Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 10, No. 4, PP. 63-73, Winter 2025
DOI: 10.22112/jwwse.2025.508184.1446

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال دهم، شماره ۴، صفحات ۶۳-۷۳، زمستان ۱۴۰۴

Research Paper

Economic and Technical Analysis of Leakage Reduction in Birjand Urban Water Distribution Network

Navid Gholampoor[1], Pooya Mohammadi[2], Fereshteh Modaresi[2*] and Hossein Ansari[3]

1- PhD Student of Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
2- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
3- Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
*Corresponding author: Email: fmodaresi@um.ac.ir

Received: 03/03/2025
Revised: 19/05/2025
Accepted: 17/08/2025
© IWWA

Abstract

Water leakage in distribution networks is one of the main challenges in urban water resource management, which leads to financial loss, water waste, and reduced system efficiency. This study aims to analyze the economic and technical leakage in the water distribution network of Zone D of Birjand city and provide practical solutions for leakage management. In this study, hydraulic modeling with WaterGEMS software was used to simulate the network and analyze hydraulic parameters; flow rate, pressure, and geographical map data were collected and the network model was calibrated. The assessment showed an ILI index of 12, which reflects the serious leakage situation in the existing network, and for this reason, five different pressure management scenarios were examined to reduce leakage. The results showed that excessive pressure was the main cause of leakage in Zone D, and targeted pressure reduction in the S4 scenario resulted in a reduction of 14.90 lit/sec of leakage, equivalent to a daily volume reduction of 1287.360 m^3 and economic savings of 1.241 billion rials per year. The findings indicate that investing in smart pressure management and renovation of worn-out infrastructure, in addition to improving economic efficiency, also reduces environmental damage caused by water waste.

Keywords: Water Waste, Modeling, Pressure Management, WaterGEMS, ILI.

مقاله پژوهشی

تحلیل اقتصادی و فنی کاهش نشت در شبکه توزیع آب شهری بیرجند

نوید غلام‌پور[۱]، پویا محمدی[۱]، فرشته مدرسی[۲*] و حسین انصاری[۳]

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
۳- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
*نویسنده مسئول، ایمیل: fmodaresi@um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۶
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

نشت آب در شبکه‌های توزیع، یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت منابع آب شهری است که منجربه اتلاف مالی، هدررفت آب و کاهش کارایی سیستم‌ها می‌شود. این پژوهش با هدف تحلیل اقتصادی و فنی نشت در شبکه توزیع آب زون D شهر بیرجند و ارائه راهکارهای عملی برای مدیریت نشت انجام شده است. در این مطالعه، از مدل‌سازی هیدرولیکی با نرم‌افزار WaterGEMS برای شبیه‌سازی شبکه و تحلیل پارامترهای هیدرولیکی استفاده شده است؛ داده‌های دبی، فشار و نقشه‌های جغرافیایی جمع‌آوری و مدل شبکه کالیبره شده است. ارزیابی انجام‌شده، شاخص ILI برابر با ۱۲ را نشان می‌دهد که وضعیت وخیم نشت در شبکه موجود را منعکس می‌کند. به‌همین دلیل، پنج سناریوی مختلف مدیریت فشار برای کاهش نشت بررسی شده‌اند. نتایج نشان داد که فشار بیش از حد، عامل اصلی نشت در زون D است و کاهش هدفمند فشار در سناریوی S4 منجر به کاهش ۱۴/۹۰ لیتر بر ثانیه نشت، معادل کاهش حجم روزانه ۱۲۸۷/۳۶۰ مترمکعب و صرفه‌جویی اقتصادی ۱/۲۴۱ میلیارد ریال در سال شده است. یافته‌ها حاکی از آن است که سرمایه‌گذاری در مدیریت هوشمند فشار و نوسازی زیرساخت‌های فرسوده، علاوه بر بهبود بهره‌وری اقتصادی، خسارات زیست‌محیطی ناشی از هدررفت آب را نیز کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی: هدررفت آب، مدل‌سازی، مدیریت فشار، WaterGEMS، ILI.

۱- مقدمه

آب یکی از منابع حیاتی و اساسی برای زندگی بشری است که نقش مهمی در توسعه پایدار، سلامت و رفاه جوامع ایفا می‌کند. با افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی، تقاضا برای آب شیرین درحال افزایش است و در کنار آن، تغییرات اقلیمی و کمبود منابع آبی، بحران‌های قابل‌توجهی را در مدیریت منابع آب ایجاد کرده است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در این زمینه، هدررفت آب در شبکه‌های توزیع است. هدررفت آب در کشورهای درحال‌توسعه به‌دلیل عواملی چون افزایش مهاجرت به مناطق شهری، مدیریت ضعیف زیرساخت‌ها، نشت آب و مصرف غیرمجاز به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است (Adedeji et al., 2017).

حجم سالانه هدررفت آب (WL)[1] در سراسر جهان حدود ۱۲۶ میلیارد مترمکعب تخمین زده شده که سالانه حدود ۳۹ میلیارد دلار هزینه دارد (Liemberger and Wyatt, 2019). کاهش کامل هدررفت آب از نظر فنی و اقتصادی، غیرممکن است. بنابراین باید اجزای مختلف هدررفت آب به‌طور دقیق ارزیابی شده و برای کاهش آن‌ها اولویت‌بندی صورت‌گیرد. در مدیریت نشت، چهار عامل اساسی مدیریت فشار (PM)[2]، سرعت و کیفیت تعمیرات، کنترل فعال نشت (ALC)[3] و نوسازی لوله‌ها و تأسیسات شبکه مطرح می‌شود (Lambert, 2002).

نشت آب در شبکه‌های توزیع می‌تواند خسارات اقتصادی زیادی به‌ویژه در انتقال آب و هزینه‌های تعمیرات به‌همراه داشته باشد. در برخی شبکه‌ها، نشت ممکن است تا ۳۰٪ از کل آب استخراج‌شده را تشکیل‌دهد (Adedeji et al., 2017). در این راستا، کاهش نشت آب باید براساس تحلیل اقتصادی صورت‌گیرد تا تعادلی بین هزینه‌های نهایی آب ذخیره‌شده و هزینه‌های کاهش نشت برقرار شود (Farley and Trow, 2003). تحلیل اقتصادی نشت در شبکه‌های توزیع شامل ارزیابی هزینه‌های کنترل نشت، تصفیه و توزیع آب و توسعه منابع جدید آب است (مصلحی و همکاران، ۱۳۹۹).

یکی از مهم‌ترین اقدامات برای کاهش نشت، کنترل فشار شبکه است که می‌تواند با کاهش نشت و بهبود کارایی شبکه‌های توزیع همراه باشد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که تغییرات فشار می‌تواند موجب آسیب به شبکه و افزایش خرابی‌ها شود (Lambert, 2001). در کشورهای توسعه‌یافته مانند انگلستان و ژاپن، مدیریت پیشگیرانه فشار از اهمیت بالایی برخوردار است (Force and Thornton, 2003)؛ اما در کشورهای درحال‌توسعه این روش به‌دلیل عدم دقت در اندازه‌گیری فشار، کم‌تر استفاده می‌شود.

مطالعات انجام‌شده در مناطق مختلف نشان می‌دهد که با مدیریت صحیح فشار، کاهش چشم‌گیری در نشت و هدررفت آب مشاهده شده است. به‌عنوان مثال، در شهر کایلیتشا آفریقای جنوبی، مدیریت فشار موجب کاهش نشت از ۷۵٪ به ۳۰٪ شد و درنتیجه، ۹ میلیون مترمکعب آب ذخیره‌سازی شد (Mckenzie and Wegelin, 2009). علاوه‌براین، در شهر بانکوک، کنترل نشت باعث کاهش هزینه‌ها به‌میزان ۰/۰۱۵ دلار آمریکا به‌ازای هر مترمکعب آب شده است (Islam and Babel, 2013).

