



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

نوید غلام پور^۱، پویا محمدی^۲، فرشته مدرسی^{۳*}، حسین انصاری^۴

۱- دانشجو دکترا آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشجو دکترا آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴- 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

چکیده

نشت آب در شبکه‌های توزیع، یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت منابع آب شهری است که منجر به اتلاف مالی، هدررفت آب و کاهش کارایی سیستم‌ها می‌شود. این پژوهش باهدف 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 جهت شبیه‌سازی شبکه و تحلیل پارامترهای هیدرولیکی استفاده شده است؛ داده‌های دبی، فشار و نقشه‌های جغرافیایی جمع‌آوری و مدل شبکه کالیبره گردیده است. ارزیابی انجام‌شده، شاخص ILI برابر با ۱۲ را نشان می‌دهد که وضعیت وخیم نشت در شبکه موجود را منعکس می‌کند و به همین 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 گردیده است. یافته‌ها حاکی

از آن است که سرمایه گذاری در مدیریت هوشمند فشار و نوسازی زیرساخت های فرسوده، علاوه بر بهبود بهره وری اقتصادی، خسارات زیست محیطی ناشی از هدررفت آب را نیز کاهش می دهد.

واژه های کلیدی: هدررفت آب، مدل سازی، مدیریت فشار، WaterGEMS، ILI.

Economic and technical analysis of leakage reduction in Birjand urban water distribution network

Navid Gholampoor¹, Pooya Mohammadi², Fereshteh Modaresi^{3*}, Hossein Ansari⁴

¹PhD student of irrigation and drainage, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

²PhD student of irrigation and drainage, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

⁴Professor, 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

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 shows 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 liters per second of leakage, equivalent to a daily volume reduction of 1287.360 cubic meters 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.

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 در حال افزایش است و در کنار آن، تغییرات اقلیمی و کمبود منابع آبی بحران‌های قابل توجهی 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 در حال توسعه به دلیل عواملی همچون افزایش مهاجرت به مناطق شهری، مدیریت ضعیف زیرساخت‌ها، نشت آب، و مصرف غیرمجاز به طور 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 و بنابراین باید اجزای مختلف هدررفت آب به‌طور دقیق ارزیابی شده و برای کاهش آنها اولویت‌بندی شوند. در مدیریت نشت، چهار عامل اساسی مدیریت فشار (PM^2)، سرعت و کیفیت تعمیرات، کنترل فعال نشت (ALC^3) و نوسازی لوله‌ها و تاسیسات شبکه مطرح می‌شود (Lambert, 2002).

نشت آب در شبکه‌های توزیع می‌تواند خسارات اقتصادی زیادی به‌ویژه در انتقال آب و هزینه‌های تعمیرات به همراه داشته باشد. در برخی شبکه‌ها، نشت ممکن است تا ۳۰ درصد از کل آب استخراج شده را تشکیل دهد (Adedeji et al., 2017). در این راستا، کاهش نشت آب باید بر اساس تحلیل اقتصادی صورت گیرد 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 آب جدید است (Moslehi et al., 2021).

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 باعث 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 در حال توسعه این روش به دلیل 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 کالیفتا آفریقای جنوبی، مدیریت فشار باعث کاهش نشت از ۷۵ درصد به ۳۰ درصد شد و در نتیجه، ۹ میلیون مترمکعب آب ذخیره‌سازی شد (Mckenzie and Wegelin, 2009). علاوه بر این، در شهر بانکوک، کنترل نشت باعث کاهش هزینه‌ها به میزان ۰/۱۵ دلار آمریکا به‌ازای هر مترمکعب آب شده است (Islam and Babel, 2013).

مدیریت فشار و تحلیل اقتصادی نشت در برخی دیگر از مطالعات نیز مورد توجه قرار گرفته است. در مطالعه‌ای در ناپل ایتالیا، طراحی مدل هیدرولیکی برای شبکه توزیع آب نشان داد که موقعیت بهینه سنسورها می‌تواند دقت کالیبراسیون مدل‌ها را افزایش دهد (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 به طور دقیق محاسبه شد (اسدیانی‌یکتا و تابش، ۱۳۸۹). همچنین، در شهر یزد، مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب به شکل دقیقی وضعیت موجود را شبیه‌سازی شده 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 صورت گرفته 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 باتوجه به وضعیت شبکه‌ها و منابع موجود میسر خواهد شد.

