



Investigating the Performance of Pump as Turbine for Pressure and Leakage Management of Urban Water Distribution Network Operation Using Modeling Approach

Mehrtash Eskandaripour¹, Ramtin Moeini^{2*}, Ali Dehnavi³

1. PhD. Student 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

3. Assist. Prof. of Civil Engineering-Water Resources Management, Civil Engineering and Transportation Faculty, University of Isfahan, Isfahan, Iran



<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.557753.3528>

Original Paper

Abstract

Pressure is one of the most important hydraulic parameters in urban water distribution networks and deviations from the permissible range can lead to increased leakage, reduced equipment lifespan, and energy losses. Although Pressure Reducing Valves are widely used as the most common tools for pressure management, this approach leads to considerable energy dissipation. In recent years, the use of Pumps As Turbines as an alternative or complementary elements compared to PRVs particularly in networks with significant differences in elevation and excess head. However, most previous studies either have focused primarily on energy generation or have not comprehensively investigated the hydraulic impacts of PATs based on Pressure Driven Analysis. In this study, the performance of PATs and PRVs in terms of pressure management, leakage, and energy recovery is comparatively investigated for the Baharestan WDS in Isfahan Province using PDA and a 24-hour Extended Period Simulation. The network was modeled considering three scenarios including, without valve, with PRV, and with replacement of PRVs by PATs. The results showed that PRV installation reduced the average network pressure from 51.11 to 35.91 m and decreased the average leakage from 64.65 to 44.26 L/s. However, replacing PRVs with PATs resulted in smaller reductions in pressure and leakage (average pressure of 45.03 m and leakage of 59.56 L/s) compared to PRVs, but enabled energy recovery of 73.28 kW during the 24-hour EPS. Overall, the results indicate that PRVs are more effective in pressure control and leakage reduction, whereas PATs, while maintaining hydraulic stability, offer substantial potential for recovering dissipated energy. These results suggest that PATs should not be considered a complete replacement for PRVs, but rather a complementary option to support informed decision-making in pressure and energy management of UWDN.

Keywords:

Pressure Management, Pressure-Driven Analysis (PDA), Energy Recovery, Leakage, Pump As Turbine (PAT), Pressure Reducing Valve (PRV).



Received: Apr. 7, 2025
Revised: June 23, 2025
Accepted: July 11, 2025

Use your device to scan and read the article online



To cite this article:

Eskandaripour, M., Moeini, R., Dehnavi, A. 2025. Investigating the performance of pump as turbine for pressure and leakage management of urban water distribution network operation using modeling approach. *Water and Wastewater*, (In press).

<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.557753.3528>.

© 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

Urban water distribution networks¹ operate under complex hydraulic conditions governed by topography, network configuration, and spatiotemporal demand variability. In many systems, elevation differences and conservative design practices lead to excess pressure value in downstream areas. Increasing pressure value is a primary driver of background more leakage, pipe bursts, and mechanical degradation of infrastructure, ultimately increasing operational costs and reducing asset lifespan (Rossi et al., 2019).

Conventional pressure management method generally relies on pressure reducing valves², which effectively regulate nodal pressures but dissipate recoverable hydraulic energy. However, several researchers have proposed Pumps as Turbines³ as an alternative mechanism for utilizing surplus hydraulic head to generate electricity while controlling pressure as follows.

For example, Sambito et al. (2021) and Pirard et al. (2022) applied multi-objective optimization to maximize PAT energy recovery, highlighting the importance of discharge redistribution and hydraulic constraints. More recently, Manservigi et al. (2023) and Marini et al. (2023) demonstrated that optimal PAT selection and scheduling can recover up to 40–50% of available hydraulic energy in real networks.

Despite these advances, most previous investigations rely on demand-driven analysis⁴ and primarily focus on energy generation potential. Limited attention has been given to pressure-driven hydraulic behavior and leakage response under PAT operation, particularly for real-scale networks subjected to diurnal demand variation. Moreover, comparative assessments of PRVs and PATs under identical installation locations remain scarce. Accordingly, the present study aims to provide a pressure-driven analysis⁵ comparative evaluation of PRVs and PATs in a real urban network, simultaneously examining pressure regulation, leakage dynamics, and energy recovery under extended period simulation⁶.

2. Materials and methods

2.1. Study area and network description

The Baharestan UWDN in Isfahan Province was selected as the case study (Fig. 1). The network consists of 3147 nodes, 3413 pipes, one reservoir, and eleven PRVs.

2.2. Hydraulic modeling framework

Hydraulic simulations were conducted using EPANET 2.2 under PDA to realistically represent nodal demand satisfaction under pressure-deficient conditions. EPS over 24 hours was adopted to capture temporal demand variations. Nodal demand was calculated using the Wagner formulation

$$Q_j^{avl} = \begin{cases} Q_j^{req} & ; \text{if } H_j \geq H_{des} \\ Q_j^{req} \left(\frac{H_j - H_{min}}{H_{des} - H_{min}} \right)^{\frac{1}{2}} & ; \text{if } H_{min} \leq H_j \leq H_{des} \\ 0 & ; \text{if } H_j \leq H_{min} \end{cases} \quad (1)$$

Where,

Q_j is supplied demand, Q_{req} is required demand, H_j is available nodal head, H_{min} is minimum pressure head, and H_{req} is required pressure head.

Network leakage was estimated using a pressure-dependent model

$$q_j = K_f * p_j^\beta \quad (2)$$

$$K_f = c * \sum_{j=1}^M 0.5 * L_{ij} \quad (3)$$

Where,

q_j is leakage at node j , L_{ij} is connected pipe length, p_j is nodal pressure, C is the leakage coefficient, and α ($=1.18$) is the pressure exponent. This formulation was applied to evaluate leakage variations among conditions rather than absolute leakage calibration.

2.3. PAT selection and energy recovery

Pumps were selected based on flow and head conditions observed at PRV locations using characteristic pump curves. Best efficiency points⁷ were extracted from manufacturer catalogs. Electrical power generated by PATs was calculated as

$$P_{tb} = 9810 \times Q_{tb} H_{tb} \delta_{tb} \quad (4)$$

⁷ Best Efficiency Points (BEP)

¹ Urban Water Distribution Networks (UWDNs)

² Pressure Reducing Valves (PRVs)

³ Pumps As Turbines (PAT)

⁴ Demand-Driven Analysis (DDA)

⁵ Pressure-Driven Analysis (PDA)

⁶ Extended Period Simulation (EPS)



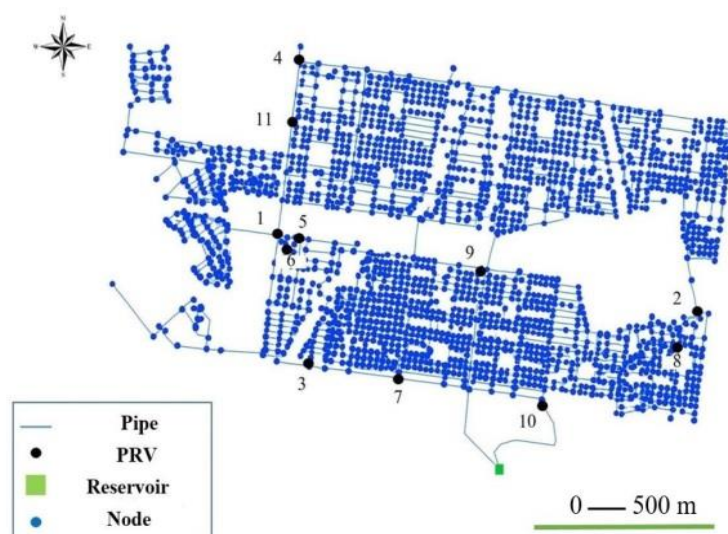


Fig. 1. Schematic map of Baharestan network

Where,

P is produced power (W), ρ is water density, g gravitational acceleration, Q turbine discharge, H recoverable head, and η PAT efficiency.

2.4. Condition definition

Three operational conditions were evaluated
Condition 1: Baseline operation without pressure control devices.

Condition 2: Installation of PRVs with uniform set pressure.

Condition 3: Replacement of PRVs with PATs at identical locations.

3. Results and discussion

Under baseline conditions (condition 1), the Baharestan network exhibited significant excess pressure across large portions of the system. As summarized in Table 1, the results indicate inefficient hydraulic operation and elevated physical water losses.

Table 2 shows that average pressure decreased to 35.91 m, accompanied by a reduction in leakage to 44.26 L/s.

Table 1. Results of hydraulic parameters of Baharestan network in PDA analytical conditions (Condition 1)

Parameter	Pressure (m)	Leakage (l/s)
Minimum	16.07	21.74
Average	51.11	65.74
Maximum	76.78	84.85

In the third condition, all PRVs were replaced with PATs at identical locations to isolate hydraulic impacts. As presented in Table 3, although pressure reduction was less pronounced

compared to PRVs, minimum nodal pressures improved, enhancing supply robustness.

Total electrical energy recovered during the 24-hour EPS reached 73.28 kW, as summarized in Table 4.

Fig. 2. compares average nodal pressure over the 24-hour EPS for three conditions.

