

قبل از انتشار

علمی-پژوهشی

مدل سازی هیدرولیکی و ارزیابی آب بدون درآمد در شبکه آب طبس گلشن

*علی نصیریان^۱ و مهسا مردانی^۲

^۱ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، a.nasirian@birjand.ac.ir

ORCID: 0000-0002-1813-0677

^۲ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، mahsa.mardani@birjand.ac.ir

ORCID: 0009-0008-0440-3583

چکیده

سابقه و هدف: آب بدون درآمد (NRW)، شامل تلفات واقعی (نشت‌های فیزیکی از لوله‌ها و اتصالات) و تلفات ظاهری (مصارف ثبت‌نشده ناشی از خطاهای کنتور، انشعابات غیرمجاز یا خطاهای ثبت داده)، یکی از چالش‌های اصلی شبکه‌های توزیع آب شهری در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران است. این پدیده کارایی اقتصادی و عملیاتی شبکه‌های آب رسانی را کاهش می‌دهد و هزینه‌های بهره‌برداری را افزایش می‌دهد. در شهر طبس، واقع در استان خراسان جنوبی، با اقلیم گرم و خشک، محدودیت منابع آبی و رشد جمعیت، مدیریت بهینه آب شرب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زون یک شبکه توزیع آب طبس گلشن به دلیل وسعت و اهمیت آن به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. این پژوهش با هدف توسعه مدل هیدرولیکی شبکه توزیع آب زون یک، کالیبراسیون دقیق مدل با استفاده از داده‌های میدانی، برآورد دقیق میزان آب بدون درآمد و تفکیک مؤلفه‌های تلفات واقعی و ظاهری انجام شد. نوآوری این مطالعه در ترکیب روش‌های بیلان آبی، تحلیل حداقل جریان شبانه و رویکرد FAVAD برای برآورد دقیق نشت و ارائه راهکارهای عملی برای کاهش تلفات در مناطق کویری است. این پژوهش با اهداف نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک هم‌راستاست، زیرا به مدیریت پایدار منابع آبی، کاهش هدررفت آب و ارتقای بهره‌وری شبکه‌های آب رسانی در شرایط کم‌آبی کمک می‌کند. این مطالعه همچنین با استفاده از داده‌های میدانی و مدل‌سازی پیشرفته، رویکردی علمی برای تحلیل و مدیریت منابع آبی در مناطق با زیرساخت‌های فرسوده یا نظارت محدود ارائه می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان الگویی برای سایر مناطق مشابه در ایران و جهان مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها: مطالعه در زون یک شبکه توزیع آب شهر طبس گلشن، واقع در استان خراسان جنوبی، انجام شد. این منطقه به دلیل اقلیم گرم و خشک و محدودیت منابع آبی، چالش‌های جدی در تأمین آب شرب دارد. مدل هیدرولیکی شبکه با استفاده از نرم‌افزار WaterGEMS و بر اساس نقشه‌های به‌روز AutoCAD و GIS توسعه یافت. این نقشه‌ها شامل اطلاعات دقیق لوله‌ها، شیرآلات، مخازن و گره‌های شبکه بود که با دقت بالا به مدل منتقل شدند. داده‌های مصرف ۲۶۴۰ مشترک در دوره‌های چهارم و پنجم سال ۱۴۰۰ (مهر و آبان) شامل متوسط مصرف ساعتی، نوع کاربری (مسکونی، تجاری، فضای سبز و غیره) و مختصات جغرافیایی جمع‌آوری شد. این داده‌ها برای تعیین الگوی مصرف و تخصیص تقاضا به گره‌های مدل استفاده شدند. داده‌های میدانی شامل دبی خروجی مخزن از سیستم تله‌متری، فشار ساعتی از دو لاگر فشار خودکار در مناطق امیرالمؤمنین و مسکن مهر، داده‌های فلو متر خط انتقال و اندازه‌گیری‌های دستی فشار و دبی در نقاط مختلف شبکه بود. کالیبراسیون مدل در دو سطح ماکرو (تطبیق دبی خروجی مخزن) و میکرو (تطبیق فشار در گره‌های خاص) انجام گرفت. برای کالیبراسیون ماکرو، دبی خروجی مخزن با داده‌های تله‌متری مقایسه شد و برای کالیبراسیون میکرو،

نویسنده مسئول *

فشارهای ثبت شده توسط لاگرها با فشارهای شبیه سازی شده تطبیق داده شد. تحلیل حداقل جریان شبانه (ساعات ۱ تا ۵ بامداد) برای تخمین دبی نشت و تفکیک تلفات واقعی از ظاهری به کار رفت. ضریب امیتر و توان فشار بر اساس روش FAVAD (مطابق نشریه ۵۵۶ شرکت آب و فاضلاب) محاسبه شد، که در آن توان فشار برای ترک های طولی ۱/۵ فرض شد. ضرایب زبری لوله ها بر اساس جنس (GRP, PE, آذبت) و عمر لوله ها تعیین و در فرآیند کالیبراسیون اصلاح شد. آزمایش میدانی افزایش فشار در روزهای ۱۵ و ۱۶ آذر ۱۴۰۰ برای بررسی رابطه فشار و دبی انجام شد که طی آن فشار تنظیمی شیر فشارشکن از ۱/۱ به ۱/۹ بار افزایش یافت و سپس به ۱/۰ بار کاهش یافت. این آزمایش به تحلیل تأثیر فشار بر نشت و مصرف کمک کرد.

یافته ها: نتایج مدل سازی نشان داد که میانگین آب بدون درآمد در زون یک طبس حدود ۳۷/۵ درصد از آب ورودی به شبکه است، که بیش از ۹۰ درصد آن به نشت های فیزیکی (تلفات واقعی) و مابقی به تلفات ظاهری (خطاهای کنتور و مصارف ثبت نشده) اختصاص دارد. کالیبراسیون مدل هیدرولیکی با داده های مهر و آب ان ۱۴۰۰ نشان داد که دبی خروجی شبیه سازی شده با داده های واقعی تطابق خوبی دارد. اختلاف فشار بین مدل و داده های لاگرها در ساعات ۱۳ تا ۱۹ حدود یک متر بود، که احتمالاً ناشی از فرض الگوی مصرف یکنواخت، توزیع همگن نشت یا خطاهای کالیبراسیون ضرایب زبری است. تحلیل حداقل جریان شبانه نشان داد که دبی نشت در ساعات کم مصرف بین ۱۶ تا ۲۲ لیتر بر ثانیه متغیر است. ضریب امیتر برای مناطق امیرالمؤمنین و مسکن مهر به ترتیب ۰/۰۰۰۶۵۳ و ۰/۰۰۰۲۰۰ محاسبه شد، که نشان دهنده تفاوت در شدت نشت بین این مناطق است. آزمایش میدانی افزایش فشار از ۱/۱ به ۱/۹ بار نشان داد که دبی در ساعات اوج مصرف تا ۱/۲ لیتر بر ثانیه افزایش می یابد، در حالی که در ساعات کم مصرف این افزایش حدود ۰/۲ لیتر بر ثانیه بود. توان فشار شبکه بین ۱/۳۲ تا ۱/۵ برآورد شد، که با نوع شکستگی های غالب (ترک های طولی و جداسازی ها) همخوانی دارد. داده های تله متری مخزن نشان داد که دبی خروجی در تیرماه به ۶۲ لیتر بر ثانیه و در آبان به ۴۲ لیتر بر ثانیه می رسد، که تحت تأثیر شرایط اقلیمی (گرمای تابستان و استفاده از کولرهای آبی) و تنظیمات شیر فشارشکن است. تحلیل داده های مصرف مشترکین نشان داد که میانگین مصرف در دوره چهارم ۱۶/۸ لیتر بر ثانیه و در دوره پنجم ۱۳/۰۷ لیتر بر ثانیه بود، که کاهش در دوره پنجم احتمالاً ناشی از تغییرات فصلی است. بررسی ها نشان داد که کاربری مسکونی بیش از ۹۰ درصد مصرف را تشکیل می دهد. همچنین، افزایش سالانه مصرف با شیب ۱/۱۵ لیتر بر ثانیه و سرانه مصرف اضافی ۲۴/۹ لیتر به ازای هر مشترک، نشان دهنده رشد تقاضا در منطقه است.

نتیجه گیری: این پژوهش با استفاده از مدل سازی هیدرولیکی در نرم افزار WaterGEMS و کالیبراسیون دقیق با داده های میدانی، ابزار مؤثری برای تحلیل آب بدون درآمد در شبکه توزیع آب زون یک طبس ارائه کرد. میزان ۳۷/۵ درصدی آب بدون درآمد، با غلبه نشت های فیزیکی (بیش از ۹۰ درصد)، نیاز به اقدامات فوری برای مدیریت فشار و نشت یابی را برجسته می کند. نوآوری مطالعه در استفاده از روش FAVAD، تحلیل حداقل جریان شبانه و ارائه ضرایب امیتر منطقه ای است که برای مناطق مشابه با اقلیم خشک قابل تعمیم است. تنظیم دقیق شیر فشارشکن می تواند نشت را به طور قابل توجهی کاهش دهد، به ویژه در ساعات اوج مصرف که افزایش فشار تأثیر بیشتری دارد. محدودیت هایی نظیر کمبود داده های به روز، تعداد محدود تجهیزات اندازه گیری (تنها دو لاگر فشار و یک فلومتر) و فرض های ساده ساز مدل (مانند الگوی مصرف یکنواخت) دقت نتایج را تحت تأثیر قرار داد. پیشنهاد می شود برای بهبود دقت، داده های فشار و دبی در فصول مختلف با تجهیزات دقیق تر (مانند حسگرهای هوشمند) جمع آوری شود، که می تواند منجر به کاهش ۱۵-۲۵ درصدی تلفات واقعی از طریق پایش مستمر و تشخیص زودهنگام نشت شود. عملکرد شیرهای فشارشکن به طور مستمر پایش گردد، که بر اساس مطالعات مشابه، می تواند نشت را تا ۲۰-۳۰ درصد کاهش دهد. الگوریتم های یادگیری ماشین برای تخمین دقیق تر مصرف و نشت به کار گرفته شوند، که پتانسیل کاهش ۲۰ درصدی NRW را دارد. توسعه مناطق مدیریت شده و نصب تجهیزات پایش مستمر نیز می تواند به کاهش تلفات تا ۱۵-۲۰ درصد کمک کند. این یافته ها نه تنها برای بهبود بهره وری شبکه های آبرسانی در مناطق خشک مفید است، بلکه با اهداف نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک در حفاظت از منابع آبی و ارتقای مدیریت پایدار هم راستاست. نتایج این مطالعه می تواند به عنوان راهنمایی برای برنامه ریزی و اجرای اقدامات کاهش تلفات در سایر شهرهای کویری ایران و مناطق مشابه در سطح جهانی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی: مدل سازی هیدرولیکی، کالیبراسیون، ضریب امیتر، توان فشار، نشت یابی

مقدمه

آب، مایه حیات و یکی از اصلی‌ترین عناصر ضروری برای ادامه زندگی موجودات زنده بشمار می‌رود. در کشور ایران که در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته، بحران آب طی سال‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین چالش‌های ملی تبدیل شده است. افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی و محدودیت منابع آبی به‌ویژه در مناطق کویری، لزوم مدیریت بهینه شبکه‌های آبرسانی را بیش‌ازپیش برجسته ساخته است. یکی از مهم‌ترین معضلات بهره‌برداری در شبکه‌های توزیع، پدیده آب بدون درآمد است که شامل دو مؤلفه اصلی تلفات واقعی (نشت فیزیکی از لوله‌ها و اتصالات) و تلفات ظاهری (مصارف ثبت‌نشده ناشی از خطای کنتور، انشعابات غیرمجاز یا خطاهای ثبت داده) است. این بخش از آب، درآمدی برای شرکت‌های آب‌وفاضلاب ایجاد نمی‌کند و منجر به کاهش کارایی اقتصادی و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری می‌گردد.

