

Development of a Hydraulic Simulation Model and Performance Analysis of Time- and Flow-Modulated Pressure Reducing Valves for Leakage Reduction in Urban Water Distribution Networks Using Water GEMS Software.

Seyyed Mohammad Kazem Banihashemi Emam gheysi¹, Ali Attarzadeh^{*2} and Hamideh Jafari³

Extended Abstract:

Introduction:

Water distribution networks are vital urban infrastructure, yet a substantial share of the water they carry is lost before reaching consumers as non-revenue water, largely through real leakage from mains, distribution pipes and service connections. Leakage wastes scarce water, raises production and pumping costs, reduces reliability and shortens asset life. Hydraulic pressure is the dominant driver of leakage and pipe bursts, so pressure management is widely regarded as one of the most effective and economical ways to reduce real losses. Calibrated hydraulic models such as Water GEMS allow pressure-control strategies to be tested before field implementation. However, most published studies address large networks or specific hydraulic conditions, and small networks with pronounced elevation differences, particularly in Chaharmahal and Bakhtiari Province, remain little studied. In such networks a single fixed pressure setting can cause excess pressure in low-lying zones and deficits at high points. This study therefore develops and validates a Water GEMS model of the Pordanjan distribution network and compares three pressure-reducing-valve (PRV) strategies, namely fixed-outlet, time-modulated and flow-modulated control, in terms of pressure, leakage reduction and practical feasibility.

Materials and Methods:

Pordanjan, a town in Farsan County, Chaharmahal and Bakhtiari Province, is supplied by gravity from a single concrete ground reservoir at the highest point of the town. The network comprises about 37 km of pipes (25–160 mm; 78% polyethylene, 16% steel, 6% asbestos cement), 207 nodes, roughly 3,000 service connections and six demand zones, serving about 9,400 people (projected 13,700 by 2041). Digital maps, as-built drawings, elevation data, customer locations, demand patterns and field pressure records were obtained from the provincial water and wastewater company, drawn in AutoCAD, checked against GIS data and site surveys, and imported into Water GEMS, where geometric errors were corrected. Hydraulic analysis relied on mass and energy conservation, with the Hazen–Williams equation for head loss. Real losses were estimated by minimum night flow (MNF) analysis. Night leakage was extended to 24 hours through the pressure–leakage relationship $Q = C \times P^{N1}$, with $N1 = 1.15$ and C calibrated from hourly model pressures. Network performance was also expressed by the Infrastructure Leakage Index (ILI). The model was calibrated by adjusting pipe roughness and demand patterns against pressures recorded every 15 minutes for 48 hours at eight points in zones 1, 3, 4 and 6, and was then validated with independent pressure and flow data. Three scenarios were simulated over an extended 24-hour period: (1) constant PRV outlet pressure, selected by a sensitivity analysis of 30–55 m; (2) time-modulated outlet pressure following the daily demand pattern; and (3) flow-modulated outlet pressure adjusted to instantaneous flow and controlled through the critical node in zone 6. All scenarios were constrained by a minimum service pressure of 20 m. Indicators were mean, maximum, minimum and standard deviation of nodal pressure, minimum night flow, daily leakage, annual water saving, and the number of nodes above 50 m or below 20 m. The annual economic value of the saved water was examined by sensitivity analysis at 10, 20 and 30 thousand toman per cubic meter.

Results and Discussions:

The calibrated model reproduced field behavior well: pressure RMSE was below 5%, and differences between simulated and measured pressure and flow were under 10%. The baseline simulation showed strongly non-uniform pressure, from 15.2 to 67.3 m (mean 41.2 m, standard deviation 11.9 m), with 116 nodes above 50 m and 38 below 20 m. Real losses were about 850 m³/day, roughly 22% of inflow and above the national average of 20–25%. MNF was 10.44 L/s, of which 66.5% (6.94 L/s) was real leakage, and the ILI was 3.8. Losses stem mainly from ageing pipes, corrosion-related cracks and weak joints aggravated by excess pressure, and daily

1- Master's student in Civil-Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Qom University of Technology, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Qom University of Technology, Iran

3- Advisor and Head of the Investment and Financial Partnership Development Group, Water and Wastewater Company, Markazi, Iran.

* Corresponding Author: Ali Attarzadeh - attarzadeh@qut.ac.ir

Received: 2009/08/08

Accepted: 2010/11/11

pressure fluctuations impose continual mechanical fatigue on pipes and fittings. All three scenarios improved on the baseline. A constant outlet pressure of 45 m proved optimal: lower values starved the upper zones, higher values limited leakage reduction. It cut mean pressure from 41.2 to 35.8 m, nodes above 50 m from 116 to 32, and daily leakage from 850 to 715 m³ (15.9%), saving 49,275 m³/year. Its weakness is that pressure stays at 45 m through low-demand night hours, when 30–35 m would suffice, and the setting must be revised as the population grows. Time-modulated control lowered mean pressure to 33.6 m, night flow to 7.98 L/s and daily leakage to 655 m³ (22.9%), saving 71,175 m³/year, while holding about 22 m in zone 6 at peak demand. Its limitations are the need for a programmable valve (20–50% costlier than a simple PRV), periodic re-tuning of the time pattern, and no response to sudden demand changes such as fires or pipe bursts. Flow-modulated control, with set points of about 35–38 m at low flow and 48–50 m at peak flow, gave the best technical performance: mean pressure of 32.1 m, pressure standard deviation of 7.8 m, only 8 nodes above 50 m, and daily leakage of 605 m³ (28.8%), saving 89,425 m³/year. However, it requires intelligent controllers, flow sensors and the highest investment. Pressure reduction did not compromise service, as no node fell below 20 m in any scenario. The sensitivity analysis gave annual benefits of about 0.49–1.48, 0.71–2.14 and 0.89–2.68 billion tomans for the three scenarios, and the ranking did not change with water value. Because equipment costs were unavailable, no payback period was calculated. Considering technical performance, cost and implementation constraints, the time-modulated scenario was judged the most suitable option under present conditions. The findings agree with earlier studies showing that pressure management can cut leakage substantially without extensive pipe replacement.

Conclusion:

A calibrated Water GEMS model proved an effective tool for diagnosing pressure problems and comparing control strategies in the Pordanjan network, where topography causes excess pressure in low zones and deficits at high points. All three PRV strategies reduced excess pressure and leakage (by 15.9%, 22.9% and 28.8%) while keeping service pressure above 20 m. Time-modulated control is recommended in the short term for its balance of leakage reduction and cost, with flow-modulated control as a longer-term upgrade. Continuous monitoring of pressure and minimum night flow is needed to sustain the gains. Future work should use long-term seasonal data, SCADA-based real-time control and life-cycle cost analysis.

Keywords: Leakage, Pressure Management, Water Distribution Network, Water Loss, Water GEMS

Author Contributions:

First author: Data collection and preliminary analysis, and manuscript writing.

Second author: Data analysis, guidance, editing and revision of the manuscript, and verification of results.

Third author: Data analysis, guidance, editing and revision of the manuscript, and verification of results.

Data Availability Statement:

The data of this study are part of the M.Sc. thesis of Seyyed Mohammad Kazem Banihashemi Emam Gheysi (Civil–Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Qom University of Technology). Part of the data was obtained from the Chaharmahal and Bakhtiari Provincial Water and Wastewater Company.

Funding:

The authors thank the Chaharmahal and Bakhtiari Provincial Water and Wastewater Company for providing data and information and for financial support of this research.

Ethical Considerations:

The authors observed ethical principles in conducting and publishing this work, including avoidance of data fabrication, falsification, plagiarism and misconduct, and all authors confirm this.



توسعه مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی و تحلیل عملکرد شیرهای فشارشکن با کنترل زمانی و وابسته به

جریان در کاهش نشت شبکه های توزیع آب شهری با استفاده از نرم افزار Water GEMS

سید محمد کاظم بنی هاشمی امام قیسی^۱، علی عطارزاده*^۲ و حمیده جعفری^۳

چکیده:

شبکه‌های توزیع آب شرب به‌عنوان شریان‌های حیاتی جوامع بشری، همواره با چالش هدررفت و نشت آب مواجه هستند. مدیریت فشار یکی از مؤثرترین و اقتصادی‌ترین روش‌های کاهش نشت واقعی در شبکه‌های توزیع محسوب می‌شود. پژوهش حاضر با هدف تحلیل هیدرولیکی و ارزیابی راهکارهای مدیریت فشار برای کاهش هدررفت آب در شبکه توزیع شهر پردنجان انجام شد. بدین منظور، مدل هیدرولیکی شبکه با استفاده از نرم‌افزار Water GEMS توسعه یافت و پس از کالیبراسیون، با داده‌های میدانی فشار و دبی اعتبارسنجی شد؛ به‌طوری‌که اختلاف نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری کمتر از ۱۰ درصد بود. سه سناریوی مدیریت فشار شامل فشار ثابت، فشار وابسته به زمان و فشار وابسته به جریان بررسی شد. نتایج نشان داد هر سه سناریو موجب کاهش فشارهای مازاد و نشت شدند. در سناریوی فشار ثابت با فشار بهینه ۴۵ متر، میانگین فشار از ۴۱/۲ به ۳۵/۸ متر و نشت روزانه از ۸۵۰ به ۷۱۵ مترمکعب کاهش یافت. در سناریوی وابسته به زمان، صرفه‌جویی سالانه ۷۱،۱۷۵ مترمکعب و در سناریوی وابسته به جریان، ۸۹،۴۲۵ مترمکعب برآورد شد. سناریوی وابسته به جریان با کاهش نشت به ۶۰۵ مترمکعب در روز، حدود ۲۸/۸ درصد کاهش نسبت به شرایط پایه ایجاد کرد. با وجود عملکرد فنی بهتر، سناریوی وابسته به زمان به دلیل سادگی و هزینه اجرایی کمتر، مناسب‌ترین گزینه برای شرایط فعلی شبکه پردنجان ارزیابی شد.