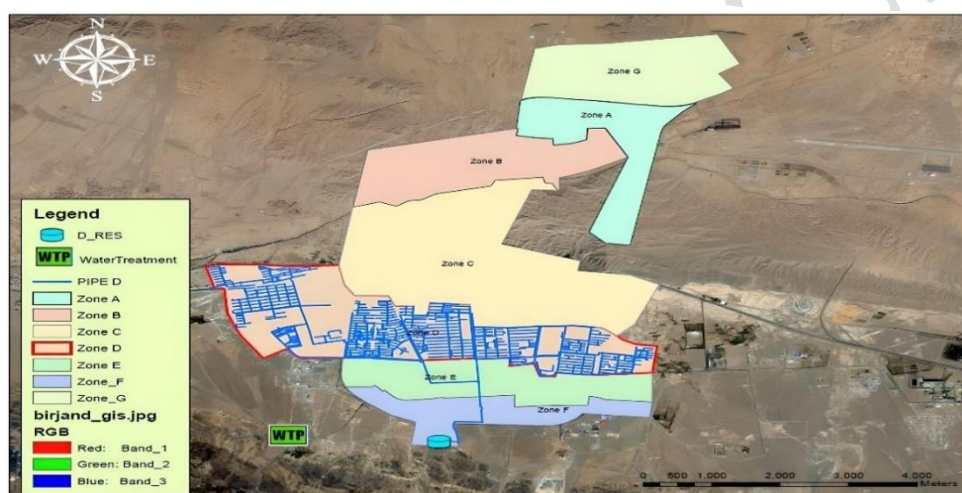
هدف اصلی این پژوهش‌ها بهبود مدیریت مصرف آب و کاهش هدررفت در راستا تعادل اقتصادی است. در این راستا، تحلیل و مدل‌سازی شبکه‌های توزیع آب، به‌ویژه در مناطق خشک، به‌عنوان ابزاری برای بهینه‌سازی مصرف و کاهش نشت استفاده می‌شود. در این زمینه، تحلیل اقتصادی نشت و کنترل فشار به‌ویژه در شهرهایی مانند بیرجند، به‌ویژه زون فشاری D که با کمبود منابع آبی و فرسودگی شبکه مواجه هستند، اهمیت زیادی دارد. این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار WaterGEMS به مدل‌سازی شبکه توزیع آب بیرجند پرداخته شده و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده، فرایند کالیبراسیون انجام، و در نهایت، ارزیابی میزان نشت و کاهش آن با استفاده از شاخص‌های فنی و اقتصادی در این منطقه بررسی شده است.

۲- مواد و روش

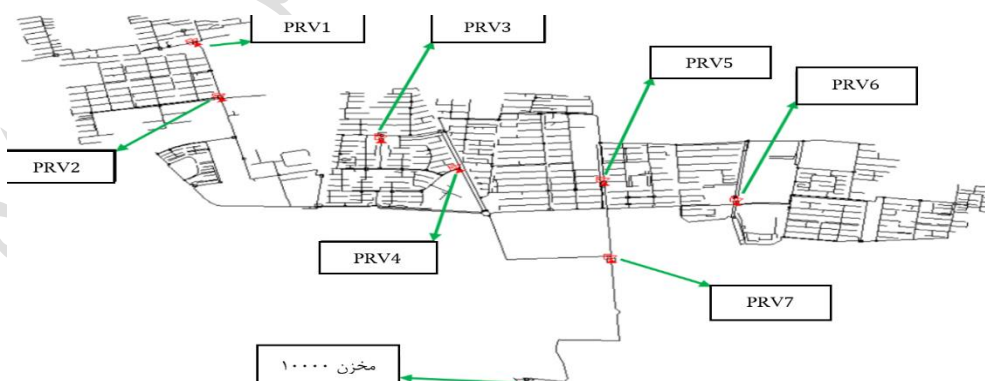
۲-۱- معرفی منطقه مورد پژوهش

شبکه توزیع آب شهر بیرجند دارای هفت پهنه بهره‌برداری است. در حال حاضر آب مورد نیاز مردم از طریق ۷ مخزن که در بلندترین نقاط ارتفاعی هر پهنه قرار دارند، به‌صورت کاملاً ثقلی تأمین می‌گردد. پهنه بهره‌برداری مورد مطالعه این پژوهش زون D شبکه توزیع آب شهر بیرجند مطابق شکل ۱ است. این زون دارای 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 قرائت شده توسط قرائت‌کنندگان کنتور شرکت آب‌وفاضلاب خراسان جنوبی در دوره پنجم سال ۱۴۰۰ (آذر و دی ماه) استفاده شده است. به منظور جایگذاری اشتراک‌ها با نوع کاربری در محل واقعی خود با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS براساس موقعیت و میزان مصرف هر اشتراک انجام شده است تا مصارف واقعی هر اشتراک به لوله نظیر آن اختصاص یافته تا نتایج مدل‌سازی به واقعیت نزدیکتر باشند. در پهنه مورد پژوهش حدود ۱۲۷۲۶۰ متر لوله موجود می‌باشد که جنس تمامی لوله‌های به کار رفته در شبکه، آزیست (۴۶/۵ درصد شبکه) و پلی‌اتیلن (۵۳/۵ درصد شبکه) است. همچنین با توجه به وسعت و رشد شهرسازی در سال‌های متفاوت در زون D، لوله‌های شبکه توزیع آب دارای سن متفاوتی می‌باشند. سن لوله‌های پلی‌اتیلن در زون D از حدود سال ۱۳۷۵ آغاز و تا امروز نیز برای اصلاح و توسعه شبکه آب از آنها استفاده می‌گردد.