مدیریت فشار و تحلیل اقتصادی نشت در برخی دیگر از مطالعات نیز موردتوجه قرارگرفته است. در مطالعه‌ای در ناپل ایتالیا، طراحی مدل هیدرولیکی برای شبکه توزیع آب نشان‌داد که موقعیت بهینه سنسورها می‌تواند دقت کالیبراسیون مدل‌ها را افزایش‌دهد (Di Nardo et al., 2018). هم‌چنین، در شیلی، مدل‌سازی نشان داد که مدیریت صحیح فشار و نشت می‌تواند به بهبود هزینه‌ها و کارایی شبکه منجر شود (Molinos et al. 2021).

در ایران نیز، مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است. برای مثال، در شهر ایلام، با استفاده از مدل تحلیل هیدرولیکی، نشت در گره‌ها و لوله‌های شبکه به‌طور دقیق محاسبه‌شد (اسدیانی‌یکتا و تابش، ۱۳۸۹). هم‌چنین، در شهر یزد، مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب به‌شکل دقیقی وضعیت موجود را شبیه‌سازی کرده است (صدرالساداتی و قدیانی، ۱۳۸۸).

مطالعات داخلی و خارجی نشان می‌دهند که تلاش‌های زیادی برای بهینه‌سازی تشخیص و کنترل نشت آب در شبکه‌های توزیع آب صورت‌گرفته است. این مطالعات نشان می‌دهند که بهترین روش کاهش نشت، یافتن تعادل اقتصادی بین هزینه‌های ذخیره‌سازی آب و هزینه‌های کاهش نشت است و این امر با توجه به وضعیت شبکه‌ها و منابع موجود میسر خواهد شد.

هدف اصلی این پژوهش‌ها، بهبود مدیریت مصرف آب و کاهش هدررفت در راستای تعادل اقتصادی است. در این راستا، تحلیل و مدل‌سازی شبکه‌های توزیع آب، به‌ویژه در مناطق خشک، به‌عنوان ابزاری برای بهینه‌سازی مصرف و کاهش نشت استفاده می‌شود. در این زمینه، تحلیل اقتصادی نشت و کنترل فشار به‌خصوص در شهرهایی مانند بیرجند، به‌ویژه زون فشاری D که با کمبود منابع آبی و فرسودگی شبکه مواجه هستند، اهمیت زیادی دارد. این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار WaterGEMS شبکه توزیع آب بیرجند را مدل‌سازی کرده و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده، فرآیند کالیبراسیون انجام و درنهایت، ارزیابی میزان نشت و کاهش آن با استفاده از

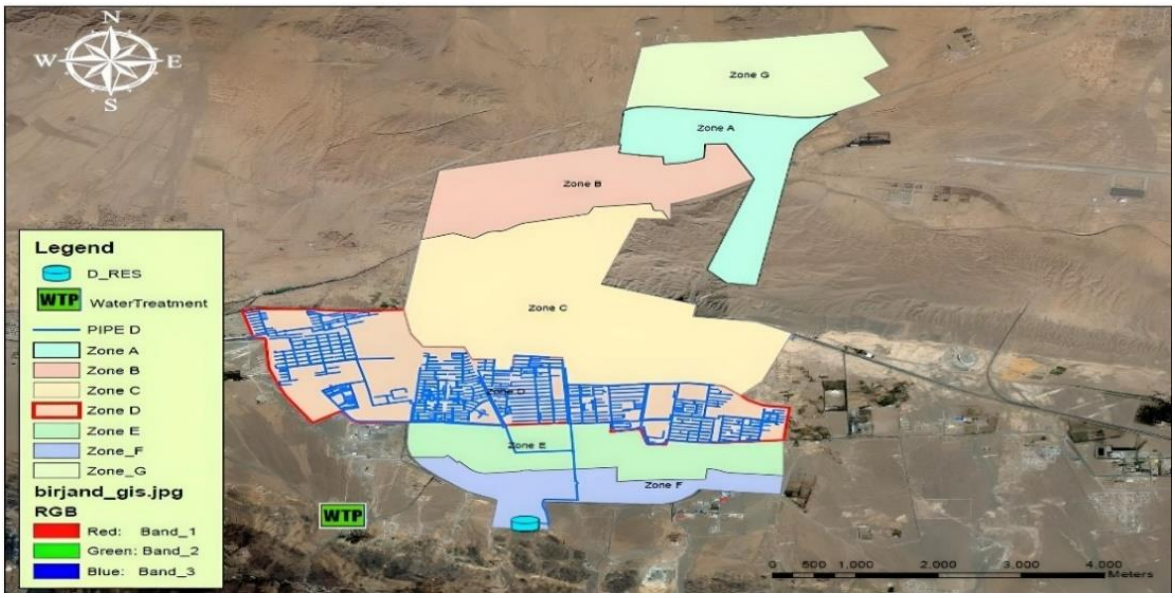
شاخص‌های فنی و اقتصادی در این منطقه بررسی شده است.

۲- مواد و روش

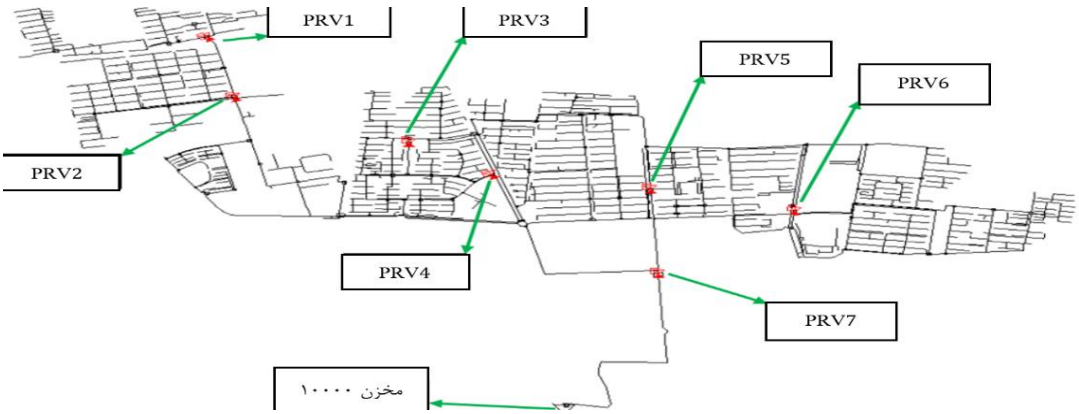
۲-۱- معرفی منطقه مورد پژوهش

شبکه توزیع آب شهر بیرجند دارای ۷ پهنه بهره‌برداری است. در حال‌حاضر آب موردنیاز مردم از طریق ۷ مخزن که در بلندترین نقاط ارتفاعی هر پهنه قراردارند، به‌صورت کاملاً ثقلی تأمین می‌شود. پهنه بهره‌برداری مورد مطالعه این پژوهش زون D شبکه توزیع آب شهر بیرجند مطابق شکل ۱ است. این زون داری یک مخزن ۱۰۰۰۰ مترمکعبی در قسمت جنوبی شهر با رقوم ارتفاعی ۱۵۵۰ است که تأمین‌کننده فشار زون‌های فشاری جنوبی شهر بیرجند (E و D) به‌صورت مشترک و با خروجی‌های مجزا است. در شکل ۲ مشخصات کلی تأسیسات کنترل فشار زون مورد پژوهش نشان داده شده است.