Table 2. Results of hydraulic parameters of Baharestan network in PDA analytical conditions (Condition 2)

Parameter	Pressure (m)	Leakage (l/s)
Minimum	8.50	15.41
Average	35.91	44.26
Maximum	63.51	71.67

Table 3. Results of average nodal pressure and average leakage in Baharestan network in PDA analytical conditions (Condition 3)

Parameter	Pressure (m)	Leakage (l/s)
Minimum	13.45	18.31
Average	45.03	59.56
Maximum	71.08	78.94

Table 4. Results of energy production of PATs in PDA

Valve number	Total energy produced (kW)
1	15.43
2	8.66
3	2.67
4	1.74
5	10.58
6	1.27
7	8.06
8	1.30
9	14.49
10	7.47
11	1.61
Total	73.28



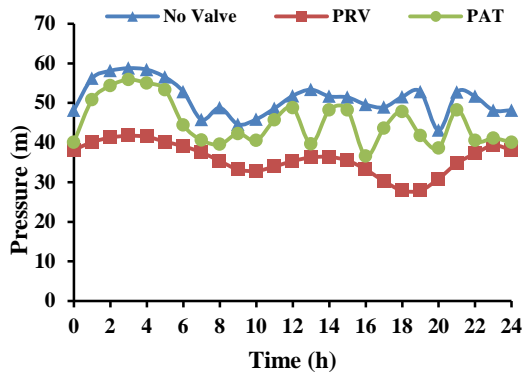


Fig. 2 . Comparison of average nodal pressure values for 24 hour EPS in the Baharestan network for three proposed conditions

Pressure zoning results (Fig. 3 and Table 5) further indicate that PRVs produced the lowest average pressures across all zones, while PATs

preserved higher minimum pressures, reducing the risk of service interruptions.

4. Conclusion

This study provided a pressure-driven comparative assessment of PRVs and PATs in a real UWDN. Results confirm that PRVs deliver the most effective pressure suppression and leakage reduction. However, PATs maintain acceptable hydraulic performance while enabling substantial energy recovery, highlighting their value as complementary devices rather than full replacements. The findings support hybrid deployment strategies integrating PRVs for critical pressure regulation and PATs in locations with persistent excess head. Such approaches can improve operational sustainability by balancing hydraulic reliability and energy efficiency.

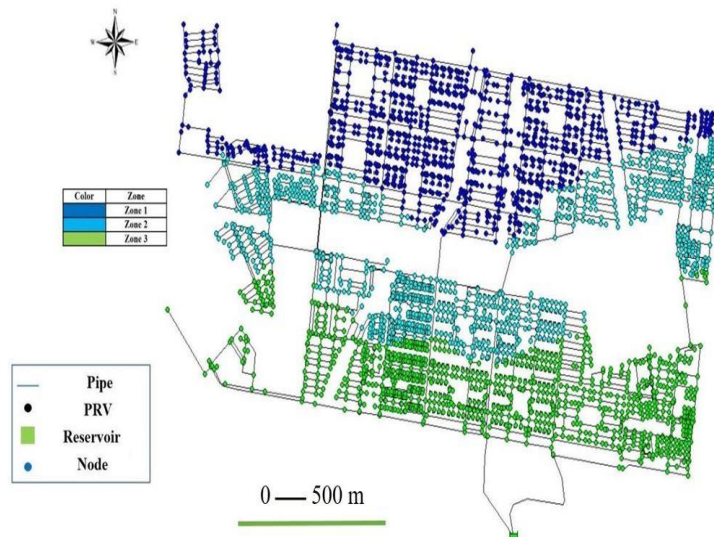


Fig. 3. Map of Baharestan network pressure zone

Table 5. Results of average nodal pressure of Baharestan network zones during EPS in all three proposed conditions

Condition	Zone\Parameter	Minimum	Average	Maximum
Condition 1	Zone 1	20.67	32.94	72.90
	Zone 2	16.03	39.78	66.19
	Zone 3	15.21	31.10	50.85
Condition 2	Zone 1	18.50	18.50	59.71
	Zone 2	13.78	13.78	57.16
	Zone 3	10.32	13.11	46.87
Condition 3	Zone 1	19.21	24.11	64.23
	Zone 2	14.64	24.34	62.74
	Zone 3	13.94	20.26	48.29



ارزیابی عملکرد پمپ معکوس در مدیریت فشار و نشت شبکه توزیع آب شهری با رویکرد مدل سازی

مهرداد اسکندری پور^۱، رامتین معینی^{۲*}، علی دهنوی^۳

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران- مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران- مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
(نویسنده مسئول) r.moeini@eng.ui.ac.ir
۳- استادیار، گروه مهندسی عمران- مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران



<https://doi.org/10.22093/wj.2025.557753.3528>

مقاله پژوهشی

چکیده

واژه‌های کلیدی:
مدیریت فشار، تحلیل
مبتنی بر فشار (PDA)،
بازیابی و تولید انرژی،
نشت، توربین پمپ
معکوس (PAT)، شیر
فشارشکن (PRV)

فشار یکی از پارامترهای کلیدی هیدرولیکی در شبکه‌های توزیع آب شهری است که انحراف آن از محدوده مجاز می‌تواند منجر به افزایش نشت، کاهش عمر تجهیزات و اتلاف انرژی و نارضایتی مصرف‌کنندگان شود. اگرچه استفاده از شیرهای فشارشکن به‌عنوان متداول‌ترین ابزار مدیریت فشار شناخته می‌شود، ولی این رویکرد با اتلاف قابل توجه انرژی همراه است؛ بنابراین، در سال‌های اخیر، استفاده از پمپ معکوس به‌عنوان جایگزین یا مکمل PRV، به‌ویژه در شبکه‌های دارای اختلاف تراز و هد مازاد، مورد توجه قرار گرفته است؛ باین‌حال، اغلب پژوهش‌های پیشین یا صرفاً بر تولید انرژی متمرکز بودند و یا اثرات هیدرولیکی PAT را به‌صورت جامع، به‌ویژه در روش تحلیل مبتنی بر فشار بررسی نکردند. در این پژوهش، عملکرد PAT و PRV در مدیریت فشار، نشت و بازیابی انرژی در شبکه توزیع آب شهری بهارستان استان اصفهان، با استفاده از روش PDA و شبیه‌سازی دینامیکی ۲۴ ساعته ارزیابی شد. شبکه در سه سناریو بدون نصب شیر، با نصب PRV و جایگزینی PRV با PAT مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که نصب PRV موجب کاهش میانگین فشار شبکه از ۵۱/۱۱ به ۳۵/۹۱ متر و کاهش میانگین نشت از ۶۴/۶۵ به ۴۴/۲۶ لیتر بر ثانیه شده است. علاوه بر این، جایگزینی PRV با PAT اگرچه کاهش فشار و نشت کمتری (میانگین فشار ۴۵/۰۳ متر و نشت ۵۹/۵۶ لیتر بر ثانیه) نسبت به PRV به همراه داشت، اما امکان بازیابی انرژی معادل ۷۳/۲۸ کیلووات در بازه ۲۴ ساعته را فراهم کرد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که PRVها از نظر کنترل فشار و کاهش نشت عملکرد مؤثرتری دارند، در حالی که PATها با حفظ پایداری هیدرولیکی شبکه، ظرفیت قابل توجهی برای بازیابی انرژی هدررفته ارائه می‌دهند. این نتایج بیانگر آن است که استفاده از PAT نه به‌عنوان جایگزین کامل، بلکه به‌عنوان یک گزینه مکمل برای PRV، می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری آگاهانه در مدیریت فشار و انرژی در شبکه‌های توزیع آب شهری باشد.



دریافت: ۱۴۰۴/۱/۱۸

اصلاح: ۱۴۰۴/۴/۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۲۰

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



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

اسکندری پور، م.، معینی، ر.، دهنوی، ع.، ۱۴۰۴، ارزیابی عملکرد پمپ معکوس در مدیریت فشار و نشت شبکه توزیع آب شهری با رویکرد مدل‌سازی. آب و فاضلاب. (در حال انتشار)

<https://doi.org/10.22093/wj.2025.557753.3528>



© 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

اضافی توسط PRV، از PAT برای بازیابی بخشی از انرژی هدررفته استفاده می‌شود (Ebrahimi et al., 2021). این فناوری می‌تواند هم‌زمان با کاهش فشار، انرژی الکتریکی نیز تولید کند. با این حال، عملکرد PAT به شرایط هیدرولیکی محل نصب، از جمله مقدار هد قابل استحصال و پایداری دبی، وابستگی قابل توجهی دارد.

بررسی سوابق نشان‌دهنده آن است که در پژوهش‌های مختلفی کاربرد PAT در شبکه‌های توزیع آب بررسی شده است. بیان این نکته ضروری است که تمرکز بسیاری از پژوهش‌ها بر تولید انرژی بوده و اثرات هیدرولیکی آن‌ها به صورت جامع بررسی نشده است. از جمله، جعفری و همکاران یک روش دو مرحله‌ای پیشنهاد کردند که در مرحله اول، برای تنظیم و محل قرارگیری بهینه PRVها، در یک شبکه توزیع آب در شهر تبریز به منظور کاهش نشت از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است (Jafari et al., 2015). در مرحله دوم، برخی از PRVها، انتخاب شده و با PATها جایگزین و مقدار توان تولید شده توسط PATها، محاسبه شده است. بررسی نتایج، کاهش تلفات و تولید میزان ۲۲۸۴ کیلووات در روز انرژی در سیستم مورد مطالعه را نشان داد.

