساخت‌ها پیش از وقوع بحران به افزایش تاب‌آوری در زیرساخت‌های حیاتی پرداختند. باتوجه‌به اینکه در شبکه‌های زیرساختی هریک از اجزای زیرساخت اهمیت خاص خود را دارد، اهمیت هر گره برای شبکه‌ها تا حد زیادی براساس نوع خدمتی که ارائه می‌دهد و تعداد گره‌های زیرساختی که به آن وابسته هستند، متفاوت است (**بالاکریشن و همکاران (۲۰۲۰)**).

المغتای و همکاران (۲۰۲۱)، یک مدل ریاضی چندهدفه عدد صحیح مبتنی بر بازیابی در جهت افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌های وابسته به یکدیگر آب و برق بعد از وقوع بحران ارائه دادند. آن‌ها با حل این مدل هزینه‌های کل فرایند بازیابی را کاهش دادند و باتوجه‌به محدودیت منابع مالی و زمانی به اولویت‌بندی گره‌ها و لینک‌هایی که باید بازیابی شوند پرداختند. به‌منظور افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌های وابسته به یکدیگر، **رضاپور و شبنم (۲۰۲۴)**، روشی نوآورانه مبتنی بر یادگیری تقویتی در جهت بازیابی مشارکتی بین زیرساخت‌های حیاتی جاده و برق در داکوتای جنوبی که توسط گردباد مختل شده بود ارائه دادند.

ژانک و همکاران (۲۰۲۴)، مدل بهینه‌سازی دوسطحی برای بازیابی هم‌زمان شبکه‌های حمل‌ونقل و برق پس از وقوع زلزله توسعه دادند. **شاهوردی و همکاران (۲۰۲۴)**، مدل ریاضی برای بهینه‌سازی ترتیب بازسازی زیرساخت‌های آب و برق و حمل‌ونقل بعد از وقوع بحران توسعه دادند و نشان دادند همکاری بین زیرساخت‌ها، اولویت‌بندی و برنامه‌ریزی اقدامات بازیابی موجب



اویانگ و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از مدل سازی و تحلیل داده ها، مکان های بحرانی را در زیرساخت های برق و گاز شناسایی کرده و تأثیر اختلالات و وابستگی بین زیرساخت ها را نیز در این مکان ها بررسی کردند. **المغتای و همکاران (۲۰۲۳)**، یک مدل ریاضی برای بهینه سازی فرایند بازیابی شبکه های زیرساختی وابسته به هم پس از وقوع بحران ارائه دادند. آن ها با استفاده از این مدل، کارهای مورد نیاز برای بازیابی را اولویت بندی کردند و سپس منابع انسانی مورد نیاز برای تعمیر را به این کارها اختصاص دادند و زمان بندی کردند.

وانگ و همکاران (۲۰۲۳)، یک مدل بازی کورنو برای تحلیل امنیت شبکه های زیرساختی در برابر حملات سایبری توسعه دادند. تمرکز این بازی بر بهینه سازی تخصیص منابع دفاعی برای حفاظت از شبکه در برابر حملات با در نظر گرفتن محدودیت منابع و گره های حیاتی شبکه بود. آن ها از روش تاپسیس برای شناسایی گره های حیاتی استفاده کردند. شناسایی گره های حیاتی به مدافعان شبکه های زیرساختی حیاتی کمک می کند تا منابع خود را به طور مؤثرتری تخصیص داده و از شبکه در برابر حملات محافظت کنند. **بارت و همکاران (۲۰۲۰)**، با استفاده از نظریه بازی همکارانه (اثر شاپلی) برای هر گره کلیدی، ائتلاف هایی تشکیل دادند و سپس با استفاده از اثر شاپلی برای هر ائتلاف، گره های غیر کلیدی را در هر ائتلاف اولویت بندی کردند و از نتایج آن در جهت تخصیص بهینه منابع استفاده کردند.

اوگوو و همکاران (۲۰۲۲)، به برنامه ریزی عملیات بازیابی سیستم های زیرساختی وابسته به هم پس از وقوع بلایای طبیعی پرداختند که تمرکز اصلی آن ها بر بازیابی امکانات درمانی بود. آن ها جهت انجام عملیات بازیابی به اولویت بندی امکانات درمانی مانند بیمارستان ها پرداختند که به شدت به عملکرد صحیح سیستم های زیرساختی پیچیده وابسته هستند. آن ها با اولویت بندی بازیابی این امکانات توانستند به بهبود کارایی و سرعت بازیابی پس از وقوع بلایا کمک کنند.

جدول شماره ۱ مروری بر مهم ترین تحقیقاتی که در گذشته در جهت رتبه بندی زیرساخت ها به منظور افزایش تاب آوری زیرساخت های حیاتی وابسته به یکدیگر در فاز قبل یا بعد از بحران انجام شده است، ارائه گردیده است.

با وجود پیشرفت های قابل توجه در این حوزه، همچنان چالش های قابل توجهی در حل مسئله بازیابی زیرساخت های وابسته به هم وجود دارد. یکی از چالش های اصلی، عدم وجود رویکردی جامع برای تقویت و بازسازی یکپارچه زیرساخت های آسیب دیده است. همان طور که در **جدول شماره ۱** مشاهده می شود، بسیاری از مطالعات صورت گرفته در این زمینه، بر روی فاز پس از بحران تمرکز داشتند و به دنبال روش هایی برای بازیابی سریع زیرساخت های آسیب دیده هستند (**المغتای و همکاران، ۲۰۲۳**؛ **هوانگ و همکاران، ۲۰۱۴**؛ **ژو و همکاران، ۲۰۱۹**؛ **شاهوردی و همکاران، ۲۰۲۴**).

روش رتبه صفحه^۱ به رتبه بندی زیرساخت های حیاتی پرداختند. آن ها از یک مدل شبکه ای جهت دار وزن دار چند لایه برای نشان دادن وابستگی بین زیرساخت های حیاتی استفاده کردند. آن ها با استفاده از این مدل، گره های بحرانی در شبکه های زیرساختی حیاتی را شناسایی کردند. هر زیرساخت حیاتی به عنوان یک گره در شبکه نشان داده شد.

کوتلر و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از روش تاپسیس به رتبه بندی گره ها و کمان ها در شبکه های زیرساختی برق و مخابرات در شرایط بروز اختلالات چندگانه پرداختند. آن ها فرمول بازگشتی برای محاسبه سهم هر مؤلفه در اختلالات چندگانه ارائه دادند. **یوان و همکاران (۲۰۱۷)**، با استفاده از تئوری نفوذ نشان دادند که در شبکه های وابسته به هم حداکثر ۱۷/۵۶ درصد از گره ها می توانند تقویت شوند تا از فروپاشی ناگهانی شبکه ها جلوگیری شود.

سوتیچن و همکاران (۲۰۲۳)، مدل تصادفی دومرحله ای ارائه دادند که در مرحله اول، تصمیمات تقویت شبکه قبل از بحران و در مرحله دوم، برنامه ریزی تعمیرات در فاز بعد از بحران را در نظر گرفتند. **هوانگ و همکاران (۲۰۱۴)**، از روشی به نام دانپ که ترکیبی از دو تکنیک دیمتل و ANP است به اولویت بندی زیرساخت های حیاتی پرداختند. مدل دانپ به طور مؤثری، روابط پیچیده بین زیرساخت ها را در نظر گرفته و به تعیین اینکه کدام بخش از زیرساخت ها برای ثبات کلی سیستم، مهم تر هستند، کمک می کند.

ژانگ و همکاران (۲۰۰۸)، با استفاده از تحلیل شبکه های اجتماعی زیرساخت های حیاتی را از نظر مشارکت در وابستگی بین زیرساخت ها رتبه بندی کردند. آن ها نشان دادند که زیرساخت های برق و مخابرات به دلیل ایجاد نقش مهمشان در ایجاد وابستگی بین زیرساخت ها از اهمیت ویژه ای برخوردارند و آسیب پذیری کل سیستم را افزایش می دهند. **چوپرا و خانا (۲۰۱۵)**، شبکه اسکلتی در زمینه تاب آوری سیستم های یکپارچه برق و گاز توسعه دادند. شبکه اسکلتی به مجموعه ای از اجزای حیاتی در سیستم های یکپارچه برق و گاز اشاره دارد که برای حفظ عملکرد کلی سیستم ضروری هستند و این اجزای حیاتی تر در اولویت بالاتری برای تعمیر یا جایگزینی قرار گرفته و موجب افزایش کارایی عملیات بازیابی می شوند و همچنین با اولویت بندی بازیابی اجزای حیاتی، زمان لازم برای بازگرداندن سیستم به عملکرد کامل خود را به طور قابل توجهی کاهش می دهند. آن ها با تمرکز بر اجزایی که بیشترین تأثیر را بر عملکرد کلی سیستم دارند، تاب آوری سیستم را در برابر اختلالات افزایش دادند.

