

Development of Reality-Based Leakage Modeling in a Decentralized Water Distribution Network with Pressure Management Analysis

Amirali Pourahari^{1*}, Ramin Amini²

¹Ph.D. Graduate, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

²Associate Professor, Department of Water and Environmental, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Corresponding Author's E-mail: Amiraliahari@yahoo.com

Received: 11 May 2025 Accepted: 17 June 2025
Revised: 28 May 2025 Published: 21 Mar. 2023



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Leakage in water distribution networks is a main cause of real water loss and plays a significant role in reducing the excellence of water supply services and increasing financial costs. To address this challenge, the study aims to develop the model for leakage flow rates more precisely, with more accurate understanding of leakage behavior. In this context, hydraulic leakage models, including the leakage power and the modified orifice equations, have been creatively applied to identify and analyze leakage at various network nodes. In the second part of the study, controlled pressure reduction using pressure reducing valves is examined as a practical solution for pressure regulation and leakage control. The findings show that this method can reduce leakage flow rates by approximately 14 percent. The study ultimately emphasizes that estimating total network leakage does not require the use of Average Zone Pressure; instead, it can be reasonably estimated using node pressures and leakage coefficients.

Keyword: Water Distribution Network, Leakage, Leakage Management, Field data, Average zone point (AZP)

Introduction: Ensuring a sustainable supply of fresh water has become a critical challenge in many countries. One of the most effective approaches to managing water demand in water distribution systems is reducing water loss. Leakage, which represents a significant portion of real water losses, shows considerable variation across the world. From a managerial perspective, achieving completely leak-free networks is neither technically possible nor economically justified. In many studies, leakage is simplified and its hydraulic basis is often overlooked. The orifice equation, commonly used for leakage analysis, does not accurately reflect real leakage behavior. Experimental and modeling evidence shows that the leakage area is not constant, as assumed in the orifice model, but increases with fluid pressure. This behavior suggests that leakage is pressure-dependent, with the leakage opening expanding linearly as pressure head rises. In contrast, the leakage power law approach is often based on the assumption that leakage occurs only at the average zone pressure. In this study, node-level leakage estimation is carried out using a realistic hydraulic model calibrated with field data. Additionally, pressure management strategies are evaluated to reduce excess pressure in the water network after the leakage modeling process.

Methodology: This study investigates leakage estimation in decentralized water distribution networks, focusing on the precise quantification of leakage at individual nodes using advanced hydraulic modeling. The first section introduces an innovative approach based on field data, integrating pressure and flow rate measurements obtained through pressure step tests. Unlike previous studies, which typically estimated overall network leakage by relying on average zone pressure (AZP), this research independently formulates leakage equations for each node. The second section examines pressure management as a strategy for reducing water losses, emphasizing pressure reducing valves (PRVs) as a key solution for controlling pressure and mitigating leakage. The final section revisits and rejects the conventional assumption of using AZP for total network leakage estimation, demonstrating that

accurate leakage calculations can be achieved by considering leakage coefficients (C_1 and C_2) and node-specific pressure values. The findings reveal that even with consumption pattern variations, such as node demand fluctuations or nighttime consumption changes, the overall leakage closely matches the AZP-based calculation. This study bridges the gap between theoretical and practical applications in real water networks, offering improved methods for leak detection and management that could enhance water conservation efforts globally.

Results and Discussion: In this study, the demand for each node in the District Metered Area (DMA), referred to as DMAK, is calculated by considering both leakage (Fig. 3-a) and pressure (Fig. 3-b). The leakage equation for each node is derived by focusing on two stages of a pressure step test, where pressure changes are similar across the selected time intervals: the first stage from 01:50 to 02:30 AM, and the second from 02:50 to 03:30 AM. During these time periods, the leakage for each node is computed as the difference between node demand and the nighttime consumption (LNC). While the average nighttime consumption (LNC) for the entire DMAK is known, individual node nighttime consumption is not directly measured. However, assuming uniform demand patterns, the nighttime consumption for each node can be calculated relative to its base demand.

In this study, pressure and leakage data from each node were gathered during the two stages of the pressure step test to derive the leakage power equation LP-Eq and the modified orifice equation (LMO-Eq). These models are used to estimate leakage for each node. The leakage profiles for each node using the Eq-LMO model are shown in Fig. 4-a. Error distribution for LP-Eq and LMO-Eq models are shown in Figs. 4-b and 4-c, respectively. The J3.1 node exhibits the least error, while node J4 shows higher deviations from the LMO-Eq model, indicating the limitations of LP-Eq in predicting leakage at this node.

Using the LMO-Eq model, the total modeled leakage for the DMA was 60.17 m³/day (19.5% of the input flow) on 2022/04/11. The LMO-LN-Eq and LP-Eq models overestimated the leakage by 6% (65.9 m³/day) and 3% (62.5 m³/day), respectively. On 2022/04/12, the measured leakage was 62.2 m³/day (20.2% of input flow), while the models predicted 68.2 m³/day LMO-LN-Eq and 63.34 m³/day LP-Eq, highlighting variable accuracy under different pressure conditions. Reducing leakage by applying pressure management could significantly help conserve water in the region.

Implementing the pressure reduction algorithm (Price et al., 2022) reduced daily leakage from 60.17 m³/day to 51.54 m³/day (14% reduction).

Conclusion: This study developed a nodal leakage model for the decentralized District Metered Area (DMAK) of Mashhad's water distribution network. Unlike previous methods relying on AZP and the power equation, the model uses nodal pressure data and simplified FAVAD coefficients to estimate total network leakage without AZP. Pressure management through PRVs further validated the model's effectiveness in reducing leakage. The results emphasize the importance of node-specific leakage estimation, improving the accuracy of water loss assessments and supporting sustainable water resource management. This approach offers a more precise method for managing water leakage in decentralized water networks.

© 2023 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

توسعه مدل‌سازی مبتنی بر واقعیت‌نشت در شبکه توزیع آب غیرمتمرکز به همراه بررسی مدیریت فشار

امیرعلی پوراهری^{۱*}، رامین امینی^۲

^۱دانش‌آموخته دکتری تخصصی، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
^۲دانشیار، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: amiraliahari@yahoo.com

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۷
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۷ تاریخ چاپ: ۱۴۰۲/۰۱/۰۱

چکیده: نشت در شبکه‌های توزیع آب از عوامل اصلی هدررفت واقعی آب به شمار می‌آید و نقش مهمی در کاهش کیفیت خدمات شرکت‌های آب‌رسانی و افزایش هزینه‌های اقتصادی دارد. جهت مقابله با این چالش، تلاش شده است با درک عمیق‌تر رفتار نشت، مدل‌سازی دقیقی از نرخ جریان نشت ارائه شود. در ابتدا، رویکردی کاربردی بر اساس داده‌های میدانی و مدلی واسنجی‌شده از یک شبکه واقعی غیرمتمرکز ارائه شده است. در این راستا، مدل‌های هیدرولیکی نشت؛ مانند معادله توان نشت و معادله روزنه اصلاح‌شده، به‌گونه‌ای خلاقانه جهت شناسایی و تحلیل نشت در گره‌های مختلف شبکه به کار گرفته شده‌اند؛ از این‌رو، احتمال بروز تفاوت‌هایی میان نتایج حاصل از معادله روزنه اصلاح‌شده و معادله توان نشت پس از انجام مدل‌سازی نشت وجود دارد. با توجه به اینکه هدف اصلی از مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع، کاهش میزان نشت و همچنین حفظ حداقل فشار لازم در هر بخش شبکه است، در بخش دوم تحقیق، کاهش کنترل‌شده فشار از طریق شیرهای فشارشکن به‌عنوان راهکاری عملی برای تنظیم فشار و مهار نشت مورد بررسی قرار گرفته است. یافته‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از این روش، نرخ جریان نشت حدود ۱۴ درصد کاهش یافته است. در نتیجه، ضمن تخمین نرخ جریان نشت در هر گره از شبکه، امکان ارزیابی غیرمستقیم کاهش نشت نیز فراهم شده است. در بخش پایانی پژوهش تأکید شده که برای برآورد نشت کلی شبکه، نیازی به استفاده از فشار میانگین ناحیه نیست، بلکه می‌توان با تکیه بر ضرایب و فشارهای گرهی در بخش‌های مختلف شبکه، مقدار کل نشت را با دقت مناسبی برآورد کرد.

واژه‌های کلیدی: شبکه توزیع آب، نشت، مدیریت نشت، داده‌های میدانی، نقطه میانگین ناحیه (AZP)

۱- مقدمه

جهان تبدیل‌شده است؛ چالشی که تحت تاثیر عواملی مانند گسترش شهرنشینی، تغییرات اقلیمی و رشد روزافزون جمعیت، روزبه‌روز شدت می‌گیرد و کاهش بیشتر منابع آبی

دسترسی به آب شرب و بهداشتی اساسی‌ترین نیاز انسان‌ها در زمینه آسایش و سلامت است. امروزه تامین پایدار آب شیرین به یکی از چالش‌های مهم در بسیاری از کشورهای

بازشدگی سطح نشت‌ها برخلاف فرض ثابت بودن در معادله روزنه، وابسته به فشار سیال است و با افزایش بار فشار، به‌طور خطی افزایش می‌یابد (Romero-Ben et al., 2023; Yousefi-Khoshqalb et al., 2023; Wan et al., 2022; Kammoun et al., 2022; Bakhtawar & Zayed, 2021; Gupta & Kulat, 2018; De Marchis et al., 2016; Fox et al., 2016a, b; May, 1994; Greyvenstein and van Zyl, 2007; Van Zyl and Clayton, 2007). باین‌حال، برخی مطالعات بررسی‌های دقیق‌تری از نشت انجام داده‌اند و آن را با استفاده از معادله روزنه اصلاح‌شده نشت مدل‌سازی کرده‌اند (Kabaasha et al., 2020; Kabaasha et al., 2018; Van Zyl et al., 2017; Schwaller et al., 2015). اگرچه معادله روزنه اصلاح‌شده برای مدل‌سازی واقع‌گرایانه نشت شناخته‌شده است، استفاده از معادله توان نشت که احتمال خطای زیادی دارد همچنان رایج است (Van Zyl et al., 2017).

در عمل، استفاده از معادله توان نشت بر این فرض استوار است که نشت‌ها تنها در نقطه میانگین ناحیه (AZP) رخ می‌دهند. این موضوع اغلب ناشی از عدم دسترسی به حسگرها و لاگرها در تمامی گره‌ها یا عدم امکان‌سنجی عملی و اقتصادی برای چنین پایش گسترده‌ای است. حتی در صورت وجود پایش کامل شبکه، محدودیت نرم‌افزارهای هیدرولیکی موجود به استفاده از یک توان ثابت در معادله توانی نشت، مانع مدل‌سازی واقع‌گرایانه نشت در گره‌های مختلف می‌شود (Pourahari et al., 2024). در این راستا، پوراھری و همکاران در راستای رسیدن به بالاترین سطح کارایی از شبکه، به توسعه و شبیه‌سازی مدلی دقیق از شبکه‌های توزیع آب پرداختند. در چارچوب این پژوهش، داده‌های مربوط به جریان و فشار با بهره‌گیری از سیستم اسکادا^۲ و تجهیزات پیشرفته اندازه‌گیری، به‌صورت دقیق ثبت و گردآوری شدند. سپس به منظور مدل‌سازی نشت در شبکه، فرآیند دستیابی به واسنجی دقیق مدل با بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی بی‌زین انجام شده است (Pourahari et al., 2024).