واژه‌های کلیدی: شبکه توزیع آب، مدیریت فشار، نشت، هدررفت آب، Water GEMS

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران - محیط‌زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، ایران

۳- مشاور - رئیس گروه سرمایه‌گذاری و توسعه مشارکت مالی آبفای مرکزی‌ایران

* نویسنده مسئول: علی عطارزاده - attarzadeh@qut.ac.ir



فاقد سرعت بهینه ۰/۳ تا ۲/۵ متر بر ثانیه بودند. پایین بودن مقدار سرعت در لوله‌ها باعث افزایش احتمال رسوب‌گذاری و بالا بودن فشار در لوله‌ها باعث تشدید نشت و افزایش احتمال ترک‌گذاری در ساعت‌های اوج فشار می‌شود (Ravanghalati & Ahmadi, 2019; Fatahi et al, 2025). یکی از مؤثرترین ابزارهای تصمیم‌گیری در مدیریت شبکه‌های توزیع آب، استفاده از مدل‌های هیدرولیکی است. توسعه نرم‌افزارهای تخصصی از جمله Water GEMS و EPANET امکان شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی شبکه، تحلیل توزیع فشار، ارزیابی وضعیت جریان، بررسی عملکرد تجهیزات کنترلی و تحلیل سناریوهای مختلف بهره‌برداری را فراهم کرده است. استفاده از این مدل‌ها علاوه بر کاهش هزینه‌های اجرایی، امکان پیش‌بینی عملکرد شبکه و انتخاب مناسب‌ترین راهکار مدیریتی را پیش از اجرای عملیات میدانی فراهم می‌کند (Bentley Systems, 2023; Walski et al, 2003).

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی درباره مدیریت فشار و کاهش هدررفت آب انجام شده است. جعفری اصل و همکاران (۲۰۲۲) با بهینه‌سازی فشار در یک شبکه توزیع آب نشان دادند که مدیریت فشار می‌تواند ضمن حفظ فشار مجاز در گره‌ها، میزان نشت را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. همچنین Latifi et al. (2022) با بررسی اثر ویژگی‌های خاک پیرامون لوله‌ها بر رفتار نشت نشان دادند که خصوصیات خاک و فشار بهره‌برداری به‌صورت هم‌زمان بر دبی نشت تأثیرگذار هستند. نتایج مطالعات Ribeiro et al. (2018) و Kourbasis et al. (2020) نیز بیانگر آن است که کاهش فشارهای اضافی، علاوه بر کاهش هدررفت آب، موجب افزایش عمر مفید شبکه و کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود.

با وجود پیشرفت‌های حاصل در زمینه مدل‌سازی هیدرولیکی، بخش زیادی از مطالعات انجام‌شده مربوط به شبکه‌های بزرگ شهری یا شرایط هیدرولیکی خاص بوده و بررسی شبکه‌های کوچک با شرایط توپوگرافی متفاوت، به‌ویژه در شهرهای استان چهارمحال و بختیاری، همچنان محدود است. شهر پردنجان به دلیل اختلاف ارتفاع قابل‌توجه، تغییرات فشار در نقاط مختلف شبکه و ضرورت کاهش هدررفت آب، یکی از شبکه‌هایی است که نیازمند ارزیابی دقیق هیدرولیکی و بررسی سناریوهای مدیریت فشار است. تاکنون مطالعه جامعی که به‌طور هم‌زمان وضعیت موجود شبکه، توزیع فشار، عملکرد هیدرولیکی و اثر سناریوهای مدیریت فشار را با استفاده از

شبکه‌های توزیع آب شهری یکی از مهم‌ترین اجزای زیرساخت‌های تأمین آب شرب هستند که وظیفه انتقال پایدار آب با کمیت، کیفیت و فشار مناسب را تا محل مصرف بر عهده دارند. در دهه‌های اخیر، رشد جمعیت، توسعه شهرنشینی، افزایش تقاضای آب، تغییرات اقلیمی و محدودیت منابع آب تجدیدپذیر، مدیریت بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع را به یکی از مهم‌ترین چالش‌های صنعت آب تبدیل کرده است. در این شرایط، کاهش هدررفت آب و افزایش بهره‌وری شبکه‌های توزیع، به‌عنوان یکی از راهبردهای اصلی مدیریت منابع آب، مورد توجه پژوهشگران و مدیران صنعت آب قرار گرفته است (Liemberger & Wyatt, 2019).

بر اساس گزارش انجمن بین‌المللی آب (IWA)، بخش قابل‌توجهی از آب تولیدی در بسیاری از شبکه‌های توزیع، پیش از رسیدن به مشترکان به‌صورت آب بدون درآمد (Non-Revenue Water) از دست می‌رود که بخش عمده آن ناشی از نشت واقعی در خطوط انتقال، لوله‌های توزیع و انشعابات است (Lambert & Taylor, 2010). نشت آب علاوه بر اتلاف منابع ارزشمند آب، موجب افزایش هزینه‌های تولید و انتقال، افزایش مصرف انرژی، کاهش قابلیت اطمینان شبکه، افت کیفیت خدمات‌رسانی و در نهایت کاهش پایداری سیستم‌های تأمین آب می‌شود (Farley & Trow, 2003; Thornton et al., 2008).

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که فشار هیدرولیکی مهم‌ترین عامل مؤثر بر میزان نشت، نرخ شکستگی لوله‌ها و عمر مفید تجهیزات شبکه است. افزایش فشار بیش از مقدار موردنیاز، اگرچه ممکن است در کوتاه‌مدت سطح خدمات را بهبود بخشد، اما در بلندمدت موجب افزایش تنش‌های مکانیکی، توسعه ترک‌ها، افزایش دبی نشت و رشد تعداد حوادث شبکه خواهد شد. از سوی دیگر، کاهش کنترل‌نشده فشار نیز می‌تواند موجب افت سطح خدمات و نارضایتی مشترکان شود؛ بنابراین مدیریت فشار باید به‌گونه‌ای انجام گیرد که ضمن تأمین فشار موردنیاز مصرف‌کنندگان، از اعمال فشارهای اضافی بر شبکه جلوگیری شود (Kourbasis et al., 2020). Aydin & Karadirek (2022) در پژوهش‌هایی با اندازه‌گیری میدانی و شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب شرب شهری دریافتند که نبود شیرهای فشارشکن، فشاری خارج از محدوده مجاز را داشتند و به دلیل قطر نامناسب خطوط لوله،

نرم افزار Water GEMS در این شهر بررسی کرده باشد، گزارش نشده است.

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر، توسعه مدل هیدرولیکی شبکه توزیع آب شهر پردنجان با استفاده از نرم افزار Water GEMS، ارزیابی وضعیت موجود شبکه و بررسی اثر سناریوهای مدیریت فشار بر بهبود عملکرد هیدرولیکی، کاهش فشارهای مازاد و کاهش هدررفت آب است. نتایج این پژوهش می تواند مبنای مناسبی برای تصمیم گیری مدیران شرکت های آب و فاضلاب در زمینه بهره برداری بهینه، کاهش آب بدون درآمد و افزایش قابلیت اطمینان شبکه های توزیع آب شهری فراهم کند. در شبکه های توزیع آب واقع در مناطق با توپوگرافی ناهمگون و اختلاف تراز زیاد، استفاده از یک تنظیم ثابت فشار می تواند در نواحی کم ارتفاع موجب فشار مازاد و در نقاط مرتفع موجب افت فشار شود. از این رو، انتخاب راهبرد کنترلی مناسب که ضمن کاهش فشارهای اضافی و نشت، حداقل فشار مورد نیاز مشترکان را نیز حفظ کند، از چالش های مهم بهره برداری این شبکه ها است. در پژوهش حاضر، این مسئله در شبکه واقعی شهر پردنجان و با مقایسه سه راهبرد کنترل فشار بررسی شده است.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

شهر پردنجان از توابع شهرستان فارس در استان چهارمحال و بختیاری است و به دلیل توسعه تدریجی بافت شهری، اختلاف ارتفاع قابل توجه و تغییرات فشار در نقاط مختلف شبکه، یکی از شبکه های توزیع آب با حساسیت بالا از نظر مدیریت فشار محسوب می شود. سامانه آبرسانی این شهر شامل تأسیسات تأمین آب، مخزن ذخیره، خطوط انتقال و شبکه توزیع است که وظیفه تأمین آب شرب مشترکان را بر عهده دارد. اختلاف تراز ارتفاعی در بخش های مختلف شهر سبب شده است که در برخی نواحی فشار بیش از حد مجاز و در برخی دیگر فشار کمتر از مقدار مطلوب مشاهده شود. این شرایط علاوه بر افزایش احتمال نشت و شکستگی لوله ها، بهره برداری از شبکه را با چالش مواجه می کند؛ از این رو ارزیابی عملکرد هیدرولیکی شبکه و بررسی راهکارهای مدیریت فشار برای این شهر ضروری است.

اطلاعات مورد نیاز این پژوهش از شرکت آب و فاضلاب استان چهارمحال و بختیاری تهیه شد. داده های گردآوری شده شامل

نقشه رقومی شبکه، مشخصات هندسی و هیدرولیکی لوله ها، اطلاعات مربوط به گره ها، مخازن، شیرآلات، الگوی مصرف، جمعیت تحت پوشش، ارتفاع نقاط، مشخصات خطوط انتقال و فشارهای اندازه گیری شده در شبکه بود. پس از بررسی، کنترل و اصلاح داده ها، اطلاعات وارد محیط نرم افزار Water GEMS شد و مدل اولیه شبکه تشکیل گردید.

به منظور افزایش دقت مدل، اطلاعات مکانی شبکه با نقشه های موجود تطبیق داده شد و کلیه خطاهای احتمالی شامل گره های تکراری، لوله های بدون اتصال، ناهماهنگی در قطر و طول لوله ها و اختلاف ارتفاع اصلاح شد.