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه مدل‌سازی و تحلیل آب بدون درآمد انجام شده است. برای نمونه، ثابت و همکاران (۲۰۲۰) با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان، محل و میزان نشت در شبکه آب گل‌بهار را تعیین کرده و نشان دادند که بخش عمده آب بدون درآمد مربوط به نشت‌های فیزیکی است. آن‌ها تأکید کردند که ترکیب کالیبراسیون دبی و فشار، امکان تفکیک نشت‌های کوچک، بزرگ و همچنین تلفات ظاهری را فراهم می‌سازد (۱). همچنین، در نشریه ۵۵۶ شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، بر اهمیت تعیین دقیق ضریب نشت و توان فشار شبکه تأکید شده و استفاده از مدل‌های تحلیلی مانند FAVAD برای بررسی رابطه نشت و فشار توصیه گردیده است. این یافته‌ها بیانگر آن است که تلفیق داده‌های میدانی با مدل‌سازی عددی، راهکاری مؤثر در شناسایی و کنترل تلفات شبکه محسوب می‌شود. از سوی دیگر، ابزارهای نرم‌افزاری متنوعی نیز توسعه یافته‌اند؛ ال‌واشالی (۲۰۲۰) در مروری بر ابزارهای نرم‌افزاری ارزیابی NRW، اهمیت نرم‌افزارهای شبیه‌سازی هیدرولیکی در تحلیل تلفات و کنترل کیفیت مدل‌های توزیع را برجسته کرده است (۲). همچنین، فاروک و همکاران (۲۰۲۳) با مرور سیستماتیک ادبیات، ۱۴ استراتژی اثربخش را برای کاهش NRW شامل مدیریت فشار، نشت‌یابی و بازسازی شبکه شناسایی کرده‌اند (۳). همچنین، رویکرد یکپارچه کالیبراسیون و برآورد تلفات که توسط برخی پژوهشگران ارائه شده، براساس ترکیب روش‌های دستی و خودکار با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی است؛ به‌طوری‌که در یک مطالعه اخیر، یک روش دومارحله‌ای مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای کالیبراسیون چندهدفه تقاضا و ضریب زبری در شبکه‌های توزیع پیشنهاد شده است (۴). افزون بر این، ایاد و همکاران (۲۰۲۱) رویکردی یکپارچه برای کالیبراسیون شبکه و کمی‌سازی تلفات ارائه کردند که با شبیه‌سازی فشار و جریان و بهینه‌سازی پارامترها، دقت تفکیک تلفات واقعی و ظاهری را بهبود می‌بخشد (۵).

مطالعات متعددی در سطح بین‌المللی نیز به توسعه مدل‌های هیدرولیکی و روش‌های کاهش آب بدون درآمد پرداخته‌اند. در مطالعه‌ای که بر روی منطقه DMA در جده، عربستان سعودی انجام شد، مدل هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار EPANET توسعه و با داده‌های SCADA کالیبره شد. سپس با به‌کارگیری شیرهای کاهش فشار و مدیریت فشار، توانستند

میزان نشت را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهند (۶). همچنین، تابش و همکاران (۲۰۰۸) یک رویکرد یکپارچه برای برآورد و تفکیک مؤلفه‌های تلفات واقعی و ظاهری ارائه کردند که با تلفیق بیلان سالانه و تحلیل حداقل جریان شبانه، توانست مکان‌یابی نشت را با استفاده از مدل هیدرولیکی و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام دهد (۷). همچنین، یو و همکاران (۲۰۲۱) رویکردی پایین‌به‌بالا ارائه کرده‌اند که با به‌کارگیری مدل آب‌سنجی و الگوریتم آدام، قابلیت تشخیص نشت و محل آن را در زمان نزدیک به واقعی بهبود می‌بخشد (۸). در مطالعات اخیر، مانند بررسی بهینه‌سازی مدیریت آب بدون درآمد (۹) و ابزار NRW-Smart برای شبیه‌سازی هیدرولیکی (۱۰)، بر اهمیت مدل‌سازی هیدرولیکی برای کاهش تلفات تأکید شده است. علاوه بر مدل‌سازی، مدیریت فشار به عنوان راهکاری مؤثر در کاهش نشت مورد توجه است؛ برای نمونه، در مطالعه‌ای در ترکیه، کاهش فشار ورودی شبکه از ۷۰ متر به ۴۵ متر منجر به کاهش ۱۹٪ در آب بدون درآمد شد که اعتبار روش مدیریت فشار در عمل را نشان می‌دهد (۱۱).

ارزیابی هیدرولیکی شبکه توزیع آب شهر صالح‌آباد (استان ایلام) با هدف نشت‌یابی و کاهش هدررفت آب توسط عبداللّهی و همکاران (۲۰۲۱) انجام شد (۱۲). در این مطالعه با تلفیق داده‌های میدانی، شبیه‌سازی در WaterGEMS و GIS، سه نقطه اصلی شکستگی شناسایی و با اقدام اصلاحی، کاهش حدود ۲۰٪ در میزان آب بدون درآمد به دست آمد.

در مطالعه‌ای توسط میسر جانی و همکاران (۲۰۲۱) مدل‌سازی هیدرولیک جریان یک شبکه واقعی با نرم‌افزار هیدرولیکی WaterGEMS و حل معکوس معادلات جریان، با داشتن مقادیر اندازه‌گیری شده فشار در تعدادی از گره‌های شبکه، پیش‌بینی محل و میزان نشت موجود در شبکه‌های توزیع آب شهر محی‌آباد واقع در استان کرمان انجام شد. ابتدا مدل هیدرولیکی شبکه مورد بررسی در نرم‌افزار تحلیل هیدرولیکی تهیه و کالیبره شده و مقدار نشت‌های موجود برداشت و سپس با تحلیل شبکه برای حالات و مقادیر مختلف وجود نشت‌های فرضی، مقادیر فشار در گره‌های مختلف شبکه محاسبه شد. در مرحله دوم با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، پس از آموزش شبکه، با ارائه فشارهای اندازه‌گیری شده در برخی از گره‌های شبکه به عنوان داده‌های ورودی به شبکه عصبی، موقعیت و مقدار نشت‌های احتمالی موجود، پیش‌بینی شد. بررسی و مقایسه نتایج حاصل از تحلیل هیدرولیکی شبکه و شبکه عصبی مصنوعی نشان‌دهنده دقت بسیار بالای شبکه‌های عصبی مصنوعی در تخمین مقدار و موقعیت نشت‌ها بود (۱۳).

دینی و همکاران (۲۰۲۳) مدل هیدرولیکی و ارزیابی قابلیت اطمینان در شبکه توزیع آب شهر اشنویه را تهیه کردند. آن‌ها با شبیه‌سازی در EPANET و تحلیل معیارهای NPRI، راهکارهای کاهش نشت و بهبود فشار را در یک مطالعه موردی شهری ارائه دادند (۱۴).

محققان با استفاده از قابلیت‌های مدل تحلیل هیدرولیکی Epanet2.10، روش جدیدی در محاسبه میزان نشت گره‌ها و لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب شهری ارائه کردند (۱۵). در این روش با اندازه‌گیری جریان حداقل شبانه در یک منطقه، نشت کلی شبکه بر اساس استانداردهای انجمن بین‌المللی آب مشخص می‌شود. سپس با تقسیم مصرف هر گره به دو بخش مصارف غیر وابسته و وابسته به فشار (نشت) و شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه به وسیله مدل تحلیل هیدرولیکی Epanet 2.10، مقدار نشت کل شبکه با توجه به میزان فشار گرهی، در هر گره توزیع و سپس نشت مربوط به هر لوله محاسبه می‌شود. آنگاه با استفاده از نرم‌افزار تهیه‌شده به بررسی اثرات مدیریت نشت در شبکه پرداخته شده و در نهایت شاخص‌های نشت تعیین می‌شود. در ادامه با استفاده از نتایج به دست آمده در یکی از پایلوت‌های آب بدون درآمد کشور (واقع در استان ایلام)، قابلیت‌های مدل ارائه شده ارزیابی شده است.

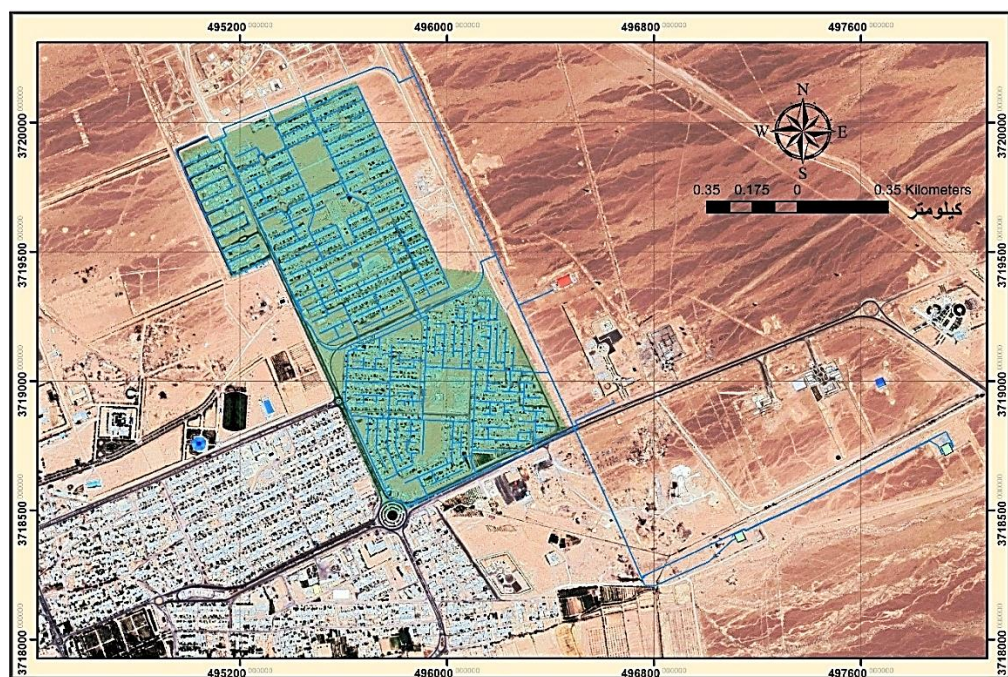
بررسی‌ها نشان داده‌اند که میزان آب بدون درآمد در بسیاری از شهرهای ایران و جهان، به‌ویژه در مناطق دارای زیرساخت فرسوده یا نظارت ضعیف، درصد قابل توجهی از آب توزیعی را شامل می‌شود. به همین دلیل، ارزیابی دقیق و کاهش آب بدون