پاتلیس و همکاران، امکان جایگزینی یک PRV با یک PAT در یک شبکه توزیع آب واقعی را بررسی کردند تا توانایی آن را برای کاهش فشار به سطوح قابل قبول و نیز، تولید مقدار قابل توجهی انرژی بررسی کنند. در این پژوهش، شبکه توزیع آب شهر کوزانی^۳ (در یونان شمالی) به عنوان شبکه مطالعه موردی، انتخاب شد. به این منظور، سه سناریو عملیاتی مختلف برای تعیین مکان بهینه PAT در مدل هیدرولیک کالیبره شده شبکه، پیشنهاد و نتایج آن‌ها ارزیابی شد. سناریوها به ترتیب بدون استفاده از شیر، استفاده از PRV و در نهایت استفاده از PAT معرفی شد. نتایج حاصل از بررسی سناریوها، نشان داد که در سناریو دوم، نتایج مطابق انتظار حاصل شد. علاوه بر این، در سناریو سوم، نتایج نشان‌دهنده تولید ۵۵۰۰ کیلووات در روز انرژی بود (Patelis et al., 2016).

محمدآوگلو و همکاران، عملکرد یک PAT نصب شده در شهر آنتالیا در ترکیه را برای دوره عملیاتی ۵ ماهه بررسی کردند و نشان

شکل‌گیری زندگی شهری و افزایش تقاضای متمرکز، موجب توسعه شبکه‌های توزیع آب شهری شده است که امروزه به عنوان یکی از زیرساخت‌های حیاتی شهرها، وظیفه تأمین آب با فشار و کیفیت مناسب را بر عهده دارند (Novara and McNabola, 2018). عملکرد شبکه‌های توزیع آب شهری به طور مستقیم تحت تأثیر شرایط هیدرولیکی، به ویژه توزیع فشار، قرار دارد. فشار یکی از مهم‌ترین پارامترهای کمی شبکه است که مقدار آن تابعی از عواملی مانند توپوگرافی منطقه، اختلاف ارتفاع، ساختار شبکه و الگوهای زمانی و مکانی مصرف آب است. در بسیاری از شبکه‌های شهری، به ویژه در مناطق با توپوگرافی متغیر، برخی نواحی تحت فشار بیش از حد مطلوب هستند که این موضوع می‌تواند پیامدهای نامطلوبی برای عملکرد شبکه به همراه داشته باشد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که افزایش فشار شبکه، به طور مستقیم به افزایش میزان نشت، تشدید ترکیدگی لوله‌ها، کاهش عمر مفید تجهیزات و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری منتهی می‌شود (Rossi et al., 2019). علاوه بر این، فشار اضافی موجب اتلاف قابل توجه انرژی در شبکه می‌شود که خود یکی از عوامل کاهش کارایی کلی سامانه‌های توزیع آب به شمار می‌آید.

متداول‌ترین راه برای مدیریت و کاهش فشار، نصب شیر فشارشکن^۱ است. در صورت استفاده از PRVها برای کنترل فشار، ممکن است مقدار زیادی انرژی در شبکه‌ها تلف شود. از نظر فنی، شبکه‌های توزیع آب شهری به دلیل اینکه مقدار زیادی انرژی به علت نشت آب و توسط شیرهای کاهش فشار هدر می‌رود، دارای کارایی انرژی پایینی هستند (Kanakoudis and Muhammetoglu, 2014, Jazayeri Farsani and Moeini, 2024, Jazayeri and Moeini, 2025, Arastou et al., 2025). این مسئله، به ویژه در شبکه‌هایی با اختلاف ارتفاع زیاد، اهمیت بررسی راهکارهای جایگزین یا مکمل برای مدیریت فشار را دوچندان می‌سازد.

در سال‌های اخیر، استفاده از پمپ معکوس^۲ به عنوان یکی از راهکارهای نوین برای کاهش اتلاف انرژی در شبکه‌های توزیع آب مورد توجه قرار گرفته است. در این رویکرد، به جای اتلاف هد

¹ Pressure Reducing Valve (PRV)

² Pump As Turbine (PAT)

برای بازیابی انرژی دارد، اما در مقایسه با PRV، انعطاف پذیری کمتری در کنترل فشار ارائه داده و عملکرد آن به شدت به پایداری دبی و شرایط هیدرولیکی محل نصب وابسته است (Samora et al., 2021).

سامبیتو و همکاران، باهدف جانمایی بهینه PATها، یک چارچوب چندهدفه (هزینه-فشار-انرژی) را پیشنهاد و عملکرد آن را برای شبکه نمونه شماره ۳ نرم افزار EPANET مدل سازی کردند. نتایج پژوهش نشان داد برای راهکار منتخب (منظور کردن سه PAT)، حداکثر تولید انرژی حدود ۴/۶ مگاوات ساعت قابل دستیابی است (Sambito et al., 2021).

پیراد و همکاران، با بررسی یک شبکه توزیع آب واقعی در کشور بلژیک، نقش توزیع مجدد دبی در شبکه را به عنوان عامل کلیدی در حداکثرسازی تولید انرژی توسط PATها نشان دادند. نتایج بهینه سازی جانمایی و بهره برداری PATها نشان داد که مقدار انرژی سالانه تولیدی بیش از ۴۰ تا ۵۰ مگاوات ساعت در سال است، مشروط بر آن که توزیع دبی و شرایط هیدرولیکی شبکه به درستی منظور شود (Pirard et al., 2022).

گیوگنی و پاگلیز، یک چارچوب عملی برای انتخاب بهینه PAT در شبکه های توزیع آب در جنوب کشور ایتالیا ارائه کردند که بر پایه الگوی زمانی دبی و فشار قابل استحصال بود. نتایج نشان داد که در مقدار بزرگ فشار و الگوی مصرف یکنواخت، انرژی روزانه قابل بازیابی در حدود ۷۰۶ کیلووات ساعت در روز و برای مقدار کوچک فشار انرژی حدود ۱۲۹ کیلووات ساعت در روز حاصل شده است (Giugni and Pugliese, 2022).

مارینی و همکاران، روشی پیشنهاد کردند که با انتخاب مناسب و جانمایی PAT، ضمن حفظ قیود تنظیم فشار، مقدار قابل توجهی انرژی روزانه تولید شد. نتایج نشان داد که برای مقدار بزرگ فشار و الگوی مصرف یکنواخت، انرژی روزانه در حدود ۶۹۶ تا ۷۱۱ کیلووات ساعت در روز (با توجه به جانمایی) حاصل شد (Marini et al., 2023).

منسورویگی و همکاران، یک روش جامع برای انتخاب بهینه PAT و زمان بندی بهره برداری از آن ارائه کردند. عملکرد روش پیشنهادی برای دو منطقه در کشور ایتالیا اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد که با انتخاب بهینه PAT در یکی از مناطق حدود ۵۱ مگاوات ساعت در سال (حدود ۴۵ درصد از انرژی هیدرولیکی

دادند که PAT نصب شده، به طور مؤثر در طیف گسترده ای از جریان ورودی، عمل کرده و انرژی تولید شده بین ۰/۷ تا ۸/۴ کیلووات ساعت برای کاهش تقریباً یک بار فشار با متوسط کارایی بازیابی انرژی ۶۰ درصد است (Muhammetoglu et al., 2018).

لطیفی و همکاران، رویکرد تولید انرژی از فشار اضافی در یک شبکه توزیع آب شهری را بررسی کردند. هدف این پژوهش، بهبود عملکرد شبکه با نصب PATها با تعداد، نوع و زمان بندی و در مکان های مناسب بود. در این راستا، زمان بندی بهینه برای استفاده PAT و PRV به طور هم زمان منظور شد. کارایی مدل پیشنهادی با انتخاب یک مطالعه موردی در شهر تهران ارزیابی و به این منظور، دو سناریو تعریف شد. نتایج سناریو اول نشان داد که نصب تعداد و نوع مناسب از PATها در مکان های بهینه، علاوه بر تأثیر بر افزایش نسبی میزان تولید انرژی، میزان هزینه های کلی شبکه را تا ۹۰ درصد نسبت به شرایط اولیه کاهش و هم زمان قابلیت اطمینان و رضایت مصرف کنندگان را افزایش داد (Latifi et al., 2021).

طحانی و همکاران، کاربرد PATها را برای تولید انرژی الکتریکی بررسی کردند. این پژوهش بر روی یک شبکه توزیع آب شهری نمونه با هد مازاد انجام شد و عملکرد PAT در تولید انرژی در شرایط مختلف دبی و اختلاف ارتفاع با تحلیل مبتنی بر تقاضا^۱ ارزیابی شد. نتایج نشان داد که استفاده از PAT منجر به تولید انرژی الکتریکی در بازه ای حدود ۱ تا ۶ کیلووات شد و بازده انرژی سیستم در سناریوهای بهینه به حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد رسید (Tahani et al., 2020).

ابراهیمی و همکاران، یک رویکرد بهینه سازی برای انتخاب PAT ارائه کردند. به این منظور به طور هم زمان اهداف بازیابی انرژی و کنترل فشار را برای یک شبکه توزیع آب شهری نمونه منظور کردند. نتایج نشان داد که انتخاب بهینه PAT توانست بازده بازیابی انرژی را به طور قابل توجهی افزایش دهد؛ به طوری که در سناریوهای بهینه، بازده انرژی سیستم تا حدود ۶۵ تا ۷۰ درصد گزارش شد (Ebrahimi et al., 2021).

سامورا و همکاران، برای شبکه ای واقعی در پرتغال، با مرور جامع مطالعات موردی و تجربیات عملی نصب PAT در شبکه های توزیع آب شهری، بیان کردند که اگرچه این فناوری ظرفیت بالایی

¹ Demand Driven Analysis (DDA)

(Safarpour et al., 2022b, Abbasi et al., 2025) ولی نوآوری پژوهش حاضر در بررسی عملکرد هیدرولیکی و تولید انرژی در یک شبکه واقعی و رفتار واقعی شبکه در شرایط بهره‌برداری EPS بود. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی علمی برای تصمیم‌گیری در انتخاب PRV و PAT در شبکه‌های توزیع آب شهری استفاده شود.