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 (HDSM⁴)

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

نگاه کلی در شبکه‌های توزیع آب باید به گونه‌ای باشد که با در نظر گرفتن جنبه‌های فنی و اقتصادی، فشار در محدوده پوشش شبکه به حداقل برسد؛ به طوری که 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 $0/3$ بار کاهش نیابد؛ از سوی دیگر، فشار حداقل شبکه توزیع آب برای ساختمان‌های یک طبقه در محل پشت‌کنتر برابر با $1/4$ بار در نظر گرفته شده و برای هر طبقه اضافه، جهت تأمین ارتفاع و جبران افت‌های لوله‌های داخلی، $0/4$ بار به این عدد افزوده می‌شود (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۹۲). با توجه به اینکه ساختمان‌های منطقه مورد پژوهش از نظر تعداد طبقات حداکثر ۴ طبقه هستند، حداقل فشار $2/6$ بار در نظر گرفته شده و این مقدار به عنوان مدل واسنجی شده در مدل هیدرولیکی مبتنی بر فشار اعمال شده است. همچنین، براساس داده‌های ثبت شده توسط کنتر خروجی مخزن و بررسی صحت داده‌های سنجنده فشار به همراه استفاده از آخرین نقشه‌های به‌روز شده شبکه در پهنه فشاری مورد تحقیق، روز شنبه مورخ ۱۴۰۰/۰۹/۲۰ به عنوان روز مدل‌سازی انتخاب گردیده است.

۳-۲- مدل WaterGEMS

نرم‌افزار WaterGEMS به دلیل توانمندی‌های پیشرفته در مدل‌سازی هیدرولیکی و تحلیل شبکه‌های توزیع آب، به عنوان 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 آن اشاره کرد که در شرایط تغییرات فشار و تأثیر آن بر میزان نشت، عملکرد تحلیل را بهبود می‌بخشد؛ علاوه بر این، یکپارچه‌سازی با GIS اجازه می‌دهد نقشه‌های دقیق شبکه توزیع آب وارد مدل شده و تحلیل‌های مکانی انجام گردد.

در این پژوهش، واسنجی مدل WaterGEMS از طریق کالیبراسیون با استفاده از داده‌های دبی‌سنجی و فشارسنجی انجام شده است؛ در مطالعه حاضر، زون D کاملاً ایزوله بوده و تنها دارای یک ورودی آب به شبکه توزیع است که این ورودی مجهز به یک دستگاه دبی‌سنج مغناطیسی بر روی لوله خروجی مخزن به قطر ۶۰۰ میلی‌متر نصب است و امکان قرائت میزان آب ورودی در زمان‌های مشخص (هر ده دقیقه) را فراهم می‌کند. داده‌های مربوط به فشارسنجی نیز در زون D بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام‌شده توسط

لاگرهای فشار آنالاین شبکه توزیع و فشارهای ورودی دو شیر فشارشکن (PRV2 و PRV7) که از طریق سیستم تله‌متری ثبت می‌شوند، در نظر گرفته شده است؛ در شکل ۳ نقاط مربوط به فشارسنجی و دبی‌سنجی نمایش داده شده‌اند.

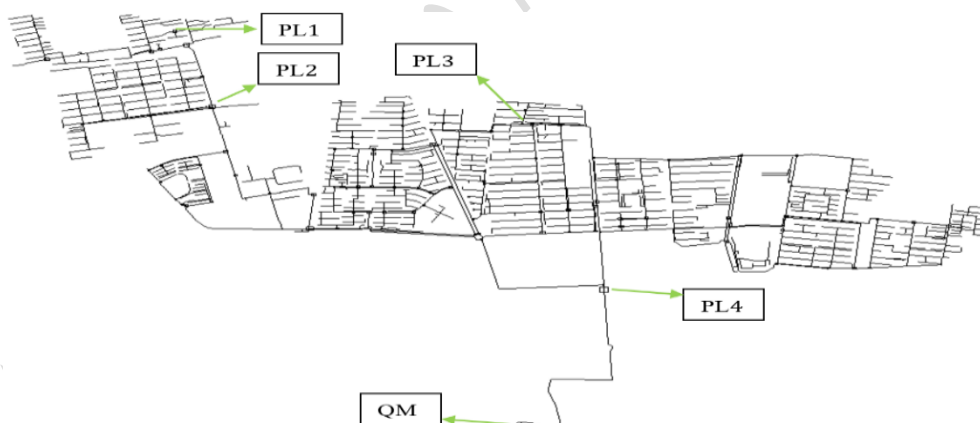
باتوجه به محیط نرم‌افزار، جهت استفاده الگوریتم ژنتیک در فرایند بهینه‌یابی، از تابع حداقل مجموع مربعات خطاها، جهت انجام عمل کالیبراسیون در نرم‌افزار استفاده شده که این تابع به صورت رابطه ۱ می‌باشد:

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

در رابطه ۱، W_{np} و W_{nf} 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 $Q_{o,nf}$ دبی شبیه‌سازی و میدانی در لوله nf ، NP و NF به ترتیب تعداد فشارها و دبی‌های اندازه‌گیری میدانی در شبکه توزیع می‌باشند. همچنین در نرم‌افزار برای ضرایب وزنی از الگوریتم خطی با توجه به مقدار صحت و اهمیت در مقادیر پارامترهای دبی و یا فشار مدنظر قرار گرفت. الگوریتم خطی به صورت روابط ۲ و ۳ در نرم‌افزار محاسبه می‌گردد:

$$W_{np} = \frac{H_{o,np}}{\sum H_{o,np}} \quad (2)$$

$$W_{nf} = \frac{Q_{o,nf}}{\sum Q_{o,nf}} \quad (3)$$



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

۴-۲- شاخص‌های عملکرد شبکه‌های توزیع آب

برای ارزیابی و مقایسه عملکرد شبکه‌های توزیع آب با یکدیگر و برای تعیین یک هدف اقتصادی برای سرمایه‌گذاری در زمینه کاهش نشت از شاخص‌های عملکرد استفاده می‌گردد (Lambert et al., 1999). شاخص نشت زیرساخت (ILI^5) یکی از مهم‌ترین و

