

Evaluating Pressure-Driven vs. Demand-Driven Strategies in Water Network Optimization

Mohammad AmelSadeghi¹ 

1. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University, Takestan Branch, Takestan, Iran. E-mail: m.amelsadeghi@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 01 Nov 2025
 Revised 26 Nov 2025
 Accepted 30 Nov 2025
 Published 26 Dec 2025

Keywords:

Pressure-Driven Analysis (PDA),
 Demand-Driven Analysis (DDA),
 Network Leakage,
 Bat Optimization Algorithm,
 Hydraulic Reliability.

ABSTRACT

In recent decades, growing pressure on water resources - particularly in arid and semi-arid regions - has highlighted the need for intelligent management of urban water distribution systems. One of the major challenges in this field is water leakage, which leads to resource loss and decreases the hydraulic reliability of the network. This study presents a comparative analysis of the Demand-Driven Analysis (DDA) and Pressure-Driven Analysis (PDA) approaches for the simulation and optimization of a water distribution network. The hydraulic model was developed in EPANET, while the optimal scheduling of pressure reducing valves (PRVs) was achieved through the Bat Optimization Algorithm (BOA) implemented in MATLAB. Simulations were conducted over 24 hours for two reservoir head levels (185 m and 205 m) and three leakage rates (0%, 25%, 45%). The results revealed that both approaches exhibit a decline in the reliability index as leakage increases; however, the PDA model more accurately represents real hydraulic behavior due to its pressure–flow dependency. Moreover, increasing the reservoir head significantly improved network reliability. Therefore, integrating pressure-driven modeling with intelligent optimization algorithms can provide an effective framework for controlling pressure and managing leakage in urban water distribution systems.

Cite this article: AmelSadeghi M. Evaluating pressure-driven vs. demand-driven strategies in water network optimization. *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(4): 23-32.
<https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.14522.1024>.

Evaluating Pressure-Driven vs. Demand-Driven Strategies in Water Network Optimization

Mohammad AmelSadeghi¹ 

1. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University, Takestan Branch, Takestan, Iran. E-mail: m.amelsadeghi@gmail.com

Extended Abstract

Background and Objective

In recent decades, increasing pressure on global water resources-particularly in arid and semi-arid regions-has emphasized the necessity for efficient and intelligent management of urban water distribution systems. Leakage in water supply networks remains one of the most critical challenges in this field. It not only leads to the waste of valuable resources but also undermines the hydraulic stability and reliability of the network, imposing substantial economic, environmental, and social consequences. Studies have shown that leakage can account for up to 30% of the total supplied water in some regions, highlighting the importance of accurate modeling and optimal control strategies for minimizing losses.

Among the available hydraulic modeling frameworks, two principal approaches are widely used for network simulation: The Demand-Driven Analysis (DDA) and the Pressure-Driven Analysis (PDA). The DDA model assumes that each consumer node receives its full water demand, regardless of the prevailing pressure conditions. Although this approach simplifies computations, it often fails to represent real network behavior under abnormal conditions such as pressure drops, pipe bursts, or leakage events. Conversely, the PDA model considers the nonlinear dependency between pressure and flow, thereby providing a more realistic representation of system behavior under variable hydraulic conditions.

Given these considerations, the present study aims to conduct a comparative analysis of DDA and PDA approaches in modeling the hydraulic performance of an urban water distribution network. The objective is to evaluate how the two approaches differ in estimating network reliability and leakage behavior under different operational scenarios and reservoir head levels. Furthermore, this research integrates a metaheuristic optimization method-the Bat Optimization (BO) algorithm-to determine the optimal time-based control schedule for pressure reducing valves (PRVs), aiming to improve pressure regulation and minimize leakage in the network.

Methodology

The hydraulic simulations were conducted using the EPANET software, which provides a robust environment for modeling steady and unsteady flow in pressurized pipe networks. The study network, a benchmark system originally introduced by Alperovits and Shamir, includes two storage reservoirs, two PRVs, eight demand nodes, and nine connecting pipes. The network configuration was selected due to its capability to represent realistic dynamic conditions such as head loss, pressure fluctuations, and flow reversals.

Two head levels for the reservoirs-185 m and 205 m-and three leakage rates-0%, 25%, and 45%-were considered to examine the influence of energy level and leakage intensity on network reliability. The demand pattern was defined for 24 hours, with hourly variations reflecting typical domestic and commercial water consumption behavior.

To optimize the valve control schedule, the Bat Optimization (BO) algorithm was implemented in the MATLAB environment. This algorithm, inspired by the echolocation behavior of bats, iteratively searches for optimal solutions by updating frequency, velocity, and position parameters of each agent based on the best current solution. The objective function was designed to maximize the nodal pressure reliability index (NPRI) while minimizing total network leakage and energy loss. The coupling between EPANET and MATLAB allowed for automated simulation runs and evaluation of network performance metrics during each iteration of the optimization process.

For performance evaluation, both DDA and PDA models were run under identical conditions. The PDA approach was implemented using pressure-dependent emitter equations to simulate the relationship between nodal pressure and outflow, ensuring a realistic assessment of leakage and flow distribution across the network.

Findings

The simulation and optimization results revealed significant differences between the DDA and PDA models in capturing the network's hydraulic behavior under varying leakage and pressure conditions.