درآمد به یکی از مهم‌ترین اهداف شرکت‌های آب‌وفاضلاب و نهادهای برنامه‌ریز تبدیل شده است. تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند EPANET و WaterGEMS، امکان مدل‌سازی دقیق، کالیبراسیون بر مبنای داده‌های میدانی و برآورد مؤلفه‌های آب بدون درآمد را فراهم ساخته است. شهر طبس، یکی از بزرگ‌ترین شهرهای استان خراسان جنوبی، با روند روبه‌رشد جمعیت و توسعه معادن، با چالش تأمین پایدار آب شرب مواجه است. در چنین شرایطی، بررسی دقیق وضعیت شبکه، تحلیل میزان آب بدون درآمد و مدل‌سازی نشت از اولیتهای اساسی برای برنامه‌ریزی بلندمدت بشمار می‌رود. پژوهش حاضر با هدف مدل‌سازی هیدرولیکی، کالیبراسیون و تحلیل آب بدون درآمد در زون یک شبکه توزیع آب شهر طبس گلشن انجام شده است. در این راستا، ابتدا مدل عددی شبکه در محیط WaterGEMS توسعه‌یافته و سپس با استفاده از داده‌های دبی، فشار و مصارف مشترکین در بازه زمانی مهر تا دی ۱۴۰۰، فرآیند کالیبراسیون انجام شده است. تمرکز اصلی این تحقیق بر تفکیک دقیق تلفات واقعی از ظاهری با استفاده از روش‌های بیلان آبی، تحلیل حداقل جریان شبانه و تعیین ضرایب امیتر و توان فشار بر مبنای روش FAVAD بوده است. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند راهگشای بهبود عملکرد شبکه، کاهش تلفات و ارتقای بهره‌وری سیستم آبرسانی در مناطق مشابه باشد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد بررسی

شهرستان طبس، پهناورترین شهرستان کشور، در استان خراسان جنوبی و در قلب فلات مرکزی ایران واقع شده است. مختصات جغرافیایی زون یک طبس بر اساس طول و عرض جغرافیایی و سیستم مختصات جهانی UTM در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت زون یک شهر طبس.

Figure 1- Location of Zone 1 in Tabas City.

بیش از ۶۰ درصد مساحت این شهرستان را بیابان‌ها تشکیل می‌دهند و حدود ۱۰ درصد از کل بیابان‌های کشور در این محدوده قرار دارد. اقلیم منطقه گرم و خشک بوده و میزان بارندگی بسیار اندک و نامنظم است. تبخیر بالا به علت تابش شدید آفتاب، دمای زیاد، وزش باد و رطوبت پایین، موجب تشدید بحران منابع آبی در منطقه شده است. از این‌رو، بررسی و مدیریت بهینه شبکه‌های آبرسانی در طبس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در نخستین گام از مدل‌سازی شبکه، مدل هیدرولیکی زون یک با بهره‌گیری از نقشه‌های به‌روز شده در نرم‌افزارهای AutoCAD و GIS تهیه شد. این نقشه‌ها شامل اطلاعات فنی مربوط به لوله‌ها، شیرآلات و مخازن بوده و در شکل (۲) نمایش داده شده‌اند.

یکی از اجزای کلیدی مدل، اعمال دقیق الگوی مصرف مشترکین است. در این راستا، اطلاعات مربوط به ۲۵۸۱ مشترک دارای مختصات جغرافیایی استخراج شد. در دوره چهارم سال ۱۴۰۰، اطلاعات مصرف ۲۲۱۴ مشترک ثبت گردید و متوسط مصرف در این دوره برابر با ۱۶/۸ لیتر بر ثانیه محاسبه شد. در دوره پنجم، با اضافه شدن ۱۱ مشترک جدید، متوسط مصرف به ۱۳/۰۷ لیتر بر ثانیه کاهش یافت.

تحلیل مصرف بلندمدت در بازه زمانی ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۰ نشان داد که مصرف در ماه‌های گرم به حداکثر ۲۳ لیتر بر ثانیه و در ماه‌های سرد به حداقل ۱۱ لیتر بر ثانیه رسیده است.



شکل ۲- خطوط لوله و حوضچه‌های شیرهای قطع و وصل زون یک.

Figure 2- Pipelines and Valve Chambers of Zone.

روند کلی افزایشی مصرف، با شیب حدود ۱/۱۵ لیتر بر ثانیه در سال، حاکی از رشد تدریجی مصرف در منطقه است. علاوه بر این، بررسی سرانه مصرف نشان داد که به‌طور میانگین، در هر دوره ۴/۱۵ لیتر بر روز به مصرف هر مشترک افزوده شده که معادل افزایش سالانه حدود ۲۴/۹ لیتر به‌ازای هر مشترک است. این روند می‌تواند ناشی از تغییر در الگوهای مصرف، افزایش جمعیت یا عوامل اقلیمی باشد و در مدیریت تقاضا باید مدنظر قرار گیرد.

در دوره چهارم، بیشترین مصرف مربوط به کاربری مسکونی با متوسط ۱۶/۸ لیتر بر ثانیه بود. در دوره پنجم نیز از مجموع ۱۳/۰۷ لیتر بر ثانیه مصرف، ۱۲/۴۴ لیتر بر ثانیه به کاربری مسکونی اختصاص داشت و سهم سایر کاربری‌ها کم بود.

در زون یک، تنها یک شیر فشارشکن در ورودی شبکه اصلی وجود دارد که فشار تنظیمی آن به مدل داده شده است. این فشار تنظیمی بر اساس کالیبراسیون مدل و بسته به شرایط مصرف، به‌ویژه در ماه‌های کمبود آب، تغییر می‌کند. برای این دوره‌ها، فشار شیر فشارشکن ۵ متر کاهش یافته است.

پمپ شناور شماره ۳۷۴/۲ با توان ۲۴/۵ کیلووات و آبدهی ۴۲ لیتر بر ثانیه، آب را از مخزن ۵۰۰۰ مترمکعبی شهر طبس به مخزن ۵۰۰۰ مترمکعبی زون یک منتقل می‌کند. لوله‌ها یکی از اجزای اصلی مدل هیدرولیکی هستند که مشخصات دقیق آن‌ها

مانند جنس، قطر و زبری باید به درستی در نظر گرفته شود. تفاوت بین قطر اسمی و قطر داخلی لوله‌ها می‌تواند تأثیر زیادی بر نتایج مدل داشته باشد. زبری لوله‌ها نیز در فرایند کالیبراسیون دقیق‌تر محاسبه می‌شود. محدوده زون یک دارای دو مخزن است: یک مخزن تعادلی (مخزن زون یک) و یک مخزن ثابت ۵۰۰۰ متر مکعبی (مخزن آب منطقه‌ای). آب مورد نیاز مخزن تعادلی از مخزن ثابت به روش پمپاژ تأمین می‌شود و مخزن زون یک مسئول آبرسانی به شبکه زون یک است.

روش مورد استفاده

در این پژوهش، به‌منظور کالیبراسیون مدل هیدرولیکی شبکه توزیع آب زون یک شهر طبس گلشن، از ترکیب روش بیلان آب و تحلیل داده‌های میدانی بهره گرفته شده است. رویکرد بیلان، با هدف برآورد دقیق میزان آب بدون درآمد و تفکیک آن به مؤلفه‌های تلفات واقعی و ظاهری، مبنای اصلی فرآیند ارزیابی و مدل‌سازی قرار گرفت. به این منظور، مجموعه‌ای از داده‌های میدانی شامل دبی، فشار، و عملکرد شیر فشارشکن جمع‌آوری و تحلیل گردید. جزئیات منابع داده به شرح زیر است:

- ۱- سیستم تله‌متری مخزن: دبی خروجی از مخزن ذخیره‌ساز اصلی با استفاده از سیستم تله‌متری، در فواصل زمانی چند دقیقه‌ای و غیرثابت، ثبت و به سامانه مرکزی منتقل شد. این داده‌ها به‌عنوان مرجع اصلی برای تحلیل الگوی ورودی به شبکه و برآورد کل آب واردشده به سیستم مورد استفاده قرار گرفتند.

- ۲- فشارسنج‌های خودکار (لاگر): دو دستگاه لاگر فشار در نقاط کلیدی شبکه نصب شد که به‌صورت ساعتی، فشار لحظه‌ای را ثبت می‌نمودند. این داده‌ها در بررسی پروفیل فشار، تعیین نوسانات فشاری ناشی از عملکرد تجهیزات کنترلی و کالیبراسیون ضرایب مدل، نقشی کلیدی داشتند.

- ۳- فلومتر خط انتقال: یک فلومتر در یکی از خطوط اصلی ورودی آب به فاز دو منطقه امیرالمؤمنین (ع) نصب گردید که دبی عبوری را در فواصل زمانی متغیر و چند نوبت در هر ساعت ثبت می‌کرد. داده‌های این فلومتر در تحلیل دقیق‌تر الگوی مصرف منطقه‌ای و بررسی تأثیر تغییرات فشار بر جریان عبوری به‌کار گرفته شد.

- ۴- برداشت‌های دستی: در سه نقطه از شبکه فشار و در یک نقطه دبی به‌صورت دستی اندازه‌گیری گردید. این داده‌ها در طی دو روز برداشت شدند و علی‌رغم محدودیت‌های ناشی از دقت ابزار و فقدان پیوستگی زمانی، به‌عنوان مبنایی برای تعیین حدود فشار و دبی در نقاط مورد نظر در فرایند انطباق مدل استفاده شدند.

- ۵- تحلیل عملکرد شیر فشارشکن: بررسی‌های اولیه نشان داد که شیر فشارشکن اصلی شبکه عملکرد پایداری در تنظیم فشار ندارد. به همین منظور، یک فشارسنج به‌مدت دو روز در محل خروجی شیر نصب شد تا نوسانات فشار به‌صورت مستند ثبت گردد. این داده‌ها در تحلیل پویایی فشار و بررسی سهم نوسانات فشار در افزایش نشت به‌کار رفتند.

در ادامه، با استفاده از روش بیلان، حجم کل شد آب واردشده به شبکه با مجموع مصارف ثبت‌شده مشترکین مقایسه تا مقدار آب بدون درآمد برآورد و سپس با مدل‌سازی هیدرولیکی در نرم‌افزار WaterGEMS، به تفکیک مؤلفه‌های آن پرداخته شد. ترکیب داده‌های میدانی و تحلیل عددی، امکان تخمین دقیق‌تر ضرایب امیتر و توان فشار، و همچنین بهینه‌سازی ضرایب زبری لوله‌ها را در مرحله کالیبراسیون فراهم ساخت.

