Archive of SID.ir

Passive Defence
Vol. 16, No. 2, Summer 2025, Serial No. 62
ISSN: 2980-8030 , E-ISSN: 2008-6849

Developing a Hybrid Resilience Model for Urban Water Supply Networks Case Study: Babol City

Zahra Mohammadpour , Mohammad Ali Nekooie* , Hadi Zakeri Khatir
*Association Prof., Dept. of Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 09/02/2025, Revised: 23/02/2025, Accepted: 09/04/2025, Published: 21/07/2025)

DOR: 20.1001.1.20086849.1404.16.2.8.4

ABSTRACT

Water supply networks are considered one of the most vital infrastructures of a country, as they fulfill the fundamental biological needs of humans, industries, and urban centers. Even a short-term disruption in their performance can lead to severe economic and social consequences due to their critical role in national interests. Therefore, it is essential to assess and enhance the resilience of these networks in order to ensure a sustainable water supply during various crises and emergency situations, and to assist water and wastewater companies in adopting optimal strategies to improve network resilience. In line with this objective, the present study aims to develop a hybrid resilience model for water distribution networks by integrating the ERASMUS and IRAM frameworks. To evaluate the resilience of a critical choke point in the water distribution network of Babol City, assets were categorized into two main groups: reservoirs and pipelines. Through questionnaires and interviews with civil defense experts and specialists from the Mazandaran Water and Wastewater Company, potential disruption scenarios were identified for each selected asset .After defining the evaluation components and indicators, data analysis was conducted to assess the current resilience status (RDR) of the selected zone. The results indicated that the existing resilience level is insufficient. Based on the applied scenarios, a significant portion of the water being transported in this zone is classified as non-revenue water. Additionally, due to the aging infrastructure, the critical choke point is highly vulnerable to threats such as deterioration and pressure fluctuations .Based on field observations, several solutions were proposed to enhance both the capacity and sub-capacities of the system, thereby increasing the overall resilience of the network. Following the implementation of these measures, a re-assessment revealed a notable improvement in the resilience level of the zone.

Keywords: Resilience Assessment, Passive Defense, Water Distribution Nnetwork, IRAM, ERASMUS

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University © Authors

* Corresponding Author Email: nekooie@mut.ac.ir

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

پدافند غیرعامل

سال پانزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، (پیاپی ۶۲): صص ۱۱۱-۹۹

شاپای چاپی: ۶۹۴۹-۲۰۰۸ | **شاپای الکترونیکی:** ۸۰۳۰-۲۹۸۰

علمی – پژوهشی

تدوین مدل ترکیبی تاب‌آوری در شبکه آب‌رسانی شهری

مطالعه موردی: شهر بابل

زهرا محمّدپور[۱]، محمّدعلی نکوئی[۲*]، هادی ذاکری خطیر

DOR: 20.1001.1.20086849.1404.16.2.8.4

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۰۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

چکیده

با توجه به اینکه شبکه‌های آب‌رسانی به‌عنوان تأمین‌کننده مهم‌ترین نیازهای زیستی انسان و صنایع و مراکز، یکی از شریان‌های حیاتی کشور محسوب شده و اختلال هرچند کوتاه‌مدت در عملکرد آن، به دلیل داشتن جایگاهی حیاتی در منافع ملّی منجر به آسیب جدی در اقتصاد، امنیت جامعه می‌شود؛ پس ارزیابی و ارتقاء سطح تاب‌آوری این شبکه‌ها به‌منظور اطمینان از دسترسی پایدار به آب در بحران‌های مختلف و شرایط گوناگون اضطراری و همچنین کمک به اخذ راهبردهای بهینه برای شرکت‌های آبفا جهت افزایش سطح تاب‌آوری شبکه خود، حیاتی است. در همین راستا هدف پژوهش حاضر، تدوین مدل ترکیبی تاب‌آوری شبکه توزیع آب، برگرفته‌شده از دو مدل ERASMUS+IRAM است. به اینصورت که برای بررسی تاب‌آوری یک پهنه گلوگاهی از شبکه توزیع آب شهر بابل، ابتدا دارایی‌ها را به دو دسته مخزن و خطوط لوله تقسیم کرده و سپس به کمک پرسشنامه و مصاحبه با خبرگان پدافند غیرعامل و متخصصان آبفای مازندران به ازای هر اختلال محتمل انتخاب‌شده، سناریوهای احتمالی متناسب با آن تعیین شد. پس از تعیین مؤلفه‌ها و شاخص‌های ارزیابی، به تحلیل داده و ارزیابی وضع موجود تاب‌آوری (RDR) پهنه موردنظر پرداخته شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد وضعیت فعلی پهنه، تاب‌آوری لازم را نداشته و بر اساس سناریوها، حجم عظیمی از آب انتقالی این پهنه بصورت آب بدون درامد است. همچنین به دلیل قدمت زیاد دارایی‌ها، پهنه گلوگاهی در برابر تهدیدات احتمالی فرسودگی و اختلاف فشار بسیار آسیب‌پذیر است. از همین رو به کمک بازدید میدانی، راهکارهایی جهت ارتقاء ظرفیت و زیر ظرفیت‌ها که افزایش سطح کلی تاب‌آوری شبکه را به دنبال خواهد داشت، پیشنهاد گردید. درنهایت بر اساس بازارزیابی پهنه پس از اعمال راهکارها، افزایش تاب‌آوری قابل‌مشاهده می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: ارزیابی تاب‌آوری، پدافند غیرعامل، شبکه توزیع آب، IRAM، ERASMUS

[۱] کارشناسی ارشد مدیریت بحران، مجتمع دانشگاهی مهندسی و پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

[۲] دانشیار، مجتمع دانشگاهی مهندسی و پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران (nekooie@mut.ac.ir)- نویسنده مسئول

[۳] استادیار، مجتمع دانشگاهی مهندسی و پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع) © نویسندگان

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۱- مقدمه

زیرساخت‌ها و شریان‌های حیاتی هر کشور به‌عنوان بستر مهم حیات، رشد و پویایی آن، با ارائه خدمات و عملکردهایی که انجام می‌دهند، بنیان‌ها و ستون فقرات یک کشور را تشکیل داده و همواره جذابیت بسیار زیادی برای انتخاب، به‌عنوان هدف اصلی حمله‌ها هستند. به‌گونه‌ای که امروزه سوابق رویدادها نشان می‌دهد، بیش از دو سوم تهدیدات معطوف به این زیرساخت‌ها می‌باشد [۳،۲،۱].

با توجه به پیچیدگی‌های ذاتی و تنوع تهدیدات در زیرساخت‌های حیاتی، تاب‌آوری به‌عنوان یک مفهوم کلیدی در سال‌های اخیر مطرح شده است، به‌گونه‌ای که این زیرساخت‌ها برای تداوم فعالیت‌های خود در شرایط بحران، نیازمند رویکردهای نوین و مؤثر برای افزایش تاب‌آوری هستند [۴, ۵].

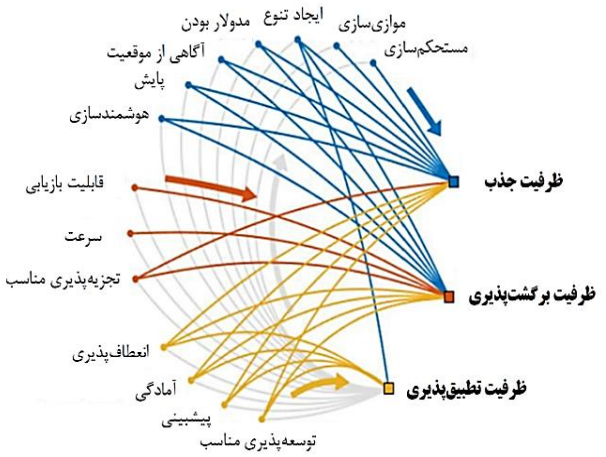
تاب‌آوری زیرساخت در برابر یک اختلال خاص (یا مجموعه‌ای از رویدادها)، توانایی کاهش مؤثر بزرگی و مدت‌زمان انحراف از سطح عملکرد ایده‌آل است، که علاوه بر مقاومت در برابر تهدیدات، بهبود سریع و تطبیق‌پذیری سیستم را نیز شامل می‌شود [۵].