تحلیل هیدرولیکی شبکه بر پایه دو اصل اساسی بقای جرم و بقای انرژی انجام شد. معادله پیوستگی برای هر گره به صورت زیر در نظر گرفته شد:

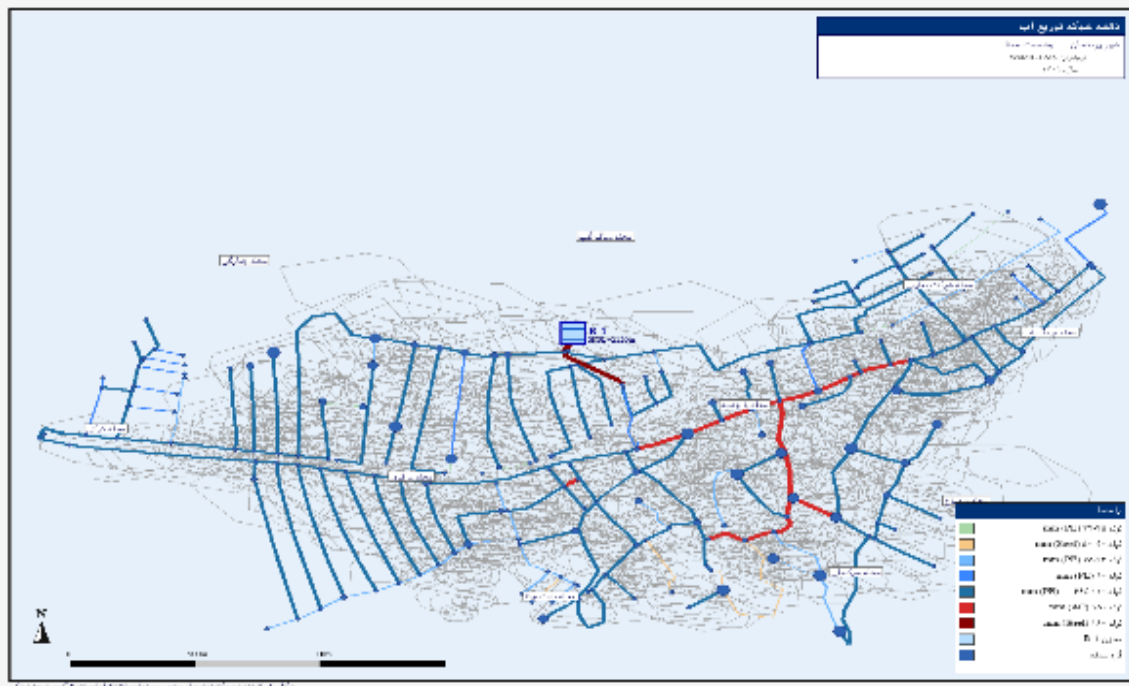
$$\sum Q_{in} - \sum Q_{out} = 0 \quad (1)$$

که در آن Q_{in} و Q_{out} به ترتیب بیانگر مجموع دبی های ورودی و خروجی از هر گره هستند. این رابطه تضمین می کند که در هر گره، مجموع جریان های ورودی و خروجی با در نظر گرفتن تقاضای مصرفی برابر باشد. به منظور تحلیل افت انرژی بین گره های شبکه نیز از معادله برنولی استفاده شد که مبنای تحلیل هیدرولیکی در نرم افزار Water GEMS است. برای محاسبه افت بار در لوله ها، رابطه هیزن-ویلیامز به کار گرفته شد:

$$h_f = 10.68 \left(\frac{Q}{C} \right)^{1.852} L(D)^{-4.87} \quad (2)$$

در این معادله h_f افت فشار (متر)، Q دبی (مترمکعب در ثانیه)، L طول لوله (متر)، C ضریب زبری لوله (بدون بعد) و D قطر لوله (متر) می باشد. این رابطه یکی از متداول ترین روابط مورد استفاده در مدل سازی شبکه های توزیع آب بوده و در نرم افزار Water GEMS نیز به عنوان رابطه اصلی افت اصطکاک استفاده می شود.

یکی از مراحل کلیدی در مدل سازی هیدرولیکی شبکه های توزیع آب، تعریف دقیق الگوهای مصرف در گره های مختلف شبکه است. از آنجا که مصرف آب در مناطق شهری تابعی مستقیم از جمعیت، تراکم و نوع کاربری زمین می باشد، تحلیل جمعیت در دوره های مختلف زمانی نقش مهمی در تخصیص دبی مصرفی به گره ها دارد. در این پژوهش، برای شهر



شکل ۱- شبکه لوله توزیع آب شرب شهر پردنجان

پردنجان، داده‌های جمعیتی و تراکم برای شش ناحیه شهری استخراج گردید. این اطلاعات شامل مساحت هر ناحیه، تراکم جمعیتی در هر دوره، و جمعیت متناظر با آن است. داده‌ها از منابع رسمی آماری و نقشه‌های شهری تهیه شده و مبنای تعریف الگوهای مصرف در مدل Water GEMS قرار گرفتند. جدول ۱، خلاصه‌ای از این اطلاعات را ارائه می‌دهد:

جدول ۱- جمعیت و تراکم نواحی شهری پردنجان

ناحیه	جمعیت	تراکم	جمعیت	تراکم	مساحت (متر مربع)
۱	۶۵۹	۲۳	۹۶۰	۳۴	۲۸۰،۹۳۱
۲	۱۴۳۱	۵۹	۲۰۸۵	۸۵	۲۴۳،۸۷۴
۳	۲۵۷۲	۸۲	۳۷۴۹	۱۱۹	۳۱۳،۱۹۰
۴	۳۰۵۹	۵۹	۴۴۵۸	۸۵	۵۲۱،۴۱۳
۵	۴۲۱	۸۲	۶۱۴	۱۱۹	۵۱۰،۲۹۱
۶	۱۲۵۸	۲۳	۱۸۳۳	۳۴	۵۳۶،۰۶۱
جمع	۹۴۰۰	—	۱۳۷۰۰	—	—

شبکه توزیع آب شهر پردنجان دارای یک مخزن اصلی ذخیره واقع در ارتفاعات شمالی شهر است که آب را به صورت ثقیلی در کل شبکه توزیع می‌کند. این مخزن از نوع بتنی زمینی در کل شبکه توزیع می‌کند. این مخزن از نوع بتنی زمینی است و در بالاترین نقطه توپوگرافی شهر قرار گرفته تا توزیع ثقیلی آب

به تمام نواحی با حداکثر بهره‌وری انجام گیرد. شبکه لوله‌ها شامل لوله‌هایی با قطرهای متنوع از ۲۵ میلی‌متر (انشعابات کوچک) تا ۱۶۰ میلی‌متر (خطوط اصلی) است. جنس لوله‌ها: پلی‌اتیلن (PE) با سهم ۷۸ درصد، فولاد (Steel) با سهم ۱۶ درصد، و آذبت سیمان (AC) با سهم ۶ درصد. طول کل شبکه حدود ۳۷ کیلومتر است.

برای تهیه مدل هیدرولیکی دقیق و قابل اعتماد از شبکه توزیع آب شهر پردنجان، فرآیند جمع‌آوری داده‌ها به‌عنوان نخستین و اساسی‌ترین مرحله پژوهش، با دقت و جامعیت انجام گرفت. در این مرحله، اطلاعات پایه شامل نقشه‌های ازبیلت شبکه توزیع، نقشه‌های کد ارتفاعی، جانمایی مشترکین، و مشخصات فنی تأسیسات آبرسانی از اداره آب و فاضلاب شهرستان فارسان دریافت شد. این داده‌ها شامل موقعیت و ویژگی‌های لوله‌ها (جنس، قطر، طول)، مخازن ذخیره، شیرهای فشارشکن، شیرهای ایزوله، چاه‌ها، و سایر اجزای شبکه بودند.

همچنین اطلاعات مربوط به الگوهای مصرف مشترکین در دوره‌های زمانی مختلف، شامل ساعات اوج مصرف و حداقل جریان شبانه، گردآوری شد تا بتوان الگوهای تقاضا را به‌صورت دقیق در مدل تعریف کرد. نقشه‌های توپوگرافی منطقه و رقوم ارتفاعی نقاط بحرانی نیز برای تعیین فشار ثقیلی و تحلیل رفتار هیدرولیکی شبکه مورد استفاده قرار گرفتند.

P: فشار میانگین (متر ستون آب)

C: ضریب نشت (ثابتی وابسته به وضعیت لوله‌ها و تعداد نقاط نشت)

N1: توان فشار، که معمولاً بین ۰,۵ (برای نشت‌های با مساحت ثابت مانند ترک‌های بزرگ) تا ۱,۵ (برای نشت‌های با مساحت متغیر مانند اتصالات انعطاف‌پذیر) متغیر است. در مطالعات عملی، میانگین N_1 حدود ۱,۰ تا ۱,۲ در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، با استفاده از فشارهای میانگین ساعتی استخراج‌شده از مدل هیدرولیکی Water GEMS و ضریب $N_1 = 1.15$ (بر اساس مطالعات Thornton et al. (2008) و Latifi et al. (2022))، ضریب C کالیبره شد و نشت کل شبانه‌روز محاسبه گردید. شاخص نشت زیرساخت^۲ یکی از معتبرترین معیارهای عملکرد شبکه است که توسط IWA تعریف شده است. این شاخص نسبت نشت واقعی فعلی^۳ به نشت غیرقابل اجتناب^۴ را نشان می‌دهد که در آن UARL بر اساس طول شبکه، تعداد انشعابات و فشار میانگین محاسبه می‌شود. برای پردنجان، با طول شبکه ۳۷ کیلومتر و حدود ۳۰۰۰ انشعاب، ILI حدود ۳/۸ برآورد شد.