Under the DDA framework, the reliability index showed a consistent decline with increasing leakage. At a reservoir head of 205 m, the reliability decreased from 0.797 (no leakage) to 0.776 (45% leakage), while at 185 m, it dropped from 0.562 to 0.473. This pattern indicates that the DDA model tends to overestimate network performance because it neglects the pressure–flow relationship, leading to unrealistic stability predictions during low-pressure events. Additionally, leakage volume was found to rise considerably with increasing leakage percentage, reaching up to 143 units at 205 m head.

In contrast, the PDA model demonstrated a more robust and realistic response. Although the overall reliability index also declined slightly with higher leakage rates, the reduction was much less pronounced compared to the DDA results. For instance, the reliability index for the 205 m head decreased only marginally from 0.797 to 0.776, while for 185 m, it remained nearly constant around 0.702–0.701. This behavior suggests that the PDA model more accurately represents the hydraulic resilience of the network under variable pressure conditions, as it inherently accounts for the interdependence between flow and pressure at each node. The comparative analysis confirmed that the PDA approach provides a more reliable and physically consistent representation of water distribution systems, particularly when modeling leakage and pressure fluctuations. The model's ability to dynamically adjust flow rates based on actual pressure values resulted in improved accuracy of leakage estimation and reliability evaluation. Furthermore, optimization using the Bat Algorithm effectively enhanced the operational performance of PRVs by minimizing unnecessary pressure peaks during off-peak demand hours and ensuring adequate supply during high-demand periods. The optimized control schedule contributed to a noticeable reduction in total leakage and improved network

energy efficiency without compromising service reliability. Overall, the study highlights that combining the Pressure-Driven Analysis (PDA) approach with intelligent metaheuristic optimization techniques such as the Bat Algorithm can significantly enhance the decision-making process in pressure management, leakage reduction, and operational reliability of urban water distribution systems.

Conclusion

This study develops an optimal PRV scheduling framework to compare PDA and DDA approaches in urban water networks. Using the Bat Algorithm in MATLAB and EPANET simulations, various leakage (0–45%) and reservoir head (185–205 m) scenarios were tested. PDA consistently showed higher pressure reliability, confirming its superior hydraulic realism. An increased head improved performance; leakage reduced it. Findings highlight the value of pressure control and smart optimization for efficient network management.

Keywords: Pressure-Driven Analysis (PDA), Demand-Driven Analysis (DDA), Network Leakage, Bat Optimization Algorithm, Hydraulic Reliability.

Cite this article: AmelSadeghi M. Evaluating pressure-driven vs. demand-driven strategies in water network optimization. *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(4): 23-32.
<https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.14522.1024>.

Declarations

- **Ethical Approval**

■ The paper is not currently being considered for publication elsewhere. All authors have been personally and actively involved in substantial work leading to the paper, and will take public responsibility for its content.

- **Competing interests**

■ Conflict of Interest - None

- **Availability of data and materials**

■ Data will be made available on the request.

- **Authors Contributions**

Mohammad AmelSadeghi performed the calculations, approved the analytical methods, supervised the findings of this work, discussed the results, and contributed to the final version of the paper.

- **Acknowledgements**

■ The author would like to thank all participants in the present study

- **Funding**

■ This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

تحلیل رویکردهای فشارمحور و تقاضامحور در بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی

محمد عامل صادقی^۱

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تاکستان، تاکستان، ایران. رایانامه: m.amelsadeghi@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۵ کلیدواژه‌ها: تحلیل فشار محور، تحلیل تقاضامحور، نشت شبکه، الگوریتم بهینه‌سازی خفاش، قابلیت اطمینان هیدرولیکی.	در دهه‌های اخیر، افزایش فشار بر منابع آب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ضرورت مدیریت هوشمند شبکه‌های توزیع آب شهری را دوچندان کرده است. یکی از چالش‌های اساسی در این حوزه، نشت آب از شبکه و افت قابلیت اطمینان هیدرولیکی است که علاوه بر اتلاف منابع، موجب کاهش پایداری عملکرد سامانه می‌شود. در این پژوهش، دو رویکرد تحلیلی تقاضامحور^۲ (DDA) و فشارمحور^۳ (PDA) در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شبکه آبرسانی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. برای این منظور، مدل هیدرولیکی شبکه در نرم‌افزار EPANET توسعه یافته و تنظیمات زمانی شیرهای فشارشکن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش^۴ (BO) در محیط MATLAB بهینه‌سازی شده است. شبیه‌سازی‌ها در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته و برای دو تراز ارتفاعی مخزن (۱۸۵ و ۲۰۵ متر) و سه سطح نشت (۰، ۲۵ و ۴۵ درصد) انجام شد. نتایج نشان دادند که در شرایط افزایش نشت، هر دو مدل کاهش شاخص قابلیت اطمینان را تجربه می‌کنند؛ با این حال، مدل فشارمحور به دلیل لحاظ نمودن وابستگی مستقیم دبی به فشار، قادر به بازنمایی دقیق‌تری از رفتار واقعی شبکه است. همچنین، افزایش تراز انرژی مخزن موجب بهبود چشمگیر شاخص قابلیت اطمینان گردید. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که به‌کارگیری رویکرد فشارمحور در کنار الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی، ابزاری مؤثر برای طراحی راهبردهای کنترل فشار و مدیریت نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری محسوب می‌شود.