1. Page Rank
2. DANP



نیاز دارد. وقوع بلایای طبیعی یا انسانی باعث ایجاد اختلال در مقیاس بزرگ در خدمات این زیرساخت‌ها می‌شوند. بازگرداندن خدمات به این زیرساخت‌ها پس از وقوع بحران، حیاتی است و از این رو، حفظ شبکه‌های زیرساختی به صورتی ایمن و تاب‌آور به یکی از چالش‌برانگیزترین مسائل برای دولت‌ها در سراسر جهان، به‌ویژه در چند دهه اخیر تبدیل شده است.

باتوجه به محدودیت‌های زمان، هزینه و سایر منابع لازم است تعیین کنیم که کدام بخش‌های شبکه، اولویت بیشتری برای تقویت دارند. هدف این تحقیق، اولویت‌بندی گره‌های حیاتی به‌منظور تقویت این زیرساخت‌ها در فاز قبل از بحران با در نظر گرفتن وابستگی بین گره‌ها در زیرساخت‌های آب، برق و فاضلاب و باتوجه به برخی شاخص‌ها نظیر، ظرفیت گره، نوع گره از نوع انتقال یا تأمین و میزان ارتباطات با سایر شبکه‌ها و میزان هزینه تعمیر است، به‌گونه‌ای که به شناسایی گره‌های حیاتی در شبکه می‌پردازد و آن‌ها را برای دریافت منابع جهت تقویتشان اولویت‌بندی می‌کند. با تقویت گره‌های حیاتی، می‌توان در زمان بروز بحران، اختلالات را به حداقل رسانده و تاب‌آوری زیرساخت‌ها را تا حد امکان افزایش داد.

روش

در این تحقیق از روش‌های دیمتل و ارزیابی ریشه برای ارزیابی و اولویت‌بندی استفاده می‌شود که در ادامه تشریح می‌گردد.

روش دیمتل^۵

روش دیمتل یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است که برای شناسایی و وزن‌دهی به معیارها در مسائل پیچیده با معیارهای کیفی و کمی متعدد به کار می‌رود. این روش توسط گابوس و فونتلا در سال ۱۹۷۲ توسعه یافته است. در استفاده از این روش به‌ترتیب از دو منبع (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹)، یزدانی و همکاران، ۲۰۱۷) استفاده شده است که مقاله یزدانی و همکاران (۲۰۱۷)، برای مراحل کلی این روش و منبع دوم ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) برای تعیین وزن معیارها استفاده شده است. مراحل اصلی روش دیمتل به شرح زیر است (یزدانی و همکاران، ۲۰۱۷):

گام اول: شناسایی معیارها

اولین قدم در روش دیمتل، شناسایی تمام معیارهای مرتبط با مسئله موردنظر است. این معیارها می‌توانند کیفی یا کمی باشند.

درحالی‌که تحقیقات کمتری در زمینه فاز قبل از بحران و اهمیت تقویت زیرساخت‌ها برای افزایش تاب‌آوری آن‌ها انجام شده است. اگرچه مطالعاتی درمورد تقویت زیرساخت‌ها در فاز قبل از بحران وجود دارد اما این مطالعات به‌طور کامل، وابستگی متقابل بین زیرساخت‌های حیاتی و محدودیت‌های منابع مانند محدودیت در بودجه و نیروی انسانی را در نظر نگرفتند (سوئچین و همکاران، ۲۰۲۳؛ یوان و همکاران، ۲۰۱۷). در نتیجه روش‌های ارائه‌شده در این مطالعات ممکن است در دنیای واقعی کارآمد نباشند.

به‌منظور پوشش شکاف تحقیقاتی موجود در این زمینه، در این تحقیق بر آنیم تا باتوجه به محدودیت بودجه، زمان و نیروی کار به اولویت‌بندی اجزای زیرساخت‌های حیاتی برای انجام اقدامات تقویتی به‌منظور افزایش تاب‌آوری در آن‌ها می‌پردازیم. هدف اصلی این پژوهش، ارائه یک روش کارآمد و مبتنی بر داده برای اولویت‌بندی اجزای زیرساخت‌های حیاتی به‌منظور انجام اقدامات تقویتی و افزایش تاب‌آوری کل سیستم، باتوجه به محدودیت‌های موجود است. در این پژوهش، تلاش خواهد شد تا با استفاده از روش‌های نوین مدل‌سازی و تحلیل شبکه‌های پیچیده، روشی جامع برای شناسایی نقاط آسیب‌پذیر و اولویت‌بندی اقدامات تقویتی ارائه شود. نوآوری اصلی این پژوهش در تلفیق دو رویکرد زیر نهفته است: اولاً، توجه به وابستگی متقابل زیرساخت‌ها و مدل‌سازی دقیق این وابستگی؛ ثانیاً، استفاده از روش‌های نوین تحلیل شبکه برای شناسایی نقاط آسیب‌پذیر و اهمیت هر یک از اجزای شبکه.

در ادامه این مقاله، ابتدا روش پیشنهادی برای اولویت‌بندی اجزای زیرساخت‌ها ارائه شده و نتایج حاصل از کاربرد این روش بر روی یک مطالعه موردی واقعی ارائه خواهد شد. درنهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای پژوهش‌های آتی ارائه می‌شود.

بیان مسئله

جوامع مدرن بر عملکرد مناسب و پایداری شبکه‌های زیرساختی حیاتی^۳ متکی هستند. این زیرساخت‌های حیاتی^۴ را می‌توان در چهار گروه حمل‌ونقل مثل بزرگراه‌ها، انرژی مثل شبکه‌های برق، مخابرات مثل شبکه بین‌المللی و آب (مثل فاضلاب) طبقه‌بندی کرد (لی و همکاران، ۲۰۰۷). شبکه‌های زیرساختی حیاتی برای ارائه خدمات ضروری به جامعه، با یکدیگر تعامل دارند و به یکدیگر وابسته هستند. اگرچه هر یک از این زیرساخت‌ها براساس عناصر ساختاری خود عمل می‌کنند، اما در عملکرد، اغلب به یکدیگر وابسته هستند. فعالیت‌های انجام‌شده توسط یک شبکه زیرساخت ممکن است به دریافت سرویس از زیرساخت دیگری نیاز داشته باشد. به‌عنوان مثال، یک نیروگاه برق برای عملکرد خود به شبکه آب برای خنک‌سازی و به شبکه حمل‌ونقل برای انتقال سوخت

3. Critical infrastructure networks

4. Critical infrastructures

5. Decision Making Trial and Evaluation Laboratory

گام دوم: ایجاد ماتریس ارتباط مستقیم (M)

گام پنجم

در ماتریس روابط کل که با T نمایش داده می‌شود، مجموع سطرها و مجموع ستون‌ها به ترتیب با بردارهای D و R نشان داده می‌شوند. این بردارها با استفاده از فرمول‌های شماره ۵ و ۶ به دست آمده‌اند.

$$5. D_i = \left[\sum_{j=1}^n z_{ij} \right]_{n \times 1} = [z_i]_{n \times 1}, i = 1, 2, \dots, n$$

$$6. R_j = \left[\sum_{i=1}^n z_{ij} \right]_{1 \times n} = [z_j]_{n \times 1}, j = 1, 2, \dots, n$$

گام ششم: تعیین مقدار آستانه (A)

از آنجایی که ماتریس T چگونگی تأثیر یک عامل بر عامل دیگر را نشان می‌دهد، تعیین یک مقدار آستانه (A) برای تصمیم‌گیرنده ضروری است. این مقدار به شفاف‌سازی روابط ساختاری بین معیارها کمک می‌کند و درعین حال پیچیدگی کل سیستم را در سطح قابل‌قبولی نگه می‌دارد. تعیین مقدار آستانه معمولاً توسط کارشناسان و باهدف تعیین حداقل سطح تأثیرگذاری انجام می‌شود. اگر مقدار همبستگی بین دو عنصر در ماتریس T کمتر از A باشد، رابطه تأثیرگذاری بین آن‌ها از نقشه حذف می‌شود. تنها تأثیراتی که از مقدار A بزرگ‌تر هستند، انتخاب و در نمودار جهت‌دار نشان داده می‌شوند. در این مقاله، مقدار A با محاسبه میانگین عناصر ماتریس T ، طبق فرمول شماره ۷ محاسبه می‌شود. در این فرمول، N تعداد کل عناصر ماتریس T است.

$$7. \alpha = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [z_{ij}]}{N}$$

گام هفتم: توسعه دیاگرام علی

دیاگرام علی، روشی برای طبقه‌بندی درجه اهمیت هر معیار است. این دیاگرام نشان می‌دهد که یک معیار به راحتی به عنوان معیار اثرپذیر یا معیار اثرگذار طبقه‌بندی می‌شود. براساس این دیاگرام، اهمیت هر معیار را می‌توان شناخت و می‌توان معیارهای علت و معلول را شناسایی و گروه‌بندی کرد. به طور خاص، (D_k) برجستگی نشان‌دهنده درجه اهمیت یک معیار است. رابطه را می‌توان به عنوان شاخصی برای قضاوت در مورد اینکه آیا یک معیار عامل علت است یا عامل معلول در نظر گرفت. اگر مقدار $(D_k + R_k)$ مربوط به یک معیار، مثبت باشد، در گروه علت قرار می‌گیرد و اگر مقدار آن منفی باشد، یک معیار معلولی است.