جدول ۲- طبقه‌بندی IWA

محدوده ILI	دسته عملکرد	توضیحات
$ILI < 2$	عالی	مدیریت نشت در سطح جهانی عالی است. تلفات نزدیک به حداقل ممکن فنی است و کاهش بیشتر معمولاً اقتصادی نیست، مگر در شرایط کمبود شدید آب.
۴ تا ۲	متوسط	پتانسیل بهبود قابل توجه وجود دارد. باید روی مدیریت فشار، کنترل فعال نشت و نگهداری بهتر تمرکز کرد. عملکرد قابل قبول است اما جای پیشرفت زیاد دارد.
۸ تا ۴	ضعیف	عملکرد ضعیف و تلفات بالا است. کاهش نشت باید اولویت بالا باشد، حتی اگر آب ارزان باشد.
$ILI > 8$	بسیار ضعیف	بسیار ناکارآمد است. برنامه‌های فوری و جدی برای کاهش تلفات ضروری است (مانند تعمیرات گسترده، کنترل نشت فعال و مدیریت فشار).

در ادامه، عناصر شبکه شامل لوله‌ها، گره‌ها، منابع تأمین، مخازن، شیرآلات و مصرف‌کنندگان در محیط نرم‌افزار AutoCAD ترسیم شدند. صحت‌سنجی رقوم ارتفاعی و موقعیت مکانی عناصر با استفاده از داده‌های GIS و برداشت‌های میدانی انجام شد. پس از آماده‌سازی نقشه‌ها، تمامی عناصر شبکه به محیط نرم‌افزار Water GEMS فراخوانی گردیدند و مشخصات فنی هر عنصر به صورت دقیق تعریف شد. خط‌های شکلی و هندسی مدل شناسایی و اصلاح شدند تا مدل اولیه برای اجرای شبیه‌سازی آماده گردد. با توجه به اهمیت دقت در داده‌های ورودی، تمامی اطلاعات جمع‌آوری‌شده با منابع رسمی و برداشت‌های میدانی تطبیق داده شد تا مدل نهایی نمایانگر شرایط واقعی شبکه توزیع آب شهر پردنجان باشد. این مدل پایه، مبنای اجرای سناریوهای مختلف مدیریت فشار و تحلیل عملکرد شبکه در مراحل بعدی تحقیق قرار گرفت.

محاسبه تلفات

برای برآورد تلفات واقعی، از روش تحلیل جریان حداقل شبانه استفاده شد که یکی از روش‌های استاندارد و پرکاربرد توصیه‌شده توسط انجمن بین‌المللی آب^۱ و سازمان‌های ملی است. اصل این روش بر این پایه استوار است که در ساعات کم‌مصرف شبانه (معمولاً ۲ تا ۴ صبح)، مصرف مشروع مشترکین (مانند مصارف خانگی) به حداقل می‌رسد و جریان ورودی به شبکه عمدتاً ناشی از نشت است. بنابراین، تفاوت بین جریان ورودی اندازه‌گیری‌شده و مصرف مشروع برآوردشده، حجم نشت واقعی را نشان می‌دهد. این روش ساده، کم‌هزینه و قابل اعتماد است، به شرطی که داده‌های جریان ورودی دقیق باشند و مصرف مشروع شبانه به درستی تخمین زده شود. مصرف مشروع شبانه شامل مواردی مانند فعالیت‌های شبانه‌روزی صنایع کوچک، مراکز درمانی، آتش‌نشانی‌ها، آبیاری فضای سبز محدود و نشت طبیعی داخل تأسیسات خانگی (مانند سیفون توالت) است.

برای تعمیم نشت شبانه به کل شبانه‌روز، از رابطه فشار-نشت استفاده شد.

$$Q = C \times P^{N1} \quad (3)$$

Q: دبی نشت (لیتر بر ثانیه)

² Infrastructure Leakage Index - Ili

³ Current Annual Real Losses - Carl

⁴ Unavoidable Annual Real Losses - Uarl

¹ Iwa



در این حالت، فشار خروجی شیر فشارشکن در طول شبانه‌روز به صورت ثابت تنظیم می‌شود. این روش ساده‌ترین نوع کنترل فشار است و برای مناطقی با الگوی مصرف یکنواخت و کم‌نوسان مناسب می‌باشد. با اجرای این سناریو، تأثیر فشار ثابت بر میزان نشت شبانه، جریان پایه، و مصرف کلی شبکه مورد بررسی قرار گرفت.

ب) سناریوی تنظیم فشار بر اساس الگوی زمانی

در این سناریو، فشار خروجی شیر فشارشکن در ساعات مختلف شبانه‌روز تغییر می‌کند. به عنوان مثال، در ساعات اوج مصرف (صبح و عصر) فشار افزایش یافته و در ساعات کم‌مصرف (نیمه‌شب تا صبح) کاهش می‌یابد. این روش با هدف کاهش جریان نشت در ساعات کم‌مصرف و بهینه‌سازی مصرف انرژی طراحی شده است. تنظیمات زمانی بر اساس داده‌های واقعی مصرف مشترکین و الگوهای رفتاری منطقه انجام شد.

ج) سناریوی تنظیم فشار بر اساس الگوی جریان

در این روش، فشار خروجی شیر فشارشکن به صورت دینامیک و وابسته به دبی لحظه‌ای جریان در شبکه تنظیم می‌شود. این سناریو پیچیده‌ترین و در عین حال دقیق‌ترین روش کنترل فشار است که نیازمند تجهیزات هوشمند و سنسورهای جریان سنج در نقاط کلیدی شبکه می‌باشد. با اجرای این سناریو، رفتار شبکه در پاسخ به تغییرات لحظه‌ای مصرف تحلیل شد و میزان نشت، فشار اضافی، و مصرف انرژی در مقایسه با دو سناریوی قبلی ارزیابی گردید.

برای هر سناریو، شاخص‌های عملکردی شامل میانگین فشار در گره‌ها، نرخ نشت، تعداد ترکیدگی‌ها، حجم آب ورودی به شبکه، مصرف مشترکین، و هزینه انرژی استخراج شد. نتایج نشان داد که سناریوی مبتنی بر الگوی جریان، بیشترین اثربخشی را در کاهش نشت و مصرف انرژی دارد، اما نیازمند زیرساخت‌های پیشرفته و هزینه‌های اجرایی بالاتر است. در مقابل، سناریوی فشار ثابت ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر بوده ولی اثربخشی آن در کاهش نشت محدودتر است. با تحلیل نتایج سناریوها، نقاط بحرانی شبکه از نظر فشار بالا یا پایین شناسایی شدند. سپس پیشنهاداتی برای بهینه‌سازی عملکرد شبکه ارائه گردید.

پس از توسعه مدل اولیه، فرآیند کالیبراسیون با هدف افزایش دقت شبیه‌سازی انجام شد. در این مرحله، فشار محاسبه‌شده در گره‌های منتخب با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در شبکه مقایسه شد و ضرایب زبری لوله‌ها، الگوی مصرف و سایر پارامترهای مؤثر به صورت تدریجی اصلاح شدند تا اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی به حداقل برسد. مرحله کالیبراسیون با استفاده از داده‌های فشارسنجی میدانی در چند نقطه کلیدی شبکه انجام گرفت. کالیبراسیون فرآیندی است که در آن پارامترهای مدل (مانند ضریب زبری لوله‌ها) تنظیم می‌شوند تا خروجی مدل با داده‌های واقعی مطابقت یابد. در این پروژه، داده‌های فشار از نقاطی مانند نواحی مرکزی (ناحیه ۳ و ۴) و حاشیه‌ای (ناحیه ۱ و ۶) جمع‌آوری شدند، برای کالیبراسیون مدل، فشار در ۸ نقطه منتخب از شبکه و در نواحی ۱، ۳، ۴ و ۶ ثبت شد. پایش فشار به مدت ۴۸ ساعت و با فاصله زمانی ۱۵ دقیقه انجام گرفت. پس از کنترل کیفی داده‌ها، مقادیر فشار و دبی اندازه‌گیری‌شده برای تنظیم پارامترهای مدل و ارزیابی خطای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. که این نقاط بر اساس اهمیت هیدرولیکی انتخاب گردیدند. شاخص خطای جذر میانگین مربعات بین فشارهای اندازه‌گیری‌شده و مدل‌سازی‌شده محاسبه گردید و کمتر از ۵ درصد به دست آمد. این شاخص، با فرمول:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_{\text{observed},i} - \gamma_{\text{predicted},i})^2}{n}} \quad (3)$$

RMSE نشان‌دهنده انحراف میانگین، γ بیانگر مقادیر مشاهداتی و مدل‌سازی هستند؛ انحراف میانگین کمتر از ۵ درصد در مهندسی آب قابل قبول تلقی می‌شود، زیرا نشان می‌دهد مدل بیش از ۹۵ درصد دقت دارد. برای دستیابی به این دقت، تنظیماتی مانند افزایش ضریب زبری در لوله‌های قدیمی یا کاهش آن در لوله‌های نو انجام گرفت.

تعریف سناریوهای مدیریت فشار

مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب به عنوان یکی از راهکارهای اقتصادی و عملیاتی برای کاهش نشت، ترکیدگی، مصرف غیرضروری و افزایش عمر تأسیسات شناخته می‌شود. در این پژوهش، سه سناریوی اصلی برای تنظیم فشار در شبکه طراحی و اجرا شد:

در سناریوی کنترل وابسته به جریان، مقدار تنظیم فشار خروجی شیر فشارشکن متناسب با تغییرات دبی عبوری و الگوی تقاضای شبکه تغییر داده شد. بدین ترتیب، در دوره‌های کم‌مصرف مقدار تنظیم فشار کاهش و با افزایش دبی و تقاضای شبکه مقدار آن افزایش یافت. مقادیر تنظیمی با کنترل فشار گره بحرانی تعیین شدند، به گونه‌ای که کاهش فشار اضافی شبکه موجب افت فشار این گره به کمتر از حداقل فشار مجاز ۲۰ متر نشود.

