

Development of an Evaluation Method for Urban Water Network Sustainability Through the Innovation of a Point Sustainability Index: A Case Study of Abyek

Darab Biranvandi¹, Hossein Hassanpour Darvishi², Hossein Ebrahimi³

Received: 2023/12/03

Revised: 2024/02/18

Accepted: 2024/04/03

Published: 2025/08/06

Highlights

- ≠ Network sustainability index is used to compare and evaluate water distribution network (WDN) performance over time and across locations.
- ≠ Point indicators for resilience, reliability, and vulnerability were defined and analyzed for different consumption levels using hydraulic modeling.
- ≠ The sustainability index decreases from minimum to maximum consumption, with point sustainability at maximum consumption being lower than other states.
- ≠ Improving point sustainability index at network nodes can effectively enhance the overall network sustainability index.

Extended Abstract

Introduction

The hydraulic conditions of WDNs are generally evaluated by using demand-driven modeling (DDM) models as a demand function in normal operational conditions and additional pressure-driven modeling (PDM) implementations that have better responded to WDNs (WDN) analysis in operating conditions. The review of the records indicated that the point index, which can represent the changes effect on the consumption point and at the same time is formed based on the sustainability index's correlations, can be very effective in improving the indices used in the plans in order to enhance the WDNs' performance.

In order to achieve the goal of the research, it was necessary to review and summarize the records of related researches that had been done to extract the stability of the water distribution network, the methods of calculating the network stability index, the components used in extracting the stability index, in addition to the effect of changes in physical and hydraulic conditions, as well as fluctuation. In addition, the network sustainability index, as a consequence of network indicators for resilience, reliability and vulnerability, was used to compare and evaluate network performance in time periods (daily, monthly, seasonally and annually) or to compare the performance of homogeneous networks in different geographical environments. The implementation of this research required the completion and improvement of the general stability extraction relationships in the network for the possibility of extracting the point stability index of the network additionally, which was not found in the records of past research.

Network reliability is the probability of network satisfaction status using the following relation:

- ≠ $\text{Duration of Network Utility Status} / \text{Total Network Analysis Time} = \text{REL}$
- ≠ The flexibility shows the network's return speed to the desired position after an event.
- ≠ General status of the network/the uncertainty of the network status = RES

¹ PhD Student of Water Resources, Dept. of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² Associated Professor, Department of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Corresponding Author, Email: hhassanpour@qodsiau.ac.ir

³ Associated Professor, Department of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

≠ The amount of vulnerability or time of unacceptable network status is defined as the amount of network

≠ vulnerability at the specified time interval: Sums of undesirable values / Total values = VUL

The domain of the network sustainability index changes (SI) from zero, which means disutility water supply, to one, which means utility water supply to all network points in the defined domain.

Case study:

Abyek city as a case study is one of the Qazvin province cities, with an area of, 1534 square kilometers. According to the detailed project of Abyeke City in 2015, the area of the city is determined to be 817 hectares for 1425 years, and the average density of this city in the mentioned year is estimated to be 122.5 people per hectare. The statistical reports of the Qazvin Province Regional Water Company indicate that the amount of per capita consumption in the period of 2016–2021, excluding lost, is 211.5 liters per person per day in Abyek city.

Theoretical Framework

The theoretical framework underpinning this research is rooted in the multidimensional analysis of water distribution network (WDN) sustainability. It synthesizes a comprehensive review of prior studies addressing the extraction and calculation methods of network stability indices, as well as the influencing components—such as physical layout and hydraulic parameters—on network stability. The approach integrates key performance criteria, including reliability, flexibility, vulnerability, and overall sustainability, to evaluate network performance under diverse operating scenarios and to compare network responses across temporal and geographical domains. Building on advancements in point sustainability indices, this framework proposes a novel perspective by connecting system-wide sustainability metrics with localized (node-level) assessments, enabling a more granular evaluation of the effects of modifications, maintenance, and enhancement strategies. This conceptual foundation supports the development and application of point sustainability index extraction methods for dynamic modeling and decision-making, thereby advancing practical and theoretical understanding of sustainable WDN management.

Methodology

For the structural classification of measuring and understanding the sustainability index of the distribution network system, the ranges of the network's response to changes, including absorption, adaptation and restoring (the network failure due to change and the need to restore), were simulated.

For the possibility of separating the pressure zone of the simulated distribution network into maximum, medium and minimal consumption hours, the output of the pressure distribution was displayed in the following ranges:

- ≠ Low pressure range in the grid for points less than 26 m of water column with orange color
- ≠ Normal network pressure range for points with pressure between 26 and 40 m of water column with blue color
- ≠ Range on the threshold of high pressure for points with pressure between 40 and 50 m of water column with green color
- ≠ Network high pressure range for points with pressure greater than 50 m of water column with purple color.

Results & Discussion

Reviewing the pressures corresponding to the points and comparison with the defined compressive range indicated that nearly 92% of the nodes in the distribution network, under maximum hourly consumption conditions, have the appropriate pressure in the range of 26 to 60 meters of water column. Taking a look at the internal distribution of this acceptable compressive range showed that the compressive range between 26 and 50 meters of water column has the most positive effect on water consumption management, with a significant superiority and more compressive distribution in consumption nodes.

In another process and in accordance with the zoning of pressure distribution in the network, the distribution of the point sustainability index was grouped in the intervals of 0.00–0.43, 0.43–0.83, and 1.00–0.83.

Therefore, it can be recommended that in network rehabilitation and development programs, evaluation and promotion of point sustainability will provide more favorable operational results. For continuing and raising up the accuracy of current research outcomes, authors suggest to analyses both overall and points sustainability indices within three main conditions of the water network correspondence to periods of the 10 meters water pressures as these pressure classification seats the acceptable pressure situation in the network.

Conclusion

This study demonstrates that the sustainability index of water distribution networks, traditionally evaluated at the network-wide level, can be effectively complemented by a point-based sustainability index that reflects consumer-level satisfaction. The analysis reveals that while the overall network sustainability declines with increasing consumption—from minimum to maximum—the point sustainability index provides a more detailed indication of performance at

individual nodes, particularly under maximum demand conditions. The strong correlation and convergence between the network-wide and point indices affirm that targeted improvements based on point sustainability can effectively enhance the overall network sustainability. Therefore, implementing network modifications, refurbishments, or development strategies evaluated through point sustainability indices enables more precise and effective planning to optimize water distribution system performance.

Keywords

Water Distribution Network, Sustainability, Resilience, Vulnerability, Reliability.



Citation:

Biranvandi, D., Darvishi, H. H., & Ebrahimi, H. (2025). Development of the Evaluation Method of Sustainability in an Urban Water Distribution Network Through the Innovation of Point Sustainability Index: A Case Study: Water Distribution Network of the Abyek City. *Journal of Urban Sustainable Development*, 6(19), 51-66



DOI: <https://doi.org/10.22034/usd.2024.2017016.1165>



DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27170128.1404.6.19.4.9>

URL: https://usdjournals.daneshpajooohan.ac.ir/article_725062.html?lang=en



Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Daneshpajooohan Pishro Higher Education Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



توسعه روش ارزیابی پایداری شبکه آب شهری با نوآفرینی شاخص نقطه‌ای پایداری - مطالعه موردی آبیگ

داراب بیرانوندی^۱، حسین حسن پور درویشی^{۲*}، حسین ابراهیمی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۱۵

چکیده: طراحی برنامه‌های بازسازی و توسعه شبکه‌های آب قبل از هر گونه اقدام اجرایی به منظور جلوگیری از اتلاف هزینه‌ها، نیازمند شبیه‌سازی تأثیر گزینه‌های اجرایی بر عملکرد شبکه است. همچنین ارزیابی عملکرد شبکه در دوره‌های زمانی (روزانه، ماهیانه، فصلی و سالیانه) به منظور تعیین پایداری کلی شبکه برای و یا مقایسه عملکرد شبکه‌های همگون نیز انجام می‌شود. در عین حال توجه به ارزیابی کارآیی موضعی و نقطه‌ای شبکه و ارتباط آن با مؤلفه‌های شاخص پایداری، ضروری می‌نماید؛ بنابراین این پژوهش برای انجام سازوکار حصول به شاخص نقطه‌ای بعنوان یک راهکار نوین برای نشان دادن اثرات تغییرات بر روی نقاط مصرف، طراحی انجام شد. در گام اجرایی شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه واقعی توزیع آب در آبیگ قزوین، برای استخراج داده لازم، انجام شد. سپس شاخص‌های نقطه‌ای تاب‌آوری، آسیب‌پذیری و قابلیت اطمینان، استخراج و سپس شاخص‌های نقطه‌ای و کل پایداری شبکه در سه حالت کمینه، متوسط و بیشینه مصرف مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در حالت بیشینه مصرف، توزیع پایداری نقطه‌ای مقادیر کمتری نسبت به سایر حالات مصرف را داشت به شکلی که روند تغییرات شاخص کل پایداری شبکه با کاهش فشار از ۰/۶۶ به ۰/۴۱ کاهش یافته بود. در همین حالت و همزمان، متوسط شاخص نقطه‌ای شبکه از ۰/۸ به ۰/۲۷ کاهش یافته بود؛ بنابراین مقایسه شاخص‌های پایداری کل و نقطه‌ای شبکه، نشان می‌دهد که میزان و توزیع شاخص پایداری نقاط شبکه با افزایش مصرف (کاهش فشار) نسبت به شاخص پایداری کل در همین شرایط، کاهش بیشتری را داشته است. اینگونه استنباط شد که شاخص پایداری نقطه‌ای در حالت بیشینه مصرف در مقایسه با شاخص پایداری کل، معرف بهتری برای گره‌های مصرف شبکه بود؛ بنابراین می‌توان توصیه نمود که در برنامه‌های اصلاح و بازسازی شبکه، ارزیابی و ارتقای پایداری نقطه‌ای، نتایج اجرایی مطلوب‌تری را فراهم خواهد نمود.