پرباربردترین شاخص عملکرد شبکه‌های توزیع آب است که در آن ارزیابی کاملی از وضعیت شبکه توزیع آب را نشان می‌دهد. شاخص عملکرد زیرساخت بر اساس روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌گردد (Cavazzini et al., 2020):

$$NRW = \frac{SIV - BW}{SIV} \times 100 \quad (4)$$

در رابطه ۴، NRW^6 آب بدون درآمد $(\%)$ ، SIV^7 حجم ورودی سیستم و BW^8 مصرف مشترکین مجاز دارای قبض است.

$$ILI = \frac{CARL}{UARL} \quad (5)$$

در رابطه ۵، ILI کیفیت مدیریت نشت را توصیف می‌کند که در آن $CARL^9$ نشت موجود سالانه و $UARL^{10}$ نشت سالانه اجتناب‌ناپذیر است. میزان نشت موجود سالانه بر اساس رابطه نشت و فشار محاسبه می‌گردد. همچنین نشت سالانه اجتناب‌ناپذیر بر اساس رابطه ۶ محاسبه می‌گردد:

$$UARL = (18 \times L_m + 0.80 \times N_c + 25 \times L_p) \times p \quad (6)$$

در رابطه ۶، $UARL$ نشت سالانه اجتناب‌ناپذیر بر حسب لیتر بر روز، L_m طول خطوط اصلی بر حسب کیلومتر، N_c تعداد مشترکین، L_p طول لوله موجود از مرز انشعاب تا کنتور مشترک بر حسب کیلومتر و p فشار متوسط شبکه توزیع آب بر حسب متر می‌باشد. با محاسبه ILI می‌توان به این نتیجه رسید که یک شرکت تأمین‌کننده آب تا چه اندازه به طور مؤثر و کارآمد سطح نشت را کنترل می‌نماید. میزان ILI نزدیک به یک نشان‌دهنده مدیریت و نگهداری خوب شبکه توزیع آب است و مقادیر غیر از یک بر اساس جدول ۱ تعریف می‌گردد (AWWA, 2016).

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

بازه ILI	ملاحظات منابع آب	ملاحظات اجرایی	ملاحظات مالی
۳-۱	منابع آب موجود بسیار محدود و توسعه آن بسیار سخت و از لحاظ محیط زیستی ناپایدار است.	نیاز توسعه زیرساخت‌های موجود و منابع آب اضافی برای تأمین تقاضا نیاز دارد.	خرید یا توسعه منابع آب هزینه‌بر و گران است.
۵-۳	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، به شرط آن که مدیریت نشت اجرا شود.	خرید یا توسعه منابع آب با یک هزینه معقول امکان دارد.
۸-۵	منابع آب فراوان، قابل اعتماد و به راحتی قابل استخراج 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	هنگامی که ملاحظات مالی و اجرایی سبب شوند ILI در بلندمدت بیش از ۸ شود، چنین سطحی از نشت جهت مصرف آب مؤثر نیست و هدف‌گذاری نشت در این حالت به‌غیر 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 به خوبی صورت گرفته 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 گردد. در این زمینه تحقیقات بسیار صورت گرفته است که معادلات پیچیده‌ای بر اساس سن و قطر لوله‌ها و حتی تغییر شکل موقتی در اثر شکست در لوله‌ها به وجود آمده است. به این منظور باتوجه به محدودیت داده‌های موجود در محدوده مورد پژوهش، از رابطه ۷ برای محاسبه نشت در لوله‌ها استفاده گردید که در این رابطه فرض شده نشت در طول لوله‌ها بطور یکنواخت توزیع می‌گردد (Germanopoulos, 1985).

$$Q_{L,ij} = C_L \times L_{ij} \times (P_{ij}^{av})^{1.18} \quad (7)$$

که در رابطه ۷، $Q_{L,ij}$ دبی خروجی از محل نشت از هر لوله بر حسب 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 لوله‌ها شبکه توزیع دارد که به وسیله آزمایشات میدانی بدست می‌آید؛ و P_{ij}^{av} فشار متوسط در طول لوله است که از رابطه ۸ به دست می‌آید:

$$P_{ij}^{av} = \frac{P_i + P_j}{2} \quad (8)$$

در رابطه ۸، P_i و P_j به ترتیب مقدار فشار آب در ابتدا و انتها لوله بر حسب متر می‌باشند.