در این مرحله، از خبرگان یا تصمیم‌گیرندگان یا افرادی که نسبت به ماهیت مسئله، شناخت کافی و لازم را دارند خواسته می‌شود تا روابط متقابل بین هر دو معیار را به صورت عددی نشان دهند. برای این منظور، از یک طیف مقایسه‌ای مانند (۰) تا (۴) استفاده می‌شود. هر عدد در این طیف، نشان‌دهنده شدت تأثیر یک معیار بر معیار دیگر است: بدون تأثیر (۰)، تأثیر کم (۱)، تأثیر متوسط (۲)، تأثیر زیاد (۳) و تأثیر بسیار زیاد (۴). با این کار، یک ماتریس رابطه مستقیم (M) با ابعاد $n \times n$ به دست می‌آید که در این ماتریس، هر عنصر (a_{ij}) نشان‌دهنده میزان تأثیر معیار i بر معیار j و n تعداد معیارها را مشخص می‌کند (فرمول شماره ۱).

$$1. M = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 0 & \dots & a_{2j} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nj} & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

گام سوم: بی‌مقیاس‌سازی ماتریس ارتباط مستقیم (M)

پس از ایجاد ماتریس رابطه مستقیم (M)، ماتریس نرمال (N) با استفاده از فرمول‌های شماره ۲ و ۳ به دست می‌آید. هر عنصر در ماتریس N در بازه ۰ تا ۱ قرار دارد.

$$2. N = K.M$$

$$K = \frac{1}{\max(\sum_{j=1}^n a_{ij})}, i, j = 1, 2, \dots, n$$

$$3. \max(\sum_{j=1}^n a_{ij})$$

گام چهارم: محاسبه ماتریس رابطه کلی (T)

ماتریس رابطه کلی (T) با استفاده از فرمول شماره ۴ به دست می‌آید که در آن (I) ماتریس واحد است. هر عنصر t_{ij} در این ماتریس نشان‌دهنده تأثیرات غیرمستقیمی است که معیار i بر معیار j دارد و ماتریس T روابط کلی بین هر جفت از متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

$$T = [z_{ij}]_{n \times n}, i, j = 1, 2, \dots, n$$

$$T = y + y^2 + y^3 + \dots + y^k =$$

$$4. y(I + y + y^2 + \dots + y^{k-1})[(I - y)^{-1}]$$

$$= y(I - y^k)(I - y)^{-1}, \text{Then,}$$

$$T = y(I - y)^{-1}y, \text{When, } K \rightarrow \infty, y^K = [0]_{n \times n}$$

$$T = y(I - y)^{-1}$$

گام هشتم: محاسبه وزن معیارها

با استفاده از فرمول شماره ۸ وزن هر معیار قابل محاسبه است (بایکاس اوغلو و گلچوک، ۲۰۱۷).

$$8. W_L = \sqrt{(D_L + R_L)^2 + (D_L - R_L)^2}$$

در نهایت، وزن نرمال شده هر معیار مطابق فرمول شماره ۹ محاسبه می شود.

$$9. \bar{W}_L = \frac{W_L}{\sum_{I=1}^n W_L}$$

وزن نهایی زیرمعیارها را می توان با استفاده از فرمول شماره ۱۰ محاسبه کرد.

$$10. W_{PI} = \bar{W}_{PI} \times \bar{W}_P$$

که $\bar{W}_P$ وزن معیارهای اصلی و $\bar{W}_{PI}$ وزن محلی زیرمعیارها است. $\bar{W}_{PI}$ وزن کل است. وزن معیارهای اصلی و زیرمعیارها نیز با استفاده از مراحل بالا محاسبه می شود.

روش ارزیابی ریشه

در این پژوهش، از روش ارزیابی ریشه به عنوان یک روش نوآورانه در تصمیم گیری چند معیاره برای اولویت بندی گره ها در زیرساخت های حیاتی قبل از وقوع بحران استفاده می کنیم. این روش در سال ۲۰۲۳ توسط ستوده اهوری ارائه شده است و به دلیل ویژگی های منحصر به فردی همچون ماهیت جبران کننده جدید، قابلیت جبران جزئی و استفاده از تابع تجمیع ریشه ای، به ابزاری مناسب برای اولویت بندی گره ها در زیرساخت های حیاتی تبدیل شده است و به ما این امکان را می دهد عوامل مختلفی را که بر عملکرد یک گره در طول یک بحران تأثیر می گذارند را در نظر بگیریم (ستوده اهوری، ۲۰۲۳).

یک مسئله تصمیم گیری شامل مجموعه ای متناهی از m گزینه $A_i, i=1, \dots, m$ در نظر بگیرید که لازم است نسبت به مجموعه ای از n معیار $C_j, j=1, \dots, n$ رتبه بندی شوند. معیارها به دو دسته سودمند و غیر سودمند تقسیم می شوند. اگر a_{ij} را به عنوان عملکرد گزینه i در معیار تصمیم j در نظر بگیریم، ماتریس تصمیم برای m گزینه و n معیار فرمول شماره ۱۱ خواهد بود.

$$11. R = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

وزن اختصاص داده شده به معیار j ام با $w_j > 0$ با نشان داده می شود به گونه ای که $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ برقرار می باشد. بدیهی است که فرآیند تعیین وزن معیارها خارج از محدوده این روش قرار

می گیرد. حال به شرح مراحل روش RAM که برای رتبه بندی گزینه های موجود استفاده می شود، می پردازیم. روش ارزیابی ریشه از مراحل زیر تشکیل شده است (ستوده اهوری، ۲۰۲۳):

گام اول

نرمال سازی ماتریس تصمیم گیری با فرمول نرمال سازی مجموع خطی را با استفاده از فرمول شماره ۱۲ داریم:

$$12. r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

گام دوم

محاسبه ماتریس تصمیم گیری نرمال شده موزون را با استفاده از فرمول شماره ۱۳ داریم:

$$13. x_{ij} = r_{ij} w_j \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$$

گام سوم

محاسبه مجموع امتیازهای نرمال شده با وزن دهی معیارهای سودمند و غیر سودمند برای گزینه نام را با استفاده از فرمول های ۱۴ و ۱۵ داریم:

$$14. S_{+i} = \sum_{j=1}^n x_{+ij}$$

$$15. S_{-i} = \sum_{j=1}^n x_{-ij}$$

گام چهارم

محاسبه امتیاز کلی هر گزینه با استفاده از تابع تجمیع. در مرحله چهارم، روش RAM از یک تابع تجمیع برای محاسبه امتیاز نهایی (کل) هر گزینه (A_i) استفاده می کند. این تابع تجمیع، تأثیر جداگانه معیارهای سودمند (S_{+i}) و غیر سودمند (S_{-i}) را که در مرحله قبل با استفاده از فرمول های ۱۴ و ۱۵ محاسبه شده اند، در نظر می گیرد. تابع تجمیع به صورت فرمول شماره ۱۶ تعریف می شود:

$$16. RI_i = \sqrt[2+S_{-i}]{2+S_{+i}} \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

گام پنجم

رتبه بندی گزینه ها با استفاده از مقدار RI_1

یافته ها و بحث

شبکه های زیرساختی شهری، مانند شبکه های برق، آب و فاضلاب، برای عملکرد روان جوامع مدرن ضروری هستند. خرابی در این شبکه ها می تواند به اختلالات گسترده، از دست دادن



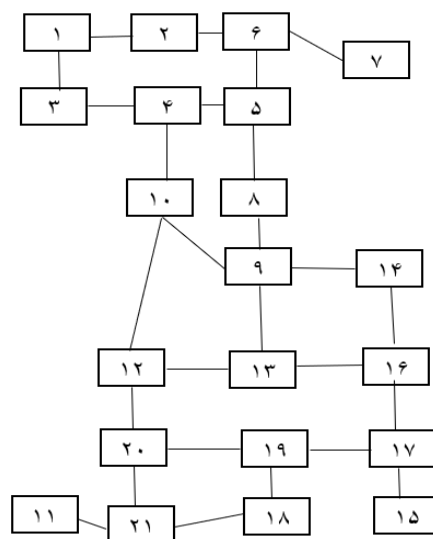
جدول شماره ۲، خلاصه‌ای از پارامترهای مسئله مربوط به زیرساخت‌های برق، آب و فاضلاب را نشان می‌دهد. پارامترها شامل گره‌های تقاضا، گره‌های تأمین، گره‌های انتقال و پارامترهای تقاضا، عرضه، ظرفیت کمان، ظرفیت گره، زمان تعمیر و هزینه تقویتی است.

گره‌های تقاضا گره‌هایی هستند که به برق، آب یا فاضلاب نیاز دارند. گره‌های تأمین، گره‌هایی هستند که جهت تأمین برق، آب یا فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند. گره‌های انتقال گره‌هایی هستند که برق، آب یا فاضلاب را از یک گره به گره دیگر منتقل می‌کنند. پارامتر تقاضا مقدار برق، آب یا فاضلاب مورد نیاز در هر گره تقاضا و پارامتر عرضه، مقدار برق، آب یا فاضلاب موجود در هر گره تأمین است. ظرفیت کمان، حداکثر مقدار برق، آب یا فاضلابی است که می‌تواند از طریق هر کمان جریان یابد و ظرفیت گره، حداکثر مقدار برق، آب یا فاضلابی است که می‌تواند در هر گره ذخیره شود. پارامتر زمان تعمیر، زمانی است که طول می‌کشد تا یک گره یا کمان معیوب، تعمیر شود. پارامتر هزینه تقویتی نیز هزینه تقویت گره است.