واژگان کلیدی: شبکه توزیع آب، پایداری، تاب‌آوری، آسیب‌پذیری، قابلیت اطمینان

^۱ دانشجوی دکتری منابع آب، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس، تهران، ایران.

^{۲*} دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس، تهران، ایران. نویسنده مسئول: Email:

hhassanpour@qodsiau.ac.ir

^۳ دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس، تهران، ایران.

۱- مقدمه و بیان مسئله

طراحی برنامه‌های ارتقاء، بازسازی، اصلاح و توسعه شبکه‌های آب قبل از هر گونه اقدام اجرایی به منظور جلوگیری از اتلاف هزینه‌ها، نیازمند شبیه سازی تأثیر گزینه‌های تغییرات اعمال شده در جهت بهبود پایداری عملکرد شبکه توزیع آب است. در این خصوص به منظور تعیین محدوده‌ها و مسیرهای بهینه سازی، شاخص ریسک شبکه که برپایه جلوگیری از حوادث و اهمیت نقاط (گره) مصرف کننده در شبکه است در حالات وضعیت موجود و وضعیت آتی شبکه (اعمال تغییرات)، مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرد.

سوابق پژوهش‌ها نشان می‌دهد ارزیابی پایداری شبکه‌های توزیع آب بصورت کلی و بعنوان یک مؤلفه برای تمام شبکه استخراج و ارزیابی شده است. در حالیکه شبکه‌های توزیع آب در شهرها بر مبنای شرایط مختلف در زونهای فشاری بهم پیوسته و یا منفرد رفتار هیدرولیکی متفاوتی را از خود نشان میدهند که ناشی از خصوصیات نقاط مصرف و گره‌های شبکه در مدل شبیه سازی شده است و این چالشی است که در پژوهش‌های پیشین به ندرت مورد توجه واقع شده و روش‌های ارزیابی برای آن طراحی و استخراج نشده است.

بنابراین اینگونه استنباط می‌شود که تا کنون، استفاده از شاخص‌های پایداری عمومی برای کل شبکه متداول بوده است، در حالیکه طرح‌های توسعه و بازسازی برای محدوده‌های خاصی از شبکه صورت می‌گیرد؛ بنابراین، به منظور بهبود ارزیابی عملکرد شبکه، پایداری نقطه‌ای به عنوان مؤلفه‌ای قابل توجه لازم است که مطرح شود. در نتیجه که در یک رویکرد نوآورانه برای ارتقاء ارزیابی توزیع پایداری در شبکه توزیع آب روش این پژوهش مطرح و به منظور اتصال ویژگی‌های پایداری از محاسبات عمومی به محاسبات نقطه‌ای در شبکه، روابط استخراج پایداری نقطه‌ای در شبکه توزیع طراحی و پیشنهاد شد. اجرای این پژوهش مستلزم تکمیل و ارتقای روابط استخراج پایداری عمومی در شبکه

برای امکان استخراج شاخص پایداری نقطه‌ای شبکه نیز بود که در سوابق پژوهش‌های گذشته یافت نشده است.

بنابراین، در غیاب یک روش رسمی برای ارزیابی توزیع پایداری در شبکه آب، پژوهش حاضر بعنوان رویکردی نو برای پیوند دادن ویژگیهای پایداری از محاسبات عمومی در شبکه توزیع آب به محاسبات نقطه‌ای در شبکه، طراحی و انجام گردید. ضروری بود که در کنار شاخص پایداری کلی، شاخص نقطه‌ای بعنوان معرف اثرات تغییرات (فشار، دبی و یا بروز حوادث) بر روی هر کدام از نقاط مصرف (و یا گره‌های شبکه) استخراج و در طرح‌های توسعه، اصلاح و بازسازی، بعنوان مؤلفه‌ای قابل توجه، در نظر گرفته شوند. به این معنی که فرآیند طراحی بشکلی انجام گیرد که علاوه بر بهبود شاخص پایداری کل، شاخص‌های نقطه‌ای نیز بهبود قابل توجهی نیز داشته باشند.

لذا در پژوهش حاضر در کنار ارائه سوابق پژوهش‌ها و طرح‌های مرتبط، روش استخراج شاخص نقطه‌ای، برای اولین بار بعنوان نوآوری پژوهشی پیشنهاد شده و در شبیه سازی هیدرولیکی یک شبکه واقعی توزیع آب، استخراج و مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت؛ بنابراین هدف این پژوهش طراحی و استخراج شاخص پایداری نقطه‌ای مقرون به واقعیت شبکه به منظور ارائه گزینه تصمیم یار برای استفاده در برنامه ریزی‌های بهبود کارکرد شبکه توزیع آب تعیین شد. به همین منظور پایداری سامانه در یک مدل دینامیکی سیستم از شبکه آب (محدوده قابل دسترس) تحت سناریوهای مختلف فشاری، استخراج و ارزیابی شد.

قابل ذکر اینکه هدف یاد شده بعنوان نقطه توجه این پژوهش در نظر گرفته شده و در عین حال بهبود روشهای محاسبه و یا ابداع روش‌های محاسبه پایداری نقطه‌ای در شبکه توزیع آب، در گام بعدی پژوهش در نظر گرفته خواهد شد و موضوع این مقاله نمی‌باشد. لذا مرور سوابق پژوهش‌های پیشین در شبکه‌های توزیع آب و استفاده از معادلات استخراج شاخص پایداری ذکر شده مورد امکانسنجی قرار گرفته است و نوآوری پژوهش حاضر، پیشنهاد و استخراج شاخص پایداری نقطه‌ای با میانسان کردن روابط شاخص پایداری کل

شاخص پایداری قطعی و فازی توسط گروهی از پژوهشگران انجام شده است. از جمله اینکه در پژوهشی شاخص پایداری شبکه بر اساس معیارهای سنج‌های برگشت پذیری، آسیب پذیری و قابلیت اطمینان تعریف شده اند. سنج قابلیت اطمینان نیز بر اساس ترکیبی از بازیابی شبکه به حالت مطلوب، سن آب و آنتروپی تعریف شد. تعیین شاخص‌های فوق با استفاده از روش منطق فازی و قطعی انجام گردید که روش منطق فازی نتایج مطلوب‌تری نسبت به روش دیگر ارائه نموده بود (Bakhtiari et al., 2016,8).

در پژوهشی که در سال ۲۰۱۷ انجام شد، نتایج تغییرات اعمال شده در شبکه توزیع آب شهر ۲۰۰۰ نفری کیرانا در سوئد در شهر در طولانی مدت بررسی شده است. نتایج با شبیه سازی‌های انجام شده با استفاده از مدل‌های هیدرولیکی تحلیل و مقایسه شدند. نتایج پژوهش یاد شده هم راستا با پژوهش دیگری بود که در سال ۲۰۲۰، تغییر ساختار شبکه در طول سالیان متمادی و تغییرات روی شبکه توزیع و مقایسه با تحلیل‌های هیدرولیکی را بررسی کرده و نشان داده بود که بیشترین کارایی استفاده از مدل‌های هیدرولیکی نه تنها شبیه سازی کارکرد شبکه قبل از دوره ساخت بلکه بازیابی و ارتقای شبکه برای در دوره بهره برداری نیز می‌تواند باشد (Marques & Cunha, 2020; Zischg et al., 2017).

بورزی^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۸، میزان پایداری شبکه توزیع آب شهر مسینای ایتالیا را از طریق ارزیابی مدل شبکه توزیع آب این شهر بررسی نمودند. شاخص پایداری شبکه توزیع آب بر اساس پارامترهای قابلیت اطمینان شبکه، قابلیت انطباق و آسیب پذیری شبکه تعیین و بدین منظور ۶ سناریو مختلف در مدل مذکور تهیه و اجرا و نتایج با یکدیگر مقایسه گردیدند. نتایج نشان دادند که مقایسه استخراج شاخص‌های پایداری در حالت واقعی و مدل شبیه سازی شده بسیار نزدیک بهم بوده و در سطح قابل قبولی قرار داشتند (Borzi et al., 2018).

توسط گروهی از پژوهشگران شاخص پایداری بعنوان برآیندی از نشانگرهای شبکه برای تاب آوری، اطمینان و

شبکه به شاخص پایداری نقطه‌ای است که در سوابق پژوهش‌های پیشین یافت نشد. هم چنین اصلاح روابط محاسبه مؤلفه‌های شاخص‌های پایداری نقطه‌ای نیز در فرآیند این پژوهش نیز انجام شده است. سرانجام شاخص‌های پایداری نقطه‌ای نسبت به شاخص پایداری کل ارزیابی و کارایی آن‌ها در بهبود وضعیت کارکرد شبکه، مورد بررسی و نتیجه‌گیری قرار گرفت.

۲- پیشینه و مبانی نظری پژوهش

گرچه پایه کلیه تحلیل‌های پایداری در شبکه‌های توزیع آب بر مبنای شبیه سازی کارکرد شبکه در شرایط واقعی و با استفاده از نرم افزارهای رایج، بنا شده است، بررسی سوابق نشان داد که شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب، بیشتر بر روی شبیه‌سازی مبتنی بر تقاضا متمرکز شده‌اند، ولیکن امروزه به جهت نیاز به توزیع مناسب فشار و ارتباط آن با مدیریت مصرف آب از شبیه‌سازی مبتنی بر فشار نیز استفاده می‌شود. در نتیجه تحلیل هیدرولیکی در شبکه‌های توزیع آب را می‌توان به دو دسته مبتنی بر تقاضا و مبتنی بر فشار تقسیم کرد (Paez & Filion, 2017; Sanz Estapé, 2016; Sanz & Pérez, 2015).