از منظر مدیریتی، دستیابی به شبکه‌های کاملاً بدون نشت نه از نظر فنی و نه از نظر اقتصادی امکان‌پذیر و عملی

در آینده، کاملاً محتمل به نظر می‌رسد. (Özerol et al., 2019; Ashraf et al., 2020). در بسیاری از کشورها، بحران کمبود آب به حدی رسیده است که دولت‌ها ناچار به استفاده از روش‌های هزینه‌بر مانند انتقال آب بین حوضه‌ها، شیرین‌سازی و انتقال آب از دریاها برای تامین نیازهای آبی شده‌اند. همچنین، جیره‌بندی آب در بسیاری از روستاها و شهرها حتی در فصل زمستان، نشان‌دهنده وضعیت ناپایدار تامین آب است (Saemian et al., 2022). یکی از راهکارهای مؤثر در مدیریت تقاضای آب در شبکه‌های آب‌رسانی، کاهش هدررفت آب است. هدررفت آب شامل تلفات واقعی (نظیر نشت‌ها و سرریزها) و تلفات ظاهری (مانند مصرف‌های غیرمجاز، خطاهای مرتبط با داده‌ها و دزدی آب به شکل‌های مختلف) است (Ghamkhar et al., 2023; AL-Washali et al., 2020; AWWA, 2016).

نشت که سهم قابل‌توجهی از هدررفت واقعی آب را به خود اختصاص می‌دهد، در سطح جهان دارای نوسانات چشمگیری است؛ این در حالی است که در کشورهای توسعه‌یافته مقدار این تلفات معمولاً بین ۳ تا ۷ درصد، و در کشورهای در حال توسعه تا بیش از ۵۰ درصد نیز گزارش شده است (Gupta & Kulat, 2018). این اختلاف قابل‌توجه بر اهمیت به‌کارگیری راهکارهای مؤثر برای مدیریت تلفات آب توسط شرکت‌های آب‌رسانی تاکید دارد؛ راهکارهایی که شامل فعالیت‌هایی نظیر پایش مستمر، شناسایی سریع و کنترل به‌موقع نشت می‌شوند.

مدیریت تلفات واقعی آب، که عمدتاً با عنوان مدیریت نشت شناخته می‌شود، به‌طور گسترده‌ای در مطالعات مختلف بررسی شده است. در بسیاری از مطالعات، فرآیند نشت در شبکه به‌صورت ساده‌انگارانه در نظر گرفته می‌شود و مبنای هیدرولیکی آن به‌درستی منظور نمی‌شود. این پژوهش‌ها معمولاً یا بر شناسایی و برآورد مستقیم نشت‌های بزرگ متمرکز هستند، یا از معادله روزنه^۱ برای تحلیل جریان نشت بهره می‌برند. باین‌حال، چنین رویکردهایی قادر به بازنمایی دقیق رفتار واقعی نشت نیستند، چراکه نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی‌ها و آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهند که

² SCADA

¹ Orifice

مطالعات مختلفی در زمینه به‌کارگیری فن‌ها و الگوریتم‌های محاسباتی در جهت تعیین مکان و تنظیمات شیرهای فشارشکن در راستای مدیریت فشار و کاهش نشت وجود دارد که در این قسمت به بخشی از مطالعات اشاره شده است.

برای دستیابی به موقعیت و تنظیم شیرهای فشارشکن، کراکو و پزینگا از الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک (GA^2) و نورد شبیه‌سازی شده (SA^3) استفاده کردند (Creaco and Pezzinga, 2018). در پژوهشی دیگر، منصف و همکاران با بهره‌گیری از الگوریتم تکامل تفاضلی (DE^4)، به هدف توزیع یکنواخت فشار و کاهش سطح فشار در شبکه در تمام ساعات شبانه‌روز دست یافتند، به طوری که مصرف انرژی شبکه حدود $28/4$ درصد کاهش یافت (Monsef et al., 2018). گوپتا و همکاران نیز با به‌کارگیری روشی مبتنی بر تحلیل ماتریس گرهی همراه با یک الگوریتم بهینه‌سازی، مکان‌های مناسب برای نصب شیرهای فشارشکن را شناسایی کردند (Gupta et al., 2020). در مطالعه پرایس و استفلد، با بهره‌گیری از نتایج مدل‌سازی هیدرولیکی نرم‌افزار EPANET، شبکه به شکل یک گراف جهت‌دار بر مبنای جهت جریان‌ها بازنمایی شد. در این چارچوب، با در نظر گرفتن دو شاخص اصلی یعنی «تعداد گره‌های پایین‌دست» و «توان بالقوه کاهش فشار»، لوله‌های کلیدی و مناسب‌ترین مکان‌ها برای نصب شیرهای فشارشکن شناسایی گردیدند (Price and Ostfeld, 2022). در پژوهشی دیگر، پرایس و همکاران طول لوله‌های پایین‌دست را به‌عنوان شاخصی برای تحلیل در نظر گرفتند. این انتخاب از آنجا ناشی می‌شود که در نرم‌افزار شبیه‌سازی EPANET، فشار تنها در گره‌ها اندازه‌گیری می‌شود و نه در طول لوله‌ها. بنابراین، استفاده از تعداد گره‌ها به‌عنوان معیار، اگرچه ساده‌تر است، اما می‌تواند به کاهش دقت در تخمین نرخ نشت منجر شود؛ چراکه در شرایط واقعی، نشت آب بیشتر تحت تاثیر تعداد اتصالات واقع در امتداد لوله‌هاست، نه صرفاً تعداد گره‌های مصرف (Price and Ostfeld, 2022). همچنین، دینی و همکاران (Dini et al., 2023) با به‌کارگیری الگوریتم کلونی

نیست، و حتی در کارآمدترین سیستم‌های آب‌رسانی که در حال بهره‌برداری هستند، همواره مقداری نشت اجتناب‌ناپذیر وجود دارد (Fanner et al., 2007). تجربه‌ها نشان داده‌اند که کنترل فشارهای اضافی و کاهش نوسانات فشاری، یکی از ساده‌ترین، سریع‌ترین و احتمالاً کم‌هزینه‌ترین روش‌ها برای کاهش تلفات آب در شبکه است (AWWA, 2016). شرکت‌های آب و فاضلاب، سیستم‌های آب‌رسانی را طوری طراحی می‌کنند که حداقل فشار آب را همیشه، حتی در ساعات اوج مصرف، حفظ کنند. مدیریت فشار فرآیندی است که با هدف تنظیم و کنترل فشار آب در شبکه توزیع صورت می‌گیرد، به گونه‌ای که فشار در محدوده‌ای بهینه و مناسب حفظ شود؛ به طوری که نه از حد مجاز فراتر رود و نه به میزانی کاهش یابد که موجب اختلال در عملکرد شبکه گردد. این به چند دلیل مهم است؛ (۱) کاهش نشت (۲) جلوگیری از ترکیدگی در لوله و (۳) اطمینان از در دسترس بودن آب با فشار کافی برای مصرف‌کنندگان. امروزه به‌طور گسترده و در سطح بین‌المللی پذیرفته شده است که مدیریت فشار می‌تواند شدت جریان نشت را کاهش دهد و از تواتر نشت در خطوط اصلی و انشعابات قدیمی بکاهد، که این امر به نوبه خود می‌تواند باعث افزایش عمر مفید زیرساخت‌ها شود. واضح است که کاهش فشار در تمام سیستم‌ها ممکن نیست و برخی از آن‌ها با مشکل کمبود فشار مواجه‌اند، اما بسیاری از سیستم‌ها همچنان با فشارهای بالاتر از حد نیاز عمل می‌کنند، که این امر ضرورت استفاده از یک برنامه مدیریت فشار را آشکار می‌سازد (Price and Ostfeld, 2022). تعبیه شیرهای فشارشکن در نقاط خاصی از شبکه، فشار آب را که به پایین‌دست با فشارهای اضافی تحمیل می‌شود، کاهش می‌دهد و به‌طور مؤثر، مدیریت فشار بهتری ارائه می‌دهد (Price and Ostfeld, 2022). بنابراین می‌توان از شیرهای فشارشکن ($PRVs^1$) به‌عنوان ابزاری مناسب با هدف نزدیک‌تر کردن فشار آب در هر نقطه از شبکه (معمولاً نقاط بحرانی) به حداقل فشار سرویس (خدمت) موردنیاز، استفاده کرد (AWWA, 2016; Lambert and Fantozzi, 2010; Vicente et al., 2016).

³ Simulated Annealing

⁴ Differential Evolution

¹ Pressure Reducing Valves

² Genetic Algorithms

بخش دوم این مطالعه به بررسی مدیریت فشار به‌عنوان یک راهبرد استاندارد در کاهش هدررفت آب در شبکه‌های توزیع اختصاص دارد. در این راستا، شیرهای فشارشکن، به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر برای تنظیم فشار و مهار نشت مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در بخش سوم و نهمی، فرض رایج استفاده از فشار مرجع در نقطه میانگین ناحیه (AZP) برای برآورد نشت کل شبکه مورد بازنگری قرار گرفته و رد می‌شود. در عوض، نشان داده شده است که با در اختیار داشتن ضرایب نشت (C_1 و C_2) و مقادیر فشار در هر گره، می‌توان نشت کلی شبکه را با دقت بالا محاسبه کرد. نتایج حاکی از آن است که حتی با تغییر در الگوهای مصرف، مانند نوسانات تقاضای گره‌ای یا تغییرات مصرف شبانه، مجموع نشت حاصل از گره‌ها با مقدار محاسبه شده بر اساس فشار میانگین ناحیه تطابق دارد.

۲-۱- تخمین نشت گرهی در شبکه توزیع آب

غیرمتمرکز

در بخش هدررفت واقعی، بیش از دو دهه است که تلاش‌های تحقیقاتی برای درک بهتر رفتار نشت صورت گرفته و سعی شده است که مدل‌سازی دقیق‌تری از دبی نشت با کمک معادلات حاصل شود. در ابتدا، بر اساس اصل بقای انرژی (برنولی) نتیجه گرفته می‌شود که دبی نشت برابر است با دبی خروجی از یک روزنه که از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$q_o = C_d A \sqrt{2gh} \quad (1)$$

که رابطه (۱)، q_o نشان‌دهنده شدت جریان؛ C_d ضریب تخلیه؛ A سطح مقطع روزنه؛ g شتاب گرانش و h اختلاف بار فشار در دو طرف روزنه است. با این حال، بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی و میدانی نشان می‌دهند که توان ۰/۵ (جذر بار فشار) در همه موارد صدق نمی‌کند و این توان محدوده بسیار بزرگ‌تری (۰/۳۶ - ۲/۹۵) را در بر می‌گیرد.

مورچگان (ACO^1)، به تعیین محل نصب شیرهای فشارشکن در شبکه توزیع آب شهر کلیبر با هدف کاهش نشتی و افزایش قابلیت اطمینان شبکه پرداختند.

