



Multi-Objective Optimization of Pressure-Reducing Valves Operation in Extreme Water Consumption Scenarios (Case Study: Najaf Abad Urban Water Distribution Network)

Seyed Pedram Jazayeri Farsani¹, Ramtin Moeini^{2*}

1. Ph.D. in Civil Engineering-Water Resources Management, Civil Engineering and Transportation Faculty, University of Isfahan, Isfahan, Iran

2. Assoc. Prof. of Civil Engineering-Water Resources Management, Civil Engineering and Transportation Faculty, University of Isfahan, Isfahan, Iran (Corresponding Author) r.moeini@eng.ui.ac.ir



<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.503350.3464>

Case Study

Abstract

Pressure and residual chlorine concentration are among the key parameters in urban water distribution networks that require continuous monitoring and control. These networks must ensure that consumer water demands are met with adequate pressure while optimizing water quality parameters, such as residual chlorine concentration, to maximize service satisfaction. In this study, the Najaf Abad urban water distribution network was selected as a real large-scale case study. A simultaneous optimization model was developed to determine nodal average pressure, residual chlorine concentration, and network combined reliability. The multi-objective optimization problem was solved using the NSGA-II algorithm under two extreme water consumption scenarios-maximum and minimum water withdrawal during warm and cold seasons. A Pressure-Driven Analysis approach was employed to calculate network parameters. Additionally, three objective functions were optimized using the NSGA-II multi-objective optimization algorithm. The optimal solution was selected from the Pareto front using the TOPSIS method. The network under study includes four operational pressure-reducing valves; after determining their optimal set pressure values, the average network pressure was reduced by 2.9% during ward days and 13.5% during cold days. The average residual chlorine concentration did not undergo significant changes however, its further reduction was prevented through optimization, effectively achieving this objective as well. Lastly, the combined reliability increased by 1.7% and 1.3% for warm and cold days, respectively.

Keywords:
Multi-Objective Optimization, Pressure Reducing Valves, Nodal Pressure, Residual Chlorine Concentration, Combined Reliability, NSGA-II.



Received: Aug. 1, 2024
Revised: Sep. 22, 2024
Accepted: Oct. 13, 2024

To cite this article:

Jazayeri Farsani, S. P. and Moeini, R., 2024. Multi-objective optimization of pressure-reducing valves operation in extreme water consumption scenarios (case study: Najaf Abad urban water distribution network). *Water and Wastewater*, 35(4), 49-70.
<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.503350.3464>.

Use your device to scan and read the article online



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



1. Introduction

A major challenge in WDNs¹ is managing seasonal water consumption and pressure fluctuations. Networks often experience peak pressure on cold winter nights and lowest pressure on hot summer afternoons, requiring reliable performance under both extreme conditions.

Beyond pressure management, water must meet quality standards to ensure public health. Maintaining adequate residual chlorine prevents pathogen growth and must remain within the acceptable range. Various reliability-based indices assess water networks' performance and resilience. Failures include pump malfunctions, leaks, pipe bursts, consumption surges, pressure fluctuations, and inadequate residual chlorine levels. No system is entirely failure-proof. Pressure-reducing valves² are key components in WDNs and must be properly adjusted for optimal operation.

Several studies have addressed the optimal placement and pressure settings of PRVs. For instance, GA³ and HS⁴ algorithms were used to determine the optimal placement and pressure setpoints for PRVs (De Paola et al., 2017). Additionally, leakage and energy recovery were analyzed using PRVs and Pumps as Turbines⁵ in WDNs (Fernández García et al., 2019). In another study, PSO⁶ and ACO⁷ were used to optimize hydraulic pressure reliability in WDNs by determining the number of valves to close and the extent of their closure (Dini and Asadi, 2020).

Patelis et al. (2020) divided a WDN into DMAs⁸, evaluating pressure regulation and DMAs' impact on water age, improving quality. Pressure management methods such as FO⁹, TM¹⁰, and FM¹¹ control in PRVs were investigated. Results showed the FM method could reduce operational costs by 11%. In another study, results showed that the best pressure management method depends on water tariff. When the tariff is high, RNM¹² is optimal, and when low, FO and TM methods are best. For constant hourly consumption with minimal fluctuations, FO is the best method (Kosucu and Demirel, 2024).

Research showed optimization methods and algorithms for PRV placement and pressure settings, mostly modeled as single-objective and

separate quantitative-qualitative. This study modeled it as multi-objective and uses NSGA-II to solve it. Real-world data from Najaf Abad's WDN was used. Optimal PRV pressure setpoints are determined simultaneously using three objectives: minimizing average node pressure, maximizing average residual chlorine concentration, and combining reliability. NSGA-II and TOPSIS¹³ are applied for optimization. The novelty of the present study is to optimize hydraulic and quality objectives simultaneously.

2. Materials and methods

In this section, the NSGA-II, reliability criterion, the mathematical optimization model, TOPSIS, and the proposed method were described.

2.1. NSGA-II

Multi-objective algorithms optimize several conflicting objectives simultaneously, creating a set of optimal pareto solutions. NSGA-II is a widely used algorithm for multi-objective optimization, valued for its reduced computational complexity and efficient non-dominated sorting. NSGA-II is known for reducing computational complexity, preserving diversity, and improving non-dominated sorting (Deb et al., 2002)

2.2. Reliability

The hybrid reliability (Equation 3) criterion of WDNs was calculated using the combination of the pressure hydraulic (Equation 1) and quality reliabilities (Equation 2)

$$HRP_N = \frac{\sum_{t=0}^{EPS} \sum_{i=1}^{NN} Q_{j,t}^{req} * HRP(j,t)}{\sum_{t=0}^{EPS} \sum_{i=1}^{NN} Q_{j,t}^{req}} \quad (1)$$

$$QR_N = \frac{\sum_{t=0}^{EPS} \sum_{i=1}^{NN} Q_{j,t}^{req} * QR2(j,t)}{\sum_{t=0}^{EPS} \sum_{i=1}^{NN} Q_{j,t}^{req}} \quad (2)$$

$$Hybrid_{Ret} = \sqrt{HRP_N * QR_N} \quad (3)$$

2.3. Multi-objective mathematical optimization model

In this study, a three-objective optimization model is formulated. The decision variables in this model are the pressure setpoints of four PRVs (integer variables) within the Najaf Abad WDN. The objectives are to simultaneously minimize the average nodal pressure, maximize the average nodal chlorine concentration, and optimize the hybrid reliability criterion of the entire WDN. The mathematical optimization model is as equation 4 to 7.

¹³ Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

¹ Water Distribution Networks (WDNs)

² Pressure- Reducing Valves (PRVs)

³ Genetic Algorithm (GA)

⁴ Harmony Search (HS)

⁵ Pumps as Turbines (PATs)

⁶ Particle Swarm Optimization (PSO)

⁷ Ant Colony Optimization (ACO)

⁸ District Metered Areas (DMAs)

⁹ Fixed Outlet (FO)

¹⁰ Time Modulated (TM)

¹¹ Flow-Modulated (FM)

¹² Remote Node Modulated (RNM)



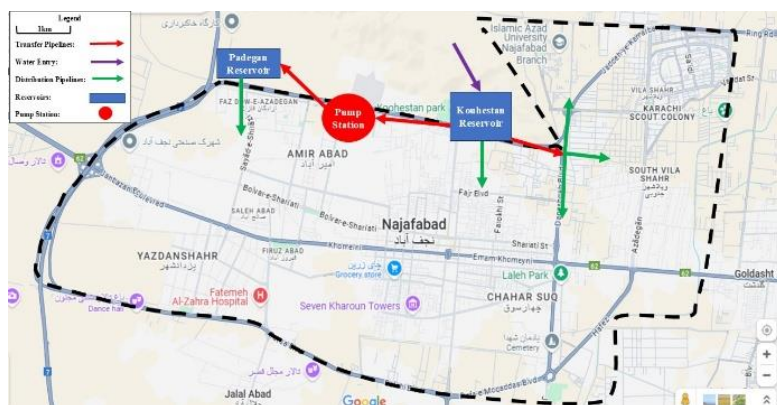


Fig. 1. Boundary of the Najaf Abad WDN and the location of reservoirs and pumping station (Jazayeri et al., 2024)



Fig. 2. Location of the PRVs in the Najaf Abad WDN

$$\text{Minimize } (\bar{P}) \text{ and Maximize } (\bar{C}_L, \text{Hybrid}_{\text{Rel}}) \quad (4)$$

$$10 \text{ m} \leq SP_i \leq 30 \text{ m}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

$$P_j \geq P_{\min} \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (6)$$

$$CL_j \geq CL_{\min} \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (7)$$

2.4. TOPSIS

The TOPSIS method is a MCDM¹ approach. In this method, the final optimal solutions are determined by minimizing the distance to the PIS² and maximizing the distance to the NIS³ (Hwang and Yoon, 1981). This method consists of five stages, with the solution having the highest value of C_i (the relative closeness index of solution i to the ideal option) being selected as the final optimal solution.

2.5. The proposed method

This study proposed a method to determine the optimal pressure setpoints for PRVs. The optimization model is solved using the NSGA-II, with parameters determined through sensitivity

analysis. The optimal solution is selected from the pareto set using the TOPSIS method.

Here, both the quantitative and qualitative objectives of the WDN, along with the hybrid hydraulic and quality reliability, are simultaneously optimized. In other words, these quantitative and qualitative parameters of the urban WDN are examined collectively, employing a multi-objective optimization modeling approach. Additionally, the network's performance and serviceability are optimized, which constitutes the innovation of this study.

3. Case study (Najaf Abad WDN)

In the present study, the WDN of Najaf Abad, Isfahan, serving a population of around 300,000 people, is used. This network consists of 2 reservoirs, 1 pump station (3 pumps), 9323 pipes, 8541 nodes, and 6 pressure-reducing valves (4 active). The network boundary, the placement of reservoirs and the pump station of Najaf Abad WDN, as well as the location of the active PRVs (yellow circles), are shown in Figs. 1 and 2, respectively.

To analyze the network under extreme water consumption conditions, the network was studied for two days in the year 2023, including the coldest day of the year (December 25, 2023) and the hottest day of the year (May 17, 2024). For the WDN calibration, a single-objective GA was

¹ Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)

² Positive Ideal Solution (PIS)

³ Negative Ideal Solution (NIS)



used in this study to calibrate the pipe roughness coefficient (C_{HW}), nodal consumption flow rates (Q), and chlorine wall decay coefficients (K_b). The goal was to ensure that the discrepancies between the hydraulic model's pressure and residual chlorine concentration values and the field measurements fall within the allowable range. This process was carried out separately for the coldest and hottest days of the year 2023 for the Najaf Abad WDN.

4. Results and discussion

After performing a sensitivity analysis for the NSGA-II parameters and determining their best values, the optimal pareto solutions for the hottest and coldest days of the year 2023 were obtained using the PDA analysis. These solutions were shown in Figs. 3 and 4.

As shown in Figs. 3 and 4, the relationships between average network pressure, chlorine concentration, and hybrid network reliability are non-linear. The final optimal solution is selected from the pareto set using the TOPSIS method. In this study, the coefficient matrix arrays (W_j) are

set to 0.33, meaning the weights of all three objectives are considered equal.

Finally, the optimal pressure setpoints and objective function values for the final optimal solutions for the warm and cold days of 2023 were presented in Table 1. Once the final optimal solutions for the warm and cold days of 2023 were determined, the pressure value, residual chlorine concentration value, and hybrid reliability were improved. The improvements in these values, before and after optimization, were presented in Table 2 based on the final optimal solutions.