در شرایطی که در روش‌های PDA اصلاح کد روابط حل‌کننده هیدرولیکی یا استفاده از روش‌های نوع تکرار شونده که در آن مؤلفه‌های تأسیسات شبکه (مانند مخازن) به گره‌های شبکه اضافه می‌شوند تا هم‌گرایی حاصل شود، به نظر می‌رسد به منظور ساده سازی روش‌ها و امکان‌پذیری حصول به اهداف شبیه سازی می‌توان از روش ترکیبی شبیه سازی مبتنی بر فشار و استفاده از خروجی‌های آن برای تحلیل و ارزیابی شرایط هیدرولیکی بعد از نرم افزارهای شبیه سازی شبکه نیز استفاده نمود. در دهه اخیر شاخص پایداری شبکه، برای مقایسه و ارزیابی عملکرد شبکه در دوره‌های زمانی (روزانه، ماهیانه، فصلی و سالیانه) و یا مقایسه عملکرد شبکه‌های همگون استفاده شده است. تحلیل و ارزیابی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از معیارهای عملکرد و

^۱ Borzi

آسیب پذیری جهت ارزیابی شبکه توسط محققان تعریف گردیده است (Ghanooni, 2021; Golabchi et al., 2021).

پژوهشگران دیگری چهار معیار قابلیت اطمینان، انعطاف پذیری، آسیب پذیری و پایداری برای ارزیابی عملکرد شبکه آب و سنجش‌های شاخص پایداری، ارائه نمودند (Ahmadi et al., 2022; Safavi et al., 2016).

سه مورد اول از نظر مفهومی بر اساس تعاریف مورد استفاده در مهندسی منابع آب است. برخلاف مطالعات منابع آب که در آن حداقل تقاضا وجود دارد، معیارهای پیشنهادی برای ارزیابی شبکه توزیع آب شرب، احتمال رسیدن شبکه به حداقل بازده را ارزیابی نمی‌کنند، بلکه کارایی شبکه را در شرایط مختلف کمینه مصرف متناظر با بیشترین فشار، متوسط مصرف و به ویژه بیشینه مصرف متناظر با کمینه فشار ارزیابی می‌کنند (Enteshari et al., 2020). کائوما و آیت^۱ در سال ۲۰۲۱، شاخص عملکرد شبکه توزیع آب تحت شرایط بارگذاری چندگانه را بررسی نمودند. در این تحقیق شاخص عملکرد شبکه توزیع آب علاوه بر شرایط فشار بالا با میزان دبی مصرفی و دبی طراحی نیز ترکیب گردید. در نتیجه شاخص عملکرد با محاسبه میانگین هندسی بر اساس چهار معیار قابلیت اطمینان، قابلیت آسیب پذیری، انعطاف پذیری و قابلیت اتصال اجزا سیستم در مواقع لزوم تعریف شد. تمام معیارهای یاد شده بر اساس کفایت انرژی، ظرفیت هیدرولیکی و توانایی ساختار شبکه برای تحویل آب در شرایط مختلف بودند. بر همین اساس، افزایش قابلیت بهره‌وری شاخص، مشابه روند دیگر شاخص‌ها، مبتنی بر افزایش فشار شبکه در نظر گرفته شد، در عین حال مشاهده شد که این رویکرد با ایجاد فشارهای بالای غیر ضروری، بطور محسوسی تفاوت داشت (Kuma & Abate, 2021).

وی‌تان^۲ و همکاران در سال ۲۰۲۱، شاخص ارزیابی شبکه توزیع آب شهری را بر اساس فشار گره‌ها در شبکه و سن آب تعیین نمودند. این شاخص بر اساس شاخص‌های

عملکردی قابلیت اطمینان، قابلیت انطباق پذیری و آسیب پذیری تعریف گردیدند. برای شبیه‌سازی فشار گره‌ها و سن آب داخل شبکه از مدل EPANET استفاده شد. سپس مقادیر دو پارامتر یاد شده برای تعیین شاخص مورد نظر با یکدیگر ترکیب شدند. همچنین محاسبات مربوطه برای تعیین امتیاز کلی شاخص پایداری زون‌های فشاری مورد نظر انجام گرفت. نهایتاً این شاخص برای رصد وضعیت شبکه و پیشنهاد گزینه‌های ارتقاء از قبیل تغییرات در بهره‌برداری پمپ‌ها و اصلاح شبکه به منظور افزایش قابلیت پایداری شبکه مورد استفاده قرار گرفت (Vitan et al., 2021).

ماسیاس^۳ و همکاران در سال ۲۰۲۱، مجموعه‌ای از شاخص‌ها را به صورت یک ساختار ریاضی در کنار شاخص‌های شناخته شده دیگر، در شبکه توزیع آب ترکیب و ارائه نمودند (Macias Ávila et al., 2021). در مقاله منتشر شده از این پژوهش، شاخص آب شهرهای پایدار مورد بحث قرار گرفته است. این شاخص از امتیاز ترکیبی بر اساس عوامل مختلفی مانند تنش آبی، فضای سبز، مخاطرات مرتبط با شبکه‌های توزیع آب، خطر سیل، تعادل و ذخیره آب برای رتبه‌بندی شهرها استفاده شد. در مرحله بعد پایداری شبکه توزیع آب در ۵۰ شهر از ۳۱ کشور اندازه‌گیری و رتبه‌بندی شد. این شاخص نشان می‌داد که اکثر شهرهای آمریکای شمالی در نیمه بالایی این نمونه از شهرهای کشورهای توسعه یافته قرار دارند. همچنین اهمیت اتخاذ رویکرد "One Water" را برای رسیدگی به چالش‌های آب به شرحی که مدل‌سازی شاخص پایداری از منبع تا مصرف بصورت یکپارچه در نظر گرفته می‌شد، مورد توصیه قرار گرفت. با این حال، این مقاله اطلاعاتی در مورد جزئیات روش‌های خاص مورد استفاده در تحقیق ارائه نمی‌دهد. دزیک و کارنی^۴ در سال ۲۰۲۱ شاخص کارایی اجرا را پیشنهاد نمودند. توانایی تحویل فشار و دبی مناسب به اجزای شبکه توزیع آب در چهار معیار قابلیت اطمینان، میزان آسیب پذیری، قابلیت برگشت پذیری و قابلیت اتصال مرتبط شدند. این معیارها به

^۳ Macias Ávila

^۴ Dziedzic & Karney

^۱ Kuma & Abate

^۲ Vitan

می‌باشد. بر اساس نقشه‌های تراکم جمعیتی مرکز آمار ایران، در سال ۱۳۹۵ شهر آبیک مساحتی برابر ۱۸۳۶ هکتار داشته و متوسط تراکم این شهر در سال مذکور برابر ۳۲/۷ نفر در هر هکتار است. بر اساس طرح تفصیلی شهر آبیک در سال ۱۳۹۴، مساحت شهر برابر ۸۱۷ هکتار برای سال ۱۴۲۵ تعیین و متوسط تراکم این شهر در سال مذکور برابر ۱۲۲/۵ نفر در هر هکتار برآورد شده است.

گزارش‌های آماری شرکت آب منطقه‌ای استان قزوین نشان دهنده میزان مصرف سرانه در دوره ۱۴۰۰-۱۳۹۵ بدون احتساب تلفات در شهر آبیک برابر ۲۱۱/۵ لیتر به ازای هر نفر در روز است. بر مبنای روشهای محاسبه سرانه در بخشهای مختلف مصرف و مدیریت مصرف و کاهش تلفات پیش بینی می‌شود میزان کل مصرف برای هر نفر در روز در سال ۱۴۲۵ به ۲۰۲ لیتر و مقدار کل ۷/۴ میلیون متر مکعب در آن سال برسد. آرایش شبکه توزیع در شهر آبیک در (شکل شماره ۲) نمایش داده شده است. مشخصات شبکه توزیع آب در (جدول شماره ۱) ارائه شده است.



شکل ۱- محدوده مطالعه.

جدول ۱- مشخصات لوله‌های شبکه توزیع آب در محدوده مورد مطالعه.

جنس لوله	قطر لوله (میلی متر)	طول لوله (متر)
AC	۸۰	۴۹۴۰
	۱۰۰	۳۷۸۴۹
	۱۵۰	۱۷۴۱۳
	۲۰۰	۳۵۱۱
	۳۰۰	۱۰۱۳
	۳۵۰	۱۰۶۰
GRP	۵۰۰	۲۴۵۷
PE	۶۳	۲۸۲۳
	۹۰	۹۱۵۲
	۱۱۰	۴۵۹۶۱
	۱۶۰	۱۳۰۲۵

خودی خود بر پایه کفایت انرژی، ظرفیت هیدرولیکی و توانایی سازه‌ای سامانه در تحویل آب تحت شرایط مشخص بودند و برای دو حالت شبکه و آلترناتیوهای آن به منظور ارزیابی میزان ارتباط آنها و میزان حساسیت سیستم به تغییرات استفاده شدند (Dziedzic & Karney, 2016; Prasad, 2021).

در تحقیقی، ۵۰ شهر بزرگ دنیا بر اساس شاخص قابلیت پایداری شبکه توزیع آب دسته‌بندی شدند به شکلی که شبکه‌های توزیع آب برای تعیین روش نشت مورد استفاده، روش کالیبراسیون و درصد نشت‌های موجود، تجزیه و تحلیل گشتند. در پژوهش یاد شده شاخص‌های کارایی متفاوتی با استفاده از پایگاه داده مورد بررسی، پیشنهاد و ارزیابی شدند و به طور کلی، بر اهمیت مدیریت نشت و کارایی سیستم لوله‌کشی در بهبود شاخص‌های کارایی تأکید گردید. (Ahmadi et al., 2022; Safavi et al., 2016).