اهداف اصلی این پژوهش در دو محور کلی قابل بیان است: نخست، تخمین نشت گرهی از طریق مدل‌سازی هیدرولیکی نزدیک به واقعیت که بر پایه داده‌های میدانی و یک مدل واسنجی شده انجام می‌پذیرد؛ و دوم، ارزیابی و تحلیل راهکارهای مدیریت فشار با هدف کاهش فشار مازاد در شبکه توزیع آب، که پس از مدل‌سازی نشت مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطالعه پیشرو سعی دارد تا با کمک از مطالعات پیشین و شناخت نواقص آن، به درک واقع‌گرایانه‌تری نسبت به گذشته در مدل‌سازی شبکه‌های توزیع آب، به‌ویژه در بحث مدیریت نشت دست یابد.

۲- روش‌شناسی

این بخش از پژوهش شامل سه قسمت اصلی است که بخش نخست آن به برآورد نشت در گره‌های یک شبکه توزیع آب غیرمتمرکز اختصاص دارد. در این مرحله، رویکردی نوآورانه بر پایه داده‌های میدانی معرفی شده است که تمرکز آن بر تخمین دقیق نشت گرهی با بهره‌گیری از مدل‌سازی پیشرفته هیدرولیکی است. هدف اصلی این بخش، ایجاد پل ارتباطی میان مطالعات نظری و کاربردهای عملی در شبکه‌های واقعی غیرمتمرکز هست. در ابتدا، داده‌های میدانی شامل فشار و شدت جریان از طریق اجرای آزمون مرحله‌ای فشار گردآوری شده‌اند. سپس، با استفاده از مفاهیم مربوط به معادله توان نشت و معادله روزنه اصلاح شده، مدلی واقع‌گرایانه برای نشت در هر گره از شبکه استخراج شده است. برخلاف مطالعات پیشین که بیشتر بر برآورد نشت کلی شبکه با تکیه بر فشار میانگین ناحیه (AZP) تمرکز داشتند، این پژوهش معادلات نشت را به صورت مستقل و اختصاصی برای هر گره فرمول‌بندی کرده است. شایان ذکر است که برای دستیابی به این هدف، از یک مدل واسنجی شده استفاده شده است.

¹ Ant Colony Optimization

هستند. با قرار دادن رابطه خطی بین هد و سطح نشت در رابطه روزنه، به رابطه (۴) دست می‌یابیم.

$$Q = C_d \sqrt{2g} (A_0 h^{0.5} + m h^{1.5}) \quad (4)$$

رابطه (۴)، رابطه روزنه اصلاح شده است که در عمل با عنوان رابطه (FAVAD³) شناخته می‌شود که توسط می^۴ ارائه شد و بر این مفهوم متکی است که جریان نشت از دو مؤلفه ساخته می‌شود: جریان در سطح اولیه نشت و جریان در سطح توسعه یافته نشت. می معتقد بود که سطح تعدادی از نشت‌ها در سیستم با فشار تغییر می‌کند و تعدادی ثابت می‌مانند (May, 1994). در معادله روزنه اصلاح شده، دو جزء برای جریان روزنه شناسایی شده‌اند: جریان در سطح اولیه نشت $(C_d A_0 \sqrt{2gh})$ و جریان در سطح توسعه یافته نشت $(C_d m \sqrt{2gh}^{1.5})$. بر این اساس، ون‌زیل و کاسا، عدد بی‌بعد نشت (L_N) را معرفی کردند که با تقسیم جزء متغیر بر جزء ثابت به دست می‌آید. آن‌ها همچنین برای تعیین ارتباط بین (L_N) و (N_1) یک رابطه ریاضی ارائه کردند (Van Zyl and Cassa, 2014):

$$L_N = \frac{mh}{A_0} = \frac{N_1 - 0.5}{1.5 - N_1} \quad (5)$$

به عبارت دیگر، با بهره‌گیری از عدد نشت، امکان تبدیل معادله توان نشت به معادله روزنه اصلاح شده وجود دارد و بالعکس، می‌توان معادله روزنه اصلاح شده را نیز به معادله توان تبدیل کرد.

آزمون مرحله‌ای فشار

آزمون مرحله‌ای فشار با کاهش تدریجی جریان ورودی به نواحی ایزوله شده^۵ همراه با بستن تدریجی شیرها یا استفاده از شیرهای فشارشکن در کنار کنتور جریان در یک ناحیه مجزا انجام می‌شود. فرآیند کاهش فشار باید به صورت مرحله‌ای و با فواصل زمانی حداقل ۱۵ دقیقه‌ای بین هر

از علل مطرح شده برای این تفاوت می‌توان به هیدرولیک نشت، جنس لوله، فعل و انفعال بین خاک و لوله و توزیع نشت در شبکه اشاره کرد. اما دلیل غالب برای این تفاوت، متغیر بودن سطح نشت‌ها بوده است. لذا برای شبیه‌سازی نشت، به‌ویژه در نرم‌افزارهای هیدرولیکی، رابطه تجربی زیر جایگزین رابطه روزنه شد:

$$q_p = Ch^{N_1} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، q_p نشان‌دهنده شدت جریان نشت؛ C ضریب نشت؛ N_1 توان نشت و h اختلاف بار فشار در دو طرف روزنه نشت است. اما به دلایل متعدد مشخص شده است که رابطه توان نشت دارای مشکلاتی است؛ که دو مورد اصلی آن عبارت هستند از: ۱. عدم پیروی از روابط هیدرولیکی و ۲. در نظر نگرفتن تغییر سطح روزنه. در واقع، ون‌زیل^۱ و همکاران در مطالعه‌ای به این نتیجه رسیدند که اگر پارامترهای معادله توان نشت فراتر از محدوده واسنجی فشار و در مقادیر توان بالا برون‌یابی شوند، ممکن است منجر به خطاهای جدی در نرخ‌های جریان نشت مدل‌سازی شده شوند (Van Zyl et al., 2017). از سوی دیگر، کاسا^۲ و همکاران در مطالعات خود نشان داده‌اند که سطح نشت به صورت خطی با فشار تحت شرایط الاستیک و ویسکوالاستیک تغییر می‌کند. طبق مطالعات، بازشدگی سطح همه نشت‌ها، بدون توجه به نوع و جنس بازشدگی، به صورت خطی با بار فشار، افزایش پیدا می‌کند (Cassa et al., 2010; Van Zyl and Cassa, 2014):

$$A = A_0 + mh \quad (3)$$

در رابطه (۳)، A_0 ، سطح اولیه نشت و m شیب سطح-فشار است. m ، به جنس لوله، شکل و هندسه روزنه نشت وابسته است. تحقیقات نشان می‌دهند که طول ترک و ضخامت دیواره به ترتیب از عوامل اصلی تاثیرگذار بر مقدار m

⁴ May

⁵ District Metered Area (DMA)

¹ Van Zyl

² Cassa

³ Fixed Area Variable Areas Discharge

مطالعات، مصارف شبانه (LNC) در طول آزمون مرحله‌ای فشار به‌عنوان یک مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود؛ به این دلیل که مصارف شبانه به‌صورت ساعتی گزارش می‌شود یا شرکت‌های آب‌رسانی تنها مصارف شبانه را در یک ساعت مشخص تخمین می‌زنند. در صورت ثابت فرض کردن مصارف شبانه در طول آزمون مرحله‌ای فشار، این فرض تنها زمانی معتبر است که این مراحل در دوره‌ای انجام شود که در آن نوسانات در مصارف شبانه زیاد نباشد. مصارف شبانه با گذشت زمان تغییر می‌کند و باید مصرف شبانه هر دوره از حداقل جریان شبانه متناظر کسر شود. همچنین، در نظر گرفتن میانگین مصارف شبانه در طول شب نادرست است. به‌طور کلی، این روش فرض می‌کند که نشت سیستم فعلی در نقطه فشار حداقل (AZP) رخ می‌دهد، اما اتکا به این فرض ممکن است در صورت وجود تفاوت نقاط نشت در سیستم منجر به خطاهای قابل‌توجهی در محاسبه پارامترهای نشت شود. برای روشن‌تر شدن موضوع، باید توجه داشت که نشت سیستم به یک نقطه خاص محدود نیست و در هر نقطه‌ای امکان وقوع آن وجود دارد؛ بنابراین، این روش تنها برای برآورد نشت کلی سیستم مؤثر است و قادر به ارائه تخمین دقیقی از نشت در نقاط مختلف سیستم نیست.

تخمین نشت گرهی

دلیل استفاده از رابطه (۶) سادگی در کاربرد و تسهیل برآورد نشت سیستم از طریق آزمون مرحله‌ای فشار است. باین‌حال، یک چالش مهم وجود دارد: چگونه می‌توان به‌سادگی نشت را در هر گره تخمین زد؟ از آنجایی که معادله توان نشت برای هر گره معتبر است، با انجام آزمون مرحله‌ای فشار و ثبت جفت داده (q_1, h_1) و (q_2, h_2) در هر گره می‌توان مقدار توان نشت (N_1) مربوط به هر گره را تخمین زد. در حال حاضر، این روش به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار نمی‌گیرد؛ زیرا از منظر اقتصادی تجهیز هر گره به حسگرها و لاگرها برای اندازه‌گیری فشار و جریان غیرعملی است. حتی با وجود داده‌های کامل از گره‌ها، مدل‌های شبیه‌ساز هیدرولیکی استاندارد مانند ایپانت (EPANET) معمولاً یک توان نشت (N_1) یکسان برای کل

مرحله انجام گیرد. در هر مرحله، فشار باید به میزان حدود ۱۰ تا ۱۵ psi (یا در حدی که شبکه قادر به تحمل آن باشد) کاهش یابد. در آغاز آزمون و پس از هر مرحله کاهش فشار، مقادیر جریان و فشار به‌دقت ثبت می‌شوند. همچنین، اندازه‌گیری فشار در نقطه میانگین ناحیه (AZP) در طول مدت آزمون ضروری است. به این صورت، آزمون مرحله‌ای فشار به‌عنوان ابزاری کلیدی در تدوین راهبردهای مدیریت نشت محسوب می‌شود، چراکه شدت نشت تأثیر مستقیمی بر نحوه کنترل و تنظیم فشار دارد. محققین اغلب از توان نشت (N_1) برای ارزیابی تأثیر فشار تنظیمی سیستم که در نقطه میانگین ناحیه (AZP) اندازه‌گیری می‌شود، بر میزان نشت بهره می‌برند. شایان ذکر است که این آزمون‌ها باید در ساعات شبانه و در زمان‌هایی که تقاضای مصرف آب در کمترین سطح قرار دارد، اجرا شوند؛ زیرا کاهش قابل‌توجه فشار در طی آزمون ممکن است منجر به اختلال موقت در خدمات‌رسانی به مشترکان، به مدت تقریبی یک ساعت، شود.

$$N_1 = \frac{\log\left(\frac{q_2}{q_1}\right)}{\log\left(\frac{h_2}{h_1}\right)} \quad (6)$$

در این رابطه q_1 و q_2 به ترتیب شدت جریان‌های نشت در فشارهای h_1 و h_2 هستند.