Table 1. The optimal values of the Najaf Abad WDN for the hot and cold days of the year 2023

Day in 2023	1 st PRV (m)	2 nd PRV (m)	3 rd PRV (m)	4 th PRV (m)	\bar{P} (m)	\bar{CL} (mg/L)	Hybrid _{Rel} (%)
Hot	12	13	26	27	23.3	0.363	47.9
Cold	17	21	26	26	26.9	0.398	55.0

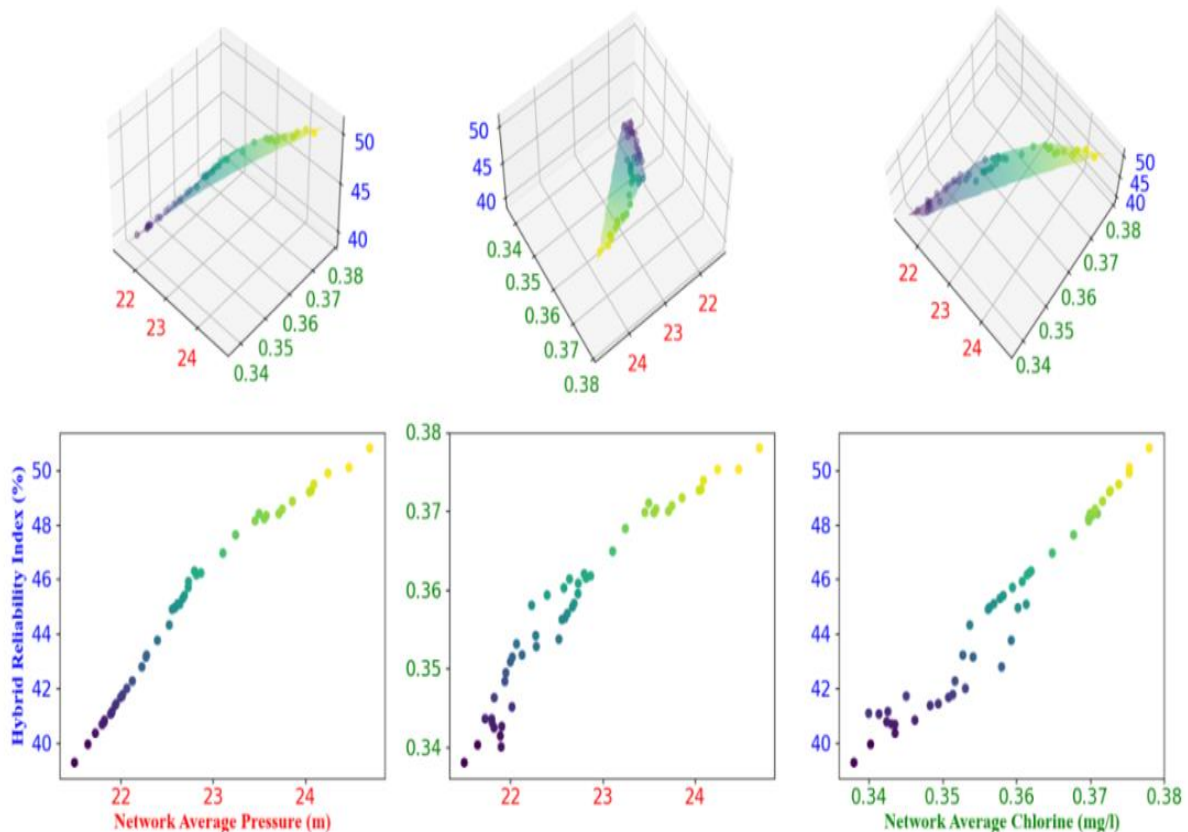


Fig. 3. The pareto front of the three-objective optimization model obtained from the NSGA-II algorithm for days with the highest temperature in the year 2023



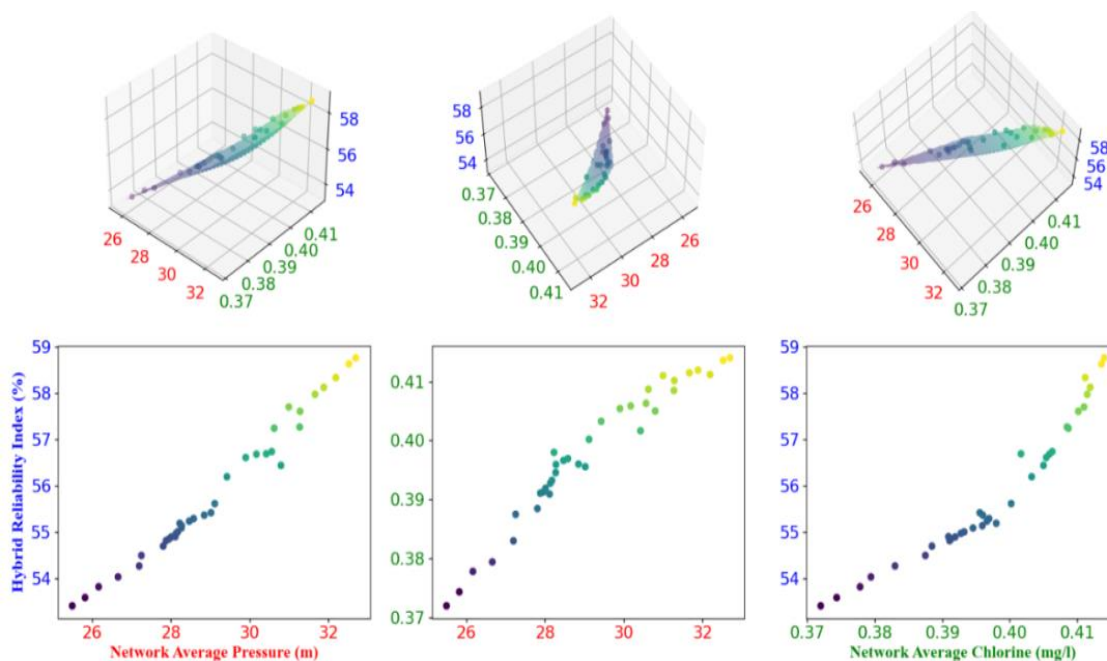


Fig. 4. The pareto front of the three-objective optimization model obtained from the NSGA-II algorithm for cold days in the year 2023

Table 2. Improvement in three objectives of the WDN before and after optimizing the PRVs on the hot and cold days of the year 2023

Day in the year 2023	Average pressure of the WDN		
	Before (m)	After (m)	Improvement (%)
Hot days	24.0	23.3	2.9
Cold days	31.1	26.9	13.5
Day in the year 2023	Average chlorine concentration of the WDN		
	Before (mg/L)	After (mg/L)	Improvement (%)
Hot days	0.363	0.366	0.1
Cold days	0.400	0.398	0
Day in the year 2023	Hybrid reliability of the WDN		
	Before (%)	After (%)	Improvement (%)
Hot days	47.1	47.9	1.7
Cold days	54.3	55.0	1.3

Comparing the results in Table 2, it is observed that the proposed multi-objective optimization method improves the average network pressure and hybrid network reliability compared to the current traditional operation of PRVs. However, the average chlorine concentration in the network remains unchanged. It is important to note that the average chlorine concentration could have been reduced by adjusting the pressure settings of the PRVs, but the optimization process did not lead to a decrease in this objective function, indicating that it was optimized. Overall, the results demonstrate

the effective performance of the proposed method in simultaneously optimizing both quantitative and qualitative objective functions.

5. Conclusion

The results showed that while average chlorine concentration remained stable, its further reduction was prevented by the proposed method. The average network pressure decreased by 2.9% and 13.5% for hot and cold days, respectively, improving system lifespan, reducing leakage, and enhancing the hybrid reliability by 1.7% and 1.3%.

In summary, this study considered the qualitative objective of average chlorine concentration alongside quantitative objectives (pressure and hybrid reliability) to examine the impact of quantitative parameters (pressure) on qualitative parameters (residual chlorine concentration). Ultimately, all objectives were simultaneously optimized using the NSGA-II, with results demonstrating the proposed method's effectiveness in comprehensive WDN management, accounting for both quantitative and qualitative parameters.

This study considered equal weights for all three objectives in optimization. Future research can adjust weights based on the relative importance of each objective. Additionally, other objectives like vulnerability and recoverability could be compared, using NSGA-II or NSGA-III for multi-objective analysis.





بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از شیرهای فشارشکن در حالات حدی مصرف آب (مطالعه موردی: شبکه توزیع آب شهری نجف‌آباد)

سید پدرام جزائری فارسانی^۱، رامتین معینی^{۲*}

۱- دکترای مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
(نویسنده مسئول) r.moieni@eng.ui.ac.ir

 <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.503350.3464>

مطالعه موردی

چکیده

فشار و غلظت کلر باقیمانده از جمله پارامترهای مهم در شبکه‌های توزیع آب شهری است که باید کنترل و بررسی شوند. در این شبکه‌ها باید نیاز آبی مشترکین با فشار مناسب حتی‌الامکان به صورت کامل تأمین شده و با بهبود پارامترهای کیفی از جمله غلظت کلر باقیمانده، بیشترین رضایت سرویس‌دهی حاصل شود. در این پژوهش، با انتخاب شبکه توزیع آب شهری نجف‌آباد به عنوان یک شبکه واقعی بزرگ مقیاس، مدل بهینه‌سازی هم‌زمان تعیین مقدار فشار و غلظت کلر باقیمانده گره‌ای متوسط و اعتمادپذیری ترکیبی شبکه تعریف شد و با استفاده از الگوریتم NSGA-II مسئله بهینه‌سازی چندهدفه در دو حالت بیشترین و کمترین میزان برداشت آب از شبکه در دو فصل گرم و سرد سال حل شد. در این پژوهش، برای محاسبه پارامترهای شبکه از تحلیل مبتنی بر فشار استفاده شد. همچنین، سه تابع هدف تعریف‌شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II بهینه شدند. در نهایت، از میان جواب‌های سطح بهینه پارتو، جواب بهینه نهایی توسط روش تاپسیس انتخاب شد. در این شبکه ۴ شیر فشارشکن در حال بهره‌برداری است که پس از تعیین مقدار فشار تنظیمی بهینه نهایی آنها، مقدار فشار متوسط شبکه برای روزهای گرم و سرد سال به ترتیب ۲/۹ و ۱۳/۵ درصد کاهش یافت. همچنین، مقدار غلظت کلر متوسط تغییر قابل توجهی نداشت، ولی با انجام بهینه‌سازی، از کاهش مجدد آن جلوگیری شد که به نوعی این هدف نیز بهینه شد. در نهایت، میزان اعتمادپذیری ترکیبی برای روزهای گرم و سرد سال نیز به ترتیب ۱/۷ و ۱/۳ درصد افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی:
بهینه‌سازی چندهدفه،
شیرهای فشارشکن
(PRVs)، فشار گره‌ای،
غلظت کلر باقیمانده،
اعتمادپذیری ترکیبی،
الگوریتم NSGA-II



دریافت: ۱۴۰۳/۵/۱۱

اصلاح: ۱۴۰۳/۷/۱

پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۲۲

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

جزائری فارسانی، س. پ.، معینی، ر.، ۱۴۰۳، بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از شیرهای فشارشکن در حالات حدی مصرف آب (مطالعه موردی: شبکه توزیع آب شهری نجف‌آباد)، آب و فاضلاب، ۳۵ (۴)، ۷۰-۴۹.

<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.503350.3464>



© The Author(s).
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



۱- مقدمه

می‌توان عدم کارکرد پمپ‌ها، هدررفت آب و شکست لوله‌ها، افزایش تقاضای آبی مشترکین و نوسانات فشار در شبکه یا تغییرات نامطلوب مشکلات غلظت کلر باقیمانده نام برد.

به‌منظور تعیین پارامترهای کمی و کیفی شبکه‌های آب، باید شبکه تحلیل شود. برای تحلیل شبکه‌های توزیع آب و تعیین پارامترهای هیدرولیکی، دو روش اصلی تحلیل تحت عنوان تحلیل مبتنی بر تقاضا^۲ و تحلیل مبتنی بر فشار^۳ ارائه شده‌اند. به‌طور کلی، برای شبیه‌سازی واقع‌بینانه‌تر شرایط جریان، استفاده از روش تحلیل PDA توصیه شده است. در این روش علاوه بر در نظر گرفتن معادلات پیوستگی و انرژی در شبکه، معادلات دبی-هد فشاری نیز برای گره‌های شبکه در نظر گرفته می‌شود که در این حالت ممکن است با توجه به هد فشاری گره‌ای، کل تقاضای آبی مشترکین تأمین نشود و در نهایت، این روش تطابق بیشتری با هیدرولیک حاکم بر شبکه آب دارد (Wagner et al., 1988).