منطق سناریوی جریان محور بر وجود ارتباط میان وضعیت تقاضای شبکه، دبی عبوری و فشار مورد نیاز استوار بود. در دبی‌های پایین، Set Point فشار خروجی PRV کاهش یافت و با افزایش دبی، مقدار Set Point افزایش داده شد. در هر مرحله، فشار گره بحرانی کنترل شد و حداقل فشار ۲۰ متر به عنوان قید بهره‌برداری در نظر گرفته شد. از این طریق، فشار اضافی به‌ویژه در دوره‌های کم‌مصرف کاهش یافت، بدون آنکه سطح خدمت در گره بحرانی شبکه مختل شود.

شاخص‌های ارزیابی

به منظور مقایسه عملکرد سناریوها، شاخص‌های فشار گره‌ها، سرعت جریان در لوله‌ها، افت هد، توزیع فشار، محدوده فشار مجاز و شاخص‌های مرتبط با احتمال نشت مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تغییرات فشار متوسط شبانه به عنوان یکی از شاخص‌های مؤثر در ارزیابی نشت شبکه مورد توجه قرار گرفت.

تحلیل داده‌ها

نتایج حاصل از شبیه‌سازی در محیط Water GEMS استخراج و با استفاده از جداول، نمودارها و نقشه‌های توزیع فشار تحلیل شد. در نهایت، عملکرد سناریوهای مختلف از نظر بهبود وضعیت هیدرولیکی، کاهش فشارهای مازاد و افزایش پایداری بهره‌برداری با یکدیگر مقایسه و مناسب‌ترین سناریو معرفی شد.

نتایج و بحث

ارزیابی عملکرد مدل هیدرولیکی

پس از تکمیل فرآیند کالیبراسیون، مدل هیدرولیکی شبکه توزیع آب شهر پردنجان با استفاده از داده‌های مستقل اعتبارسنجی شد. مقایسه فشارهای شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در ساعات مختلف شبانه‌روز نشان داد که مدل قادر است رفتار واقعی شبکه را با دقت مناسبی بازتولید کند.

اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی برای فشار و دبی کمتر از ۱۰ درصد بود که بیانگر قابلیت مناسب مدل برای تحلیل سناریوهای بهره‌برداری و مدیریت فشار است. این میزان خطا در محدوده قابل قبول مطالعات هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب قرار دارد و نشان می‌دهد که پارامترهای مدل، به‌ویژه ضرایب زبری و الگوی مصرف، به‌درستی تنظیم شده‌اند. اعتبار مناسب مدل سبب شد بتوان از آن به عنوان ابزاری قابل اعتماد برای تحلیل اثر تغییرات مدیریتی بر رفتار هیدرولیکی شبکه استفاده کرد. به عبارت دیگر، نتایج حاصل از سناریوهای مختلف مدیریت فشار را می‌توان با اطمینان نسبی به شرایط واقعی شبکه تعمیم داد.

تحلیل وضعیت موجود شبکه

نتایج شبیه‌سازی وضعیت موجود نشان داد که توزیع فشار در سطح شبکه یکنواخت نیست و برخی نواحی پایین‌دست دارای فشار بیش از مقدار مورد نیاز هستند، در حالی که در بخش‌های مرتفع افت فشار مشاهده می‌شود. این اختلاف فشار ناشی از تغییرات توپوگرافی شهر و نحوه بهره‌برداری از شبکه است. وجود فشارهای بیش از حد در بخشی از شبکه علاوه بر افزایش احتمال نشت، موجب افزایش تنش‌های مکانیکی وارد بر لوله‌ها و اتصالات شده و احتمال شکستگی را افزایش می‌دهد. در مقابل، فشار ناکافی در نواحی مرتفع می‌تواند کیفیت خدمات‌رسانی به مشترکان را کاهش دهد. بنابراین، نتایج مدل بیانگر آن است که مدیریت فشار باید با هدف ایجاد تعادل بین حداقل فشار مورد نیاز و جلوگیری از فشارهای اضافی انجام شود.

تحلیل وضعیت تلفات

شبکه توزیع آب شهر پردنجان با طول تقریبی ۳۷ کیلومتر لوله‌کشی، شامل پلی‌اتیلن (۷۸ درصد)، فولاد (۱۶ درصد)، و آذبت سیمانی (۶ درصد)، وابسته به یک مخزن ذخیره اصلی (R-1) است. جمعیت فعلی حدود ۹۴۰۰ نفر با پیش‌بینی رشد تا حدود ۱۳۷۰۰ نفر در سال ۱۴۲۰. فشار در ۲۰۷ گره شبکه از ۱۵/۲ تا ۶۷/۳ متر متغیر است. دبی خروجی از ۱۰/۴۴ لیتر بر ثانیه در شب تا ۵۲/۱۸ لیتر بر ثانیه در پیک متغیر است.

نشت آب به عنوان یکی از مشکلات اصلی و حیاتی شبکه، حدود ۲۲ درصد از کل آب ورودی (معادل ۸۵۰ مترمکعب روزانه) را تشکیل می‌دهد، که این رقم بالاتر از میانگین کشوری (۲۰-۲۵ درصد) است و بر اساس روش تحلیل جریان



استانداردهای نشریه ۳-۱۱۷ وزارت نیرو، حداقل فشار در نقاط مصرف باید حدود ۱۵-۲۰ متر ستون آب باشد تا آب به طبقات بالای ساختمان‌ها برسد و نارضایتی مشترکین ایجاد نشود. بنابراین، بدترین شرایط یعنی ساعات اوج مصرف (با حداکثر تقاضا و افت فشار بیشتر) و دورترین/مرتفع‌ترین نقطه شبکه (ناحیه ۶) - به عنوان مبنا قرار گرفت. فشار خروجی شیر بر روی ۴۵ متر تنظیم شد، که این مقدار به گونه‌ای انتخاب گردید که:

در ناحیه ۶ (بالا ترین نقطه)، حتی در پیک مصرف صبحگاهی و عصرگاهی، فشار به زیر ۲۰ متر نرسد و حداقل ۲۱-۲۲ متر حفظ شود.

در نواحی پست‌تر مانند ناحیه ۱ و ۲ (نزدیک‌ترین نقاط به مخزن)، فشار حداکثر به ۵۵-۶۰ متر محدود شود و از سطوح خطرناک (بالای ۶۵ متر در حالت پایه) جلوگیری گردد.

میانگین فشار کلی شبکه به طور قابل توجهی کاهش یابد تا نشت و خطر ترکیدگی لوله‌ها کم شود، بدون اینکه کیفیت خدمات آب‌رسانی مختل گردد.

این تنظیم با شبیه‌سازی‌های متعدد تأیید شد، جایی که فشار ۴۵ متر به عنوان نقطه بهینه شناسایی گردید. مقادیر پایین‌تر (مانند ۴۰ متر) منجر به کمبود فشار در نواحی بالا می‌شد، در حالی که مقادیر بالاتر (مانند ۵۰ متر) کاهش نشت را محدود می‌کرد.

پس از اجرای شبیه‌سازی دوره گسترش یافته ۲۴ ساعته با این تنظیمات، نتایج چشمگیری به دست آمد که بهبود قابل توجه عملکرد شبکه را نشان می‌دهد:

۱. کاهش میانگین فشار: میانگین فشار در کل گره‌های شبکه از ۴۱/۲ متر در حالت پایه به ۳۵/۸ متر کاهش یافت، که معادل ۱۳/۱ درصد کاهش است. این کاهش عمدتاً در نواحی پست‌تر (۱ و ۲) محسوس بود، جایی که فشار بالا عامل اصلی نشت بود. کاهش میانگین فشار نه تنها هدررفت را کم می‌کند، بلکه انرژی مورد نیاز برای پمپاژ (در صورت وجود) را کاهش می‌دهد.

۲. کاهش حداکثر فشار: حداکثر فشار مشاهده‌شده در شبکه از ۶۷/۳ متر به ۵۴/۶ متر رسید، که ۱۸/۹ درصد کاهش دارد. تعداد گره‌هایی با فشار بیش از ۵۰ متر (حد خطر ترکیدگی) از میانگین ۱۱۶ گره (۱۸/۸ درصد کل گره‌ها) به ۳۲ گره (۵/۲ درصد کل گره‌ها) کاهش یافت.

حداقل شبانه (MNF) محاسبه شده. تلفات واقعی عمدتاً ناشی از فرسودگی لوله‌های قدیمی (به ویژه چدنی و آریست سیمانی که تحت تأثیر خاک اسیدی منطقه و فشارهای بیش از حد قرار دارند)، ترک‌های ناشی از خوردگی، و اتصالات ضعیف است که دبی نشت را بر اساس تئوری FAVAD (مسیرهای تخلیه با مساحت ثابت و متغیر) به طور نمایی با توان ۱/۰ تا ۱/۵ از فشار افزایش می‌دهد. شاخص نشت زیرساخت (ILI) برابر با ۳/۸ است، که نشان‌دهنده چهار برابر بودن تلفات نسبت به سطح غیرقابل اجتناب بوده و جریان حداقل شبانه ۱۰/۴۴ لیتر بر ثانیه با ۶۶/۵ درصد (۶/۹۴ لیتر بر ثانیه) مربوط به نشت واقعی را تأیید می‌کند. این هدررفت نه تنها منابع زیرزمینی محدود استان چهارمحال و بختیاری را تهدید کرده و برداشت بیش از حد از چاه‌ها را الزامی می‌سازد، بلکه هزینه‌های تولید، تصفیه و پمپاژ را تا ۲۵ درصد افزایش می‌دهد و خطر آلودگی آب از طریق فشار منفی در نقاط نشت (که مواد خارجی مانند خاک یا فاضلاب را مکش می‌کند) را به همراه دارد. علاوه بر این، نوسانات فشار روزانه با انحراف معیار ۱۱/۹ متر، خستگی مکانیکی مداوم در لوله‌ها و اتصالات ایجاد کرده، احتمال حوادث مانند ترکیدگی را دو برابر می‌نماید و تعمیرات اضطراری را مکرر می‌کند. شبکه با وجود پتانسیل ارتقا از طریق لوله‌های جدیدتر پلی‌اتیلن (با شیب متوسط ۲-۵ درصد و تا ۱۰ درصد در نواحی کوهستانی) و موقعیت مناسب مخازن (در رقوم ۲۱۵۰-۲۲۰۰ متر)، نیازمند مداخلاتی جامع مانند نصب شیرهای کنترل و زون‌بندی برای دستیابی به توزیع عادلانه، پایدار و کارآمد است.