استناد: عامل صادقی محمد. تحلیل تطبیقی رویکردهای فشارمحور و تقاضامحور در تنظیم شیرآلات و بهینه‌سازی عملکرد هیدرولیکی شبکه‌های آبرسانی. منابع آب و تغییر اقلیم. ۱۴۰۴؛ ۱(۴): ۲۳-۳۲. <http://doi.org/10.22091/wrcc.2025.14522.1024>

²- Demand-Driven Analysis

³- Pressure-Driven Analysis

⁴- Bat Optimization

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، افزایش فشار بر منابع آب شهری، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، موجب شده است که بهره‌وری و پایداری شبکه‌های توزیع آب به یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسان آب و مدیران شهری تبدیل شود. یکی از مهم‌ترین چالش‌های این شبکه‌ها، نشت آب در مسیر انتقال و توزیع است؛ پدیده‌ای که نه تنها منجر به اتلاف منابع ارزشمند می‌شود، بلکه کارایی هیدرولیکی سامانه را نیز به شدت کاهش می‌دهد [۱].

مطالعات نشان می‌دهند که در برخی مناطق، میزان نشت می‌تواند تا ۳۰ درصد از کل آب تولیدی را شامل شود [۲]، که این امر پیامدهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی گسترده‌ای به همراه دارد.

نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری اغلب ناشی از ترکیبی از عوامل ساختاری، هیدرولیکی و مدیریتی است. فشار بیش‌ازحد در خطوط انتقال، فرسودگی زیرساخت‌ها، کیفیت پایین اجرا، و تنظیم نامناسب شیرآلات از جمله دلایل اصلی بروز نشت محسوب می‌شوند. این عوامل نه تنها موجب اتلاف منابع ارزشمند آب می‌گردند، بلکه بهره‌وری هیدرولیکی سامانه را نیز به شدت کاهش می‌دهند و پیامدهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی قابل‌توجهی به همراه دارند [۳].

در این میان، مدیریت فشار به‌عنوان یکی از راه‌بردهای کلیدی برای کاهش نشت و بهبود عملکرد شبکه، مورد توجه ویژه قرار گرفته است. این رویکرد با تنظیم بهینه فشار در نقاط مختلف شبکه، می‌تواند نرخ نشت را به‌طور مؤثری کاهش دهد و عمر مفید تجهیزات را افزایش دهد [۴ و ۵].

ابزارهای متعددی برای پیاده‌سازی مدیریت فشار وجود دارد که از میان آن‌ها، شیرهای فشارشکن^۴ (PRVs)

به‌دلیل قابلیت کنترل‌پذیری بالا و هزینه‌های به‌نسبت پایین، کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند.

پژوهش‌های میدانی و عددی نشان داده‌اند که استقرار راهبردی این شیرآلات، می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر نشت و افزایش قابلیت اطمینان شبکه شود [۶ و ۷]. با این حال، اثربخشی این راه‌کارها به شدت وابسته به نحوه مدل‌سازی و تحلیل رفتار هیدرولیکی شبکه است.

در این زمینه، دو رویکرد تحلیلی اصلی در مدل‌سازی شبکه‌های توزیع آب مطرح هستند: مدل‌های DDA و مدل‌های PDA.

در حالی که رویکرد تقاضامحور فرض می‌کند که مصرف‌کنندگان همواره نیاز خود را به‌طور کامل دریافت می‌کنند، مدل‌های فشارمحور با در نظر گرفتن وابستگی جریان به فشار، رفتار واقعی‌تری از شبکه در شرایط بحرانی مانند افت فشار یا نشت ارائه می‌دهند [۸ و ۹].

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از مدل‌های فشارمحور در کنار الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند، می‌تواند به طراحی مؤثرتر راه‌بردهای کنترل فشار منجر شود [۱۰ و ۱۱].

جاود^۵ و همکاران به بررسی روش‌های نوین مدیریت نشت با استفاده از یادگیری تقویتی عمیق پرداختند. ایشان نشان دادند که الگوریتم‌های هوشمند توانستند در شناسایی نقاط بحرانی نشت و بهینه‌سازی فشار شبکه نقش مؤثری ایفا کنند. تحقیق نیز به چالش‌های پیاده‌سازی این روش‌ها در شبکه‌های واقعی اشاره دارد [۱۲].

آویل^۶ و همکاران به بررسی نرخ نشت در شبکه‌های توزیع آب در کشورهای مختلف پرداخته و نشان داد که میزان نشت توانست بین ۱۰ تا ۵۵ درصد متغیر باشد. نویسندگان بر اهمیت مدیریت فشار و استفاده از فناوری‌های تشخیص نشت تأکید کردند [۱۳].

تیا^۷ و همکاران به بررسی تجربی و مدل‌سازی مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب پرداخته و نشان

^۶- Ávila

^۷- Tian

^۴- Pressure Reducing Valves

^۵- Javed

(۲) تحلیل فشار محور (PDA)

این رویکرد رابطه غیرخطی بین فشار گره و جریانی که از آن عبور می‌کند را در بر می‌گیرد؛ به عبارت دیگر، جریان تخصیص یافته به هر گره تابعی از فشار همان گره است.

روش فشار محور، بازنمایی دقیق تری از عملکرد شبکه در موقعیت‌های نامعمول همچون کاهش ناگهانی فشار یا شکست لوله ارائه می‌دهد؛ بنابراین، به کارگیری این مدل می‌تواند نتایج ارزیابی و بهینه‌سازی شبکه را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد [۱۵].

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی هیدرولیک شبکه نمونه از نرم‌افزار EPANET بهره گرفته شد. مدل‌سازی برای یک دوره ۲۴-ساعته اجرا شد و در طول این مدت از شیرهای PRVs به منظور کنترل سطح فشار و بهبود پارامترهای هیدرولیکی استفاده گردید.