۳- روش تحقیق

۳-۱- محدوده مطالعات

شهرستان آبیک یکی از شهرستان‌های استان قزوین با وسعتی بالغ بر ۱۵۳۴ کیلومتر مربع در محدوده شرقی استان واقع شده و مرکز آن شهر آبیک است. این شهرستان دارای ۲ بخش بشاریات و مرکزی است که شامل ۲ شهر و ۵ دهستان و ۷۹ آبادی دارای سکنه است (شکل شماره ۱). شهر آبیک در شرقی‌ترین نقطه استان قزوین و در حد فاصل مرکز این استان و شهرستان کرج واقع شده است. فاصله این شهر از قزوین ۵۰ کیلومتر، از کرج ۴۵ کیلومتر و از تهران ۸۵ کیلومتر می‌باشد. شیب عمومی شهر آبیک از شمال شرقی به جنوب غربی است. بالاترین رقوم ارتفاعی، ۱۳۹۰ متر از سطح دریا در شمال شهر مربوط به شهرک صنعتی بوده و کمترین رقوم ارتفاعی، ۱۲۱۵ متر از سطح دریال و در بخش جنوبی شهر می‌باشد. براساس سرشماری جمعیت ۱۳۹۵، جمعیت شهرستان آبیک شامل ۲۹/۲۳۴ خانوار در برگیرنده ۹۴/۵۳۶ نفر شامل ۴۹/۱۲۹ نفر مرد و ۴۵/۴۰۷ نفر زن بوده است. بر همین اساس، جمعیت شهر آبیک ۶۰/۱۰۷ نفر با نرخ رشد ۱/۵٪ سالیانه

$P_i < P_{min}, P_i > P_{max}$: i عدم مطلوبیت در نقطه

$P_i \geq P_{min}, P_i \leq P_{max}$: i مطلوبیت در نقطه

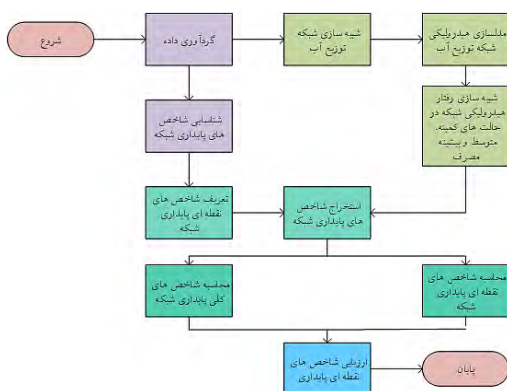
شاخص پایداری شبکه ترکیب وزنی قابلیت اطمینان، قابلیت انعطاف و میزان آسیب پذیری شبکه مورد تبعیت قرار گرفت و البته که این شاخص می‌تواند در طول زمان متغیر باشد. قابلیت اطمینان شبکه بر مبنای زمان مطلوبیت شبکه تعریف شده و عبارت است از احتمال وضعیت رضایت بخشی شبکه با استفاده از رابطه زیر (Boltz et al., 2019; Butler et al., 2017):

کل مدت زمان تحلیل شبکه / مدت زمان وضعیت مطلوب شبکه = REL

تاب آوری (قابلیت انعطاف)، سرعت بازگشت شبکه را پس از یک حادثه به حالت مطلوب را نشان می‌دهد و در رابطه کلی زیر تعریف شده است (Creaco & Haidar, 2019; Dziedzic & Karney, 2016):

وضعیت عام شبکه / عدم مطلوبیت وضعیت شبکه = RES
آسیب پذیری نشان دهنده مقدار یا زمان وضعیت غیر قابل قبول شبکه در بازه زمانی مشخص بر اساس رابطه زیر برای شبکه توزیع آب تعریف می‌شود (Alamanos, 2021; Huizar et al., 2011; Monsef et al., 2019):

کل مقادیر/مجموع مقادیر نامطلوب = VUL
منظور از مقادیر نامطلوب، هر نوع مؤلفه نامطلوب در هر سامانه‌ای می‌باشد که در ارتباط با شبکه توزیع آب موارد فشار و یا بده می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۳- روندنگار انجام پژوهش.

جنس لوله	قطر لوله (میلی متر)	طول لوله (متر)
DI	۲۰۰	۸۷۹۹
	۲۵۰	۲۴۰۴
	۳۰۰	۵۴
	۳۵۰	۸۸
	۴۰۰	۱۷۸۹
	۵۰۰	۱۰۶
ST	۶۰۰	۲۵۲۳
	۵۰۰	۲۳۴
	۶۰۰	۱۳۸



شکل ۲- شبکه توزیع آب شهر آبیک.

۲-۳- روند انجام پژوهش

در نخستین گام، مدل هیدرولیکی سامانه توزیع آب با استفاده از نرم افزار WaterGems پایه ریزی شد. در بخش شبیه سازی، جزئیات مرتبط با مدل هیدرولیکی سامانه، ارائه شده است. روابط مؤلفه مؤثر در شاخص پایداری شبکه پس از مرحله ارزیابی کمی و کیفی داده‌های گردآوری شده، مورد بازبینی قرار گرفتند. این مراحل با ذکر جزئیات در بخش شبیه سازی ارائه شده‌اند. مراحل اجرای پژوهش که در (شکل شماره ۳) نمایش داده شده‌اند.

برای این پژوهش شاخص پایداری بعنوان معیاری که نشان دهنده میزان رضایت بخشی عملکرد شبکه توزیع آب می‌باشد، در نظر گرفته شد. همانگونه که در سوابق پژوهش ارائه شده است، میزان رضایت بخشی یا مطلوبیت عملکرد شبکه با استفاده از یک تابع ریاضی از عدم رضایت بخشی متمایز می‌گردد (Ezzeldin & Djebdjan, 2020). در تطبیق با ضوابط نظام فنی و اجرایی کشور، در پژوهش حاضر، فشار مطلوب در شبکه بین ۲۶ متر تا ۶۰ متر فشار آب در نظر گرفته شده است.

شبه سازی شده و فشار سنجی انجام شده در شبکه انجام گرفت. در کنار آن عملکرد سیستم در شرایط بحرانی فشار (به دلیل برخی رویدادهای بحرانی مانند خرابی های مکانیکی و هیدرولیکی یا مازاد تقاضا) شبه سازی شد. از نرم افزار Water Gems برای شبه سازی عملکرد هیدرولیکی شبکه در شرایط ذکر شده، استفاده شد.

تحلیل مبتنی بر فشار در نرم افزار Water GEMS یک فرایند مهم برای بهبود عملکرد و بهینه سازی شبکه های توزیع آب است. این تحلیل قابلیت استفاده از الگوریتم های پیشرفته مانند PSO-PDA برای انجام بهینه سازی و تحلیل شبکه های آب استفاده می کند. در این فرآیند، ابتدا وضعیت فعلی شبکه شامل فشارها، دبی ها و جریانات مورد بررسی قرار می گیرد. سپس با استفاده از الگوریتم های پیشرفته، تغییرات فشار در سامانه در پاسخ به یکی یا ترکیبی از متغیرهای مختلف مانند تغییرات دما، نشتی و تقاضا بررسی می شود. از نتایج این تحلیل می توان برای برنامه ریزی به منظور بهینه سازی فشار، کنترل نشت، بهبود جریانات و کاهش خطاهای هیدرولیکی استفاده کرد. با استفاده از PDA، مدیران شبکه قادرند به صورت دقیق تغییرات در فشار و دبی را پیش بینی کنند و اقدامات مناسب برای بهینه سازی عملکرد شبکه را انجام دهند. برای تحلیل PDA، داده های مختلفی استفاده می شود که شامل ویژگی های شاخص پایداری برای ارزیابی عملکرد شبکه توزیع آب، نیز می باشد. این داده ها به منظور بررسی نتایج شاخص، حساسیت شاخص نسبت به تغییرات پارامترهای شبکه و زمان های تعمیرات از جمله مدت زمانهای حضور پرسنل فنی در محل و عیب یابی استفاده می شوند. این اطلاعات کمک می کنند تا عملکرد شبکه بهبود یابد و بهینه سازی مناسب بر روی فشار، کنترل نشت و بهبود جریانات صورت گیرد.

از آنجائیکه بر اساس داده های موجود، پیچیدگی های تحلیل و محدودیت زمان ارائه نتایج این پژوهش دانشگاهی، ارزیابی مبتنی بر فشار بصورت مستقیم از نرم افزار شبه سازی امکان پذیر نبود، بنابراین خروجی های مرتبط با فشار در گره های شبکه، جهت محاسبات ثانویه برای محاسبه

از آنجائی که رابطه بین شاخص پایداری و مؤلفه های آن (قابلیت اطمینان، قابلیت انعطافو میزان آسیب پذیری) در پژوهش های گذشته مورد تأیید قرار گرفته بود (Bakhtiari et al., 2016, Ghafoori et al., 2021; Zischg et al., 2017)

لذا در پژوهش حاضر نیز شاخص پایداری شبکه بر اساس رابطه زیر تعریف شد:

$$SI_i \equiv \frac{REL_{time}^i}{\partial RES^i} \partial \pm 0 VUL, \frac{1}{3} \quad (5)$$

متغیرهای موضوع این رابطه، در روابط قبل تعریف شده اند.

دامنه تغییرات شاخص پایداری شبکه (SI) از صفر به معنی عدم مطلوبیت توزیع آب و یک به معنی توزیع آب مطلوب به تمام نقاط شبکه در دامنه تعریف شده می باشد. ارزیابی وضعیت شبکه بر اساس رتبه شبکه در شاخص پایداری کل شبکه (رابطه شماره ۵) تعیین می گردد.

جدول ۲- ارزیابی وضعیت شبکه بر اساس شاخص تاب آوری.

وضعیت شبکه	SI مقدار شاخص
غیر قابل قبول	۰,۲۵-۰
متوسط	۰,۵-۰,۲۵
قابل قبول	۰,۷۵-۰,۵
عالی	۱-۰,۷۵

۳-۳- شبه سازی

شبه سازی هیدرولیکی شبکه های توزیع آب برای رسیدن به حد مطلوب توزیع مناسب مصارف سرانه به طور کلی با استفاده از مدل های DDM به عنوان تابعی از تقاضا در شرایط بهره برداری نرمال و پیاده سازی PDM به عنوان راهکار برای مدیریت تقاضا و مصرف بر اساس توزیع مناسب فشار و همچنین در شرایط بهره برداری تحت مخاطراتی مانند حادثه، نشت و یا نقص، مورد ارزیابی قرار می گیرند (Butler et al., 2017; Cassiolato et al., 2021).