برای جمع‌آوری داده در نقاط (q_1, h_1) و (q_2, h_2) به‌منظور محاسبه توان نشت (N_1) می‌توان از آزمون مرحله‌ای فشار استفاده کرد. این‌رویش به‌کارگیری یک شیر فشارشکن (PRV) در ورودی ناحیه برای کاهش فشار در دوره حداقل جریان شبانه (MNF) را دربر می‌گیرد که معمولاً بین ساعات ۲ تا ۴ رخ می‌دهد. این بازه زمانی به دو دلیل انتخاب می‌شود: (۱) فشار در دوره شبانه تثبیت می‌شود و با پایداری جریان و فشار در شب می‌توان فشار را کاهش داد و جریان نیز با آن همسو می‌شود. (۲) حداقل جریان شبانه عمدتاً نشت را شامل می‌شود و با کسر مصارف شبانه مجاز (LNC) از حداقل جریان شبانه می‌توان مقدار نشت واقعی را محاسبه کرد. نکته بسیار مهم این است که در بسیاری از

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} h_1^{0.5} & h_1^{1.5} \\ h_2^{0.5} & h_2^{1.5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{h_1^{0.5}h_2^{1.5} - h_1^{1.5}h_2^{0.5}} \begin{bmatrix} h_2^{1.5} & -h_1^{1.5} \\ -h_2^{0.5} & h_1^{0.5} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن، عبارت‌های C_1 و C_2 از رابطه‌های (۹) به دست می‌آیند.

$$C_1 = \frac{h_2^{1.5}q_1 - h_1^{1.5}q_2}{h_1^{0.5}h_2^{0.5}(h_2 - h_1)} \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{h_1^{0.5}q_2 - h_2^{0.5}q_1}{h_1^{0.5}h_2^{0.5}(h_2 - h_1)}$$

به دست آوردن دو ضریب C_1 و C_2 ، به ما امکان استخراج رابطه روزنه اصلاح‌شده برای هر گره را می‌دهد. این مرحله با عنوان "LMO-Eq" شناخته می‌شود.

♦ مرحله ۳: ون‌زیل و همکارانش ارتباطی تئوری بین رابطه توان نشت و رابطه روزنه اصلاح‌شده برقرار کردند. به‌طور خاص، با استفاده از رابطه (۵) (L_N)، رابطه (۱۰) برای $\frac{C_2}{C_1}$ برقرار است (Van Zyl et al., 2017).

$$\frac{L_N}{h} = \frac{m}{A_0} = \frac{C_d m \sqrt{2g}}{C_d A_0 \sqrt{2g}} = \frac{C_2}{C_1} \quad (10)$$

سپس، با در نظر گرفتن رابطه $\frac{L_N}{h} = \frac{C_2}{C_1}$ ، معادله روزنه اصلاح‌شده (رابطه (۴)) می‌تواند به‌صورت زیر بازنویسی شود:

$$q_{m0} = C_1 \left(h^{0.5} + \frac{L_N}{h} \cdot h^{1.5} \right) \quad (11)$$

$$q_{m0} = (1 + L_N)C_1 h^{0.5} \quad (12)$$

رابطه (۱۲) به نحوی تنظیم‌شده است که یک‌ترم اصلاحی

شبکه اختصاص می‌دهند. برای رفع این مشکل، مطالعه حاضر رویکردی اصلاح‌شده برای آزمون مرحله‌ای فشار ارائه می‌دهد. این رویکرد، بدون نیاز به داده‌های نقطه مشخصی، مانند نقطه میانگین ناحیه (AZP)، پیشنهاد می‌کند که فشار قبل و بعد از شیرهای فشارشکن (PRVs) کاملاً در دسترس است و همچنین فشار در یک گره از شبکه (ترجیحاً در انتهای شبکه) جمع‌آوری شود. این اصلاح، به همراه واسنجی شبیه‌سازی بر اساس داده‌های مشاهده‌شده و به هدف هماهنگ‌سازی وضعیت سیستم با داده‌های دقیق، به فشار و جریان در هر گره کمک می‌کند. پس از این واسنجی، هر گره حداقل یک مجموعه داده از مقادیر فشار و جریان خواهد داشت که به تسهیل مدل‌سازی نشت از طریق معادلات توان نشت و معادلات روزنه اصلاح‌شده می‌انجامد. مراحل به شرح زیر است:

♦ مرحله صفر: دریافت جفت داده‌های (q_1, h_1) و (q_2, h_2) در طول آزمون مرحله‌ای فشار.

♦ مرحله ۱: استخراج «معادله توان نشت» که شامل محاسبه توان نشت (N_1) با استفاده از رابطه (۶) و اعمال آن بر جفت داده‌های به دست آمده است. ضریب نشت نیز با استفاده از رابطه (۲) برای همین جفت داده‌ها تعیین می‌شود. این مرحله با عنوان "LP-Eq" شناخته می‌شود.

♦ مرحله ۲: در این مرحله، معادله روزنه اصلاح‌شده نشت به‌طور مفصل‌تر توضیح داده می‌شود. اگر معادله روزنه اصلاح‌شده به این صورت بیان شود:

$$\begin{aligned} q_{m0} &= C_1 h^{0.5} + C_2 h^{1.5} \\ C_1 &= C_d A_0 \sqrt{2g} \end{aligned} \quad (7)$$

$$C_2 = C_d m \sqrt{2g}$$

سپس، ضرایب نشت C_1 و C_2 ، که متناظر با جفت داده‌های (q_1, h_1) و (q_2, h_2) هستند، می‌توانند از طریق ماتریسی که به‌صورت زیر است، استخراج شوند:

این شیرها قادرند فشار بالای ورودی و نوسانات آن را به صورت خودکار به یک فشار خروجی ثابت تبدیل کنند. به کارگیری شیرهای فشارشکن علاوه بر تسهیل در بهره برداری از خطوط انتقال و شبکه های توزیع، هزینه های بالای مرتبط با خرید زمین و احداث مخازن فشارشکن را نیز حذف می کند. همان طور که پیش تر اشاره شد، کاهش فشار اضافی در شبکه از طریق این شیرها می تواند به طور قابل توجهی از هدررفت آب جلوگیری کند. لازم به ذکر است که شیرهای فشارشکن به دو شیوه کنترل می شوند: یا به صورت دستی از طریق محرک های هیدرولیکی، و یا به صورت از راه دور با استفاده از سامانه های ارتباطی برخط. در هر دو روش، تنظیم دقیق نقاط کنترلی اهمیت بالایی دارد تا اطمینان حاصل شود که فشار خدماتی مورد نیاز در نقاط بحرانی شبکه در تمامی ساعات روز تامین گردد. در این قسمت از پژوهش، برای کاهش فشار مجاز، از الگوریتم پیشنهادی (Price et al., 2022) که از اختلاف فشار در گره بحرانی و حداقل فشار مورد نیاز سرویس (خدمات) استفاده شده است.

$$P_{allowable}^{e,t} = P_{minimum}^{e,t} - P_{service} \forall t \in T \quad (14)$$

$$PRV_{setpoint}^{e,t} = P_{allowable}^{e,t} - P_{service} \forall t \in T \quad (15)$$

جایی که کاهش فشار مجاز در پایین دست شیر فشارشکن در مرحله زمانی 't' (متر آب) $P_{allowable}^{e,t}$ ؛ حداقل فشار در پایین دست شیر فشارشکن در مرحله زمانی $P_{minimum}^{e,t}$ ؛ حداقل فشار مورد نیاز سرویس (متر آب) $P_{service}$ (با توجه به شرایط ایران، معمولاً فشار آب باید تا حداکثر چهار طبقه مستقیماً از شبکه تامین شود. در ساختمان های بلندتر، به منظور تامین فشار مناسب آب، استفاده از تأسیسات داخلی ضروری است. از این رو، با توجه به تعداد طبقات، حداقل فشار مورد نیاز معمولاً در حدود ۱۴ متر ستون آب برآورد می شود). فشار در گره انتهایی لوله متصل در پایین دست شیر فشارشکن در مرحله زمانی $P_{allowable}^{e,t}$.

وابسته به فشار، که با $(1 + L_N)$ نمایش داده می شود، برای انعکاس تغییرات در سطح نشت در نظر گرفته شود. با این حال، به دلایل زیر امکان اعمال این روش در رابطه (۱۲) وجود ندارد: در رابطه (۱۱)، مقدار $\frac{L_N}{h} = \frac{C_2}{C_1}$ باید در شرایط پایدار ثابت باقی بماند؛ زیرا هر گره با یک مقدار ثابت از توان نشت (N_1) مشخص می شود. مقدار توان نشت (N_1) ثابت است، مگر این که در وضعیت فیزیکی نشت گره مدنظر تغییراتی رخ دهد. طبق رابطه (۵)، مقدار L_N نیز ثابت باقی می ماند، به این معنی که مقدار h در نسبت $\frac{L_N}{h}$ نیز باید ثابت باشد. اما اگر از فرض ثابت بودن فاصله بگیریم، به یک مدل ساده شده می رسیم که در رابطه (۱۲) نشان داده شده است، در این رابطه فشار h در ترم $\frac{L_N}{h}$ به عنوان یک متغیر دینامیکی در نظر گرفته می شود و در نتیجه $\frac{L_N}{h}$ به یک مقدار متغیر تبدیل می شود، نه ثابت. بنابراین، رابطه (۱۱) باید شامل دو مجهول باشد: نسبت $\frac{L_N}{h}$ و ضریب C_1 . اما با استفاده از نقاط داده قادر به ایجاد ماتریسی مشابه با رابطه (۸) برای یافتن مجهولات هستیم. به این ترتیب، با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) می توانیم C_1 را محاسبه و نتیجه گیری کنیم:

$$\frac{L_N}{h} = \frac{C_2}{C_1} = \frac{h_1^{0.5} q_2 - h_2^{0.5} q_1}{h_2^{1.5} q_1 - h_1^{1.5} q_2} = \frac{h_1^{0.5} \left(\frac{q_2}{q_1}\right) - h_2^{0.5}}{h_2^{1.5} - h_1^{1.5} \left(\frac{q_2}{q_1}\right)} \quad (13)$$

رابطه (۱۳) نشان می دهد با ثابت بودن مقدار L_N ، مقدار h بر اساس شدت جریان نشت و فشار متناظر در هر گره در طول آزمون مرحله ای فشار تعیین و در نتیجه یک مقدار ثابت برای هر گره حاصل می شود. برای تحلیل عددی، رابطه (۱۲) به عنوان "LMO-LN-Eq" شناخته می شود.

۲-۲- مدیریت فشار با محوریت تنظیم شیرهای فشارشکن (PRV)

هدف اصلی از مدیریت فشار در شبکه های توزیع آب، کاهش میزان نشت و حفظ حداقل فشار مورد نیاز در تمام نقاط شبکه است، استفاده از شیرهای فشارشکن به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر و بلندمدت در این زمینه شناخته می شود.