جدول شماره ۳ وابستگی‌های متقابل بین زیرساخت‌های مختلف در شبکه شهری سیوکس فالز را نشان می‌دهد. ستون دوم این **جدول** نشان می‌دهد که چه خدماتی توسط یک گره وابسته مورد نیاز است. ستون سوم آن نشان می‌دهد که چه خدماتی توسط یک گره تأمین‌کننده ارائه می‌شود. به عبارت دیگر، نشان می‌دهد که هر گره برای کارکرد صحیح به چه منابعی از سایر گره‌ها نیاز دارد و در مقابل چه منبعی را برای شبکه تأمین می‌کند. به عنوان مثال، برق و فاضلاب در ستون دوم مربوط به گره ۱۸، به این معنی است که گره ۱۸ یک تصفیه‌خانه آب است که برای عملکرد به برق و فاضلاب نیاز دارد. آب در ستون سوم

خدمات حیاتی و حتی تلفات جانی منجر شود. به دلیل محدودیت منابع برای تقویت و ارتقای زیرساخت‌ها در دنیای واقعی، شناسایی و اولویت‌بندی گره‌های حیاتی در این شبکه‌ها برای اطمینان از تاب‌آوری و عملکرد آن‌ها در برابر اختلالات احتمالی از اهمیت بالایی برخوردار است. به منظور بررسی عملکرد الگوریتم‌های تشریح‌شده، از شبکه شهری سیوکس فالز در داکوتای جنوبی استفاده می‌کنیم که در تحقیقات گذشته برای مسائل ترافیک مورد استفاده قرار گرفته است. ما این داده‌ها را از داده‌های مقاله **سوتچین و همکاران (۲۰۲۳)** استخراج می‌کنیم که داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، یک شبکه وابسته از زیر ساخت‌های آب و برق و فاضلاب می‌باشد که شامل ۲۴ گره است که در این تحقیق ما از ۲۴ گره که از انواع، گره‌های عرضه، انتقال و تقاضا بودند، از ۲۱ گره آن که فقط شامل گره‌های انتقال و عرضه هستند استفاده می‌کنیم و از گره‌هایی که صرفاً فقط از نوع تقاضا هستند به علت اینکه نمی‌توانیم آن‌ها را جز گره‌های با اهمیت در عملکرد شبکه در نظر بگیریم صرف‌نظر شده است (۳ گره حذف شدند).

همان‌طور که در **تصویر شماره ۱**، قابل مشاهده است، این شبکه شامل ۲۱ گره و ۲۳ کمان است. بودجه تقویت هر زیرساخت معادل ۵ درصد از کل هزینه تقویت تمام کمان‌های آن زیرساخت در نظر گرفته شده است. فرض می‌کنیم گره‌های تقاضا دارای درجه اهمیت یکسان بوده و اهمیت سیستم برق، دو برابر اهمیت سیستم فاضلاب و آب در نظر گرفته شده است. علاوه بر این در این تحقیق در قسمت‌هایی که نیاز بوده است از نظر خبرگان بهره‌گیری شود، منظور از خبرگان افرادی هستند که شناخت کافی و لازمی نسبت به شبکه‌های زیر ساختی آب، برق و فاضلاب شهری دارند.



تصویر ۱. شبکه شهری Sioux Falls



به دست آمده است. از ماتریس M در جدول شماره ۴، ماتریس روابط مستقیم نرمال (N) به دست می آید که در جدول شماره ۵ نشان داده شده است. سپس، ماتریس تأثیرات کل (T)، در جدول شماره ۶ نشان داده می شود. حال، مجموع سطرها و ستون ها که به ترتیب با بردارهای d و r نشان داده می شوند، محاسبه شده و در جدول شماره ۷ نشان داده شده است. نمودار علت و معلول، همان طور که در تصویر شماره ۲ نمایش داده شده، با ترسیم داده های جدول شماره ۷ به دست می آید. براساس مقادیر به دست آمده در جدول شماره ۷، مجموعه داده های ($d+r$) و ($d-r$) با استفاده از فرمول های ۵ و ۶ محاسبه می شوند. پس از آن، وزن نرمال شده هر گزینه تصمیم گیری با استفاده از فرمول های ۸ و ۹ به دست می آید. نتایج این محاسبات در جدول شماره ۸ نشان داده شده است.

نمودار علیتی که در تصویر شماره ۲ نشان داده شده است، با رسم داده های جدول شماره ۸ به دست آمده است. مقادیر ($r-d$) محور عمودی نمودار است که میزان تأثیرگذاری هر معیار را نشان می دهد و هرچه مقدار آن بیشتر باشد به این معنی است که آن معیار با سایر معیارها، تعامل بیشتری دارد و اهمیت آن معیار بیشتر است. همان طور که در جدول شماره ۸ مشاهده می شود، معیار ظرفیت گره (C_1) بیشترین اهمیت را دارد. محور افقی نمودار تصویر شماره ۲ بیانگر مقادیر ($r+d$) می باشد که میزان تأثیرپذیری آن معیار را نشان می دهد. در جدول شماره ۸ معیار هزینه تعمیر (C_2) تأثیرپذیرترین معیار است.

برای هر زیرمعیار، یک وزن محلی در نظر گرفته شده است که نشان دهنده اهمیت نسبی آن زیرمعیار نسبت به سایر زیرمعیارهای همان معیار اصلی است. در جدول شماره ۹ وزن محلی زیرمعیارها به صورت تصادفی در نظر گرفته شده است و مجموع آن ها باید ۱ شود.

وزن کلی هر زیرمعیار با ضرب وزن محلی آن در وزن معیار اصلی مربوطه محاسبه می شود. این وزن، اهمیت نهایی هر زیرمعیار را در کل سیستم نشان می دهد. پس از محاسبه وزن کلیه معیارهای اصلی، می توان وزن کلی هر زیرمعیار را با استفاده از فرمول شماره ۱۰ محاسبه کرد. نتایج محاسبات در جدول شماره ۹ نشان می دهد که معیار ظرفیت گره «بیشترین اهمیت را در تصمیم گیری دارد و در نتیجه، افزایش ظرفیت گره ها، تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد سیستم خواهد داشت. همچنین، زیرمعیار برق در اغلب موارد، بیشترین وزن محلی را در بین زیرمعیارهای هر معیار اصلی دارد که اهمیت زیرساخت برق را در این مسئله تأیید می کند. با استفاده از این نتایج، می توان اولویت بندی پروژه های توسعه شبکه را انجام داده و منابع را به صورت بهینه تخصیص داد.

رتبه بندی گره های حیاتی در شبکه زیرساخت های وابسته به یکدیگر آب و برق و فاضلاب با روش ارزیابی ریشه به شرح زیر انجام می شود:

مربوط به گره ۱۸، به این معناست که خروجی گره ۱۸، آب تصفیه شده است. فاضلاب در ستون دوم مربوط به گره ۶، به این معنی است که گره ۶ یک نیروگاه است که برای تولید برق به فاضلاب نیاز دارد.

بنابراین، جدول شماره ۳ به ما کمک می کند تا روابط و وابستگی های مهم بین اجزای مختلف شبکه زیرساخت شهری را درک کنیم. اختلال در یک گره (مثلاً کمبود فاضلاب برای نیروگاه) می تواند بر عملکرد سایر گره ها (مثلاً کمبود برق برای تصفیه خانه آب) و در نهایت بر کل شبکه تأثیر بگذارد. اختلال در تأمین خدمات از گره های بالادست می تواند اثرات آشناری داشته باشد و بر گره های پایین دست که به آن خدمات وابسته هستند، تأثیر بگذارد.

تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها

در این شبکه، ۲۱ گره، گزینه های ما هستند و پنج معیار اصلی ظرفیت گره (C_1)، گره تأمین (C_2)، گره انتقال (C_3)، ارتباط با سایر شبکه ها مثل ارتباطات (C_4) و معیار هزینه تعمیر (C_5) و سه زیرمعیار از نوع زیرساخت برق (C_{11})، آب (C_{12}) و فاضلاب (C_{13}) موجود است که ۱ شماره معیار اصلی است که زیرمعیارها به آن تعلق دارند.

ابتدا برای هر زیرمعیار، براین اساس که زیرساخت برق، اهمیتی دو برابر زیرساخت های آب و فاضلاب دارد، وزن محلی تعیین می کنیم. در این حالت، وزن زیرمعیار برق، 0.5 و وزن محلی زیرمعیارها دیگر را 0.25 در نظر گرفتیم. جهت استفاده از روش ارزیابی ریشه به منظور اولویت بندی گره ها باید وزن معیارها را داشته باشیم. در این زیر بخش ابتدا با استفاده از روش دیمتل به تشریح جزئیات مربوط به مراحل تعیین وزن معیارهای اصلی پرداخته و سپس به نحوه محاسبه وزن محلی هر زیرمعیار و وزن نهایی آن تحت معیارهای اصلی مربوطه می پردازیم.