۲-۲- الگوریتم بهینه‌سازی خفاش

در این پژوهش، به منظور بهینه‌سازی تنظیمات زمانی شیرآلات فشارشکن و بهبود شاخص‌های عملکرد هیدرولیکی، از الگوریتم BO شده است.

این الگوریتم در سال ۲۰۱۰ توسط یانگ^۸ معرفی شد و بر مبنای رفتار پژواک‌یابی^۹ خفاش‌ها در طبیعت برای یافتن شکار و اجتناب از موانع طراحی گردیده است [۱۶]. خفاش‌ها هنگام پرواز، امواج فراصوتی منتشر می‌کنند و با تحلیل بازتاب آن‌ها، فاصله و موقعیت هدف را تعیین می‌نمایند.

در الگوریتم خفاش نیز، هر خفاش به عنوان یک عامل هوشمند جستجوگر در فضای مسئله حرکت کرده و موقعیت خود را براساس فرکانس، سرعت و بلندی صدا^{۱۰} تنظیم می‌کند تا به سمت نقطه‌ی بهینه حرکت نماید. فرآیند کلی الگوریتم خفاش شامل مراحل زیر است. فرمول‌های ریاضی مربوطه مطابق با روابط (۱) تا (۳) است:

دادند که تنظیم فشار توانست به طور مستقیم موجب کاهش نشت و افزایش تاب‌آوری شبکه شود. تحقیق ایشان هم چنین به نقش موقعیت شیرآلات در اثربخشی مدیریت فشار اشاره داشت [۱۴].

با توجه به اهمیت روزافزون کاهش نشت و افزایش قابلیت اطمینان در شبکه‌های توزیع آب، هدف این پژوهش، مقایسه عملکرد دو رویکرد فشار محور و تقاضا محور در تحلیل و بهینه‌سازی شبکه‌ای نمونه با حضور شیرهای فشارشکن و مخازن ذخیره است. در این راستا، از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار EPANET و الگوریتم بهینه‌سازی خفاش (BO) در محیط MATLAB برای تنظیم برنامه زمان‌بندی ۲۴ ساعته بهره گرفته شده است.

در این تحقیق، شبیه‌سازی‌ها در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته و برای دو تراز ارتفاعی مخزن (۱۸۵ و ۲۰۵ متر) و سه سطح نشت (۰، ۲۵ و ۴۵ درصد) انجام شده دو رویکرد DDA و فشار محور PDA برای شبیه‌سازی استفاده شده است.

نتایج این مطالعه می‌تواند راه‌گشای طراحی سیاست‌های کنترلی مؤثرتر در مدیریت نشت و بهبود عملکرد هیدرولیکی شبکه‌های آبرسانی شهری باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- شبیه‌سازی هیدرولیکی

برای بررسی رفتار هیدرولیکی شبکه‌های آبی توزیعی دو چارچوب اصلی وجود دارد.

(۱) تحلیل تقاضا محور (DDA)

در این مدل، مقدار مصرف هر نقطه یا گره به صورت ثابت محسوب می‌شود و تأثیر فشار بر مقدار مصرف در محاسبه در نظر گرفته نمی‌شود.

^{۱۰}- Loudness

^۸- Yang

^۹- Echolocation

نشت شبکه نیز براساس روابط (۷) تا (۸) محاسبه

می‌شود:

$$Q_{j,leak} = P_j K_j^\beta \quad (۷)$$

$$K_j = L \sum c_j \quad (۸)$$

که در آن، $Q_{j,leak}$ = میزان نشت از گره j ، P_j = فشار سرویس در گره j ، K_j = ضریب نشت گره j ، L_j = طول لوله های متصل به گره j ، c = ضریب تخلیه وابسته به جنس و قطر لوله است.

۲-۴- پارامترهای الگوریتم BO

مقادیر پارامترهای مورد استفاده در کدنویسی الگوریتم BO در محیط MATLAB به صورت جدول ۱ تنظیم شده است.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در کد BO

Table 1. Parameter values used in BO code	
Parameter	Value
Population size (n)	25
Iteration (T)	100
α	0.9
γ	0.9
f_{min}	0
f_{max}	2
A_0	1
r_0	0.5

در مجموع، مدل سازی عددی شبکه در نرم افزار EPANET و بهینه سازی تنظیمات زمانی شیرهای فشارشکن با بهره گیری از الگوریتم خفاش در MATLAB انجام شد.

هدف، دستیابی به ترکیب بهینه ای از فشار و دبی در گره ها به گونه ای است که ضمن حفظ قابلیت اطمینان شبکه، نشتی و افت انرژی کمینه شود.

(۱) مقداره ای اولیه جمعیت خفاش ها (موقعیت و

سرعت اولیه).

(۲) به روزرسانی موقعیت و سرعت خفاش ها با

استفاده از فرکانس های تصادفی:

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \cdot \beta \quad (۱)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - x_{*i}) \cdot f \quad (۲)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (۳)$$

که در آن، f_i = فرکانس خفاش نام؛ β = عدد تصادفی بین صفر و ۱؛ x_{*} = بهترین موقعیت فعلی؛ v_i^t و x_i^t = به ترتیب سرعت و موقعیت خفاش در تکرار t هستند.

(۳) به روزرسانی بلندی صدا و نرخ انتشار پالس ها

مطابق با رابطه (۴) می باشد:

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t, \quad r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (۴)$$

که در آن، A_i = شدت صدا؛ r_i = نرخ انتشار پالس؛ α و γ = ضرائب ثابت هستند.