بنابراین، فرض مصرف گرهی ثابت (DDM) رویکردهای تنها در شرایط عادی زمانی معتبر است که فشارها برای برآوردن تقاضای تعیین شده کافی باشد. شبه سازی شبکه توزیع محدوده پژوهش به روش مبتنی بر فشار انجام گرفته و واسنجی آن نیز بر اساس همسان کردن فشار

مصرف، متناظر حالت‌های اصلی فشار به ترتیب بیشینه، متوسط و کمینه در شبکه نیز بودند.

روابط مؤلفه‌های مؤثر در شاخص پایداری شبکه در فرآیند هم‌سان سازی مطالعات با سوابق پژوهشی، شاخص‌های آسیب‌پذیری، سازگاری و قابلیت اطمینان برای شبکه موجود در سه حالت مصرف کمینه، متوسط و بیشینه استخراج شدند. به منظور حصول به هدف پژوهش و در یک نوآوری، رابطه شاخص پایداری شبکه برای تمامی نقاط (گره‌های) شبکه، بازتعریف، مؤلفه بندی و محاسبه شد. در مرحله پایانی شاخص‌های نقطه‌ای همگام با شاخص پایداری کل شبکه مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفتند.

۴-۳- شاخص پایداری شبکه

در شبکه توزیع آب مورد پژوهش و به عنوان سری دوم خروجی‌های مدل شبیه سازی هیدرولیکی، پارامترهای لازم برای استخراج تاب‌آوری شبکه، پارامترهای فشار در هر گره در زمان آبدهی و آبرسانی (h_i) برحسب متر ستون آب و میزان آبدهی هر گره (Q_i) برحسب لیتر بر ثانیه، از خروجی مدل برای هر گره استخراج و حسب ضوابط نظام فنی و اجرایی حداقل فشار لازم ۲۶ متر ستون آب، تعیین و در محاسبات مورد استفاده قرار گرفت. روابط استخراج شاخص‌های قابلیت اطمینان، قابلیت انعطاف و میزان آسیب‌پذیری بر اساس روابط مندرج در بخش (۲-۲)، به منظور استخراج شرایط نقطه‌ای در شبکه مورد پژوهش، بازنگری و متناسب سازی شدند (روابط شماره ۶، ۷ و ۸). توضیح اینکه این روابط برای نخستین بار در یک پژوهش کاربردی برای محاسبه و ارزیابی وضعیت کارکرد نقطه‌ای در شبکه توزیع آب، ارائه و مورد استفاده قرار می‌گیرند. در استخراج شاخص پایداری نقطه‌ای در شبکه، بر اساس تغییرات هیدرولیکی ۲۴ ساعته، شبیه‌سازی شبکه توزیع آب مورد پژوهش برای هر گره، فشارهای هر گره در بازه زمانی یاد شده، استخراج و در هر ساعت تعداد گره‌های دارای شرایط فشاری مطلوب (بیشتر از ۲۶ و کمتر از ۶۰ مترستون آب) در مقایسه با گره‌های خارج از حد مطلوب فشاری، شمرده شدند. نسبت تعداد کل گره‌های دارای شرایط فشاری مطلوب به

مؤلفه‌های پایداری و ارزیابی نتایج حاصله، خارج از نرم افزار Water Gems و با استفاده از روابط ارائه شده در بخش (۲-۴)

(۴) این نوشتار، صورت گرفت. توضیح اینکه ارزیابی خصوصیات کیفی آب توزیعی در شبکه، با توجه به اهداف پژوهش و محدودیت‌های زمان آن در این مراحل مورد توجه نبوده ولیکن به دلیل اهمیت شرایط کیفی آب با شرایط هیدرولیکی، برای پژوهش‌های آتی میتواند مورد توجه باشد.

با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از مراجع ذیربط ابتدا فیزیک شبکه توزیع در مدل هیدرولیکی ساخته شد. در این مرحله اطلاعات قطر و جنس لوله‌ها، محل شیرهای فشارهای شکن، خروجی تنظیمی آنها، شیرهای حدی بین مخازن و بین زونهای فشاری، موقعیت مخازن و ... به مدل وارد گردید. پس از رفع مشکلات مدل از قبیل عدم اتصال برخی از نقاط به منبع تأمین، شبیه‌سازی فیزیکی در مدل تکمیل شد. سپس رقوم ارتفاعی به گره‌های موجود در مدل هیدرولیکی، با استفاده از نقشه‌های رقومی تهیه شده از سازمان نقشه برداری، اختصاص یافت. پس از آن میزان مصرف برای هر گره با استفاده از اطلاعات کنتورهای مصرف مشترکین (دریافت شده از آب و فاضلاب منطقه مورد نظر) اختصاص داده شد. الگوی مصرف مشترکین با توجه به الگوی خروجی مخزن و ضریب حداکثر روزانه و ساعتی نیز بر اساس آنالیز دبی خروجی محاسبه و به گره‌های مربوط به هر مخزن اختصاص داده شد.

برای تعیین و ارزیابی کارایی شبکه و از داده‌های فیزیکی، هیدرولیکی و بهره‌برداری شبکه توزیع آب مورد نظر، موجود در شرکت آب و فاضلاب استان قزوین استفاده گردید. همچنین داده‌های یاد شده در طول ۵ سال اخیر بهره‌برداری (۱۴۰۰-۱۳۹۶) از زیرساخت‌های مربوطه مورد بررسی قرار گرفت. روند مصارف آب مورد بررسی قرار گرفت و نمودار مصرف ۲۴ ساعته برای روزهای کمینه، متوسط و بیشینه مصرف استخراج شد. واسنجی مدل نیز بر اساس داده‌های فشار سنجی انجام گرفت. شبیه‌سازی رفتار فشار شبکه برای هر ۳ حالت مصرف، صورت گرفت. همین ۳ حالت

$$\begin{aligned}
 IFh_i < 26, RELp &\equiv h_i / 26, \\
 IFh_i > 50, RELp &\equiv 50 / h_i, \\
 IFh_i / +50 \cdot 26, / 26, &\approx 1; RELp \equiv +50 \cdot 26, / 2, h_i,
 \end{aligned}
 \quad (8)$$

در (رابطه شماره ۸)، RELp نشاندهنده فشار نقطه‌ای به نسبت محدوده مطلوب فشاری است. این شاخص لازم است بگونه‌ای استخراج شود که برای تمامی گره‌های (به اصطلاح) کم فشار، فشار مناسب و پر فشار در مقایسه با حدود مطلوب فشار، در محدوده ۰-۱ باشد. در این بازه حدهای صفر و یک، بترتیب نشاندهنده کمترین بیشترین میزان اطمینان به کارکرد مطلوب شبکه هستند. با توجه به اینکه فشارهای نقطه‌ای شبکه در مقایسه با حدود فشار مطلوب در بازه‌های کمتر از ۲۶ متر ستون آب، کمتر از ۵۰ متر ستون آب و بیش از آن، قرار دارند، بنابراین، RELp بگونه‌ای تعریف شد که برای هر فشارهای نقطه‌ای در مقایسه با نزدیکترین حد مطلوب (۵۰-۲۵ متر ستون آب) بتواند در بازه تعریف شده برای اطمینان از کارکرد شبکه (۰-۱)، قرار گیرد.

شاخص آسیب پذیری، نسبت بین تعداد کل گره‌های دارای فشار کم (کمتر از ۲۶ متر ستون آب) به تعداد کل گره‌ها، تعریف شده بود. متناسب با شاخص یاد شده، شاخص نقطه‌ای آسیب پذیری VULp، نسبت فشار در گره‌های کم فشار به حد پایین و بالای فشار مطلوب (بترتیب ۲۶ و ۵۰ متر ستون آب) به شرح زیر تعریف و برای تمام گره‌های مصرف، محاسبه شد.

$$IFh_i < 26; IFh_i > 50; VULp \equiv h_i / 26; VULp \equiv 260 h_i / 26 \quad (9)$$

قابل ذکر اینکه شاخص پایداری نقطه‌ای شبکه بر اساس رابطه ۵ و با استفاده از شاخص‌های نقطه‌ای تاب آوری، میزان اطمینان و آسیب پذیری هر نقطه، محاسبه شد.

۴- بحث و یافته‌های پژوهش

۴-۱- پهنه بندی فشاری شبکه توزیع

در این مرحله رفتار هیدرولیکی گره‌های شبکه توزیع آب شرب محدوده در مدل سازی و تطابق آن با رفتار هیدرولیکی متناظر در مناطق مختلف تحت پوشش شبکه مورد بررسی

تعداد کل گره‌ها در تغییرات ۲۴ ساعته جریان آب در شبکه، بعنوان شاخص حد اطمینان شبکه برای رساندن آب با فشار مطلوب به مشترکین، محاسبه گردید. شاخص آسیب پذیری شبکه پس از محاسبه تعداد گره‌های دارای فشار پایین (کمتر از ۲۶ متر ستون آب) در خروجی مدل شبیه‌سازی شده شبکه و نسبت آنها به تعداد کل گره‌ها، استخراج گردید.

تعداد گره‌های دارای شرایط فشاری مطلوب / تعداد گره‌های خارج از حد مطلوب فشاری = RES (6)

در گام آخر شاخص پایداری شبکه بعنوان برآیند ریاضی، مؤلفه‌های تاب آوری، اطمینان و آسیب پذیری، با استفاده از (رابطه شماره ۵) محاسبه گردید.