به طور خلاصه مراحل روش مورد استفاده به‌صورت زیر است:

- ۱- پیش‌پردازش داده‌ها: در گام نخست، به‌منظور تحلیل دقیق شبکه، اطلاعات پایه‌ای شامل نقشه‌های به‌روزشده شبکه توزیع، اطلاعات مشترکین، نوع لوله‌ها، قطر، جنس، زبری و وضعیت شیرآلات از شرکت آب و فاضلاب طبس دریافت شد. اطلاعات مصارف دوره‌های چهارم و پنجم سال ۱۴۰۰ برای ۲۶۴۰ مشترک شامل متوسط مصرف، کاربری (مسکونی، اداری، تجاری، فضای سبز و غیره)، و مکان‌یابی دقیق بر پایه سیستم GIS جمع‌آوری گردید. مصارف دوره‌ای به مصرف ساعتی تبدیل و به مدل وارد شد.

۲- مدل سازی هیدرولیکی: مدل سازی هیدرولیکی شبکه زون یک در نرم افزار WaterGEMS صورت گرفت. داده های نقشه ای با فرمت AutoCAD و GIS به محیط نرم افزار منتقل شده و گره ها، لوله ها، شیرآلات و مخازن بر اساس اطلاعات واقعی تعریف شدند. به منظور تعیین ارتفاع گره ها، نقشه های توپوگرافی منطقه با دقت ۱ متری استفاده شد. اطلاعات پمپاژ، فشار شیر فشارشکن و وضعیت باز/ بسته بودن شیرهای قطع و وصل نیز به مدل اضافه شدند.

۳- کالیبراسیون مدل با دبی و فشار: کالیبراسیون مدل در دو سطح صورت گرفت: ماکرو کالیبراسیون: دبی خروجی مخزن که از سیستم تله متری به دست آمده بود، با دبی شبیه سازی شده در مدل مقایسه شد. با میانگین گیری داده های ساعتی، تطابق دقیق در دو ماه مهر و آبان حاصل شد. میکرو کالیبراسیون: داده های فشار از دو لاگر فشار خودکار (در مناطق امیرالمؤمنین و مسکن مهر) و فشارسنج های دستی مورد استفاده قرار گرفت. با تنظیم ضرایب زبری لوله ها و تراز ارتفاعی، فشار مدل با فشار واقعی تطبیق داده شد. در ماکرو کالیبراسیون، دبی خروجی مخزن با داده های تله متری مقایسه و با حل سیستم معادلات غیرخطی با استفاده از الگوریتم گرادینت در WaterGEMS تطبیق داده شد. در میکرو کالیبراسیون، فشارها با استفاده از معادله انرژی در حلقه ها تنظیم گردیدند.

۴- تفکیک تلفات واقعی و ظاهری: برای تفکیک تلفات واقعی از ظاهری، از روش حداقل جریان شبانه استفاده شد. در این روش:

ابتدا میزان دبی ورودی در ساعات ۱ تا ۵ بامداد ثبت شد. سپس با اعمال مقدار مصرف پایه شبانه (برآورد شده برای منطقه)، دبی نشت به دست آمد. ۵- محاسبه ضریب امیتر و توان فشار (بر اساس روش FAVAD): بر مبنای رابطه نشت-فشار در مدل FAVAD (برگرفته از نشریه ۵۵۶ شرکت آب و فاضلاب کشور)، ضریب امیتر (C) و توان فشار (N) تعیین شد: باتوجه به نوع شکستگی ها (ترک های طولی، جداشدگی و ضربه قوچ)، مقدار توان فشار برابر ۱/۵ در نظر گرفته شد. ضریب امیتر از روی نمودار تغییرات فشار و جریان در ساعات کم مصرف به دست آمد و به صورت یکنواخت در مدل اعمال شد.

۶- اعمال ضرایب زبری: ضرایب زبری اولیه برای لوله ها بر اساس جنس (PE، GRP، آزیست) و عمر لوله تعیین شد. سپس در مرحله کالیبراسیون، این ضرایب با هدف انطباق بهتر فشار مدل و فشار واقعی اصلاح گردیدند. زبری برخی لوله های فرسوده آزیستی به صورت دستی افزایش داده شد.

مدل سازی هیدرولیکی شبکه بر اساس معادلات حاکم بر جریان سیال در شبکه های لوله ای انجام شد. نرم افزار WaterGEMS از موتور محاسباتی EPANET برای حل معادلات استفاده می کند. معادله حفظ جرم در هر گره j به صورت زیر اعمال می شود:

$$\sum Q_{in,j} = \sum Q_{out,j} + D_j \quad (1)$$

که در آن $Q_{in,j}$ جریان ورودی به گره j ، $Q_{out,j}$ جریان خروجی از گره j ، و D_j تقاضای مصرف در گره j است. معادله حفظ انرژی برای هر لوله i بین گره های m و n بر اساس فرمول Darcy-Weisbach محاسبه می شود:

$$h_{L,i} = f_i \cdot \frac{L_i}{D_i} \cdot \frac{V_i^2}{2g} \quad (2)$$

که $h_{L,i}$ افت هد در لوله i ، f_i ضریب اصطکاک (بر اساس فرمول Swamee-Jain محاسبه شده)، L_i طول لوله، D_i قطر لوله، V_i سرعت جریان و g شتاب گرانش است. برای لوله‌های قدیمی‌تر، فرمول Hazen-Williams نیز قابل استفاده است:

$$h_{L,i} = 10.67 \cdot \frac{L_i}{C_i^{1.852}} \cdot \frac{Q_i^{1.852}}{D_i^{4.87}} \quad (3)$$

که C_i ضریب Hazen-Williams و Q_i نرخ جریان در لوله i است. برای مدل‌سازی نشت، از رویکرد FAVAD استفاده شد که رابطه نشت با فشار را به صورت $L = C \cdot P^N$ توصیف می‌کند که L نرخ نشت، C ضریب امیتر، P فشار متوسط و N توان فشار است. در این مطالعه، $N = 1.5$ برای ترک‌های طولی فرض شد و C بر اساس داده‌های میدانی محاسبه گردید. همچنین، کالیبراسیون با روش حداقل مربعات خطا برای تنظیم ضرایب زبری و امیتر انجام شد.

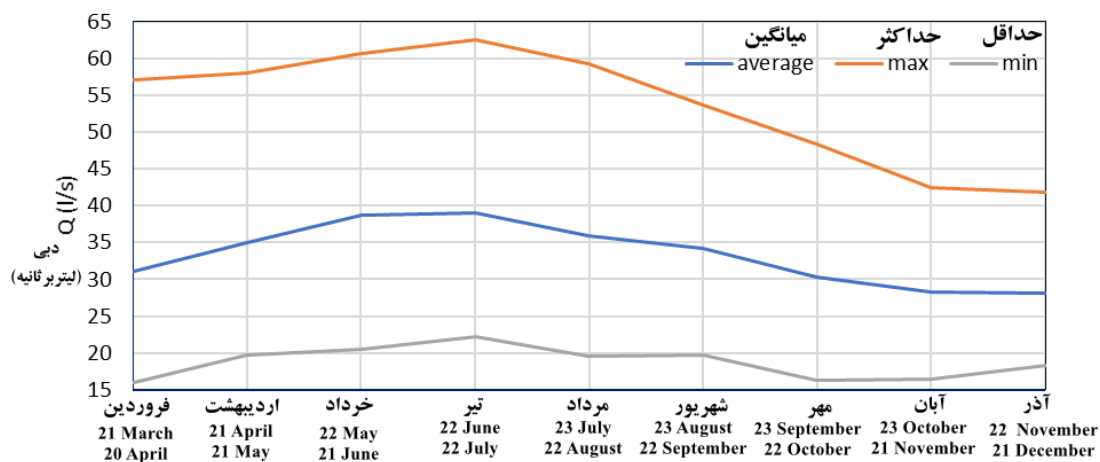
نتایج و بحث

سیستم تله‌متری مخزن

مخزن ۵۰۰۰ مترمکعبی زون یک مجهز به یک دبی‌سنج متصل به سامانه تله‌متری است که اطلاعات خروجی را به صورت زمان‌بندی شده و با فواصل متغیر ارسال می‌کند. داده‌های خروجی این مخزن از سال ۱۳۹۷ تا آذر ۱۴۰۰ گردآوری شده و باتوجه به انجام عملیات فشارسنجی و دبی‌سنجی در مهر و آبان ۱۴۰۰، فرآیند کالیبراسیون مدل هیدرولیکی برای این بازه زمانی انجام خواهد شد.

در بازه زمانی ۲۳ تیر تا ۳۱ شهریور ۱۴۰۰، نوسانات جریان ورودی به شبکه توزیع بررسی شد. در تیرماه، دبی خروجی مخزن در برخی مواقع تا ۶۱ لیتر بر ثانیه نیز افزایش یافته است. کاهش ناگهانی دبی از حدود ۵ تیر به علت کاهش فشار تنظیمی شیر فشارشکن بوده و افت جریان در اواخر مرداد نیز به دلیل ایام تاسوعا و عاشورا رخ داده است.

در ماه‌های مهر و آبان نیز بررسی داده‌های ساعتی دبی خروجی مخزن نشان می‌دهد که در ساعات کم‌مصرف شبانه، دبی بین ۱۷ تا ۲۵ لیتر بر ثانیه و در ساعات پیک مصرف بین ۳۱ تا ۴۷ لیتر بر ثانیه در نوسان بوده است. در این دوره، حداکثر دبی ثبت شده ۴۸/۳۶ و حداقل آن ۱۶/۳ لیتر بر ثانیه بوده است.



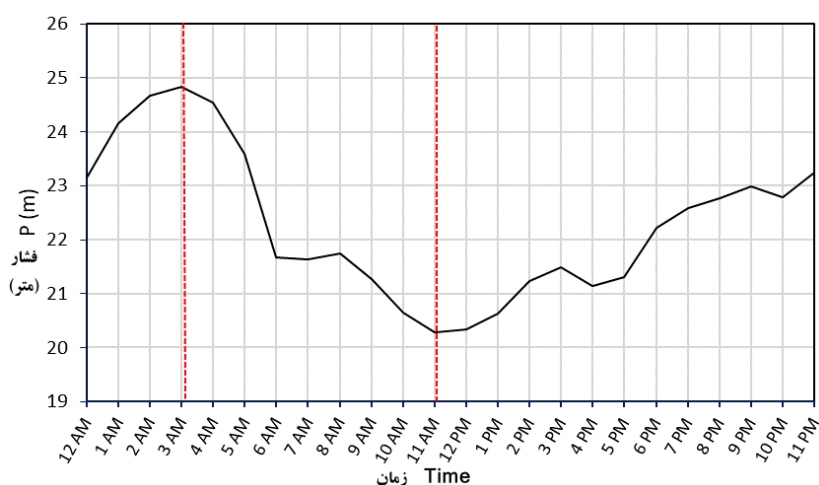
شکل ۳- ماکزیمم مطلق، مینیمم مطلق و میانگین خروجی مخزن در ماه‌های سال ۱۴۰۰.

Figure 3- Absolute Maximum, Absolute Minimum, and Average Tank Outflow in the Months of 2021.