شیرهای فشارشکن یکی از مهم‌ترین المان‌های شبکه توزیع آب است که به‌منظور بهره‌برداری بهینه از شبکه باید تنظیم شوند. بررسی سوابق پژوهشی نشان‌دهنده آن است که پژوهش‌های جامعی در زمینه بهینه‌سازی جانمایی و تنظیمات PRVs انجام شده است. در ادامه به مهم‌ترین آنها اشاره شده است.

عبدالمجید و اولانیسکی، جریان در شیرهای فشارشکن را مدل‌سازی کردند. به‌این منظور از الگوریتم ژنتیک^۴ برای محاسبه ضرایب روابط درجه دوم بین دبی و فشار خروجی در PRVs استفاده شد. مزیت اصلی روش پیشنهادی آن بود که در این روش، منحنی تنها یک‌بار محاسبه شده و برای بهره‌برداری رنج وسیعی از تقاضاهای گره‌ای مناسب است. همچنین، برای DMAs^۵ شبکه مورد مطالعه در این پژوهش با منظور کردن فقط یک شیر فشارشکن ورودی، میزان نشت تا ۲۰ درصد کاهش یافت (AbdelMeguid, 2010).

and Ulannicki, 2010)

دی پائولا و همکاران از الگوریتم‌های جستجوی هارمونی^۶ و ژنتیک برای تعیین جانمایی و تنظیم PRVs استفاده کردند. تابع هدف کاهش نشت از طریق حداقل‌سازی فشار بود. مقایسه نتایج

در حالت کلی، بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب شهری شامل کنترل فشار، مدیریت مصرف، اطمینان از کیفیت آب و کاهش تلفات ناشی از نشتی و شکستگی لوله‌ها است. بهره‌برداری کارآمد نیازمند نظارت دقیق بر عملکرد شبکه از طریق حسگرها، مدل‌های هیدرولیکی و سیستم‌های کنترل هوشمند است تا آب با کمترین هدررفت و بیشترین رضایتمندی مشترکین به مصرف‌کنندگان برسد. یکی از چالش‌های اصلی در این حوزه، تغییرات فصلی در مصرف آب و تأمین فشار مطلوب در شبکه در این شرایط است، چرا که در ساعات نیمه‌شب سردترین شب فصل زمستان، شبکه آب در حال تجربه بیشترین میزان فشار (کمترین مصرف آب مشترکین) و در ساعات بعدازظهر گرم‌ترین روز فصل تابستان، شبکه دارای کمترین میزان فشار (بیشترین مصرف آب مشترکین) خواهد بود. بنابراین شبکه باید قادر باشد که در هر یک از این دو شرایط بحرانی عملکرد مطلوبی داشته باشد. لازم به ذکر است در صورت وجود فشارهای بالا لازم است که با استفاده از شیرهای فشارشکن، فشار در شبکه کاهش یابد ولی همچنان نیاز آبی مشترکین تأمین شود (Ferrarese et al., 2022).

علاوه بر مشکلات فشار و اهمیت مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب شهری، آب باید استاندارد کیفی مناسب برای مشترکین را داشته باشد تا سلامت افراد به خطر نیفتد. یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفی شبکه، غلظت کلر باقیمانده است که از رشد و تولیدمثل میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا جلوگیری می‌کند. بیان این نکته ضروری است که غلظت این پارامتر باید در بازه مجاز بوده و در صورتی که شبکه با افت غلظت کلر باقیمانده متوسط همراه شد، با در نظر گرفتن تمهیداتی، مقدار این پارامتر افزایش یابد (Ardeshir et al., 2017).

با توجه به پارامترهای کمی و کیفی شبکه، شاخص‌ها و معیارهای ترکیبی مختلفی از جمله اعتمادپذیری (قابلیت اطمینان) به‌منظور بررسی عملکرد، سرویس‌دهی و قدرتمندی شبکه تعریف شده است. این معیارها با تعریف شکست در شبکه حاصل می‌شود. در حالت کلی، هیچ سیستمی به‌صورت کامل و ۱۰۰ درصد قابل اطمینان نیست. از جمله شرایط شکست در شبکه‌های آب را

¹ Pressure Regulator Values (PRVs)

² Data Envelopment Analysis (DDA)

³ Pressure Dependent Analysis (PDA)

⁴ Genetic Algorithm (GA)

⁵ District Metered Areas (DMAs)

⁶ Harmony Search (HS)



مصلحی و همکاران روش‌های مدیریت فشار با خروجی ثابت^۵، تنظیم زمانی^۶ و تنظیم دبی^۷ در PRVs را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بهترین روش FM است که در آن هزینه‌های بهره‌برداری ۱۱ درصد کاهش یافته است (Moslehi et al., 2020).

خاشعی و همکاران جانمایی و فشار تنظیمی بهینه PRVs را با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعیین و تأثیر مدیریت فشار بر تقاضای مشترکین را بررسی کردند. در روش پیشنهادی آنها، فشار متوسط شبکه در شرایط عادی بهره‌برداری تا ۸ متر کاهش یافت (Khashei et al., 2022).

کاسوسو و دمیرل عملکرد رویکرد مدیریت فشار با استفاده از PRVs بر مبنای روش‌های FO، TM، FM و روش تنظیم‌گره از راه دور^۸ را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بهترین روش مدیریت فشار به مقدار آب‌بها وابسته است. به عبارت دیگر، هنگامی که مقدار آب‌بها زیاد باشد بهترین روش، RNM و هنگامی که آب‌بها کم باشد بهترین روش، FO و TM هستند. همچنین، هنگامی که مصارف ساعتی ثابت بوده و نوسانات زیادی نداشته باشد، بهترین روش FO است (Kosucu and Demirel, 2024).

وظیفه‌دوست صالح و همکاران شیرهای فشارشکن و پمپ به‌جای توربین را در شبکه آب به‌منظور مدیریت فشار استفاده کردند. به این منظور، آنها از الگوریتم تکامل تفاضلی^۹ به‌منظور بهینه‌سازی جانمایی و فشار تنظیمی شیرهای فشارشکن، جانمایی، نوع و سرعت دورانی پمپ به‌جای توربین‌ها در طول شبانه‌روز استفاده کردند. در بهترین حالت، ۱۶۰ کیلووات ساعت انرژی در طول ۲۴ ساعت حاصل شد و بازگشت سرمایه هزینه‌های پیاده‌سازی ۴ سال خواهد بود (Vazifehdoest Saleh et al., 2024).

بررسی سوابق پژوهشی نشان‌دهنده آن است که از روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلفی به‌منظور بهینه‌سازی جانمایی و فشار تنظیمی شیرهای فشارشکن استفاده شده که در اکثر این پژوهش‌ها مسئله به‌صورت یک تابع تک‌هدفه مدل شده است. همچنین، مسئله به‌صورت کمی و کیفی مجزا مدل‌سازی شده است.

نشان داده شد که با استفاده از روش پیشنهادی، مقدار نشت کاهش یافته و الگوریتم HS عملکرد بهتری نسبت به GA داشت (De Paola et al., 2017).

فرناندزگارسیا و همکاران، میزان نشت و احیای انرژی با استفاده از شیرهای فشارشکن و پمپ به‌جای توربین^۱ را بررسی کردند. روش پیشنهادی در دو سناریو بررسی شد که در سناریو اول، از PATs به‌جای PRVs استفاده شد. در سناریوی دوم، جانمایی جدیدی برای PATs تعیین شد. نتایج نشان‌دهنده آن بود که انرژی برقایی تولید شده می‌تواند انرژی الکتریکی موردنیاز شبکه (مثلاً پمپاژ آب) را در سناریوی اول و دوم به ترتیب ۲۱ و ۲۳ درصد کاهش دهد (Fernández García et al., 2019).

دینی و اسدی روشی پیشنهاد کردند که در آن بهره‌برداری بهینه از شیرهای نیمه‌بسته به‌منظور مدیریت فشار تعیین شود. به بیان دیگر در این روش تعیین شد که در هر یک از ساعات شبانه‌روز، کدام یک از شیرها و به چه میزان باید باز شده تا شاخص اعتمادپذیری فشار شبکه حداکثر شود. در این پژوهش، از الگوریتم PSO^۲ برای انتخاب شیرها و کالیبراسیون شبکه و از الگوریتم ACO^۳ برای تعیین تنظیمات بهینه شیرها استفاده شد. پیاده‌سازی و اجرای روش پیشنهادی بر روی یک شبکه آب نمونه و یک شبکه واقعی نشان داد که شاخص اعتمادپذیری فشار شبکه ۳۲/۶ درصد افزایش و نرخ نشت متوسط ۳۱/۷ درصد کاهش یافت (Dini and Asadi, 2020).

پاتلیس و همکاران با ارائه روشی، یک شبکه واقعی در کشور یونان (کز تاون^۴) را تقسیم‌بندی کردند. در این پژوهش، شیر فشارشکن در ابتدای نواحی منظور و سپس سن آب بررسی شد. به بیان دیگر، تأثیر تنظیم فشار همراه با اجرای DMAs در شبکه، بر روی سن آب ارزیابی شد. شبیه‌سازی هیدرولیکی در نرم‌افزار WaterCad انجام شد و نشان داد با افزایش فشار تنظیمی PRVs، سن آب کاهش یافته و کیفیت آب افزایش می‌یابد (Patelis et al., 2020).

⁵ Fixed Outlet (FO)

⁶ Time Modulated (TM)

⁷ Flow Modulated (FM)

⁸ Remote Node Modulated (RNM)

⁹ Differential Evolutionary (DE)

¹ Pump As Turbines (PATs)

² Particle Swarm Optimization (PSO)

³ Ant Colony Optimization (ACO)

⁴ Kos Town



هدف به‌طور هم‌زمان بهینه‌سازی می‌شوند. این رویکرد زمانی کاربرد دارد که مسئله دارای چندین معیار عملکردی (هدف) باشد که اغلب با یکدیگر در تضاد قرار دارند. در این روش، برخلاف بهینه‌سازی تک‌هدفه که یک پاسخ یکتا ارائه می‌شود، مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه تولید می‌شود که این مجموعه جواب‌های پارتو نامیده می‌شود. هر نقطه از این مجموعه نمایانگر یک تعادل بهینه میان اهداف مختلف است (Coello et al., 2007). هدف اصلی این رویکرد یافتن یک یا چند راه‌حل بهینه است که بتواند تضادهای موجود بین اهداف مختلف را به‌طور مؤثر مدیریت کرده و تعادلی مناسب برقرار کند.

در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، یافتن جوابی که منجر به مقدار بهینه تمام توابع هدف تعیین شود نادر است، زیرا توابع هدف معمولاً در تضاد هستند. در این شرایط، مجموعه‌ای از جواب‌های پارتو ایجاد می‌شود که هیچ‌کدام نسبت به دیگری برتری ندارند و بهبود یکی، موجب بدتر شدن سایر جواب‌ها می‌شود.

الگوریتم NSGA-II از مهم‌ترین و پرکاربردترین الگوریتم‌های چندهدفه است که برای بهینه‌سازی مسائل چندهدفه توسعه یافته‌اند. الگوریتم NSGA-II توسط دب و همکاران معرفی شد و به‌سرعت به یکی از الگوریتم‌های محبوب در زمینه بهینه‌سازی چندهدفه تبدیل شد. این الگوریتم به دلیل کاهش پیچیدگی محاسباتی، حفظ تنوع و بهبود مکانیسم مرتب‌سازی غیرمغلوب^۴، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. مراحل کلی این الگوریتم شامل ایجاد جمعیت اولیه، ارزیابی جمعیت، مرتب‌سازی غیرمغلوب، محاسبه فاصله ازدحامی، انتخاب والدین، اعمال عملگرهای ترکیب و جهش و شرط خاتمه الگوریتم است (Deb et al., 2002).