سامانه‌های آب‌رسانی به‌عنوان بخشی از سامانه‌های زیرساخت حیاتی هستند که آسیب یا تخریب آن‌ها پس از بلایای طبیعی و یا حوادث پیش‌بینی نشده، تأثیرات منفی زیادی بر امنیت زندگی و آسایش شهروندان خواهد داشت [۶, ۷]. بطور کلی شبکه توزیع آب به‌عنوان یک جزء از سیستم آب‌رسانی شهری (یک سیستم پیچیده) که از اجزاء و عناصر مختلفی (دارایی‌هایی) تشکیل شده می‌توان معرفی کرد [۸].

با توجه به اینکه شبکه‌های توزیع آب از عوامل مهم رفاه اجتماعی، رشد اقتصادی و سلامت عمومی در شهرها بوده است و همچنین پیوسته در معرض تهدیدات کمی و کیفی قرار دارند، بنابراین حفظ عملکرد صحیح این شبکه‌ها به دلیل تأثیر مستقیم بر سلامت و ایمنی مردم و با توجه به هدف آن‌ها که تأمین مقادیر کافی آب سالم و باکیفیت (مطابق با استانداردهای تعیین‌شده) در شرایط مختلف به مصرف‌کنندگان می‌باشد، همواره یکی از دغدغه‌های اصلی شهرها و شهرداری‌ها بوده است [۸, ۹, ۱۰, ۱۱, ۱۲].

ازجمله راه‌های کاهش خسارت ناشی از تهدیدات طبیعی و انسان‌ساخت، سرمایه‌گذاری درجهت رعایت الزامات پدافند غیرعامل که رابطه مستقیمی با افزایش تاب‌آوری زیرساخت آب دارد، می‌باشد [۱, ۱۳]. تاب‌آوری در شبکه‌های توزیع آب به معنای توانایی مقاومت شبکه در مقابل تغییر ناخواسته یا رویداد اخلال‌گر (ظرفیت جذب)، تطبیق با شرایط جدید (ظرفیت انطباق‌پذیری) و سرعت بخشیدن به بازیابی پس از اختلال (ظرفیت برگشت‌پذیر) می‌باشد [۱۴]. ازاین‌رو در این پژوهش، می‌توان به‌ضرورت آمادگی برای بحران و پیامدهای آن و توانایی برای بازیابی به‌موقع و معقول از تغییرات ناگهانی و غیرمنتظره که خطری برای عملکرد صحیح شبکه توزیع آب و خدمات مرتبط با آن است، پی برد [۱۵].

در شکل (۱)، ظرفیت و زیر ظرفیت‌های تأثیرگذار بر تاب‌آوری زیرساخت قابل‌مشاهده است.



شکل (۱): ارتباط بین زیرظرفیت‌ها با سه ظرفیت تاب‌آوری [۱۶]

۱-۱- پیشینه پژوهش

در این بخش به بررسی مطالعات انجام‌شده در خصوص روش‌های ارزیابی تاب‌آوری شبکه‌های توزیع آب پرداخته‌شده است. همچنین شکل (۲)، نشان‌دهنده مشخصات و گام‌های عملیاتی هریک از این روش‌ها می‌باشد.

علیرضا نریمان و همکاران [۱۷] در مقاله خود به میزان تاب‌آوری هیدرولیکی شبکه آب شهر صدرا، در برابر زلزله پرداختند و استراتژی‌های مختلفی برای تعمیر شبکه توزیع آب تعریف کردند. ابتدا شبکه آب در EPANET شبیه‌سازی کرده و سپس به‌عنوان ورودی در کد WNTR وارد شد. WNTR بر اساس تئوری شبکه‌های پیچیده توسعه‌یافته و شاخص دسترسی

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

شهروندان به خدمات آب، محاسبه کردند. نتایج نشان داد درحالی‌که افزایش شدت زلزله در تمامی نواحی رابطه همبستگی مثبت با آسیب‌پذیری شبکه آب‌رسانی دارد، زمان بازگشت شبکه به شرایط نرمال به استراتژی تعمیر و تغییر در تقاضای مورد انتظار مصرف‌کننده وابسته است. سپس به شناسایی آسیب‌پذیرترین ناحیه شبکه پرداختند و درنهایت زمان بازگشت سیستم به حالت نرمال در هر سناریو و تعداد، شماره و محل لوله‌های آسیب‌دیده در هر سناریو تعیین‌شده است.

محمدحسن علوی و همکاران [۱۸] با استفاده از روش‌های تحلیل احتمال حرکت لرزه‌ای، مؤلفه‌های حرکت لرزه‌ای گسل شمال تهران را به دست آوردند. سپس با توجه به شاخص حداقل آب موردنیاز جامعه، مقوله آب‌رسانی اضطراری مدنظر قرارگرفته و راهکارهای افزایش تاب‌آوری ارائه شد. با توجه به نتایج پژوهش، کمینه نرخ تعمیرات بر کیلومتر ۰/۰۶ و بیشینه آن ۰/۴۴ به دست آمد. در پایان، با درنظرگرفتن آسیب‌پذیری خطوط، خطر لرزه‌خیزی و شاخص‌های آب‌رسانی اضطراری، راهکارهای افزایش تاب‌آوری ارائه‌شده است.

وی لئو و همکاران [۱۹] یک چارچوب ارزیابی تاب‌آوری عملیاتی چرخه حیات شبکه‌های توزیع آب شهری را با در نظر گرفتن حوادث، خرابی لوله‌ها و بازسازی، پیشنهاد می‌دهند. شبکه‌های توزیع آب در شهر میانژو با چارچوب عملیاتی چرخه حیات، ارزیابی شد و شش استراتژی تاب‌آوری بررسی و مقایسه شدند.

سیملارو و همکاران [۲۰] یک شاخص تاب‌آوری (R) برای شبکه توزیع آب پیشنهاد داده که حاصل‌ضرب سه شاخص که برحسب عملکرد و زمان بازیابی تعریف شده‌اند است. ۱. تعداد کاربران موقت بدون آب، ۲. سطح آب در مخزن و ۳. کیفیت آب. نتیجه نشان می‌دهد که شاخص تاب‌آوری (R) به برنامه‌ریزان و مهندسان کمک کرده تا عملکرد یک WDN را ارزیابی کنند که شامل: (۱) ارائه تقاضای معینی از آب با سطح قابل‌قبول فشار و کیفیت و (۲) فرآیند بازسازی پس از یک رویداد شدید می‌باشد.

احمد اسد و همکاران [۱۰] با تأکید بر نیاز به توسعه یک رویکرد جامع با درنظرگرفتن ابعاد مختلف تاب‌آوری، برای ارزیابی تاب‌آوری WDN ها به دلیل وجود و استفاده از چارچوب‌هایی مانند روش‌های شبیه‌سازی WDN ها که تنها بر جنبه‌های خاصی از تاب‌آوری تمرکز دارند، در پژوهش خود به ارائه یک متریک تاب‌آوری که چند ویژگی جدید را بر اساس استحکام و افزونگی شبکه‌های توزیع آب دربر می‌گیرد، پرداخته است.

اولیویر پیلر و همکاران [۲۱] در پروژه ResiWater، به بهبود سه مفهوم برای امنیت بهتر شبکه و افزایش تاب‌آوری پرداختند: پیشگیری، نظارت و پاسخ به سامانه‌های توزیع آب که با تهدیدات عمده روبرو هستند. نتایج این پروژه نشان داد که به‌منظور تشخیص سریع زوال کیفیت آب یا خرابی سیستم آب‌رسانی می‌بایست بر چارچوب تاب‌آوری و توسعه حسگرهای با کارایی بالا تمرکز کرد.

کیگونگ دیائو و همکاران [۲۲] متفاوت از تجزیه‌وتحلیل ریسک سنتی، یک رویکرد تحلیل تاب‌آوری جهانی (GRA) را پیشنهاد دادند. هدف GRA ارزیابی تاب‌آوری سیستم در برابر حالت خرابی احتمالی بدون توجه به تهدید (های) علت (معلوم یا ناشناخته، خارجی یا داخلی) است. این روش برای آزمایش تاب‌آوری چهار سیستم توزیع آب، با ویژگی‌های مختلف به سه حالت شکست معمولی (شکست لوله، تقاضای اضافی و نفوذ مواد) استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تاب‌آوری در یک حالت خرابی ممکن است تاب‌آوری را نسبت به حالت دیگر کاهش داده و افزایش ظرفیت سیستم ممکن است بازیابی سیستم را در برخی شرایط به تأخیر بیندازد.