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 علاوه بر بررسی اقتصادی طرح‌های سرمایه‌گذاری خصوصی یک روش کاربردی و معروف در ارزیابی طرح‌های دولتی به علت عام‌المنفعه بودن این طرح‌ها است. اگر طرحی دارای BCR بیشتر از یک باشد، انتظار می‌رود که طرح ارزش فعلی خالص مثبتی را به شرکت و سرمایه‌گذاران آن ارائه می‌دهد و اگر BCR طرح کمتر از یک باشد، هزینه‌های طرح بیشتر از مزایای آن است و نباید آن را در نظر گرفت. شاخص BCR به صورت رابطه ۹ محاسبه می‌گردد (منصور خاکی و همکاران، ۱۳۹۶):

$$BCR = \frac{\sum_{n=0}^N \frac{B_n}{(1+r)^n}}{\sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1+r)^n}} \quad (9)$$

در رابطه ۹، B_n و C_n هزینه و منافع حاصل از طرح در زمان n برابر نرخ بهره که در این پژوهش براساس گزارش بانک مرکزی جمهوری اسلامی در سال ۱۴۰۰ مقدار ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است، n تعداد سال و N سال مورد نظر می‌باشد. در این روش برای محاسبه هزینه‌های سرمایه‌گذاری و سود، از قیمت هر مترمکعب آب در محدوده مورد پژوهش که برابر ۱۷۰۰۰ ریال می‌باشد

و همچنین صورت‌های مالی شرکت و فهرست بهای‌های توزیع و نگهداری سال ۱۴۰۰ استفاده شده است؛ و سپس با فرض ثابت بودن مقدار نرخ بهره به مدت ۲۰ سال، تا سال ۱۴۲۰ برای تمامی سناریوهای شاخص BCR محاسبه گردیده شده است.

۲-۷- سناریوهای کاهش نشت

بر اساس هدف مهم این پژوهش که مبحث کاهش نشت آب با اعمال تعدیل فشار در شبکه‌های توزیع بوده است و همچنین وجود محدودیت‌هایی از قبیل استفاده حداکثری از تأسیسات و لوله‌های موجود، پس از اجرای سناریوهای مختلف در نهایت سناریوهای جدول ۲ که قابلیت اجرا در شبکه توزیع منطقه مورد پژوهش را دارا بود در نظر گرفته شده است:

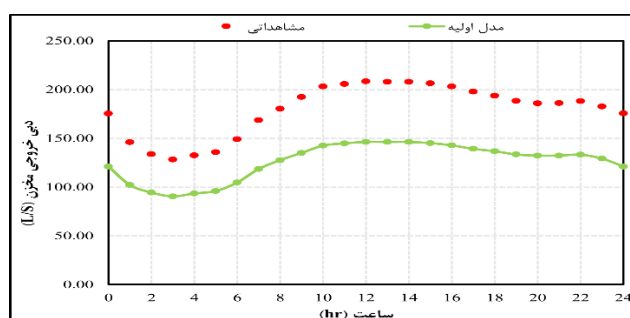
جدول ۲- سناریوهای در نظر گرفته شده برای تعدیل فشار در محدوده مطالعاتی

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

۳- نتایج و بحث

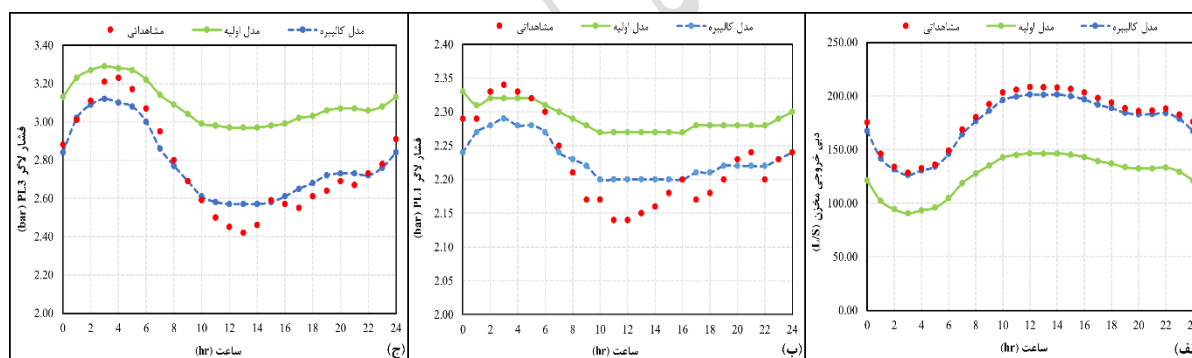
۳-۱- بررسی وضع موجود شبکه توزیع آب زون D

در شکل ۴، خروجی مخزن براساس داده‌های اندازه‌گیری شده و مدل اولیه ساخته شده بدون در نظر گرفتن هدررفت در محدوده مورد پژوهش نشان داده شده است؛ همانطور که مشاهده می‌شود، اختلاف بین میزان دبی شبیه‌سازی شده و دبی اندازه‌گیری شده نشان‌دهنده وجود عواملی همچون نشتی‌های شبکه توزیع، عدم کالیبراسیون دبی‌ها و ضرایب زبری لوله‌ها می‌باشد؛ پس از تنظیم پارامترهای نشتی و دبی، کالیبراسیون ضرایب زبری در لوله‌ها بر اساس قطر، جنس انجام شده است.