در حالت کلی، الگوریتم‌های تکاملی (فراکاشی) بر اساس یک جمعیت اولیه عمل می‌کنند که این جمعیت به‌طور تصادفی تولید می‌شود و هر فرد آن نماینده یک راه‌حل از مسئله برای متغیرهای تصمیم است. هر فرد در جمعیت به‌صورت یک کروموزوم مدل‌سازی می‌شود که از رشته‌ای از ژن‌ها تشکیل شده است. پس از ایجاد جمعیت اولیه، به هر فرد مقداری برازندگی مطابق با تابع هدف اختصاص داده می‌شود. در روش مرتب‌سازی غیرمغلوب،

بنابراین، در این پژوهش این مسئله به‌صورت هم‌زمان کمی و کیفی و چندهدفه مدل‌سازی شده و یکی از بهترین و پرکاربردترین الگوریتم‌های فراکاشی چندهدفه به نام NSGA-II^۱ برای حل آن استفاده شد. این الگوریتم توسط ماژول EPyT^۲ و از طریق کدنویسی در زبان برنامه‌نویسی پایتون^۳ به شبیه‌ساز هیدرولیکی EPANET2.2 متصل می‌شود (Kyriakou et al., 2023).

در این پژوهش، سه هدف فشار و غلظت کلر باقیمانده متوسط و اعتمادپذیری ترکیبی شبکه به‌صورت هم‌زمان بهینه می‌شوند که نوآوری این پژوهش نیز محسوب می‌شود. همچنین از اطلاعات شبکه توزیع آب شهری نجف‌آباد به‌عنوان یک شبکه آب واقعی بزرگ مقیاس استفاده شد و مقدار بهینه فشار تنظیمی شیرهای فشارشکن به‌صورت هم‌زمان با استفاده از سه تابع هدف تعیین شد. به‌این منظور، سه تابع هدف حداقل‌سازی فشار گره‌ای متوسط در شبکه، حداکثرسازی غلظت کلر باقیمانده گره‌ای متوسط در شبکه و اعتمادپذیری ترکیبی کمی و کیفی تعریف شد. دلیل آنکه حداکثرسازی برای کلر انتخاب شد آن بود که شبکه با افت غلظت کلر همراه است و باید میزان متوسط غلظت کلر افزایش یابد.

در نهایت، با تعیین جبهه پارتوی جواب‌های بهینه توسط الگوریتم NSGA-II، از یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به نام تاپسیس^۳ برای تعیین جواب نهایی استفاده شد. در این روش، با استفاده از اهمیت هریک از توابع هدف و با نرمالیزه کردن جواب‌های بهینه، در نهایت جواب بهینه نهایی تعیین می‌شود. بررسی نتایج نشان‌دهنده عملکرد مطلوب روش پیشنهادی است.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش روش‌های استفاده شده در این پژوهش از جمله الگوریتم NSGA-II، شاخص اعتمادپذیری، روش تاپسیس و همچنین، مدل بهینه‌سازی ریاضی چندهدفه مسئله ارائه شده است.

۲-۱- الگوریتم NSGA-II

بهینه‌سازی چندهدفه یکی از زیرمجموعه‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در آن به‌جای تمرکز بر یک هدف خاص، چندین

¹ Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)

² Python

³ Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

⁴ Non-Dominated Sorting (NDS)



استاندارد است. شایان ذکر است اعتمادپذیری ترکیبی می‌تواند ترکیب دو یا هر سه اعتمادپذیری مکانیکی، هیدرولیکی و کیفی تعریف شود.

در این پژوهش، معیار اعتمادپذیری هیدرولیکی فشار برای کل شبکه، به صورت میانگین وزنی دبی‌های مورد تقاضای گره‌ای بر اساس معادله ۱ منظور شد (Dini et al., 2022)

$$HRP_N = \frac{\sum_{t=0}^{EPS} \sum_{i=1}^{NN} Q_{j,t}^{req} * HRP(j,t)}{\sum_{t=0}^{EPS} \sum_{i=1}^{NN} Q_{j,t}^{req}} \quad (1)$$

که در آن

HRP_N اعتمادپذیری هیدرولیکی فشار شبکه در کل دوره زمانی گسترده^۱ بوده، NN تعداد گره‌های شبکه $Q_{j,t}^{req}$ دبی مورد تقاضای گره زدر زمان t است. همچنین، $HRP(j,t)$ اعتمادپذیری هیدرولیکی فشار برای گره زدر زمان t بوده که مطابق با معادله ۲ محاسبه می‌شود (Dini et al., 2022)

(۲)

$$HRP(j, t) = \begin{cases} 0, & P < 10m \\ \frac{1}{32} * (P - 10), & 10m < P < 26m \\ \frac{1}{10} (P - 26) + 0.5, & 26m < P < 31m \\ 1, & P = 31m \\ -\frac{1}{38} (P - 31) + 1.0, & 31m < P < 50m \\ -\frac{1}{40} (P - 50) + 0.5, & 50m < P < 60 \\ 0.25, & P > 60m \end{cases}$$

که در آن

P هد فشاری در گره زو در زمان t است.

همچنین، اعتمادپذیری کیفی برای کل شبکه (QR_N) به صورت معادله ۳ است (Dini and Tabesh, 2019)

$$QR_N = \frac{\sum_{t=0}^{EPS} \sum_{i=1}^{NN} Q_{j,t}^{req} * QR2(j,t)}{\sum_{t=0}^{EPS} \sum_{i=1}^{NN} Q_{j,t}^{req}} \quad (3)$$

که در آن

$QR(j,t)$ اعتمادپذیری کیفی برای گره زدر زمان t بوده و که به صورت معادله ۴ محاسبه می‌شود

جمعیت به طور غیرمغلوب مرتب شده و افراد در جبهه‌های مختلف تقسیم می‌شوند. افراد جبهه اول هیچ‌گاه توسط دیگران مغلوب نمی‌شوند، در حالی که افراد جبهه دوم فقط توسط افراد جبهه اول مغلوب می‌شوند و این روند تا جبهه‌های بعدی ادامه می‌یابد.

برای حفظ تنوع در جمعیت، فاصله ازدحامی محاسبه می‌شود که نمایانگر میزان فاصله هر فرد از سایر افراد در فضای هدف است. در انتخاب اعضای جبهه‌های یکسان، فردی که فاصله ازدحامی بیشتری دارد، به نسل بعدی منتقل می‌شود. تولید نسل بعدی از طریق ترکیب مرتب‌سازی غیرمغلوب و فاصله ازدحامی انجام می‌شود، به طوری که افراد با کیفیت بالا و تنوع بیشتر برای نسل جدید انتخاب می‌شوند. عملگرهای ترکیب و جهش برای تولید فرزندان جدید به کار می‌روند که ترکیب اطلاعات را بین والدین منتقل کرده و جهش تنوع پاسخ‌ها را افزایش می‌دهد. در ادامه، والدین و فرزندان باهم ترکیب شده و یک جمعیت ترکیبی شکل می‌دهند. از این جمعیت، بهترین افراد انتخاب شده و نسل بعدی ایجاد می‌شود. این فرایند تا رسیدن به شرط توقف که می‌تواند شامل اتمام تعداد تکرارها یا عدم بهبود در پاسخ‌ها در بازه زمانی مشخص باشد، ادامه می‌یابد (Lambora et al., 2019).

۲-۲- اعتمادپذیری

اعتمادپذیری در حالت کلی میزان احتمال یک سیستم (مثلاً شبکه آب) برای آنکه وظایف و مأموریت خود را در یک بازه زمانی و مکانی خاص با در نظر گرفتن یک سری قیود و محدودیت‌ها انجام دهد، تعریف می‌شود (Bazovski, 1961). شایان ذکر است که یک شاخص جامع و کلی برای محاسبه اعتمادپذیری وجود ندارد و پژوهشگران روابطی را برای این شاخص ارائه داده‌اند.

به طور کلی چند دسته مختلف از جمله مکانیکی، هیدرولیکی، کیفی و ترکیبی اعتمادپذیری تعریف شده است. اعتمادپذیری مکانیکی یک المان، احتمال تداوم عملکرد آن در طی مدت زمان خاصی است. اعتمادپذیری هیدرولیکی برای گره یا شبکه، احتمال تأمین آب مورد تقاضای مشترکین با میزان هد فشاری خاص برای گره یا شبکه است. همچنین، اعتمادپذیری کیفی برای گره یا شبکه، احتمال حفظ یک پارامتر کیفی آب (مثلاً غلظت کلر) در بازه

¹ Extended Period Simulation (EPS)



که در آنها

(۴)

Hybrid_{Rel} و \overline{CL} , \overline{P} به ترتیب فشار، غلظت کلر گره‌ای متوسط و شاخص اعتمادپذیری ترکیبی شبکه آب و SP_i مقدار فشار تنظیمی شیر فشارشکن i ام است (متغیر تصمیم مسئله و از نوع عدد صحیح). در این مدل، فشار تنظیمی شیرهای فشارشکن می‌تواند مقداری بین ۱۰ تا ۳۰ متر داشته باشد.

معادلات ۷ و ۸ به ترتیب، قید حداقل فشار و کلر در شبکه است. در این معادلات، P_j و P_{min} به ترتیب، فشار در گره زوحداقل فشار مجاز گره‌ای و CL_j و CL_{min} به ترتیب، غلظت کلر در گره j و حداقل غلظت کلر مجاز در شبکه است. مقدار P_{min} برابر با صفر متر و CL_{min} برابر $0/2$ میلی‌گرم بر لیتر انتخاب شده است. مدل بهینه‌سازی چندهدفه از نوع مقید بوده است که برای اعمال قیود، از روش جریمه (پنالتی) استفاده شده است.

۲-۴- روش تاپسیس

روش تاپسیس یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۱ است. در این روش، جواب‌های بهینه نهایی به‌گونه‌ای تعیین می‌شوند که کمترین فاصله را از راه‌حل مطلق مثبت^۲ و بیشترین فاصله را از راه‌حل بهینه مطلق منفی^۳ داشته باشد (Hwang et al., 1981). این روش دارای پنج مرحله است که در ادامه ارائه شده است. در گام اول، ماتریس جواب‌های بهینه تشکیل شده و سپس آرایه‌های آن، توسط معادله ۱۰ نرمالیزه می‌شوند و ماتریس نرمالیزه شده برای جواب‌های بهینه حاصل می‌شود

$$r_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n f_{ij}^2}} \quad (10)$$

که در آن

r_{ij} مقدار نرمالیزه شده جواب بهینه، f_{ij} جواب بهینه نهایی، i شماره‌دهنده برای دسته جواب‌ها، j شماره‌دهنده برای تابع هدف و n تعداد دسته جواب‌ها است.

در گام دوم، ماتریس تصمیم‌گیری نرمالیزه شده وزن‌دار (V_{ij})

$$QR(j, t) = \begin{cases} 0, C < 0.1 \frac{mg}{l} \\ 5(C - 0.1), & 0.1 \frac{mg}{l} < C < 0.2 \frac{mg}{l} \\ \frac{5}{4}(C - 0.2) + 0.5, & 0.2 \frac{mg}{l} < C < 0.4 \frac{mg}{l} \\ 2.5(C - 0.2) + 0.5, & 0.4 \frac{mg}{l} < C < 0.5 \frac{mg}{l} \\ 1, & C = 0.5 \frac{mg}{l} \\ \frac{-5}{3}(C - 0.5) + 1, & 0.5 \frac{mg}{l} < C < 0.8 \frac{mg}{l} \\ \frac{-5}{4}(C - 0.8) + 0.5, & 0.8 \frac{mg}{l} < C < 1 \frac{mg}{l} \\ 0.25, & C > 1 \frac{mg}{l} \end{cases}$$

که در آن

C غلظت کلر باقیمانده گره زدر زمان t است.