L_1 و L_2 به ترتیب نشت کل شبکه در گام اول و دوم از آزمون مرحله‌ای فشار است. در نتیجه ضرایب A و B در رابطه (۱۶) به صورت روابط (۱۹) و (۲۰) مشتق می‌شود.

$$B = \left(\frac{L_1}{P_1^{0.5}} - \frac{L_2}{P_2^{0.5}} \right) / (P_1 - P_2) \quad (19)$$

$$A = \left(\frac{L_1}{P_1^{0.5}} - B \times P_1 \right) \quad (20)$$

۲-۴- منطقه مورد مطالعه

بخش مجزا یا ایزوله (DMAK) در ناحیه I_1 از شبکه توزیع آب کلان‌شهر مشهد برای بررسی روش پیشنهادی انتخاب شد (شکل ۱). این ناحیه، به دلیل داشتن زیرساخت‌های جدیدتر، کمترین میزان نشت‌های گزارش‌شده و گزارش‌نشده را دارد. جریان ورودی، با هدف تسهیل ارزیابی از DMAK از شبکه بزرگ‌تر، توسط یک مخزن مجازی تنظیم شده است. این تغییر، شبیه‌سازی و تحلیل دقیقی از خصوصیات فیزیکی DMAK را فراهم می‌آورد. در نتیجه یک شیر فشارشکن (PRV) به دنبال مخزن مجازی نصب شده است. در DMAK آب به صورت ثقلی برای ۱۰۶۸ اشتراک [۱۷۰± خانه] فراهم می‌شود. همچنین متوسط مصرف شبانه مجاز مشترکان تقریباً ۳/۱ لیتر/اشتراک/ساعت [3.1×1068/3600 = 0.92 L/s] بین ساعت ۲:۰۰ تا ۳:۰۰ بامداد و ۲/۱۸ لیتر/اشتراک/ساعت [2.18×1068/3600 = 0.64 L/s] بین ساعت ۳:۰۰ تا ۴:۰۰ صبح است (Yousefi-Khoshqalb et. al. 2021). در جدول ۱ مشخصات پس از واسنجی مربوط به مدل DMAK ارائه شده است. داده‌های مورد استفاده از طریق سیستم قرائت از راه دور ثبت شده‌اند. در مرحله بعدی پژوهش، آزمون مرحله‌ای فشار به منظور ارزیابی عملکرد DMAK بین ساعت ۰۱:۰۰ تا ۰۴:۰۰ بامداد در تاریخ ۱۴۰۱/۰۱/۲۲ تحت شرایط مختلف اجرا شد. در این پژوهش، هدف این آزمون بررسی تاثیر تغییر فشار در سه فاز مختلف، از ۳۵ به ۳۰ متر، از ۳۰ به ۲۵ متر و در آخر از ۲۵ تا ۱۵ متر با استفاده از شیر فشارشکن (PRV) بود. در این فرآیند نظارت مستمر بر هر دو فشار بالادست و پایین دست شیر فشارشکن در ارتباط با شدت

۲-۳- عدم نیاز به AZP برای محاسبه نشت کل شبکه

بر اساس تحقیقات شوالر و همکارانش، رابطه بین سطح نشت و بار فشار خطی فرض می‌شود. یکی از جنبه‌های مهم فرض مزبور این است که سطح کل نشت یک سیستم، با نشت‌های زیاد، رابطه خطی بین سطح نشت و بار فشار را نشان می‌دهد (Schwaller et. al. 2015)؛ به این معنی که رابطه روزنه اصلاح‌شده (۴) ممکن است به طور برابر برای یک سیستم (یا لوله) با نشت منفرد یا چندگانه اعمال شود. همان‌طور که در بخش تخمین نشت گرهی بیان شد، در نظر گرفتن نقطه میانگین ناحیه برای محاسبه نشت به این صورت است که نشت فقط در نقطه میانگین ناحیه اتفاق افتاده است و از طرفی حتی در کارهای اجرایی یافتن نقطه میانگین ناحیه (AZP) با محدودیت‌های همراه است. بنابراین اپراتورها و متخصصان شبکه توزیع آب به دنبال راهکاری برای محاسبه نشت کل شبکه، بدون یافتن نقطه میانگین ناحیه، هستند. به این صورت که با اطلاعات هر گره، نظیر فشار گرهی، بتوان نشت کل شبکه را تخمین زد و ارزیابی کرد (با کمک روش آزمون مرحله‌ای فشار، حداقل جریان شبانه و مصارف شبانه). برای رسیدن به این هدف در این بخش از پژوهش، با استفاده از رابطه روزنه اصلاح‌شده (۴) راهکاری بیان خواهد شد که رابطه آن به صورت رابطه (۱۶) تعریف می‌شود:

$$L = AAZP^{0.5} + B AZP^{1.5} \quad (16)$$

جمله اول بیانگر شدت جریان در سطح اولیه نشت است، در حالی که جمله دوم به شدت جریان نشت در سطح متغیر اشاره دارد. با استفاده از زوج مقادیر L_1, P_1 و L_2, P_2 در آزمون مرحله‌ای فشار می‌توان هم‌زمان از معادلات (۱۷) و (۱۸) استفاده کرد.

$$L_1 = A \times P_1^{0.5} + B \times P_1^{1.5} \quad (17)$$

$$L_2 = A \times P_2^{0.5} + B \times P_2^{1.5} \quad (18)$$

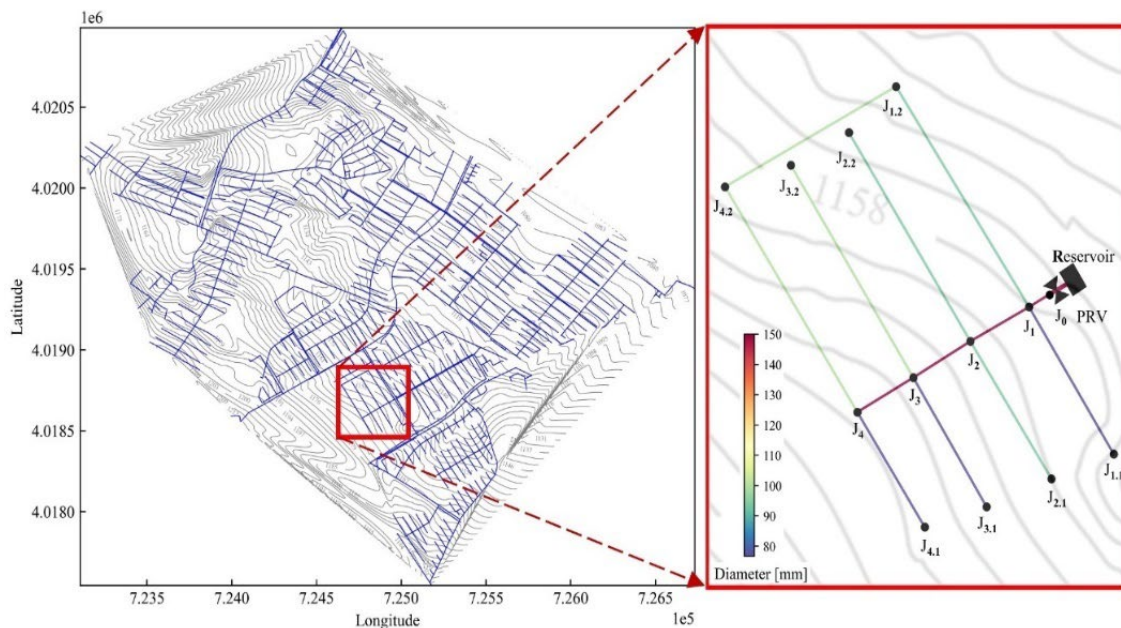


Fig. 1 Schematic of the decentralized network DMAK

شکل ۱ طرحواره شبکه غیرمتمرکز DMAK

جدول ۱ خصوصیات شبکه غیرمتمرکز DMAK پس از واسنجی (Pourahari et al., 2024)

Table 1 Post-calibration characteristics of the decentralized network DMAK

| Node Name | Elevation [m] | Base Demand [L/s] | Pattern | Pipe Name | Length [m] | Diameter [mm] | Roughness |
|-----------|---------------|-------------------|------------------------|--------------|------------|---------------|-----------|
| PRV | 1156.09 | 0 | | PRV to J0 | 2.85E+00 | 150 | 120 |
| J0 | 1156.71 | 4.84E-03 | Fig. 2 | J0 to J1 | 3.35E+01 | 150 | 111 |
| J1 | 1157.22 | 7.74E-02 | Fig. 2 | J1 to J1.1 | 1.54E+02 | 77 | 126 |
| J1.1 | 1152.97 | 1.11E-02 | Fig. 2 | J1 to J1.2 | 2.34E+02 | 94 | 129 |
| J1.2 | 1151.77 | 2.10E-01 | Fig. 2 | J1 to J2 | 6.22E+01 | 150 | 119 |
| J2 | 1162.54 | 1.87E-01 | Fig. 2 | J2 to J2.1 | 1.45E+02 | 94 | 119 |
| J2.1 | 1160.83 | 1.28E-01 | Fig. 2 | J2 to J2.2 | 2.19E+02 | 94 | 117 |
| J2.2 | 1153.76 | 1.38E-01 | Fig. 2 | J2 to J3 | 6.18E+01 | 150 | 122 |
| J3 | 1165.68 | 2.13E-01 | Fig. 2 | J3 to J3.1 | 1.35E+02 | 77 | 129 |
| J3.1 | 1164.77 | 6.93E-03 | Fig. 2 | J3 to J3.2 | 2.23E+02 | 100 | 127 |
| J3.2 | 1157.00 | 3.12E-01 | Fig. 2 | J3 to J4 | 6.02E+01 | 150 | 115 |
| J4 | 1170.04 | 1.86E+00 | Fig. 2 | J4 to J4.1 | 1.21E+02 | 77 | 132 |
| J4.1 | 1169.35 | 8.45E-02 | Fig. 2 | J4 to J4.2 | 2.37E+02 | 100 | 127 |
| J4.2 | 1160.97 | 2.99E-01 | Fig. 2 | J4.2 to J1.2 | 1.81E+02 | 100 | 116 |
| Reservoir | 1199.38 | | Fig. 2 | | | | |

۱۴۰۱/۰۱/۲۳ جمع آوری شده است.

جریان ورودی DMAK ضروری است.