شکل ۳ مقادیر ماکزیمم مطلق، مینیمم مطلق و متوسط ماهانه دبی خروجی مخزن را نشان می دهد. یک دبی سنج در خروجی مخزن و یک فلومتر اولتراسونیک روی لوله آزیست با قطر ۱۵۰ میلیمتر استفاده شده است. بیشترین دبی خروجی مربوط به تیرماه و کمترین مقدار در آبان و آذر ثبت شده است. دبی حداقل شبانه در ماههایی مانند فروردین، مهر و آبان حدود ۱۶ لیتر بر ثانیه و در تیر تا ۲۲ لیتر بر ثانیه بوده که به دلیل گرمای شبانه و استفاده از کولرهای آبی افزایش یافته است. دبی خروجی از مخزن را به صورت پیوسته داریم و مینیمم مربوط یکی دو ساعت بعد از نیمه شب تا حدود یک ساعت مانده به اذان است. بجز این در نقاط دبی سنجی پیوسته انجام شده و مینیمم بر اساس آن برداشت شده است. کاهش دبی شبانه در مرداد و شهریور به دلیل کاهش تنظیم شیر فشارشکن، و افزایش آن در آذر به دلیل عملکرد نامناسب شیر بوده است. دبی پیک ساعتی ماهانه بین حدود ۶۲ لیتر بر ثانیه (تیرماه) و ۴۲ لیتر بر ثانیه (آبان و آذر) در نوسان بوده است. میانگین دبی ماهانه نیز از حدود ۲۸ لیتر بر ثانیه (آبان) تا ۳۹ لیتر بر ثانیه (تیر) متغیر بوده است. این نتایج نشان دهنده تأثیر قابل توجه شرایط اقلیمی و عملکرد تجهیزات کنترل فشار بر الگوی مصرف و نوسانات دبی خروجی مخزن می باشد.

لاگر فشار شماره ۳ و ۴

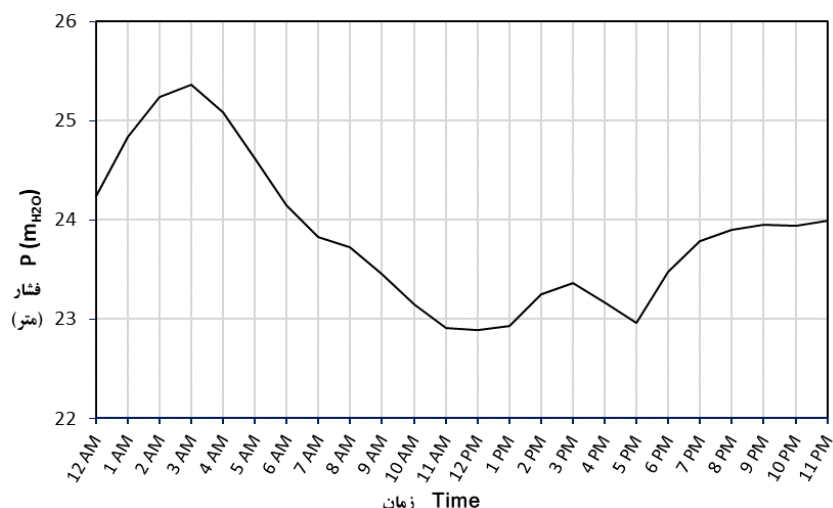
برای کالیبراسیون مدل هیدرولیکی، داده های فشارسنجی از دو لاگر فشار نصب شده در شبکه مورد استفاده قرار گرفت. لاگر شماره ۳ از تاریخ ۳۰ آبان ۱۴۰۰ در محدوده فاز ۲ منطقه امیرالمؤمنین نصب شد و به صورت ساعتی داده ثبت می کند (شکل ۴). این لاگر با باتری تغذیه می شود و نیاز به شارژ دوره ای دارد. هرچند داده های آن با بازه زمانی مهر و آبان هم پوشانی نداشت، این مغایرت در مرحله میکرو کالیبراسیون اصلاح گردید. تحلیل داده های ثبت شده نشان داد که بیشینه فشار در ساعات بامداد و کمینه آن در ساعات میانی روز رخ می دهد، اما تطابق دقیقی با الگوی دبی خروجی از مخزن مشاهده نشد که می تواند نشان دهنده خطای داده یا رفتار غیرعادی در شبکه باشد.



شکل ۴- فشار میانگین ساعتی در لاگر شماره ۳.

Figure 4- Average Hourly Pressure at Logger No. 3.

در مقابل، لاگر فشار شماره ۴ که از ۲۳ تیر ۱۴۰۰ در محدوده مسکن مهر و با تغذیه برق مستقیم نصب شده، در هر ساعت چهار داده ثبت می کند (شکل ۵). داده های این لاگر هم زمان با دوره مصرفی مدل بوده و از دقت زمانی بالاتری برخوردار است. از این رو، اطلاعات آن برای تحلیل نوسانات فشار در بازه مهر و آبان قابل اطمینان تر است و نقش کلیدی در کالیبراسیون مدل ایفا کرده است.



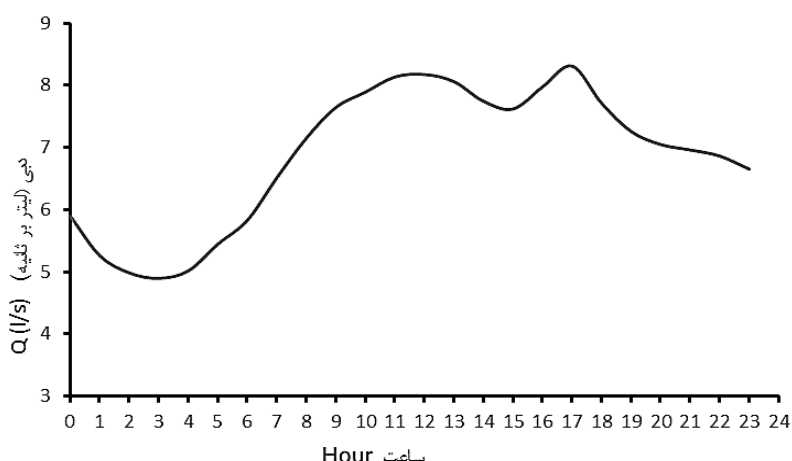
شکل ۵- فشار میانگین ساعتی در لاگر شماره ۴.

Figure 5- Average Hourly Pressure at Logger No. 4.

فلومتر امیرالمؤمنین (ع)

فلومتر نصب شده در محدوده منطقه امیرالمؤمنین (ع) به عنوان تنها دبی سنج اتوماتیک شبکه، نقش کلیدی در کالیبراسیون مدل ایفا می کند. این تجهیز با ثبت مستمر داده های دبی، اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت عملکرد شیرها، زبری لوله ها، میزان نشت و مصارف غیرمجاز فراهم می سازد. داده های ثبت شده در بازه ۱۷ شهریور تا ۲۵ آبان ۱۴۰۰ نشان دهنده نوسان جریان در محدوده ۵ تا ۸ لیتر بر ثانیه است. همچنین در بازه ۱۱ تا ۱۸ آذر، افزایش حدود ۲ لیتر بر ثانیه در دبی به دلیل تغییر فشار تنظیمی شیر فشارشکن در تاریخ های ۱۵ و ۱۶ آذر ثبت شده است.

تحلیل الگوی ساعتی دبی در مهر و آبان نشان می دهد که جریان حداقلی در ساعات شبانه حدود ۵ لیتر بر ثانیه بوده و در ساعات ۱۲ ظهر و ۵ عصر به حداکثر مقدار حدود ۸ لیتر بر ثانیه می رسد. این الگوها به خوبی بیانگر تأثیر نوسانات مصرف روزانه و تنظیمات شیر فشارشکن بر رفتار هیدرولیکی شبکه هستند و در کالیبراسیون مدل مورد استفاده قرار گرفته اند (شکل ۶).



شکل ۶- مقادیر دبی میانگین فلومتر محدوده امیرالمؤمنین در مهر و آبان.

Figure 6- Average Flow Rates of the Flowmeter in the Amiralmomenin Area for Mehr and Aban.

محاسبه ضریب امیتر بر اساس روش FAVAD

یکی از عوامل کلیدی در برآورد میزان نشت، نوع شکستگی لوله است. در مواردی که نشت ناشی از سوراخ شدگی باشد، سطح مقطع نشت با تغییرات فشار تغییر چندانی نمی کند و ضریب امیتر به مقدار ۰/۵ نزدیک می شود. اما در مواردی مانند ترک های طولی، جداشدگی قطعات یا گردبر شدن، سطح مقطع نشت با افزایش فشار گسترش می یابد و در نتیجه، توان فشار

تا مقدار ۱/۵ نیز می‌تواند افزایش یابد. به همین دلیل، بررسی نوع رخدادهای نشت در شبکه می‌تواند راهنمای مناسبی برای تعیین ضریب توان فشار باشد.

مطابق روش FAVAD که در نشریه ۵۵۶ مطرح شده است، با تحلیل رخدادهای نشت در شبکه و تعیین نوع آن‌ها، می‌توان عدد توان فشار را برآورد کرد. در همین راستا، داده‌های مربوط به اتفاقات ثبت‌شده در زون یک طبس در سال ۱۳۹۸ به‌عنوان مرجع تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است.

وابستگی نشت به فشار: دیدگاه نظری و تجربی

وابستگی میان نشت و فشار در شبکه‌های توزیع آب، یک مفهوم شناخته‌شده در مهندسی آب است. از دیدگاه نظری، اگر منفذ نشت سطح مقطع ثابتی داشته باشد، رابطه دبی نشت با فشار به‌صورت جذر فشار تعریف می‌شود:

$$Q = kP^{0.5} \quad (4)$$

اما نتایج برخی مطالعات میدانی در کشورهای مختلف از جمله ژاپن و انگلستان نشان داده است که این رابطه در عمل معمولاً به‌صورت توانی (نه جذری) ظاهر می‌شود. به‌ویژه در شرایطی که سطح مقطع نشت متغیر باشد (مانند ترک‌های پویا)، افزایش فشار منجر به افزایش چشمگیرتری در دبی نشت می‌گردد.

در قالب مطالعات انجام‌شده در بازه زمانی ۱۹۷۹ تا ۱۹۹۷، رابطه ۵ برای بررسی اثر فشار بر نشت معرفی شده است:

$$L_1 = L_0 \times \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^N \quad (5)$$

در این رابطه، L_0 و L_1 به‌ترتیب نرخ نشت در فشارهای P_0 و P_1 هستند و توان N به‌عنوان پارامتر کلیدی در تعیین حساسیت نشت نسبت به فشار شناخته می‌شود. در حالت ایده‌آل که سطح نشت ثابت باشد، N برابر با ۰/۵ است. اما با در نظر گرفتن مصرف معقول شبانه و رفتار واقعی شبکه، مقدار این توان در مطالعات میدانی بین ۰/۵ تا ۲ گزارش شده است.

برای بررسی رفتار واقعی شبکه زون یک طبس، نوع شکستگی‌های ثبت‌شده در مرداد و شهریور ۱۳۹۸ تحلیل شد. تمام رخدادهای ثبت‌شده مربوط به ترک‌های طولی یا جداشدگی لوله‌ها بوده‌اند که در دسته نشت با سطح مقطع متغیر قرار می‌گیرند؛ بنابراین، با استناد به روش FAVAD، مقدار توان N برابر ۱/۵ برای این منطقه در نظر گرفته شده است.