ابتدا برای هر زیرمعیار، براین اساس که زیرساخت برق، اهمیتی دو برابر زیرساخت های آب و فاضلاب دارد، وزن محلی تعیین می کنیم. در این حالت، وزن زیرمعیار برق، 0.5 و وزن محلی زیرمعیارها دیگر را 0.25 در نظر گرفتیم. جهت استفاده از روش ارزیابی ریشه به منظور اولویت بندی گره ها باید وزن معیارها را داشته باشیم. در این زیر بخش ابتدا با استفاده از روش دیمتل به تشریح جزئیات مربوط به مراحل تعیین وزن معیارهای اصلی پرداخته و سپس به نحوه محاسبه وزن محلی هر زیرمعیار و وزن نهایی آن تحت معیارهای اصلی مربوطه می پردازیم.

تعیین وزن معیارهای اصلی

ماتریس روابط مستقیم اولیه (M) در جدول شماره ۴ نشان داده شده است. ماتریس M یک ماتریس 5 در 5 است که با مقایسه های جفتی از نظر تأثیرات و جهت ها بین معیارها

جدول ۱. مروری بر مقالات ارائه شده در حوزه اولویت بندی زیرساخت های حیاتی وابسته به هم

نویسندگان	نوع زیرساخت ها	رویکرد اولویت بندی	هدف پژوهش	مطالعه موردی
ژانگ و همکاران، (۲۰۰۸)	همه زیرساخت های حیاتی	تحلیل شبکه های اجتماعی	محافظت از زیرساخت های حیاتی و بهبود تاب آوری آن ها در برابر حملات	ندارد
هوانگ و همکاران، (۲۰۱۴)	انرژی، آب، حمل و نقل، مخابرات	DANP	بررسی اهمیت و وابستگی های متقابل زیرساخت های حیاتی و اولویت بندی آن ها	تایوان
اولیوا و همکاران، (۲۰۱۴)	صنایع در یک سیستم اقتصادی به هم وابسته	شاخص های اهمیت فازی	رتبه بندی صنایع بر اساس اهمیت آن ها	ندارد
اویانگ و همکاران، (۲۰۱۶)	برق و گاز	مدل سازی و شبیه سازی	شناسایی مکان های حیاتی و بررسی تأثیر اختلالات بر وابستگی بین زیرساخت ها	تگزاس آمریکا
یوان و همکاران، (۲۰۱۷)	ارائه یک مدل ریاضی با استفاده از تئوری نفوذ		تعیین حداقل سهم گره هایی که باید تقویت بشوند تا از فروپاشی شبکه ها جلوگیری شود	ندارد
ژائو و همکاران، (۲۰۱۸)	برق، گاز، آب، مخابرات	الگوریتم Page Rank و مدل شبکه های جهت دار وزن دار چندلایه	ارزیابی بحرانی زیرساخت های حیاتی شهری (رتبه بندی)	چین
بارنت، (۲۰۱۹)	آب و جاده	نظریه بازی همکارانه و مدل ریاضی	تخصیص منابع به زیرساخت های حیاتی به هم وابسته و اولویت بندی تعمیر بخش های مختلف زیرساخت	تمپا فلوریدا
ژو و همکاران، (۲۰۱۹)	قابل کاربرد در انواع زیرساخت ها	مدل سازی ریاضی	بهبود روش های زمان بندی توالی تعمیر برای زیرساخت حیاتی بعد از وقوع بلایا	ندارد
کوتر و همکاران، (۲۰۲۰)	برق و مخابرات	Topsis	ارائه روشی برای شناسایی اجزای مهم شبکه در صورت بروز خرابی های چندگانه	اداره برق و مخابرات سوئد
بالاکریشن و همکاران، ۲۰۲۰	قابل کاربرد در انواع زیرساخت ها	الگوریتم هیوریستیک	اولویت بندی اجزای زیرساخت های حیاتی به منظور افزایش تاب آوری کلی شبکه	ندارد
المفتاوی و همکاران، (۲۰۲۱)	برق گاز آب، حمل و نقل، ارتباطات	مدل بهینه سازی چندهدفه	تعیین بهترین ترتیب بازیابی زیرساخت ها، اختصاص گروه های کاری و سایر منابع که موجب تأثیر در عملیات بازیابی و کاهش هزینه های کل بازیابی و افزایش تاب آوری کل شبکه می شود.	شلیبی
اوگوو و همکاران، (۲۰۲۲)	برق، آب، حمل و نقل	مدل سازی ریاضی	برنامه ریزی بازیابی بعد از وقوع بحران برای اینکه خدمات بهداشتی حیاتی پس از وقوع بلایای طبیعی در دسترس باشند	شهر مجازی با سه بیمارستان
سوتچین و همکاران، (۲۰۲۳)	آب، برق، فاضلاب	برنامه ریزی تصادفی دومرحله ای ژنتیک و بهینه سازی جزئی	ارائه یک رویکرد یکپارچه برای تقویت و تعمیر شبکه های زیرساختی به هم وابسته در شرایط بحرانی	داکوتای جنوبی
المفتاوی و همکاران، (۲۰۲۳)	آب، برق، گاز	مدل سازی ریاضی برنامه ریزی عدد صحیح مختلط (MIP)	بهینه سازی عملیات بازیابی با تعیین ترتیب عملیات بازیابی در هر شبکه زیرساختی	شلیبی
وانگ و همکاران، (۲۰۲۳)	آب، برق، گاز	مدل بازی کورنو و Topsis و شبیه سازی	بهینه سازی تخصیص منابع دفاعی برای حفاظت از شبکه در برابر حملات سایبری با در نظر گرفتن محدودیت منابع و گره های حیاتی شبکه	ندارد
رضاپوروشنیم، (۲۰۲۴)	جاده و برق	روش یادگیری تقویتی چندگانه به هم پیوسته	بازیابی هم زمان و هماهنگی زیرساخت های حیاتی	داکوتای جنوبی
شاهوردی و همکاران، (۲۰۲۴)	برق، آب، حمل و نقل	مدل سازی ریاضی	اولویت بندی خدمات حیاتی جامعه در فرایند بازیابی زیرساخت های حیاتی بعد از وقوع بحران	شبکه فرضی شامل دو بیمارستان



جدول ۲. خلاصه پارامترهای مسئله (سوتچین و همکاران، ۳۲۰۲)

پارامتر	زیرساخت برق	زیرساخت فاضلاب	زیرساخت آب
گره‌های تقاضا	{۲۱، ۲۰، ۱۹، ۱۸، ۱۷، ۱۶، ۱۵، ۱۳، ۱۰، ۸، ۷}	{۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸}	{۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶}
گره‌های تأمین	{۱، ۲، ۳، ۴}	{۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰}	{۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹}
گره‌های انتقال	{۱۱، ۱۲، ۱۳}	{۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲}	{۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴}
تقاضا	گسسته U [۱، ۱۰۰]	گسسته U [۱، ۱۰۰]	گسسته U [۱، ۱۰۰]
عرضه	گسسته U [۱، ۴۰۰]	گسسته U [۱، ۴۰۰]	گسسته U [۱، ۴۰۰]
ظرفیت کمان	گسسته U ۱، ۴۰۰	گسسته U [۱، ۴۰۰]	گسسته U ۱، ۴۰۰
ظرفیت گره	گسسته U [۱، ۱۰۰]	گسسته U [۱، ۱۰۰]	گسسته U [۱، ۱۰۰]
زمان تعمیر	گسسته U [۱، ۳]	گسسته U [۱، ۳]	گسسته U [۱، ۳]
هزینه تقویتی	گسسته U [۱، ۳]	گسسته U [۱، ۳]	گسسته U [۱، ۳]

جدول ۳. وابستگی‌های متقابل بین زیرساخت‌ها در شبکه سیوکس فالز (سوتچین و همکاران، ۳۲۰۲)

گره	زیرساخت‌های سطح بالاتر	زیرساخت سطح پایین‌تر
۱	برق و آب	فاضلاب
۲	برق و آب	فاضلاب
۵	آب و فاضلاب	برق
۶	فاضلاب	برق
۹	برق و آب	فاضلاب
۱۵	برق و آب	فاضلاب
۱۶	برق و آب	فاضلاب
۱۸	برق و فاضلاب	آب

جدول ۴. تشکیل ماتریس ارتباط مستقیم A

معیار	C1	C2	C3	C4	C5
C1	۰	۳/۵	۳	۴	۳
C2	۳	۰	۱/۵	۳	۳/۵
C3	۳	۲	۰	۲/۵	۳
C4	۲	۱/۵	۴	۰	۳/۵
C5	۴	۳	۲	۳/۵	۰

جدول ۵. ماتریس روابط مستقیم نرمال شده (X) معیارهای اصلی

معیار	C1	C2	C3	C4	C5
C1	۰	۰/۲۵۹	۰/۲۲۲	۰/۲۹۶	۰/۲۲۲
C2	۰/۲۲۲	۰	۰/۱۱۱	۰/۲۲۲	۰/۲۵۹
C3	۰/۲۲۲	۰/۱۴۸	۰	۰/۱۸۵	۰/۲۲۲
C4	۰/۱۴۸	۰/۱۱۱	۰/۲۹۶	۰	۰/۲۵۹
C5	۰/۲۹۶	۰/۲۲۲	۰/۱۴۸	۰/۲۵۹	۰