در نهایت، معیار اعتمادپذیری ترکیبی (Hybrid_{Rel}) به صورت معادله ۵ تعریف شد که میانگین هندسی معیارهای اعتمادپذیری هیدرولیکی فشار و اعتمادپذیری کیفی است

$$Hybrid_{Rel} = \sqrt{HRP_N * QR_N} \quad (5)$$

۲-۳- مدل ریاضی بهینه‌سازی چندهدفه

در این پژوهش، مدل بهینه‌سازی سه‌هدفه مسئله تعریف شد. در این مدل، متغیر تصمیم فشار تنظیمی چهار شیر فشارشکن است. همچنین، اهداف شامل حداقل‌سازی فشار گره‌ای متوسط شبکه و حداکثرسازی غلظت کلر گره‌ای متوسط و اعتمادپذیری ترکیبی شبکه است. از آنجایی‌که این توابع با یکدیگر در تناقض هستند از الگوریتم NSGA-II برای حل مدل بهینه‌سازی استفاده شده است. مدل ریاضی بهینه‌سازی با تعریف توابع هدف و قیود آن به شرح زیر است

$$OF: \text{Minimize } (\overline{P}) \text{ and Maximize } (\overline{CL}, Hybrid_{Rel}) \quad (6)$$

$$10 \text{ m} \leq SP_i \leq 30 \text{ m}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

$$P_j \geq P_{min} \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (8)$$

$$CL_j \geq CL_{min} \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (9)$$

SP_i is integer variable

¹ Multiple Criteria Decision Making (MCDM)

² Positive Ideal Solution (PIS)

³ Negative Ideal Solution (NIS)



C_i ، شاخص نزدیکی نسبی جواب i نسبت به گزینه ایده‌آل است. در انتها پس از محاسبه این شاخص برای تمامی جواب‌ها، دسته جوابی که دارای بیشترین مقدار C_i است، به‌عنوان جواب نهایی بهینه انتخاب می‌شود (Hwang et al., 1981).

۲-۵- روش پیشنهادی

در این پژوهش، روشی برای تعیین فشار تنظیمی بهینه شیرهای فشارشکن پیشنهاد شد. در روش پیشنهادی، ابتدا مدل ریاضی بهینه‌سازی مسئله تعریف می‌شود. مدل بهینه‌سازی مسئله با استفاده از الگوریتم NSGA-II حل می‌شود. در ابتدا پارامترهای الگوریتم NSGA-II با تحلیل حساسیت تعیین می‌شوند. با حل مدل بهینه‌سازی سطح پارتوی جواب‌های بهینه حاصل می‌شود. در نهایت جواب بهینه از مجموعه جواب‌های طرح پارتو با استفاده از روش تاپسیس تعیین می‌شود.

در این پژوهش، تابع هدف کمی و کیفی شبکه به همراه اعتمادپذیری ترکیبی هیدرولیکی و کیفی به‌صورت هم‌زمان بهینه شدند. به‌عبارت دیگر پارامترهای کمی و کیفی شبکه‌های توزیع آب شهری به‌صورت یکجا بررسی شدند، به‌این منظور از مدل‌سازی بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شد. همچنین علاوه بر توابع کمی و کیفی شبکه، عملکرد و سرویس‌دهی شبکه نیز بهینه شد که نوآوری این پژوهش بود. در شکل ۱، فلوچارت مراحل کلی روش پیشنهادی ارائه شده است.

۳- مطالعه موردی

برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در این پژوهش، از اطلاعات شبکه توزیع آب شهری نجف‌آباد، اصفهان استفاده شد.

۳-۱- اطلاعات شبکه توزیع آب شهری نجف‌آباد

این شبکه برای آب‌رسانی شهر نجف‌آباد و ویلاشهر که جمعیتی نزدیک به ۳۰۰،۰۰۰ نفر دارد، استفاده می‌شود. این شبکه دارای ۲ مخزن، ۱ ایستگاه پمپاژ (۳ پمپ تیپ)، ۹۳۲۳ لوله، ۸۵۴۱ گره و ۶ شیر فشارشکن (۴ شیر فعال) است. محدوده مرزی شبکه، جانمایی مخازن و ایستگاه پمپاژ نجف‌آباد و جانمایی شیرهای فشارشکن

محاسبه می‌شود. ماتریس V_{ij} توسط معادله ۱۱ تعیین می‌شود

$$V_{ij} = W_j * r_{ij} \quad (11)$$

که در آن

W_j ، ماتریس ضرایب برای جواب‌های بهینه حاصل از تابع هدف زام است.

در گام سوم، گزینه بهینه مطلق مثبت و منفی، به ترتیب توسط معادلات ۱۲ و ۱۳ تعیین می‌شود

$$(12)$$

$$A_j^+ = \{V_j^+ | V_{ij} \text{ در ماتریس هدف در تابع هدف}\}$$

$$(13)$$

$$A_j^- = \{V_j^- | V_{ij} \text{ در ماتریس هدف در تابع هدف}\}$$

که در آنها

V_j^+ و V_j^- به ترتیب، بهترین و بدترین مقدار در تابع هدف زاست. در گام چهارم، فاصله هر جواب بهینه از جواب بهینه مطلق مثبت با تعریف پارامتر S_i^+ و فاصله هر جواب بهینه از جواب بهینه مطلق منفی با تعریف پارامتر S_i^- بر اساس معادلات ۱۴ و ۱۵ تعیین می‌شوند

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

که در آن

m تعداد توابع هدف است.

در گام پنجم، شاخص نزدیکی نسبی هر جواب به گزینه ایده‌آل طبق معادله ۱۶ به‌دست می‌آید و سپس رتبه‌بندی انجام می‌شود

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (16)$$

که در آن



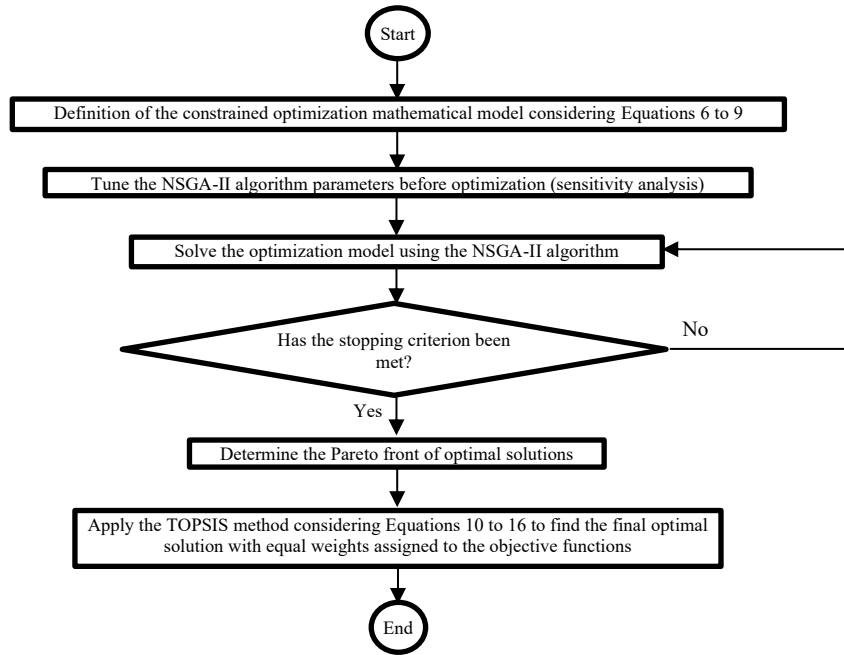


Fig. 1. Flowchart of the overall steps of the proposed method

شکل ۱- فلوچارت مراحل کلی روش پیشنهادی

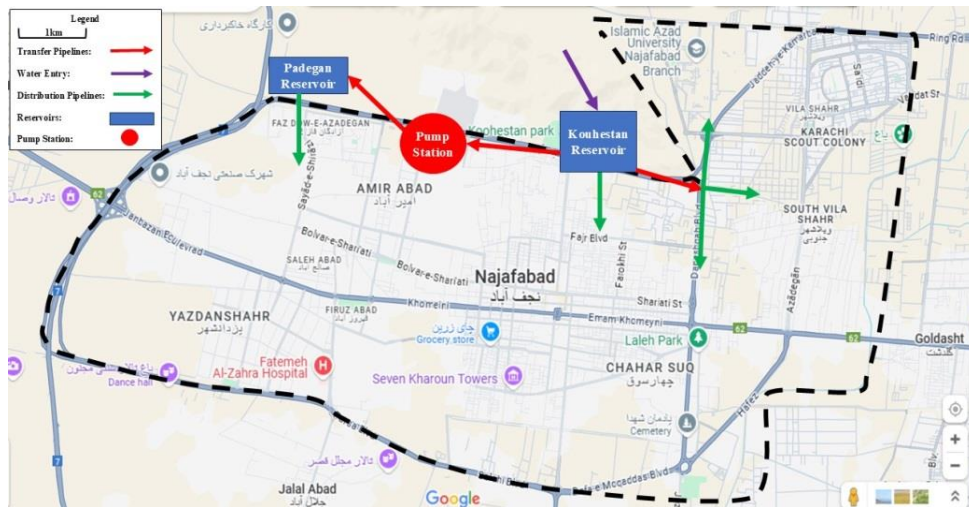


Fig. 2. Boundary of the Najaf Abad WDN, the location of reservoirs and pump stations (Jazayeri et al., 2024)

شکل ۲- محدوده مرزی شبکه آب نجف‌آباد و جانمایی مخازن و ایستگاه پمپاژ (Jazayeri et al., 2024)

در شکل ۴ ارائه شده است. همچنین، غلظت اولیه کلر در مخزن کوهستان و پادگان برای روز سرد سال به ترتیب برابر با ۰/۹۸ و ۰/۹۳ میلی‌گرم در لیتر و برای روز گرم سال به ترتیب برابر با ۱ و ۰/۹۵ میلی‌گرم در لیتر

فعال (دایره زرد رنگ)، به ترتیب مطابق با شکل‌های ۲ و ۳ است. این شبکه برای دو روز از سال ۱۴۰۲، شامل سردترین روز سال (مورخ ۱۴۰۲/۱۰/۴) و گرم‌ترین روز سال (مورخ ۱۴۰۲/۰۵/۲۷) تحلیل شد. ضرایب مصرف ساعتی در این شبکه



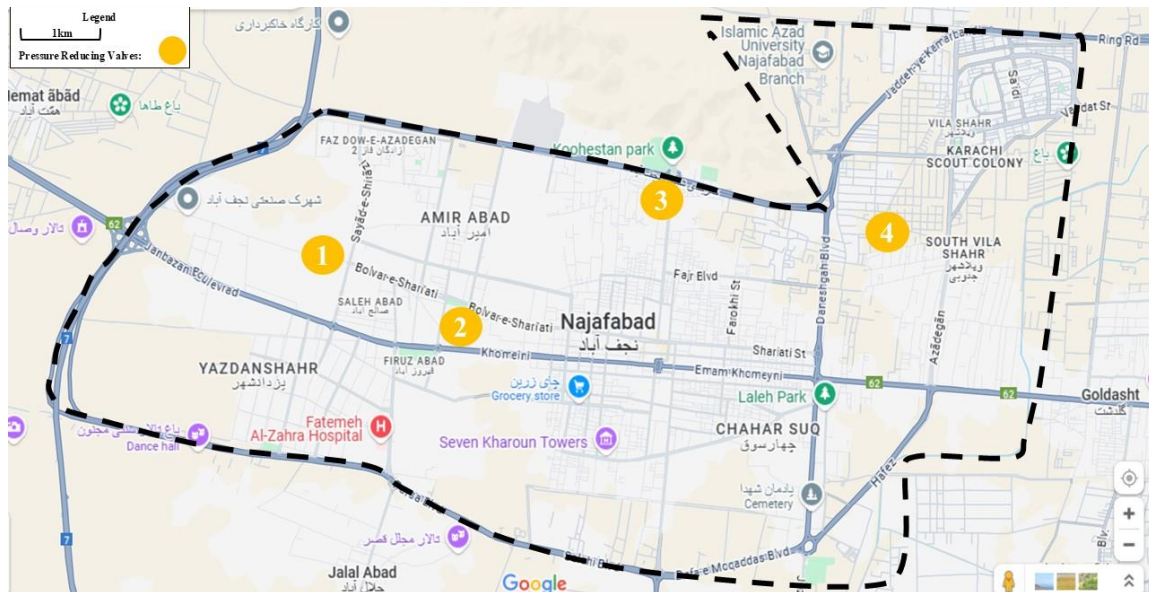


Fig. 3. Location of PRVs in the Najaf Abad WDN

شکل ۳- جانمایی شیرهای فشارشکن شبکه آب نجف‌آباد

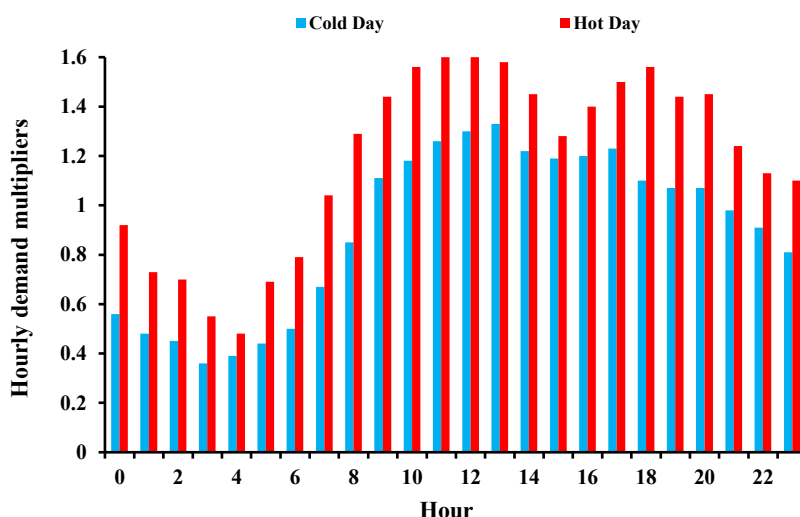


Fig. 4. Hourly Demand coefficients for the cold and warm days of the year 1402 in the Najaf Abad WDN