لیئون اف گی و همکاران [۲۳] در پژوهش خود، به یک روش شبیه‌سازی تصادفی (ERASMUS) برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه‌های توزیع آب پرداخته است. در این روش ابتدا مجموعه‌ای از سناریوهای شکست را ایجاد کرده و برای هریک سه پارامتر تاب‌آوری، عملکرد سیستم، هزینه‌های بازیابی را به دست می‌آورد. به این صورت که یک مدل شبکه اسکلت‌بندی شده از شبکه توزیع آب واقعی برای تحلیل، مونتاژ شده و در معرض مقادیر مختلف یک نوع خاص از رویداد مخرب قرار می‌گیرد. فرض این روش به این صورت است که فراوانی وقوع و بزرگی رویدادهای مخرب طبیعی مانند سیل، زلزله یا طوفان با قانون قدرت مرتبط است؛ یعنی رویدادهای مخرب کم تأثیر، به‌طور قابل‌توجهی بیش از رویدادهای با تأثیر زیاد رخ می‌دهند.

۱-۲- بیان مسئله

تاکنون روش‌های متعددی برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه‌های آب‌رسانی ارائه‌شده است اما بررسی‌ها و مطالعات انجام‌شده از منابع علمی داخلی و خارجی، نیاز به روشی ساده، قابل‌فهم و

Archive of SID.ir

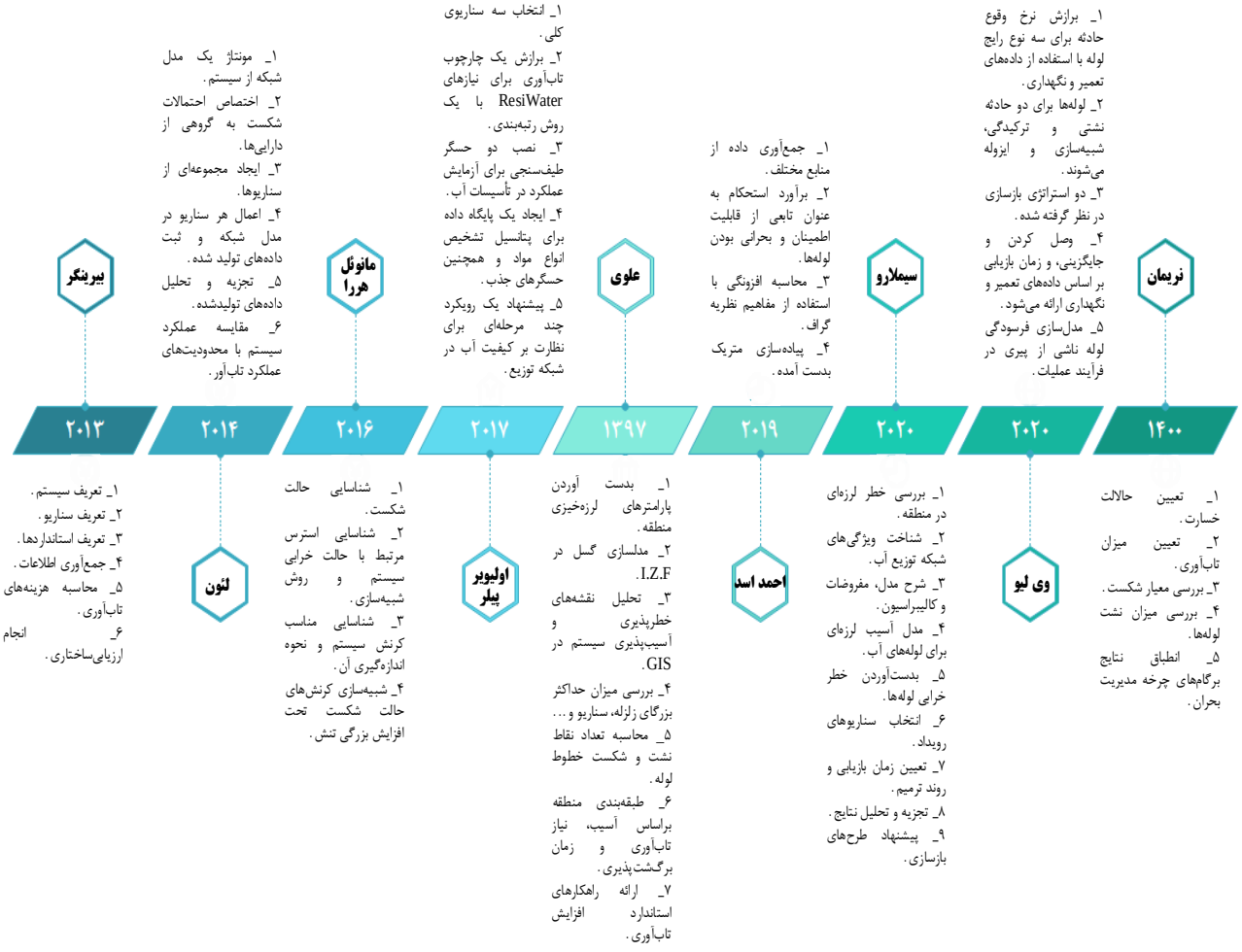
Archive of SID.ir

درعین‌حال دقیق جهت ارزیابی این شبکه‌ها را نشان می‌دهد. روش‌های موجود اغلب پیچیده، هزینه‌بر و نیازمند نرم‌افزار و یا ابزارهایی هستند که دسترسی به آن برای همه کاربران، آسان و یا امکان‌پذیر نیست. همچنین بسیاری از این روش‌ها انعطاف کافی برای تحلیل سناریوهای مختلف تهدیدات (اعم از تهدیدات طبیعی و انسان‌ساخت) را ندارند. ازاین‌رو در این پژوهش به تدوین مدلی به‌منظور ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع آب، پرداخته‌شده که ضمن سنجش مؤلفه عملکرد شبکه (میزان آبدهی) حین اختلال، به تحلیل زمان و هزینه‌های بازیابی شبکه در زمان بحران می‌پردازد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- محدوده موردمطالعه

مطالعه موردی؛ یک پهنه از شبکه توزیع آب شهر بابل است که ازنظر میزان اهمیت در مطالعاتی که از قبل انجام‌گرفته شده، به‌عنوان پهنه گلوگاهی شناخته‌شده و بنا به محدودیت‌های موجود در این مقاله پهنه x، نام‌گذاری شده است. در این پژوهش به‌منظور بررسی و ارزیابی تاب‌آوری پهنه منتخب، به علت عدم دسترسی به اطلاعات و مشخصات کافی شبکه توزیع آب این شهر و طی بررسی‌های انجام‌شده در تحقیقات گذشته، به تدوین مدلی ترکیبی برگرفته‌شده از مدل‌ها ERASMUS+IRAM، با کمک مصاحبه و پرسشنامه از خبرگان پدافند غیرعامل و متخصصان حوزه آب مازندران انجام‌شده است.

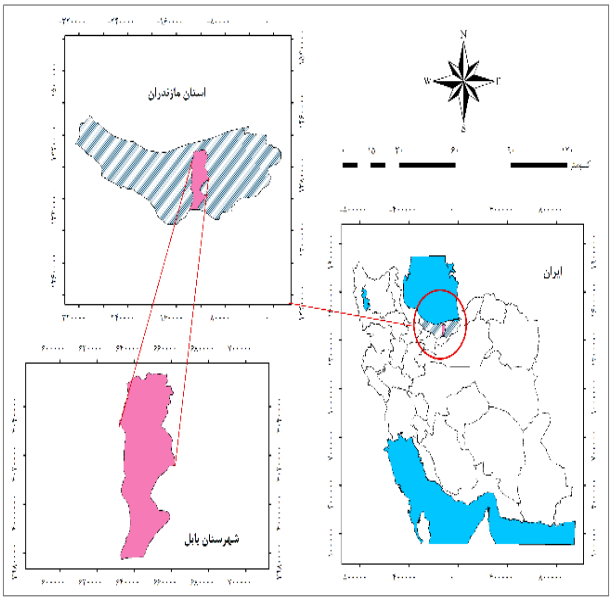


شکل (۲): خلاصه روش‌های ارزیابی تاب‌آوری شبکه‌های توزیع آب

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

شکل زیر، موقعیت جغرافیایی شهر بابل را نشان می‌دهد.