۵-۳- شاخص تاب آوری نقطه‌ای برای شبکه

شاخص تاب آوری شبکه، نسبت مجموع دبی در تفاضل فشار نقطه‌ای از حداقل فشار لازم در شبکه به مجموع دبی در حداقل فشار لازم در شبکه تعریف شده بود؛ بنابراین، وضعیت تاب آوری RESp نقطه‌ای در هر گره از شبکه، به صورت زیر تعریف شد:

$$\begin{aligned}
 IF q_i^{req} h_{min} > 0, RESp &\equiv 0, \\
 IF q_i^{req} h_{min} < 0, RESp &\equiv 1, \\
 IF q_i^{req} h_{min} < 0, RESp &\equiv ABS(q_i^{req} h_{min} / q_i^{req} h_{min})
 \end{aligned}
 \quad (7)$$

در (رابطه شماره ۷)، q_i^{req} نشان دهنده میزان مصرف مجاز برابر با تقاضای تأیید شده مشترک (دبی اشتراک) و $q_i^{req} h_{min}$ برای نشان دادن نیروی مازاد بدون بعد در گره‌های مصرف است. شاخص میزان اطمینان، نسبت بین تعداد کل گره‌های دارای فشار مطلوب (محدوده ۲۶ تا ۵۰ متر ستون آب) به تعداد کل گره‌ها در شبیه‌سازی ۲۴ ساعته کارکرد شبکه در بازه‌های ۱ ساعته، تعریف شده بود. در تناسب با شاخص یاد شده، شاخص نقطه‌ای میزان اطمینان RELp، نسبت فشار هر گره مصرف، به حد بالا و یا پایین فشار مطلوب (بترتیب ۲۶ و ۵۰ متر ستون آب) به شرح زیر تعریف و برای تمام گره‌های مصرف، محاسبه شد:

قرار گرفت. مدل هیدرولیکی شبکه برای روزهای پیشینه، متوسط و کمینه مصرف بصورت دینامیکی شبیه‌سازی شد و سپس مؤلفه‌های مورد نظر هیدرولیکی (بده و فشار) شبکه مورد پردازش قرار گرفتند. برای امکان تفکیک پهنه فشار شبکه توزیع شبیه‌سازی شده در شرایط پیشینه، متوسط و کمینه مصرف ساعتی، خروجی توزیع فشار به تفکیک محدوده‌های زیر، نمایش داده شده است:

- محدوده کم فشار در شبکه برای نقاطی با فشار کمتر از ۲۶ مترستون آب با رنگ نارنجی
- محدوده فشار نرمال شبکه برای نقاطی با فشار بین ۲۶ الی ۴۰ مترستون آب با رنگ آبی
- محدوده در آستانه فشار بالا برای نقاطی با فشار بین ۴۰ الی ۵۰ مترستون آب با رنگ سبز
- محدوده پرفشار شبکه برای نقاطی با فشار بیش از ۵۰ مترستون آب با رنگ بنفش

شبکه‌های توزیع آب شرب غالباً برای پاسخگویی به گزینه‌های توأمان پیک مصارف و تأمین فشار در محدوده مجاز طراحی، اجرا، بازسازی و اصلاح می‌شوند؛ بنابراین هر گونه کارکرد مناسب و قابل قبول شبکه، در هر سناریویی (از قبیل تغییرات مصرف، مخاطرات و حوادث) در بازه گزینه‌های توأمان یاد شده، تعریف می‌شود. با توجه به رابطه کلی و معکوس مصرف و فشار در شبکه‌های توزیع آب، کارکرد مطلوب شبکه لازم است در حداکثر مصرف متناظر با حداقل فشار نیز حاصل شود. بر اساس همین قاعده کلی، بروز نشت بر اثر مخاطرات، حوادث و یا فرسودگی در شرایط حداقل مصرف متناظر با بیشترین فشار در شبکه بیشترین احتمال وقوع را دارد. همین عامل بنوعی مؤلفه‌های مرتبط با شاخص پایداری در شبکه را نیز در محاسبه و پیش‌بینی تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در بررسی فشارهای متناظر با نقاط و مقایسه با محدوده‌های فشاری تعریف شده، نشان می‌دهند که نزدیک به ۹۲٪ از گره‌های مصرف در شبکه توزیع در شرایط حداکثر مصرف (کمترین فشار هیدرولیکی آب در شبکه توزیع)،

فشار مناسب در دامنه ۲۶ تا ۶۰ مترستون آب را داشته‌اند و نگاهی به توزیع داخلی این دامنه قابل قبول فشاری نشان می‌دهد که دامنه فشاری مابین ۲۶ تا ۵۰ مترستون آب که بیشترین اثر مثبت را در مدیریت مصرف آب دارد با یک برتری قابل توجه دارای بیشتری توزیع فشاری در گره‌های مصرف بوده است.

(شکل شماره ۴ الف)، نشان می‌دهد که بخش بیشتر

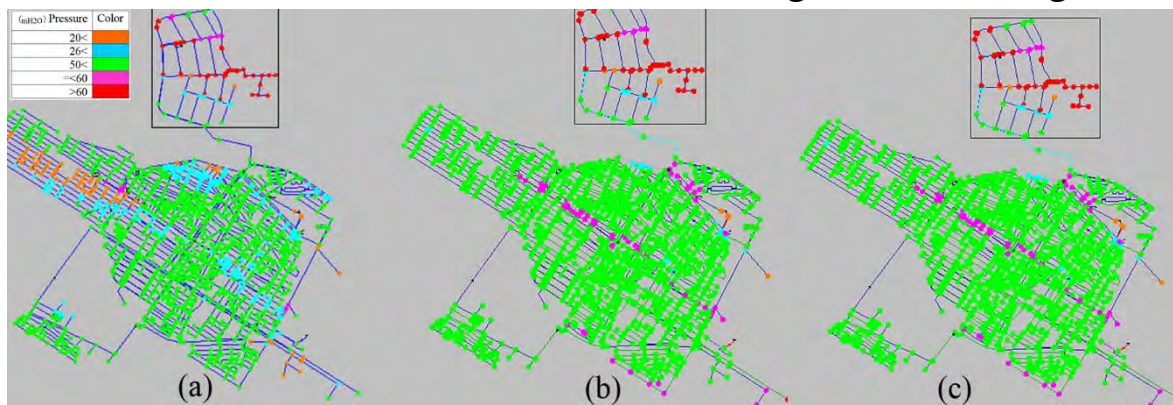
شبکه شامل محدوده‌های میانی، از غرب تا شرق و جنوب شبکه دارای توزیع مناسب فشاری بوده است اما بخش شمال غربی شبکه نیازمند بهبود فشار با اجرای برنامه‌های مدیریت مصرف و اصلاح شبکه است.

از پهنه بندی توزیع فشاری در شرایط متوسط مصرف ساعتی (شکل شماره ۴ ب)، استنباط می‌شود که نزدیک به ۸۹٪ از گره‌های مصرف در شبکه توزیع در شرایط متوسط مصرف ساعتی (متناظر با کمترین فشار هیدرولیکی آب در شبکه توزیع)، فشار مناسب در دامنه ۲۶ تا ۶۰ مترستون آب را داشته‌اند و نگاهی به توزیع داخلی این دامنه قابل قبول فشاری نشان می‌دهد که دامنه فشاری مابین ۲۶ تا ۵۰ مترستون آب که بیشترین اثر مثبت را در مدیریت مصرف آب دارد، با یک برتری نسبی توجه دارای بیشتری توزیع فشاری در گره‌های مصرف بوده است. در عین حال بخش بیشتر شبکه شامل محدوده‌های میانی، از غرب تا شرق و جنوب شبکه دارای توزیع مناسب فشاری بوده است اما بخش شمال غربی شبکه همچنان نیازمند بهبود فشار با اجرای برنامه‌های مدیریت مصرف و اصلاح شبکه است.

در نهایت توزیع فشار در شرایط کمینه مصرف، متناظر با حد بالای فشار در شبکه (شکل شماره ۴ ج)، نزدیک به ۹۶٪ از گره‌های مصرف دارای فشار مناسب در دامنه ۲۶ تا ۶۰ مترستون آب بوده‌اند و نگاهی به توزیع داخلی قابل قبول فشاری نشان می‌دهد که دامنه فشاری مابین ۲۶ تا ۵۰ مترستون آب، با یک برتری قابل توجه (۸۹٪ از کل شبکه) دارای بیشتری توزیع فشاری مناسب در گره‌های مصرف بوده است.

پژوهش ارائه شده در **شکل ۴ ج**، نشان می‌دهد که بخش بسیار محدود و کمی از شبکه شامل بخشی کوچکی از محدوده میانی شبکه دارای توزیع مناسب فشاری نبوده است.

این اعداد به نسبت شرایط هیدرولیکی شبکه در زمانهای پیشینه و متوسط مصارف در گره‌ها، شرایط بسیار مطلوبی را از نظر توزیع فشار و مصرف نشان می‌دهند. تفکیک رنگ دامنه‌ها برای توزیع مناسب فشار در شبکه توزیع آب محدوده

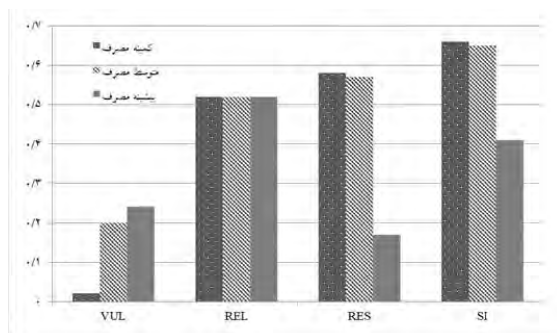


شکل ۴- وضعیت فشار در شبکه: الف- حداکثر مصرف ساعتی، ب- متوسط مصرف ساعتی و ج- کمینه مصرف ساعتی.