باین‌حال، باید توجه داشت که گزارش‌های اتفاقات فقط شامل نشت‌های قابل‌توجه هستند و نشت‌های ریزتر از قبیل نشتی در اتصالات، درزها و انشعابات معمولاً ثبت نمی‌شوند. از طرفی، در داخل منازل مشترکین نیز ممکن است نشت‌هایی وجود داشته باشد که اگرچه به‌عنوان مصرف ثبت می‌شوند، ولی رفتار فشاری مشابه نشت دارند. همچنین، مواردی مانند چکه‌کردن شیرهای آب نیز وجود دارد که مشابه اوریفیس عمل می‌کنند و رابطه فشار-دبی آن‌ها به توان ۰/۵ نزدیک است.

بنابراین، گرچه عدد ۱/۵ به‌عنوان مقدار حداکثری توان فشار در نظر گرفته شده، اما در عمل، ترکیب نشت‌های مختلف در شبکه باعث می‌شود که مقدار واقعی N کمتر از این مقدار باشد. در نتیجه، این عدد صرفاً به‌عنوان یک حد بالایی در مدل‌سازی لحاظ می‌گردد.

آزمایش میدانی افزایش فشار شبکه

در روزهای ۱۵ و ۱۶ آذر ۱۴۰۰، فشار تنظیمی شیر فشارشکن شبکه دستخوش تغییراتی شد. مقدار اولیه فشار شبکه، بر اساس فشارسنج نصب‌شده روی این شیر، ۱/۱ بار بود. تغییرات اعمال‌شده به شرح زیر است:

۱۵ آذر، ساعت ۱۳:۵۰: فشار از ۱/۱ بار به ۱/۱۵ بار افزایش یافت.

۱۶ آذر، ساعت ۱۴:۳۵: فشار مجدداً به ۱/۹ بار افزایش داده شد.

۱۷ آذر، ساعت ۱۴:۵۰: فشار تنظیمی کاهش یافته و به مقدار ۱ بار بازگردانده شد.

با افزایش فشار تنظیمی، میزان جریان ورودی به شبکه نیز تغییر کرده که مقادیر آن در جدول (۱) ارائه شده است. با این حال، فشارسنج خروجی شیر فشارشکن دارای خطا بوده است. برای افزایش دقت تحلیل، در محاسبات این بخش، داده‌های اندازه‌گیری شده توسط لاگرهای فشار شماره ۳ و ۴ مورد استفاده قرار گرفته است. در اثر تغییرات فشار تنظیمی شیر فشارشکن، مقدار دبی افزایش یافته است و پس از کاهش مجدد فشار به مقادیر اولیه نزدیک شده است.

جدول ۱- تغییرات مقدار دبی خروجی مخزن در اثر تغییر فشار تنظیمی شیر فشار شکن.

Table 1- Changes in Tank Outflow Rate Due to Variations in the Pressure Setting of the Pressure-Reducing Valve.

شرح Description	حداکثر فشار بر اساس لاگر ۳ (متر) Maximum Pressure Logger 3 (m)	حداقل فشار بر اساس لاگر ۳ (متر) Minimum Pressure Logger 3 (m)	متوسط دبی (لیتر بر ثانیه) Average Flow Rate (L/s)	دبی حداقل (لیتر بر ثانیه) Minimum Flow Rate (L/s)	دبی حداکثر (لیتر بر ثانیه) Maximum Flow Rate (L/s)
متوسط دبی در فشار تنظیمی ۱/۱ بار Average flow at pressure setting 1.1 bar	25	19.5	27.65	19.5	35
متوسط دبی در فشار تنظیمی ۱/۵ بار Average flow at pressure setting 1.5 bar	28.7	22	30.57	22	38
متوسط دبی در فشار تنظیمی ۱/۹ بار Average flow at pressure setting 1.9 bar	32.5	-	33.11	25	41
متوسط دبی در فشار تنظیمی ۱ بار Average flow at pressure setting 1.0 bar	23.7	23.5	27.63	18.3	35
افزایش فشار و دبی در شبکه از در ۱/۵ بار نسبت به ۱/۱ بار Increase in pressure and flow at 1.5 bar compared to 1.1 bar	3.7	2.5	2.92	2.5	3
افزایش فشار و دبی در شبکه از در ۱/۹ بار نسبت به ۱/۱ بار Increase in pressure and flow at 1.9 bar compared to 1.1 bar	7.5	4	5.46	5.5	6

بررسی رابطه مصرف و فشار در شبکه توزیع آب

در شبکه‌های توزیع آب، رابطه‌ای مستقیم بین فشار و میزان مصرف (شامل مصرف واقعی و نشت) وجود دارد. با افزایش فشار در شبکه، معمولاً مصرف نیز افزایش می‌یابد. این موضوع در مدل‌سازی شبکه‌های آبرسانی، خصوصاً در نرم‌افزارهایی مانند WaterGEMS، از طریق تحلیل مصارف وابسته به فشار لحاظ می‌شود.

در تحلیل PDD، مصرف مشترکین تابعی از فشار است؛ به این معنا که اگر فشار در شبکه کمتر از حداقل مقدار مورد نیاز باشد، مصرف کاهش می‌یابد. ولی در صورتی که فشار از این حد عبور کند، مصرف به مقدار اسمی خود رسیده و افزایش بیشتری نخواهد یافت.

بر اساس نشریه شماره ۱۱۷، حداقل فشار مورد نیاز برای تأمین آب در طبقات مختلف ساختمان‌ها مشخص شده است. باتوجه به اینکه بیشتر ساختمان‌های زون یک طبس یک طبقه و تعداد اندکی دوطبقه هستند، فشار آستانه برای تحلیل PDD در این منطقه ۱۸ متر ستون آب در نظر گرفته شد.

تحلیل‌های انجام شده در مدل هیدرولیکی شبکه نشان می‌دهد که افزایش فشار در شبکه موجب افزایش قابل توجهی در میزان مصرف می‌شود. این اثر به‌ویژه در ساعات اوج مصرف محسوس‌تر است.

باتوجه به تغییرات فشار ناشی از تنظیم شیر فشارشکن در بازه مورد بررسی، مشخص گردید که افزایش فشار باعث افزایش تدریجی مصرف شده است. هرچند در ساعات کم مصرف این افزایش ناچیز و در حدود ۰/۲ لیتر بر ثانیه بوده، اما در ساعات اوج مصرف، افزایش فشار از حدود ۱ به ۲ بار موجب افزایش مصرف تا حدود ۱/۲ لیتر بر ثانیه شده است.

لازم به ذکر است که فشار تنظیمی شیر فشارشکن به‌طور مستقیم با فشار واقعی شبکه یکسان نیست، چرا که به دلیل اختلاف ارتفاع و توزیع مکانی، فشار متوسط در نقاط مختلف شبکه تقریباً ۱/۵ بار بیشتر از فشار تنظیمی شیر برآورد می‌شود. در مجموع، این تحلیل نشان می‌دهد که تأثیر فشار بر مصرف نه‌تنها وابسته به میزان افزایش فشار است، بلکه شدت این تأثیر نیز در ساعات مختلف شبانه‌روز متفاوت بوده و در زمان اوج مصرف به‌مراتب بیشتر احساس می‌شود.

در مدیریت هوشمند فشار، علاوه بر کاهش تلفات فیزیکی ناشی از فشار بالا که هزینه‌های نگهداری را افزایش می‌دهد، حفظ حداقل فشار لازم برای تأمین آب مشترکین ضروری است. فشار پایین می‌تواند منجر به کاهش مصرف وابسته به فشار اعتراضات مشترکین شود. در این مطالعه، با استناد به نشریه شماره ۱۱۷ شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، حداقل فشار ۱۸ متر ستون آب برای ساختمان‌های منطقه در نظر گرفته شد تا رضایت مشترکین حفظ شود. مدیریت هوشمند فشار با کاهش نوسانات، پوشش گره‌های با فشار مطلوب را افزایش می‌دهد و رضایت مشترکین را بهبود می‌بخشد. این رویکرد تعادلی بین کاهش نشت و تأمین تقاضا ایجاد می‌کند. این یافته‌ها با رویکردهای داده‌محور در کاهش آب بدون درآمد در تانزانیا (۱۶) و چالش‌های پایداری آب بدون درآمد (۱۷) همخوانی دارد، که مدل‌های هیدرولیکی را برای محاسبه تلفات فیزیکی پیشنهاد می‌کنند.

تعیین درصد تلفات ظاهری و توان فشار بر اساس آزمایش‌های میدانی آب بدون درآمد در شبکه‌های توزیع به دو گروه اصلی تقسیم می‌شود: الف) تلفات واقعی شامل نشت‌های ناشی از ترک، شکستگی لوله‌ها، نشت از اتصالات و سایر موارد مشابه که تابع فشار شبکه هستند.

ب) تلفات ظاهری شامل مصارفی است که بهای آن پرداخت نمی‌شود، مانند انشعابات غیرمجاز، خطای کنتورها یا ثبت داده‌ها. این نوع تلفات به فشار وابسته نیست و بیشتر به الگوی مصرف وابسته است.

در دوره چهارم سال ۱۴۰۰، مقدار آب بدون درآمد در زون یک طبس حدود ۱۲/۳۲ لیتر بر ثانیه برآورد شده است. جهت تعیین سهم هر یک از اجزای تلفات، تحلیل میدانی در چند مرحله انجام شد:

۱- فرض شد درصدی از این مقدار ناشی از تلفات ظاهری و باقی‌مانده مربوط به نشت (تلفات واقعی) باشد.

۲- در مدل، تلفات واقعی به‌صورت نشت با تعریف ضریب امیتر لحاظ شد.

۳- برای چهار حالت مختلف تنظیم فشار شیر فشارشکن، دبی خروجی مدل برای ضرایب توان مختلف محاسبه گردید.

۴- با مقایسه دبی‌های شبیه‌سازی شده با مقادیر واقعی، میانگین مربعات خطا برای هر ترکیب محاسبه شد.

۵- بر اساس کمینه‌سازی خطا، مقدار بهینه برای درصد تلفات ظاهری و توان فشار تعیین گردید.

نتایج نشان دادند که مقدار بهینه برای تلفات ظاهری حدود ۱۰٪ و توان فشار برابر با ۱/۳۲ است. با این حال، با توجه به خطاهای موجود در اندازه‌گیری‌ها و افقی بودن نمودارهای خطا در محدوده جواب بهینه، می‌توان گفت که:

تلفات ظاهری محتمل است در بازه ۰ تا ۲۵٪ قرار داشته باشد.

توان فشار واقعی شبکه بین ۱/۲ تا ۱/۵ در نوسان است.

این مقادیر با نتایج به‌دست‌آمده از روش FAVAD نیز همخوانی مناسبی دارند که نشان از اعتبار نتایج میدانی و دقت مدل‌سازی انجام شده دارد.