۳- نتایج و بحث

در مدل واسنجی شده تقاضای هر گره با لحاظ کردن نشت (مطابق شکل ۳-ا) و همچنین فشار (مطابق شکل ۳-ب)

داده‌ها هر ۳۰ ثانیه در یک بازه زمانی ۲۴ ساعته گردآوری شدند تا در مورد پویایی شبکه تحت فشارهای متفاوت اطمینان حاصل شود. علاوه بر این، داده‌های مربوط به ساعاتی خارج از دوره زمان آزمون مرحله‌ای فشار در تاریخ

محاسبه می‌شود و می‌توان معادله نشت را برای هر گره

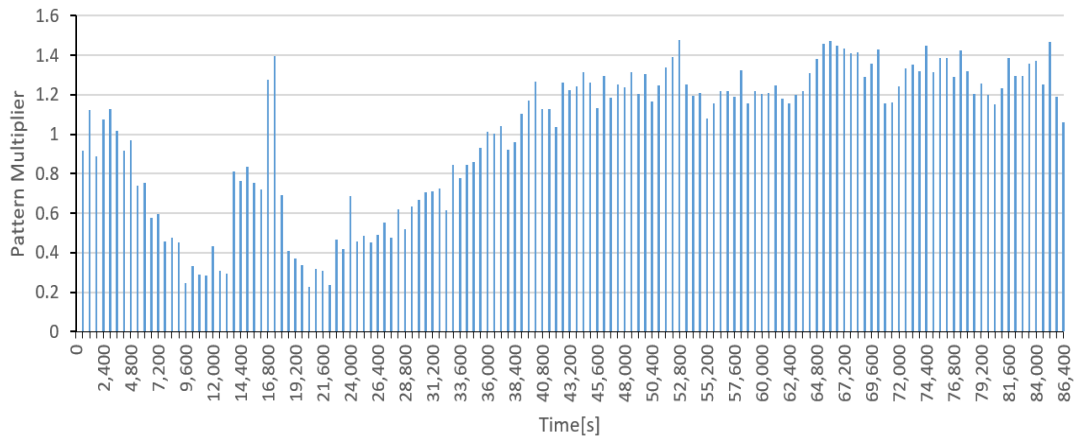


Fig. 2 Demand pattern coefficient of the decentralized network DMAK

شکل ۲ ضرایب الگوی مصرف شبکه غیرمتمرکز DMAK

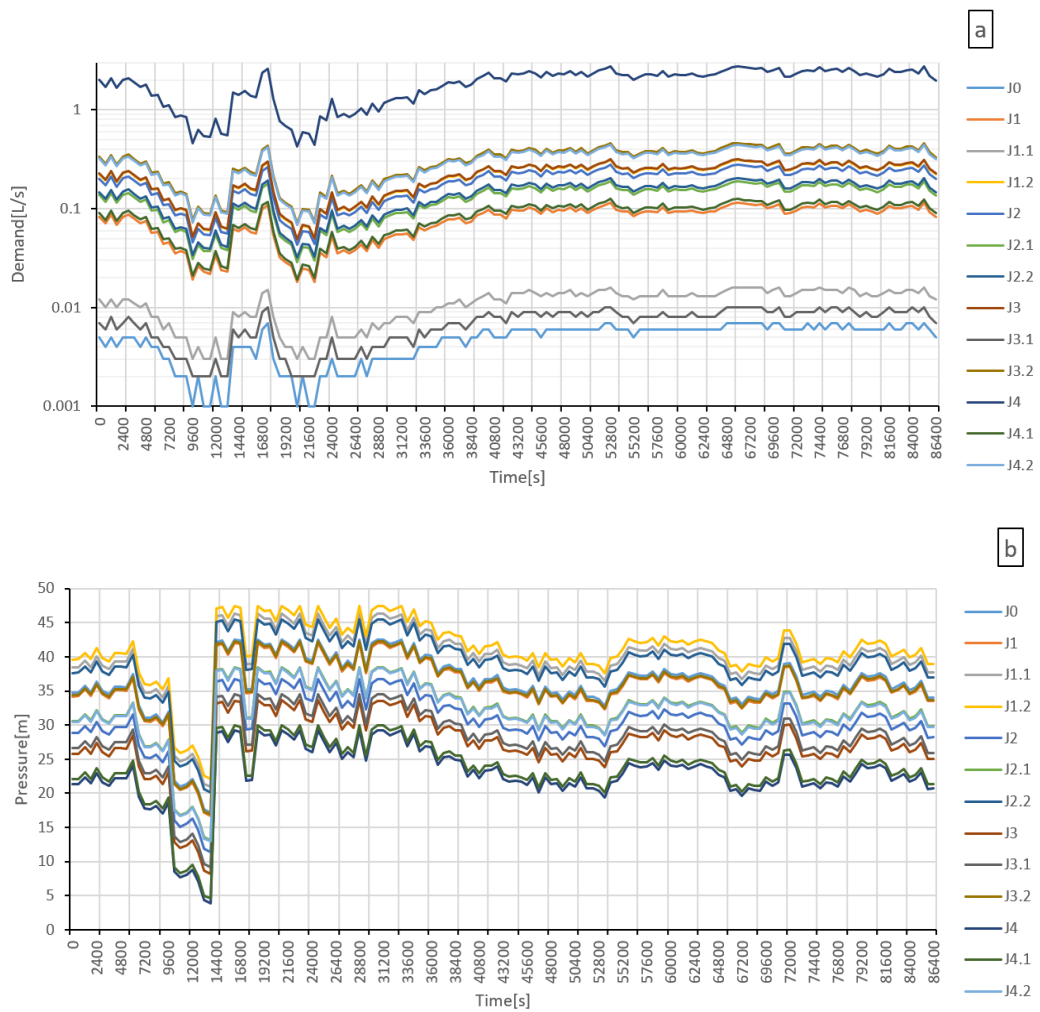


Fig. 3 Post-Calibration computations at DMAK Nodes: time series of (a) demand [L/s]; (b) pressure [L/s].

شکل ۳ تحلیل پس از واسنجی در گره های DMAK: تغییرات زمانی (a) تقاضا (لیتر بر ثانیه)؛ (b) فشار (متر)

دامنه بین چارکی (IQR) باریک و عدم وجود نقاط پرت (outliers) نمایان می شود و دقت بالای مدل LP-Eq را برای این گره نشان می دهد. در مقابل، گره J4 با دامنه بین چارکی بزرگتر و بدون نقاط دورافتاده، بیشترین انحراف از مدل LMO-Eq را نشان می دهد. این یافته ها نشان می دهند که اگرچه مدل LP-Eq معمولاً نتایج قابل اعتمادی تولید می کند، محدودیت هایی در دقت پیش بینی خود برای گره J4 دارد. با این حال، نبود نقاط پرت و اندازه کم خطاها برای تمام گره ها نشان می دهد که پیش بینی های مدل در مجموع قابل قبول هستند. [شکل ۴-ب](#) خطای مدل LMO-LN-Eq را، در مقایسه با مدل LMO-Eq، نمایش می دهد. خطاهای مدل LMO-LN-Eq بیشتر از روش LP-Eq است و نقاط دورافتاده برای همه گره ها وجود دارد که نشان دهنده سازگاری کمتر با مدل LMO-Eq است. با این وجود، گره J2 کمترین خطا را نشان می دهد و نقاط دورافتاده موجود در [شکل ۴-ب](#) به اندازه ای نیستند که تحلیل را به شدت تحت تاثیر قرار دهند. [شکل ۴-ب](#) دقت مدل LMO-LN-Eq را برای این گره تایید می کند. در مقابل، دامنه بین چارکی بزرگ برای گره J4 آن را به عنوان یک ناهنجاری با اختلافات قابل توجه از مدل LMO-Eq تایید می کند. علت دامنه بین چارکی بزرگ این است که تغییرات یا پراکندگی خطاهای مدل برای گره J4 نسبت به سایر گره ها زیاد است که نشان دهنده نوسانات بیشتر در دقت پیش بینی های مدل برای این گره است. این موضوع ممکن است بیانگر این امر باشد که مدل نتوانسته برای این گره خاص پیش بینی های دقیقی انجام دهد و داده ها به صورت پراکنده تر و ناپایدارتر توزیع شده اند.

می کند. علاوه بر این، نشت کلی در تاریخ ۱۴۰۱/۰۱/۲۳، ۶۲/۲ مترمکعب در روز (۲۰/۲ درصد از جریان ورودی) اندازه گیری شد. در همین حال مدل های LMO-LN-Eq و LP-Eq نشت را به ترتیب حدود ۶۸/۲ و ۶۳/۳۴ مترمکعب در روز پیش بینی کردند که به ترتیب ۱۰ و ۵ درصد بیشتر از تخمین مدل LMO-Eq بود. این اختلافات نشان دهنده دقت متغیر مدل ها در شرایط فشار مختلف است. بنابراین،

استخراج کرد. برای این منظور، تحلیل روی دو مرحله پایانی آزمون مرحله ای فشار متمرکز شده است که به دلیل وجود تغییرات فشار مشابه در دوره های زمانی ثابت انتخاب شده اند: مرحله اول از ساعت ۰۱:۵۰ تا ۰۲:۳۰ بامداد و مرحله دوم از ساعت ۰۲:۵۰ تا ۰۳:۳۰ بامداد. در این بازه های زمانی، حجم نشت هر گره از طریق تفاوت بین تقاضای گرهی و مصرف شبانه (LNC) محاسبه می شود. همچنین باید اشاره کرد، در حالی که مقدار متوسط مصرف شبانه (LNC) برای کل (DMA) (به صورت لیتر/اشتراک/ساعت) مشخص شده است، مصرف شبانه مربوط به هر گره مستقیماً اندازه گیری نشده است. با این حال، با فرض الگوی تقاضای یکنواخت در تمام گره ها، می توان مصرف شبانه هر گره را به صورت نسبی محاسبه کرد. این کار با مقیاس بندی مقدار مصرف شبانه برای کل (DMA) بر اساس تقاضای پایه هر گره انجام می شود. مقادیر تخمینی مصرف شبانه و نشت هر گره در هر مرحله در [جدول ۲](#) آورده شده است.

در این بخش از پژوهش، داده های فشار و نشت از هر گره در دو مرحله از آزمون مرحله ای فشار برداشت شد تا معادله توان نشت (LP-Eq) و معادلات مربوط به روزنه اصلاح شده (LMO-LN-Eq، LMO-Eq) برای مدل سازی نشت استخراج شود. پارامترهای این مدل ها برای هر گره به صورت کامل در [جدول ۲](#) فهرست شده اند. با استفاده از این پارامترها، معادلات مدل نشت برای هر گره به دست آمده است. [شکل ۴-ا](#) توزیع خطای مدل LP-Eq را، در مقایسه با مدل LMO-Eq، به صورت نمودار جعبه ای نمایش می دهد. با بررسی این [شکل](#)، گره J3.1 کمترین خطا را دارد که با

با استفاده از مدل LMO-Eq برای تعیین نرخ واقعی نشت در هر گره، می توان نشت کلی DMA را تخمین زد. نشت کلی مدل شده در ۱۴۰۱/۰۱/۲۲، ۶۰/۱۷، ۱۴۰۱/۰۱/۲۳ و ۶۵/۵ درصد از جریان ورودی) بود. اما مدل های LMO-LN-Eq و LP-Eq نشت را به ترتیب ۶ درصد (معادل ۶۵/۹ مترمکعب در روز) و ۳ درصد (معادل ۶۲/۰۵ مترمکعب در روز) بیشتر تخمین زدند که نادرستی این مدل ها را برجسته

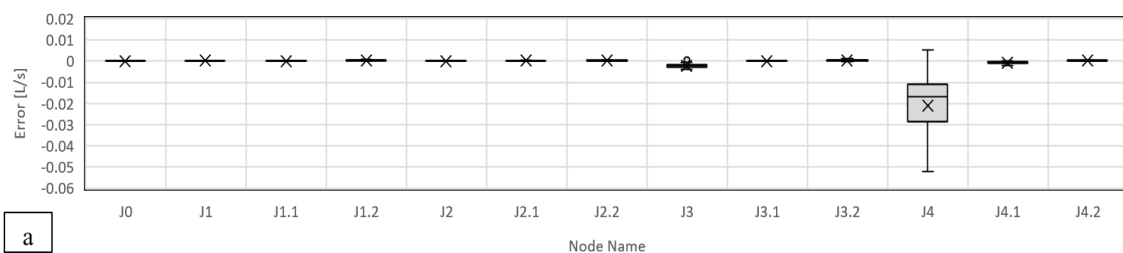
روزانه نیازهای حداقل ۴۱۵ نفر را تامین کند. صرفه‌جویی در این حجم از آب می‌تواند به کاهش چالش‌های کمبود