شکل ۴- ضرایب مصرف ساعتی برای روزهای سرد و گرم سال ۱۴۰۲ در شبکه آب نجف‌آباد

فشارشکن و حالت استفاده از شیرهای فشارشکن (بدون بهینه‌سازی بهره‌برداری سنتی کنونی) در جدول ۲ با یکدیگر مقایسه شده است. مطابق با این جدول، با استفاده از شیرهای فشارشکن، فشار متوسط شبکه برای روزهای گرم و سرد سال ۱۴۰۲ به ترتیب برابر با ۸/۷ و ۷/۲ درصد کاهش یافت. همچنین، میزان غلظت کلر متوسط شبکه نیز برای روزهای گرم و سرد سال ۱۴۰۲ به ترتیب برابر با ۶/۴ و ۷/۴ درصد کاهش یافت. بنابراین با استفاده از

بود. بیان این نکته ضروری است که غلظت اولیه کلر برای تمامی گره‌های شبکه در محدوده [۰/۲، ۰/۸] میلی‌گرم در لیتر بود. مقدار فشار تنظیمی PRVs در شبکه آب نجف‌آباد، به همراه فشار و غلظت کلر متوسط در شبکه قبل از حل مدل بهینه‌سازی (بهره‌برداری سنتی کنونی)، در جدول ۱ ارائه شده است. شایان ذکر است که مقدار فشار، غلظت کلر متوسط در شبکه و اعتمادپذیری ترکیبی شبکه در حالت بدون استفاده از شیرهای



جدول ۱- فشار تنظیمی شیرهای فشارشکن، فشار و غلظت کلر متوسط و اعتمادپذیری ترکیبی شبکه آب نجف‌آباد قبل از بهینه‌سازی

Table 1. Set pressure of the PRVs, average pressure and chlorine concentration, and hybrid reliability of the Najaf Abad WDN before optimization

Day in the year 2023	Set point for the 1 st PRV (m)	Set point for the 2 nd PRV (m)	Set point for the 3 rd PRV (m)	Set point for the 4 th PRV (m)	Average pressure of the WDN (m)	Average chlorine concentration of the WDN (mg/L)	Hybrid reliability of the WDN (%)
Hot days	17	25	30	27	24.0	0.363	47.1
Cold days	15	20	30	25	31.1	0.400	54.3

جدول ۲- مقایسه فشار و غلظت کلر باقیمانده متوسط شبکه و اعتمادپذیری ترکیبی شبکه قبل از استفاده از شیرهای فشارشکن با حالت استفاده از شیرهای فشارشکن (بهره‌برداری سنتی از آن)

Table 2. Comparison of the average pressure and residual chlorine concentration, and hybrid reliability of the WDN before and after the use of PRVs (traditional operation of these valves)

Day in the year 2023	Average pressure of the WDN			Average chlorine concentration of the WDN			Hybrid reliability of the WDN		
	Without using the PRVs (m)	With Using the PRVs (m)	Improvement (%)	Without using the PRVs (mg/L)	With using the PRVs (mg/L)	Improvement (%)	Without using the PRVs (%)	With Using the PRVs (%)	Improvement (%)
Hot days	27.3	24.0	8.7	0.388	0.363	6.4	51.1	47.1	7.8
Cold days	33.5	31.1	7.2	0.432	0.400	7.4	60.2	54.3	9.8

جدول ۳- انتخاب مقدار تصادفی برای فشار تنظیمی شیرهای فشارشکن شبکه نجف‌آباد (بدون بهینه‌سازی)

Table 3. Selection of random values for the set pressure of PRVs in Najaf Abad WDN (without optimization)

Day in the year 2023	Set point for the 1 st PRV (m)	Set point for the 2 nd PRV (m)	Set point for the 3 rd PRV (m)	Set point for the 4 th PRV (m)	Average chlorine concentration (mg/L)
Hot days	17	22	32	26	0.355
Cold days	15	16	30	26	0.390

استفاده از شیرهای فشارشکن و بهره‌برداری سنتی کنونی (قبل از بهینه‌سازی) به ترتیب برابر با ۲/۲ و ۲/۵ درصد کاهش یافت. به‌طور کلی و با بررسی جداول ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که استفاده یا عدم استفاده از شیرهای فشارشکن، بر روی میزان غلظت کلر متوسط شبکه تأثیر گذاشته و همچنین در حالت استفاده از شیرهای فشارشکن، با انتخاب مقدار مختلف برای فشار تنظیمی شیرها، میزان غلظت کلر متوسط شبکه نیز همچنان تغییر می‌کند. بنابراین در این پژوهش، تابع هدف حداکثرسازی غلظت کلر متوسط شبکه

شیرهای فشارشکن در شبکه و بهره‌برداری سنتی از آن (بدون بهینه‌سازی)، مقدار غلظت کلر متوسط شبکه نیز تغییر یافت. در صورتی که برای تنظیم فشار شیرهای فشارشکن شبکه از بهینه‌سازی استفاده نشود و مقدار دیگری برای فشار تنظیمی این شیرها مطابق با جدول ۳ انتخاب شود، میزان غلظت کلر باقیمانده نیز همچنان تغییر می‌کند. مطابق با مقدار این جدول، مقدار غلظت کلر متوسط شبکه برای روزهای گرم و سرد سال ۱۴۰۲ به ترتیب برابر با ۰/۳۵۵ و ۰/۳۹۰ میلی‌گرم در لیتر شد که نسبت به حالت



از تصفیه‌خانه آب باباشیخعلی شروع می‌شود. برای فصول گرم و سرد به ترتیب برابر با $0/53$ و $0/20$ بر روز محاسبه شده است. همچنین مقدار K_w برای فصول گرم و سرد به ترتیب برابر با $0/20$ و $0/13$ متر بر روز محاسبه شده است. (Frouzandeh et al., 2020)

از آنجایی که آب شبکه نجف‌آباد از ابتدای این خطوط انتقال تأمین می‌شود بنابراین، ضریب K_b در شبکه توزیع آب شهری نجف‌آباد برابر با مقدار $0/53$ و $0/20$ بر روز برای فصول گرم و سرد سال منظور می‌شود. ولی مقدار K_w در این شبکه، با استفاده از بهینه‌سازی کالیبراسیون کیفی تعیین می‌شود.

در مدل بهینه‌سازی کالیبراسیون کیفی، تابع هدف، کاهش مجموع اختلاف مقدار غلظت کلر باقیمانده اندازه‌گیری شده در شبکه با مقدار غلظت کلر باقیمانده حاصل از تحلیل مدل هیدرولیکی شبکه، است. در این مدل، 9323 متغیر تصمیم برای مسئله وجود داشته (ضرایب K_w برای تمامی لوله‌های شبکه) که با تحلیل شبکه و انجام بهینه‌سازی، مقدار بهینه هر یک تعیین شده است. شایان ذکر است که بازه مجاز در نظر گرفته شده برای این ضرایب، $0/01$ تا $0/30$ متر بر روز است. پس از انجام کالیبراسیون کمی (فشار) و کیفی (غلظت کلر باقیمانده شبکه)، مقدار پارامترهای کالیبره شده برای برخی لوله و گره‌های مدل هیدرولیکی نجف‌آباد در جدول ۴ ارائه شده است.

۴- نتایج و بحث

در این بخش نتایج روش پیشنهادی ارائه شده است. در ابتدا، کلیه مقدار حاصل از تحلیل PDA برای شبکه توزیع آب شهری نجف‌آباد ارائه می‌شود. همچنین، نتایج حل مدل ریاضی و با استفاده از الگوریتم NSGA-II، سپس نتایج سطح پارتو و در نهایت، جواب‌های بهینه تعیین شده با استفاده از روش تاپسیس، ارائه شده است.

در ابتدا برای حل مدل بهینه‌سازی، پارامترهای مناسب الگوریتم NSGA-II با استفاده از تحلیل حساسیت تعیین شد. با انجام تحلیل حساسیت برای پارامترهای الگوریتم، برای عملگر چرخ رولت ترکیب، مقدار $0/87$ ، برای عملگر یکتواخت جهش، مقدار $0/01$ ، 50 عضو برای جمعیت و 100 تکرار برای مسئله

در کنار دو تابع هدف دیگر حداقل‌سازی فشار متوسط شبکه و حداکثرسازی اعتمادپذیری ترکیبی شبکه منظور شد.

۲-۳- کالیبراسیون شبکه توزیع آب شهری نجف‌آباد

کالیبراسیون فرایندی ضروری برای اطمینان از عملکرد بهینه سیستم‌های توزیع آب است. این فرایند شامل تنظیم مدل‌های هیدرولیکی برای تطابق با داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده در شبکه است. برای انجام کالیبراسیون، روش‌های مختلفی وجود داشته که به‌طور مثال می‌توان با استفاده از سعی و خطا در یک روند تکراری و با تنظیم پارامترهای موردنظر، مدل هیدرولیکی را کالیبره کرد. به‌علاوه، با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی از جمله الگوریتم‌های فراکاوشی نیز می‌توان این روند سعی و خطا را به‌طور بهینه و در کمترین زمان ممکن انجام داد. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه (GA) به‌منظور کالیبراسیون پارامترهای ضریب زبری لوله‌ها (C_{HW})، دبی‌های تقاضای گره‌ای (Q) و ضرایب زوال دیواره کلر (K_b) استفاده شد تا در نهایت اختلاف مقدار فشار و غلظت کلر باقیمانده حاصل از مدل هیدرولیکی و اندازه‌گیری میدانی در شبکه، در بازه مجاز قرار گیرد. این روند به‌صورت جداگانه برای روزهای گرم و سرد سال 1402 برای شبکه توزیع آب شهری نجف‌آباد انجام شد.

در ابتدا برای پارامتر فشار، کالیبراسیون فشار انجام می‌شود. به‌این منظور، با تعریف مدل ریاضی بهینه‌سازی و سپس مدل با استفاده از GA حل شده و مقدار بهینه پارامترهای Q و C_{HW} تعیین می‌شوند. تابع هدف مدل، حداقل‌سازی مجموع اختلاف مقدار فشار نقاط فشارسنجی شبکه با نتایج فشار مدل هیدرولیکی شبکه است تا در نهایت، این مقدار با استفاده از بازه مجاز، به یکدیگر نزدیک شده و مدل قابل اعتماد باشد.