ارزیابی سناریوهای مدیریت فشار

به منظور بهبود عملکرد شبکه، سه سناریوی مدیریتی شامل تنظیم فشار ثابت، تنظیم فشار بر اساس الگوی زمانی و تنظیم فشار بر اساس الگوی جریان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که هر سه سناریو نسبت به وضعیت موجود باعث بهبود عملکرد هیدرولیکی شبکه شدند، اما میزان اثربخشی آن‌ها متفاوت بود.

سناریوی نخست روش تعیین فشار ثابت مناسب، بر اساس تحلیل حساسیت در نرم‌افزار Water GEMS انجام گرفت. در این تحلیل، مقادیر مختلف فشار خروجی (از ۳۰ تا ۵۵ متر) تست شدند تا تعادل بین تأمین حداقل فشار در نقاط بحرانی و کاهش حداکثر فشار در نواحی پست‌تر برقرار شود. معیار اصلی، اطمینان از تأمین حداقل فشار مجاز بود. بر اساس

درصد) کاهش یافت. این امر خطر شکست لوله‌ها، به ویژه لوله‌های قدیمی چدنی یا PVC، را به طور قابل توجهی پایین می‌آورد و هزینه‌های تعمیرات اضطراری را کاهش می‌دهد.

۳. تأمین حداقل فشار: در تمامی ساعات شبانه‌روز، حداقل فشار در دورترین نقاط بالای ۲۱ متر حفظ شد، که بالاتر از حد مجاز ۲۰ متر است. این موفقیت نشان می‌دهد که سناریو بدون ایجاد کمبود آب در نواحی مرتفع عمل کرده و حتی حداقل فشار را از ۱۵/۲ متر در حالت پایه به ۲۱/۳ متر افزایش داده (۴۰/۱ درصد بهبود).

۴. کاهش نشت: با اعمال رابطه فشار-نشت بر پایه تئوری مسیرهای تخلیه با مساحت ثابت و متغیر FAVAD - و ضریب توان ۱/۱۵، نشت کاهش یافت. جریان حداقل شبانه از ۱۰/۴۴ به ۸/۷۵ لیتر بر ثانیه رسید، که ۱/۶۹ لیتر بر ثانیه (۱۶/۲ درصد) کاهش در نشت شبانه را نشان می‌دهد. نشت کل روزانه از ۸۵۰ به ۷۱۵ مترمکعب کاهش یافت، معادل ۱۳۵ مترمکعب صرفه‌جویی روزانه یا حدود ۴۹۲۷۵ مترمکعب در سال. این صرفه‌جویی نه تنها منابع آب زیرزمینی را حفظ می‌کند، بلکه هزینه‌های تولید و تصفیه آب را پایین می‌آورد.

۵. کاهش نوسانات فشار: انحراف معیار فشار از ۱۱/۹ متر به ۹/۴ متر کاهش یافت، که توزیع فشار را یکنواخت‌تر می‌کند و خستگی مکانیکی لوله‌ها را کم می‌نماید.

علی‌رغم نتایج مثبت، سناریوی کنترل فشار ثابت دارای محدودیت‌هایی است که باید در نظر گرفته شود:

در ساعات کم‌مصرف شبانه (۲-۵ صبح)، که تقاضا پایین است، فشار ثابت ۴۵ متری همچنان اعمال می‌شود، در حالی که فشار پایین‌تر (مثلاً ۳۰-۳۵ متر) کافی بود. این امر می‌تواند منجر به نشت بیش از حد ضروری در این ساعات شود و پتانسیل صرفه‌جویی بیشتری را از دست بدهد.

در بلندمدت، با افزایش جمعیت تا سال ۱۴۲۰ (۱۳۷۰۰ نفر) یا توسعه شبکه، فشار ثابت ۴۵ متر ممکن است دیگر بهینه نباشد و نیاز به تنظیم مجدد یا ارتقاء به سیستم‌های پیشرفته‌تر مانند PRV های هوشمند با کنترل زمانی ایجاد شود.

در نهایت، سناریوی اول ثابت کرد که حتی یک مداخله ساده مانند نصب یک شیر PRV می‌تواند بهبودهای قابل توجهی در کارایی شبکه ایجاد کند. این روش، با هزینه پایین و اجرای

سریع، گزینه‌ای ایده‌آل برای شهرهای مشابه پردنجان است و پایه‌ای برای سناریوهای پیشرفته‌تر مانند کنترل فشار زمانی فراهم می‌آورد. صرفه‌جویی سالانه حدود ۴۹ هزار مترمکعب آب، معادل تأمین نیاز چندین صد خانوار، ارزش اقتصادی و زیست‌محیطی بالایی دارد و بازگشت سرمایه را در کمتر از چند سال تضمین می‌کند.

در سناریوی دوم، تنظیم فشار متناسب با تغییرات زمانی مصرف انجام شد. این روش ضمن حفظ فشار مورد نیاز مشترکان در ساعات اوج مصرف، از افزایش غیرضروری فشار در ساعات کم‌مصرف جلوگیری کرد. در نتیجه، کاهش نشت، کاهش مصرف انرژی و کاهش تنش مکانیکی وارد بر شبکه به‌طور هم‌زمان حاصل شد.

سناریوی سوم نیز بیشترین کاهش فشار را ایجاد کرد، اما به دلیل نیاز به تجهیزات کنترلی پیشرفته‌تر و هزینه سرمایه‌گذاری بیشتر، اجرای آن مستلزم صرف منابع مالی قابل توجه است.

نتایج شبیه‌سازی دوره گسترش‌یافته ۲۴ ساعته سناریوی دوم بهبودهای چشمگیری نسبت به حالت پایه و سناریوی اول نشان داد:

۱. کاهش بیشتر میانگین فشار

۲. بهبود توزیع فشار در طول شبانه‌روز: توزیع فشار یکنواخت‌تر شد. در ساعات اوج مصرف، حداقل فشار در ناحیه ۶ حدود ۲۲ متر حفظ گردید.

۳. افزایش ذخیره شبانه مخازن: کاهش دبی خروجی در ساعات شبانه، فرصت پر شدن بیشتر مخزن ذخیره را فراهم کرد. حجم ذخیره شبانه از ۱۲۵ مترمکعب در حالت پایه به ۱۵۲ مترمکعب افزایش یافت.

سناریوی دوم مدیریت فشار، به عنوان رویکردی پیشرفته‌تر نسبت به سناریوی اول، برای رفع محدودیت‌های کنترل فشار ثابت طراحی شد. در سناریوی اول، فشار ثابت در ساعات کم‌مصرف شبانه بیش از حد لازم باقی می‌ماند و منجر به نشت غیرضروری می‌شود. در سناریوی دوم، فشار خروجی شیر فشارشکن در ساعات مختلف شبانه‌روز متغیر است و بر اساس الگوی مصرف واقعی شبکه تنظیم می‌گردد.

• تطبیق بهتر با الگوی واقعی مصرف: فشار فقط در زمان نیاز افزایش می‌یابد و از هدررفت جلوگیری می‌شود.



گردید تا پاسخ‌دهی سریع و پایدار تضمین شود. مزیت اصلی این روش، پاسخ‌دهی خودکار به تغییرات ناگهانی تقاضا است، مانند افزایش مصرف در حوادث یا کاهش ناگهانی در شب.

نتایج شبیه‌سازی دوره گسترش‌یافته ۲۴ ساعته سناریوی سوم، بهترین عملکرد را در میان تمام سناریوها نشان داد. بهینه‌ترین کاهش فشار، حداکثر کاهش نشت، پاسخ‌دهی بهینه به تغییرات، کاهش بیشتر مصرف انرژی، افزایش عمر تأسیسات از مزایای این سناریو بود.

جدول ۴ مقایسه جامعی ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که سناریوی سوم در تمام شاخص‌های کلیدی برتر است. کاهش ۹۳/۱ درصدی گره‌های پر فشار و افزایش ۳۲ درصدی ذخیره مخزن، پایداری و ایمنی سیستم را به سطح عالی رسانده است.

جدول ۴- مقایسه جامع سه سناریو با حالت پایه

شاخص	حالت پایه	سناریوی ۱ (فشار ثابت)	سناریوی ۲ (الگوی زمانی)	سناریوی ۳ (الگوی جریان)
میانگین فشار (متر)	۴۱/۲	۳۵/۸ (درصد -۱۳/۱)	۳۳/۶ (درصد -۱۸/۴)	۳۲/۱ (درصد -۲۲/۱)
حداکثر فشار (متر)	۶۷/۳	۵۴/۶ (درصد -۱۸/۹)	۵۲/۸ (درصد -۲۱/۵)	۵۱/۲ (درصد -۲۳/۹)
حداقل فشار (متر)	۱۵/۲	۲۱/۳ (+۴۰/۱ درصد)	۲۲/۱ (درصد +۴۵/۴)	۲۱/۸ (درصد +۴۳/۴)
انحراف معیار فشار (متر)	۱۱/۹	۹/۴ (درصد -۲۱)	۸/۶ (درصد -۲۷/۷)	۷/۸ (درصد -۳۴/۵)
جریان حداقل شبانه (لیتر بر ثانیه)	۱۰/۴۴	۸/۷۵ (درصد -۱۶/۲)	۷/۹۸ (درصد -۲۳/۶)	۷/۳۵ (درصد -۲۹/۶)
نشت روزانه (مترمکعب در روز)	۸۵۰	۷۱۵ (درصد -۱۵/۹)	۶۵۵ (درصد -۲۲/۹)	۶۰۵ (درصد -۲۸/۸)
صرفه‌جویی سالانه (مترمکعب)	-	۴۹۲۷۵	۷۱۱۷۵	۸۹۴۲۵
ذخیره شبانه مخزن (مترمکعب)	۱۲۵	۱۳۵ (درصد +۱۰/۴)	۱۹۵ (درصد +۲۱/۶)	۲۴۵ (درصد +۳۲)
تعداد گره با فشار >۵۰ متر	۱۱۶	۳۲ (درصد -۷۲/۴)	۱۸ (درصد -۸۴/۵)	۸ (درصد -۹۳/۱)
تعداد گره با فشار <۲۰ متر	۳۸	۰ (درصد -۱۰۰)	۰ (درصد -۱۰۰)	۰ (درصد -۱۰۰)

نکته مهم آن است که کاهش فشارهای مازاد شبکه به کاهش سطح خدمت در نقاط بحرانی منجر نشد. در حالت پایه ۳۸ گره دارای فشار کمتر از ۲۰ متر بودند، در حالی که پس از

افزایش ذخیره مخازن در ساعات شبانه بهبود پایداری سیستم در برابر اختلالات.