۴-۲- پایداری شبکه

هم چنین شاخص میزان اطمینان نقطه‌ای نیز در محدوده صفر تا ۱/۰ قرار می‌گیرد. عدد ۱ به منزله اطمینان کامل نقطه‌ای نسبت به آبرسانی در دبی و فشار مطلوب و عدد صفر نشان دهنده پایین‌ترین حد اطمینان است که مفهوم انتزاعی داشته و با توجه به اینکه این شاخص با ۲ رقم اعشار مورد محاسبه قرار گرفته است، بنابراین در فرآیند ارزیابی، RELp کوچک‌تر از ۰/۰۱ با عدد صفر نمایش داده شدند. از طرفی شاخص نقطه‌ای آسیب‌پذیری برای تمام نقاط نیز همانند دو شاخص قبلی گفته شده، در محدوده صفر تا ۱/۰ قرار می‌گیرد. عدد ۱ آسیب‌پذیری کامل نقطه‌ای نسبت به آبرسانی در دبی و فشار مطلوب و حد صفر نشان دهنده حد پایین (ایمنی کامل) این شاخص نقطه‌ای است که مفهوم انتزاعی دارد.

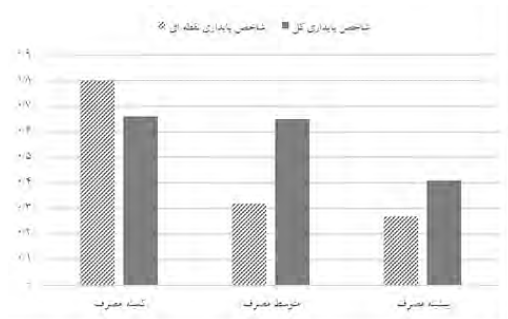
در **(شکل شماره ۵)** شاخص پایداری شبکه در ۳ حالت کمینه، متوسط و پیشینه مصرف ارائه شده‌اند. مقایسه شاخص پایداری شبکه در حالات کمینه، متوسط و پیشینه مصرف نشان می‌دهد که شبکه در حالت‌های کمینه و متوسط مصرف رفتار هیدرولیکی نسبتاً مشابهی را از خود نشان داده است. در حالیکه ورود به فاز پیشینه مصرف نشان دهنده افزایش آسیب‌پذیری و کاهش قابل توجه اطمینان در رفتار هیدرولیکی مطلوب شبکه است؛ بنابراین هر گونه برنامه اصلاحی می‌تواند بر اساس توجه مدیریت بهره‌برداری به محدوده‌هایی از شبکه که به ترتیب دچار افت فشار و یا تغییرات فشار بیش از حد مطلوب، در خروجی مدل در حالت پیشینه باشد.



شکل ۵- نمودار شاخص‌های شبکه در حالات مختلف مصرف.

شاخص تاب‌آوری نقطه‌ای در بازه صفر تا ۱/۰ قرار می‌گیرد. عدد ۱ نشان دهنده تاب‌آوری کامل نقطه‌ای نسبت به تغییرات فشار و دبی و صفر نشان دهنده حد پایین این شاخص نقطه‌ای است که مفهوم انتزاعی دارد، در عین حال با توجه به ماهیت نقطه‌ای محاسبات برای این شاخص، برای نقاطی از شبکه که RESp محاسبه شده بیش از ۱/۰ بوده است، حد پیشینه این شاخص یعنی همان عدد ۱/۰ منظور شده است.

در محدوده پایداری نسبی قرار گرفته‌اند و جزئی (قابل صرفنظری) از گره‌های شبکه در محدوده ناپایدار قرار گرفته‌اند.



شکل ۶- نمودار مقایسه شاخص‌های پایداری نقطه‌ای.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

بررسی سوابق پژوهش‌های گذشته نشان داد که معیار پایداری شبکه برای مقایسه و ارزیابی عملکرد شبکه در دوره‌های زمانی (روزانه، ماهیانه، فصلی و سالیانه) و مقایسه عملکرد شبکه‌های همگون در محیط‌های جغرافیایی به منظور ارزیابی عملکرد شبکه، مورد استفاده است. بر همین اساس برای امکان هر گونه تحلیل منطقه‌ای از شبکه، طراحی و پیشنهاد یک شاخص که بتواند وضعیت رضایت مندی هر مصرف کننده در شبکه را به درستی شبیه‌سازی نماید، ضروری است. به همین منظور و با استفاده از روابط معتبری که برای شاخص‌های ۳ گانه و ارتباط این شاخص‌ها برای محاسبه شاخص پایداری مورد استفاده قرار گرفته‌اند، شاخص‌های نقطه‌ای تاب‌آوری، میزان اطمینان و آسیب پذیری، تعریف شدند.

این شاخص‌ها برای هر ۳ حالت کمینه، متوسط و بیشینه مصرف، با استفاده از آمار پایه و خروجی مدل هیدرولیکی شبکه، استخراج شده و مورد تحلیل قرار گرفتند. در یک روند شبیه‌سازی، پهنه فشاری و توزیع دبی در گره‌های مصرف شبکه، برای هر سه حالت گفته شده با نرم افزار Water Gems مبتنی بر فشار در ارتباط با رفتار مصرف، شبیه سازی شد. سپس فرآیند استخراج شاخص کلی پایداری و شاخص‌های نقطه‌ای پایداری برای هر کدام از حالت‌ها، بر اساس محاسبه مؤلفه‌های قابلیت اطمینان، قابلیت انعطاف و

شاخص نقطه‌ای پایداری مطابق فرمول شاخص پایداری، ماحصل ترکیب شاخص‌های نقطه‌ای تاب‌آوری، میزان اطمینان و آسیب پذیری برای کلیه نقاط شبکه استخراج شد؛ بنابراین برای درک وضعیت شبکه توزیع آب محدوده پژوهش در شرایط نامطلوب، حدود بالا، متوسط و پایین شاخص‌های نقطه‌ای پایداری در شبکه برای حالات کمینه، متوسط و بیشینه مصرف، محاسبه شدند (جدول شماره ۳). استخراج شاخص‌های ۳ گانه فوق برای کل شبکه نشان داد که بحرانی‌ترین حالت (کمترین میزان شاخص‌های مطلوب) در حالت بیشینه مصرف اتفاق می‌افتاده بود، در حالت‌های مصرف ۳ گانه نیز شاخص‌های نقطه‌ای پایداری از همین روند تبعیت کرده‌اند و وسیع‌ترین دامنه حدود پایین و متوسط پایداری نقاط را می‌توان در حالت بیشینه مصرف مشاهده نمود.

در فرآیند دیگری و در تناسب با پهنه بندی توزیع فشاری در شبکه، توزیع شاخص نقطه‌ای پایداری در بازه‌های ۰/۴۳-۰/۸۳، ۰/۸۳-۰/۴۳ و ۰/۴۳-۰/۸۳ گروه بندی شدند. بر همین اساس، در یک روند از کمینه فشار تا بیشینه فشار (متناظر با بیشینه مصرف تا کمینه مصرف) در شبکه شاخص پایداری نقطه‌ای روند افزایشی داشته بطوریکه متوسط آن از ۰/۲۸ به ۰/۸ به یک افزایش یافته است.

جدول ۳- حدود بیشینه و کمینه شاخص SIp برای نقاط شبکه در حالات مختلف مصرف.

	مصرف	کمینه	متوسط	بیشینه
SI		۰/۶۶	۰/۶۵	۰/۴۱
SIp	حد پایین	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۰۰
SIp	متوسط	۰/۸	۰/۳۲	۰/۲۷
SIp	حد بالا	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰

شاخص‌های پایداری کل و نقطه‌ای شبکه برای ۳ حالت کمینه، متوسط و بیشینه مصرف در یک نمودار ترسیم شدند (شکل شماره ۶). مقایسه توزیع شاخص‌های پایداری نقطه‌ای نشان داد که بیش از نصف گره‌های شبکه بصورت نسبی در حالت پایدار وجود دارند و متوسط شاخص پایداری نقطه‌ای در این حالت، از طرفی بخش قابل توجهی از گره‌های شبکه

به منظور بهبود ارزیابی عملکرد و توزیع وضعیت پایداری آن، در سناریوهای مختلف مصرف (متناسب با فشار) روش محاسبه شاخص پایداری نقطه‌ای طراحی و پیشنهاد شد. سناریوهای یاد شده بر روی یک مدل دینامیک سیستم از شبکه آب اعمال و سپس ارزیابی شاخص‌های پایداری نقطه‌ای سامانه انجام شد. این روش باعث بهترین استفاده ممکن از داده‌های مشاهداتی و محاسباتی و به دست آوردن دقیق‌تر وضعیت توزیع پایداری در محدوده‌های خاص شبکه توزیع آب گردید.

نتایج نشان داد که این روش می‌تواند پایش توزیع پایداری و شاخص‌های زیر مجموعه آن در سامانه را در شرایط بهره‌وری و نیز ارزیابی عملکرد قبل از اجرای برنامه‌های اصلاح، بازسازی و توسعه را در سطح شبکه توزیع ارتقاء دهد. به منظور ادامه و تدقیق بیشتر نتایج حاصل از این پژوهش پیشنهاد می‌شود در کنار تحلیل نتایج مطابق با ۳ حالت اصلی مصرف، متناظر بازه‌های دهی فشار آب که مبنای تقسیم بندی حدود قابل قبول شرایط فشار در شبکه را تشکیل می‌دهند، شاخص پایداری کلی و نقطه‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از کلیه پژوهشگرانی که امکان استناد به نتایج کاربردی پژوهش‌های آن‌ها به واسطه انتشار نتایج یاد شده، در این نوشتار فراهم شده است، تقدیر و تشکر می‌نمایند.

۶- منابع

- ≠ Ahmadi, N. A., Moradi, E., Hoseini, S. M., & Shahraki, A. S. (2022). Simulation of the dynamics of water resources in the Hirmand watershed under economic and environmental scenarios. *Environment, Development and Sustainability*, 27, 15091-15117.