در این پژوهش از داده‌های مصارف قرائت‌شده توسط قرائت‌کنندگان کنتور شرکت آب و فاضلاب خراسان جنوبی در دوره پنجم سال ۱۴۰۰ (آذر و دی ماه) استفاده شده است. به‌منظور جای‌گذاری اشتراک‌ها با نوع کاربری در محل واقعی خود با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS براساس موقعیت و میزان مصرف هر اشتراک انجام شده است که مصارف واقعی هر اشتراک به لوله نظیر آن اختصاص یافته تا نتایج مدل‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر باشد. در پهنه مورد پژوهش، حدود ۱۲۷۲۶۰ متر لوله موجود است که جنس تمامی لوله‌های به‌کاررفته در شبکه، آزبست (۴۶/۵٪ شبکه) و پلی‌اتیلن (۵۳/۵٪ شبکه) است. هم‌چنین با توجه به وسعت و رشد شهرسازی در سال‌های متفاوت در زون D، لوله‌های شبکه توزیع آب دارای سن متفاوتی هستند. سن لوله‌های پلی‌اتیلن در زون D از حدود سال ۱۳۷۵ آغاز و تا امروز نیز برای اصلاح و توسعه شبکه آب از آن‌ها استفاده می‌شود.



شکل ۱- پهنه‌بندی شبکه توزیع آب شهر بیرجند



شکل ۲- شماتیک محل قرارگیری شیرهای فشارشکن و مخزن موجود در پهنه D بیرجند

۲-۲- تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار (HDSM)[۴]

در شرایط بحرانی در شبکه‌های توزیع آب مثل شکست هیدرولیکی و مکانیکی سیستم و یا تقاضای بیش از حد که موجب ایجاد شرایطی فشاری متغیر می‌شود، فرض ثابت‌بودن مقدار برداشت از گره‌ها و برابری تقاضای گرهی پایدار نخواهد بود، درنتیجه برای مدل‌سازی واقعی عملکرد سیستم در شرایط بحرانی، لازم است رابطه میان فشار و خروجی گره‌ها درنظر گرفته شود. این نوع شبیه‌سازی که در آن رابطه میان دبی خروجی گره و فشار درنظر گرفته می‌شود، روش شبیه‌سازی مبتنی بر فشار نام دارد (تابش، ۱۳۹۵).

نگاه کلی در شبکه‌های توزیع آب باید به‌گونه‌ای باشد که با درنظرگرفتن جنبه‌های فنی و اقتصادی، فشار در محدوده پوشش شبکه به حداقل برسد؛ به‌طوری‌که فشار حداقل، با احتساب افت‌های ناشی از شبکه توزیع آب، لوله‌کشی داخل ساختمان و تغییرات سطح آب مخازن، در بالاترین نقطه برداشت (پشت‌بام) کم‌تر از ۰/۳ بار کاهش نیابد؛ از سوی دیگر، فشار حداقل شبکه توزیع آب برای ساختمان‌های یک‌طبقه در محل پشت کنتور برابر با ۱/۴ بار درنظر گرفته‌شده و برای هر طبقه اضافه، برای تأمین ارتفاع و جبران افت‌های لوله‌های داخلی، ۰/۴ بار به این عدد افزوده می‌شود (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۹۲). با توجه به این‌که ساختمان‌های منطقه مورد پژوهش، ازنظر تعداد طبقات حداکثر ۴ طبقه هستند، حداقل فشار ۲/۶ بار درنظر گرفته‌شده و این مقدار به‌عنوان مدل واسنجی‌شده در مدل هیدرولیکی مبتنی بر فشار اعمال شده است. هم‌چنین، براساس داده‌های ثبت‌شده توسط کنتور خروجی مخزن و بررسی صحت داده‌های سنجنده فشار به‌همراه استفاده از آخرین نقشه‌های به‌روزشده شبکه در پهنه فشاری مورد تحقیق، روز شنبه مورخ ۱۴۰۰/۰۹/۲۰ به‌عنوان روز مدل‌سازی انتخاب شده است.

۲-۳- مدل WaterGEMS

نرم‌افزار WaterGEMS به‌دلیل توانمندی‌های پیشرفته در مدل‌سازی هیدرولیکی و تحلیل شبکه‌های توزیع آب، به‌عنوان ابزار اصلی پژوهش انتخاب شده است. این نرم‌افزار با امکان شبیه‌سازی دقیق جریان، فشار، نشت و بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای کالیبراسیون داده‌ها و مدیریت فشار، دقت تحلیل را افزایش می‌دهد. از مهم‌ترین ویژگی‌های آن می‌توان به قابلیت مدل‌سازی مبتنی بر فشار اشاره کرد که در شرایط تغییرات فشار و تأثیر آن بر میزان نشت، عملکرد تحلیل را بهبود می‌بخشد. علاوه‌بر این، یکپارچه‌سازی با GIS اجازه می‌دهد نقشه‌های دقیق شبکه توزیع آب وارد مدل شده و تحلیل‌های مکانی انجام شود.

در این پژوهش، واسنجی مدل WaterGEMS ازطریق کالیبراسیون با استفاده از داده‌های دبی‌سنجی و فشارسنجی انجام شده است. هم‌چنین زون D کاملاً ایزوله بوده و تنها دارای یک ورودی آب به شبکه توزیع است که این ورودی مجهز به یک دستگاه دبی‌سنج مغناطیسی برروی لوله خروجی مخزن به قطر ۶۰۰ میلی‌متر است و امکان قرائت میزان آب ورودی در زمان‌های مشخص (هر ۱۰ دقیقه) را فراهم می‌کند. داده‌های مربوط به فشارسنجی نیز در زون D براساس اندازه‌گیری‌های انجام‌شده توسط لاگرهای فشار آنلاین شبکه توزیع و فشارهای ورودی دو شیر فشارشکن (PRV2 و PRV7) که ازطریق سیستم تله‌متری ثبت می‌شوند، درنظر گرفته‌شده است. در شکل ۳ نقاط مربوط به فشارسنجی و دبی‌سنجی نمایش داده شده‌اند.

باتوجه‌به محیط نرم‌افزار، برای استفاده از الگوریتم ژنتیک در فرآیند بهینه‌یابی، از تابع حداقل مجموع مربعات خطاها، به‌منظور انجام عمل کالیبراسیون در نرم‌افزار استفاده شده که این تابع به‌صورت رابطه (۱) است.

$$Z = MIN \frac{\sum_{np=1}^{NP} W_{np} \left(\frac{H_{s,np} - H_{o,np}}{H_{o,np}}\right)^2 + \sum_{nf=1}^{NF} W_{nf} \left(\frac{Q_{s,nf} - Q_{o,nf}}{Q_{o,nf}}\right)^2}{NP + NF} \quad (۱)$$

که W_{nf} و W_{np}: ضریب وزنی برای پارامترهای دبی و فشار، $H_{s,np}$ و $H_{o,np}$: هد هیدرولیکی شبیه‌سازی و میدانی برای گره np، $Q_{s,nf}$ و $Q_{o,np}$: دبی شبیه‌سازی و میدانی در لوله nf، NP و NF: به‌ترتیب تعداد فشارها و دبی‌های اندازه‌گیری میدانی در شبکه توزیع هستند. هم‌چنین در نرم‌افزار برای ضرایب وزنی، الگوریتم خطی با توجه به مقدار صحت و اهمیت در مقادیر پارامترهای دبی و یا فشار مدنظر قرارگرفت. الگوریتم خطی به‌صورت رابطه‌های (۲) و (۳) در نرم‌افزار محاسبه می‌شود.

$$W_{np} = \frac{H_{o,np}}{\sum H_{o,np}} \quad (۲)$$

$$W_{nf} = \frac{Q_{o,nf}}{\sum Q_{o,nf}} \quad (۳)$$

شکل ۳- جانمایی نقاط اندازه‌گیری‌شده در محدوده مورد پژوهش (زون D)

۲-۴- شاخص‌های عملکرد شبکه‌های توزیع آب

برای ارزیابی و مقایسه عملکرد شبکه‌های توزیع آب با یکدیگر و برای تعیین یک هدف اقتصادی به‌منظور سرمایه‌گذاری در زمینه کاهش نشت از شاخص‌های عملکرد استفاده می‌شود (Lambert et al., 1999). شاخص نشت زیرساخت (ILI)[۵] یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین شاخص عملکرد شبکه‌های توزیع آب است که در آن ارزیابی کاملی از وضعیت شبکه توزیع آب را نشان می‌دهد. شاخص عملکرد زیرساخت براساس روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شود (Cavazzini et al., 2020):

$$NRW = \frac{SIV - BW}{SIV} \times 100 \qquad (۴)$$

که NRW[۶]: آب بدون درآمد (٪)، SIV[۷]: حجم ورودی سیستم و BW[۸]: مصرف مشترکین مجاز دارای قبض است.