جدول ۶. ماتریس ارتباطات کامل (T)

معیار	C1	C2	C3	C4	C5
C1	۱/۳۵	۱/۳۶۸	۱/۴۱۴	۱/۶۸۴	۱/۶۲۸
C2	۱/۳۴۲	۰/۹۹۹۹	۱/۱۵۹	۱/۴۳۱	۱/۴۴۵
C3	۱/۲۹۴	۱/۰۸۷	۱/۰۱۱	۱/۳۵۲	۱/۳۶۷
C4	۱/۲۷۴	۱/۰۸۲	۱/۲۷۲	۱/۲۲۲	۱/۴۲۲
C5	۱/۵۱۶	۱/۲۹۱	۱/۳۰۴	۱/۵۹۳	۱/۳۷۵

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم گیری R

در جدول شماره ۱۰ ماتریسی تشکیل می شود که در سطرهای آن ۲۱ گره شبکه و در ستون های آن معیارهای مختلف (با در نظر گرفتن زیرمعیارها) قرار می گیرند. مقادیر هر سلول از این ماتریس، نشان دهنده میزان برآورده سازی هر معیار توسط هر گره است. در ساخت ماتریس تصمیم گیری در روش ارزیابی ریشه، معیارها به دودسته اصلی سودمند و غیرسودمند تقسیم بندی شدند. معیارهای سودمند به مواردی اشاره دارند که افزایش آن ها به بهبود عملکرد شبکه کمک می کند، درحالی که معیارهای غیرسودمند، مواردی هستند که کاهش آن ها مطلوب است. در این مطالعه، ظرفیت گره (C_۱)، گره تأمین (C_۲)، گره انتقال (C_۳) به عنوان معیارهای سودمند در نظر گرفته شدند. ارتباط با سایر شبکه ها (C_۴) و هزینه تعمیر (C_۵) به عنوان معیارهای غیرسودمند

هستند. معیار هزینه به هزینه های مرتبط با تقویت یا تعمیر گره ها اشاره دارد و ارتباط به میزان وابستگی گره به سایر گره های شبکه اشاره دارد. گره هایی که ارتباط بیشتری با سایر گره ها دارند، در صورت خرابی می توانند تأثیر بیشتری بر کل شبکه بگذارند.

گام دوم و سوم: نرمال سازی ماتریس تصمیم گیری و وزن دار کردن آن

ماتریس تصمیم گیری ارائه شده در جدول شماره ۱۰ با استفاده از فرمول شماره ۱۲ نرمال می شود. برای نرمال سازی، هر عنصر بر مجموع ستونی که این عنصر در آن قرار دارد تقسیم می شود. با ضرب ماتریس نرمال سازی شده در ماتریس وزن معیارها و به کمک فرمول شماره ۱۳ ماتریس تصمیم گیری وزنی حاصل می شود. این نتایج در جدول شماره ۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۷. محاسبه بردار r_d

معیار	R	d
C1	۷/۴۴۴	۶/۷۷۷
C2	۶/۳۷۸	۵/۸۲۸
C3	۶/۱۱۲	۶/۱۶۱
C4	۶/۲۷۳	۷/۲۸۳
C5	۷/۰۸۰	۷/۳۳۷

جدول ۸. تأثیرات کلی و خالص برای هر معیار زیرساخت‌های حیاتی و وزن هر معیار

معیار	r+d	r-d	نوع معیار	ارتباط با سایر معیارها	وزن	وزن‌های نرمال شده
C1	۱۴/۲۲۰	۰/۶۶۷	اثرگذار	زیاد	۱۴/۲۳۶	۰/۲۱۴
C2	۱۲/۲۰۶	۰/۵۵۰	اثرگذار	زیاد	۱۲/۲۱۸	۰/۱۸۳
C3	۱۲/۲۷۳	-۰/۰۵۰	اثرپذیر	زیاد	۱۲/۲۷۳	۰/۱۸۴
C4	۱۳/۵۵۶	-۱/۰۱۰	اثرپذیر	زیاد	۱۳/۵۹۴	۰/۲۰۴
C5	۱۴/۳۱۸	-۰/۱۵۷	اثرپذیر	زیاد	۱۴/۳۱۹	۰/۲۱۵

گام چهارم

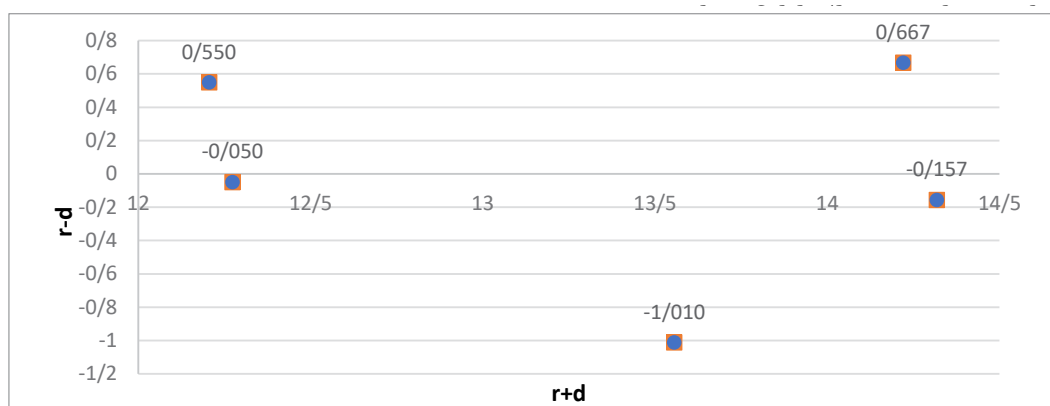
قابل توجه این است که تفاوت در مقادیر نرمال شده بین گره‌های مختلف نسبتاً کم است، که نشان می‌دهد اهمیت نسبی گره‌ها در این شبکه به هم نزدیک است. این یافته‌ها می‌تواند به مدیران و تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا منابع محدود را به‌طور مؤثرتری برای تقویت نقاط حیاتی شبکه تخصیص دهند و در نتیجه، تاب‌آوری کلی سیستم را در برابر اختلالات احتمالی بهبود بخشند.

نتایج حاصل از تحلیل جدول شماره ۱۲ نشان می‌دهد که گره‌های حیاتی شناسایی شده در رتبه‌بندی، معمولاً گره‌هایی هستند که در چندین زیرساخت نقش کلیدی دارند یا وابستگی‌های زیادی به سایر گره‌ها دارند. این نشان می‌دهد که تقویت این گره‌ها می‌تواند به‌طور قابل توجهی به بهبود عملکرد کل شبکه کمک کند. علاوه بر این، وابستگی‌های پیچیده بین زیرساخت‌های مختلف نشان می‌دهد که اختلال در یک زیرساخت می‌تواند تأثیر

برای هر گزینه مجموع مقادیر وزنی نرمال شده برای معیارهای سودمند (S_i^+) و معیارهای غیرسودمند (S_i^-) محاسبه شده است. امتیاز کلی هر گزینه با استفاده از فرمول شماره ۱۶ به دست آمده است و سپس گزینه‌ها براساس مقادیر RI_i رتبه‌بندی شده است. نتایج رتبه‌بندی تولیدشده توسط روش ارزیابی ریشه در جدول شماره ۱۲ ارائه شده است. مشخص شد که در شبکه زیرساخت‌های وابسته به یکدیگر آب، برق و فاضلاب، گره‌های ۱۲، ۱۳، ۱۵، ۵ و ۶ به ترتیب بیشترین اهمیت را دارند. این گره‌ها باید در اولویت اول برای تقویت و بهبود قرار گیرند تا تاب‌آوری کل شبکه در برابر بحران‌های احتمالی افزایش یابد. ازسوی دیگر، گره‌های ۱۱، ۱۹ و ۱۰ کمترین اهمیت را در شبکه دارند. نکته

جدول ۹. وزن معیارهای اصلی و فرعی

معيار	C1	C2	C3	C4	C5						
وزن	۰/۲۱۴	۰/۱۸۳	۰/۱۸۴	۰/۲۰۴	۰/۲۱۵						
زیرمعیار	C۱۱	C۲۱	C۲۲	C۲۳	C۳۱	C۳۲	C۳۳	C۴۱	C۴۲	C۴۳	C۵۱
وزن محلی	۱	۰/۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۱
وزن کل	۰/۲۱۴	۰/۰۹۱۷	۰/۰۴۵۸	۰/۰۴۶	۰/۰۹۲	۰/۰۴۶	۰/۰۴۶	۰/۱۰۲	۰/۰۵۱	۰/۰۵۱	۰/۲۱۵



تصویر ۲. نمودار ارتباط -اثر معیارهای انتخاب گره‌های کلیدی در زیرساخت‌های حیاتی



جدول ۰۱. ماتریس تصمیم‌گیری R برای اولویت‌بندی گره‌های شبکه زیرساختی وابسته به یکدیگر