(۴) ارزیابی تابع هدف و انتخاب بهترین موقعیت

(بهترین تنظیم زمانی شیرها در ۲۴ ساعت)

۲-۳- تابع هدف و شاخص های ارزیابی

تابع هدف در این پژوهش به منظور بیشینه نمودن قابلیت اطمینان فشار گرهی و کمینه نمودن نشت شبکه تعریف شده است. شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی^{۱۱} (NPRI) از رابطه (۵) محاسبه می شود:

$$NPRI(i, j) = \frac{P_{ij}}{P_{ref}} \quad (۵)$$

که در آن، P_{ij} = فشار گره j در زمان i ، P_{ref} = فشار مرجع طراحی است.

مقدار کلی شاخص قابلیت اطمینان شبکه از رابطه

(۶) به دست می آید:

$$NPRI = \frac{1}{NN} \sum_{i=1}^{NN} \frac{Q_i}{Q_{req,i}} \quad (۶)$$

که در آن، NN = تعداد کل گره ها، و Q_i = دبی واقعی تامین شده در گره i است.

^{۱۱}- Nodal Pressure Reliability Index

۳- مطالعه موردی

تقاضای روزانه بوده و مبنای محاسبات هیدرولیکی در نرم افزار EPANET قرار گرفته‌اند.

جدول ۲- الگوهای مصرف آب در گره‌های شبکه توزیع

Table 2. Water consumption patterns at distribution network nodes

Time (hr)	1	2	3	4	5	6
Coefficient	0.67	0.64	0.61	0.58	0.50	0.60
Time (hr)	7	8	9	10	11	12
Coefficient	0.73	0.76	1	1.15	1.20	1.23
Time (hr)	13	14	15	16	17	18
Coefficient	1.26	1.30	1.33	1.34	1.45	1.50
Time (hr)	19	20	21	22	23	24
Coefficient	1.35	1.20	1.10	0.90	0.80	0.70

۴- بحث و بررسی نتایج

۴-۱- سناریوی اول: تحلیل تقاضا محور (DDA)

در نخستین سناریو، تحلیل هیدرولیکی شبکه براساس رویکرد تقاضا محور انجام گرفت. در این روش، میزان برداشت هر گره به صورت ثابت در نظر گرفته شده و فشار، تأثیری در مقدار جریان گرهی ندارد.

برای بررسی رفتار شبکه، سه حالت نشت متفاوت شامل صفر، ۲۵ و ۴۵ درصد در دو ارتفاع مختلف مخزن (۲۰۵ و ۱۸۵ متر) شبیه سازی گردید. همچنین اثر افت هد مخزن بر شاخص‌های عملکرد شبکه مورد ارزیابی قرار گرفت.

به منظور افزایش دقت نتایج، هر تحلیل سه بار در محیط نرم افزار EPANET تکرار و میانگین خروجی‌ها به عنوان نتیجه نهایی گزارش شد. داده‌های حاصل در جداول ۳ و ۴ ارائه گردیده‌اند.

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، از شبکه‌ی شاخصی با پیچربندی دو حلقه‌ای بهره گرفته شد که نخستین بار توسط آلپروویتز^{۱۲} و شمیر^{۱۳} معرفی گردید و به عنوان یکی از شبکه‌های استاندارد در تحلیل و بهینه سازی سامانه های توزیع آب شناخته می‌شود.

نسخه‌ی مورد استفاده در این پژوهش شامل دو مخزن ذخیره، دو شیر فشارشکن، هشت گره مصرف و نه لوله رابط است.

گره‌های R1 و R2 به عنوان منابع تغذیه‌ی شبکه در نظر گرفته شده‌اند و سایر گره‌ها نقش نقاط مصرف را ایفا می‌کنند.

طرح هندسی و آرایش هیدرولیکی شبکه‌ی بررسی شده در شکل ۱ نمایش داده شده است.

این ساختار به دلیل دارا بودن مسیرهای موازی و وجود عناصر کنترلی، امکان بررسی هم‌زمان پدیده‌های افت فشار، نوسانات دبی و رفتار دینامیکی شیرآلات را فراهم می‌سازد.

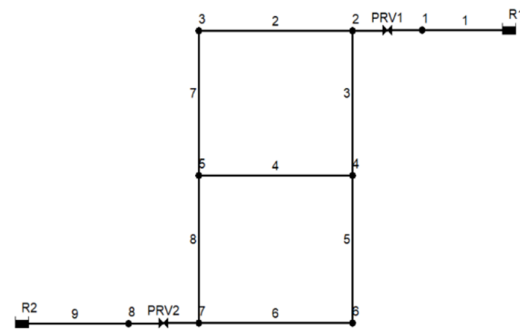


Figure 1. Sample network under study

شکل ۱- شبکه نمونه مورد مطالعه

به منظور لحاظ کردن تغییرات زمانی تقاضا، یک الگوی بار مصرفی ۲۴ ساعته برای گره‌ها تعریف گردید. ضرایب ساعتی این الگو که بر مبنای رفتار مصرف خانگی و تجاری تنظیم شده‌اند، در جدول ۲ ارائه شده است. این ضرایب بیان گر نسبت مصرف لحظه‌ای هر ساعت به بیشینه

¹³- Shamir

¹²- Alperovits

۴-۲- سناریوی دوم: تحلیل مبتنی بر فشار (PDA)

در سناریوی دوم، تحلیل شبکه با استفاده از رویکرد فشارمحور انجام شد.