$$ILI = \frac{CARL}{UARL} \qquad (۵)$$

که ILI: کیفیت مدیریت نشت را توصیف می‌کند که در آن $CARL$[۹]: نشت موجود سالانه و $UARL$[۱۰]: نشت سالانه اجتناب‌ناپذیر است. میزان نشت موجود سالانه براساس رابطه نشت و فشار محاسبه می‌شود. هم‌چنین نشت سالانه اجتناب‌ناپذیر براساس رابطه (۶) به‌دست می‌آید.

$$UARL = \left(18 \times L_m + 0.80 \times N_C + 25 \times L_p\right) \times p \qquad (۶)$$

که $UARL$: نشت سالانه اجتناب‌ناپذیر برحسب لیتر بر روز، L_m: طول خطوط اصلی برحسب کیلومتر، N_C: تعداد مشترکین، L_p: طول لوله موجود از مرز انشعاب تا کنتور مشترک برحسب کیلـومتر و p: فشار متوسط شبکه توزیع آب برحسب متر است.

با محاسبه ILI می‌توان به این نتیجه رسید که یک شرکت تأمین‌کننده آب تا چه اندازه به‌طور مؤثر و کارآمد سطح نشت را کنترل می‌کند. میزان ILI نزدیک به ۱، نشان‌دهنده مدیریت و نگهداری خوب شبکه توزیع آب است و مقادیر غیر از ۱، براساس جدول ۱ تعریف می‌شود (AWWA, 2016).

جدول ۱- مقادیر هدف‌گذاری شاخص نشت زیرساخت (ILI) (AWWA, 2016)

بازه ILI	ملاحظات منابع آب	ملاحظات اجرایی	ملاحظات مالی
۱-۳	منابع آب موجود بسیار محدود و توسعه آن بسیار سخت و از لحاظ محیط‌زیستی ناپایدار است.	نیاز توسعه زیرساخت‌های موجود و منابع آب اضافی برای تأمین تقاضا نیاز دارد.	خرید یا توسعه منابع آب هزینه‌بر و گران است.
۳-۵	منابع آب برای تأمین نیازهای بلندمدت کافی است، اما اقدامات مربوط به مدیریت تقاضا شامل مدیریت نشت نیاز است.	توانایی زیرساخت‌های موجود برای تقاضای بلندمدت تأمین آب کافی، به‌شرط آن‌که مدیریت نشت اجرا شود.	خرید یا توسعه منابع آب با یک هزینه معقول امکان دارد.
۵-۸	منابع آب فراوان، قابل‌اعتماد و به‌راحتی قابل‌استخراج هستند.	ظرفیت بالای زیرساخت‌های تأمین آب، آن‌ها را در مقابل تأمین کمبودها تقریباً مصون می‌سازد.	هزینه خرید یا تصفیه آب پایین است.
بیش‌تر از ۸	هنگامی‌که ملاحظات مالی و اجرایی سبب شوند ILI در بلندمدت بیش از ۸ شود، چنین سطحی از نشت برای مصرف آب مؤثر نیست و هدف‌گذاری نشت در این حالت به غیر از حالتی که منجر به سطح نشت کم‌تر در درازمدت شود، بی‌تأثیر است.		
کم‌تر از ۱	دستیابی ILI کم‌تر از ۱ برای اکثر شبکه‌های توزیع آب غیرممکن است و اگر حاصل شود، کنترل سطح نشت به‌خوبی صورت‌گرفته است.		

۲-۵- رابطه نشت - فشار

برای برآورد میزان نشت در شبکه‌های توزیع آب توسط مدل‌های هیدرولیکی، لازم است رابطه میزان نشت و فشار در هر گره یا لوله مشخص شود. در این زمینه تحقیقات بسیاری صورت‌گرفته است که معادلات پیچیده‌ای براساس سن و قطر لوله‌ها و حتی تغییرشکل موقتی در اثر شکست در لوله‌ها به‌وجود آمده است. به این منظور با توجه به محدودیت داده‌های موجود در محدوده مورد پژوهش، از رابطه (۷) برای محاسبه نشت در لوله‌ها استفاده‌شد که در این رابطه فرض شده است نشت در طول لوله‌ها به‌طور یکنواخت توزیع می‌شود (Germanopoulos, 1985).

$$Q_{L,ij} = C_L \times L_{ij} \times (P_{ij}^{av})^{1.18} \quad (۷)$$

که $Q_{L,ij}$: دبی خروجی از محل نشت از هر لوله برحسب لیتر بر ثانیه، C_L: ضریب ثابت نشت که به خصوصیات شبکه توزیع آب بستگی دارد و برای هر شبکه توزیع مقدار ثابتی است. این ضریب رابطه مستقیم با جنس و عمر لوله‌های شبکه توزیع دارد که به‌وسیله آزمایش‌های میدانی به‌دست می‌آید و P_{ij}^{av}: فشار متوسط در طول لوله است که از رابطه (۸) به‌دست می‌آید.

$$P_{ij}^{av} = \frac{P_i + P_j}{2} \quad (۸)$$

که P_i و P_j: به‌ترتیب مقدار فشار آب در ابتدا و انتهای لوله بر حسب متر است.

۲-۶- شاخص اقتصادی نسبت هزینه – سود (BCR)[11]

انتخاب و اولویت‌بندی پروژه‌ها با شاخص‌های مالی و اقتصادی انجام می‌شوند. یکی از این شاخص‌ها، شاخص نسبت منافع به مخارج یا سود به هزینه است. این شاخص علاوه‌بر بررسی اقتصادی طرح‌های سرمایه‌گذاری خصوصی، یک روش کاربردی و معروف در ارزیابی طرح‌های دولتی به‌علت عام‌المنفعه بودن این طرح‌ها است. اگر طرحی دارای BCR بیش‌تر از ۱ باشد، انتظار می‌رود که طرح، ارزش فعلی خالص مثبتی را به شرکت و سرمایه‌گذاران آن ارائه دهد و اگر BCR طرح کم‌تر از ۱ باشد، هزینه‌های طرح بیش‌تر از مزایای آن است و نباید آن‌را درنظر گرفت. شاخص BCR به‌صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود (منصورخاکی و همکاران، ۱۳۹۶).

$$BCR = \frac{\sum_{n=0}^{N} \frac{B_n}{(1+r)^n}}{\sum_{n=0}^{N} \frac{C_n}{(1+r)^n}} \quad (۹)$$

که B_n و C_n: هزینه و منافع حاصل از طرح در زمان n، r: برابر نرخ بهره که در این پژوهش براساس گزارش بانک مرکزی جمهوری اسلامی در سال ۱۴۰۰ مقدار ۲۰٪ درنظر گرفته شده است، n: تعداد سال و N: سال موردنظر است. در این روش برای محاسبه هزینه‌های سرمایه‌گذاری و سود، از قیمت هر مترمکعب آب در محدوده مورد پژوهش که برابر ۱۷۰۰۰ ریال است و هم‌چنین صورت‌های مالی شرکت و فهرست‌بهاهای توزیع و نگهداری سال ۱۴۰۰ استفاده شده است. سپس با فرض ثابت‌بودن مقدار نرخ بهره به‌مدت ۲۰ سال، تا سال ۱۴۲۰ برای تمامی سناریوهای شاخص BCR محاسبه شده است.