شکل (۳): موقعیت جغرافیایی شهر بابل [۲۴]

۲-۲- روش‌شناسی

فرآیند روش ترکیبی ارزیابی تاب‌آوری شبکه‌های توزیع آب که در مطالعه گذشته به‌صورت گام‌به‌گام طراحی‌شده و با پایان هر گام شروع گام بعد میسر خواهد بود. شش گام فرآیندی به شرح زیر است:

۲-۲-۱- تعریف پهنه (ها)

در اولین گام تحلیل، می‌بایست شبکه توزیع تحت بررسی را تعریف کرد. به‌منظور تعریف پهنه، تحلیلگر باید به موارد زیر پاسخ دهد:

- تعیین اجزای تشکیل‌دهنده پهنه و کدام باید در تحلیل‌ها مورداستفاده قرار گیرند.
- تعیین چگونگی وابستگی و اندرکنش اجزا باهم.
- تعیین مرزهای سیستم.

۲-۲-۲- ایجاد و تعریف سناریوها

این مرحله تعیین‌کننده دامنه تحلیل است و سناریو (ها) ی اختلالی که بر زیرساخت موردمطالعه تأثیر می‌گذارد مشخص می‌شود. برای مشخص نمودن سناریوهای اختلال محتمل بر پهنه x، به سؤالاتی باید پاسخ داده شود:

- چه اختلالاتی محتمل است؟
- چه زمانی اختلال رخ می‌دهد؟
- اختلال محتمل ازنظر کارکنان آبفا چیست؟
- دارایی (ها) تحت تأثیر مستقیم از اختلال کدام است؟
- در صورت آسیب دیدن فیزیکی اجزای در معرض اختلال، در چه وسعتی است؟
- سطح خسارت اجزای عملکردی آسیب‌دیده چقدر است؟
- زمان ماندگاری اثرات سناریوی اختلال چه مدت است؟
- فعالیت‌های ممکن برگشت‌پذیری در پاسخ به اختلال کدام است؟
- معیارهای مورداستفاده در برگشت‌پذیری کامل کدام است؟

۲-۲-۳- تعریف مؤلفه‌های ارزیابی

بر اساس روش ترکیبی ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع آب (ERASMUS+IRAM)، جهت ارزیابی تاب‌آوری بایستی دو مؤلفه عملکرد پهنه حین اختلال (تأثیر سامانه‌ای) و هزینه‌های برگشت‌پذیری (زمان و هزینه برگشت‌پذیری) برای پهنه گلوگاهی شبکه آب شهر بابل احصاء شود.

اطلاعات این مؤلفه‌ها می‌توان از طریق مدل‌سازی و شبیه‌سازی، منابع کتابخانه‌ای و یا نظرات متخصصان جمع‌آوری گردد.

۲-۲-۴- تحلیل داده و ارزیابی وضع موجود تاب‌آوری (RDR[1])

برگشت‌پذیری نسبی یک اختلال را هزینه‌های تاب‌آوری گفته می‌شود. پهنه یا سناریو با هزینه‌های بیشتر، تاب‌آوری کمتری نسبت به پهنه یا سناریوی با هزینه‌های کمتر دارد. به‌منظور برآورد هزینه‌های تاب‌آوری می‌بایست دو مقدار عددی تأثیر سامانمند و تلاش برای بهبودی کامل محاسبه شود. پس برای تحلیل و ارزیابی وضع موجود تاب‌آوری در سناریوهای اختلال محتمل که در گام دوم تعیین و تعریف شدند، می‌بایست داده‌های مربوط به مؤلفه‌های تاب‌آوری، مطابق ذیل محاسبه گردد:

[1] Recovery-Dependent Resilience costs

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۲-۲-۴-۱- تأثیر سیستمیک (SI)

اثر تجمعی که اختلال بر عملکرد پهنه دارد، با تعیین تفاوت میان سطح عملکرد موردنظر پهنه و عملکرد واقعی آن تحت اختلال در طول دوره زمانی برگشت‌پذیری اندازه‌گیری می‌شود. محاسبه تأثیر سامانه‌ای مستلزم آن است تا برای عملکرد پهنه، معیارهای عملکرد مناسبی انتخاب گردد.

$$SI = \int_{t_0}^{t_f} [TSP(t) - SP(t)] \qquad (۱)$$

SI[1]: تأثیر سیستمیک

TSP[2]: عملکرد موردنظر پهنه

SP[3]: عملکرد حین اختلال پهنه

۲-۲-۴-۲- تلاش برای بهبود کامل (RE/TRE)

استفاده از منابع و درنتیجه تلاش‌های برگشت‌پذیری است که پس از وقوع اختلال شروع می‌شود. با گرفتن انتگرال از تابع تلاش برگشت‌پذیری (RE) می‌توان تلاش برای بهبود به‌طور کامل محاسبه شود.

$$TRE = \int_{t_0}^{t_f} [RE(t)]\, dt \qquad (۲)$$

TRE: تلاش برای بهبود کامل

RE: تلاش‌های برگشت‌پذیری

تحلیل ترکیبی تاب‌آوری شبکه توزیع آب شامل برآورد دو نوع هزینه تاب‌آوری وابسته به هم را نشان می‌دهد:

۱) هزینه (ها) ی تاب‌آوری وابسته به برگشت‌پذیری:

تاب‌آوری کمیتی بی‌بعد است که کل هزینه‌های سیستم زیرساخت را در اختلالی خاص (d) تعیین می‌کند.

$$RDR(d, RE, SP(t_0)) = \frac{SI + \alpha \times TRE}{Norm} \qquad (۳)$$

RDR: هزینه‌های وابسته به بازتوانی تاب‌آوری در اختلال d

SI: تأثیر سیستمیک

α: فاکتور وزن

TRE: تلاش برای بهبود کامل

Norm: عامل بی‌بعد ساز

تعیین‌کننده تلاش بهبود بطور کامل و مشخص نمودن اهمیت نسبی و مؤلفه‌های تأثیر سیستماتیک (همواره مثبت است).

Norm عاملی است که امکان مقایسه تاب‌آوری سیستم و مقدار مختلف سطح عملکرد را میسر می‌سازد.

$$Norm = \int_{t_0}^{t_f} |TSP(t)|\, dt \qquad (۴)$$

که در آن:

Norm: عامل بی‌بعد ساز

TSP: عملکرد ایده آل پهنه

۲-۲-۵- هزینه تاب‌آوری بهینه (OR)

زمانی که پهنه در اختلال (d) هزینه‌های کل برگشت‌پذیری خود را به حداقل می‌رساند، هزینه تاب‌آوری بهینه گفته می‌شود.

$$OR(d, RE, SP(t_0)) = min_{RE} \frac{SI + \alpha \times TRE}{Norm} \qquad (۵)$$

که در آن:

OR: هزینه‌های بهینه تاب‌آوری در اختلال d

SI: تأثیر سیستمیک

α: فاکتور وزن

TRE: تلاش برای بهبود کامل

مقادیرRDR و ORبا تاب‌آوری رابطه عکس دارند.

به‌منظور مقایسه تاب‌آوری یک پهنه در اختلال مشخص، می‌توان از هزینه‌های تاب‌آوری در راهبردهای مختلف برگشت‌پذیری استفاده کرد. راهبرهای ارائه‌شده‌ای که کمترین مقدار RDR را کسب کند، بیشینه تاب‌آوری را فراهم کرده است. همچنین از اهمیت بررسی هزینه‌های تاب‌آوری می‌توان به قابل‌مقایسه بودن وضعیت قبل و بعد از تقویت پهنه و میزان اهمیت ارزیابی و تأیید منافع سرمایه‌گذاری در این راستا اشاره کرد.