پس از کالیبراسیون فشار، باید غلظت کلر باقیمانده شبکه نیز کالیبره شود تا شبکه از لحاظ کیفی نیز قابل اعتماد و استفاده باشد. به‌این منظور نیاز است تا مقدار ضرایب زوال حجمی کلر (K_w) و ضرایب زوال دیواره کلر (K_b) برای شبکه نجف‌آباد در دسترس باشد. شرکت‌های آب و فاضلاب استان‌ها این ضرایب را در اختیار ندارند ولی در پژوهشی، مقدار این ضرایب برای شبکه انتقال آب اصفهان تعیین شده که در آن K_b برای شبکه انتقال آب اصفهان که



جدول ۴- مقدار پارامترهای کالیبره شده برای برخی لوله و گره‌های مدل هیدرولیکی نجف‌آباد

Table 4. Calibrated parameter values for some pipes and nodes of the Najaf Abad hydraulic model

Parameter	Pipe 1	Pipe 2	Pipe 598	Pipe 874	Pipe 1441	Pipe 2876	Pipe 4500	Pipe 8785	Pipe 9210
K_w (m/d)	0.22	0.28	0.04	0.11	0.17	0.30	0.25	0.16	0.19
C_{HW}	113	124	135	134	136	127	140	102	128
Parameter	Node	Node	Node	Node	Node	Node	Node	Node	Node
	212	1672	2317	3445	4670	5555	6703	7902	8533
Q_{k-new} (lps)	0.062	0.073	0.011	0.010	0.090	0.082	0.047	0.085	0.057

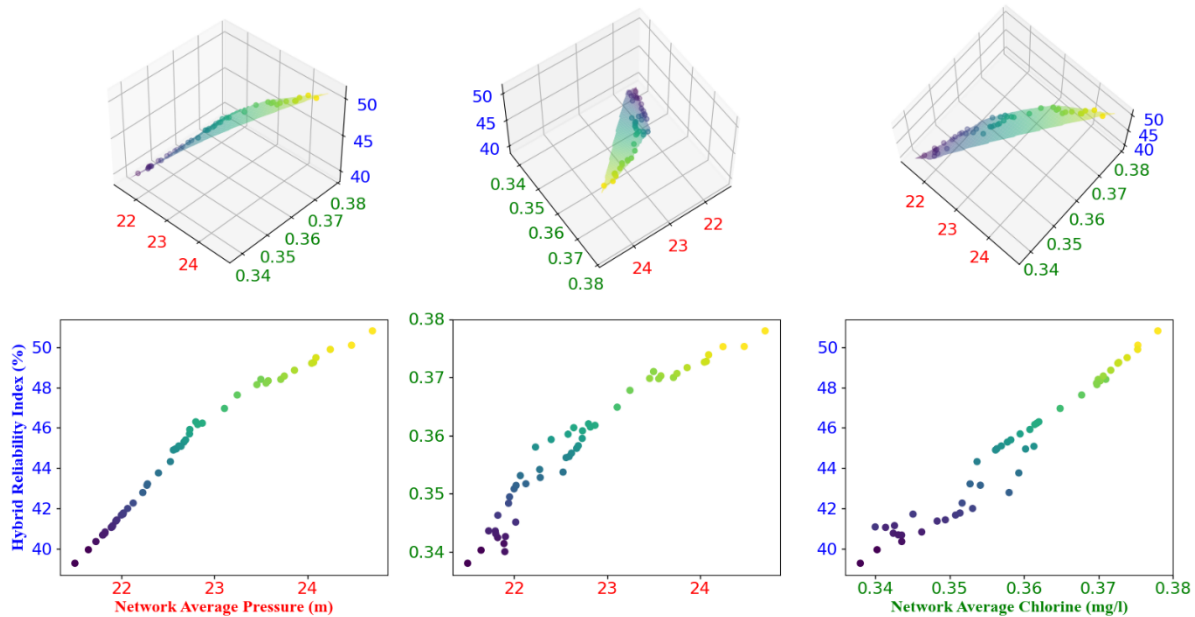


Fig. 5. The pareto front of the three-objective optimization model obtained from the NSGA-II algorithm for hot days in the year 2023

شکل ۵- سطح پارتوی مدل بهینه‌سازی سه‌هدفه حاصل از الگوریتم NSGA-II برای روزهای گرم سال ۱۴۰۲

ترکیبی شبکه) به صورت خطی ولی با شیب‌های مختلف است (مطابق معادله ۲)، ولی با مقایسه نمودارهای این دو شکل مشاهده می‌شود رابطه فشار متوسط شبکه (نه فشار گره‌ای) با مقدار اعتمادپذیری ترکیبی شبکه (نه اعتمادپذیری هیدرولیکی فشار گره‌ای) به صورت خطی است. در این دو شکل، نمودارهای دوعبده در کنار نمودارهای سه‌بعده (از نماهای مختلف) ارائه شده است. مقایسه سایر نمودارهای دوعبده نشان‌دهنده آن است که برای هر دو تابع هدف انتخابی، هیچ‌یک از آنها با یکدیگر رابطه خطی نداشته، ولی می‌توان با تقریبی یک خط (منحنی درجه ۲) به آنها برازش داد.

انتخاب شد. با حل مدل بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم NSGA-II، نمودار سطح پارتو برای مدل سه‌هدفه برای روزهای گرم و سرد سال ۱۴۰۲ مطابق با شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. در این دو شکل محورهای قرمز، سبز و آبی رنگ به ترتیب نشان‌دهنده میزان فشار متوسط شبکه (متر)، میزان غلظت کلر باقیمانده متوسط شبکه (میلی‌گرم در لیتر) و میزان اعتمادپذیری ترکیبی شبکه (%) است. مطابق با نمودارهای شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که پس از بهینه‌سازی و حل مدل، تعداد نقاط بهینه سطح پارتو، کمتر از ۵۰ نقطه برای هر دو روز است. همچنین، با توجه به آنکه رابطه فشار گره‌ای با اعتمادپذیری هیدرولیکی فشار گره‌ای (نه اعتمادپذیری



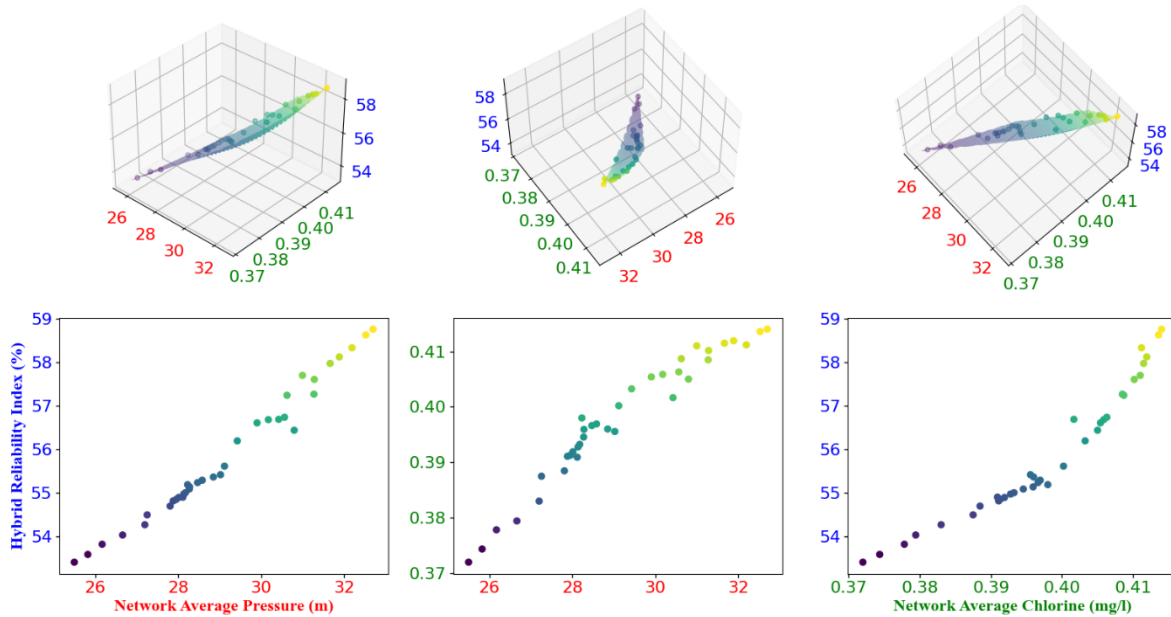


Fig. 6. The pareto front of the three-objective optimization model obtained from the NSGA-II algorithm for the cold days in the year 2023

شکل ۶- سطح پارتوی مدل بهینه‌سازی سه‌هدفه حاصل از الگوریتم NSGA-II برای روزهای سرد سال ۱۴۰۲

جدول ۵- مقدار ماتریس‌های DM

Table 5. The values of the DM matrices

Day in the year 2023	The arrays of DM matrices		
	Average pressure of the WDN (m)	Average chlorine concentration of the WDN (mg/l)	Hybrid reliability of the WDN (%)
Hot days	21.5	0.342	39.6
	22.2	0.350	43.2
	23.3	0.366	47.9
	24.6	0.388	50.1
Cold days	25.7	0.379	53.3
	26.9	0.398	55.0
	30.8	0.414	56.3
	32.2	0.428	58.1

در این پژوهش، مقدار آرایه‌های ماتریس ضرایب توابع هدف (W_j) ، $0/33$ منظور شد. به عبارت دیگر، وزن‌های هر سه تابع هدف یکسان منظور شد که ماتریس تصمیم‌گیری نرمالیزه شده وزن‌دار (V_{ij}) به صورت جدول ۷ تعیین شده است. همچنین، گزینه‌های بهینه مطلق مثبت و منفی مطابق جدول ۸ ارائه شده است. در جدول ۹، مقدار پارامترهای S_1^+ و S_1^- برای دسته جواب بهینه نهایی مقدار شاخص نزدیکی برای دسته جواب بهینه نهایی روزهای گرم و سرد سال ارائه شده است.

در ادامه، جواب بهینه نهایی از بین مجموعه جواب‌های پارتو توسط روش تاپسیس انتخاب شد. به این منظور، در ابتدا ماتریس جواب‌های مدل بهینه‌سازی (DM)، برای روزهای گرم و سرد به شرح جدول ۵ تعیین می‌شود. در این جدول ماتریسی، ستون اول، دوم و سوم به ترتیب جواب‌های بهینه حاصل از تابع هدف اول، دوم و سوم است. همچنین، ماتریس نرمالیزه شده جواب‌ها (NM) نیز در جدول ۶ ارائه شده است.



جدول ۶- مقدار ماتریس‌های NM
Table 6. The values of the NM matrices

Day in the year 2023	The arrays of NM matrices		
	Average pressure of the WDN (m)	Average chlorine concentration of the WDN (mg/L)	Hybrid reliability of the WDN (%)
Hot days	0.469	0.473	0.436
	0.484	0.483	0.476
	0.508	0.506	0.528
	0.536	0.536	0.552
Cold days	0.443	0.470	0.478
	0.463	0.491	0.494
	0.531	0.511	0.505
	0.555	0.528	0.521

جدول ۷- مقدار ماتریس‌های V_{ij}
Table 7. The values of the V_{ij} matrices

Day in the year 2023	The arrays of V_{ij} matrices		
	Average pressure of the WDN (m)	Average chlorine concentration of the WDN (mg/L)	Hybrid reliability of the WDN (%)
Hot days	0.155	0.156	0.144
	0.160	0.159	0.157
	0.168	0.170	0.174
	0.177	0.177	0.182
Cold days	0.146	0.155	0.158
	0.153	0.162	0.163
	0.175	0.169	0.167
	0.183	0.174	0.172

جدول ۸- گزینه‌های بهینه مطلق مثبت و منفی برای روزهای گرم و سرد سال ۱۴۰۲

Table 8. The absolute positive and negative optimal options for the hot and cold days of the year 2023

Absolute positive and negative optimal options	Average pressure of the WDN (m)	Average chlorine concentration of the WDN (mg/l)	Hybrid reliability of the WDN (%)
A_{j-hot}^+	0.155	0.177	0.182
A_{j-hot}^-	0.177	0.156	0.144
A_{j-cold}^+	0.146	0.174	0.172
A_{j-cold}^-	0.183	0.155	0.158

جدول ۹- مقدار پارامترهای S_i^+ و S_i^- و C_i برای دسته جواب بهینه نهایی در روزهای گرم و سرد سال ۱۴۰۲

Table 9. The values of the parameters S_i^+ , S_i^- , and C_i for the final optimal solution set on the hot and cold days of the year 2023

Day in the year 2023	Parameters	Values	Parameters	Values
Hot days	S_i^+	0.016	C_i	0.680
	S_i^-	0.034		
Cold days	S_i^+	0.016		0.660
	S_i^-	0.031		