۲-۷- سناریوهای کاهش نشت

براساس هدف مهم این پژوهش که مبحث کاهش نشت آب با اعمال تعدیل فشار در شبکه‌های توزیع بوده است و هم‌چنین وجود محدودیت‌هایی ازقبیل استفاده حداکثری از تأسیسات و لوله‌های موجود، پس از اجرای سناریوهای مختلف، درنهایت سناریوهای جدول ۲ که قابلیت اجرا در شبکه توزیع منطقه مورد پژوهش را دارا بود، درنظر گرفته‌شده است:

جدول ۲- سناریوهای درنظر گرفته‌شده برای تعدیل فشار در محدوده مطالعاتی

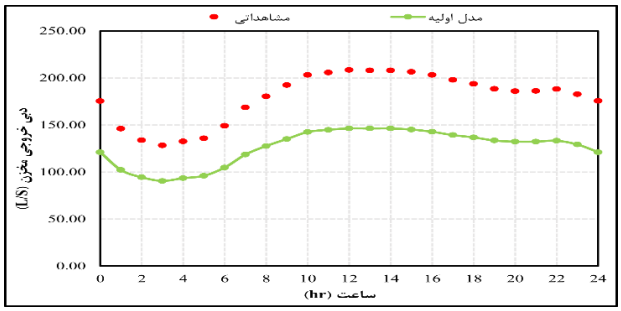
سناریو	هدف	شرح
S1	کالیبره کردن وضع موجود	بررسی وضع موجود از نظر میزان فشار و نشت آب
S2	اصلاح فشار تنظیمی خروج شیرهای فشارشکن تک‌زمانه	هوشمند کردن شیرهای فشارشکن موجود تک‌زمانه
S3	جابه‌جایی شیر فشارشکن PRV5	شیرهای فشارشکن موجود طبق حالت سناریوی S1 و تک‌زمانه
S4	جابه‌جایی شیر فشارشکن PRV5 و اضافه‌کردن یک شیر فشارشکن جدید	شیر فشارشکن جدید از نوع تک‌زمانه
S5	اضافه‌کردن دو شیر فشارشکن جدیدزمانه و حذف شیر فشارشکن PRV6	شیرهای فشارشکن جدید از نوع تک‌زمانه

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی وضع موجود شبکه توزیع آب زون D

در شکل ۴، خروجی مخزن براساس داده‌های اندازه‌گیری‌شده و مدل اولیه ساخته‌شده بدون درنظرگرفتن هدررفت در محدوده مورد پژوهش نشان‌داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف بین میزان دبی شبیه‌سازی‌شده و دبی اندازه‌گیری‌شده، نشان‌دهنده وجود عواملی چون نشتی‌های شبکه توزیع، عدم کالیبراسیون دبی‌ها و ضرایب زبری لوله‌ها است. پس از تنظیم پارامترهای نشتی و دبی، کالیبراسیون ضرایب زبری در لوله‌ها براساس قطر و جنس انجام شده است.

در شکل ۵، کالیبره دبی شبیه‌سازی‌شده خروجی مخزن (شکل ۵-الف) و کالیبره فشار در فشارسنج‌های آنلاین PL1 و PL3 (شکل‌های ۵-ب و ۵-ج)، به نمایش گذاشته‌شده است. در شکل ۵-الف، تقریباً داده‌های میدانی و مدل‌سازی‌شده خروجی مخزن هم‌پوشانی دارند که نشان‌دهنده کالیبره دقیق مدل برای دبی خروجی مخزن در محدوده مورد پژوهش است. در شکل‌های ۵-ب و ۵-ج نیز مشاهده می‌شود که داده‌های میدانی و مدل‌سازی‌شده فشار در فشارسنج‌های PL1 و PL3 در طول روز تا حدی هم‌پوشانی دارند، به‌جز در ساعات حداقل و حداکثر مصرف، که این امر احتمال وقوع رویدادهایی مانند بسته یا باز شدن یک شیر قطع و وصل در اطراف این فشارسنج‌ها برای کنترل دبی و فشار را نشان می‌دهد.



شکل ۴- جریان خروجی از مخزن برای مقادیر مشاهده‌ای و مدل اولیه

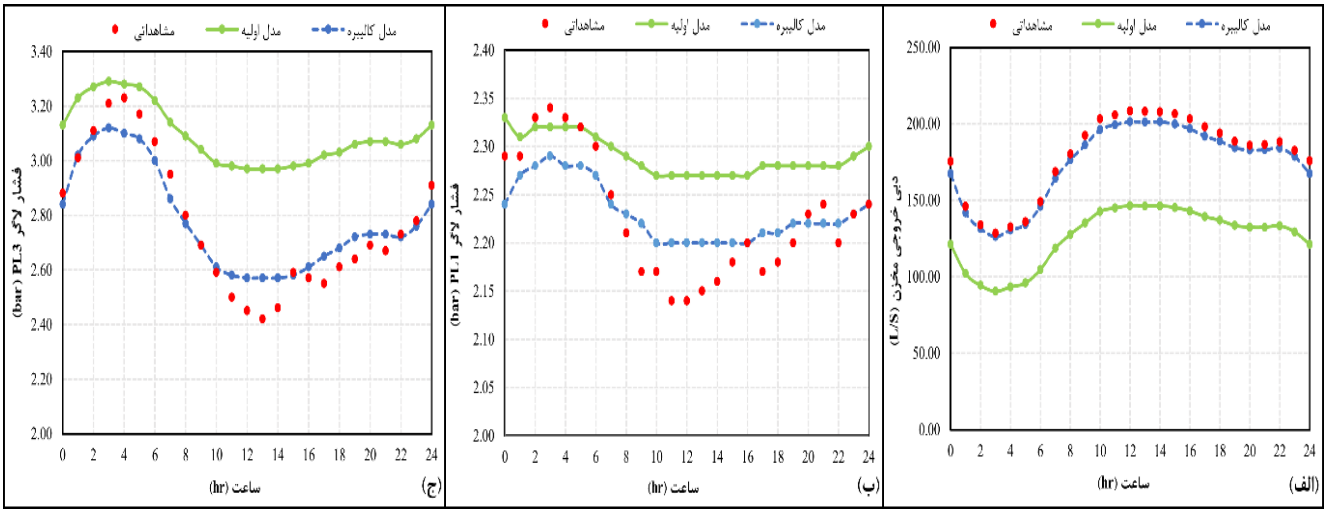
در شکل ۶، فشار ورودی دو شیر فشارشکن PRV2 و PRV7 ارائه شده است. در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود که داده‌های میدانی و مدل‌سازی‌شده ورودی شیر فشارشکن هوشمند PRV2 تقریباً هم‌پوشانی دارند که نشان‌دهنده کالیبره دقیق و بسیار بالای مدل برای این شیر هوشمند در محدوده مورد پژوهش است. در شکل ۶-ب نیز داده‌های میدانی و مدل‌سازی‌شده ورودی شیر فشارشکن هوشمند PRV7 به‌جز در ساعات حداقل مصرف، هم‌پوشانی دارند که علت آن می‌تواند تغییرات ناگهانی سطح مخزن یا اتفاقی در خط انتقال از خروجی مخزن تا ورودی این شیر باشد.