کالیبراسیون ضرایب امیتر در مدل شبکه

در فرآیند مدل‌سازی نشت در شبکه توزیع، نشت به‌صورت ضریب امیتر در گره‌های مدل اعمال می‌شود. با توجه به وابستگی نرخ نشت به فشار شبکه، مقدار نشت در ساعات مختلف شبانه‌روز متغیر بوده و بنابراین ضرایب امیتر باید به‌صورت مکانی و زمانی تنظیم شوند. این ضرایب تحت تأثیر عواملی همچون عمر و جنس لوله‌ها، کیفیت اجرایی، شرایط خاک، سطح فشار و میزان فعالیت‌های نشت‌یابی گذشته قرار دارند.

برای شبکه زون یک طبس، در راستای افزایش دقت مدل و بهره‌گیری از اطلاعات میدانی، دو ضریب امیتر جداگانه برای مناطق امیرالمؤمنین و مسکن مهر تعریف شد. تعیین این ضرایب بر اساس داده‌های حاصل از دبی‌سنجی‌های میدانی و فرایند کالیبراسیون مدل انجام گرفت.

دبی‌سنجی‌ها شامل اندازه‌گیری‌های مربوط به دبی ورودی از مخزن اصلی، خط لوله آبست با قطر ۱۵۰ میلی‌متر در ورودی جنوبی منطقه امیرالمؤمنین و خط لوله آبست ۲۰۰ میلی‌متر در شمال منطقه مسکن مهر است. دبی‌سنجی خط شمالی به‌صورت دستی در روزهای ۱۳ و ۱۴ مهرماه انجام شده است. بر اساس این داده‌ها، با تنظیم ضرایب امیتر در نواحی مذکور، مدل کالیبره شده و قابلیت شبیه‌سازی دقیق‌تری از وضعیت واقعی شبکه به دست آمد.

بررسی داده‌های دبی‌سنجی شبکه نشان می‌دهد که نسبت دبی حداقل مصرفی به دبی کل شبکه در مناطق مختلف، متفاوت است. از آنجاکه دبی خروجی از مخزن تحت تأثیر توأمان مصارف واقعی و نشت شبکه است، تغییرات الگوی مصرف در ساعات مختلف شبانه‌روز موجب تغییر فشار در شبکه شده و به تبع آن، نرخ نشت نیز تغییر می‌کند.

تحلیل این نسبت‌ها به درک بهتر ماهیت غالب (مصرف یا نشت) در هر ناحیه کمک می‌کند. به‌طور کلی، بزرگ‌بودن این نسبت نشان‌دهنده سهم بالای مصرف و کوچک بودن آن حاکی از سهم بالای نشت در دبی خروجی شبکه است.

در راستای کالیبراسیون مدل و انطباق آن با داده‌های میدانی، مقدار مصرف و نشت در هر ناحیه محاسبه شد. ابتدا با بهره‌گیری از اطلاعات ثبت‌شده مشترکین، مقدار تقریبی مصرف در هر ناحیه استخراج گردید. سپس با در نظر گرفتن مقدار توان فشار مشخص شده در مراحل پیشین، ضریب نشت هر ناحیه به نحوی تنظیم شد که نسبت دبی حداقل به حداکثر در مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده هم‌خوانی داشته باشد.

نتایج این تحلیل منجر به تعیین ضرایب امیتر برای مناطق مختلف شبکه شد که به شرح زیر است:

ضریب امیتر در منطقه امیرالمؤمنین برابر ۰/۰۰۲

ضریب امیتر در منطقه مسکن مهر برابر ۰/۰۰۰۶۵۳

ضریب امیتر محاسبه شده در محدوده مقادیر گزارش شده در مطالعات مشابه (۰/۰۰۰۱ تا ۰/۰۰۱) قرار دارد که بسته به فشار متوسط و نوع شبکه متفاوت است.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، با هدف ارزیابی دقیق میزان آب بدون درآمد (NRW) و تفکیک مؤلفه‌های آن، مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب زون یک شهر طبس گلشن با استفاده از نرم‌افزار WaterGEMS انجام شد. فرآیند مدل‌سازی شامل مراحل پیش‌پردازش داده‌های مکانی و مصرف مشترکین، ساخت مدل عددی، کالیبراسیون دوگانه فشار و دبی، و تحلیل رابطه نشت-فشار با رویکرد FAVAD بوده است. داده‌های میدانی شامل دبی خروجی مخزن، فشار لاگرها، و داده‌های فلومتر در مهر و آب‌ان ۱۴۰۰ به‌عنوان مبنای کالیبراسیون مدل مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که میانگین آب بدون درآمد در منطقه مورد مطالعه حدود ۳۷/۵ درصد از آب ورودی به شبکه است که از این مقدار، بیش از ۹۰ درصد مربوط به تلفات واقعی (نشت) و مابقی مربوط به تلفات ظاهری (خطاهای کنتور، ثبت‌نشده‌ها) می‌باشد. این میزان آب بدون درآمد با مطالعه انجام‌شده در شهر کازرون ایران (۳۸/۵۶ درصد) مشابه است، اما بالاتر از متوسط کشوری ایران (۲۶ درصد) می‌باشد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک خارجی، مقادیری مانند ۵۰ درصد در اردن، ۴۸ درصد در لبنان و ۶۰ درصد در عراق گزارش شده که نشان‌دهنده چالش‌های مشابه در چنین اقلیم‌هایی است. همچنین، بررسی وابستگی نشت به فشار نشان داد که توان فشار حدود ۱/۵ برآورد می‌شود که با توجه به نوع شکستگی‌ها (ترک‌های طولی و جداشدگی‌ها) منطقی است. توان فشار برآوردشده با مطالعات دیگر مانند مدل‌سازی هیدرولیکی در سیستم‌های توزیع آب (۱/۳۸) همخوانی دارد. اختلاف میانگین فشار مدل و داده‌های لاگرها کمتر از ۱ متر برآورد شد که نشان‌دهنده دقت نسبتاً خوب مدل در بازنمایی رفتار شبکه است. علاوه بر این، مدیریت فشار با در نظر گرفتن حداقل فشار لازم برای جلوگیری از اعتراضات مشترکین ناشی از کمبود فشار، می‌تواند به پایداری شبکه و رضایت مصرف‌کنندگان کمک کند.

از دیگر نتایج مهم می‌توان به تأثیر قابل توجه فشار شیر فشارشکن بر میزان نشت اشاره کرد؛ به‌طوری‌که تغییرات اندک در تنظیم فشار می‌تواند منجر به افزایش چشمگیر در دبی نشت شود. دبی نشت ۱۶ تا ۲۲ لیتر بر ثانیه با مطالعات زیмбаوه ۳۵ درصد آب بدون درآمد با سهم عمده نشت قابل مقایسه است که در آن تلفات واقعی بیش از ۹۰ درصد آب بدون درآمد را تشکیل می‌دهد. این نکته اهمیت به‌کارگیری مدیریت فشار فعال در شبکه را به‌ویژه در مناطق خشک و کم‌آب مانند طبس نشان می‌دهد.

مطالعه حاضر با وجود ارائه نتایج قابل قبول، با چندین محدودیت مواجه بوده است که ممکن است بر دقت نهایی مدل تأثیر گذاشته باشد:

- محدودیت داده‌های میدانی: بخش عمده‌ای از داده‌های مورد استفاده مربوط به مرداد و شهریور سال ۱۳۹۸ بوده که باتوجه‌به تغییرات جمعیتی، مصرف، و شرایط شبکه در سال‌های بعد، ممکن است بازتاب دقیق از وضعیت فعلی شبکه ارائه ندهد.

- کمبود تجهیزات اندازه‌گیری: به دلیل محدودیت در تعداد لاگرهای فشار، فلومترهای نصب‌شده، و فشارسنج‌های دستی، امکان کالیبراسیون گسترده و سراسری در کل شبکه فراهم نبوده است. تنها دو لاگر و یک فلومتر خودکار در مناطق محدود نصب شده بودند.

- فقدان داده‌های هم‌زمان: برخی داده‌ها مانند داده‌های مصرف مشترکین، فشار، و دبی مخزن به‌طور هم‌زمان برداشت نشده‌اند که این موضوع تطبیق دقیق بین داده‌های واقعی و مدل را دشوار می‌سازد.

- فرض‌های ساده‌ساز مدل: استفاده از یک الگوی مصرف یکنواخت، اعمال ضرایب نشت و زبری به‌صورت همگن در کل شبکه و بی‌توجهی به احتمال وجود خطاهای ثبت‌کننده و نشت پنهان، ممکن است موجب کاهش دقت نتایج گردد.

پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده شامل موارد زیر است:

- برداشت داده‌های فشار و دبی در فصول مختلف سال و در چندین نقطه از شبکه با ابزار دقیق‌تر برای بهبود میکرو کالیبراسیون مدل که می‌تواند منجر به کاهش ۱۵-۲۵ درصدی تلفات واقعی از طریق پایش مستمر و تشخیص زودهنگام نشت شود.

- بررسی عملکرد شیرهای فشارشکن در بازه‌های زمانی مختلف و تأثیر آن بر نوسانات فشار و نشت می‌تواند نشت را تا ۲۰-۳۰ درصد کاهش دهد.

- استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تخمین مصرف مشترکین با داده‌های ناقص که پتانسیل کاهش ۲۰ درصدی NRW را دارد.

- توسعه مدل به سایر مناطق طبس و ایجاد شبکه‌های DMA جهت پایش مستمر تلفات نیز می‌تواند به کاهش تلفات تا ۱۵-۲۰ درصد کمک کند.

- افزودن سنسورهای هوشمند (IoT) برای ثبت هم‌زمان و پیوسته داده‌ها در شبکه توزیع که می‌تواند منجر به کاهش ۱۵-۲۵ درصدی تلفات شود. استفاده از مدل‌های محاسباتی مبتنی بر IoT برای آب بدون درآمد فیزیکی (۱۸) می‌تواند دقت تخمین‌ها را افزایش دهد.

تقدیر و تشکر

از مدیران و کارشناسان محترم شرکت آب‌وفاضلاب استان خراسان جنوبی که در اجرای این پژوهش همکاری کردند، تقدیر و تشکر می‌شود.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

داده‌های این مقاله مرتبط با پروژه تحقیقاتی با عنوان مطالعات تهیه مدل هیدرولیکی و ارزیابی آب بدون درآمد در قسمتی از شبکه توزیع آب شهر طبس گلشن می‌باشد. دسترسی به داده‌ها و اطلاعات صرفاً برای داوران/دبیر تخصصی/سر دبیر نشریه و بنابر درخواست ایشان میسر خواهد بود.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این متن به شکل ذیل است:

نویسنده اول: طرح تحقیق و روش‌شناسی، تهیه و آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات، بازبینی مقاله.

نویسنده دوم: تهیه پیش نویس مقاله، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله، مشارکت در آنالیزها.

اصول اخلاقی

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

حمایت مالی

این مقاله از حمایت مستقیم مالی برخوردار نبوده است.