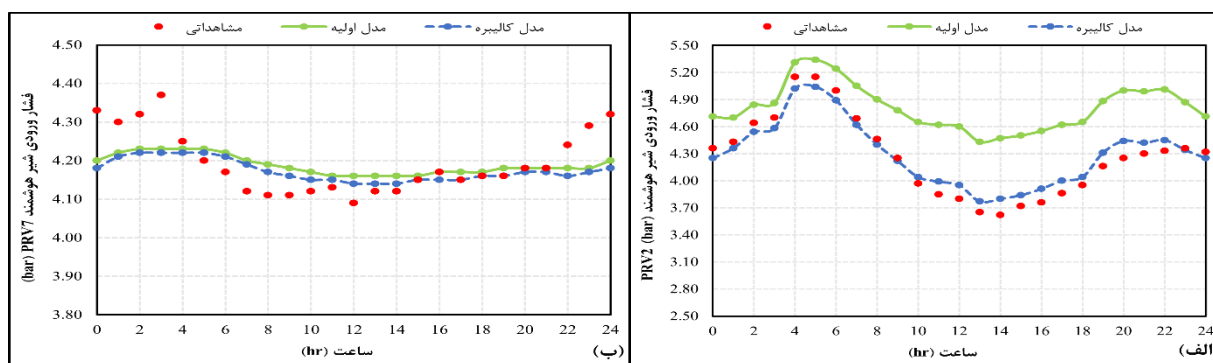
شکل ۴- جریان خروجی از مخزن برای مقادیر مشاهده‌ای و مدل اولیه

در شکل ۵، کالیبره دبی شبیه‌سازی شده خروجی مخزن (شکل ۵ - الف) و کالیبره فشار در فشارسنج‌های آنالین PL1 و PL3 (شکل ۵ - ب و ج)، به نمایش گذاشته شده است؛ در قسمت الف شکل ۵، تقریباً داده‌های میدانی و مدل‌سازی شده خروجی مخزن همپوشانی دارند که نشان‌دهنده کالیبره دقیق مدل برای دبی خروجی مخزن در محدوده مورد پژوهش می‌باشد؛ در قسمت‌های ب و ج نیز مشاهده می‌شود که داده‌های میدانی و مدل‌سازی شده فشار در فشارسنج‌های PL1 و PL3 در طول روز تا حدی همپوشانی دارند، به جز 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 جهت کنترل دبی و فشار را نشان می‌دهد.



شکل ۵- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و مدل‌سازی شده اولیه و کالیبره شده برای دبی خروجی از مخزن (الف)، لاگر فشار PL1 (ب) و لاگر فشار PL3 (ج)

در شکل ۶، فشار ورودی دو شیر فشارشکن PRV2 و PRV7 به نمایش گذاشته شده است؛ در شکل ۶- الف مشاهده می‌شود که داده‌های میدانی و مدل‌سازی شده ورودی شیر فشارشکن هوشمند PRV2 تقریباً همپوشانی دارند که نشان‌دهنده کالیبره دقیق و بسیار بالا مدل برای این شیر هوشمند در محدوده مورد پژوهش می‌باشد؛ در شکل ۶- ب نیز داده‌های میدانی و مدل‌سازی شده ورودی شیر فشارشکن هوشمند PRV7 به جز 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.



شکل ۶- مقایسه مقادیر مشاهداتی و مدل شده اولیه و کالیبره شده برای فشار ورودی به شیرهای هوشمند PRV2 (الف) و PRV7 (ب)