کاهش مصرف انرژی: صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی پمپاژ.

امکان برنامه‌ریزی برای توسعه آتی: الگو به راحتی با تغییرات جمعیتی یا فصلی تنظیم می‌شود.

محدودیت‌های سناریوی دوم عبارت‌اند از:

نیاز به شیر فشارشکن با قابلیت برنامه‌ریزی زمانی: هزینه خرید و نصب بالاتر (۲۰ تا ۵۰ درصد بیشتر از شیر ساده).

نیاز به تنظیم دوره‌ای الگوی زمانی: در صورت تغییر الگوی مصرف (مانند فصول مختلف یا رشد جمعیت)، باید الگو بازنگری شود.

عدم پاسخ‌دهی به تغییرات ناگهانی و غیرمنتظره: مانند تقاضای ناگهانی در حوادث (آتش‌سوزی یا شکست لوله)، که ممکن است نیاز به روش‌های پیشرفته‌تر مانند کنترل وابسته به جریان داشته باشد.

در نهایت، سناریوی دوم با بهره‌گیری از کنترل فشار وابسته به زمان، کارایی بسیار بالاتری نسبت به روش ثابت ارائه می‌دهد و صرفه‌جویی سالانه بیش از ۷۱ هزار مترمکعب آب ایجاد می‌کند. این مقدار معادل تأمین نیاز آب شرب چندین صد خانوار اضافی است و ارزش اقتصادی و زیست‌محیطی بالایی دارد. این رویکرد، به ویژه برای شهرهای کوهستانی ایران با الگوهای مصرف مشابه، الگویی عملی و مؤثر است و بازگشت سرمایه را در مدت کوتاهی (معمولاً کمتر از ۳-۵ سال) تضمین می‌کند.

روش پیاده‌سازی سناریوی سوم شامل نصب یک شیر فشارشکن هوشمند در نقطه ورودی اصلی شبکه (خروجی مخزن) بود. کنترل‌کننده شیر بر اساس رابطه جریان-فشار برنامه‌ریزی شد تا در جریان‌های پایین (کم‌مصرف شبانه) فشار را به حداقل ممکن (حدود ۳۵-۳۸ متر) کاهش دهد و در جریان‌های بالا (پیک مصرف) فشار را تا ۴۸-۵۰ متر افزایش دهد، به گونه‌ای که حداقل فشار ۲۰-۲۲ متر در ناحیه ۶ حفظ شود. این تنظیم با استفاده از منحنی‌های عملکرد در نرم‌افزار Water GEMS شبیه‌سازی شد و چندین بار بهینه‌سازی

اثر مدیریت فشار بر کاهش نشت

نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که اجرای سناریوهای مدیریت فشار موجب کاهش قابل توجه میزان نشت در شبکه شد. بر اساس نتایج پژوهش، مدیریت فشار توانست میزان تلفات آب را تا حدود ۳۰ درصد کاهش دهد و هم‌زمان پایداری بهره‌برداری از شبکه را افزایش دهد. این یافته بیانگر آن است که بخش قابل توجهی از هدررفت آب در شبکه ناشی از فشارهای بیش از حد بوده و بدون نیاز به تعویض گسترده لوله‌ها می‌توان تنها با مدیریت صحیح فشار، بخش زیادی از تلفات را کنترل کرد.

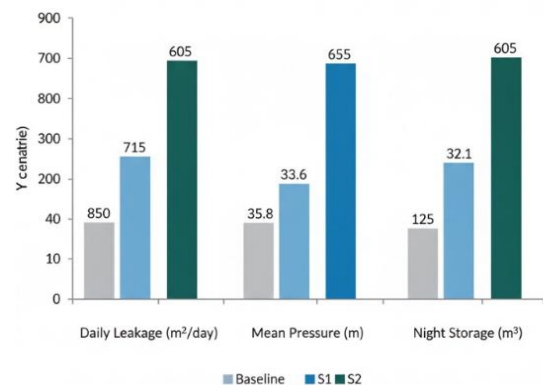
تحلیل اقتصادی

کاهش نشت علاوه بر صرفه‌جویی در منابع آب، باعث کاهش حجم آب تولیدی مورد نیاز، کاهش هزینه‌های پمپاژ و کاهش احتمال ایجاد شکستگی در شبکه می‌شود؛ بنابراین مدیریت فشار می‌تواند یکی از اقتصادی‌ترین راهکارهای کاهش آب بدون درآمد باشد.

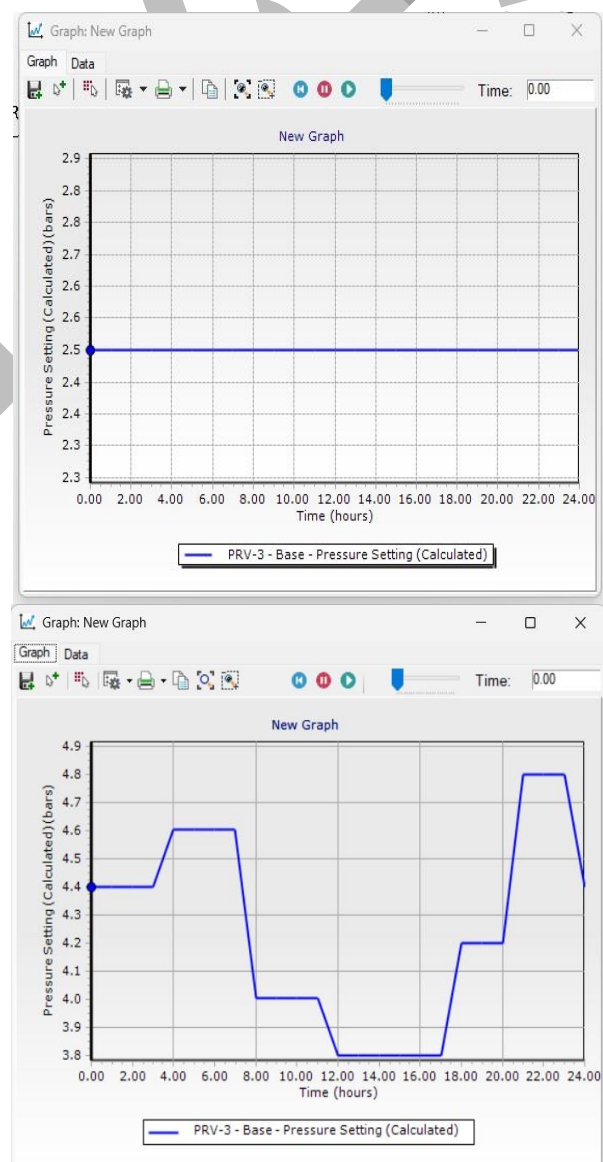
مقایسه اقتصادی سناریوها نشان داد که سناریوی نخست کمترین هزینه اولیه را دارد، در حالی که سناریوی سوم بیشترین سرمایه‌گذاری را نیازمند است. با وجود این، تحلیل اقتصادی بلندمدت نشان داد که سناریوی سوم بیشترین بازده اقتصادی را ایجاد می‌کند، زیرا کاهش بیشتر نشت و هزینه‌های تعمیرات، هزینه اولیه را در بلندمدت جبران می‌کند. با این حال، با در نظر گرفتن شرایط فعلی شبکه پردنجان، محدودیت‌های اجرایی و هزینه سرمایه‌گذاری، سناریوی دوم مناسب‌ترین گزینه ارزیابی شد، زیرا تعادل مناسبی بین هزینه اجرا، عملکرد هیدرولیکی و کاهش نشت ایجاد می‌کند.

نتایج این پژوهش با یافته‌های Jafarinasl et al. (2018) در زمینه نقش مدیریت فشار در کاهش نشت و نیز با نتایج Ribeiro et al. (2018) و Thornton et al. (2008) درباره ارتباط مستقیم فشار و میزان نشت همخوانی دارد. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از مدل هیدرولیکی WaterGEMS می‌تواند پیش از اجرای پروژه‌های اصلاح شبکه، اثر سناریوهای مختلف را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند و ریسک تصمیم‌گیری را کاهش دهد. این موضوع اهمیت استفاده از مدل‌های هیدرولیکی را در برنامه‌ریزی و مدیریت شبکه‌های توزیع آب شهری بیش از پیش آشکار می‌کند.

اعمال هر سه راهبرد این تعداد به صفر رسید و حداقل فشار شبکه در تمام سناریوها بالاتر از ۲۰ متر باقی ماند.



شکل ۲- نمودار مقایسه جامع سه سناریو با حالت پایه



شکل ۳- نقشه‌های توزیع فشار (Pressure Contour Maps) برای حالت پایه و سناریوی بهینه



نتایج این پژوهش نشان داد که مدل سازی هیدرولیکی با استفاده از نرم افزار Water GEMS، ابزار مؤثری برای ارزیابی عملکرد شبکه توزیع آب شهر پردنجان و بررسی سناریوهای مختلف بهره برداری و مدیریت فشار است. مدل توسعه یافته پس از کالیبراسیون و اعتبارسنجی، توانست رفتار واقعی شبکه را با دقت قابل قبول شبیه سازی کرده و نقاط دارای شرایط بحرانی از نظر فشار و عملکرد هیدرولیکی را شناسایی کند. بررسی وضعیت موجود شبکه نشان داد که اختلاف ارتفاع و شرایط توپوگرافی شهر موجب ایجاد عدم یکنواختی در توزیع فشار شده است؛ به گونه ای که برخی مناطق با فشارهای مازاد و برخی نواحی با کمبود فشار مواجه هستند. این شرایط می تواند موجب افزایش احتمال نشت، شکستگی خطوط و کاهش کیفیت خدمات رسانی شود.