۳-۲- تغییرات فشار شبکه در سناریوهای مورد بررسی

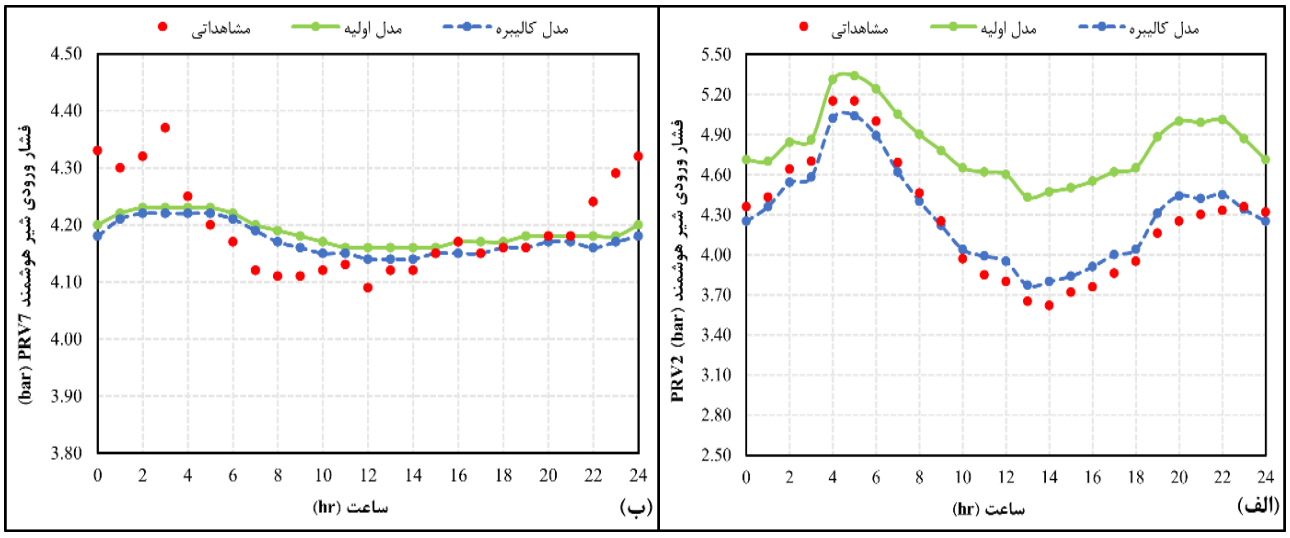
سناریوی S1 دارای خصوصیات فعلی شبکه توزیع زون D بوده و بیش‌ترین شباهت را به وضعیت موجود دارد. به‌عنوان سناریوی مرجع، در زمان حداقل مصرف، ۵۳/۴٪ از گره‌ها دارای فشار بیش از ۳ بار و از این مقدار ۱۷٪ دارای فشار بیش از ۴ بار بوده‌اند که نشان‌دهنده فشار بیش از حد موجود و نقش آن در ایجاد نشت و حوادث در شبکه است.

براساس هدف پژوهش، در سناریوی S2 با هوشمندسازی شیرها، در زمان حداقل مصرف ۴۲/۸٪ از گره‌ها، دارای فشار بیش از ۳ بار و ۱۳/۵٪ دارای فشار بیش از ۴ بار بودند که بیانگر کاهش ۱۰/۶ درصدی گره‌های دارای فشار بیش از ۳ بار نسبت به S1 است. با استفاده حداکثری از تأسیسات موجود و بررسی تأثیر شیرهای فشارشکن، در سناریوی S3 پس از جابه‌جایی شیر PRV5 و تنظیم آن بر روی فشار ۳ بار، در زمان حداقل مصرف، ۶/ ۳۴٪ از گره‌ها دارای فشار بیش از ۳ بار و ۹/۶٪ دارای فشار بیش از ۴ بار شدند و در زمان حداکثر مصرف، دیگر فشار بالای ۵ بار مشاهده نشد. این موضوع نشان می‌دهد که موقعیت اولیه شیر PRV5 مناسب نبوده و با جابه‌جایی آن می‌توان تأثیر کاهش فشار را افزایش داد.

پس از بررسی حالت‌های مختلف جابه‌جایی شیر فشارشکن و هم‌چنین پژوهش انجام‌شده توسط نصیرپور و همکاران (۱۳۹۷)، در سناریوی S4 با اضافه کردن شیر فشارشکن جدید از نوع تک‌زمانه با فشار تنظیمی ۲ بار و جابه‌جایی شیر PRV5، در زمان حداقل مصرف ۲۶/۹٪ از گره‌ها دارای فشار بیش از ۳ بار و تنها ۳/۱٪ دارای فشار بیش از ۴ بار شدند. هم‌چنین در زمان مصرف حداکثر، دیگر فشار بالای ۴/۵ بار مشاهده نشد و ۶۸/۴٪ از گره‌ها بین فشار حداقل تعریف‌شده قرارگرفتند که نشان‌دهنده کنترل مناسب فشار در منطقه است. درنهایت، در سناریوی S5 با جانمایی دو شیر فشارشکن جدید از نوع تک‌زمانه با فشار تنظیمی ۳ و ۲ بار، در زمان حداقل مصرف، ۳۱٪ از گره‌ها دارای فشار بیش از ۳ بار و ۳/۱٪ دارای فشار بیش از ۴ بار شدند. هم‌چنین در زمان مصرف حداکثر، هم‌چنان فشار بالای ۴/۵ بار مشاهده نشد؛ ولی درصد گره‌های بین فشار حداقل تعریف‌شده به ۶۵٪ کاهش یافت که نسبت به سناریوی S4 کاهش ۳/۴ درصدی دارد و نشان می‌دهد شیر PRV6 در شبکه توزیع مورد مطالعه تأثیرگذار نیست.



شکل ۵- مقایسه مقادیر مشاهداتی و مدل‌شده اولیه و کالیبره‌شده برای: الف) دبی خروجی از مخزن؛ ب) لاگر فشار PL1؛ و ج) لاگر فشار PL3



شکل ۶- مقایسه مقادیر مشاهداتی و مدل‌شده اولیه و کالیبره‌شده برای: الف) فشار ورودی به شیرهای هوشمند PRV2؛ و ب) PRV7

۳-۳- بررسی اقتصادی کاهش نشت در سناریوها

با بررسی محاسبات، شکل ۷ نشان می‌دهد که در سناریوی S2 (شکل ۷-الف)، به‌دلیل هزینه‌های هوشمندسازی شیرهای فشارشکن در ایران، در ۴ سال اول، هیچ سودی حاصل نمی‌شود و از سال چهارم به بعد سودده خواهد بود. در سناریوی S3 (شکل ۷-ب)، که تنها شامل جابه‌جایی شیر PRV5 و اجرای حوضچه با هزینه ناچیز است، با توجه به کاهش نشت و سود ناشی از آن، از همان سال اول اجرا، سودده خواهد بود. در سناریوی S4 (شکل ۷-ج)، که شامل جابه‌جایی شیر PRV5 و نصب یک شیر جدید است، زمان و هزینه‌های اجرا و بهره‌برداری نسبت به سناریوهای قبلی بیش‌تر است؛ کاهش قابل‌توجه نشت باعث می‌شود که این سناریو نیز از همان سال اول، سودده باشد. نهایتاً در سناریوی S5 (شکل ۷-د)، که شامل نصب دو شیر جدید و حذف یک شیر است و زمان و هزینه‌های اجرای آن بسیار بالاتر است، با وجود کاهش نشت کم‌تر نسبت به S4، از همان سال اول، سودده خواهد بود اما سود آن نسبت به سناریوی S4 کم‌تر است.