۲-۲-۶- ارزیابی ساختاری و ارتقاء تاب‌آوری

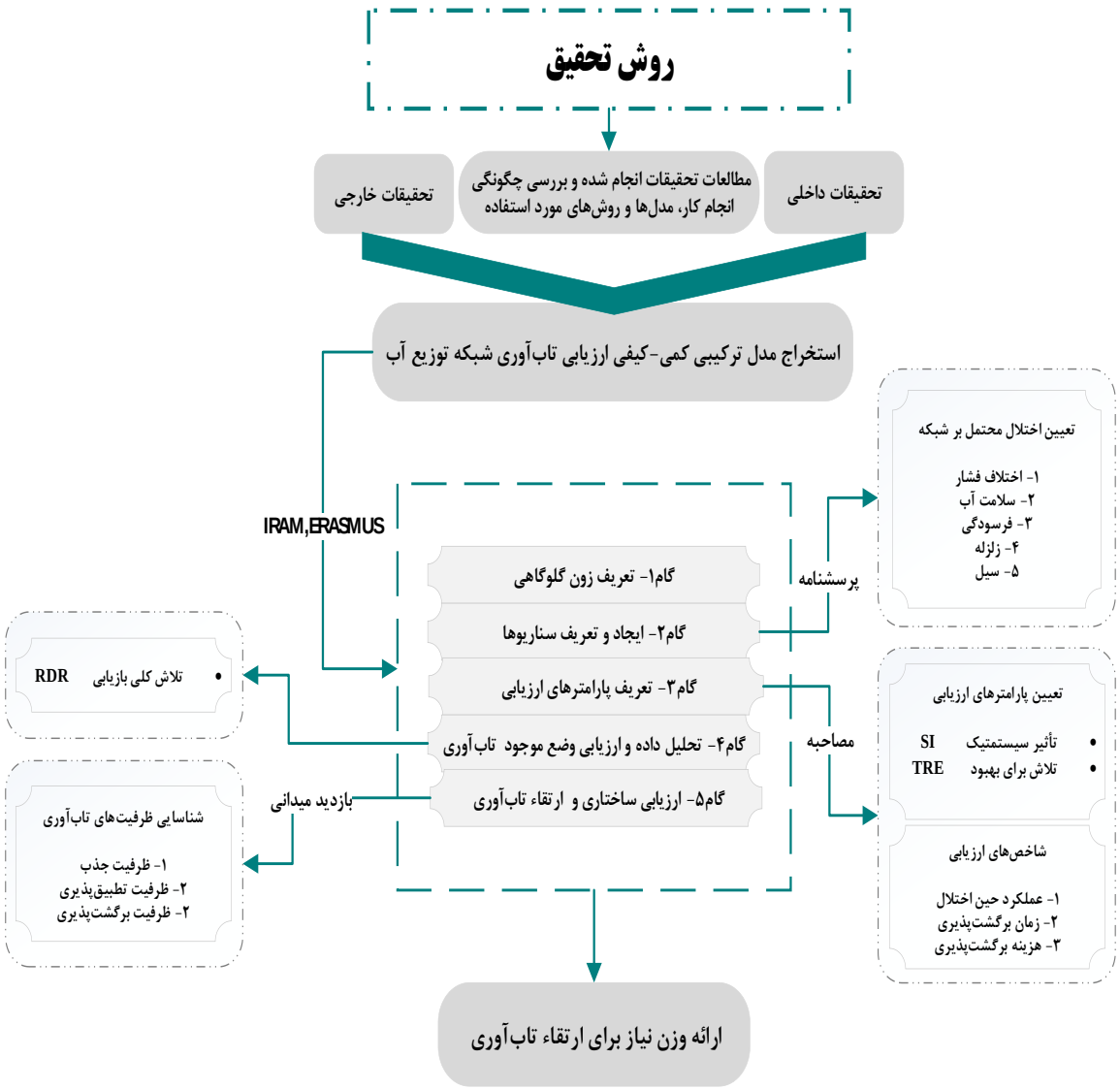
گام نهایی شناخت ظرفیت و زیر ظرفیت‌های تاب‌آوری (شکل ۱) می‌باشد که بر ارتقاء تاب‌آوری پهنه و همچنین کل شبکه، اثر می‌گذارد و منجر به نتایج کمّی می‌شود. شناخت این ظرفیت‌ها همچون راهنمایی برای چگونگی بهبود و ارتقاء تاب‌آوری پهنه (ها) می‌باشد[۲۵, ۲۶, ۲۷].

شکل (۴)، نمای کلی روش انجام تحقیق و پژوهش را نشان می‌دهد.

[1] Systemic Impact
[2] Target System Performance
[3] System Performance

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل (۴): روش و فرایند تحقیق

۳- نتایج و بحث

۳-۱- گام اول: تعریف پهنه (ها) گلوگاهی

پهنه گلوگاهی موردنظر (پهنه x) از شبکه توزیع آب شهر بابل از دو دسته دارایی شامل یک مخزن و ایستگاه پمپاژ با ظرفیت اسمی ۲۵ هزار متر مکعبی و خطوط لوله با طول ۱۰۲۵۷ متر تشکیل‌شده است. جنس لوله‌های بکار گرفته‌شده شامل آزبست، فولادی، پلی‌اتیلن، چدن داکتیل و PVC است که بازه قطری ۶۳ تا ۲۵۰ میلی‌متری دارد. همچنین جمعیت تحت پوشش این پهنه ۲۳۲۳ نفر می‌باشد.

۳-۲- گام دوم: ایجاد و تعریف سناریوها

در این مرحله سناریوهای فرضی مرتبط با ۵ تهدید محتمل بر شبکه توزیع آب شهر بابل (که حاصل مصاحبه و پرسشنامه، از متخصصین شرکت آبفای مازندران است) به تفکیک ۲ دسته دارایی (مخازن و خطوط لوله) ایجادشده است.

به دلیل تشابه میزان احتمالی پیامدی بعضی از تهدیدات در یک دسته دارایی، طبق نظر خبرگی سناریوهای تهدید ۳ دسته و به‌صورت ذیل تعریف می‌شوند.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول (۱): تشریح سناریوهای تهدیدات در هر دسته دارایی

تهدید	دسته دارایی	سناریو	میزان احتمالی تخریب (قبل از اعمال راهکار)	وضعیت احتمالی پیامدی
فرسودگی و اختلاف فشار	خطوط لوله	۱. خطوط لوله، در تهدید فرسودگی و اختلاف فشار دچار هیچ آسیبی نشده.	٪۰	سالم
		۲. خطوط لوله، در تهدید فرسودگی و اختلاف فشار دچار مقداری آسیب و ایجاد ترک‌هایی شده و باعث ایجاد آب بدون درآمد شده.	٪۳۵	نشت
		۳. خطوط لوله، در تهدید فرسودگی و اختلاف فشار به‌طورکلی آسیب‌دیده و آبدهی ندارد.	٪۱۰۰	ترکیدگی
سیل و زلزله	مخازن	۱. مخزن در تهدید سیل و زلزله دچار آسیب نوع ۱(خیلی‌کم) شده است.	٪۱۰	نشت
		۲. مخزن در تهدید سیل و زلزله دچار آسیب نوع ۲(کم) شده است.	٪۲۰	نشت
		۳. مخزن در تهدید سیل و زلزله دچار آسیب نوع ۳(متوسط) شده است.	٪۴۰	نشت
		۴. مخزن در تهدید سیل و زلزله دچار آسیب نوع ۴(زیاد) شده است.	٪۵۰	شکستگی
		۵. مخزن در تهدید سیل و زلزله دچار آسیب نوع ۵(خیلی‌زیاد) شده است.	> ٪۵۰	شکستگی
	خطوط لوله	۱. خطوط لوله، در تهدید سیل و زلزله دچار آسیب نوع ۱(خیلی‌کم) شده است.	٪۱۰	نشت
		۲. خطوط لوله، در تهدید سیل و زلزله دچار آسیب نوع ۲(کم) شده است.	٪۲۰	نشت
		۳. خطوط لوله، در تهدید سیل و زلزله دچار آسیب نوع ۳(متوسط) شده است.	٪۴۰	نشت
		۴. خطوط لوله، در تهدید سیل و زلزله دچار آسیب نوع ۴(زیاد) شده است.	٪۵۰	ترکیدگی
		۵. خطوط لوله، در تهدید سیل و زلزله دچار آسیب نوع ۵(خیلی‌زیاد) شده است.	> ٪۵۰	ترکیدگی
سلامت آب	مخازن	۱. مخزن، در تهدید سلامت آب دچار هیچ آسیبی نشده است.	٪۰	سالم
		۲. مخزن، در تهدید سلامت آب به‌طور کامل دچار آسیب شده است.	٪۱۰۰	آلوده

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۳-۳- گام سوم: تعریف مؤلفه‌های ارزیابی

همانطور که گفته شد مؤلفه‌های ارزیابی تاب‌آوری پهنه‌ها شامل تأثیر سیستمتیک (SI) و هزینه‌های برگشت‌پذیری (TRE) می‌باشد. برای محاسبه هر کدام از مؤلفه‌ها شاخص‌هایی متناسب با هر دسته دارایی، بصورت ذیل تعیین شده است.