شدت جریان نشت ۶۲/۲ مترمکعب در روز در DMAK، بر اساس مصرف روزانه ۱۵۰ لیتر برای هر نفر، می‌توانست

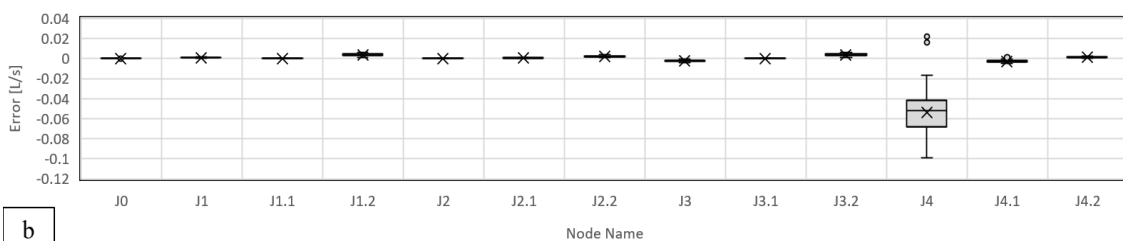
جدول ۲ تحلیل و مدل‌سازی نشت با بهره‌گیری از معادلات توان اصلاح‌شده

Table 2 Leakage analysis and modeling using modified orifice and power equations

| Node Name | Step | Pressure (m) | Demand (10^3 L/s) | LNC (10^4 L/s) | Leakage $\times 10^{-4}$ | Average Leakage $\times 10^{-4}$ | LP-Eq | | LMO-LN-Eq | | LMO-Eq | |
|-----------|------|--------------|----------------------|-------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | | | | | | N1 $\times 10^{-3}$ | C $\times 10^{-5}$ | LN $\times 10^{-3}$ | C1 $\times 10^{-4}$ | C1 $\times 10^{-4}$ | C2 $\times 10^{-7}$ |
| J0 | 1 | 31.16 | 2.15 | 12.5 | 9.04 | 7.95 | 654 | 9.53 | 182 | 1.34 | 1.32 | 9.49 |
| | 2 | 20.47 | 1.56 | 8.77 | 6.87 | | | | | | | |
| J1 | 1 | 30.64 | 34.4 | 200 | 145 | 127 | 641 | 161 | 164 | 21.9 | 21.7 | 143 |
| | 2 | 19.95 | 25.0 | 140 | 110 | | | | | | | |
| J1.1 | 1 | 34.88 | 4.92 | 28.5 | 20.7 | 18.2 | 751 | 14.4 | 335 | 2.53 | 2.50 | 28.8 |
| | 2 | 24.19 | 3.58 | 20.1 | 15.7 | | | | | | | |
| J1.2 | 1 | 36.07 | 93.6 | 542 | 393 | 346 | 782 | 238 | 393 | 45.2 | 44.6 | 579 |
| | 2 | 25.38 | 68.0 | 382 | 299 | | | | | | | |
| J2 | 1 | 25.33 | 83.4 | 483 | 350 | 308 | 502 | 692 | 2.00 | 69.5 | 69.5 | 5.91 |
| | 2 | 14.65 | 60.6 | 340 | 266 | | | | | | | |
| J2.1 | 1 | 27.03 | 56.9 | 330 | 239 | 210 | 546 | 394 | 48.2 | 43.5 | 43.3 | 99.2 |
| | 2 | 16.35 | 41.3 | 232 | 182 | | | | | | | |
| J2.2 | 1 | 34.09 | 61.3 | 355 | 257 | 227 | 731 | 195 | 300 | 32.8 | 32.4 | 343 |
| | 2 | 23.4 | 44.5 | 250 | 196 | | | | | | | |
| J3 | 1 | 22.19 | 9.48 | 550 | 398 | 351 | 418 | 1090 | -75.8 | 93.7 | 94.2 | -435 |
| | 2 | 11.51 | 68.9 | 387 | 303 | | | | | | | |
| J3.1 | 1 | 23.1 | 3.08 | 17.9 | 13.0 | 11.4 | 443 | 32.3 | -53.9 | 2.91 | 2.91 | -9.13 |
| | 2 | 12.42 | 2.24 | 12.6 | 9.84 | | | | | | | |
| J3.2 | 1 | 30.85 | 139 | 803 | 582 | 512 | 647 | 634 | 172 | 87.1 | 86.6 | 593 |
| | 2 | 20.17 | 101 | 565 | 442 | | | | | | | |
| J4 | 1 | 17.84 | 826 | 4790 | 3470 | 3060 | 301 | 14600 | -166 | 1070 | 1100 | -15400 |
| | 2 | 7.15 | 601 | 3370 | 2640 | | | | | | | |
| J4.1 | 1 | 18.53 | 37.6 | 218 | 158 | 139 | 320 | 621 | -153 | 46.3 | 47.4 | -576 |
| | 2 | 7.84 | 27.3 | 153 | 120 | | | | | | | |
| J4.2 | 1 | 26.89 | 133 | 770 | 558 | 491 | 543 | 935 | 44.9 | 102 | 102 | 216 |
| | 2 | 16.21 | 96.6 | 542 | 424 | | | | | | | |



a



b

Fig. 4 comparative error analysis between a) LP-Eq and LMO-Eq, and b) LMO-LN-Eq and LMO-Eq

شکل ۴ تجزیه و تحلیل خطای مقایسه‌ای بین (a) LP-Eq و LMO-Eq، و (b) LMO-LN-Eq و LMO-Eq.

جدول ۲ استخراج شده‌اند. علاوه بر این، مقادیر L_1 و L_2 به‌عنوان نشت کلی ناحیه، از مجموع نشت گره‌ها محاسبه شده است. **جدول ۳** بخشی از نتایج **جدول ۲** برای زیر ناحیه DMAK از ناحیه ۱ شبکه توزیع آب مشهد است.

نتایج **جدول ۳** نشان می‌دهد که با به‌کارگیری ضرایب A و B در هر گره می‌توان نشت کل شبکه را تخمین زد. بنابراین، تنها نقطه میانگین ناحیه AZP نیست که قادر به تخمین نشت است؛ بلکه با داشتن مقادیر فشار در دو مرحله از آزمون مرحله‌ای فشار نیز می‌توان به نشت کلی شبکه دست یافت. به‌علاوه، در صورتی که برای محاسبه توان نشت (N_1) هر گره به‌جای استفاده از مقدار نشت گرهی، از نشت کلی ناحیه استفاده شود، نتایج به‌دست‌آمده برای توان نشت تفاوتی نخواهد داشت و یکسان خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، مدلی برای تخمین نشت گرهی در شبکه توزیع آب غیرمتمرکز (DMAK) توسعه یافته است. این مدل برخلاف روش‌های قبلی که به فشار در نقطه میانگین ناحیه (AZP) و معادله توان نشت تکیه داشتند، از داده‌های

آب در منطقه کمک کند. مطابق با داده‌های گردآوری‌شده در تاریخ ۱۴۰۱/۰۱/۲۲ و نتایج به دست آمده از مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی ایپانت و با توجه به روابط (۱۴) و (۱۵)، حداقل فشار در پایین‌دست شیر فشارشکن در گره J4 در زمان ۲۰:۳۰ برابر با ۱۸/۱۲ متر آب است. همچنین، حداقل فشار سرویس برابر با ۱۴ متر در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که فشار گره انتهایی لوله متصل به پایین‌دست شیر فشارشکن در گره J0 برابر با ۳۱/۵ متر می‌باشد. بنابراین، با توجه به تغییرات فشار در شیر فشارشکن در تاریخ ۱۴۰۱/۰۱/۲۲، این مقدار در تمامی گام‌های زمانی حدود ۲۷ درصد کاهش خواهد یافت. طبق مدل LMO-Eq و مقادیر موجود در **جدول ۲** و پس از کاهش فشار مجاز طبق الگوریتم پیشنهادی (Price et al., 2022)، شدت جریان نشت روزانه، بر اساس **شکل ۵** از ۶۰/۱۷ مترمکعب در روز، به ۵۱/۵۴ مترمکعب در روز کاهش یافته است که این مقدار تقریباً معادل ۱۴ درصد می‌باشد.

در بخش عدم نیاز به AZP برای محاسبه نشت کل شبکه، داده‌های مربوط به ناحیه مجزا (DMAK) مورد تحلیل قرار گرفته است. مقادیر فشار و توان نشت هر گره مستقیماً از

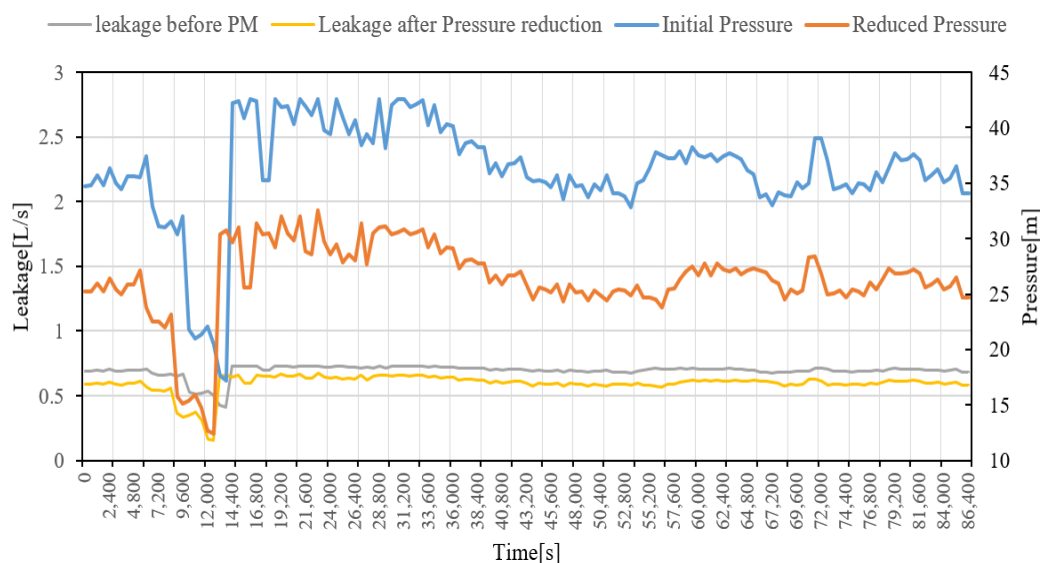


Fig. 5 Variations in pressure and leakage flow rate following pressure management in the decentralized DMAK network on 11 April 2022

شکل ۵ تغییرات فشار و شدت جریان نشت پس از اعمال مدیریت فشار در شبکه غیرمتمرکز DMAK در تاریخ ۱۴۰۱/۰۱/۲۲