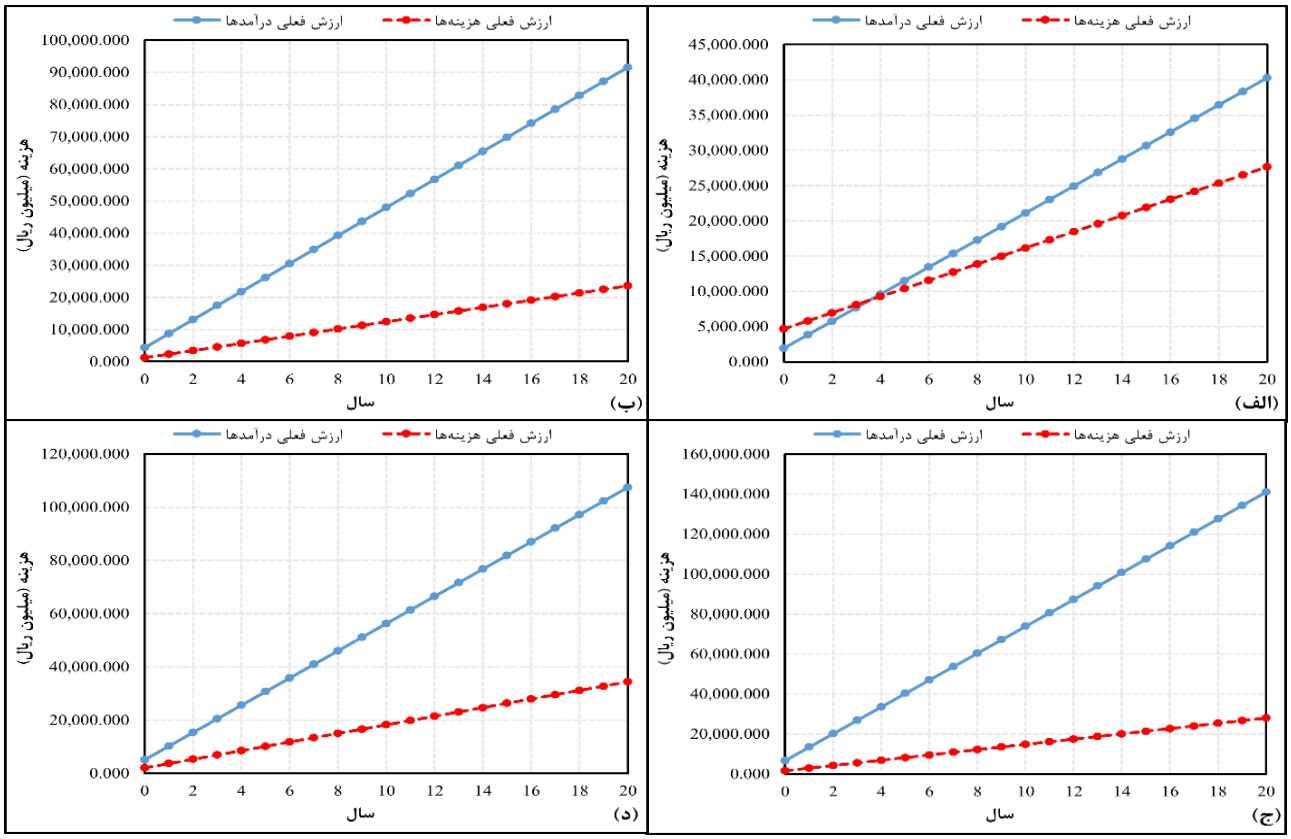
۳-۴- میزان شاخص عملکرد زیرساخت در محدوده مورد پژوهش

با توجه به توضیحات بیان‌شده و هم‌چنین نتایج به‌دست‌آمده از کالیبره مدل، شاخص آب بدون درآمد برای محدوده مورد پژوهش به‌صورت زیر محاسبه شده است:

$$NRW = \frac{208.37 - 122.05}{208.37} \times 100 = \%41.42$$

در این شاخص، مقدار ثبت‌شده از خروجی مخزن برابر ۲۰۸/۳۷ لیتر بر ثانیه و مقدار مصرف ثبت‌شده از مشترکین کل

محدوده مورد مطالعه برابر ۱۲۲/۰۵ لیتر بر ثانیه است. این شاخص به‌خوبی نشان می‌دهد مقدار هدررفت آب در محدوده مورد مطالعه به مقدار زیادی بالاتر از مقدار توصیه‌شده و بهینه ۱۵٪ است (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۹۲). هم‌چنین شاخص نشت زیرساخت با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از سناریوها، به‌صورت جدول ۳ محاسبه شده است.



شکل ۷- مقایسه شاخص اقتصادی BCR در تمامی سناریوها (به‌ترتیب از الف تا د مربوط به سناریوهای S_2، S_3، S_4 و S_5)

جدول ۳- مقایسه مقادیر شاخص نشت زیرساخت در تمامی سناریوها

سناریو	UARL (L/S)	CARL (L/S)	ILI
S_1	۵/۸۱	۶۹/۷۱	۱۲/۰۰
S_2	۵/۵۵	۶۶/۰۸	۱۱/۹۰
S_3	۵/۲۶	۶۱/۴۶	۱۱/۶۸
S_4	۴/۹۱	۵۷/۰۰	۱۱/۶۱
S_5	۵/۱۴	۶۰/۰۳	۱۱/۶۷

با توجه به جدول ۳ و مقادیر به‌دست‌آمده شاخص ILI و جدول ۱، می‌توان دریافت که اوضاع شبکه توزیع آب زون D بیرجند از نظر نشت به‌شدت وخیم است و کاهش فشار در محدوده مورد پژوهش نتوانسته تغییر زیادی در شاخص ILI داشته باشد و طبق جدول ۱ بند ۴، باید در درازمدت اقدامات مدیریتی و اجرایی برای کنترل نشت این زون انجام گیرد.

۳-۵- جمع‌بندی سناریوها

با توجه به سناریوهای درنظرگرفته‌شده و نتایج به‌دست‌آمده از هر سناریو، خلاصه نتایج کلی در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. طبق جدول ۴، مدیریت هوشمند فشار و نزدیک‌شدن به فشار حداقل مورد نیاز، در محدوده مورد پژوهش منجربه کاهش نشت آب در شبکه توزیع می‌شود که این کاهش به‌وضوح در سناریوی S4 با توجه به انتخاب بهینه مکان شیر فشارشکن، نمایان شده است. هم‌چنین این جدول نشان می‌دهد که افزودن شیرهای فشارشکن بیش‌تر، مانند سناریوی S5، لزوماً به بهبود متناسب شبکه منجر نمی‌شود.

جدول ۵ تأکید می‌کند که، هزینه سرمایه‌گذاری بالا در شبکه توزیع، همیشه موجب کاهش بیش‌تر نشت نمی‌شود و با انتخاب سناریوی مناسب می‌توان هزینه‌ها را کاهش داده و از نظر مالی به سود وکاهش نشت بیش‌تر و مدیریت بهینه اقتصادی فشار دست یافت.

جدول ۴- مقادیر نشت حداکثر و متوسط روزانه در تمامی سناریوها

سناریو	نشت حداکثر (L/S)	کاهش نشت (L/S)	متوسط نشت روزانه (L/S)	حجم روزانه کاهش نشت (m^3)
S_1	۷۴/۴۹	-	۶۹/۷۱	-
S_2	۶۸/۷۰	۵/۷۹	۶۶/۰۸	۵۰۰/۲۵۶
S_3	۶۴/۶۳	۹/۸۶	۶۱/۴۶	۸۵۱/۹۰۴
S_4	۵۹/۵۹	۱۴/۹۰	۵۷/۰۰	۱۲۸۷/۳۶۰
S_5	۶۲/۳۵	۱۲/۱۴	۶۰/۰۳	۱۰۷۱/۳۶۰

جدول ۵- مقادیر مجموع شاخص اقتصادی BCR در تمامی سناریوها در طی ۲۰ سال

سناریو	B (میلیون ریال)	C (میلیون ریال)	B/C
S_2	۴۲۲۸۹۹	۳۳۸۹۴۷	۱/۲۴۷
S_3	۱۰۰۷۴۵۵	۲۶۰۴۴۲	۳/۸۶۸
S_4	۱۵۵۱۶۱۳	۳۱۰۲۶۴	۵/۰۰۰
S_5	۱۱۸۱۸۷۹	۳۸۲۵۵۶	۳/۰۸۹