۳-۳-۱- تأثیر سیستمتیک (SI)

الف) خطوط لوله

$$SI = \int_{t_0}^{t_f}[TSP(t) - SP(t)] \qquad (۶)$$

SI: اثر تجمعی ریالی اختلال بر آبدهی پهنه (بر اساس سناریوها)

TSP: مجموع ریالی نیاز آبی هر پهنه

SP: مجموع ریالی آبدهی هر پهنه حین اختلال

dt: زمان لازم برای تعمیر/تعویض

ب) مخزن

$$SI = \int_{t_0}^{t_f}[TSP(t) - SP(t)] \qquad (۷)$$

SI: اثر تجمعی ریالی اختلال بر دبی مخزن (بر اساس سناریوها)

TSP: مجموع ریالی دبی مصرفی روزانه مخزن

SP: مجموع ریالی آبدهی مخزن حین اختلال

dt: زمان لازم برای تعمیر/ بازسازی

۳-۳-۲- تلاش برای بهبود کامل (RE/TRE)

الف) خطوط لوله

$$TRE = \int_{t_0}^{t_f}[RE(t)]\,dt \qquad (۸)$$

TRE: مجموع هزینه‌های تعمیر/تعویض

RE: هزینه‌های لازم جهت تعمیر/تعویض

ب) مخزن

$$TRE = \int_{t_0}^{t_f}[RE(t)]\,dt \qquad (۹)$$

TRE: مجموع هزینه‌های تعمیر/ بازسازی

RE: هزینه‌های لازم جهت تعمیر/ بازسازی

۳-۴- گام چهارم: تحلیل داده و ارزیابی وضع موجود تاب‌آوری

در این گام برای محاسبه هزینه‌های تاب‌آوری (RDR) برای ۲ دسته دارایی موجود در پهنه x، ابتدا می‌بایست، به محاسبه مجموع ریالی عملکرد پهنه در حالت ایده آل (Norm) که از مجموع ریالی نیاز آبی (دبی مصرفی) روزانه شبکه به دست می‌آید، پرداخته شود. نتایج محاسبه در جدول (۲)، نشان داده‌شده است.

جدول (۲): محاسبه هزینه‌های تاب‌آوری پهنه x، در سناریوهای مختلف قبل از اعمال راهکار

سیل و زلزله					
سناریوها / دسته دارایی	RDR1	RDR2	RDR3	RDR4	RDR5
مخزن	۱۰/۷۵	۱۹/۴۹	۱۸۳/۲۴	۳۵۰/۲۹	۳۵۰/۲۹
خطوط لوله	۴۳۵۷/۰۹	۸۷۱۴/۱۹	۱۷۴۲۸/۹۷	۶۵۱۷۰/۹۳	۶۵۱۷۰/۹۳

سلامت آب		
سناریوها / دسته دارایی	RDR1	RDR2
مخزن	۰	۱۷/۳۷

فرسودگی و اختلاف فشار			
سناریوها / دسته دارایی	RDR1	RDR2	RDR3
خطوط لوله	۰	۱۵۲۴۹/۸۳	۱۲۹۹۷۰/۹۳

$Norm_{(مخزن)}$=۲۶۳۳۴۷۰۰۰۰ریال
$Norm_{(خطوط لوله)}$= ۷۲۱۹۸۸۴۰ ریال

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۳-۴-۱- گام پنجم: ارزیابی ساختاری و ارتقاء تاب‌آوری

این مدل ترکیبی، ساختاری را برای پاسخگویی به وضعیت تاب‌آوری پهنه (ها) ارائه داده که نتیجه آن مشخص نمودن دلیل پایین یا بالا بودن سطح تاب‌آوری پهنه است. در این گام و با استفاده از داده‌های دریافت شده حاصل مصاحبه و بازدیدی که از این پهنه گلوگاهی شبکه توزیع آب شهر بابل انجام گرفت، با ارائه چند راهکار پیشنهادی برای هر دسته دارایی و متناسب با هر تهدید، به ارزیابی ساختاری و ارتقاء تاب‌آوری پهنه x، پرداخته‌شده است.

الف) راهکارهای مربوط به خطوط لوله:

۱) جایگزینی اتصالات مقاوم (منعطف و ضد لرزه) برای لوله‌ها، بجای اتصالات ترد (سیل و زلزله).

۲) تغییر جنس خطوط آب‌رسانی فرسوده آزبست به چدن داکتیل (فرسودگی و اختلاف فشار).

ب) راهکارهای مربوط به مخزن:

۱) انجام تعمیرات و برطرف کردن درز و ترک‌های موجود بر دیواره مخزن (سیل و زلزله).

۲) تأمین و نصب دوربین‌های پایش در محوطه مخزن (سلامت آب).

جدول (۳): محاسبه هزینه‌های تاب‌آوری پهنه x، در سناریوهای مختلف پس از اعمال راهکار

سیل و زلزله					
سناریوها / دسته دارایی	RDR1	RDR2	RDR3	RDR4	RDR5
مخزن	۰/۴۷	۴/۹۵	۹/۹۰	۹۶	۹۶
خطوط لوله	۳۶۸۵/۹۳	۷۳۵۸/۰۲	۱۴۷۰۲/۱۹	۱۸۳۷۴/۲۷	۱۸۳۷۴/۲۷
سلامت آب					
سناریوها / دسته دارایی	RDR1	RDR2			
مخزن	۸/۴۴	۱۵/۴۴			
فرسودگی و اختلاف فشار					
سناریوها / دسته دارایی	RDR1	RDR2	RDR3		
خطوط لوله	۷۹/۰۳	۸۳۹۵/۲۲	۷۱۳۵۹/۵۸		
$Norm_{(مخزن)}$ = ۲۶۳۳۴۷۰۰۰۰ ریال					
$Norm_{(خطوط\ لوله)}$ = ۷۲۱۹۸۸۴۰ ریال					

پس از محاسبه هزینه‌های وابسته به بازتوانی تاب‌آوری پهنه، پس از اعمال راهکارهای متناسب با هر اختلال، در جدول (۴)، به مقایسه آن‌ها نسبت به هم و درصد بهبود RDR پرداخته‌شده است.