گره‌ها	C11 (+)	C21 (+)	C22 (+)	C23 (+)	C31 (+)	C32 (+)	C33 (+)	C41 (-)	C42 (-)	C43 (-)	C51 (-)
Wi	۰/۲۱۴	۰/۰۹۲	۰/۰۴۶	۰/۰۴۶	۰/۰۹۲	۰/۰۴۶۴	۰/۰۴۶۴	۰/۱۰۲۴	۰/۰۵۱۷	۰/۰۵۱	۰/۲۱۵
۱	۵۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۲
۲	۷۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۲
۳	۹۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۳
۴	۵۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۲
۵	۱۰۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۳
۶	۶۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۳
۷	۵۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۳
۸	۹۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۲
۹	۵۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۳
۱۰	۸۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۳
۱۱	۵۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۳
۱۲	۸۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۳
۱۳	۶۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۳
۱۴	۲۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۲
۱۵	۸۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۳
۱۶	۹۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۲
۱۷	۸۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۲
۱۸	۷۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۳
۱۹	۵۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۲
۲۰	۸۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۲
۲۱	۴۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۲

باشد. همچنین، باید به وابستگی‌های بین زیرساخت‌ها توجه ویژه شود و اقدامات لازم برای کاهش این وابستگی‌ها انجام شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از روش‌ها و تحلیل‌های جامع، به بررسی معیارهای مختلف در ارزیابی و تقویت شبکه‌های زیرساختی بحرانی پرداخته شد. روش دیمتل برای تعیین وزن معیارهای مختلف مورد استفاده قرار گرفت و مشخص شد که ظرفیت گره مهم‌ترین معیار در ارتقاء عملکرد و پایداری شبکه است. این معیار، به‌عنوان تأثیرگذارترین عامل، نقش کلیدی در مدیریت و بهبود شبکه‌های زیرساختی داشت. روش ارزیابی ریشه

گسترده‌ای بر عملکرد زیرساخت‌های دیگر داشته باشد. بنابراین، رویکردی جامع برای تقویت زیرساخت‌ها ضروری است که در آن تمام وابستگی‌ها و تعاملات بین زیرساخت‌ها در نظر گرفته شود. پارامترهایی مانند ظرفیت، زمان تعمیر و هزینه تقویت نیز نقش مهمی در تعیین اهمیت گره‌ها دارند. گره‌هایی با ظرفیت بالا و زمان تعمیر کوتاه، اهمیت کمتری دارند، زیرا اختلال در آن‌ها به‌سرعت قابل جبران است. در نتیجه، برای افزایش تاب‌آوری شبکه زیرساخت، پیشنهاد می‌شود که منابع محدود برای تقویت زیرساخت‌ها بر روی گره‌های حیاتی شناسایی شده متمرکز شود. این گره‌ها معمولاً گره‌های انتقال یا تأسیسات اصلی هستند که اختلال در آن‌ها می‌تواند تأثیر گسترده‌ای بر کل شبکه داشته



جدول ۱۱. ماتریس تصمیم‌گیری نرمال موزون برای اولویت‌بندی گره‌های شبکه زیرساختی وابسته به یکدیگر

گره‌ها	C11 (+)	C21 (+)	C22 (+)	C23 (+)	C31 (+)	C32 (+)	C33 (+)	C41 (-)	C42 (-)	C43 (-)	C51 (-)
۱	۰/۰۱۴	*	*	۰/۰۰۹	*	*	*	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	*	۰/۰۰۸
۲	۰/۰۰۸	*	*	۰/۰۰۹	*	*	*	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	*	۰/۰۰۸
۳	۰/۰۰۸	*	*	*	*	۰/۰۰۵	۰/۰۱۵	۰/۰۰۷	*	*	۰/۰۱۲
۴	۰/۰۱۴	*	*	۰/۰۰۹	*	*	*	۰/۰۰۷	*	*	۰/۰۰۸
۵	۰/۰۰۸	*	*	*	*	۰/۰۰۵	*	۰/۰۰۷	*	۱/۷۸۳	۰/۰۰۸
۶	۰/۰۱۵	۰/۰۳۰	*	*	*	*	*	*	۰/۰۰۶	۱/۷۸۳	۰/۰۱۲
۷	۰/۰۱۱	*	*	*	*	*	*	۰/۰۰۷	*	۱/۷۸۳	۰/۰۱۲
۸	۰/۰۱۱	*	*	۰/۰۰۹	*	*	*	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	*	۰/۰۰۸
۹	۰/۰۱۲	*	*	۰/۰۰۹	*	*	*	۰/۰۰۷	*	*	۰/۰۱۲
۱۰	۰/۰۰۸	*	*	*	*	*	*	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	۱/۷۸۳	۰/۰۰۸
۱۱	۰/۰۱۲	*	*	*	*	*	*	۰/۰۰۷	*	۱/۷۸۳	۰/۰۰۸
۱۲	۰/۰۱۲	*	*	*	*	۰/۰۰۵	*	۰/۰۰۷	*	۱/۷۸۳	۰/۰۱۲
۱۳	۰/۰۰۸	۰/۰۳۰	۰/۰۴۶	*	*	۰/۰۰۵	*	*	*	*	۰/۰۱۲
۱۴	۰/۰۰۸	*	*	*	۰/۰۳۱	*	۰/۰۱۵	*	۰/۰۰۶	*	۰/۰۱۲
۱۵	۰/۰۰۹	*	*	*	*	۰/۰۰۵	*	۰/۰۰۷	*	۱/۷۸۳	۰/۰۱۲
۱۶	۰/۰۰۹	۰/۰۳۰	*	*	*	۰/۰۰۵	*	*	*	۱/۷۸۳	۰/۰۱۲
۱۷	۰/۰۱۲	*	*	*	*	۰/۰۰۵	۰/۰۱۵	۰/۰۰۷	*	*	۰/۰۰۸
۱۸	۰/۰۱۴	*	*	*	*	۰/۰۰۵	*	۰/۰۰۷	*	*	۰/۰۱۲
۱۹	۰/۰۰۳	*	*	*	۰/۰۳۱	*	*	*	۰/۰۰۶	۱/۷۸۳	۰/۰۰۸
۲۰	۰/۰۱۲	*	*	*	۰/۰۳۱	۰/۰۰۵	*	*	*	۱/۷۸۳	۰/۰۱۲
۲۱	۰/۰۰۶	*	*	*	*	*	*	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	۱/۷۸۳	۰/۰۰۸



جدول ۲۱. نتایج رتبه‌بندی گره‌های شبکه زیرساخت‌های وابسته به یکدیگر با استفاده از روش ارزیابی ریشه

رتبه‌بندی	نرمال‌سازی	RI_i	$S-i$	$S+i$	گره‌ها
۶	۰/۰۴۷	۱/۴۱۶	۰/۰۱۵	۰/۰۲۳	۱
۱۲	۰/۰۴۷	۱/۴۱۶	۱/۸۰۰	۰/۰۱۳	۲
۱۴	۰/۰۴۷	۱/۴۱۶	۱/۸۰۱	۰/۰۱۴	۳
۱۷	۰/۰۴۸	۱/۴۲۱	۱/۷۹۵	۰/۰۴۵	۴
۴	۰/۰۴۸	۱/۴۲۱	۰/۰۲۱	۰/۰۲۳	۵
۵	۰/۰۴۸	۱/۴۲۱	۰/۰۲۱	۰/۰۱۷	۶
۱۸	۰/۰۴۸	۱/۴۱۶	۰/۰۱۲	۰/۰۸۹	۷
۱۰	۰/۰۴۷	۱/۴۱۶	۱/۸۰۱	۰/۰۴۶	۸
۱۳	۰/۰۴۷	۱/۴۱۵	۰/۰۱۹	۰/۰۲۸	۹
۱۹	۰/۰۴۸	۱/۴۲۱	۰/۰۱۵	۰/۰۳۳	۱۰
۲۱	۰/۰۴۷	۱/۴۱۶	۱/۸۰۴	۰/۰۰۸	۱۱
۱	۰/۰۴۸	۱/۴۲۱	۱/۸۰۰	۰/۰۱۲	۱۲
۲	۰/۰۴۸	۱/۴۲۱	۰/۰۱۹	۰/۰۱۹	۱۳
۱۶	۰/۰۴۸	۱/۴۲۱	۱/۸۰۱	۰/۰۱۷	۱۴
۳	۰/۰۴۷	۱/۴۱۶	۱/۸۰۱	۰/۰۱۱	۱۵
۷	۰/۰۴۷	۱/۴۱۶	۰/۰۲۱	۰/۰۲۰	۱۶
۱۱	۰/۰۴۸	۱/۴۲۱	۱/۸۰۰	۰/۰۳۴	۱۷
۱۵	۰/۰۴۸	۱/۴۲۱	۰/۰۱۹	۰/۰۲۱	۱۸
۲۰	۰/۰۴۸	۱/۴۲۱	۱/۷۹۵	۰/۰۴۸	۱۹
۸	۰/۰۴۷	۱/۴۱۶	۰/۰۱۸	۰/۰۵۴	۲۰
۹	۰/۰۴۸	۱/۴۲۱	۱/۸۰۴	۰/۰۰۶	۲۱