جدول ۳ تخمین نشت کلی شبکه غیرمتمرکز DMAK بر اساس مشخصات هر گره

Table 3 Estimation of total leakage in the decentralized DMAK network based on individual node characteristics

| Node Name | Step | Pressure (m) | N1 $\times 10^{-3}$ | L1 (L/s) | L2 (/s) | B $\times 10^{-5}$ | A $\times 10^{-2}$ | N1 $\times 10^{-3}$ |
|-----------|------|--------------|---------------------|----------|---------|--------------------|--------------------|---------------------|
| J0 | 1 | 31.16 | 654 | 0.66 | 0.5011 | 69.264 | 9.65797 | 654 |
| | 2 | 20.47 | | | | | | |
| J1 | 1 | 30.64 | 641 | | | | | |
| | 2 | 19.95 | | | | | | |
| J1.1 | 1 | 34.88 | 751 | | | | | |
| | 2 | 24.19 | | | | | | |
| J1.2 | 1 | 36.07 | 782 | | | | | |
| | 2 | 25.38 | | | | | | |
| J2 | 1 | 25.33 | 502 | | | | | |
| | 2 | 14.65 | | | | | | |
| J2.1 | 1 | 27.03 | 546 | | | | | |
| | 2 | 16.35 | | | | | | |
| J2.2 | 1 | 34.09 | 731 | | | | | |
| | 2 | 23.4 | | | | | | |
| J3 | 1 | 22.19 | 418 | | | | | |
| | 2 | 11.51 | | | | | | |
| J3.1 | 1 | 23.1 | 443 | | | | | |
| | 2 | 12.42 | | | | | | |
| J3.2 | 1 | 30.85 | 647 | | | | | |
| | 2 | 20.17 | | | | | | |
| J4 | 1 | 17.84 | 301 | | | | | |
| | 2 | 7.15 | | | | | | |
| J4.1 | 1 | 18.53 | 320 | | | | | |
| | 2 | 7.84 | | | | | | |
| J4.2 | 1 | 26.89 | 543 | | | | | |
| | 2 | 16.21 | | | | | | |

یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که برآورد نشت به صورت گرهی باعث ارتقای دقت در ارزیابی هدررفت آب شده است و به مدیریت پایدار منابع آبی کمک می‌کند. بنابراین، این روش، رویکردی دقیق برای مدیریت نشت در شبکه‌های توزیع آب غیرمتمرکز ارائه می‌کند.

فشار گرهی و ضرایب ساده‌شده FAVAD بهره می‌گیرد و به این ترتیب بدون نیاز به فشار در نقطه میانگین ناحیه (AZP)، میزان نشت کلی شبکه را برآورد می‌کند. همچنین به‌منظور تایید صحت مدل و کاهش نشت، مدیریت فشار از طریق شیرهای فشارشکن (PRV) مورد استفاده قرار گرفت.

5- List of symbols

| | |
|-------------------------|------------------------------------|
| q_o (Lit/s) | Leakage flowrate |
| C_d | Discharging coefficient |
| A (mm ²) | Orifice area |
| g | Acceleration due to gravity |
| h (mH ₂ O) | Head differential over the orifice |
| q_p (Lit/s) | Leakage flowrate |
| N_1 | Leakage exponent |

| | |
|---|--|
| A_0 (mm ²) | Initial leak area when the head differential is zero |
| m | Head-area slope |
| L_N | Leakage number |
| PRV | pressure reducing valve |
| AZP | Average zone point |
| MNF | minimum night flow |
| LNC | legitimate night consumption |
| $P_{allowable}^{e,t}$ (mH ₂ O) | allowable pressure reduction downstream from pipe 'e' at time step 't' |

| | |
|----------------------------|--|
| $P_{minimum}^{e,t}$ (mH2O) | minimum downstream pressure from pipe 'e' at time step 't' |
| $P_{service}$ (mH2O) | minimum service pressure |
| $PRV_{setpoint}^{e,t}$ | PRV pressure setting |

Acknowledgments

This research was conducted with the full cooperation of the authors.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization (A.P.); Methodology (A.P.); Software (A.P.); Formal analysis (A.P.); Data analysis (A.P.); Writing-Original Draft (R.A. and A.P.); Writing Review and Editing (R.A. and A.P.); Supervision (R.A.);

Funding

This research has not received any financial support.

Data Availability Statement

Data will be made available on request.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- Al-Washali, T., Sharma, S., Lupoja, R., Fadhl, A. N., Haidera, M., & Kennedy, M. (2020). Assessment of water losses in distribution networks: Methods, applications, uncertainties, and implications in intermittent supply. *Resources, Conservation and Recycling*, 152, Article104515.
- Ashraf, S., AghaKouchak, A., Nazemi, A., Mirchi, A., Sadegh, M., Mofstakhari, H.R., Hassanzadeh, E., Miao, C.Y., Madani, K., Mousavi Baygi, M. and Anjileli, H. (2019). Compounding effects of human activities and climatic changes on surface water availability in Iran. *Climatic Change*, 152(3), 379–391.
- AWWA. (2016). *Water audits and loss control programs*. American water works association. Fourth ed. Denver.
- Bakhtawar, B., & Zayed, T. (2021). Review of Water Leak Detection and Localization Methods through Hydrophone Technology. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 12(4), 03121002.
- Cassa, A. M., & Van Zyl, J. E. (2013). Predicting the head-leakage slope of cracks in pipes subject to elastic deformations. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 62(4), 214–223.
- Cassa, A. M., Van Zyl, J. E., & Laubscher, R. F. (2010). A numerical investigation into the effect of pressure on holes and cracks in water supply pipes. *Urban Water Journal*, 7(2), 109–120.
- Creaco, E., & Pezzinga, G. (2018). Comparison of algorithms for the optimal location of control valves for leakage reduction in WDNs. *Water*, 10(4), 466.
- De Marchis, M., Fontanazza, C. M., Freni, G., Notaro, V., and Puleo, V. (2016). “Experimental evidence of leaks in elastic pipes.” *Water Resources Management*, 30(6), 2005–2019.
- Dini, M., Abbaspoor, G., & Saghebhan, S. A. (2023). Calibration of water distribution networks by considering the uncertainty of nodal pressure. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 8(3), 13–24.
- Fanner, P V, R Strum, J Thornton, R Liemberger, S E Davis, and Tanya Hoogerwerf. 2007. *Leakage Management Technologies*. American Water Works Association. Awwa Research Foundation, 380p
- Fox, S., Collins, R., and Boxall, J. (2016a). Experimental study exploring the interaction of structural and leakage dynamics. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Fox, S., Collins, R., and Boxall, J. (2016b). Physical investigation into the significance of ground conditions on dynamic leakage behavior. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 65(2) 103–115.
- Ghamkhar, H., Jalili Ghazizadeh, M., Mohajeri, S. H., Moslehi, I., & Yousefi-Khoshqalb, E. (2023). An unsupervised method to exploit low-resolution water meter data for detecting end-users with abnormal consumption: Employing the DBSCAN and time series complexity. *Sustainable Cities and Society*, 94, 104516.
- Greyvenstein, B., and van Zyl, J. E. (2007). An experimental investigation into the pressure-leakage relationship of some failed water pipes. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 56(2), 117–124.
- Gupta, A., & Kulat, K. D. (2018). A Selective Literature Review on Leak Management Techniques for Water Distribution System. *Water Resources Management*, 32(10), 3247-3269.
- Kabaasha, A. M., Piller, O., & Van Zyl, J. E. (2018). Incorporating the Modified Orifice Equation into

- Pipe Network Solvers for More Realistic Leakage Modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(2), 04017064.
- Kabaasha, A. M., Van Zyl, J. E., & Mahinthakumar, G. (2020). Correcting Power Leakage Equation for Improved Leakage Modeling and Detection. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(3), 06020001.
- Kammoun, M., Kammoun, A., & Abid, M. (2022). Leak Detection Methods in Water Distribution Networks: A Comparative Survey on Artificial Intelligence Applications. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 13(3), 04022024.
- Lambert, A., Fantozzi, M., 2010. Recent developments in pressure management. In: *Proceedings of the IWA International Specialized Conference on Leakage 2010*. IWA, Hague, the Netherlands.
- May, J. H. (1994). Pressure dependent leakage. *World Water and Environmental Engineering*, Water Environment Federation, Washington DC.
- Monsef, H., Naghashzadegan, M., Farmani, R., & Jamali, A. (2018). Pressure management in water distribution systems in order to reduce energy consumption and background leakage. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 67(4), 397–403.
- Özerol, G., Dolman, N., Bormann, H., Bressers, H., Lulofs, K., & Böge, M. (2020). Urban water management and climate change adaptation: A self-assessment study by seven midsize cities in the North Sea Region. *Sustainable Cities and Society*, 55, 102066.
- Pourahari, A., Amini, R., & Yousefi-Khoshqalb, E. (2024). Advancing nodal leakage estimation in decentralized water networks: Integrating Bayesian optimization, realistic hydraulic modeling, and data-driven approaches. *Sustainable Cities and Society*, 112, 105612.
- Price, E., Ostfeld, A., 2022. A graph theory-based layout algorithm for PRVs placement and setpoint determination in water distribution systems. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 148, 04022005.
- Price, E., Abhijith, G. R., & Ostfeld, A. (2022). Pressure management in water distribution systems through PRVs optimal placement and settings. *Water Research*, 226, 119236.
- Romero-Ben, L., Alves, D., Blesa, J., Cembrano, G., Puig, V., & Duviella, E. (2023). Leak detection and localization in water distribution networks: Review and perspective. *Annual Reviews in Control*, S1367578823000160.
- Saemian, Peyman, Mohammad J. Tourian, Amir AghaKouchak, Kaveh Madani, and Nico Sneeuw. 2022. "How Much Water Did Iran Lose over the Last Two Decades?" *Journal of Hydrology: Regional Studies* 41 (June): 101095.
- Schwaller, Julie, and Jakobus E. Van Zyl. 2015. "Modeling the Pressure-Leakage Response of Water Distribution Systems Based on Individual Leak Behavior." *Journal of Hydraulic Engineering* 141 (5): 04014089.
- Van Zyl, J. E., and Cassa, A. M. (2014). Modeling elastically deforming leaks in water distribution pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Van Zyl, J. E., and Clayton, C. R. I. (2007). The effect of pressure on leakage in water distribution systems. *Water Management*, 160(2), 109-114.
- Van Zyl, J. E., Lambert, A. O., & Collins, R. (2017). Realistic Modeling of Leakage and Intrusion Flows through Leak Openings in Pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(9), 04017030.
- Vicente, D.J., Garrote, L., S'anchez, R., Santill'an, D., 2016. Pressure management in water distribution systems: current status, proposals, and future trends. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 142, 04015061
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000589](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000589).
- Wan, X., Kuhanestani, P. K., Farmani, R., & Keedwell, E. (2022). Literature Review of Data Analytics for Leak Detection in Water Distribution Networks: A Focus on Pressure and Flow Smart Sensors. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(10), 03122002.
- Yousefi-Khoshqalb, E., Jalili Ghazizadeh, M. R., Masoumnezhad, A., Komeily, M., Mohtasham, M., & Moslehi, I. (2021, December). *Per capita residential night consumption assessment*. In 3rd National Conference on Water Consumption Management, Loss Reduction, and Reuse (pp. 1–10). University of Tehran, Iran. Iran Water & Wastewater Association (IWWA). (In Persian)
- Yousefi-Khoshqalb, E., Nikoo, M. R., & Gandomi, A. H. (2023). Optimal deployment of sensors for leakage detection in water distribution systems using metaheuristics. In *Comprehensive Metaheuristics* (pp. 269–291). Academic Press