<https://doi.org/10.1007/s10668-022-02713-9>

- ≠ Alamanos, A. (2021). Sustainable water resources management under water-scarce and limited-data conditions. *Central Asian Journal of Water Research*, 7(2), 1-19.

میزان آسیب پذیری شبکه، انجام شد. به منظور امکان‌پذیری ارزیابی شاخص پایداری کلی و نقطه‌ای، متوسط شاخص‌های پایداری نقطه‌ای در ۳ حالت مصرف (متناظر با فشار) با شاخص پایداری کلی در همان حالات مقایسه شدند. بر اساس معیار ارزیابی، شاخص پایداری شبکه هم در کمینه و هم در بیشینه مصرف حد بالای متوسط (قابل قبول) بود و در روند تغییرات مصرف از کمینه به بیشینه مصرف، شاخص پایداری شبکه کاهش یافته بود. شاخص‌های نقطه‌ای شبکه نیز تعریف و استخراج شدند. نتایج نشان داد که در حالت بیشینه مصرف، توزیع پایداری نقطه‌ای در شبکه در مقادیر کمتری نسبت به سایر حالات مصرف را داشت به شکلی که روند تغییرات شاخص کل پایداری شبکه با کاهش فشار از ۰/۶۶ به ۰/۴۱ کاهش یافته بود. در همین حالت و همزمان، متوسط شاخص نقطه‌ای شبکه از ۰/۸ به ۰/۲۷ کاهش یافته بود؛ بنابراین مقایسه شاخص‌های پایداری کلی و نقطه‌ای شبکه، نشان می‌دهد که میزان و توزیع شاخص پایداری نقاط شبکه با افزایش مصرف (کاهش فشار) نسبت به شاخص پایداری کلی در همین شرایط، کاهش بیشتری را داشته است. از کمینه مصرف به بیشینه مصرف، توزیع شاخص پایداری نقاط شبکه نشان دهنده کاهش آن بود. در نتیجه در مقایسه با شاخص کل پایداری شبکه، شاخص پایداری نقطه‌ای در حالت بیشینه مصرف می‌تواند معرف بهتری برای گره‌های مصرف شبکه باشد.

این عامل، نشان‌دهنده لزوم توجه بیشتر به وزن شاخص پایداری نقطه‌ای به عنوان شاخص ویژه در اقدامات مدیریت فشار برای مصرف و طرح‌های اصلاح و بازسازی شبکه است؛ بنابراین هر گونه اعمال برنامه‌های بهبود، اصلاح و بازسازی شبکه می‌تواند در شبیه‌سازی این عملیات بر مبنای شاخص پایداری نقطه‌ای آن قبل از اجرا مورد ارزیابی قرار گیرد. در عین حال بررسی و تحلیل نتایج نشان‌دهنده همگرایی شاخص پایداری کلی شبکه با شاخص پایداری نقطه‌ای بوده بطوریکه طراحی برنامه‌های اصلاحی بر مبنای شاخص پایداری نقاط سبب بهبود شاخص پایداری کلی شبکه نیز خواهد شد.

- networks under multiple loading conditions. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(1), 14.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000564](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000564)
- ≠ Enteshari, S., Safavi, H. R., & van der Zaag, P. (2020). Simulating the interactions between the water and the socio-economic system in a stressed endorheic basin. *Hydrological Sciences Journal*, 65(13), 2159-2174.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1802027>
- ≠ Ezzeldin, R. M., & Djebedjian, B. (2020). Optimal design of water distribution networks using whale optimization algorithm. *Urban Water Journal*, 17(1), 14-22.
<https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1734635>
- ≠ Ghafoori, S., Hassanpour Darvishi, H., Mohamadvali Samani, H., & Taherei Ghazvinei, P. (2021). Enhancing the method of decentralized multi-purpose reuse of wastewater in urban area. *Sustainability*, 13(24), 13553.
<https://doi.org/10.3390/su132413553>
- ≠ Ghanooni, H. (2021). Introducing the four approaches to sustainable development and proposing a suitable scenario for the current conditions in Iran. *Sustainable Urban Development*, 2(5), 65-71.
<https://doi.org/10.22034/usd.2021.696819>
- ≠ Golabchi, M., & SamaniMajd, A. M. (2021). Study on Environmental Sustainable Development Indices Based on Project Management PMBOK Standards (Case Study: Esfahan City) *Urban Sustainable Development Journal*, 2(2), 1-10.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27170128.140.0.2.2.1.4>
- ≠ Huizar, J., Luis, H., Kang, D., & Lansey, K. (2011). A decision support system for sustainable urban water supply. *World Environmental and Water Resources Congress: Bearing Knowledge for Sustainability*, Palm Springs, CA, United States.
[doi:10.29258/CAJWR/2021-R1.v7-2/1-19.eng](https://doi.org/10.29258/CAJWR/2021-R1.v7-2/1-19.eng)
- ≠ Bakhtiari, S., Safavi, H., & GolMohammadi, M.H. (2016). Analysis and evaluation of the performance of water distribution networks using performance criteria and deterministic and fuzzy stability index (In Persian). *Water and Wastewater Science and Engineering*, 1(1), 28-36.
<https://doi.org/10.22112/jwwse.2017.51051>
- ≠ Boltz, F., Poff, N. L., Folke, C., Kete, N., Brown, C. M., Freeman, S. S. G., Rockström, J. (2019). Water is a master variable: Solving for resilience in the modern era. *Water Security*, 8, 100048.
<https://doi.org/10.1016/j.wasec.2019.100048>
- ≠ Borzì, I., Bonaccorso, B., & Aronica, G. T. (2018). Performance Analysis of the Water Distribution System of the City of Messina through Sustainability Indices. *Proceedings of the 13th International Conference on Hydroinformatics*, Palermo.
<https://www.iahr.org/library/infor?pid=17834>
- ≠ Butler, D., Ward, S., Sweetapple, C., Astaraie-Imani, M., Diao, K., Farmani, R., & Fu, G. (2017). Reliable, resilient, and sustainable water management: the Safe & SuRe approach. *Global Challenges*, 1(1), 63-77.
<https://doi.org/10.1002/gch2.1010>
- ≠ Cassiolato, G., Carvalho, E. P., Caballero, J. A., & Ravagnani, M. A. (2021). Optimization of water distribution networks using a deterministic approach. *Engineering Optimization*, 53(1), 107-124.
<https://doi.org/10.1080/0305215X.2019.1702980>
- ≠ Creaco, E., & Haidar, H. (2019). Multiobjective optimization of control valve installation and DMA creation for reducing leakage in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(10).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001114](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001114)
- ≠ Dziedzic, R., & Karney, B. W. (2016). Performance index for water distribution

analysis for integrated water resources planning and management under uncertainty in the Zayandehrud river basin. *Journal of hydrology*, 539, 625-639.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.073>

- ≠ Sanz Estapé, G. (2016). Demand modeling for water networks calibration and leak localization (Tesi doctoral). UPC, Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials.

<http://dx.doi.org/10.5821/dissertation-2117-96319>

- ≠ Sanz, G., & Pérez, R. (2015). Sensitivity analysis for sampling design and demand calibration in water distribution networks using the singular value decomposition. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(10), 12.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000535](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000535)

- ≠ Vitan, E., Hotupan, A., & Hadarean, A. (2021). Average Operating Pressure Effect on Water Supply Systems Performances. A Case Study for 12 Romanian Small Water Distribution Networks. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 11(2), 143-150.

<https://doi.org/10.2478/jaes-2021-0019>

- ≠ Zischg, J., Mair, M., Rauch, W., & Sitzenfrie, R. (2017). Enabling efficient and sustainable transitions of water distribution systems under network structure uncertainty. *Water*, 9(9), 715.

<https://doi.org/10.3390/w9090715>

[https://doi.org/10.1061/41173\(414\)339](https://doi.org/10.1061/41173(414)339)

- ≠ Kuma, T., & Abate, B. (2021). Evaluation of hydraulic performance of water distribution system for sustainable management. *Water Resources Management*, 35(15), 14.

<http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-540541/v1>

- ≠ Macías Ávila, C. A., Sánchez-Romero, F.-J., López Jiménez, P. A., & Pérez-Sánchez, M. (2021). Leakage Management and Pipe System Efficiency. Its Influence in the Improvement of the Efficiency Indexes. *Water*, 13(14), 25.

- ≠ Marques, J., & Cunha, M. (2020). Upgrading water distribution networks to work under uncertain conditions. *Water Supply*, 20(3), 878-888.

<https://doi.org/10.2166/ws.2020.011>

- ≠ Monsef, H., Naghashzadegan, M., Farmani, R., & Jamali, A. (2019). Deficiency of reliability indicators in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(6), 04019022.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001053](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001053)

- ≠ Paez, D., & Filion, Y. (2017). Use of network theory and reliability indexes for the validation of synthetic water distribution systems case studies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 24, 2-7.

<https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.12.002>

- ≠ Prasad, R. K. (2021). Identification of Critical Pipes for Water Distribution Network Rehabilitation. *Water Resources Management*, 35(15), 5187-5204

<https://doi.org/10.1007/s11269-021-02994-1>

- ≠ Safavi, H. R., Golmohammadi, M. H., & Sandoval-Solis, S. (2016). Scenario

نحوه ارجاع به مقاله:

بیرانوندی، داراب، حسن پور درویشی، حسین، و ابراهیمی، حسین. (۱۴۰۴). توسعه روش ارزیابی پایداری شبکه آب شهری با نوآفرینی شاخص نقطه‌ای پایداری - مطالعه موردی آبیگ. توسعه پایدار شهری، ۶(۱۹)، ۵۱-۶۶.



DOI: <https://doi.org/10.22034/usd.2024.2017016.1165>



DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27170128.1404.6.19.4.9>

URL: https://usdjournal.daneshpajooohan.ac.ir/article_725062.html?lang=fa



Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Daneshpajooohan Pishro Higher Education Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