۲- روش انجام پژوهش

در این پژوهش، هدف اصلی ارزیابی عملکرد PATها در مقایسه با PRVها در مدیریت و مقدار فشار، نشت و بازیابی و تولید انرژی بود. از این رو، چارچوب روش‌شناسی به‌گونه‌ای پیشنهاد شد که امکان مقایسه جامع شرایط هیدرولیکی شبکه در سناریوهای مختلف فراهم شود. در این بخش، ابتدا اطلاعات شبکه مورد مطالعه و سپس، روش مدل‌سازی ارائه شده است. فلوچارت روش پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۱- معرفی شبکه مورد مطالعه

شبکه مورد مطالعه، شبکه بهارستان در استان اصفهان بود. این شبکه شامل ۳۱۴۷ گره یک مخزن و ۳۴۱۳ لوله است. همچنین، این شبکه دارای یازده PRV با میزان فشار تنظیمی متفاوت است. تراز ارتفاعی مخزن برابر ۱۶۲۷/۳۴ متر است. نقشه شماتیک شبکه بهارستان، در شکل ۲ ارائه شده است. شایان ذکر است که کلیه اطلاعات مربوط به شبکه بهارستان در استان اصفهان از سازمان آب و فاضلاب استان اصفهان دریافت شده است.

۲-۲- روش مدل‌سازی

در این پژوهش، عملکرد PRVها و PATها بر پارامتر فشار و میزان نشت در شبکه در شرایط EPS بررسی شد. به‌این منظور، شبکه در سه حالت بدون نصب شیر (حالت اول)، با نصب PRV (حالت دوم) و جایگزینی PRV با PAT (حالت سوم) مدل‌سازی و تحلیل شد. حالت سوم که در آن کلیه PRVها با PAT جایگزین شد، به‌این منظور تعریف شد تا اثرات هیدرولیکی استفاده از PAT در شبکه مورد مطالعه بررسی شود. بدیهی است که این سناریو

قابل دسترس) و در سایت دیگر حدود ۴۱ مگاوات ساعت در سال (حدود ۴۰ درصد) انرژی تولید شد. همچنین، با استفاده از جانمایی دو PAT موازی، میزان انرژی تولیدی حدود نزدیک ۵۰ درصد انرژی قابل دسترس است (Manservigi et al., 2023).

در نهایت، اسکندری‌پور و همکاران با انجام پژوهشی بر روی شبکه نمونه ژوویت^۱، رویکردهای مختلف مدیریت فشار و بازیابی انرژی در شبکه‌های توزیع آب شهری را با تمرکز بر PRV و PAT ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از PATها در نقاط دارای فشار مازاد می‌تواند به بهبود بهره‌وری انرژی شبکه منجر شود، در حالی که کنترل فشار با PRV در بسیاری از سناریوها پایدارتر و قابل پیش‌بینی‌تر ارزیابی شده است (Eskandaripour et al., 2025).

با وجود بررسی‌های انجام شده در زمینه PAT، مشخص شد که در اکثر پژوهش‌های پیشین فقط پتانسیل تولید انرژی با استفاده از PAT در مقایسه با PRV مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، در بسیاری از این پژوهش‌ها از روش DDA برای تحلیل شبکه استفاده شده که این روش در شرایط کمبود فشار، نتایج واقع‌گرایانه‌ای از رفتار شبکه ارائه نمی‌دهد و لازم است از روش تحلیل مبتنی بر فشار^۲ استفاده شود. به‌عبارت دیگر، بررسی اثرات استفاده از PAT بر مقدار فشار، نشت و تولید انرژی در یک شبکه واقعی، با استفاده از تحلیل PDA و شبیه‌سازی دینامیکی در طول یک شبانه‌روز^۳، هنوز به‌صورت جامع مورد توجه و بررسی قرار نگرفته است. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر ارزیابی مقایسه‌ای عملکرد PRV و PAT در مدیریت فشار، کاهش نشت و بازیابی و تولید انرژی در شبکه توزیع آب شهر بهارستان در استان اصفهان با استفاده از رویکرد تحلیل PDA بود. با توجه به این‌که شبکه مورد مطالعه در این پژوهش، شهر بهارستان در استان اصفهان بود، مرور پژوهش‌های جدید انجام شده در این منطقه مطالعاتی حائز اهمیت است. در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در شهر بهارستان و مناطق مختلف شهری استان اصفهان با تمرکز بر سیاست‌های مدیریت تقاضا و مدیریت فشار انجام شده است (Khashaei et al., 2022, Safarpour et al., 2021, Safarpour et al., 2022a,

¹ Jowitt

² Demand Driven Analysis (PDA)

³ Extended Period Simulations (EPS)

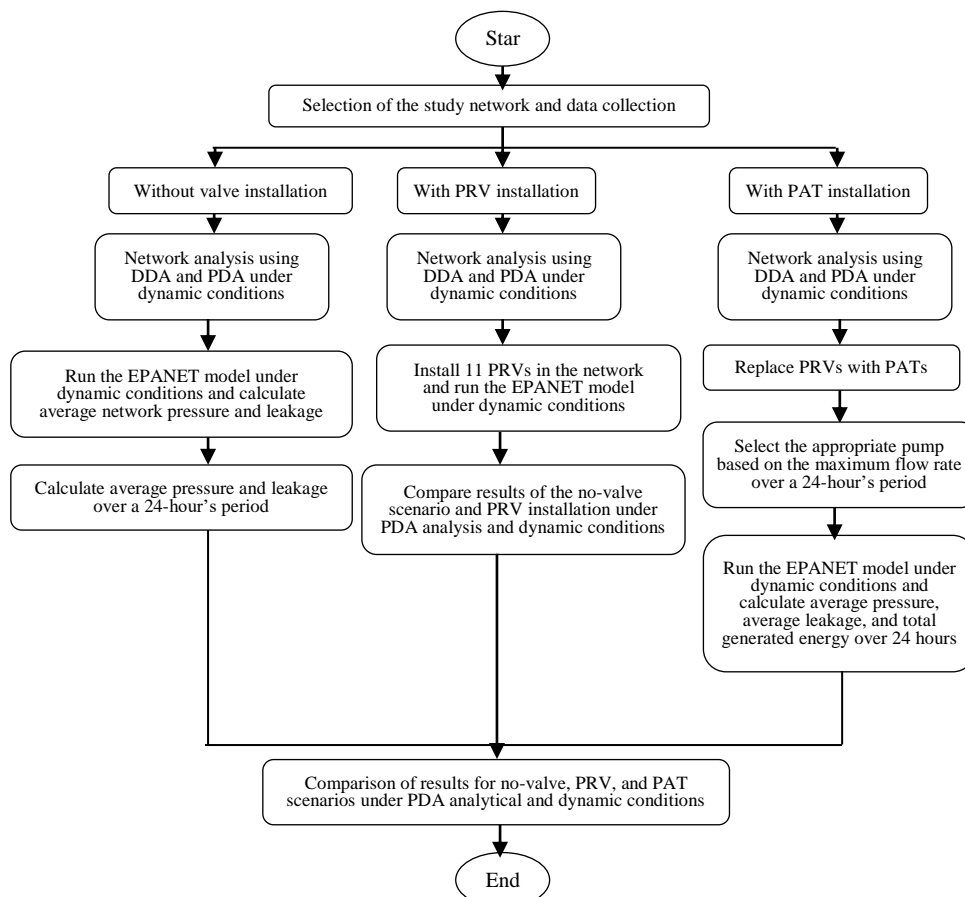


Fig. 1. Research methodology flowchart

شکل ۱- فلوچارت روش پژوهش

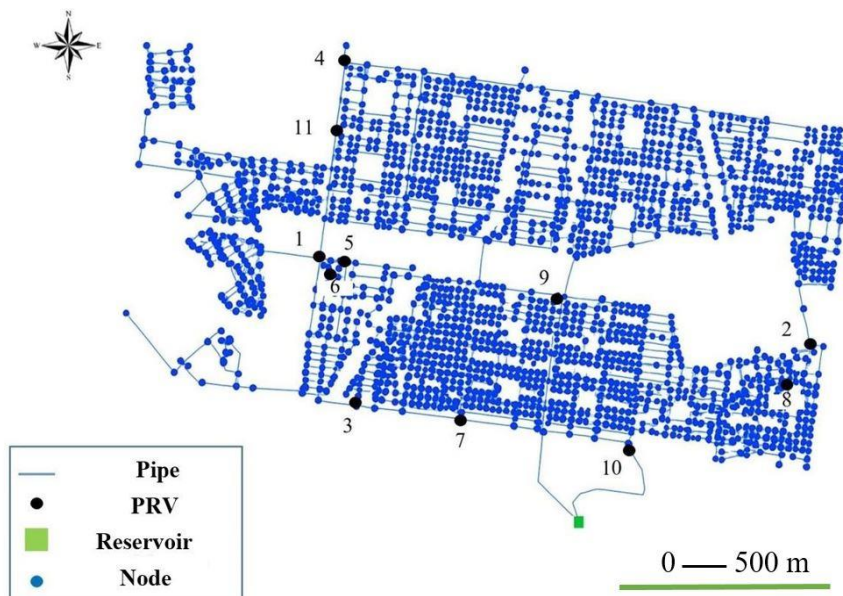


Fig. 2. Schematic map of Baharestan network

شکل ۲- نقشه شماتیک شبکه بهارستان



گره‌ای، حداقل هد فشاری است که به ازای مقدار کمتر از آن هیچ جریانی از گره قابل برداشت نبوده و منظور از هد فشار مطلوب گره‌ای، هد فشاری است که برای مقدار کمتر از آن، بخشی از نیاز گره‌ای قابل تأمین بوده و برای مقدار بزرگتر یا مساوی آن، تمام نیاز گره‌ای قابل تأمین است. در ادامه، یکی از پرکاربردترین روابط پیوسته با حد بالا برای برداشت آب که به رابطه واگنر معروف است، به صورت معادله ۱ ارائه شده است (Wagner et al., 1988)

$$Q_j^{avl} = \begin{cases} Q_j^{req} & ; \text{if } H_j \geq H_{des} \\ Q_j^{req} \left(\frac{H_j - H_{min}}{H_{des} - H_{min}} \right)^{\frac{1}{2}} & ; \text{if } H_{min} \leq H_j \leq H_{des} \\ 0 & ; \text{if } H_j \leq H_{min} \end{cases} \quad (1)$$