منابع مورد استفاده

1. Sabet, M., Nasirian, A., Mohtasham, M., & Ahrari, M. (2020). Determination of value and location of the leakage in water distribution networks using calibration (Case Study: The water distribution network of Golbahar, Khorasan Razavi). *Journal of Water and Wastewater*, 30(6), 119-125. *Tehran: Water and Wastewater Consulting Engineers*. (in Persian)
2. AL- Washali, T. M., Elkhider, M. E., Sharma, S. K., & Kennedy, M. D. (2020). A review of nonrevenue water assessment software tools. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 7(2), e1413. <https://doi.org/10.1002/wat2.1413>
3. Farouk, A. M., Rahman, R. A., & Romali, N. S. (2023). Non-revenue water reduction strategies: a systematic review. *Smart and Sustainable Built Environment*, 12(1), 181-199. <https://doi.org/10.1108/SASBE-07-2022-0190>
4. Zanfei, A., Menapace, A., Santopietro, S., & Righetti, M. (2020). Calibration procedure for water distribution systems: Comparison among hydraulic models. *Water*, 12:5, 1421. <https://doi.org/10.3390/w12051421>
5. Ayad, A., Khalifa, A., Fawy, M. E., & Moawad, A. (2021). An integrated approach for non-revenue water reduction in water distribution networks based on field activities, optimisation, and GIS applications. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(4), 3509-3520. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.03.012>
6. Alsaydalani, M. O. (2024). Hydraulic modelling for leakage reduction in water distribution systems through pressure control. *Open Civil Engineering Journal*, 18(1), 1874-1945. <https://doi.org/10.2174/18741495024180101874>
7. Tabesh, M., Asadiyani Yekta, A. H., & Burrows, R. (2009). An integrated model to evaluate losses in water distribution systems. *Water Resources Management*, 23(1), 477-492. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9284-2>

8. Yu, J., Zhang, L., Chen, J., Xiao, Y., Hou, D., Huang, P., Zhang, G., & Zhang, H. (2021). An integrated bottom-up approach for leak detection in water distribution networks based on assessing parameters of water balance model. *Water*, 13(6), 867. <https://doi.org/10.3390/w13060867>
9. Mlewa, M. K., Tole, K., & Mvuya, M. (2025). Optimizing Non-Revenue Water Management: A Review. *Multidisciplinary Journal of Technical University of Mombasa*, 4(1), 37-49.
10. Ausina, J. F. P., & Francesc, J. (2025). NRW-Smart: a simulation-based tool for the management of Non-Revenue Water in urban and rural water supply systems using mathematical models. *Conference Proceedings/Working Paper*.
11. Olmüştür, M. M., & Uysal, F. (2025). Investigation of water losses with real-time pressure management as a case study in Sakarya. *Scientific Reports*, 15(1), 26505. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12281-3>
12. Abdollahi, H., Mamizadeh, J., & Rezaei, R. (2021). Hydraulic evaluation of water distribution network of Salehabad city in order to detect network leakage and reduce water loss. *Journal of Water and Irrigation Management*, 11(2), 301-314. <https://doi.org/10.22059/jwim.2021.325127.879>. (In Persian)
13. Miserjani, P., Sayari, N., & Sayari, S. (2021). Leak Modeling in Water Supply Networks Using WaterGEMS Model and Artificial Neural Network. *Journal of Water and Sustainable Development*, 8(2), 81-90. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v8i2.1010>. (In Persian)
14. Dini, M., Mohammadi-Kaleibar, A., Nourani, V., & Hashemi, S. (2023). Probabilistic Zoning of Hydraulic Performance of Water Distribution Network by Applying Key Parameter Uncertainty. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 53(111), 50-60. <https://doi.org/10.22034/jcee.2021.44669.2007>. (In Persian)
15. Asadiani Yekta, A. H., & Tabesh, M. (2010). A Combined Model To Calculate And Manage Of Leakage In Water Distribution Networks. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 44(1), 1-12. Tehran: University of Tehran Press. (In Persian)
16. Kwikima, M. M., Bennett, G., Ahmada, F. K., & Magina, A. (2025). Reducing non-revenue water in peri-urban Tanzania through an integrated data-driven approach: a pilot study in Dodoma. *International Journal of Energy and Water Resources*, 9(3), 1201-1219. <https://doi.org/10.1007/s42108-025-00234-7>
17. Espinoza, G., & Huacho, J. (2025). The Challenge of Non-revenue Water: A Soon-To-Be an Exhausted Resource. In *Equalizing the Three Pillars of Sustainability: Exploring Social Responsibility in Context* (pp. 71-91). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-XXXX-X_5
18. Ribeiro, A. C. F., & Haghi, A. K. (2024). Computational Models for Physical Non-revenue Water (NRW) Through Internet of Things (IoT). In *Smart Water Resource Management: A Practical Introduction* (pp. 17-27). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-XXXX-X_2

Hydraulic Modeling and Non-Revenue Water Assessment in the Tabas Golshan Water Distribution Network

*Ali Nasirian¹, Mahsa Mardani².

¹ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, a.nasirian@birjand.ac.ir, ORCID: 0000-0002-1813-0677

² PhD Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, mahsa.mardani@birjand.ac.ir, ORCID: 0009-0008-0440-3583

Abstract

Background and objectives: Non-revenue water (NRW), comprising real losses (physical leakages from pipes and fittings) and apparent losses (unrecorded consumption due to meter errors, unauthorized connections, or data recording inaccuracies), represents a major challenge for urban water distribution networks in arid and semi-arid regions like Iran. This phenomenon reduces the economic and operational efficiency of water supply systems and increases operational costs. In Tabas, a city in South Khorasan Province characterized by a hot, dry climate and limited water resources, effective water management is critical. Zone 1 of the Tabas Golshan water distribution network was selected for study due to its size and significance. This research aims to develop a hydraulic model of the Zone 1 network, perform precise calibration using field data, accurately estimate NRW, and differentiate between real and apparent losses. The study's innovation lies in integrating water balance methods, minimum night flow analysis, and the FAVAD approach to precisely estimate leakages and propose practical solutions for loss reduction in arid regions. This research aligns with the objectives of the Journal of Water and Soil Conservation Research by contributing to sustainable water resource management, reducing water wastage, and enhancing the efficiency of water distribution networks in water-scarce environments. Additionally, it provides a scientific approach to water management in regions with aging infrastructure or limited monitoring, serving as a model for similar areas in Iran and globally.

Materials and methods: The study was conducted in Zone 1 of the Tabas Golshan water distribution network, located in South Khorasan Province, Iran, a region facing significant challenges in potable water supply due to its hot, arid climate. A hydraulic model was developed using WaterGEMS software, based on updated AutoCAD and GIS maps containing detailed information on pipes, valves, reservoirs, and network nodes. Consumption data from 2,640 subscribers during the fourth and fifth periods of 2021 (October and November) were collected, including hourly consumption rates, usage types (residential, commercial, green spaces, etc.), and geographic coordinates. These data were used to determine consumption patterns and allocate demand to model nodes. Field data included tank outflow rates from a telemetry system, hourly pressure measurements from two automatic loggers in the Amiralmomenin and Maskan-e-Mehr areas, flowmeter data from a transmission line, and manual pressure and flow measurements at various network points. Model calibration was performed at two levels: macro (matching tank outflow) and micro (matching node pressures). Macro-calibration involved comparing tank outflow with telemetry data, while micro-calibration aligned simulated pressures with logger measurements. Minimum night flow analysis (1–5 a.m.) was employed to estimate leakage rates and distinguish real from apparent losses. Emitter coefficients and pressure exponents (assumed as 1.5 for longitudinal cracks) were calculated using the FAVAD method, as

* Coressponding author

outlined in Publication 556 of the Iran Water and Wastewater Company. Pipe roughness coefficients were determined based on material (PE, GRP, asbestos) and pipe age, and adjusted during calibration. A field experiment on December 6–7, 2021, increased the pressure-regulating valve setting from 1.1 to 1.9 bar and then reduced it to 1.0 bar to assess the pressure-flow relationship, aiding in the analysis of pressure impacts on leakage and consumption.

Results: The modeling results indicated that NRW in Zone 1 of Tabas accounts for approximately 37.5% of the input water, with over 90% attributed to physical leakages (real losses) and the remainder to apparent losses (meter errors and unregistered consumption). The calibrated hydraulic model showed good agreement with field data from October and November 2021. The pressure difference between the model and logger data from 1 p.m. to 7 p.m. was approximately 1 meter, likely due to assumptions of uniform consumption patterns, homogeneous leakage distribution, or calibration errors in pipe roughness coefficients. Minimum night flow analysis revealed that leakage flow during low-consumption hours ranged from 0.016 to 0.022 m³/s (16–22 L/s). Emitter coefficients for the Amiralmomenin and Maskan-e-Mehr areas were calculated as 0.002 and 0.000653, respectively, indicating variations in leakage intensity across these regions. The field experiment increasing pressure from 1.1 to 1.9 bar showed that flow rates increased by up to 0.0012 m³/s (1.2 L/s) during peak consumption hours, while the increase was approximately 0.0002 m³/s (0.2 L/s) during low-consumption hours. The pressure exponent ranged from 1.32 to 1.5, consistent with the predominant types of pipe failures (longitudinal cracks and joint separations). Telemetry data indicated tank outflow rates of 0.062 m³/s (62 L/s) in July and 0.042 m³/s (42 L/s) in November, influenced by climatic conditions (summer heat and water cooler usage) and pressure-regulating valve settings. Subscriber consumption analysis showed average consumption rates of 0.0168 m³/s (16.8 L/s) in the fourth period and 0.01307 m³/s (13.07 L/s) in the fifth period, with the reduction likely due to seasonal variations. Residential usage accounted for over 90% of total consumption. Additionally, an annual consumption increase of 0.00115 m³/s (1.15 L/s) and an additional per-subscriber consumption of 24.9 liters per year highlighted growing water demand in the region.

Conclusion: This study, utilizing hydraulic modeling in WaterGEMS and precise calibration with field data, provided an effective tool for analyzing NRW in the Zone 1 Tabas water distribution network. The 37.5% NRW rate, predominantly from physical leakages (over 90%), underscores the urgent need for active pressure management and leakage detection strategies. The study's innovation lies in employing the FAVAD method, minimum night flow analysis, and region-specific emitter coefficients, which are applicable to similar arid regions. Precise adjustment of pressure-regulating valves can significantly reduce leakage, particularly during peak consumption hours when pressure increases have a greater impact. Limitations, such as outdated data, limited measurement equipment (only two pressure loggers and one flowmeter), and simplifying assumptions (e.g., uniform consumption patterns), affected result accuracy. Recommendations include collecting pressure and flow data across seasons using more precise tools (e.g., smart sensors), which can lead to a 15-25% reduction in real losses through continuous monitoring and early leak detection. Continuously monitoring pressure-regulating valves, which, based on similar studies, can reduce leakage by 20-30%. Applying machine learning algorithms for more accurate consumption and leakage estimation, with potential for 20% NRW reduction. Developing District Metered Areas (DMAs) and installing continuous monitoring equipment could further reduce losses by 15-20%. These findings are valuable for improving the efficiency of water distribution networks in arid regions and align with the Journal of Water and Soil Conservation Research goals of promoting water conservation and sustainable management. The results can guide long-term planning and implementation of loss reduction measures in other arid cities in Iran and similar regions worldwide.

Keywords: Hydraulic modeling, calibration, emitter coefficient, pressure exponent, leakage detection