در این روش، جریان عبوری از هر گره تابعی از فشار واقعی آن است و لذا رفتار شبکه در شرایط افت فشار، نشت یا شکست لوله به صورت واقع‌گرایانه‌تری شبیه‌سازی می‌شود. مشابه سناریوی نخست، سه سطح نشت (صفر، ۲۵ و ۴۵ درصد) برای دو ارتفاع مخزن ۲۰۵ و ۱۸۵ متر در نظر گرفته شد.

میانگین نتایج به دست آمده در جداول ۵ و ۶ درج شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش میزان نشت، مقدار متوسط قابلیت اطمینان اندکی کاهش می‌یابد، اما برخلاف روش تقاضامحور، مقدار افت آن در محدوده فشار پایین کم‌تر است. به عبارت دیگر، مدل فشارمحور توانسته است تا حدی پایداری هیدرولیکی شبکه را در برابر افت هد حفظ نماید.

علاوه بر این، مقایسه مقادیر نشت در جدول ۶ بیان گر آن است که در فشارهای پایین‌تر، میزان نشت محاسبه شده در مدل فشارمحور به واقعیت نزدیک‌تر است؛ زیرا این روش وابستگی مستقیم نشت به فشار گرهی را در روابط خود لحاظ می‌کند. این موضوع از اهمیت ویژه‌ای در ارزیابی اتلاف آب و طراحی سیاست‌های کنترل فشار برخوردار است.

جدول ۵- میانگین قابلیت اطمینان برای روش فشارمحور (کمینه فشار برای تمامی حالت‌ها ۱۰ در نظر گرفته می‌شود)

Reservoir head (m)	No leakage	25% leakage	45% leakage
205	0.797	0.789	0.776
185	0.702	0.703	0.701

جدول ۳- میانگین قابلیت اطمینان برای روش تقاضامحور

Table 3. Average reliability for the demand-driven method

Reservoir head (m)	No leakage	25% leakage	45% leakage
205	0.797	0.789	0.776
185	0.562	0.538	0.473

جدول ۴- میانگین نشت برای روش تقاضامحور

Table 4. Average leakage for the demand-driven method

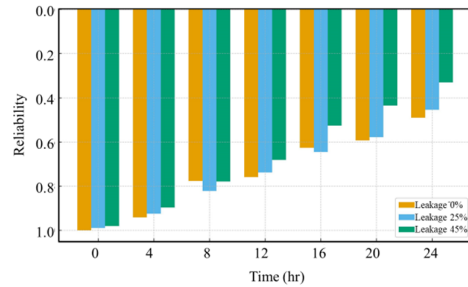
Reservoir head (m)	No leakage	25% leakage	45% leakage
205	0	61	143
185	0	42	88

بررسی مقادیر جدول ۳ نشان می‌دهد که میانگین شاخص قابلیت اطمینان فشار با افزایش درصد نشت در هر دو هد مخزن کاهش یافته است؛ به گونه‌ای که برای هد ۲۰۵ متر از مقدار ۰/۷۹۷ در حالت بدون نشت به ۰/۷۷۶ در حالت نشت ۴۵ درصد کاهش پیدا کرده است.

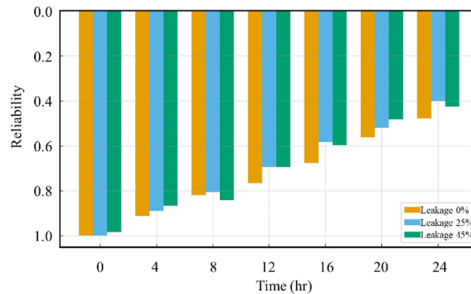
این روند در هد ۱۸۵ متر نیز به صورت محسوس مشاهده می‌شود و بیان گر حساسیت عملکرد شبکه به افت فشار ناشی از نشت است.

هم‌چنین نتایج جدول ۴ حاکی از آن است که میانگین حجم نشت در شبکه با افزایش درصد نشت ورودی، رشد قابل توجهی دارد. برای مثال، در هد ۲۰۵ متر مقدار نشت از صفر به ۱۴۳ افزایش یافته است.

این تغییرات نشان می‌دهد که مدل تقاضامحور در شبیه‌سازی وضعیت‌های غیرعادی (مانند افت فشار یا نشت بالا) دقت محدودی دارد، زیرا در این مدل دبی مصرف ثابت فرض می‌شود و تأثیر فشار واقعی بر میزان جریان نادیده گرفته می‌شود.



(a)



(b)

Figure 2. Reliability comparison in heads (a) 185, and (b) 205, for various leakages

شکل ۲- مقایسه قابلیت اطمینان برای هد ۲۰۵ و نشت‌های مختلف

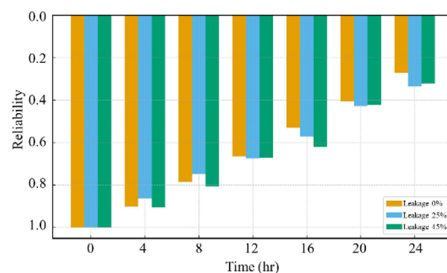


Figure 3 - Reliability comparison (DDA)

شکل ۳- مقایسه قابلیت اطمینان (تقاضا محور)

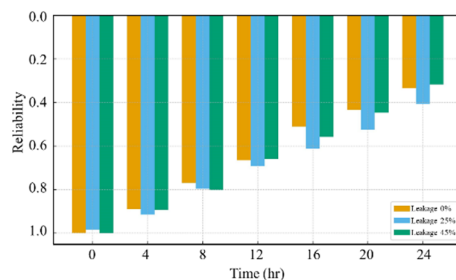


Figure 4 - Reliability comparison (PDA)