بر اساس این معادله، برای میزان تقاضای ممکن (Q_j^{avl})، هنگامی که در گره j هد فشار موجود (H_j) از هد فشار مطلوب (H_{des}) بیشتر باشد، میزان دبی برابر با تقاضای گره‌ای (Q_j^{req}) به آن گره اختصاص می‌یابد. همچنین، اگر مقدار هد فشار موجود از حداقل هد فشار مورد نیاز (H_{min})، بیشتر و از هد فشار طراحی کمتر باشد، بخشی از کل تقاضای گره‌ای تأمین می‌شود. در نهایت، اگر میزان هد فشار موجود از حداقل هد فشار مورد نیاز کمتر بود، آبی به گره اختصاص داده نشده است که با واقعیت حاکم بر شبکه‌های توزیع آب نیز تطابق دارد.

از دیدگاه انرژی، PRVها ضمن کاهش فشار، انرژی سیال را تا حد زیادی کاهش می‌دهند. برای بازیابی بخشی از انرژی مصرفی به جای این شیرها، می‌توان از PAT برای کنترل فشار استفاده کرد. در واقع PATها همان پمپ‌های گریز از مرکز با عملکرد معکوس در شبکه آب‌رسانی است که به‌عنوان توربین استفاده می‌شود. برای استفاده از این شیر، در این پژوهش، ابتدا با توجه به میزان دبی عبوری (برحسب لیتر بر ثانیه) و هد (برحسب متر) PRV، پمپ مناسب با توجه به تغییر عملکرد آن با استفاده از معادلات پرکاربرد و پیشنهادی ۲ و ۳ تعیین شد (Derakhshan and Nourbakhsh, 2008) در این مرحله مبنای انتخاب دبی، حداکثر میزان دبی طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز است. با کمک این اطلاعات از کاتالوگ پمپ‌ران، پمپ مناسب با توجه به بهترین کارایی انتخاب شد

$$Q_{pump} = Q_{prv} \times \sqrt{0.75} \quad (2)$$

لزوماً یک راهکار عملیاتی توصیه شده برای بهره‌برداری واقعی شبکه نیست. در عمل، تصمیم‌گیری برای نصب PAT معمولاً مبتنی بر معیارهای فنی و اقتصادی است. به‌این منظور، بهینه‌سازی جانمای PAT نیز باید مورد توجه قرار گیرد. در این پژوهش، بهینه‌سازی جانمایی PAT انجام نشد و تمامی PATها با PRVها در همان جانمایی‌های اولیه شبکه جایگزین شد تا در ابتدا عملکرد هیدرولیکی آن‌ها بررسی شود. در این راستا، بهینه‌سازی جانمایی PAT، می‌تواند موضوع یک پژوهش مستقل باشد که در بخش پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده به آن اشاره شده است.

در این پژوهش، برای تحلیل شبکه از نرم‌افزار ایپانت^۱ استفاده شد زیرا قابلیت شبیه‌سازی کمی دارد. نرم‌افزار ایپانت یک نرم‌افزار کاربرپسند برای تحلیل هیدرولیکی شبکه توزیع آب شهری است. معمولاً به دلیل استفاده آسان، منبع باز^۲، دسترسی رایگان و در دسترس بودن عمومی استفاده می‌شود. علاوه بر این، به راحتی می‌تواند با استفاده از کدهای کتابخانه‌ای به نرم‌افزارهای دیگر بهینه‌سازی متصل شود (Najarzadegan and Eskandaripour, 2025)

بنابراین، در این پژوهش از این نرم‌افزار استفاده شد، همچنین برای تحلیل هیدرولیکی شبکه از روش PDA استفاده شد. به‌این منظور، از قابلیت مدل‌سازی PDA در نرم‌افزار ایپانت نسخه ۲/۲ استفاده شد که امکان در نظر گرفتن وابستگی تأمین تقاضا به فشار گره‌ای را فراهم کرده است. شایان ذکر است که در تحلیل DDA سعی بر آن است که تمامی تقاضای گره‌های مصرف تأمین شود و بنابراین، مقدار فشار گره‌ای در راستای تأمین کامل تقاضای گره‌ای مورد توجه نیست. ولی اگر توپوگرافی یا شرایط شبکه به‌گونه‌ای باشد که تأمین کل تقاضای گره‌ای برای تمام گره‌ها امکان‌پذیر نباشد، با توجه به فشار موجود شبکه، تمام تقاضا یا بخشی از آن تأمین می‌شود. به همین دلیل استفاده از روش تحلیل PDA که نتایج واقعی‌تری در زمان بهره‌برداری شبکه ارائه می‌دهد، پیشنهاد می‌شود (Wagner et al., 1988, Eskandaripour et al., 2025).

در حالت کلی، روابط مربوط به روش تحلیل PDA، بر مبنای دو مقدار حداقل هد فشار گره‌ای (H_{min}) و هد فشار مطلوب گره‌ای (H_{des}) تعریف شده است. در این روابط، منظور از حداقل هد فشار

¹ EPANET

² Open Source



که در آنها

$$H_{\text{pump}} = H_{\text{prv}} \times 0.75 \quad (3)$$

که در آنها

Q_{prv} و H_{prv} به ترتیب دبی و هد PRV و H_{pump} هد و Q_{pump} دبی پمپ انتخابی و δ میزان کارایی در BEP¹ است. از آنجایی که در نقطه BEP کارایی پمپ و PAT یکسان است، مقدار کارایی، دبی و هد در BEP با توجه به منحنی مشخصه پمپ تعیین می‌شود. سپس هد و دبی PAT در نقطه BEP (H_{tb} و Q_{tb}) توسط معادلات ۴ و ۵ محاسبه می‌شود

$$H_{\text{tb}} = \frac{H_{\text{pb}}}{\delta_{\text{pb}}^{1.2}} \quad (4)$$

$$Q_{\text{tb}} = \frac{Q_{\text{pb}}}{\delta_{\text{pb}}^{0.8}} \quad (5)$$

با محاسبه دبی و هد PAT، توان الکتریکی تولیدی (P_t) با استفاده از معادله ۶ محاسبه شد.

که در آن

Q_t میزان دبی عبوری از PAT طی هر ساعت است. همچنین، P_{tb} توان تولیدی PAT در BEP است که توسط معادله ۷ تعیین شده است (Derakhshan and Nourbakhsh, 2008)

$$\frac{P_t}{P_{\text{tb}}} = -0.3092 \left(\frac{Q_t}{Q_{\text{tb}}} \right)^3 + 2.1472 \left(\frac{Q_t}{Q_{\text{tb}}} \right)^2 - 0.8865 \left(\frac{Q_t}{Q_{\text{tb}}} \right) + 0.0452 \quad (6)$$

$$P_{\text{tb}} = 9810 \times Q_{\text{tb}} H_{\text{tb}} \delta_{\text{tb}} \quad (7)$$

در تحلیل شبکه نمونه این پژوهش، میزان نشت از طریق معادلات ۸ و ۹ تعیین شد (Araujo et al., 2006)

$$q_j = K_f * p_j^\beta \quad (8)$$

$$K_f = c * \sum_{j=1}^M 0.5 * L_{ij} \quad (9)$$

q_j برابر میزان نشت در گره j ، p_j برابر میزان فشار در گره j ، K_f برابر ضریب نشت برای هر گره، c برابر ضریب دبی که در این پژوهش برابر 10^{-5} بود، L_{ij} برابر طول لوله‌های بین گره‌های i و j ، M برابر تعداد لوله‌های متصل به گره j و β برابر ضریب ثابت فشار که برابر $1/18$ لحاظ شد (Araujo et al., 2006).

شایان ذکر است که مدل نشت به‌کاررفته در این پژوهش یک مدل متعارف و پرکاربرد وابسته به فشار بود که به‌طور گسترده در مطالعات مدیریت فشار از آن استفاده شده است. هدف از استفاده این مدل، برآورد دقیق میزان نشت شبکه نبود، بلکه مقایسه تغییرات نسبی میزان نشت در سناریوها و حالات مختلف پیشنهادی بود. از این‌رو، عدم کالیبراسیون دقیق پارامترهای نشت تأثیری بر اعتبار تحلیل مقایسه‌ای نتایج ندارد. به‌عبارت‌دیگر، تمرکز اصلی این پژوهش، ارزیابی عملکرد نسبی PAT در مقایسه با PRV بود و تحلیل نشت به‌عنوان یکی از شاخص‌های عملکرد هیدرولیکی در این چارچوب انجام شد.