۴- نتیجه‌گیری

باتوجه‌به اهمیت موضوع نشت در شبکه‌های توزیع آب در سطح دنیا و ضرورت کنترل و مدیریت آن، این پژوهش بر روی پهنه فشاری D شهر بیرجند با استفاده از مدل‌سازی مبتنی بر فشار واقعی شبکه، پنج سناریوی اجرایی را برای کاهش نشت، مورد آزمایش قرار داد. نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌های زیرساخت شبکه نشان می‌دهد که وضعیت نشت در شبکه، وخیم بوده و نیاز فوری به اجرای اقدامات بلندمدت دارد؛ به‌طوری‌که در سناریوی S4 ، کاهش شاخص نشت زیرساخت به میزان حدود ۰/۴۰ نسبت به وضعیت موجود، اثربخشی این سناریو را به‌خوبی نشان می‌دهد. هم‌چنین، نتایج نشان می‌دهد که در شبکه توزیع موجود، ۵۳/۴٪ از گره‌ها در زمان حداقل مصرف دارای فشار بیش از ۲/۶ بار هستند که بیانگر مدیریت نادرست فشار و افزایش نشت است. در سناریوی S4 این مقدار به ۲۶/۹٪ کاهش‌یافته است. علاوه‌بر این، جابه‌جایی شیر PRV5 و اضافه‌کردن یک شیر فشارشکن جدید، به‌دلیل کاهش فشار شبکه و نزدیک شدن به فشار حداقل، به‌عنوان کاراترین سناریو (S4) شناخته‌شده است. در این سناریو با سرمایه‌گذاری ۲۷۹/۳ میلیون ریال، سود حاصل از کاهش نشت آب به ۱/۲۴۱ میلیارد ریال و اثربخشی معادل ۱۴/۹۰ لیتر بر ثانیه در ساعت حداقل مصرف و هم‌چنین کاهش حجم نشتی به میزان ۱۲۸۷/۳۶۰ مترمکعب در طول روز به‌دست آمده است؛ اگرچه ازنظر مدت‌زمان اجرا، زمان‌بر است. درنهایت، پژوهش نشان‌داد که هرگونه مدیریت کوتاه‌مدت نشت طبق سناریوهای معرفی‌شده، می‌تواند به کاهش نسبی نشت در شبکه کمک کند، اما برای دستیابی به اثرگذاری کامل، نیاز به بررسی عوامل دیگر و استفاده از الگوریتم‌های نوین برای بهینه‌سازی روش‌های کاهش نشت آب از طریق مدیریت فشار، کنترل فعال نشت، تسریع در تعمیرات و ارائه راه‌کارهای هدفمند است. هم‌چنین در بحث شاخص‌ها، شاخص مدیریت فشار (PMI)[12]، به‌عنوان معیاری برای ارزیابی بهینه‌سازی فشار شبکه‌ها در کاهش نشت شناخته می‌شود. بااین‌حال در این پژوهش، شاخص ILI به‌طور جامع عملکرد شبکه در مدیریت نشت را پوشش داده است. مطالعات آینده می‌توانند با تمرکز بر مدیریت فشار و محاسبه PMI، تحلیل‌های تکمیلی در این زمینه ارائه دهند.

۵- پی‌نوشت‌ها

1- Water Losses
2- Pressure Management
3- Active Leakage Control
4- Head Driven Simulation Method
5- Infrastructure Leakage Index
6- Non Revenue Water
7- System Input Volume
8- Billed Water
9- Current Annual Real Losses
10- Unavoidable Annual Real Losses
11- Benefit Cost Ratio
12- Pressure Management Index

۶- مراجع

اسدیانی‌یکتا، ا.، و تابش، م.، (۱۳۸۹)، "یک مدل تلفیقی جامع برای محاسبه و مدیریت نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری"، *نشریه دانشکده فنی*، ۴۴(۱)، ۱-۱۲، https://doi.org/journal.ut.ac.ir/article_20758.html.

تابش، م.، (۱۳۹۵)، *مدل‌سازی پیشرفته شبکه‌های توزیع آب*، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

صدرالساداتی، ع.، و قدیانی، م.، (۱۳۸۸)، "کالیبراسیون مدل شبکه‌های توزیع آب شهری (با مطالعه موردی شبکه توزیع آب شهر یزد)"، *سومین همایش ملی آب و فاضلاب با رویکرد اصلاح الگوی مصرف*، تهران. https://doi.org/civilica.com/doc/78329.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست‌جمهوری، (۱۳۹۲)، *ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و*

روستایی، نشریه شماره ۳-۱۱۷، بازنگری اول، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست‌جمهوری و دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا، وزارت نیرو، تهران.

منصورخاکی، ع.، موسوی، س.، و رضایی ارجرودی، ع.، (۱۳۹۶)، "محاسبه کاهش هزینه‌های عملکردی در ارزیابی اقتصادی بهسازی راه‌ها (مطالعه موردی: راه اصلی فسا-زاهدشهر)"، *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، ۴۹(۱)، ۱۶۵-۱۷۳، https://doi.org/10.22060/ceej.2016.573.

نصیرپور، ح.، نصیریان، ع.، و اکبرپور، الف.، (۱۳۹۸)، "تعیین موقعیت بهینه شیرهای فشارشکن در شبکه توزیع آب (مطالعه موردی: شبکه توزیع آب شهر بیرجند)"، *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۰(۱)، ۱۷-۳۳.

Adedeji, K.B., Hamam, Y., Abe, B.T., and Abu-Mahfouz, A.M., (2017), "Towards achieving a reliable leakage detection and localization algorithm for application in water piping networks: An overview", *IEEE Access*, 5, 20272-20285, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2752802.

American Water Work Association (AWWA), (2016), *Water audits and loss control programs: AWWA manual M-36*, Denver, 423 p.

Cavazzini, G., Pavesi, G., and Ardizzon, G., (2020), "Optimal assets management of a water distribution network for leakage minimization based on an innovative index", *Sustainable Cities and Society*, 54, 101890, https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101890.

Di Nardo, A., Di Natale, M., Di Mauro, A., Santonastaso, G.F., Palomba, A., and Locoratolo, S., (2018), "Calibration of a water distribution network with limited field measures: The case study of Castellammare di Stabia (Naples, Italy)", *International Conference on Learning and Intelligent Optimization*, 433-436, https://doi.org/10.1007/978-3-030-05348-2_36.

Farley, M., and Trow, S., (2003), *Losses in water distribution networks*, IWA publishing, London.

Force, I.W.L.T., and Thornton, J., (2003), "Managing leakage by managing pressure: A practical approach", *Water 21*, October.

Germanopoulos, G., (1985), "A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models", *Civil Engineering Systems*, 2(3), 171-179, https://doi.org/10.1080/02630258508970401.

Islam, M.S., and Babel, M.S., (2013), "Economic analysis of leakage in the Bangkok water distribution system", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(2), 209-216, https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000235.

Lambert, A.O., Brown, T.G., Takizawa, M., and Weimer, D., (1999), "A review of performance indicators for real losses from water supply systems", *Journal of Water Supply: Research and Technology AQUA*, 48(6), 227-237, https://doi.org/10.2166/aqua.1999.0025.

Lambert, A., (2001), "What do we know about pressure leakage relationships in distribution systems", *Systems Approach to Leakage Control and Water Distribution System Management*, An IWA Conference, Brno, Czech Republic, 16-18 May.

Lambert, A.O., (2002), "International report: water losses management and techniques", *Water Science and Technology: Water Supply*, 2(4), 1-20, https://doi.org/10.2166/ws.2002.0115.

Liemberger, R., and Wyatt, A., (2019), "Quantifying the global non-revenue water problem", *Water Supply*, 19(3), 831-837, https://doi.org/10.2166/ws.2018.129.

McKenzie, R., and Wegelin, W., (2009), "Implementation of pressure management in municipal water supply systems", *Proceedings of the EYDAP Conference* "*Water: The Day After*", Athens, Greece, 20.

Molinos-Senante, M., Villegas, A., and Maziotis, A., (2021), "Measuring the marginal costs of reducing water leakage: the case of water and sewerage utilities in Chile", *Environmental Science and Pollution Research*, 28(25), 32733-32743, https://doi.org/10.1007/s11356-021-13048-9.

Moslehi, I., Jalili-Ghazizadeh, M., and Yousefi-Khoshqalb, E., (2021), "Developing a framework for leakage target setting in water distribution networks from an economic perspective", *Structure and Infrastructure Engineering*, 17(6), 821-837, https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1777568.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.