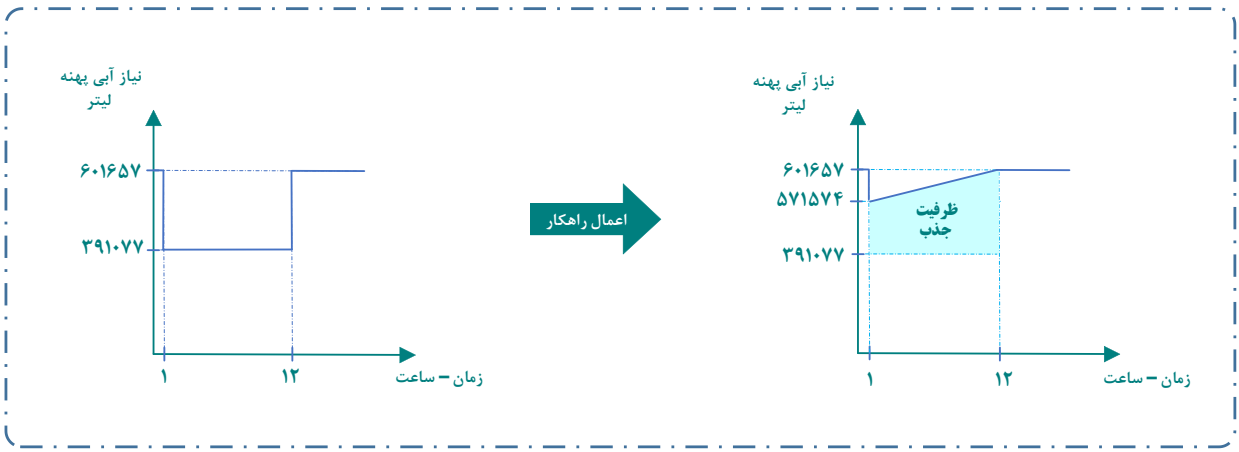
Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول (۴): درصد قیاسی هزینه‌های تاب‌آوری، پس از اعمال راهکار پهنه x

تهدید	دسته دارایی	سناریوها					RDR پهنه
سیل و زلزله	مخزن	۱	۲	۳	۴	۵	افزایش تاب‌آوری
		۹۶٪	۷۵٪	۹۵٪	۷۳٪	۷۳٪	
	خطوط لوله	۱۵٪	۱۵٪	۱۶٪	۷۲٪	۷۲٪	
سلامت آب	مخزن	۲					
		۱۱,۱۱٪					
فرسودگی و اختلاف فشار	خطوط لوله	۲		۳			
		۴۵٪		۴۵٪			

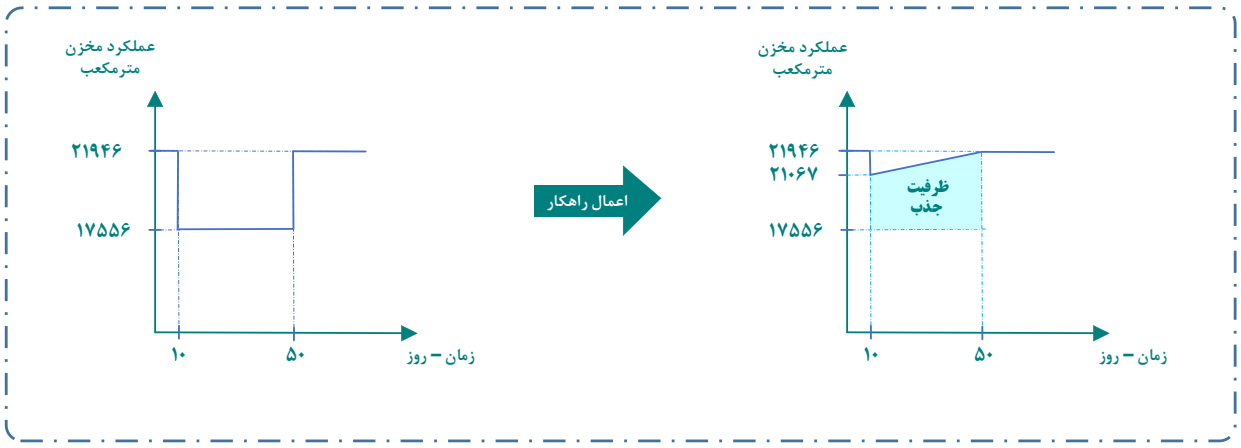
نتایج ارزیابی ساختاری و ارتقاء تاب‌آوری توسط راهکارهای پیشنهادی در جدول (۴)، نشان می‌دهد که اولین راهکار مرتبط به مخزن و خطوط لوله، به‌عنوان بهترین راهکار که RDR کمتری داراست و درنتیجه ظرفیت تاب‌آوری این پهنه را به نسبت راهکارهای دیگر به‌طور چشمگیر افزایش می‌دهد، انتخاب می‌شود. در ادامه و تحت نمودار، جبران افت عملکرد سیستم پس از انجام ارزیابی و سیاست‌های ارتقاء تاب‌آوری (سناریوهای اول از راهکارهای منتخب) نشان داده‌شده است.



شکل (۵): نمودار قیاسی تاب‌آوری قبل و پس از اعمال دومین راهکار مربوط به خطوط لوله (جایگزینی اتصالات و مقاوم منعطف برای لوله‌ها، بجای اتصالات ترد)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل (۶): نمودار قیاسی تاب‌آوری قبل و پس از اعمال اولین راهکار مربوط به مخزن (انجام تعمیرات و برطرف کردن درز و ترک‌های موجود بر دیواره مخزن)

۴- نتیجه‌گیری

ازآنجایی‌که ارزیابی و افزایش تاب‌آوری در شبکه‌های آب‌رسانی، گامی حیاتی در جهت مدیریت پایدارتر آب شهری است، لذا سهل‌انگاری در این موضوع می‌تواند اثرات مخرب و پیامدهای جبران‌ناپذیری را به خود شبکه و زیرساخت‌های وابسته و درنهایت کل جامعه وارد کند. همچنین با ارزیابی و تعیین وضعیت موجود تاب‌آوری پهنه (ها)، می‌توان به انتخاب راهبردهای بهینه برای شرکت‌های آب و فاضلاب در جهت ارتقاء سطح تاب‌آوری زیرساخت خود، کمک بسزایی کرد.

اختلال عملکردی در شبکه‌های توزیع آب، به دلایل متعددی ممکن است رخ دهد. نتایج حاصل از پرسشنامه اخذشده از متخصصین این حوزه در استان مازندران نشان می‌دهد که بیشترین امتیاز تهدیدات محتمل شبکه توزیع آب این شهر شامل سیلاب، زلزله، اختلاف فشار، فرسودگی خطوط لوله و تهدیدات مرتبط با سلامت آب است. نتایج حاصل از بازدید میدانی نشان می‌دهد که مهم‌ترین ضعف موجود در این پهنه که آن را بسیار آسیب‌پذیر کرده، وجود شکاف در بدنه مخزن می‌باشد که دبی زیادی به‌صورت روزانه و به شکل رواناب از مخزن خارج و در محوطه بیرونی اتلاف شده و متأسفانه باعث ایجاد آب بدون درآمد می‌شود. همچنین نتایج تحلیل و ارزیابی تاب‌آوری پهنه x، با استفاده از روش ترکیبی تدوین‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد که مسئولین این شرکت، ملزم به افزایش تاب‌آوری با اولویت قرار دادن بهینه‌ترین راهکارها در راهبردهای خود (انجام تعمیرات و برطرف کردن این درز و ترک‌های موجود بر دیواره مخزن و جایگزینی اتصالات مقاوم و منعطف برای لوله‌ها، بجای اتصالات ترد)، به‌صورت ارتقاء ظرفیت‌های تاب‌آور پهنه می‌باشد.

لازم به ذکر است، روش تدوین شده در این پژوهش، بهبود قابل‌توجهی را در دقت و سرعت ارزیابی، نسبت به مطالعات پیشین، نشان می‌دهد و برخلاف دیگر روش‌های تشریح شده در این مقاله، قابلیت تعمیم‌پذیری به سایر زیرساخت‌ها را دارد. همچنین این روش ترکیبی، به مسئولین در انتخاب بهترین و بهینه‌ترین راهکارها جهت تخصیص صحیح منابع، با تعیین دقیق زمان و هزینه بازیابی به ازای میزان بهبود در عملکرد سیستم کمک می‌کند.

طی بازدید میدانی و بررسی وضعیت فعلی پهنه x، ازمنظر توجه به نکات و الزامات پدافند غیرعامل، مصاحبه با خبرگان و متخصصان حوزه آب و فاضلاب این استان، وزن نیاز ظرفیت‌ها جهت اخذ راهبرهای یاری‌دهنده ارتقاء تاب‌آوری و بهبود در عملکرد این پهنه، به‌صورت شکل (۷)، تعیین گردید.