۳- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج هیدرولیکی شبکه بهارستان در سه حالت پیشنهادی ارائه و با یکدیگر مقایسه شده است. جزئیات این سه حالت در ادامه ارائه شده است. از آنجاکه، به دلیل توپوگرافی منطقه، در تحلیل DDA شبکه بهارستان، در طی ساعاتی از شبانه‌روز میزان فشار در تعدادی از گره‌های شبکه منفی شده است، بنابراین تأمین کل تقاضای گره‌ای برای تمام گره‌ها امکان‌پذیر نبوده و در عمل نتایج این شبکه در این وضعیت تحلیلی غیرقابل قبول و غیرواقعی است؛ بنابراین، از روش تحلیل PDA برای تحلیل شبکه بهارستان استفاده شد.

۳-۱- پارامترهای هیدرولیکی شبکه بهارستان بدون نصب شیر (حالت اول)

در حالت اول، نتایج میزان حداقل، میانگین و حداکثر مقدار میانگین فشار گره‌ها طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز در کل شبکه و همچنین، میزان حداقل، میانگین و حداکثر مقدار میانگین نشت طی ۲۴ ساعت

¹ Best Efficiency Point (BEP)

بررسی نتایج جدول ۲ نشان داد که میزان میانگین فشار در کل شبکه با نصب PRVها، برابر ۳۵/۹۱ متر و میزان میانگین نشت برابر ۴۴/۲۶ لیتر بر ثانیه است. با وجود کاهش فشار در شبکه و برطرف کردن مشکل وجود فشار غیرمجاز بالا در حالت اول، با این حال، میزان حداقل فشار گره‌ای این حالت برابر ۸/۵۰ متر است که نشان‌دهنده وجود مقدار کمتر از میزان مجاز فشار در تعدادی از گره‌های شبکه به‌واسطه نصب ۱۱ شیر PRV با میزان فشار تنظیمی ۳۰ متر است.

۳-۳- نتایج پارامترهای هیدرولیکی شبکه بهارستان در جایگزینی PAT به جای PRV (حالت سوم)

در حالت سوم، ابتدا، اطلاعات پمپ پیشنهادی در حالت تحلیلی PDA در جدول ۳ و در شرایط دینامیکی ارائه شده است. سپس، با جایگذاری PATها به جای PRVها، نتایج میزان حداقل، میانگین و حداکثر مقدار میانگین فشار گره‌ها طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز در کل شبکه و همچنین، میزان حداقل، میانگین و حداکثر مقدار میانگین نشت طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز در کل شبکه و در شرایط تحلیلی PDA با نصب PATها، در جدول ۴ ارائه شده است.

پس از جایگزینی PATها به جای PRVها، میزان انرژی تولیدی طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز در حالت تحلیلی PDA محاسبه شد که نتایج در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان‌دهنده آن است که با جایگذاری PATها به جای PRVها، میزان میانگین فشار در کل شبکه برابر ۴۵/۰۳ متر و میزان میانگین نشت برابر ۵۹/۵۶ لیتر بر ثانیه حاصل شده است. همچنین، با جایگزینی PRVها با PATها میزان ۷۳/۲۸ کیلووات در طی ۲۴ ساعت انرژی در شبکه تولید شده است. نتایج این حالت نشان داد که PATها نسبت به حالت دوم که فشار گره‌ای تعداد زیادی از گره‌ها از حداقل فشار مجاز استاندارد کمتر است، با نصب PATها این تعداد کاهش یافته و کمترین میزان فشار گره‌ای برابر ۱۳/۴۵ است که مقداری قابل قبول است. همچنین، در شکل ۳ نتایج میانگین فشار شبکه در تحلیل دوره گسترده در یک شبانه‌روز در شبکه بهارستان برای سه حالت پیشنهادی ارائه و مقایسه شده است.

شبانه‌روز در کل شبکه و در شرایط تحلیلی PDA بدون نصب شیر در شبکه، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- نتایج پارامترهای هیدرولیکی شبکه بهارستان در شرایط تحلیلی PDA (حالت اول)

Table 1. Results of hydraulic parameters of Baharestan network in PDA analytical conditions (condition 1)

Parameter	Pressure (m)	Leakage (l/s)
Minimum	16.07	21.74
Average	51.11	65.74
Maximum	76.78	84.85

بررسی نتایج جدول ۱ نشان داد که میزان میانگین فشار در کل شبکه در حالت بدون نصب شیر، برابر ۵۱/۱۱ متر و میزان میانگین نشت برابر ۶۵/۷۴ لیتر بر ثانیه است. همچنین، با توجه به میزان محدوده مجاز برای فشار در شبکه (نشریه ۱۱۷-۳)، میزان فشار حداکثر در این حالت برابر ۷۶/۷۸ متر است که نشان‌دهنده فشار بیش از حد مجاز در شبکه است.

۳-۲- پارامترهای هیدرولیکی شبکه بهارستان با نصب PRVها (حالت دوم)

در حالت دوم، نتایج میزان حداقل، میانگین و حداکثر مقدار میانگین فشار گره‌ها طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز در کل شبکه و همچنین، میزان حداقل، میانگین و حداکثر مقدار میانگین نشت طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز در کل شبکه و در شرایط تحلیلی PDA با نصب PRVها، در جدول ۲ ارائه شده است. شایان ذکر است که فشار تنظیمی تمامی PRVها در این حالت برابر ۳۰ متر لحاظ شده است.

جدول ۲- نتایج پارامترهای هیدرولیکی شبکه بهارستان در شرایط تحلیلی PDA (حالت دوم)

Table 2. Results of hydraulic parameters of Baharestan network in PDA analytical conditions (condition 2)

Parameter	Pressure (m)	Leakage (l/s)
Minimum	8.50	15.41
Average	35.91	44.26
Maximum	63.51	71.67



جدول ۳- اطلاعات پمپ انتخابی از کاتالوگ پمپیران در شرایط تحلیلی PDA

Table 3. Selected pump information from the Pumpiran catalog in PDA analytical mode

Valve number	Pump type	Efficiency (%)	Head (m)	Flow (l/s)
1	P 100-200	80	41.38	277.19
2	P 65-200	70	33.58	137.08
3	P 50-160	75	29.71	73.01
4	P 32-200	25	14.94	1.37
5	P 32-200	42	41.33	14.02
6	P 40-315	35	41.33	1.12
7	P 125-315	55	27.97	188.02
8	P 50-160	73	29.03	38.93
9	P 100-400	72	46.20	173.68
10	P 100-315	73	29.13	129.94
11	P 80-250	76	18.10	83.14

جدول ۴- نتایج میانگین فشار گره‌ای و میانگین نشت در شبکه بهارستان در شرایط تحلیلی PDA (حالت سوم)

Table 4. Results of average nodal pressure and average leakage in Baharestan network in PDA analytical conditions (Condition 3)

Parameter	Pressure (m)	Leakage (l/s)
Minimum	13.45	18.31
Average	45.03	59.56
Maximum	71.08	78.94

جدول ۵- نتایج انرژی تولیدی PATها در تحلیل PDA

Table 5. Results of energy production of PATs in PDA

Valve number	Total energy produced (kW)
1	15.43
2	8.66
3	2.67
4	1.74
5	10.58
6	1.27
7	8.06
8	1.30
9	14.49
10	7.47
11	1.61
Total	73.28

اول) کاهش می‌یابد، اما مقدار فشار همچنان بالاتر از استفاده از PRV (حالات دوم) است. در مجموع نتایج نشان‌دهنده آن است که اگرچه عملکرد PAT در کنترل فشار به اندازه PRV مؤثر نبوده، اما ضمن حفظ پایداری هیدرولیکی شبکه، امکان بازیابی و تولید انرژی از هد اضافی را دارد. در مجموع، PRV گزینه مناسب‌تری برای کاهش فشار و نشت است، در حالی که PAT به‌عنوان گزینه‌ای مکمل برای مدیریت هم‌زمان فشار و انرژی قابل توجه است.

نتایج شکل ۳ نشان‌دهنده آن است که در حالت بدون شیر، مقدار فشار شبکه در اغلب ساعات زیاد بوده و دارای نوسان قابل توجه است که بیانگر وجود فشار اضافی در شبکه است. همچنین، نصب PRV (حالت دوم) موجب کاهش محسوس و یکنواخت‌تر فشار در کل دوره زمانی شد که مؤثرترین عملکرد را در کنترل فشار و کاهش نوسانات نشان داده است. در مقابل، با استفاده از PAT (حالت سوم) فشار شبکه نسبت به حالت بدون شیر (حالت



PAT در مقایسه با PRV است. علاوه بر این، مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان داد که میزان انرژی تولیدی شبکه بهارستان (۷۳/۲۸ کیلووات) با وجود عدم بهینه‌سازی جانمایی شیرها نزدیک یا بالاتر از پژوهش‌های مشابه است. از منظر کنترل و مدیریت فشار، اگرچه نتایج این پژوهش نشان داد که PRVها توانایی بیشتری در کاهش فشار شبکه داشته است (کاهش میانگین فشار تا ۳۵/۹۱ متر)، اما با استفاده از PATها مقدار فشار در محدوده قابل قبول (۴۵/۰۳ متر) است که ضمن جلوگیری از افت فشار شدید، پایداری تأمین آب در گردهای دوردست شبکه را نیز تضمین کرده است.