شکل ۴- مقایسه قابلیت اطمینان (فشار محور)

جدول ۶- میانگین نشت برای روش فشار محور (کمینه فشار برای تمامی حالت‌ها ۱۰ در نظر گرفته می‌شود)

Table 6. Average leakage for the pressure-driven method (The minimum pressure for all modes is 10)

Reservoir head (m)	No leakage	25% leakage	45% leakage
205	0	67	144
185	0	13	31

۳-۴- تحلیل مقایسه‌ای دو رویکرد

مقایسه دو رویکرد نشان می‌دهد که مدل فشار محور نسبت به مدل تقاضا محور دقت بالاتری در بازتولید شرایط واقعی شبکه دارد، به‌ویژه در حالتی که فشار در محدوده‌های بحرانی قرار می‌گیرد.

در مدل تقاضا محور، نشت و قابلیت اطمینان به‌صورت اغراق‌آمیز یا کمتر از واقعیت برآورد می‌شود، در حالی که مدل فشار محور قادر است تغییرات فشار را به‌صورت پویا در محاسبات لحاظ نماید.

به‌طور کلی، نتایج این بخش تأیید می‌کند که در تحلیل شبکه‌های توزیع آب شهری، به‌ویژه هنگام استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تنظیم شیرآلات، اتخاذ رویکرد فشار محور می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تر و کنترل مؤثرتر نشت منجر شود.

۴-۴- مقایسه دو سناریو (روش‌های DDA و PDA)

به‌منظور ارزیابی تطبیقی دو رویکرد تحلیل، تغییرات شاخص بدون بعد قابلیت اطمینان فشار گرهی برای هر دو مدل تقاضا محور و فشار محور در سطوح مختلف نشت (۰، ۲۵ و ۴۵ درصد) و دو تراز هد مخزن (۱۸۵ و ۲۰۵ متر) بررسی شد. نتایج این مقایسه در قالب نمودارهای شکل‌های ۲ تا ۴ ارائه شده است.

توسعه یافته است. به این منظور، از الگوریتم خفاش در محیط MATLAB برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی و از نرم‌افزار EPANET برای شبیه‌سازی عددی شبکه‌ی نمونه استفاده شده است.

شبکه مورد مطالعه شامل دو مخزن تغذیه و دو شیر فشارشکن بوده و برای ارزیابی رفتار آن، سناریوهای مختلفی شامل تغییر درصد نشت (۰، ۲۵ و ۴۵ درصد) و تغییر تراز انرژی مخزن (۱۸۵ و ۲۰۵ متر) مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در تمامی بازه‌های زمانی شبانه‌روز، مقادیر شاخص قابلیت اطمینان فشار در مدل فشارمحور به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیش از مقادیر متناظر در مدل تقاضامحور است. این امر بیان‌گر آن است که لحاظ وابستگی فشار و دبی در رویکرد PDA موجب افزایش دقت و واقع‌نمایی تحلیل هیدرولیکی می‌شود.

هم‌چنین مشاهده شد که افزایش ارتفاع هیدرولیکی مخزن از ۱۸۵ به ۲۰۵ متر منجر به افزایش شاخص قابلیت اطمینان شبکه در هر دو رویکرد می‌گردد، در حالی که افزایش درصد نشت از صفر تا ۴۵ درصد سبب افت محسوس قابلیت اطمینان شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کنترل مؤثر فشار و کاهش نشت، دو عامل کلیدی در حفظ پایداری عملکرد شبکه و بهبود راندمان توزیع آب محسوب می‌شوند.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش تأکید می‌کند که به‌کارگیری مدل فشارمحور در کنار الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند، رویکردی کارآمد برای طراحی سیاست‌های کنترلی و مدیریت بهینه‌ی شبکه‌های آبرسانی شهری است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسنده اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید ایشان است.

بررسی تغییرات زمانی شاخص قابلیت اطمینان نشان می‌دهد که در هر سه سطح نشت، مقادیر حاصل از مدل فشارمحور در اغلب ساعات شبانه‌روز بیش از مقادیر متناظر در مدل تقاضامحور بوده است. این موضوع بیان‌گر آن است که مدل PDA در شبیه‌سازی رفتار واقعی شبکه در شرایط افت فشار، کارآمدتر عمل می‌کند؛ زیرا رابطه‌ی مستقیم میان فشار و دبی گرهی در معادلات آن لحاظ شده است.

در همد مخزن ۲۰۵ متر، مقادیر قابلیت اطمینان در تمام ساعات شبانه‌روز به‌نسبت بالا و دارای نوسان محدود بوده و با افزایش نشت از صفر تا ۴۵ درصد، کاهش ملایمی را نشان می‌دهد. در مقابل، برای همد ۱۸۵ متر، تغییرات فشار محسوس‌تر بوده و شاخص قابلیت اطمینان در طول روز کاهش قابل توجهی را تجربه کرده است. این رفتار نشان می‌دهد که کاهش تراز انرژی در منابع تغذیه می‌تواند به‌طور مستقیم بر پایداری فشار در گره‌های مصرف اثر بگذارد.