در ادامه به چند مورد از راهکارهای متمرکز بر دستیابی به ظرفیت‌های تاب‌آوری پهنه x، پرداخته‌شده است:

- نصب ژنراتورهای تولید برق اضطراری و منبع تأمین برق بی‌وقفه در مخزن و ایستگاه پمپاژ (ظرفیت تطبیق‌پذیری).
- نصب شیرهای قطع و وصل اضطراری در مخزن و نیز در ورودی و خروجی پهنه x و سپس رصد منظم و دوره‌ای و در صورت نیاز، تعمیر و تعویض این شیرآلات (ظرفیت جذب و ظرفیت برگشت‌پذیری).
- استتار بخش‌ها و تأسیسات مختلف مخزن و تصفیه‌خانه، حفاظت فیزیکی و دیوارکشی، تأمین روشنایی مناسب جهت دید صحیح در شب، پراکندگی تجهیزات و ایجاد سیستم‌های امنیتی در آن (ظرفیت برگشت‌پذیری و ظرفیت تطبیق‌پذیری).

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل (۷): وزن نیاز ارتقاء تاب‌آوری به تفکیک ظرفیت‌ها

۵- مراجع

[1] M. A. Nakoei, L. Sayadi-Shalmani, M. H. Tofighi, A. Memarzadeh, A.Ali-Abbaszadeh, "Comprehensive Principles of Protecting Critical Infrastructures in the Water and Wastewater Industry". Malek Ashtar University of Technology,2023. (In Persian)

[2] "Strategic Plan for Protecting the Country's Infrastructure". No. 16011/1/2305, 1402/09/25. (In Persian) https://media.dotic.ir/uploads/org/2023/10/30/169866050544329600.pdf

[3] M. Sheikhali, GH. Asadolleh Fardi, S. Imamzadeh, "Vulnerability Assessment of Water Supply Facilities Using the Integrated AHP and RAMCAP Method", Amirkabir Civil Engineering Journal, vol. 52, no. 5, pp. 1205–1220,2020. (In Persian)

[4] R. Afsari, M.Hassan Ali Zadeh, "Analysis of Resilience Indicators in Urban Blocks with Passive Defense Approach (Case Study: Tehran Metropolis) ". Passive defense Journal, vol. 15, no. 4, pp. 57–75. (In Persian)
DOR: 20.1001.1.20086849.1403.15.4.5.8

[5] Z. Mohammadpour, "Localization of a Hybrid Operational Model of Resilience Based on a Quantitative-Qualitative Approach Based on Developed IRAM Models in Water Distribution Networks", Master's Thesis in Passive Defense-Crisis Management, Faculty of Engineering and Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. (2024). (In Persian)

[6] P. Suchorab and D. Kowalski, "Water Resources Protection by Controlling Water Supply Network Leakages", International Journal of Conservation Science, vol. 12, pp. 745–754, 2021.

[7] A. Nariman, M. H. Fattahi, N. Talebbeydokhti, and M. S. Sadeghian, "Assessment of Hydraulic Resilience and Return Time of Sadra City Water Distribution Network under Earthquake", Iran-Water Resources Research, vol. 17, no. 2, pp. 204–221, 2021. (In Persian)
https://sid.ir/paper/953172/en.

[8] S. Q. Shuang Qing, L. H. Liu HuiJie, and E. Porse, "Review of the quantitative resilience methods in water distribution networks, 2019.
https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20193329434.
DOI: 10.3390/w11061189

[9] M. Maiolo, D. Pantusa, M. Carini, G. Capano, F. Chiaravalloti, and A. Procopio, "A new vulnerability measure for water distribution network", Water, vol. 10, no. 8, p. 1005, 2018.
DOI: 10.3390/w10081005

[10] A. Assad, O. Moselhi, and T. Zayed, "A new metric for assessing resilience of water distribution networks", Water, vol. 11, no. 8, p. 1701, 2019. DOI:10.3390/w11081701

[11] A. H. Abdollahzadeh, S. Shahriar "Location of Risk Zones in Water Network Systems Quality Crisis With GIS, AHP Approach Case Study: Water Network Of Tehran". 2019. (In Persian)
https://pd.ihu.ac.ir/article_204444.html?lang=en

[12] S.Givehchi, A.Vojdani Nozar, B. Malek Mohammadi, "Evaluation of Easibility of Threats to Urban Water and Sewage Assets in the Face of Intentional Man-Made Disasters (Case Study: Hamedan City) ".2024. (In Persian)
https://jms.ihu.ac.ir/article_209341.html.
DOR: 20.1001.1.20086849.1403.15.3.6.7

[13] A. Abdar, "Complying with passive defense requirements in water facilities to increase resilience", presented at the Fourth National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, Fourth National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, Apr. 2017. (In Persian)
https://civilica.com/doc/611979.

[14] Technical and Specialized System for the Protection of the Country's Infrastructures Approved on 28/06/1402 by the Standing Committee (Supreme Council) of the Country's Passive Defense.(In Persian)
https://rc.majlis.ir/fa/law/show/1792212.

[15] P. Gasser, P. Lustenberger, M. Cinelli, W. Kim, M. Spada, P. Burgherr, et al., "A review on resilience assessment of energy systems", Sustainable and Resilient Infrastructure, vol. 6, no. 5, pp. 273–299, Sep. 2021.
DOI: 10.1080/23789689.2019.1610600

[16] A. Mentges, L. Halekotte, M. Schneider, T. Demmer, and D. Lichte, "A resilience glossary shaped by context: Reviewing resilience-related terms for critical infrastructures", International journal of disaster risk reduction,p.103893,2023.
DOI: 10.1016/j.ijdrr.2023.103893

[17] A. Nariman, M. H. Fattahi, N. Talebbeydokhti, and M. S. Sadeghian, "Assessment of Seismic Resilience in Urban Water Distribution Network Considering Hydraulic Indices", Iran J Sci Technol Trans Civ Eng, vol. 47, no. 2, pp. 1165–1179, Apr. 2023. (In Persian)
DOI: 10.1007/s40996-022-00941-7

[18] S. M. Alavi, M. Masoud, A. Karimi, "Evaluation of the resilience of urban water network infrastructures against earthquakes (Case Study: Region 2 of Tehran Municipality)", 2019. (In Persian)
https://www.sid.ir/paper/138938/fa.

[19] W. Liu, Z. Song, and M. Ouyang, "Lifecycle operational resilience assessment of urban water distribution networks", Reliability Engineering & System Safety, vol. 198, p. 106859, 2020.
DOI: 10.22059/jhgr.2018.228869.1007424

[20] G. P. Cimellaro, A. Tinebra, C. Renschler, and M. Fragiadakis, "New Resilience Index for Urban Water Distribution Networks", J. Struct. Eng., vol. 142, no. 8, p. C4015014, Aug. 2016.
DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001433

[21] O. Piller, F. Sedehizade, T. Bernard, M. Braun, N. Cheifetz, et al., "Augmented resilience of water distribution systems following severe abnormal events", in CCWI 2017-Computing and Control for the Water Industry, 2017, pp. 8-p.
https://hal.science/hal-01609292/.
DOI:10.15131/shef.data.5363509.v1

[22] K. Diao, C. Sweetapple, R. Farmani, G. Fu, S. Ward, and D. Butler, "Global resilience analysis of water distribution systems", Water research, vol. 106, pp. 383–393, 2016. https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.10.011

[23] L. F. Gay and S. K. Sinha, "Stochastic simulation methodology for resilience assessment of water distribution networks", IJCIS, vol. 10, no. 2, p. 134, 2014.
DOI: 10.1504/IJCIS.2014.062966

[24] NCC, National Cartographic Center, "Babol City map and spatial information atlas. Iran," https://en.ncc.gov.ir/, 2021. (In Persian)

[25] L. F. Gay Alanis, "Development of a resilience assessment methodology for networked infrastructure systems using stochastic simulation, with application to water distribution systems", PhD Thesis, Virginia Tech, 2013.

[26] M. Zolfaqari, A. Ghanbari Nasab, M. A. Nekooie, and S. M. Hosseini, "Evaluation of resilience of West Tehran wastewater transmission line to Firooz Bahram treatment plant", Emergency Management, vol. 12, no. 1, pp.1–15,2023.(In Persian)
DOR: 20.1001.1.23453915.1402.12.1.1.5

[27] B. Betty, "The book Security and Resilience of Vital Infrastructure". Malek Ashtar University of Technology Publications, 2019. (In Persian)

Archive of SID.ir