۳-۲- تغییرات فشار شبکه در سناریوهای مورد بررسی

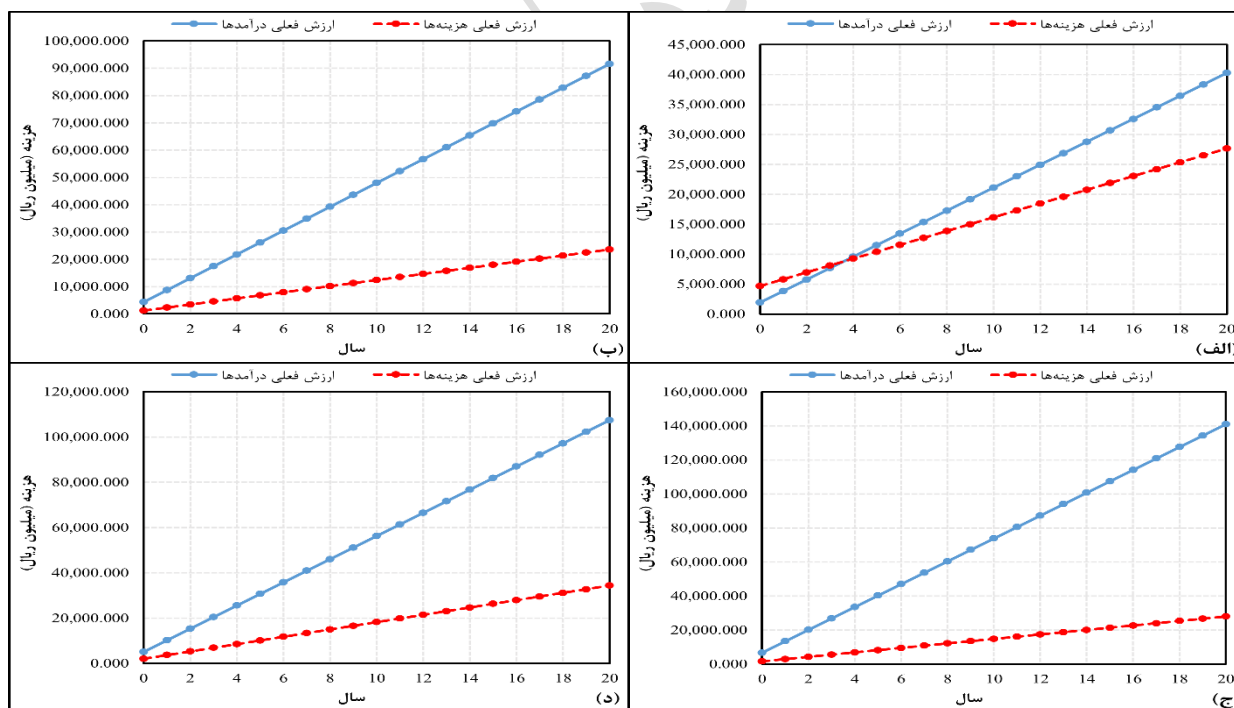
سناریوی S1 دارای خصوصیات فعلی شبکه توزیع زون D بوده و بیشترین شباهت را به وضعیت موجود دارد؛ به عنوان سناریو مرجع، در زمان حداقل مصرف ۵۳/۴ درصد از گره‌ها دارای فشار بیش از ۳ بار و از این مقدار ۱۷ درصد دارای فشار بیش از ۴ بار بوده‌اند که نشان‌دهنده فشار بیش از حد موجود و نقش آن در ایجاد نشت و حوادث در شبکه است. براساس هدف پژوهش، در سناریوی S2 با هوشمندسازی شیرها، در زمان حداقل مصرف ۴۲/۸ درصد از گره‌ها دارای فشار بیش از ۳ بار و ۱۳/۵ درصد دارای فشار بیش از ۴ بار شدند که بیانگر کاهش ۱۰/۶ درصدی گره‌های دارای فشار بیش از ۳ بار نسبت به S1 می‌باشد. با استفاده حداکثری از تأسیسات موجود و بررسی تأثیر شیرهای فشارشکن، در سناریوی S3 پس از جابه‌جایی شیر PRV5 و تنظیم آن بر فشار ۳ بار، در زمان حداقل مصرف ۳۴/۶ درصد از گره‌ها دارای فشار بیش از ۳ بار و ۹/۶ درصد 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 انجام شده توسط نصیرپور و همکاران (۱۳۹۷)، با موضوع بهینه‌یابی موقعیت نصب شیرهای فشارشکن با روش الگوریتم مورچگان در زون D بیرجند، در سناریوی S4 با اضافه نمودن شیر فشارشکن جدید از نوع تک زمانه با فشار تنظیمی ۲ بار و جابه‌جایی شیر PRV5، در زمان حداقل مصرف ۲۶/۹ درصد از گره‌ها دارای فشار بیش از ۳ بار و تنها ۳/۱ درصد دارای فشار بیش از ۴ بار شدند؛ همچنین در زمان مصرف حداکثر دیگر فشار بالای ۴/۵ بار مشاهده نشد و ۶۸/۴ درصد از گره‌ها بین فشار حداقل تعریف شده قرار گرفتند که نشان‌دهنده کنترل مناسب فشار در منطقه است. در نهایت، در سناریوی S5 با جانمایی دو شیر فشارشکن جدید از نوع تک زمانه با فشار تنظیمی ۳ و ۲ بار، در زمان حداقل مصرف ۳۱ درصد از گره‌ها دارای فشار بیش از ۳ بار و ۳/۱ درصد 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 تعریف شده به ۶۵ درصد کاهش یافت که نسبت به سناریو S4 کاهش ۳/۴ درصدی دارد و نشان می‌دهد شیر PRV6 تأثیرگذار در شبکه توزیع مورد مطالعه نمی‌باشد.

۳-۳- بررسی اقتصادی کاهش نشت در سناریوها

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



شکل ۷- مقایسه شاخص اقتصادی BCR در تمامی سناریوها (به ترتیب از الف تا د مربوط به سناریوهای S2، S3، S4 و S5)

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

باتوجه به توضیحات بیان شده و همچنین نتایج به دست آمده از کالیبره مدل، شاخص آب بدون درآمد برای محدوده مورد پژوهش به صورت زیر محاسبه شده است:

$$NRW = \frac{208/37 - 122/05}{208/37} \times 100 = \%41/42$$

در این شاخص ۲۰۸/۳۷ لیتر بر ثانیه مقدار ثبت شده از خروجی مخزن و ۱۲۲/۰۵ لیتر بر ثانیه مقدار مصرف ثبت شده از مشترکین کل محدوده مورد مطالعه می باشد. این شاخص به خوبی نشان می دهد مقدار هدررفت آب در محدوده مورد مطالعه به مقدار زیادی بالاتر از مقدار توصیه شده و بهینه ۱۵ درصد می باشد (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۹۲). همچنین شاخص نشت زیر ساخت باتوجه به نتایج بدست آمده از سناریوها، به صورت جدول ۳ محاسبه شده است:

جدول ۳- مقایسه مقادیر شاخص نشت زیر ساخت 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

باتوجه به جدول ۳ و مقادیر بدست آمده شاخص ILI و جدول ۱ می توان یافت که اوضاع شبکه توزیع آب زون D بیرجند از نظر نشت به شدت 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 دراز مدت یک سری اقدامات مدیریتی و اجرایی برای کنترل نشت این زون انجام گرفته شود.