مقایسه نتایج در دو مدل تحلیلی نیز حاکی از آن است که در شرایط نشت بالا، اختلاف بین مقادیر حاصل از DDA و PDA بیش‌تر می‌شود؛ به‌گونه‌ای که مدل تقاضامحور در ساعات اوج مصرف، مقدار قابلیت اطمینان را کم‌تر از واقع برآورد می‌کند. این تفاوت ناشی از فرض ثابت بودن دبی در مدل DDA است که منجر به عدم انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات فشار می‌گردد.

به‌طور کلی، الگوی تغییرات در شکل‌های ۲ تا ۴ نشان می‌دهد که رویکرد فشارمحور توانایی بازنمایی دقیق‌تری از پویایی شبکه و تأثیر نشت بر افت فشار را دارا است. بنابراین، برای تحلیل‌های بهینه‌سازی و طراحی راهبردهای کنترل فشار، استفاده از مدل PDA می‌تواند نتایج واقع‌گرایانه‌تر و تصمیم‌گیری‌های مؤثرتری را فراهم سازد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک برنامه زمان‌بندی بهینه برای عملکرد شیرهای فشارشکن با هدف مقایسه‌ی دو رویکرد تحلیل مبتنی بر فشار و تحلیل مبتنی بر تقاضا و بررسی تأثیر آن بر کارایی هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب شهری

مشارکت نویسندگان

حامی مالی

محمد عامل صادقی تحلیل داده‌ها، تدوین و تفسیر

این پژوهش هیچ‌گونه کمک هزینه خاصی دریافت

مواد مطالعه را انجام داد.

نکرده است.

تعارض منافع

سپاسگزاری

بنا بر اظهار نویسنده این مقاله تعارض منافع ندارد.

از داوران محترم به‌خاطر ارائه نظرهای ساختاری و

علمی سپاسگزاری می‌شود.

References

- [1] Farley M, Trow S. Losses in water distribution networks: A practitioner's guide to assessment, monitoring and control. London: IWA Publishing; 2003. <https://doi.org/10.2166/9781780402642>.
- [2] Puust R, Kapelan Z, Savic D, Koppel T. A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*. 2010; 7(1): 25–45. <https://doi.org/10.1080/15730621003610878>.
- [3] Serafeim AV, Fourniotis NT, Deidda R, Kokosalakis G, Langousis A. Leakages in water distribution networks: Estimation methods, influential factors, and mitigation strategies—A comprehensive review. *Water*. 2024; 16(11): 1534. <https://doi.org/10.3390/w16111534>.
- [4] Avila FG, Anazco AA, Jara JO, Quezada CG, Delpino LF, Fernandez LR. Pressure management for leakage reduction using pressure reducing valves: Case study in an Andean city. *Alexandria Engineering Journal*. 2019; 58(4): 1313–1326. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.10.005>.
- [5] Araujo LS, Ramos H, Coelho ST. Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Water Resources Management*. 2006; 20(1): 133–149. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-4635-3>.
- [6] Samir N, Kansoh R, Elbarki W. Pressure control for minimizing leakage in water distribution systems. *Alexandria Engineering Journal*. 2017; 56(4): 767–773. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2017.07.008>.
- [7] Gungor M, Yazar U, Canturk U, Firat M. Increasing performance of water distribution network by using pressure management and database integration. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2019; 10(2): 1–8. [https://doi:10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000367](https://doi:10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000367).
- [8] Chang DE, Lee HM, Yoo DG, Kim JH. Quantification of the head-outflow relationship for pressure-driven analysis in water distribution networks. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2019; 23: 3353–3363. <https://doi:10.1007/s12205-019-1883-3>.
- [9] Giustolisi O, Savic DA, Kapelan Z. Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2008; 134(5): 626–635. [https://doi:10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:5\(626\)](https://doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:5(626)).
- [10] Dini M, Asadi A. Optimal operational scheduling of available partially closed valves for pressure management in water distribution networks. *Water Resour Manag*. 2020; 34(8): 2571–2583. <https://doi:10.1007/s11269-020-02579-4>.
- [11] Hamed MM, Elsayad MA, Mahfouz SY, Khadr WMH. Graphical user interface for water distribution network pressure-driven analysis using artificial elements. *Discover Water*. 2022; 2(1): 1–13. <https://doi:10.1007/s40899-022-00675-4>.
- [12] Javed A, Wu W, Sun Q, Dai Z. Leak management in water distribution networks through deep reinforcement learning: A review. *Water*. 2025; 17(13): 1928. <https://doi:10.3390/w17131928>.
- [13] Ávila A, El-Zahab S, Zayed T. Lost and found: leakage in water distribution networks. *Waterlyst*. 2021. Available from: <https://waterlyst.com/articles/water-leakage-distribution-networks>.
- [14] Tian Y, Gao J, Chen J, Xie J, Que Q, Munthali RM, Zhang T. Optimization of pressure management in water distribution systems based on pressure-reducing valve control: evaluation and case study. *Sustainability*. 2023; 15(14): 11086. <https://doi:10.3390/su151411086>.

- [15] Seyoum AG, Tanyimboh TT, Siew C. Comparison of demand-driven and pressure-dependent hydraulic approaches for modelling water quality in distribution networks. In: Proceedings of Computing and Control for the Water Industry (CCWI 2011); 2011 Sep 5–7; Exeter, UK. London: University of Exeter; 2011. p. 521–526.
- [16] Yang X-S. A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm. In: Gonzalez JR, Luna F, Terashima-Marín H, editors. *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NISCO 2010)*. Lecture Notes in Computer Science vol 284. Springer; 2010. p. 65-74. doi:10.1007/978-3-642-12538-6_6.