نتایج حاصل از تحلیل سناریوهای مدیریت فشار نشان داد که اعمال راهکارهای کنترلی می تواند ضمن حفظ فشار مورد نیاز مشترکان، فشارهای اضافی شبکه را کاهش داده و شرایط هیدرولیکی آن را بهبود بخشد. در میان سناریوهای بررسی شده، تنظیم فشار بر اساس الگوی زمانی مصرف، به دلیل ایجاد تعادل مناسب میان کاهش فشارهای مازاد، کاهش هدررفت آب و هزینه اجرایی، به عنوان مناسب ترین گزینه برای شبکه مورد مطالعه انتخاب شد. این سناریو برای شرایط کوتاه مدت شهر پردنجان توصیه می شود. همچنین برای بهبود عملکرد فنی در بلند مدت، استقرار شیر فشارشکن مجهز به کنترل کننده زمان محور یا وابسته به جریان پیشنهاد می گردد. پایش مستمر فشار و حداقل جریان شبانه جهت حفظ دستاوردهای حاصله ضروریست. همچنین، نتایج نشان داد که مدیریت فشار می تواند میزان هدررفت واقعی آب را به طور قابل توجهی کاهش داده و موجب کاهش هزینه های تولید، مصرف انرژی، تعمیرات و نگهداری شبکه شود. بنابراین، اجرای برنامه های مدیریت فشار می تواند یکی از راهکارهای اقتصادی و پایدار برای کاهش آب بدون درآمد در شبکه های توزیع آب شهری باشد.

به طور کلی، ترکیب مدل سازی هیدرولیکی، کالیبراسیون دقیق مدل و استفاده از سناریوهای مدیریت فشار، رویکردی کارآمد برای بهینه سازی بهره برداری از شبکه های توزیع آب محسوب می شود. نتایج این پژوهش می تواند به عنوان مبنایی برای تصمیم گیری مدیران شرکت های آب و فاضلاب در زمینه کاهش هدررفت آب، افزایش قابلیت اطمینان شبکه و مدیریت پایدار منابع آب در شهرهای دارای شرایط مشابه مورد استفاده

برای کمی کردن تحلیل اقتصادی، حجم آب صرفه جویی شده در هر سناریو محاسبه شد. صرفه جویی سالانه برای سناریوهای فشار ثابت، زمان محور و جریان محور به ترتیب ۴۹،۲۷۵، ۷۱،۱۷۵ و ۸۹،۴۲۵ مترمکعب در سال است. در نسخه نهایی، ارزش اقتصادی این حجم بر اساس هزینه واقعی تأمین و تولید هر مترمکعب آب محاسبه خواهد شد. همچنین هزینه خرید، نصب و بهره برداری تجهیزات هر سناریو در محاسبه دوره بازگشت سرمایه وارد می شود.

با توجه به عدم قطعیت در ارزش اقتصادی آب، سه مقدار ۱۰، ۲۰ و ۳۰ هزار تومان به ازای هر مترمکعب به عنوان سناریوهای تحلیل حساسیت در نظر گرفته شد.

ارزش اقتصادی سالانه آب صرفه جویی شده برای سه سطح مفروض ارزش آب در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۳ - تحلیل حساسیت ارزش اقتصادی سالانه آب صرفه جویی شده در سناریوهای مختلف مدیریت فشار

سناریو	صرفه جویی سالانه (m ³ /year)	۱۰ هزار تومان/m ³	۲۰ هزار تومان/m ³	۳۰ هزار تومان/m ³
فشار ثابت	۴۹۰۲۷۵	۴۹۳ میلیون تومان	۹۸۶ میلیون تومان	۱/۴۸ میلیارد تومان
زمان محور	۷۱۰۱۷۵	۷۱۲ میلیون تومان	۱/۴۲ میلیارد تومان	۲/۱۴ میلیارد تومان
جریان محور	۸۹۰۴۲۵	۸۹۴ میلیون تومان	۱/۷۹ میلیارد تومان	۲/۶۸ میلیارد تومان

نتایج تحلیل حساسیت نشان می دهد که با وجود تغییر ارزش واحد آب، روند مقایسه سناریوها ثابت باقی می ماند و سناریوی جریان محور به دلیل بیشترین حجم کاهش نشت، بیشترین منفعت مستقیم ناشی از آب صرفه جویی شده را ایجاد می کند. با این حال، از آنجا که هزینه واقعی خرید، نصب و نگهداری تجهیزات کنترلی برای شبکه مورد مطالعه در دسترس نبوده است، از ارائه دوره بازگشت سرمایه قطعی خودداری شد.

بنابراین مقادیر فوق صرفاً به عنوان تحلیل حساسیت منفعت مستقیم آب صرفه جویی شده ارائه شده اند و مقادیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ هزار تومان نیز تعرفه واقعی آب نبوده و تنها برای بررسی حساسیت نتایج نسبت به ارزش اقتصادی واحد آب در نظر گرفته شده اند.

نتیجه گیری

- 2- Bentley Systems, 2023. *OpenFlows WaterGEMS: Water distribution system modeling and management*. Bentley Systems. Available at: <https://www.bentley.com/software/openflows/watergems> (Accessed: 12 August 2026).
- 3- Fattahi, H., Mamizadeh, J., Baghi, A. and Abdollahi, H., 2024. Field measurement and hydraulic simulation of water transmission lines and drinking water distribution network (Case study: Chavar City, Ilam Province). *Iranian Water Research Journal*, 18(55). doi:10.22034/iwrj.2024.14845.2623. [In Persian].
- 4-Latifi, M., Parvaneh, R. and Naeeni, S.T.O., 2022. Investigating the influence of surrounding soil properties on leakage discharge from cracks in polyethylene pipes. *Engineering Failure Analysis*, 141, 106676. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106676>
- 5- Kourbasis, N., Patelis, M., Tsitsifli, S. and Kanakoudis, V., 2020. Optimizing water age and pressure in drinking water distribution networks. *Environmental Sciences Proceedings*, 2(1), p. 51. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2020002051>
- 6- Liemberger, R. and Wyatt, A., 2019. Quantifying the global non-revenue water problem. *Water Supply*, 19(3), pp.831-837. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.129>
- 7- Jafari-Asl, J., 2018. Optimal pressure control for leakage minimizing in water distribution system management using metaheuristic optimization methods. M.Sc. thesis, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Yasouj University. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v4i2.61886>
- 8-Ravan Ghalati, A., and Ahmadi, S.H., 2018. Modelling and hydraulic analysis of water distribution network of the Bezein Town in the Shiraz city, *Iranian Water Researches Journal*, 30(3), pp. 99–108. doi: 10.22034/iwrj.2024.14845.2623. [In Persian].
- 9- Ribeiro, L., Sousa, J., Muranho, J. and Sá Marques, A., 2018. Locating unreported leaks with modelling tools and pressure monitoring: a case study. *EPiC Series in Engineering*, 3, pp. 1758–1765. <https://doi.org/10.29007/79rg>
- 10- Lambert, A. and Taylor, R., 2010. *Water Loss Guidelines*. New Zealand: The New Zealand Water & Wastes Association Wairoa Aotearoa, 102p
- 11- Thornton, J., Sturm, R. and Kunkel, G., 2008. *Water Loss Control*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill. 380p.
- 12- Walski, T.M., Chase, D.V., Savic, D.A., Grayman, W., Beckwith, S. and Koelle, E., 2003. *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Waterbury, CT: Haestad Press. http://ecommons.udayton.edu/cee_fac_pub/18
- 13- Farley, M. and Trow, S., 2003. *Losses in Water Distribution Networks*. London: IWA Publishing. <http://www.iwapublishing.com>

قرار گیرد. در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود عملکرد راهبردهای مدیریت فشار با استفاده از داده‌های پایش بلندمدت و در فصول مختلف بررسی شود. همچنین توسعه کنترل بلادرنگ مبتنی بر داده‌های SCADA، بررسی کنترل راه دور نقطه بحرانی و تحلیل هم‌زمان اثر مدیریت فشار بر نشت، شکست لوله و کیفیت آب می‌تواند تصویر جامع‌تری از عملکرد بلندمدت راهبردهای کنترل فشار فراهم کند. انجام تحلیل هزینه چرخه عمر نیز برای مقایسه اقتصادی دقیق‌تر گزینه‌های کنترلی پیشنهاد می‌شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از شرکت آب و فاضلاب استان چهارمحال و بختیاری به خاطر در اختیار قرار دادن داده و اطلاعات و حمایت مالی از این تحقیق تشکر می‌نمایند

تضاد منافع نویسندگان

"در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است"

دسترسی به داده‌ها

داده‌های این تحقیق مربوط به بخشی از پایان نامه سید محمد کاظم بنی هاشمی امام قیسی دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - محیط‌زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم می باشد.

"بخشی از داده‌های این تحقیق از سازمان آب و فاضلاب استان چهارمحال و بختیاری دریافت شد"

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول : جمع‌آوری و تحلیل اولیه داده‌ها و انجام مراحل نگارش مقاله

نویسنده دوم: تحلیل داده ها، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج

نویسنده سوم: تحلیل داده ها، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

منابع

- 1- Aydin, M.E. and Karadirek, I.E., 2022. Water losses management in urban water distribution systems. In: Bahadir, M. and Haarstrick, A. (eds.), *Water and Wastewater Management: Global Problems and Measures*. Cham: Springer, pp. 53–65.