۵-۳- جمع بندی سناریوها

باتوجه به سناریوهای در نظر گرفته شده و نتایج به دست آمده از هر سناریو، خلاصه نتایج کلی در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است؛ طبق جدول ۴، مدیریت هوشمند فشار و نزدیک شدن به فشار حداقل مورد نیاز، در محدوده مورد پژوهش منجر به کاهش نشت آب در شبکه توزیع می گردد که این کاهش به وضوح در سناریو S₄ با توجه به انتخاب بهینه مکان شیر فشارشکن، نمایان شده است؛ همچنین، این جدول نشان می دهد که افزودن شیرهای فشارشکن بیشتر مانند سناریو S₅ لزوماً به بهبود متناسب شبکه منجر نمی شود. جدول ۵ تأکید می کند که، هزینه سرمایه گذاری بالا در شبکه توزیع همیشه موجب کاهش بیشتر نشت نمی شود و با انتخاب سناریوی مناسب می توان هزینه ها را کاهش داده و از نظر مالی به سود و کاهش نشت بیشتر و مدیریت بهینه اقتصادی فشار دست یافت.

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

سناریو	نشت ماکسیمم (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	۵۰۰/۳۵۶
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

باتوجه به 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 سناریو اجرایی را جهت کاهش نشت مورد آزمایش قرار داده است. نتایج به دست آمده از شاخص‌های زیرساخت شبکه نشان می‌دهد که وضعیت نشت در شبکه وخیم بوده و نیاز فوری به اجرای اقدامات بلندمدت وجود دارد؛ به طوری که در سناریو S₄ کاهش شاخص نشت زیرساخت به میزان حدود ۰/۴۰ نسبت به وضعیت موجود، اثربخشی این سناریو را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که در شبکه توزیع موجود، ۵۳/۴ درصد از گره‌ها در زمان حداقل مصرف دارای فشار بیش از ۲/۶ بار هستند که بیانگر مدیریت نادرست فشار و افزایش نشت می‌باشد؛ در سناریو S₄ این درصد به ۲۶/۹ درصد کاهش یافته است. علاوه بر این، جابه‌جایی شیر PRV5 و اضافه نمودن یک شیر فشارشکن جدید، به دلیل کاهش فشار شبکه و نزدیک شدن به فشار حداقل، به عنوان کارترین سناریو (S₄) شناخته شده است؛ در این سناریو با سرمایه‌گذاری ۲۷۹/۳ میلیون ریال، سود حاصل از کاهش نشت آب به ۱/۲۴۱ میلیارد ریال و اثر بخشی معادل ۱۴/۹۰ لیتر بر ثانیه در ساعت حداقل مصرف و همچنین کاهش حجم نشتی به میزان ۱۲۸۷/۳۶۰ مترمکعب در طول روز به دست آمده است، اگرچه از نظر مدت زمان اجرا، زمانبر می‌باشد. در نهایت، پژوهش نشان داده که هرگونه مدیریت کوتاه‌مدت نشت طبق سناریوهای

معرفی شده 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 جهت 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}) به عنوان معیاری برای ارزیابی بهینه‌سازی فشار شبکه‌ها در کاهش نشت شناخته می‌شود. با این حال، در این پژوهش، شاخص ILI به طور 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- منابع

- 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://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://civilica.com/doc/78329>
- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، (۱۳۹۲)، ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی، نشریه ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی، نشریه شماره ۳-۱۷، بازنگری اول، تهران.
- منصور خاکی، ع.، موسوی، س. و رضایی ارجودی، 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)، ۳۳-۱۷. https://www.waterjournal.ir/article_95872.html
- 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, pp.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, pp. 423.

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, pp.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 Locorotolo, S., (2018), Calibration of a water distribution network with limited field measures: The case study of Castellammare di Stabia (Naples, Italy), In *Learning and Intelligent Optimization: 12th International Conference, LION 12*, Kalamata, Greece, June 10–15, 2018, Revised Selected Papers 12 (pp. 433-436), Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05348-2_36.

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

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

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), pp.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), pp.209-216. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000235](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), pp.227-237. <https://doi.org/10.2166/aqua.1999.0025>.

Lambert, A., (2001, May), What do we know about pressure-leakage relationships in distribution systems, In *IWA Conf. n Systems approach to leakage control and water distribution system management*.

Lambert, A.O., (2002), International report: water losses management and techniques, *Water Science and Technology: Water Supply*, 2(4), pp.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), pp.831-837. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.129>.

McKenzie, R. and Wegelin, W., (2009, November), Implementation of pressure management in municipal water supply systems, In *Proceedings of the EYDAP Conference “Water: The Day After”*, Athens, Greece (Vol. 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, pp.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), pp.821-837. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1777568>.