مشارکت نویسندگان

مفهوم سازی: آذر احرامباف، پروانه سموئی و معصومه مسی
بیدگلی؛ تحقیق و بررسی: آذر احرامباف، پروانه سموئی و معصومه
مسی بیدگلی؛ ویراستاری و نهایی سازی نوشته: پروانه سموئی و
معصومه مسی بیدگلی.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

به شناسایی و رتبه بندی گره های حیاتی کمک کرد. نتایج نشان داد که گره هایی با ظرفیت بالا و تأثیر زیاد بر شبکه، از جمله گره های شماره ۵، ۶، ۱۳، و ۱۵ به عنوان نقاط بحرانی شناخته شدند که نیازمند توجه و تقویت بیشتری هستند. این گره ها در صورت بروز خرابی، می توانند تأثیرات گسترده ای بر کل شبکه داشته باشند و بنابراین، اولویت بندی دقیق آن ها برای تخصیص منابع و اجرای برنامه های بهبود دهنده ضروری است. تقویت گره های شناسایی شده و بهینه سازی زیرساخت ها می تواند به طور قابل توجهی تاب آوری و پایداری شبکه های زیرساختی بحرانی را افزایش دهد. چراکه شناخت و تحلیل وابستگی های متقابل بین گره های شبکه های زیرساختی آب، فاضلاب و برق برای بهبود پایداری و تاب آوری این شبکه ها ضروری است. با شناسایی گره های بحرانی و تقویت آن ها، می توان از وقوع اختلالات گسترده جلوگیری کرد و عملکرد پایدار شبکه را تضمین نمود. این موردی است که در تحقیقات پیشین بدان پرداخته نشده است و در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است.

محدودیت های پژوهش

برخی از داده های مطالعه موردی در منبع اولیه (سوتچین و همکاران؛ ۲۰۲۳) موجود نبود و از طریق منابع دیگر نیز قابل دسترسی نبود لذا مجبور شدیم از داده های تصادفی برای آنها کمک بگیریم.

پیشنهادهای آتی

همچنین، این پژوهش با ارائه یک چارچوب جامع برای تحلیل و ارزیابی شبکه ها، زمینه ای برای تحقیقات بیشتر و توسعه روش های پیشرفته تر در این حوزه فراهم می کند. پیشنهادهای آتی شامل گسترش مدل سازی، استفاده از داده های واقعی، تحلیل های بین رشته ای، و توسعه ابزارهای تصمیم گیری چند معیاره است. این پیشنهادهای می تواند به بهبود و تقویت شبکه های زیرساختی بحرانی کمک کند و همچنین، موجب ارتقاء دانش و فناوری در این زمینه شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

از اصول اخلاق در پژوهش استفاده شده است و از داده های محرمانه نیز استفاده نگردیده است.

حامی مالی

این مقاله برگرفته از رساله دکتری آذر احرامباف شوشتر است و هیچ گونه کمک مالی از سازمانی های دولتی، خصوصی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

References

- Almoghathawi, Y., González, A. D., & Barker, K. (2021). Exploring recovery strategies for optimal interdependent infrastructure network resilience. *Networks and Spatial Economics*, 21, 229-260. [DOI:10.1007/s11067-020-09515-4]
- Almoghathawi, Y., Selim, S., & Barker, K. (2023). Community structure recovery optimization for partial disruption, functionality, and restoration in interdependent networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 229, 108853. [DOI: 10.1016/j.res.2022.108853]
- Balakrishnan, S., & Zhang, Z. (2020). Criticality and susceptibility indexes for resilience-based ranking and prioritization of components in interdependent infrastructure networks. *Journal of Management in Engineering*, 36(4), 04020022. [Link]
- Barnett, K. (2020). Decentralized resource allocation for interdependent infrastructure networks restoration: A Game Theory Approach [MA thesis]. Oklahoma: University of Oklahoma. [Link]
- Baykasoğlu, A., & Gölcük, İ. (2017). Development of an interval type-2 fuzzy sets based hierarchical MADM model by combining DEMATEL and TOPSIS. *Expert Systems with Applications*, 70, 37-51. [DOI: 10.1016/j.eswa.2016.11.001]
- Chopra, S. S., & Khanna, V. (2015). Interconnectedness and interdependencies of critical infrastructures in the US economy: Implications for resilience. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 436, 865-877. [DOI:10.1016/j.physa.2015.05.091]
- Fan, X., Zhang, X., Wang, X., & Yu, X. (2023). A deep reinforcement learning model for resilient road network recovery under earthquake or flooding hazards. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 4(1), 8. [DOI: 10.1186/s43065-023-00072-x]
- Huang, C. N., Liou, J. J., & Chuang, Y. C. (2014). A method for exploring the interdependencies and importance of critical infrastructures. *Knowledge-Based Systems*, 55, 66-74. [DOI: 10.1016/j.knsys.2013.10.010]
- Kuttler, E., Barker, K., & Johansson, J. (2020). Network importance measures for multi-component disruptions. In *2020 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)* (pp. 1-6). IEEE. [Link]
- Li, Q., Yu, H., Li, S., & Liu, S. (2024). Cascading failures in interdependent networks with reinforced crucial nodes and dependency groups. *International Journal of Modern Physics C (IJMPC)*, 35(5), 1-27. [DOI:10.1142/S0129183124500554]
- Oliva, G., Setola, R., & Barker, K. (2014). Fuzzy importance measures for ranking key interdependent sectors under uncertainty. *IEEE Transactions on Reliability*, 63(1), 42-57. [Link]
- Ouyang, M. (2016). Critical location identification and vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems under spatially localized attacks. *Reliability Engineering & System Safety*, 154, 106-116. [DOI: 10.1016/j.res.2016.05.007]
- Rezapour, S. A coupled reinforcement learning mechanism for concurrent restoration of interdependent critical infrastructures. [Link]
- Shahverdi, B., Miller-Hooks, E., & Isaac, S. (2024). Decision support for prioritizing critical societal services in optimal post-disaster critical lifeline recovery. *OR Spectrum*, 1-37. [DOI:10.1007/s00291-024-00777-9]
- Shen, S. (2013). Optimizing designs and operations of a single network or multiple interdependent infrastructures under stochastic arc disruption. *Computers & Operations Research*, 40(11), 2677-2688. [DOI: 10.1016/j.cor.2013.05.002]
- Sütiçen, T. C., Batun, S., & Çelik, M. (2023). Integrated reinforcement and repair of interdependent infrastructure networks under disaster-related uncertainties. *European Journal of Operational Research*, 308(1), 369-384. [DOI: 10.1016/j.ejor.2022.10.043]
- Sotoudeh-Anvari, A. (2023). Root Assessment Method (RAM): A novel multi-criteria decision making method and its applications in sustainability challenges. *Journal of Cleaner Production*, 423, 138695. [DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138695]
- Ugwu, I. A., Salarieh, B., Salman, A. M., Petnga, L., & Williams, M. Y. (2022). Postdisaster recovery planning for interdependent infrastructure systems prioritizing the functionality of healthcare facilities. *Journal of Infrastructure Systems*, 28(4), 04022038. [DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000719]
- Wang, S., Sun, J., Zhang, J., Dong, Q., Gu, X., & Chen, C. (2023). Attack-Defense game analysis of critical infrastructure network based on Cournot model with fixed operating nodes. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 40, 100583. [DOI: 10.1016/j.ijcip.2022.100583]
- Xu, M., Ouyang, M., Mao, Z., & Xu, X. (2019). Improving repair sequence scheduling methods for postdisaster critical infrastructure systems. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 34(6), 506-522. [DOI: 10.1111/mice.12435]
- Yuan, X., Hu, Y., Stanley, H. E., & Havlin, S. (2017). Eradicating catastrophic collapse in interdependent networks via reinforced nodes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(13), 3311-3315. [DOI: 10.1073/pnas.1621369114] [PMID]
- Yazdani, M., Chatterjee, P., Zavadskas, E. K., & Zolfani, S. H. (2017). Integrated QFD-MCDM framework for green supplier selection. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3728-3740. [DOI:10.1016/j.jclepro.2016.10.095]
- Zhang, W., Han, Q., Dong, H., Wen, J., & Xu, C. (2024). Resilience-based post-earthquake restoration scheduling for urban interdependent transportation-electric power network. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1-18. [DOI: 10.1080/15732479.2024.2401374]
- Zhao, C., Li, N., & Fang, D. (2018). Criticality assessment of urban interdependent lifeline systems using a biased PageRank algorithm and a multilayer weighted directed network model. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 22, 100-112. [DOI:10.1016/j.ijcip.2018.06.002]
- Zhang, W. J., Liu, X., Chai, C. L., Deters, R., Liu, D., & Dyachuk, D., et al. (2008). Social network analysis of the vulnerabilities of interdependent critical infrastructures. *International Journal of Critical Infrastructures*, 4(3), 256-273. [Link]
- Zhang, X., & Su, J. (2019). A combined fuzzy DEMATEL and TOPSIS approach for estimating participants in knowledge-intensive crowdsourcing. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106085. [DOI: 10.1016/j.cie.2019.106085]