همچنین مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج پژوهش خاشعی و همکاران نشان داد که در هر دو پژوهش، مدیریت فشار به عنوان یک ابزار مؤثر برای کاهش نشت و بهبود عملکرد شبکه معرفی شده است. با این حال، تفاوت‌های معناداری در نحوه محاسبه پارامترهای هیدرولیکی و فرایند تصمیم‌گیری مشاهده می‌شود. در پژوهش خاشعی و همکاران، تنظیم بهینه فشار با تمرکز بر کاهش تلفات آب و با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی انجام شده است، در حالی که در پژوهش حاضر، تمرکز بر ارزیابی تطبیقی عملکرد PRV و PAT تحت شرایط یکسان و بدون انجام بهینه‌سازی جانمایی بود. همچنین، در حالی که پژوهش خاشعی و همکاران عمدتاً بر نتایج هیدرولیکی و پایداری سیستم در شرایط نرمال و کمبود آب متمرکز بود، پژوهش حاضر علاوه بر شاخص‌های هیدرولیکی، ارزیابی انرژی از فشار اضافی نیز به عنوان یک معیار مکمل ارزیابی شد (Khashaei et al., 2022).

علاوه بر این، مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش لطیفی و همکاران نشان داد که هر دو پژوهش استفاده از PAT در نقاط دارای فشار اضافی می‌تواند منجر به بازیابی انرژی بدون ایجاد اختلال جدی در عملکرد هیدرولیکی شبکه شود. با این حال، تفاوت در شرایط هیدرولیکی شبکه‌های مورد مطالعه، به ویژه توپوگرافی منطقه، الگوی مصرف و فرایند جانمایی تجهیزات است که به تفاوت در میزان انرژی بازیافتی و تغییرات فشار شده است. علاوه بر این، پژوهش حاضر در مقایسه با پژوهش‌های پیشین، شبکه مورد مطالعه با روش PDA تحلیل شد که نتایج واقع‌گرایانه‌تری نسبت به تحلیل DDA انجام شده در سایر پژوهش‌ها ارائه شده است (Latifi et al., 2021).

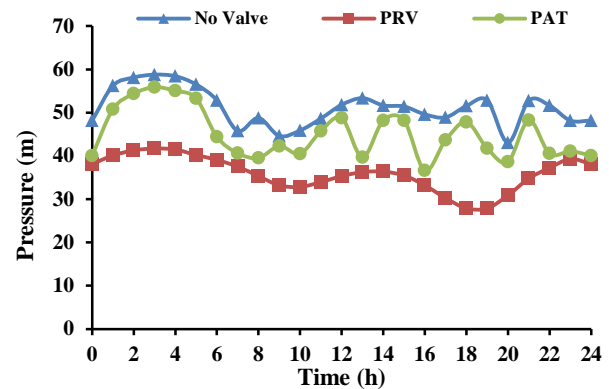


Fig. 3. Comparison of average nodal pressure values for 24 hour EPS in the Baharestan network for three proposed conditions

شکل ۳- مقدار میانگین فشار شبکه در تحلیل دوره گسترده ۲۴ ساعت در شبکه بهارستان در سه حالت پیشنهادی

در نهایت، میزان میانگین فشار هر زون شبکه نیز تعیین و مقایسه شده است. نقشه زون بندی شبکه بهارستان در شکل ۴ نشان ارائه شده است. نتایج مقدار حداقل، میانگین و حداکثر فشار زون‌های مختلف در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز در جدول ۶ ارائه شده است.

بررسی نتایج جدول ۶ نشان‌دهنده آن است که در حالت بدون نصب شیر (حالت اول)، میانگین فشار در زون‌ها بیشتر است و این موضوع نشان‌دهنده وجود فشار مازاد در بخش‌هایی از شبکه است. ولی با نصب PRV (حالت دوم)، میانگین فشار در هر سه زون به صورت محسوس کاهش می‌یابد و دامنه تغییرات فشار محدودتر می‌شود که بیانگر عملکرد مؤثر PRV در کنترل فشار و یکنواخت‌سازی آن در سطح زون‌ها (مناطق) است. در حالت نصب PAT (حالت سوم) نیز فشار نسبت به حالت اول کاهش می‌یابد، اما مقدار میانگین فشار در اغلب زون‌ها معمولاً بیشتر از حالت دوم است. این رفتار نشان داد که PATها اگرچه در کاهش فشار به اندازه PRVها مؤثر نبوده، اما همچنان قادر به تعدیل فشار اضافی بوده و امکان بازیابی و تولید انرژی نیز دارند.

در مجموع، نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که هر چند PRV در کاهش فشار و نشت شبکه نسبت به PAT عملکرد بهتری دارد، اما به‌کارگیری PATها علاوه بر حفظ پایداری هیدرولیکی شبکه، منجر به بازیابی قابل توجهی از انرژی تلف شده در شبکه شده است. این مورد یکی از مهم‌ترین مزیت‌های کاربرد

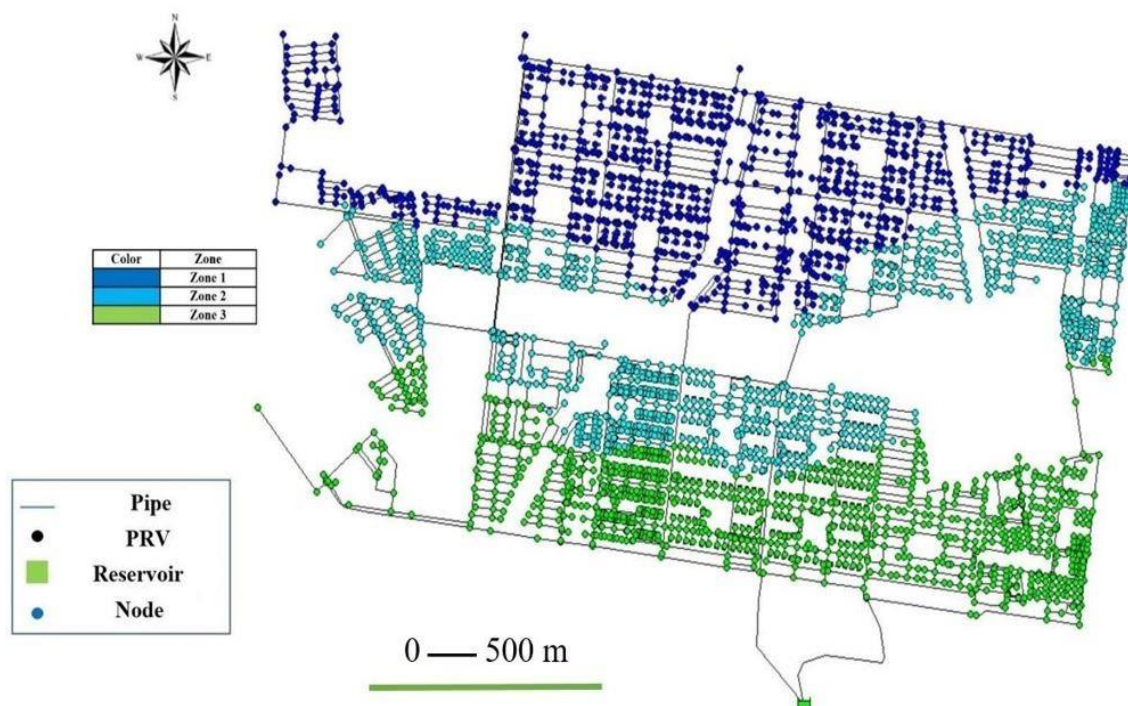


Fig. 4. Map of Baharestan network pressure zone

شکل ۴- نقشه زون بندی فشار شبکه بهارستان

جدول ۶- نتایج میزان میانگین فشار زون های شبکه بهارستان در تحلیل دوره زمانی گسترده برای هر سه حالت پیشنهادی

Table 6. Results of average nodal pressure of Baharestan network zones during EPS in all three proposed conditions

Condition	Zone\Parameter	Minimum	Average	Maximum
Condition 1	Zone 1	20.67	32.94	72.90
	Zone 2	16.03	39.78	66.19
	Zone 3	15.21	31.10	50.85
Condition 2	Zone 1	18.50	18.50	59.71
	Zone 2	13.78	13.78	57.16
	Zone 3	10.32	13.11	46.87
Condition 3	Zone 1	19.21	24.11	64.23
	Zone 2	14.64	24.34	62.74
	Zone 3	13.94	20.26	48.29

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، عملکرد PATها در مقایسه با PRVها در یک شبکه واقعی توزیع آب شهری، شبکه توزیع آب شهر بهارستان در اصفهان، ارزیابی شد. به عبارت دیگر، تمرکز اصلی پژوهش حاضر بررسی هم زمان اثرات المان های مختلف شبکه بر مدیریت فشار، میزان نشت و قابلیت بازیابی انرژی بود. به این منظور سه حالت

در مجموع، مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مطالعات پیشین نشان می دهد که اگرچه روند کلی تأثیر مدیریت فشار بر کاهش نشت و بهبود عملکرد هیدرولیکی شبکه با سایر پژوهش های هم خوانی دارد، اما تفاوت در مفروضات مدل سازی، نحوه انتخاب تجهیزات و معیارهای تصمیم گیری می تواند به تفاوت در نتایج منتهی شود.



کاربردی نیز، نتایج این پژوهش می‌تواند به تصمیم‌گیران و بهره‌برداران شبکه‌های توزیع آب کمک کند تا در شبکه‌هایی با شرایط توپوگرافی متغیر و دارای فشار اضافی، از PAT نه به‌عنوان جایگزین، بلکه به‌عنوان مکمل PRV استفاده کنند.