جدول ۱۰- مقدار فشار تنظیمی بهینه شیرهای فشارشکن، فشار و غلظت کلر متوسط و اعتمادپذیری شبکه آب نجف‌آباد حاصل از روش پیشنهادی برای روزهای گرم و سرد سال ۱۴۰۲

Table 10. The optimal set pressure values for PRVs, average pressure and average chlorine concentration, and reliability of the Najaf Abad WDN obtained from the proposed method for the hot and cold days of the year 2023

Day in the year 2023	Set point for the 1 st PRV (m)	Set point for the 2 nd PRV (m)	Set point for the 3 rd PRV (m)	Set point for the 4 th PRV (m)	Average pressure of the WDN (m)	Average chlorine concentration of the WDN (mg/L)	Hybrid reliability of the WDN (%)
Hot days	12	13	26	27	23.3	0.363	47.9
Cold days	17	21	26	26	26.9	0.398	55.0

جدول ۱۱- بهبود توابع هدف در شبکه قبل و بعد از بهینه‌سازی شیرهای فشارشکن در روزهای گرم و سرد سال ۱۴۰۲

Table 11. Improvement in the objective of the WDN before and after optimizing the PRVs on the hot and cold days of the year 2023

Day in the year 2023	Average pressure of the WDN			Average chlorine concentration of the WDN			Hybrid reliability of the WDN		
	Before (m)	After (m)	Improvement (%)	Before (mg/L)	After (mg/L)	Improvement (%)	Before (%)	After (%)	Improvement (%)
Hot days	24.0	23.3	2.9	0.363	0.366	0.1	47.1	47.9	1.7
Cold days	31.1	26.9	13.5	0.400	0.398	0	54.3	55.0	1.3

پیشنهادی در بهینه‌سازی هم‌زمان توابع هدف کم‌آبی و کیفی است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از الگوریتم چندهدفه NSGA-II، فشار تنظیمی بهینه شیرهای فشارشکن در شبکه توزیع آب شهری نجف‌آباد تعیین شد. به این منظور یک مدل بهینه‌سازی تعریف شد که توابع هدف مسئله شامل حداقل‌سازی فشار متوسط شبکه و حداکثرسازی غلظت کلر باقیمانده متوسط و اعتمادپذیری ترکیبی شبکه بود. با حل مدل بهینه‌سازی سطح پارتوی جواب‌ها تعیین شد. در انتها از میان جواب‌های بهینه پارتو، جواب بهینه نهایی با استفاده از روش تاپسیس تعیین و نتایج قبل و بعد از بهینه‌سازی با یکدیگر مقایسه شدند.

مقایسه نتایج نشان داد که اگرچه با انجام بهینه‌سازی، مقدار غلظت کلر متوسط شبکه تغییر قابل توجهی نداشته، ولی با استفاده از بهینه‌سازی از کاهش مجدد آن نیز جلوگیری شده که به‌نوعی در راستای بهینه‌کردن مقدار این تابع هدف است. همچنین، مقدار فشار متوسط شبکه با استفاده از بهینه‌سازی برای روزهای گرم و سرد سال

در نهایت، مقدار فشارهای تنظیمی بهینه و مقدار توابع هدف به‌ازای جواب‌های بهینه نهایی برای روزهای گرم و سرد سال ۱۴۰۲ به شرح جدول ۱۰ است.

زمانی که جواب بهینه نهایی برای روزهای گرم و سرد سال ۱۴۰۲ تعیین شد، مقدار فشار، غلظت کلر باقیمانده و اعتمادپذیری ترکیبی بهبود یافت. میزان بهبود این مقدار، قبل و بعد از بهینه‌سازی با توجه به جواب‌های بهینه نهایی در جدول ۱۱ ارائه شده است.

با مقایسه نتایج جدول ۱۱ مشاهده می‌شود که با انجام بهینه‌سازی چندهدفه روش پیشنهادی، مقدار فشار متوسط شبکه و اعتمادپذیری ترکیبی شبکه نسبت به حالت بهره‌برداری سنتی کنونی شیرهای فشارشکن، بهبود داشته‌اند. این در حالی است که میزان غلظت کلر متوسط شبکه تغییری نکرده است. بیان این نکته ضروری است که با مقایسه تابع هدف حداکثرسازی غلظت کلر متوسط شبکه در جداول ۳ و ۱۱، مقدار غلظت کلر متوسط شبکه همچنان می‌توانست با تغییر فشار تنظیمی شیرها، کاهش یابد ولی با انجام بهینه‌سازی، مقدار این تابع هدف کاهش نیافته و به‌نوعی بهینه شده است. به‌طورکلی، بررسی نتایج نشان‌دهنده عملکرد مطلوب روش



به‌صورت هم‌زمان بهینه شدند که نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش پیشنهادی برای مدیریت جامع شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن هم‌زمان پارامترهای کمی و کیفی است.

در این پژوهش، تأثیر هر سه تابع هدف برای انجام بهینه‌سازی، با وزن‌های یکسان در نظر گرفته شد. حال آنکه در پژوهش‌های آینده می‌توان بر اساس اهمیت بیشتر یکی از این توابع نسبت به سایرین، وزن آن را تغییر داد و نتایج را بررسی کرد. همچنین، می‌توان توابع هدف دیگری را با توابع هدف این پژوهش مقایسه کرد. به‌عنوان نمونه، معیارهای آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری در شبکه آب با استفاده از الگوریتم NSGA-II و هر سه معیار اعتماد‌پذیری، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری با استفاده از الگوریتم NSGA-III یا هر الگوریتم بهینه‌سازی دیگری بررسی شود.

۶-ق‌ردانی

نویسندگان بر خود لازم دانسته تا از شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان و امور آب و فاضلاب نجف‌آباد که اطلاعات شبکه توزیع آب شهری نجف‌آباد را در اختیار قرار دادند، قدردانی کنند.

۱۴۰۲ به ترتیب ۲/۹ و ۱۳/۵ درصد کاهش یافت. کاهش فشار متوسط شبکه باعث افزایش طول عمر المان‌های شبکه شده، از مصارف مازاد ناشی از افزایش فشار شبکه جلوگیری کرده و همچنین با در نظر گرفتن رابطه مستقیم فشار با نشت، میزان نشت شبکه نیز کاهش می‌یابد. همچنین، مقدار اعتماد‌پذیری شبکه با استفاده از الگوریتم NSGA-II برای روزهای گرم و سرد سال ۱۴۰۲ به ترتیب ۱/۷ و ۱/۳ درصد افزایش یافت و باعث سرویس‌دهی بهتر به مشترکین شبکه شد.

بررسی نتایج نشان داد که کلیه مقدار متغیر تصمیم مسئله (فشار تنظیمی شیرهای فشارشکن) در محدوده مجاز قرار دارد و همچنین، فشارها و غلظت‌های کلر باقیمانده گره‌ای با توجه به معادلات ۸ و ۹ در بازه موردنظر قرار دارند و جواب‌های بهینه و امکان‌پذیر تعیین شد. به‌طور خلاصه در این پژوهش، تابع هدف کیفی غلظت کلر متوسط شبکه در کنار سایر اهداف کمی (فشار و اعتماد‌پذیری ترکیبی) منظور شد تا تأثیر پارامترهای کمی (فشار) بر روی پارامترهای کیفی (غلظت کلر باقیمانده) بررسی شود. در نهایت کلیه اهداف کمی و کیفی توسط بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II

References

- AbdelMeguid, H. and Ulanicki, B., 2010. Pressure and leakage management in water distribution systems via flow modulation PRVs. *Water Distribution Systems Analysis*, 1124-1139. [https://doi.org/10.1061/41203\(425\)102](https://doi.org/10.1061/41203(425)102).
- Ardeshir, A., Behzadian, K., Alimohamadnejad, M., Jaliliani, F. and Forutan Alizadegan, H., 2017. Optimal chlorination of water distribution systems with respect residual chlorine and formation of THM. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33(3.1), 21-29. (In Persian). <https://doi.org/10.24200/j30.2017.20073>.
- Bazovski, I., 1961. *Reliability Theory and Practice*, Prentice Hall, Englewood. New Jersey.
- Coello, C. A. C., Lamont, G. B. and Veldhuizen, D. A. V., 2007. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Springer, New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-36797-2>.
- De Paola, F., Giugni, M. and Portolano, D., 2017. Pressure management through optimal location and setting of valves in water distribution networks using a music-inspired approach. *Water Resources Management*, 31(5), 1517-1533. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1592-y>.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T., 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.
- Dini, M. and Asadi, A., 2020. Optimal operational scheduling of available partially closed valves for pressure management in water distribution networks. *Water Resources Management*, 34, 2571-2583. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02579-4>.
- Dini, M. and Tabesh, M., 2019. Optimal renovation planning of water distribution networks considering hydraulic and quality reliability indices. *Urban Water Journal*, 16(4), 249-258. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1669185>.



- Dini, M., Mohammadikaleibar, A., Hashemi, S. and Nourani, V., 2022. Stochastic long-term reliability of water distribution networks using Monte Carlo simulation. *Urban Water Journal*, 19(2), 151-160. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.1971264>.
- Fernández García, I., Ferras, D. and Mc Nabola, A., 2019. Potential of energy recovery and water saving using micro-hydropower in rural water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(3), 05019001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001045](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001045).
- Ferrarese, G., Fontana, N., Gioffreda, S., Malavasi, S. and Marini, G., 2022. Pressure reducing valve setting performance in a variable demand water distribution network. *Environmental Sciences Proceedings*, 21(1), 61. <https://doi.org/10.3390/envirosci2022021061>.
- Frouzandeh, Y., Dehnavi, A. and Shanehsazzadeh, A., 2020. Application of multiple-part method length of line to improve the simulation of chlorine decay in big Isfahan water conveyance line. *Journal of Water and Wastewater*, 31(1), 1-11. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2019.176018.2842>.
- Hwang, C. L., Yoon, K., 1981. Methods for multiple attribute decision making. In: Hwang, C. L. and Yoon, K., Ed. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications a State-of-the-Art Survey*, Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 58-191. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3.
- Jazayeri, P., Safavi, H., Nazemizadeh, M., Ebrahimi, M. S. and Rahmatpanah, A., 2024. Daily urban water consumption prediction and optimization of pumping station operation hours: a case study of Najaf Abad. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 9(3), 17-28. <https://doi.org/10.22112/jwwse.2024.411391.1373>.
- Khashei, M., Tabesh, M., Shahangian, S. A. and Abbasi, M., 2022. The effect of demand management using optimal pressure regulation in WDNs during normal and water scarcity conditions. *Journal of Water and Wastewater*, 33(5), 1-18. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2022.318859.3206>.
- Koşucu, M. M. and Demirel, M. C., 2024. Cost efficiency assessment of four pressure management methods in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 150(3), 05023022. <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-5984>.
- Kyriakou, M. S., Demetriades, M., Vrachimis, S. G., Eliades, D. G. and Polycarpou, M. M., 2023. EPyT: an EPANET-Python Toolkit for smart water network simulations. *Journal of OpenSource Software*, 8(92), 5947. <https://doi.org/10.21105/joss.05947>.
- Lambora, A., Gupta, K. and Chopra, K., 2019. Genetic algorithm-a literature review. In *2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon)*, 380-384. <https://doi.org/10.1109/COMITCon.2019.8862255>.
- Moslehi, I., Ghazizadeh, M. J. and Yousefi-Khoshqalb, E., 2020. An economic valuation model for alternative pressure management schemes in water distribution networks. *Utilities Policy*, 67, 101129. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101129>.
- Patelis, M., Kanakoudis, V. and Kravvari, A., 2020. Pressure regulation vs. water aging in water distribution networks. *Water*, 12(5), 1323. <https://doi.org/10.3390/w12051323>.
- Vazifehdoest Saleh, P., Yazdi, J. and Moridi, A., 2024. Pressure management in water distribution networks with optimal placement of pressure relief valve and pump as turbine. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 9(2), 31-42. (In Persian). <https://doi.org/10.22112/jwwse.2023.389161.1355>.
- Wagner, J. M., Shamir, U. and Marks, D. H., 1988. Water distribution reliability: simulation methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(3), b276-294. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1988\)114:3\(276\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:3(276)).