در انتها بیان این نکته ضروری است که این پژوهش دارای محدودیت‌هایی بود. اولاً، جانمایی PATها در این پژوهش با بهینه‌سازی همراه نبود زیرا هدف پژوهش، ارزیابی تطبیقی عملکرد تجهیزات تحت شرایط یکسان بود. ثانیاً، مدل نشت مورد استفاده از مدل‌های متعارف وابسته به فشار بوده و کالیبراسیون دقیق آن برای شبکه مورد مطالعه انجام نشد. با این حال، این موضوع با توجه به ماهیت مقایسه‌ای تحلیل‌ها، تأثیری بر اعتبار نتایج نسبی ندارد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، جانمایی بهینه PATها با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه و یا چندهدفه و با در نظر گرفتن هم‌زمان معیارهای هیدرولیکی، انرژی و اقتصادی بررسی شود. همچنین، استفاده از داده‌های بهره‌برداری واقعی برای کالیبراسیون مدل نشت و توسعه تحلیل‌های دوره زمانی می‌تواند به بهبود دقت نتایج کمک کند. بررسی ابعاد اقتصادی و پایداری استفاده از PAT در کنار PRV نیز می‌تواند رویکرد مناسبی برای تکمیل یافته‌های پژوهش حاضر باشد.

۶- قدردانی

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

بدون شیر (حالت اول)، با PRV (حالت دوم) و جایگزینی PRV با PAT (حالت سوم) پیشنهاد شد. در این راستا، برای تحلیل شبکه از روش PDA استفاده شد تا تصویر واقع‌بینانه‌تری از عملکرد شبکه ارائه شود. نتایج نشان داد که اگرچه PRVها (حالت دوم) از نظر کنترل پایدار فشار عملکرد مناسبی داشته‌اند، اما استفاده از PAT (حالت سوم) در نقاط دارای فشار اضافی بدون ایجاد اختلال جدی در عملکرد هیدرولیکی شبکه، امکان بازیابی بخشی از انرژی هدررفته فراهم می‌شود. به عبارت دیگر، میزان میانگین فشار در کل شبکه با نصب شیرهای PRV (حالت دوم)، برابر ۲۴/۰۵ متر و میزان میانگین نشت برابر ۳۳/۸۳ لیتر بر ثانیه حاصل شد. پس از جایگذاری شیرهای PAT به جای PRV (حالت سوم) و انتخاب پمپ‌های مربوط به هر شیر، میزان میانگین فشار در کل شبکه برابر ۴۵/۰۳ متر و میزان میانگین نشت برابر ۵۹/۵۶ لیتر بر ثانیه حاصل شد. در همین راستا، با جایگزینی شیرهای PRV با PAT (حالات سوم) میزان ۷۳۳۲۷ وات ساعت انرژی در شبکه تولید شد.

از منظر علمی، این پژوهش با ارائه یک چارچوب تحلیلی مبتنی بر فشار برای مقایسه عملکرد PRV و PAT، به غنای مطالعات موجود در حوزه مدیریت فشار شبکه‌های توزیع آب می‌افزاید. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین، در پژوهش حاضر با ارائه رویکردی تطبیقی و تحت شرایط یکسان مدل‌سازی، امکان مقایسه جامع عملکرد PRV و PAT فراهم شد. نتایج نشان داد که تفسیر نتایج مدیریت فشار و بازیابی انرژی به مفروضات روش‌شناختی و شرایط هیدرولیکی شبکه وابسته است. از منظر

References

- Abbasi, M., Tabesh, M., Shahangian, S. A. and Safarpour, H., 2025. Enviro-technical assessment of social responses to water demand management policies facing water scarcity. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 151(8), 04025030. <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-04025030>.
- Arastou, K., Najarzadegan, M. and Eskandaripour, M., 2025. Assessing the environmental impact of wastewater leakage: a case study on grey water and carbon footprints in wastewater collection networks. *Water Resources and Industry*, 100300. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2025.100300>.
- Araujo, L. S., Ramos, H. and Coelho, S. T., 2006. Pressure control for leakage minimization in water distribution systems management. *Journal of Water Resources Management*, 20(1), 133-149. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-4635-3>.

- Derakhshan, S. and Nourbakhsh, A., 2008. Experimental study of characteristic curves of centrifugal pumps working as turbines in different specific speeds. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 800-807. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2007.10.004>.
- Ebrahimi, S., Riassi, A. and Kandi, A. 2021. Selection optimization of variable speed pump as turbine (PAT) for energy recovery and pressure management. *Energy Conversion and Management*, 227, 113586. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113586>.
- Eskandaripour, M., Moeini, R., Dehnavi, A. and Bateni, S. M., 2025. Pressure management and energy production approaches in urban water distribution networks using pumps as turbines. *Energy Reports*, 14, 2593-2606. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.09.034>.
- Giugni, M. and Pugliese, F., 2022. A practical approach for selecting pumps as turbines in water distribution networks. *Water*, 14(6), 889. <https://doi.org/10.3390/w14060889>.
- Jafari, R., Khanjani, M. J. and Esmaeilian, H. R., 2015. Pressure management and electric power production using pumps as turbines. *Journal-American Water Works Association*, 107(7), E351-E363. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2015.107.0083>.
- 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). *Journal of Water and Wastewater*, 35(4), 49-70. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.503350.3464>.
- Jazayeri, P. and Moeini, R., 2025. Graph theory-based algorithm to define district metered areas considering hydraulic conditions. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 151(10), 04025055. <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-7003>.
- Kanakoudis, V. and Muhammetoglu, H., 2014. Urban water pipe networks management towards non-revenue water reduction: two case studies from Greece and Turkey. *Clean-Soil, Air, Water*, 42(7), 880-892. <https://doi.org/10.1002/clen.201300138>.
- Khashaei, M., Tabesh, M., Shahangian, S. A. and Abbasi, M., 2022. Impacts of demand management using optimal pressure regulation in water distribution networks under 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>.
- Latifi, M., Farahi Moghadam, K. and Naeeni, S. T., 2021. Pressure and energy management in water distribution networks through optimal use of Pump-As-Turbines along with pressure-reducing valves. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(7), 04021039. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001392](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001392).
- Marini, G., Di Menna, F., Maio, M. and Fontana, N., 2023. HYPER: computer-assisted optimal pump-as-turbine (PAT) selection for microhydropower generation and pressure regulation in a water distribution network (WDN). *Water*, 15(15), 2807. <https://doi.org/10.3390/w15152807>.
- Manservigi, L., Cocco, D. and Mazzola, S., 2023. Optimal selection and operation of pumps as turbines for energy recovery in water systems. *Applied Energy*, 344, 120245. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120245>.
- Muhammetoglu, A., Riassi, B. and Salcedo, A., 2018. Evaluation of performance and environmental benefits of a full-scale pump as turbine system in Antalya water distribution network. *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(1), 130-141. <https://doi.org/10.2166/ws.2017.087>.
- Najarzadegan, M. and Eskandaripour, M., 2025. Maximizing efficiency and performance of water distribution systems through the implementation of optimization algorithms: a comprehensive analysis of valve and chlorine booster placement and management. *Heliyon*, 11(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42306>.
- Novara, D. and McNabola, A., 2018. A model for the extrapolation of the characteristic curves of pumps as turbines from a datum best efficiency point. *Energy Conversion and Management*, 174, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.091>.



- Patelis, M., Kanakoudis, V. and Gonelas, K., 2016. Pressure management and energy recovery capabilities using PATs. *Procedia Engineering*, 162, 503-510. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.094>.
- Pirard, T., Kitsikoudis, V., Erpicum, S., Piroton, M., Archambeau, P. and Dewals, B., 2022. Discharge redistribution is a key process for the heuristic optimization of energy production with pumps as turbines in a water distribution network. *Water Resources Management*, 36(4), 1237-1250. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03078-4>.
- Rossi, M., Nigro, A. and Renzi, M., 2019. Experimental and numerical assessment of a methodology for performance prediction of Pumps-as-Turbines (PATs) operating in off-design conditions. *Applied Energy*, 248, 555-566. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.123>.
- Safarpour, H., Tabesh, M. and Shahangian, S. A., 2021. Social life cycle assessment of wastewater systems under water demand management policies. *Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering*, 28(5), 2574-2589. <https://doi.org/10.24200/sci.2021.56182.4837>.
- Safarpour, H., Tabesh, M. and Shahangian, S. A., 2022a. Environmental assessment of a wastewater system under water demand management policies. *Water Resources Management*, 36(6), 2061-2077. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03021-7>.
- Safarpour, H., Tabesh, M., Shahangian, S.A., Hajibabaei, M. and Sitzenfrei, R., 2022b. Life cycle sustainability assessment of wastewater systems under applying water demand management policies. *Sustainability*, 14(13), 7736. <https://doi.org/10.3390/su14137736>.
- Sambito, M., Freni, G. and Puleo, V., 2021. Multi-objective optimization for the placement of pumps as turbines in water distribution networks. *Water*, 13(4), 514. <https://doi.org/10.3390/w13040514>.
- Samora, I., Franca, M. J., Schleiss, A. J. and Ramos, H. M., 2021. Energy recovery in water systems: state of the art and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110943. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110943>.
- Tahani, M., Kandi, A., Moghimi, M. and Derakhshan Houreh, Sh., 2020. Rotational speed variation assessment of centrifugal pump-as-turbine as an energy utilization device underwater distribution network condition. *Energy*, 213, 118502. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118502>.
- Wagner, J. M., Shamir, U. and Marks, D. H., 1988. Water distribution reliability: simulation methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(3), 276-294. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1988\)114:3\(276\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:3(276)).

